

硕士学位论文

基于 LCA 的城市污水处理厂

环境影响负荷研究

**RESEARCH ON THE ENVIRONMENTAL IMPACT
LOAD OF THE URBAN WASTEWATER
TREATMENT PLANT BY THE METHOD OF
LIFE CYCLE ASSESSMENT**

梁松

哈尔滨工业大学

2012 年 7 月

国内图书分类号: X822
国际图书分类号: 504

学校代码: 10213
密级: 公开

工学硕士学位论文

基于 LCA 的城市污水处理厂
环境影响负荷研究

硕士研究生: 梁松

导师: 樊庆铎副教授

申请学位: 工学硕士

学科: 环境科学与工程

所在单位: 市政环境工程学院

答辩日期: 2012 年 7 月

授予学位单位: 哈尔滨工业大学

Classified Index: X822

U.D.C: 504

Dissertation for the Master Degree in Engineering

**RESEARCH ON THE ENCIRONMENTAL IMPACT
LOAD OF THE URBAN WASTEWATER
TREATMENT PLANT BY THE METHORD OF
LIFE CYCLE ASSESSMENT**

Candidate:	Song Liang
Supervisor:	Prof. Qingxin Fan
Academic Degree Applied for:	Master of Engineering
Specialty:	Environmental science and Engineering
Affiliation:	School of Municipal and Environmental Engineering
Date of Defence:	July, 2012
Degree-Conferring-Institution:	Harbin Institute of Technology

摘要

城市污水处理厂作为一项环保工程是有益于环境的改善，在节约水资源、减少水环境污染等方面发挥了不可替代的作用。然而城市污水处理厂在其建设、运行和拆除过程中有不可避免的产生了废水、废气和固体废弃物，污染了环境。因此，本文采用生命周期评价的方法，对污水处理厂在其生命周期范围内的环境影响负荷进行了分析。

首先，本文采用生命周期评价的思想对污水处理厂进行了研究目的和范围的界定，将其生命周期范围划分为：原材料获取及运输与施工建设阶段、运营阶段和报废拆除阶段三个部分。并以该污水处理厂的年处理量为基本功能单位（FU=730 万 t/a）对不同生命周期范围内的输入与输出数据进行现场调查和实地监测，编制了污水处理厂生命周期范围内的分析清单。

其次，根据不同环境影响因子的性质，将污水处理厂的环境影响划分为全球变暖影响、不可再生资源消耗、可再生资源消耗、填埋空间消耗、水质影响、空气质量影响、水体富营养化影响、酸化影响、光化学烟雾影响和人体健康影响等 10 类。并根据美国 EPA 公布的特征化模型对不同环境影响进行特征化计算，采用九标标度法和层次分析法确定不同环境影响类别的权重，对污水处理厂各类环境影响进行了量化处理，得到污水处理厂生命周期范围内总体环境影响符合为 5359.344t/FU。其中，贡献最大的为全球变暖影响 2717.873t/FU，占总环境影响负荷的 50.713%；其次依次为不可再生资源消耗，1326.440t/FU，占总环境影响负荷的 24.750%；可再生资源消耗 1056.1t/FU，19.705%；填埋空间消耗 204.008t/FU，3.807%；水质影响 36.854 t/FU，0.688%；空气质量影响 6.072 t/FU，0.113%；水体富营养化影响 5.922 t/FU，0.110%；酸化影响 5.615 t/FU，0.105%；光化学烟雾影响 0.450 t/FU，0.008%；对人体健康影响 0.008 t/FU，不足 0.001%。在污水处理厂各生命周期阶段中，对环境影响贡献最大的为运营阶段，4421.067t/FU，占总环境影响负荷的 82.493%。

最后，本文对整个生命周期评价过程进行了生命周期解释，并针对不同生命周期阶段内环境影响的特点，提出了相应影响因子的控制措施和减量化意见。

关键词：城市污水处理厂；生命周期评价；环境影响负荷

Abstract

As an environmental protection project, wastewater treatment plant plays an irreplaceable role in conserving water recourse and reducing the pollution. However, wastewater treatment plant produces lots of contaminants in its life cycle, which are bad for environment. This study analyzes the environmental impact load of an urban wastewater treatment plant by the method of life cycle assessment (LCA).

Firstly, this study divided the life cycle of the wastewater treatment plant into three stages by the method of life cycle assessment, the process of the raw material production and transportation, the process of operation, the process of demolition. And this study make the annul handing capacity of wastewater the treatment plant as the function unit, that is $FU=7.3 \times 10^6t/a$. According to the results of life cycle parts division, this study works out a data list of the wastewater treatment plant.

Secondly, this study divides the environmental impact load of the wastewater treatment plant into ten categories: global warming potential (GWP), non-renewable resource consumption, renewable resource consumption, landfill space consumption, water quality impact (WQP), air quality impact (AQP), eutrophication potential, acidification potential (AP), photochemical smog impact (POCP), human health impact. Then, this study calculates the load of every kind of environmental impact by the models published by the environmental protection agency of United States. At the end, this study values the environmental impact load by the weight, which is drawn by the method of nine scale and analytic hierarchy process (AHP). The final environmental impact load of the wastewater treatment plant is 5359.344t/FU. The largest part is global warming potential, 2717.873t/FU, 50.713% of the whole environmental impact load. The second largest part is non-renewable resource consumption, 1326.440t/FU, 24.750% of the whole load, renewable resources consumption, 1056.1t/FU, 19.705%; landfill space consumption,204.008/FU, 3.807%; water quality impact 36.854t/FU, 0.688%; air quality impact 6.072t/FU, 0.113%; eutrophication potential, 5.922t/FU, 0.108%; acidification potential, 5.615t/FU, 0.105%; photochemical smog impact 0.450t/FU, 0.008%, human health impact,0.008t/FU, 0.001%.From another aspect, operation process has the largest

environmental impact load of the wastewater treatment plant, 4421.067t/FU, 82.493% of the total.

At last, this study gives an interpretation of the life cycle assessment. And according to the characteristics of the environmental impact load, this study puts forward some measures to control and reduce the environmental impact load.

Keywords: WWTP, life cycle assessment, environmental impact load

目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	II
目 录.....	IV
第 1 章 绪 论.....	1
1.1 课题来源与研究背景.....	1
1.1.1 课题来源.....	1
1.1.2 研究背景.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 国外的污水处理现状.....	2
1.2.2 国外研究现状.....	3
1.2.3 国内污水处理现状.....	5
1.2.4 国内研究现状.....	6
1.3 主要研究内容及研究目的和意义.....	8
1.3.1 主要的研究内容.....	8
1.3.2 研究目的和研究意义.....	8
1.3.3 研究方案及主要实施步骤.....	9
第 2 章 理论方法与研究范围.....	11
2.1 理论方法.....	11
2.1.1 生命周期评价的概念.....	11
2.1.2 生命周期评价的发展.....	12
2.1.3 生命周期评价的基本方法.....	13
2.2 研究范围.....	16
2.2.1 研究对象.....	16
2.2.2 研究目的和范围的界定.....	19
2.3 本章小结.....	20
第 3 章 清单分析.....	21
3.1 清单分析的基本过程.....	21
3.2 建设阶段清单分析.....	22
3.2.1 施工阶段资源和能源消耗.....	22
3.2.2 建材生产阶段消耗和环境释放清单.....	23
3.2.3 建材运输阶段消耗与排放清单.....	25

3.3 运营期清单分析.....	28
3.3.1 运营期消耗清单.....	28
3.3.2 运营期排放清单.....	30
3.4 报废拆除阶段清单分析.....	35
3.4.1 报废拆除阶段消耗清单.....	35
3.4.2 报废拆除阶段环境释放清单.....	36
3.5 本章小结.....	38
第 4 章 影响分析.....	39
4.1 环境影响分类.....	39
4.2 环境影响特征化.....	40
4.2.1 可再生资源消耗.....	40
4.2.2 不可再生资源消耗.....	40
4.2.3 全球变暖影响潜能.....	42
4.2.4 光化学烟雾影响潜能.....	44
4.2.5 酸化响潜能.....	45
4.2.6 水体富营养化影响潜能.....	46
4.2.7 水质影响潜能.....	48
4.2.8 空气质量影响潜能.....	49
4.2.9 填埋空间消耗.....	50
4.2.10 人体健康影响.....	51
4.3 环境影响量化.....	53
4.3.1 层次分析法基本原理.....	54
4.3.2 层次分析法的基本步骤.....	54
4.3.3 权重向量的计算.....	56
4.3.4 加权评估.....	58
4.4 本章小结.....	60
第 5 章 城市污水处理厂生命周期解释.....	61
5.1 重大问题识别.....	61
5.1.1 信息的识别和组织.....	61
5.1.2 重大问题的确定.....	63
5.2 评估.....	64
5.2.1 研究目的和范围阶段评估.....	64
5.2.2 清单分析阶段评估.....	64
5.2.3 影响分析阶段评估.....	64

5.3 生命周期结果及改善分析.....	65
5.3.1 生命周期结果.....	65
5.3.2 建设阶段改善分析.....	65
5.3.3 运营阶段改善分析.....	66
5.3.4 拆除阶段改善分析.....	67
5.4 本章小结.....	67
结 论.....	68
参考文献.....	69
攻读硕士学位期间发表的论文及其它成果.....	73
哈尔滨工业大学学位论文原创性声明及使用授权说明.....	74
致 谢.....	75

第 1 章 绪 论

1.1 课题来源与研究背景

1.1.1 课题来源

城市水资源与水环境国家重点实验室的项目，项目名称：基于生命周期评价的污水处理厂环境影响负荷研究，项目编号：HC200815。

1.1.2 研究背景

水是生命之源，是人类社会生存和发展不可或缺的因素。随着世界人口规模的不断增加和社会经济的不断发展，全球生态破坏与环境污染的问题日益突出。水作为环境系统不可或缺的元素，其污染问题已经得到了全世界的广泛关注。

进入 21 世纪以来，我国经济发展非常迅速，然而由此而产生的水污染问题也不容忽视。根据 2010 年环保部发布的《中国环境状况公报》显示：我国松花江、辽河、淮河、海河、黄河、长江和珠江七大水系总体为轻度污染，其中长江和珠江水系水质较好，松花江和淮河水系水体污染程度较轻，黄河、淮河和辽河水系水体污染较为严重；根据全国 204 条河流共 409 个地表水国控监测断面的监测数据显示，我国现有 I-III 类水体为 59.9%，IV—V 类水体为 23.7%，劣 V 类水体为 16.4%；水体主要污染指标为高锰酸盐指数、BOD、氨氮和石油烃类。如图 1-1 所示。

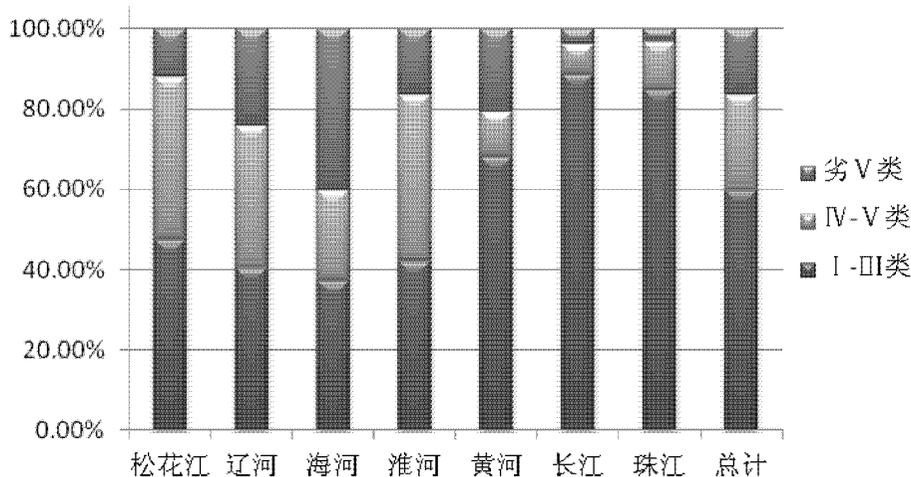


图 1-1 2010 年我国七大水系水质分布情况

26 个国控重点湖泊和水库中，I-II 类水体为 3.8%，III 类水体为 19.2%，IV 类水体为 15.4%，V 类水体为 23.1%，劣 V 类水体为 38.5%；主要污染指标为总氮和总磷。如图 1-2 所示。

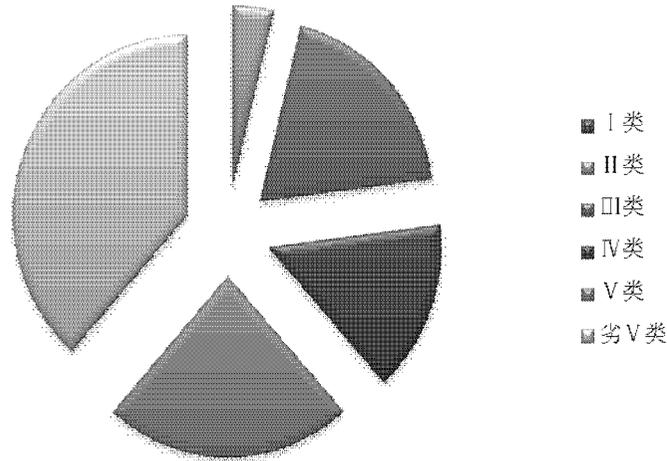


图 1-2 2010 年我国国控湖库水质分布

面对这种日益严重的水体污染问题，污水处理厂作为一种控制污染物排放的手段得到了广泛的应用，其主要作用是对污水进行物理化学和生物化学处理，从而使污水中的污染物质得到分离和净化，减少污染物的排放。

然而，污水处理厂作为一项环保工程，其建设、运行和拆除过程又不可避免的产生了资源能源消耗和环境释放等一系列问题，生命周期评价作为一种环境管理的手段在污水处理厂的建设和运行过程中得到了广泛应用。

生命周期评价的研究始于 20 世纪 60 年代，随着环境问题和能源问题的日益突出，生命周期评价的思想越来越受到社会的关注。1990 年美国环境毒理学与化学学会正式提出了生命周期评价的概念。1997 年国际标准化组织公布了 ISO14040 标准，该标准确立了生命周期评价的基本原则和框架并规范了生命周期评价的内容和步骤，使得生命周期评价正式成为一种环境管理工具。随着污水处理厂建设数量的增加，越来越多的人开始注意到了污水处理厂作为环保工程建设的同时带来的环境问题，许多学者开始将生命周期评价的思想应用到污水处理厂的建设和管理中。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 国外的污水处理现状

工业革命之后，随着人口的增加和社会经济的发展，水污染的问题越来越

严重。世界上先后出现了多起公害事件，人们才逐渐认识到保护水资源，改善水环境的重要性。世界各国都将污水处理厂看作是一种减少水环境污染的有效手段，从立法的角度对污水处理工作给予了很大保障，并投入大量资金，不断的研究新技术^[1]，使污水处理工作得到了很大发展，并取得了一定的成果。

19世纪中期，英国开始了对污水处理技术的研究，先后研究出了几种重力式分层沉淀设备，1882年研究出了人工生物滤池，并发展了多种污水处理新技术。截至到目前为止，英国已有污水处理厂8000多座，全部二级污水处理厂，形成了12大污水处理集团^[2]。

20世纪初期美国开始了污水处理的研究工作，并得到了迅速的发展。1913年美国建成了世界上第一座生产性的活性污泥法污水处理厂。截至到目前为止，美国是世界上污水处理厂最多的国家，其中大部分为二级污水处理厂^[3]。

德国的污水处理也已有上百年的历史，1893年德国最早使用了生产性加氯消毒技术。截止到2008年，德国已有城镇污水处理厂6113座，总设计规模3000万 m^3/d ^[4]。

芬兰是世界上污水处理最发达的国家之一，20世纪初首都赫尔基辛建立了芬兰第一座城市污水处理厂。1932年芬兰建立了第一座地下污水处理厂，并得到了缓慢发展。目前，芬兰在节约水资源，高效污水处理厂等方面拥有世界一流的技术和工艺，供水和废水处理等业务领域超过250家企业，被联合国列为全球水资源管理水平最高的国家^[5]。

在水资源日益短缺的情况下，污水处理和回用技术越来越受到各国的重视。国外污水处理工艺已经开始从二级处理逐步向三级处理过度，并逐步趋向于大型化。

1.2.2 国外研究现状

国外学者采用生命周期评价方法分析污水处理厂起步较早，逐步从单一的环境影响负荷指标过渡到环境、经济、技术等多方面综合评价的指标，并不断对污水处理厂的生命周期阶段进行细化，使研究的系统更准确，研究的目的更明确，其研究范围涉及生活污水和工业污水以及污水处理工艺和污泥处理工艺。

1998年，Anne-Marie Tillman和Michael Singly等人^[6-7]将生命周期评价的思想应用于瑞士西海岸的两个城市污水处理厂，对污水处理厂建设阶段和运行阶段的能源消耗与环境影响做了初步分析。该分析认为污水处理厂运行阶段的环境影响远大于建设阶段。

2005年Almudena和Gumersindo等^[8]采用生命周期评价的方法对城市污水

处理厂剩余污泥的厌氧消化处理方式和热解焚烧处理方式进行了比较分析,通过对能源资源回收等方面的比较认为热解焚烧处理方式是目前污泥处理的最好方式。

2005年 Tangsubkul 等^[9]采用生命周期评价的思想以环境影响和能源消耗为指标对 CMF、MBR 和 WSP 等污水回用技术进行了比较分析。该分析认为 WSP 工艺的环境影响负荷最小,为污水回用技术的设计和管理提供了一定的参考依据。

2007年 Stephane Lassaux 和 Robert Renzoni 等人^[10]把污水处理厂的生命周期过程分为下水道系统、污水处理阶段和污水排放阶段对瓦隆大区某城市污水处理工程进行了分析,该分析认为污水收集和污水处理的效率越高,污水处理厂对全球的环境负荷越小。

2007年 Mohamed 等^[11]将生命周期评价的思想应用于污水处理厂的决策管理系统的研究中。该研究认为应用生命周期的思想可以有效地实现对污水处理厂的环境友好管理,降低污水处理厂的环境影响负荷。这为污水处理厂的运行管理提供了有效地理论支持。

2007年 M. Ortiz 等^[12-13]通过生命周期评价的方法对比分析了 CASS 和 CASS-TF 两种污水处理工艺对环境的影响程度。研究结果表明,CASS-TF 污水处理厂工艺与 CASS 污水处理工艺相比对环境所造成的影响比较小。这为污水处理厂运营和后续污水处理厂设计提供了数据支持。

2008年 Flores-Alsina 等^[14]采用生命周期评价的方法从经济、环境、技术和可行性四个方面构建了评价模型对活性污泥法进行了评价,并给出了相应的评价标准,并提出活性污泥法污水处理厂在运行过程中的不确定性对最终评价结果具有一定程度的影响。

2008年 H. Almudena 等^[15]采用生命周期评价的方法对污水处理厂运营阶段的环境影响负荷进行了分析,并采用荷兰莱顿大学所开发生命周期评价软件对污水处理厂运营阶段的环境影响负荷进行了定量化。研究结果表明,污水处理厂的生物处理阶段在总体运营过程中能耗所占比例最大,但其对氮磷等物质去除效果最明显,降低了污水处理厂对水体富营养化的影响。

2009年 Adriana 和 Michela 等^[16]以意大利某污水处理厂为例,采用生命周期评价的思想对该污水处理厂的建设阶段和运行阶段的废物产生进行了分配,从而得到了不同生命周期阶段的污水处理厂的环境负荷的大小。

2010年 Jeffrey Foley 等^[17]采用生命周期评价的方法对污水处理厂运营过程中的资源能源消耗和环境污染物排放进行了分析,分析结果表明,出水中氮和

磷的含量与运营过程中资源能源消耗有很大关联。因此，可以通过对比分析受纳水体水质和污水处理厂运营过程中的环境影响来确定出水中氮和磷的值。这为污水处理厂的运营管理提供了数据支持。

随着生命周期评价的发展和不断完善，越来越多的研究者将其应用到了污水处理厂环境影响负荷的分析中，并逐步应用到污水处理系统规划^[18]、污泥处理^[19]、污水处理厂出水对收纳水体的影响分析^[20]等方面，使污水处理厂生命周期评价不断完善。

1.2.3 国内污水处理现状

20 世纪初，我国开始污水处理工作。1923 年，我国建成了第一座城市污水处理厂—上海北区污水处理厂。建国初期，由于我国工农业生产刚刚起步，水体污染程度较低，全国仅有近十座污水处理厂，且处理规模小，处理工艺简单，仅为一级处理。改革开放以后，随着我国社会经济的快速发展，水环境污染问题日益严重，1982 年，天津纪庄子污水处理厂开工建设，我国开始了污水处理的快速发展，先后在北京、上海、广东、河北、湖南等地建设了数十座不同规模的污水处理厂。根据国家统计局发布的数据，截止到 2011 年底，我国已有 637 个城市建有污水处理厂，占城市总数的 97%，全国累计建设城镇污水处理厂 3135 座，污水处理能力 13600 万 m^3/d ^[21]。

目前，我国城市污水处理主要采用的二级生物处理，有多种处理工艺：传统活性污泥法、氧化沟工艺、SBR 工艺、AB 法污水处理工艺、A/O 工艺、A2/O 工艺、CASS 工艺等^[22]。

与国外的污水处理相比，我国污水处理厂在建设和运行过程中存在有许多问题。

首先，污水处理率较低。截止到 2011 年底我国城市污水处理率为 80%，农村地区的生活污水处理率几乎为 0。

其次，污水处理厂运行效率低。由于我国污水处理厂大部分由政府投资建设和运营，缺乏对经济效益的考虑，致使大部分污水处理厂因资金缺乏而无法正常运转，造成污水直接排放或部分达标排放。

第三，污泥处理程度低。我国现阶段污泥处理方式主要是垃圾填埋场卫生填埋，但是，大部分城市污水处理厂，尤其是小城镇污水处理厂的污泥往往随意堆放，不能实现无害化处理，造成了二次污染。

由此可见，我国在污水处理，保护水资源和水环境仍有待提高。

1.2.4 国内研究现状

与国外相比,我国在生命周期评价的研究中起步较晚,将生命周期评价的思想应用的污水处理厂的环境负荷分析是近几年在我国发展起来的。

杨健、郝一舒等^[23]将污水处理厂的生命周期过程分为施工阶段、运营阶段和拆除阶段三个部分,并对采用活性污泥法和生物滤池的两座小城镇污水处理厂进行了生命周期分析。分析结果表明,生物滤池工艺与活性污泥法相比,运行阶段能耗较小,承受冲击负荷的能力较强,是小城镇污水处理厂较好的选择。但生物滤池建设阶段的资源能源消耗远大于活性污泥法。

2002年陈郁等^[24]利用生命周期评价的思想对城市污水处理厂进行了初步研究,并建立了污水处理厂的生命周期评价的指标体系。该评价指标体系将污水处理厂的整个生命周期过程界定为污水收集阶段、污水处理阶段和出水排放及污泥处理与处置阶段。通过对污水处理厂整个生命周期过程中的环境效益、经济效益和技术指标的分析,对不同的污水处理工艺进行了优劣排序。研究结果表明,生物滤池处理工艺的能耗小于活性污泥处理工艺,但其对环境的影响大于活性污泥处理工艺。

2006年王巧等^[25]对污水再生利用工程进行了生命周期评价,该研究将污水再生过程的整个生命周期分为污水收集、污水处理、污水回用和部分排放及污泥处理与处置阶段,对污水再生过程的能源消耗和环境影响进行了有效分析,并提出了城市污水再生利用工程的生命周期评价模型。

2006年周凌等^[26]对采用生命周期评价的方法对城市污水处理厂的环境效益进行了初步分析。该研究将污水处理厂看作是一种产品,将其生命周期阶段分为施工建设阶段、生产运行阶段和报废拆除阶段,从而对活性污泥和生物滤池两种污水处理工艺的整个生命周期过程的环境影响进行了对比分析,认为生物滤池工艺的环境影响负荷远小于活性污泥处理工艺。

2006年熊家晴、王巧等^[27]采用生命周期评价的方法对西安市北石桥污水处理厂 DE 型氧化沟进行了资源能源消耗和环境污染排放的分析,并以典型活性污泥法作为对照。研究结果表明,DE 型氧化沟污水处理工艺与典型活性污泥法相比,环境影响较小。

2007年王梅等^[28]以生命周期评价的方法分析了金霞市某城市污水处理厂,并通过选取出水水质、恶臭气体和固体废弃物等评价因子定性和定量分析了资源能源消耗、人体健康、生态系统和生态毒性等方面环境影响负荷,最后提出了污水处理厂效益最大化的改进措施。

