

# 水泥行业功能拓展环境影响评价方法研究

石喜军

2014年12月

中图分类号:

UDC 分类号:

## 水泥行业功能拓展环境影响评价方法研究

作者姓名	石喜军
学院名称	管理与经济学院
指导教师	张强教授
答辩委员会主席	韩伯棠教授
申请学位	管理学博士
学科专业	管理科学与工程
学位授予单位	北京理工大学
论文答辩日期	2014年12月23日

# **The Study of Environmental Impact Assessment in Cement Industry Function Expansion**

Candidate Name: Xijun Shi

School or Department: Management & Economics

Faculty Mentor: Prof. Qiang Zhang

Chair, Thesis Committee: Prof. Botang Han

Degree Applied: Doctor of Management

Major: Management Science & Engineering

Degree by: Beijing Institute of Technology

The Date of Defence: December 23th, 2012

## 研究成果声明

本人郑重声明：所提交的学位论文是我本人在指导教师的指导下进行的研究工作获得的研究成果。尽我所知，文中除特别标注和致谢的地方外，学位论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得北京理工大学或其它教育机构的学位或证书所使用过的材料。与我一同工作的合作者对此研究工作所做的任何贡献均已在学位论文中作了明确的说明并表示了谢意。

特此申明。

签 名：                      日期：

## 摘要

当前,我国水泥行业中高耗能、高排放的传统作业方式依旧占有不小比重,所产生的环境问题日益突出。由于水泥窑具有高温、高压、大容量和全封闭等特点,很适合处置城市污泥、城市垃圾、污染土及其它产业废弃物等,因此国家和各地方政府在相关规划中多次强调水泥行业的功能拓展作用。目前,一些水泥企业已经在水泥窑协同处置城市污泥等方面进行了尝试,并收到了良好效果。本文主要采用生命周期评价理论和模糊层次分析法对水泥行业功能拓展进行研究,主要研究工作如下:

(1) 对指标值是模糊数的模糊层次分析法进行了研究,其中判断矩阵采用权重分配的方式来确定。首先,作者对模糊集及模糊层次分析法中的有关定义和定理进行了简单介绍。其次,为了解决模糊数加和减、乘和除不再是一对逆运算的问题,并使得运算法则更加符合客观实际情况,而引入了经典数学中自变量、因变量、代表系统和自由度等概念,继而定义了模糊集理论中自变模糊数、因变模糊数、代表系统和自由度等概念,并据此对模糊数互补判断矩阵的乘性一致性进行了研究,结果发现若一个模糊数互补判断矩阵满足一些文献对其乘性一致性的定义则个矩阵一定是精确数互补判断矩阵这一不合理之处,进而作者结合模糊集截集理论,利用判断矩阵元素间的关系,重新对乘性一致性模糊数互补判断矩阵进行了定义。再次,文章给出了模糊数互补判断矩阵和模糊数互反判断矩阵间的相互转换数学表达式,并证明了通过此数学表达式相互转换后的矩阵与原矩阵保持着相同的一致性。最后,作者结合传统层次分析法中关于正互反判断矩阵的权重求解过程和模糊集截集理论,给出了基于模糊数互补判断矩阵的模糊权重求解算法,继而给出了模糊层次分析法的模糊权重和环境影响综合评价求解算法。

(2) 对我国水泥行业发展现状进行了分析。首先,作者根据我国水泥行业的发展轨迹,将水泥行业发展历史划分为诞生阶段、衰落停滞阶段、自行研制阶段、发展阶段和产能结构调整蓬勃发展阶段五个阶段。其次,分析了我国水泥行业的发展现状,指出经过几十年的发展,我国水泥行业产能持续增长、结构持续优化、集中度持续提高、节能减排持续改善、技术装备水平持续进步。再次,指出了我国水泥行业在发展过程中存在的问题,其综合表现为水泥行业产能严重过剩、生产技术水平低下、水泥生产集中度低等。最后,对我国水泥行业未来发展趋势进行了研判,未来一段时间我

国水泥行业应以解决过剩产能为中心，以产业结构调整为重点，加大对水泥行业技术创新的投资力度，提高优质水泥生产比重，并重点发展绿色水泥工业。

(3) 对水泥行业处置城市污泥和城市垃圾的功能拓展进行了研究。水泥行业的功能拓展是指水泥企业在进行正常水泥生产活动的同时，还要利用水泥窑具有的高温、高压、大容量和全封闭等特点协同处置城市污泥、城市垃圾、污染土及其它产业废弃物。水泥行业功能拓展过程中对环境造成怎样的影响是一个很重要的问题，因为这直接影响着行业发展的可持续性。作者运用生命周期评价理论和模糊层次分析法，对城市污泥和城市垃圾的水泥窑协同处置与传统处置方式在环境影响上进行了对比研究，其中目前城市污泥的主流处置方式有五种：其中两种为水泥窑协同处置，即城市污泥脱水后外运水泥厂处置和石灰石稳定后外运水泥厂处置，另外三种为传统的处置方式，即城市污泥干化后填埋处置、焚烧后填埋处置和脱水后堆肥处置；而目前城市垃圾的主流处置方式也有五种：其中三种为水泥窑协同处置，即城市垃圾焚烧后水泥窑处置、直接水泥窑处置和水泥窑综合处置，另外两种为传统的处置方式，即城市垃圾卫生填埋处置和焚烧后填埋处置。

(4) 对水泥行业功能拓展与措施进行了分析。目前国内水泥行业功能拓展实践主要集中在利用水泥窑协同处置城市污泥、城市垃圾、工业废弃物和污染土上，因此作者将研究重点放在了水泥行业在这几个方面的功能拓展上。另外，水泥行业要想功能拓展成功，需要有一定的保障措施。从内部环境看，企业需要做好以下五点：一要转变管理方式；二要优化能源结构；三要完善环保措施；四要突破关键技术；五要替换矿产资源。从外部环境看，政府需要制定五大政策：一要统筹规划布局，开展试点示范；二要完善税收优惠及改造补贴政策；三要出台国家标准、规范；四要加大全过程监督管理力度；五要加强宣传推广。

**关键词：**生命周期评价理论；模糊层次分析法，水泥，功能拓展，环境影响

## Abstract

Nowadays, the traditional work mode with the high energy consumption and the high emission still occupy a large proportion in cement industry in China, thus the environment problem caused by traditional ways is increasingly prominent. Because the cement kiln has the characteristic of high temperature, high pressure, large capacity and whole sealing, etc, it is suitable to dispose municipal sludge, urban waste, contaminated soil, other industrial waste and so on. So the state and local governments emphasized numerous times the function of transformation for cement enterprises in related programs. In present, some cement enterprises have already begun to try cement rotary kiln co-processing which achieved a good effect. In this paper, it studied the function of transformation for cement enterprises by using life cycle assessment and fuzzy analytic hierarchy process theory. Followings are the main researches:

(1) Study on the fuzzy analytic hierarchy process which index values are fuzzy numbers, and which judgment matrix is established by using weight distribution. First of all, the author gives a brief introduction on the definitions and theorems of fuzzy sets and fuzzy analytic hierarchy process. Secondly, to solve the problem that the relationship between addition and subtraction and that between multiplication and division in fuzzy numbers is no longer the inverse operation and make the operational laws more correspond to reality, the author studies the multiplicative consistency of fuzzy reciprocal judgment matrix by introducing the concepts of independent variable, dependent variable, representative system and degree of freedom in classical mathematics. Then, the result reveals that it is unreasonable that if a fuzzy reciprocal judgment matrix satisfies the conditions of multiplicative consistency defined in some existing related literatures, then this matrix must be a precise reciprocal judgment matrix. Finally, based on the fuzzy cut set theory, using the relationships among elements of fuzzy reciprocal judgment matrix, the multiplicative consistency of fuzzy reciprocal judgment matrix is redefined. Thirdly, the author gives the convert mathematical expression between fuzzy number complementary judgment matrix and fuzzy reciprocal judgment matrix, and proved the consistency unchanged of judgment matrix before and after conversion. Finally, the author combines the solving process of positive reciprocal judgment matrix of analytic hierarchy process, and gives the solving algorithm of fuzzy number complementary judgment matrix, then the author gives the

algorithm of fuzzy analytic hierarchy process and comprehensive evaluation of environmental impact.

(1) Study on the current situation of the cement industry development in China. First of all, according to the development path of China's cement industry, the author divides the history of cement industry development into five stages: the birth stage, the stagnation and decline stage, the research stage, the development stage and the flourish of capacity structure stage. Secondly, the author analyzed the current situation of the cement industry development in China. For decades, the cement industry in China has developed to the sustainable growth of capacity, the sustainable optimization of structure, the sustainable growth of concentration, the sustainable improvement of energy saving and emission reduction, and the sustainable progress of technical equipment level. Thirdly, during the development of cement industry in China, the author pointed out some problems which are excess capacity, low level of production technical, low concentration of cement production, etc. At last, the author analyzed the trend of future development for cement industry in China. The key jobs of cement industry in our country are solving the excess capacity and adjusting industrial structure for a period of time in the future. At the same time, the government should increase investment on the technology innovation, increase the proportion of high quality cement productions, and focus on developing green cement industry.

(2) Study on the function transformation of cement enterprises which aim to dispose urban waste and municipal sludge. The function transformation means, at the same time of normal cement production, dispose municipal sludge, urban waste, contaminated soil, and other industrial waste by cement rotary kiln co-processing which using the characteristics of high temperature, high pressure, large capacity and fully enclosed in cement kiln. It is a significant problem that what is the influence on the environment during the process of function transformation, which directly affects the sustainable development of cement industry. Authors using the life cycle assessment theory, comparative study the environmental impact of cement kiln co-processing and disposition of traditional of urban waste and sludge. There are five sewage sludge disposal. Two of those for cement kiln co-processing, namely transporting cement plant after dehydration or lime stabilization. The other three are traditional disposal methods, namely desiccation landfill, incineration landfill and dehydrated compost. City garbage disposal also has five. Two of those for cement kiln co-processing, namely cement kilns disposal after incineration, direct disposal

of cement kiln and cement kilns consolidated disposal. The other two are traditional disposal methods, namely Sanitary landfill and Incineration Landfill.

(3) Study on the expansion and measures for Cement business. At the present time, domestic cement companies focused on the use of cement kiln co-processing of municipal sewage sludge , municipal waste , industrial waste and contaminated soil in function transformation practice, so in this paper, the expansion in these areas are focused on to expand. In addition, if the cement companies want to make the transition successfully, some safeguards are needed. From the internal environment, companies need to complete the six major changes: First, the management way should be changed from extensive to intensive; second, the energy structure should be changed from a one-time shift to alternative fossil fuel energy; third, in terms of quality varieties should be diversified from a single ecological transition; fourth is in production equipment, to make a transition from the large-scale to energy conservation; fifth is on the environmental protection, it should be changed from high-carbon economy to a low carbon economy; sixth is the raw material resources, changing from high -grade to low-grade . From the external environment, the government needs to develop the following five policies. First of all, it is necessary to implement a carbon trading mechanism, forcing cement companies function transformation ;second is to improve the tax incentives and renovation subsidies, to incentive cement companies function transformation ; third, the introduction of national standards and norms to guide the transformation of cement enterprise functions ; fourth is to clear " who pollute, who bear the economic and legal responsibility" to force cement companies function transformation ; five is to carry cement kiln co-processing integrated demonstration projects , leading cement companies function transformation.

**Key Words:** Life Cycle Assessment Theory; fuzzy analytic hierarchy process; Cement; function expansion; environmental impact

## 目录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 选题背景及意义.....	1
1.2 研究现状分析.....	2
1.2.1 水泥行业功能拓展研究进展.....	2
1.2.2 生命周期评价理论在水泥行业中的应用研究进展.....	5
1.3 主要研究内容、结构和创新点.....	7
1.3.1 论文的主要研究内容.....	7
1.3.2 论文的结构和创新点.....	9
<b>第 2 章 我国水泥行业现状分析</b> .....	13
2.1 我国水泥行业发展历史.....	13
2.2 我国水泥行业的发展现状及问题.....	14
2.3 我国水泥行业的发展趋势.....	17
2.4 本章小结.....	19
<b>第 3 章 生命周期评价理论概述</b> .....	20
3.1 生命周期评价的起源与发展.....	20
3.2 生命周期评价的定义.....	21
3.3 生命周期评价的技术框架.....	22
3.3.1 目的与范围的确定.....	23
3.3.2 清单分析.....	24
3.3.3 影响评价.....	24
3.3.4 结果解释.....	32
3.4 生命周期评价理论的局限性.....	33
3.5 本章小结.....	33
<b>第 4 章 基于模糊层次分析法的环境综合评价研究</b> .....	34
4.1 预备知识.....	34

4.2 模糊数互补判断矩阵的乘性一致性.....	37
4.3 两类模糊数矩阵的相互转化关系.....	42
4.4 基于模糊数互补判断矩阵的模糊权重求解算法.....	43
4.5 模糊层次分析法权重求解算法及环境综合评价.....	45
4.6 本章小结.....	50
<b>第 5 章 水泥行业处置城市污泥的功能拓展研究.....</b>	<b>52</b>
5.1 研究范围与研究目的.....	52
5.2 城市污泥处置过程中的清单分析.....	53
5.2.1 脱水后外运水泥厂处置清单分析.....	53
5.2.2 石灰稳定后外运水泥厂处置清单分析.....	54
5.2.3 干化后外运填埋场处置清单分析.....	54
5.2.4 焚烧后外运填埋场处置清单分析.....	54
5.2.5 脱水后外运堆肥场处置清单分析.....	55
5.3 发电和运输过程中的清单分析.....	56
5.3.1 发电阶段的清单分析.....	56
5.3.2 运输清单.....	57
5.4 环境影响标准化.....	58
5.5 环境影响综合评价.....	60
5.6 结果解释.....	64
5.6.1 不同环境类型下的对比分析.....	64
5.6.2 综合对比分析.....	65
5.7 本章小结.....	66
<b>第 6 章 水泥行业处置城市垃圾的功能拓展研究.....</b>	<b>67</b>
6.1 研究范围与研究目的.....	67
6.2 清单分析.....	68
6.2.1 城市垃圾卫生填埋处置的清单分析.....	68
6.2.2 城市垃圾焚烧后填埋处置的基础清单分析.....	70

6.2.3 城市垃圾焚烧后水泥窑处置的基础清单分析.....	73
6.2.4 城市垃圾直接水泥窑处置的基础清单分析.....	75
6.2.5 城市垃圾水泥窑综合处置的基础清单分析.....	78
6.3 环境影响标准化.....	80
6.4 环境影响综合评价.....	81
6.5 结果解释.....	83
6.5.1 不同环境类型下的对比分析.....	83
6.5.2 综合对比分析.....	85
6.6 本章小结.....	86
<b>第 7 章 水泥行业功能拓展实证分析与措施保障.....</b>	<b>87</b>
7.1 水泥行业功能拓展实证分析.....	87
7.1.1 功能拓展一：协同处置城市污泥.....	87
7.1.2 功能拓展二：协同处置城市生活垃圾.....	89
7.1.3 功能拓展三：协同处置城市工业危险废弃物.....	90
7.1.4 功能拓展四：协同处置污染土.....	90
7.2 水泥行业功能拓展的措施保障.....	92
7.2.1 水泥企业自身措施保障.....	92
7.2.2 行业政策措施保障.....	93
7.3 本章小结.....	96
<b>结论与展望.....</b>	<b>97</b>
主要研究结论.....	97
研究展望.....	99
<b>附录 A 不同环境影响类型相对重要性调查问卷.....</b>	<b>107</b>
<b>附录 B 模糊层次分析法的 MATLAB 求解程序.....</b>	<b>109</b>
<b>攻读学位期间发表论文与研究成果清单.....</b>	<b>129</b>
<b>致谢.....</b>	<b>130</b>
<b>作者简介.....</b>	<b>131</b>

## 第 1 章 绪论

### 1.1 选题背景及意义

改革开放初期，为改变我国企业管理混乱、经济效益低下的局面，1981 年召开了五届人大四次会议，会议通过的政府工作报告首次提出了以提高经济效益为中心的发展国民经济的十条方针。改革开放后的近三十年，政府工作报告中多次强调要改变经济增长方式，保持经济平稳较快发展。多年来，我国经济发展一直以“快”为主，“快”在“好”之前，依据“又快又好”的要求，衡量我国经济发展的名义 GDP 已经从 1980 年的 4545.6 亿元增长到了 2006 年的 216314.4 亿元，26 年间增长了 40 多倍，年均增速达 16.71%。2007 年 11 月胡锦涛同志在中共十七大上首次提出要加快转变经济发展方式，促进国民经济又好又快发展。从“又快又好发展”调整为“又好又快发展”，把原来的“经济增长方式”改提为“经济发展方式”，由强调发展的速度到注重发展的效益和增长的质量，反映了中国经济发展理念的一大转变，成为今后引领中国经济发展的指导思想。2013 年 11 月 30 日，习近平在党外人士座谈会上指出：“经济增长必须是实实在在和没有水分的增长，是有效益、有质量、可持续的增长”，经济工作“要以提高经济增长质量和效益为中心”，“增强经济增长的内在活力和动力”，他强调，要以科学发展为主题，把推动发展的着力点转到质量和效益上来，下大力气推进绿色发展、循环发展、低碳发展。

近年来，党和政府开始关注和重视经济发展带来的环保问题，并把生态文明建设纳入到十七大报告之中，将中国特色社会主义事业总体布局由经济建设、政治建设、文化建设、社会建设“四位一体”拓展为包括生态文明建设的“五位一体”。之后的十八大报告再次论及“生态文明建设”，并将其提升到更高的战略层面，体现了尊重自然、顺应自然、保护自然的理念。但从最近几年来看，我国的环境现状不容乐观，粗放型经济发展方式并没有完全改变，高投入、高能耗、高污染、低效益即“三高一低”企业仍然大量存在，全国性的雾霾天气时有发生且呈现出愈演愈烈的趋势，工业废渣和城市垃圾的不合理堆放处置已经成为重要的污染源。以城市污泥和城市垃圾为例，据统计，2010 年全国城市污水处理厂产生的污泥（含水率 80%）高达 3000 万吨/年，而且每年还以 10%~15% 的速度增长；而我国是世界上城市垃圾包袱最沉重的国

家之一，国内约有 2/3 的城市陷入垃圾围城的困境，全国城市垃圾年产量已经超过 2.5 亿吨，占世界总量的四分之一以上，历年堆放总量高达 80 亿吨，且随着我国城镇化进程的加快和城市规模的不断扩大，城市垃圾的总量也在以每年约 10% 的速度增长。目前，我国的城市污泥和垃圾处置主要以填埋、堆肥和焚烧为主，但填埋存在占地面积大，使用时间短，造价高等缺点，并且填埋物成分比较复杂，其渗透液即使经过无害化处理也会存在少量有毒有害物质，容易对土壤和地下水造成二次污染；城市污泥和垃圾堆肥量大，养分含量低，长期使用容易造成土壤板结和地下水变质；而焚烧处置虽然部分解决了城市垃圾和污泥的占地问题，但是在焚烧过程中会释放出大量的有毒气体，如二恶英、汞蒸气等，并且产生炉渣和灰尘，对大气环境造成恶劣影响。

作为“三高一低”的水泥行业，其产能已严重过剩。根据数字水泥网的统计，2013 年全国水泥产量 24.14 亿吨，比 2012 年增长 9.57%，达到历史最高点，产能过剩约 8 亿吨，过剩比例将近三分之一。未来，单纯以生产水泥为主要业务的水泥企业的发展必将受到国家多项政策的严格限制，水泥行业功能拓展势在必行。由于城市污泥和垃圾焚烧灰与生产水泥的原料成分类似，而且水泥窑具有天然的高温环境，可以消灭二恶英并能中和酸性气体，加上我国水泥生产线遍布全国，各地可以因地制宜，充分利用当地资源，因此利用水泥窑处理城市污泥和城市垃圾等废弃物将是一个非常实用的课题。

本论文主要以生命周期评价理论和模糊层次分析法为工具，以城市污泥和城市垃圾的传统处置方式和水泥窑处置方式为研究对象，通过建立生命周期评价模型，对这几种不同的处置方式在温室效应、酸化效应、光化学效应、水体富营养化、人体健康危害和不可再生资源消耗等主要环境影响类型下进行对比分析。本文的研究可为水泥行业功能拓展提供科学依据与建议，因此具有一定的理论意义和实际应用价值。

## 1.2 研究现状分析

### 1.2.1 水泥行业功能拓展研究进展

20 世纪 50 年代，有些水泥企业就已经开始将废弃物纳入到水泥生产当中，当时这些废弃物主要包括化工行业的电石渣和磷石膏、电力行业的粉煤灰和脱硫石膏、冶金行业的尾矿和高炉渣等。目前，挪威甚至规定城市垃圾全部运用水泥窑协同处理方式消纳。就我国而言，据华新水泥有限公司预计，到 2017 年，水泥窑协同处置废弃物总量可达到 2000 万吨/年。利用水泥窑协同处置废弃物，既可以解决废弃物的处置

问题，废弃物燃烧后的燃烧灰可直接替代部分原料直接进行水泥生产，因此也节约了自然资源<sup>[1]</sup>。经过半个多世纪的发展，水泥行业已经开始处置工业矿渣、生活垃圾、城市污泥等多种废弃物，处置水平也在不断提高和进步。

### 1.2.1.1 国外研究进展

Kumar M S 等<sup>[2]</sup>对水泥窑协同处置城市垃圾和污泥进行了研究和分析，研究结果显示，城市垃圾和污泥经过水泥窑的高温焚烧处置能够起到减量化和资源化的作用，焚烧灰可替代部分原料来生产水泥，不需要再做填埋处置，采用水泥窑协同处置是一种两全其美的城市垃圾和污泥的处置方法。Martin 等<sup>[3]</sup>对水泥窑协同处置污水处理厂产生的污泥焚烧灰进行了研究，结果表明污泥焚烧灰掺加率在 20%-50%的试块其强度和抗压性均优于普通水泥试块。Asavapisit 等<sup>[4]</sup>在不同的污泥和粉煤灰替代量情形下，试验了利用水泥固化氰化锌电镀污泥的固化效果，结果表明，试块的抗压性能随着污泥掺量的增加明显下降，但使用粉煤灰部分的水泥试块抗压性能下降并不明显。Dewil 等<sup>[5]</sup>人指出，美国加利福尼亚某水泥企业以干化污泥替代部分燃料生产水泥，替代率为 12%~15%，美国采用焚烧方式处理污泥的污水处理厂近 200 座，占全美污泥处理总量的 20%，其中 6%的污泥采用水泥窑协同处置方式进行处置。Lin K L 等<sup>[6]</sup>对水泥窑协同处置焚烧垃圾灰进行了试验研究，结果显示，当焚烧灰掺量控制在 10%~20%时，水泥的强度与非掺加焚烧灰的普通水泥相比没有明显区别，TCPL 毒性浸出试验结果符合美国国家环保标准，但当焚烧灰掺量超过 20%时，水泥的凝固时间会有不同程度的延长。Navia 等<sup>[7]</sup>人对火山土替代原料生产水泥和传统水泥生产的成本进行了比较，结果表明火山土替代原料生产水泥可提高处置的经济效益。Kare Helge Karstensen 等<sup>[8]</sup>以对越南利用水泥窑焚烧处置农药进行了研究，结果表明，处置后的废弃物中的主要有毒有机物焚毁率达 99.99%以上，排放的二氧化硫、氮氧化物、粉尘和烟尘等污染物与未处置废弃物的普通水泥没有太大的区别，而且水泥窑协同处置农药对生产的水泥产品质量没有影响。Esawy Kasem Mahmoud 等<sup>[9]</sup>对水泥窑与碳过滤器协同处置纺织业废水里的 COD 和重金属进行了深入研究，研究结果表明这种协同处置方式对纺织业废水的脱色和重金属吸附效果非常明显。Juan 等<sup>[10]</sup>对水泥窑协同处置废纸浆进行了研究，研究结果表明，废纸浆在这种处置过程中会排放出少量的多环芳烃，但氯化物几乎不受影响，而且不会产生氯二苯和二恶英等严重危害人体健康的有毒有害气体。Hendrik 与 Amy 等<sup>[11,12]</sup>对美国 1950-2000 年间水泥行业的能源、资源以及污染物进行了统计分析，结果表明，水泥生产过程中的能源消耗较高，但低于

矿石开采及加工过程，不过其生产带来的环境问题不容忽视，尤其是温室气体排放问题，水泥生产企业可以通过消纳工业废弃物及副产品来减少单纯处理这些物质所带来的环境影响。Rehan 与 Nehdi<sup>[13]</sup>针对加拿大的水泥行业提出了温室气体与气候变化的应对政策，主要包括发放政府补贴、征收环保税、制定排放标准、设计绿色营销及环境标示等等。SHIH 等<sup>[14]</sup>对城市垃圾燃烧灰直接掺入工业生料以烧制水泥进行了研究，结果显示，水泥强度随燃烧灰掺量的增加呈直线下降趋势。

### 1.2.1.2 国内研究进展

孔祥娟等<sup>[15]</sup>对我国城市污泥处置面临的问题进行了分析，并全方位介绍了我国当前水泥窑协同处置城市污泥的现状、行业发展特征以及存在的问题，进而提出水泥窑协同处置城市污泥的政策需求。龚成晨等<sup>[16]</sup>对印染废水处理后的剩余污泥的水泥窑协同处置进行了可行性分析，结果表明，掺加一定量的印染废水污泥，有利于提高水泥生料的易烧性，得到的熟料的物相组成与非掺入熟料基本相同，污泥中的重金属元素绝大部分固化在水泥熟料中，其浸出毒性也远低于国家标准。刘素芹<sup>[17]</sup>等对水泥窑协同处置城市污泥的可行性进行了试生产研究，试生产结果表明，当城市污泥掺量比低于 2% 时，对水泥质量没有影响，从而得出水泥窑协同处置方式是“减量化、资源化、无害化”处置城市污泥的一条有效途径。史骏<sup>[18]</sup>以北京水泥厂污泥干化和水泥窑焚烧项目为例分析了水泥窑协同处置干化污泥系统中的关键问题，分析了水泥窑焚烧污泥的特点及优越性，介绍了北京市水泥厂污泥干化和水泥窑焚烧协同处置项目的工业设计、流程和工艺特点。马勇<sup>[19]</sup>等对污泥深度脱水和水泥窑协同处置技术进行了研究和分析。吕兴菊<sup>[20]</sup>分析了大理市城市生活垃圾的现状及存在问题，根据处理的资源化、无害化和低成本化等原则，对新兴干法水泥回转窑协同处置城市生活垃圾进行了探索性研究。赵洪等<sup>[21]</sup>从技术、应用、环保、经济等多个方面对传统的城市垃圾焚烧处置与水泥窑协同处置两种方式进行了对比分析，结果显示，与传统的生活垃圾焚烧相比，城市垃圾的水泥窑协同处置具有污染少、运行费用低、投资回报期短、推广应用价值高等优点。郑元格等<sup>[22]</sup>采用实验室模拟试验的方法，对应用水泥窑协同处置固体废弃物焚烧灰的无害化处理与资源化利用进行了可行性分析研究，结果表明，水泥窑协同处置技术不仅使固体废弃物焚烧灰达到了无害化处理的目的，其资源化利用前景也非常广阔。蔡玉良等<sup>[23,24]</sup>介绍了利用水泥窑协同处置城市生活垃圾的关键技术，对水泥窑协同处置城市垃圾的自然环境及水泥产品质量影响做了重点阐述和论证，以便为政府和企业提供数据资料，更快的促进此项技术的推广和应用。金宜英等<sup>[25]</sup>研究了焚烧

飞灰水洗后替代水泥原料煅烧熟料的可能性, 结果表明, 掺入较低替代率的焚烧飞灰经水泥窑协同处置后不会对熟料品质产生影响。谢燕<sup>[26]</sup>等在广州珠江水泥有限公司 5000t/d 新型干法线上开展了城市生活垃圾焚烧炉渣应用的试生产研究, 对生产工艺、水泥性能、有毒有害物质排放等方面进行了分析, 结果表明, 无论用于生料还是混合料, 炉渣对水泥生产工艺、性能及环境安全等影响都不大。陈晓东<sup>[27]</sup>等结合金隅集团水泥企业的实际情况和需求, 阐述了水泥窑大批量协同处置生活垃圾技术的可行性研究及成果。潘琦<sup>[28]</sup>等充分分析了水泥窑协同处理生活垃圾的技术特点、应用情况、优势以及制约因素, 提出了水泥窑协同处置生活垃圾应该注意的问题以及发展建议。蒋明麟<sup>[29]</sup>分析了我国水泥工业协同处置城市废弃物的现状, 提出了这一领域未来发展的政策建议。富丽<sup>[30]</sup>对比分析了国内外水泥窑协同处置城市废弃物的现状, 指出了我国在水泥窑协同处置城市废弃物方面与国外的差距。蔡木林<sup>[31]</sup>等对水泥窑协同处置 DDT 废弃物技术进行了试验研究, 结果表明, 当 DDT 废弃物投速率在每小时不超过一吨时, DDT 的焚烧去除率可达 99.9999962%, 烟气中二恶英的排放浓度远远低于国家规定的标准限值。查少翔<sup>[32]</sup>分析和研究了水泥窑协同处置生活垃圾项目实施过程中的环保问题, 提出了相应的环保对策。向丛阳等人<sup>[33, 34]</sup>对水泥窑协同处置危险废弃物生产水泥熟料的性能进行了研究, 给出了相关的意见和建议。许杭俊等<sup>[35]</sup>以城市垃圾焚烧灰为原料, 制备了以阿里尼特为主要矿物的生态水泥, 结果表明, 垃圾焚烧灰可以作为原料烧制成生态水泥熟料, 且制成的生态水泥具有很高的抗压强度。

## 1.2.2 生命周期评价理论在水泥行业中的应用研究进展

1969 年, 美国西部研究所针对可口可乐公司饮料瓶进行的评价研究, 标志着生命周期评价的开始<sup>[36]</sup>, 该研究从原材料的采掘到最终废弃物的处置进行了全过程的跟踪和定量分析, 涉及了玻璃、钢铁、铝、纸和塑料等多个工业部门, 研究报告于 1974 年发布, 在报告中提出了一系列早期的生命周期评价的研究框架。其后这一理论发展迅速, 一些国家的政府部门及国际性组织对生命周期评价的理论结构及框架进行了逐步完善<sup>[37-40]</sup>。

### 1.2.2.1 国外研究进展

Houillon 等<sup>[41]</sup>通过采用生命周期评价的方法, 对城市污泥的堆肥、焚烧、填埋、湿氧化分解、高温分解、水泥窑协同处置六种处置方式的环境影响潜质进行了对比分析研究, 结果表明, 城市污泥的水泥窑协同处置对环境的影响最小, 而填埋处置影响

最大。Karin Gabel<sup>[42]</sup>等运用生命周期模型模拟了可用于生产水泥的工艺方法，在保证水泥产品质量的前提下，设计了水泥窑协同处置工业副产品和特定城市废弃物的9个场景，并对这9种场景的环境影响进行了比较，模拟结果显示，在保证水泥熟料常规要求的前提下不但可以增加废弃物的使用量，而且在一定范围内污染物的排放量也有所减少。Boughton等<sup>[43]</sup>采用生命周期评价方法对切割厂切丝碎屑的填埋厂填埋、水解生产轻燃油、回收再利用以及水泥窑协同处置四种处理方式的环境影响潜质进行了对比分析，结果表明，水泥窑协同处置切丝碎屑的所有特征化结果都优于其他三种方式。Chena等<sup>[44]</sup>运用生命周期评价理论对整个传统水泥生产过程进行了评价研究，结果显示，水泥工业对环境造成的影响主要包括全球气候变暖、环境酸化效应和不可再生资源能源消耗。Deborah与Thomas<sup>[45]</sup>运用生命周期评价方法对传统生产、加入火山灰混合生产和加入水泥窑灰混合生产的三种硅酸盐水泥生产工艺进行了对比分析，结果表明，加入火山灰混合生产工艺的二氧化碳排放量相对最低。Shizukat等人<sup>[46]</sup>通过采用生命周期评价方法并结合案例分析的方式对日本Kawasaki地区以工业共生方式减少水泥企业二氧化碳排放问题进行了分析，指出使用可再利用材料可减少温室气体的排放量及自然资源的消耗量。

### 1.2.2.2 国内研究进展

姜德义<sup>[47]</sup>等运用生命周期评价理论对北京琉璃河水泥厂水泥生产过程中的资源、能源消耗及污染物排放数据进行了分析，对水泥生产的环境负荷进行了评价，结果显示，在水泥生产的不同阶段，对环境的影响有较大差异，其中熟料煅烧过程的环境负荷最大，其次为原材料开采和水泥粉磨阶段，而在环境的影响类型中，温室效应相对影响最重，其次是酸化效应。龚先政等<sup>[48]</sup>人利用生命周期评价方法对北京地区水泥生产过程中的环境负荷进行了分析，结果表明，水泥生产对环境影响最大的因素是能源消耗，其次为土地占用与破坏，标准化和归一化显示，北京地区水泥生态指数正不断上升，水泥生产对环境造成的负担进一步加剧。周奇等<sup>[49]</sup>人以生命周期评价方法为研究手段，对水泥窑协同处置废皮革和常规水泥生产进行了对比研究分析，结果表明，与传统水泥生产相比，以废皮革替代燃料生产水泥时，不但可以减少燃料的使用量，降低能源消耗，而且能够减少二氧化碳的排放，降低人体健康损害的环境压力。李璐等<sup>[50]</sup>以废弃农药为研究对象，应用生命周期评价理论对水泥窑协同处置及焚烧炉处置在人体健康、生态系统质量和资源三个角度的环境影响进行了对比分析，结果表明，水泥窑协同处置废弃农药对生态系统影响程度更低，资源能源消耗更少，人体健康危

害更小，因此这种处置方式更具有环境合理性。崔素平等<sup>[51]</sup>运用生命周期分析理论与技术对水泥材料及其生产过程开展了研究，解决了水泥生产过程中的资源能源综合利用与废弃物排放等环境影响的定量分析难题，建立了水泥生产的生命周期基础数据库，开发了相应的生态设计系统软件工具。刘娜等<sup>[52]</sup>人以低品质包装废弃物为研究对象，以生命周期评价方法为研究工具，对水泥窑协同处置及常规水泥生产的环境影响进行了对比分析，结果表明，与常规水泥生产相比，水泥窑协同处置低品质包装废弃物在人体健康损害、酸化和富营养化方面的环境影响潜质降低，而气候变化的影响潜质则变化不大。周奇等<sup>[53]</sup>以生命周期评价方法为研究手段对水泥窑协同处置危废农药技术进行了评价研究，并与危废农药的其他处置方式做了对比，对比结果表明，水泥窑协同处置危废农药的综合环境影响指数远低于危废农药的常规处理。董世根等<sup>[54]</sup>运用物料平衡理论和生命周期评价方法，对新型干法工艺生产水泥在原料开采、水泥生产、运输的直接环境影响和消耗电力、煤炭等间接环境影响进行了研究，结果显示，新兴干法工艺生产水泥对环境影响最大的是温室效应，其次为烟尘和粉尘的排放。姜瑞等人<sup>[55-59]</sup>按照生命周期评价理论方法框架，建立了水泥工业的生命周期评价模型，通过收集的水泥生产过程中各阶段的资源能源消耗和污染物排放等清单数据，对我国的水泥工业环境影响进行了评价。

## 1.3 主要研究内容、结构和创新点

### 1.3.1 论文的主要研究内容

本文是在水泥行业面临产能严重过剩、环保政策趋紧的背景之下，通过引入生命周期评价理论，并结合模糊层次分析法对水泥行业协同处置城市污泥和城市垃圾的环境影响进行分析，对水泥行业功能拓展及措施进行研究，概括起来，本文的主要内容如下：

第一部分，我国水泥行业现状分析

这一部分主要分析我国水泥行业的发展历史、现状及存在问题、发展趋势。自从1889年我国第一个水泥厂——河北唐山细绵土厂投产以来，我国的水泥行业已经经历了诞生、衰落停滞、自行研制、发展初期和产能结构调整蓬勃发展五个阶段。目前，我国水泥行业正处于产能结构调整蓬勃发展阶段，虽然经过几十年的快速发展，水泥行业整体素质提升明显，但是在快速发展过程中出现的许多问题也值得注意，如水泥行业“三高一低”发展模式没有根本改变；产品产销供求失衡，产能严重过剩；水泥

生产技术水平低下，生产工艺相对落后；水泥生产集中度低，产品质量不稳定；水泥生产资源浪费严重，环境污染大等。因此未来我国水泥行业将重点发展什么样的产品？研发怎样的技术？未来结构调整方向在哪里？等等，以上这些都将是本部分的分析内容。

### 第二部分，基于模糊层次分析法的环境综合评价研究

生命周期评价理论的重要步骤之一是确定不同环境影响类型的影响权重，以对企业功能拓展的环境影响进行综合评价，在本论文中，影响权重采用模糊层次分析法来确定。自从 Saaty<sup>[60]</sup>引入层次分析法以来，就一直是学术界研究的热点，并很快在各个领域得到了广泛应用，然而传统层次分析法只能解决确定型问题，对于决策信息以模糊形式来表达的决策问题并不适用，因此有必要把层次分析法与模糊集理论相结合，形成模糊层次分析法。目前对标度值为 0~1 之间的精确数的模糊层次分析法研究最多，但是，正如 Laarhoven 和 Pedrycz<sup>[61]</sup>指出的那样，既然决策者的意见本质上是模糊的，两两比较的结果就应该表示成模糊数，而不是精确数。另外，在两两比较时，采用权重分配的方式构造判断矩阵不但更容易控制和把握，而且确定的权重也更能反映决策者的意图。因此，本部分主要对指标值是模糊数的模糊层次分析法进行研究，其中的模糊判断矩阵采用权重分配的方式来确定。具体来说，本部分首先对现有文献关于乘性一致性模糊数互补判断矩阵的定义进行研究，接着找出模糊数互补判断矩阵和模糊数互反判断矩阵之间的相互转换关系，进而结合传统层次分析法中关于正互反判断矩阵的权重求解过程和模糊集理论，给出基于模糊数互补判断矩阵的模糊权重求解算法，并在此基础上给出模糊层次分析法的模糊权重求解算法，最后结合生命周期评价理论进行环境影响综合评价。

### 第三部分，水泥行业处置城市污泥的功能研究

城市污泥是污水处理厂的副产品，根据“全国城镇污水处理管理信息系统”的统计数据显示，截止到 2010 年底，我国运营的污水处理厂共 2832 座，全年累计产生含水率为 80%的污泥约 3000 万吨，约为 2005 年的 2.5 倍。由于我国污泥成分复杂，不但含有氮、磷等营养物质，也含有大量的寄生虫卵、重金属、病毒等有毒有害物质，尤其城市污泥中的重金属元素常常以铁锰氧化物结合态、碳酸盐结合态、硫化物结合态的形式存在，很容易被植物吸收利用，食用会对人体健康造成严重影响。目前，我国传统的污泥处置方式主要为填埋、焚烧和堆肥，这些处置方式要么需要占据大量的土地资源，要么严重污染空气、土壤及地下水等周围生态环境。目前一些水泥企业也

开始利用水泥窑高温、高压、大容量和全封闭的天然优势特点协同处置城市污泥，本部分内容主要采用生命周期评价方法理论和模糊层次分析法，对目前几种传统的城市污泥处置方式和利用水泥窑协同处置方式进行对比研究，以期找出水泥窑协同处置城市污泥的优势和劣势所在，为水泥行业在协同处置城市污泥的功能拓展方面提出科学的意见和建议。

#### 第四部分，水泥行业处置城市垃圾的功能研究

根据有关部门的统计数字显示，目前我国每年产生垃圾总量为 2.5 亿吨，并且以 10% 的年增长速度迅速增加，加上历年的积累，我国目前的垃圾堆放总量已超过 80 亿吨。在全国 600 多座城市中，已有三分之二处于垃圾的包围之中，城市垃圾的外移，会导致城乡结合部生态环境的恶化，垃圾围城、恶臭扰民、土地占用、重金属污染、二恶英毒害、地下水遭侵蚀等城市垃圾问题已经成为我国城镇化发展绕不过去的一座大山。目前，我国传统的城市垃圾处置方式主要为直接卫生填埋和焚烧后填埋，同样，这些处置方式仍旧存在着占用大量土地资源，影响周围生态环境等缺点，目前，一些水泥企业也开始采用水泥窑来协同处置城市垃圾。本部分内容主要运用生命周期评价方法理论和模糊层次分析法，对目前几种传统的城市垃圾处置方式和利用水泥窑协同处置方式进行对比研究，以期找出水泥窑协同处置城市垃圾的优势和劣势所在，为水泥行业在协同处置城市垃圾的功能拓展方面提出科学的意见和建议。

#### 第五部分，水泥行业功能拓展实证分析与措施保障

根据政策要求和水泥行业面临的形势看，未来单纯以传统方式进行水泥生产和销售的水泥企业将举步维艰，水泥行业功能拓展必然是大势所趋，本部分主要对水泥行业利用水泥窑协同处置城市污泥、城市垃圾、工业危险废弃物和污染土等方面功能拓展做得比较好的水泥企业进行了实证分析。另外，水泥企业采取怎样的措施才能顺利实现其功能拓展也是本部分的主要研究内容，这部分研究从两方面着手分析，一是企业自身如何做，二是需要怎样的政策支持。

### 1.3.2 论文的结构和创新点

根据本文的研究内容，全文共分为 7 章，具体安排如下：

第 1 章为绪论。本章分析了对水泥行业功能拓展的研究意义，总结了水泥窑功能拓展和基于生命周期评价理论的水泥行业环境影响评价的国内外研究现状，并在此基础上分析了本文的研究内容、研究框架及创新点。

第 2 章主要对水泥行业功能拓展现状进行分析，与研究内容中的第一部分相对应。

本章主要包括四部分内容,分别介绍了水泥行业的发展历史、现状及存在的主要问题、发展趋势等。

第3章主要对生命周期评价理论进行介绍。首先介绍了生命周期评价理论的起源和发展;其次介绍了国际环境毒理学与化学学会、国际标准组织等国际性组织以及美国环保局、保洁公司等政府机构和企业对生命周期评价的定义;再次介绍了生命周期评价过程的技术框架,评价过程主要包括研究目的与范围的确定、清单分析、影响评价和结果解释4个过程,其中对影响评价做了重点分析;最后对生命周期评价理论在应用和评价范围、评估方法、时间和地域方面的局限性进行了介绍。

第4章主要对基于模糊层次分析法的环境综合评价进行研究,与研究内容中的第二部分相对应。这一章首先介绍了模糊集理论及模糊层次分析法中的有关定义、定理和概念。其次,文中为了解决模糊数的加和减、乘和除不再是一对逆运算的问题,并使得运算法则更加符合客观实际情况,而引入了经典数学中的自变量、因变量、代表系统和自由度等概念,进而定义了模糊集理论中的自变模糊数、因变模糊数、代表系统和自由度等概念,继而对模糊数互补判断矩阵的乘性一致性进行了研究,结果发现若一个模糊数互补判断矩阵满足目前一些文献对其乘性一致性的定义则个矩阵一定是精确数互补判断矩阵这一不合理之处,据此文章结合模糊集截集理论,利用模糊数互补判断矩阵元素间的关系,重新对乘性一致性模糊数互补判断矩阵进行了定义。再次,文章给出了模糊数互补判断矩阵和模糊数互反判断矩阵相互转换数学表达式,并证明了通过此数学表达式相互转换后的矩阵与原矩阵保持着相同的一致性。最后结合传统层次分析法中关于正互反判断矩阵的权重求解过程和模糊集截集理论,给出了基于模糊数互补判断矩阵的模糊权重求解算法,继而给出了模糊层次分析法的模糊权重和环境影响综合评价求解算法。

第5章主要对水泥行业处置城市污泥的功能拓展进行研究,与研究内容中的第三部分相对应。这一章以城市污泥为研究对象,以生命周期评价理论和模糊层次分析法为研究工具,结合实证分析方法对五种城市污泥处置方式进行比较研究,其中两种处置方式采用水泥窑协同处置,即城市污泥的“浓缩-脱水-外运水泥厂处置”和“浓缩-脱水-石灰稳定-外运水泥厂处置”处置方式;另外三种为目前常用的城市污泥传统处置方式,即城市污泥的“浓缩-脱水-干化-外运填埋处置”、“浓缩-脱水-干化-焚烧-外运填埋处置”和“浓缩-脱水-堆肥处置”处置方式。通过采用生命周期评价理论和模糊层次分析法对城市污泥五种处置方式处置过程进行评价研究,以期发现采用水

泥窑协同处置城市污泥在环境影响方面的优劣之处，为水泥行业在处置城市污泥方面的功能拓展提出科学的意见和建议。

第 6 章主要对水泥行业处置城市垃圾的功能拓展进行研究，与研究内容中的第四部分相对应。和第 4 章类似，这一章以城市垃圾为研究对象，以生命周期评价理论和模糊层次分析法为研究工具，结合实证分析方法对目前五种主流城市垃圾处置方式进行比较研究，其中三种采用水泥窑协同处置，即城市垃圾的“收集-运输至焚烧厂-焚烧-运输至水泥厂-水泥窑处置”、“收集-运输至水泥厂-水泥窑处置”和“收集-运输至水泥厂-RDF 制造-水泥窑处置”处置方式；另外两种为目前常用的城市垃圾传统处置方式，即城市垃圾的“收集-运输-卫生填埋”和“收集-运输至焚烧场-焚烧-运输至填埋场-填埋”处置方式。通过采用生命周期评价理论和模糊层次分析法对城市垃圾五种处置方式整个处置过程进行评价研究，以期发现采用水泥窑协同处置城市污泥在环境影响方面的优劣势，为水泥行业在处置城市垃圾方面的功能拓展提出科学的意见和建议。

