



申请同济大学工学硕士学位论文

应用生命周期分析的酒精企业 清洁生产研究

培养单位：环境科学与工程学院

一级学科：环境科学与工程

二级学科：环境科学

研究生：谭斌

指导教师：蒋大和 教授

二〇〇七年四月



申请同济大学工学硕士学位论文

应用生命周期分析的酒精企业 清洁生产研究

培养单位：环境科学与工程学院

一级学科：环境科学与工程

二级学科：环境科学

研究生：谭斌

指导教师：蒋大和 教授

二〇〇七年四月



A dissertation submitted to
Tongji University in conformity with the requirements for
the degree of Master of Engineering

Study on cleaner production for alcohol distillery with the tool of LCA

School/Department: School of Environmental
Science and Engineering

Discipline: Environmental Science and
Engineering

Major: Environmental Science

Candidate: Bin Tan

Supervisor: Prof. Da-he Jiang

April, 2007

学位论文版权使用授权书

本人完全了解同济大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意如下各项内容：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版；学校有权保留学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务；学校有权按有关规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；在不以赢利为目的的前提下，学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

学位论文作者签名：

2007年4月20日

同济大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律 responsibility 由本人承担。

学位论文作者签名： 

2007 年 4 月 20 日

摘要

随着人类社会的发展，环境污染问题日益加剧。环境保护成为建设和谐社会的重要议题。工业污染是环境问题的重要方面，人类解决工业污染问题的进程经历了由末端治理到源头控制的发展阶段。清洁生产着重源头控制，即在设计生产工艺和过程中就考虑减少原材料的使用，减少能源消耗或提高能源使用效率，减少污染物的排放。因此清洁生产理念是一种新的、创造性的思维方式，是工业环境管理的一大进步，也是实现可持续发展的必由之路。目前企业实施清洁生产的主要手段是通过清洁生产审计发现问题，再针对问题采用或研发相应技术来解决问题。因此清洁生产审计是企业实施清洁生产的重要前提。

针对人类社会面临资源、能源匮乏，环境污染日益严重的问题，人们进一步提出了生命周期评价（LCA）的理念和评价管理方式。“从摇篮到坟墓”，LCA是一种对产品、工艺或活动的整个生命周期对环境造成的影响进行定量分析与定性评价的工具。LCA可以应用于不同范围。在政府层面，LCA可以用来帮助政府制定各种政策和计划，主要有面向产品的政策，废物管理政策和一般性的面向工艺和过程的政策。在企业层面，LCA强调生产的全过程，并进一步分析评价关于能源、资源消耗和排放污染物的环境影响。因此LCA也是补充清洁生产审计、促进清洁生产的有效工具。将LCA的技术方法应用于清洁生产审计中，通过细致、全面的清单分析和定量评价，可以更好的建立企业生产与环境压力之间的关系，从而对企业的环境管理提供技术和决策支持。

本文介绍和讨论了LCA的理念和实施技术框架。在1997年颁布的ISO14040标准中，把LCA的技术方法分为目的和范围的确定、清单分析、影响评价和结果解释四部分。本文将以这四个技术步骤为基础进行研究。

LCA的研究涉及到大量的数据和信息，如何方便、有效地处理数据、信息，是LCA工作的一大挑战；同时，为了LCA的研究具有更好的连续性，LCA的各种技术方法的也需要形成系统的模型。为解决以上问题，各种LCA软件应运而生。本文采用了最新的LCA软件SimaPro。SimaPro是荷兰Leiden大学环境科学中心（CML）开发，并得到UNEP支持在全球推广应用。该软件采用“集合”的概念实现产品系统的模块化，并且集成了世界上最先进的生命周期评价

方法和数据库。本文研究了 SimaPro 的工作方式，并详细介绍了其应用方法。

酒精行业是一个传统产业，也是一个高能耗高污染产业，其环境问题由来已久。运用清洁生产的理念解决酒精生产中的环境问题，对我国酒精行业具有重要意义，因此国家已经制订了酒精行业清洁生产技术要求的试行标准（HJ/T XX-2002）。但目前尚未见到在企业层面的酒精生产 LCA 的研究和实践工作。

在对 LCA 的技术方法进行梳理的基础上，本文建立了我国酒精企业基于 LCA 方法的清洁生产审计方式。另外，本文以新太酒精厂为案例，借助最新的 LCA 软件 SimaPro，进行酒精生产的 LCA 研究。通过清单分析，确定了酸雨效应、温室效应、资源消耗、富营养化效应、人体毒性和光化学烟雾六种影响类型。选用 CML 1992 v2.1 模型，对清单结果作特征化的处理，分析得出酒精生产不同单元过程对 6 种环境影响的贡献大小。通过综合分析特征化结果，本案例得出如下结论：整个酒精生产系统中，与环境影响关系最大的是蒸馏产生的废醪液，以及锅炉燃烧产生的大气污染物，另外，发酵过程中也会产生大量的二氧化碳。由此，可以识别出重点单元过程，进而提出了 4 套清洁生产方案。

关键词：生命周期评价，酒精，清洁生产，清洁生产审计，软件

ABSTRACT

Along with the development of human society, environment pollution has been becoming increasingly serious. Environmental protection is an important issue in building a harmonious society. Industry pollution is a great part of environmental pollution. People have come through the process from end-of-pipe control to pollution prevention to combat industrial pollution. The latter also refers to cleaner production. In cleaner production, early as at the design stage, actions are considered to reduce the use of raw material, reduce energy consumption, and/or reduce pollutant emissions. Therefore, cleaner production focuses on source control. The concept of cleaner production is a new and innovative in industrial pollution control, and a great step forward in industrial environmental management. What's more, cleaner production is also oriented to sustainable development. To promote and implement cleaner production, it is necessary to conduct a cleaner production auditing. With the result of cleaner production auditing, the enterprise recognize the main issues in production associated with environment impact, and then uses or develops responding techniques to overcome the problems. Therefore, cleaner production auditing is a important step in implementing cleaner production.

Faced with the shortage of resources and energy, and the increasingly severer problem of environmental pollution, the concept and methodology of life-cycle assessment (LCA) have been brought forward. LCA is a management tool that makes quantitative analysis and qualitative assessment. LCA can be used on several levels. On the governmental level, LCA can help make policies and plans, e.g. product oriented policy, waste management policy and the general process-oriented policy. On the enterprises' level, LCA focuses on all the production processes, and analyzes and assesses environmental impacts on energy and resource consumption, and pollutant emission. Therefore, LCA is an effective tool that promotes cleaner production auditing and cleaner production implementation. The use of LCA methodology in cleaner production auditing, with comprehensive inventory analysis and quantitative assessment, can help establish the connection between production and environmental

ABSTRACT

stresses. Consequently, enterprises can get technical and decision support in environmental management.

This paper introduces and discusses the idea of LCA and technology framework. The ISO14040 standard issued in 1997, defines the technical method of LCA involved with four parts: goal and scope definition, inventory analysis, impact assessment, and interpretation. The study of this paper is based on the four steps of the LCA technical method.

The LCA research is involved with massive data and information. It is a great challenge to LCA study how to process the data and information effectively and conveniently. What's more, for a better continuity of the LCA research, several LCA technological methods need to form systematic models. In order to solve these issues above, kinds of LCA software emerge. In this paper, lately LCA software SimaPro is introduced. SimaPro is developed by the Environmental Science Center (CML) of Leiden University in Dutch, and promotes worldwide on the support of UNEP. The software uses the concept of 'Assembly' to realize modulation of product system. This paper studies the way SimaPro works, and introduces the application method in detail.

Alcohol production is a conventional industry, and also an industry that consumes large quantity of energy and disposes large quantity of pollutants, of which the environmental issue is a Long-standing one. As a trend, to manage the environmental issue in alcohol industry with the idea of cleaner production makes great sense. Therefore, Chinese government has drafted a provisional standard of technology requirement on cleaner production in alcohol industry. However, up to the present, there is no domestic research found on alcohol LCA at the enterprises' level.

This thesis studies the LCA methodology, and then establishes the method of cleaner production auditing based on LCA for alcohol distilleries in China. This thesis also makes a LCA study of Xintai alcohol distillery of Taichang as a case study. In the case study, the LCA software SimaPro is used. On life-cycle inventory analysis, acidification, greenhouse, energy, eutrophication, human toxicity and photochemical smog are made impact types associated with this study. CML 1992 v2.1 is used as an impact assessment model in this study. In the characterization step, inventory result is

ABSTRACT

processed. Analysis result is rate of contributions to environmental impacts of each unit progress. On a comprehensive analysis of the characterization result, conclusions are found: in the whole alcohol production system, waste mash solution from the distillation process and air pollutants from coal-burning boilers have the largest contribution to environment impacts. Besides, CO₂ from the fermentation process also has large contribution to environmental impacts. Thus, key unit progresses are identified, and consequently, 4 sets of projects for cleaner production are proposed.

Key Words: Life Cycle Assessment, Alcohol, Cleaner production, Cleaner production audit, Software

目录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 研究背景	1
1.2.1 工业发展模式转变的趋势	1
1.2.2 酒精行业现状分析	2
1.2.3 我国酒精行业存在的问题	4
1.2.4 生命周期理论在环境管理中的应用	6
1.3 研究意义	6
1.4 研究进展	7
1.4.1 生命周期理论的研究和应用	7
1.4.2 关于酒精行业的研究情况	10
1.4.3 酒精生产技术	11
1.4.4 小结	11
1.5 本文的研究内容和技术路线	12
1.5.1 主要研究内容	12
1.5.2 技术路线	13
第 2 章 生命周期评价理论	14
2.1 生命周期评价 (LCA) 理论的发展历程	14
2.1.1 生命周期评价的起源	14
2.1.2 生命周期评价的初期研究	14
2.1.3 生命周期评价的迅速发展时期	15
2.1.4 生命周期评价概念和标准的提出	15
2.1.6 小结	16
2.2 生命周期评价 (LCA) 理论框架	17
2.2.1 生命周期评价(LCA)的定义与分类	17

2.2.2 LCA 的技术特点	18
2.2.3 生命周期评价在清洁生产中的应用	19
2.2.4 生命周期评价 (LCA) 的技术框架	21
2.5 生命周期评价理论的启示	31
第 3 章 LCA 应用软件	32
3.1 LCA 软件的开发和应用	32
3.2 SimaPro 的工作原理与应用	33
3.2.1 简易方法使用 SimaPro	34
3.2.2 常规方法使用 SimaPro	34
第 4 章 酒精生产的生命周期评价方法和过程	47
4.1 酒精企业的清洁生产	47
4.1.1 清洁生产的概念及内涵	47
4.1.2 清洁生产审计	48
4.1.3 国内酒精企业的清洁生产审计	48
4.2 酒精企业环境管理中应用 LCA 的意义	50
4.3 酒精企业的 LCA 技术方法和过程	50
4.3.1 酒精生产 LCA 的前提条件与背景知识	50
4.3.1.4 糖蜜原料酒精生产过程	53
4.3.2 酒精企业 LCA 的技术过程	53
4.3.3 基于 LCA 的清洁生产模式	60
第 5 章 酒精企业 LCA 案例—以太仓市酒精厂为案例	61
5.1 案例研究背景—新太酒精厂概述	61
5.2 运用 SimaPro 进行酒精生产的生命周期分析	62
5.2.1 目的与范围的确定	63
5.2.2 清单分析	65
5.2.3 SimaPro 中各生产单元数据的输入	68
5.2.4 影响评价	72

5.3 案例总结	84
第 6 章 结论与展望	85
6.1 结论	85
6.2 进一步工作的方向	86
致谢	88
参考文献	89
附录 特征化因子(CML 1992 v2.1).....	94
个人简历 在读期间发表的学术论文.....	108



第 1 章 绪论

1.1 引言

人类社会发展到今天，创造了无数前所未有的物质文明和精神文明，但随着科学技术的进步，工业与经济的发展，人口的激增，人类忽视了环境和资源的保护。如今，人类的各种活动已经造成了对环境的严重污染和自然生态资源的破坏，保护和改善环境已成为全世界共同关心的话题。然而，人们对于环境保护的观念是不断更新的。从最初的污染末端治理，到 20 世纪 80 年代中后期人们对污染预防(Pollution Prevention)和清洁生产(Cleaner Production)的认识逐步提高，说明面对复杂的工业生产系统，从全生命周期的角度，综合考虑环境问题，已成为工业生产中环境管理的趋势。

酒精作为一种工业产品，广泛应用于食品、医药、工业等各种领域。同时，由于世界能源危机，酒精作为石油的一种替代能源，可以有效缓解石油危机带来的能源短缺^{[1]-[4]}。从酒精的整个生命过程来看，光合作用合成葡萄糖需要的二氧化碳量，与酒精发酵燃烧释放的二氧化碳量相等，在总量上不增加大气中的二氧化碳量。使用燃料酒精是消除由于汽车尾气中二氧化碳排放引起的温室效应最有效的措施之一。因此，酒精还是一种具有广阔发展前景的清洁能源。目前，我国酒精生产企业(包括车间)已达 900 多个，遍布全国各地，酒精年生产能力 300 多万吨，仅次于美国、巴西，居世界第三位。随着我国国民经济的发展，酒精的需求量将会进一步增加。同时，酒精企业生态化潜力是巨大的。因为酒精工业是一种高能耗、高污染的产业，在其生命周期过程中，其对环境产生的影响不可忽视。

1.2 研究背景

1.2.1 工业发展模式转变的趋势

人类在解决资源和环境问题上，经历了长期的历史演变。从生产与环境的

关系角度讲，工业的发展也大致经历了三个阶段：一、当人类早期的活动只是简单的采集自然资源，用后即弃，废弃物完全依靠自然界消化，即在工业化初期，环境问题不明显，工业污染处于自由排放阶段，是一种“资源—产品—废物”的模式；二、随着工业化的快速发展，环境质量急剧恶化，工业发展经历了末端治理阶段，企业逐步开始对排放的污染物进行治理，如德国拜耳公司（Bayer）1898年建立了公司自己的环境监测和控制部门，1901年成立了防水委员会，1966年建起了废水处理的焚烧炉和填埋场^[5]；三、随着认识水平的提高，人们进一步意识到，对工业污染物的最好治理就是源头减量，工业生产进入污染预防的发展阶段，即清洁生产阶段。清洁生产从清洁能源、清洁产品、清洁工艺等角度入手，较好地解决了过程层次的资源和环境问题。联合国环境署与1989年在全球开展清洁生产计划。我国于1992年开始引进清洁生产。1997年起推动清洁生产政策机制，2002年颁布《清洁生产促进法》，并展开多样性的清洁生产实践，如国家经贸委负责的“中加清洁生产项目”^[6]。

在今天资源枯竭和污染肆意的状况下，人类已逐渐认识到先污染后治理的道路是一条弯路，它造成资源和投入的巨大浪费。由此，我们可以看出，随着人们认识水平的提高以及实践经验的愈加丰富，也为了克服“末端控制”所造成的经济上的不可行性和生态上的再污染性，工业生产中的环境管理越来越注重对工业环境问题的整体认识，即“源头控制”、“污染预防”思想的运用，它要求从生产的始端开始，对整个生产过程进行控制，在生态上，具有低消耗、少污染和无公害的特征。因此，要求向生产系统投入的原料和能源是清洁的，而且生产系统向外输出的产品也要是清洁的。另外，“全生命周期”的思想也越来越多的融入企业环境管理中。这些思想标志着企业环境管理从“被动”到“主动”的转变，使企业的发展进入“绿色”阶段。

1.2.2 酒精行业现状分析

工业生产中环境问题日益突出的同时，工业环境管理思想也在不断发展，而酒精行业是一种传统产业，在工业进程中占有重要地位，其环境问题也倍受关注。下面就酒精行业现状的初步分析，也是本文研究的前提和背景之一。

1.2.2.1 国外酒精行业现状

目前为止，从生产方式来看，世界上绝大多数酒精产品（90%以上）为发酵

法生产。其原料来源十分广泛：包括谷物、糖蜜、果汁、葡萄酒、乳清、纤维素和其它原料。其中，使用糖蜜作原料生产的酒精产量较大，占世界酒精总产量的 45%左右，如巴西、巴基斯坦、澳大利亚、墨西哥等国家全部采用糖蜜作原料生产酒精。使用淀粉质原料经发酵法生产的酒精比例不大，仅占世界酒精总产量的 16%左右。此外，一些森林资源丰富，造纸工业发达的国家，如瑞典、挪威、芬兰、奥地利、加拿大等，纸浆废液酒精占很大比例。由于化学合成法生产的酒精逐渐增多，使发酵酒精的比例下降，例如美国、英国、日本、俄罗斯、德国、法国等工业化国家，其合成酒精的产量在国内已占很大比重。目前世界合成酒精的产量占酒精总产量的 20%左右，超过了淀粉酒精的产量。但是由于合成酒精往往夹杂有异构化高级醇类，对于人的高级神经中枢有麻痹作用，不适于作饮料、食品、医药和香料等用途，所以迄今为止，合成酒精尚不能完全取代发酵酒精。

1.2.2.2 国内酒精生产情况

我国酒精生产也以发酵法为主，但 80%左右的酒精都用淀粉质原料生产，其中 65~70%的工厂采取薯干为原料，但在广东、广西、福建、四川、台湾等省主要以甘蔗糖蜜发酵生产酒精；华北、东北、西北地区则以甜菜糖蜜发酵生产酒精者较多，采用糖蜜为原料生产酒精约有 15%的厂家。其他尚有以亚硫酸盐纸浆废液和木屑酸水解液为原料生产酒精，产量约占酒精总产量的 1.5%；我国合成酒精的生产才开始起步，产量还较小，约占酒精总产量的 3.5%。近年来，随着引进设备及工艺的应用及农作物结构的变化，用谷物（主要是玉米）原料制酒精的工厂发展速度较快，特别在东北地区最为明显^[7]。

1.2.2.3 小结

从以上介绍的内容我们可以看出，尽管目前世界的酒精产业以发酵法为生产工艺占了绝大多数比例，然而由于发酵法的原料不同，在这方面我国酒精生产方式与国外存在较大差异。因此我们需要研究适合国内情况的酒精行业清洁生产模式。本文的研究工作即是以此为背景之一开展的。

1.2.3 我国酒精行业存在的问题

1.2.3.1 环境污染严重

我国酒精行业年排放废水总量超过 $3 \times 10^8 \text{m}^3$ ，其中酒精糟废液的年排放超过 $4 \times 10^7 \text{m}^3$ ，年排 BOD_5 约 $1.15 \times 10^6 \text{t}$ ， COD_{Cr} 约 $2.2 \times 10^6 \text{t}$ ，分别占全国工业废水 BOB_5 总量的 18% 和 COD_{Cr} 排放总量的 12.5%，是我国有机污染物排放量大、造成环境污染严重的行业之一^[7]。

表 1.1 我国酒精行业与国内外排放标准的差距

单位: mg/L

企业现状与排污标准			COD		BOD ₅		SS	
			薯类	玉米	薯类	玉米	薯类	玉米
企业平均排污浓度			5200	3700	2400	2000	1300	950
我国排放标准	一级	98年1月1日后建企业	100	100	20	20	70	70
	一级	97年12月31日前建企业	100	100	30	30	70	70
	二级	98年1月1日后建企业	300	300	100	100	150	150
	二级	97年12月31日前建企业	300	300	150	150	200	200
德国排放标准			200	200	30	30		

表 1.1^[8]列出了我国酒精行业主要污染物的排放浓度与国内外排放标准的对比。从中可以看出，我国酒精行业各项污染物排放浓度均大大超过国家《污水综合排放标准(GB8978-1996)》1998年1月1日后建企业的二级排放标准，其中薯类酒精企业 COD、BOD₅、SS 的平均排放浓度分别是二级排放标准的 17 倍、16 倍和 6.5 倍，玉米酒精企业 COD、BOD₅、SS 的平均排放浓度分别是二级排放标准的 12 倍、13 倍和 4.8 倍，污染之严重可谓触目惊心。

1.2.3.2 酒精企业清洁生产方法有待改进

酒精生产作为一种传统工业，从环境保护的角度来说，其发展也经历了如前所述的三种污染治理模式，即自由排放→末端治理→污染预防。我国的酒精工业也不例外。

污染预防，即清洁生产理念，是一种污染的源头控制方法，是将整体预防的环境战略持续应用于生产过程、产品和服务中，以增加生态效率和减少人类健康及环境的风险^[9]。实施清洁生产，是企业环境管理的一大成功，是20世纪80年代以来全球环境污染物排放量增速减缓的重要手段^[10]。清洁生产审计是清洁生产理论的核心，清洁生产方案的制定和实施也都是建立在清洁生产审计对于企业管理和生产工艺分析的基础上；同时，清洁生产审计也是目前清洁生产的主要工具。因此，目前国内很多酒精企业已经进行了清洁生产审计的工作，这为清洁工艺的采用，进一步实施企业清洁生产打下了很好的基础。

然而，随着企业环境管理实践的丰富和理论的深入，清洁生产理论及方法有待进一步改进。主要表现在：

(1) 清洁生产主要是针对企业内部的活动。企业主要采用内部管理、原材料替代等简便、直接的方法实现“源头控制”和减少环境影响，一般的方法包括防止跑冒滴漏、节能和改进包装等。有研究表明，清洁生产要取得一定成效，通常需要经历一到两年的时间^[11]。很多企业更多关注的只是那些无费/低费的清洁生产方案，因此很少对产品和过程技术进行重大变革，而只是优化其生产过程。目前企业是在没有政府管理机构和消费者强制的情况下实施清洁生产，主要是考虑到污染预防具有经济回报，同时又是好的生产实践，其次才是减少环境污染。然而，在人们日益重视企业社会责任的今天，企业的清洁生产应该更多的关注环境影响。因此，目前清洁生产审计对企业外部的环境压力考虑不够，不能确切的知道污染排放或能源或物质的利用对环境的影响程度。另外，从技术上来讲，清洁生产审计没有建立起企业内部生产与外部环境影响的定量化关系。因此，从这个角度看，对环境影响程度的定量化便是企业清洁生产在技术环节上的挑战，同时也是新的机会。