2008年林璐等^[29]采用生命周期评价的方法对比分析了九江流域的两座城市污水处理厂，采用A/O工艺的龙岩市新罗区污水处理厂和采用百乐卡工艺的长泰县东区污水处理厂。研究表明，A/O工艺在环境影响与技术性能等方面优于百乐卡工艺。这为后续中小城镇污水处理厂的设计提供了数据支持。

2009年余建鹏、郑泽根等^[30]以重庆三峡库区小城镇污水处理厂为例，采用生命周期的思想对曝气池工艺和生物滤池工艺进行了经济、技术和环境效益三方面的对比分析，认为生物滤池在污水处理过程中具有明显优势。

2009年孟翔宇等^[31]采用生命周期分析中的物料流与能量流的分析方法对污水处理厂的环境影响负荷进行了定量化分析，更加直观的反映了污水处理厂对环境的影响程度。该研究通过对一年中污水处理厂的运行状况的跟踪调查指出：污水处理厂的运行温度与运行工况对污水处理厂的环境影响负荷有很大影响。

2010年曹冰等^[32]对西安市第三污水处理厂的能耗成本和环境效益进行了生命周期评价分析。该研究通过以CAST工艺为例对污水处理厂的建设阶段、运行阶段和报废拆除阶段的资源消耗、能源消耗和污染物排放进行了整理和分析，认为对污水处理厂整个生命周期过程中环境负荷贡献最大的是由能源消耗引起的全球变暖与大气酸化。

2010年吉倩倩等^[33]通过对环境效益的定量分析，提出了城市污水处理系统对环境影响的LCA模型，将污水处理厂的环境效益归结为以单位能耗来表征的单一指标，并通过该指标的大小来衡量污水处理厂在运行过程中对环境影响负荷的大小。为污水处理工程的建设提供了一定的参考价值。

通过对国内外污水处理工程生命周期评价的对比不难发现，我国在污水处理厂的生命周期评价的研究上呈现以下特点：

1、研究对象较为单一：与国外的研究相比较，我国在污水处理厂生命周期评价的研究上，研究对象局限于对污水处理厂的处理工艺的研究，缺乏对污泥处理与处置阶段的环境影响负荷的分析。

2、研究缺乏深度：与国外的研究相比较，我国在对数据清单及清单数据库的研究上还有待完善。通过对比可以发现，我国在对数据清单的分析上缺乏对污水处理过程中药剂投加清单以及污泥处理与处置过程中输入与输出清单的分析。

3、研究片面：通过对国内污水处理厂生命周期评价研究的现状总结可以发现，我国在对污水处理厂进行生命周期分析时，其生命周期阶段划分分为如下两种方法：

- (1) 污水处理厂建设阶段、生产运行阶段、报废拆除阶段；
- (2) 污水收集阶段、污水处理阶段、污水排放及污泥处理与处置阶段；

这两种划分方法均未考虑到对污水处理厂建设阶段原材料的获取与运输阶段的环境影响负荷的研究。

1.3 主要研究内容及研究目的和意义

1.3.1 主要的研究内容

结合国内外对污水处理厂环境影响负荷研究现状，本文在以生命周期评价的思想对呼兰区城市污水处理厂的环境影响负荷进行分析时，将其生命周期分为如下阶段：原材料的获取与运输阶段、污水处理厂施工建设阶段、污水处理厂运行阶段、污水处理厂报废拆除阶段。具体研究内容如下所示：

1、根据生命周期评价的基本方法确定呼兰区老城区城市污水处理厂的系统边界范围和基本功能单元。并根据划分的生命周期阶段制定数据清单，对各个生命周期阶段的数据进行监测、收集和分析。

2、通过对数据清单的分析，对污水处理厂整个生命周期阶段的环境影响负荷进行分类和特征化，并根据层次分析法进行量化。分析污水处理厂的整体环境影响负荷的大小，找出贡献最大的环境影响类别和生命周期阶段。

3、通过对呼兰区老城区城市污水处理厂的范围界定、清单分析和影响评价，提出生命周期解释，对该污水处理厂存在的问题进行识别和评估，形成初步结论，并提出合理建议。

1.3.2 研究目的和研究意义

污水处理厂的功能是把经污水管网收集的污水经过物化和生化处理使污染物分离、转化为无害少害的易于处理的物质，实现废水的净化排放。然而，污水处理厂作为一个环保工程，在其建设和运营过程中又不可避免的会消耗资源能源，产生废水、废气、噪声和固体废弃物等环境污染物质，对周围环境产生一系列影响。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量化和识别的客观过程，它可以有效地实现对产品从摇篮到坟墓的整个生命周期过程的环境影响负荷的分析。对污水处理厂而言，可以把污水处理厂看作是一个产品，其整个生命周期过程包括原材料的获取和运输、污水处理厂的建设、污水处理厂的运行和污水处理厂的报废拆除阶段；也可以把污水处理厂看作是一种生产工艺：原水为原材料，出水为产品，其整个生命周期过程包括原水的收集阶段、污水的处理阶段、污泥处理与出水排放阶段；从而通过生命

周期评价的方法实现对污水处理厂整个生命周期过程中的环境负荷进行分析与研究。

本文旨在以生命周期评价的基本思想为指导，把污水处理厂看作是一种产品，其整个生命周期范围包括原材料的获取与运输、污水处理厂的建设、污水处理厂的运行和污水处理厂的拆除阶段。

通过对污水处理厂整个生命周期阶段的分析，实现对污水处理厂各个生命周期阶段环境影响负荷的定量化，为后续污水处理厂建设和污水处理厂的管理提供数据支持。

1.3.3 研究方案及主要实施步骤

本研究采用生命周期评价的思想对呼兰区老城区城市污水处理厂的整体环境负荷进行分析，

根据 ISO14000 和美国环境毒理学和化学学会（SETAC）中有关生命周期评价方法的规定，研究步骤可分为如下几部分：

（1）研究目的和范围的界定。即是按照生命周期评价的思想对研究目的进行定义，并根据所确定的研究目的对呼兰区城市污水处理厂的空间和时间范围进行界定，并划分生命周期阶段。

（2）清单分析。根据所确定的研究目的和研究范围，对每一个生命周期阶段的输入和输出数据进行收集和分析。

（3）影响分析。根据清单分析所收集的数据，对污水处理厂在其生命周期阶段内所造成的环境影响进行分类、特征化和量化。

（4）生命周期解释。对污水处理厂在其生命周期阶段所造成的环境影响进行解释和识别，并提出相应改善的建议。

具体研究方案和研究过程如图 1-3 所示：

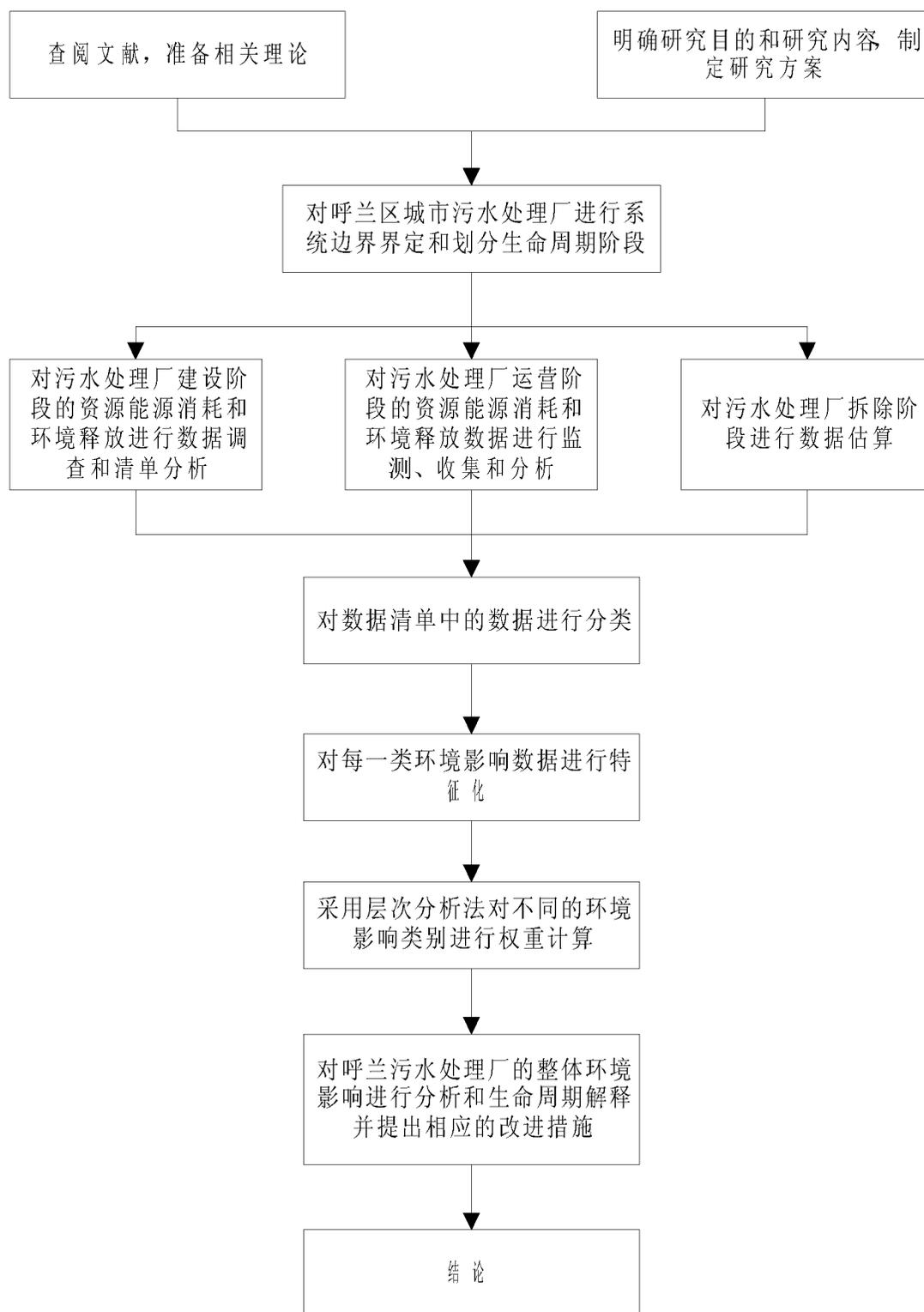


图 1-3 研究方案及技术路线图

第 2 章 理论与研究方法

2.1 理论方法

本文所采用的评价方法为生命周期评价。生命周期评价 (Life Cycle Assessment, 简称 LCA) 又称为生命周期分析(LCI), 是分析产品或服务生命周期阶段内资源能源消耗和环境释放的环境管理工具, 是一种从“摇篮”到“坟墓”的管理方式^[34]。产品的生命周期范围主要由原材料获取与运输、产品加工生产、产品销售、产品使用和最终处理与处置等几个部分构成。

2.1.1 生命周期评价的概念

目前, 关于生命周期评价有的定义有很多种, 其中 SETAC 和 ISO14040 系列标准中所给出的有关于生命周期评价的定义得到了普遍认可。

国际标准化组织(ISO)在 ISO14040 标准中将生命周期评价定义为: 生命周期评价是对一个产品系统的生命周期中输入、输出及其潜在环境影响的汇编与评价^[35]。

美国环境毒理学和化学学会 (SETAC) 定义生命周期评价为: 全面地审视与一种工艺或产品“从摇篮到坟墓”的整个生命周期有关的环境后果^[36]。其目的在于对整个生命周期的投入与产出及其所造成的潜在环境影响进行评估和量化, 并寻找改善这种环境影响的方法和手段, 使其环境影响最小化。这种量化评估贯穿于产品、工艺 (或服务) 的全部生命周期范围内, 主要包括原材料获取与运输、产品加工生产、产品销售、产品使用以及产品的最终处理与处置阶段。

在我国根据 GB/T24040-1999 的规定, 将生命周期评价定义为: 生命周期评价是研究贯穿于产品、生产工艺 (或服务) 从“摇篮”到“坟墓”的生命周期范围内的环境影响负荷及计算方法, 一般情况下考虑的影响因素包括资源能源的消耗和利用、对人体健康影响和生态影响。

将这些概念总结起来, 可以将生命周期评价描述为: 对一种产品、生产工艺或服务的整个生命周期阶段的资源能源和环境影响的分析与评价, 包括原材料获取与运输、加工、生产和产品使用及最终处理与处置阶段。

2.1.2 生命周期评价的发展

生命周期评价的思想最早出现于 20 世纪 60 年代^[37]，在国内外经过了 40 多年的发展，已经成为了一种重要的环境管理工具。其发展过程大致可分为三个阶段：早期研究阶段、徘徊研究阶段和迅速发展阶段^[38]。

(1) 早期研究阶段

现在通常认为生命周期评价开始于 20 世纪六七十年代对包装品环境问题的研究，当时把这种研究方法称为资源与环境状况分析研究(REPA)。其研究开始的标志是 1969 年美国中西部资源研究所(MRI)对可口可乐公司饮料罐的一项研究。该项研究对比分析了大约 40 种材料的饮料罐来决定那种材料的饮料罐对资源能源的消耗最少，对环境影响负荷最小。这项研究促使了可口可乐公司用塑料包装瓶替代了过去长期使用的玻璃包装瓶。

随后，欧美等国家的研究机构也相继开展了一些类似的研究，其研究焦点为包装品废弃物问题的研究，如瑞典的 Sundstrom 公司、美国的富兰克林研究会、英国的 Boustead 咨询公司等。这一时期的研究通常是伴随工业企业的发展而秘密进行的，其研究结果通常只作为企业内部产品开发和决策管理的支持工具。

(2) 徘徊发展阶段

到了 20 世纪 70 年代，能源问题已成为环境问题的核心，伴随着全球能源危机的出现，人们逐渐认识到了对化石燃料保护的重要性和能源生产所带来的污染问题的严重性。继而许多对污染物排放的研究转变为对能源分析与规划的研究。这一时期能源分析法成为了主要的研究方法。后来，由于一些关于 REPA 的研究工作未能取得预期中的研究成果，部分企业逐步放弃了有关这方面的研究，这使得 REPA 的研究项目和研究人员迅速减少，仅在学术界有关 REPA 的研究在缓慢进行。

到了 20 世纪 80 年代，有关固体废弃物的管理问题成为了全球的焦点问题，REPA 的研究思想又重新得到了研究人员的重视，成为当时环境问题研究的一个重要工具。

(3) 迅速发展阶段

到了 20 世纪 90 年代初，随着区域范围和全球范围内环境问题的日渐严重，环境保护和可持续发展思想在全球范围内的普及，REPA 的研究得到了迅速发展。其研究内容涉及到工业、企业、管理机构、研究部门和消费者等多个方面，所研究的目的不尽相同，各有侧重。这一时期的 REPA 研究也变得越来越复杂，

缺乏统一的标准。

到了 1989 年，荷兰国家居住、规划与环境部(VROM)提出了涉及产品生产、消费和最终处理与处置的各个环节的环境政策，同时也提出了对生命周期评价的基本方法和数据同时也提出了对生命周期评价数据进行特征化处理的基本思想，逐步完善了生命周期评价的基本模式。第一次关于生命周期评价的国际会议于 1990 年召开，美国环境毒理学和化学学会（SETAC）在会议上首次提出了生命周期评价(Life Cycle Assessment,简称 LCA)的基本概念。1997 年-2000 年国际标准化组织(ISO) 先后颁布了 ISO14040 生命周期评价系列标准。1997 年颁布《生命周期评价—原则与框架》(ISO14040) 标准,1999 年颁布《生命周期评价—目标与范围确定，清单分析》(ISO14041) 标准，2000 年颁布《生命周期评价—生命周期影响评价》(ISO14042) 标准和《生命周期评价—生命周期解释》(ISO14043) 标准。参考 ISO 国际标准，我国在 1999 年—2002 年也颁布了多项标准。

2.1.3 生命周期评价的基本方法

2.1.3.1 生命周期评价的基本原则

根据 ISO14040 和 GB/T24040 标准的要求，在进行生命周期评价时，应遵循如下准则：

- (1) 评价应充分考虑产品系统整个生命周期阶段所涉及的各种环境因素。
- (2) 应依据研究目的和研究范围确定研究的深度和研究跨度。
- (3) 应明确指出研究范围和所涉及的重要假设条件及具体要求。
- (4) 在进行清单分析时，要明确指出数据来源和对数据质量进行准确描述。

2.1.3.2 生命周期评价的总体框架

美国环境毒理学和化学学会(SETAC)将生命周期评价(LCA)分成了研究目

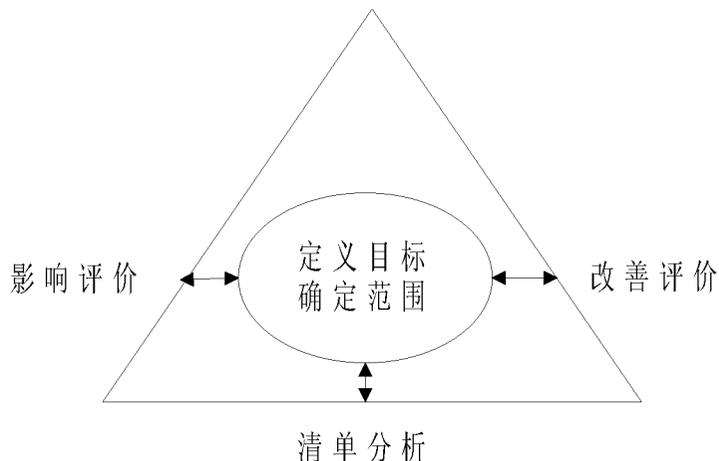


图 2-1 生命周期评价技术框架图 (SETAC,1993)

的和范围的确定、清单分析、影响评价和改善评价^[39]等四个有机组成部分，其相互关系如图 2—1 所示。

ISO 标准又对生命周期评价(LCA)进行了规范，将生命周期评价分为目的与范围的确定、清单分析、影响评价和生命周期解释四个部分，其相互关系如图 2—2 所示。

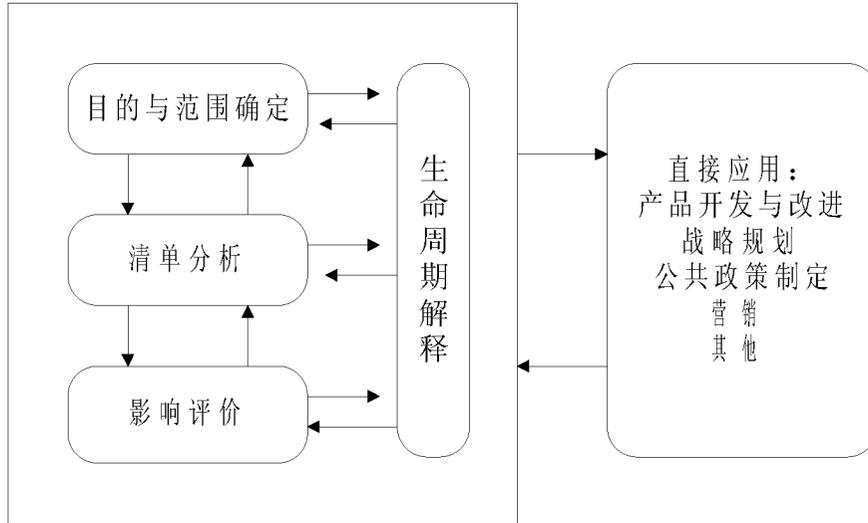


图 2-2 生命周期评价框架图 (ISO, 1997)

1、研究目的和范围的确定

在进行生命周期评价时，应根据应用意图确定评价的目的。研究的应明确，根据研究的理由和研究方法，需要哪些信息，会得到哪些结果，研究结果有什么用途。并根据研究目的确定研究范围，包括如下环节：确定评价系统、明确系统边界、指出限制系统的假设条件、说明数据要求和定义功能单元。

确定研究目的和研究范围是生命周期评价的第一步，也是整个评价最重要的一个环节。尽可能精确地确定评价的目的和范围对生命周期评价是非常有用的，目的和范围的选取要适当，选取的过小则得到的结论缺乏可靠性，选取的过大又会增加后续工作的复杂性。同时，必须指出的是生命周期评价是一个反复的过程，有时会根据需要对已经选取的评价目的和范围进行修改，这是允许的，也是必要的。

2、清单分析

清单分析也称之为盘查，是为了实现研究目的而进行的数据收集，它是对整个系统所需的能量与原材料和所造成的环境释放进行客观量化的过程。其核心是建立产品系统的输入与输出的数据清单，通常产品系统的输入主要是能源物质和原材料，输出主要是废水、废气和固体废弃物等环境污染物质。如图 2

—3 所示。

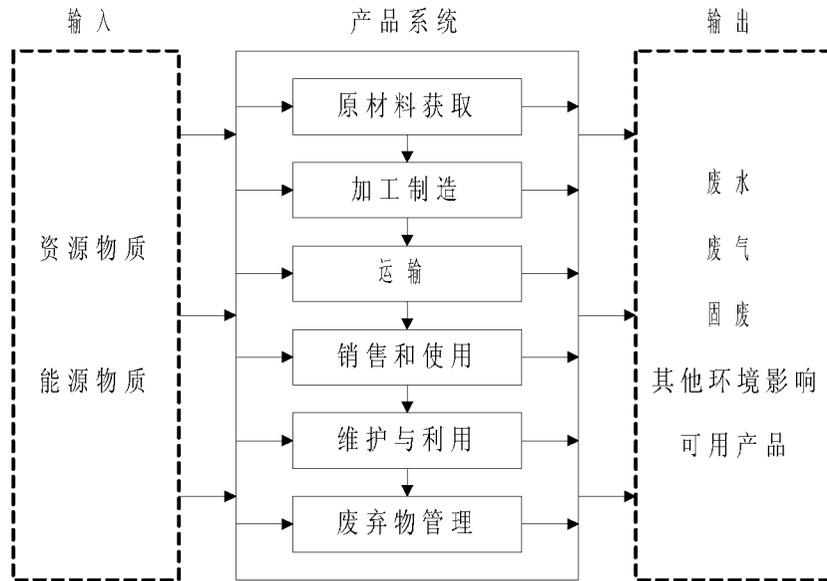


图 2-3 清单分析单元

清单分析贯穿于产品系统的每一个单元过程，是一种描述产品系统物质流和能量流的方法。当生命周期研究的目的和范围确定之后，开始进行数据收集。根据 ISO14041 和 GB/T24041—2000 中的相关规定，生命周期评价的清单分析过程通常涉及一下几个步骤：数据收集的准备、过程和产品预算、数据收集、分配程序和清单结果。这是一个反复的过程，它要求根据分析清单不断的调整和细化系统边界范围，从而进一步完善数据清单。

3、影响评价

生命周期影响评价是根据清单分析所得到的输入与输出数据对产品所造成的环境影响进行量化和评估的过程。其实质是对产品所造成的环境影响进行定性和定量评价的客观过程，这也是生命周期评价中最重要的一环。目前，关于生命周期影响评价还没有统一的方法，美国环境毒理学和化学学会(SETAC)和国际标准化组织(ISO) 通常将环境影响评价分为分类 (classification)、特征化 (characterization) 和量化 (valuation) 三个部分。

分类 (classify): 分类是对清单分析中所得到的输入与输出数据按照其所造成的环境影响进行类别划分。到目前为止，生命周期评价的环境影响通常包括三大类：资源能源消耗、生态环境影响和人体健康影响。每一大类环境影响下又包括诸多子类影响。

特征化 (characterization): 特征化是将同一类环境影响类别中的不同物质转化为统一的单元，如温室效应统一以 CO₂ 当量表示，酸化影响以 SO₂ 表示。

目前，关于特征化计算有很多种模型，包括：负荷模型、暴露模型、当量模型、效应模型和层次分析模型，其中层次分析模型的应用最为广泛。

量化 (valuation)：量化是按相对影响大小对不同环境影响类别进行赋权，结合权重和特征化结果得到环境影响整体水平。目前，关于量化的方法有很多，但大多数方法都是通过人的主观判断对各类环境影响进行赋权的，缺乏统一的标准。因此不同的研究者根据自己的主观意愿对各类环境影响所赋权重大小不尽相同。

4、生命周期解释

生命周期解释是生命周期评价的最后一个阶段，它是通过对前几个阶段的分析来形成结论，提出建议和不足。生命周期解释是一个系统的过程，它是对产品、工艺（或服务）的整个生命周期阶段的解释，同时结果解释还要满足研究目的与范围中所规定的要求。另外，生命周期解释是一个反复的过程，它通过不断的修改和细化系统边界和分析清单来进一步完善生命周期结果。

ISO14043 和 GB/T24043 标准将生命周期解释划分为三个要素：识别、评估和报告。识别是对生命周期的整个阶段进行组织，以便确定重大问题，通常识别包括信息的组织识别和确定重大问题两个部分；评估就是对生命周期评价步骤的完整性、一致性和敏感性的检查；报告是根据生命周期解释的结果提出符合研究目的和范围的结论并提出合理建议。