第 7 章主要对水泥行业功能拓展进行实证分析，并对功能拓展措施提出建议。本章与研究内容中的第五部分相对应，这一章首先对水泥行业利用水泥窑协同处置城市污泥、城市垃圾、工业危险废弃物和污染土等方面功能拓展做得比较好的水泥企业进行实证分析，接着对水泥行业功能拓展的措施提出建议。

本论文主要研究框架可参考图 1.1，其中图中的虚线框出部分为研究的创新点，归纳起来，本文的创新点主要有以下几点：

(1) 为使得模糊数间的运算法则更加符合客观实际情况，而引入了经典数学中的自变量、因变量、代表系统和自由度等概念，并定义了模糊集理论中的自变模糊数、因变模糊数、代表系统和自由度等概念，在此基础上解决了模糊数间的加和减、乘和除不再是一对逆运算的问题，进而指出了若一个模糊数互补判断矩阵满足目前一些文献的乘性一致性定义则这个矩阵一定是精确数互补判断矩阵这一不合理之处，并重新对乘性一致性模糊数互补判断矩阵给出了一个较为合理的定义。

(2) 构建了城市污泥的两种水泥窑协同处置和三种传统方式处置的环境影响评价模型，通过一系列生命周期评价步骤对五种城市污泥处置方式在资源能源消耗、环境污染物排放、土地资源占用等环境负荷指标上进行比较，科学论证了水泥行业在协同处置城市污泥功能拓展上的优越性。

(3) 构建了城市垃圾的三种水泥窑协同处置和两种传统方式处置环境影响评价

模型，通过一系列生命周期评价步骤对五种城市垃圾处置方式在资源能源消耗、环境污染物排放、土地资源占用等环境负荷指标上进行比较，科学论证了水泥行业在协同处置城市垃圾功能拓展上的优越性。

(4) 对目前水泥行业主要功能拓展方向和收到良好效果的企业进行了实证分析，提出了确保水泥行业功能拓展成功的企业内部措施和外部保障政策。

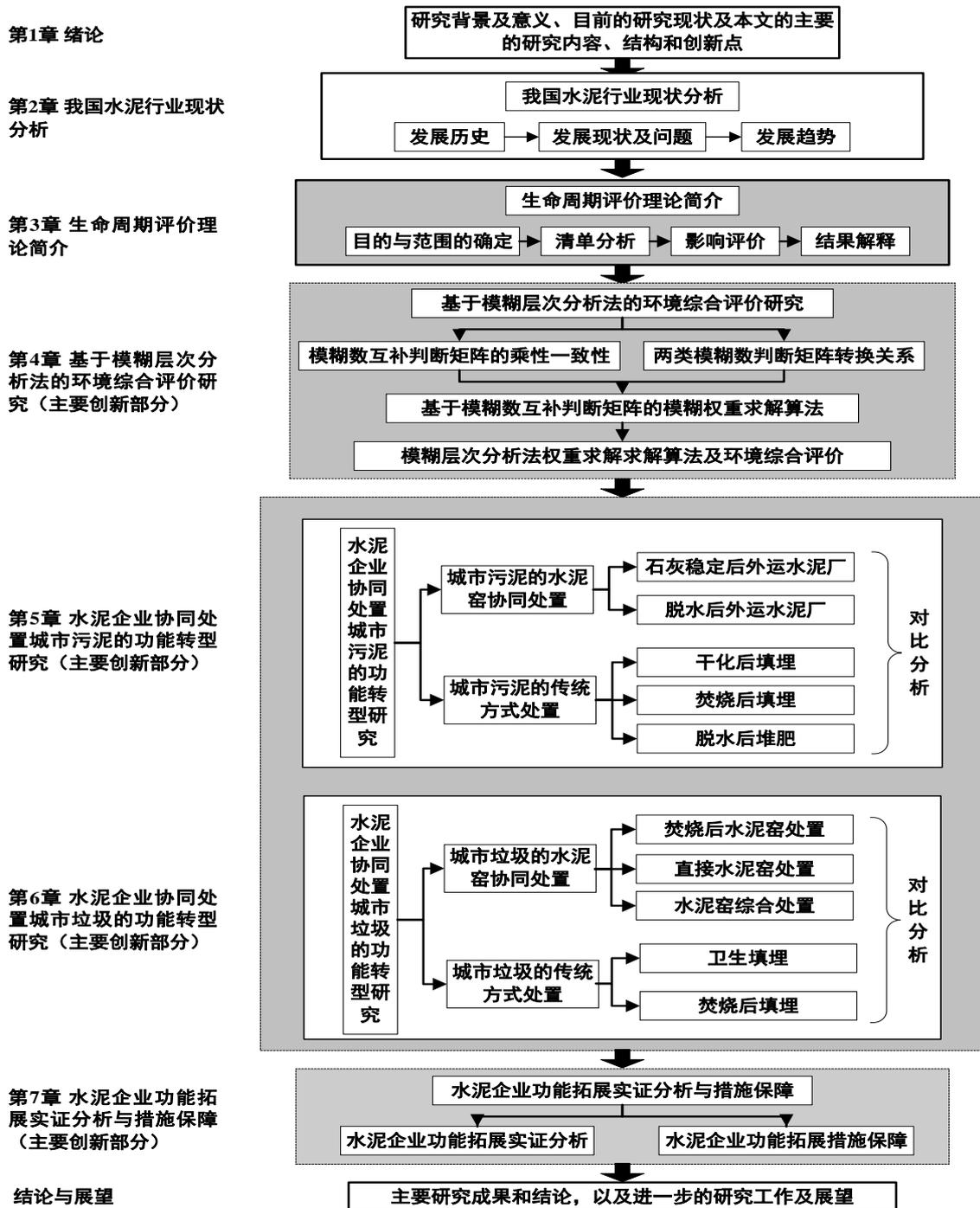


图 1.1 论文组织结构图

## 第 2 章 我国水泥行业现状分析

### 2.1 我国水泥行业发展历史

我国的水泥行业大致经历了五个阶段：

(1) 诞生阶段（1889 年—1936 年）：1889 年，我国第一个水泥厂——河北唐山细绵土厂建成投产，开启了我国水泥工业的历史，此后又相继建立了大连、上海、广州等水泥厂。

(2) 衰落停滞阶段（1937 年—1949 年）：国内先后建设了哈尔滨、本溪、小屯、抚顺、牡丹江和琉璃河等水泥厂，但 1937 年七七事变之后，日本开始了全面侵华战争，连年的战争造成这些水泥厂不能持续稳定生产，直至新中国成立前，国内大部分水泥厂一直处在停产状态，只有极少数的一些还在继续生产。

(3) 自行研制阶段（1950 年—1969 年）：1949 年，全国水泥总产量只有 66 万吨，新中国成立后，我国开始大力发展基础建设，水泥需求剧增，带动水泥行业进入快速发展阶段。新中国成立初期，国内水泥生产主要以湿法为主，设备多来自东欧社会主义国家，如原民主德国、罗马尼亚和捷克斯洛伐克等<sup>[62,63]</sup>，但当时国外进口的设备往往比较昂贵，若大规模进口对刚刚经济起步的新中国来说无疑是一个不小的负担，因此决定自行研制开发水泥生产设备。在这期间，我国制造出了当时具有较高水平的小屯型半干法立波窑、华新型湿法窑和上海型湿法窑，不但在国内水泥厂得到大力推广，而且还出口柬埔寨和阿尔巴尼亚等国家。

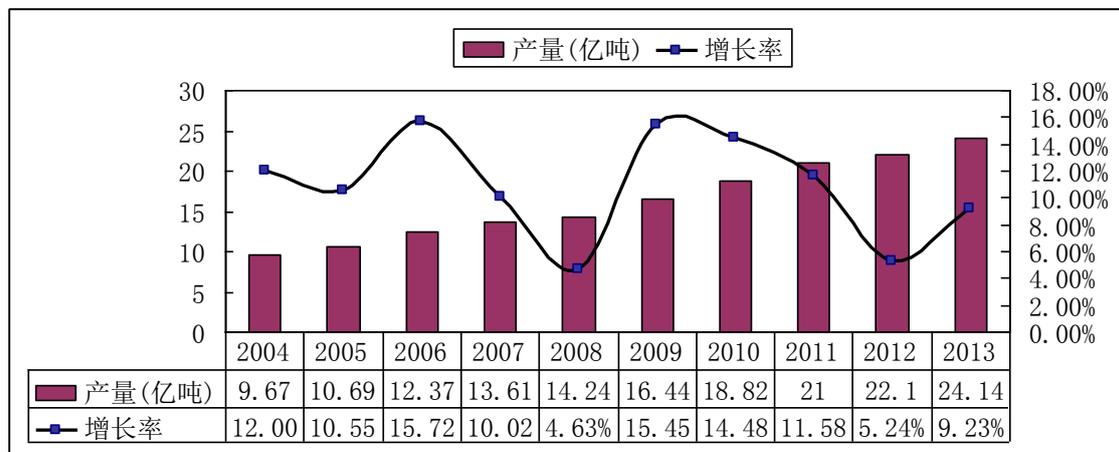
(4) 发展初阶段（1970 年—1989 年）：70 年代初期，湿法仍然是世界水泥工业的主流发展方向，但之后不久日本研发出了带分解炉旋风预热器窑的干法生产水泥，这种方法在产量和节能等许多方面都大大优越于湿法，从此，世界各国的水泥企业的生产纷纷开始由湿法转向干法。在这期间，我国自行研制了日产 700 吨、1000 吨、1200 吨和 2000 吨熟料的预分解窑生产线，并分别在上海川沙、辽宁本溪、江苏邳县等地水泥厂建成投产。从 1978 年改革开放开始，我国相继从国外引进日产能在 2000 吨至 4000 吨之间的大型预分解窑成套设备，先后建成冀东、宁国、柳川等大型水泥企业，为我国以后水泥工业的迅速崛起奠定了坚实基础。

(5) 产能结构调整蓬勃发展阶段（1990 年—）：90 年代初，我国开始了日产 4000

吨及以上熟料大型干法烧成系统的研发工作,随着天津工业设计研究院自主研发的日产 5000 吨、6000 吨、8000 吨以及 10000 吨熟料生产线成功投产,我国水泥工业开始进入自主发展阶段。但随着水泥工业为我国经济腾飞助力的同时,其高耗能、高排放的传统作业方式依旧占有不小比重,所产生的环境问题日益突出。为此,在最近几年国家和地方政府相关法规中,多次强调水泥产业结构转型,水泥企业要尽最大可能利用二次资源、能源、工业矿渣、生活垃圾甚至可燃性危险废弃物。

## 2.2 我国水泥行业的发展现状及问题

根据数字水泥网提供的数字显示,2004 年至 2013 年的最近十年,我国水泥产量呈逐年递增趋势,其中 2005 年全国水泥年产量第一次突破 10 亿吨。仅过了 6 年,2011 年全国水泥产量便又突破了 20 亿吨,达到 21 亿吨。2013 年全国水泥产量为 24.14 亿吨,比 2012 年增加 2.04 亿吨,增长幅度 9.57%,达历史最高水平。从增长幅度来看,2013 年全国水泥总产量是 2004 年的 2.5 倍,平均年复合增长率达 10.7%。需要说明的是,2008 年全国水泥产量同比增长 4.63%,为近十年来同比增长最低的一年,而之后的 2009 年全国水泥产量同比增长 15.45%,处于近十年来最高的一年。究其原因不难发现,2008 年美国次贷危机引发的国际金融海啸肆虐全球,严重冲击着世界经济,由于外部环境恶化、内需不足等原因,2008 年全国水泥产量增长率处于历史较低水平,我国政府为保持 8% 的经济增长,2008 年 11 月 9 日出台了 4 万亿经济刺激方案,主要对保障性安居工程、农村基础设施建设、铁路、公路和机场重大基础设施建设、地震灾区灾后重建等十方面工程进行投资,在此拉动之下,2009 年全国水泥市场产销两旺。



注: 根据数字水泥网提供的信息整理所得

图 2.1 2004—2013 年全国水泥年产量及增长率

另外, 根据中国水泥协会发布的《关于发布 2013 年中国水泥熟料产能前 20 家企业排行榜的公告》显示, 截止到 2013 年底, 全国 (不含港澳台地区) 前 10 家大企业集团水泥熟料产能占全国总产能的 46.8%, 前 20 家达到 55.9%。其中, 中国建材集团年产能在 3 亿吨以上, 稳居世界第一位。2013 年中国水泥熟料产能前 20 家企业排名如表 2.1 所示:

表 2.1 2013 年中国水泥熟料产能前 20 家企业排名榜

排名	企业名称	(万吨/年)
1	中国建材集团有限公司	30005
2	安徽海螺水泥股份有限公司	16774
3	中国中材集团有限公司	8396
4	唐山冀东水泥股份有限公司	7080
5	华润水泥控股有限公司	5664
6	山东山水水泥集团有限公司	4747
7	华新水泥股份有限公司	4263
8	台泥水泥股份有限公司	3602
9	红狮控股集团有限公司	3311
10	天瑞集团水泥有限公司	3209
	北京金隅集团有限责任公司	3181
12	拉法基瑞安水泥有限公司	2031
	吉林亚泰 (集团) 股份有限公司	2018
14	新疆青松建材化工 (集团) 股份有限公司	1606
15	尧柏特种水泥集团有限公司	1581
	亚洲水泥 (中国) 控股公司	1566
17	江苏金峰水泥集团有限公司	1318
18	内蒙古蒙西水泥股份有限公司	1302
19	河南同力水泥股份有限公司	1225
20	葛洲坝集团水泥有限公司	1178

虽然我国的水泥行业取得了长足发展, 但在发展过程中也出现了许多问题, 综合表现为: 水泥行业 “三高一低” 发展模式没有根本改变; 产品产销供求失衡, 产能严

重过剩；水泥生产技术水平低下，生产工艺相对落后；水泥生产集中度低，产品质量不稳定；水泥生产资源浪费严重，环境污染大。

### （1）“三高一低”状况没有根本改变

水泥行业是典型的“三高一低”即高投入、高消耗、高污染、低效率型行业。

第一，水泥行业是高投入型行业。投资一条中等规模的水泥生产线往往需要投资几亿甚至十几亿，如：海纳公司 2500/d 熟料电石渣水泥生产线总投资约 3.3 亿元；成县祁连山水泥有限公司年产 200 万吨水泥生产线项目总投资约 6.6 亿元，湖南益阳海螺水泥规划建设 2 条日产 4500 吨新型干法水泥熟料生产线，项目总投资约 16 亿元；塔牌集团拟在广东省梅州市蕉岭县文福镇新建 2 条 10000t/d 新型干法旋窑熟料水泥生产线，项目计划总投资 35.55 亿元。

第二，水泥行业是高能源消耗型行业。据统计，在我国现有的技术水平条件下，每吨水泥综合能耗 115kg 标准煤，综合电耗 91kWh。2013 年全国水泥产量 24.14 亿吨，可以推算出当年水泥行业总能耗约 2.776 亿吨标准煤，总电耗 2197 亿 kWh，分别占同期全社会总煤耗的 11%和总电耗的 5%。

第三，水泥行业是高污染型行业。根据中国环境科学研究院、中国水泥协会的数据显示，2012 年中国水泥工业粉尘年排放量 368 万吨，其中吨熟料粉尘排放量为 915mg/Nm<sup>3</sup>，是国标限值 90mg/Nm<sup>3</sup> 的 10 倍；二氧化硫年排放量 137 万吨，占全国工业总排放量的 4.8%；氮氧化物排放量接近 240 万吨，占全国工业排放总量的 10%，仅次于电力和机动车尾气。如此巨大的排放量不仅给环境带来了严重影响，也给水泥工业自身的发展带来了巨大压力。

第四，水泥行业是低效率型行业。目前整个水泥行业的效率比较低，受需求疲弱以及产能过剩的影响，整个行业的景气度下降。

### （2）水泥产能严重过剩

国际上一般选用产能利用率或设备利用率作为产能过剩的评价指标，根据欧美等发达国家水泥工业发展的经验，水泥产能利用率或设备利用率正常区间水平在 79%~83%之间，即水泥产能 20%左右的富裕度是合理的。然而，我国超过一半的水泥企业的设备利用率在 70%以下。根据中国水泥协会的数据显示，2013 年，我国水泥熟料产量 18.6 亿吨，熟料实际产能富余 37.6%，实际水泥产能富余 32.3%，已经超出了 20%的合理范围，我国的水泥行业产能已经严重过剩。

### （3）生产技术水平不高

虽然我国一直在积极鼓励水泥企业采用新型干法生产工艺，但由于新型干法工艺水泥生产线成本较高，且需要一定的企业规模才能产生经济效益，因此，很多中小企业仍然采用落后的立窑工艺来生产水泥。尽管我国的大型水泥厂均已采用具有国际水平的先进新型干法工艺生产水泥，但由于我国中小企业数量众多，生产工艺落后，产品档次较低，使得我国水泥行业平均技术水平不高。

#### （4）水泥生产集中度低

集中度是指规模处于前几位的企业在生产、销售、资产等方面的累计数量占整个行业该指标的比重，即前几位企业市场份额之和，是反映市场竞争激烈程度的重要量化指标。目前国际上前 10 家企业水泥产量总和占全球总产量的 60%-70%，而中国的前 10 家水泥产量总和仅占全国总产量的 46.8%，行业集中度较低。此外相对于大企业而言，小企业一般能源资源利用率低且单位产能的环境负荷高，因此国内水泥行业的数千家小企业还存在很大的资源浪费和环境破坏等问题。

## 2.3 我国水泥行业的发展趋势

未来几年，我国水泥行业将以解决过剩产能为中心，以产业结构调整为工作重点，加大对水泥行业技术创新的投资力度，提高优质水泥生产比重，并重点发展绿色水泥工业。

#### （1）水泥行业产业结构调整

目前，虽然我国的水泥新增产能得到了一定的控制，但产能严重过剩的基本面还没有改变，未来一段时间，水泥行业仍然需要进行大规模的结构调整与产业升级。中国水泥协会会长乔龙德在 4 月 27 日召开的 2014 年中国国际水泥峰会上表示，中国水泥行业结构调整开始向两头延伸，一头是创新提升，创新研发第二代新型干法水泥技术装备；另一头是重新界定落后产能，提高门槛，加快淘汰落后产能的步伐。因此，根据产业洞察网发布的《中国水泥行业前景分析》，未来水泥行业的发展应该执行“控制总量，调整结构”政策，即对水泥生产总量严格控制，遏制产能过剩势头，同时改善水泥行业的企业结构，淘汰取缔小企业，扶持大企业发展壮大。未来，水泥行业将由数量型向质量型转变，通过兼并重组优胜劣汰，最终形成以大集团为主导的区域性市场格局。

#### （2）加大水泥行业技术创新

企业的科技创新能力，对实现产业升级和培育新的经济增长点至关重要<sup>[64]</sup>。在技

术创新方面，水泥企业要两手抓，一手抓两化，即信息化与工业化的深度融合，一手抓技改，即加快技术改造，提升精准管理水平。水泥企业在这两个方面都已经有了成功范例，如华新水泥股份有限公司打造了标准化的生产、业务管控平台和统一的数据中心，同时融合智能移动 IT 技术，使网上买水泥在华新变成了现实，“鼠标+水泥”的现代水泥企业管理新模式全面提升了公司核心竞争力；河北新峰水泥有限责任公司制定了两化建设规划，先后斥资建设了全范围数字化管控系统、BI 决策分析系统、大宗原材料进销存软件、ERP 财务核算系统、流程审批优化 OA 综合管理系统等，增强了企业的生存发展能力；唐山冀东水泥股份有限公司自主研发了水泥企业管理系统 (EMES 系统)，并设计了实施集团协同平台管理系统，不仅在内部得到了很好的使用，并且逐步推广于同行业其他企业。

### (3) 注重优质水泥生产

根据中国产业洞察网的研究，虽然目前我国水泥行业整体产能过剩，但其中大部分为普通水泥，优质水泥不但没有过剩，而且由于产量相对少，导致缺口还很大。另外，水泥的质量关系到混凝土的强度等级，混凝土强度每增加一个等级，水泥和钢筋的用量就会减少 10%~15%，因此采用优质水泥还可减少资源的使用量，发展优质水泥符合我国可持续发展的政策。

### (4) 发展绿色水泥

“绿色水泥”的概念可由“绿色建材”衍生而来，可定义为：采用清洁生产技术、少用天然资源和能源、大量使用工业或城市固态废弃物生产的无毒害、无放射性、有利于环境保护和人体健康的水泥<sup>[65]</sup>。近些年来，国家各部委多次发文要求各水泥企业要利用现有的水泥窑协同处置城市垃圾、污泥、工业危废及污染土等废弃物，大力发展绿色水泥，淘汰落后产能。最近的发文有：2013 年 5 月 24 日，国家环保部发布了《水泥工业污染防治技术政策》（公告 2013 年第 31 号），鼓励水泥企业利用新型干法水泥窑处置工业废物、生活垃圾、污泥等固体废物及污染土壤，并对于能效低、环境污染程度高的立窑、干法中空窑、立波尔窑、湿法窑等落后生产能力和工艺装备依法予以取缔；2013 年 9 月 10 日，国务院发布了《大气污染防治行动计划》（国发〔2013〕37 号）十条措施，其中第三条中要求，要实施园区循环化改造，推进能源梯级利用、废物交换利用、土地节约集约利用，促进企业循环式生产、园区循环式发展、产业循环式组合，构建循环型工业体系，推动水泥等工业窑炉、高炉实施废物协同处置；2014 年 5 月 6 日，国家发改委、科技部、工信部、环保部、住建部和能源局 7 部委联合下

发了《关于促进生产过程协同资源化处理城市及产业废弃物工作的意见》（发改环资[2014]884号），要求在水泥行业推进利用现有水泥窑协同处理危险废物、污水处理厂污泥、垃圾焚烧飞灰等，利用现有水泥窑协同处理生活垃圾的项目开展试点。客观地讲，绿色水泥取代传统水泥已是必然趋势。

## 2.4 本章小结

这一章主要对我国水泥行业的现状进行了分析，文中首先依据水泥行业的历史发展轨迹梳理出了5个阶段，即诞生阶段（1989年—1936年）、衰落停滞阶段（1937年—1949年）、自行研制阶段（1950年—1969年）、发展初阶段（1970年—1989年）和产能结构调整蓬勃发展阶段（1990年—）。接着对我国水泥行业现状进行了分析，指出虽然我国水泥行业几十年来已经有了长足发展，但在发展的过程中也出现了许多问题，综合表现为：水泥行业“三高一低”发展模式没有根本改变；产品产销供求失衡，产能严重过剩；水泥生产技术水平低下，生产工艺相对落后；水泥生产集中度低，产品质量不稳定；水泥生产资源浪费严重，环境污染大等这些问题严重制约着行业的发展。最后对我国水泥行业的发展趋势做了研判，文章指出未来一段时间我国应将以解决过剩产能为中心，以产业结构调整为工作重点，加大对水泥行业技术创新的投资力度，提高优质水泥生产比重，并重点发展绿色水泥。

## 第 3 章 生命周期评价理论概述

### 3.1 生命周期评价的起源与发展

上世纪六十年代末，针对可口可乐公司饮料瓶进行的评价研究，可以说是生命周期评价研究开始的标志。1969 年，为了对可口可乐公司生产的不同类型的饮料瓶进行比较，以判断哪种饮料瓶对环境的影响最小，美国中西部资源研究所（MidWest Research Institute, MRI）专门为此进行了一项研究<sup>[66]</sup>。该研究从原材料采掘到最终废弃物处置进行了全过程跟踪和定量分析（从摇篮到坟墓）。这个研究量化了原材料及每种瓶子从生产到处置过程中对环境的影响能力，涉及玻璃、钢铁、铝、纸和塑料等多个工业部门，分析了大约 40 种材料。研究结束后，国家环保局于 1974 年发表了一份公开报告，报告中提出了一系列早期的生命周期评价的研究框架。

这种量化产品资源利用和环境排放的过程被认为是“资源和环境纲要分析（Resource and Environmental Profile Analysis, REPA）”。随后美国、日本和欧洲的大学、研究所、公司等也相继开展了一系列 REPA 研究，研究焦点主要集中在包装废弃物问题上，如针对日本利乐包装公司的《利乐砖纸盒及多次使用和非多次使用玻璃瓶对资源和环境的影响》<sup>[67]</sup>、美国 Franklin 协会发布的《15 种一次性饮料瓶的能量比较报告》<sup>[68]</sup>等。据统计，20 世纪 70 年代初全球 90 多项 REPA 研究中，大约 50% 针对包装品，10% 针对化学品和塑料制品，另有 20% 针对建筑材料和能源生产<sup>[69]</sup>。

生命周期评价得到广泛关注是在上世纪 80 年代末期。随着区域性和全球性环境问题日益突出和环保意识不断增强，各种 REPA 研究随之大量出现。但由于研究的产品和系统越来越复杂，使用 REPA 研究的目的是侧重点也各有不同，导致这些 REPA 研究并没有统一的方法和框架。1989 年，荷兰住宅空间计划及环境部（荷兰语：Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieu, VROM）相较于传统的“末端控制”环保政策，首次提出涉及到产品生产、消费到最终废弃物处理所有环节（即所谓的产品生命周期）的环境政策，要求对产品整个生命周期内和环境影响有关的所有因素进行评价分析，同时也给出生命周期评价的基本方法和数据标准化方法。

上世纪 90 年代生命周期评价方法得到迅速发展。1990 年国际环境毒理学与化学学会（The Society of Environmental Toxicology and Chemistry, SETAC）主持召开了“生

命周期评价国际研讨会”，在该次会议上首次提出了“生命周期评价（LCA）”的概念。1993年，SETAC在葡萄牙召开了一次生命周期评价学术会议，会后根据研讨成果出版了“生命周期评价纲要：使用指南”，为生命周期评价方法提供了基本的技术框架，是生命周期评价方法论研究道路上的一个里程碑。1993年美国国家环境保护局（U.S. Environmental Protection Agency, EPA）委托风险缩减工程实验室对生命周期清单进行分析研究，根据研究结果出版了《生命周期评价——清单分析的原则与指南》，较系统地给出了生命周期清单分析的基本框架，1995年EPA又出版了《生命周期分析质量评价指南》和《生命周期影响评价：概念框架、关键问题和方法简介》，使生命周期评价进入实质性的推广应用之中。

经过20多年的实践，在国际环境毒理学与化学学会和国际标准组织（International Organization for Standardization, ISO）共同努力下，生命周期评价方法论的国际标准也取得了重要进展。1997年到2000年ISO相继推出4个生命周期评价方法论的国际标准，分别为ISO 14040-1997《环境管理—生命周期评价—原则与框架》、ISO 14041-1997《环境管理—生命周期评价—目标与范围的确定，清单分析》、ISO 14042-2000《环境管理—生命周期评价—生命周期影响评价》和ISO 14043-2000《环境管理—生命周期评价—生命周期解释》。2006年ISO又对原有的4项标准进行重新修订，最终形成ISO 14040-2006《环境管理—生命周期评价—原则与框架》和ISO 14044-2006《环境管理—生命周期评价—要求事项与指南》两项国际标准。参照国际标准，我国环境管理标准化技术委员会于1999年和2000年相继推出GB/T 24040-1999《环境管理—生命周期评价—原则与框架》、GB/T 24041-2000《环境管理—生命周期评价—目的与范围的确定和清单分析》、GB/T 24042-2002《环境管理—生命周期评价—生命周期影响评价》和GB/T 24043-2002《环境管理—生命周期评价—生命周期解释》四项生命周期评价方法论的国家标准。为了与国际同步，2008年全国环境管理标准化委员会又对2006年新修订并发布的两项国际标准进行了等同转化，形成并正式颁布了GB/T 24040-2008《环境管理—生命周期评价—原则与框架》和GB/T 24044-2008《环境管理—生命周期评价—要求与指南》两项国家标准。

### 3.2 生命周期评价的定义

生命周期评价的定义有多种提法，其中以SETAC和ISO的定义最具权威性。

SETAC对生命周期评价的定义是：生命周期评价是一种对产品、生产工艺以及活

动对环境的压力进行评价的客观过程，它是通过对能量和物质利用以及由此造成的环境废物排放进行辨识和量化，这种评价贯穿于产品、工艺和活动的整个生命周期，包括原材料的提取与加工、产品制造、运输、使用以及废物循环利用和最终弃置等整个过程<sup>[70]</sup>。

ISO14040-1997 对生命周期评价的定义是：生命周期评价是对产品或服务系统在整个生命周期中与其所产生的相应功能直接有关的环境影响，对物质和能源的投入与产出进行汇集和测定的一套系统方法<sup>[71]</sup>。

另外，一些政府机构和企业站在各自的立场上对生命周期评价也都有一番描述，如美国环保局的定义：对自最初从地球中获得原材料开始，到最终所有的残留物质回归地球结束的任何一种产品或人类活动所带来的污染物排放及其环境影响进行估测的方法；美国 3M 公司的定义：从制造到加工、处理乃至最终作为残留有害废物处置的全过程中，检查如何减少或消除废物的方法；美国宝洁公司的定义：显示产品制造商对其产品从设计到处置全过程中所造成的环境负荷承担的态度，是保证环境确实而不是虚假地得到改善的定量方法。

归结起来，可以将生命周期评价表述为：对一种产品及其包装物、生产工艺、原材料、能源或其他某种人类活动行为的全过程，包括原材料的采集、加工、生产、包装、运输、消费和回收以及最终处理等，进行资源和环境影响的分析和评价<sup>[69]</sup>。

### 3.3 生命周期评价的技术框架

根据 ISO 14040-2006 定义的技术框架，LCA 评价过程包括研究目的与范围的确定、清单分析、生命周期影响评价和生命周期解释 4 个过程。

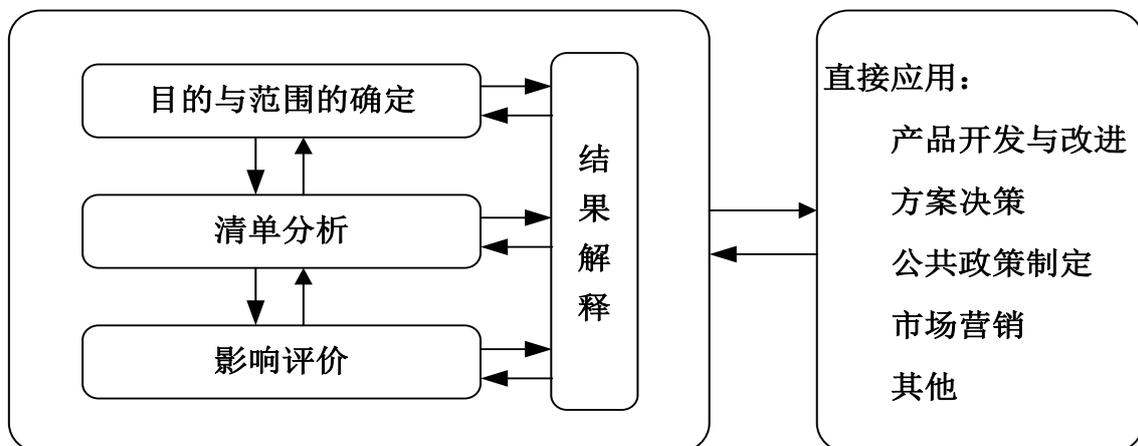


图 3.1 生命周期评价技术框架

### 3.3.1 目的与范围的确定

生命周期评价的目的是对一个明确的产品或流程在环境影响方面实施评价。不同条件下,评价目的是不一样的,这表现在:如果是设计阶段,评价目的就是在备选方案之间进行比较;如果是设计完成阶段,评价目的就是在产品的制造或流程操作中减少对环境影响程度。生命周期评价的目的如果能被量化,比如“环境影响能力在现有基础上减少 30%”,这样的评价目的会更有用。

在生命周期评价中,范围的确定是重点也是难点,范围设定过小,得出的结论不准确不可靠,范围设定过大,则会增加后续工作的任务量。通常情况下,生命周期评价的范围可按照如图 3.2 所示的五个阶段进行设定<sup>[69]</sup>。

**阶段一是产品制造之前的原材料获取阶段。**这一阶段处于制造商直接控制范围之外,需要的信息难以着手考虑。尽管如此,一些与环境密切相关的公司仍会和产品制造商一起将其纳入到生命周期的分析范围之内。

**阶段二是产品生产阶段。**这一阶段也被称为“门到门的分析”,即包括原材料运入生产工厂的门开始到产品运出工厂的门为止。

**阶段三是产品的包装运输阶段。**早在 19 世纪 90 年代,德国就已经规定,要求产品生产商要回收其产品的包装盒、包装袋、包装纸等,这鼓励生产商尽可能减少产品包装和增加包装材料的再使用次数,实际上是把产品包装品加入到了生命周期的环境评价之中。

**阶段四是产品的使用或消耗阶段。**很早之前,人们就开始关注产品在使用过程中的环境问题,如产品用后垃圾的分类处理等,因此产品使用过程中产生的环境问题也是生命周期评价的一个重要方面。

**阶段五是产品回收再利用阶段。**目前,一些欧洲国家正在考虑制定这样一些法律,即当有消费者用后某些产品又不想要时,制造商必须回收他们的产品。一些制造商发现这样的回收紧接着再重新加工使用是有利可图的,接下来,这些行为促使生产商去重新设计产品和选取原材料以使得产品的回收再利用价值达到最优,结果就是阶段五也开始受到人们的重视。

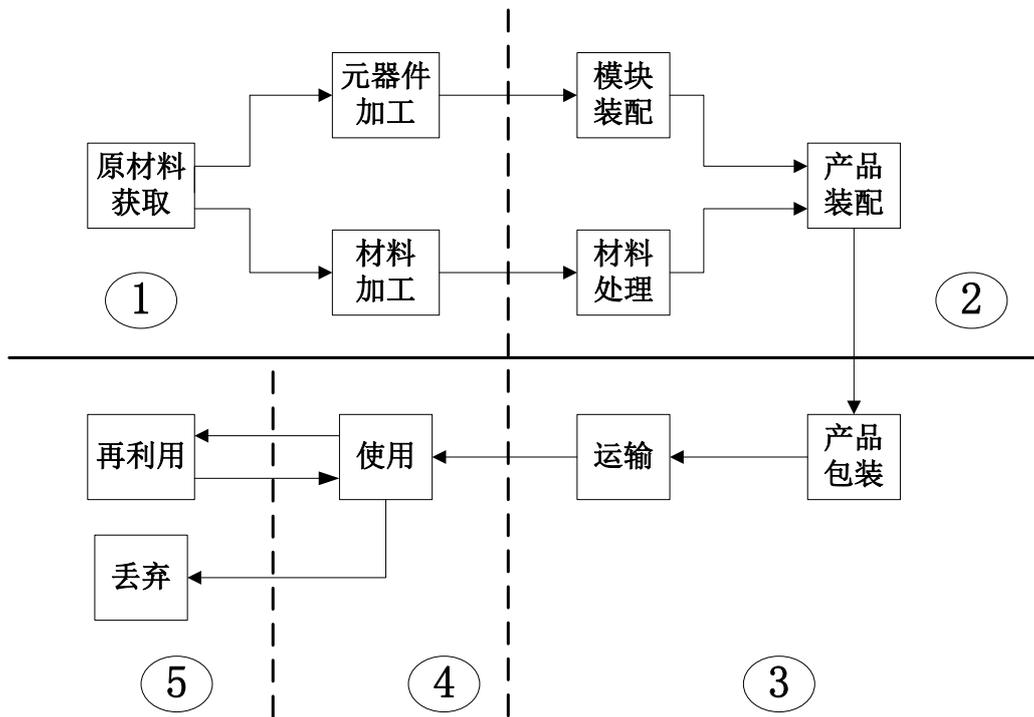


图 3.2 产品生命周期评价的 5 个阶段

### 3.3.2 清单分析

目的和范围设定以后，接下来就要对目标产品的生命周期清单进行分析了。根据 GB/T 24041-2000，生命周期清单分析（LCI）涉及到数据的收集和计算程序，这一活动根据图 3.3 所示的步骤进行 [72]。

数据收集需要对每个单元过程透彻了解，为了避免重复计算，必须对每个单元过程表述予以记录，这包括对输入和输出的定量和定性表述，用来确定过程的起始点和终止点，以及对单元过程功能的定量和定性表述。如果单元过程有多个输入或多个输出，必须将与分配程序有关的数据形成文件和报告，如果数据来自于公开出版物，必须标明出处。

### 3.3.3 影响评价

影响评价是将生命周期盘查得到的各种排放物对现实环境的影响进行定性定量的评价，这是生命周期评价最重要的阶段，也是最困难的环节。一般可将影响评价再分为四个过程：分类、特征化、标准化和加权综合评价。

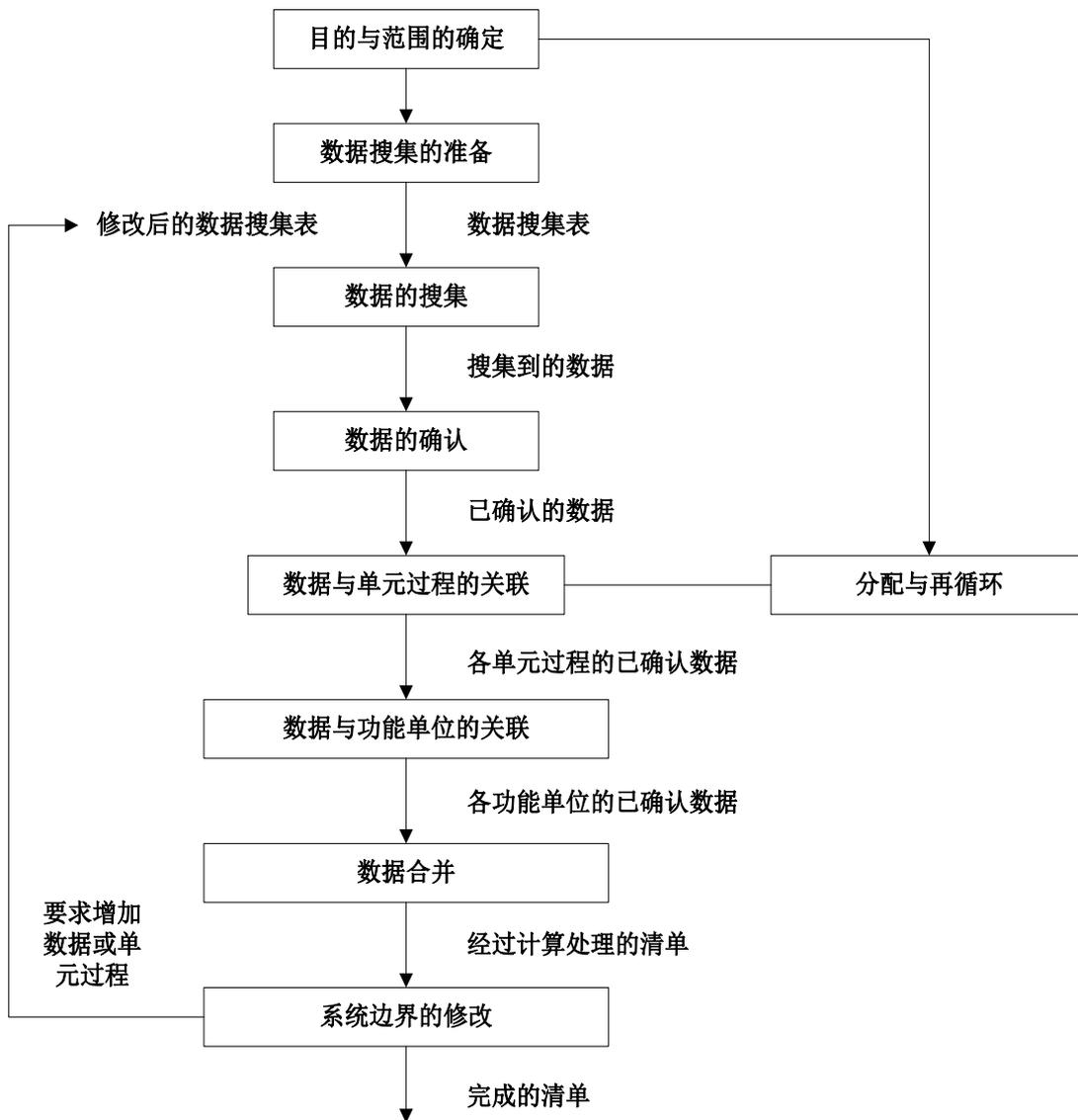


图 3.3 清单分析程序略图（某些反复性过程未予显示）

### 3.3.3.1 分类

分类是将清单分析中的输入和输出数据归入到不同的环境影响类型的过程。在进行影响评价时，需要将输入输出物分配在一个或多个环境影响因子类别中，这里的影响因子是指导致某种环境的因素。根据生命周期评价方法体系的不同，环境类型的分类方法也有多种形式。目前，常用的生命周期评价方法体系和相应的环境影响类型有：Environmental design of Industrial Products 1997(EDIP 97)、Environmental Priority Strategies in Product Development 2000 (EPS 2000)、Centre of Environmental Science 2001 (CML 2001)、IMPACT 2000+和 Environmental Design of Industrial Products 2003 (EDIP2003) (表 3.1)。

表 3.1 生命周期影响评价方法体系

方法	主要作者	发表时间	环境影响类型
EDIP 97	Wenzel 等 <sup>[73]</sup>	1997 年	全球变暖、酸化、富营养化、人体毒性、生态毒性、臭氧消耗、光化学臭氧诱导形成的潜在影响
EPS 2000	Steen 等 <sup>[74]</sup>	2000 年	人类健康、生态系统生产能力、生物多样性
CML 2001	Guinee 等 <sup>[75]</sup>	2001 年	温室效应、酸化效应、光化学效应、水体富营养化、人体健康损害、不可再生资源消耗
IMPACT 2002+	Jolliet 等 <sup>[76]</sup>	2003 年	分为中间点类型和损害类型，其中中间点类型包含人类毒性、呼吸影响、电离辐射、臭氧层消耗、光化学氧化、水生生态毒性、陆地生态毒性、水体酸化、水体富营养化、土壤酸化、土地占用、全球气候变暖、不可再生能源、矿物开采。损害类型包括人体健康、生态系统质量、气候变化、资源
EDIP 2003	Hauschild 等 <sup>[77]</sup>	2005 年	酸化、陆地水体富营养化、植物光化学臭氧接触、人类光化学臭氧接触、水体富营养化、通过空气接触的人类毒性和生态毒性、全球气候变暖、平流层臭氧损耗

在本文中，采用了 CML 2001 方法体系，选取的环境影响类型包括温室效应（GWP）、酸化效应（AP）、光化学效应（POCP）、水体富营养化（EP）、人体健康损害（HTP）和不可再生资源消耗（ADP）六种，分类结果如表 3.2 所示。

表 3.2 环境影响类型及其相关环境负荷项目

环境影响类型	类型参数	影响项目
温室效应（GWP）	CO <sub>2</sub> 当量（kg）	CO <sub>2</sub> 、NMVOC、CH <sub>4</sub> 、N <sub>2</sub> O
酸化效应（AP）	SO <sub>2</sub> 当量（kg）	SO <sub>2</sub> 、NO、NO <sub>2</sub> 、NH <sub>3</sub> 、氟化物、HCl
光化学效应（POCP）	乙烯当量（kg）	CO、SO <sub>2</sub> 、NO <sub>2</sub> 、NMVOC、CH <sub>4</sub>
水体富营养化（EP）	磷酸根当量（kg）	NO、NO <sub>2</sub> 、NH <sub>3</sub>
人体健康损害（HTP）	1,4-二氯苯当量（kg）	SO <sub>2</sub> 、NO <sub>2</sub> 、粉尘、NH <sub>3</sub> 、NMVOC、As、Cd、Cr、Hg、Ni、Pb、V、Zn、Cu、氟化物、HCl、二恶英
不可再生资源消耗（ADP）	锑当量（kg）	煤、石油、天然气、石灰石、石膏、砂岩

### 3.3.3.2 特征化

分类完成后，下一个步骤是数据的特征化，其目的是将每一个影响项目中的不同影响物质转化和汇总成为统一的单元。具体的计算过程为：根据环境影响类型以及选用的模型，得到环境影响的特征化因子，将之前得到的生命周期清单数据转化为相应的环境影响参数，利用不同环境影响类型的参数结果来表现系统生命周期影响评价的特征。选取 CML 作为环境影响特征化的模型，选取的特征化因子计算如下：

#### (1) 温室效应 (GWP)

根据 2007 年联合国政府间气候变化专门委员会 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 第三次评估报告中定义 GWP 的计算方法，一种化学物质的全球暖化潜势定义为从开始释放一公斤该物质起，一段时间内辐射效应对时间的积分，相对于同条件下释放一公斤参考气体 (二氧化碳) 对应时间积分的比值<sup>[78]</sup>：

$$GWP(x) = \frac{\int_0^{TH} a_x \times x(t) dt}{\int_0^{TH} a_{ref} \times ref(t) dt} \quad (3-1)$$

式中： $GWP(x)$ 表示物质  $x$  在温室效应潜势方面的特征化因子；

TH 表示评估期间长度；

$a_x$  表示 1 公斤气体的辐射效率；

$x(t)$ 表示 1 公斤气体在  $t=0$  时间释放到大气后，随时间衰减之后的比例；

$ref$  表示表示参考物质，一般选用二氧化碳。

分子是待测化学物质积分量，分母是二氧化碳积分量，随着时间的变化，辐射效率  $a_x$  和  $a_r$  可能不是常数。在本项目中，选取 100 年作为评估期间长度，即选取  $GWP_{100}$ 。