(2) 清洁生产的发展趋势，便是越来越注重将全生命周期的思想运用到实际操作中来。清洁生产审计的大体思路，即是通过建立企业生产的流程图，利用物料平衡分析相应物质的输入、输出和物料流失的具体位置，通过对废物、能源进行评估，判明废弃物的产生部位、分析废弃物的产生原因、提出方案减少或消除废弃物。在企业内部，任何减少原材料、减少能源消耗、减排污染物的活动都是清洁生产的行为。而根据清洁生产的原则，整体预防的发展战略需要更全面地分析企业生产过程及其上游（原料供给方）和下游（产品及废物的接受方）产品全过程的资源消耗和环境状况。因此，清洁生产审计，作为一种评

价的工具，不是从产品全生命周期或者企业生产的全过程角度进行分析、评估。

综合以上两点，为了使传统的清洁生产评价方法更好的满足可持续发展的工业模式的要求，清洁生产审计需要进一步改进其技术方法。本文试图以其他技术工具对酒精企业的环境管理提供技术支持，改进企业的清洁生产方法，以促进酒精企业的生态化进程。

1.2.4 生命周期理论在环境管理中的应用

在全球追求可持续发展的呼声愈来愈高的背景下，提供环境友好产品成为消费者对产业界的必然要求，这就迫使企业将生态问题与整个产品系统联系起来，寻求解决的途径。生命周期评价作为一种面向产品的环境管理工具便是在这样的背景下产生的。

作为新的环境管理工具和预防性的环境保护手段，生命周期评价主要应用在通过确定和定量化研究能量和物质利用及废弃物的环境排放来评估一种产品、工序和生产活动造成的环境负载；评价能源、材料利用和废弃物排放的影响以及评价环境改善的方法^[12]。相对于环境定点分析方法，生命周期评价的优点在于考虑产品或服务的整个生命周期，或者生产活动的全过程，更系统的分析企业生产与环境问题的关系，发现环境问题的源头，是对清洁生产有效的促进手段。

另外，由于LCA的研究涉及到大量的数据、信息，建立数据库和模型方法需要数据、信息的积累，同时也为了更快捷、准确的对数据做出分析，LCA的研究越来越需要新的技术支持。近年来，随着信息与计算技术的发展，利用计算机技术支持LCA极大地提高了信息、数据的处理能力，以及计算和分析的精确性，因此，各种生命周期评价信息系统和应用软件应运而生。新的技术支持和应用软件提高了工作效率，是LCA未来发展的趋势。

1.3 研究意义

生命周期评价（LCA）是一种用于评价产品或服务相关的环境因素及其整个生命周期环境影响的工具。生命周期评价（LCA）方法已经成为一种环境管理国际标准，并将在全球环境领域发挥越来越大的作用。一种产品或服务对环

境的影响往往是多方面的，而人们通常只看到了易于觉察的，末端的环境影响，而忽视其整个生命周期内其他方面与环境的冲突关系。建立生命周期评价方法，可以全面、系统地，并且定量地评价一个产品或服务与环境的关系，从而有助于人们更为准确、客观的修改产品或服务的设计方案，最优化其环境效应。

酒精行业的高污染性，使得我们对于酒精产品进行生命周期分析显得更为必要，通过对酒精生产进行生命周期评价，可以建立酒精企业生产的内部管理与环境影响的定量关系，为企业环境管理提供更多的决策支持，丰富清洁生产的理论，实现可持续发展的企业发展战略。本研究的目的是进行 LCA 方法在酒精企业清洁生产中应用的方法论尝试和探讨，为今后 LCA 在清洁生产中的应用和研究提供一些有价值的方法和依据。

1.4 研究进展

1.4.1 生命周期理论的研究和应用

1.4.1.1 国外对于 LCA 的研究和应用

自生命周期的概念产生以来，在全球范围内尤其是在欧洲和北美国家的大学研究机构和政府机构以及工业界对生命周期评价从理论与方法上进行了广泛的研究并在其应用上进行了各个领域的探索。生命周期评价起源于企业内部且最先在企业部门得到广泛的应用，一些国际著名的跨国企业为龙头如惠普^[13]、IBM^{[14][15]}、AT&T^[16]、德国西门子公司^[17]等一方面开展生命周期评价方法论的研究，另一方面积极对其产品进行生命周期评价。

表 1.2 企业生命周期评价研究

惠普公司	美国	有关打印机和微机的能源效率和废弃物研究
美国电报电话公司	美国	生命周期评价方法论研究，商业电话生命周期评价示范研究
国际商业机器公司	美国	磁盘驱动器生命周期评价示范研究，微机报废及能源效率
数字设备公司	美国	生命周期评价方法论研究，电子数字设备部件的生命周期评价
施乐公司	美国	产品部件报废研究

第 1 章 绪论

西门子公司	德国	各种产品生命周期结束后有关问题研究
奔驰汽车	德国	生命周期评价方法论研究, 空气清洁器生命周期评价师范研究
Loewe-opta	德国	彩色电视机生命周期评价
飞利浦公司	荷兰	广泛开展了各种产品的生命周期评价
菲亚特集团	意大利	汽车发动机生命周期评价示范研究
ABB 集团	瑞典	大规模的环境管理系统研究
爱立信集团	瑞典	无线电系统生命周期评价示范研究
沃尔沃汽车公司	瑞典	生命周期评价方法论
Bang&Olufsen 电器	丹麦	生命周期评价方法论, 机电设备、电冰箱、彩色电视机、高压清洗器等产品的生命周期评价

1969 年美国中西部资源研究所(MRI)的研究者们为可口可乐公司开始的一项研究, 为目前生命周期分析的方法奠定了基础。该研究试图从最初的原材料采掘到最终的废弃物处理, 进行全过程的跟踪与定量分析(从摇篮到坟墓), 目的是对不同的饮料罐做比较来决定哪种罐子对周围环境排放的污染最少, 对自然资源供给的影响最少。该项研究量化了原材料、原油的使用和每种瓶子在生产过程中对环境产生的压力研究结束后, 由国家环保局于 1974 年发表了一份公开的报告, 提出了一系列早期的生命周期评价的研究框架。

生命周期评价的基础是生命周期系统总量数据。欧洲塑料生产协会(APME)^[18]是世界上第一个收集并公开发布其成员公司环境数据的工业组织。最近十几年, 人们在生命周期过程中系统总量(LCI)数据的获得和自由交换方面取得了进展。SPOLD (Society for Promotion of Life-cycle Assessment Development) (1996)^[19]开发了一种数据交换格式, 它定义了 LCI 数据的逻辑结构, 并可在网络运行, 为数据的自由流动提供了技术前提。瑞典的 SPINE (1995)^[20]提出了一个标准化的数据模型和关系型数据库结构, 它可成为 LCA 的“通用语言”。它能处理、构造和存储 LCA 数据的所有相关信息。SPINE 中整套数据和流程的中心概念就是活动和流。

生命周期评价方法学方面, A.B. Culaba 和 M.R.I. Purvis (1999)^[21]提出了一个关于制造工艺的 LCA 方法。它考虑了知识系统的适应性和决策能力。其重

点在于当场废物的最少化以及其与环境影响评价和工艺改进相关的可持续性。其软件模型成功地用于纸和纸浆生产的 LCA 评价。

Goran Finnveden (1999)^[22]研究了用于固体废物管理系统的 LCA 方法学。讨论了 5 个方面：上游和下游系统边界、开环回收的分配、多输入的分配、填埋物污染的时效以及生命周期影响评价。

M.A.J. Huijbregts 等 (2000)^[23]提出了一个计算潜在毒性的改进模型：全球的嵌套式多媒体全周期、排放和影响模型 USES-LCA。它是基于物质评价的统一系统 2.0(USES2.0)。USES-LCA 用于计算 181 种物质在 6 个方面的潜在毒性，它们是排放于有限空气中、淡水中、海水中、工业用土壤和农用土壤中相应产生的淡水生态毒性、海水生态毒性、淡水沉积物生态毒性、海水沉积物生态毒性、陆地生态毒性和人体毒性。

1.4.1.2 LCA 在国内的研究和应用

国内对全生命周期评价的研究起步较晚，而且无论在深度还是在广度上，都与国外发达国家的存在很大的差距。基本上处于对生命周期评价的消化理解^{[24]-[27]}和简单应用上，也有部分工作对 LCA 方法进行了研究。

彭小燕和席德立等人^[28]研究了 LCA 中系统总量分析数据的获得。从我国具体情况出发，开发了一套获取产品 LCA 系统总量数据的方法，介绍了通过行业污染系数获取产品的社会数据以及借助企业生产的质量流程图收集和检验企业数据的具体步骤。以小型垃圾焚烧炉为案例，研究了对象的系统总量数据表，根据该产品的特点，将其生命周期分为 4 个阶段，并按指标体系考察资源消耗、水污染、大气污染、固体废物以及其它类型共 5 类环境要素。

杨建新等人 (1998)^[29]采用目标距离法计算出我国全球变暖酸化和富营养化的权重因子。

刘顺妮等人 (1998)^[30]介绍了生命周期评价方法 LCA 及其在水泥工业中的应用运用环境影响指标标准化和 AHP 权重定量法对硅酸盐水泥进行了较为系统的 LCA 评价得到了硅酸盐水泥环境综合指标。

上海交通大学建立了木薯乙醇燃料周期经济能源和环境评价模型^[31]；清华大学对燃料电池车基础设施进行了生命周期排放评价^[32]。

重庆大学的田亚峰^[33]首次对 LCA 与清洁生产的结合运用进行了尝试，并对泡沫聚苯乙烯 (EPS) 做了 LCA 的案例分析，进行了详细的阐述。

在食品行业方面, LCA 也有应用研究。吉林大学的曹利江^[34]通过对啤酒生产系统的 LCA 研究, 提出了食品行业中基于 LCA 的清洁生产评价模式。由于本文关注酒精企业, 因此该研究方法也对本文的酒精生产 LCA 具有借鉴意义。

在标准的制定方面, 我国参照 ISO 系列国际标准, 于 1999 年和 2000 年相继推出了 GB/T24040—1999《环境管理 生命周期评价原则与框架》及 GB/T24041—2000《环境管理生命周期评价目的与范围的确定和清单分析》等国家标准, 2002 年 4 月出版了 GB/24042《环境管理—生命周期评价—生命周期影响评价》、GB—24043《环境管理—生命周期评价—生命周期解释》^{[37][70]}

1.4.2 关于酒精行业的研究情况

美国和巴西是目前世界上酒精产量最大的两个国家, 其产量占到世界酒精总产量的 60%。其次亚洲和欧洲也是世界酒精的主要生产地。就酒精的用途来说, 它除了是一种饮料, 更主要的用途是作为绿色燃料。世界酒精的 2/3 都用作燃料, 但是作为亚洲第一大酒精生产国, 在燃料酒精的研究和应用方面却处于起步阶段。

自 20 世纪 80 年代中期, 世界酒精产量由于燃料酒精的发展开始迅速增长, 这种快速增长一直持续到 90 年代末。其实, 酒精用于汽车燃料始于汽车的发明伊始, 但很快被价格便宜的汽油所替代。随着 1970 年的石油危机, 巴西率先推出“酒精汽油计划”后, 美国也发起了“汽油醇计划”, 燃料酒精逐步在世界各国开始复兴。在中国燃料酒精于九十年代末开始受到人们的重视, 但是一直未能够达到大规模的应用。

巴西的酒精以糖蜜或甘蔗汁为原料, 产品分为普通酒精(含水 5%) 和无水酒精两种。普通酒精可以单独作为汽车燃料, 但是需要特别设计的发动机。无水酒精则作为添加剂加入汽油中, 最高混入量可达 24%, 而不用改变目前发动机和汽化器的结构。目前巴西的酒精产品中普通酒精占 2/3, 无水酒精占 1/3。

美国的酒精产品主要用作燃料, 主要以玉米为原料。燃料酒精发展比较晚, 几乎是受其国家战略及联带产品市场变动的影 响。国家战略包括寻找替代汽柴油的可再生能源利用, 减少国家对一次性资源石油的严重依赖; 维护农民利益; 增加就业机会; 倡导环境保护。而联带产品市场包括淀粉糖, 甜味剂, 玉米油, DDGS 等, 迎合这个市场是选择生产工艺路线所决定的。

我国酒精生产主要是采用发酵法,大部分共产采用薯干作为原料。解放前我国酒精工业十分薄弱。解放后,随着国民经济的发展与液态法白酒生产的推广,酒精工业有了很快的发展,现全国有生产企业(包括车间)1000多个,遍布除西藏以外的各省、市、自治区,其中以山东、四川两省为最多。目前,我国酒精工业在生产和技术上有了很大的提高,无论是在连续蒸煮、真空冷却、连续糖化、液体曲的使用,还是在连续发酵、中(低)温蒸煮、浓醪发酵、新型高效节能蒸馏塔的应用、优良菌种选育、工艺设备的改造、自动控制 and 综合利用等方面都取得了不少的成就。但企业间的生产水平差距很大,全行业的能源和资源利用率低,大量资源变为“三废”流入环境,不但造成资源浪费,而且造成环境严重污染。

1.4.3 酒精生产技术

目前,国外发达国家的酒精生产技术比较成熟,国外新建的酒精厂大多采用连续发酵法,生产过程实现自动化。国外糖蜜酒精生产大多数采用浓醪连续发酵法,而淀粉质原料的连续发酵在原苏联较为普遍。另外,国外酒精工厂对综合利用及三废处理相当重视。俄罗斯、波兰、匈牙利、德国等国家广泛利用酒精糟生产饲料酵母。日本研究将糖蜜酒精糟用于铸造工业,代替淀粉、糊精等作为翻砂造型时的粘结剂;还研究将浓缩酒精糟加入用石灰水处理过的稻草制成发酵饲料,以提高饲料的营养价值。有的国家用分离的酒糟固形物加入废糟水培养的饲料酵母制成干燥粗饲料,其营养价值和售价均比粮食高1.3倍左右,以此解决了酒糟的利用问题。

现在已有相当部分酒精厂采用低能耗的双酶法液化、糖化工艺和高温活性干酵母连续发酵工艺,同时正在开发发酵成熟醪的差压蒸馏工艺与设备和玉米酒精糟生产 DDGS 工艺和设备。目前,酒精行业尚未有一家企业全部采用酒精生产最新工艺流程中的新工艺、新技术、新设备,不少企业只是部分采用。

1.4.4 小结

通过总结现阶段的国内外研究与实践的进展情况,我们发现:

(1) 国外对于生命周期评价的研究相对成熟,无论是生命周期评价方法论还是应用,而对于 LCA 方法论的研究,主要集中在数据结构、评价模型的研究等。国内在借鉴国外先进成果的基础上,开发了国内的 LCA 模型和数据库。国内也

有 LCA 运用于企业环境管理中的研究先例，然而对于酒精生产企业来说，尚无将 LCA 方法应用到清洁生产中的研究先例。

(2) 酒精作为一个传统的行业，技术不断成熟，同时发展酒精产业，也具有重要的战略意义。而中国作为最大的发展中国家，面对巨大的资源和环境压力，实施清洁生产战略是我国可持续发展的根本途径。由于国外的酒精生产主要是以糖蜜和玉米为原料，例如巴西、澳大利亚、墨西哥等国家，美国是以玉米为主要生产原料；然而，在中国，淀粉质原料，尤其是薯干作为发酵法生产酒精的主要原料。因此，中国的酒精生产方式与国外有一定的差异。而在借鉴国外先进技术的同时，研究适合中国国情的酒精生产模式就具有积极的现实意义。

综上所述，LCA 作为一种先进的环境管理工具，运用在酒精企业环境管理体系中，将企业内部生产活动与外部环境影响建立定量关系，更加系统化的分析清洁生产问题和提出解决方法，是酒精企业环境管理发展的很好的方向。因此，我们有必要针对中国的酒精生产现实情况，进行酒精企业的生命周期评价，从而对国内酒精企业的环境管理工作提供决策支持。

1.5 本文的研究内容和技术路线

1.5.1 主要研究内容

鉴于酒精企业生产中存在的环境问题，以及关于 LCA 方法在酒精行业的应用的研究不足，本文将从生命周期系统化视角切入问题，同时应用最新的 LCA 软件 SimaPro7.0。SimaPro7.0 是一个全功能的 LCA 软件工具，由联合国环境规划署 (UNEP) 和荷兰 Leiden 大学环境科学中心 (CML) 合作开发。利用软件的环境评价模型，进行酒精生产生命周期分析，分析企业生产的环境问题及其根源，针对问题提出解决清洁生产解决方案，同时对将 LCA 的思想和方法融入酒精企业清洁生产的实践进行探索，为企业的环境管理提供决策和技术支持。本研究分为如下几部分：

- (1) LCA 的理论与技术框架的梳理；
- (2) LCA 软件 SimaPro7.0 的工作原理和应用方法；
- (3) 清洁生产审计与 LCA 结合的方法论研究，探讨利用 LCA 作为分析工具支持企业清洁生产的技术方法；

(4) 以太仓市酒精厂为案例, 运用 LCA 软件, 做酒精企业的生命周期评价; 通过分析, 找出企业实施清洁生产的重点, 并提出合理的清洁生产方案。

1.5.2 技术路线

本课题的技术路线如图所示 1.1 所示。

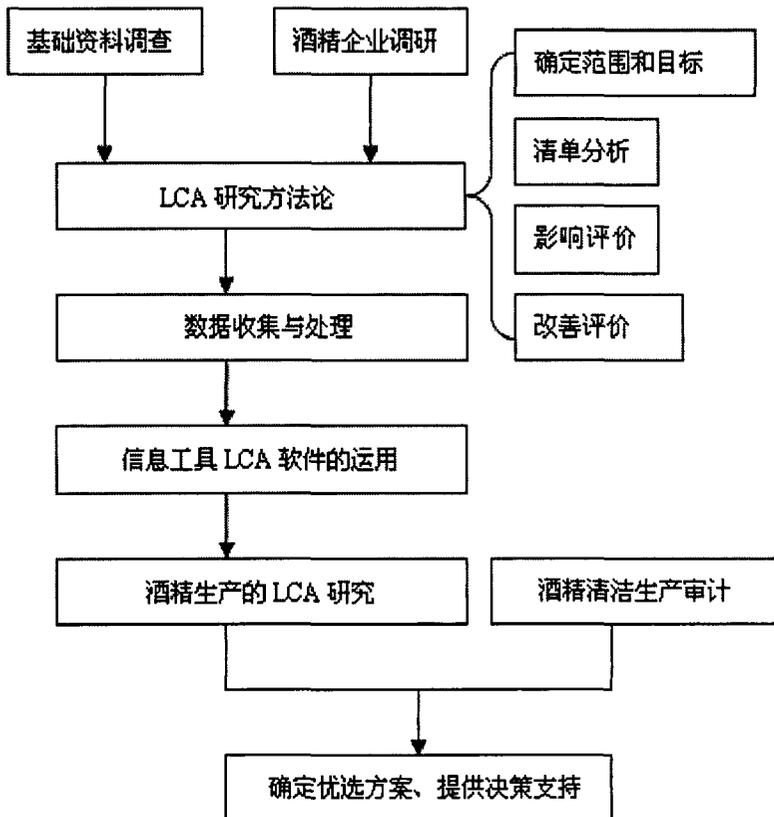


图 1.1 本文的技术路线

第 2 章 生命周期评价理论

环境各要素组成的是一个有机联系的统一整体，孤立地防止某一环境要素的污染并不能从根本上解决问题，必须从整体上采取预防措施，这就是目前在工业界所倡导的在可持续发展思想指导下，对产品整个生命周期进行环境管理的污染预防的发展战略，其最终目标是实现工业系统的生态化。为实现这一目标，国际社会正在探索一些有效的实现工业可持续发展战略的方法。在这种情况下，从生命周期的角度出发，面向产品生命各阶段或生产系统全过程的解决生产过程中环境、资源压力问题的生命周期评价应运而生。

2.1 生命周期评价（LCA）理论的发展历程^{[35]-[39]}

2.1.1 生命周期评价的起源

产品生命周期的研究与实践已有 30 多年的历史，其基本思想始于 20 世纪 60 年代。在 20 世纪 60 年代末至 80 年代初的两次石油危机的背景下，能源问题成为制约工业发展的一个瓶颈，欧美的一些研究机构就已从能源的角度开始了生命周期分析方法的研究工作。最早的生命周期评价研究由美国可口可乐公司发起，1969 年，由该公司中西部资源研究所开展的针对饮料包装瓶评价研究，是公认的生命周期评价研究开始的标志。该研究使可口可乐公司抛弃了它过去长期使用的玻璃瓶，转而采用塑料瓶包装。

2.1.2 生命周期评价的初期研究

20 世纪 70 年代早期，在美国、欧洲、日本的其他公司进行了类似的比较性的生命周期评价分析。1975 年东京野村研究所为日本的利乐公司进行了首次包装生命周期评价研究，通过不同的销售方案对纸盒与玻璃瓶进行比较，完成《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》研究，随后美国 Franklin 协会提出“15 种一次性饮料瓶的能量比较”的报告。这些都可被视为生命周期评价的早期研究成果。

量化产品资源利用和环境排放的过程渐渐被认为是“资源和环境纲要分析 (REPA)”，在美国已经得到实践证实。20 世纪 70 年代环境问题的核心是能源问题，这一时期 REPA 的研究普遍采用能源分析方法。随着 20 世纪 70 年代末到 80 年代中期出现的全球固体废弃物问题，这种研究方法又逐渐成为一种资源分析工具。这一时期的 REPA 均着重于计算固体废弃物产生量和原材料消耗量。因此，REPA 方法也是生命周期评价的雏形。

1984 年，受 REPA 方法的启发，瑞士联邦“材料测试与研究实验室”为瑞士环境部开展了一项有关包装材料的研究，该研究首次采用了健康标准评估系统，即后来所发展的临界体积方法。该实验室据此建立了一个详细的清查数据库。同一年，美国 Little 公司提出了“容器中含有的生命周期能源”的研究报告，其后，苏黎世大学冷冻工程研究所从生态平衡和环境评价等角度出发对生命周期评价进行了较为系统的研究，对开创 LCA 这一新领域起到了决定性的作用。