2.2 研究范围

2.2.1 研究对象

本研究对象为呼兰城市污水处理厂。呼兰城市污水处理厂位于哈尔滨市呼兰区老城区呼兰河岸边，是松花江流域治理工程之一，主要负责呼兰区老城区城市生活污水和部分工业废水的处理。该水厂采用 CAST 工艺，设计使用年限 25 年，总投资 4500 万元，占地面积 6.8 万 m^2 ，日处理量 20000 m^3/d ，处理达到一级 A 类标准后排入呼兰河，汇入松花江。其主要构筑物包括综合楼、预处理间、CAST 池、鼓风机房和变配电间、污泥池、污泥脱水间、消毒间、消毒池和锅炉房等。

其平面布置如图 2-4 所示。

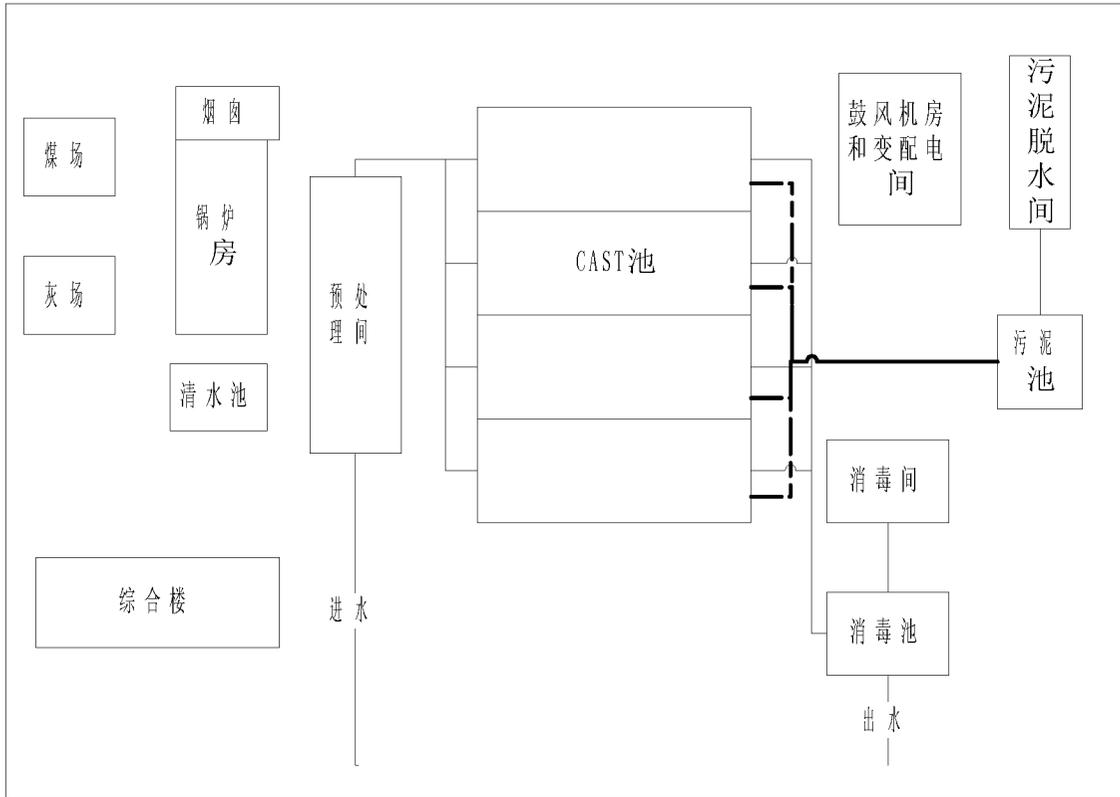


图 2-4 呼兰城市污水处理厂平面布置图

呼兰区老城区城市污水处理厂采用 CAST 工艺，主要构筑物包括综合楼、预处理间、锅炉房、CAST 池、鼓风机房及变配电间、消毒间、污泥脱水间、消毒池和强排泵房，其详细的工艺流程如图 2-5 所示。

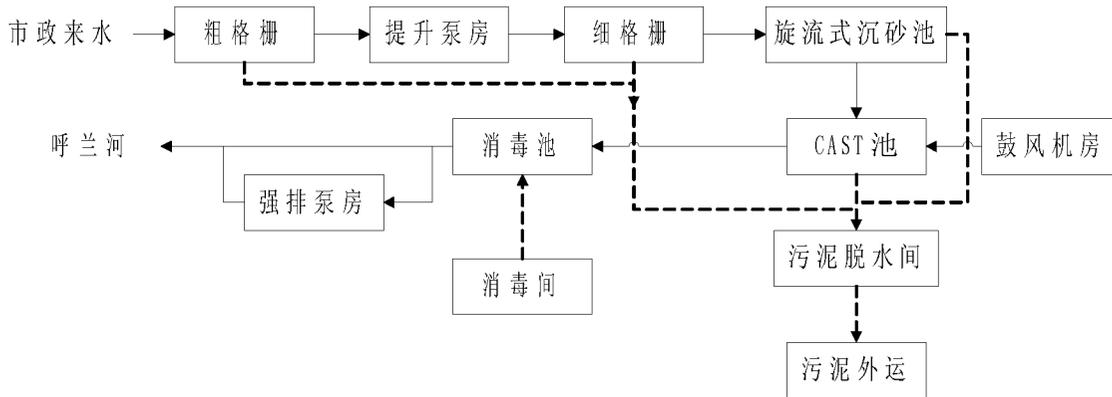


图 2-5 呼兰城市污水处理厂工艺流程图

1、粗格栅

呼兰城市污水处理厂设有不锈钢缆式自动格栅除污机 3 台， $B \times H = 1500 \times 3000$ ，用来拦截进水悬浮物，保护水泵。栅条宽度 10mm，间距 50mm，安装角度 75° 。格栅上截留的杂物，采用 3 台 HGC1500/8700-25 回转格栅除污机去除，

$a=75^\circ$, $b=25$, $B=1500$, $H=9100$, $N=1.5\text{kW}$ 。格栅前后设启闭机械各一座, $B \times H=1400 \times 1400$, $N=0.75\text{kW}$ 。栅渣经 3 斗螺旋输送机 ($W=2.4\text{m}^3/\text{h}$, $H=8.0\text{m}$, $N=3.0\text{kW}$) 和 45° 螺旋输送压榨机 ($W=2.4\text{m}^3/\text{h}$, $H=8.0\text{m}$, $N=3.0\text{kW}$) 压榨后输送出厂, 外运填埋。

2、污水提升

污水提升泵采用 3 台潜水排污泵 ($Q=850\text{m}^3/\text{h}$, $H=15\text{m}$, $N=55\text{kW}$) 和 3 台潜水轴流泵 ($1.2\text{m}^3/\text{s}$, $H=10.5\text{m}$, $N=185\text{kW}$)。

3、细格栅

预处理间内设有细格栅 2 台耙齿式回转格栅除污机, 用来进一步去除污水内的悬浮物, $a=70^\circ$, $b=5$, $B=1400$, $H=1750$, $N=1.5\text{kW}$ 。设有螺旋输送机 1 台, $W=2.4\text{m}^3/\text{h}$, $L=4.7\text{m}$, $N=3.0\text{kW}$ 。设有 45° 螺旋压榨机 1 台, $W=2.4\text{m}^3/\text{h}$, $H=1.5\text{m}$, $N=3.0\text{kW}$ 。格栅机前后设启闭闸门各一座, $N=0.75\text{kW}$ 。

4、旋流式沉砂池

设旋流式沉砂池 1 座, 分两格, 砂斗直径 $D=1500$, $N=1.5\text{kW}$ 。设有砂水分离器 1 台, $Q=34\text{m}^3/\text{h}$, $N=0.37\text{kW}$ 。启闭闸门两座, $B \times H=1500 \times 500$ 。启闭机械两台 $N=0.75\text{kW}$ 。

5、CAST 池

设 CAST 池一座, $B \times L=61.2\text{m} \times 89.8\text{m}$, 分四格。采用滗水器方式出水, $Q=1800\text{m}^3/\text{h}$, $L=18\text{m}$ 。共设有污泥回流泵 8 台, $Q=80\text{m}^3/\text{h}$, $H=7\text{m}$, $N=3.0\text{kW}$ 。设有剩余污泥泵 8 台, $Q=150\text{m}^3/\text{h}$, $H=7\text{m}$, $N=5.5\text{kW}$ 。设有 MA2.2/8-320-740, $N=2.2\text{kW}$ 液下搅拌器 12 台, LFP4/4-2200-52, $N=2.2\text{kW}$ 液下搅拌器 8 台。

鼓风机房内设有三叶罗茨鼓风机 5 台, 4 用 1 备, $Q=47.28\text{m}^3/\text{h}$, $H=6.0\text{m}$, $N=75\text{kW}$, HTJ-3 型卷绕式空气过滤器 1 台。

6、污泥脱水间

污泥脱水间采用两台带式压滤机进行污泥脱水, 带宽 $B=1.5\text{m}$, $N=1.1+0.75\text{kW}$ 。设有回转式螺旋压缩机 2 台, $Q=0.3\text{m}^3/\text{min}$, $N=3.0\text{kW}$, $PN=1.0\text{MPa}$, 污泥进料泵 2 台, $Q=7.2-33\text{m}^3/\text{h}$, $H=0.2\text{MPa}$, $N=5.5\text{kW}$, 反冲洗泵 2 台, $Q=25\text{m}^3/\text{h}$, $H=50\text{m}$, $N=5.5\text{kW}$ 。设有 50WQ15-8-0.75 排污泵 1 台, $Q=10\text{m}^3/\text{h}$, $H=10\text{m}$, $N=0.75\text{kW}$ 。T35-11-3.55-25 轴流通风机 4 台, $Q=2760\text{m}^3/\text{h}$, $P=70\text{Pa}$, $N=0.09\text{kW}$ 。

7、消毒

采用二氧化氯消毒。消毒间内设有二氧化氯发生器 2 台, $Q=10\text{kg}/\text{h}$, $N=6.0\text{kW}$ 。消毒池内设强排潜水泵 3 台, $Q=600\text{m}^3/\text{h}$, $H=9\text{m}$, $N=30\text{kW}$, 回用水

提升泵 2 台， $Q=30\text{m}^3/\text{h}$ ， $H=18\text{m}$ ， $N=4\text{kw}$ 。

8、锅炉房

锅炉房内设有 D2GN07-07/95 型号锅炉一台。 $N=0.75\text{MW}$ 。供热温度 $t=95^\circ$ 。Y5-47NO.5C 型号引送风机 1 台， $N=4.0\text{kw}$ 。HC401S 型号回转式鼓风机 1 台， $Q=45\text{m}^3/\text{h}$ ， $N=4.0\text{kw}$ 。

2.2.2 研究目的和范围的界定

2.2.2.1 研究目的

1、识别污水处理厂在其整个生命周期阶段内的各种环境影响因素，如资源消耗、能源消耗及环境释放等。

2、分析资源消耗、能源消耗、废水排放、废气排放和固体废弃物排放等有关环境影响。

3、为污水处理厂的设计、建设和运行管理提出相应改进意见，以减少其环境影响。

2.2.2.2 产品系统和功能单元

研究的产品系统为一座城市污水处理厂，包括该污水处理厂的建设阶段、运营阶段和报废拆除阶段。以呼兰区城市污水处理厂的日处理能力($20000\text{m}^3/\text{d}$)作为生命周期分析的功能单元，用来计算污水处理厂每一个生命周期阶段的输入与输出。

2.2.2.3 系统边界

采用生命周期的方法分析污水处理厂，把污水处理厂作为一种产品，这一产品系统的生命周期阶段包括：污水处理厂建设阶段、污水处理厂运营阶段和污水处理厂报废拆除阶段，其中建设阶段又可以细化分为：原材料获取、运输和施工建设等阶段。其时间边界为污水处理厂的设计使用年限，25 年。所确定的污水处理厂系统边界如图 2-6 所示。

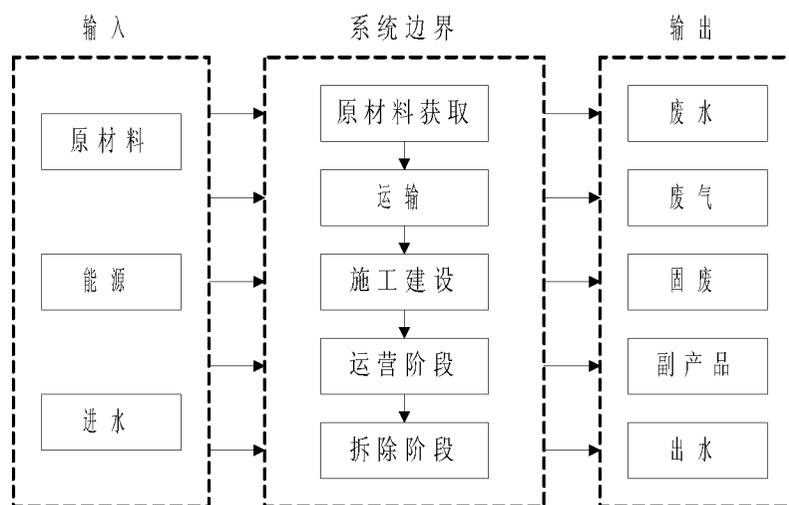


图 2-6 污水处理厂系统边界

2.3 本章小结

本章在对呼兰区城市污水处理厂了解的基础上，明确了研究目的，并进行了研究范围的界定。把污水处理厂看作是一个产品，该产品的生命周期阶段包括原材料的获取与运输阶段、施工建设阶段、运营阶段和报废拆除阶段，确定了污水处理厂系统边界的主要输入与输出指标，为生命周期评价的进一步工作打下了良好的基础。

第 3 章 清单分析

清单分析是生命周期评价的中心环节，也是整个系统生命周期评价的基础。是对产品系统的整个生命周期过程中的原材料和能源的输入以及环境释放等输出的客观量化过程。这一分析过程贯穿于污水处理厂的整个生命周期，包括原材料的获取、运输、施工建设、污水处理厂运营阶段和报废拆除阶段。

3.1 清单分析的基本过程

清单分析的基本过程主要包括：数据收集的准备、数据收集、确认、与单

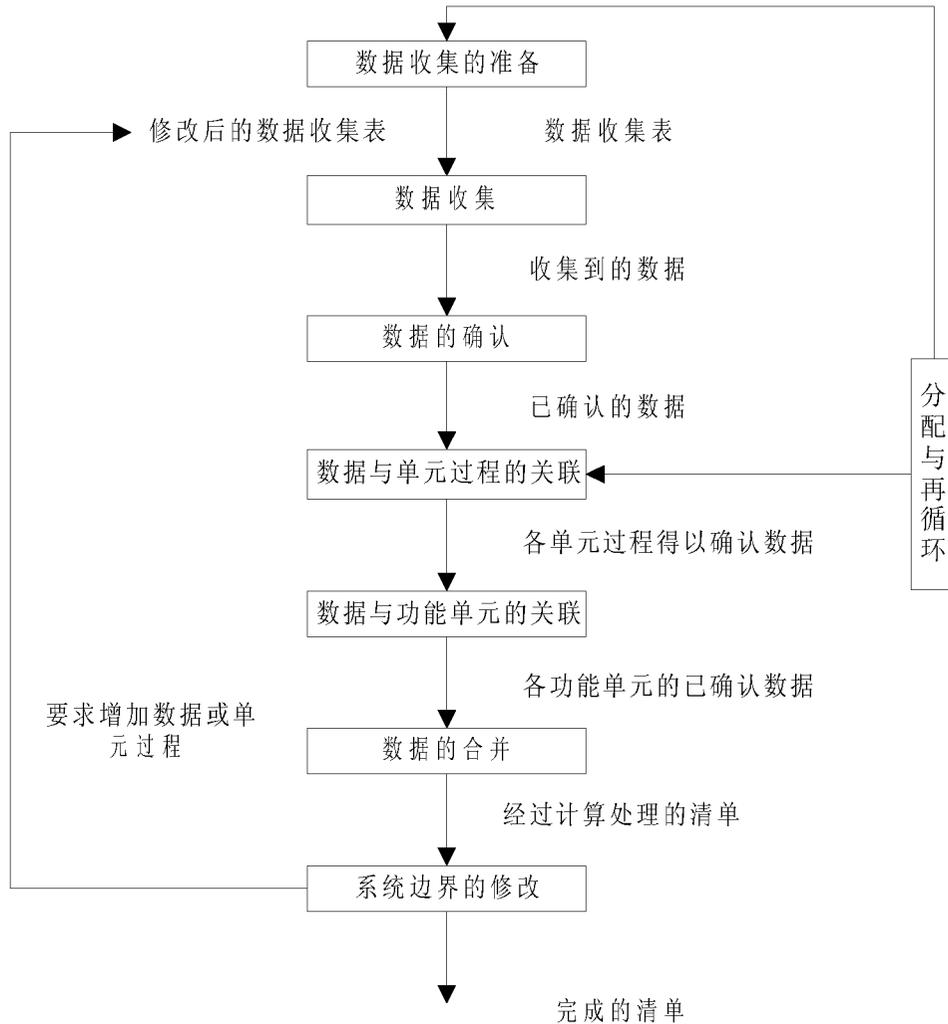


图 3-1 清单分析过程图

元过程和功能单位的关联、数据合并、分配与再循环、系统边界修改等。如图 3-1 所示。

上述过程是一个反复的过程，再取得一部分数据之后，经过数据的确认、关联与合并之后，就会对原有的系统有了新的认识，从而出现新的数据要求，或者发现原有系统与数据的局限性，因而对系统边界和数据收集过程做出修改，完善清单分析数据，适应研究目的的要求。

按照对污水处理厂生命周期阶段的划分，确定污水处理厂的数据清单分为三个部分：污水处理厂建设阶段、污水处理厂运营阶段和污水处理厂报废拆除阶段。综合考虑污水处理厂的整个生命周期过程，将生命周期评价的功能单位定义为污水处理厂的年处理量，即是 $FU=730$ 万 t/a。

3.2 建设阶段清单分析

污水处理厂建设阶段从原材料的获取开始，至污水处理厂施工建设完成为止。这一阶段的输入主要是钢材、混凝土等原材料和电、成品油等能源输入，其输出主要是建材获取和运输以及施工建设过程中所产生的废水、废气和固体废弃物等。通过对呼兰区城市污水处理厂的设计图纸的分析和施工现场的调查，结合国内外有关生命周期评价的现状，得到污水处理厂建设阶段有关的数据清单。

3.2.1 施工阶段资源和能源消耗

污水处理厂建设阶段的资源消耗主要是钢材、混凝土、挤塑苯板、砖和水等建筑材料，能源消耗主要是施工过程中电的消耗。通过对污水处理厂设计资料的分析 and 施工现场的实地调查，得到呼兰污水处理厂建设阶段的资源和能源消耗如表 3-1 所示。

表 3-1 呼兰污水处理厂建设阶段资源和能源消耗清单

名称	PVC(kg)	挤塑苯板(kg)	电焊条(kg)	钢材(kg)	水(t)	电(kwh)
消耗量	8279.9	54499.6	12926.6	1267546.1	85391.2	2391.0
名称	聚酯(kg)	卫生陶瓷(kg)	涂料(kg)	棉织品(kg)	混凝土(m ³)	
消耗量	4620.6	1577.2	47776.9	1280.5	12376.7	
名称	橡胶(kg)	建筑陶瓷(m ²)	成品油(kg)	砖(千块)	水泥(kg)	
消耗量	2441.9	169.1	1642.9	546.0	34683.2	

从表 3-1 中可以看出，污水处理厂建设阶段的消耗主要是建筑材料的消耗，污水处理厂的建筑以钢筋混凝土建筑为主，因此在建设过程中对钢材和混凝土的消耗量较大，消耗钢材 1267546.1kg，混凝土 12376.7m³。

3.2.2 建材生产阶段消耗和环境释放清单

由于污水处理厂建设阶段所耗建材在其生产过程中也会消耗资源和能源物质，产生废气、废水和固体废弃物等环境污染物质，因此，本文对建材生产阶段的数据进行了收集和分析。结合国内外现有的生命周期评价结果和《第一次全国污染源普查工业污染源产排污系数手册》的相关部分成果得到各种建材在其生产过程中的主要资源和能源消耗，如表 3-2 所示，大气污染物排放如表 3-3 所示，水体污染物和固体废弃物排放如表 3-4 所示。

表 3-2 各种原材料生产阶段主要资源与能源消耗

名称	挤塑苯板 ^[40-41]	PVC ^[42]	棉织品 ^[43]	施工	橡胶 ^[44]	水泥 ^[45]
电(kwh)	6641.3	1789.7	1280.5	2391.0	976.8	3281.4
煤(kg)	700071.4	1988.8	786.2	966.0	618.8	6659.2
水(t)	55.0	97.5	15878.4	853.912	15.4	—
名称	建筑陶瓷 ^[46]	聚酯 ^[47]	成品油 ^[48]	混凝土 ^[49]	砖 ^[50]	
电(kwh)	710.3	8534.3	103.2	15965.5	13650.0	
煤(kg)	423.3	5308.2	73.4	1149173.6	228229.0	
水(t)	93.0	37.0	—	16089.7	127.2	
名称	卫生陶瓷 ^[51]	涂料 ^[52]	电焊条 ^[53]	钢材 ^[54]	总计	
电(kwh)	288.0	8829.2	54808.6	5374395.4	5491254.2	
煤(kg)	900.6	7166.5	23397.1	2294258.4	4420986.5	
水(t)	197.9	5562.8	439.5	43096.6	82543.9	

注：成品油的生产在其生命周期阶段中主要是对原油的消耗，根据生命周期评价结果，生产 1642.9kg 成品油，消耗原油 2152.2kg

从表 3-2 中可以看出，从原材料生产至污水处理厂建设完成这一阶段，消耗电能 5491254.2kwh，消耗煤 4420986.5kg，消耗水 82543.9t。由于钢材在污水处理厂建设过程中用量较大，且钢材生产为高能耗行业，因此，钢材对电和煤的消耗量较大，污水处理厂建设阶段因钢材的生产消耗电能 5374395.4kwh，消

耗煤 2294258.4kg。

表 3-3 建材生产过程中大气污染物排放

单位: kg

名称	CO ₂	CH ₄	CO	NO _x	SO ₂	TSP	CH
挤塑苯板 [40-41]	940385.8	708.5	59.9	17.4	6082.3	119.8	1.0
PVC ^[42]	2046.5	107.6	9.1	20.9	27.9	18.2	0.2
棉织品 ^[43]	6571.6	10.5	35.8	34.3	5.0	2.2	33.0
橡胶 ^[44]	8717.8	31.7	29.3	46.4	34.2	175.8	114.8
水泥 ^[45]	24208.9	31.1	4.4	47.9	28.2	35.8	24.1
建筑陶瓷 [46]	2813.3	15.6	3.9	21.1	115.3	131.9	1.0
聚酯 ^[47]	9703.3	27.7	24.5	45.3	78.5	16.2	46.2
成品油 ^[48]	361.4	0.4	0.2	1.4	1.9	2.9	—
混凝土 ^[49]	4475403.2	50744.3	49506.7	19802.7	16089.7	39605.3	936.3
砖 ^[50]	390391.7	236.2	507.8	229.3	393.1	18946.3	—
卫生陶瓷 [51]	3138.7	17.4	1.0	9.3	10.2	3.3	1.1
涂料 ^[52]	27080.0	621.1	1.9	149.5	178.2	33.4	—
电焊条 ^[53]	74678.0	163024.6	1421.9	52.5	659.2	581.7	24.6
钢材 ^[54]	10393878.1	22826.0	13943.0	20280.7	64644.8	57039.6	2408.3
电 ^[55]	2558.4	6.2	3.7	15.4	23.7	4.8	1.2
总计	16361936.7	238408.9	65553.1	40774.1	88372.2	116717.2	3591.8

从表 3-3 中可以看出, 污水处理厂从原材料获取至施工建设完成阶段共产生 CO₂ 16361936.7kg, CH₄ 238408.9kg, CO 65553.1kg, NO_x 40774.1kg SO₂ 88372.2kg, TSP 114717.2kg, CH 3591.8kg。因为钢材、混凝土等建筑材料用量较大, 并且其生产为高污染行业, 所以钢材和混凝土的大气污染物排放量最大, 钢材在其生产过程中排放大气污染物 CO₂ 10393878.1kg, CH₄ 22826.0kg, CO 13943.0kg, NO_x 20280.7kg SO₂ 64644.8kg, TSP 57039.6kg, CH 2408.3kg, 混凝土在其生产过程中排放大气污染物 CO₂ 4475403.2kg, CH₄ 50744.3kg, CO 49506.7kg, NO_x 19802.7kg SO₂ 16089.7kg, TSP 39605.3kg, CH 936.3kg。