#### (2) 酸化效应 (AP)

酸化对于土壤、地下水、地表水、生物机体和生态系统等都有多种影响，根据 CML 给出的方法，某种物质的酸化效应可按照下面的公式进行计算：

$$AP_{x,i} = \frac{\sum_j \sum_e A_{e \in j} \times t_{x,i,j} / CL_{u,x,e \in j}}{\sum_j \sum_e A_{e \in j}} \quad (3-2)$$

式中： $AP_{x,i}$  表示物质  $x$  在在地区  $i$  的酸化效应潜势方面的特征化因子；

$A_{e \in j}$  表示生态系统  $e$  的面积 (单位为  $\text{km}^2$ )；

$t_{x,i,j}$  是转化系数，表示在区域  $i$  中的网格单元中每千克酸性气体转化为沉降量的数值；

$CL_{u,x,e \in j}$  表示在生态系统  $e$  的网格单元中与酸化相关的酸性物质的临界负荷。

### (3) 光化学效应 (POCP)

光化学效应是大气中的自由基、碳氢化合物与氮氧化物通过光化学反应产生的, 其产物如果高度集中, 可能引发健康问题、植物毒性和原有物质的退化。最初估算 POCP 特征化因子是为了评估某物质在不同排放状态下产生光化学效应的潜势, 所以最初某物质的光化学效应特征化因子计算公式为:

$$POCP_i = \frac{a_i / b_i}{a_{ref} / b_{ref}} \quad (3-3)$$

式中:  $POCP_i$  表示物质  $i$  在光化学效应潜势方面的特征化因子;

$a_i$  表示物质  $i$  的排放变化导致的臭氧浓度变化量;

$b_i$  表示物质  $i$  的排放量;

$ref$  表示参考物质, 一般选用乙烯作为参考物质。

### (4) 水体富营养化 (EP)

水体富营养化是指由于大量的氮、磷、钾等元素排入到流速缓慢、更新周期长的地表水体中, 使藻类等水生生物大量生长繁殖, 有机物产生的速度远远超过消耗速度, 水体中有机物积蓄, 破坏水生生态平衡的过程。通常物质  $i$  的水体富营养化的特征化因子采用下面的公式计算:

$$EP_i = \frac{v_i / M_i}{v_{ref} / M_{ref}} \quad (3-4)$$

式中:  $EP_i$  表示物质  $i$  在水体富营养化潜势方面的特征化因子;

$v_i$  表示 1 摩尔物质  $i$  在水体富营养化方面的潜势;

$M_i$  表示物质  $i$  的质量;

$ref$  表示参考物质, 一般选用  $PO_4^{3-}$ 。

### (5) 人体健康损害 (HTP)

此项包含了环境中存在的对人体健康产生影响的有毒物质, 选取的影响时间长度为无限, 影响范围为全球。HTP 包含的污染物种类是这五个环境影响类别中最多的, 除了常见的工业废气外, 还包括了随粉尘排放到大气中的重金属元素。本项目中选用 Huijbregts 给出的公式作为有毒物质在人体健康损害潜势方面的特征化因子:

$$HTP_{i,comp} = \frac{\sum_r \sum_s PEI_{i,comp,r,s} \times E_{i,r} \times N_s}{\sum_r \sum_s PEI_{ref,comp,r,s} \times E_{ref,r} \times N_s} \quad (3-5)$$

式中： $HTP_{i,ecomp}$  表示有毒物质  $i$  在人体健康损害潜势方面的特征化因子；

$PEI_{i,ecomp,r,s}$  表示在地区  $s$  人体通过暴露途径  $r$  从初级排放源摄入有毒物质  $i$  的量；

$E_{i,r}$  是“效果因子”，表示有毒物质对人体毒性效能的大小；

$Ref$  表示参考物质，一般选用 1,4-二氯苯。

根据上述方法，选取的环境影响特征化因子列于表 3.3 中。

表 3.3 环境影响特征化因子

环境影响	温室效应	酸化效应	光化学效应	水体富营养化	人体健康危害
CO <sub>2</sub>	1.00E+00	0	0	0	0
CO	0	0	2.70E-02	0	0
SO <sub>2</sub>	0	1.20E+00	4.80E-02	0	9.60E-02
NO	0	7.60E-01	0	2.00E-01	0
NO <sub>2</sub>	0	5.00E-01	2.80E-02	1.30E-01	1.20E+00
粉尘	0	0	0	0	8.20E-01
NH <sub>3</sub>	0	1.60E+00	0	3.50E-01	1.00E-01
NMVOC	4.52E-02	0	1.50E-01	0	1.14E+01
CH <sub>4</sub>	2.50E+01	0	6.00E-03	0	0
N <sub>2</sub> O	3.10E+02	0	0	0	0
As	0	0	0	0	3.48E+05
COD	0	0	0	0	2.20E-02
Cd	0	0	0	0	1.45E+05
Cr	0	0	0	0	3.43E+06
Hg	0	0	0	0	6.01E+03
Ni	0	0	0	0	3.50E+04
Pb	0	0	0	0	4.67E+02
V	0	0	0	0	6.24E+03
Zn	0	0	0	0	1.04E+02
氟化物	0	1.60E+00	0	0	2.85E+03
二恶英	0	0	0	0	1.93E+09
Cu	0	0	0	0	4.30E+03
HCl	0	8.80E-01	0	0	5.00E-01
苯并(a)芘	0	0	0	0	2.50E+02
苯并(b)荧蒽	0	0	0	0	1.30E+04
苯并(k)荧蒽	0	0	0	0	1.30E+04
六氯苯	0	0	0	0	5.60E+06

## (6) 不可再生资源消耗 (ADP)

所有的工业化进程都必然以牺牲自然资源作为代价,而作为自然资源重要组成部分的矿产资源,具有不可再生性和耗竭性,理应成为生命周期清单和影响评价的重要组成部分。目前,有一种常用方法是采用资源开采量与储量的比例来表示该资源的耗竭程度,这里对这种方法进行修正以作为资源耗竭的特征化因子,具体计算公式如下:

$$ADP_i = \frac{D_{r_i} / (R_i)^2}{D_{r_{ref}} / (R_{ref})^2} \quad (3-6)$$

$$ADP = \sum ADP_i \times m_i \quad (3-7)$$

式中:  $ADP_i$  表示  $i$  种资源耗竭的特征化因子;

$R_i$  表示  $i$  资源的储量;

$D_i$  表示  $i$  资源的年开采量;

$Ref$  表示参考资源,一般选用金属锑;

$m_i$  表示第  $i$  项资源的消耗量;

$ADP$  表示资源耗竭的特征化参数结果。

国际上常选取金属锑作为参考资源,并将其耗竭系数作为资源当量因子的基准值。在本论文中,也选择金属锑作为参考资源,并将矿石资源分为化石资源和非金属矿产资源,相应的特征化因子分别进行计算。

非金属矿产资源的耗竭特征化因子仍旧采用公式(3-6)进行计算,根据《中国国土资源年鉴》和《中国矿产年鉴》,查到金属锑的储量为  $2.47E+06$  吨,年开采量为  $1.98E+5$  吨,因此根据公式(3-6)可计算出本论文中用到的非金属矿产资源的耗竭特征化因子,结果列于表 3.4 中。

表 3.4 部分非金属矿产资源的耗竭特征化因子

资源类别	年开采量 (t)	储量 (t)	特征化因子 (梯当量)
石膏	2.13E+07	5.88E+10	1.90E-07
水泥用灰岩	4.45E+08	6.59E+10	3.16E-06
水泥用凝灰岩	2.21E+05	7.63E+07	1.17E-03
水泥配料用黏土	6.10E+06	2.23E+09	3.78E-05
水泥配料用砂岩	3.47E+06	8.89E+07	1.35E-02
水泥标准砂	2.99E+05	1.00E+08	9.21E-04

化石燃料的耗竭问题可被定义为能源储量的损耗，单位采用千克标准煤。化石能源耗竭特征化因子的计算方法如下：

$$ADP_{i,eng} = \frac{Dr_{i,eng} \cdot \varepsilon / (R_{i,eng} \cdot \varepsilon)^2}{Dr_{ref} / (R_{ref})^2} \quad (3-8)$$

式中： $ADP_{i,eng}$  表示化石能源 i 的特征化因子；

$Dr_{i,eng}$  表示化石能源 i 的年开采量

$R_{i,eng}$  表示化石能源 i 的储量

$\varepsilon$  表示化石能源的折标准煤系数

$Ref$  表示参考资源，一般选用金属锑。

另外，根据《中国国土资源年鉴》和《中国矿产年鉴》，我国煤、石油和天然气的储量分别为 1.03E+12t、6.17E+09t 和 3.26E+12m<sup>3</sup>，年开采量分别为 1.96E+09t、1.75E+08t 和 4.08E+10m<sup>3</sup>，通过公式（3-8）及各种煤类、石油类和天然气类等化石燃料的折标准煤系数可计算出相应的特征化因子，其结果列于表 3.5 中。

表 3.5 化石燃料的折标准煤系数及特征化因子

资源类别	资源类别	折标准煤系数	特征化因子 (kg 梯当量/kg)
煤类	原煤	0.7143	7.97E-08
	洗精煤	0.9000	6.33E-08
	其他洗煤	0.2857	1.99E-07
	烟煤（化工用）	0.7636	7.45E-08
	烟煤（热力用）	0.6686	8.51E-08
石油类	原油	1.4286	9.91E-05
	汽油	1.4714	9.63E-05
	柴油	1.4571	9.72E-05
	燃料油	1.4286	9.91E-05
	炼厂干气	1.5714	9.01E-05
	其他石油制品	0.9715	1.46E-04
天然气类	天然气	1.3300	8.89E-08
	焦炉煤气	0.5714	2.07E-07
	其他煤气	0.1786	6.62E-07

### 3.3.3.3 标准化

不同环境影响类型特征化后的数值单位不同，既不能对在环境影响类型之间比较，也不能对整个过程的环境影响程度进行判断，因此需要将特征化的数值做标准化处理，将各环境影响类型转化为同一标准下的量化数据。这里，可以用环境负荷当量与环境负荷总当量之比值进行处理，称之为环境负荷相对指数：

环境负荷相对指数=环境负荷当量数/环境负荷总当量数

世界范围内的环境负荷总当量数如表 3.6 所列。

表 3.6 世界范围内的环境负荷总当量数

环境影响类型	单位（参照物）	世界环境负荷总当量数（kg）
温室效应（GWP）	kg（CO <sub>2</sub> 当量）	4.18E+13
酸化效应（AP）	kg（SO <sub>2</sub> 当量）	3.18E+11
光化学效应（POCP）	kg（NMVOC当量）	3.51E+11
水体富营养化（EP）	kg（PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> 当量）	1.58E+11
人体健康损害（HTP）	kg（1,4-DCB当量）	8.86E+12
不可再生资源消耗（ADP）	kg（锑当量）	2.14E+10

注：环境负荷总当量数是指全世界在单位时间内消耗的资源、能源总量和污染物排放总量，数据由北京工业大学环境材料与技术研究所提供。

### 3.3.3.4 加权综合评价

将环境影响类型转换为统一量纲的标准化处理后理论上可以相加求和，从而对不同生产工艺或产品的综合环境负荷进行定量对比分析。但是，不同环境影响类别之间的重要程度因地理环境、宏观政策、经济条件、人口分布等实际差异而有所不同，为此，还需要对不同环境影响类别确定各自的相对权重<sup>[79]</sup>。

对于不同环境影响类别相对权重的确定，本文采用了改进的模糊层次分析法来进行计算，具体改进过程详情见第 4 章。

### 3.3.4 结果解释

生命周期解释的目的是基于前几个阶段的工作来分析结果、形成结论、解释局限性、提出建议并报告生命周期解释的结果。根据 GB/T 24044-2008 和 ISO 14044-2006 的要求，生命周期评价的结果解释阶段包括识别、评估和报告 3 个要素。识别主要是基于清单分析和影响评价阶段的结果识别重大问题，评估主要是对整个生命周期评价的完整性、敏感性和一致性进行检查，报告主要是形成完整的研究报告。

### 3.4 生命周期评价理论的局限性

(一) 应用范围的局限性: 生命周期评价诞生本身是为环境服务的, 它只考虑了产品对生态环境、人体健康、资源消耗等方面的问题, 对于技术、经济或社会效果方面, 如质量、性能、成本、赢利、公众形象等方面的因素很少考虑。

(二) 评价范围的局限性: 生命周期评价只考虑了已经发生或一定会发生的环境影响因素, 没有考虑可能发生的环境风险、突发事件所造成的危害及其采取必要的预防应急措施。在评估时, 生命周期评价也没有考虑与有关环境的法律规定和限制是否有冲突。但对企业来说, 这些环境政策和法规都是十分重要的问题。

(三) 评估方法的局限性: 生命周期评价的评估方法既包括了客观成分, 也包括了主观成分。在评价中, 主观性的选择、假设和价值判断涉及多个方面, 如系统边界设定、数据来源的选择、环境损害种类的选择、计算方法的选择以及环境影响评估中的评价过程等。无论其评估的范围和详尽程度如何, 所有的生命周期评价方法都包含了假设、价值判断和折中这样的主观因素, 所以, 其结论需要完整的解释说明, 以区别由测量或自然科学知识得到的信息和基于假设和主观判断得出的结论。

(四) 时间和地域的局限性: 在不同的时间和地域范围内, 会有不同的环境编目数据, 相应的评估结果也只适合于某个时间段和某个区域, 这是由产品系统的时间性和地域性所决定的。

### 3.5 本章小结

这一章主要对生命周期评价理论进行了介绍, 是后面几章的研究基础。在这一章中, 首先对生命周期评价的起源和发展进行了梳理, 指出它起源于 1969 年 MRI 公司针对可口可乐饮料瓶的评价研究, 接下来的几十年, 随着区域性和全球性环境问题日益严重及环保意识不断加强, 生命周期评价理论得以迅速发展; 其次介绍了目前国际权威部门、政府及大型跨国企业集团给出的生命周期评价定义, 包括国际环境毒理学与化学学会、国际标准组织、美国环保局、美国 3M 公司等; 再次介绍了生命周期评价的理论框架, 框架主要包括目的与范围的确定、清单分析、影响评价和结果解释四个部分, 其中影响评价部分是整个生命周期评价理论的核心内容, 它又有分类、特征化、标准化和加权评价四个步骤; 最后从应用范围、评价范围、评估方法和评估的时间地点四个方面指出了生命周期评价理论的局限性。

## 第 4 章 基于模糊层次分析法的环境综合评价研究

对于不同环境影响类别相对权重的确定, 本文采用模糊层次分析法来进行计算。模糊层次分析法是在传统层次分析法的基础上演变而来, 它把模糊集理论和传统层次分析法相结合, 解决了传统层次分析只适用于确定型决策问题。

根据构造判断矩阵方法的不同, 模糊层次分析法分为基于加性传递性模糊互补判断矩阵和基于乘性传递性模糊互补判断矩阵的模糊层次分析法。对决策者来说, 基于乘性传递性、采取两两方案比较进而权重赋值的方法构建模糊互补判断矩阵, 更容易控制和把握, 因此由其确定的主观权重也更能反映决策者的主观意图。目前, 在大部分现有文献中, 所构建的这两种模糊互补判断矩阵的标度值多为 0 和 1 之间的精确数, 但是, 正如 Laarhoven 和 Pedrycz<sup>[61]</sup> 指出的那样, 既然决策者的意见本质上是模糊的, 两两比较的结果就应该表示成模糊数, 而不是精确数的形式。为了叙述方便, 规定若没有特别说明, 称标度值为模糊数的模糊互补判断矩阵为模糊数互补判断矩阵。

### 4.1 预备知识

**定义 4.1**<sup>[80]</sup> 设  $\mu_{\tilde{A}}$  是论域  $X$  到  $[0,1]$  闭区间上的任意映射

$$\begin{aligned} \mu_{\tilde{A}} : X &\rightarrow [0,1] \\ x &\rightarrow \mu_{\tilde{A}}(x) \end{aligned}$$

确定  $X$  上的一个模糊集  $\tilde{A}$ ,  $\mu_{\tilde{A}}$  叫做  $\tilde{A}$  的隶属函数,  $\mu_{\tilde{A}}(x)$  叫做  $x$  对  $\tilde{A}$  的隶属度, 记为:

$$\tilde{A} = \{(x, \mu_{\tilde{A}}(x)) \mid x \in X\}$$

显然, 模糊集  $\tilde{A}$  完全由隶属函数  $\mu_{\tilde{A}}(x)$  刻画。  $X$  上的全体模糊集所构成的集合记为  $F(X)$ 。如果  $\tilde{A} \in F(X)$ , 且  $\tilde{A} : X \rightarrow \{0,1\}$ , 则  $\tilde{A}$  为经典集, 从而经典集也可视为模糊集的特例。

**定义 4.2**<sup>[81]</sup> 若  $\tilde{p}$  为模糊数,  $\mu_{\tilde{p}}(x)$  为模糊数  $\tilde{p}$  的隶属函数, 而  $\alpha \in [0,1]$ , 记  $\tilde{p}(\alpha) = \{x \in X \mid \mu_{\tilde{p}}(x) \geq \alpha\}$ , 称  $\tilde{p}(\alpha)$  为模糊数  $\tilde{p}$  的  $\alpha$  截集。

**定义 4.3**<sup>[81]</sup> 实数域  $\mathbf{R}$  上的模糊集  $\tilde{A} \in F(\mathbf{R})$  称为  $\mathbf{R}$  上的一个模糊数, 如果  $\forall \alpha \in (0,1)$ ,  $\tilde{A}(\alpha)$  是有界闭区间。

梯形模糊数、三角模糊数和区间数是最常用的三种模糊数, 它们统称为 I 型模糊

数<sup>[82]</sup>。

**定义 4.4** 设  $\tilde{A} \in \tilde{\mathbf{R}}$ ，则

1)  $\tilde{A}$  为梯形模糊数，如果：

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x < b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c < x \leq d \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

简记为  $\tilde{A} = (a, b, c, d)$ ，其图形如图 4.1 (1) 所示：

2)  $\tilde{A}$  为三角模糊数，如果：

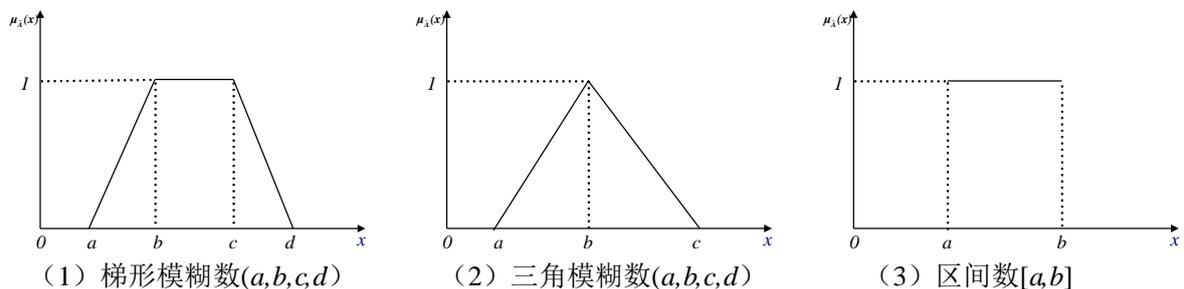
$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b < x \leq c \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

简记为  $\tilde{A} = (a, b, c)$ ，其图像如图 4.1 (2) 所示：

3)  $\tilde{A}$  为区间数，如果：

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 1, & a \leq x \leq b \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

简记为  $\tilde{A} = [a, b]$ ，其图像如图 4.1 (3) 所示：



**图 4.1 三种常见的模糊数**

本论文中所提到的模糊数均为正模糊数，对于（正）区间数  $\tilde{a} = [L_1, R_1]$  和  $\tilde{b} = [L_2, R_2]$ ，有以下基本运算<sup>[83]</sup>：

$$\begin{aligned} \tilde{a} + \tilde{b} &= [L_1 + L_2, R_1 + R_2], & \tilde{a} - \tilde{b} &= [L_1 - R_2, R_1 - L_2], \\ \tilde{a}\tilde{b} &= [L_1L_2, R_1R_2], & \tilde{a}/\tilde{b} &= [L_1/R_2, R_1/L_2], & \tilde{a}^{-1} &= [R_1^{-1}, L_1^{-1}] \end{aligned}$$

**定理 4.1**<sup>[81]</sup>  $\tilde{a}$  和  $\tilde{b}$  为模糊数, 其隶属函数分别为  $\mu_{\tilde{a}}(x)$  和  $\mu_{\tilde{b}}(y)$ ,  $*$  可表示  $+$ 、 $-$ 、 $\times$  和  $\div$  等运算, 若  $\tilde{c} = \tilde{a} * \tilde{b}$ , 则

$$\mu_{\tilde{c}}(z) = \bigvee_{x*y=z} (\mu_{\tilde{a}}(x) \wedge \mu_{\tilde{b}}(y)) \quad (4-1)$$

**定理 4.2**<sup>[84]</sup> (分解定理) 设  $\tilde{p}$  为模糊数,  $\tilde{p}(\alpha)$  为模糊数  $\tilde{p}$  的  $\alpha$  截集, 则

$$\tilde{p} = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} \alpha \tilde{p}(\alpha)$$

显然, 一方面, 一个有界模糊数的  $\alpha$  截集为区间数, 而区间数也可看作是一簇精确数的集合。另一方面, 若知道了一个有界模糊数在所有  $\alpha$  截集下的区间数, 则经过分解定理可得出原模糊数。因此分解定理可看作是连接模糊集和经典集的桥梁, 很多模糊集理论中的问题, 都可以通过  $\alpha$  截集求解转化后的隶属于经典集范畴的问题, 再经过分解定理得出原问题的解。

**定义 4.5**<sup>[85]</sup> 矩阵  $\tilde{P} = (\tilde{p}_{ij})_{n \times n}$ , 其中  $\tilde{p}_{ij} = [\tilde{p}_{ij}^L, \tilde{p}_{ij}^R]$  为区间数, 若对于  $\forall i, j$  有  $\tilde{p}_{ij}^L + \tilde{p}_{ji}^R = \tilde{p}_{ij}^R + \tilde{p}_{ji}^L = 1$ , 则称矩阵  $\tilde{P}$  为区间数互补判断矩阵。

**定义 4.6**<sup>[86]</sup> 矩阵  $\tilde{Q} = (\tilde{q}_{ij})_{n \times n}$ , 其中  $\tilde{q}_{ij} = [\tilde{q}_{ij}^L, \tilde{q}_{ij}^R]$  为区间数, 若对于  $\forall i, j \in N$  有  $\tilde{q}_{ij}^L \tilde{q}_{ji}^R = \tilde{q}_{ij}^R \tilde{q}_{ji}^L = 1$ , 则称矩阵  $\tilde{Q}$  为区间数互反判断矩阵。

对模糊数互补判断矩阵研究最多的是 I 型模糊数 (区间数、三角模糊数和梯形模糊数) 互补判断矩阵, 而无论何种模糊数互补判断矩阵, 都可定义如下:

**定义 4.7**<sup>[87]</sup> 若矩阵  $\tilde{P} = (\tilde{p}_{ij})_{n \times n}$ , 其中  $\exists i, j$ ,  $\tilde{p}_{ij}$  为模糊数, 若其任意  $\alpha$  解集  $\tilde{P}(\alpha) = (\tilde{p}_{ij}(\alpha))_{n \times n}$  为区间数互补判断矩阵, 则矩阵  $\tilde{P}$  为模糊数互补判断矩阵。

同样, 也可以对模糊数互反判断矩阵做如下定义:

**定义 4.8** 若矩阵  $\tilde{Q} = (\tilde{q}_{ij})_{n \times n}$ , 其中  $\exists i, j$ ,  $\tilde{q}_{ij}$  为模糊数, 若其任意  $\alpha$  解集  $\tilde{Q}(\alpha) = (\tilde{q}_{ij}(\alpha))_{n \times n}$  为区间数互反判断矩阵, 则矩阵  $\tilde{Q}$  为模糊数互反判断矩阵。

苏为华<sup>[88]</sup>曾通过对两两比较法进行改造而提出了一种“互补式两两比较构权法”, 即二元权分配法, 构造的矩阵称之为二元权分配判断矩阵。

**定义 4.9**<sup>[88]</sup>  $p_{ij}$  为精确数, 它表示决策对比两个方案或指标  $i$  和  $j$  的重要性而对  $i$  进行权重分配, 则称分配型矩阵  $P = (p_{ij})_{n \times n}$  为二元权分配判断矩阵。

根据此定义, 若  $i$  指标与  $j$  指标权重分别为  $w_i$  和  $w_j$ , 则分配型矩阵  $P = (p_{ij})_{n \times n}$  中的元素  $p_{ij} = w_i / (w_i + w_j)$ 。例如,  $i$  指标与  $j$  指标相比较, 权重分配比例为三七开, 则  $p_{ij} = 0.3$ ,  $p_{ji} = 0.7$ 。

类似地, 以模糊数为指标值、以二元权分配为构造方法建立的矩阵为模糊二元权

分配判断矩阵，即

**定义 4.10**  $\tilde{p}_{ij}$  为模糊数，它表示决策对比两个方案或指标  $i$  和  $j$  的重要性而对  $i$  进行不确定权重分配，则称分配型矩阵  $\tilde{P} = (\tilde{p}_{ij})_{n \times n}$  为模糊二元权分配判断矩阵。

## 4.2 模糊数互补判断矩阵的乘性一致性

判断专家给出的模糊数互补判断矩阵是否具有一致性是一个很重要的问题，因为它直接影响到最终的排序结果能否真实地反映客观实际情况<sup>[87]</sup>。目前，对于模糊数互补判断矩阵乘性一致性的定义主要有以下几个：

**定义 4.11**<sup>[89]</sup> 对于区间数互补判断矩阵  $\tilde{P} = (\tilde{p}_{ij})_{n \times n}$ ，其中  $\tilde{p}_{ij} = [\tilde{p}_{ij}^L, \tilde{p}_{ij}^R]$  为区间数，满足  $\forall i, j, k$ ，有

$$\frac{\tilde{p}_{ij}^L \tilde{p}_{jk}^L}{\tilde{p}_{ji}^R \tilde{p}_{kj}^R} = \frac{\tilde{p}_{ik}^L}{\tilde{p}_{ki}^R} \quad (4-2)$$

$$\frac{\tilde{p}_{ij}^R \tilde{p}_{jk}^R}{\tilde{p}_{ji}^L \tilde{p}_{kj}^L} = \frac{\tilde{p}_{ik}^R}{\tilde{p}_{ki}^L} \quad (4-3)$$

则称区间数互补判断矩阵为乘性一致性区间数互补判断矩阵

然而，朱吉乔在论文[87]中已经证明，若一个区间数互补判断矩阵满足公式(4-2)和公式(4-3)，则这个矩阵一定是精确数互补判断矩阵，因此文献[89]给出乘性一致性区间数互补判断矩阵的定义 4.11 并不合理。另外，徐泽水曾仿照 Tanino T 的定义，给出了乘性一致性三角模糊数互补判断矩阵的定义：

**定义 4.12**<sup>[90]</sup>  $\tilde{P} = (\tilde{p}_{ij})_{n \times n}$  为三角模糊数互补判断矩阵，若

$$\tilde{p}_{ik} \tilde{p}_{kj} \tilde{p}_{ji} = \tilde{p}_{ki} \tilde{p}_{jk} \tilde{p}_{ij}, \quad \forall i, j, k \quad (4-4)$$

则称  $\tilde{P}$  是乘性一致性三角模糊数互补判断矩阵。

其实，定义 4.12 定义的乘性一致性三角模糊数互补判断矩阵也不存在，在分析定义 4.12 之前，我们先来对定理 4.1 进行深入研究。若给出模糊数  $\tilde{a}$ 、 $\tilde{b}$  和运算法则  $*$ ，则可以利用定理 4.1 中的公式(4-1)来求得模糊数  $\tilde{c}$ 。以区间数为例，当  $\tilde{a} = [3, 5]$ ， $\tilde{b} = [4, 6]$ ， $*$  为  $+$  时：

$$\mu_{\tilde{c}}(z) = \bigvee_{x+y=z} (\mu_{\tilde{a}}(x) \wedge \mu_{\tilde{b}}(y))$$

由上式可知，若存在  $x \in [3, 5]$  和  $y \in [4, 6]$  满足  $z = x + y$ ，则必有  $\mu_{\tilde{c}}(z) = 1$ ，因为  $x + y \in [7, 11]$ ，因此当  $z \in [7, 11]$  时， $\mu_{\tilde{c}}(z) = 1$ ，即  $\tilde{c} = \tilde{a} + \tilde{b} = [7, 11]$ 。而当  $\tilde{c} = [7, 11]$ ，

$\tilde{a}=[3,5]$ , \* 为 - 时, 同样由上述分析可知  $\tilde{c}-\tilde{a}=[2,8] \neq \tilde{b}$ 。单从模糊数间的运算来看, 模糊数间的 + 和 - 运算已经不再是一对逆运算, 同样  $\times$  和  $\div$  也不再是一对逆运算。分析其原因不难发现, 若  $\tilde{c}=\tilde{a}+\tilde{b}$ , 其中  $x \in \tilde{a}$ ,  $y \in \tilde{b}$ , 令  $z=x+y$ , 则  $z$  的值域即为  $\tilde{c}$ 。需要注意的是, 在方程  $z=x+y$  中,  $x$  和  $y$  可以在各自隶属的区间内任意取值, 而  $z$  的取值只能随着  $x$  和  $y$  的确定而确定, 因此这里可以将  $x$  和  $y$  称之为自变量,  $z$  为因变量, 相对应地  $\tilde{a}$  和  $\tilde{b}$  为自变区间数,  $\tilde{c}$  为因变区间数。同样地, 若  $\tilde{b}=\tilde{c}-\tilde{a}$ , 其中  $z \in \tilde{c}$ ,  $x \in \tilde{a}$ , 令  $y=z-x$ , 则  $y$  的值域即为  $\tilde{b}$ , 这时  $z$ 、 $x$  和  $\tilde{c}$ 、 $\tilde{a}$  分别成了自变量和自变区间数、 $y$  和  $\tilde{b}$  成了因变量和因变区间数。由于  $\tilde{a}$ 、 $\tilde{b}$ 、 $\tilde{c}$  和  $x$ 、 $y$ 、 $z$  自身变化性质的不同, 其运算结果也随之发生了变化。

通常若  $\tilde{c}=\tilde{a}*\tilde{b}$ , 一般认为  $\tilde{a}$  和  $\tilde{b}$  为自变模糊数,  $\tilde{c}$  为因变模糊数。如假设有一房间, 室内的温度由两台空调调节, 现在知道一台空调可调高 3~5 摄氏度, 另一台可调高 4~6 摄氏度, 则房间内的温度可被调高 7~11 摄氏度。让区间数  $\tilde{a}=[3,5]$  和  $\tilde{b}=[4,6]$  分别表示两台空调可调高度数,  $\tilde{c}$  表示房间温度调高的度数, 则  $\tilde{c}=\tilde{a}+\tilde{b}=[7,11]$ 。从另一角度考虑, 现在知道房间的温度可被调高 7~11 摄氏度, 又知道其中一台空调可调高 3~5 摄氏度, 那么另一台可调高多少摄氏度呢? 显然也是 4~6 摄氏度, 即  $\tilde{c}=[7,11]$ ,  $\tilde{a}=[3,5]$ ,  $\tilde{b}=\tilde{c}-\tilde{a}=[4,6]$ , 这时公式 (3-1) 已不成立, 而模糊数的 + 和 - 却成了一对逆运算。深入分析可知, 是两台空调调控温度的变化而导致室温发生了变化, 也就是说两台空调调控温度是原因, 室温变化为结果, 因此无论求房间的温度还是其中一台空调调控的温度, 总有  $\tilde{a}$  和  $\tilde{b}$  为自变模糊数,  $\tilde{c}$  为因变模糊数。

由上面的分析可知, 求解等式  $\tilde{c}=\tilde{a}*\tilde{b}$ , 实际上是对  $z=x*y$  进行分析, 其中  $x \in \tilde{a}$ ,  $y \in \tilde{b}$ ,  $z \in \tilde{c}$ 。这里不妨设满足  $x \in \tilde{a}$ ,  $y \in \tilde{b}$ ,  $z \in \tilde{c}$ ,  $z=x*y$  的一组  $(x, y, z)$  叫做  $(\tilde{a}, \tilde{b}, \tilde{c})$  的一个代表系统, 定义一簇模糊数的“代表系统”如下:

**定义 4.13** 令  $\mathcal{A}=(\tilde{a}_1, \tilde{a}_2, \dots, \tilde{a}_n, \tilde{b}_1, \tilde{b}_2, \dots, \tilde{b}_m)$ , 其中  $\tilde{a}_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 和  $\tilde{b}_j$  ( $j=1, 2, \dots, m$ ) 为区间数, 且

$$f_1(\tilde{a}_1, \tilde{a}_2, \dots, \tilde{a}_n) = f_2(\tilde{b}_1, \tilde{b}_2, \dots, \tilde{b}_m)$$

如果  $x_i \in \tilde{a}_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ),  $y_j \in \tilde{b}_j$  ( $j=1, 2, \dots, m$ ), 且

$$f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = f_2(y_1, y_2, \dots, y_m)$$

则称  $(x_1, x_2, \dots, x_n, y_1, y_2, \dots, y_m)$  叫做  $\mathcal{A}$  的一个代表系统。

通常, 在含有  $n$  个变量的  $m$  个线性无关的方程中, 变量的自由度为  $n-m$ , 因此等式  $\tilde{c}=\tilde{a}*\tilde{b}$  的自由度为 2, 由上面的分析可得出如下结论:

**定理 4.3**  $\tilde{a}$ 、 $\tilde{b}$ 、 $\tilde{c}$  为区间数，且  $\tilde{c} = \tilde{a} * \tilde{b}$ ，若  $(x, y, z)$  为  $(\tilde{a}, \tilde{b}, \tilde{c})$  的代表系统，则

① 若  $\tilde{a}$ 、 $\tilde{b}$  为自变区间数， $\tilde{c}$  为因变区间数，则任意  $x \in \tilde{a}$ ， $y \in \tilde{b}$ ，总有  $z \in \tilde{c}$ ，且对任意  $z \in \tilde{c}$ ，总存在  $x \in \tilde{a}$ ， $y \in \tilde{b}$  满足  $z = x * y$ ；

② 若  $\tilde{a}$ 、 $\tilde{c}$  为自变区间数， $\tilde{b}$  为因变区间数，则任意  $x \in \tilde{a}$ ， $z \in \tilde{c}$ ，总有  $y \in \tilde{b}$ ，且对任意  $y \in \tilde{b}$ ，总存在  $x \in \tilde{a}$ ， $z \in \tilde{c}$  满足  $z = x * y$ ；

③ 若  $\tilde{b}$ 、 $\tilde{c}$  为自变区间数， $\tilde{a}$  为因变区间数，则任意  $y \in \tilde{b}$ ， $z \in \tilde{c}$ ，总有  $x \in \tilde{a}$ ，且对任意  $x \in \tilde{a}$ ，总存在  $y \in \tilde{b}$ ， $z \in \tilde{c}$  满足  $z = x * y$ 。

下面我们来对定义 4.12 进行分析，设  $\alpha \in [0, 1]$ ，则三角模糊数互补判断矩阵  $\tilde{P} = (\tilde{p}_{ij})_{n \times n}$  的  $\alpha$  截集  $\tilde{P}(\alpha) = (\tilde{p}_{ij}(\alpha))_{n \times n}$  为区间数互补判断矩阵，其中  $\tilde{p}_{ij}(\alpha) = [\tilde{p}_{ij}^L(\alpha), \tilde{p}_{ij}^R(\alpha)]$ 。若公式 (4-4) 成立，则

$$\tilde{p}_{ik}(\alpha)\tilde{p}_{kj}(\alpha)\tilde{p}_{ji}(\alpha) = \tilde{p}_{ki}(\alpha)\tilde{p}_{jk}(\alpha)\tilde{p}_{ij}(\alpha), \quad \forall i, j, k \quad (4-5)$$

设  $X = (x_{ij})_{n \times n}$  为  $\tilde{P}(\alpha) = (\tilde{p}_{ij}(\alpha))_{n \times n}$  的一个代表系统，由元素间的互补性及定义 4.13 可知  $x_{ij} \in \tilde{p}_{ij}(\alpha)$ ，且对  $\forall i, j, k$

$$\begin{cases} x_{ik} + x_{ki} = 1 \\ x_{kj} + x_{jk} = 1 \\ x_{ji} + x_{ij} = 1 \\ x_{ik}x_{kj}x_{ji} = x_{ki}x_{jk}x_{ij} \end{cases} \quad (4-6)$$

从而

$$\frac{1}{x_{ij}} - 1 = \left( \frac{1}{x_{ik}} - 1 \right) \left( \frac{1}{x_{kj}} - 1 \right), \quad \forall i, j, k \quad (4-7)$$

显然，在 (4-7) 中， $\forall i, j, k$ ， $x_{ij}$ 、 $x_{ik}$  和  $x_{kj}$  的自由度为 2。现在假设  $x_{ik}$  和  $x_{kj}$  为自变量， $x_{ij}$  为因变量（其它情况类似），由前可知， $x_{ij}$ 、 $x_{ik}$  和  $x_{kj}$  一定满足下面两个条件：

- 1) 任意  $x_{ik} \in \tilde{p}_{ik}(\alpha)$  和  $x_{kj} \in \tilde{p}_{kj}(\alpha)$ ，若公式 (4-7) 成立，则  $x_{ij} \in \tilde{p}_{ij}(\alpha)$ 。
- 2) 对任意  $x_{ij} \in \tilde{p}_{ij}(\alpha)$ ，总存在  $x_{ik} \in \tilde{p}_{ik}(\alpha)$  和  $x_{kj} \in \tilde{p}_{kj}(\alpha)$ ，使公式 (4-7) 成立。

现在证明：若  $\tilde{P}(\alpha) = (\tilde{p}_{ij}(\alpha))_{n \times n}$  的代表系统  $X = (x_{ij})_{n \times n}$  满足上述的 1) 和 2)，则对  $\forall i, j$  必有  $\tilde{p}_{ij}^L(\alpha) = \tilde{p}_{ij}^R(\alpha)$ 。

首先证明当  $x_{ij} = \tilde{p}_{ij}^L(\alpha)$  时， $x_{ik} = \tilde{p}_{ik}^L(\alpha)$ ， $x_{kj} = \tilde{p}_{kj}^L(\alpha)$ ，否则会出现以下四种情况：

- ①  $x_{ik} < \tilde{p}_{ik}^L(\alpha)$  或  $x_{kj} < \tilde{p}_{kj}^L(\alpha)$
- ②  $x_{ik} > \tilde{p}_{ik}^L(\alpha)$ ， $x_{kj} = \tilde{p}_{kj}^L(\alpha)$

$$\textcircled{3} \quad x_{ik} = \tilde{p}_{ik}^L(\alpha), \quad x_{kj} > \tilde{p}_{kj}^L(\alpha)$$

$$\textcircled{4} \quad x_{ik} > \tilde{p}_{ik}^L(\alpha), \quad x_{kj} > \tilde{p}_{kj}^L(\alpha)$$

显然, ①与 2) 相矛盾。对于②、③和④, 若取  $x_{ik} = \tilde{p}_{ik}^L(\alpha)$ ,  $x_{kj} = \tilde{p}_{kj}^L(\alpha)$ , 则必有  $x_{ij} < \tilde{p}_{ij}^L(\alpha)$ , 这与 1) 相矛盾, 因此命题得证。以此类推可知:

$$x_{ij} = \tilde{p}_{ji}^L(\alpha), \quad \forall i, j$$

从而  $\forall \alpha$ ,

$$\tilde{p}_{ij}^L(\alpha) = x_{ij} = 1 - x_{ji} = 1 - \tilde{p}_{ji}^L(\alpha) = \tilde{p}_{ij}^R(\alpha), \quad \forall i, j$$

这说明, 若三角模糊数互补判断矩阵  $\tilde{P} = (\tilde{p}_{ij})_{n \times n}$  中的元素满足公式 (4-4), 则  $\tilde{P}$  一定是精确数互补判断矩阵。换句话说, 满足定义 4.12 的乘性一致性三角模糊数互补判断矩阵并不存在。

任意 I 型模糊数的  $\alpha$ -截集均为区间数, 因此这里可以先定义乘性一致性区间数互补判断矩阵, 进而利用模糊集截集理论对乘性一致性模糊数互补判断矩阵进行定义。区间数可看作某一区间的精确数的集合, 而精确数互补判断矩阵的乘性一致性研究已经相当成熟, 为了充分利用其研究成果, 可先定义乘性一致性区间数互补判断矩阵。

以定义 4.5 为例, 由于考虑到了精确数间的运算法则已不同于模糊数, 因此在定义区间数互补判断矩阵时并没有对精确数互补判断矩阵的定义加以直接引用, 而是利用表示判断矩阵中区间数的端点数值间的关系重新进行了定义。在定义 4.5 中, 对于  $\forall i, j$  有  $\tilde{p}_{ij}^L + \tilde{p}_{ji}^R = 1$  和  $\tilde{p}_{ij}^R + \tilde{p}_{ji}^L = 1$ , 因此  $\tilde{p}_{ij}^L$  和  $\tilde{p}_{ji}^R$  或者  $\tilde{p}_{ij}^R$  和  $\tilde{p}_{ji}^L$  可看作是精确数互补判断矩阵中的一对互补元素, 由于  $\tilde{p}_{ij}^L$ ,  $\tilde{p}_{ji}^R$ ,  $\tilde{p}_{ij}^R$ ,  $\tilde{p}_{ji}^L$  为原区间数互补判断矩阵中表示区间数元素的端点, 因此可将由满足  $\forall i, j$ ,  $\tilde{p}_{ij}^L + \tilde{p}_{ji}^R = 1$  或者  $\tilde{p}_{ij}^R + \tilde{p}_{ji}^L = 1$  组成的矩阵称之为原区间数互补判断矩阵的导出精确数互补判断矩阵。

**定义 4.14**  $\tilde{P} = (\tilde{p}_{ij})_{n \times n}$  为区间数互补判断矩阵, 其中  $\tilde{p}_{ij} = [\tilde{p}_{ij}^L, \tilde{p}_{ij}^R]$ , 则称判断矩阵  $P^1 = (p_{ij}^1)_{n \times n}$  或  $P^2 = (p_{ij}^2)_{n \times n}$  为矩阵  $\tilde{P} = (\tilde{p}_{ij})_{n \times n}$  的导出精确数互补判断矩阵, 称  $P^1 = (p_{ij}^1)_{n \times n}$  和  $P^2 = (p_{ij}^2)_{n \times n}$  为矩阵  $\tilde{P} = (\tilde{p}_{ij})_{n \times n}$  的一对共轭精确数互补判断矩阵, 其中对于  $\forall i, j$ , 有  $p_{ij}^1, p_{ij}^2 \in \{\tilde{p}_{ij}^L, \tilde{p}_{ij}^R\}$  且

$$1) \quad \text{若 } p_{ij}^1 = \tilde{p}_{ij}^L, \text{ 则 } p_{ji}^1 = \tilde{p}_{ji}^R, p_{ij}^2 = \tilde{p}_{ij}^R, p_{ji}^2 = \tilde{p}_{ji}^L$$

$$2) \quad \text{若 } p_{ij}^1 = \tilde{p}_{ij}^R, \text{ 则 } p_{ji}^1 = \tilde{p}_{ji}^L, p_{ij}^2 = \tilde{p}_{ij}^L, p_{ji}^2 = \tilde{p}_{ji}^R$$

显然, 在一个  $n \times n$  的区间数互补判断矩阵中, 共有  $2^k$  个导出精确数互补判断矩阵和  $2^{k-1}$  对共轭精确数互补判断矩阵, 其中  $k = n(n-1)/2$  为原区间数互补判断矩阵的自由度。有了以上导出精确数互补判断矩阵和共轭精确数互补判断矩阵的概念, 可以对

区间数互补判断矩阵进行如下定义:

**定义 4.15** 对于区间数互补判断矩阵  $\tilde{P} = (\tilde{p}_{ij})_{n \times n}$ , 其中  $\tilde{p}_{ij} = [\tilde{p}_{ij}^L, \tilde{p}_{ij}^R]$  为区间数, 若存在  $\tilde{p}$  的一对共轭判断矩阵  $P^1 = (p_{ij}^1)_{n \times n}$  和  $P^2 = (p_{ij}^2)_{n \times n}$  均为乘性一致性精确数互补判断矩阵, 则称  $\tilde{p}$  为乘性一致性区间数互补判断矩阵。

**例 1:** 有一区间数互补判断矩阵

$$\tilde{P} = \begin{bmatrix} [\frac{1}{2}, \frac{1}{2}] & [\frac{2}{7}, \frac{2}{5}] & [\frac{1}{3}, \frac{3}{8}] & [\frac{9}{13}, \frac{3}{4}] \\ [\frac{3}{5}, \frac{5}{7}] & [\frac{1}{2}, \frac{1}{2}] & [\frac{3}{7}, \frac{3}{5}] & [\frac{9}{11}, \frac{45}{53}] \\ [\frac{5}{8}, \frac{2}{3}] & [\frac{2}{5}, \frac{4}{7}] & [\frac{1}{2}, \frac{1}{2}] & [\frac{15}{19}, \frac{6}{7}] \\ [\frac{1}{4}, \frac{4}{13}] & [\frac{8}{53}, \frac{2}{11}] & [\frac{1}{7}, \frac{4}{19}] & [\frac{1}{2}, \frac{1}{2}] \end{bmatrix}$$