2.1.3 生命周期评价的迅速发展时期

随着区域性与全球性环境问题的日益严重，全球环境保护意识的加强，可持续发展思想的普及以及可持续行动计划的兴起，大量的资源与环境状况分析研究开始出现，公众和社会开始日益关注研究结果，生命周期评价越来越受到广泛关注，发展迅速。资源与环境状况分析研究涉及到研究机构、管理部门、工业企业、产品消费者等，但其使用资源与环境状况分析的目的和侧重点各不相同，而且所分析的产品和系统也变得越来越复杂，急需加强对资源与环境状况分析的方法研究和统一化。

1989 年荷兰国家居住、规划与环境部针对传统的末端控制环境政策，首次提出了制定面向产品的环境政策。这种面向产品的环境政策涉及到产品的生产，消费到最终废弃物处理的所有环节，即所谓的产品生命周期。该研究提出要对产品整个生命周期内的所有环境影响进行评价，同时也提出了要对生命周期评价的基本方法和数据进行标准化。

2.1.4 生命周期评价概念和标准的提出

1990 年由国际环境毒理学与化学学会 (SETAC) 首次主持召开了有关生命周期评价的国际研讨会，首次提出了“生命周期评价”的概念。1992 年以后，

以美国环境毒性和化学学会为主，组织西方几个国家的有关科研机构成立了五个研究工作组，对 LCA 开展了全面深入的研究工作协调统一有关概念、定义及具体操作自理方法等，使 LCA 有了长足的发展。1993 年 SETAC 出版了一本纲领性报告：“生命周期评价纲要——实用指南”。该报告为生命周期评价方法提供了一个基本技术框架，成为生命周期评价方法论研究起步的一个里程碑。

荷兰政府从 1990 年起，历史三年开展了“荷兰废物再利用研究”，该研究的大量成果，尤其是 1992 年出版的研究报告“产品生命周期评价”，奠定了 SETAC 后来提出的方法论的基础。该研究涉及研究机构、工业企业、环境管理部门以及消费者协会，为后来的生命周期评价跨学科、跨部门合作提供了一种示范。

1993 年美国国家环境保护局（EPA）委托风险降低工程实验室（Risk Reduction Engineering Laboratory）进行了生命周期清单分析的研究，出版了《生命周期评价——清单分析的原则与指南》，比较系统地规范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》，《生命周期影响评价：概念框架、关键问题和方法简介》，这些都使生命周期评价的方法有了一定的依据，使生命周期评价进入实质性的推广之中。

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的共同努力下，生命周期评价方法论的国际标准化取得了重要进展。1997 年国际标准组织推出 ISO14040 标准《环境管理-生命周期评价-原则与框架》、1999 年推出 ISO14041 《环境管理-生命周期评价-目标与范围的确定，清单分析》，其他相关标准如 ISO14042 《环境管理-生命周期评价-生命周期影响评价》、ISO14043 《环境管理-生命周期评价-生命周期解释》已在制定和审查之中。

我国对生命周期评价的工作也极为重视，于 1999 和 2000 年相继推出了 GB/T24040-1999 《环境管理生命周期评价原则与框架》及 GB/T24041-2000 《环境管理生命周期评价目标与范围的确定，清单分析》国家标准，2002 年相继推出了 GB/T24042-2002 《环境管理生命周期评价生命周期影响评价》及 GB/T24043-2002 《环境管理生命周期评价生命周期解释》等国家标准。

2.1.6 小结

生命周期评价（LCA）从企业内部关于资源、环境压力的研究，到系列环境标准在国际社会得到认可，经历了 30 多年的发展。现在已经被认定为环境管

理的有效工具，而生命周期评价的方法论也在不断的成熟，其应用领域也越来越广。因此，生命周期评价在企业的环境管理方面的应用也会随着自身理论的完善而不断有新的发展。

2.2 生命周期评价 (LCA) 理论框架

2.2.1 生命周期评价 (LCA) 的定义与分类

2.2.1.1 LCA 的定义

目前，生命周期评价的定义有多种提法^{[40]-[42]}，政府、企业和一些机构站在各自的立场对它都有一番描述，如：

1) SETAC 的定义^[43]：生命周期评价是一种对产品过程以及活动的环境影响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排放进行辨识和量化来进行的。其目的在于评价能量和物质利用，以及废物排放对环境的影响，寻求改善环境影响的机会以及如何利用这种机会。这种评价贯穿于产品、过程和活动的整个生命周期，包括原材料提取与加工；产品制造运输以及销售；产品的使用、再利用和维护；废物循环和最终废物弃置；

2) 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；

3) 美国 3M 公司的定义：在从制造到加工、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；

4) Procter & Gamble 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责任的态度，是保证环境确实而不是虚假地得到改善的定量方法；

5) 国标 GB/T24040—1999 (ISO14040—1997)：对在一个产品系统的生命中输入、输出及其潜在环境影响的汇编和评价。

将这些概念归结起来，可将 LCA 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全过程，包括原材料的采集、加工、生产、包装、运输、消费和回用以及最终处理等，进行资源和环境影响的分析与

评价。

2.2.1.2 LCA 分类

LCA 按照其技术复杂程度可分为三类：

(1) 概念型 LCA（或称“生命周期思想”）：根据有限的，通常是定性的清单分析评估环境影响。因此，它不宜作为市场促销或公众传播的依据，但可帮助决策人员识别哪些产品在环境影响方面具有竞争优势。

(2) 简化型或速成型 LCA：它涉及全部生命周期，但仅限于进行简化的评价，例如使用通用数据（定性或定量）、使用标准的运输或能源生产模式、着重最主要的环境因素、潜在环境影响、生命周期阶段或 LCA 步骤，同时给出评价结果的可靠性分析。其研究结果多数用于企业内部评估和不要求提供正式报告场合。

(3) 详细型 LCA：包括 ISO14040 所要求的目的和范围确定、清单分析、影响评价和结果解释全部 4 个阶段。常用于产品开发、环境声明（环境标志）、组织的营销和包装系统的选择等。

本研究以太仓市新太酒精厂为案例，研究的目的是为酒精厂的清洁生产服务，即用于改进企业的生产环节，相当于内部评估，故侧重点为简化型的 LCA。

2.2.2 LCA 的技术特点^[44]

2.2.2.1 面向产品系统

在全球追求可持续发展的呼声愈来愈高的背景下，提供对环境友好的产品成为消费者对产业界的必然要求，迫使产业界在其产品开发、设计阶段就开始考虑环境问题，将生态环境问题与整个产品系统联系起来，寻求最有效的解决方案。

2.2.2.2 “从摇篮到坟墓”

生命周期评价是与整个产品系统原材料的采集、加工、生产、包装、运输、消费和回用以及最终处理生命周期有关的环境负荷的分析过程。

2.2.2.3 充分重视环境影响的方法

生命周期评价强调分析产品或行为在生命周期各阶段对环境的影响，包括能源利用、土地占用及排放污染物等，最后以总量形式反映产品或行为的环境

影响程度.生命周期评价注重研究系统在生态健康、人类健康和资源消耗领域内的环境影响。

2.2.2.4 系统性、定量化

生命周期评价以系统的思维方式去研究产品或行为在整个生命周期中每一个环节中的所有资源消耗、废弃物的产生情况及其对环境的影响，定量来评价这些能量和物质的使用以及所释放废物对环境的影响，辨识和评价改善环境影响的机会。

2.2.2.5 开放性评价体系

生命周期评价涉及到化学、物理学、数学、毒理学、统计学、经济学、生态学、环境学等理论和知识，应用分析技术、测试技术、信息技术、工程技术、工艺技术等，适应清洁生产、可持续发展的需要，因此，其方法论也是持续改进、不断进步的，同时，针对不同的产品系统，可以应用不同的技术和方法。

2.2.3 生命周期评价在清洁生产中的应用

LCA 在国外已经得到广泛应用。在清洁生产方面，主要有两个层次：^[45]

(1) 在政府层次，LCA 主要用于帮助制定和实施以下几方面的政策和计划：

① 面向产品的政策：例如，利用 LCA 方法，制定环境友好的产品和服务的购买政策，即绿色采购政策。

② 废物管理政策：废物处置可视为一种特殊的生产过程，其中，原材料就是废物本身。因此，LCA 可用于优化废物处置过程，选择最佳废物处置方案，制定押金——偿还计划。在包装政策制定方面，许多国家采用 LCA，研究牛奶包装、啤酒瓶和啤酒罐、PVC 包装等包装材料的环境影响，帮助制定相关政策。

③ 一般性的面向工艺和过程的政策：在欧洲，欧盟在制定“包装和包装法”时明确将关于 LCA 的条款纳入了法令的内容；比利时政府 1993 年作出决定，根据环境负荷的大小对包装和产品征税，其中环境负荷大小就是用 LCA 方法确定的。丹麦政府和企业间的一个约定中，向企业提出了对 LCA 的要求，据此，他们用了 3 年时间，对 10 种产品类型进行了生命周期评价。

(2) 在企业层次，LCA 主要用于产品的比较和改进以及产品的生态设计。其中，生态设计要求在产品开发的所有阶段均考虑环境因素，以便从产品的整个

生命周期减少对环境的影响，最终引导产生一个更具有可持续性的生产和消费系统。

根据我国清洁生产的发展现状和趋势，LCA 将会在以下几个方面发挥较大作用^[46]：

(1) 清洁生产审计

清洁生产审计是对企业的生产和服务实行预防污染的分析 and 评估，其审计的具体对象是企业生产的产品和生产过程。清洁生产审计思路是“判明废物产生的部位—分析废物产生的原因—提出方案以减少或消除废物”。LCA 作为一种环境评估工具用于清洁生产审计，可以保证更全面地分析企业生产过程及其上游（原料供给方）和下游（产品及废物的接受方）产品全过程的资源消耗和环境状况，找出存在的问题，提出解决方案。

(2) 产品和工艺的清洁生产技术规范制订

生命周期理论是判断产品和工艺是否真正属于清洁生产范畴的基础，在这方面，LCA 可以作为最有效的支持技术之一。

(3) 清洁产品设计和再设计

清洁产品设计或称产品环境设计或生态设计，是 LCA 最重要应用之一。它在产品开发和革新中，充分考虑产品整个生命周期的环境因素，从真正的源头预防污染物的产生。

(4) 废物回收和再循环管理

在 LCA 基础上，给出废物处置的最佳方案，制订废物管理的政策措施（如押金—偿还计划、再循环含量要求等），即所谓的生命周期管理。推广生命周期管理，可以促进废物的资源化和再利用，从而在一定程度上有助于循环经济的发展。

(5) 区域清洁生产的实现—生态工业园的园区分析和入园项目的筛选

生态工业园的最主要特征是：园区中各组成单元间相互利用废物，作为生产原料，最终实现园区内资源利用最大化和环境污染的最小化。LCA 由于考虑的是产品生命周期全过程，即既考虑产品的生产过程（单元内），亦考虑原材料获取和产品（以及副产品、废物）的处置（单元外），将单元内、外综合起来，考察其资源利用和污染物排放清单及其环境影响，因此可以辅助进行生态工业园区的现状分析、园区设计和入园项目的筛选。

2.2.4 生命周期评价 (LCA) 的技术框架

1993 年, 环境毒物化学学会 (SETAC) 在“生命周期评价纲要——实用指南”中将生命周期评价的基本结构归纳为四个有机联系的部分, 即目标和范围的确定(Goal and scope definition)、清单分析(Inventory analysis)、影响评估(Impact assessment)和改善评价(Improvement assessment)^{[47]-[50]}。这四个阶段既相互独立, 也相互联系。见图 2.1。

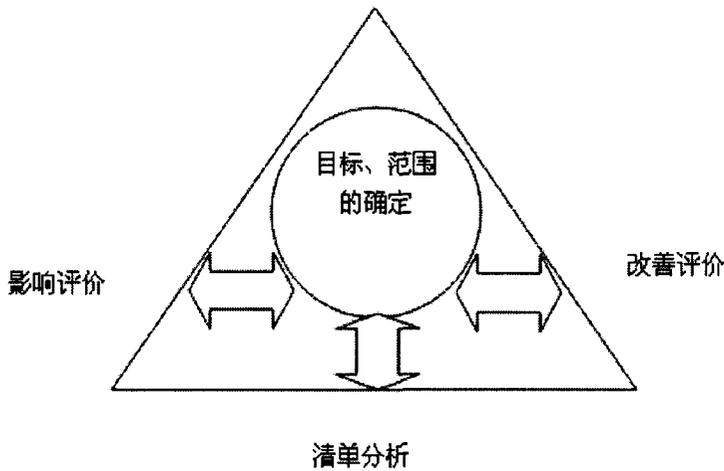


图 2.1 生命周期评价技术框架 (SETAC, 1993)

在 1997 年颁布的 ISO14040 标准中, 把生命周期评价步骤分为目的和范围的确定, 清单分析, 影响评价和结果解释四部分^{[51]-[54]}。ISO 对 SETAC 框架的一个重要改进是去掉了改善评价阶段, 同时增加了生命周期解释环节, 对前三个互相联系的步骤进行解释。如图 2.2 所示, 图中箭头表示基础信息流, 每个箭头都进行结果解释, 以发现改进所评价活动的环保特性的机会。

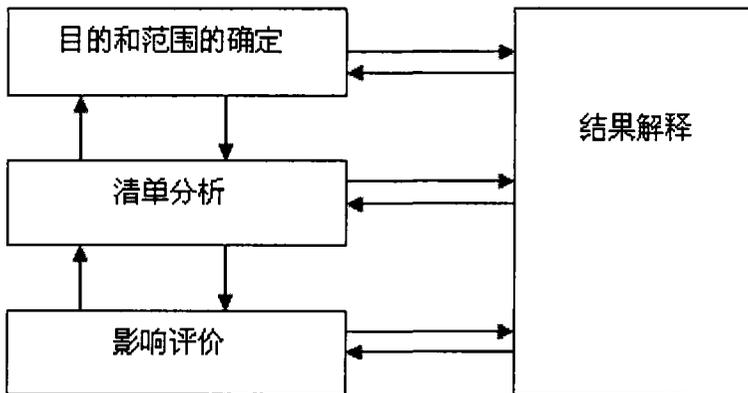


图 2.2 生命周期评价框架 (ISO, 1997)

2.2.4.1 目标与范围的确定

根据项目研究的理由、应用意图以及决策者所需要的信息，确定评价目的的定义，并按照评价目的界定研究范围，包括评价系统的定义、边界的确定、假设条件以及有关数据要求和限制条件等，这是生命周期评价的第一步，也是整个生命周期评价最重要的环节^[55]，它直接影响到整个评价工作程序和最终的研究结论的准确度，甚至会导致结论的错误。目的和范围的确定主要包括目的、范围、功能单元、系统边界、数据质量。

(1) 研究目的

研究目的必须明确陈述应用意图，进行该项研究的理由以及它的使用对象，即研究结果的预期交流对象（研究结果的接受者）。LCA的目的通常是对特定产品或过程的环境因素进行评价，以获得如何改进其环境表现的信息。如果LCA在设计阶段的初期进行，其目的可能是比较选择几个替代设计方案。如果设计已经完成，产品已经投入生产，或者过程开始运行后进行LCA，所作的就是在对当前操作造成最低干扰和增加最小额外成本的前提下，改进其环境特性。

(2) 生命周期评价的范围

在针对生命周期评价的过程中，范围占主要地位。如果只局限于某个生命周期阶段或对局部造成影响，生命周期评价的制定将更有意义，因为，意义重大的利益经常来自于限定的生命周期评价。生命周期评价的界限选择对于生命周期评价的时间、规模和可控制性有巨大影响。应妥善确定生命周期评价研究的范围，以保证研究的广度、深度和详尽程度与之相符，并足以适应所确定的研究目的，生命周期评价范围包括功能单位、基准流和系统边界。

在确定生命周期评价研究范围时，首先必须明确陈述产品的功能即产品性能特征规定。功能单位是对产品系统输出功能的量度，最后得到的所有数据都必须以功能单位为标准来提供。不同的产品系统进行比较时，必须采用相同的功能单位，才会有可比性。

功能单位确定了量化这些选定功能的基础，功能单位必须与研究的目的和范围相符。功能单位的主要作用是提供在数学意义上的统一计量输入和输出的基准，具有规定明确、可测量的特性。基准流是在给定产品系统中，为实现一个功能单位的功能所需的过程输出量，基准流被用来计算系统的输入和输出，系统间的比较必须基于同样的功能，以相同功能单位所对应的基准流的形式加以量化。

确定系统边界，就是确定要纳入待模型化系统的单位过程。在理想情况下，建立产品系统的模型时，其边界上输入和输出均为基准流。但在许多情况下，没有充足的时间、数据或资源来进行这样全面的研究。因而研究系统边界时必须决定在研究中对哪些单位过程建立模型，并决定对这些单位过程研究的详细程度，从而不必为量化那些对总体结论影响不大的输入和输出而消耗资源；应确定涉及其它产品系统的输入和输出。

很显然，LCA 边界的选择在评价的周期、费用、结果、意义和研究难易程度都会产生巨大的影响。因此，边界选择应当尽量与 LCA 目的相吻合。在许多情况下，随着研究的进展，还要在前期工作成果的基础上对上述初步确定的系统边界加以修改。图 2.3 为产品完整的生命周期系统以及输入输出关系图^[56]。

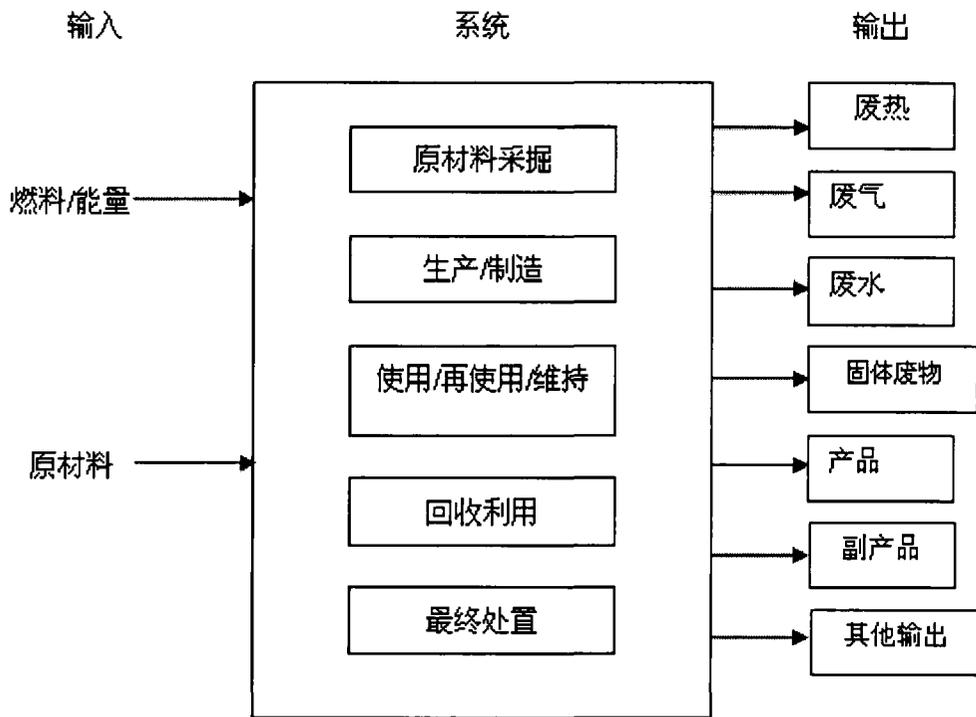


图 2.3 LCA 系统输入、输出关系图

由于本文中 LCA 的目的是进行酒精企业的清洁生产研究，在已经存在并投入运营的企业内，LCA 的着眼点在企业内的生产系统，即从酒精生产整个过程的角度考察其环境表现，通过分析，找出生产流程中需要改进的环节，从环境保护和经济效益的角度实施清洁生产。图 2.4 描绘了一般的酒精生产系统，亦即本文研究的系统边界。

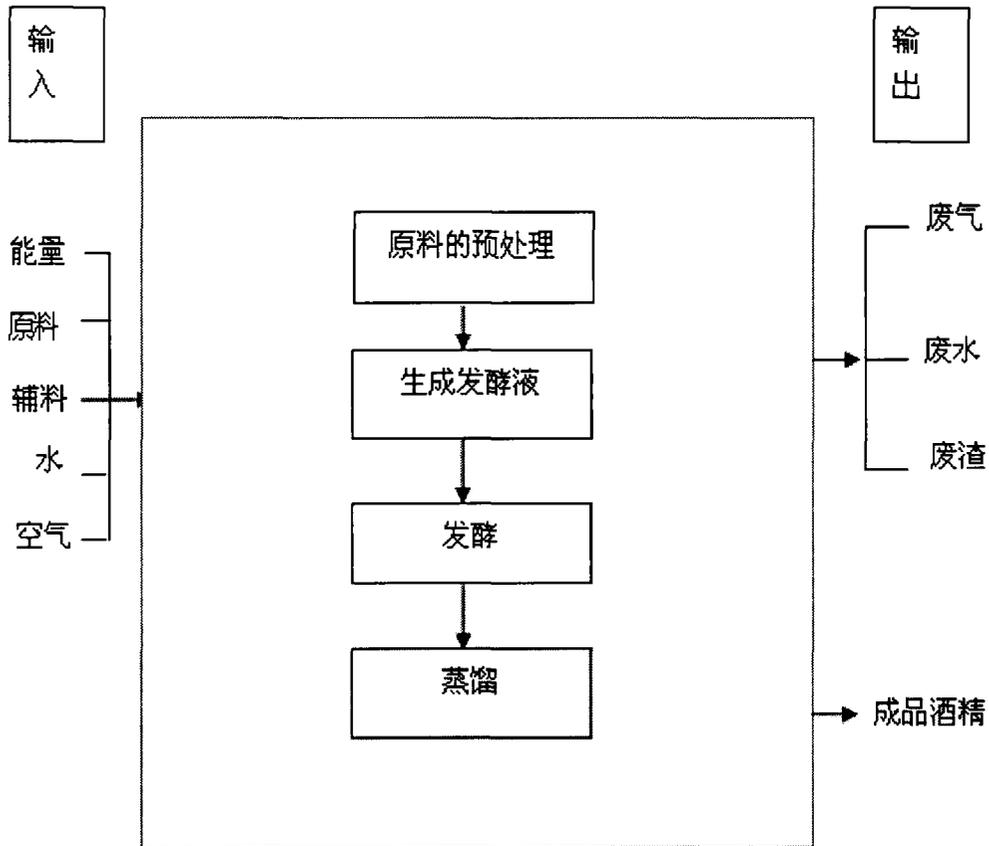


图 2.4 一般的酒精生产系统及输入、输出流及系统边界

2.2.4.2 清单分析

生命周期清单分析(Life cycle Inventory, LCI)包括为实现特定的研究目的对所需数据的收集,它基本上是一份关于所研究系统的输入和输出数据清单。目标和范围设定后,就可以对目的产品进行生命周期的清单分析,也称之为盘查。这是一种定性描述系统内外物质流和能量流的方法。主要包括:数据收集、细化系统边界、计算、数据检验、数据与特定系统关联的分配^[57]。