表 3-4 水污染物和固体废弃物排放清单

污染物名称	COD(kg)	总氮(kg)	总磷(kg)	SS(kg)	固废(t)
挤塑苯板 ^[40]	22.4	4.5	0.2	21.6	57470.4
PVC ^[42]	3.8	0.9	0.03	3.0	0.04
棉织品 ^[43]	44.2	1.8	0.07	2.1	0.005
橡胶 ^[44]	9.8	2.4	0.08	11.4	0.06
水泥 ^[45]	8.4	0.04	0.001	0.2	1.4
建筑陶瓷 ^[46]	14.2	0.02	0.0008	150.7	5.6
聚酯 ^[47]	1.1	0.3	0.009	2.0	0.3
成品油 ^[48]	0.01	0.003	0.00009	0.01	0.0128
混凝土 ^[49]	6188.3	1547.1	51.6	7219.7	30941.7
砖 ^[50]	6.1	1.5	0.05	7.1	1.3
卫生陶瓷 ^[51]	0.5	0.2	0.008	1.1	0.08
涂料 ^[52]	93.6	0.6	0.02	109.2	24.1
电焊条 ^[53]	2.6	12.8	0.05	3253.8	62.7
钢材 ^[54]	357.4	1254.9	5.1	152790.0	6147.6
电 ^[55]	0.08	0.01	0.008	0.05	0.3
总计	6752.58	2827.21	57.11	163572.05	94655.5

由表 3-4 可得，污水处理厂建设阶段排放水体污染物为 COD 6752.58kg，TN 2827.21kg，TP 57.11kg，SS163572.05kg。因为钢材和混凝土在其生产过程中，单位产量的水体污染物排放量较小，但在建设过程中消耗量较大，所以混凝土和钢材的生产和使用过程对水体污染物的排放量较大。混凝土排放水体污染物 COD 6188.3kg，TN 1547.1kg，TP 51.6kg，SS 7219.7kg。钢材排放水体污染物 COD 357.4kg，TN 1254.91kg，TP 5.1kg，SS152790.0kg。污水处理厂建设阶段排放固体废弃物 94655.5t，主要是混凝土和挤塑苯板的生产过程的排放。

3.2.3 建材运输阶段消耗与排放清单

由于机动车辆在运输过程中会产生尾气排放和二次扬尘，因此，本文结合各种建材的运输距离对建材的道路运输阶段的资源消耗和环境释放进行了分析和计算。重型货车百公里油耗 38.75L，轻型货车百公里油耗 16.4L^[56]。得到各种建材在运输阶段的资源消耗如表 3-5 所示。

表 3-5 建材运输情况表

建材名称	车型	燃油种类	载重量	运输距离	总运输距离	油耗
PVC	轻型货车	汽油	4t	10km	20km	3.28L
挤塑苯板	重型货车	柴油	15t	20km	60km	23.25L
棉织品	轻型货车	汽油	2t	10km	10km	1.64L
电焊条	重型货车	柴油	15t	20km	20km	7.75L
钢材	重型货车	柴油	30t	20km	860km	333.25L
混凝土	轻型货车	汽油	10m ³	10km	12377km	2029.83L
聚酯	轻型货车	汽油	5t	10km	10km	1.64L
水泥	重型货车	柴油	15t	10km	30km	11.625L
涂料	重型货车	柴油	15t	20km	60km	23.25L
卫生陶瓷	轻型货车	汽油	2t	10km	10km	1.64L
建筑陶瓷	轻型货车	汽油	2t	10km	10km	1.64L
橡胶	轻型货车	汽油	4t	10km	10km	1.64L
成品油	轻型货车	汽油	2t	10km	10km	1.64L
砖	轻型货车	汽油	4t	10km	400km	65.6L
总计					柴油399.125L(343.24kg)汽油2108.31L(1558.0kg)	
					重型柴油车：1030km，轻型汽油车：12857km	

从表 3-5 中可以得出,建材运输阶段汽油消耗 1558.0kg,柴油消耗 343.24kg。根据国内外对对成品油的生命周期分析结果可以得到,所耗成品油在生产阶段的资源能源消耗和环境释放清单如表 3-6 所示。

表 3-6 所耗成品油生产消耗和环境释放清单

单位: kg

	原煤消耗	原油消耗	CO ₂	NO _x	CH ₄	CO	SO ₂
汽油 ^[57]	74.3	2040.98	342.76	1.32	0.33	0.21	1.82
柴油 ^[57]	16.4	442.91	75.51	0.29	0.07	0.046	0.40
合计	90.7	2483.89	412.27	1.61	0.40	0.256	2.22
	TSP	COD	SS	TN	TP	固废	
汽油	2.73	9.5 × 10 ⁻³	9.5 × 10 ⁻³	2.8 × 10 ⁻³	8.5 × 10 ⁻⁵	12.1	
柴油	0.60	2.1 × 10 ⁻³	2.1 × 10 ⁻³	6.3 × 10 ⁻⁴	1.8 × 10 ⁻⁵	2.7	
合计	3.33	11.6 × 10 ⁻³	11.6 × 10 ⁻³	3.43 × 10 ⁻³	1.03 × 10 ⁻⁴	14.8	

根据车辆的道路运输情况和各种车辆的道路排放因子,可以得到在建材运输阶段所造成的环境释放清单如表 3-7 所示。

表 3-7 建材运输道路排放清单

	CO ₂	CO	CH ₄	SO ₂	NO _x	CH	TSP
汽油排放因子 ^[57]	208.92	41.11	0.06	2.0	2.75	7.96	0.12
汽油排放量/kg	2686.1	528.6	0.8	3.1	35.4	102.3	0.2
柴油排放因子 ^[57]	736.47	5.63	0.04	2.80	24.10	4.28	2.0
柴油排放量/kg	758.6	5.5	0.04	0.96	24.8	4.4	0.7
总计/kg	3444.7	534.1	0.84	4.06	60.2	106.7	0.9

注：CO₂、CO、CH₄、NO_x、CH 为单位里程排放因子单位 g/km，SO₂、烟尘为单位燃料排放因子。单位 g/kg

由表 3-5、3-6 和 3-7 可以得到，建材运输过程共消耗成品油 1901.24kg，因其生产和使用过程消耗煤 90.7kg，原油 2483.89kg，排放 CO₂ 3856.97kg，CH₄ 1.24kg，CO 534.356kg，SO₂ 6.28kg，NO_x 61.81kg，TSP 4.23kg，固体废弃物 14.8kg，COD 11.6×10⁻³kg，SS 11.6×10⁻³kg，TN 3.43×10⁻³kg，TP1.03×10⁻⁴kg。由于污水处理厂建设阶段对混凝土的消耗量较大，总运输距离最长，因此道路运输阶段，混凝土对资源能源消耗量最大，消耗原油 2010.76kg，原煤 73.423kg，对污染物的排放贡献最大，为 80.952%。

综上所述，通过对污水处理厂建设阶段整体输入与输出数据的生命周期分析，可以得到，污水处理厂建设阶段的资源能源消耗和环境释放对每一功能单位的贡献量如表 3-8 所示。

表 3-8 污水处理厂建设阶段分析清单

资源消耗 t/FU						
煤耗		水耗		原油消耗		
176.84		3301.76		0.185		
环境释放 t/FU						
CO ₂	CH ₄	CO	NO _x	SO ₂	TSP	CH
654.63	9.53	2.64	1.63	3.54	4.67	0.148
COD	TN	TP	SS	固废		
0.27	0.113	2.28×10 ⁻³	6.54	3788.98		

注：FU=730 万 t/a。

从表 3-8 中可以看出，污水处理厂建设阶段的煤耗为 176.84t/FU，主要是钢材、混凝土和挤塑苯板等建材生产的消耗。水耗为 3301.76t/FU，主要是钢材在其生产过程中因矿石精选、高炉炼铁、炼钢等工艺过程的消耗。原油消耗为 0.185t/FU，主要是建筑材料，尤其是混凝土的运输对成品油的消耗。污水处理

厂建设阶段所排放的大气污染物以 CO₂ 的排放量最大，为 654.63t/FU，主要来自建材生产和道路运输过程。水体污染物以 SS 的排放量最大，为 6.54t/FU，主要来自钢材和混凝土的生产过程。固体废弃物排放量为 3788.98t/FU，主要来自于挤塑苯板、钢材和混凝土的生产过程。因此，钢材、混凝土和挤塑苯板等建筑材料的生产过程是污水处理厂建设阶段资源能源消耗和环境释放的主要来源。

3.3 运营期清单分析

污水处理厂运营阶段，输入主要是水耗、电耗、煤耗和油耗。水耗主要是日常生活用水和药剂混合用水；电耗主要是日常生活用电和工艺配套设备用电；煤耗主要是冬季取暖用煤；油耗主要是栅渣、剩余污泥等道路运输用油。输出主要是向环境中释放的污染物质，烟尘、CH₄、CO₂、CO、H₂S、SO₂、NO_x、NH₃、COD、TN、TP、SS 和污泥等。以污水处理厂年处理量为功能单位（FU=730 万 t/a）对污水处理厂运营阶段的清单分析如下所示。

3.3.1 运营期消耗清单

（1）油耗

油的消耗主要是运营期各种原材料和废弃物的运输过程的消耗。经过对污水处理厂现场调查，结合各种车辆的运输百公里油耗量，得到各种材料的道路运输情况如表 3-9 所示。

表3-9 污水处理厂运营阶段道路运输情况

材料名称	量 t/a	运输车型	燃油种类	载重量	运输距离	总运输距离	油耗 L
锅炉燃煤	175	重型货车	柴油	15	40km	480km	186.0
生活垃圾	21.5	轻型货车	汽油	4	20km	120km	19.68
栅渣	730	轻型货车	汽油	4	20km	3660km	600.24
沉砂	650	轻型货车	汽油	4	20km	3260km	534.6
剩余污泥	5475	轻型货车	汽油	4	20km	27380km	4490.32
炉灰渣	40.3	轻型货车	汽油	4	10km	110km	18.04
总计						柴油：186.0L；汽油5662.88L	

经计算可得，污水处理厂运营阶段消耗成品油 4344.86kg/a，其中，柴油 159.96kg/a，汽油 4184.9kg/a。

（2）电耗

污水处理厂厂区内的电能消耗主要是工艺正常运行时的设备消耗和厂区附属构筑物日常生活消耗。具体工艺设备耗电情况如表 3-10 所示。

表 3-10 污水处理厂工艺设备耗电情况表

工艺名称	配套设施	数量	功率(kw)	合计(kw)	总计/kw
预处理间	格栅除污机	3	1.5	4.5	739.5
	3 斗螺旋输送机	1	3.0	3.0	
	45° 螺旋输送压榨机	1	3.0	3.0	
	潜水排污泵	3	55	165	
	潜水轴流泵	3	185	555	
	耙齿式回转格栅除污机	2	1.5	3.0	
	螺旋输送机	1	3.0	3.0	
	45° 螺旋压榨机	1	3.0	3.0	
旋流沉砂池	砂水分离器	1	0.37	0.37	14.37
	沉砂池除砂设备	2	1.5	3.0	
	回转式鼓风机	2	5.5	11.0	
CAST 池	污泥回流泵	8	3.0	24.0	112
	剩余污泥泵	8	5.5	44.0	
	液下搅拌器	12	2.2	26.4	
	液下搅拌器	8	2.2	17.6	
	带式压滤机	2	1.85	3.7	
	高效混凝装置	2	0.75	1.5	
	回转式螺杆压缩机	2	3.0	6.0	
	污泥进料泵	2	5.5	11.0	
污泥脱水间	反冲洗泵	2	5.5	11.0	68.71
	自动加药计量泵	2	0.75	1.5	
	水平螺旋输送机	1	4.0	4.0	
	螺旋输送机	1	4.0	4.0	
	潜水搅拌器	2	2.2	4.4	
	虑罐反冲洗泵	1	15	15	
	排污泵	1	0.75	0.75	
	轴流通风机	4	0.09	0.36	
鼓风机房	离心式通风机	1	5.5	5.5	375
	三叶罗茨鼓风机	5	75	375	
消毒间	二氧化氯发生器	2	6.0	12	12
消毒池	强排潜水泵	3	30	90	98
	回用水提升泵	2	4.0	8	
锅炉房	送、引风机	1	4.0	4	4
总计					1423.58

经计算得到，污水处理厂年耗电量为：12452800.8kwh/a。

(3) 煤耗

厂区内设锅炉房一座，保证厂区内冬季供热。供热面积 2900m²。锅炉房内设 DHGNO.7/95/70-ALL-111 型号锅炉一台，Q=0.7MW，P=0.7MPa。年耗煤量 175t。

(4) 水耗

污水处理厂运营过程中所消耗的新鲜水，主要日常生活用水和药剂混合用水，呼兰城市污水处理厂日耗新鲜水 5t，即 1825t/a。。

综上所述，污水处理厂运营阶段每功能单位的各种资源和能源消耗如表 3-11 所示。

表 3-11 污水处理厂运营期消耗清单

材料	电(kwh/FU)	煤(t/FU)	水(t/FU)	油(t/FU)
消耗量	12452800.8	175.0	1825.0	4.34

注：FU=730 万 t/a

从表 3-11 中可以看出，污水处理厂正常运行时耗电 12452800.8kwh/FU，主要是工艺设备运行时的耗电。其中。预处理间和鼓风机房的耗电量最大，运处理间耗电 6478020kwh/FU，鼓风机房耗电 3285000kwh/FU。污水处理厂运营阶段冬季取暖耗煤 175.0t/FU，日常生活用水和药剂混合用水 1825.0t/FU，燃煤和固体废弃物运输过程消耗燃油 4.34t/FU。

3.3.2 运营期排放清单

(1) 电的生产过程污染物排放

由于所耗电来自于电厂，本文以燃煤发电的火电厂为例，根据国内外现有的燃煤发电的生命周期评价结果^[56]，得到污水处理厂运营阶段所耗标煤为 5030.9t/a，(1kwh=0.404kg 标煤)。各种污染物排放如表 3-12 所示。

表 4-12 电的生产过程污染物排放量

污染物	CO ₂	CH ₄	SO ₂	NO _x	TSP	CO
排放量(t/a)	13324.5	32.4	123.6	80.4	251.5	19.3
污染物	COD	SS	TN	TP	固废	
排放量(t/a)	0.4	0.3	0.05	0.04	1569.0	

由表 3-12 可得，污水处理厂运营阶段所耗电能在其生产过程中对 CO₂ 的排

放量最大，为 13324.5kg/a。这主要是由煤的燃烧和缺乏对烟气中 CO₂ 的控制引起的。

(2) 燃煤污染物排放

污水处理厂冬季取暖采用自设锅炉燃煤，无除尘和脱硫设备。锅炉所用燃煤为黑龙江鹤岗煤，煤中各组分含量为：灰分，24.0%；C,83.1%；S, 0.4%；N, 0.8%；根据《燃料燃烧排放大气污染物物料衡算办法（试行）》中规定的燃煤污染物排放量计算得到：

①烟尘排放量计算公式

$$G_{sd} = 1000 \times B \times A \times dff \times (1 - \eta) / (1 - C_{fh}) \quad (4-1)$$

式中：G_{sd}——烟尘排放量，单位 kg；

B——燃煤量，单位 t；

A——煤中灰分，为百分数；

dff——灰分中烟尘，为百分数；

η——系统除尘效率，为百分数；

C_{fh}——烟尘中的可燃物含量，为百分数；

②SO₂排放量计算公式

$$G_{so_2} = 1600 \times B \times S \times (1 - \eta) \quad (4-2)$$

式中：G_{so₂}——SO₂的排放量，单位 kg；

B——燃煤量，单位 t；

S——煤中全硫份含量，为百分数；

η——SO₂去除率，百分数；

③CO₂排放量计算公式

$$G_{co_2} = 3660 \times B \times C \times (1 - Q) \quad (4-3)$$

式中：G_{co₂}——CO₂的排放量，单位 kg；

B——燃煤量，单位 t；

C——煤中碳元素的含量，为百分数；

Q——燃煤燃烧不完全值，为百分数；

④CO排放量计算公式

$$G_{co} = 2330 \times B \times C \times Q \quad (4-4)$$

式中：G_{co}——CO的排放量，单位 kg；

B——燃煤量，单位 t；

C——煤中碳元素的含量，为百分数；

Q ——燃煤燃烧不完全值，为百分数；

⑤ NO_x 排放量计算公式

$$G_{NO_x} = 1630 \times B \times (0.015 \times \beta + 0.000938) \quad (4-5)$$

式中： G_{NO_x} —— NO_x 排放量，单位 kg；

B ——燃煤量，单位 t；

β ——燃煤中氮元素的转化率，为百分数；

⑥炉渣产生量计算公式

$$G_z = 1000 \times B \times A \times dz / (1 - C_z) \quad (4-6)$$

式中： G_z ——炉渣的排放量，单位 kg；

B ——燃煤量，单位 t；

A ——煤中灰分，为百分数；

dz ——炉渣中的灰分占总灰分的百分比，为百分数；

C_z ——炉渣中可燃物的含量，为百分数；

经计算得到冬季取暖燃煤所排放污染物如表 3-13 所示。

表 3-13 锅炉燃煤污染物排放量

名称	烟尘	SO ₂	CO ₂	CO	NO _x	炉渣
排放量(t/a)	19.09	1.12	516.3	9.8	1.3	40.3

(3) 燃油污染物排放

污水处污水处理厂运营阶段消耗成品油为 4.34t/a（柴油 159.96kg/a，汽油 4184.9kg/a），根据各种运输车辆的道路排放因子可以得到，污水处理厂运营阶段运输过程所造成的环境释放清单如表 3-14 所示。

表 3-14 运营期道路运输环境释放清单

	CO ₂	CO	CH ₄	SO ₂	NO _x	CH	粉尘
汽油排放因子	208.92	41.11	0.06	2.0	2.75	7.96	0.12
汽油排放量(kg)	7214.0	1419.5	2.07	8.37	94.96	274.8	0.50
柴油排放因子	736.47	5.63	0.04	2.80	24.10	4.28	2.0
柴油排放量(kg)	353.5	2.70	0.02	0.45	11.57	2.05	0.32
总计(kg)	7567.5	1422.2	2.09	8.82	106.53	276.85	0.82

注：CO₂、CO、CH₄、NO_x、CH 为单位里程排放因子单位 g/km，SO₂、烟尘为单位燃料排放因子，单位 g/kg

结合国内外有关成品油的生命周期评价结果，可以得到污水处理厂运营阶

段所消耗的成品油在生产过程中的各种环境释放如表 3-15 所示。

表 3-15 运营阶段所成品油生产过程的环境释放清单 单位: kg

	原煤消耗	原油消耗	CO ₂	NO _x	CH ₄	CO	SO ₂
汽油	199.6	5482.2	920.7	3.55	0.91	0.56	4.90
柴油	7.63	206.3	35.2	0.14	0.035	0.02	0.19
合计	207.23	5688.5	955.9	3.69	0.945	0.58	5.09
	粉尘	COD	SS	TN	TP	固废	
汽油	7.32	2.55×10 ⁻²	2.55×10 ⁻²	7.52×10 ⁻³	2.28×10 ⁻⁴	32.5	
柴油	0.28	9.79×10 ⁻⁴	9.79×10 ⁻⁴	2.94×10 ⁻⁴	8.4×10 ⁻⁶	1.24	
合计	7.60	2.65×10 ⁻²	2.65×10 ⁻²	7.8×10 ⁻³	2.36×10 ⁻⁴	33.74	

(4) 工艺过程环境释放

① 废水

呼兰污水处理厂日处理量 20000m³/d。出水排入呼兰河后汇入松花江，出水执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918-2002)中的一级 A 标准。根据前文所选取的水质监测指标和监测方法，在呼兰区污水处理厂的工作人员帮助下完成了对该水厂进出水水质的监测，具体水质情况如表 3-16 所示。

表 3-16 污水处理厂进出水水质清单

	监测时间	COD(mg/L)	SS(mg/L)	TN(mg/L)	TP(mg/L)
进水水质	2012.4.10	348.5	249.6	57.8	4.15
	2012.4.11	351.3	251.2	58.1	4.21
	2012.4.12	349.7	251.6	58.3	4.20
	2012.4.13	350.8	250.8	57.9	4.18
	2012.4.14	350.3	249.4	58.0	4.17
	平均值	350.12	250.52	58.02	4.18
出水水质	2010.4.10	41.6	9.5	14.6	0.47
	2012.4.11	42.2	9.8	14.5	0.46
	2012.4.12	41.8	9.6	14.3	0.48
	2012.4.13	42.0	9.8	14.5	0.45
	2012.4.14	41.9	9.6	14.4	0.47
	平均值	41.9	9.66	14.46	0.466

② 固体废弃物

污水处理厂在运营过程中所产生的固体废弃物主要是工作人员的生活垃圾、格栅间所产生的栅渣、旋流沉砂池的沉砂和污泥脱水间的剩余污泥。通过对呼兰污水处理厂的实地调查得到各种固体废弃物的排放量如表 3-17 所示。

表 3-17 固体废弃物产量

污染源	污染物名称	产生量 t/a	处置方式	排放量 t/a
工作人员	生活垃圾	21.5	卫生填埋	21.5
预处理间	栅渣	730	卫生填埋	730
旋流式沉砂池	沉砂	650	卫生填埋	650
污泥脱水间	剩余污泥	5475	卫生填埋	5475
锅炉房	炉灰渣	40.3	回收利用	0

综上所述，污水处理厂运营阶段每功能单位的资源能源消耗及环境释放清单如表 3-18 所示。

表 3-18 污水处理厂运营阶段数据清单

资源消耗 t/FU						
煤耗		水耗		原油消耗		
5206.107		1825.0		5.69		
环境释放 t/FU						
CO ₂	CH ₄	CO	NO _x	SO ₂	TSP	CH
13849.32	32.4	30.52	81.8	124.72	270.59	0.277
COD	TN	TP	SS	固废		
306.27	105.61	3.44	70.818	8445.5		

注：FU=730 万 t/a。

从表 3-18 中可以看出，污水处理厂运营阶段消耗燃煤 5206.107t/FU，主要是电的生产和污水处理厂冬季取暖对煤的消耗。污水处理厂运营过程中所耗电量在生产过程中消耗原煤 5030.9t/FU，冬季取暖消耗燃煤 175.0t/FU。所耗水量主要是日常生活用水和药剂混合用水。原油消耗主要燃煤和固体废弃物在运输过程中所耗燃油在生产过程中需要的原油量。污水处理厂运营阶段所排放的大气污染物主要来自电的生产过程和冬季取暖燃煤过程，CO₂的排放量最大，为 13849.32t/FU，电的生产过程排放 CO₂ 13324.5t/FU，冬季取暖燃煤过程排放 CO₂ 516.3t/FU。水体污染物主要来自污水处理厂正常运行过程中的出水，COD 306.27t/FU、TN 105.61t/FU、TP 3.44t/FU、SS 70.818t/FU。排放固体废弃物 8445.5t/FU，主要包括工作人员的生活垃圾 21.5t/FU，预处理间的栅渣 730.0t/FU，旋流式沉砂池所产生的沉砂 630.0t/FU，污泥脱水间所产生的剩余污泥 5474t/FU 和电的生产过程所产生的固体废弃物 1569.0t/FU。

3.4 报废拆除阶段清单分析

污水处理厂拆除阶段是指污水处理厂达到设计年限之后，对污水处理厂进行报废拆除处理。主要是对原有建筑的拆除和拆除后地表覆土的填充，覆土平均填充深度为 1.5m。这一阶段的输入主要是电、油等物质的消耗，输出主要是在拆除过程中废弃物的回收和建筑垃圾处理过程中的环境释放。本文根据国内有关建筑物拆除的规定和研究成果对该污水处理厂拆除阶段的资源能源消耗和环境释放数据进行数据估算。

3.4.1 报废拆除阶段消耗清单

哈尔滨市呼兰区城市污水处理厂内各构筑物的建筑面积如表 3-19 所示。

表 3-19 污水处理厂各构筑物建筑面积

构筑物名称	综合楼	预处理间	消毒间	消毒池	门卫室
建筑面积 m ²	1193.26	648.6	123.39	329.18	50.46
构筑物名称	污泥脱水间	锅炉房	鼓风机房	CAST 池	总计
建筑面积 m ²	418.86	384.97	507.9	5814.9	9471.86

由表 3-19 可知，呼兰区城市污水处理厂总建筑面积为 9471.86m²，建筑面积较小，采用人工和机械的拆除方式进行拆除。根据相关文献统计，单位建筑面积拆除能耗约 95kwh^[58]，则污水处理厂拆除阶段总计消耗 899826.7kwh。