如果令

$$P^1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{2}{5} & \frac{1}{3} & \frac{3}{4} \\ \frac{3}{5} & \frac{1}{2} & \frac{3}{7} & \frac{9}{11} \\ \frac{5}{8} & \frac{2}{7} & \frac{1}{2} & \frac{15}{19} \\ \frac{2}{3} & \frac{4}{7} & \frac{1}{2} & \frac{6}{7} \\ \frac{1}{4} & \frac{2}{11} & \frac{1}{7} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}, \quad P^2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{2}{7} & \frac{3}{8} & \frac{9}{13} \\ \frac{5}{7} & \frac{1}{2} & \frac{3}{5} & \frac{45}{53} \\ \frac{5}{8} & \frac{2}{5} & \frac{1}{2} & \frac{15}{19} \\ \frac{8}{5} & \frac{4}{7} & \frac{2}{2} & \frac{19}{7} \\ \frac{4}{13} & \frac{8}{53} & \frac{4}{19} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

则  $P^1$  和  $P^2$  为原区间数互补判断矩阵  $\tilde{p}$  的一对共轭精确数互补判断矩阵, 且容易证明,  $P^1$  和  $P^2$  均为乘性一致性精确数互补判断矩阵, 因此  $\tilde{p}$  为乘性一致性区间数互补判断矩阵。

因为任意一个有界模糊数的  $\alpha$  解集均为区间数, 因此借助定义 4.15 可对乘性一致性模糊数互补判断矩阵进行如下定义:

**定义 4.16**  $\tilde{P} = (\tilde{p}_{ij})_{n \times n}$  为模糊数互补判断矩阵, 若  $\forall \alpha \in [0, 1]$ ,  $\tilde{P}(\alpha) = (\tilde{p}_{ij}(\alpha))_{n \times n}$  为乘性一致性区间数互补判断矩阵, 则称  $\tilde{P}$  为乘性一致性模糊数互补判断矩阵。

类似地, 可定义一致性区间数互反判断矩阵和一致性模糊数互反判断矩阵:

**定义 4.17** 对于区间数互反判断矩阵  $\tilde{Q} = (\tilde{q}_{ij})_{n \times n}$ , 若存在矩阵  $Q^1 = (q_{ij}^1)_{n \times n}$  和  $Q^2 = (q_{ij}^2)_{n \times n}$  均为一致性精确数互反判断矩阵, 其中

- 1) 若  $q_{ij}^1 = \tilde{q}_{ij}^L$ , 则  $q_{ji}^1 = \tilde{q}_{ji}^R, q_{ij}^2 = \tilde{q}_{ij}^R, q_{ji}^2 = \tilde{q}_{ji}^L$
- 2) 若  $q_{ij}^1 = \tilde{q}_{ij}^R$ , 则  $q_{ji}^1 = \tilde{q}_{ji}^L, q_{ij}^2 = \tilde{q}_{ij}^L, q_{ji}^2 = \tilde{q}_{ji}^R$

则  $\tilde{Q}$  为一致性区间数互反判断矩阵

**定义 4.18** 对于模糊数互反判断矩阵  $\tilde{Q} = (\tilde{q}_{ij})_{n \times n}$ , 若  $\forall \alpha \in [0, 1]$ ,  $\tilde{Q}(\alpha) = (\tilde{q}_{ij}(\alpha))_{n \times n}$  为一致性区间数互反判断矩阵, 则称  $\tilde{Q}$  为一致性模糊数互反判断矩阵。

### 4.3 两类模糊数矩阵的相互转化关系

**定理 4.4** 设  $\tilde{P} = (\tilde{p}_{ij})_{n \times n}$  为模糊数互补判断矩阵, 则通过下式

$$\tilde{q}_{ij} = \frac{\tilde{p}_{ij}}{1 - \tilde{p}_{ij}}, \quad \forall i, j \quad (4-8)$$

可得到模糊数互反判断矩阵  $\tilde{Q} = (\tilde{q}_{ij})_{n \times n}$ , 且若  $\tilde{P} = (\tilde{p}_{ij})_{n \times n}$  为乘性一致性模糊数互补判断矩阵, 则通过上式得到的矩阵  $\tilde{Q} = (\tilde{q}_{ij})_{n \times n}$  为一致性模糊数互反判断矩阵。

证明:  $\tilde{P} = (\tilde{p}_{ij})_{n \times n}$  为模糊数互补判断矩阵, 则对于任意  $\alpha$  有  $\tilde{p}_{ij}^L + \tilde{p}_{ji}^R = \tilde{p}_{ij}^R + \tilde{p}_{ji}^L = 1$ , 于是

$$\tilde{q}_{ij}^L = \frac{\tilde{p}_{ij}^L}{1 - \tilde{p}_{ij}^L} = \frac{1 - \tilde{p}_{ji}^R}{\tilde{p}_{ji}^R} = \frac{1}{\tilde{q}_{ji}^R}, \quad \tilde{q}_{ij}^R = \frac{\tilde{p}_{ij}^R}{1 - \tilde{p}_{ij}^R} = \frac{1 - \tilde{p}_{ji}^L}{\tilde{p}_{ji}^L} = \frac{1}{\tilde{q}_{ji}^L}$$

因此  $\tilde{Q} = (\tilde{q}_{ij})_{n \times n}$  为模糊数互反判断矩阵。

若  $\tilde{P} = (\tilde{p}_{ij})_{n \times n}$  为乘性一致性模糊数互补判断矩阵, 则  $\forall \alpha \in [0, 1]$ ,  $\tilde{P}(\alpha) = (\tilde{p}_{ij}(\alpha))_{n \times n}$  为乘性一致性区间数互补判断矩阵, 即存在判断矩阵  $P^1(\alpha) = (p_{ij}^1(\alpha))_{n \times n}$  和  $P^2(\alpha) = (p_{ij}^2(\alpha))_{n \times n}$  均为乘性一致性精确数互补判断矩阵, 其中  $P^1(\alpha)$  和  $P^2(\alpha)$  满足定义 4.14 中的 1) 或 2), 因此对于  $\forall i, j, k$ ,

$$\frac{1}{q_{ij}^1(\alpha)} = \frac{1}{p_{ij}^1(\alpha)} - 1 = \left(\frac{1}{p_{ik}^1(\alpha)} - 1\right) \left(\frac{1}{p_{kj}^1(\alpha)} - 1\right) = \frac{1}{q_{ik}^1(\alpha)q_{kj}^1(\alpha)}$$

$$\frac{1}{q_{ij}^2(\alpha)} = \frac{1}{p_{ij}^2(\alpha)} - 1 = \left(\frac{1}{p_{ik}^2(\alpha)} - 1\right) \left(\frac{1}{p_{kj}^2(\alpha)} - 1\right) = \frac{1}{q_{ik}^2(\alpha)q_{kj}^2(\alpha)}$$

即  $q_{ij}^1(\alpha) = q_{ik}^1(\alpha)q_{kj}^1(\alpha)$ ,  $q_{ij}^2(\alpha) = q_{ik}^2(\alpha)q_{kj}^2(\alpha)$ , 其中  $q_{ij}^1(\alpha)$  和  $q_{ij}^2(\alpha)$  满足定义 4.17 中的 1) 和 2)。这说明  $q_{ij}^1(\alpha)$  和  $q_{ij}^2(\alpha)$  为满足定义 4.17 中的 1) 和 2) 的精确数互反判断矩阵, 因此  $\tilde{Q} = (\tilde{q}_{ij})_{n \times n}$  为一致性模糊数互反判断矩阵。

由基于乘性一致性的模糊数互补判断矩阵和模糊数互反判断矩阵之间的转换关系, 结合经典集中精确数互反判断矩阵的权重求解算法, 就可以对基于二元权分配判断矩阵的模糊数互补判断矩阵的权重进行求解了。

#### 4.4 基于模糊数互补判断矩阵的模糊权重求解算法

基于二元权分配方式建立的模糊数互补判断矩阵和模糊数互反判断矩阵可以相互转化，而分解定理就像是一座桥梁，能将模糊集和经典集连接起来。目前对于经典的互反判断矩阵的权重求解研究已经取得了丰硕的成果，因此，为了充分利用前人的研究成果，这里把决策者经过两两重要性比较得出的模糊数二元权分配判断矩阵利用定理 4.4 转化为模糊数互反判断矩阵，然后利用和积法建立线性规划模型进行权重求解。当然，为了使求得的权重能够真实客观的反应现实情况，在这之前需要利用文献 [91] 给出的方法对建立的模糊数互补判断矩阵进行一致性分析和调整。整个过程详细叙述如下：

**Step1:** 设决策者主观地给出各属性重要程度两两比较值或模糊语言，然后转化成模糊数，得到模糊二元权分配判断矩阵；

**Step2:** 设定满意乘性一致性阈值；

**Step3:** 利用文献[87]对模糊二元权分配判断矩阵的一致性进行判断，若原矩阵满足满意一致性，则直接转下一步，否则依据[91]中的算法并结合决策者的意见进行调整，直到调整后的矩阵满足满意乘性一致性。令  $\tilde{P}$  为判断或调整后的矩阵，然后转下一步；

**Step4:** 设定初始置信水平  $\alpha=0$ ，步长  $l$ ；

**Step5:** 求  $\tilde{P}(\alpha)=[\tilde{P}^L(\alpha), \tilde{P}^R(\alpha)]=[\tilde{p}_{ij}^L(\alpha), \tilde{p}_{ij}^R(\alpha)]_{n \times n}$ ；

**Step6:** 求  $\tilde{Q}(\alpha)=(\tilde{q}_{ij}(\alpha))_{n \times n}$  及由  $\tilde{Q}(\alpha)$  矩阵确定的权重向量  $\tilde{W}(\alpha)$ ，其中  $\tilde{q}_{ij} = \tilde{p}_{ij} / (1 - \tilde{p}_{ij})$ ；

假设由模糊数互反判断矩阵  $\tilde{Q}$  确定的模糊数权重  $\tilde{W}=[\tilde{w}_1, \tilde{w}_2, \dots, \tilde{w}_n]^T$ ，由和积法：

$$\tilde{w}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left( \tilde{q}_{ij} / \sum_{k=1}^n \tilde{q}_{kj} \right) \quad i=1, 2, \dots, n$$

从而  $\tilde{w}_i(\alpha)=[\tilde{w}_i^L(\alpha), \tilde{w}_i^R(\alpha)]$ ，其中  $\tilde{w}_i^L(\alpha)$  和  $\tilde{w}_i^R(\alpha)$  由下式确定：

$$\tilde{w}_i^L(\alpha) = \frac{1}{n} \min \sum_{j=1}^n \left( x_{ij} / \sum_{k=1}^n x_{kj} \right) \quad i=1, 2, \dots, n$$

$$\tilde{w}_i^R(\alpha) = \frac{1}{n} \max \sum_{j=1}^n \left( x_{ij} / \sum_{k=1}^n x_{kj} \right) \quad i=1, 2, \dots, n$$

约束条件为：

$$\begin{cases} x_{ji} = 1/x_{ij} \\ \tilde{q}_{ij}^L(\alpha) \leq x_{ij} \leq \tilde{q}_{ij}^R(\alpha) \\ i, j = 1, 2, \dots, n \end{cases}$$

**Step7:** 判断  $\alpha+l < 1$  是否成立, 若成立, 令  $\alpha = \alpha + l$  然后转 **Step5**, 否则转下一步;

**Step8:** 已得出不同置信水平下基于模糊数互补判断矩阵的模糊权重。

整个过程的流程如下图所示:

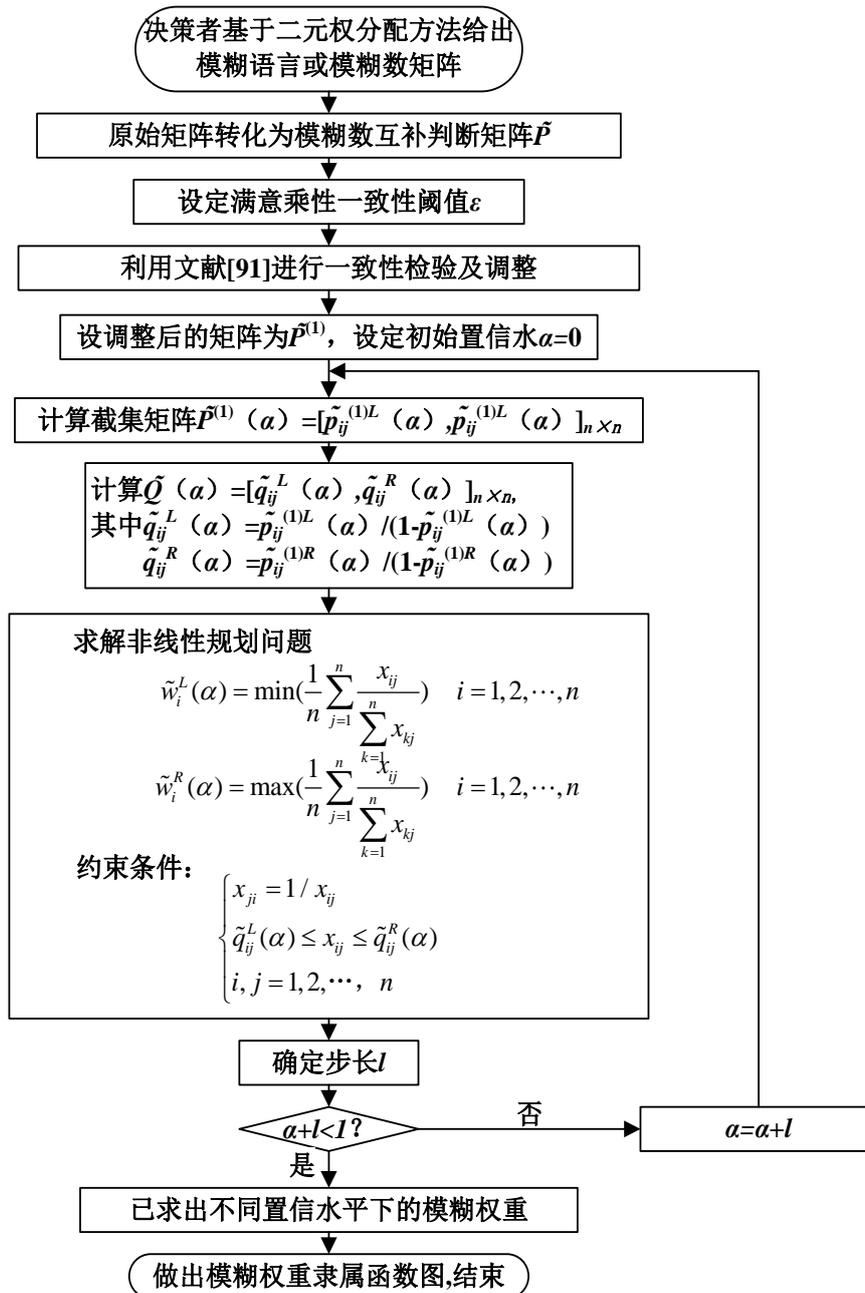


图 4.2 基于模糊二元权分配判断矩阵的模糊权重求解流程图

## 4.5 模糊层次分析法权重求解算法及环境综合评价

在对模糊层次分析法求解之前，这里先来引入一个定理：

**定理 4.5**（模糊加权平均定理）假设有两组正区间数向量  $\tilde{w} = [\tilde{w}_1, \tilde{w}_2, \dots, \tilde{w}_n]$  和  $\tilde{x} = [\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_n]$ ，其中  $\tilde{w}_i = [\tilde{w}_i^L, \tilde{w}_i^R]$ ， $\tilde{x}_i = [\tilde{x}_i^L, \tilde{x}_i^R]$ ，并且若以  $w = [w_1, w_2, \dots, w_n]$  表示  $\tilde{w}$  的一个代表系统，则必满足  $\sum_{i=1}^n w_i = 1$ 。令  $\tilde{u} = \sum_{i=1}^n \tilde{w}_i \tilde{x}_i$ ，则

$$\tilde{u} = [\tilde{u}^L, \tilde{u}^R]$$

其中

$$\tilde{u}^L = \sum_{i=1}^{r_1-1} \tilde{w}_{p(i)}^R \tilde{x}_{p(i)}^L + \left[ 1 - \sum_{i=1}^{r_1-1} \tilde{w}_{p(i)}^R - \sum_{i=r_1+1}^n \tilde{w}_{p(i)}^L \right] \tilde{x}_{p(r_1)}^L + \sum_{i=r_1+1}^n \tilde{w}_{p(i)}^L \tilde{x}_{p(i)}^L \quad (4-9)$$

$$\tilde{u}^R = \sum_{i=1}^{r_2-1} \tilde{w}_{q(i)}^L \tilde{x}_{q(i)}^R + \left[ 1 - \sum_{i=1}^{r_2-1} \tilde{w}_{q(i)}^L - \sum_{i=r_2+1}^n \tilde{w}_{q(i)}^R \right] \tilde{x}_{q(r_2)}^R + \sum_{i=r_2+1}^n \tilde{w}_{q(i)}^R \tilde{x}_{q(i)}^R \quad (4-10)$$

这里， $p$  和  $q$  为  $1 \sim n$  这  $n$  个数的两个排序自映射函数，并满足：

$$\tilde{x}_{p(1)}^L \leq \tilde{x}_{p(2)}^L \leq \dots \leq \tilde{x}_{p(n)}^L \quad (4-11)$$

$$\tilde{x}_{q(1)}^R \leq \tilde{x}_{q(2)}^R \leq \dots \leq \tilde{x}_{q(n)}^R \quad (4-12)$$

而， $r_1$  和  $r_2$  则分别满足：

$$\tilde{w}_{p(r_1)}^L < 1 - \sum_{i=1}^{r_1-1} \tilde{w}_{p(i)}^L - \sum_{i=r_1+1}^n \tilde{w}_{p(i)}^R \leq \tilde{w}_{p(r_1)}^R \quad (4-13)$$

$$\tilde{w}_{q(r_2)}^L < 1 - \sum_{i=1}^{r_2-1} \tilde{w}_{q(i)}^R - \sum_{i=r_2+1}^n \tilde{w}_{q(i)}^L \leq \tilde{w}_{q(r_2)}^R \quad (4-14)$$

证明：因为  $\tilde{u} = [\tilde{u}^L, \tilde{u}^R]$ ，所以

$$\tilde{u}^L = \min \left( \sum_{i=1}^n \tilde{w}_i \tilde{x}_i \right) = \min \left( \sum_{i=1}^n \tilde{w}_i \tilde{x}_i^L \right)$$

考察问题

$$\begin{cases} \min & f(w) = \sum_{i=1}^n \tilde{x}_i^L w_i \\ \text{s.t.} & \tilde{w}_i^L \leq w_i \leq \tilde{w}_i^R \quad i=1, 2, \dots, n \\ & \sum_{i=1}^n w_i = 1 \end{cases} \quad (4-15)$$

上式可以改写为

$$\begin{cases} \min & f(w) = \sum_{i=1}^n \tilde{x}_i^L w_i \\ \text{s.t.} & g_i^L(w) = -w_i + \tilde{w}_i^L \leq 0 \quad i=1,2,\dots,n \\ & g_i^R(w) = w_i - \tilde{w}_i^R \leq 0 \quad i=1,2,\dots,n \\ & h(w) = \sum_{i=1}^n w_i - 1 = 0 \end{cases}$$

$K-T$  条件表示式:

$$\nabla f(w) = [\tilde{x}_1^L, \tilde{x}_2^L, \dots, \tilde{x}_n^L]^T$$

$$\nabla g_i^L(w) = [0, \dots, 0, -1, 0, \dots, 0]^T \quad i=1,2,\dots,n$$

$$\nabla g_i^R(w) = [0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0]^T \quad i=1,2,\dots,n$$

$$\nabla h(w) = [1, 1, \dots, 1]^T$$

$K-T$  条件式:

$$\begin{cases} \tilde{x}_i^L - \lambda_i^L + \lambda_i^R + \mu = 0 \\ \lambda_i^L (-w_i + \tilde{w}_i^L) = 0 \\ \lambda_i^R (w_i - \tilde{w}_i^R) = 0 \\ \lambda_i^L \geq 0 \\ \lambda_i^R \geq 0 \\ i=1,2,\dots,n \end{cases} \quad (4-16)$$

下面证明

$$w^* = [\tilde{w}_{p(1)}^L, \dots, \tilde{w}_{p(r_1-1)}^L, 1 - \sum_{i=1}^{r_1-1} \tilde{w}_{p(i)}^R - \sum_{i=r_1+1}^n \tilde{w}_{p(i)}^L, \tilde{w}_{p(r_1+1)}^L, \dots, \tilde{w}_{p(n)}^L]$$

满足 (4-16) 式, 其中  $p(i)$  和  $r_1$  分别满足 (4-11) 式和 (4-13) 式。(4-16) 式可写为

$$\begin{cases} \tilde{x}_{p(i)}^L - \lambda_{p(i)}^L + \lambda_{p(i)}^R + \mu = 0 \\ \lambda_{p(i)}^L (-w_{p(i)} + \tilde{w}_{p(i)}^L) = 0 \\ \lambda_{p(i)}^R (w_{p(i)} - \tilde{w}_{p(i)}^R) = 0 \\ \lambda_{p(i)}^L \geq 0 \\ \lambda_{p(i)}^R \geq 0 \\ i=1,2,\dots,n \end{cases} \quad 4-17$$

因为

$$g_{p(i)}^L(w) = 0 \quad (i = 1, \dots, r_1 - 1), \quad g_{p(i)}^R(w) = 0 \quad (i = r_1 + 1, \dots, n),$$

所以

$$\lambda_{p(i)}^R = 0 \quad (i = 1, \dots, r_1), \quad \lambda_{p(i)}^L = 0, \quad (i = r_1, \dots, n),$$

又  $\sum_{i=1}^n w_{p(i)} = 1$ , 从而  $K-T$  条件式简化为

$$\begin{cases} \tilde{x}_{p(i)}^L - \lambda_{p(i)}^L + \mu = 0 & i = 1, 2, \dots, r_1 - 1 \\ \tilde{x}_{p(r_1)}^L + \mu = 0 \\ \tilde{x}_{p(i)}^L + \lambda_{p(i)}^R + \mu = 0 & i = r_1 + 1, r_1 + 2, \dots, n \end{cases} \quad (4-18)$$

由 (4-18) 第二个方程知  $\mu = -\tilde{x}_{p(r_1)}^L$ , 带入其他的方程得

$$\begin{cases} \lambda_{p(i)}^L = \tilde{x}_{p(i)}^L - \tilde{x}_{p(r_1)}^L & i = 1, 2, \dots, r_1 - 1 \\ \lambda_{p(i)}^R = \tilde{x}_{p(r_1)}^L - \tilde{x}_{p(i)}^L & i = r_1 + 1, r_1 + 2, \dots, n \end{cases}$$

因为  $p(i)$  及  $x_{p(i)}^L$  满足(4-11)式, 因此

$$\begin{cases} \lambda_{p(i)}^L = \tilde{x}_{p(i)}^L - \tilde{x}_{p(r_1)}^L \geq 0 & i = 1, 2, \dots, r_1 - 1 \\ \lambda_{p(i)}^R = \tilde{x}_{p(r_1)}^L - \tilde{x}_{p(i)}^L \geq 0 & i = r_1 + 1, r_1 + 2, \dots, n \end{cases}$$

因而  $w^*$  是  $K-T$  点。又显然问题 (4-15) 为凸规划问题, 因此  $w^*$  是问题 (4-15) 的最优解。于是

$$\tilde{u}^L = \sum_{i=1}^{r_1-1} \tilde{w}_{p(i)}^R \tilde{x}_{p(i)}^L + \left[ 1 - \sum_{i=1}^{r_1-1} \tilde{w}_{p(i)}^R - \sum_{i=r_1+1}^n \tilde{w}_{p(i)}^L \right] \tilde{x}_{p(r_1)}^L + \sum_{i=r_1+1}^n \tilde{w}_{p(i)}^L \tilde{x}_{p(i)}^L$$

取 (4-15) 式目标函数  $f(w)$  的相反数, 同理可以证明

$$\tilde{u}^R = \sum_{i=1}^{r_2-1} \tilde{w}_{q(i)}^L \tilde{x}_{q(i)}^R + \left[ 1 - \sum_{i=1}^{r_2-1} \tilde{w}_{q(i)}^L - \sum_{i=r_2+1}^n \tilde{w}_{q(i)}^R \right] \tilde{x}_{q(r_1)}^R + \sum_{i=r_2+1}^n \tilde{w}_{q(i)}^R \tilde{x}_{q(i)}^R$$

其中  $q(i)$  及  $r_2$  分别满足 (4-12) 和 (4-14) 式, 证毕。

有了定理 4.5 和模糊基于模糊数互补判断矩阵的单层权重求解, 就可以对模糊层次分析法进行求解了, 求解过程如下:

**Step1:** 对问题进行分析, 并建立层次结构 (假设层数为  $m$ );

**Step2:** 决策者采用权重分配的原则建立两两比较模糊数互补判断矩阵;

**Step3:** 设定满意一致性阈值  $\varepsilon$ ;

**Step4:** 对建立的每一个模糊数互补判断矩阵进行一致性分析, 对于不满足满意一

致性的矩阵根据文献[91]提供的方法进行一致性调整，直至所有矩阵均满足满意乘性一致性为止；

**Step5:** 设定初始置信水平  $\alpha = 0$ ，步长  $l$ ，并令  $k = 2$ ；

**Step6:** 假设  $\alpha$  水平下第  $k$  层  $n_k$  个元素相对于目标层的模糊合成权重为：

$$\tilde{u}^{(k)}(\alpha) = (\tilde{u}_1^{(k)}(\alpha), \tilde{u}_2^{(k)}(\alpha), \dots, \tilde{u}_{n_k}^{(k)}(\alpha))^T$$

注意： $\tilde{u}^{(2)}(\alpha) = \tilde{w}_1^{(2)}(\alpha)$ ，其中  $\tilde{w}_j^{(k)}(\alpha)$  表示  $\alpha$  水平下第  $k$  层  $n_k$  个元素相对于第  $k-1$  层第  $j$  个元素的模糊权重向量；

**Step7:** 假设利用 4.4 中的方法计算出  $\alpha$  水平下第  $k+1$  层的  $n_{k+1}$  各元素关于第  $k$  层第  $j$  个元素 ( $j = 1, 2, \dots, n_k$ ) 的模糊排序权重向量为

$$\tilde{w}_j^{(k+1)}(\alpha) = (\tilde{w}_{1j}^{(k+1)}(\alpha), \tilde{w}_{2j}^{(k+1)}(\alpha), \dots, \tilde{w}_{n_{k+1}j}^{(k+1)}(\alpha))^T$$

上式对第  $k+1$  层的  $n_{k+1}$  个元素应是完全的，当某些元素不受第  $k$  层的第  $j$  个元素支配时，相应位置用零补充，于是得到  $n_{k+1} \times n_k$  模糊矩阵：

$$\tilde{W}^{(k+1)}(\alpha) = [\tilde{w}_{ij}^{(k+1)}(\alpha)]_{n_{k+1} \times n_k} = [\tilde{w}_{ij}^{(k+1)L}(\alpha), \tilde{w}_{ij}^{(k+1)R}(\alpha)]_{n_{k+1} \times n_k}$$

**Step8:** 计算  $1 \sim n_k$  的自映射函数  $p_i^{(k)}(j)$  和  $q_i^{(k)}(j)$  ( $i = 1, 2, \dots, n_{k+1}, j = 1, 2, \dots, n_k$ )，其分别满足：

$$\tilde{w}_{ip_i^{(k)}(1)}^{(k+1)L}(\alpha) \leq \tilde{w}_{ip_i^{(k)}(2)}^{(k+1)L}(\alpha) \leq \dots \leq \tilde{w}_{ip_i^{(k)}(n_k)}^{(k+1)L}(\alpha), (i = 1, 2, \dots, n_{k+1}) \quad (4-19)$$

$$\tilde{w}_{iq_i^{(k)}(1)}^{(k+1)R}(\alpha) \leq \tilde{w}_{iq_i^{(k)}(2)}^{(k+1)R}(\alpha) \leq \dots \leq \tilde{w}_{iq_i^{(k)}(n_k)}^{(k+1)R}(\alpha), (i = 1, 2, \dots, n_{k+1}) \quad (4-20)$$

**Step9:** 找出分别满足下式的  $r_{i2}^{(k)}$  和  $r_{i1}^{(k)}$ , ( $i = 1, 2, \dots, n_{k+1}$ ):

$$\tilde{u}_{p_i^{(k)}(r_{i1}^{(k)})}^{(k)L}(\alpha) < 1 - \sum_{j=1}^{r_{i1}^{(k)}-1} \tilde{u}_{p_i^{(k)}(j)}^{(k)R}(\alpha) - \sum_{j=r_{i1}^{(k)}+1}^{n_k} \tilde{u}_{p_i^{(k)}(j)}^{(k)L}(\alpha) \leq \tilde{u}_{p_i^{(k)}(r_{i1}^{(k)})}^{(k)R}(\alpha) \quad (4-21)$$

$$\tilde{u}_{p_i^{(k)}(r_{i1}^{(k)})}^{(k)L}(\alpha) < 1 - \sum_{j=1}^{r_{i1}^{(k)}-1} \tilde{u}_{p_i^{(k)}(j)}^{(k)R}(\alpha) - \sum_{j=r_{i1}^{(k)}+1}^{n_k} \tilde{u}_{p_i^{(k)}(j)}^{(k)L}(\alpha) \leq \tilde{u}_{p_i^{(k)}(r_{i1}^{(k)})}^{(k)R}(\alpha) \quad (4-22)$$

**Step10:** 利用递推公式

$$\tilde{u}^{(k)}(\alpha) = (\tilde{u}_1^{(k)}(\alpha), \tilde{u}_2^{(k)}(\alpha), \dots, \tilde{u}_{n_k}^{(k)}(\alpha))^T$$

计算出  $\alpha$  水平下第  $k+1$  层的  $n_{k+1}$  个元素相对于目标层的合成权重，由前文可知：

$$\tilde{u}_i^{(k+1)}(\alpha) = [\tilde{u}_i^{(k+1)L}(\alpha), \tilde{u}_i^{(k+1)R}(\alpha)] \quad i = 1, 2, \dots, n_{k+1}$$

其中

$$\begin{aligned}
\tilde{u}_i^{(k+1)L}(\alpha) &= \sum_{j=1}^{r_{i1}^{(k)}-1} \tilde{u}_{p_i^{(k)}(j)}^{(k)R}(\alpha) \tilde{w}_{ip_i^{(k)}(j)}^{(k+1)L}(\alpha) \\
&+ \left[ 1 - \sum_{j=1}^{r_{i1}^{(k)}-1} \tilde{u}_{p_i^{(k)}(j)}^{(k)R}(\alpha) - \sum_{j=r_{i1}^{(k)}+1}^{n_k} \tilde{u}_{p_i^{(k)}(j)}^{(k)L}(\alpha) \right] \tilde{w}_{i_{i1}^{(k)}}^{(k+1)L}(\alpha) \\
&+ \sum_{j=r_{i1}^{(k)}+1}^{n_k} \tilde{u}_{p_i^{(k)}(j)}^{(k)L}(\alpha) \tilde{w}_{ip_i^{(k)}(j)}^{(k+1)L}(\alpha) \\
\tilde{u}_i^{(k+1)R}(\alpha) &= \sum_{j=1}^{r_{i2}^{(k)}-1} \tilde{u}_{q_i^{(k)}(j)}^{(k)L}(\alpha) \tilde{w}_{iq_i^{(k)}(j)}^{(k+1)R}(\alpha) \\
&+ \left[ 1 - \sum_{j=1}^{r_{i2}^{(k)}-1} \tilde{u}_{q_i^{(k)}(j)}^{(k)L}(\alpha) - \sum_{j=r_{i2}^{(k)}+1}^{n_k} \tilde{u}_{q_i^{(k)}(j)}^{(k)R}(\alpha) \right] \tilde{w}_{i_{i2}^{(k)}}^{(k+1)R}(\alpha) \\
&+ \sum_{j=r_{i2}^{(k)}+1}^{n_k} \tilde{u}_{q_i^{(k)}(j)}^{(k)R}(\alpha) \tilde{w}_{iq_i^{(k)}(j)}^{(k+1)R}(\alpha)
\end{aligned}$$

**Step12:** 若  $k+1 < m$ , 令  $k = k+1$  重复 **Step6** 到 **Step10**; 若  $k+1 = m$ , 则已求得  $\alpha$  水平下底层方案模糊权重为  $\tilde{u}^{(m)}(\alpha) = (\tilde{u}_1^{(m)}(\alpha), \tilde{u}_2^{(m)}(\alpha), \dots, \tilde{u}_{n_m}^{(m)}(\alpha))$ , 然后转下一步;

**Step13:** 此时已计算出给定的不同置信水平下的各方案相对于目标层的模糊权重;

上述 **Step1~Step13** 为基于模糊层次分析法的模糊权重求解算法, 其中的模糊数互补判断矩阵采用权重分配的方式确定。为了简化计算, 作者利用 MATLAB 数学软件对整个求解过程进行了编程, 具体程序见附录 B。

根据上述步骤可求得某一产品生产或废物处置工艺在不同置信水平下各环境影响类型的影响权重  $\tilde{W} = [\tilde{w}_1, \tilde{w}_2, \tilde{w}_3, \tilde{w}_4, \tilde{w}_5, \tilde{w}_6]^T$ , 假设已经求得不同环境影响类型下的标准化向量为  $S = [s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6]$ , 其中 1 至 6 分别对应于温室效应、酸化效应、光化学效应、水体富营养化、人体健康损害和不可再生资源消耗, 这时可以进一步求得某一产品生产或废物处置工艺的模糊加权综合评价。

**Step14:** 利用公式

$$\tilde{U} = S \bullet \tilde{W} = \sum_{i=1}^6 s_i \tilde{w}_i \quad (4-23)$$

得到不同置信水平下的综合影响负荷值, 为了对数据有直观的认识, 做出综合影响负荷图。

整个模糊层次分析法权重求解算法及环境综合评价流程如图 4.3 所示。

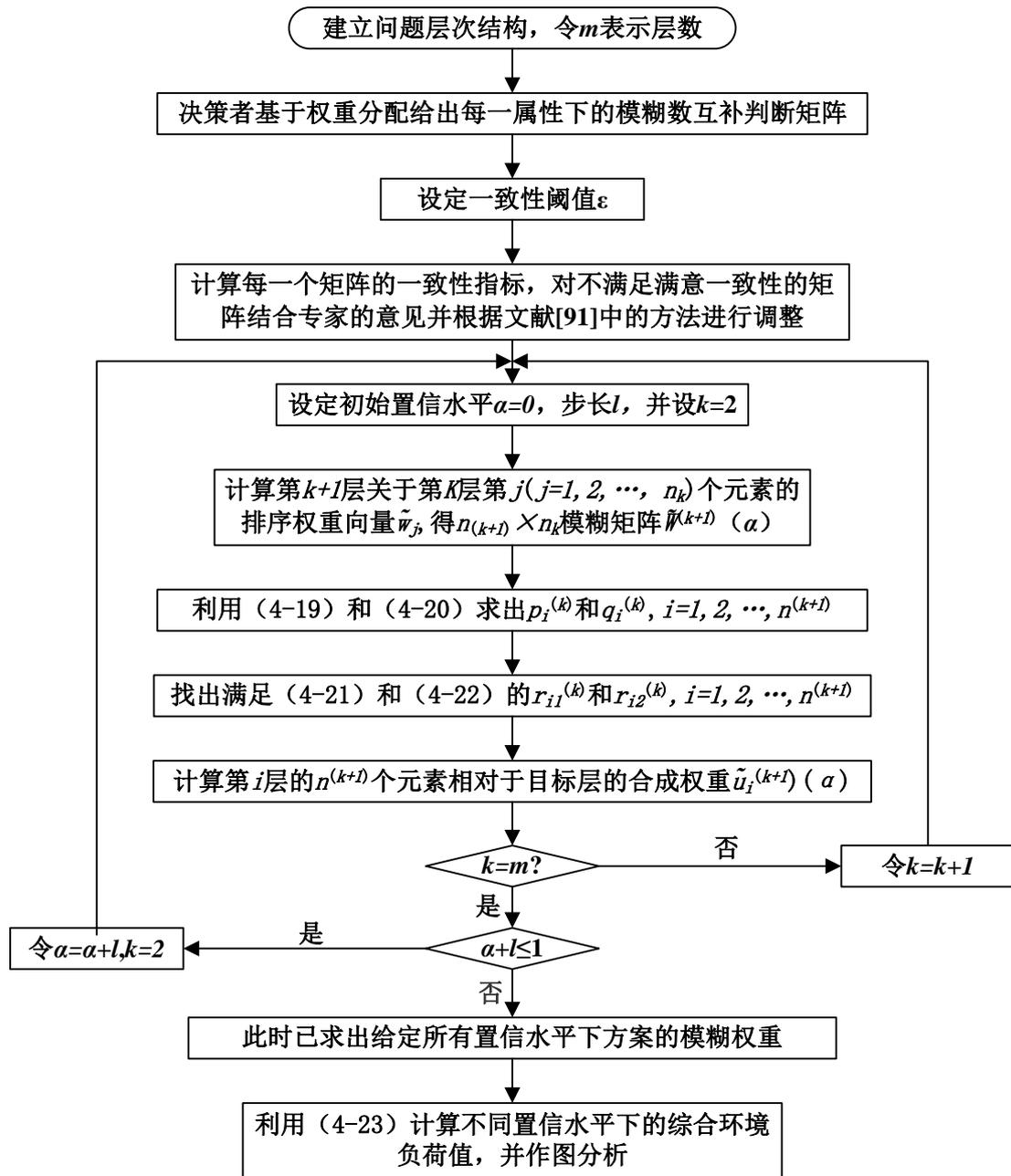


图 4.3 模糊层次分析法权重求解算法及环境综合评价流程图

## 4.6 本章小结

根据模糊理论中的运算法则, 模糊数间的加和减、乘和除运算已经不再是逆运算, 本章通过深入剖析造成这一结果的原因, 为使模糊数间的运算法则更能符合客观的实际情况, 引入了经典数学中的自变量、因变量、代表系统和自由度等概念, 进而对文献[90]中乘性一致性三角模糊数互补判断矩阵定义进行了分析, 得出满足文献[90]定义

的乘性一致性三角模糊数互补判断矩阵并不存在。为了合理定义乘性一致性模糊数互补判断矩阵，本章对区间数互补判断矩阵的定义进行了研究，通过引入导出精确数互补判断矩阵和共轭精确数互补判断矩阵的概念，对乘性一致性区间数互补判断矩阵和乘性一致性模糊数互补判断矩阵给出了一个合理的定义。目前由于对于经典的互反判断矩阵权重求解算法研究已经成熟，因此为了充分应用前人的研究成果，文中依照经典正互反判断矩阵的权重求解方法建立了区间数互反判断矩阵权重求解模型，进而不断调整置信水平，得出原模糊数互补判断矩阵在不同置信水平下各个方案的权重。

## 第 5 章 水泥行业处置城市污泥的功能拓展研究

污水处理厂排放的污泥在经过浓缩、脱水等工艺处理后，含水率降至 80%左右，后续的处理和最终的处置方式有多种选择方案，不同的方案投资、运行成本不同，对北京、天津等大城市来说，更关心的是能耗指标和环境影响的比较。目前关于城市污泥的典型处理方法，共分为外运水泥厂处置和全部在污水厂处置两种方式。外运水泥厂处置方式有两类，分别是“浓缩-脱水-外运水泥厂处置”和“浓缩-脱水-石灰稳定-外运水泥厂处置”，城市污泥全部在污水处理厂处置方式有三类，分别是“浓缩-脱水-干化-外运填埋场”、“浓缩-脱水-干化-焚烧-外运填埋场”和“浓缩-脱水-堆肥处置”（见图 5.1）。

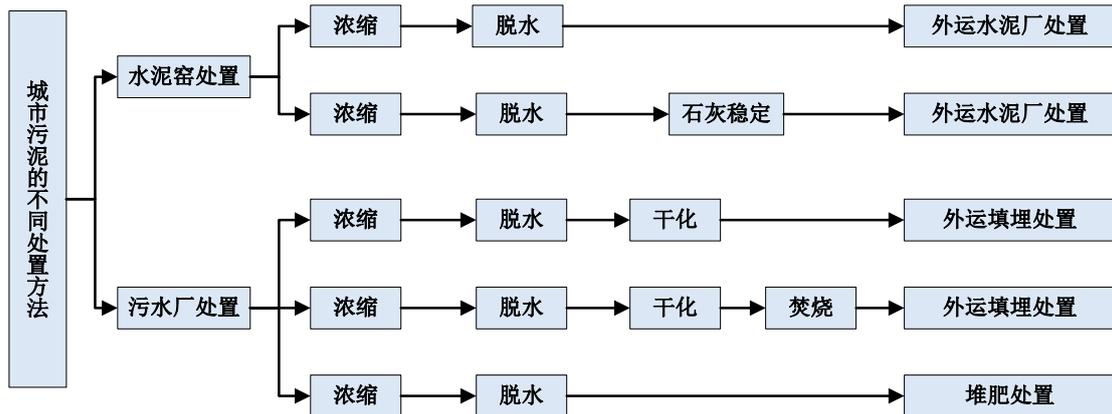


图 5.1 城市污泥的不同处置方法

### 5.1 研究范围与研究目的

**研究范围：**本章的研究对象为五种城市污泥处置方法，研究范围从污水厂排放污泥开始，经过浓缩、脱水等一系列中间处理环节，到污泥最终被处置的五种污泥处置方法的所有过程，研究范围的系统边界如图 5.2 所示。

**研究目的：**本章研究的主要目的是在建立的五种城市污泥典型处置方法生命周期清单的基础上，通过一系列生命周期评价步骤对五种城市污泥处置方法在资源能源消耗、环境污染物排放、土地资源占用等环境负荷指标上进行比较，以对水泥窑协同处置城市污泥的方式进行考察，选取的功能单位是 1 吨湿基污泥（含水率 80%）。

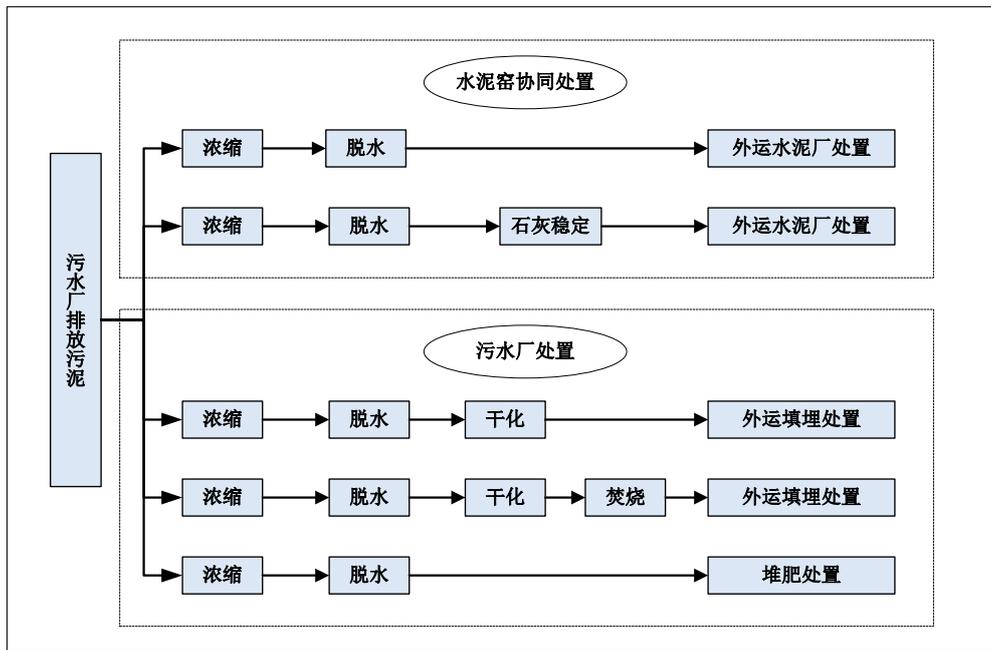


图 5.2 研究范围边界图

## 5.2 城市污泥处置过程中的清单分析

### 5.2.1 脱水后外运水泥厂处置清单分析

脱水后外运水泥厂处置是指污泥的“浓缩-脱水-外运水泥厂处置”处置方式，金隅集团下属的北京水泥厂采用的就是这种方式。北京水泥厂处置的污泥含水率通常在80%左右，而从污水厂直接排放的污泥含水率比较高，因此需浓缩和脱水处理后才能运往水泥厂做进一步处置。污水处理厂使用浓缩和脱水机械设备对污泥脱水，经测定污泥的浓缩和脱水这一部分的电耗平均为 60kWh/t 干基污泥，折合成功能单位是 1t 湿基污泥（含水率 80%）为 12wKwh/t 湿基污泥（含水率 80%）。除了要考虑污泥脱水消耗的电力能源之外，污泥的运输系统也在考虑范围之内，污水处理厂到水泥厂的运输距离为 30km，采用公路运输。

在运送至水泥厂后，需要将含水率 80%的污泥干化至 30%左右方可用于水泥生产，水泥厂干化污泥约耗电 0.6kWh/t 干基污泥，折合 0.12kWh/湿基污泥（含水率 80%），耗煤 0.16t/干基污泥，折合 0.032t/湿基污泥（含水率 80%）。由于在干化过程中利用了水泥窑中的部分余热，因此干化的能耗要远低于污水处理厂的干化过程。另外，污泥应用于水泥窑生产，约可替代 0.06t 砂岩/t 干基污泥，折合 0.012t 砂岩/t 湿基污泥（含水率 80%），减少了矿石开采及挖掘的土地，在计算中也应予以考虑。

### 5.2.2 石灰稳定后外运水泥厂处置清单分析

石灰稳定后外运水泥厂处置是指污泥的“浓缩-脱水-石灰稳定-外运水泥厂处置”处置方式。和脱水后直接外运水泥厂进行处置的方式一样，此处置方式同样需要使用浓缩和脱水机械设备将水泥厂排放的污泥脱水至含水率 80%左右，这一步骤的耗电量为 12KWh/湿基污泥（含水率 80%）。不同的是，在运往水泥厂处置之前，要先对污泥进行石灰稳定。