清单分析主要围绕能流和物流建立清单。所投入的所有原材料和能源作为输入,而在这个过程中排出的所有释放到环境中的物质(包括废气、废水、固体废弃物及其他环境释放物)作为输出。因此清单分析是在整个生命周期内对能量与原材料需要量进行以数据为基础的客观量化过程^[58]。该分析贯穿于产品的整个生命周期,即原材料的提取、制造加工、销售使用再使用或维持原状以及废物利用和废弃物处理等四个阶段。图 2.5^[59]是一个完整的 LCA 清单分析程序。

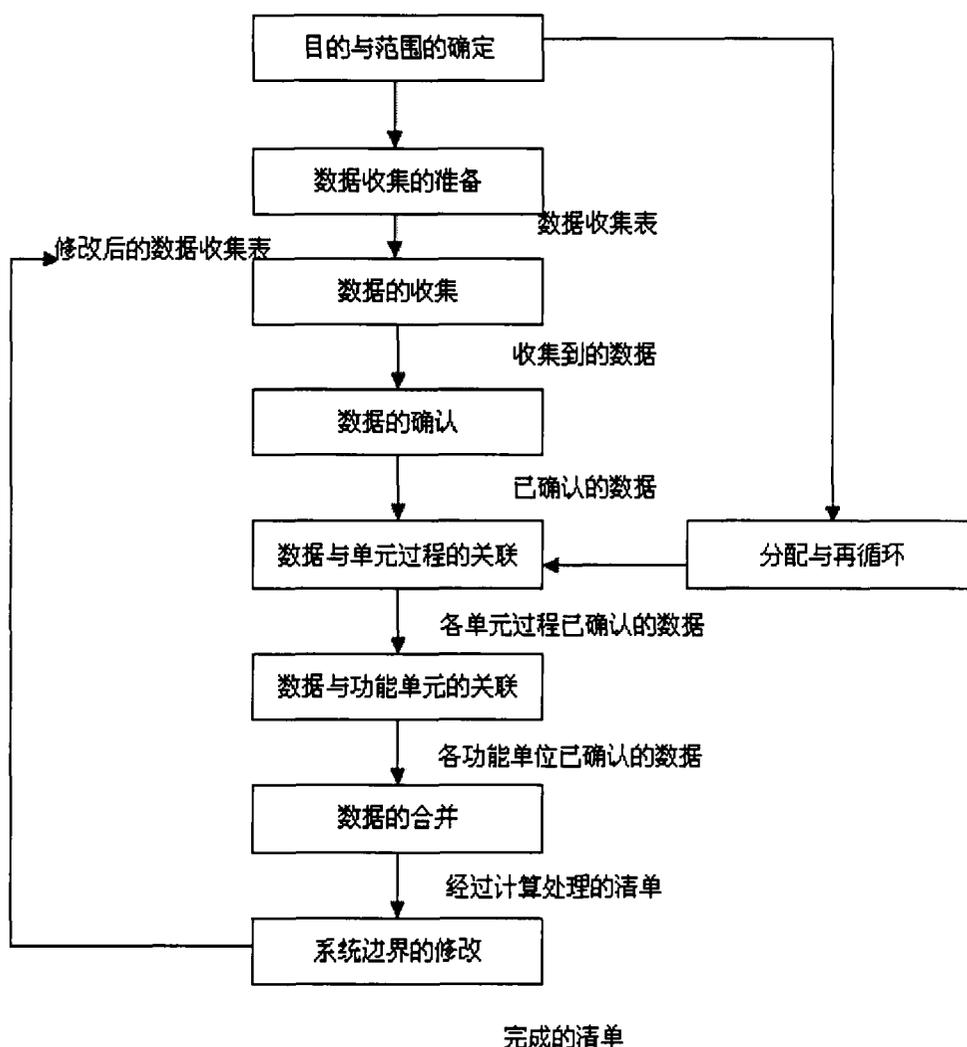


图 2.5 清单分析程序略图 (ISO, 1998)

(1) LCI 数据的收集和确认

一个数据收集计划的核心部分应包括：明确数据质量目标，确定数据的来源和种类，建立数据质量的指示器，设计一个数据调查表。数据质量目标要针对确定最终结果的精确性和代表性。

在进行数据收集计划的第一步就是确立数据质量目标来只是在什么地方数据质量是一个优先环节，以及为了获得满意的数据质量需要多大的努力。另外数据质量目标还确定了那种数据种类对于分析很重要。

表 2.1 数据质量目标和收集计划略表

项目	内容
数据质量目标	详尽准确的原材料和能源输入、水资源消耗、气体排放、固体废弃物的数据
数据来源	可信的工厂数据来源
数据类型	经过初步测量的和未测量的数据
指示器	可接受性；偏差；完整性；比较性；代表性

本研究所用数据收集的方法有以下几种：

- 自行收集。结合所研究的对象和设计目标，按照产品的生命周期，自行收集数据，建立适合所研究对象的产品数据库。主要集中在产品生产制造数据的收集上，一般借助企业的生产流程图，将酒精的整个生产过程划分为若干个便于数据收集的单元过程(unit process)。这些单元过程通过中间品/或废物处理设施相互联系在一起，共同构成一个亚系统；通过产品流与其他亚系统相连。
- 现有生命周期分析数据库和知识库。例如：Ecoinvent 等。
- 文献数据。

(2) 数据质量指示器(Data Quality Indicator)的应用

数据收集以后，需要分析数据的有效性。数据质量指示器能定量或定性地界定那些作为基准的数据的特性，这种基准用来分析数据质量目标是否达到要求。因此在分析中关键在于确定质量目标和选择指示器之间的联系。在分析中，事先确定的数据质量目标能帮助我们确定哪种指示器与 LCI 数据质量分析最有关。例如：一个数据质量目标要求 LCI 数据能代表整个国家的生产工艺水平，那么“代表性”和“比较性”就很重要了。

同时，数据类型、数据处理方法、数据质量分析的类型都对数据质量指示器的选择有影响。

谱系矩阵作为一种数据质量指示器的半定量化表征方法，给我们分析数据的质量提供了一个标准。在得到获取各个数据收集的情况后，可以给数据的各个指示器打分，分别为 1、2、3、4、5 分。分数越高表示数据的可靠性越差。如表 2.2 所示：

表 2.2 5 个数据质量指示器的谱系矩阵

指示器得分	1	2	3	4	5
可靠性	基于测量得到的数据并经过验证	部分基于假设的数据得到了验证或基于测量的数据没有得到验证	部分基于假设的数据没有经过验证	经过专家评估	没有经过专家的评估
完整性	来自于合适的期限和充足的样本点	来自于合适的期限和少量的样本点	来自于合适的样本点和较短的期限	来自于较少的样本点和合适的期限	来自于少量的样本点和较短期限
时间相关性	少于3年	少于6年	少于10年	少于15年	不知时间
地理相关性	来自研究的地域	平均值来自更大的区域, 所研究的区域包含其中	来自相似生产条件的区域	来自于部分相似的区域	区域不明
技术相关性	来自所言就的企业的工艺过程和原材料	来自所研究的工艺过程和原材料, 但来自不同企业	来自研究的工艺和原材料, 但来自不同的技术	相同技术, 但不同工艺和原材料	来自相关工艺和原材料, 但不同技术

(3) LCI 结果的解释

对 LCI 的结果必须根据研究的目的与范围加以解释, 解释中必须包含数据质量评价和对重要输入、输出及方法选用的敏感性分析和不确定分析, 以认识结果的不确定性。对清单分析进行解释时还必须结合研究的目的对下列情况加以考虑: 系统功能和功能单位的规定是否恰当; 系统边界的确定是否恰当; 通过对数据评价和敏感性分析所发现的局限性。

由于输入的不确定性和数据变异性的累积, 给 LCI 研究带来了不确定性。用于 LCI 的不确定性分析所提供的区间和概率分布有助于判定 LCI 结果和结论中的不确定性。

a. 敏感性分析

敏感性分析能对各种 LCI 进行评价, 主要用于确定一个模型的输入输出参数改变后对整个模型结论的影响。在 LCI 中, 敏感性分析对下列情况有很重要的作用: 在分析中, 数据源的可信度不高; 被评价的产品系统具有很高的可变性; 某一成分的数据丢失或缺乏。

敏感性分析的原理很简单，即当其他参数不变时，分析某个参数变化给整个模型结果带来的影响就能知道参数对模型的重要性或敏感性。主要分析方法有“一条路”分析、图标分析、比率分析。敏感性分析也有它的弊端，即可能导致：排除经敏感性分析判定为缺乏重要性的生命周期阶段或过程；排除对研究结果缺乏重要性的输入和输出；纳入经敏感性分析认为重要的新的单元过程、输入和输出。

b. 不确定分析

不确定性产生的原因有：测量和取样方法的随机误差；测量和取样方法的系统误差；自然变异性；建模的近似性。不确定分析是用来确定各种输入参数的不确定性如何影响模型结果的不确定性。其基本原则是给参数的不确定性赋值，然后运用统计学和数学方法来确定模型输出的不确定性。它有助于理解数据源或模型的重要性，并能帮助决定是否需要更多的信息。

不确定分析的一般有 3 种定量方法：不确定性传播法、高斯近似法和蒙特卡罗分析法。最常用的是蒙特卡罗分析方法。

2.2.4.3 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，即确定产品系统的物质、能量交换对其外部环境的影响。这种评价应考虑对生态系统、人体健康以及其他方面的影响。这是 LCA 最重要的阶段，也是最困难的环节^[60]。一般可将影响评价分为三个阶段：分类(Classification)、特征化(Characterization)和定量评价(Valuation)。

(1) 分类(Classification)

分类属于定性作业，是将对环境有一致或类似影响的排放物分作一类，一般按照对人类健康的影响、对生态环境（自然界，植被等）的影响、对资源（特别是枯竭资源）的影响等分成三大类，在每一类下又有许多子类，并冠以不同的影响因子。生命周期各阶段所使用的物质和能量以及所排放的污染物经分类整理后，可作为影响因子。

通过分类可以探明各种影响因子对环境造成影响的途径，掌握一种产品在多大范围内对环境产生影响，确定下一步分析评价的对象。在定义具体的影响类型时，应该关注相关的环境过程，这样有利于尽可能地根据这些过程的知识来进行影响评价。另外，一种具体类别，可能会同时具有直接和间接两种影响

效应，见表 2.3、2.4^[61]。

表 2.3 影响因子和其可能的环境影响

清单项目	直接影响	间接影响
酸性物质排放	酸雨	湖泊酸化
光化学氧化物物质	烟雾	健康危害
营养物质	富营养化	沼泽化
温室效应气体	臭氧层破坏	海平面上升
臭氧破坏物质	臭氧层破坏	皮肤癌
恶臭化学物	美观	毒性
有毒化学物	毒性	栖地破坏
固态废弃物	土地使用	健康危害
化学物质释放进入地下水	地下水影响	
石化燃料的使用	资源耗竭	
噪声	人类/生态扰动	生物多样性丧失
施工	栖地破坏	

表 2.4 具体影响子类的归类

自然资源的影响	生态系统影响	人类健康和生态毒性
可再生资源的使用	全球变暖	慢性职业健康影响
不可再生资源的使用 或破坏	臭氧层破坏	慢性公众健康影响
能量的使用	光化学烟雾	恶臭等感观影响
固体废弃物填埋空间	酸化	水生生态毒性
	大气质量	陆生生态毒性
	水体富营养化	
	COD 和 TSS	

(2) 特征化(Characterization)

特征化即针对所确定的环境影响类型对数据进行分析和定量化，是将清单分析的结果根据分类结果转化为相应的环境影响。具体方法有很多种，常见的方法有将清单分析所得的数据与环境标准或无影响浓度关联起来的“临界目标距离法”，以及对污染接触程度和污染效应进行模拟的“环境问题”当量因子法。特征描述需要进一步对数据进行标准化，主要目的是使得数据具有可比性。特征描述的结果最终表达为环境影响状况。

(3) 量化评价(Valuation)

量化评价是确定不同影响类型的贡献大小或权重，以期得到总的环境影响水平的过程。经过特征化之后，得到的是单项环境问题类别的影响加总值，评价则是将这些不同的各类别环境影响问题给予相对的权重，以得到整合性的影响指针，是决策者在决策的过程中，能够完整地捕捉及衡量所有方面的影响，不会因信息的偏颇、差异或缺乏比较而被蒙蔽。不同的环境影响类别之间彼此并没有特定的联结，也没有市场价格来做比较的基础，目前进行评价的方式多是引用多目标决策的分析技术，如 Bloemhof-Ruward (1995) 是利用分析层次程序法(AHP)作为评价工具；Powell 等 (1996) 则是利用愿付价格法作为比较不同回收系统的评价工具，其他在 SETAC 的报告中提到可以引用的方法还有多属性效用理论方法 (MAUT)、影响分析矩阵法 (IAM)、条件评估法等。

2.2.4.4 生命周期解释

生命周期解释是根据 LCA 前几个阶段或 LCI 研究的发现，以透明的方式来分析结果、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。

生命周期解释具有系统性、复杂性的特点。第一，它基于 LCA 或 LCI 研究的发现，运用系统化的程序进行识别、判定、检查、评价和提出结论，以满足研究目的和范围中所规定的应用要求；第二，在解释阶段内部和 LCA 的其他阶段或 LCI 研究间都应用同一个反复的程序；第三，就确定的目的和范围，针对 LCA 或 LCI 研究的长处或局限来说明 LCA 和其他环境管理技术之间的联系。

生命周期评价中的目的与范围的确定和解释阶段构成了 LCA 研究的框架，而其他阶段(LCI 和 LCIA)则提供了有关产品系统的信息。图 2.6 描述了生命周期解释与 LCA 其他阶段之间的关系。

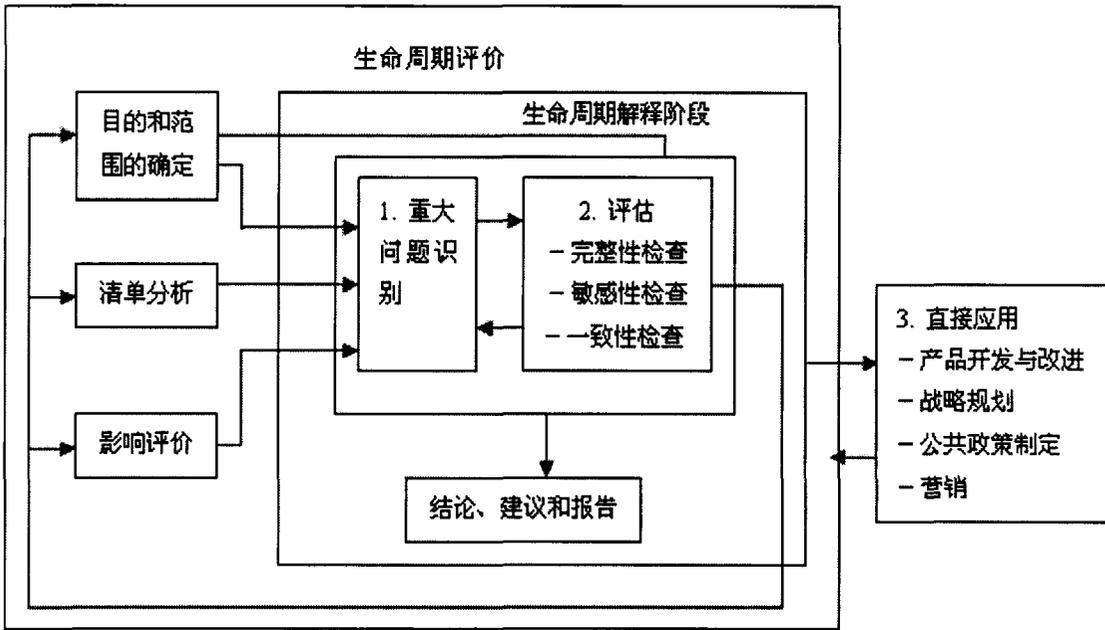


图 2.6 LCA 解释阶段与其他阶段的关系

2.5 生命周期评价理论的启示

LCA 方法已经成为一种环境管理国际标准，并将在全球贸易与环境领域发挥越来越大的作用。随着我国大力发展清洁生产、生态工业和循环经济，促进可持续发展的呼声越来越高，企业界和政府部门迫切需要一些切实可行的支持技术，LCA 就是其中重要的工具之一。由于它的研究方法符合可持续发展战略，因此具有广阔的应用前景。

由于清洁生产审计是企业实施清洁生产的重要前提，同时也是企业实施清洁生产最重要的一环。而 LCA 又是一种全生命周期的定量化评价方法，可以弥补清洁生产审计中存在的不足，对传统清洁生产审计的延伸和补充，因此是企业实施清洁生产的有效工具。因此，从企业层面来讲，可以将 LCA 应用于清洁生产审计，运用 LCA 的方法，建立企业生产与环境压力的定量关系，并形成 LCA 模型，进一步分析企业的审计重点，为清洁生产方案的制定、实施以及企业环境管理工作提供决策支持。这也是本文的研究重点。

第3章 LCA 应用软件

3.1 LCA 软件的开发和应用

随着社会的进步,科技的发展,在信息爆炸的时代中,计算机技术在人类的生产、生活中发挥着越来越大的作用。而 LCA 的研究也涉及到大量的数据和信息,如何对数据进行有效的处理和存储,是对 LCA 工作者的一大挑战,同时,LCA 的各种技术方法的也需要形成系统的模型。为了解决以上问题,各种 LCA 应用软件便应运而生。

欧美国家目前研究开发生命周期评价工具,应用计算机技术进行了自动化的软件开发。例如, Boustead Model 是最早的 LCA 工具之一,该工具的数据库中大约有 4000 组单元数据,已经用于各种复杂的产品,尤其是在汽车行业中的应用较广,但该软件没有环境影响评估能力。LCA Inventory Tool (瑞典),其数据主要是关于制造、运输过程中的能量消耗方面的。该工具可用于复杂产品,比如电冰箱的 LCA 分析,但也没有环境影响评估功能。德国的 GaBi LCA,其数据库中含有 350 个典型工艺的环境信息。Eco-Pro (瑞士)主要是针对包装材料开发的。Oeko-Base (瑞士)则是针对瑞士产品的包装材料开发的,具有环境评估功能,但是不适用于复杂产品。Dutch SimaPro Tool 则是专门针对复杂产品开发的。奔驰公司的 Daimler-Benz 则是直接针对该公司的产品开发的,该工具全量化且完全具有环境影响评估功能。美国贝尔电话公司的 Matrix approach 和数字公司的 Pre-LCA 均属于半量化 LCA 工具,使用起来简捷,但是信息较为粗糙,在很大程度上还依靠人的主观判断,可用于复杂产品。

各种 LCA 数据库和软件的运用,使得生命周期评价具有了很强的可操作性,但是每种软件都是各开发者从自身的角度进行思考的,其应用范围和特点都有具体的要求,如表 3.1^[62]。下一节将会着重介绍目前在世界上应用比较广泛的一种 LCA 软件 SimaPro。

表 3.1 主要生命周期评价软件

软件名称	开发商	数据来源	特点
Boustead	Boustead	欧洲	生命周期清单分析, 数据库系统性强, 范围广, 支持 Windows 和 DOS 系统
GaBi	IPTS	德国	生命周期清单分析和影响评价模型, 数据库包括 800 种物质和能源以及 10 个工艺类型
KCL-ECO	Finnish Paper Insr.	芬兰	生命周期清单分析, 主要应用于芬兰及欧洲其他国家的纸浆制造和纸张生产的清单分析
LCAiT	Chalmers industry	瑞典	生命周期清单分析, 主要对能源生产和运输以及一些化学物质, 塑料, 纸张的评价
PEMS	PIRA	欧洲	生命周期清单分析和影响评价, 涵盖原材料生产, 运输, 能源生产和废弃物管理等
TEAM	Ecobalance	美国	生命周期清单分析模型和成本分析模型, 包含 216 个独立的数据文件和 10 类评价对象
Bee2.0	Building and Fire Research Laboratory	美国	建筑物生命周期评价
ATHENA	ATHENA Sustainable Materials Institute	加拿大	针对北美地区建筑物进行生命周期评价

3.2 SimaPro 的工作原理与应用

SimaPro 软件由荷兰 Leiden 大学环境科学中心 (CML) 开发与发展, 现在已发展到 SimaPro 7.0 版本。其目的主要在于可简化期评流程及图标量化数据, 目前为应用最广的生命周期评价软件。由于各环节之评估过程与结果均可以系统流量 (包括物质与能量) 方式表示, 设计工程师不须要花太多功夫去了解生命周期分析的具体过程及数据, 便能以生命周期的观念来改善产品设计, 进而达到保护环境及为决策者提供决策支持的目的。

该软件于 1990 年首度完成推出，现今版本为第七代（version 7.0），其每一代的发展，都代表着生命周期影响评价方法的更新，但仍保留旧有的评价方法，供使用者参考选用。SimaPro 集成了世界上最先进的生命周期评价方法和数据库，如 Eco-indicator99、CML 1992 v2.1、Ecopoints 97 (CH) v2.1、EPS 2000 V2.1 等。目前该软件也受到了 UNEP 的支持，在全球大力推广应用。由于本文将 SimaPro 作为 LCA 研究的工具，下面的章节便介绍了该软件应用原理和方法。