由于各构筑物均为钢筋混凝土建筑，在拆除过程中钢材可部分回收，取其回收系数为 0.8，即可回收钢材 1014.036t。其余部分为建筑垃圾，根据我国有关建筑拆除的统计数据表明，拆除每平方米建筑物大约产生 1.35t 的建筑垃圾^[59]，呼兰城市污水处理厂报废拆除阶段共产生建筑垃圾 12787.01t，送至垃圾填埋场填埋处理。

原有建筑拆除后，需要对场地覆土和平整，按照平均覆土深度为 1.5m，覆土密度 2t/m³，计算得到，所需覆土体积为 14207.79m³，覆土重量为 28415.58t。

拆除阶段所产生的建筑垃圾和覆土道路运输情况如表 3-20 所示。

表 3-20 报废拆除阶段道路运输情况

	运输车辆	燃油种类	载重量	运输距离	总运输距离	油耗
建筑垃圾	重型货车	柴油	10t	10km	12787km	4954.96L
覆土	重型货车	柴油	10t	4km	11366km	4404.3L
总计					24153km	9359.28L

由表 3-20 可以得到，报废拆除阶段所需消耗燃油为 9359.28L。

3.4.2 报废拆除阶段环境释放清单

报废拆除阶段的环境释放主要是拆除阶段所耗能源与燃油在其生命周期阶段内的环境释放，以及在拆除过程中所产生的 TSP 等物质。由于施工时间较短，施工过程中所产生的 TSP 量较少，本文不予考虑。

①能源消耗环境释放

所耗能源以电能的形式计算，本文以燃煤发电的火电厂为例，根据国内外现有的燃煤发电的生命周期评价结果，得到污水处理厂报废拆除阶段所耗标煤为 363.53t。各种污染物排放如表 3-21 所示。

表 3-21 拆除阶段所耗电能生产过程清单

污染物	CO ₂	CH ₄	SO ₂	NO _x	TSP	CO
排放量 t	962.8	2.33	8.9	5.8	18.18	1.39
污染物	COD	SS	TN	TP	固废	
排放量 t	2.9×10 ⁻²	2.2×10 ⁻²	3.6×10 ⁻³	2.9×10 ⁻³	113.38	

②道路运输释放清单

经过消耗清单分析可以得到，污水处处理厂运营阶段消耗柴油为 8048.98kg，运输距离 24153km。根据各种运输车辆的道路排放因子可以得到，污水处理厂报废拆除阶段阶段运输过程所造成的环境释放清单如表 3-22 所示。

表 3-22 拆除阶段道路运输环境释放清单

	CO ₂	CO	CH ₄	SO ₂	NO _x	CH	TSP
柴油排放因子	736.47	5.63	0.04	2.80	24.10	4.28	2.0
柴油排放量/kg	17787.96	135.98	0.966	22.54	582.09	103.37	16.10

注：CO₂、CO、CH₄、NO_x、CH 为单位里程排放因子单位 g/km，SO₂、烟尘为单位燃料排放因子。单位 g/kg

报废拆除阶段所耗成品油在生产过程中的各种环境释放如表 3-23 所示。

表 3-23 拆除阶段成品油生产过程的环境释放清单

单位：kg

原煤消耗	原油消耗	CO ₂	NO _x	CH ₄	CO	SO ₂
383.9	10383.2	1770.78	6.82	1.75	1.09	9.42
TSP	COD	SS	TN	TP	固废	
14.08	4.92×10 ⁻²	4.92×10 ⁻²	1.48×10 ⁻²	4.2×10 ⁻⁴	62.37	

综上所述，通过对污水处理厂报废拆除阶段资源能源消耗和环境释放的分析可以得到，污水处理厂报废拆除阶段的每功能单位的分析清单如表 3-24 所示。

表 3-24 污水处理厂报废拆除阶段分析清单

资源消耗 t/FU						
煤耗		水耗			原油消耗	
14.56		—			0.42	
环境释放 t/FU						
CO ₂	CH ₄	CO	NO _x	SO ₂	TSP	CH
39.29	0.0932	0.061	0.256	0.357	0.728	4.12×10 ⁻³
COD	TN	TP	SS	固废		
1.16×10 ⁻³	1.44×10 ⁻⁴	1.16×10 ⁻⁴	8.8×10 ⁻⁴	516.02		

注：FU=730 万 t/a

从表 3-24 中可以看出，污水处理厂拆除阶段煤耗为 14.56t/FU，主要是拆除阶段所耗电能在其生产过程中的消耗。消耗原油 0.42t/FU，主要是成品油在其生产过程中所消耗的原油。拆除阶段所排放的大气污染物中 CO₂ 的排放量最

表 3-25 污水处理厂生命周期清单分析

资源消耗(t/FU)						
	煤耗	水耗			原油消耗	
建设阶段	176.84	3301.76			0.185	
运营阶段	5206.107	1825.0			5.69	
拆除阶段	14.56	—			0.42	
总计	5397.507	5126.76			6.295	
环境释放(t/FU)						
	CO ₂	CH ₄	CO	NO _x	SO ₂	TSP
建设阶段	654.63	9.53	2.64	1.63	3.54	4.67
运营阶段	13849.32	32.4	30.52	81.8	124.72	270.59
拆除阶段	39.29	0.0932	0.061	0.256	0.357	0.728
总计	14543.24	42.0232	33.221	83.686	128.617	275.988
	CH	COD	TN	TP	SS	固废
建设阶段	0.148	0.27	0.113	2.28×10 ⁻³	6.54	3788.98
运营阶段	0.277	306.27	105.61	3.44	70.818	8445.5
拆除阶段	4.12×10 ⁻³	1.16×10 ⁻³	1.44×10 ⁻⁴	1.16×10 ⁻⁴	8.8×10 ⁻⁴	516.02
总计	0.429	306.54	105.72	3.44	73.358	12750.5

注：FU=730 万 t/a。

大，39.29t/FU，主要来自电的生产过程。排放固体废弃物 516.02t/FU，主要是建筑垃圾。所排放水体污染物数量较小。

通过对污水处理厂每个生命周期阶段的分析，得到污水处理厂在其整个生命周期过程中的清单分析如表 3-25 所示。

3.5 本章小结

本章对污水处理厂生命周期范围内的资源能源消耗和环境释放数据进行了收集和分析，得到了每功能单位的输入与输出数据，为后续的生命周期评价工作奠定了良好的基础。

第 4 章 影响分析

生命周期影响分析是在对产品或服务完成目标及范围界定和清单分析的基础上，对其进行环境影响预测的一步工作。是根据清单分析所提供的资源能源消耗数据和环境释放数据对产品或服务所造成的环境影响进行预测和评估，其实质上是对清单分析结果进行定性和定量化研究。根据 ISO 和 SETAC 的有关规定，生命周期影响分析一般采用“三步走”的模型，即是：分类、特征化和量化。

4.1 环境影响分类

分类是对清单分析所得到的输入与输出数据进行环境影响类别的划分。生命周期评价中所包含的环境影响类别通常分为三大类：资源消耗影响、人体健

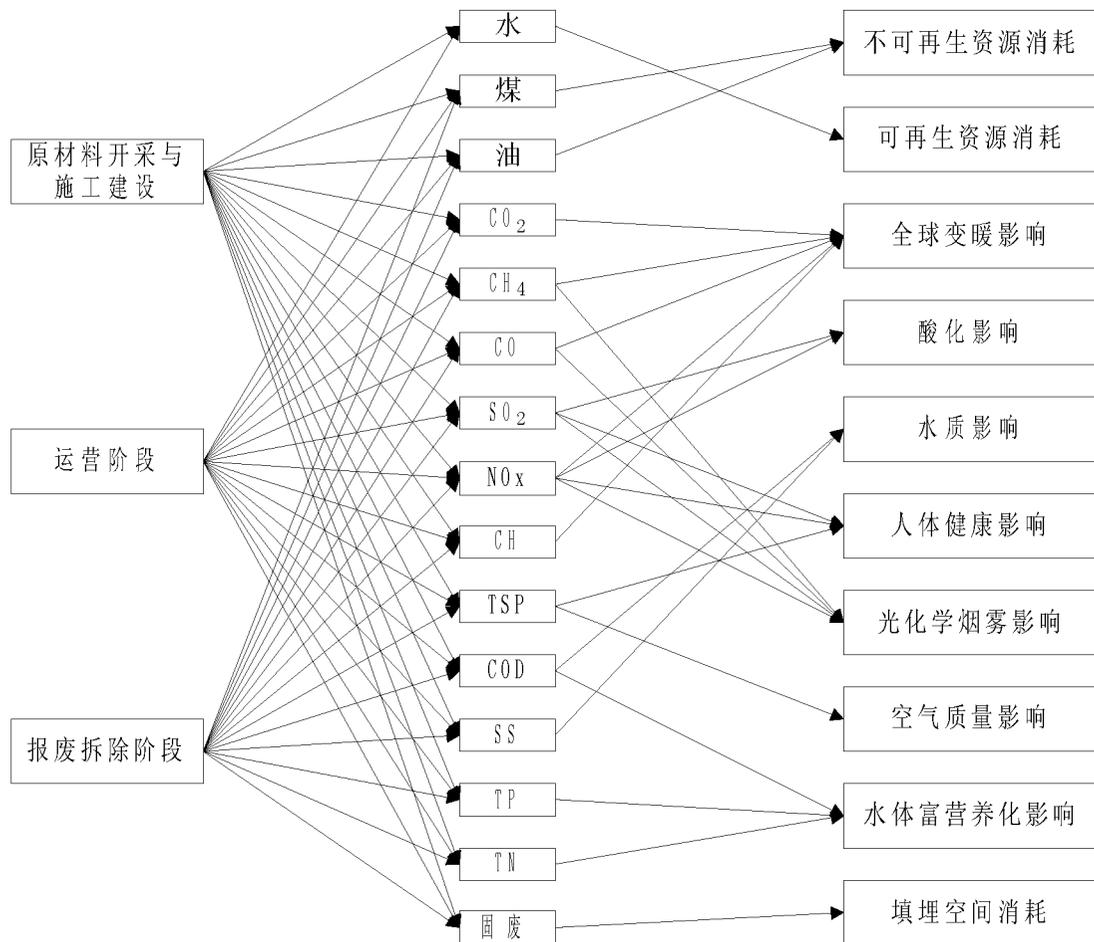


图 4-1 环境影响分类

康影响和生态环境影响，每一类又包括许多子类。参考 EPA 的有关研究，清单分析中输入与输出项中的每一类物质所造成的环境影响分类如图 4-1 所示。

4.2 环境影响特征化

特征化是将每一个环境影响类别中的不同环境影响因素归类和汇总为统一的单元。根据国内外的相关研究，本文对每一类环境影响将采取如下模型进行计算。

4.2.1 可再生资源消耗

污水处理厂可再生资源的消耗主要是水的消耗，特征化按下式进行：

$$IRrr = \sum_{i=1}^n ISIRrr_i = \sum_{i=1}^n AMTrr_i \times (1 - RC_i) \quad (4-1)$$

式中： $IRrr$ ——可再生资源的特征化结果；

$ISIRrr$ ——第 i 种物质的可再生资源消耗量；

$AMTrr_i$ ——第 i 种物质的清单分析量；

RC_i ——第 i 种物质的回收率或重复利用率；

根据公式 4-1 计算得到，污水处理厂生命周期中各个阶段对水资源消耗的特征化结果如表 4-1 所示。

表 4-1 水资源消耗特征化结果

水	RC ^[36]	建设阶段	运营阶段	拆除阶段	总计
特征化结果	0	3301.76	1825.0	0	5126.76

从表 4-1 中可以看出，污水处理厂建设阶段所耗水量最大，3301.76t/FU，为总体水耗的 64.402%。主要是钢材在其生产过程中因矿石精选、高炉炼铁、炼钢等生产工艺的消耗。建材生产过程消耗水量 3267.6t/FU，施工建设过程消耗水量 34.156t/FU。运营阶段消耗水量为 1825.0t/FU，为总体水耗的 35.598%，主要是污水处理厂运营过程中的日常生活用水和药剂混合用水。由于拆除阶段所耗水量较小，本文未加以考虑。

4.2.2 不可再生资源消耗

污水处理厂不可再生资源的使用主要是煤和石油，其消耗量采用美国环保局（EPA）提供的计算模型。不可再生资源的计算模型与可再生资源相比增加

了一个系数，即资源稀缺系数，用来区分各种资源的丰富程度。计算方法见公式 4-2。

$$NRrr = \sum_{i=1}^n ISNRrr_i = \sum_{i=1}^n \omega_i \times [AMTrr_i \times (1 - RC_i)] \quad (4-2)$$

式中：NRrr——不可再生资源消耗量；

ISNRrr_i——第*i*种物质的不可再生资源的消耗量；

AMTrr_i——第*i*种物质的清单分析量；

RC_i——第*i*种物质的回收率或重复利用率；

ω_i——第*i*种物质的资源稀缺系数。

资源稀缺系数在计算时采用目标距离法，即是用资源丰富程度的当前水平和目标水平之间的距离来表示，一般取 10 年。本文以 2010 年和 2000 年的水平进行计算。如公式 4-3 所示。

$$\omega_i = ER_{2010} / ER_{2000} \quad (4-3)$$

式中：ER₂₀₁₀——第*i*种物质的 2010 年基准水平，等于 2010 年的储量，减去当年的产量；

ER₂₀₀₀——第*i*种物质的 2000 年基准水平，等于 2000 年的储量，减去当年的产量；

根据 BP Statistical Review of World Energy June 2011 公布的数据，2000 年末世界石油储量 11049 亿桶，煤炭储量 9842.11 亿吨，2010 年末世界石油储量 13832 亿桶，煤炭储量 8609.38 亿吨。计算得到 ω_{石油}=1.25，ω_煤=0.87。根据公式 4-2 计算得到，污水处理厂各生命周期阶段的不可再生资源消耗特征化结果如表 4-2 所示。

表 4-2 不可再生资源特征化结果

资源名称	ω _i	建设阶段	运营阶段	拆除阶段	总计
煤	0.87	153.85	4529.31	12.667	4695.827
石油	1.25	0.23	7.11	0.525	7.865
总计		154.08	4536.42	13.192	4703.692

从表 4-2 中可以看出，污水处理厂生命周期阶段内对不可再生资源的消耗是 4703.692t/FU，煤的消耗是 4695.827t/FU，石油的消耗是 7.865t/FU，建设阶段消耗不可再生资源 154.08t/FU，运营阶段 4536.42t/FU，拆除阶段 13.192t/FU。如图 4-2 和图 4-3 所示。

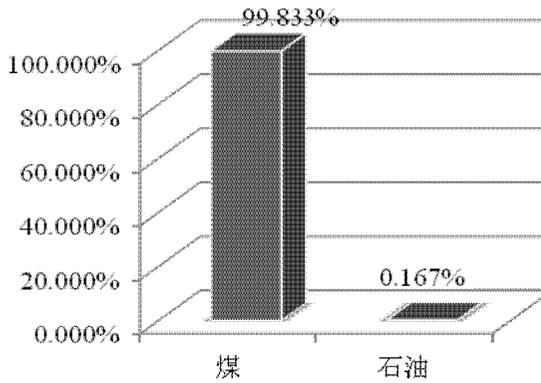


图 4-2 不可再生资源消耗

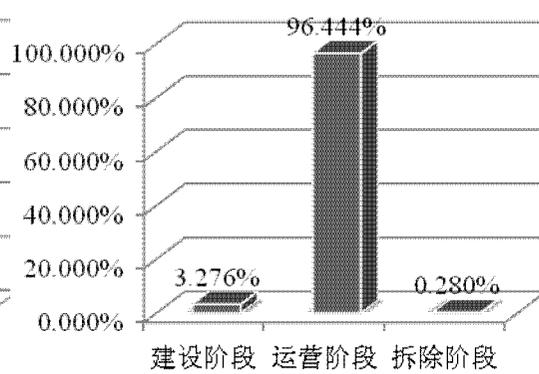


图 4-3 各生命周期阶段不可再生资源消耗

从图 4-2 中可以看出，污水处理厂生命周期阶段内对不可再生资源的消耗主要是煤的消耗，为不可再生资源消耗的 99.833%，主要是污水处理厂在其生命周期阶段内所耗电能生产过程中对煤的消耗。原油消耗占不可再生资源消耗的 0.167%，主要是各种建材、固体废弃物在道路运输过程中的消耗。从图 4-3 中可以看出，污水处理厂生命周期阶段内对不可再生资源消耗量较大的是运营阶段，为不可再生资源消耗的 96.444%，其次是建设阶段 3.276%，最后是拆除阶段 0.280%。主要是污水处理厂在运行过程中因工艺设备的运行对电能的消耗较大，因此而导致电能生产过程中对煤的消耗量较大，为 4376.88t/FU，冬季取暖耗煤 152.25t/FU，道路运输消耗煤 0.180t/FU，消耗原油 7.11t/FU。因此污水处理厂生命周期内不可再生资源的消耗主要是运营阶段内的发电用煤和冬季取暖燃煤的消耗。

4.2.3 全球变暖影响潜能

全球变暖影响是指大气中因 CO₂ 等温室气体的增加而引起的全球平均气温的提高和气候变化。全球变暖影响潜能(Global Warming Potential, GWP)是指排放的这种温室气体对全球平均温度提高的贡献潜在值。通常采用相关系数法来计算，即是在计算某种温室气体的全球变暖影响潜能时，以 CO₂ 为基准，通过相关性比较，进而将结果相加汇总。其计算方法如公式 4-4 所示。

$$GWP = \sum_{i=1}^n ISGW_i = \sum_{i=1}^n EFGWP_i \times AMTGG_i \quad (4-4)$$

式中： GWP ——表示全球变暖影响潜能；

$ISGW_i$ ——表示第 i 种温室气体的全球变暖影响潜能；

$EFGWP_i$ ——表示第 i 种物质的 GWP 相关性系数，本文采用 EPA 公布的相关系数。

$AMTGG_i$ ——表示第 i 种物质的清单分析排放量；

根据公式 4-4 可计算得到污水处理厂生命周期各个阶段的全球变暖影响潜能特征化结果如表 4-3 所示。

表 4-3 全球变暖影响潜能

温室气体	GWP 系数 ^[36]	建设阶段	运营阶段	拆除阶段	总计
CO ₂	1	654.63	13849.32	39.29	14543.24
CH ₄	21	200.13	680.4	1.957	882.487
CO	3	7.92	91.56	0.183	99.663
NO _x	40	65.2	3272.0	10.24	3347.44
CH	3	0.444	0.831	1.236 × 10 ⁻²	1.287
总计		928.324	17894.11	51.68	18874.12

从表 4-3 中可以看出，全球变暖影响潜能所考虑的物质是 CO₂、CH₄、CO、NO_x 和 CH，经特征化计算可以看出，污水处理厂生命周期内对全球变暖的贡献为 18874.12t/FU，其中 CO₂ 为 14543.24t/FU，CH₄ 为 882.487t/FU，CO 为 99.663t/FU，NO_x 为 3347.44t/FU，CH 为 1.287t/FU。建设阶段的全球变暖影响潜能为 928.324t/FU，运营阶段为 17894.11t/FU，拆除阶段为 51.68t/FU。如图 4-4 和图 4-5 所示。

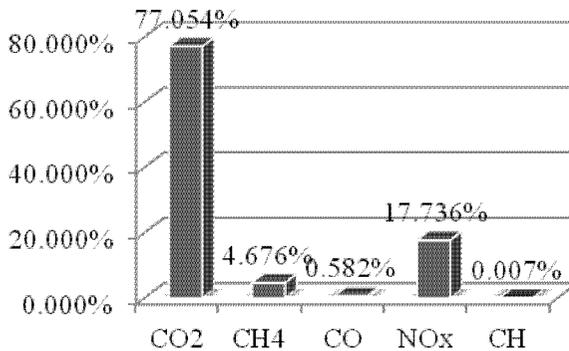


图 4-4 全球变暖影响潜能

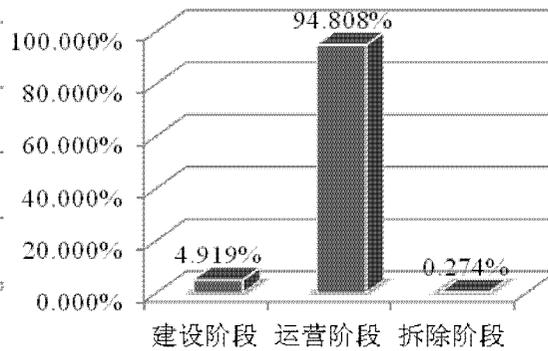


图 4-5 各阶段全球变暖影响潜能

从图 4-4 中可以看出，污水处理厂生命周期阶段内对全球变暖影响贡献最大的是二氧化碳，占 77.054%，其次是氮氧化物 17.736%，甲烷 4.676%，一氧化碳 0.528%，烃类 0.007%。从图 4-5 中可以看出，对全球变暖影响贡献最大的是运营阶段，占 94.808%，其次依次为建设阶段 4.919%和拆除阶段 0.274%。

污水处理厂生命周期内全球变暖影响主要来自于运营阶段工艺设备的正常运转所耗电能在生产过程中造成的温室气体的排放。污水处理厂运营阶段因电耗而引起的全球变暖影响潜能为 17278.8t/FU，为总体全球变暖影响的 91.584%。

4.2.4 光化学烟雾影响潜能

光化学烟雾是指大气中的碳氢化合物、自由基与氮氧化合物的物质通过光化学反应而形成的对环境和人体健康有害的混合烟雾。光化学烟雾影响潜能(POCP)是指所排放的物质对光化学烟雾形成的贡献值,其计算通常采用相关性系数法,即是在计算某种物质的光化学烟雾的影响潜能时,以化合物乙烯为参照物质,通过相关性比较得到光化学烟雾的影响潜能。其计算公式如 4-5 所示。

$$POCP = \sum_{i=1}^n ISPOCP_i = \sum_{i=1}^n EPPOCP_i \times AMTPOCP_i \quad (4-5)$$

式中: $POCP$ ——光化学烟雾影响潜能;

$ISPOCP_i$ ——第 i 种物质的光化学烟雾影响潜能;

$EPPOCP_i$ ——第 i 种物质的 $POCP$ 相关性系数,本文采用 EPA 公布的 $POCP$ 相关系数。

$AMTPOCP_i$ ——第 i 种物质的清单分析排放量;

根据公式 4-5 可计算得到污水处理厂生命周期各个阶段的光化学烟雾影响潜能特征化结果如表 4-4 所示。

表 4-4 光化学烟雾特征化结果

化合物	POCP 系数 ^[36]	建设阶段	运营阶段	拆除阶段	总计
CO	0.03	0.079	0.916	0.002	0.997
NO _x	0.03	0.049	2.454	0.008	2.511
SO ₂	0.05	0.177	6.236	0.018	6.425
CH ₄	0.007	0.067	0.227	0.001	0.295
总计		0.372	9.833	0.029	10.228

从表 4-4 中可以看出,光化学烟雾影响所考虑的物质主要是 CO、NO_x、SO₂ 和 CH₄。经特征化计算可以看出,污水处理厂生命周期阶段内所造成的光化学烟雾影响为 10.228t/FU,其中 CO 为 0.997t/FU,NO_x 为 2.511t/FU,SO₂ 为 6.425t/FU,CH₄ 为 0.295t/FU。建设阶段光化学烟雾影响为 0.372t/FU,运营阶段 9.833t/FU,拆除阶段 0.029t/FU。如图 4-6 和图 4-7 所示。

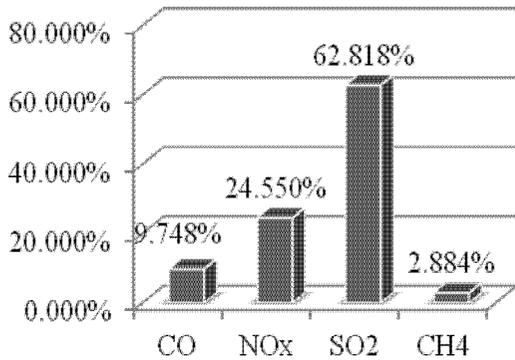


图 4-6 光化学烟雾影响

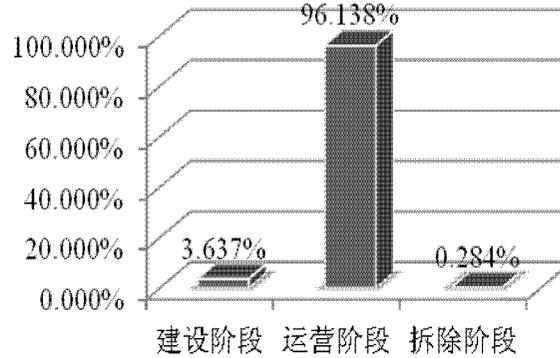


图 4-7 各阶段光化学烟雾影响

从图 4-6 中可以看出，污水处理厂生命周期阶段内对光化学烟雾影响贡献最大的是二氧化硫的排放，占 62.818%，其次依次是氮氧化物 24.550%，一氧化碳 9.748%和甲烷 2.884%。从图 4-7 中可以看出污水处理厂各生命周期阶段中对光化学烟雾影响贡献最大的是运营阶段 96.138%，其次为建设阶段 3.637%，拆除阶段 0.284%。污水处理厂光化学烟雾影响主要是由运营阶段的二氧化硫和氮氧化物的排放造成的，主要来自运营过程中所耗电能在其生产过程中的排放。污水处理厂运营过程因电能消耗排放的污染物的光化学烟雾影响潜能为 9.398t/FU，为总体光化学烟雾影响的 91.883%。