对于石灰稳定这一步骤，因石灰可作为颗粒核的增重剂，加速不容物的重量，对废水中的胶体微粒能起到助凝作用，因此加入石灰能有效去除磷酸根、硫酸根及氟离子等阴离子，破坏能与个别金属结合的氨基磺酸根等络合剂或螯合剂。如果加入一定比例的生石灰 CaO，石灰稳定干化后，污泥含水率可以迅速降低至 40%，堆置 15 天后，含水率可以降低 10%。

经测定，这一处置方式中生石灰的用量为 0.2t/t 湿基污泥（含水率 80%），石灰稳定后，污泥含水率降至 30%。利用特制的箱式卡车采取公路运输方式外运至水泥厂，运输距离为 50km。

在运送至水泥厂后，因为含水率 30%的污泥已经达到水泥生产的要求，因此不需要再做干化处理。同样，石灰稳定后的污泥应用于水泥生产可以替代 0.06t 砂岩/干基污泥，折合 0.012t 砂岩/湿基污泥（含水率 80%）。

### 5.2.3 干化后外运填埋场处置清单分析

干化后外运填埋场处置是指污泥的“浓缩-脱水-干化-外运填埋场”处置方式。在这一处置方式中，污水厂首先使用浓缩和脱水机械设备将污泥脱水至含水率 80%，然后利用干化设备将污泥干化至含水率 35%，脱水设备和干化设备均用电力提供能量，经测定浓缩、脱水和干化共消耗电能 697kWh/t 污泥（干基），折合功能单位是 1t 湿基污泥（含水率 80%）为 140KWh/t 湿基污泥（含水率 80%）。考虑到外运填埋场，运输距离为 100km，运输方式为公路运输，运输量为 0.7t 污泥（含水率 35%）/t 污泥（含水率 80%）。此外，干化后的污泥外运填埋场处置还要考虑土地占用这方面的环境影响。

### 5.2.4 焚烧后外运填埋场处置清单分析

焚烧后外运填埋场处置是指污泥的“浓缩-脱水-干化-焚烧-外运填埋场”处置方式。含水率是污泥焚烧处理中的一个关键因素，含水率低不但有利于污泥维持自然，

而且还可以降低对焚烧设备的侵蚀程度降低处理费用。在这一处置方式中，污水厂首先使用浓缩和脱水机械设备将污泥脱水至含水率 80%，然后利用干化设备将污泥干化至含水率 10%，最后焚烧至水分完全消失，污泥焚烧产生一定量的废气、粉尘等污染物，具体排放清单如表 5.1 所示。经测定浓缩、脱水、干化和焚烧共消耗电能 760kWh/t 污泥（干基），折合成功能单位是 1t 湿基污泥（含水率 80%）为 152KWh/t 湿基污泥（含水率 80%）。考虑到焚烧后的残渣外运填埋场处置，运输距离为 100km，运输方式为公路运输，运输重量为 0.2t 残渣/t 污泥（含水率 80%）。此外，焚烧后的残渣外运填埋场处置还要考虑土地占用这方面的环境影响。

表 5.1 城市污泥焚烧的污染物排放清单

（功能单位：1t 湿基污泥（含水率 80%））

排放物	t/t
CO <sub>2</sub>	8.65E-02
CO	1.82E-04
NO <sub>x</sub>	1.50E-03
SO <sub>2</sub>	6.00E-04
粉尘	1.18E-05

### 5.2.5 脱水后外运堆肥场处置清单分析

脱水后外运堆肥场处置是指污泥的“浓缩-脱水-堆肥处置”处置方式。堆肥是在一定条件下通过微生物的作用，使有机物不断被降解和稳定，并生产出一种适宜土地利用的产品的过程。堆肥分为好氧堆肥和厌氧堆肥两种，好氧堆肥是在有氧情况下有机物料的分解过程，代谢产物主要有二氧化碳、水和热。厌氧堆肥是在无氧条件下有机物料的分解过程，代谢产物主要有甲烷、二氧化碳、有机酸等。厌氧堆肥与好氧堆肥相比，单位质量的有机质降解产生的能量较少，而且容易发出臭气，有鉴于此，几乎所有的堆肥工程系统都采用好氧堆肥来处置。

在这一处置方式中，污水厂需要使用浓缩和脱水机械设备将污泥的含水率降至 80%，接着外加热源将污泥干化至含水率 60%，然后外运堆肥场进行规模化堆肥处理。根据要求，堆肥过程中最高堆温在 50~55℃之间持续 5~7 天，或者在 55℃以上持续 3 天，这样才能有效杀死堆体中的病原菌和有害微生物。由于堆肥过程持续时间比较长，而且在此期间需要反应器保持恒温，反应器还需要电力来运转输送带等设备，因此耗

电量较高。据测算，整个污泥的堆肥处置过程中，以 1t 湿基污泥（含水率 80%）为功能单位，所有过程的耗电量约为 120kWh/t 湿基污泥（含水率 80%）。对于重金属的排放，农用堆肥一般要求城市污泥在污水处理厂时就需要进行重金属的无害化处理，因此在此认为堆肥过程中重金属的排放量达到标准要求。考虑到脱水后的污泥外运堆肥场堆肥处置，运输距离为 100km，运输方式为公路运输，运输重量为 0.6t 污泥（含水率 60%）/t 湿基污泥（含水率 80%）。

以 1 吨含水率为 80%的湿基污泥作为功能单位，脱水后外运水泥厂处置（脱水-水泥厂）、石灰稳定后外运水泥厂处置（石灰-水泥厂）、干化后外运填埋场处置（干化-填埋）、焚烧后外运填埋场处置（焚烧-填埋）和脱水后外运堆肥场处置（脱水-堆肥）五种城市污泥处置方式的输入输出清单如下表所列：

表 5.2 五种污泥处置方式输入输出清单

（功能单位：1t 湿基污泥（含水率 80%））

	项目	单位	脱水-水泥厂	石灰-水泥厂	干化-填埋	焚烧-填埋	脱水-堆肥
污水厂处置	电耗	kWh/t	12	12	140	152	120
	石灰消耗	t/t	0	0.2	0	0	0
	污泥含水	%	80	30	35	0	80
运输	运输质量	t/t	1	1.2	0.7	0.2	0.6
	运输距离	km	30	50	100	100	100
填埋	填埋质量	t/t	0	0	0.7	0.2	1
水泥厂处置	干化煤耗	t/t	0.032	0	0	0	0
	干化电耗	kWh/t	0.12	0	0	0	0
	减少物耗	t/t	0.012	0.012	0	0	0

## 5.3 发电和运输过程中的清单分析

### 5.3.1 发电阶段的清单分析

我国的电力工业主要是以燃煤发电为主，这里也是采用火力发电的数据来计算 1kWh 电力所涉及的资源能源输入和污染物的输出。选取 1kWh 的电力为功能单位，火电厂每单位电力的生命清单列于下表。

表 5.3 火电厂每生产 1kWh 电力的生命周期清单

资源能源消耗	kg, m <sup>3</sup> /kWh	排放物	(kg/kWh)
原煤	5.470E-01	NO	3.798E-03
洗精煤	6.509E-05	NO <sub>2</sub>	4.220E-04
其他洗煤	1.289E-02	粉尘	2.351E-04
原油	8.874E-04	NM VOC	1.733E-04
汽油	3.476E-07	CH <sub>4</sub>	1.158E-04
柴油	5.864E-04	N <sub>2</sub> O	6.580E-05
燃料油	7.456E-04	AS	1.620E-06
炼厂干气	1.962E-04	Cd	1.030E-08
其他石油制品	3.907E-04	Cr	1.370E-07
天然气	5.188E-03	Hg	7.110E-08
焦炉煤气	3.415E-03	Ni	2.030E-07
其他煤气	4.235E-03	Pb	1.420E-06
CO <sub>2</sub>	1.195E+00	V	2.330E-06
CO	1.754E-03	Zn	1.940E-06
SO <sub>2</sub>	1.045E-03		

### 5.3.2 运输清单

建立使用高速公路的货车运输的清单，需要确定高速公路货车运输所对应的单位耗油因子和环境排放因子，选取每吨百公里为单位，公路运输清单如表 5.4 所示。

表 5.4 公路运输清单（每吨百公里）

输入	kg 或 m <sup>3</sup>	输出	kg
原煤	1.357E-01	NO <sub>2</sub>	1.624E-02
原油	3.757E+00	SO <sub>2</sub>	1.021E-02
天然气	2.257E-04	NM VOC	1.960E-02
CO <sub>2</sub>	9.615E+00	CH <sub>4</sub>	4.000E-04
CO	6.038E-02	N <sub>2</sub> O	6.200E-04
NO	1.462E-01	粉尘	7.490E-04

## 5.4 环境影响标准化

(1) 在电力消耗方面造成的环境影响特征化结果

根据表 5.2 五种污泥处置方式输入输出清单、表 5.3 火电厂每生产 1kWh 电力的生命周期清单和第 3 章表 3.3 中的环境影响的特征化因子, 可计算出每处置 1 吨湿基污泥 (含水率 80%), 不同的处置方式在电力消耗方面对环境造成影响特征化结果 (表 5.5)。

表 5.5 不同污泥处置方式在电力消耗方面造成的环境影响特征化结果  
(功能单位: 1t 湿基污泥 (含水率 80%))

	脱水-水泥厂	石灰-水泥厂	干化-填埋	焚烧-填埋	脱水-堆肥
电力消耗 (kWh/t)	12.12	12	140	152	120
温室效应(GWP)	1.48E+01	1.46E+01	1.71E+02	1.85E+02	1.46E+02
酸化效应(AP)	5.27E-02	5.22E-02	6.09E-01	6.61E-01	5.22E-01
光化学效应(POCP)	1.65E-03	1.63E-03	1.91E-02	2.07E-02	1.63E-02
水体富营养化(EP)	9.87E-03	9.77E-03	1.14E-01	1.24E-01	9.77E-02
人体健康损害(HTP)	1.29E+01	1.27E+01	1.48E+02	1.61E+02	1.27E+02
不可再生资源消耗(ADP)	5.08E-06	5.00E-06	5.83E-05	6.33E-05	5.00E-05

(2) 在交通运输方面造成的环境影响特征化结果

根据表 5.2 五种污泥处置方式输入输出清单、表 5.4 公路运输清单和第 3 章表 3.3 中的环境影响的特征化因子, 可计算出每处置 1 吨湿基污泥 (含水率 80%), 不同的处置方式在交通运输方面对环境造成影响特征化结果 (表 5.6)。

表 5.6 不同污泥处置方式在交通运输方面造成的环境影响特征化结果  
(功能单位: 1t 湿基污泥 (含水率 80%))

	脱水-水泥厂	石灰-水泥厂	干化-填埋	焚烧-填埋	脱水-堆肥
运输质量 (t/t)	1	1.2	0.7	0.2	1
运输距离 (百公里)	0.3	0.5	1	1	1
温室效应(GWP)	2.95E+00	5.89E+00	6.87E+00	1.96E+00	5.89E+00
酸化效应(AP)	3.94E-02	7.89E-02	9.20E-02	2.63E-02	7.89E-02
光化学效应(POCP)	1.66E-03	3.32E-03	3.87E-03	1.11E-03	3.32E-03
水体富营养化(EP)	9.40E-03	1.88E-02	2.19E-02	6.27E-03	1.88E-02
人体健康损害(HTP)	7.34E-02	1.47E-01	1.71E-01	4.89E-02	1.47E-01
不可再生资源消耗(ADP)	1.60E-04	3.19E-04	3.72E-04	1.06E-04	3.19E-04

## (3) 在资源能源消耗方面造成的环境影响特征化结果

根据表 5.2 五种污泥处置方式输入输出清单、第 3 章表 3.4 部分非金属矿产资源的耗竭特征化因子以及表 3.5 化石燃料的折标煤系数及特征化因子,可计算出每处置 1 吨湿基污泥(含水率 80%),不同的处置方式在煤耗及物耗(砂岩)方面对环境造成影响特征化结果(表 5.7)。

表 5.7 不同污泥处置方式在煤耗及物耗方面造成的环境影响特征化结果

(功能单位: 1t 湿基污泥(含水率 80%))

	脱水-水泥厂	石灰-水泥厂	干化-填埋	焚烧-填埋	脱水-堆肥
煤耗(t/t)	0.032	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
物耗(砂岩)(t/t)	-0.012	-0.012	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
温室效应(GWP)	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
酸化效应(AP)	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
光化学效应(POCP)	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
水体富营养化(EP)	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
人体健康损害(HTP)	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
不可再生资源消耗(ADP)	-1.62E-04	-1.62E-04	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

## (4) 综合造成的环境影响特征化结果

根据污泥不同处置方法在电力、运输和能源资源方面造成的环境影响特征化结果(表 5.5、表 5.6 和表 5.7),可以计算出综合环境影响特征化结果(见表 5.8)。

表 5.8 不同污泥处置方式综合环境影响特征化结果

(功能单位: 1t 湿基污泥(含水率 80%))

	脱水-水泥厂	石灰-水泥厂	干化-填埋	焚烧-填埋	脱水-堆肥
温室效应(GWP)	1.78E+01	2.05E+01	1.78E+02	1.87E+02	1.52E+02
酸化效应(AP)	9.21E-02	1.31E-01	7.01E-01	6.87E-01	6.01E-01
光化学效应(POCP)	3.31E-03	4.95E-03	2.30E-02	2.18E-02	1.96E-02
水体富营养化(EP)	1.93E-02	2.86E-02	1.36E-01	1.30E-01	1.17E-01
人体健康损害(HTP)	1.30E+01	1.28E+01	1.48E+02	1.61E+02	1.27E+02
不可再生资源消耗(ADP)	3.08E-06	1.62E-04	4.30E-04	1.69E-04	3.69E-04

根据第 3 章的表 3.6 世界范围内的环境负荷总当量数,可以得到五种城市污泥处

理方式的环境影响标准化结果（见表 5.9）。

表 5.9 不同污泥处置方式的环境影响标准化结果

（功能单位：1t 湿基污泥（含水率 80%））

	脱水-水泥厂	石灰-水泥厂	干化-填埋	焚烧-填埋	脱水-堆肥
温室效应(GWP)	4.25E-13	4.90E-13	4.26E-12	4.47E-12	3.63E-12
酸化效应(AP)	2.90E-13	4.12E-13	2.20E-12	2.16E-12	1.89E-12
光化学效应(POCP)	9.43E-15	1.41E-14	6.54E-14	6.21E-14	5.59E-14
水体富营养化(EP)	1.22E-13	1.81E-13	8.60E-13	8.24E-13	7.37E-13
人体健康损害(HTP)	1.46E-12	1.45E-12	1.67E-11	1.82E-11	1.44E-11
不可再生资源消耗(ADP)	1.44E-16	7.57E-15	2.01E-14	7.91E-15	1.72E-14

## 5.5 环境影响综合评价

为确定各环境影响类型重要性程度，需要构造环境影响类型间的两两比较判断矩阵，本文采用向环保行业专家发送调查问卷（见附录 A）的形式获得两两比较数据信息。由于专家们具有较强的主观性，且获得的数据精度较低，而三角模糊数主要用于处理和表达模糊信息，对精度不高的数据资料具有很好的适用性，因此这里可以将获取数据转换为三角模糊数。三角模糊数  $A=(a,b,c)$  可由以下方法得到<sup>[92]</sup>：将数据最小值和均值分别减去 2 倍标准差的值进行比较，取较大值赋予  $a$ ，将数据平均值赋予  $b$ ，将数据最大值和均值分别加上 2 倍标准差的值进行比较，取较小值赋予  $c$ 。

根据整理，得出如下环境影响类型间两两比较的三角模糊数互补判断矩阵：

表 5.10 环境影响类型间两两比较的三角模糊数互补判断矩阵

	GWP	AP	POCP	EP	HTP	ADP
GWP	(.50,.50,.50)	(.35,.42,.48)	(.65,.74,.79)	(.72,.81,.89)	(.22,.28,.34)	(.66,.73,.80)
AP	(.52,.58,.65)	(.50,.50,.50)	(.71,.80,.85)	(.80,.85,.90)	(.33,.36,.41)	(.70,.78,.87)
POCP	(.21,.26,.35)	(.15,.20,.29)	(.50,.50,.50)	(.51,.60,.67)	(.09,.13,.19)	(.40,.46,.55)
EP	(.11,.19,.28)	(.10,.15,.20)	(.33,.40,.49)	(.50,.50,.50)	(.05,.09,.11)	(.30,.36,.41)
HTP	(.66,.72,.78)	(.59,.64,.67)	(.81,.87,.91)	(.89,.91,.95)	(.50,.50,.50)	(.77,.86,.88)
ADP	(.20,.27,.34)	(.13,.22,.30)	(.45,.54,.60)	(.59,.64,.70)	(.12,.14,.23)	(.50,.50,.50)

因为这里只有一个三角模糊数互补判断矩阵，因此，只需要根据第4章4.4中的基于模糊数互补判断矩阵的模糊权重求解算法进行计算即可。依步骤求解过程如下：

**Step1:** 表5.10既是要考察的模糊数互补判断矩阵，即

$$\tilde{P} = \begin{bmatrix} (.50,.50,.50) & (.35,.42,.48) & (.65,.74,.79) & (.72,.81,.89) & (.22,.28,.34) & (.66,.73,.80) \\ (.52,.58,.65) & (.50,.50,.50) & (.71,.80,.85) & (.80,.85,.90) & (.33,.36,.41) & (.70,.78,.87) \\ (.21,.26,.35) & (.15,.20,.29) & (.50,.50,.50) & (.51,.60,.67) & (.09,.13,.19) & (.40,.46,.55) \\ (.11,.19,.28) & (.10,.15,.20) & (.33,.40,.49) & (.50,.50,.50) & (.05,.09,.11) & (.30,.36,.41) \\ (.66,.72,.78) & (.59,.64,.67) & (.81,.87,.91) & (.89,.91,.95) & (.50,.50,.50) & (.77,.86,.88) \\ (.20,.27,.34) & (.13,.22,.30) & (.45,.54,.60) & (.59,.64,.70) & (.12,.14,.23) & (.50,.50,.50) \end{bmatrix}$$

**Step2:** 设定满意乘性一致性阈值  $\varepsilon = 0.1$ ；

**Step3:** 根据文献[91]中的方法对矩阵  $\tilde{P}$  进行一致性检验，经过计算，矩阵  $\tilde{P}$  的一致性指标  $\rho = 0.0073 < 0.1$ ，这说明原矩阵满足满意乘性一致性，因此不需要调整，可直接进入下一步；

**Step4:** 另初始  $\alpha = 0$ ，步长  $l = 0.05$ ；

**Step5:** 求  $\tilde{P}(\alpha)$ ：

$$\tilde{P}(\alpha) = \begin{bmatrix} [.50,.50] & [.35,.48] & [.65,.79] & [.72,.89] & [.22,.34] & [.66,.80] \\ [.52,.65] & [.50,.50] & [.71,.85] & [.80,.90] & [.33,.41] & [.70,.87] \\ [.21,.35] & [.15,.29] & [.50,.50] & [.51,.67] & [.09,.19] & [.40,.55] \\ [.11,.28] & [.10,.20] & [.33,.49] & [.50,.50] & [.05,.11] & [.30,.41] \\ [.66,.78] & [.59,.67] & [.81,.91] & [.89,.95] & [.50,.50] & [.77,.88] \\ [.20,.34] & [.13,.30] & [.45,.60] & [.59,.70] & [.12,.23] & [.50,.50] \end{bmatrix}$$

**Step6:** 求区间数互反判断矩阵  $\tilde{Q}(\alpha)$  及由此矩阵确定的权重：

$$\tilde{Q}(\alpha) = \begin{bmatrix} [1.00,1.00] & [0.54,0.92] & [1.86,3.76] & [2.57,8.09] & [0.28,0.52] & [1.94,4.00] \\ [1.08,1.86] & [1.00,1.00] & [2.45,5.67] & [4.00,9.00] & [0.49,0.69] & [2.63,6.69] \\ [0.27,0.54] & [0.18,0.41] & [1.00,1.00] & [1.04,2.03] & [0.09,0.23] & [0.67,1.22] \\ [0.12,0.39] & [0.11,0.25] & [0.49,0.96] & [1.00,1.00] & [0.05,0.12] & [0.42,0.69] \\ [1.94,3.55] & [1.44,2.03] & [4.26,10.1] & [8.09,19.0] & [1.00,1.00] & [3.35,7.33] \\ [0.25,0.52] & [0.15,0.38] & [0.82,1.50] & [1.44,2.33] & [0.14,0.30] & [1.00,1.00] \end{bmatrix}$$

假设由模糊数互反判断矩阵  $\tilde{Q}$  确定的模糊权重为  $\tilde{W} = [\tilde{w}_1, \tilde{w}_2, \tilde{w}_3, \tilde{w}_4, \tilde{w}_5, \tilde{w}_6]$ ，建立区间数互反判断矩阵权重求解模型，并利用 Matlab 程序求解得：

$$\tilde{w}_1(\alpha) = [0.11, 0.26], \quad \tilde{w}_2(\alpha) = [0.17, 0.34], \quad \tilde{w}_3(\alpha) = [0.04, 0.10]$$

$$\tilde{w}_4(\alpha) = [0.03, 0.06], \quad \tilde{w}_5(\alpha) = [0.31, 0.52], \quad \tilde{w}_6(\alpha) = [0.05, 0.11]$$

**Step7:** 因为  $\alpha + l = 0 + 0.05 < 1$ ，令  $\alpha = \alpha + l = 0.05$  转至 **Step5** 直到  $\alpha + l > 1$  为止；

.....

**Step8:** 最终得到在不同置信水平下各环境影响类型的模糊权重值（结果见下表）；

表 5.11 不同置信水平下各环境影响类型的模糊权重值

$\alpha$	温室效应	酸化效应	光化学效应)	水体富营养化	人体健康损害	不可再生资源消耗
0	[0.114,0.258]	[0.169,0.344]	[0.041,0.098]	[0.025,0.063]	[0.309,0.523]	[0.046,0.108]
0.05	[0.117,0.253]	[0.172,0.338]	[0.042,0.096]	[0.026,0.061]	[0.314,0.518]	[0.047,0.105]
0.10	[0.117,0.248]	[0.174,0.332]	[0.043,0.094]	[0.027,0.060]	[0.320,0.512]	[0.046,0.103]
0.15	[0.120,0.243]	[0.177,0.326]	[0.044,0.092]	[0.027,0.059]	[0.325,0.507]	[0.049,0.101]
0.20	[0.123,0.238]	[0.180,0.320]	[0.045,0.090]	[0.028,0.058]	[0.330,0.502]	[0.051,0.099]
0.25	[0.126,0.234]	[0.183,0.314]	[0.045,0.088]	[0.029,0.057]	[0.335,0.497]	[0.050,0.097]
0.30	[0.128,0.229]	[0.187,0.309]	[0.046,0.086]	[0.030,0.055]	[0.340,0.491]	[0.053,0.095]
0.35	[0.131,0.225]	[0.190,0.303]	[0.047,0.084]	[0.030,0.054]	[0.345,0.486]	[0.054,0.093]
0.40	[0.134,0.220]	[0.193,0.298]	[0.048,0.082]	[0.031,0.053]	[0.351,0.481]	[0.055,0.091]
0.45	[0.137,0.216]	[0.197,0.292]	[0.049,0.080]	[0.032,0.052]	[0.356,0.476]	[0.056,0.089]
0.50	[0.139,0.212]	[0.199,0.287]	[0.050,0.078]	[0.033,0.051]	[0.362,0.471]	[0.057,0.087]
0.55	[0.143,0.208]	[0.202,0.282]	[0.051,0.076]	[0.034,0.050]	[0.367,0.466]	[0.058,0.085]
0.60	[0.146,0.204]	[0.206,0.277]	[0.052,0.074]	[0.034,0.049]	[0.373,0.460]	[0.059,0.083]
0.65	[0.149,0.200]	[0.210,0.272]	[0.053,0.072]	[0.035,0.048]	[0.378,0.455]	[0.061,0.081]
0.70	[0.153,0.196]	[0.213,0.267]	[0.054,0.071]	[0.036,0.047]	[0.384,0.450]	[0.062,0.080]
0.75	[0.155,0.192]	[0.217,0.262]	[0.055,0.069]	[0.037,0.046]	[0.390,0.445]	[0.063,0.078]
0.80	[0.159,0.188]	[0.221,0.257]	[0.056,0.067]	[0.037,0.045]	[0.396,0.440]	[0.064,0.076]
0.85	[0.162,0.184]	[0.225,0.252]	[0.057,0.065]	[0.038,0.044]	[0.402,0.435]	[0.065,0.074]
0.90	[0.166,0.180]	[0.229,0.247]	[0.058,0.064]	[0.039,0.043]	[0.408,0.430]	[0.066,0.072]
0.95	[0.169,0.177]	[0.233,0.242]	[0.059,0.062]	[0.040,0.042]	[0.414,0.425]	[0.067,0.070]
1	[0.173,0.173]	[0.238,0.238]	[0.060,0.060]	[0.041,0.041]	[0.420,0.420]	[0.068,0.068]

**Step1~Step8** 可用 MATLAB 程序进行求解，整个求解程序见附录 B。

**Step9:** 计算不同处置方式的综合影响负荷值  $\tilde{U}_i = S_i^T \bullet \tilde{W} = \sum_{j=1}^6 s_{ij} \tilde{w}_j$ ，其中  $i$  表示不同的处置方法， $j$  表示不同环境影响类型，这里

$$S = \begin{bmatrix} 4.25E-13 & 2.90E-13 & 9.43E-15 & 1.22E-13 & 1.46E-12 & 1.44E-16 \\ 4.90E-13 & 4.12E-13 & 1.41E-14 & 1.81E-13 & 1.45E-12 & 7.57E-15 \\ 4.26E-12 & 2.20E-12 & 6.54E-14 & 8.60E-13 & 1.67E-11 & 2.01E-14 \\ 4.47E-12 & 2.16E-12 & 6.21E-14 & 8.24E-13 & 1.82E-11 & 7.91E-15 \\ 4.47E-12 & 1.89E-12 & 5.59E-14 & 7.37E-13 & 1.44E-11 & 1.72E-14 \end{bmatrix} \begin{matrix} S_1^T \\ S_2^T \\ S_3^T \\ S_4^T \\ S_5^T \end{matrix}$$

经过计算，求得不同城市污泥处置方式综合环境负荷值如下表所列：

表 5.12 不同置信水平下各城市污泥处置方式综合环境负荷值 ( $\times 10^{-13}$ )

$\alpha$	脱水-水泥厂	石灰-水泥厂	干化-填埋	焚烧-填埋	脱水-堆肥
0	[5.526,9.815]	[5.795,10.399]	[60.495,106.522]	[65.293,114.733]	[52.101,91.712]
0.05	[5.620,9.697]	[5.895,10.270]	[61.516,105.271]	[66.392,113.394]	[52.980,90.636]
0.10	[5.706,9.580]	[5.983,10.142]	[62.465,104.033]	[67.419,112.070]	[53.797,89.572]
0.15	[5.801,9.463]	[6.084,10.014]	[63.502,102.801]	[68.537,110.751]	[54.690,88.511]
0.20	[5.899,9.348]	[6.188,9.889]	[64.567,101.582]	[69.683,109.446]	[55.607,87.463]
0.25	[5.997,9.233]	[6.291,9.764]	[65.626,100.371]	[70.825,108.150]	[56.519,86.421]
0.30	[6.095,9.120]	[6.396,9.640]	[66.690,99.170]	[71.970,106.864]	[57.435,85.388]
0.35	[6.194,9.007]	[6.500,9.518]	[67.762,97.978]	[73.125,105.588]	[58.358,84.363]
0.40	[6.292,8.895]	[6.605,9.396]	[68.832,96.794]	[74.277,104.320]	[59.279,83.344]
0.45	[6.396,8.785]	[6.714,9.275]	[69.951,95.618]	[75.482,103.060]	[60.242,82.332]
0.50	[6.493,8.674]	[6.816,9.156]	[71.020,94.450]	[76.636,101.808]	[61.162,81.327]
0.55	[6.601,8.565]	[6.930,9.037]	[72.190,93.288]	[77.895,100.564]	[62.169,80.328]
0.60	[6.707,8.456]	[7.043,8.919]	[73.344,92.135]	[79.138,99.328]	[63.163,79.335]
0.65	[6.815,8.349]	[7.158,8.802]	[74.513,90.988]	[80.397,98.099]	[64.169,78.349]
0.70	[6.924,8.241]	[7.274,8.685]	[75.698,89.848]	[81.672,96.876]	[65.189,77.368]
0.75	[7.033,8.135]	[7.389,8.570]	[76.880,88.713]	[82.945,95.660]	[66.207,76.392]
0.80	[7.146,8.029]	[7.509,8.455]	[78.098,87.586]	[84.257,94.451]	[67.256,75.421]
0.85	[7.260,7.924]	[7.630,8.341]	[79.333,86.465]	[85.586,93.249]	[68.319,74.457]
0.90	[7.375,7.819]	[7.753,8.228]	[80.584,85.349]	[86.932,92.053]	[69.395,73.497]
0.95	[7.492,7.715]	[7.877,8.115]	[81.850,84.240]	[88.295,90.863]	[70.486,72.542]
1	[7.611,7.611]	[8.004,8.004]	[83.137,83.137]	[89.680,89.680]	[71.593,71.593]

## 5.6 结果解释

### 5.6.1 不同环境类型下的对比分析

根据表 5.9 不同城市污泥处置方式的环境影响标准化结果，对五种城市污泥处置方式在不同环境影响类型下进行对比分析。在不同环境影响类型下，将影响最大的处置方式的影响值作为 100%，其他处置方式影响值与此影响值的比值作为相对影响值，则五种城市污泥处置方式在不同环境影响类型下的对比情况如图 5.3 所示。

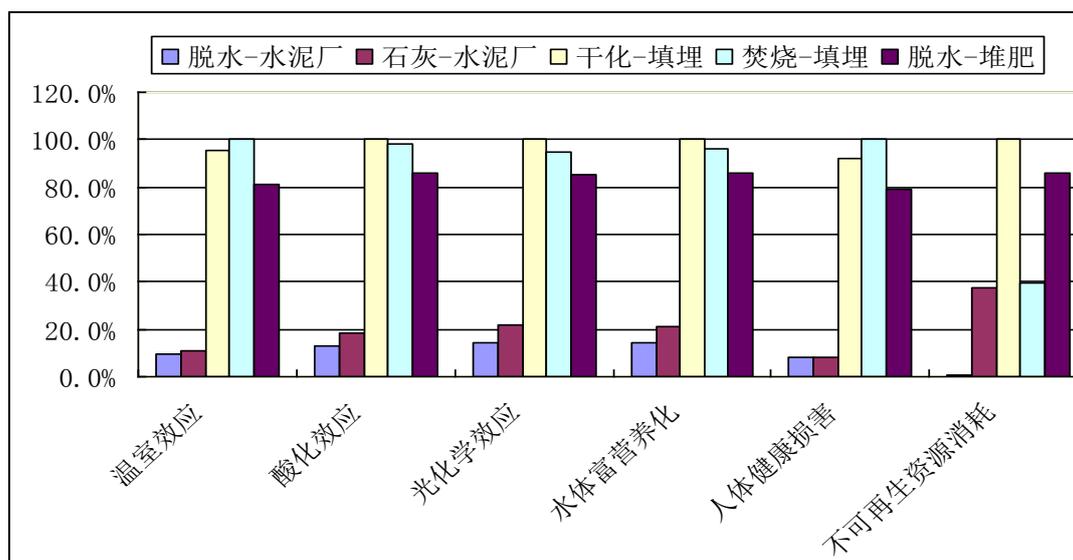


图 5.3 五种城市污泥处置方式的环境影响对比图

从图中可以看出，与传统处置方式相比，城市污泥的水泥窑协同处置具有很大的环保优势：

第一，在温室效应、酸化效应、光化学效应、水体富营养化和人体健康损害方面，城市污泥的传统处置方式对环境的影响较大。其中焚烧填埋处置在温室效应和人体健康损害方面对环境的影响最大，而干化填埋处置则在酸化效应、光化学效应和水体富营养化方面对环境的影响最大，但其他两种城市污泥的传统处置方式在这五个方面相对环境影响值均在 80% 以上。相对而言，城市污泥的水泥窑协同处置在这五方面的环境影响较小，相对环境影响值均在 20% 以下，其中脱水后水泥窑处置相对影响值都是最小，其数值均在 15% 以下。

第二，在不可再生资源消耗方面，城市污泥的干化填埋处置对环境的影响最大，其次为脱水堆肥处置，相对环境影响值在 85% 左右。影响最小的为城市污泥脱水后水泥窑处置，相对影响值不足 1%。另外，石灰稳定后水泥窑处置和城市污泥焚烧后填埋

分列第二、三位，这两种处置方式在不可再生资源消耗方面的环境影响相差不大，相对影响值分别在 37% 和 39% 左右。

### 5.6.2 综合对比分析

根据表 5.12 不同置信水平下各城市污泥处置方式综合环境负荷值作出综合对比图，如下图所示。

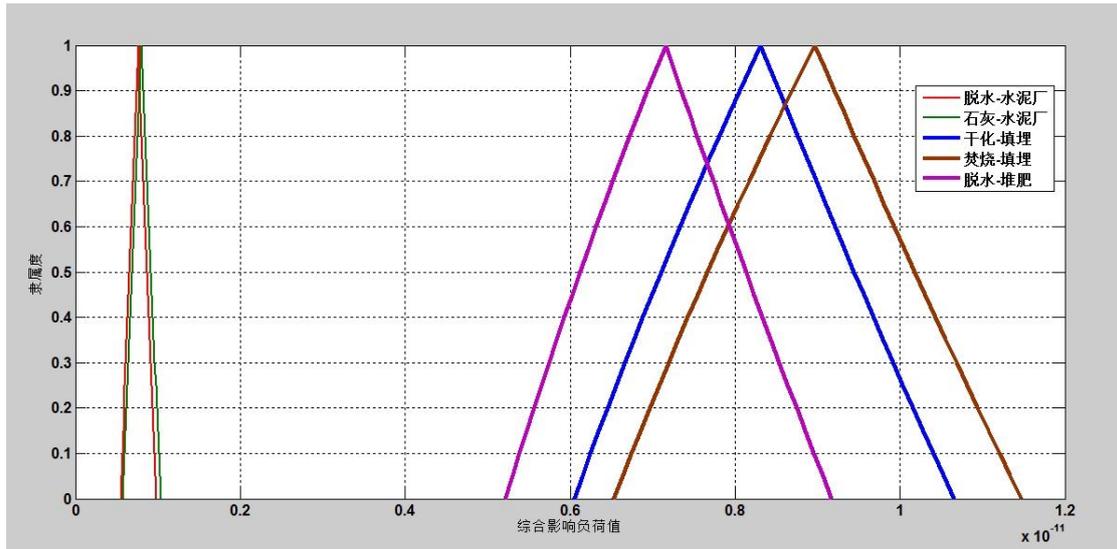


图 5.4 不同城市污泥处置方式综合环境负荷对比图

从图 5.4 中可以看出，与传统处置方式相比，城市污泥的水泥窑协同处置的综合环境负荷明显小于传统处置方式，具体来说：（1）对于城市污泥的两种水泥窑协同处置方式，脱水后外运水泥厂处置的综合环境影响最小，这也是北京水泥厂采用的城市污泥处置方式；石灰稳定后外运水泥厂处置的环境影响程度与脱水后外运水泥厂处置相差不大，但经济成本较高，目前还未普及。（2）对于城市污泥的传统处置方式，焚烧后外运填埋场处置在综合环境影响程度最高，其次为干化后外运填埋场处置和脱水后外运堆肥场处置，这两种处置方式的环境影响程度也相对较高。（3）定量来看，各种城市污泥处置方式综合环境负荷值可以用三角模糊数近似表示，若以三角模糊数  $\tilde{C}_i$  来表示不同城市污泥处置方式的综合环境负荷值，其中  $i \in \{\text{脱水-水泥厂}, \text{石灰-水泥厂}, \text{干化-填埋}, \text{焚烧-填埋}, \text{脱水-堆肥}\}$ ，则：

$$\tilde{C}_{\text{脱水-水泥厂}} = (5.53, 7.61, 9.82) \times 10^{-13}, \quad \tilde{C}_{\text{石灰-水泥厂}} = (5.80, 8.00, 10.40) \times 10^{-13}$$

$$\tilde{C}_{\text{干化-填埋}} = (60.50, 83.14, 106.52) \times 10^{-13}, \quad \tilde{C}_{\text{焚烧-填埋}} = (65.29, 89.68, 114.73) \times 10^{-13},$$

$$\tilde{C}_{\text{脱水-堆肥}} = (52.10, 71.59, 91.71) \times 10^{-13}$$

根据三角模糊数基本运算法则，就有：

$$\tilde{C}_{\text{水泥厂处置}} = \frac{\tilde{C}_{\text{脱水-水泥厂}} + \tilde{C}_{\text{石灰-水泥厂}}}{2} = (5.67, 7.81, 10.11) \times 10^{-13}$$

$$\tilde{C}_{\text{传统处置}} = \frac{\tilde{C}_{\text{干化-填埋}} + \tilde{C}_{\text{焚烧-填埋}} + \tilde{C}_{\text{脱水-堆肥}}}{3} = (59.30, 81.47, 104.32) \times 10^{-13}$$

于是

$$\frac{\tilde{C}_{\text{传统处置}}}{\tilde{C}_{\text{水泥厂处置}}} \approx (5.87, 10.43, 18.40)$$

这说明利用传统方式处置污泥对环境造成的影响大约是水泥厂处置的 10.43 倍。因此，与污水处理厂直接处置城市污泥相比，水泥窑协同处置城市污泥可有效节省水泥生产所需要的天然矿物资源，大大降低对环境造成的影响。另外，与城市污泥的石灰稳定后外运水泥厂相比，北京水泥厂采用的脱水后直接水泥厂处置对环境的影响程度更低，成本更小。因此，可以得出以下结论：城市污泥在污水处理厂进行机械脱水至含水率 80% 时运往水泥厂进行协同处置时综合环境影响最低的技术方案。

## 5.7 本章小结

本章通过一系列生命周期评价步骤对五种城市污泥处置方式在温室效应、酸化效应、光化学效应、水体富营养化、人体健康损害和不可再生资源六种不同环境影响类型下进行了对比分析，其中传统处置方式有三种，分别为“浓缩-脱水-干化-填埋”、“浓缩-脱水-干化-焚烧-填埋”和“浓缩-脱水-堆肥”；而水泥窑协同处置方式有两种，分别是“浓缩-脱水-水泥厂”和“浓缩-脱水-石灰稳定-水泥厂”。研究结果显示，采用水泥窑处置城市污泥在这六种环境影响类型下均优于传统处置方式，通过模糊层次分析法综合对比来看，传统方式处置污泥对环境造成的影响大约是水泥厂处置的 10.43 倍。而对于城市污泥的两种水泥厂处置方式，与石灰稳定后外运水泥厂的处置方式相比，采用污泥脱水后直接水泥厂处置对环境的影响程度更低，成本更小，因此，可以得出以下结论：城市污泥在污水处理厂进行机械脱水至含水率 80% 时运往水泥厂进行协同处置是综合环境影响最低的技术方案。

## 第 6 章 水泥行业处置城市垃圾的功能拓展研究

城市垃圾一般指城市居民的生活垃圾、商业垃圾、市政管理和维护中所产生的垃圾。中国是世界上城市垃圾排放量最多的国家,据统计,目前我国城市垃圾年排放量已经超过 2.5 亿吨,占世界排放总量的四分之一,历年堆放总量已高达 80 亿吨。随着我国城市化进程的加快和城市规模的不断扩大,城市垃圾年排放量正以每年约 10% 的速度迅速增加。目前,我国约有三分之二的城市陷入垃圾围城的困境,城市垃圾的不恰当处置不仅影响城市景观,同时也污染了对我们生命至关重要的大气、水和土壤,对城镇居民的健康构成严重威胁,垃圾已经成为城市发展中的棘手问题。

我国城市垃圾常用的处置方式主要有卫生填埋、焚烧和堆肥,根据建设部在 2006 年发布的《中国城市建设统计年报》,我国城市垃圾填埋、焚烧和堆肥的无害化处理能力的比例分别为 82.4%、4.7% 和 12.9%。

就北京市现状而言,卫生填埋依然是北京市最主要的垃圾处理方式。北京市目前运行的大部分填埋场建成于 2000 年左右,大部分设计使用寿命在 10 到 20 年之间,少数不到 10 年,城区部分垃圾填埋场存在着超负荷运转现象。随着全球资源的匮乏以及对资源可持续发展的重视,人们不再将城市生活垃圾仅仅视为一种污染物来进行处理,而是渐渐地将其作为一种有用的宝贵资源加以再利用。在这样的背景之下,利用水泥窑烧成系统处理城市垃圾是近年来提出的一种新的垃圾处理途径。该方法不但可以利用水泥回转窑系统吸收垃圾处理过程中产生的有毒气体,而且垃圾焚烧后剩余的灰渣可作为水泥的原料,将有害的灰渣与重金属固化在水泥熟料中,通过对垃圾的预处理、原料成分的配比和对水泥工艺流程的调整,实现对城市垃圾的综合利用。

### 6.1 研究范围与研究目的

本章主要对不同城市垃圾的处置方式的环境影响进行对比分析,研究内容包含城市垃圾的以下五种主流处置方式:(1)卫生填埋处置:垃圾收集后,直接运送至填埋场进行卫生填埋;(2)焚烧后填埋处置:垃圾收集与焚烧后,焚烧灰运送至填埋场填埋处置;(3)焚烧后水泥窑处置:垃圾收集与焚烧后,焚烧灰经由水泥窑协同处置;(4)直接水泥窑处置:垃圾收集后,直接运送至水泥厂入窑替代材料和燃料;(5)水泥窑综合处置:垃圾收集后,将可燃组分和生物组分干化后制备成燃料棒,替代水

泥窑燃料，再将无机成分分拣后入窑替代粘土质原料。其中前两种为传统的城市垃圾处置方式，后三种为水泥行业新提出的城市垃圾处置方式。

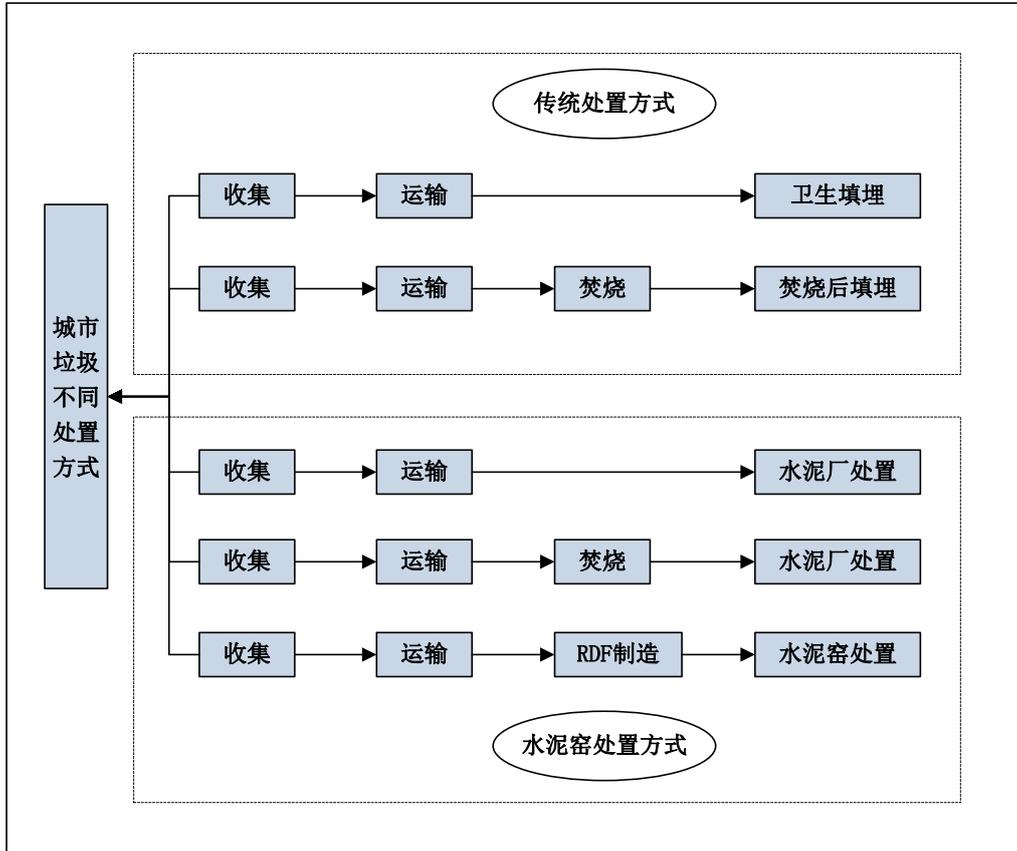


图 6.1 城市垃圾的五种主流处置方式

本章研究的主要目的是在建立五种主流城市垃圾处置方式生命周期清单的基础上，通过一系列生命周期评价步骤对五种城市垃圾处置方式在能源资源消耗、环境污染排放、土地资源占用等环境负荷指标上进行比较分析，并定量辨识水泥窑处置城市垃圾所带来的主要环境负荷，为固废政策的制定提供合理化的量化工具，选取的功能单位是 1 吨城市垃圾。

## 6.2 清单分析

### 6.2.1 城市垃圾卫生填埋处置的清单分析

城市垃圾卫生填埋是指城市垃圾的“收集-运输-卫生填埋”处置方式。具体来讲，该处置方式是将城市垃圾填入坑中盖上覆土压实，使其发生生物、物理、化学变化，达到减量化和无害化的目的。城市垃圾卫生填埋处置的清单分析范围主要包括以下三个方面：一是垃圾填埋过程中的环境负荷清单分析；二是消耗电力在发电过程中的间