3.2.1 简易方法使用 SimaPro

运用 LCA 向导建立 LCA 程序，这样可以节省很多时间。运用 SimaPro 建立 LCA 有三种不同的模式：

(1) 简捷型，适用于结果导向的使用者，这样的使用者倾向于软件的简单应用，而不去研究其复杂的功能，并且愿意使用向导来简历 LCA。

(2) 分析型，适用于运用 LCA 结果进行分析的专家，这样的使用者需要运用其所有的功能。

(3) 开发型，适用于在原有版本的基础上开发新功能，或者讲 SimaPro 用到其他软件中的使用者。

本课题的研究倾向于第二种使用方法，由于 LCA 分析结果将用来知道企业的清洁生产实践，故本软件的大部分功能都将会用到。

启动 SimaPro 后，系统会要求用户打开一个工程或库。

工程是用来储存完成你的项目所需要的数据和过程的一个区域；而库是一种特殊类型的工程，它包含 SimaPro 所提供的标准数据，库是所有工程的来源。但是从库里面编辑数据是不被允许的，而应首先将所需数据连接到用户的工程中。

利用向导来完成一项 LCA 的工作时，SimaPro 会利用问题的形式来按步骤进行，用户只需要按照提示和问题就可以一步步完成目标，同时，由不同的过程组成的框架也会建立起来。

3.2.2 常规方法使用 SimaPro

使用向导可以很简便的完成一个基本的生命周期评价过程。然而，当你需要用到 SimaPro 更多的特性和功能来帮助你完成工作的时候，你就需要用常规方

法，在一个常规的界面下完成你的工作。

3.2.2.1 LCA 浏览器

一个常规的 LCA，是在 LCA 浏览器中进行的（如下图 3.1 所示），它可以提供 SimaPro 中的所有功能。

整个 SimaPro 的 LCA 浏览器是目录结构的形式，用户输入并编辑数据，都需要在目录中进行。然而，生命周期评价是一项反复的工作，这意味着你需要不断的修正前面的工作以达到最佳效果。因此在工作中，我们运用粗略的数据进行初始计算，以发现生命周期的哪些阶段是与我们的目的相关性最大的，然后在针对这些阶段进行进一步的分析。当数据编辑完成后，需要检查结果的合理性。

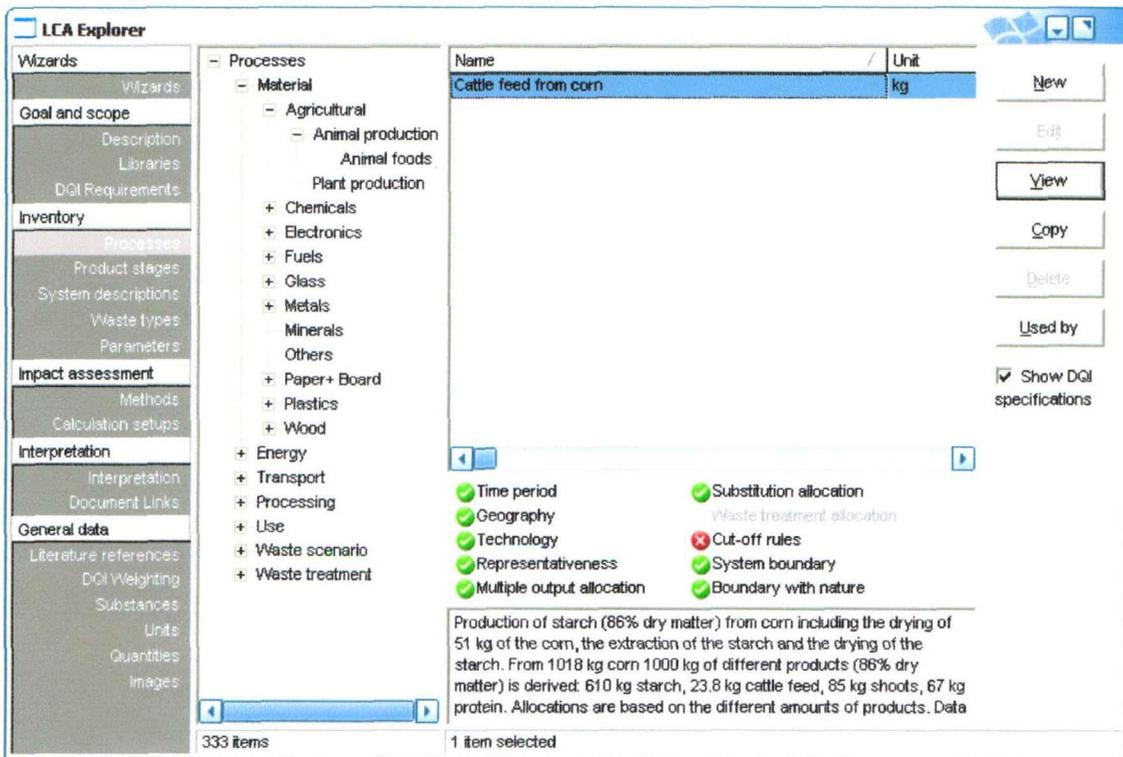
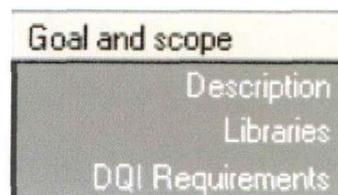


图 3.1 SimaPro 的 LCA 浏览器

LCA 浏览器的左边部分包含了生命周期分析过程中的所有问题，可以分为 5 个部分：

(1) 描述目标和范围

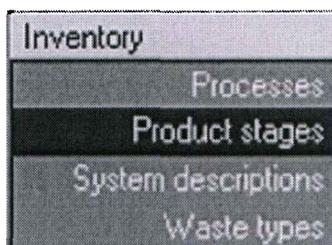
总体描述(Description)中，是不同的文本框，用来



描述 LCA 的目标和范围；数据库(Libraries)用来储存标准数据源和各种影响评价方法；数据质量条件(DQI Requirement)反映各种数据与目标和范围的匹配程度。

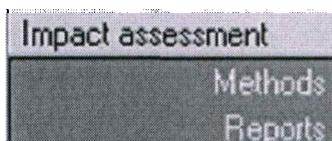
(2) 生命周期清单

通过这一部分，可以建立各种过程(Processes)和产品阶段(Product stages)—SimaPro 中两种主要的数据表现方式；除此外，还包括系统描述(System descriptions)和废弃物类型(Waste types)。



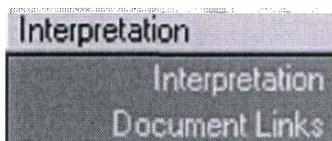
(3) 影响评价

这一部分包含有用来进行影响评价的方法；报告功能条里，用户可以定义哪个生命周期、过程和加工过程需要被重复分析和比较。



(4) 生命周期解释

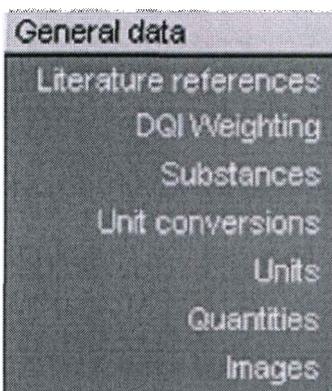
当整个工作接近尾声时，我们就可以得出结论，并检查数据结果和合理性。可以通过本部分的解释功能条实现。



(5) 其他数据类型

这一部分包括文献参考、数据质量权重、物质名称、单位转换、单位和图片等功能条。

- 文献参考可以链接到与过程记录相关的文献；
- 物质名称包括 LCA 所有涉及到的物质；
- 所有单位和常见产品的相关图片都可以列举出。



3.2.2.2 输入和编辑数据

生命周期清单分析阶段的核心部分就是建立一个联系一个生命周期内各相关过程的过程树。SimaPro 的数据结构包含两种不同的构建模式：

(1) 过程(Processes)，过程树的构建模式，包含各种环境信息，环境输入输出数据。

(2) 产品生命阶段(Product stages)，不包含环境信息，但是描述产品和生命周期各阶段。

使用产品生命阶段的构建模式是 SimaPro 独有的特征，这使得它可以构建很复杂的产品生命周期的模型。

3.2.2.3 过程(Processes)

SimaPro 中的一个过程可以包含下列数据:

(1) 环境和社会数据(Environmental and social flows): 废气、废水、固体废弃物; 非物质化的排放物, 如辐射和噪声; 原材料的使用; 社会影响。

(2) 经济数据(Economic flows): 从其他过程输入的物质流; 输出流(在 SimaPro 中是指产品); 进行深度处理(如污水处理、焚烧等)的废弃物; 可以避免的过程(针对分配问题的一个解决方法, 例如扩大系统边界); 经济影响。

(3) 文本描述(Documentation): 包含一些基本的信息, 如名称、作者、日期、和基本描述内容; 数据质量指示器区域; 系统描述。

(4) 系数(Parameters): 常量系数和表达式。

过程可以在数据库索引中通过各自的输出被识别。各个不同的过程之间可以互相连接以组成互相联系的网络结构, 这种连接可以在过程记录中定义, 这样的—个好处就是过程之间的连接可以自动被保留, 当用户使用庞大的数据结构的时候可以节省很多时间。例如图 3.2 所示钢铁的生产过程, 几个过程互相联系在一起, 便构成了钢铁生产的生命周期结构图。

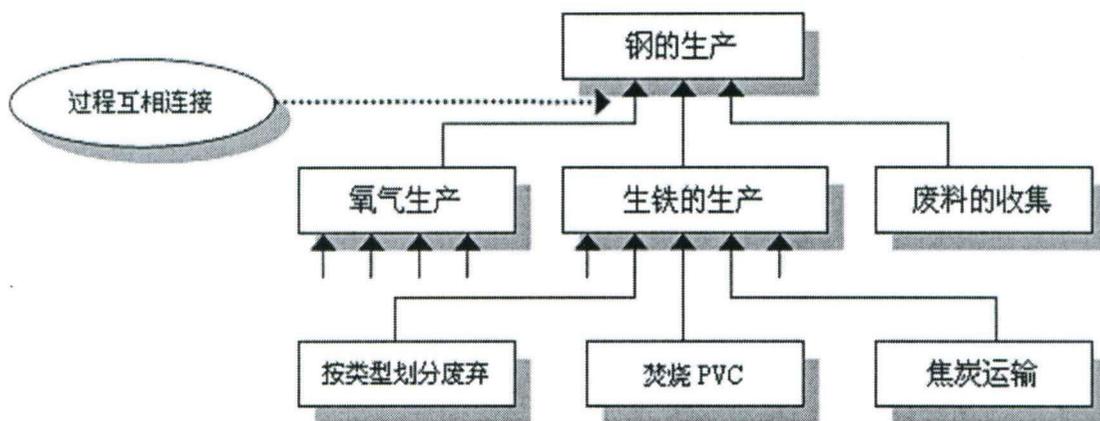


图 3.2 不同过程如何联系在一起组成过程树结构的示意图

过程记录可以描述代表单一过程步骤的单元过程, 也可以描述一个以上单元过程组合成的系统。

过程或者产品生命周期阶段都可以视图的形式用网络结构或者树状结构表示。网络与树状结构的不同之处在于, 面对参与循环的过程, 树状的处理方式是可以使该过程出现 N 次; 而网络则只允许每个过程出现一次, 代之以流量线的数量表示循环次数。

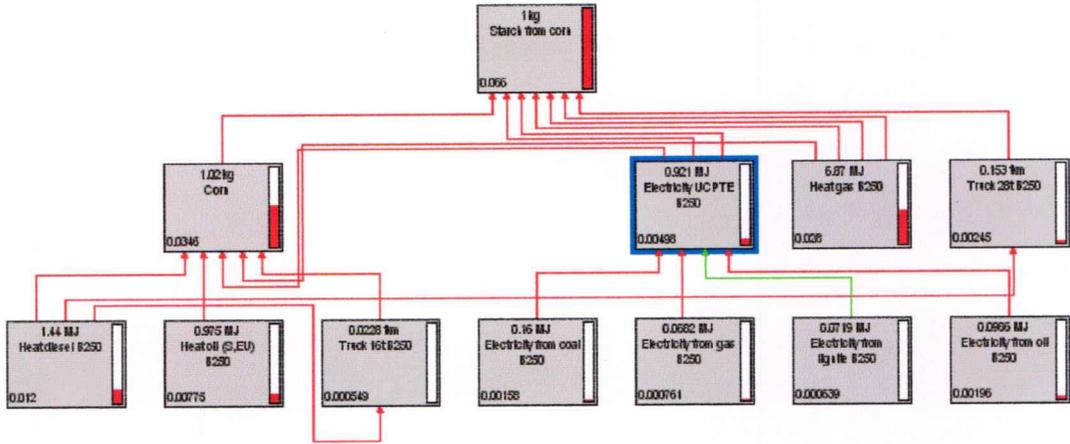


图 3.3 SimaPro 的网络结构化示意图

通常情况下，用户所需要的过程已经存在于数据库中，我们可以通过建立新的过程与数据库中的过程的连接，引用你所需要的过程。这样一来，用户所使用的数据取决于所连接的数据库。用户也可以建立当前工程与其他工程的连接，以实现数据的共享。

3.2.2.4 产品生命周期阶段 (Product stages)

产品生命周期阶段是用来描述产品的组装、使用和废弃处置的过程。每一个产品阶段对应若干过程。例如，一件产品含有 1kg 钢铁，即与描述钢铁生产的过程相联系，数量为 1kg。一些产品阶段也可以与其他的 product stages 相联系。

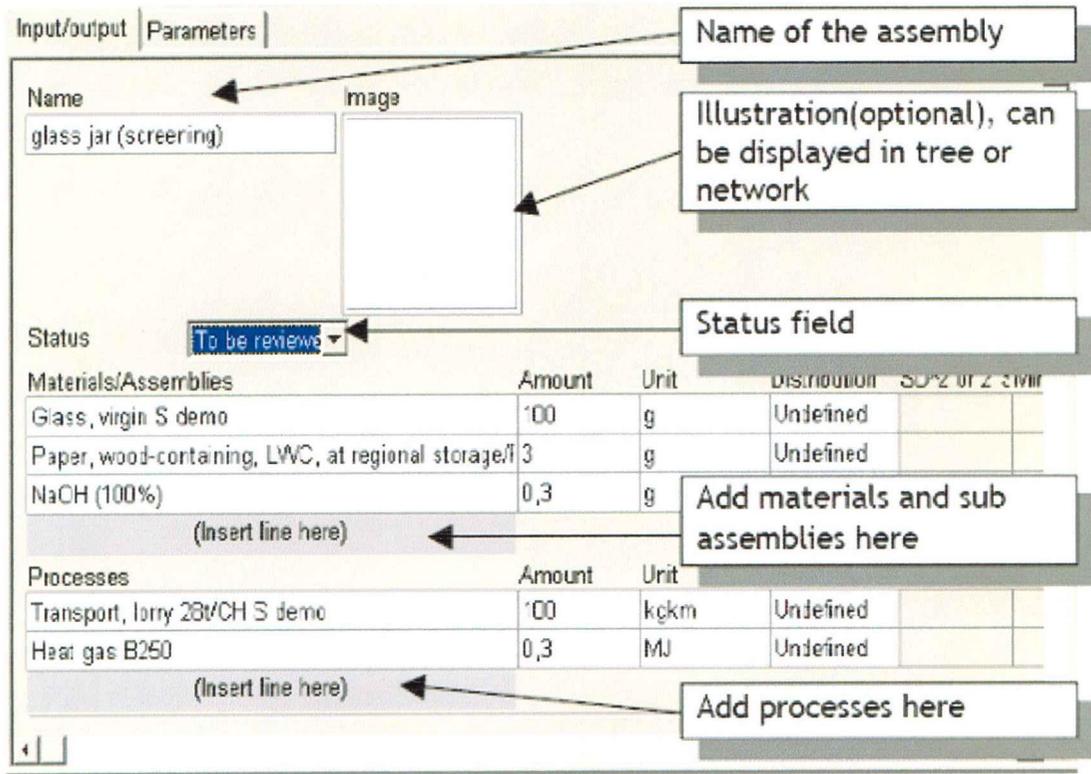


图 3.4 一个产品阶段界面，本例为组装阶段

SimaPro 有五个产品生命周期阶段，每个阶段都有各自的结构。

(1) 装配(Assemblies)

包含原材料和组件清单；以及生产、运输和能量使用过程。装配可以理解为对一件产品的定义。

(2) 生命周期(Life cycles)，是主要的产品阶段，它们包括可以组成产品的组装、装配；各种使用过程，如能量的使用；废弃物幕景；附加的其他生命周期。

一个生命周期可以连接其他的生命周期，当一个产品生命周期内使用其他产品时，会发生这种情况。

(3) 弃置幕景(Disposal scenarios)，描述整个产品生命周期末段的情形，适用于该产品将被循环利用或者拆卸的情况。它们包括许多反映环境负荷的过程，连接到决定产品最终目的地的处置方式，例如弃置、废物处理、循环利用等。各种处置方式所承载物质质量的百分比之和必须为 100%。

需要注意的是，SimaPro 也有描述物流的废弃物幕景模式，废弃物是以物质形式表示，而非产品形式。例如，玻璃瓶的循环利用幕景可以用来自破碎瓶子的玻璃的循环利用或填埋来描述。

(4) 拆卸、分解(Disassemblies), 描述产品使用过后拆卸、分解成为零件的过程。它包含产品被拆卸后的各部件; 造成环境负荷的拆卸过程; 拆卸后部件的目的地和零部件的功效。

(5) 重复利用(Reuse), 包括造成环境负荷的重复利用操作过程。

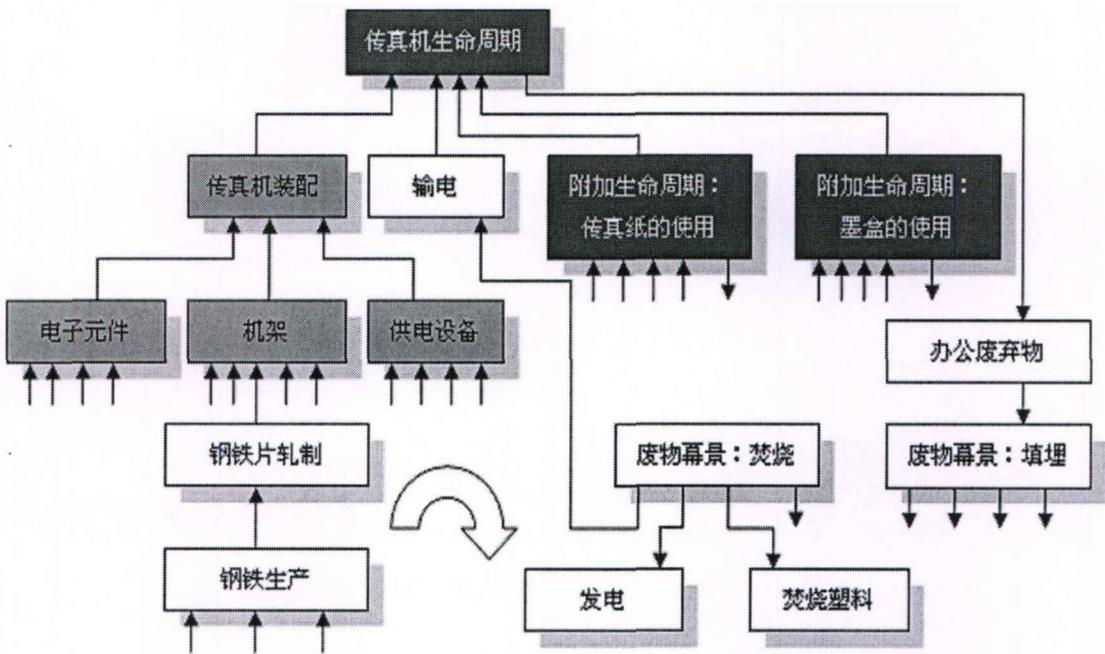


图 3.5 传真机生命周期示意图

图 3.5 为传真机的生命周期示意图, 顶端黑色和灰色部分都代表产品生命周期阶段(Product stages); 白色方框代表过程(Processes), 如上图所示, 一个生命周期可以连接:

- 一个装配阶段;
- 一个或多个使用过程 (本例中为电力输送);
- 一个或多个附加产品的生命周期, 例如纸张和墨盒。这些附加的产品生命周期也是一个完整的产品生命周期过程, 也含有产品的装配、使用和弃置阶段;
- 废弃物弃置幕景;
- 附加生命周期。

SimaPro 可以自动生成这样的过程树示意图。但是用户不可以直接编辑修改过程树中的数据, 需要在过程或产品阶段记录编辑界面进行修改。

3.2.2.5 废弃物幕景(Waste scenarios)和弃置幕景(Disposal scenarios)的模拟

相比较一个产品生命周期其他阶段，对生命周期末段的模拟，即废弃物的处理和处置，是一件更为复杂的工作。SimaPro 提供了一套先进的工具模拟产品生命周期的末段。大多数的 LCA 工作者很少涉足工业生产的这一阶段，然而对生产部门来说，熟悉产品废弃物处理流程又是至关重要的。

关于生命周期末段的模拟，有两个术语需要特别说明一下，即 Waste scenarios 和 Disposal scenarios。在 SimaPro 中，它们是有区别的，区别在于：Waste scenarios 是指与物质流的相关操作过程，即产品本身的特征显示不出了，在 Waste scenarios 中，关于一个产品如何被分解成不同的零部件的信息不被保留，只有关于物质的信息；而 Disposal scenarios 是指与产品流相关的操作过程，产品特征的信息被保留，拆卸或者重复利用等操作可以模拟出来。

为了说明上述二者的区别，我们可以以玻璃瓶的回收利用为例。当涉及到玻璃瓶的材质玻璃时，我们可以用 Waste scenarios 进行模拟；而可回收的玻璃瓶被洗刷继而重复利用的过程中，其产品特征依然保留，我们就可以用 Disposal scenarios 进行模拟。下面的篇章，本文将分别介绍两种不同的幕景。

(1) 废弃物幕景(Waste scenarios)

在 Waste scenarios 中，废物流(Waste stream)被分解为不同的废弃物类型，然后废弃物以不同的类型划分，被分别送往不同的废弃物处理过程进行处理，比如进行填埋、焚烧、循环利用、堆肥等。