4.2.5 酸化响潜能

酸化影响是指硫氧化物和氮氧化物等在大气中形成酸雾、酸雨等酸性物质对周围环境和人体健康的影响。酸化影响潜能(AP)是指所排放的某种物质对形成酸雾和酸雨等酸性物质的贡献值，通常采用相关系数法进行计算，即是以 SO₂ 为参照物，通过相关性比较得到酸化影响潜能值的大小。其计算公式如 4-6 所示。

$$AP = \sum_{i=1}^n ISAP_i = \sum_{i=1}^n EPAP_i \times AMTAP_i \quad (4-6)$$

式中：AP——酸化影响潜能；

ISAP_i——第 i 种物质的酸化影响潜能；

EPAP_i——第 i 种物质的 AP 相关性系数，本文采用 EPA 公布的 AP 相关性系数。

AMTAP_i——第 i 种物质的清单分析排放量；

污水处理厂生命周期各个阶段的酸化影响潜能特征化结果如表 4-5 所示。

表 4-5 酸化特征化结果

化合物	AP 系数 ^[36]	建设阶段	运营阶段	拆除阶段	总计
NO _x	0.7	1.141	57.260	0.179	58.580
SO ₂	1.0	3.54	124.72	0.357	128.617
总计		4.681	181.980	0.536	187.197

从表 4-5 中可以看出，酸化影响主要是氮氧化物和二氧化硫的排放所造成的，经特征化计算可以看出，污水处理厂生命周期内所造成的酸化影响是 187.197t/FU，其中氮氧化物为 58.58t/FU，二氧化硫为 128.617t/FU。建设阶段酸化影响为 4.681t/FU，运营阶段为 181.980t/FU，拆除阶段为 0.536t/FU。如图 4-8 和图 4-9 所示。

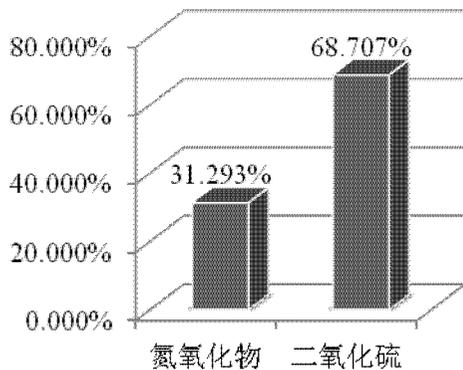


图 4-8 酸化影响潜能

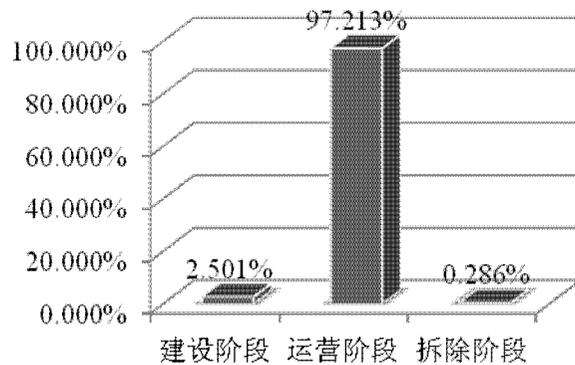


图 4-9 各阶段酸化影响潜能

从图 4-8 中可以看出，污水处理厂生命周期阶段内对酸化影响贡献二氧化硫为 68.707%，氮氧化为 31.293%。从图 4-9 中可以看出，污水处理厂各生命周期阶段对酸化影响贡献虽大的是运营阶段 97.213%，其次为建设阶段 2.501%，拆除阶段 0.286%。污水处理厂生命周期内对酸化影响的贡献主要是运营阶段内二氧化硫和氮氧化物的排放，主要是运营耗电的生产所造成的二氧化硫和氮氧化物的排放。污水处理厂运营阶段因电能消耗而排放的污染物的酸化影响潜能为 179.88t/FU，为总酸化影响的 96.091%。

4.2.6 水体富营养化影响潜能

水体富营养化是指氮磷等营养物质和有机物质不断的排入水体中，造成藻类繁殖快速，耗尽水中溶解氧，使水质恶化的一种现象。水体富营养化影响潜能(EP)是指所排放的某种物质对水体富营养的贡献程度，通常采用相关系数法计算，即是以磷酸根为基准物质，通过相关性比较得到水体富营养化影响潜能，其计算公式如 4-7 所示。

$$EP = \sum_{i=1}^n ISEP_i = \sum_{i=1}^n EFEP_i \times AMTEP_i \quad (4-7)$$

式中： EP ——水体富营养化影响潜能；

$ISEP_i$ ——第 i 种物质的水体富营养化影响潜能；

$EFEP_i$ ——第 i 种物质的 EP 相关性系数，本文采用 EPA 公布的 EP 相关性系数。

$AMTEP_i$ ——第 i 种物质的清单分析排放量；

经计算得到污水处理厂水体富营养化的特征化结果如表 4-6 所示。

表 4-6 水体富营养化特征化结果

化合物	EP 系数 ^[36]	建设阶段	运营阶段	拆除阶段	总计
TN	0.42	0.047	44.356	6.048×10^{-5}	44.403
TP	3.06	6.977×10^{-3}	10.526	3.550×10^{-4}	10.533
COD	0.022	5.94×10^{-3}	6.738	2.552×10^{-5}	6.744
总计		0.060	61.620	4.410×10^{-4}	61.68

从表 4-6 中可以看出，水体富营养化影响所考虑的物质为总氮、总磷和 COD。经特征化计算得到，污水处理厂生命周期内对水体富营养化影响为 61.68t/FU，其中总氮为 44.403t/FU，总磷为 10.533t/FU，COD 为 6.744t/FU。建设阶段的水体富营养化为 0.060t/FU，运营阶段为 61.620t/FU，拆除阶段为 4.410×10^{-4} t/FU。如图 4-10 和图 4-11 所示。

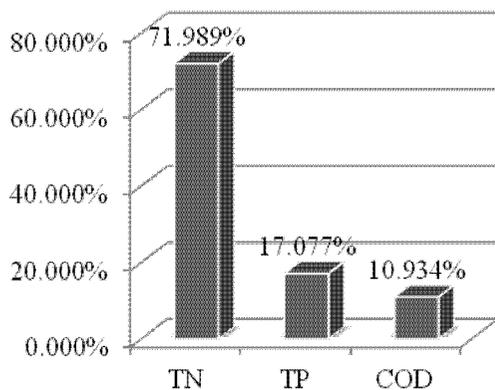


图 4-10 水体富营养化影响潜能

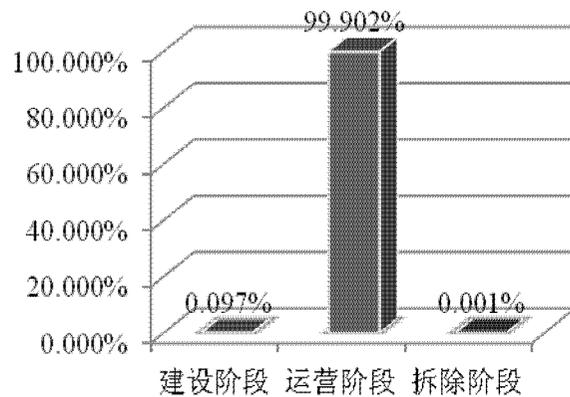


图 4-11 各阶段水体富营养化影响

从图 4-10 中可以看出，对水体富营养化贡献最大的为总氮的排放，71.989%，其次为总磷 17.077%，COD，10.934%。从图 4-11 中可以看出，对水体富营养化贡献最大的生命周期阶段是运营阶段 99.902%，其次为建设阶段 0.097%，拆除阶段为 0.001%。污水处理厂生命周期内对水体富营养化贡献主要

是运营阶段出水排放中总氮和总磷的排放。运营阶段出水对水体富营养化贡献为 61.467t/FU，为总水体富营养化影响的 99.655%。

4.2.7 水质影响潜能

水质影响是指由于 COD、SS 等物质进入地表水而引起地表水污染从而导致的水中溶解氧消耗、水质恶化的现象。其计算公式如 4-8 所示。

$$WQP = AMTCOD + AMTSS \quad (4-8)$$

式中： WQP ——水质影响潜能；

$AMTCOD$ ——COD 的清单分析排放量；

$AMTSS$ ——SS 的清单分析排放量；

根据公式 4-8 计算可以得到污水处理厂生命周期各个阶段内的水质影响潜能特征化结果如表 4-7 所示。

表 4-7 水质影响潜能特征化结果

名称	建设阶段	运营阶段	拆除阶段	总计
<i>COD</i>	0.27	306.27	1.16×10^{-3}	306.54
<i>SS</i>	6.54	70.818	8.8×10^{-4}	77.358
总计	6.81	377.088	2.04×10^{-3}	383.898

从表 4-12 中可以看出，污水处理厂生命周期内对水质影响为 383.898t/FU，其中 COD 为 306.54t/FU，SS 为 77.358t/FU。建设阶段的水质影响为 6.81t/FU，运营阶段为 377.088t/FU，拆除阶段为 2.04×10^{-3} t/FU。如图 4-12 和图 4-13 所示。

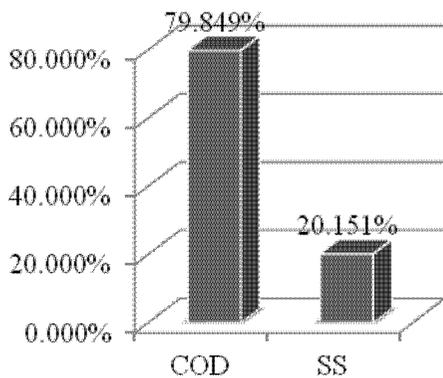


图 4-12 水质影响潜能

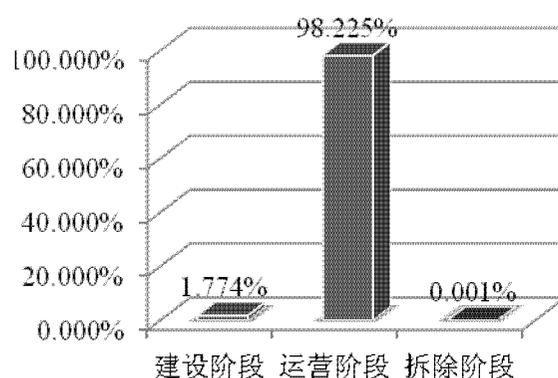


图 4-13 各阶段水质影响

从图 4-12 中可以看出污水处理厂生命周期内水质影响主要是 COD，占 79.849%，其次为 SS，占 20.151%。从图 4-13 中可以看出，度水质影响贡献最大的生命周期阶段是运营阶段 98.225%，建设阶段 1.774%，拆除阶段 0.001%。

污水处理厂生命周期内对水质影响主要是运营阶段内污水处理厂出水中 COD 和 SS 的排放。运营阶段出水对水质影响为 376.388t/FU，为总体水质影响的 98.043%。

4.2.8 空气质量影响潜能

空气质量影响潜能是指由于大气中颗粒物质的排放而引起的空气质量下降的现象，其计算公式如 4-9 所示。

$$AQP = AMTTSP \quad (4-9)$$

式中： AQP ——空气质量影响潜能；

$AMTTSP$ —— TSP 的清单分析排放量；

根据公式 4-9 所示，污水处理厂生命周期各个阶段空气质量影响潜能特征化结果如表 4-8 所示。

表 4-8 空气质量影响潜能特征化结果

名称	建设阶段	运营阶段	拆除阶段	总计
TSP	4.67	270.59	0.728	275.988

从表 4-8 中可以看出，污水处理厂生命周期内对空气质量影响主要是 TSP，为 275.988t/FU。其中建设阶段为 4.67t/FU，运营阶段为 270.59t/FU，拆除阶段为 0.728t/FU。如图 4-14 所示。

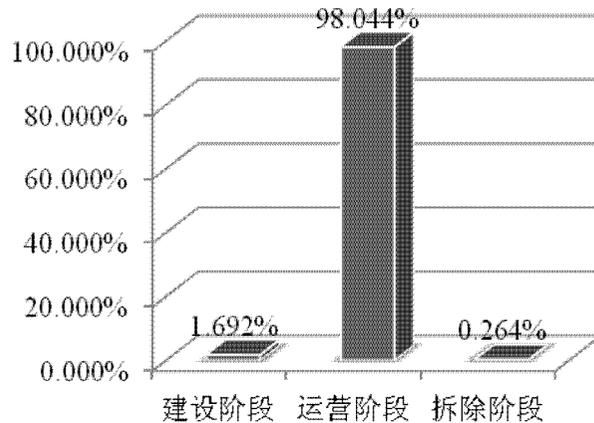


图 4-14 各生命周期阶段空气质量影响

从图 4-14 中可以看出，污水处理厂运营阶段对空气质量影响最大，98.044%，其次为建设阶段 1.692%，拆除阶段 0.264%。结合清单分析结果可以看出，污水处理厂空气质量影响主要是运营过程中所耗电能生产过程中 TSP 的排放。运营过程中因电能生产所排放的 TSP 为 251.5t/FU，为总体空气质量影响

的 91.127%。

4.2.9 填埋空间消耗

填埋空间消耗是指固体废弃物或者是有害固体废弃物进入垃圾填埋场所需要的填埋空间的消耗，其计算公式如 4-10 所示。

$$SW = \sum_{i=1}^n ISSW_i \quad (4-10)$$

式中：SW——填埋空间消耗；

$ISSW_i$ ——第 i 种物质的填埋空间消耗；

根据公式 4-10 计算得到污水处理厂生命周期各个阶段填埋空间消耗的特征化结果如表 4-9 所示。

表 4-9 填埋空间消耗特征化结果

	建设阶段	运营阶段	拆除阶段	总计
固体废弃物	3788.98	8445.5	516.02	12750.5

从表 4-9 中可以看出，污水处理厂生命周期内填埋空间的消耗为 12750.5t/FU。建设阶段为 3788.98t/FU，运营阶段为 8445.5t/FU，拆除阶段为 516.02t/FU。如图 4-15 所示。

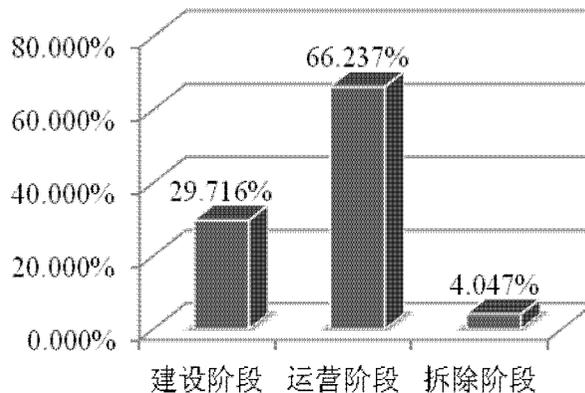


图 4-15 各生命周期阶段填埋空间消耗

从图 4-15 中可以看出，污水处理厂各生命周期阶段对填埋空间消耗影响最大的是运营阶段为 66.237%，其次为建设阶段 29.716%，拆除阶段 4.047%。结合清单分析的结果可以看出，污水处理厂生命周期内对填埋空间消耗的影响主要是运营阶段内栅渣、剩余污泥等固体废弃物的排放。

4.2.10 人体健康影响

人体健康影响是指所排放的化合物对人类生命系统的潜在影响，计算时采用人体健康受损负荷值，如公式 4-11 所示。

$$HE = \sum_{i=1}^n ISHE_i = \sum_{i=1}^n EFHE_i \times AMTHE_i \quad (4-11)$$

式中： HE ——人体健康影响潜能；

$ISHE_i$ ——第 i 种物质的人体健康影响潜能；

$EFHE_i$ ——第 i 种物质的人体健康影响相关系数，本文采用人体健康影响因子。

$AMTHE_i$ ——第 i 种物质的清单分析排放量；

根据公式 4-11 得到污水处理厂各个生命周期阶段的人体健康影响潜能特征化结果如表 4-10 所示。

表 4-10 人体健康影响潜能特征化结果

化合物	人体健康受损因子 ^[36]	建设阶段	运营阶段	拆除阶段	总计
NO _x	0.000151	2.46×10^{-4}	1.23×10^{-2}	3.86×10^{-5}	1.26×10^{-2}
SO ₂	0.0000535	1.89×10^{-4}	6.67×10^{-3}	1.91×10^{-5}	6.878×10^{-3}
TSP	0.000375	1.75×10^{-3}	0.1014	2.73×10^{-4}	0.1034
总计		2.185×10^{-3}	0.1203	3.307×10^{-4}	0.1229

从表 4-10 中可以看出，污水处理厂生命周期内对人体健康影响潜能为 0.1229t/FU，其中氮氧化物为 1.26×10^{-2} t/FU。二氧化硫为 6.878×10^{-3} t/FU。TSP 为 0.1034 t/FU。建设阶段对人体健康影响为 2.185×10^{-3} t/FU。运营阶段为 0.120 t/FU。拆除阶段为 33.307×10^{-4} t/FU。如图 4-16 和 4-17 所示。

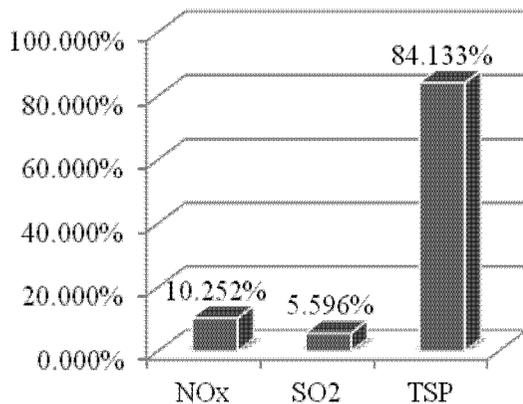


图 4-16 人体健康影响潜能

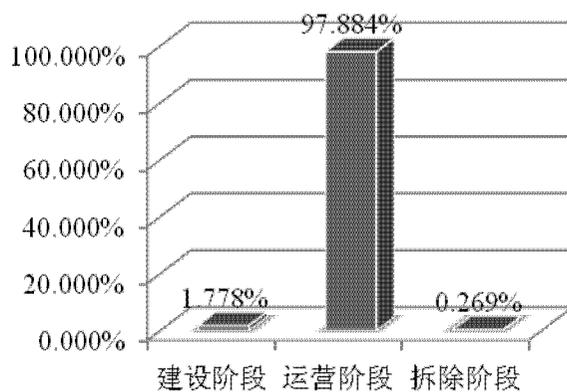


图 4-17 各阶段人体健康影响潜能

从图 4-16 中可以看出，对人体健康影响贡献最大的为 TSP 的排放，为 84.133%，其次为氮氧化物，10.252%，二氧化硫为 5.596%。从图 4-17 中可以看出，对人体健康影响贡献最大的为运营阶段 97.884%，其次为建设阶段 1.778%，拆除阶段 0.296%。污水处理厂生命周期内对人体健康影响主要是运营阶段内 TSP、氮氧化物和二氧化硫的排放。主要是运营过程中所耗电能生产阶段的排放。运营过程中电的生产所排放的污染物对人体健康影响为 0.113t/FU，为总人体健康影响的 91.997%。

综上所述，污水处理厂各生命周期阶段的环境影响类别的特征化结果如表 4-11 所示。

表 4-11 环境影响特征化结果

影响类别	建设阶段	运营阶段	拆除阶段	总计
可再生资源消耗 t/FU	3301.76	1825.0	—	5126.76
不可再生资源消耗 t/FU	154.08	4536.42	13.192	4703.692
全球变暖影响潜能 t/FU	928.324	17894.11	51.68	18874.12
光化学烟雾影响潜能 t/FU	0.372	9.833	0.029	10.228
酸化影响潜能 t/FU	4.681	181.980	0.536	187.197
水体富营养化影响 t/FU	0.060	61.620	4.410×10^{-4}	61.68
水质影响 t/FU	6.81	377.088	2.04×10^{-3}	383.898
空气质量影响 t/FU	4.67	270.59	0.728	275.988
填埋空间消耗 t/FU	3788.98	8445.5	516.02	12750.5
人体健康影响 t/FU	2.185×10^{-3}	0.1203	3.307×10^{-4}	0.1229
总计	8189.737	33602.261	582.185	42374.186

注：FU=730 万 t/a

从表 4-11 中可以看出，污水处理厂生命周期内的环境影响为 42374.186t/FU。其中，可再生资源消耗 5126.76t/FU，不可再生资源消耗 4703.692 t/FU，全球变暖影响潜能为 18874.12t/FU，光化学烟雾 10.228t/FU，酸化影响 187.197t/FU，水体富营养化影响 61.68t/FU，水质影响 379.898t/FU，空气质量影响 275.988t/FU，填埋空间消耗 12750t/FU，人体健康影响 0.1229t/FU。建设阶段为 10715.729t/FU，运营阶段为 39232.591t/FU，拆除阶段为 926.198t/FU。如图 4-18 和图 4-19 所示。

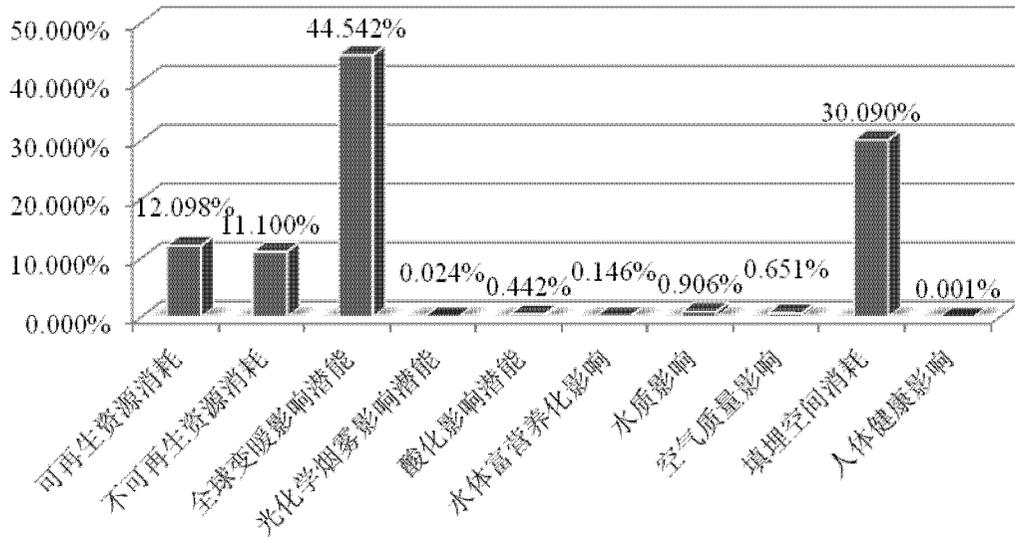


图 4-18 污水处理厂生命周期环境影响潜能

从图 4-18 中可以看出，污水处理厂生命周期内各类环境影响的特征化结果中，全球变暖影响最大，为 44.542%，其次，依次为填埋空间消耗 30.090%，可再生资源消耗 12.098%，不可再生资源消耗 11.110%，水质影响 0.906%，空气质量影响 0.651%，酸化影响 0.442%，水体富营养化 0.146%，光化学烟雾影响 0.024%，最后为人体健康影响，不足 0.001%。

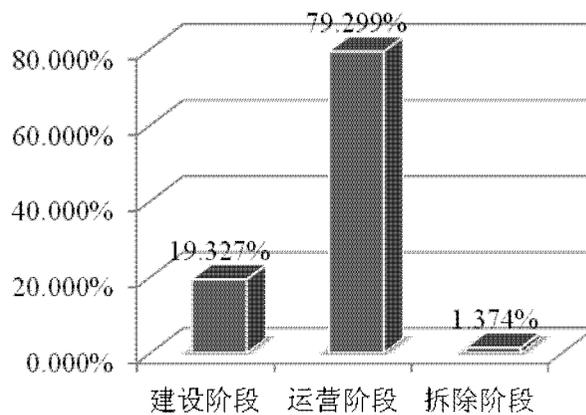


图 4-19 各生命周期阶段环境影响

从图 4-19 中可以看出污水处理厂各生命周期阶段中环境影响最大的为运营阶段 79.229%，其次为建设阶段 19.327%，拆除阶段 1.374%。运营阶段是污水处理厂环境影响的主要来源。