接环境负荷清单分析；三是运输过程中的环境负荷清单分析。

#### (1) 垃圾填埋过程中的环境负荷清单分析

垃圾填埋处理主要产生两类环境影响，一是土地占用，二是填埋垃圾中的有毒有害等渗透液渗透到土壤和地下水中，进而对人体健康造成损害。

在土地占用方面，生活垃圾卫生填埋技术规范（CJJ17-2004）中规定，填埋的垃圾压实密度应大于  $600\text{kg/m}^3$ ，厚度不应超过  $9\text{m}$ 。经过调研，典型填埋场的垃圾密度在  $0.51\sim 1.73\text{t/m}^3$  之间，据此计算得到每吨垃圾填埋占地面积约为  $0.099\text{m}^2/\text{t}$ 。

在填埋垃圾中的有毒有害等渗透液渗透到土壤和地下水中产生的环境影响的计算方面，参考中华人民共和国环境保护标准（HJ564-2010）中的计算方法：

$$Q = \frac{I \times (C_1 \times A_1 + C_2 \times A_2 + C_3 \times A_3)}{1000}$$

其中： $Q$  为渗透液的年产生量（ $\text{m}^3/\text{yr}$ ）； $I$  为平均年降雨量（ $\text{mm}/\text{y}$ ），北京市近 20 年的年降雨量平均值为  $1152\text{mm}/\text{y}$ ； $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  分别为作业单元、中间覆盖单元与终场覆盖单元的汇水面积； $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$  分别为作业单元、中间覆盖单元与终场覆盖单元的渗出系数，这里分别为  $0.5\sim 0.8$ 、 $0.4\sim 0.6$ 、 $0.1\sim 0.2$ 。

根据典型填埋场的具体参数，计算得到该填埋场全年的渗透液总量为  $88600\text{m}^3$ ，平均每吨垃圾的渗透液约为  $0.467\text{m}^3$ 。结合国家标准与文献中渗透液成分的取值范围，可计算出每吨垃圾填埋的污染物排放清单。

#### (2) 消耗电力在发电过程中的间接环境负荷清单分析

除填埋过程直接污染物排放以外，在填埋前需要对收集到的城市垃圾进行分拣、压缩等处理，该过程需要消耗一定的电力，根据测定，每吨城市垃圾填埋前处理的电耗约为  $1.26\text{kWh}$ 。根据第 5 章表 5.3 中的火电厂每生产  $1\text{kWh}$  电力的生命周期清单，可以计算出垃圾处理过程消耗的电力在发电过程中产生的间接环境负荷清单。

#### (3) 运输过程中的环境负荷清单分析

城市垃圾在填埋前，需要先经过收集、运输等一系列过程，假设垃圾收集后运送至填埋场的平均距离为  $100\text{km}$ ，运输方式为轻型货车公路运输。根据第 5 章表 5.4 公路运输清单，可计算出每吨垃圾填埋在运输过程中所造成的环境负荷清单。

#### (4) 清单汇总

将以上三个过程的清单进行汇总，得到城市垃圾卫生填埋处置的环境负荷总清单，见表 6.1 所示。

表 6.1 城市垃圾卫生填埋处置的环境负荷总清单  
(功能单位: 1 吨城市垃圾)

物质	单位	消耗/排放量	物质	单位	消耗/排放量
原煤	kg	8.25E-01	NO <sub>2</sub>	kg	1.68E-02
洗精煤	kg	8.20E-05	粉尘	kg	1.05E-03
其他洗煤	kg	1.62E-02	NM VOC	kg	1.98E-02
原油	kg	3.76E+00	CH <sub>4</sub>	kg	5.46E-04
汽油	kg	4.38E-07	N <sub>2</sub> O	kg	7.03E-04
柴油	kg	7.39E-04	AS	kg	2.04E-06
燃料油	kg	9.39E-04	COD	kg	2.10E+01
炼厂干气	kg	2.47E-04	Cd	kg	3.97E-03
其他石油制品	kg	4.92E-04	Cr	kg	2.03E-03
天然气	m <sup>3</sup>	6.77E-03	Hg	kg	8.96E-08
焦炉煤气	m <sup>3</sup>	4.30E-03	Ni	kg	2.10E-04
其他煤气	m <sup>3</sup>	5.34E-03	Pb	kg	4.69E-04
CO <sub>2</sub>	kg	1.11E+01	V	kg	2.94E-06
CO	kg	6.26E-02	Zn	kg	8.64E-02
SO <sub>2</sub>	kg	1.15E-02	Cu	kg	2.31E-03
NO	kg	1.51E-01	土地占用	m <sup>2</sup> /yr	1.98E+00

## 6.2.2 城市垃圾焚烧后填埋处置的基础清单分析

城市垃圾焚烧后填埋是指城市垃圾“收集-运输至焚烧场-焚烧-运输至填埋场-填埋”的处置方式。具体来讲,该处置方式先将城市垃圾运送至焚烧场进行焚烧,在焚烧过程中可消灭城市垃圾中的各种病原菌,并将有毒有害物质转化为无害物质以实现垃圾的减量化,之后将城市垃圾焚烧灰运送至填埋场作填埋处置。城市垃圾焚烧后填埋处置的清单分析范围主要包括以下四个方面:一是垃圾焚烧过程中的环境负荷清单分析;二是焚烧灰填埋过程中的环境负荷清单分析;三是消耗电力在发电过程中的间接环境负荷清单分析;四是运输过程中的清单分析。

### (1) 垃圾焚烧过程中的环境负荷清单分析

城市垃圾焚烧会产生多种污染物排放,据统计,在未采取任何末端治理的情况下,焚烧产生的污染物多达数百种,即使装备有较为完善的废气净化装置,也会排放出数十种污染物。垃圾焚烧产生的污染物尤以二恶英和重金属对人体健康的损害最大。经

过测定，每吨垃圾焚烧造成的主要污染物排放清单如表 6.2 所示。另外，虽然垃圾本身具有一定的热值，但在燃烧时仍需要加入一定的燃料油助燃，大约每吨城市垃圾需加燃料油 1.61kg。

表 6.2 城市垃圾焚烧过程中的环境负荷清单

(功能单位：1 吨城市垃圾)

物质	单位	消耗/排放量	物质	单位	消耗/排放量
燃油	kg/t	1.61E+00	As	kg/t	1.00E-05
CO <sub>2</sub>	kg/t	1.69E+02	Cr	kg/t	1.85E-04
SO <sub>2</sub>	kg/t	1.69E+00	Cu	kg/t	9.30E-05
NO <sub>x</sub>	kg/t	3.39E-01	Ni	kg/t	1.20E-04
CO	kg/t	7.00E-01	Zn	kg/t	9.00E-04
NMVOC	kg/t	2.00E-02	多氯联苯	kg/t	5.30E-06
颗粒物	kg/t	3.80E-01	二恶英	kg/t	3.50E-07
COD	kg/t	1.94E-01	苯并(a)芘	kg/t	4.20E-06
Pb	kg/t	8.00E-04	苯并(b)荧蒽	kg/t	3.20E-06
Cd	kg/t	1.00E-04	苯并(k)荧蒽	kg/t	3.10E-06
Hg	kg/t	1.10E-03	六氯苯	kg/t	2.00E-06

### (2) 焚烧灰填埋过程中的环境负荷清单分析

城市垃圾焚烧后干重约下降 70%-90%，产生的灰渣分为底灰与飞灰两类，其中底灰的质量占 80% 以上，压实密度在 1.2t/m<sup>3</sup> 左右，而飞灰的压实密度在 1.24-1.51t/m<sup>3</sup> 之间。焚烧灰一般仍采用填埋处置，按焚烧后干重下降 80% 计算，每吨城市垃圾产生焚烧灰 200kg，填埋这些焚烧灰的占地面积为 0.018m<sup>2</sup>（按填埋深度 9m 计）。焚烧灰填埋过程的渗滤液排放清单仍采用与直接填埋处置相同的计算方法。

### (3) 消耗电力在发电过程中的间接环境负荷清单分析

垃圾焚烧处理的电力消耗来自三个方面：一是焚烧系统的电耗，约为 57.12kwh/t 垃圾；二是填埋前预处理的电耗，按焚烧后干重质量下降 80% 计算，处理每吨城市垃圾需要填埋 200kg 的焚烧灰，约耗电 0.252kwh；三是利用城市垃圾焚烧过程产生的热量进行发电，每吨城市垃圾焚烧约产生 271Kwh 的电力；综合考虑以上三个方面，每吨城市垃圾焚烧后填埋的电耗量为-213kwh，即焚烧过程的发电量超过了垃圾处理电耗。根据第 5 章表 5.3 中的火电厂每生产 1kWh 电力的生命周期清单，可以计算出发电过程的间接环境负荷清单。

## (4) 运输过程中的环境负荷清单分析

焚烧处置的运输分为两个方面，一是城市垃圾在填埋前，需要先经过收集并运送至焚烧场，假设垃圾收集后运送至焚烧场的平均距离为 100km，运输方式为轻型货车，城市道路；二是焚烧后焚烧灰运送至填埋场，运输距离假设为 20km。根据第 5 章表 5.4 公路运输清单（每吨百公里），编制出每吨垃圾焚烧处置在运输过程所造成的环境负荷清单。

## (5) 清单汇总

将以上四个过程的清单进行汇总，得到城市垃圾焚烧后填埋处置的环境负荷总清单，见表 6.3 所示。

表 6.3 城市垃圾焚烧后填埋处置的环境负荷总清单

(功能单位：1 吨城市垃圾)

物质	单位	消耗/排放量	物质	单位	消耗/排放量
原煤	kg	-1.17E+02	CH <sub>4</sub>	kg	-2.43E-02
洗精煤	kg	-1.39E-02	N <sub>2</sub> O	kg	-1.34E-02
其他洗煤	kg	-2.75E+00	AS	kg	-3.35E-04
原油	kg	5.33E+00	COD	kg	4.39E+00
汽油	kg	-7.40E-05	Cd	kg	8.91E-04
柴油	kg	-1.25E-01	Cr	kg	5.62E-04
燃料油	kg	-1.59E-01	Hg	kg	1.08E-03
炼厂干气	kg	-4.18E-02	Ni	kg	1.19E-04
其他石油制品	kg	-8.32E-02	Pb	kg	5.91E-04
天然气	m <sup>3</sup>	-1.11E+00	V	kg	-4.96E-04
焦炉煤气	m <sup>3</sup>	-7.27E-01	Zn	kg	1.78E-02
其他煤气	m <sup>3</sup>	-9.02E-01	二恶英	Kg	3.50E-07
CO <sub>2</sub>	kg	-7.60E+01	Cu	kg	5.55E-04
CO	kg	3.89E-01	苯并(a)芘	kg	4.20E-06
SO <sub>2</sub>	kg	1.48E+00	苯并(b)荧蒽	kg	3.20E-06
NO	kg	-3.18E-01	苯并(k)荧蒽	kg	3.10E-06
NO <sub>2</sub>	kg	-7.30E-02	六氯苯	kg	2.00E-06
粉尘	kg	3.31E-01	土地占用	m <sup>2</sup> /yr	3.58E-01
NM VOC	kg	3.50E-03			

### 6.2.3 城市垃圾焚烧后水泥窑处置的基础清单分析

城市垃圾焚烧后水泥窑处置是指城市垃圾“收集-运输至焚烧场-焚烧-运输至水泥厂-水泥窑处置”的处置方式。具体来讲，该处置方式先将城市垃圾运送至焚烧场进行焚烧，由于焚烧后产生的焚烧灰可替代水泥生料中的粘土成分，因此城市垃圾的焚烧灰作为水泥原料再运送至水泥厂进一步处置。城市垃圾焚烧后水泥窑处置的清单分析范围主要包括以下四个方面：一是垃圾焚烧过程中的环境负荷清单分析；二是水泥窑处置焚烧灰的资源与能源消耗的环境负荷清单分析；三是消耗电力在发电过程中的间接环境负荷清单分析；四是运输过程中的环境负荷清单分析。

#### (1) 垃圾焚烧过程中的环境负荷清单分析

在水泥窑处置焚烧灰的技术路线中，垃圾经收集后首先运送至焚烧炉进行焚烧，焚烧过程的环境负荷清单与垃圾焚烧处置方式中计算得到的垃圾焚烧的直接排放清单完全相同，在此不再累述。

#### (2) 水泥窑处置焚烧灰的资源与能源消耗的环境负荷清单分析

焚烧灰运送至水泥厂，经过分解、除氯等一系列预处理后的物质作为生料替代粘土质原料的消耗，因此水泥厂处置焚烧灰可降低粘土质原料的消耗。假设焚烧灰可以替代相同质量的粘土资源，计算得到处置每吨城市垃圾焚烧灰以减少粘土资源的用量与降低这些资源在开采过程的能源消耗与污染物排放情况，见表 6.4 所示，负值表示水泥窑处置焚烧灰所带来的环境效益，即避免了这些资源能源消耗与污染物排放。

表 6.4 水泥窑处置焚烧灰的资源与能源消耗的环境负荷清单

物质	每吨粘土开采		每吨垃圾处置	
	单位	单位粘土开采	单位	数量
原煤	kg/t	9.23E-03	kg/t	-1.85E-02
原油	kg/t	8.55E-01	kg/t	-1.71E-01
天然气	m <sup>3</sup> /t	6.56E-052	m <sup>3</sup> /t	-1.31E-02
CO <sub>2</sub>	kg/t	2.38E-00	kg/t	-4.76E-01
SO <sub>2</sub>	kg/t	8.07E-04	kg/t	-1.61E-04
NO <sub>x</sub>	kg/t	3.31E-02	kg/t	-6.61E-03
CO	kg/t	9.66E-03	kg/t	-1.93E-03
CH <sub>4</sub>	kg/t	1.21E-04	kg/t	-2.41E-05
NM VOC	kg/t	3.89E-03	kg/t	-7.79E-04
颗粒物	kg/t	3.38E-03	kg/t	-6.77E-04
工业用地(占用)	m <sup>2</sup> /year×t	1.16E+00	m <sup>2</sup> /year×t	-2.31E-01

### (3) 消耗电力在发电过程中的间接环境负荷清单分析

水泥窑处置焚烧灰过程的电力消耗主要来自三个方面：一是焚烧系统的电耗，约为 57.12kwh/t 垃圾，二是水泥窑对焚烧灰进行预处理的电耗，按焚烧后干重质量下降 80% 计算，每吨城市垃圾焚烧后产生 200kg 的焚烧灰，预处理每吨焚烧灰约耗电 17kwh；三是利用城市垃圾焚烧过程产生的热量进行发电，每吨城市垃圾焚烧产生的电力为 271kWh。综合以上三方面，水泥窑处置城市垃圾焚烧灰的电力消耗为 -196.88kWh，根据第 5 章表 5.3 中的火电厂每生产 1kWh 电力的生命周期清单，可以计算出水泥窑处置城市垃圾在发电阶段的间接环境负荷清单。

### (4) 运输过程中的环境负荷清单分析

水泥窑处置焚烧灰路线的运输过程分为两部分：一是城市垃圾在焚烧前，需要先经过收集并运送至焚烧场，假设垃圾收集后运送至焚烧场的平均距离为 100km，运输方式为轻型货车公路运输；二是焚烧后焚烧灰运送至水泥厂，运输距离假设为 50km。根据第 5 章表 5.4 公路运输清单（每吨百公里），可计算出每吨城市垃圾在运输过程中所造成的环境负荷清单。

### (5) 清单汇总

将以上四个过程的清单进行汇总，得到城市垃圾焚烧后水泥窑处置的环境负荷总清单，见表 6.5 所示。其中包含了该处置方式处置城市垃圾在收集、运输、焚烧与水泥厂预处理等过程中的主要资源消耗、能源消耗、污染物排放与土地使用情况。

表 6.5 城市垃圾焚烧后水泥窑处置的环境负荷总清单

(功能单位：1 吨城市垃圾)

物质	单位	消耗/排放量	物质	单位	消耗/排放量
原煤	kg	-1.08E+02	CH <sub>4</sub>	kg	-2.24E-02
洗精煤	kg	-1.28E-02	N <sub>2</sub> O	kg	-1.23E-02
其他洗煤	kg	-2.54E+00	AS	kg	-3.09E-04
原油	kg	5.39E+00	COD	kg	1.94E-01
汽油	kg	-6.84E-05	Cd	kg	9.80E-05
柴油	kg	-1.15E-01	Cr	kg	1.58E-04
燃料油	kg	-1.47E-01	Hg	kg	1.09E-03
炼厂干气	kg	-3.86E-02	Ni	kg	8.00E-05
其他石油制品	kg	-7.69E-02	Pb	kg	5.20E-04

物质	单位	消耗/排放量	物质	单位	消耗/排放量
天然气	m <sup>3</sup>	-1.03E+00	V	kg	-4.59E-04
焦炉煤气	m <sup>3</sup>	-6.72E-01	Zn	kg	5.18E-04
其他煤气	m <sup>3</sup>	-8.34E-01	二恶英	Kg	3.50E-07
CO <sub>2</sub>	kg	-5.59E+01	Cu	kg	9.30E-05
CO	kg	4.19E-01	苯并(a)芘	kg	4.20E-06
SO <sub>2</sub>	kg	1.50E+00	苯并(b)荧蒽	kg	3.20E-06
NO	kg	-2.55E-01	苯并(k)荧蒽	kg	3.10E-06
NO <sub>2</sub>	kg	-6.52E-02	六氯苯	kg	2.00E-06
粉尘	kg	3.34E-01	土地占用	m <sup>2</sup> /yr	-2.33E-01
NM VOC	kg	6.72E-03			

#### 6.2.4 城市垃圾直接水泥窑处置的基础清单分析

城市垃圾直接水泥窑处置是指城市垃圾“收集-运输至水泥厂-水泥窑处置”的处置方式。具体来讲，该处置方式是不用事先经过焚烧处理而直接运送至水泥厂，通过发酵处理便可作为水泥的补充原料入窑煅烧成水泥熟料。城市垃圾直接水泥窑处置的清单分析范围主要包括以下四个方面：一是水泥窑焚烧城市垃圾过程中的环境负荷清单分析；二是水泥窑处置城市垃圾的资源与能源消耗的环境负荷清单分析；三是消耗电力在发电过程中的环境负荷清单分析；四是运输过程中的环境负荷清单分析。

##### (1) 水泥窑焚烧城市垃圾过程中的环境负荷清单分析

目前，城市垃圾焚烧主要是通过焚烧炉来完成，与焚烧炉相比，水泥回转窑则具有更加理想的燃烧条件，见表 6.6 所示。

表 6.6 水泥回转窑与焚烧炉的参数比较

参数	窑内温度℃	物料温度℃	气体停留时间 s	物料停留时间 s	回转窑转速 r/min
焚烧炉	1200	850	2	由性质决定	0.2-0.3
水泥回转窑	2000	1450	>4	30-50	2.8-3.2

由表中可以看出以下四点：第一，水泥回转窑的焚烧温度更高，气体和物料的停留时间更长，使废弃物焚烧得更为彻底；第二，水泥窑全系统在负压下运行，有毒有害气体不能溢出，除尘效率较高，且水泥生产为碱性环境，可以中和并吸收有害废弃物中的氯、硫与氟等成分，便于废气的净化与脱酸处理；第三，焚烧的残渣进入水泥

熟料，绝大多数重金属元素固化于熟料中；第四，水泥煅烧时的温度超过了产生二恶英的温度范围，破坏了它的生成条件，所以水泥回转窑在焚烧废弃物时基本不会产生二恶英类排放物。我国典型的 2000t/d 水泥熟料生产线，在常规煅烧和焚烧危险废弃物时，据监测，二恶英的排放浓度仅为 0.006ng-TEQ/m<sup>3</sup>。但是在气体的冷却过程中却可能产生二恶英，需要将出窑废气在增湿塔里急速冷却到 250℃ 以下，可防止在 250-350℃ 温度范围内二恶英重新生成。

### (2) 水泥窑处置城市垃圾的资源与能源消耗的环境负荷清单分析

垃圾中的无机物如 SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等可直接与水泥熟料进行化合生成水泥熟料矿物，可燃性废弃物还可替代部分燃煤的消耗，既处理了废料，又节约了资源与能源，一举多得。水泥窑处置每吨城市垃圾减少的粘土与原煤用量，以及间接避免的这些资源在开采过程的环境负荷清单见表 6.7 所示，表中的负值表示水泥窑处置城市垃圾所带来的环境效益，即避免了这些资源能源消耗与污染物排放。

表 6.7 城市垃圾直接水泥窑处置的资源与能源消耗的环境负荷清单

(功能单位：1 吨城市垃圾)

物质	每吨粘土开采		每吨原煤开采		利用每吨城市垃圾	
	单位	数量	单位	数量	单位	数量
原煤	kg/t	9.23E-02	kg/t	1.08E+03	kg/t	-1.08E+02
原油	kg/t	8.55E-01	kg/t	8.59E-01	kg/t	-2.57E-01
天然气	m <sup>3</sup> /t	6.56E-02	m <sup>3</sup> /t	5.13E-05	m <sup>3</sup> /t	-1.31E-02
CO <sub>2</sub>	kg/t	2.38E-00	kg/t	6.19E+00	kg/t	-1.10E+00
SO <sub>2</sub>	kg/t	8.07E-04	kg/t	7.45E-036	kg/t	-9.06E-04
NO <sub>x</sub>	kg/t	3.31E-02	kg/t	4.29E-02	kg/t	-1.09E-02
CO	kg/t	9.66E-03	kg/t	5.17E-03	kg/t	-2.45E-03
CH <sub>4</sub>	kg/t	1.21E-04	kg/t	8.71E-02	kg/t	-8.73E-03
NM VOC	kg/t	3.89E-03	kg/t	0.00E+00	kg/t	-7.79E-04
颗粒物	kg/t	3.38E-03	kg/t	8.51E-03	kg/t	-1.53E-03
工业用地(占用)	m <sup>2</sup> year/t	1.16E+00	m <sup>2</sup> year/t	6.03E+00	m <sup>2</sup> year/t	-8.34E-01
粘土	kg/t	1.03E+03	-	-	kg/t	-2.01E+02

### (3) 消耗电力在发电过程中的环境负荷清单分析

水泥窑处置城市垃圾与处置焚烧灰相同，需要对进场垃圾进行预处理方可入窑焚

烧，其间的水洗等设备需要消耗一定的电力。根据测定，水泥窑处置城市垃圾共耗电约 40kWh/t，根据第 5 章表 5.3 中的火电厂每生产 1kWh 电力的生命周期清单，可以计算出水泥窑处置城市垃圾消耗电力在发电过程中的间接环境负荷清单。

#### (4) 运输过程中的环境负荷清单分析

垃圾收集后运送至水泥厂的平均距离为 100km，运输方式为轻型货车公路运输，根据第 5 章表 5.4 公路运输清单（每吨百公里），可以计算出出每吨城市垃圾在运输过程中所造成的环境负荷清单。

#### (5) 清单汇总

将以上四个过程的清单进行汇总，得到城市垃圾直接水泥窑处置的环境负荷总清单，见表 6.8 所示。

**表 6.8 城市垃圾直接水泥窑处置的环境负荷总清单**  
(功能单位: 1 吨城市垃圾)

物质	单位	消耗/排放量	物质	单位	消耗/排放量
原煤	kg	-8.60E+01	CH <sub>4</sub>	kg	-3.70E-03
洗精煤	kg	2.60E-03	N <sub>2</sub> O	kg	3.25E-03
其他洗煤	kg	5.16E-01	AS	kg	6.48E-05
原油	kg	3.54E+00	COD	kg	1.94E-01
汽油	kg	1.39E-05	Cd	kg	4.12E-07
柴油	kg	2.35E-02	Cr	kg	5.48E-06
燃料油	kg	2.98E-02	Hg	kg	2.84E-06
炼厂干气	kg	7.85E-03	Ni	kg	8.12E-06
其他石油制品	kg	1.56E-02	Pb	kg	5.68E-05
天然气	m <sup>3</sup>	1.95E-01	V	kg	9.32E-05
焦炉煤气	m <sup>3</sup>	1.37E-01	Zn	kg	7.76E-05
其他煤气	m <sup>3</sup>	1.69E-01	二恶英	Kg	1.80E-09
CO <sub>2</sub>	kg	2.25E+02	粘土	kg	-2.01E+02
粉尘	kg	3.89E-01	工业用地(占用)	m <sup>2</sup> /yr	-8.34E-01
NM VOC	kg	4.58E-02			

### 6.2.5 城市垃圾水泥窑综合处置的基础清单分析

城市垃圾水泥窑综合处置是指城市垃圾“收集-运输至水泥厂-RDF 制造-水泥窑处置”的处置方式。具体来讲，该处置方式是利用 RDF (Refuse Derived Fuel, 垃圾衍生燃料) 制造技术将可燃组分和生物组分压缩成所需形状的固体燃料，作为水泥生产的替代燃料，而垃圾中的无机组分经过破碎与均化处理后可作为水泥生产的替代原料。城市垃圾水泥窑综合处置的清单分析范围主要包括以下四个方面：一是 RDF 燃料替代燃煤燃烧的环境负荷清单分析；二是水泥窑综合处置城市垃圾的资源与能源消耗的环境负荷清单分析；三是消耗电力在发电过程中的间接环境负荷清单分析；四是运输过程中的环境负荷清单分析。

#### (1) RDF 燃料替代燃煤燃烧过程中的环境负荷清单分析

燃煤的煤粉炉由于垃圾成分和尺寸波动较大，很难直接燃烧生活垃圾，而在煤中混烧 RDF 被证明是可行并且有效的。经实验结果表明，RDF 混烧时可以降低  $\text{NO}_x$  的排放量。同时，混烧时硫化物的排放浓度较单独燃煤时低，这是由于 RDF 的硫含量较少，降低了  $\text{SO}_2$  的排放浓度。混烧中虽然二恶英排放比煤多，但仍符合环保标准。每吨城市垃圾可以制造出大约 545kg 的 RDF，其在水泥窑燃烧产生的排放清单，见表 6.9 所示。

表 6.9 RDF 燃料替代燃煤燃烧过程中的环境负荷清单

(功能单位：1 吨城市垃圾)

物质	单位	消耗/排放量	物质	单位	消耗/排放量
$\text{CO}_2$	kg/t	9.21E+01	NM VOC	kg/t	1.09E-02
$\text{SO}_2$	kg/t	9.21E-01	颗粒物	kg/t	2.07E-01
$\text{NO}_x$	kg/t	1.85E-01	COD	kg/t	1.06E-01
CO	kg/t	3.82E-01	二恶英	kg/t	9.81E-10

#### (2) 水泥窑综合处置城市垃圾的资源与能源消耗的环境负荷清单分析

垃圾经分拣后，无机物组分可直接与水泥熟料进行化合生成水泥熟料矿物，替代粘土质原料的消耗。可燃部分制成 RDF 后可替代部分燃煤的消耗，通常每吨垃圾可产出 545kg 的 RDF，其热值在 12500~17500kJ/kg 之间，而一般生活垃圾的热值仅为 3500~5000kJ/kg。水泥窑处置每吨城市垃圾减少的粘土与原煤用量，以及间接避免的这些资源在开采过程的环境负荷清单见表 6.10 所示，表中的负值表示水泥窑处置城市

垃圾所带来的环境效益，即避免了这些资源能源消耗与污染物排放。

表 6.10 水泥窑综合处置城市垃圾的资源与能源消耗的环境负荷清单

(功能单位: 1 吨城市垃圾)

物质	每吨粘土开采		每吨原煤开采		利用每吨城市垃圾	
	单位	数量	单位	数量	单位	数量
原煤	kg/t	9.23E-02	kg/t	1.08E+03	kg/t	-4.22E+02
原油	kg/t	8.55E-01	kg/t	8.59E-01	kg/t	-4.90E-01
天然气	m <sup>3</sup> /t	6.56E-02	m <sup>3</sup> /t	5.13E-05	m <sup>3</sup> /t	-1.18E-02
CO <sub>2</sub>	kg/t	2.38E+00	kg/t	6.19E+00	kg/t	-2.85E+00
SO <sub>2</sub>	kg/t	8.07E-04	kg/t	7.45E-03	kg/t	-3.06E-03
NO <sub>x</sub>	kg/t	3.31E-02	kg/t	4.29E-02	kg/t	-2.27E-02
CO	kg/t	9.66E-03	kg/t	5.17E-03	kg/t	-3.76E-03
CH <sub>4</sub>	kg/t	1.21E-04	kg/t	8.71E-02	kg/t	-3.41E-02
NMVOOC	kg/t	3.89E-03	kg/t	0.00E+00	kg/t	-7.01E-04
颗粒物	kg/t	3.38E-03	kg/t	8.51E-03	kg/t	-3.94E-03
工业用地(占用)	m <sup>2</sup> /year×t	1.16E+00	m <sup>2</sup> /year×t	6.03E+00	m <sup>2</sup> /year×t	-2.57E+00
粘土	kg/t	1.03E+03	-	-	kg/t	-1.80E+02

### (3) 消耗电力在发电过程中的间接环境负荷清单分析

垃圾在分拣、预处理与 RDF 制备过程中均需要消耗一定量的电力，每吨城市垃圾可产生 545kg 的 RDF，约耗电 111.4kwh/t RDF，换算为每吨城市垃圾处置约耗电 60.7kwh/t 垃圾。根据第 5 章表 5.3 中的火电厂每生产 1kWh 电力的生命周期清单，可以计算出城市垃圾综合处置消耗电力在发电过程中的间接环境负荷清单。

### (4) 运输过程中的环境负荷清单分析

垃圾收集后运送至水泥厂的平均距离为 100km，运输方式为轻型货车公路运输，根据第 5 章表 5.4 公路运输清单（每吨百公里），可以计算出每吨城市垃圾在运输过程中所造成的环境负荷清单。

### (5) 清单汇总

将以上四个过程的清单进行汇总，得到城市垃圾水泥窑综合处置的环境负荷总清单，见表 6.11 所示。

表 6.11 城市垃圾水泥窑综合处置的环境负荷总清单

(功能单位: 1 吨城市垃圾)

物质	消耗/排放量	物质	消耗/排放量
原煤	-3.89E+02	CH <sub>4</sub>	-2.67E-02
洗精煤	3.95E-03	N <sub>2</sub> O	4.61E-03
其他洗煤	7.82E-01	AS	9.83E-05
原油	3.32E+00	COD	1.06E-01
汽油	2.11E-05	Cd	6.25E-07
柴油	3.56E-02	Cr	8.32E-06
燃料油	4.53E-02	Hg	4.32E-06
炼厂干气	1.19E-02	Ni	1.23E-05
其他石油制品	2.37E-02	Pb	8.62E-05
天然气	3.03E-01	V	1.41E-04
焦炉煤气	2.07E-01	Zn	1.18E-04
其他煤气	2.57E-01	二恶英	9.81E-10
CO <sub>2</sub>	1.71E+02	工业用地(占用)	-2.57E+00
CO	5.45E-01	农业用地→工业用地	-2.16E-02
SO <sub>2</sub>	9.92E-01	林地→工业用地	-2.32E-02
NO	5.40E-01	草地→工业用地	-5.75E-03
NO <sub>2</sub>	4.18E-02	未利用地→工业用地	-7.78E-02
粉尘	2.18E-01	粘土	-1.80E+02
NM VOC	4.03E-02		

### 6.3 环境影响标准化

根据表 6.1 城市垃圾卫生填埋处置的环境负荷总清单、表 6.3 城市垃圾焚烧后填埋处置的环境负荷总清单、表 6.5 城市垃圾焚烧后水泥窑处置的环境负荷总清单、表 6.8 城市垃圾直接水泥窑处置的环境负荷总清单、表 6.11 城市垃圾水泥窑综合处置的环境负荷总清单和第 3 章表 3.3 中的环境影响特征化因子, 可计算出每处置 1 吨城市垃圾, 五种不同处置方式的环境影响的特征化结果 (见表 6.12)。

表 6.12 五种城市垃圾处置方式的特征化结果

(功能单位: 1 吨城市垃圾)

	填埋	焚烧后填埋	焚烧灰后 水泥窑处置	直接 水泥窑处置	水泥窑 综合处置
温室效应 (GWP)	1.13E+01	-8.08E+01	-6.03E+01	2.26E+02	1.72E+02
酸化效应 (AP)	1.37E-01	1.50E+00	1.57E+00	2.58E+00	1.62E+00
光化学效应 (POCP)	5.69E-03	7.99E-02	8.24E-02	1.14E-01	6.94E-02
水体富营养化 (EP)	3.24E-02	-7.31E-02	-5.95E-02	1.30E-01	1.13E-01
人体健康危害 (HTP)	7.57E+03	2.64E+03	1.14E+03	4.69E+01	6.69E+01
不可再生资源消耗 (ADP)	3.73E-04	4.74E-04	4.84E-04	-7.25E-03	-6.49E-03

根据第 3 章的表 3.6 世界范围内的环境负荷总当量数, 可以得到五种城市垃圾处理方式的环境影响标准化结果 (表 6.13)

表 6.13 五种城市垃圾处置方式的标准化结果

(功能单位: 1 吨城市垃圾)

	填埋	焚烧后填埋	焚烧灰后 水泥窑处置	直接 水泥窑处置	水泥窑 综合处置
温室效应 (GWP)	2.70E-13	-1.93E-12	-1.44E-12	5.41E-12	4.11E-12
酸化效应 (AP)	4.31E-13	4.72E-12	4.94E-12	8.11E-12	5.09E-12
光化学效应 (POCP)	1.62E-14	2.28E-13	2.35E-13	3.25E-13	1.98E-13
水体富营养化 (EP)	2.05E-13	-4.63E-13	-3.77E-13	8.23E-13	7.15E-13
人体健康危害 (HTP)	8.54E-10	2.98E-10	1.29E-10	5.29E-12	7.55E-12
不可再生资源消耗 (ADP)	1.74E-14	2.21E-14	2.26E-14	-3.39E-13	-3.03E-13

## 6.4 环境影响综合评价

这里也是根据第 4 章给出的权重求解及环境影响综合评价模型依步骤进行分析, 其中 *Step1* 至 *Step8* 不同置信水平下各环境影响类型的模糊权重值的计算过程及结果与第 4 章完全相同, 这里不再赘述。下面从 *Step9* 开始分析:

**Step9:** 计算城市垃圾不同处置方式的综合影响负荷值  $\tilde{U}_i = S_i^T \bullet \tilde{W} = \sum_{j=1}^6 s_{ij} \tilde{w}_j$ , 其中  $i$  表示不同的处置方法,  $j$  表示不同环境影响类型, 这里

$$S = \begin{bmatrix} 2.70E-13 & 4.31E-13 & 1.62E-14 & 2.05E-13 & 8.54E-10 & 1.74E-14 \\ -1.93E-12 & 4.72E-12 & 2.28E-13 & -4.63E-13 & 2.98E-10 & 2.21E-14 \\ -1.44E-12 & 4.94E-12 & 2.35E-13 & -3.77E-13 & 1.29E-10 & 2.26E-14 \\ 5.41E-12 & 8.11E-12 & 3.25E-13 & 8.23E-13 & 5.29E-12 & -3.39E-13 \\ 4.11E-12 & 5.09E-12 & 1.98E-13 & 7.15E-13 & 7.55E-12 & -3.02E-13 \end{bmatrix} \begin{matrix} S_1^T \\ S_2^T \\ S_3^T \\ S_4^T \\ S_5^T \end{matrix}$$

经过计算，求得不同城市污泥处置方式综合环境负荷值如下表所列：

表 6.14 不同置信水平下各城市垃圾处置方式综合环境负荷值 ( $\times 10^{-12}$ )

$\alpha$	直接填埋	焚烧后填埋	焚烧后水泥窑处置	直接水泥窑处置	水泥窑综合处置
0	[264.380,446.910]	[92.792,156.990]	[40.590,68.801]	[3.640,6.997]	[3.675,6.790]
0.05	[268.650,442.350]	[94.290,155.380]	[41.246,68.090]	[3.706,6.891]	[3.740,6.698]
0.10	[273.040,437.810]	[95.828,153.780]	[41.917,67.383]	[3.756,6.788]	[3.794,6.607]
0.15	[277.400,433.290]	[97.360,152.180]	[42.588,66.678]	[3.822,6.685]	[3.859,6.516]
0.20	[281.830,428.790]	[98.913,150.590]	[43.267,65.977]	[3.891,6.584]	[3.926,6.427]
0.25	[286.260,424.300]	[100.470,149.010]	[43.947,65.278]	[3.960,6.484]	[3.993,6.339]
0.30	[290.680,419.830]	[102.020,147.440]	[44.627,64.582]	[4.029,6.385]	[4.061,6.252]
0.35	[295.140,415.380]	[103.590,145.870]	[45.313,63.889]	[4.099,6.288]	[4.128,6.165]
0.40	[299.570,410.940]	[105.140,144.300]	[45.995,63.199]	[4.171,6.192]	[4.197,6.080]
0.45	[304.210,406.530]	[106.770,142.750]	[46.708,62.512]	[4.244,6.097]	[4.269,5.995]
0.50	[308.900,402.120]	[108.410,141.190]	[47.423,61.827]	[4.303,6.003]	[4.331,5.911]
0.55	[313.640,397.730]	[110.070,139.650]	[48.150,61.145]	[4.382,5.910]	[4.406,5.828]
0.60	[318.440,393.360]	[111.760,138.110]	[48.887,60.465]	[4.458,5.818]	[4.480,5.746]
0.65	[323.280,389.000]	[113.460,136.570]	[49.633,59.788]	[4.535,5.727]	[4.555,5.664]
0.70	[328.190,384.660]	[115.180,135.040]	[50.387,59.113]	[4.614,5.637]	[4.631,5.583]
0.75	[333.140,380.320]	[116.920,133.510]	[51.151,58.440]	[4.692,5.547]	[4.706,5.503]
0.80	[338.160,376.000]	[118.680,131.990]	[51.923,57.769]	[4.774,5.459]	[4.785,5.424]
0.85	[343.240,371.690]	[120.470,130.470]	[52.704,57.100]	[4.857,5.372]	[4.865,5.345]
0.90	[348.380,367.390]	[122.270,128.960]	[53.495,56.433]	[4.941,5.285]	[4.946,5.266]
0.95	[353.570,363.110]	[124.100,127.450]	[54.295,55.768]	[5.027,5.200]	[5.028,5.189]
1	[358.840,358.840]	[125.940,125.940]	[55.105,55.105]	[5.115,5.115]	[5.112,5.112]

## 6.5 结果解释

### 6.5.1 不同环境类型下的对比分析

根据表 6.13 不同城市垃圾处置方式的环境影响标准化结果,对五种城市垃圾处置方式在不同环境影响类型下进行对比分析。在不同环境影响类型下,将影响最大的处置方式的影响值作为 100%,其他处置方式影响值与此影响值的比值作为相对影响值,则五种城市垃圾处置方式在不同环境影响类型下的对比情况如图 6.2 和图 6.3 所示。

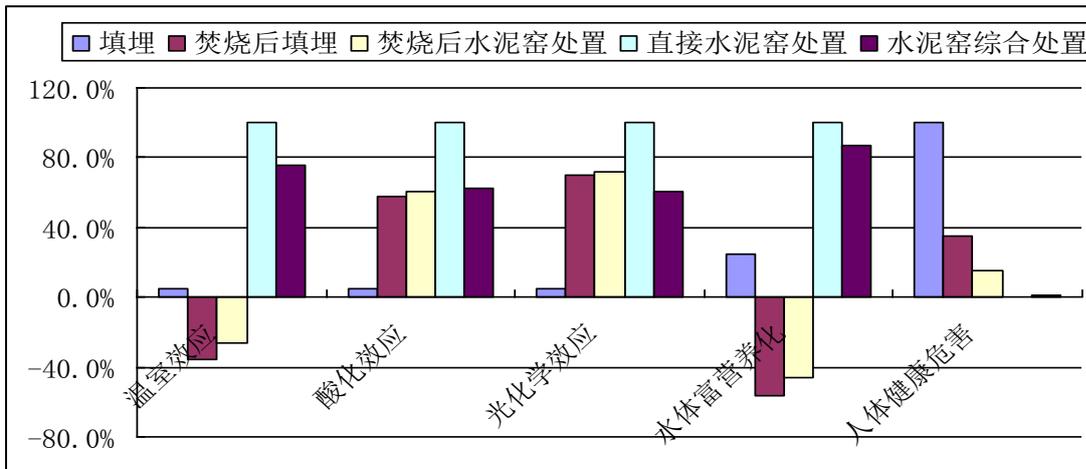


图 6.2 五种城市垃圾处置方式的环境影响对比图（一）

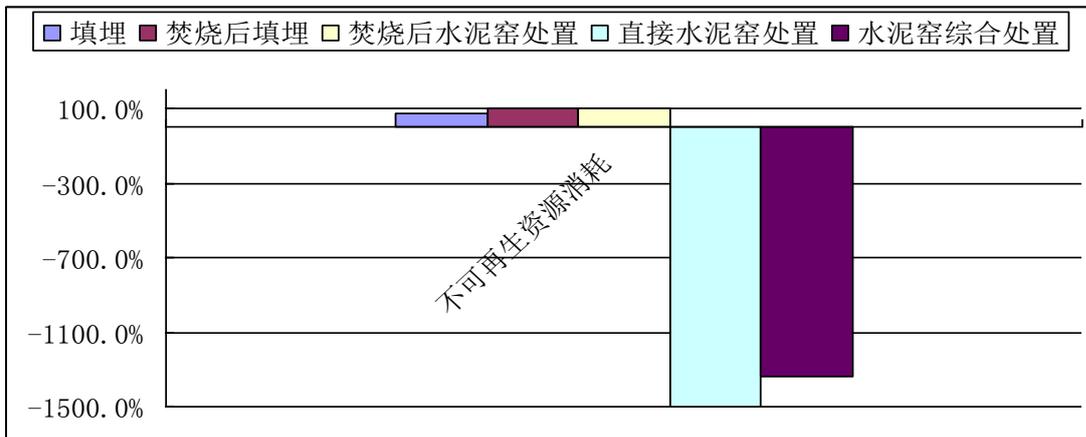


图 6.3 五种城市垃圾处置方式的环境影响对比图（二）

根据对比结果,从五个方面讨论五种城市垃圾处置方式造成环境影响的差异:

第一,在温室效应(GWP)和水体富营养化(EP)方面,焚烧后填埋和焚烧后水泥窑处置的环境影响最低且为负值,主要是因为焚烧垃圾产生的电力超出其消耗的电力,其中每吨垃圾焚烧后填埋可额外产生 196.88kWh 的电力,焚烧后水泥厂处置可额外产生 40kWh 的电力,从而避免了这些额外电力以火电厂的形式进行发电所产生

的各类排放。而直接水泥窑处置和综合处置的环境影响最高，主要是因为处置过程中消耗的电力对环境的不利影响超出城市垃圾替代粘土与原煤对环境造成的有益影响。

第二，在酸化效应（AP）和光化学效应（POCP）方面，卫生填埋处置对环境的影响最小，直接水泥窑处置环境影响最大，而其他三种处置方式对环境的影响也都较大，主要是因为造成环境酸化效应（AP）和光化学效应（POCP）的多是CO、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、NH<sub>3</sub>、NMVOC等有害气体，这些气体大多在焚烧过程中产生，除卫生填埋外，其余四种城市垃圾的处置方式均需要经过焚烧处理，因此这四种城市垃圾处置方式在酸化效应（AP）和光化学效应（POCP）方面对环境的影响较大。

第三，在人体健康危害（HTP）方面，人体健康损害是城市垃圾处置最为主要的环境影响，其损害潜力远高于其他环境影响。城市垃圾填埋处置会持续产生渗透液，污染土壤与地下水，而垃圾焚烧会排放有毒有害气体和颗粒物，污染大气环境。从计算结果上来看，填埋处置对人体健康的损害潜质最大。焚烧后填埋处置环境影响潜质次之，这种城市垃圾的处置方式消除了80%的填埋阶段的环境影响，但增加了焚烧阶段的环境影响。焚烧后水泥窑处置的环境相对影响值约为15%，在处置过程中，焚烧后的焚烧灰替代部分粘土作为水泥生产原料，不但节省了能源资源，而且还可以避免填埋造成的人体危害影响。直接水泥窑处置和综合处置的环境影响潜质最低，相对影响值均不到1%，这两种处置方式一方面可以利用城市垃圾本身的燃烧产热性质替代部分燃煤，而且燃烧后的剩余物质还可作为原料生产水泥，起到节约能源资源的作用。

第四，在不可再生资源消耗（ADP）方面，从结果来看，城市垃圾的两种传统处置方式和焚烧后水泥窑处置的不可再生资源消耗影响潜质为正值，其余为负值。其中焚烧后水泥窑处置在不可再生资源消耗的环境影响负荷最大，这种处置方式的不可再生资源消耗主要发生在焚烧、水泥窑协同处置和交通运输三个阶段上，尽管焚烧尽管垃圾焚烧发电量大于消耗量，焚烧灰也可以替代粘土来生产水泥，但是在水泥窑协同处置过程中需要消耗大量的电力，再加上交通运输消耗，因此焚烧后水泥窑处置在不可再生资源方面的损耗已大大超出焚烧发电及替代粘土带来的益处。填埋处置的不可再生资源消耗主要发生在电力和交通运输两个阶段，而焚烧后填埋处置主要发生在焚烧、电力和交通运输三个阶段，这两种处置方式在不可再生资源消耗方面的相对影响值大约分别为77%和97.8。城市垃圾的直接水泥窑处置和水泥窑综合处置在不可再生资源消耗方面均对环境造成有益影响，这两种城市垃圾处置方式的不可再生资源消耗