Products						
Waste specification						
Name	Amount	Unit	Category	Comment		
	0	kg	Municipal			
Inputs						
Known inputs from technosphere (materials/fuels)						
Name	Amount	Unit	Distribution	SD*2 or 2*SD Min	Max	Comment
(Insert line here)						
Known inputs from technosphere (electricity/heat)						
Name	Amount	Unit	Distribution	SD*2 or 2*SD Min	Max	Comment
(Insert line here)						
Outputs						
Materials and/or waste types separated from waste stream						
Waste scenario/treatment	Material / Waste type	Percentage	Comment			
(Insert line here)						
Waste streams remaining after separation						
Waste scenario/treatment	Material / Waste Percentage	Comment				
(Insert line here)						

图 3.6 SimaPro 中的废弃物处理幕景(Waste scenarios)编辑界面

本文以市政垃圾为例进行 SimaPro 中废弃物处理的幕景模拟,模拟产品使用者将一件产品投入垃圾桶以后,产品物质流向和处理的情况。本例简化处理为,市政垃圾根据废弃物类型可以分为两部分,即废物流有两个流向,一部分被填埋,一部分被焚烧。

当废弃物被焚烧时,会产生一些排放物,废弃物的物质成分决定了焚烧将会产生哪些排放物。排放物是与废弃物类型有关的,例如废弃物类型可以是纸张类、塑料类、合金类等。在 SimaPro 中,用户可以自己定义废弃物的种类,并说明哪些物质属于此类型。图 3.7 为市政垃圾处理的示意图,其中,按照废弃物类型可以将焚烧分为三种方式的处理程序:焚烧纸张、焚烧塑料、焚烧 PVC。

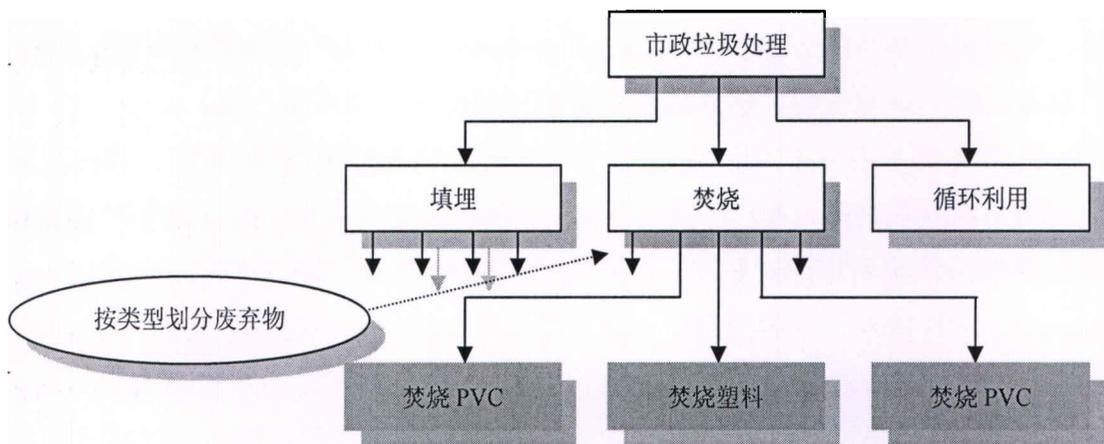


图 3.7 市政垃圾的 Waste scenario

废弃物处理过程中的排放物决定于产品的组成成分。假如有 2kg 的物质,类型属于 PVC,废弃物的 50%将被焚烧,那么焚烧作为一种废弃物处理方式,就会接受 1kg 的废弃物输入。

引入废弃物类型可以简化模拟的工作,但是同时也会产生其他问题。不是所有的 PVC 都含有铅,以此作为稳定剂,如果只有 PVC 这种废弃物类型,则含铅和不含铅的 PVC 就不能被区别出来,由此会造成处理方式的不当。解决方法有两个:

(1) 引入更多的废弃物类型;(2) 不要使用废弃物类型进行废弃物分配,而根据单纯的物质的不同来分配。

以上第二种方法是比较精确的,而且 SimaPro 也支持这种方法。然而,这样造成的后果就是用户必须同时纠正所有的与此相关的废弃物处理幕景模拟。如果选择使用以上两种方法,取决于你对准确性与实用性的权衡,最终还是取决

于你对 LCA 目的和范围的定义。

废弃物经处理后，有时候会产生一些有用的副产品，例如热能或者再生利用的物质。SimaPro 允许模拟这种闭环循环的程序。这意味着如果废物处理后，焚烧产生了 1kWh 的电，环境负荷就要相应的减少。需要注意的是，在 SimaPro 中，Ecoinvent 和 ETH 这两个数据库不使用这种系统边界扩大的方法，即焚烧产生的有用副产品将被忽略。

(2) 产品处置的幕景(Disposal scenarios)

在 Disposal scenario 中，废弃产品流也会被分解，但是有三种渠道：a.产品被拆卸；b.重复利用；c.利用 waste scenario 进行处理（如前所述）。

以传真机的回收系统为例，我们可以对此做如下幕景假设：

- 传真机 50%的部分将不被回收。这意味着这些部分将被送到废弃物幕景(waste scenario)程序中进行处理。在废弃物幕景程序中，按照一定比例，一部分采取焚烧的方式进行处理，一部分采取填埋的方式。
- 传真机 10%的部分性能良好，可以被直接重复使用。在 SimaPro 中，你可以在重复利用记录中定义一种方法，说明需要经过怎样的过程（如运输、加工等）能实现这 10%的部分重复使用。SimaPro 将把这 10%的部分看作在一个闭合回路里循环来进行模拟。10%的重复利用，生产环节就会减少 10%的产量。
- 剩下的 40%的部分将被拆卸掉。在 SimaPro 中，拆卸掉的部分列在拆卸记录(disassembly record)内，此外，拆卸掉的部分最终去处，以及剩下的部分以后被处理的情况都被记录在这里。

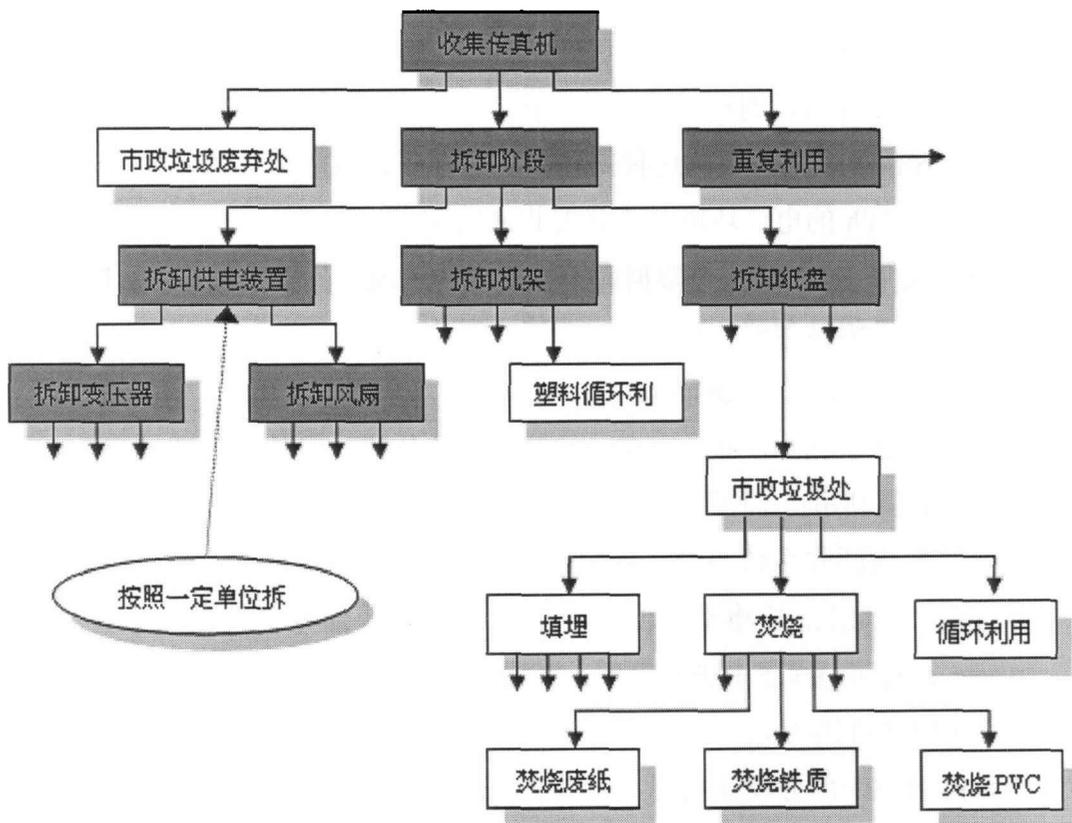


图 3.8 传真机弃置幕景的模拟示意图

图 3.8 为传真机的弃置幕景模拟示意图。图中可以看出，传真机在使用过后弃置的时候，有不同的处理方式，分不同的部分分别拆卸，重复利用，或作为废弃物处理掉。拆卸的过程中，产品又被分解为不同的部分，并且每一部分都被送往不同的目的地进行后续处理。

利用 SimaPro 的产品弃置幕景的模拟，通过对产品重复利用、拆卸等操作，我们可以对产品生命周期末段进行很详尽和复杂的模拟。这些也要取决于操作时对实际问题的把握，不管怎样，这确实是 SimaPro 对于 LCA 的一项强大的功能。

3.2.2.6 SimaPro 使用小结

通过以上的介绍，对于在 SimaPro 中构建一个产品的 LCA 模型，我们可以通过如下程序实现：

定义一个产品装配(assembly)阶段，并为之命名。

通过将产品装配过程与原材料的生产过程相联系，明确产品的物质构成。

很多情况下，这些过程可以与其他过程连接，SimaPro 会自动保存这些连接。

说明为进行装配所需要的其他生产和运输的过程。

定义一个生命周期(life cycle)阶段，并为之命名。

将前面已完成的装配阶段与这个生命周期阶段相联系。

输入使用过程，如运输、能量使用，所以应同时将这些过程与刚定义的这个生命周期阶段相联系。

在生命周期阶段内输入关于废弃物处置(waste scenario)或产品弃置(disposal scenario)幕景的数据。Waste scenarios 是一系列过程，disposal scenario 也是一个生命周期阶段，下面将会描述。Waste scenarios 一般会与废弃物处理过程相联系，这样就足够描述废弃物的后续处理过程了，而 SimaPro 会保存这种联系。

如果我们希望包括副产品在内，也可以建立一个新的关于这些副产品的生命周期模型，并与当前正建立的这个主产品的生命周期模型相联系。

在 SimaPro 中，要实现过程与过程，过程与产品阶段，产品阶段与阶段的连接是相对比较简单，只需要双击过程或产品阶段中适当的区域，就会得到能够与之连接的过程或阶段，选择需要连接的过程或阶段，就建立了一个连接。

通过以上步骤，我们可以建立一个完整的产品生命周期结构图，而 SimaPro 对于实现这类结构图的可视化是很方便的。通过结构图，LCA 工作者可以清楚了解一件产品生命周期的全景，便于以后进一步分析。

3.2.2.7 SimaPro 使用补充：状态区域

LCA 的工作中，收集数据不仅仅是一项耗费时间的东西，而且也并不那么容易操作。因为通常我们所需要的数据在开始建立模型之前并不是一定能及时收集到的。这意味着我们所建模型里面有数据完整的过程，同时也会有初步的以待改进的过程。在大型的 LCA 工作中，这是很难掌握得好的。而 SimaPro 具有这样的功能，可以帮助用户方便的标记每个过程的完成情况。具体的，在每个过程或产品阶段的记录表内，有一个标记状态的区域。每一个过程的完成都包含在以下几种状态内：

- 空白：这是系统的缺省值，我们新建的一个过程或产品阶段，就处于这样的状态。
- 临时的：临时创建的过程。当有些数据不能够收集到的时候，可以插入一个临时的记录，进行粗略的计算。

- 草稿：没有完成的过程，并且正在编辑。
- 待修正的：也是一个草稿，作为一个标记，表明这个过程需要改进。
- 待评价的：也是一个草稿，但是需要其他人来进行评价、检验的。
- 完成的：代表已经完成的，完整的过程。

在形成树状或网络结构图时，每个过程会以状态的不同呈现相应的颜色，达成一种直观的效果，便于以后的编辑，修正。

第4章 酒精生产的生命周期评价方法和过程

由于清洁生产思想和方法在我国酒精行业的环境管理中发挥着重要的作用，因此，我们有必要先对国内酒精企业的清洁生产做一下分析，然后，再针对清洁生产的不足，提出酒精生产的LCA方法和模型，为酒精企业的环境管理提供技术与决策支持。

4.1 酒精企业的清洁生产

4.1.1 清洁生产的概念及内涵

4.1.1.1 清洁生产的概念

1989年，联合国环境规划署首次为“清洁生产”概念下了定义^[63]：

“清洁生产是一种新的创造性的思想，该思想将整体预防的环境战略持续应用于生产过程、产品和服务中，以增加生态效率和减少人类及环境的风险。一对生产过程，要求节约原材料和能源，淘汰有毒原材料，减降所有废弃物的数量和毒性；一对产品，要求减少从原材料提炼到产品最终处置的全生命周期对环境的不利影响；一对服务，要求将环境因素纳入设计和提供的服务中。”

4.1.1.2 清洁生产的涵义

清洁生产的定义中包含了四层涵义：

一是清洁生产的目标是节省能源、降低原材料消耗、减少污染物的产生和排放量；

二是清洁生产的基本手段是改进工艺、强化企业管理，最大限度地提高资源、能源的利用水平和改善产品体系，更新设计观念，争取废物最少排放及将环境因素纳入到服务中去；

三是清洁生产的方法是排污审计，即通过审计发现排污部位、排污原因，并筛选消除或减少污染物的措施；

四是清洁生产的终极目标是保护人类和环境，提高企业自身的经济效益。

4.1.2 清洁生产审计

企业清洁生产工作程序包括准备、审计、制定方案和实施方案 4 个基本阶段。其中审计阶段是清洁生产的重要阶段。酒精企业在推行清洁生产之前应做好清洁生产审计工作。清洁生产审计，也称“污染预防审计”或“污染预防评价”，是企业对现在的和计划进行的工业生产进行的预防污染的分析 and 评估，即企业对目前的生产流程进行全面的评估和分析，找出高物耗、高能耗、高污染的原因，确定废弃物的来源、数量及削减目标，然后有的放矢地制定有效的废物控制对策、制定方案，减少和防止污染物的产生，提高企业环境管理的效率。因此，清洁生产审计是企业推行清洁生产的重要前提。

4.1.3 国内酒精企业的清洁生产审计

目前，我国已有许多酒精生产企业开展了清洁生产审计工作。通过酒精清洁生产审计的实施，企业提高了原材料、水、能源和设备的利用率，降低了生产成本，提高了生产效率，降低和减少了污染的产生量和排泄量，减少了污染处理费用，同时树立了企业形象，扩大了企业影响。因此企业的经济效益、环境效益都将得到提高。

酒精清洁生产审计的流程一般为：宣传发动、建立组织→预评估→备选方案的产生与筛选→可行性分析→方案实施→持续清洁生产（具体见图 4.1）

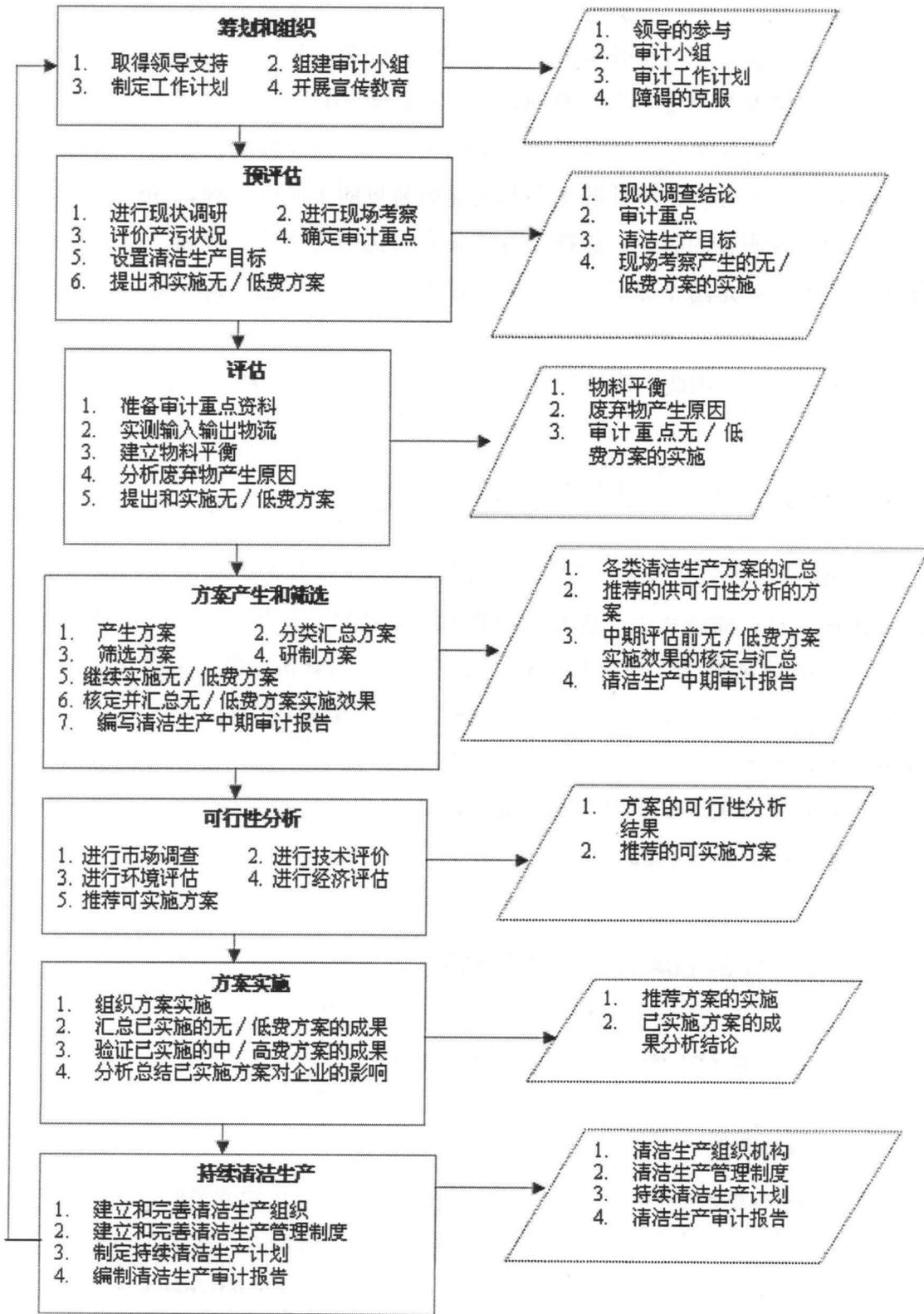


图 4.1 清洁生产审计的一般流程

清洁生产审计的一般流程表明，其重点和前提在于确定审计重点，即通过调研和现场考察，分析企业生产中存在的问题或薄弱环节，找出“废物产生的原因”。企业在做审计重点的选择时，一般采用权重总和法、打分法和投票法等。以上几种方法均为依靠生产经验确定不同生产工艺或阶段的权重值，从而确定审计重点。一般而言，审计的重点都是显而易见的工艺或流程。当生产环节的环境影响比较明显的时候，这样的方法具有很强的实用性。然而，以上确定审计重点的方法，是基于资源消耗、能源使用和污染物排放量的判断，并没有完全与企业的生产的环境压力建立定量的联系，即各生产工艺流程所造成的具体的环境压力大小。因此，清洁生产审计可以在定量分析方面做出进一步改进。

4.2 酒精企业环境管理中应用 LCA 的意义

LCA 是一种对产品全生命周期阶段或生产全过程的环境和资源影响的分析、评价工具；而清洁生产也是一种基于“全过程”角度考虑的企业环境管理理论。因此 LCA 作为一种分析工具，可以通过影响评价模型，分析企业生产流程的对外环境影响，建立定量关系；同时可以与清洁生产审计结合运用于酒精企业的环境管理工作中，根据环境影响的程度，进而确定清洁审计的重点。这样可以弥补清洁生产审计的不足，发挥 LCA 全生命周期的定量分析优势，从而支持清洁生产的研究和实施。

4.3 酒精企业的 LCA 技术方法和过程

4.3.1 酒精生产 LCA 的前提条件与背景知识

4.3.1.1 前提条件

建立我国酒精生产的 LCA 最基本的前提条件，便是需要了解国内不同酒精企业的生产方式。由于化学合成法酒精有含杂较多等缺陷，其应用受到限制，因此发酵法酒精仍占重要地位，尤其是随着世界性石油危机的发生，石油储量锐减，发酵法酒精工业将日趋重要。在我国，发酵法生产酒精的比例占绝对优势，其中，淀粉质原料(玉米、薯干、木薯)占酒精生产原料的 75%，废糖蜜原料

占酒精生产原料的15%，以亚硫酸盐纸浆废液等纤维原料生产的酒精约占2%左右，合成酒精占酒精总产量的3.5%左右。由于本文的研究针对我国的酒精行业，因此将重点放在发酵法酒精生产的企业，其中，以淀粉质和糖蜜为原料的酒精生产企业为主要的研究对象。

4.3.1.2 传统酒精生产方法

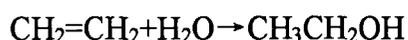
传统酒精生产方法有发酵法和化学合成法两种。发酵法是将淀粉质、糖质原料，在微生物作用下经发酵生产酒精。化学合成法是利用炼焦碳裂解石油的废气为原料，在高温高压作用下合成。

(1) 淀粉质原料发酵酒精是我国当前生产酒精的主要方法，它是利用玉米、薯干、木薯等含有淀粉的农副产品为主要原料，经蒸煮、糖化工艺将淀粉转化为葡萄糖，并进一步发酵生产酒精。

(2) 糖蜜原料发酵生产酒精是以制糖生产工艺排出的废糖蜜为原料，经稀释并添加营养盐，在微生物的作用下进一步发酵生产酒精。

(3) 亚硫酸盐纸浆废液发酵生产酒精是在造纸原料经亚硫酸盐液蒸煮后，废液中含有六碳糖，这部分糖在酵母作用下可以发酵生产酒精，主要是工业酒精。

(4) 化学合成法生产酒精是利用炼焦碳裂解石油的废气为原料，经化学合成反应而制成酒精，其化学反应式如下：



化学合成法又分为间接水合法和直接水合法，间接水合法对设备腐蚀严重，酸消耗较多；直接水合法是乙烯和水蒸气在磷酸催化下，温度285—305℃，70个大气压下合成，对设备和材料的要求较高。