4.3 环境影响量化

量化是通过确定不同环境影响类型的贡献值或权重系数，从而得到总的环

境影响水平的过程。目前，在生命周期评价中有多种权重系数确定的方法，如专家打分法，目标距离法等，其中应用最广的为层次分析法（AHP）。

4.3.1 层次分析法基本原理

层次分析法（AHP）是上世纪 70 年代中期提出的一种多目标决策的系统分析法，它把定性分析和定量分析有机的统一起来，从而实现对决策目标的全面分析^[60]。

其基本原理是将决策目标按照问题性质和目的分成不同的子目标层，从而构建一个完整的层次结构，通过比较不同子目标层的相对重要性实现对各子目标层的优劣排序，完成目标决策^[61]。

4.3.2 层次分析法的基本步骤

①构建层次模型

采用层次分析法对目标问题进行决策分析时，首先要明确所研究的问题，分析问题所包含的各个因素，明确各因素之间的相互关系，构建子目标层，形成层次模型。

②构造判断矩阵

判断矩阵是整个层次分析法的基础，在建立层次模型之后，通过对目标层之内的因素两两之间进行相对重要性比较之后，以矩阵的形式表示出来，其基本形式如图 4-20 所示。

	p_1	p_2	...	p_i	...	p_n
p_1	b_{11}	b_{12}	...	b_{1i}	...	b_{1n}
p_2	$1/b_{12}$	b_{22}	...	b_{2i}	...	b_{2n}
...
p_i	$1/b_{1i}$	$1/b_{2i}$...	b_{ii}	...	b_{in}
...
p_n	$1/b_{1n}$	$1/b_{2n}$...	$1/b_{in}$...	b_{nn}

图 4-20 判断矩阵基本形式

在判断矩阵构建过程中，为了使所的判断结果定量化，通常采用九标标度法表示两个因素之间的相对重要性，即是用“1-9”九个数字表示来表示两因素之间相对重要性的比较结果，其基本含义如表 4-12 所示。

表 4-12 九标标度法及其含义

标度	标度含义
1	p_i 与 p_j 相比同等重要
3	p_i 与 p_j 相比稍微重要
5	p_i 与 p_j 相比明显重要
7	p_i 与 p_j 相比强烈重要
9	p_i 与 p_j 相比极端重要
2、4、6、8	上述两标度的中间值
以上数值倒数	p_i 与 p_j 相比得到矩阵元素 b_{ij} ，则因素 p_j 与 p_i 相比得到元素 b_{ji}

③判断矩阵一致性检验

为判断所确定的两两因素的相对重要性的比较结果是否满足一致性要求，要对所得的判断矩阵进行一致性检验。其具体方法如图 4-21 所示。首先求解判断矩阵的最大特征值 λ_{max} ，其次计算判断矩阵的一致性指标 CI，最后通过比较判断矩阵的一致性指标 CI 和平均随机一致性指标 RI（如表 4-13 所示）得到一致性比率 CR。当 $CR < 0.1$ 时，说明判断矩阵满足一致性要求，当 $CR \geq 0.1$ 时，说明要对判断矩阵进行修正，重新比较确定。

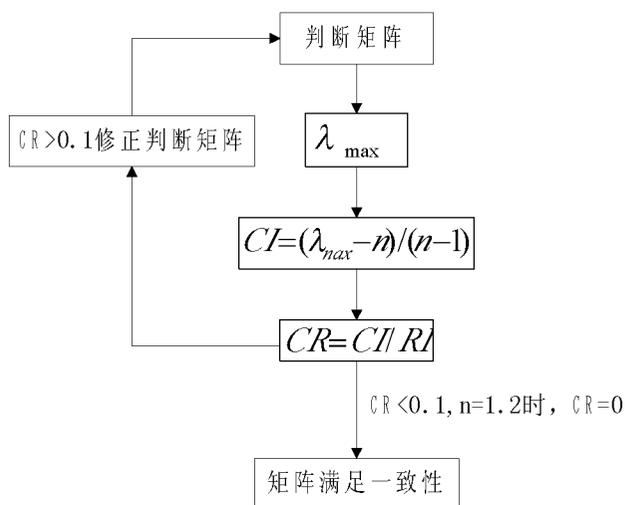


图 4-21 矩阵一致性检验

表 4-13 平均随机一致性指标

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

④层次排序

判断矩阵经过一致性检验之后，就可通过求解判断矩阵的最大特征向量确定各指标层权重。一般采用方均根法求解权重向量。

首先，计算判断矩阵中每一行元素的相应几何平均值，得到向量 M 。

$$m_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n b_{ij}}, \quad i=1,2,3 \cdots n \quad (4-12)$$

$$M = [m_1 \quad m_2 \quad \dots \quad m_n]^T$$

其次，对向量 M 做归一化处理，得到最后的权重向量 w 。

$$w_i = m_i / \sum_{i=1}^n m_i \quad (4-13)$$

$$w = [w_1 \quad w_2 \quad \dots \quad w_n]^T$$

经过求解判断矩阵的权重向量，可以得到判断矩阵的最大特征值为：

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(Aw)_i}{w_i} \quad (4-14)$$

式中 $(Aw)_i$ 是判断矩阵左乘权重向量后得到的对应向量的第 i 个分量。

经计算后可得到判断矩阵所对应的权重向量和最大特征值，并进行矩阵一致性检验。

4.3.3 权重向量的计算

通过前文的环境影响分类，可以把整体环境影响作为目标决策层，把不同的环境影响类型看作是子目标层，从而构建一个适用于污水处理厂环境影响分

	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇	P ₈	P ₉	P ₁₀
不可再生资源消耗 P ₁	1	2	3	4	4	5	6	7	8	9
可再生资源消耗 P ₂	1/2	1	2	3	3	4	5	6	7	8
全球变暖影响 P ₃	1/3	1/2	1	2	2	3	4	5	6	7
水质影响 P ₄	1/4	1/3	1/2	1	1	2	3	4	5	6
水体富营养化影响 P ₅	1/4	1/3	1/2	1	1	2	3	4	5	6
人体健康影响 P ₆	1/5	1/4	1/3	1/2	1/2	1	2	3	4	5
光化学烟雾影响 P ₇	1/6	1/5	1/4	1/3	1/3	1/2	1	2	3	4
酸化影响 P ₈	1/7	1/6	1/5	1/4	1/4	1/3	1/2	1	2	3
空气质量影响 P ₉	1/8	1/7	1/6	1/5	1/5	1/4	1/3	1/2	1	2
填埋空间消耗 P ₁₀	1/9	1/8	1/7	1/6	1/6	1/5	1/4	1/3	1/2	1

图 4-22 判断矩阵

析的层次模型。采用九标标度法，通过两两对比不同的环境影响类别的影响范围和影响程度，得到不同环境影响类型相对重要性的判断矩阵如图 4-22 所示。

经公式 4-12 计算后，得到每一行几何平均值所构建的向量 M ，

$$M = [4.130 \quad 3.007 \quad 2.101 \quad 1.405 \quad 1.405 \quad 0.933 \quad 0.638 \quad 0.444 \quad 0.316 \quad 0.232]^T$$

经公式 4-13 计算后，得到判断矩阵所对应的权重向量 w ，

$$w = [0.282 \quad 0.206 \quad 0.144 \quad 0.096 \quad 0.096 \quad 0.064 \quad 0.044 \quad 0.030 \quad 0.022 \quad 0.016]^T$$

经公式 4-14 计算可以得到，判断矩阵的最大特征值为：

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} \frac{(Aw)_i}{w_i} = 10.425$$

$$CI = (10.425 - 10) / (10 - 1) = 0.047$$

$$CR = CI / RI = 0.047 / 1.49 = 0.032 < 0.1$$

所以，所构建判断矩阵满足一致性要求，所得权重向量为：

$$w = [0.282 \quad 0.206 \quad 0.144 \quad 0.096 \quad 0.096 \quad 0.064 \quad 0.044 \quad 0.030 \quad 0.022 \quad 0.016]^T$$

因此，根据权重向量得到不同环境影响类型的权重值，如图 4-23 所示。

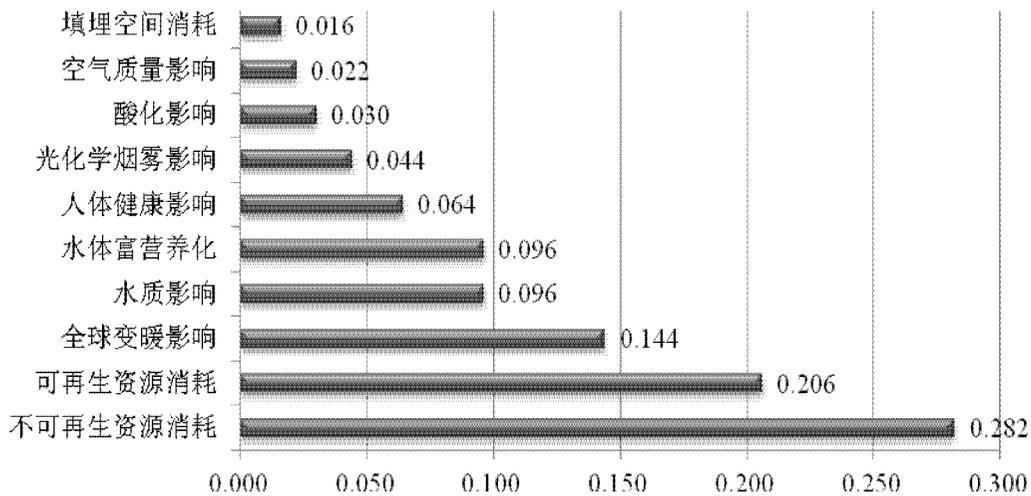


图 4-23 环境影响类别权重分布图

从图 4-23 中可以看出，由于不可再生资源消耗后不可恢复，且当今世界能源危机日趋严重，所以本文对不可再生资源所赋权重较大为 0.282；可再生资源主要是水资源的消耗，由于当今世界水污染严重、水资源日益短缺并且水资源更新时间较长，所以本文对可再生资源消耗所赋权重结果为 0.206；全球变暖因其影响为全球范围，影响时间较长，所以所赋权重较大，为 0.144；水质影响、水体富营养化属于流域性影响，影响时间短，所以所赋权重为 0.096；人体健康影响、光化学烟雾影响、酸化影响、空气质量影响和填埋空间消耗为区域性影

响,影响时间短,所以所赋权重较小,依次为 0.064、0.044、0.030、0.022 和 0.016。

4.3.4 加权评估

通过对特征化结果加权之后,得到污水处理厂最终的生命周期评价结果,它反映了污水处理厂在其生命周期内对外部环境的总的压力,如表 4-14 所示。

表 4-14 环境影响类别量化结果

影响类别	权重	建设阶段	运营阶段	拆除阶段	总计
可再生资源消耗 t/FU	0.206	680.15	375.95	—	1056.1
不可再生资源消耗 t/FU	0.282	43.450	1279.270	3.720	1326.440
全球变暖影响潜能 t/FU	0.144	133.679	2576.752	7.442	2717.873
光化学烟雾影响潜能 t/FU	0.044	0.016	0.433	0.001	0.450
酸化影响潜能 t/FU	0.030	0.140	5.459	0.016	5.615
水体富营养化影响 t/FU	0.096	0.0058	5.916	0.00004	5.922
水质影响 t/FU	0.096	0.654	36.200	0.0002	36.854
空气质量影响 t/FU	0.022	0.103	5.953	0.016	6.072
填埋空间消耗 t/FU	0.016	60.624	135.126	8.256	204.008
人体健康影响 t/FU	0.064	1.398×10^{-4}	0.008	0.00002	0.008
总计	1	918.822	4421.067	19.451	5359.344

从表 4-14 中可以看出,污水处理厂在其生命周期内对外部环境的总的压力为 5359.344t/FU。其中建设阶段为 918.822t/FU,运营阶段为 4421.067t/FU,拆除阶段为 19.451t/FU。如图 4-24 和图 4-25 所示。

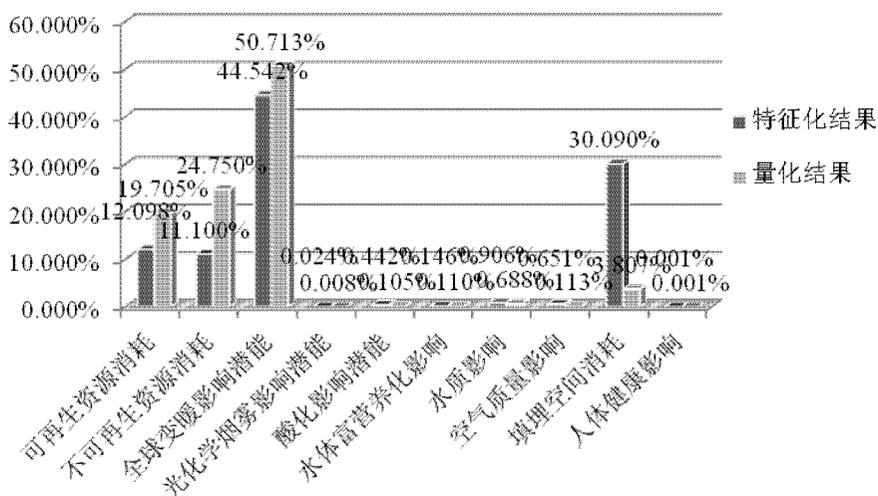


图 4-24 环境影响类别量化结果

从图 4-24 中可以看出,污水处理厂在其生命周期内对外界环境影响最大的

为全球变暖影响，占总环境影响负荷的 50.713%。其次为不可再生资源消耗 24.750%，可再生资源消耗 19.705%，填埋空间消耗 3.807%，水质影响 0.688%，空气质量影响 0.113%，水体富营养化影响 0.110%，酸化影响 0.105%。光化学烟雾影响 0.008%，对人体健康影响不足 0.001%。

同特征化结果相比，由于不同环境影响类型所赋权重不同，量化结果所占比重有所变化。全球变暖影响因其为全球性影响，影响时间较长，在赋权过程中所赋权重较大，其比重由 44.542%上升为 50.713%；不可再生资源消耗因其不可再生性，在赋权过程中所赋权重较大，量化结果与特征化结果相比由 11.100%上升为 24.750%。填埋空间消耗影响范围较小，所赋权重最小，其量化结果所占比重与特征化结果相比，由 30.090%减小为 3.807%。

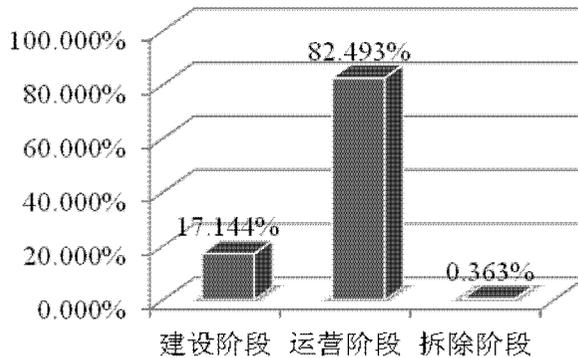


图 4-25 各生命周期阶段环境影响量化结果

从图 4-25 中可以看出，运营阶段对污水处理厂生命周期内总的环境影响贡献最大，为 82.493%，其次为建设阶段 17.144%，拆除阶段 0.363%。各生命周期阶段的环境影响如图 4-26 所示。

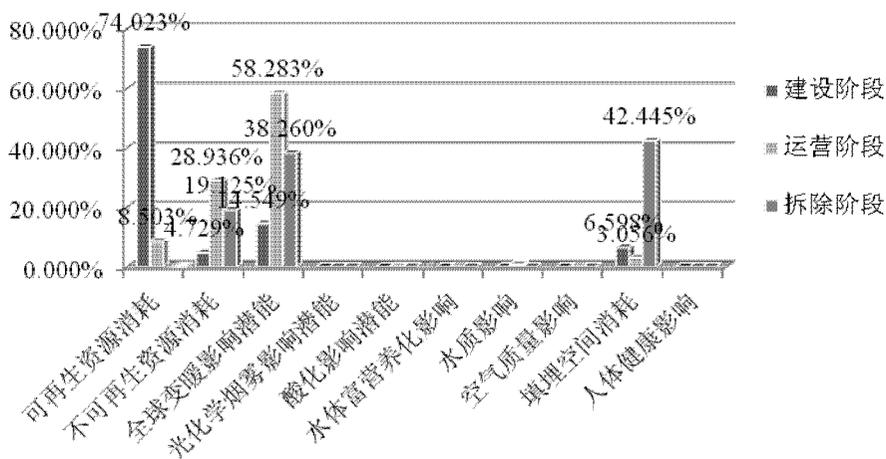


图 4-26 各生命周期阶段环境影响分析

从图 4-26 中可以看出，污水处理厂建设阶段对环境贡献最大的可再生

资源消耗，为建设阶段环境影响负荷的 74.023%；其次依次为全球变暖影响 14.549%；填埋空间消耗 6.598%；不可再生资源消耗 4.729%；水质影响 0.071%；酸化影响 0.015%；空气质量影响 0.011%；光化学烟雾影响 0.002%；水体富营养化影响 0.001%；人体健康影响 0.001%。污水处理厂运营阶段对环境的影响最大的为全球变暖影响，为运营阶段总环境影响负荷的 58.283%，其次依次为不可再生资源消耗 28.936%，可再生资源消耗 8.503%；填埋空间消耗 3.056%；水质影响 0.819%；空气质量影响 0.135%；水体富营养化影响 0.134%；酸化影响 0.123%；光化学烟雾影响 0.010%；人体健康影响 0.001%。污水处理厂拆除阶段对环境的影响最大的是填埋空间消耗，为拆除阶段总环境影响负荷的 42.444%，其次依次为全球变暖 38.260%；不可再生资源消耗 19.125%；空气质量影响 0.082%；酸化影响 0.082%；水质影响 0.001%；水体富营养化 0.001%；人体健康影响 0.001%。

4.4 本章小结

本章主要是根据美国 EPA 公布的生命周期评价中环境影响类别的特征化模型对清单分析的数据进行特征化，并采用九标标度法和层次分析法对不同的环境影响类型进行赋权，得到了呼兰区城市污水处理厂最终的环境影响为 5359.344t/FU，其中对环境的影响最大的为全球变暖影响，2717.873t/FU，为总体环境影响的 50.713%，其次为不可再生资源消耗，1326.440t/FU，为总体环境影响的 24.750%。在污水处理厂各生命周期阶段中，对环境的影响最大的为运营阶段，4421.067t/FU，为总体环境影响的 82.493%。

第5章 城市污水处理厂生命周期解释

生命周期解释贯穿于生命周期评价的整个过程，它是以研究目的和范围界定、清单分析、影响评估等几个阶段为基础，通过分析结果、识别问题的方式来形成结论，并提出相应的建议。根据 GB/T24043—2002 和 ISO14043—2000 中的要求，生命周期解释通常包括问题识别、评估和报告三个要素。

5.1 重大问题识别

问题识别通常是确定研究目的和范围以及在评价过程中各要素之间的相互作用对清单分析和影响评价的结果进行组织和分析，以便对问题进行识别。通常包括信息识别和组织与问题确定两个步骤。

5.1.1 信息的识别和组织

通过污水处理厂的生命周期过程分析可以看出，污水处理厂在其生命周期内对外界环境影响最大的为全球变暖影响，2717.873t/FU，占总环境影响负荷的50.713%。其次，依次为不可再生资源消耗，1326.440t/FU，为总体环境影响的24.750%，可再生资源消耗 1056.1t/FU，19.705%，填埋空间消耗 204.008t/FU，3.807%，水质影响 36.854 t/FU，0.688%，空气质量影响 6.072 t/FU，0.113%，水体富营养化影响 5.922 t/FU，0.110%，酸化影响 5.615 t/FU，0.105%，光化学烟雾影响 0.450 t/FU，0.008%，对人体健康影响 0.008 t/FU，不足 0.001%。

将污水处理厂分为不同的生命周期阶段可以看出，运营阶段是污水处理厂向环境释放污染物质的主要阶段为 4421.067t/FU，占污水处理厂整个生命周期过程的 82.493%。其次为建设阶段 918.822t/FU，为总体环境影响的 17.144%，拆除阶段 19.451t/FU，为总体环境影响的 0.363%。

(1) 建设阶段信息识别和组织

建设阶段对环境的总体影响中，可再生资源消耗贡献最大，为 680.15t/FU，为建设阶段总体环境影响的 74.023%，其主要影响因子是水资源，主要来自于施工建设过程、钢材、混凝土等建材生产过程；其次为全球变暖影响，133.667t/FU，为建设阶段总体环境影响的 14.549%，其主要影响因子为 CO₂，主要来自与钢材、混凝土等建材的生产和运输过程；填埋空间消耗 60.624t/FU，为建设阶段总体环境影响的 6.598%，其影响因子为固体废弃物，主要来自于钢

材、混凝土和挤塑苯板等建材的生产过程；不可再生资源的消耗，43.45t/FU，为建设阶段总体环境影响的4.729%，其影响因子主要为石油和煤等化石能源，石油的消耗主要是各种建材的道路运输过程，煤的消耗主要是钢材、混凝土和挤塑苯板等建材的生产过程；水质影响为0.654t/FU，为建设阶段总体环境影响的0.071%，影响因子为COD和SS，主要来自于混凝土、涂料、棉织品和挤塑苯板等建材的生产过程；酸化影响0.14t/FU，为建设阶段总体环境影响的0.015%，影响因子为NO_x和SO₂，主要来源于钢材、混凝土等建材的生产和道路运输过程；空气质量影响0.103t/FU，为建设阶段环境影响的0.011%，影响因子为TSP，主要来自于钢材和混凝土的生产过程；光化学烟雾影响为0.016t/FU，为建设阶段环境影响的0.002%，影响因子为CO、NO_x、SO₂，主要来自于钢材和混凝土等建材的生产和运输过程；水体富营养化影响0.0058t/FU，为建设阶段环境影响的0.001%，影响因子为TN、TP和COD，主要来自于混凝土、钢材、涂料、棉织品和挤塑苯板等建材的生产过程；人体健康影响0.0001398t/FU，不足建设阶段环境影响的0.001%，影响因子为NO_x、SO₂和TSP，主要来自于钢材、混凝土等建材的生产过程。

(2) 运营阶段信息识别和组织

运营阶段对环境的总体影响中，全球变暖影响最大，2576.752t/FU，为运营阶段总体环境影响的58.283%，影响因子为CO₂、NO_x、CH₄、CO和CH₄，主要来自于污水处理厂运营过程中所耗电能的生产和污水处理厂冬季取暖燃煤等过程；第二为不可再生资源消耗，1279.27t/FU，为运营阶段总体环境影响的28.936%，影响因子为煤和石油，煤的消耗主要是污水处理厂运营过程中所耗电能的生产和冬季取暖燃煤，石油的消耗主要是栅渣、沉砂、剩余污泥和燃煤的道路运输过程；可再生资源消耗，375.95t/FU，为运营阶段总体环境影响的8.503%，影响因子为水，主要是运营过程中投加药剂混合用水和工作人员的生活用水；填埋空间消耗，135.126t/FU，为运营阶段总体环境影响的3.056%，影响因子为固体废弃物，主要是污水处理厂运营过程中预处理间所产生的栅渣、旋流式沉砂池所产生的沉砂和污泥脱水间所产生的剩余污泥；水质影响，36.2t/FU，为运营阶段总体环境影响的0.819%，影响因子为COD和SS，主要来自于污水处理厂的出水排放；空气质量影响，5.953t/FU，为运营阶段总体环境影响的0.135%，影响因子为TSP，主要来自于污水处理厂运营过程中所耗电能的生产和冬季取暖燃煤过程；水体富营养化影响，5.916t/FU，为运营阶段总体环境影响的0.134%，影响因子为TN、TP和COD，主要来自于污水处理厂的出水排放；酸化影响，5.459t/FU，为运营阶段总体环境影响的0.123%，影响

因子为 SO_2 和 NO_x ，主要来自于污水处理厂运营过程中所耗电能的生产和水厂冬季取暖燃煤；光化学烟雾影响，0.433t/FU，为运营阶段总体环境影响的 0.010%，影响因子为 CO 、 NO_x 、 SO_2 ，主要来自于污水处理厂运营过程中所耗电能的生产和水厂冬季取暖燃煤和道路运输燃油；人体健康影响，0.008t/FU，不足运营阶段总体环境影响的 0.001%，影响因子为 NO_x 、 SO_2 和 TSP，主要来自于污水处理厂运营过程中所耗电能的生产和水厂冬季取暖燃煤和道路运输燃油。