均主要发生在焚烧、电力、水泥生产和交通运输四个方面，其中城市垃圾可代替部分煤炭为水泥生产提供能源，燃烧灰也可以替代粘土作为生产水泥的原料，从数值上看是这两种城市垃圾的水泥窑处置方式在不可再生资源消耗方面的相对影响值大约分别为-1500%和-1341%。

### 6.5.2 综合对比分析

根据表 6.14 不同置信水平下各城市垃圾处置方式综合环境负荷值作出综合对比图，如图所示。

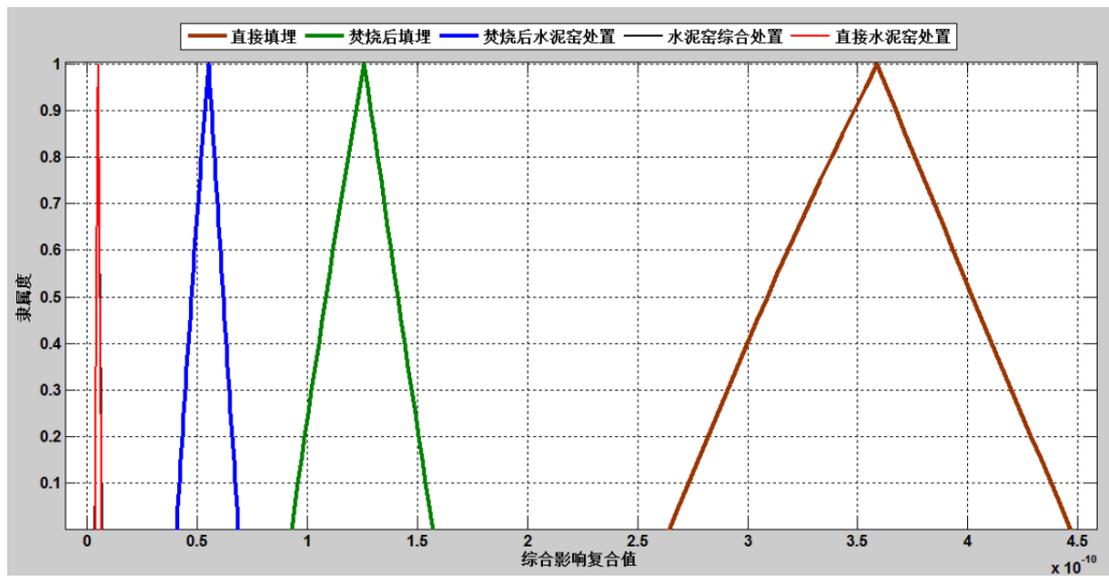


图 6.4 不同城市垃圾处置方式综合环境负荷对比图

与城市垃圾的传统处置方式相比，尽管采用水泥窑处置在温室效应、酸化效应、光化学效应和水体富营养化方面并不占优势，但是在人体健康危害和不可再生资源消耗方面对环境的影响要远远小于传统处置方式。综合考虑温室效应、酸化效应、光化学效应、水体富营养化、人体健康危害和不可再生资源消耗多项环境影响，采用水泥窑协同处置城市垃圾的处置方式要优于传统处置方式。定量来看，各城市垃圾泥处置方式的综合环境负荷值也可以用三角模糊数近似表示，同样以三角模糊数  $\tilde{C}_i$  来表示不同城市垃圾处置方式的综合环境负荷值，其中  $i \in \{\text{直接填埋, 焚烧后填埋, 焚烧后水泥窑处置, 直接水泥窑处置, 水泥窑综合处置}\}$ ，则：

$$\tilde{C}_{\text{直接填埋}} = (264.38, 358.84, 446.91) \times 10^{-12}, \quad \tilde{C}_{\text{焚烧后填埋}} = (92.79, 125.94, 156.99) \times 10^{-12}$$

$$\tilde{C}_{\text{焚烧后水泥窑处置}} = (40.59, 55.11, 68.80) \times 10^{-12}, \quad \tilde{C}_{\text{直接水泥窑处置}} = (3.64, 5.12, 7.00) \times 10^{-12}$$

$$\tilde{C}_{\text{水泥窑综合处置}} = (3.68, 5.11, 6.79) \times 10^{-12}$$

因此

$$\tilde{C}_{\text{水泥厂处置}} = \frac{\tilde{C}_{\text{焚烧后水泥窑处置}} + \tilde{C}_{\text{直接水泥窑处置}} + \tilde{C}_{\text{水泥窑综合处置}}}{3} = (15.97, 21.78, 27.53) \times 10^{-12}$$

$$\tilde{C}_{\text{传统处置}} = \frac{\tilde{C}_{\text{直接填埋}} + \tilde{C}_{\text{焚烧后填埋}}}{2} = (178.59, 242.39, 301.95) \times 10^{-12}$$

于是

$$\frac{\tilde{C}_{\text{传统处置}}}{\tilde{C}_{\text{水泥厂处置}}} \approx (6.49, 11.13, 18.91)$$

这说明利用传统方式处置城市垃圾对环境造成的影响大约是水泥厂处置的 11.13 倍。因此在保证水泥质量的前提下，采用水泥窑消纳城市垃圾，在节约自然资源的同时，也可大大降低有害物质的排放，一举多得。而在水泥窑处置方式线路中，城市垃圾直接水泥窑处置与焚烧后水泥窑处置相比，进一步降低了焚烧过程中二恶英与重金属的排放，产生的环境影响更小，城市垃圾的水泥窑综合处置方式又在水泥窑直接处置的基础上，增加了城市垃圾中有效热值的利用效率，因此其综合环境影响潜质最低。

## 6.6 本章小结

这一章采用了生命周期评价方法，对五种城市垃圾处置方式的环境负荷进行了对比分析，其中两种为传统处置方式，分别为城市垃圾卫生填埋处置和焚烧后填埋处置，另外三种采用水泥窑协同处置，分别是城市垃圾焚烧后水泥窑处置、直接水泥窑处置和水泥窑综合处置。结果显示，采用水泥窑处置城市污泥在温室效应、酸化效应、光化学效应和水体富营养化方面并不占优势，但是在人体健康危害和不可再生资源消耗方面的环境影响要远远小于传统处置方式。若通过模糊层次分析法综合考虑温室效应、酸化效应、光化学效应、水体富营养化、人体健康危害和不可再生资源消耗多项环境影响，则采用水泥窑协同处置城市垃圾对环境的影响要优于传统处置方式。而在水泥窑处置方式线路中，与城市垃圾焚烧再水泥窑处置相比，直接水泥窑处置进一步降低了焚烧过程中二恶英与重金属的排放，产生的环境影响更小，而水泥窑综合处置方式又在水泥窑直接处置的基础上，增加了城市垃圾中有效热值的利用效率，因此其综合环境影响潜质最低。

## 第 7 章 水泥行业功能拓展实证分析与措施保障

### 7.1 水泥行业功能拓展实证分析

根据数字水泥网提供的信息,2013 年全国水泥产量 24.14 亿吨,同比增长 9.57%,达到历史最高水平,但根据中国行业研究网的研究显示,我国水泥产能过剩统计超过 8 亿吨,已属于严重过剩。2013 年国务院印发了《关于化解产能严重过剩矛盾的指导意见》(国发〔2013〕41 号)(下称“意见”),意见要求“消化一批、转移一批、整合一批、淘汰一批”过剩产能,到 2015 年底淘汰水泥(熟料及粉磨能力)1 亿吨;另外,意见还鼓励水泥行业要依托现有水泥生产线,综合利用废渣发展高标号水泥和满足海洋、港口、核电、隧道等工程需要的特种水泥等新产品;支持利用现有水泥窑无害化协同处置城市生活垃圾和产业废弃物,协同处置生产线数量不低于 10%;强化氮氧化物等主要污染物排放和能源、资源单耗指标约束,对整改不达标的生产线依法予以淘汰。2014 年 5 月 6 日,国家发改委等 7 部委联合下发了《关于促进生产过程协同资源化处理城市及产业废弃物工作的意见》(发改环资[2014]884 号),要求水泥行业要推进利用现有水泥窑协同处理危险废物、污水处理厂污泥、垃圾焚烧飞灰等,利用现有水泥窑协同处理生活垃圾的项目开展试点。将来一段时间,一方面我国的经济将保持在较高水平上运行,作为基础原材料产业的水泥工业,与国民经济和社会发展关联度高,联系紧密,未来国内对水泥的需求将会保持适度增长;另一方面,水泥作为典型的“三高一低”行业,其产能受到国家的严格控制,未来,有悖于国家环保政策和可持续发展的以粗放型发展方式为主的中小型水泥企业将被淘汰。从水泥行业现状和国家政策层面上可以看出,水泥企业从传统行业向节能环保行业的功能拓展已是大势所趋,目前,一些水泥企业在功能拓展上已经做了大量实践研究,并取得了一定的成果,其中实践最多的是利用水泥窑协同处置城市污泥、城市生活垃圾、城市工业废弃物和污染土。

#### 7.1.1 功能拓展一：协同处置城市污泥

城市污泥是污水处理厂的副产物,主要来源于初沉池、二沉池等工艺环节<sup>[93, 94]</sup>。根据“全国城镇污水处理管理信息系统”的统计数据显示,截止到 2010 年底,我国运营的污水处理厂共 2832 座,全年累计产生含水率为 80%的污泥约 3000 万吨,约为

2005 年的 2.5 倍<sup>[95]</sup>。然而,在城市污泥产量如此巨大的背景下,我国面临着处置率严重偏低的严峻事实。据不完全统计,目前我国约 15%的城市污泥采用焚烧及建材利用进行处置,约 10%采用无害化和稳定化土地利用,其余污泥未经任何处置直接进入环境。由于我国污泥成分复杂,不但含有氮、磷等营养物质,而且也含有大量的寄生虫卵、重金属、病毒等有毒有害物质,尤其城市污泥中的重金属元素常常以铁锰氧化物结合态、碳酸盐结合态、硫化物结合态的形式存在,很容易被植物吸收,食用会对人体健康造成严重影响<sup>[96, 98]</sup>。利用水泥窑高温高压的特点协同处置城市污泥是水泥行业功能拓展的路径之一,处置过程中,污泥将在高温条件下完全焚烧,焚烧后的产物可替代部分原料来生产水泥,从而达到污泥的安全处置。在国内有部分水泥企业已经开始了水泥窑协同处置污泥的探索实践。

2006 年,重庆拉法基瑞安水泥有限公司(以下简称拉法基公司)率先启动利用水泥窑协同处置城市污泥的试验工作。在完成实验室、工业小试等前期工作后,拉法基于 2006 年底在南山水泥厂进行了连续工业中试,最大污泥处置量达每小时 2.8 吨。2008 年 8 月该公司建成投运国内第一条年处置能力 4 万吨污泥的设施,总投资额 800 万元,经过一年多的试运营表明,在保障水泥生产状况稳定的条件下,各项污染物排放指标均满足国家环保排放标准。

2007 年,越堡水泥有限公司进行了 6000t/d 水泥生产窑协同处置含水率 30%的漂染污泥的工业试验,试验结果表明,窑内污泥焚烧率可达 99.999%,污泥中的有害物质被完全分解,同时污泥灰渣中的重金属通过烧成过程可被固定在水泥熟料中,从而达到被固化的目的。2008 年,该公司又建设了一座污泥干化处置中心,日处置能力达 600t(含水率 80%),处置中心主要利用水泥窑余热将污泥烘干至含水率 30%以下,然后经过接口设备将烘干污泥输送到 6000t/d 生产线水泥熟料烧成系统中进一步处置,该污泥处置项目因可实现污泥处理的无害化、减量化和资源化,且有显著的生态环境效益,而荣获了 2010 年度“凯胜杯”全国建材行业技术革新奖<sup>[99]</sup>。

2009 年 10 月 28 日,北京水泥厂有限责任公司处置污水处理厂污泥工程建成投产,该工程由北京市政工程设计研究总院和天津水泥设计研究院共同设计,是我国首个利用水泥窑余热干化处置污水处理厂污泥的示范项目。项目位于北京市昌平区北京水泥厂厂区内,新建的污水处理厂的处置中心主要包括取热、干化、水处理三个部分,工程总投资 1.7 亿元,干燥工艺采用涡轮薄层干燥技术,投产后,每天可处置污泥 500 吨(平均含固率 20%)<sup>[100]</sup>。

此外,上海建筑材料(集团)总公司于2014年开工建设“上海建材资源综合利用示范基地项目”,该项目预计投资18亿元,主要通过水泥工业系统处置城市固体废弃物,实现污泥、城市垃圾的资源化再利用。据估计,项目建成后,这座“绿色水泥厂”可消纳上海市半数市政城市污泥。

### 7.1.2 功能拓展二:协同处置城市生活垃圾

据统计,目前我国城市中每人每天产生生活垃圾约1千克,而在大城市中则达到1.2千克。根据有关部门的统计数字显示,目前全国每年产生垃圾总量为2.5亿吨,并且正以10%的年增长速度迅速增加,加上历年的积累,我国目前的垃圾堆放总量已超过80亿吨。在全国600多座城市中,三分之二处于垃圾的包围之中,城市垃圾的外移,会导致城乡结合部生态环境恶化,垃圾围城、恶臭扰民、占用土地、重金属污染、二恶英毒害、地下水遭侵蚀等城市垃圾问题已经成为我国城镇化发展绕不过去的一座大山。

2010年,安徽海螺水泥股份有限公司铜陵分公司在5000t/d新型干法水泥生产线上建成一条城市生活垃圾协同处置系统,可日处置城市生活垃圾300吨,截止2013年4月,该系统已累计处置生活垃圾30多万吨。同时,该分公司正准备在第二条5000t/d新型干法水泥生产线上新建同等能力的城市垃圾处置系统,计划今后将垃圾收集范围从目前的铜陵市区扩大到涵盖周边郊区。

2012年底,北京金隅集团旗下的金隅琉璃河水泥公司建设的国内首条城市垃圾飞灰处置工业化环保示范线成功投产运营,该生产线可年消纳生活垃圾飞灰1万吨。另外,同是金隅集团旗下的金隅生态岛公司成功运营着北京市规模最大的“城市垃圾无害化综合处置中心”,该中心通过8大技术系统,做到了危险废弃物的无害化处置和安全再生利用。

2013年9月,总投资1.5亿元的华新水泥公司生活垃圾预处理系统正式投入使用,生活垃圾在预处理系统中经过破碎、烘干、分选等处理,把其中的无机成分作为水泥生产原料,有机成分作为水泥生产的燃料,可有效解决城市生活垃圾处理过程中的废渣废气等问题。根据水泥人网提供的信息显示,到2017年,华新将在全国投入建设100个生活垃圾预处理工厂、100个市政污泥预处理工厂和20个危险废物处置工厂,预计在2017年,华新利用水泥窑协同处置城市废弃物(不包括工业固体废弃物)总量约占全国的1/10。

### 7.1.3 功能拓展三：协同处置城市工业危险废弃物

危险废弃物是指列入《国家危险废弃物名录》或根据国家规定的相关鉴定标准认定的具有危险特性的废弃物，一般具有腐蚀性、急性毒性、浸出毒性等特点，如果不进行有效处置会对生态环境和人体健康造成严重危害。根据国家发改委、科技部、工信部等七部委于 2014 年 5 月 14 日联合发布的《关于促进生产过程协同资源化处理城市及产业废弃物工作的意见》，目前全国工业固体废物每年产生量约 32.3 亿吨，但由于我国废弃物处置能力相对不足，大量固体废物未得到及时有效的处置。在国内，工业废弃物处理设施投资与运营成本较高，尤其是工业危险废弃物，处理难度很大，是我国固体废物管理中的薄弱环节。国外从 1970 年就已经开始了水泥窑协同处置工业废弃物的研究，当时的核心技术只有美国、日本和欧洲的部分国家掌握，经过四十多年的发展，德国、法国、瑞士、美国、日本等国家都已经形成了利用水泥行业处理危险废弃物的产业规模。在我国，一些水泥企业也开始在水泥窑协同处置工业危险废弃物方面进行尝试，并收到了良好效果。

2005 年 8 月，北京金隅集团旗下的金隅红树林公司建设的全国首条利用水泥窑专业处置城市工业废弃物环保示范线投入使用，2010 年 3 月国家首个危险废弃物经营许可证被国家环保部授予金隅红树林公司，成为公司发展的里程碑。目前，金隅红树林公司可具备处置《国家危险废弃物名录》中所列 47 大类中的 30 大类危险废弃物的处置资质，年处置能力达 10 万吨。截止到 2012 年底，累计处置各类废弃物达 30 万吨，红树林公司已成为国内最大的利用水泥窑协同处置工业废弃物的环保企业。

2008 年底开始，华新环保（武穴）公司开始利用水泥窑对医药废物、农药废物、有机溶剂废物等 13 类有害废弃物进行无害化处理。2010 年 7 月，华新秭归水泥公司建成水泥窑协同处置三峡库区漂浮物项目，年处理能力可达 150000m<sup>3</sup>。

目前，江苏天山水泥集团有限公司溧阳分公司利用水泥窑处置废弃物工程正在由中材国际环境工程（北京）有限公司建设，该工程投资 6908 万元（不含新增土地投资），一期建设年处置废弃物 9800 吨，综合利用废弃物 20000 吨，处置的危险废弃物主要为两类：有毒有害工业废液（2800 吨/年）及有毒有害半固态和固态工业危险废弃物（7000 吨/年）<sup>[101]</sup>。

### 7.1.4 功能拓展四：协同处置污染土

近年来随着我国工业化进程的快速发展和城镇化进程的不断加快，越来越多的重金属、石油废弃物、农药化肥和工业三废等有毒有害物质随着灌溉和降雨等多种途径

进入土壤中，造成土壤污染。据统计目前我国每年的化肥使用量达 6000 多万吨，占世界化肥施用总量的 35%，农药施用量 131.2 万吨，平均每亩 931.3 克，比发达国家高出一倍<sup>[102]</sup>；另外，我国每年有将近 60 万吨的石油污染物进入土壤环境，造成土壤的石油污染，占全世界石油污染土壤的 7.5%<sup>[103]</sup>；加上污水灌溉造成的土壤污染，估计目前我国受污染的耕地约有 1.5 亿亩，占总耕地面积的 8.3%<sup>[104]</sup>。污染土具有长期性、隐蔽性、多样性、毒害性和滞后性等特点，若不经处置或处置不当污染土可能会通过地下水或生物富集作用直接或间接地影响人体健康<sup>[105]</sup>。

金隅集团旗下的金隅红树林公司早在 2004 年就开始了利用水泥窑协同处置污染土研究，现在已经开发了利用水泥窑焚烧处置污染土和热脱附与水泥窑结合方法修复污染土两种工艺，其中公司利用水泥窑焚烧处置污染土的窑为 67 米×4.3 米的旋转筒体，不仅处理量大（年处理量 15 万吨），而且可以维持均匀稳定的焚烧状态。利用热脱附与水泥窑结合法修复污染土不但可以省去尾气处理单元的二次投资，而且处理速度快，无二次污染。

2010 年 11 月，重庆拉法基瑞安地维水泥有限公司在位于重庆市江津区珞璜镇珞璜建材工业园区的水泥窑协同处置污染土生产线项目投产。该项目是利用重庆腾辉地维水泥厂 2500t/d 干法窑在生产水泥过程中，把污染土作为一部分水泥替代原料，以一定比例从干法窑烟室处喂入窑的煅烧系统中，经过入窑高温煅烧，与其它水泥原料进行充分化学反应，将有害的成分去除，从而实现废物的有效处理和利用。工程依托现有的 2500t/d 新型干法熟料生产线，新建存储量约 50000 吨的污染土储存系统。系统由两部分组成，一部分是污染土贮存仓库、仓库周边排水系统、渗滤液收集系统等；另一部分是污染土入窑系统，主要包括污染土进料仓、计量称、提升机、除尘器等。项目总投资 780 万元，可日处理污染土约 70 吨。

2012 年 4 月，华新水泥公司利用水泥窑协同处置技术，在武穴建设第一个污染土处置项目。截止至 2013 年 6 月，污染土的总处置量已达 30 万吨。2013 年 4 月该公司“水泥窑无害化和资源化协同处置污染土工程技术与应用”项目通过了湖北省科技厅组织的技术鉴定，项目中的“热质均衡系统技术”被专家们认定为国际首例，该项目主要创新点是首次提出了“热质均衡系统技术”、有机污染土的高温点投入处置技术方案，并自主研发了高效预分解窑装置和污染土预处理器。

## 7.2 水泥行业功能拓展的措施保障

### 7.2.1 水泥企业自身措施保障

从内部环境看，水泥企业要想功能拓展成功，需要做好以下五点：

#### (1) 转变管理方式

在生产中，不同的水泥企业即使采用相同的工艺设备，各项经济技术和质量指标也会参差不齐，造成这种情况的主要问题在于设备、技术、工艺等方面的管理方式不同所致。国内的很多水泥企业在经济腾飞的浪潮中得到迅速发展，但多年来企业以不计成本与效率的粗放型管理方式并没有取得大的改善，企业文化建设、人才队伍建设、制度建设往往浅尝辄止，流于形式，可以说粗放型的管理问题是水泥企业共同的“短板”。

水泥企业要想更好的实现企业的功能拓展，在管理方式上就必须由粗放型向集约型转变。集约型管理主要体现在质量管理、技术管理、制度建设和经营管理四个方面，具体措施为：水泥企业在质量管理上要以品牌建设为重点，在技术管理上要以节能降耗减排为重点，在制度建设上要以体系建设为重点，在经营管理上要以企业核心竞争力为中心。另外，企业的集约型管理离不开信息化的支撑，因此水泥企业应以当前的两化深度融合为契机，提升企业管理的信息化、数字化和智能化水平。

#### (2) 优化能源结构

我国的水泥企业多以煤炭等一次性化石燃料和电力提供能源，据悉，每生产 1 吨水泥，需要消耗电力 110 千瓦时，吨熟料综合煤耗约合 110 千克标准煤，按照 2013 年全国水泥总产量 24.14 亿吨计算，2013 年我国水泥生产消耗电力 2655 亿千瓦时，综合煤耗约合 2.65 亿吨标准煤。水泥企业长期大量消耗不可再生的一次性化石燃料，不但有悖于我国的可持续发展政策，对我国未来经济长期稳定发展造成严重威胁，而且消耗一次性化石燃料会带来大量的污染物和温室气体排放，给我国的环境造成巨大压力。

水泥企业要改变以一次性化石燃料为主的能源结构，加大对可再生能源的利用力度，开发替代能源。由于水泥预分解炉可利用 60% 以上低热值燃料，并且我国大部分城市排放的污泥、生活垃圾和工业废弃物的热值均在 60% 以上，因此水泥企业应考虑采用城市污泥、生活垃圾和工业废弃物等作为一次性化石燃料的替代能源生产水泥。

#### (3) 完善环保措施

严格执行《水泥窑协同处置固体废物污染控制标准》，在制定完善技术规范 and 标准的基础上，强化处理过程的环境管理，研究污染物的迁移转化规律，制定具有针对性的治理措施，加强协同处理设施的环境监测工作，强化二恶英监测，推动监测信息公开，形成完善的污染综合防控体系。注重废弃物运输、贮存、预处理和混烧过程的污染控制，保障生产企业达标排放。

#### (4) 突破关键技术

开展水泥企业协同资源化处理废弃物的技术攻关，将废弃物中污染成分的迁移转化规律、废弃物预处理、稳定运行保障和二次污染控制等关键技术纳入科技计划的重点方向，研究协同资源化处理废弃物的节能减排措施。

#### (5) 替换矿产资源

石灰石是生产水泥的主要原材料，目前，我国已探明的石灰石基础储量为 750 亿吨，其中具备经济开采条件的只有 390 亿吨<sup>[106]</sup>。根据测算，平均每生产 1 吨水泥需要消耗石灰石约 1.2 吨，按照 2013 年全国水泥生产总量 24.14 亿吨计算，若不采用石灰石替代原料，需要消耗石灰石共约 28.97 亿吨，以此来计算，具备经济开采价值的石灰石只需约 13.5 年就将用完，而已探明的石灰石基础储量也只够开采 26 年。

在原料资源上，水泥企业应从两个方面入手，一方面企业要扭转因开采方式和管理水平落后造成的矿产资源掠夺性开采局面，提高资源开采和利用效率；另一方面企业要寻找可再利用资源作为石灰石替代原料，降低对自然资源的依赖程度。目前，我国每年由城市污水处理厂排出的污泥达 3000 万吨（含水率 80%），产生的城市垃圾 2.5 亿吨（累计已超过 80 亿吨），工业固体废弃物 32.3 亿吨，由于水泥窑具有高温、高压、全封闭和大容量等特点，不但在协同处置城市污泥、生活垃圾和工业固体废弃物方面有着得天独厚的优势，而且处理后灰渣成分与水泥组分相近，因此可作为石灰石、粘土等的替代原料生产水泥。当前，走水泥工业协同处置城市污泥、城市垃圾、污染土和其他产业废弃物的循环发展之路，实现水泥企业功能拓展，是水泥企业可持续发展的必由之路。

### 7.2.2 行业政策措施保障

从外部环境看，水泥企业要想功能拓展成功，需要获得以下政策支持：

#### (1) 统筹规划布局，开展试点示范

各地根据本地废弃物处理和可协同处理设施现状，加强组织协调，合理布局，充分利用好现有设施，处理好现有企业协同处理和新建废弃物处理处置设施的关系，确

保废弃物得到有效处置。不得以协同处理为名新建生产设施，严防重复建设、低水平建设。在具备协同资源化处理条件的地区，鼓励具备条件的水泥企业通过与地方政府或产出废弃物的企业签订合约，积极参与协同资源化处理废弃物。

在有废弃物无害化处置和资源化利用需求的地区，选择基础条件好的现有水泥企业，开展协同资源化处理的试点示范工程，加大支持力度，完善生产规范和运营机制。企业生产主体设备要先进可靠，在试点期内稳定生产运行，确保效率发挥。强化政策引导和政府监管措施，探索建立市场化运作模式，以点带面，逐步向全国推广。

## （2）完善税收优惠及改造补贴政策

目前，水泥窑协同处置项目面临着改造投资成本高、生产成本高和折旧成本高的压力。在水泥窑协同资源化处置城市及产业废弃物前，需要投入大量资金对水泥窑进行改造，如：北京水泥厂改造了一条危险废弃物的水泥窑协同处置项目，可年处置危险废弃物 8 万吨，投资约 5200 万元；原广州越堡水泥有限公司利用 1 条 6000t/d 水泥熟料生产线改造成城市污泥处置项目，可年处置城市污泥（含水 80%）18 万吨，投资约 7070 万元；华新水泥集团宜昌工厂改造了一条水泥窑协同处置城市污泥（含水率 80%）项目，可年处置城市污泥 4.5 万吨，项目总投资 2500 万元。重庆拉法基瑞安地维水泥有限公司利用重庆腾辉地维水泥厂 2500t/d 水泥熟料生产线改造为污染土处置利用项目，可年处置污染土 2 万吨，项目总投资 780 万元。另外，水泥窑协同处置项目生产成本和折旧成本非常高，费用主要包括生产成本、电能消耗、冷却费用、热能损失费用、药剂成本、人工成本、运输费用、日常检修维护费、固定资产折旧、管理费等 16 项。过高的成本费用会给企业带来很大的压力。

但是，国内水泥窑协同处置项目的补助还不明确，各地标准也不统一，长效机制没有建立，处置费落实没有形成制度化，没有形成完善的补贴扶持机制。税收政策和改造资金支持政策不完善不但会影响到企业向处置废物方面做大的投入，而且还会制约水泥行业处置废物能力的发挥利用

利用水泥窑协同处置城市及产业废弃物是一项公共环境事业，为促进水泥窑协同处置产业发展，建议扩大享受优惠税收政策的废物种类，明确把城市污泥、生活垃圾、工业固体废弃物、污染土、垃圾焚烧飞灰等纳入到水泥窑利用废物的税收优惠政策范围中，利用可燃废物替代一次能源企业可享受节能奖励政策；加大对实施企业给予适当投入，引导社会资金投入，加大财税金融等政策扶持力度，提高水泥企业参与公共环境事业的积极性；设立水泥窑协同处置工业废物、污泥、城市生活垃圾的专项资金；

在用地方面、用电方面和产品推广方面都将有相应的政策倾斜，在技术研发方面，要充分考虑处置科研工作的需求，加大了研究经费的投入

### (3) 出台国家标准、规范

国外欧洲、美国、日本等国家利用水泥窑协同处置废弃物技术居于世界前列，国家标准、法规等也较为完备。由于我国起步较晚，因此还没有完全建立适用于水泥工业协同处置废弃物的标准、法规体系，目前已经出台和可执行的相关国家标准、法规情况如下：

表 7.1 我国当前已经出台或可执行水泥工业协同处置相关国家标准、法规

名称	标准号	发布日期	实施日期
标准	《水泥窑协同处置固体废物污染控制标准》	GB 30485-2013	2013-12-27 2014-3-1
	《水泥工业大气污染物排放标准》	GB 4915-2013	2013-12-27 2014-3-1
	《水泥单位产品能源消耗限额》	GB 16780-2012	2012-12-31 2013-10-01
	《水泥生产原料中废渣用量的测定方法》	GB 27978-2011	2011-12-30 2012-10-01
规范	《水泥窑协同处置垃圾工程设计规范》	GB 50954-2014	2014-01-09 2014-08-01
	《水泥窑协同处置固体废物环境保护技术规范》	HJ 662-2013	2012-12-27 2014-03-01
	《水泥窑协同处置污泥工程设计规范》	GB 50757-2012	2012-03-30 2012-08-01
	《水泥窑协同处置工业废物设计规范》	GB50634-2010	2010-11-03 2011-10-01

现在我国水泥工业协同处置的一些国家标准和规范已经出台，但与发达国家相比，我国对水泥企业处置废物的优惠政策以及垃圾、污泥处理等的环保标准还不完善，相关标准和规划的制定明显落后于水泥企业协同处置废物的实际情况；标准实施与政策支持不匹配，导致标准及部分政策的实施、监管等无证可查、无法可查。

建议政府和行业相关部门积极参与国家编制与修订标准工作。编制水泥窑协同处置城市污泥、生活垃圾、工业固体废弃物和污染土等国家标准，确定可以利用的以及禁用的废物名单，制定在利用替代燃料时的水泥窑废气排放标准和水泥产品国家标准，增加有害有机物和重金属含量的控制指标。

### (4) 加大全过程监督管理力度。

各级相关部门要完善监管措施，严惩违约违规，切实防止废弃物产生方无故不提供废弃物或协同处理方无故不接受废弃物的问题发生；严格加强环境监管，保证废弃

物在交易、运输、贮存和协同处理过程中的环境安全；加强对生活垃圾和城镇污水处理厂污泥处理处置的指导和监管。各级循环经济发展综合管理部门要认真开展工作，履行组织协调的职责。建议政府要明确“谁污染、谁承担相应的经济和法律责任”，违者从重处罚，吊销其营业执照，确保违法成本高于守法成本，以使不规范的废弃物填埋与焚烧所引起的大气二恶英污染和地下水重金属污染最小化。建立健全完善的在线监控制度，确保监控数据的可靠性和实效性；

(5) 加强宣传推广。

加大正面宣传力度，广泛宣传企业协同处理废弃物在保护环境、节约资源中的重要作用，普及基本知识，积极稳妥推行信息公开，消除社会对处理过程环境安全的担忧，提高有关部门、相关企业和广大群众的认识程度。举办协同处理废弃物的技术、设备展览会和研讨会。结合推广循环经济典型模式案例，召开现场经验交流会，组织示范工程现场观摩和经验交流。

### 7.3 本章小结

对水泥企业功能拓展与措施进行了研究。目前国内水泥企业功能拓展实践主要集中在利用水泥窑协同处置城市污泥、城市垃圾、工业废弃物和污染土上，因此作者将研究重点放在了水泥企业在这几个方面的功能拓展上。另外，水泥企业要想功能拓展成功，需要有一定的保障措施。从内部环境看，企业需要做好以下五点：一要转变管理方式；二要优化能源结构；三要完善环保措施；四要突破关键技术；五要替换矿产资源。从外部环境看，政府需要制定五大政策：一要统筹规划布局，开展试点示范；二要完善税收优惠及改造补贴政策；三要出台国家标准、规范；四要加大全过程监督管理力度；五要加强宣传推广。

## 结论与展望

### 主要研究结论

当前,我国水泥行业中高耗能、高排放的传统作业方式依旧占有不小比重,产生的环境问题不容小觑。由于水泥窑具有高温、高压、大容量和全封闭等天热特点,很适合处理城市垃圾、污泥和工业废弃物,因此国家和地方政府在相关法律法规中多次强调水泥行业功能拓展作用,要求水泥企业应尽最大可能利用二次资源、能源、工业矿渣、城市垃圾、污泥甚至可燃性危险废弃物。目前,一些水泥企业在水泥窑协同处置方面已经做了长时间的实践并取得了可喜的成绩。本文主要采用生命周期评价方法和模糊层次分析法为研究工具,对城市污泥和城市垃圾的水泥企业协同处置方式与传统处置方式进行了对比研究,并对水泥行业的功能拓展及措施进行了分析,主要研究结论如下:

(1) 对指标值是模糊数的模糊层次分析法进行了研究,其中判断矩阵采用权重分配的方式来确定。为了解决模糊数的加和减、乘和除不再是一对逆运算的问题,并使得运算法则更加符合客观实际情况,而引入了经典数学中的自变量、因变量、代表系统和自由度等概念,进而定义了模糊集理论中的自变模糊数、因变模糊数、代表系统和自由度等概念,并据此对模糊数互补判断矩阵的乘性一致性进行了研究,结果发现若一个模糊数互补判断矩阵满足目前一些文献对其乘性一致性的定义则个矩阵一定是精确数互补判断矩阵这一不合理之处,接着文章结合模糊集截集理论,利用模糊数互补判断矩阵元素间的关系,重新对乘性一致性模糊数互补判断矩阵进行了定义。接着文章给出了模糊数互补判断矩阵和模糊数互反判断矩阵相互转换数学表达式,并结合层次分析法中正互反判断矩阵的权重求解过程和模糊集截集理论,给出了基于模糊数互补判断矩阵的模糊权重求解算法,继而给出了模糊层次分析法的模糊权重和环境影响综合评价求解算法。

(2) 利用生命周期评价方法和模糊层次分析法对城市污泥的五种处置方式进行了对比研究,其中两种为水泥窑协同处置,即城市污泥脱水后外运水泥厂处置和石灰稳定后外运水泥厂处置;另外三种为传统的处置方式,即城市污泥干化后填埋处置、焚烧后填埋处置和脱水后堆肥处置。研究结果表明:采用水泥窑处置城市污泥在温室

效应、酸化效应、光化学效应、水体富营养化、人体健康损害和不可再生资源消耗这六种环境影响类型下均优于传统处置方式，通过模糊层次分析法综合对比来看，传统方式处置污泥对环境造成的影响大约是水泥厂处置的 10.43 倍。因此，与污水处理厂直接处置城市污泥相比，水泥窑协同处置城市污泥可有效节省水泥生产所需要的天然矿物资源，大大降低对环境造成的影响。另外，与城市污泥的石灰稳定后外运水泥厂相比，北京水泥厂采用的脱水后直接水泥厂处置对环境的影响程度更低，成本更小。经过对比论证可以得出以下结论：城市污泥在污水处理厂进行机械脱水至含水率 80% 时运往水泥厂进行协同处置是综合环境影响最低的技术方案。

(3) 利用生命周期评价方法和模糊层次分析法对城市垃圾的五种处置方式进行了对比研究，其中三种为水泥窑协同处置，即城市垃圾的焚烧后水泥窑处置、直接水泥窑处置和水泥窑综合处置；另外两种为传统的处置方式，即城市垃圾的卫生填埋和焚烧后填埋处置。研究表明，与城市垃圾的传统处置方式相比，尽管采用水泥窑处置在温室效应、酸化效应、光化学效应和水体富营养化方面并不占优势，但是在人体健康危害和不可再生资源消耗方面对环境的影响要远远小于传统处置方式。利用模糊层次分析法综合考虑温室效应、酸化效应、光化学效应、水体富营养化、人体健康危害和不可再生资源消耗多项环境影响，得出利用传统方式处置城市垃圾对环境造成的影响大约是水泥厂处置的 11.13 倍，因此采用水泥窑协同处置城市垃圾的处置方式要优于传统处置方式。经过对比论证得出以下结论：采用水泥窑消纳城市垃圾，在节约自然资源的同时，也可大大降低有害物质的排放，一举多得；而在水泥窑处置方式线路中，城市垃圾直接水泥窑处置与焚烧后水泥窑处置相比，进一步降低了焚烧过程中二恶英与重金属的排放，产生的环境影响更小，城市垃圾的水泥窑综合处置方式又在水泥窑直接处置的基础上，增加了城市垃圾中有效热值的利用效率，因此其综合环境影响潜质最低。

(4) 对水泥行业功能拓展和措施进行了分析。从分析结果看，无论从水泥行业面临的环境形势分析，还是从国家宏观政策层面考虑，水泥行业从传统粗放型发展方式向环保节能产业功能拓展已是必然趋势，将来有悖于国家环保政策和可持续发展的单纯生产水泥的中小型水泥企业将被淘汰，水泥企业要想生存，必须转型。目前国内一些水泥企业在功能拓展上已经积累了一些成功经验，这些水泥企业的功能拓展主要集中在四个方向，即利用水泥窑协同处置城市污泥、协同处置城市垃圾、协同处置工业危险废物和协同处置污染土，未来水泥企业可根据企业具体情况和地区实际状况选

择功能拓展方向。水泥企业要想转型成功，必须要有一定的保障措施，从内部环境看，企业需要做好以下五点：一要转变管理方式；二要优化能源结构；三要完善环保措施；四要突破关键技术；五要替换矿产资源。从外部环境看，政府需要制定五大政策：一要统筹规划布局，开展试点示范；二要完善税收优惠及改造补贴政策；三要出台国家标准、规范；四要加大全过程监督管理力度；五要加强宣传推广。

## 研究展望

本文采用生命周期评价方法，对水泥行业的功能拓展进行了研究。根据论文的研究内容，结合水泥行业功能拓展进展情况，作者认为可在本文的研究基础上进一步做如下研究工作：

(1) 决策者的主观不确定态度对模糊决策的结果有着很大的影响，应该用怎样的模糊标度来刻画这种不确定性？因此将模糊层次分析法和心理学、行为组织学等行为科学相结合是未来研究工作之一。

(2) 目前水泥行业功能拓展实践最多的是利用水泥窑协同处置城市污泥、城市垃圾、工业危废和污染土，由于人力、物力、财力和时间有限等原因，本文主要采用了生命周期评价方法对水泥窑协同处置城市污泥和城市垃圾的功能拓展进行了研究，下一步可采用本文的研究方法和研究框架对水泥窑协同处置工业危废和污染土的功能拓展进行研究。

(3) 利用水泥窑高温、高压、大容量和全封闭的特点协同处置城市和工业废物，不但可以替代部分煤炭提供少量热能，减少因采用其他处置方式对环境造成的影响，而且处置后的残渣可替代部分天然矿产资源生产水泥。水泥窑协同处置功能拓展的主要目的还是生产水泥，生产水泥质量的优劣将直接影响着水泥行业功能拓展成功与否，因此对利用水泥窑协同处置城市和工业废物生产的水泥产品性能的研究也是重要的研究方向。

(4) 水泥企业主要还是以盈利为目的，协同处置城市和工业废弃物等功能拓展后的水泥企业运营成本如何改变？产品发生怎么的变化？市场是否接受生产的产品？会产生怎么的社会效益等等，也将是以后重点考虑的内容和研究方向。

## 参考文献

- [1] 左铁镛. 水泥工业: 循环经济链的重要一环[J]. 中国建材, 2005(8):20-22.
- [2] Kumar M S, Mudliar S N, Reddy K M K, et al. Production of biodegradable plastics from activated sludge generated from a food processing industrial wastewater treatment plant [J]. Bioresource Technology, 2004, 95(3):327-330.
- [3] Martin Cyr, Coutand M, Clastres P. Technological and environmental behavior of sewage sludge ass(SSA) in cement-based materials [J]. Cement and Concrete Research, 2007,37(8):1278-1289.
- [4] Asavapisit S, naksrichum S, et al. Leachability and microstructure characteristics of cement-based solidified plating sludge [J]. Cement and Concrete Research, 2005,35(6):1042-1049.
- [5] Dewil R, Appels L, Baeyens J. Energy use of biogas hampered by the presence of siloxanes[J]. Energy Conversion and Management, 2006,47,1711-1722.
- [6] Lin K L, Lin C Y. Hydration Characteristics of wastesludge ash utilized as raw cement material [J]. Cement and Concrete Research 2005, 35(10):1999-2009.
- [7] Navia R, Rivela B et al. Recycling contaminated soil as alternative raw material in cement facilities: Life cycle assessment[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2006,48:339-356.
- [8] Kare Helge Karstensen, Nguyen Khac Kinh, Le Bich Thang, et al. Environmentally sound destruction of obsolete pesticides in developing countries using cement kilns [J]. Environmental Science and Policy, 2006(9):577-586.
- [9] Esawy Kasem Mahmoud. Cement kiln dust and coal filters treatment of textile industrial effluents [J].Desalination, 2010, 255(3):175-178.
- [10] Juan A. Conesa, Araceli Galveza, et al. Decomposition of paper wastes in presence of ceramics and cement raw material [J]. Chemosphere, 2008, 72(2):306-311.
- [11] G.V. Hendrik, C.P. Amy. Cement manufacture and the Environment Part I: Chemistry and Technology [J]. Journal of Industrial Ecology, 2002, 6(1):89-105.
- [12] G.V. Hendrik, C.P. Amy. Cement manufacture and the Environment Part II: Environmental Challenges and Opportunities [J]. Journal of Industrial Ecology, 2003, 7(1):93-126.
- [13] R.Rehan, M. Nehdi. Carbon dioxide emissions and climate change: policy implications for the cement industry [J]. Environmental Science and policy, 2005, 8(2):105-114.

- [14] SHIH P H, CHANG J E, CHIANG L C. Replacement of raw mix in cement production by municipal solid waste incineration ash [J]. *Cement and Concrete Research*, 2003,33(11):1831-1836.
- [15] 孔祥娟, 魏亮亮, 薛重华, 任海静. 城镇污泥水泥窑协同处置现状与政策需求分析[J]. *给水排水*, 2012, 38(6): 22-27.
- [16] 龚成晨, 徐竟成, 李健. 水泥工业协同处置印染废水污泥的可行性[J]. 2013, 39(6):11-25.
- [17] 刘素芹, 熊永超, 钱英. 水泥窑协同处置城市污泥试生产的成效[J]. *江苏建材*, 2013(1):22-25.
- [18] 史骏. 污泥干化与水泥窑焚烧协同处置工艺分析与案例[J]. *中国给水排水*, 2010, 26(14):50-55.
- [19] 马勇, 匡鸿等. 污泥深度脱水 and 水泥窑协同处置技术应用[J]. *上海建材*, 2012(3):14-17.
- [20] 吕兴菊. 大理市生活垃圾采用新兴干法水泥回转窑协同处置模式浅析[J]. *环境科学导刊*, 2010, 29(zl):44-47.
- [21] 赵洪, 董贝. 焚烧炉与水泥窑协同处置城市生活垃圾的综述比较[J]. *新世纪水泥导报*, 2012, 18(4):11-15.
- [22] 郑元格, 沈东升, 陈志斌等. 固体废物焚烧灰水泥窑协同处置的试验研究[J]. *浙江工业大学(理学版)*, 2011, 38(5):562-569.
- [23] 蔡良玉, 杨学权, 辛美静等. 利用水泥窑协同处置城市生活垃圾技术[J]. *中国水泥* 2010,4: 28-35.
- [24] 蔡良玉, 杨学权, 辛美静等. 重点关注水泥窑协同处置城市生活垃圾技术及推广应用[J]. *中国水泥*, 2011(5):43-49.
- [25] 金宜英, 王雷, 聂永丰等. 生活垃圾焚烧飞灰水泥窑协同处置技术[J]. *中国环境科学学术年会论文集*, 590-596.
- [26] 谢燕, 吴笑梅, 樊粤明等. 水泥工业协同处置城市生活垃圾焚烧炉渣的工业应用[J]. *水泥*, 2010(9):13-18.
- [27] 陈晓东, 陈美楠, 郝利炜. 水泥窑批量协同处置生活垃圾技术[J]. *中国水泥*, 2014, (2):61-66.
- [28] 潘琦, 王艳, 刘旭. 水泥窑协同处置生活垃圾的可行性[J]. *中国资源综合利用*, 2012,30(6):40-43.
- [29] 蒋明麟. 我国水泥工业“协同处置”废弃物现状和未来发展的政策建议[J]. *中国水泥*, 2012(12): 16-19
- [30] 富丽. 我国水泥窑协同处置废弃物现状分析与展望[J]. *居业*, 2012(4): 68-70.
- [31] 蔡木林, 李扬, 闫大海. 水泥窑协同处置 DDT 废物的工厂试验研究[J]. *环境工程技术学报*,

- 2013,3 (5): 437-442.
- [32] 查少翔. 水泥窑协同处置生活垃圾应关注的环保问题及相应对策[J]. 河南建材, 2011(6):97-100.
- [33] 向丛阳, 何永佳, 吕林女等. 水泥窑协同处置危废生产熟料的性能研究[J]. 环境科学与管理, 2013,38(9):81-86.
- [34] 苑辉, 胡芝娟, 李惠等. 水泥窑协同处置危险废物管理制度现状分析和建议[J]. 中国水泥, 2013(8):33-35.
- [35] 许杭俊, 黄立维. 利用城市垃圾焚烧飞灰制备生态水泥的研究[J]. 热力发电, 2013,42(2):41-44.
- [36] EPA. Guidelines for Assessing the Quality of Life-Cycle Inventory Analysis [S]. EPA 530-R-95-010,PB95-191:235,1995.
- [37] SETAC. Guidelines for life-cycle assessment: a code of practice [S].brussel: SETAC, 1993,9.
- [38] EPA. B W . Vigon et al. Life-Cycle Assessment: Inventory Guidelines and Principles [S]EPA/600/R-92/245,1993.
- [39] ISO 14040. Environmental Management-life cycle assessment-principles and framework[S] 1997/2006.
- [40] GB/T2040-1999 ISO14040 环境管理-生命周期评价-原则与框架[S].1999.
- [41] Houillon G, Jolliet O. Life Cycle Assessment of Processes for the treatment of wastewater urban sludge: Energy and Global Warming Analysis [J]. Journal of Cleaner Production, 2005, 13(6):287-299.
- [42] Gabel K, Tillman A. M. Simulating operational alternatives for future cement production [J]. Journal of Cleaner Production, 2005, 13(6): 1246-1257.
- [43] Boughton B, Horvath A. Environmental assessment of shredder residue management [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2006,47(5):1-25.
- [44] C. Chena, G Haberta, Y. Bouzidib et al. Environmental impact of cement production: detail of the different processes and cement plant variability evaluation[J]. Journal of Cleaner Production, 2010, 16(5):478-485.
- [45] N.H. Deborah, D.E. Thomas. A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies [J]. Journal of Cleaner Production, 2009, 17(7):668-675.