下面将详细介绍淀粉质原料和糖蜜原料的酒精生产过程。

4.3.1.3 淀粉质原料酒精生产过程

淀粉质原料生产酒精时，投产前必须先把块状或粒状的原料，磨碎成粉末状态后，经过高压蒸煮和糖化作用，然后在进行发酵，最后经蒸馏得到成品酒精，具体工艺如下：

1. 原料粉碎 连续蒸煮的酒精工厂，原料出库后，先经过粉碎，然后在投入生产。几乎大多数工厂都采用了锤式粉碎机，把原料磨成粉。很多工厂都采用二次粉碎法，在进入锤碎机前先经过粗碎，把大块原料初步打碎成小块原料，

再经过锤碎机，将小块原料打碎成较细的粉末原料，这样便于连续蒸煮。

2. 蒸煮糊化 把磨碎后的粉末原料，先行拌水预热，使原料升温，为连续蒸煮作好预煮准备。原料内的淀粉颗粒，经高压蒸煮后逐步破裂，趋于溶解状态，蒸煮醪液成糊状。

3. 曲霉糖化 经蒸煮糊化后的醪液，通过曲霉菌的淀粉酶进行糖化作用。曲霉菌生成的淀粉酶，能把原料内含有的淀粉转变为可发酵性糖，供酵母菌利用。曲霉菌是属于好气性的微生物，故在繁殖和生长过程中要给以充分得空气，同时，淀粉酶的形成也取决于所供给的空气量。

4. 酵母发酵 酒精发酵是属于厌气性发酵，在发酵过程中进行无氧呼吸，在此过程中，发生着复杂的生物化学变化，既有糖化醪中淀粉和糊精继续被淀粉酶水解生成糖，也有蛋白质在曲霉蛋白酶水解下生成肽和氨基酸。这些物质一部分被酵母吸收合成菌体细胞，另一部分则被发酵，生成酒精和 CO_2 。

5. 蒸馏提纯 经酵母菌把糖转变成酒精后，在成熟发酵醪内，除含有酒精和大量水分外，还含有固形物和许多杂质。蒸馏是把发酵醪中含有的酒精提纯出来，通过粗馏和精馏，最后取得合乎规格的酒精，同时得到副产物酒精糟，还有大量的酒糟（也称废醪液）排除。有的工厂把酒糟内的余热，设法取出，充分利用。

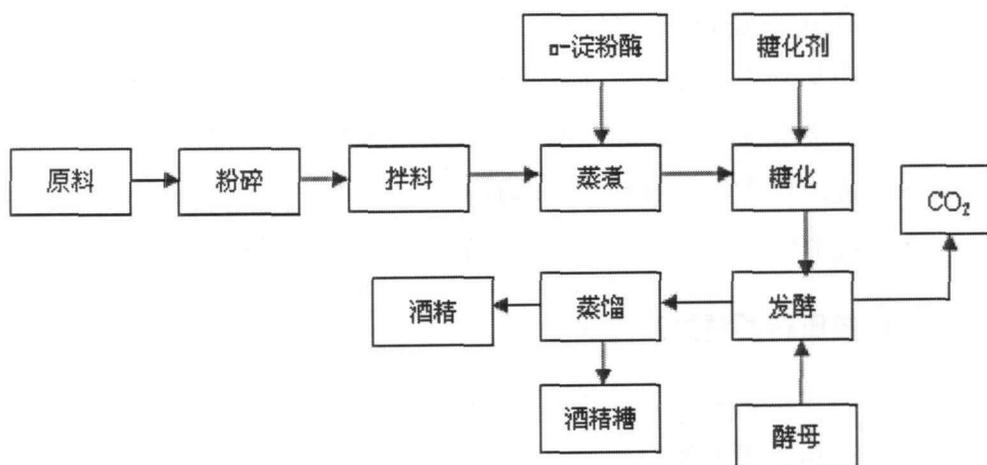


图 4.2 淀粉质原料制酒精的工艺流程图

4.3.1.4 糖蜜原料酒精生产过程

糖蜜原料生产酒精，直接利用糖蜜中的糖分，经过稀释并添加部分营养盐，借酒母的作用发酵生成酒精。大致生产流程如下：

糖蜜→稀糖液制备→稀糖液→发酵→蒸馏→成品酒精

从糖蜜酒精发酵的特点，可清楚看到糖蜜干物质浓度很大，糖分高，产酸细菌多，灰分与胶体物质很多，如不预先进行处理，酵母是无法直接进行发酵的。因此必须进行预处理，糖蜜的处理程序包括稀释、酸化、灭菌、澄清和添加营养盐等过程。

发酵过程以及成熟醪蒸馏的机理，设备和要求与淀粉质原料酒精生产相同，本节不作叙述。

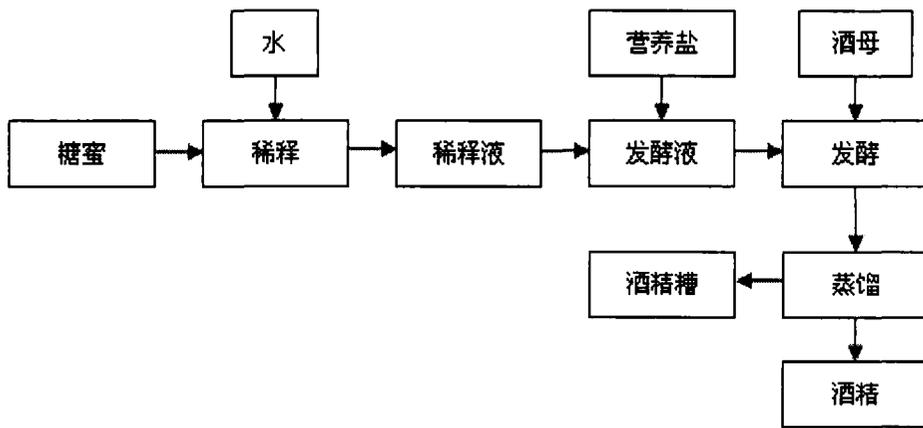


图 4.3 糖蜜原料生产酒精的工艺流程图

4.3.2 酒精企业 LCA 的技术过程

鉴于目前我国酒精行业在工艺生产上的特点，本 LCA 研究技术方法主要针对淀粉质原料和糖蜜原料生产。在后面的论述中，如果具体的技术方法上二者有不同之处，文章将分别加以说明。

4.3.2.1 LCA 目的和范围的确定 (Goal and Scope Definition)

(1) 目的

对于每一项 LCA 来说，首先应该明确的便是其目的，因为 LCA 的目的决

定了研究范围和系统边界的界定,以及整个研究对数据质量的要求。对于本研究来说,LCA的目的有两个:①通过分析、评价支持酒精企业的清洁生产审计工作,为企业的环境管理工作提供决策支持。②探索国内酒精生产的LCA技术方法,为以后生命周期评价的进一步研究提供借鉴。

(2) 研究范围

一般情况下,当LCA用于产品系统时,通常研究的范围是产品的整个生命周期,即从原材料采集,到生产、使用,最后废弃的一系列过程。然而,我们的研究对象基本是已建成投入生产的企业,因此,对于企业的清洁生产来说,企业外部的情况(如原材料的选取、加工,酒精的使用和最后的处置)可以不纳入企业管理的范畴。基于此,我们限制LCA的研究范围为企业内部的生产流程,即企业生产工艺的生命周期评价。

需要特别指出的是,由于系统的范围是企业内部的生产流程,故我们需要将生产工艺系统划分为不同的生产单元,以每个生产单元为基础进行数据分析。

(3) 功能单位

在LCA研究中,功能单位使选定的产品基本功能的定量化表达,是统一比较不同产品方案输入和输出的基准。对于酒精生产,本文选定LCA的功能单位为1吨酒精产品。

4.3.2.2 生命周期清单(Life-Cycle Inventory)

酒精生产LCA的研究范围确定以后,单元过程和有关的数据类型也就初步确定了。下面的工作便是进行数据的收集,并进行LCA清单分析。

(1) 数据的收集

对于酒精生产清单分析数据的来源,我们可以从以下几个方面获得:

自行收集:包括酒精企业提供的数据、各生产部门实际测得数据、自行测量所得。其中有些数据为企业内部各种测量仪表实时记录数据,可靠性强;一部分数据由技术人员及相关管理人员自行收集,往往比较直观,但不可避免的具有测量误差。

现有相关生命周期分析数据库和知识库:国外许多研究机构都建立有自己的数据库(如:BUWAL250、Ecoinvent等),用于生命周期分析。这些数据可靠性较高,但是不一定适合我国酒精企业的背景,而且可能会有很大的误差,只能结合数据获取背景进行借鉴和采用。

文献数据：许多论文、专著和研究报告等文献,都使用一些数据和方法来证明观点。这些数据和方法也是酒精生命周期分析的重要数据源之一。

(2) 清单分析

清单分析是一种定性描述系统内外物质流和能量流的方法,即建立酒精生产过程的输入、输出流。输入输出流是在数据收集的基础上,通过细化系统边界,围绕每个生产单元建立能流、物流清单。输入流就是输入的原料、各种物料和能源;输出流是指生产系统输出的产品和释放到环境中的物质(包括废气、废水、固体废弃物及其他环境释放物)。在输入、输出流的基础上,通过信息工具(即 LCA 应用软件)进行清单数据分析,可以生成各生产单元过程的物质、能量关系图(树状或网络状结构图),便于研究者更方便的了解企业生产流程之间的关系。

4.3.2.3 生命周期影响评价(Life-Cycle Impact Assessment)

环境影响评价是一种建立清单数据与环境影响之间定量关系的方法。目前国际上采用的评价方法,基本上可以分为两大类:“环境问题法”和“目标距离法”。前者着眼于环境影响因子和影响机理,对各种环境干扰因素采用当量因子转换而进行数据标准化和对比分析,如瑞典 EPS 方法、瑞士和荷兰的生态稀缺性方法(生态因子)以及丹麦的 EDIP 方法等;后者则着眼于影响后果,用某种环境效应的当前水平与目标水平(标准或容量)之间的距离来表征某种环境效应的严重性,其代表方法是瑞士的临界体积方法。下面简要介绍几种常用的影响评价模型。

(1) 环境优先策略(Environment Priority Strategies, EPS)

EPS 系统^{[64][65]}是瑞典环境研究院(IVL)和 Volvo 汽车公司与 1989 年合作开发的一个环境评估系统。EPS 系统是从汽车的研究开始,进而开发完成。EPS 的目标就是让产品设计人员选择那些环境影响最小的零部件。从应用的角度看, EPS 系统既详尽,又直观。汽车生产用到的每一种材料都被赋予一个环境指数。不同阶段的环境指数反映了这种材料在汽车生产、使用和最终处置过程中的环境影响。把这 3 个生命周期阶段的环境指数加起来就得到这种材料的总环境指数(单位为 ELU/kg),也就是使用每 kg 材料的环境负荷单位(ELUs)。将环境指数与所消耗的材料量相乘,即可得到生产过程和最终产品的环境负荷。表 4.1 描述了部分环境指数。

表 4.1 EPS 系统中的部分环境指数(ELU/kg)

原料		向空气的排放		向水体的排放	
Co	256	CO ₂	0.108	BOD	0.002
Cr	84.9	CO	0.331	磷	0.055
Fe	0.96	NO _x	2.13		
Mn	5.64	N ₂ O	38.3		
Mo	2120	SO ₂	3.27		
Ni	160	CFC-11	541		
Pb	175	HCFF-22	194		
Pt	7430000	CH ₄	2.72		
Rh	4950000				
Sn	1190				
V	56				

资料来源: B.Steen, A Systematic Approach to Environmental Priority Strategies in Product Development (EPS). Version 2000-General System Characteristics, CPM Report 1999:5, Chalmers University, Göteborg, Sweden, 1999.

EPS 系统目前正在被改进, 而且被越来越多的组织使用。许多软件包都含有大容量的数据库并且简单易用。

(2) SETAC/CML 模型

此模型由荷兰 Leiden 大学的环境科学中心(Center for Environment Science, Leiden, the Netherlands)发布。下面给出几种常见的大气排放物的特征化因子, 如表 4.2。

表 4.2 几种常见大气排放物的特征化因子

排放	温室效应	臭氧层破坏	人体毒性	酸化效应
CO ₂	1	—	—	—
CO	—	—	0.012	—
NO _x	—	—	0.78	0.7
SO ₂	—	—	1.2	1

以上每一个特征化因子乘以每一种排放物的量，便得到了该排放物对相应的环境影响值的大小，即环境影响的程度。

(3) 环境指数方法(Eco-Indicator)

环境指数方法（Eco-Indicator）是由荷兰住宅、空间规划与环境部委托，瑞士科学基金会环境优先项目协同资助，一个名为"产品生态学咨询组织"（Product Ecology Consultants）的LCA和环境专家的国际组织发展起来的。

Eco-Indicator方法（即环境指数法）是一个全新的评价方法，取得了一系列理论和方法上的突破，得到材料的单一评价数值。它建立了资源消耗、土地使用、气候变化、离子辐照、酸化富营养化和生态毒性的全新的环境影响模型。

通过对"环境"的可能的定义进行了大量研究之后，该组织(Product Ecology Consultants)把生态状况定义为：一组受人类活动影响的生物学、物理学和化学方面的参数，反映了人类和自然界功能的健康状况。这些状况包括人类健康、生态系统健康和资源的存储和供应情况。

根据这样的定义，环境指数法是基于对环境损害的原理对产品生命周期进行环境影响评价的方法^[66]，这里所说的环境是指三个方面：人类健康(Human health)、生态系统健康(Ecosystem health)、资源储藏（Resource base）。这三个项目称为损害类别(Damage Category)。

而环境指数法就是针对损害导向(damage-oriented)所开发的环境影响评价方法。此方法先污染排放物对环境造成的冲击负荷与污染影响类别，然后再经过特征化(Characterization)、损害评价(Damage analysis)、标准化(Normalization)、加权(Weighting)和单项数值(Single score)五项步骤来表现环境负荷的严重程度。

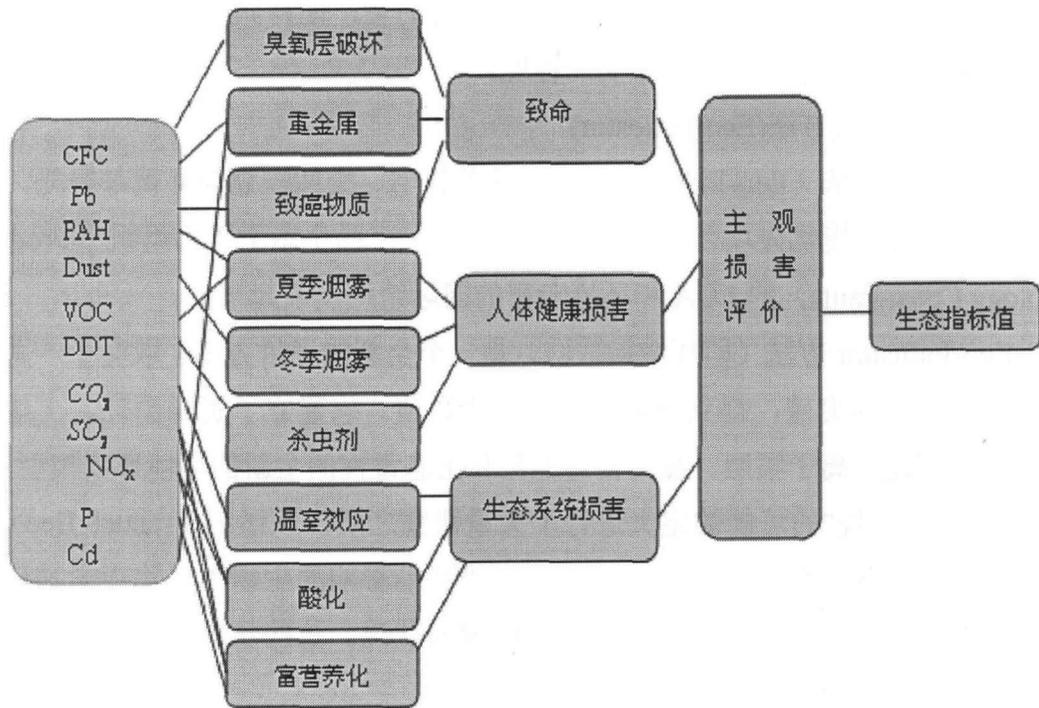


图 4.4 Eco-indicator 的生态指标结构图

图片来源: The Eco-indicator95 Final Report (1996)

不同的污染物对环境的影响, 可以通过污染物排放量与特征化因子的乘积, 得到不同污染对特定环境指标的影响程度, 如下列方程式所示:

$$\text{指标类别} = \sum \text{特征化因子} \times \text{污染物的量}$$

环境指数是在生命周期分析的数据基础上计算得出的单一数值, 不仅可以用来表述某一产品的环境损害相对负荷值, 也可以表述某种材料或某个过程的环境影响相对负荷值。环境生态指数被定义为单位物理量的代数值。将所有环境负荷值乘以数量相加, 可得产品系统增加的总的环境负荷值^[67]。

对于所有影响评价模型来说, 基本的评价步骤是: 特征化(Characterization)、损害评价(Damage assessment)、标准化(Normalization)和权重(Weighting)。根据 ISO 标准, 后三步是可以选择的, 即特征化是必须进行的步骤。

某种物质针对某种环境影响类别的影响, 可以表示为该物质对该影响类别的权重系数乘以该物质的排放量。其中, 权重系数根据不同的模型选择, 以及不同的物质和对应的影响类别, 其值是不同的。例如, 全球变暖潜力(Global

Warming Potential, GWP) 用来表征各种温室气体导致全球变暖的能力,指这种变暖物质(与 CO₂ 相关) 圈住地球热量的能力,用瞬时排放 1 kg 温室气体造成的累积辐射效应与同一瞬时排放 1 kg 二氧化碳造成的累积辐射效应的比值表示。联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change , IPCC) 已研究完成了一些常见温室气体的 GWP。燃料乙醇生命周期排放的全球变暖潜力为其温室气体排放量与相关温室气体 GWP 系数乘积的和。

4.3.2.4 生命周期解释(Life-Cycle Interpretation)

(1) 问题识别

清单分析和影响评价阶段取得的结果满足了研究目的和范围的要求后,便建立起了酒精生产的清单结果与环境影响之间的定量关系,从而可以进一步找出造成环境压力的原因,即生产工艺中的哪个环节对环境造成的压力最大。这样,从分析结果来看,就可以比较直观的反映出企业生产流程中造成环境压力的重点环节。

(2) 改善评价

根据识别出的问题,寻找整个酒精生命周期内削减能源、资源消耗以及环境释放的机会。改进酒精生产系统环境性能的措施一般包括:生产工艺及相关技术的改进、资源的循环利用、废弃物处理的合理化等。它依赖于清单分析、影响评价或二者的结合。

LCA 前几个步骤目的都是为了找出改善产品生产环境性能的机会,因此改善评价是真正产生效应的一环。对酒精企业来讲,改善评价无疑将为企业开展清洁生产,实现可持续发展提供有效的技术和决策支持。^[68]

4.3.2.5 清洁生产方案的产生

在实施简单易行的无费、低费方案的基础上,通过前面的影响评价分析和解释,结合酒精行业的清洁工艺及企业生产的现实条件,研究产生合适的清洁生产方案,进行有的放矢的工艺改进,同时加强生产管理。

4.3.2.6 持续清洁生产

清洁生产不是一个阶段性工作,它是一个相对的概念,随着科学技术的进步,会不断有新的内容。因此,必须不断地结合时代的进步,提高对清洁生产概念中“相对清洁”提法的认识,深化清洁生产的进程。通过清洁生产技术的

研制、开发和推广应用，将逐渐淘汰技术工艺落后、资源消耗高、严重污染环境的生产工艺设备，重点发展能源和原材料消耗低、技术含量高、清洁无污染、附加值的绿色产品，以更好地为人类服务。

4.3.3 基于 LCA 的清洁生产模式

经过前面的分析，我们可以运用 LCA 的技术方法进行清洁生产审计，并将二者结合，得出基于 LCA 的清洁生产审计的一般方法，进而形成实施企业清洁生产的技术框架通用模式，如图 4.5。

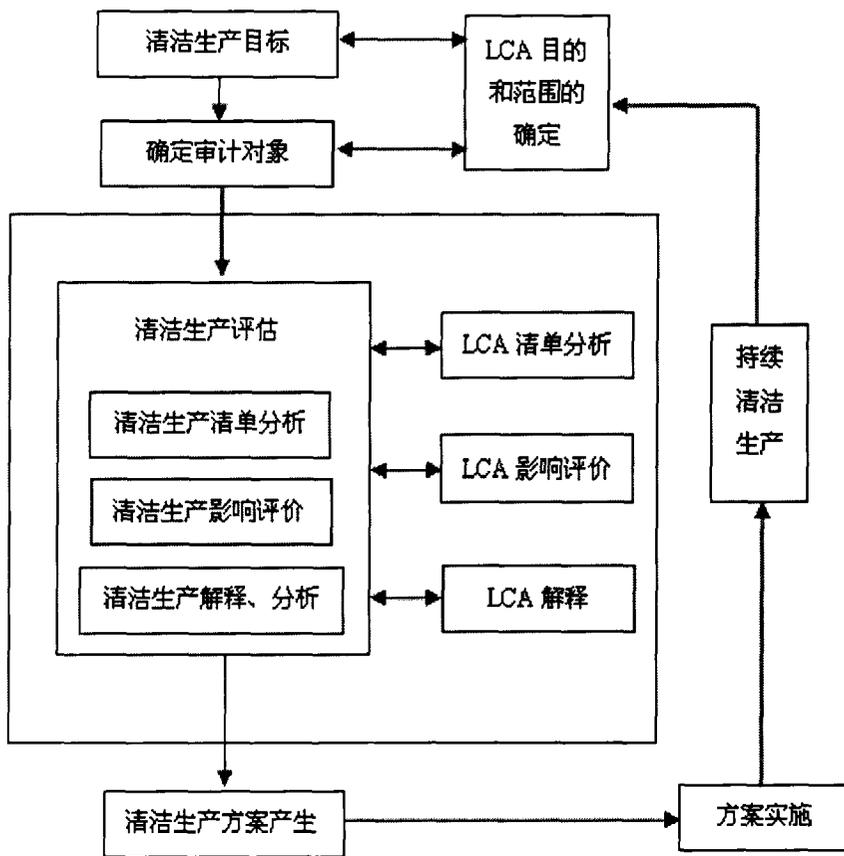


图 4.5 基于 LCA 的清洁生产技术框架模式

第5章 酒精企业 LCA 案例—以太仓市酒精厂为案例

在第4章建立的 LCA 技术框架的基础上,本章将以太仓市新太酒精厂为案例,运用最新的 LCA 软件 SimaPro7.0,对酒精生产进行生命周期评价,运用评价结果分析生产中造成环境污染的根源,发现企业进行清洁生产重点,进一步提出改进策略。本章的目的即是通过案例支持,对基于 LCA 的清洁生产技术框架做详细的描述,并为后续的研究工作提供借鉴。