(3) 拆除阶段信息识别和组织

拆除阶段对环境影响最大的为填埋空间消耗，8.256t/FU，为拆除阶段总体环境影响的 42.445%，影响因子为固体废弃物，主要是污水处理厂拆除过程中所产生的建筑垃圾；第二为全球变暖影响，7.442t/FU，为拆除阶段总体环境影响的 38.260%，影响因子为 CO_2 、 NO_x 、 CH_4 、 CO 和 CH ，主要来自于拆除阶段所耗电能的生产和建筑垃圾的道路运输过程；不可再生资源消耗，3.72t/FU，为拆除阶段总体环境影响的 19.125%，影响因子为煤和石油，煤的消耗主要是拆除阶段所耗电能的生产和过程，石油的消耗主要是建筑垃圾的道路运输过程；酸化影响，0.016t/FU，为拆除阶段总体环境影响的 0.082%，影响因子为 SO_2 和 NO_x ，主要来自于拆除阶段所耗电能的生产和建筑垃圾的道路运输过程；空气质量影响，0.016t/FU，为拆除阶段总体环境影响的 0.082%，影响因子为 TSP，主要来自于拆除阶段所耗电能的生产和过程；光化学烟雾影响，0.001t/FU，为拆除阶段总体环境影响的 0.005%，影响因子为 CO 、 NO_x 、 SO_2 ，主要来自于拆除阶段所耗电能的生产和建筑垃圾的道路运输过程；其余环境影响较小，不足 0.001%。

5.1.2 重大问题的确定

通过对污水处理厂生命周期的信息识别和组织可以看出，污水处理厂整个生命周期内对全球变暖、不可再生资源消耗、可再生资源消耗和填埋空间消耗的影响较大，需从整个生命周期的角度对污水处理厂所产生的 CO_2 、 CH_4 、 NO_x 等温室气体的排放，石油消耗、煤耗、水资源消耗和固体废弃物的产生加以控制。污水处理厂建设阶段、运营阶段和拆除阶段都是以全球变暖影响、不可再生资源消耗、可再生资源消耗和填埋空间消耗的影响较大，需在建材生产和施工建设过程、污水处理厂运营过程和拆除施工过程中对 CO_2 、 CH_4 、 NO_x 等温室气体的排放、石油消耗、煤耗、水资源消耗和固体废弃物的产生加以控制。

5.2 评估

评估是对整个生命周期评价的步骤进行检查，确保生命周期评价所需的数据和信息已完整获得，并通过对数据和结论的不确定性分析来评价其可靠性。结合本次生命周期评价的特点，本文对研究目的和范围界定阶段、清单分析阶段和影响评价阶段进行了评估。

5.2.1 研究目的和范围阶段评估

根据生命周期评价的要求，本文将污水处理厂的生命周期阶段界定为建设阶段（原材料生产及施工建设阶段）、运营阶段（污水处理、出水排放及污泥处理阶段）和拆除阶段（污水处理厂保费拆除阶段）三个部分，实现了对污水处理厂从“摇篮”到“坟墓”的界定，并对这一过程中的环境影响进行分析。研究目的和范围明确，为清单分析和影响评价提供了良好的基础。

5.2.2 清单分析阶段评估

清单分析是对生命周期内的数据收集和分析，是整个生命周期评价的基础。本文在对污水处理厂生命周期进行分析时，其输入项主要为不可再生资源（煤和石油）、可再生资源（水），输出项主要为废气（ CO_2 、 CO 、 CH_4 、 NO_x 、 CH_4 、 SO_2 ）、废水（ COD 、 SS 、 TP 、 TN ）和固体废弃物。本文在对输入和输出数据进行收集时，建材生产阶段数据根据国内外现有生命周期评价结果获得，数据可靠性较高；施工建设阶段数据通过现场实地调查获得，数据较准确；运营阶段数据通过对污水处理厂运行过程的实际监测获得，数据准确定较高；拆除阶段数据通过对国内建筑物拆除过程的类比调查获取，数据具有一定的可信度。总的来说，污水处理厂生命周期清单数据可信度较高，符合数据分析要求。

5.2.3 影响分析阶段评估

本文在对生命周期内的输入和输出数据进行影响评价时，以美国 EPA 公布的评价模型进行特征化分析，并采用九标标度法和层次分析法对不同的环境影响类别进行赋权和量化，最终得到污水处理厂生命周期对环境的综合影响，得到的结论比较真实，能够反映污水处理厂的实际情况。

5.3 生命周期结果及改善分析

5.3.1 生命周期结果

本文采用生命周期评价的方法对污水处理厂生命周期内的环境影响负荷进行分析,通过采用美国 EPA 公布的环境影响计算方法和模型进行特征化,九标度法和层次分析法计算权重,得到污水处理厂生命周期内环境影响负荷为 5359.344t/FU。在所考虑的各种环境影响类型中,污水处理厂对全球变暖影响贡献最大,为 2717.873t/FU,为总体环境影响的 50.713%,其次为不可再生资源消耗 1326.440t/FU,为总体环境影响的 24.750%。在污水处理厂各生命周期阶段中,对环境影响最大的为运营阶段 4421.067t/FU,为总体环境影响的 82.493%。

通过对污水处理厂生命周期内问题识别可以发现,对污水处理厂环境影响贡献较大的影响因子为:CO₂、SO₂、NO_x、CH₄、煤、石油、固体废弃物等。这些影响因子主要由建材生产、电的生产、取暖燃煤、道路运输和剩余污泥处理等过程产生。

5.3.2 建设阶段改善分析

污水处理厂建设阶段的对全球变暖、不可再生资源消耗和填埋空间消耗的影响较大,这些环境影响较主要来自于建材生产和道路运输过程。针对污水处理厂建设阶段所存的环境问题本文提出如下改进措施:

(1) 合理选择建筑材料,大量使用绿色建材。

污水处理厂建设阶段的环境影响主要来自于建材的生产过程,其中以钢材和混凝土所产生的环境影响最大。根据清单分析显示污水处理厂建设阶段所耗钢材在其生产阶段产生 CO₂ 10393.878t, CH₄ 22.826t, CO 13.943t, NO_x 20.280t, SO₂ 64.644t, TSP 57.040t, CH 2.498t; 建设阶段所耗混凝土在其生产阶段产生 CO₂ 4475.403t, CH₄ 50.744t, CO 49.506t, NO_x 19.803t, SO₂ 16.090t, TSP 39.605t, CH 0.936t。建议在污水处理厂建设过程中合理选择建筑材料,以绿色建材为主。如建筑垃圾再生混凝土、掺粉煤灰混凝土等。根据相关文献报道^[36],在保证混凝土质量的前提下,可通过掺入粉煤灰减少混凝土生命周期范围内的污染物排放,具体结果如表 5-1 所示。

表 5-1 掺粉煤灰混凝土污染物减少量

影响较少量	掺 55% I 级粉煤灰	掺 40% II 级粉煤灰	掺 10% III 级粉煤灰
煤耗	30.6%	22.3%	5.6%
CO ₂	31.4%	22.8%	5.7%
SO ₂	28.0%	22.5%	5.0%
NO _x	37.5%	25.1%	4.9%
量化结果(t/FU)	12.80	9.54	2.15

本文所用混凝土若为掺入 55% I 级粉煤灰混凝土可减少环境影响负荷 12.80t/FU，若为掺入 40% II 级粉煤灰的混凝土可减少环境影响负荷 9.54t/FU，若为掺入 10% III 级粉煤灰混凝土可减少环境影响负荷 2.15t/FU。因此，采用绿色建材不仅可以实现废物的资源化利用，还可以明显降低污水处理厂建设阶段对环境的影响。

(2) 节约施工能源的使用，

建议在污水处理厂施工建设过程中合理选择施工设备，如节能设备等，减少因设备的不必要使用而造成能源的浪费；对施工设备进行定期维护和保养，保证施工设备的正常运行，避免设备的不正常运转而造成能源浪费；合理使用建筑材料，节约材料，减少建筑材料的浪费，提倡使用绿色建材。

5.3.3 运营阶段改善分析

污水处理厂运营阶段对全球变暖影响、不可再生资源消耗、可再生资源消耗的和填埋空间消耗的影响较大，针对污水处理厂运营现状本文提出如下改进措施：

(1) 增加燃煤锅炉的烟气处理设备。

呼兰区城市污水处理厂采用自设锅炉的方式实现冬季取暖，年耗煤量为 175t，无烟气处理设备，产生各类污染物为：烟尘 19.09t/a，SO₂1.12t/a，CO₂516.3t/a，CO9.8t/a，NO_x1.3t/a。建议增加对锅炉烟气的处理，增加除尘设备，以除尘效率 80%计算，可以减少烟尘 15.272t/a；建议增加对烟气的吸收处理，可同时去除 SO₂ 和 NO_x，以去除率为 80%计算，可减少 SO₂ 0.896t/a，NO_x 1.04t/a。可减少污水处理厂对全球变暖影响、空气质量影响、酸化影响和光化学烟雾的影响。

(2) 改锅炉燃煤供热为城市集中供热。

哈尔滨市呼兰区主城区集中供热热源为哈尔滨市第三发电厂，呼兰区污水处理厂距离呼兰区主城区约 1 公里，可采用该热源供热。哈尔滨市第三发电厂

总装机容量 160 万 kw, 供热面积 1300 万 m², 采用静电除尘器, 除尘效率在 99% 以上, 并设有脱硫系统, 脱硫率在 85% 以上, 工业废水回用率 100%, 粉煤灰综合利用率在 50% 以上。可明显减少呼兰区污水处理厂因取暖燃煤而造成的不可再生资源消耗和 CO₂、SO₂、NO_x、CH₄ 等温室气体的排放。

(3) 实现对污泥减量化、稳定化和综合利用。

呼兰区城市污水处理厂产生剩余污泥 5475t/a, 是污水处理厂运营阶段对填埋空间消耗的主要影响因子, 目前的处理方法为卫生填埋。根据我国有关城市污水处理厂剩余污泥的土地利用标准, 建议将呼兰区污水处理厂的剩余污泥土地综合利用。目前关于剩余污泥土地综合利用的方法有很多, 如污泥自然风干农田施用、污泥干燥和造粒后农田施用、污泥堆肥农田施用和污泥制复合肥后农田施用。剩余污泥土地综合利用投资较少, 能耗较低。同时, 还可以改良土壤, 实现剩余污泥的资源化, 减少污水处理厂运营过程中对填埋空间的消耗。

5.3.4 拆除阶段改善分析

通过对拆除阶段的生命周期分析可以看出, 拆除阶段对环境影响最大的为填埋空间的消耗, 42.445%。通过清单分析可以看出, 污水处理厂拆除阶段产生固体废弃物共 12900.5t, 其中建筑垃圾为 12787.01t。根据我国建筑垃圾的相关研究成果和现有处理水平, 建议对建筑垃圾实现资源化再生利用, 如实现建筑垃圾再生骨料, 废旧混凝土循环利用, 建筑垃圾再生混凝土, 建筑垃圾再生砂浆, 建筑垃圾再生墙体材料等。即可减少对填埋空间的消耗, 又可以减少对混凝土等建材的使用, 减少对环境的影响。通过对拆除阶段建筑垃圾的资源化利用, 可使拆除阶段的填埋空间消耗减少至 1.816t/FU。

5.4 本章小结

本章对生命周期的各个阶段进行了综合的分析与评估, 并对污水处理厂运行过程中多造成的环境影响进行了问题识别。最终确定该污水处理厂主要的环境影响为全球变暖、不可再生资源消耗、可再生资源消耗和填埋空间消耗, 主要的影响因子为 CO₂、SO₂、NO_x、CH₄、煤、石油、固体废弃物。并根据这些影响因子的来源, 针对生命周期的不同阶段提出了相应的控制和减量化措施。

结 论

本文按照 ISO14040 和 GB24040-2008 中有关生命周期评价的要求,对哈尔滨市呼兰区城市污水处理厂进行了生命周期分析,得到了该污水处理厂环境影响负荷的综合水平。为后续污水处理厂建设和现有污水处理厂的改造工程提供了有关的数据支持,同时也为污水处理厂的可持续发展提供了理论支持。通过对哈尔滨市呼兰区城市污水处理厂的生命周期分析,得到以下结论:

(1) 采用申明周期评价的方法分析污水处理厂,以该污水处理厂的年处理量为功能单位 (FU=730 万 t/a),通过对各类环境影响的量化分析得到,呼兰区城市污水处理厂的综合环境影响负荷为 5359.344t/FU,其中贡献最大的环境影响类型为全球变暖影响,2717.873t/FU,为总体环境影响的 50.713%,其主要影响因子为 CO₂、CH₄、NO_x、CO 和 CH;其次为不可再生资源消耗,1326.440t/FU,为总体环境影响的 24.750%,其主要影响因子为煤和石油;可再生资源消耗 1056.1t/FU, 19.705%,其主要影响因子为水资源;填埋空间消耗 204.008t/FU, 3.807%,其影响因子为固体废弃物;水质影响 36.854 t/FU, 0.688%,其影响因子为 SS 和 COD;空气质量影响 6.072 t/FU, 0.113%,其影响因子为 TSP;水体富营养化影响 5.922 t/FU, 0.110%,其影响因子为 TP、TN 和 COD;酸化影响 5.615 t/FU, 0.105%,其影响因子为 SO₂、NO_x;光化学烟雾影响 0.450 t/FU, 0.008%,其影响因子为 CO、NO_x、SO₂;对人体健康影响 0.008 t/FU,不足 0.001%,其影响因子为 SO₂、NO_x和 TSP。

(2) 在污水处理厂各生命周期阶段中,对环境影响最大的为运营阶段,4421.067t/FU,为总体环境影响的 82.493%,其环境影响主要来自于运营阶段中所耗电能的生产和冬季取暖的燃煤过程。

(3) 根据生命周期分析的结果,本文针对不同生命周期阶段的环境影响因子提出了相应的控制措施。建议污水处理厂建设阶段合理选择建材和节约施工能源;建议运营阶段增加锅炉尾气的处理设备,改自建锅炉供热为城市集中供热,实现对污水处理厂污泥的减量化、稳定化和资源化;建议对拆除阶段的建筑垃圾进行资源化再生处理。

参考文献

- [1] 胡名操.污水处理技术发展年谱[J].建筑技术通讯（给水排水）.1982.12.27
- [2] 刘欣铠.国内外城市污水处理现状及展望[J].防灾博览.2005.10.28
- [3] 国外城市污水处理厂的建设及运行管理.世界环境，2000.
- [4] 德国的污水处理[N].中国水利报，2004.
- [5] 中国住芬兰使馆经商处.芬兰：引领绿色竞争的潮流[N].国际商报，2010-06-23(009)
- [6] Anne-Marie Tillman, Mikael Svingby, Henrik Lundstrom.Life Cycle Assessment of Municipal Waste Water Systems [J]. LCA Case Studies. 1998, 3(3), 145-157.
- [7] Alsina X F, Gallego A, Feijoo G, et al. Multiple-objective evaluation of wastewater treatment plant control alternatives [J]. Journal of Environmental Management, 2010, 91: 1193-1201.
- [8] Almudena Hospido, M Teresa Moreira, Maria Martin, etal. Environmental Evaluation of Different Treatment Processes for Sludge from Urban Wastewater Treatnebts: Anaerobic Digestion versus Thermal Processes [J]. Int J LCA. 2005:10(5)336-345.
- [9] N.Tangsubkul, P.Beavis, S.J.Moope, etal. Life Cycle Assessment of Water Recycling Technology [J]. Water Resources Management 2005(19):521-537.
- [10] Stephane Lassaux, Robert Renzoni, Albert Germain. Life Cycle Assessment of Water from the Pumping Station to the Waste Water Treatment Plant [J]. Water Management. 2007, 12(2_118-126.
- [11] Mohamed Taefic Ahmed. Life Cycle Assessment, A Decision Making Tool in Wastewater Treatment Facilities [J]. Wastewater Reuse-Risk Assessment, Decision Making and Environment Security.2007, 305-314.
- [12] Ortiz M, Raluy R G, Serra L. Life cycle assessment of water treatment technologies: wastewater and water-reuse in a small town [J]. Desalination, 2007, 24: 121-131.
- [13] Ortiz, Oscar, Castells, et al. Sustainability in the construction industry: a review of recent developments based on LCA [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23 (1): 28-39.
- [14] Lim S R, Park D, Park J M. Environmental and economic feasibility study of a

- total wastewater treatment network system [J]. Journal of Environmental Management, 2008, 88: 564-575.
- [15] Almudena Hospido, Ma Teresa, Gumersindo Feijoo. A Comparison of Municipal Wastewater Treatment Plants for Big Centres of Population in Galicia (Spain)[J]. LCA Case Studies-Wastewater Treatment Plants. 2008, 57-64.
- [16] Adriana Del Borghi, Michela Gallo, Marco Del Borghi. A Survey of Life Cycle approached in waste management [J]. Life Cycle Assess. 2009, 14:597-610.
- [17] Foley J, Haas D, Hartley K, et al. Comprehensive life cycle inventories of alternative wastewater treatment systems [J]. Water Research, 2010, 44: 1654-1666.
- [18] Margareta Lundin, Gregore Morrison. A Life Cycle Assessment Based Procedure for Development of Environmental Sustainability Indicators for Urban Water Systems [J]. Urban Water. 2002(4):145-152.
- [19] Houillon, Jolloet. Life Cycle Assessment of Processes for the Treatment of Wastewater Urban Sludge: Energy and Global Warming analysis [J]. Journal of Cleaner Production 2005(13):287-299.
- [20] Sajidu, Masamba. Water Quality Assessment in Streams and Wastewater Treatment Plants of Blantyre, Malawi [J]. Physics and Chemistry of the earth, 2007(32):1391-1398.
- [21] 高志刚.我国污水处理现状、发展对策及趋势[J].商品与质量, 2011.12
- [22] 郑绍红,徐琼华.国内城市污水处理工艺综述[J].海岸工程.2004, 3
- [23] 杨健,郝一舒.污水处理厂环境影响的生命周期分析[J].环境导报.No.5, 1999
- [24] 陈郁,郑洪波,杨凤林,等.城市污水处理厂生命周期评价方法初探及应用案例[J].大连理工大学学报.Vol 43. No.3. May.2002
- [25] 王巧.污水再生利用工程生命周期评价研究[D].西安:西安建筑科技大学, 2006.
- [26] 周凌.城市污水处理厂环境效益的生命周期分析[D].重庆:重庆大学.2006.
- [27] 熊家晴,王巧,王晓昌.污水处理工程生命周期环境影响评价量化方法及其应用[J].中国可持续发展研究会 2006 年学术会议
- [28] 王梅,周新平.金霞市城市污水处理厂生命周期评价研究[J].平顶山工学院学报,2007:6(3)
- [29] 林璐.给予生命周期评价方法的九江流域污水处理厂综合评价研究[D].厦门:厦门大学, 2008

- [30] 余建鹏,郑泽根.城市污水处理厂全过程生命周期评价模式探讨[J].土木建筑与环境工程.Vol 31.No.2, Apr.2009
- [31] 孟翔宇,污水处理厂的生命周期评价[D].合肥:合肥工业大学.2009
- [32] 曹冰.污水处理工程能耗成本与环境效益生命周期评价[D].西安:西安建筑科技大学.2010
- [33] 吉倩倩.生命周期评价在城市污水处理的环境效益分钟的应用[D].西安:西安建筑科技大学,2010
- [34] Console F, D. Allen, Boustead. Guidelines for Life Cycle Assessment: a code of practice [M]. SETAC, Pensacola, 1993.
- [35] ISO/D ISO14040. Environmental Management Life Cycle Assessment Part: Principles and Framework[S].1997.
- [36] 王小兵,邓南圣.生命周期评价[M].北京:化学工业出版社.2003
- [37] 黄春林,张建强,沈淞涛.生命周期评价综论[J].环境技术.2004(1)
- [38] 樊庆铎,敖红光,孟超.生命周期评价[J].环境科学与管理.2007:32(6)
- [39] Thomason M A, Dolman M A, Calker H J, et al. Relating life cycle assessment indicators to gross value added for Dutch dairy farms [J]. Ecological Economics, 2009, 68: 2278-2284.
- [40] 陈红,郝维昌,石凤,等.几种典型高分子材料的生命周期评价[J].环境科学学报.2004, 24(3)
- [41] Furuholt. Life Cycle Assessment of gasoline and diesel [J]. Resources, Conservation and Recycling, 1995, 14(3):251-263
- [42] 伍跃辉,陈爱燕,王震,等.聚氯乙烯生产过程生命周期评价[J].环境科学与技术.2010.33(5)
- [43] 汤传毅,万融.棉织品的生命周期清单分析[J].上海纺织科技.2003, 31(6)
- [44] 储险峰,李娜,刘艳.橡胶阻尼材料的生命周期清单分析[J].江西科学.2010 .28(3)
- [45] 姜睿,王洪涛.中国水泥工业的生命周期评价[J].化学工程与设备,2010.4
- [46] 陈庆文,马晓茜.建筑陶瓷的生命周期评价[J].中国陶瓷.2008.44(7)
- [47] 洪紫萍,程晶波.聚酯的生命周期评价[J].聚酯工业,2003,16(5)
- [48] 袁宝荣,聂祚仁,狄向华,等.中国化石能源生产的生命周期清单—生命周期清单的编制结果[J].现代化工.2006.4(26)
- [49] 李小东,王帅,孔祥琴,等.预拌混凝土生命周期评价[J].土木工程学报.2011.1(44)

- [50] 罗楠.中国烧结砖制造过程环境负荷研究[D].北京:北京工业大学.2009
- [51] 李晓鹏.我国卫生陶瓷生命周期影响评价研究[D].北京:北京工业大学.2009
- [52] 马岩,曹磊,周才华,等.典型化工产品生命周期影响评价研究—以水性涂料产品为例[J].环境科学与技术.2011.11(34)
- [53] 王智慧,李强,蒋剑敏,等.药芯焊丝生命周期评价[J].北京工业大学学报.2007.11(33)
- [54] 杨建新,刘炳江.中国钢材生命周期清单分析[J].环境科学学报.2002.4(22)
- [55] 狄向华,聂祚仁,左铁镛.中国火力发电燃料消耗的生命周期排放清单[J].中国环境科学.2005.25(5)632-635
- [56] 王祎,项乔君,常玉林,等.城市交通系统能源消耗与环境影响分析方法[M].北京:科学出版社,2002
- [57] 李伟,傅立新,郝吉明,等.中国道路机动车10种污染物的排放量[J].城市环境与城市生态.2003,16(2)
- [58] 武慧君.基于生命周期评价的建筑物环境影响分析[D].大连:大连理工大学.2006.
- [59] 李秋义.建筑垃圾资源化再生利用技术[M].北京:中国建材工业出版社.2011
- [60] 李小东.层次—灰色关联分析法及其在污水处理方案优选中的应用[D].太原:太原理工大学.2006
- [61] 魏丽,王瑛.基于AHP的模糊灰色耦合理论在污水处理工艺优化设计中的应用研究[D].兰州:兰州理工大学,2009:7-19...

攻读硕士学位期间发表的论文及其它成果

（一）发表的学术论文

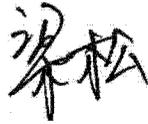
- [1] Qingxin Fan, Song Liang, Yang Yu. Life Cycle Assessment of the Construction Process of an Urban Wastewater Treatment Plant.: .The 2nd International Conference on Civil Engineering and Urban Planning (CEUP 2012).

哈尔滨工业大学学位论文原创性声明及使用授权说明

学位论文原创性声明

本人郑重声明：此处所提交的学位论文《基于 LCA 的污水处理厂环境影响负荷研究》，是本人在导师指导下，在哈尔滨工业大学攻读学位期间独立进行研究工作所取得的成果。据本人所知，论文中除已注明部分外不包含他人已发表或撰写过的研究成果。对本文的研究工作做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式注明。本声明的法律结果将完全由本人承担。

作者签名：



日期：2012 年 7 月 7 日

致 谢

衷心的感谢我的导师樊庆铎老师对本文的精心指导，本文论是在樊老师的悉心指导下完成的，从论文的开始到结束的每一个阶段都倾注了樊老师的大量心血，我的论文的每一点进步都和樊老师的严格督促和悉心教诲分不开的。

在这两年的研究生生活中，樊庆铎老师对我产生了极大的影响和教育作用，不仅让我学习到了严谨的学习和工作态度，更让我明白了许多为人处世的道理，让我更好的适应了社会，让我受益匪浅。再次，再一次向我的导师樊庆铎老师致以衷心的感谢。

同时，感谢哈尔滨工业大学环保科技有限公司和哈尔滨市呼兰区城市污水处理厂对我的论文给予的帮助。

第三，感谢我的同学和朋友们在这一段时间给予我的鼓励和支持，使得我的论文能够顺利完成。

最后，我要感谢各位评阅老师在论文完成过程中给予的指导意见。