- [46] H. Shizuka, F. Tsuyoshi, G. Yong, et al. Realizing CO<sub>2</sub> emission reduction through industrial symbiosis: A cement production case study for Kawasaki [J]. Resources, Conservation and recycling, 2010,54(10):704-710.
- [47] 姜德义, 苍大强, 关生林等. 北京典型水泥企业生产过程环境负荷评价[J]. 武汉理工大学学报, 2008,30(4):36-39.
- [48] 龚先政, 聂祚仁, 王志宏. 北京水泥生产过程的环境负荷研究[J]. 武汉理工大学学报, 2006,28(3):121-122.
- [49] 周奇, 黄启飞, 王琪, 李丽. 废皮革水泥窑共处置生命周期评价[J]. 环境科学研究, 2009, 22(4):506-510.
- [50] 李璐, 黄启飞, 闫大海, 蔡木林. 基于生命周期评价 EI99 的水泥窑共处置废弃农药分析[J]. 环境科学学报, 2010, 30(7): 1527-1536.
- [51] 崔素萍, 李琛. 水泥 LCA 研究与应用进展[J]. 中国材料进展, 2011, 30(8):35-41.
- [52] 刘娜, 李丽, 闫大海等. 水泥窑共处置低品质包装废弃物的生命周期评价[J]. 环境科学研究, 2012, 25(6):724-730.
- [53] 周奇, 明玉, 黄启飞等. 水泥窑共处置废农药生命周期评价研究[J]. 环境科学研究. 2008, 21(6):62-66.
- [54] 董世根, 李小冬, 张智慧. 新型干法水泥生产生命周期环境影响评价[J]. 环境保护, 2008(10):39-42.
- [55] 姜睿, 王洪涛. 中国水泥工业的生命周期评价[J]. 化学工程与装备, 2010(4):183-187.
- [56] 吴红, 崔素萍, 王志宏. 中国水泥工业环境负荷分析[J]. 中国建材科学, 2006,15(3):50-54.
- [57] 朱天乐, 何炜, 曾小岚等. 中国水泥生产环境负荷研究[J]. 环境科学, 2006, 27(10):2135-2138.
- [58] 韩仲琦. 水泥的生命周期评价[J]. 水泥技术, 2006(2):23-25.
- [59] 雷宇, 贺克斌, 张强, 刘作毅. 基于技术的水泥工业大气颗粒物排放清单[J]. 环境科学, 2008,29(8):2366-2371.
- [60] Saaty T L. The Analytic Hierarchy Process. McGraw-Hill, Newyork, 1980.
- [61] Laarhoven P J M, Pedrycz W. A fuzzy extension of saaty's priority theory [J]. Fuzzy sets and systems, 1983, 11(3): 229-241.
- [62] 韩仲琦. 中国水泥工业的历史和发展（上）[J]. 中国水泥,2012(8):8-12.
- [63] 韩仲琦. 中国水泥工业的历史和发展（下）[J]. 中国水泥,2012(9):10-11.
- [64] 赵艳琴. 浅析我国水泥行业发展现状及趋势[J]. 建材发展导向,2014(2):54.

- [65] 史春树. 绿色水泥: 不是零碳 而是负碳[J]. 环境与生活, 2012(1):69-72.
- [66] Robert G Hunt and William E. Franklin. LCA-How it Came About: Personal Reflection on the Original and the Development of LCA in the USA [J]. The International journal of Life Cycle Assessment, 1996, 1(1):4-7.
- [67] T E Graedel, B R Allenby, P R Comrie. Matrix Approaches to Abridged Life Cycle Assessment [J]. Environ. Sci. Technol, 1996, 29(3):134A-139A.
- [68] Lave L B, et al. Using Input-Output Analysis to Estimate economy-wide Discharges[J]. Environ. Sci. Technol, 1995, 29(9): 420A-426A.
- [69] 邓南圣, 王小兵. 生命周期评价[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [70] EPA. Life-cycle Impact Assessment. A Conceptual Framework, Key Issues and Summart of Existing Methods EPA-452/R-95-002.
- [71] ISO/DIS 14040. Environmental Management-Life Cycle Assessment-Part: Principles and Framework [S]. 1997.
- [72] 《环境管理—生命周期评价—目的与范围的确定和清单分析》GB/T 24041-2000
- [73] WENZEL H HAUSCHILD M. Environmental Assessment of Products. Lond: Chapman and Hall,1997
- [74] GOEDKOOP M SPRIENSMA R. The Ecoindicator 99:A Damage Oriented Method for Life Cycle Impact Assessment. The Netherlands: PR éConsultants, Amersfoort, 1999
- [75] GUIN E J B GORR E M HEIJUNGS R. Life cycle assessment: An operational guide to the ISO standards. The Netherlands: Spatial Planning and Environment(VROM)and Centre of Environmental Science(CML),Den Haag and Leiden, 2001
- [76] JOLLIET O MARGNI M CHARLES R. IMPACT 2002+:A new life cycle impact assessment methodology. International Journal of Life Cycle Assessment, 2003(6)
- [77] HAUSCHILD M POTTING J. Background for spatial differentiation in LCA impact assessment:The EDIP 03 methodology. Denmark: Institute for Product Development Technical University of Denmark, 2005
- [78] IPCC 2001 Third Assessment Report
- [79] 徐鹤. 生命周期评价概述[J].上海环境科学. 1990,(16)6-8.
- [80] 李荣钧. 模糊多准则决策理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [81] 胡宝清. 模糊理论基础(第二版)[M]. 湖北: 武汉大学出版社, 2010.

- [82] 侯福均, 吴祈宗. I 型不确定数互补判断矩阵的一致性和排序研究[J]. 系统工程理论与实践, 2005, 10: 60-66.
- [83] Xu R N, Zhai X Y. Extensions of the analytic hierarchy process in fuzzy environment [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2002, 52: 251-257.
- [84] 李荣钧. 模糊多准则决策理论与应用[M]. 湖北: 武汉大学出版社, 2010.
- [85] 徐泽水. 区间数互补判断矩阵排序的一种实用方法[J]. 运筹与管理, 2001, 10(1): 16-19
- [86] 魏毅强, 刘进生, 王绪柱. 不确定型 AHP 中判断矩阵的一致性概念及权重[J]. 系统工程理论与实践, 1997, 7(4): 1-22.
- [87] 朱吉乔, 张强, 赵璇. 模糊数互补判断矩阵的乘性一致性研究[J]. 运筹与管理, 2013, 22(1): 29-35.
- [88] 苏为华. 多指标综合评价理论与方法问题研究[D]. 厦门大学博士学位论文, 2009
- [89] 巩在武, 刘思峰. 区间数互补判断矩阵的性质及相关问题研究[J]. 运筹与管理, 2006, 15(3): 25-30.
- [90] 徐泽水. 三角模糊数互补判断矩阵排序方法研究[J]. 系统工程学报, 2004, 19(1): 85-88
- [91] 赵璇, 张强, 朱吉乔. 模糊数互补判断矩阵的乘性一致性检验及改进方法[J]. 运筹与管理, 2013, 22(3): 1-8
- [92] 樊梦佳, 袁兴中, 祝慧娜等. 基于三角模糊数的河流沉积物中重金属污染评价模型[J]. 环境科学学报, 2010, 30(8): 1700-1706.
- [93] Apples L, Baeyens J, Degreve J, et al. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge [J]. Prog Energ Combust Sci, 2008, 34(6): 755-781.
- [94] 尹军, 谭学军. 我国城市污水污泥的特性与处置现状[J]. 中国给水排水, 2003, 19(13): 21-24.
- [95] 住房和城乡建设部, 国家发展和改革委员会. 城镇污水处理厂污泥处理处置技术指南 (试行), 2011.
- [96] 唐明星. 城市污水处理厂污泥现状及处置对策[J]. 山西建筑, 2011(14): 192-193.
- [97] Chu C P, Lee D J, Chang B V, et al. Anaerobic digestion of polyelectrolyte flocculated waste activated Sludge. Chemosphere, 2003, 53(7): 757-764.
- [98] Mahmoud N, Zeeman G, Gijzen H, et al. Anaerobic stabilisation and conversion of biopolymers in primary sludge—effect of temperature and sludge retention time. Water Research, 2004, 38(4): 983-991.
- [99] 张小雄, 陈文和, 邓明佳等. 利用水泥窑协同处置城市污水处理厂污泥[J]. 中国水泥,

2011(2):51-54.

[100] 给水排水动态[J]2011(2):7-7.

[101] 将明麟. 关于水泥工业协同处置废弃物的情况和进展[J]. 建材发展导向, 2013, 11(6):1-4.

[102] 宁清同, 王丽香. 我国农业化肥污染防治制度初探[J]. 行政与法, 2012, 11:74-79.

[103] 李宝明. 石油污染土壤微生物修复的研究[D]. 中国农业科学院, 2007.

[104] 焦丽香, 郭加朋. 土壤重金属的污染与治理进展研究[J]. 科技情报开发与经济, 2008, 19(1):115-156.

[105] 赵金艳, 李莹, 李珊珊, 张爽. 我国污染土壤修复技术及产业现状[J]. 中国环保产业, 2013(3):53-57.

[106] 秦金平. 水泥工业转型升级路径之初探[J]. 广东建材, 2012(11):88-90.

## 附录 A 不同环境影响类型相对重要性调查问卷

各位专家：

你好，感谢您百忙之中抽出时间参与本次调查问卷。本次调查问卷旨在确定不同环境影响类型间的相对重要程度，为评价水泥企业功能拓展中的环境影响程度提供依据。本次调查问卷需对 6 个环境影响类型做两两比较判断，共需判断 15 次，为了保证问卷的有效性，请您回答所有问题，不要遗漏。再次真诚感谢您的合作！

填表人姓名\_\_\_\_\_职务\_\_\_\_\_所在单位\_\_\_\_\_联系方式\_\_\_\_\_

填表说明：本表需要您以权重分配的方式对任意两种环境影响类型做出比较，分配权重大小按重要程度由小到大分为 9 种（见表 1），请根据您的判断在得分单元格内填下相应的数值。

表 1 比较标度值及含义

含义	$p_i$ 与 $p_j$ 同等重要	$p_i$ 比 $p_j$ 稍重要	$p_i$ 比 $p_j$ 重要	$p_i$ 比 $p_j$ 强烈重要	$p_i$ 比 $p_j$ 极重要
权重赋值	0.5	0.625	0.75	0.875	1
$P_{ij}$	0.5625	0.6875	0.8125	0.9375	

表中：GWP、AP、POCP、EP、HTP、ADP 分别表示温室效应、酸化效应、光化学效应、水体富营养化、人体健康损害和不可再生资源消耗。

若您认为温室效应比酸化效应重要，请在对应于数字 0.75 的单元格中填写 GWP（见演示表 2 第二行）；

若您认为光化学烟雾比温室效应很重要，但又不那么强烈重要，请在对应于数字 0.8125 的单元格中填写 POCP（见演示表 2 第三行）；

若您认为水体富营养化与温室效应同等重要，请在对应于数字 1 的一栏中直接打√（见演示表 2 第四行）。

表 2 演示表格

政策比较		比较结果								
		0.5	0.5625	0.625	0.6875	0.75	0.8125	0.875	0.9375	1
GWP	AP					GWP				
GWP	POCP						POCP			
GWP	EP	√								

不同环境影响类型相对重要性调查表

政策比较		比较结果								
		0.5	0.5625	0.625	0.6875	0.75	0.8125	0.875	0.9375	1
GWP	AP									
GWP	POCP									
GWP	EP									
GWP	HTP									
GWP	ADP									
AP	POCP									
AP	EP									
AP	HTP									
AP	ADP									
POCP	EP									
POCP	HTP									
POCP	ADP									
EP	HTP									
EP	ADP									
HTP	ADP									

非常感谢你参与调查，祝你工作顺利，万事如意！

## 附录 B 模糊层次分析法的 MATLAB 求解程序

这里以表 5.10 环境影响类型间两两比较的三角模糊数互补判断矩阵为例来说明如何利用 MATLAB 对模糊层次分析法进行求解。

首先新建一个文件夹，并进行命名（这里命名为“数据”），在文件夹下建立两个名称分别为“1-1.xls”和“支配位置.xls”的 excel 文件，其中“1-1.xls”的 excel 文件为需要求解的三角模糊数互补判断矩阵，其数据为：

	GWP	AP	POCP	EP	HTP	ADP
GWP	(.50,.50,.50)	(.35,.42,.48)	(.65,.74,.79)	(.72,.81,.89)	(.22,.28,.34)	(.66,.73,.80)
AP	(.52,.58,.65)	(.50,.50,.50)	(.71,.80,.85)	(.80,.85,.90)	(.33,.36,.41)	(.70,.78,.87)
POCP	(.21,.26,.35)	(.15,.20,.29)	(.50,.50,.50)	(.51,.60,.67)	(.09,.13,.19)	(.40,.46,.55)
EP	(.11,.19,.28)	(.10,.15,.20)	(.33,.40,.49)	(.50,.50,.50)	(.05,.09,.11)	(.30,.36,.41)
HTP	(.66,.72,.78)	(.59,.64,.67)	(.81,.87,.91)	(.89,.91,.95)	(.50,.50,.50)	(.77,.86,.88)
ADP	(.20,.27,.34)	(.13,.22,.30)	(.45,.54,.60)	(.59,.64,.70)	(.12,.14,.23)	(.50,.50,.50)

“支配位置.xls”表示上层对下层的支配位置，这里只对这一个矩阵进行分析，因此数据为：

第一层	[1, 2, 3,4]
-----	-------------

整个求解程序如下：

```
function FAHP
clc,clear,close all
dirname=uigetdir; % 载入数据所在文件
HNOA=3;%层数
NOEH=[1,4];%每层个数
epsilon=0.1;% 阈值
[~,pos]=xlsread([dirname '\支配位置']);
layers=pos(:,2:end);
t=now;
```

```

str=datestr(t,30);
resultfilename=[dirname,'\运行结果',str];
mkdir(resultfilename); % 创建储存运行结果的文件夹
global M N
hh=waitbar(0,'请稍等...');
set(hh,'WindowStyle','modal')
for i=1:HNOA-1
for j=1:NOEH(i)
    a{i,j}=str2num(layers{i,j}); % 第 i 层第 j 元素对第 i+1 层支配元素位置
    [~,prpt{i,j}]=xlsread([dirname,'\num2str(i),'-',num2str(j)]);
    % 对矩阵进行转换, 转换后的矩阵为 A
    MA1=prpt{i,j}(2:end,2:end);
    MA1=strrep(MA1,('[ ');MA1=strrep(MA1,')'],');
    MA2=str2mat(MA1');
    for ii=1:size(MA2,1)
        A{i,j}(ii,:)=str2num(MA2(ii,:));
    end
    AA{i,j}=A{i,j};
    if sqrt(size(A{i,j},1))~=fix(sqrt(size(A{i,j},1)))
        errordlg('判断矩阵必须为方阵! ', '出错! ')
        close(hh)
        return
    elseif ~ismember(size(A{i,j},2),[1,2,3,4])
        errordlg('判断矩阵必须为 I 型模糊数或精确数! ', '出错! ')
        close(hh)
        return
    elseif size(A{i,j},2)==1
        A{i,j}=repmat(A{i,j},1,4);
    elseif size(A{i,j},2)==2;
        A{i,j}=[A{i,j}(:,1),A{i,j}(:,1),A{i,j}(:,2),A{i,j}(:,2)];

```

```

elseif size(A{i,j},2)==3;
    A{i,j}=[A{i,j}(:,1),A{i,j}(:,2),A{i,j}(:,2),A{i,j}(:,3)];
else
    continue
end
%对 A{i,j} 进行一致性分析，并对不满足满意一致性的矩阵进行调整
M=length(A{i,j}(:,1));N=sqrt(M);count1=1;
BB{1}=reshape(A{i,j}(:,1),N,N)+reshape(A{i,j}(:,4),N,N);
BB{2}=reshape(A{i,j}(:,2),N,N)+reshape(A{i,j}(:,3),N,N);
BB{3}=reshape(A{i,j}(:,3),N,N)+reshape(A{i,j}(:,2),N,N);
BB{4}=reshape(A{i,j}(:,4),N,N)+reshape(A{i,j}(:,1),N,N);
if ~isequal(BB{1},ones(N,N))||~isequal(BB{2},ones(N,N))||...
    ~isequal(BB{3},ones(N,N))||~isequal(BB{4},ones(N,N))
    errordlg(['判断矩阵',num2str(i),'-',num2str(j),'必须是为互补型矩阵！'],'出错！')
    close(hh)
    return
end
A{i,j}(A{i,j}==0)=eps;
%QP 为 P 的 Q 算子矩阵，R 为 QP 的特征矩阵，C 为偏差矩阵
QP{1}=Qoperator(A{i,j});
R{1}=Character(QP{1});
C{1}=QP{1}-R{1};
rho(1)=sum(sum(abs(C{1}))/N*(N-1));
while rho(count1)>epsilon
    T{count1}=abs(triu(C{count1},1));
    [delta{count1},ind(count1)]=max(T{count1}(:));
    [aa(count1),bb(count1)]=ind2sub(size(C{count1}),ind(count1));
    %定义对话框的提示语
    if size(AA{i,j},2)==1
        prompt=sprintf(['判断矩阵',num2str(i),'-',num2str(j),...

```

```

'的乘性一致性指标值',num2str(rho(count1)), '>', ...
num2str(epsilon), '因此需要进行调整\n', ...
'最大偏差值为: ', num2str(delta{count1}), '\n', ...
'最大偏差位置为: ', [num2str(aa(count1)), ', ', num2str(bb(count1))], '\n', ...
'对应的模糊数为:', num2str(A{i,j}(N*(aa(count1)-1)+bb(count1),1)), '\n', ...
'请输入调整量:');
elseif size(AA{i,j},2)==2
prompt=sprintf(['判断矩阵', num2str(i), '-', num2str(j), ...
'的乘性一致性指标值', num2str(rho(count1)), '>', ...
num2str(epsilon), '因此需要进行调整\n', ...
'最大偏差值为: ', num2str(delta{count1}), '\n', ...
'最大偏差位置为: ', [num2str(aa(count1)), ', ', num2str(bb(count1))], '\n', ...
'对应的模糊数为:', num2str(A{i,j}(N*(aa(count1)-1)+bb(count1),[1,4])), '\n', ...
'请输入调整量:');
elseif size(AA{i,j},2)==3
prompt=sprintf(['判断矩阵', num2str(i), '-', num2str(j), ...
'的乘性一致性指标值', num2str(rho(count1)), '>', ...
num2str(epsilon), '因此需要进行调整\n', ...
'最大偏差值为: ', num2str(delta{count1}), '\n', ...
'最大偏差位置为: ', [num2str(aa(count1)), ', ', num2str(bb(count1))], '\n', ...
'对应的模糊数为:', num2str(A{i,j}(N*(aa(count1)-1)+bb(count1),[1,2,4])), '\n', ...
'请输入调整量:');
elseif size(AA{i,j},2)==4
prompt=sprintf(['判断矩阵', num2str(i), '-', num2str(j), ...
'的乘性一致性指标值', num2str(rho(count1)), '>', ...
num2str(epsilon), '因此需要进行调整\n', ...
'最大偏差值为: ', num2str(delta{count1}), '\n', ...
'最大偏差位置为: ', [num2str(aa(count1)), ', ', num2str(bb(count1))], '\n', ...
'对应的模糊数为:', num2str(A{i,j}(N*(aa(count1)-1)+bb(count1),:)), '\n', ...
'请输入调整量:');

```

```
end

dlf={};%定义对话框的默认值
dlgTitle='调整对话框：';%定义对话框的标题
lineNo=1;%定义对话框的间距
the=inputdlg(prompt,dlgTitle,lineNo,dlf);
thet=str2num(the{1});
IM=size(thet,2);
if isempty(thet)
    errordlg('请输入有效的调整数！','出错！')
    close(hh)
    return
elseif ~ismember(IM,[1,size(AA{i,j},2)])
    errordlg('输入的模糊数有误，请重新输入！','出错！')
    close(hh)
    return
elseif ismember(IM,[1,4])
    theta{count1}=thet;
elseif IM==2
    theta{count1}=[thet(1),thet(1),thet(2),thet(2)];
elseif IM==3
    theta{count1}=[thet(1),thet(2),thet(2),thet(3)];
else
    errordlg('必须是I型模糊数！','出错!')
    close(hh)
    return
end

count1=count1+1;
if C{count1-1}(aa(count1-1),bb(count1-1))>0
A{i,j}(N*(aa(count1-1)-1)+bb(count1-1),:)=A{i,j}(N*(aa(count1-1)-1)+...
    bb(count1-1),:)-theta{count1-1};
```

```

A{i,j}(N*(bb(count1-1)-1)+aa(count1-1),:)=A{i,j}(N*(bb(count1-1)-1)+...
aa(count1-1),:)+fliplr(theta{count1-1});
else
A{i,j}(N*(aa(count1-1)-1)+bb(count1-1),:)=A{i,j}(N*(aa(count1-1)-1)+...
bb(count1-1),:)+theta{count1-1};
A{i,j}(N*(bb(count1-1)-1)+aa(count1-1),:)=A{i,j}(N*(bb(count1-1)-1)+...
aa(count1-1),:)-fliplr(theta{count1-1});
end
QP{count1}=Qoperator(A{i,j});
R{count1}=Character(QP{count1});
C{count1}=QP{count1}-R{count1};
rho(count1)=sum(sum(abs(C{count1}))/N*(N-1));
end
while rho(count1)<=epsilon
qeacrho{i,j}=rho(1);
heacrho{i,j}=rho(count1);
tiaozhengcishu{i,j}=count1-1;
if count1==1
break
else
prompt=sprintf(['判断矩阵',num2str(i),'-',num2str(j),...
'不具有满意乘性一致性\n\n',...
'调整次数为: ',num2str(count1-1),'\n\n',...
'调整后的一致性指标为:',num2str(rho(end)),'\n\n',...
'是否打开调整后的矩阵? :]);
fnumber=length(AA{i,j}(1,:));
if fnumber==1
AB=num2cell(reshape(A{i,j}(:,1),N,N));
prpt{i,j}(2:end,2:end)=AB;
fname=[resultfilename,'\ ',num2str(i),'-',num2str(j),'调整后'];

```

```
    xlswrite(fname,prpt{i,j})
elseif fnumber==2
    AC1=reshape(A{i,j}(:,1),N,N)';
    AC2=reshape(A{i,j}(:,end),N,N)';
    for iii=1:N
        for jjj=1:N
            AC3{iii,jjj}=sprintf(['',...
                num2str(AC1(iii,jjj)),'',...
                num2str(AC2(iii,jjj)),'']);
        end
    end
    prpt{i,j}(2:end,2:end)=AC3;
    fname=[resultfilename,'\',num2str(i),'-',num2str(j),'调整后'];
    xlswrite(fname,prpt{i,j})
elseif fnumber==3
    AD1=reshape(A{i,j}(:,1),N,N)';
    AD2=reshape(A{i,j}(:,2),N,N)';
    AD3=reshape(A{i,j}(:,4),N,N)';
    for iii=1:N
        for jjj=1:N
            AD4{iii,jjj}=sprintf(['(',...
                num2str(AD1(iii,jjj)),'',...
                num2str(AD2(iii,jjj)),'',...
                num2str(AD3(iii,jjj)),'']);
        end
    end
    prpt{i,j}(2:end,2:end)=AD4;
    fname=[resultfilename,'\',num2str(i),'-',num2str(j),'调整后'];
    xlswrite(fname,prpt{i,j})
elseif fnumber==4
```

```
AE1=reshape(A{i,j}(:,1),N,N);
AE2=reshape(A{i,j}(:,2),N,N);
AE3=reshape(A{i,j}(:,3),N,N);
AE4=reshape(A{i,j}(:,4),N,N);
for iii=1:N
    for jjj=1:N
        AE5{iii,jjj}=sprintf(['(',...
            num2str(AE1(iii,jjj)),',',...
            num2str(AE2(iii,jjj)),',',...
            num2str(AE3(iii,jjj)),',',...
            num2str(AE4(iii,jjj)),')']);
    end
end
prpt{i,j}(2:end,2:end)=AE5;
fname=[resultfilename,'\',num2str(i),'-',num2str(j),'调整后'];
xlswrite(fname,prpt{i,j})
else
    errordlg('输入的模糊数有误! ')
    close(hh)
    return
end
Button=questdlg(prompt,'请选择','是','否','是');
waitfor(Button)
switch Button
    case '是'
        winopen([fname,'.xls'])
    case '否'
end
break
end
```

```

        end

    end

    waitbar(i/(5*(HNOA-1)),hh,'请稍等...')

    end

    count2=1;

    for i=1:HNOA-1

        for j=1:NOEH(i)

            AAA{count2}=[num2str(i),'-',num2str(j)];

            BBB{count2}=sprintf(num2str('%0.4f'),qeacrho{i,j});

            CCC{count2}=sprintf(num2str('%0.4f'),heacrho{i,j});

            DDD{count2}=sprintf(num2str('%d'),tiaozhengcishu{i,j});

            count2=count2+1;

        end

    end

    allrho(1,2:count2)=AAA;

    allrho(2,1:count2)=[ '调整前',BBB];

    allrho(3,1:count2)=[ '调整后',CCC];

    allrho(4,1:count2)=[ '调整次数',DDD];

    allrhoname=[resultfilename,'\','各个矩阵的一致性指标'];

    xlswrite(allrhoname,allrho);

    count=1;

    global alpha

    for alpha=0:0.05:1

        % 下面这个循环是求 alpha 水平下各个模糊判断矩阵的模糊权重

        for i=1:HNOA-1

            for j=1:NOEH(i)

                weightokl{i,j}=zeros(1,NOEH(i+1));weightokr{i,j}=zeros(1,NOEH(i+1));

                [FuzzyWeightVectorl{i,j},FuzzyWeightVectorr{i,j}]=FAHPWeightVector(A{i,j});

                weightokl{i,j}(a{i,j})=FuzzyWeightVectorl{i,j};

                weightokr{i,j}(a{i,j})=FuzzyWeightVectorr{i,j};
            end
        end
    end

```

```

% WTOK 为第 i 层第 j 个元素下的模糊矩阵所对应的模糊权重
WTOKL{i,j}(count,:)=FuzzyWeight Vectorl{i,j};
WTOKR{i,j}(count,:)=FuzzyWeight Vectorr{i,j};
end
end
for i=2:HNOA
    FuzzyDecMatrixl{i}=[];FuzzyDecMatrixr{i}=[];
    for j=1:NOEH(i-1)
        FuzzyDecMatrixl{i}=[FuzzyDecMatrixl{i},weightokl{i-1,j}'];
        FuzzyDecMatrixr{i}=[FuzzyDecMatrixr{i},weightokr{i-1,j}'];
    end
end
weightKtoTopl{1}=1;weightKtoTopr{1}=1;
for i=2:HNOA
    [weightKtoTopl{i},weightKtoTopr{i}]=weightKtoTop(FuzzyDecMatrixl{i},...
        FuzzyDecMatrixr{i},weightKtoTopl{i-1},weightKtoTopr{i-1});
    weightKtoTopL{count,i}=weightKtoTopl{i};
    weightKtoTopR{count,i}=weightKtoTopr{i};
end
count=count+1;
waitbar(1/5+4*alpha/5,hh,'请稍等...')
end
for i=2:HNOA
    for j=1:length(0:0.05:1)
        weightKL{i}(j,:)=weightKtoTopL{j,i};
        weightKR{i}(j,:)=weightKtoTopR{j,i};
    end
end
for i=2:HNOA
    FA=[];

```

```

for j=1:NOEH(i)
    WWW=[weightKL{i}(:,j);flipud(weightKR{i}(:,j))];
    FA=[FA,WWW];
end
fuzzyweight{i}=FA;
end
%每个判断矩阵的模糊权重
K=length(0:0.05:1);
AO=0:0.05:1;
for i=1:K
    AP{i}=sprintf(num2str(AO(i)));
end
for i=1:HNOA-1
    for j=1:NOEH(i)
        for l=1:size(a{i,j},2)
            for k=1:length(0:0.05:1)
                eachtable{k,l}=sprintf(['l',num2str('%4.3f'),' ',...
                    num2str('%4.3f'),'l'],...
                    round(1000*W TOKL{i,j}(k,l))/1000,...
                    round(1000*W TOKR{i,j}(k,l))/1000);
            end
        end
        eachexcel{i,j}(1,1:size(a{i,j},2)+1)=['\alpha',prpt{i,j}(1,2:end)];
        eachexcel{i,j}(2:K+1,1:size(a{i,j},2)+1)=[AP',eachtable];
        eachfname=[resultfilename,'\',num2str(i),'-',num2str(j),'模糊权重'];
        xlswrite(eachfname,eachexcel{i,j})
        eachtable=[];
    end
end
%每层的模糊权重

```

```
for i=2:HNOA
    AJ=[];BC=[];
    for k=1:NOEH(i-1);
        AI=str2num(layers{i-1,k});
        BD=prpt{i-1,k}(1,2:end);
        AJ=[AJ,AI];
        BC=[BC,BD];
    end
    AN{i}(AJ)=BC;
end
U=[0:0.05:1,1:-0.05:0];
table=[];
colormap=HSV(NOEH(end));
for i=1:NOEH(end)
    table=[table,fuzzyweight{end}(:,i)];
    plot(fuzzyweight{end}(:,i),U,'o',...
        'linewidth',2.0,...
        'markersize',1.5,...
        'color',colormap(i,:));
    hold on
end
close(hh)
plot([0 0],[0 1.03],'k',[0 max(max(table))+0.03],[0 0],'k');
ax=[max(max(table))+0.03+0.03,max(max(table))+0.03,...max(max(table))+0.03; ...
0,0.01,-0.01];
fill(ax(1,:),ax(2:,:),'k');
ay=[0,0.005,-0.005; 1.1,1.025,1.025];
fill(ay(1,:),ay(2:,:),'k');
text(-0.01,-0.03,'$$$',...
    'interpreter','latex',...
```

```

    'FontSize',12,...
    'HorizontalAlignment','left')
text(-0.06, 1.05, '$$\{\mu\}_{\tilde{w}}(x)$$',...
    'interpreter','latex',...
    'FontSize',12,...
    'HorizontalAlignment','left')
text(max(max(table))+0.03, -0.03, '$x$$',...
    'interpreter','latex',...
    'FontSize',12, 'VerticalAlignment','top')
h=legend(AN{end},1);
set(h,'FontAngle','italic',...
    'FontWeight','bold',...
    'edgecolor','w',...
    'FontSize',10)
box off
hold off
print('-djpeg', 'FAHPSOLVER_dome.jpg')
tab= repmat(U,1,numel(table(1,:)));
mu=sum(tab.*table)/sum(U);
mu=mu/sum(mu);
[mm,nnn]=sort(mu);
mm=flipr(mm);
nnn=flipr(nnn);
nn(nnn)=1:length(nnn);
for i=2:HNOA
    table{i}(1,:)=['\alpha',AN{i}];
    for j=1:NOEH(i)
        for k=1:K
            eachlayers{k,j}=sprintf(['',num2str('%4.3f'),' ',...
                num2str('%4.3f'),''],...

```

```

round(1000*weightKL{i}(k,j))/1000,...
round(1000*weightKR{i}(k,j))/1000);
end
end
fuzzyweighto{i}=eachlayers;
eachtable1{i}(1,:)=['\alpha',AN{i}];
eachtable1{i}(2:K+1,:)=[AP',fuzzyweighto{i}];
eachlayersfname=[resultfilename,'\','第',num2str(i),'层元素模糊权重'];
xlswrite(eachlayersfname,eachtable1{i})
eachlayers=[];
end
for i=1:NOEH(end)
    MU{i}=sprintf(num2str(round(1000*mu(i))/1000));
    NN{i}=sprintf(num2str(nn(i)));
end
[BE,BF]=size(eachtable1{end});
eachtable2=eachtable1{end};
eachtable2{BE+1,1}='权重';eachtable2{BE+2,1}='排序';
eachtable2(BE+1:BE+2,2:end)=[MU;NN];
f = figure;
set(gcf,'position',[80,80,600,600])
T=uitable('data',eachtable2,...
    'Parent',f,...
    'Position',[20 20 1000 650]);
xlswrite([resultfilename,'\最终结果'],eachtable2)
%P 的 Q-算子矩阵
function QP=Qoperator(P)
global M N
for i=1:M
    if P(i,1)==P(i,2)&&P(i,3)==P(i,4)&&P(i,1)~=0&&P(i,4)~=1

```

```

X(i,1)=(1-P(i,1))^(1/8)*P(i,1)^(-1/8);
X(i,2)=X(i,1);
Y(i,1)=X(i,1);
Y(i,2)=X(i,1);
X(i,3)=(1-P(i,3))^(1/8)*P(i,3)^(-1/8);
X(i,4)=X(i,3);
Y(i,3)=X(i,3);
Y(i,4)=X(i,3);
elseif P(i,1)==P(i,2)&&P(i,3)~=P(i,4)&&P(i,1)~=0&&P(i,4)~=1
X(i,1)=(1-P(i,1))^(1/8)*P(i,1)^(-1/8);
X(i,2)=X(i,1);
X(i,3)=(1-P(i,3))^(1-P(i,3))/(2*(P(i,4)-P(i,3)));
X(i,4)=(1-P(i,4))^(1-P(i,4))/(2*(P(i,3)-P(i,4)));
Y(i,1)=X(i,1);
Y(i,2)=X(i,1);
Y(i,3)=P(i,3)^(P(i,3)/(2*(P(i,4)-P(i,3))));
Y(i,4)=P(i,4)^(P(i,4)/(2*(P(i,3)-P(i,4))));
elseif P(i,1)~=P(i,2)&&P(i,3)==P(i,4)&&P(i,1)~=0&&P(i,4)~=1
X(i,1)=(1-P(i,1))^(1-P(i,1))/(2*(P(i,2)-P(i,1)));
X(i,2)=(1-P(i,2))^(1-P(i,2))/(2*(P(i,1)-P(i,2)));
X(i,3)=(1-P(i,3))^(1/8)*P(i,3)^(-1/8);
X(i,4)=X(i,3);
Y(i,1)=P(i,1)^(P(i,1)/(2*(P(i,2)-P(i,1))));
Y(i,2)=P(i,2)^(P(i,2)/(2*(P(i,1)-P(i,2))));
Y(i,3)=X(i,3);
Y(i,4)=X(i,3);
elseif P(i,1)~=P(i,2)&&P(i,3)~=P(i,4)&&P(i,1)==0&&P(i,4)~=1
X(i,1)=(1-P(i,1))^(1-P(i,1))/(2*(P(i,2)-P(i,1)));
X(i,2)=(1-P(i,2))^(1-P(i,2))/(2*(P(i,1)-P(i,2)));
X(i,3)=(1-P(i,3))^(1-P(i,3))/(2*(P(i,4)-P(i,3)));

```

```

X(i,4)=(1-P(i,4))^(1-P(i,4))/(2*(P(i,3)-P(i,4)));
Y(i,1)=1;
Y(i,2)=P(i,2)^P(i,2)/(2*(P(i,1)-P(i,2)));
Y(i,3)=P(i,3)^P(i,3)/(2*(P(i,4)-P(i,3)));
Y(i,4)=P(i,4)^P(i,4)/(2*(P(i,3)-P(i,4)));
elseif P(i,1)~=P(i,2)&&P(i,3)~=P(i,4)&&P(i,1)~=0&&P(i,4)==1
X(i,4)=1;
X(i,1)=(1-P(i,1))^(1-P(i,1))/(2*(P(i,2)-P(i,1)));
X(i,2)=(1-P(i,2))^(1-P(i,2))/(2*(P(i,1)-P(i,2)));
X(i,3)=(1-P(i,3))^(1-P(i,3))/(2*(P(i,4)-P(i,3)));
Y(i,1)=P(i,1)^P(i,1)/(2*(P(i,2)-P(i,1)));
Y(i,2)=P(i,2)^P(i,2)/(2*(P(i,1)-P(i,2)));
Y(i,3)=P(i,3)^P(i,3)/(2*(P(i,4)-P(i,3)));
Y(i,4)=P(i,4)^P(i,4)/(2*(P(i,3)-P(i,4)));
else
X(i,1)=(1-P(i,1))^(1-P(i,1))/(2*(P(i,2)-P(i,1)));
X(i,2)=(1-P(i,2))^(1-P(i,2))/(2*(P(i,1)-P(i,2)));
X(i,3)=(1-P(i,3))^(1-P(i,3))/(2*(P(i,4)-P(i,3)));
X(i,4)=(1-P(i,4))^(1-P(i,4))/(2*(P(i,3)-P(i,4)));
Y(i,1)=P(i,1)^P(i,1)/(2*(P(i,2)-P(i,1)));
Y(i,2)=P(i,2)^P(i,2)/(2*(P(i,1)-P(i,2)));
Y(i,3)=P(i,3)^P(i,3)/(2*(P(i,4)-P(i,3)));
Y(i,4)=P(i,4)^P(i,4)/(2*(P(i,3)-P(i,4)));
end
end
Pp=prod(X.*Y,2);
QP=1./(Pp+1);
QP=reshape(QP,N,N)';
%QP 的特征矩阵
function R=Character(QP)

```

```

global N
A=1./QP-1;
for i=1:N
    B(i)=sum(A(i,:));
end
for i=1:N
    for j=1:N
        R(i,j)=1/((B(i))/(B(j))+1);
    end
end
end
%FAHPWeight Vector 函数
function [FuzzyWeight Vectorl,FuzzyWeight Vectorr]=FAHPWeight Vector(DecMatrix)
global alpha
%FAHPWeight Vector:根据模糊互补判断矩阵及置信区间计算模糊权重向量
%DecMatrix:标度值为梯形模糊数的模糊互补判断矩阵
%FuzzyWeight Vectorl:模糊权重向量左端点
%FuzzyWeight Vectorr:模糊权重向量右端点
n=length(DecMatrix(:,1));m=sqrt(n);
%计算 alpha 截集下的模糊互补判断矩阵
AL=DecMatrix(:,1)+(DecMatrix(:,2)-DecMatrix(:,1))*alpha;
AR=DecMatrix(:,4)-(DecMatrix(:,4)-DecMatrix(:,3))*alpha;
AL=reshape(AL,m,m)';AR=reshape(AR,m,m)';
%计算由模糊互补判断矩阵导出的模糊正互反判断矩阵
BL=AL./(1-AL);
BR=AR./(1-AR);
x0=ones(1,n)/2;%设初值
options=optimset('largescale','off');%不执行大规模算法
global g1 g2 aaa bbb
[aaa,bbb]=find(BR==Inf);
g1=m;

```

```

for g2=1:m
%计算 fahpw1 的最小值
[x1,w1]=fmincon(@fahpw1,x0,[],[],[],[],BL, BR,[],options);
%计算 fahpwr 的最小值
    [xr,wr]=fmincon(@fahpwr,x0,[],[],[],[],BL, BR,[],options);    FuzzyWeight Vectorl(g2)=w 1;
    FuzzyWeight Vectorr(g2)=-wr;
end
%fahpw1 函数
function y=fahpw1(x)
global g1 g2
m=g1;t=g2;
p=0;
for i=1:m
    for j=1:i
        x((j-1)*m+i)=1/x((i-1)*m+j);
    end
end
for j=1:m
    p=p+x((j-1)*m+t)/sum(x(((j-1)*m+1):(j-1)*m+m));
end
y=p/m;
%fahpwr 函数
function y=fahpwr(x)
global g1 g2
m=g1;t=g2;
p=0;
for i=1:m
    for j=1:i
        x((j-1)*m+i)=1/x((i-1)*m+j);
    end
end

```

```

end

for j=1:m
    p=p+x((j-1)*m+t)/sum(x(((j-1)*m+1):(j-1)*m+m));
end

y=-p/m;

%weightKtoTop 函数
function [weightKtoTopl,weightKtoTopr]=weightKtoTop(AL, AR, BL, BR)

m=length(AL(:,1));n=length(AL(1,:));
%对矩阵 AL 的列向量按从小到大排列, al 为索引矩阵
[AL,a]=sort(AL,2);
%对矩阵 AR 的列向量按从小到大排列, ar 为索引矩阵
[AR,ar]=sort(AR,2);
BL=BL(a);BR=BR(ar);
AL=[zeros(m,1),AL,zeros(m,1)];AR=[zeros(m,1),AR,zeros(m,1)];
BL=[zeros(m,1),BL,zeros(m,1)];BR=[zeros(m,1),BR,zeros(m,1)];
n=n+2;
for j=1:m
    for i=2:n-1
        if 1-sum(BR(j,1:(i-1)))-sum(BL(j,i:n))<0||1-sum(BR(j,1:i))-sum(BL(j,(i+1):n))>0
            continue
        else
            r1(j)=i;
            break
        end
    end
end

end

for j=1:m
    for i=2:n-1
        if 1-sum(BL(j,1:i))-sum(BR(j,(i+1):n))<0||1-sum(BL(j,1:(i-1)))-sum(BR(j,i:n))>0
            continue

```

```
else
    r2(j)=i;
    break
end
end
end
end
for i=1:m
    weightKtoTopl(i)=sum(BR(i,1:(r1(i)-1)).*AL(i,1:(r1(i)-1)))+(1-sum(BR(i,1:(r1(i)-1)))-...
        sum(BL(i,(r1(i)+1):n)))*AL(i,r1(i))+sum(BL(i,(r1(i)+1):n).*AL(i,(r1(i)+1):n));
    weightKtoTopr(i)=sum(BL(i,1:(r2(i)-1)).*AR(i,1:(r2(i)-1)))+(1-sum(BL(i,1:(r2(i)-1)))-...
        sum(BR(i,(r2(i)+1):n)))*AR(i,r2(i))+sum(BR(i,(r2(i)+1):n).*AR(i,(r2(i)+1):n));
end
```

## 攻读学位期间发表论文与研究成果清单

- [1] Xijun Shi, Hongxia Sun, Qiang Zhang. Inclusion and Chain Variations of Non-Additive Set Function on T-Tribe [J]. Energy Procedia, 2011, 13: 9049-9055.
- [2] 石喜军, 张强, 朱吉乔. 对模糊数互补判断矩阵乘性一致性的重新认识[J]. 运筹与管理(已录用).
- [3] 石喜军, 张强, 朱吉乔. 模糊数互反判断矩阵的一致性研究[J]. 中国管理科学, 2013,21(zj):70-74.

## 致谢

博士论文的完成，标志着我的博士求学生活也告一段落。回想起这四年，真是感慨万千。查文献、看文献、写论文、改论文等等一幕幕的情景仿佛又回到了我的面前。我能够顺利获得博士学位，是和我的导师、家人、朋友、同学分不开的，正是他们，陪伴着我、鼓励着我，对我这篇论文的写作提供了莫大的帮助。

感谢我的导师张强教授，四年来张强教授对我的悉心指导，培养了我严谨的治学态度和做事风格。在我博士论文的选题、撰写过程中，张强教授给予了很多有益的指导和建议，他严谨的治学精神、精益求精的科研作风，深深地鼓励着我，使我有勇气攀越知识的高峰。同时也感谢我的师母熊孟英老师，熊老师身上散发的生机和活力深深感染了我，感谢熊老师在生活中和工作中的关心和帮助。

感谢北京理工大学管理与经济学院的韩伯棠教授和北京工业大学经济与管理学院的宗刚教授，感谢他们在开题时给我提供的一系列可行建议和帮助。

感谢我的同门朱吉乔在数学模型和 Matlab 程序上提供的帮助，感谢同门孙红霞、赵璇、张宇宁、张建勇、张勇和张华伟……感谢他们在科研工作中给我带来的启发和帮助。

感谢我的家人，感谢他们一直以来对我的支持和鼓励，感谢他们在我论文写作过程中给予的理解和关怀。在未来的日子里，我会更加努力工作，以回报我的家人。

最后，感谢对我博士论文进行评审的各位教授，感谢他们提出的宝贵建议。

## 作者简介

石喜军，男，汉族，1966年出生于河北省唐县。1986年至1990年本科就读于河南理工大学。1990年至1992年在北京矿务局长沟峪煤矿工作。1992年至1995年研究生就读于中国矿业大学管理工程专业，获管理学硕士学位。1995年至今在北京金隅集团有限责任公司工作。2010年9月至今，就读于北京理工大学管理与经济学院管理科学与工程专业，攻读博士学位。