5.1 案例研究背景—新太酒精厂概述

太仓市新太酒精有限公司(简称新太,下同)是由新加坡光裕(私人)有限公司投资成立的外商独资企业,其前身为苏州百科化工有限公司,于1994年5月建成投产,属于化工行业中以木薯为原料的酒精生产企业。太仓市新太酒精有限公司以木薯为原料,年生产酒精5万多吨,其中无水酒精1万吨,优级食用酒精3万吨,药用酒精1万吨、系列消毒药用瓶装酒精1000吨,二氧化碳2万吨、沼气1200万 m^3 。该厂就生产规模而言,在国内酒精行业中属于大型企业。酒精产品70%外销,主要出口日本、韩国、新加坡、印尼、台湾等国家和地区,年销售逾1.8亿元人民币,出口创汇1200万美元。该厂临河而建,占地面积10万 m^2 ,分为生产部和污水处理部及能源部。全厂职工人数216名,其中各级工程技术人员38名,占职工总数的18%。

新太采用进口木薯(淀粉含量 $\geq 65\%$,水分 $\leq 14\%$,含砂量 $\leq 3\%$)为原料,运用发酵工艺进行各类食用酒精的生产,成品的原料消耗为2.85吨/吨。厂内三班连续作业,生产过程采用电脑及仪表自动化控制,以确保产品质量和正常运行。工艺流程见图5.1。

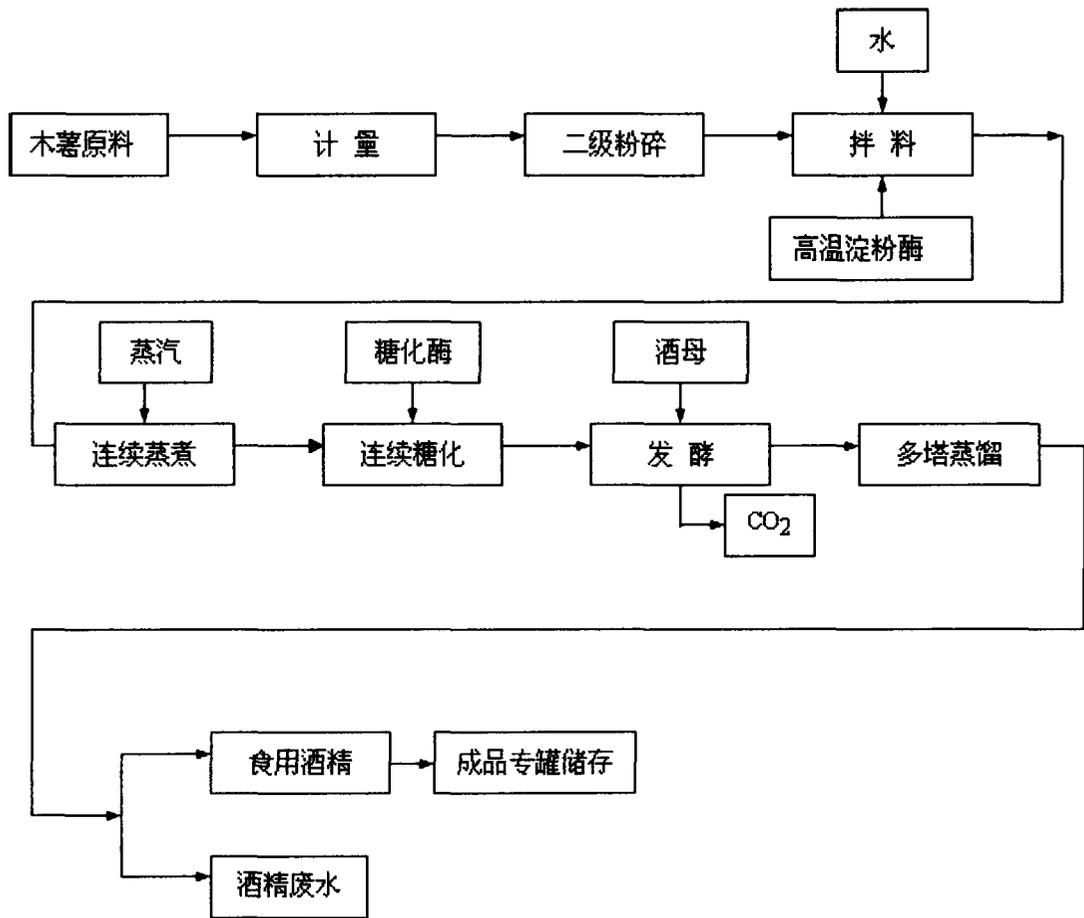


图 5.1 新太酒精厂工艺流程图

5.2 运用 SimaPro 进行酒精生产生命周期评价

目前酒精厂的清洁生产审计，主要是通过物料和能量衡算，发现企业生产环节的能量利用和污染物排放方面的问题，从而确定审计重点，通过分析，确定了切实可行的清洁生产方案。而 LCA 作为一种环境评价的方法和工具，可以更全面、细致地盘查酒精生产中能量利用和污染物排放情况，并通过定量地环境影响评价，更准确的找出企业中的环境问题。因此，通过开展企业的 LCA，可以更好的指导清洁生产审计。下面就本案例的 LCA 具体环节进行阐述。

5.2.1 目的与范围的确定

5.2.1.1 研究目的

本案例的 LCA 研究目的是通过将 LCA 方法应用于新太酒精厂的清洁生产审计中,通过分析环境负荷最大的生产工艺过程,针对问题,提出解决方案,进而为企业的环境管理决策提供技术支持;为以后酒精生产的 LCA 研究提供可借鉴的方法。

5.2.1.2 研究范围和功能单位

通过上一章的分析,本案例中以新太酒精厂的产品酒精为研究对象,以企业内各生产环节为研究重点。酒精生产主要包括以下四个流程:

(1) 拌料糊化工序

木薯原料进入投料口经二级粉碎(采用锤式机 ϕ 1.5mm 筛子)成为木薯粉。木薯粉与水按 1:3.5—3.8 比例在拌料罐内混成料浆并适当加热,控制温度为 50—60℃。

(2) 蒸煮糖化工序

料浆经往复泵输送入蒸煮锅,采用蒸汽直接加热至 110—120℃进入维持罐保温,时间约为 90 分钟,目的是使原料淀粉充分膨胀,糊化变成糊精或多肽糖。糖化醪经喷淋冷却至 32℃左右,输送入发酵罐。目的是使糊精转化为可发酵性糖。

(3) 酒母发酵工序

糖化醪进入发酵罐(400 立方米共 15 只)同时加入酒母,控制温度为 ≤ 38 ℃(夏天 ≤ 40 ℃)。发酵时间为 72 小时左右,成熟醪含酒精量 10—11%。

(4) 蒸馏工序

成熟发酵醪经中间罐后泵进入粗馏塔,用蒸汽直接加热,塔顶温度控制在 100℃左右,底部温度控制在 110℃左右,塔顶蒸汽含酒精约 40—45%进入精馏塔,塔底排出酒精糟液排入废糟池。

粗馏塔酒精汽在精塔中下部进入,精馏塔采用蒸汽直接加热,顶温控制在 78℃左右,底温控制在 107℃左右,中部温度控制在 85℃左右。采用强制回流,塔顶控制排杂(主要是低沸点物质)并提取适量的工业酒精,塔中提取杂醇油(主要是高沸点多级醇),塔底排放废热水(可作为杀菌用水等),塔底部适

当的板数后提取成品食用酒精。

新太酒精厂能源部有两台锅炉和一台发电机组，酒精制造部门的生产过程所需蒸汽和电能全部来自能源部。

除酒精生产流程，该厂还引进污水处理设施，用以处理酒精废液。由于污水处理设施不属于一般酒精工艺流程种，为使研究具有普遍意义，故暂时不考虑污水处理环节。

本案例选取 LCA 功能单位为 1 吨酒精产品。

5.2.1.3 系统边界

为了数据处理和分析的方便，本文将酒精生产系统分为以下 5 个单元：粉碎和拌料、蒸煮、糖化、发酵、蒸馏。LCA 的系统边界如图 5.2 所示。

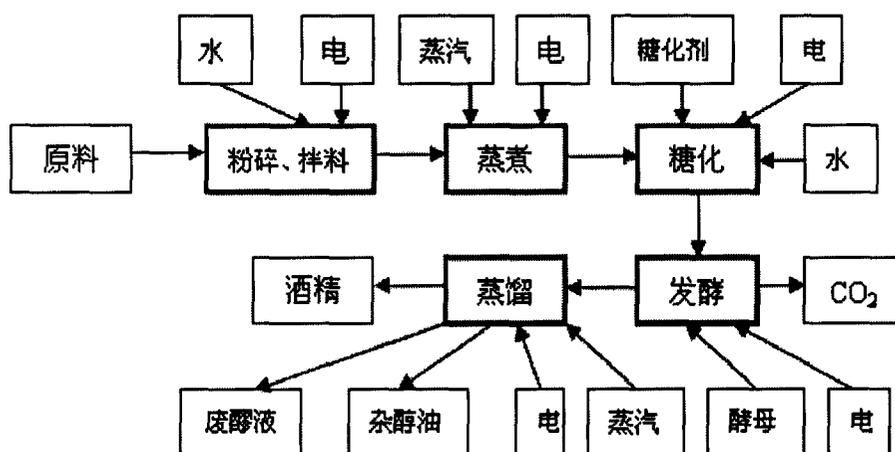


图 5.2 本案例研究的系统边界

5.2.1.4 数据类型及质量

本案例中，通过调查，计算下列几种数据类型：

- (1) 主要原材料的消耗（木薯原料、酒精生产辅料等）；
- (2) 生产过程中水的消耗；
- (3) 对大气的主要排放；
- (4) 对水体的主要排放；
- (5) 对土壤的主要排放；

(6) 主要能量的消耗，为电能和蒸汽的消耗。

(7) 能源消耗，在本案例中指煤的燃烧。

本案例以太仓市新太酒精厂的生产过程数据为基础，与酒精生产相关的数据为实地调查、计算得到，锅炉燃烧发电数据为根据实际情况做了适当假设的基础上的通用数据。

5.2.2 清单分析

5.2.2.1 能源生产的清单数据

新太酒精厂酒精生产需要的能源全部来自该厂能源部所生产的能源，通过 2 台锅炉和一台发电机提供全厂生产、运行所需的电和蒸汽。其中，生产 1 吨蒸汽耗煤 0.12 吨，1 度电耗煤 0.35kg。生产 1 吨酒精消耗蒸汽 5.3 吨，耗电 165.8kW.h。同时，煤燃烧时排放废气、废渣等。由于该厂没有煤燃烧污染物排放数据，在本案例中采用通用数据，例如，设定煤的含硫量为 1.65%。根据我国实际统计数据，单位能源生产的污染物排放量见表 5.1^{[69][70]}。由于条件有限，本案例没有对煤燃烧排放的可吸入颗粒物数据进行采集。

表 5.1 单位能源生产污染物排放量

名称	污染物名称	数量/单位
大气污染物	废气量	2.52Nm ³ /kW.h
	CO	0.081g/kW.h
	CO ₂	631g/kW.h
	C _n H _m (碳氢化合物)	0.032g/kW.h
	NO ₂	3.180g/kW.h
	SO ₂	11g/kW.h
固体废物	废石、尾矿	0.578kg/kW.h
	粉煤灰	0.147kg/kW.h
	炉渣	0.017kg/kW.h

图 5.3 为 SimaPro 中电能生产过程的数据输入界面。在 SimaPro 中，该生产过程作为其他生产单元中电能的输入与其他单元过程连接。

第 5 章 酒精企业 LCA 案例—以太仓市酒精厂为案例

Products						
Known outputs to technosphere. Products and co-products						
Name	Amount	Unit	Quantity	Allocation %	Category	
电能	1	kWh	Energy	100 %	Electricity by fuel/Coal	
(insert line here)						
Known outputs to technosphere. Avoided products						
Name	Amount	Unit	Distribution	SD*2 or 2*SD Min	Max	
(insert line here)						
Inputs						
Known inputs from nature (resources)						
Name	Sub-compartment	Amount	Unit	Distribution	SD*2 or 2*SD Min	Max
Coal, brown (ignite)	in ground	0.35	kg	Undefined		
(insert line here)						
Known inputs from technosphere (materials/fuels)						
Name	Amount	Unit	Distribution	SD*2 or 2*SD Min	Max	
(insert line here)						
Known inputs from technosphere (electricity/heat)						
Name	Amount	Unit	Distribution	SD*2 or 2*SD Min	Max	
(insert line here)						
Outputs						
Emissions to air						
Name	Sub-compartment	Amount	Unit	Distribution	SD*2 or 2*SD Min	Max
Carbon dioxide, fossil	high. pop.	631	g	Undefined		
Carbon monoxide, fossil	high. pop.	0.081	g	Undefined		
Nitrogen dioxide	high. pop.	3.180	g	Undefined		
Sulfur dioxide	high. pop.	11	g	Undefined		
Hydrocarbons, unspecified	high. pop.	0.032	g	Undefined		

图 5.3 发电过程的数据输入界面

5.2.2.2 主要输入的清单数据

酒精生产各单元的主要输入为原材料（木薯）、水、蒸汽和电能。其中，酒精生产用水主要为冷却水，拌料水和生产蒸汽用水。各单元主要输入原料和能量的数据以新太酒精厂实际生产流程为基础，通过调研，以 2003 年全年生产数据为基础，根据酒精年产量，折算成一吨酒精所需要的原料和能量。

表 5.2 各单元主要输入的数据清单

能源类型	单位	合计	粉碎、拌料	蒸煮	糖化	发酵	蒸馏
木薯原料	t/t	2.78	2.78	0	0	0	0
酒母	t/t	0.78	0	0	0	0.78	0
蒸汽	t/t	5.29	0	1.46	0	0	3.84
电能	kW · h/t	165.8	106.51	20.46	14.55	1.11	23.18
水	t/t	113.47	8.35	0	14.41	33.8	56.91

5.2.2.3 气体排放

表 5.3 各生产单元向大气中的排放

排放物质	单位	合计	粉碎、拌料	蒸煮	糖化	发酵	蒸馏

第 5 章 酒精企业 LCA 案例—以太仓市酒精厂为案例

CO ₂	kg/t	2187.18	67.21	328.76	9.18	936.70	845.34
CO	g/t	160.61	8.63	42.20	1.18	0.09	108.52
C _n H _m	g/t	63.45	3.41	16.67	0.47	0.04	42.87
NO ₂	g/t	6305.47	338.69	1656.81	46.26	3.53	4260.18
SO ₂	kg/t	21.81	1.17	5.73	0.16	0.01	14.74
甲醇	g/t	2.56	0	2.56	0	0	0
甲醛	g/t	12.79	0	0	0	0	12.79
氢氰酸	kg/t	0.139	0	0.139	0	0	0

5.2.2.4 向水体的排放

生产过程的废水主要来自蒸馏发酵成熟醪后排出的酒精糟液，以及排入下水道的冷却水。

表 5.4 各单元过程向水体的排放

单元过程	污染物	单位	排放量
糖化	COD	kg/t	0.825
发酵	COD	kg/t	3.4
蒸馏	废醪液	t/t	10.5
	COD	Kg/t	524.78
	BOD	Kg/t	200.65
	SS	Kg/t	514.49
	总氮	Kg/t	12.6
	杂醇油	Kg/t	3.5
	异丁醇	g/t	852.25
	戊醇	g/t	2406.6
	游离脂肪酸	g/t	0.385
	酯类	g/t	0.7
	糠醛	g/t	0.175

由表 5.4 可以看出，酒精生产中向水体排放污染物最多的单元是蒸馏过程。其中包括杂醇油和发酵后的废醪液中的主要污染物质。

5.2.2.5 固体排放物

表 5.5 固体排放物清单汇总

排放物质	单位	合计	粉碎、拌料	蒸煮	糖化	发酵	蒸馏
酒精糟泥	t/t	6.15	0	0	0	0	6.15
粉煤灰	kg/t	1146.09	61.56	301.14	8.41	0.64	774.34
炉渣	kg/t	291.48	15.66	76.59	2.14	0.16	196.93
废石、尾矿	kg/t	33.71	1.81	8.86	0.25	0.02	22.77

5.2.3 SimaPro 中各生产单元数据的输入

图 5.4 粉碎、拌料单元数据的输入界面

第 5 章 酒精企业 LCA 案例—以太仓市酒精厂为案例

Products						
Known outputs to technosphere. Products and co-products						
Name	Amount	Unit	Quantity	Allocation %	Waste type	
蒸煮液	11.878002	ton	Mass	100 %	not defined	
(Insert line here)						
Known outputs to technosphere. Avoided products						
Name	Amount	Unit	Distribution	SD*2 or 2*SD Min		
(Insert line here)						
Inputs						
Known inputs from nature (resources)						
Name	Sub-compartment	Amount	Unit	Distribution	SD*2 or 2*SD Min	
(Insert line here)						
Known inputs from technosphere (materials/fuels)						
Name	Amount	Unit	Distribution	SD*2 or 2*SD Min		
拌料液	11.139624	ton	Undefined			
(Insert line here)						
Known inputs from technosphere (electricity/heat)						
Name	Amount	Unit	Distribution	SD*2 or 2*SD Min		
Steam china	1.46	ton	Undefined			
电能	20.46	kWh	Undefined			
(Insert line here)						
Outputs						
Emissions to air						
Name	Sub-compartment	Amount	Unit	Distribution	SD*2 or 2*SD Min	
Methanol	high. pop.	2.56	g	Undefined		
Hydrogen cyanide	high. pop.	0.139	kg	Undefined		

图 5.5 蒸煮单元数据输入界面

Products						
Known outputs to technosphere. Products and co-products						
Name	Amount	Unit	Quantity	Allocation %	Waste type	
糖化	11.157066	ton	Mass	100 %	not defined	
(Insert line here)						
Known outputs to technosphere. Avoided products						
Name	Amount	Unit	Distribution	SD*2 or 2*SD Min		
(Insert line here)						
Inputs						
Known inputs from nature (resources)						
Name	Sub-compartment	Amount	Unit	Distribution	SD*2 or 2*SD Min	
Water, barrage	in ground	14.41	ton	Undefined		
(Insert line here)						
Known inputs from technosphere (materials/fuels)						
Name	Amount	Unit	Distribution	SD*2 or 2*SD Min		
(Insert line here)						
Known inputs from technosphere (electricity/heat)						
Name	Amount	Unit	Distribution	SD*2 or 2*SD Min		
电能	14.55	kWh	Undefined			
(Insert line here)						
Outputs						
Emissions to air						
Name	Sub-compartment	Amount	Unit	Distribution	SD*2 or 2*SD Min	
(Insert line here)						
Emissions to water						
Name	Sub-compartment	Amount	Unit	Distribution	SD*2 or 2*SD Min	
COD, Chemical Oxygen Demand	river	0.825	kg	Undefined		

图 5.6 糖化单元数据输入界面

第 5 章 酒精企业 LCA 案例—以太仓市酒精厂为案例

Known outputs to technosphere. Products and co-products						
Name	Amount	Unit	Quantity	Allocation %	Waste type	
发酵液	11.157066	ton	Mass	100 %	not defined	
(insert line here)						
Known outputs to technosphere. Avoided products						
Name	Amount	Unit	Distribution	SD*2 or 2*SD Min		
(insert line here)						
Inputs						
Known inputs from nature (resources)						
Name	Sub-compartment	Amount	Unit	Distribution	SD*2 or 2*SD Min	
酒母	in ground	0.78	ton	Undefined		
Water, cooling, unspecified natural origin/kg	in ground	33.8	ton	Undefined		
(insert line here)						
Known inputs from technosphere (materials/fuels)						
Name	Amount	Unit	Distribution	SD*2 or 2*SD Min		
糖化液	11.157066	ton	Undefined			
(insert line here)						
Known inputs from technosphere (electricity/heat)						
Name	Amount	Unit	Distribution	SD*2 or 2*SD Min		
电能	1.11	kWh	Undefined			
(insert line here)						
Outputs						
Emissions to air						
Name	Sub-compartment	Amount	Unit	Distribution	SD*2 or 2*SD Min	
Nitrogen dioxide	high. pop.	936	kg	Undefined		
(insert line here)						
Emissions to water						
Name	Sub-compartment	Amount	Unit	Distribution	SD*2 or 2*SD Min	
COD, Chemical Oxygen Demand	river	3.4	kg	Undefined		

图 5.7 发酵单元数据输入界面

第 5 章 酒精企业 LCA 案例—以太仓市酒精厂为案例

Name	Amount	Unit	Quantity	Allocation %	Waste type	
成品酒精	1	ton	Mass	100 %	not defined	
(insert line here)						
Known outputs to technosphere. Avoided products						
Name	Amount	Unit	Distribution	SD*2 or 2*SD Min	Max	
(insert line here)						
Inputs						
Known inputs from nature (resources)						
Name	Sub-compartment	Amount	Unit	Distribution	SD*2 or 2*SD Min	Max
Water, cooling, unspecified natural origin/kg	in ground	56.91	ton	Undefined		
(insert line here)						
Known inputs from technosphere (materials/fuels)						
Name	Amount	Unit	Distribution	SD*2 or 2*SD Min	Max	
(insert line here)						
Known inputs from technosphere (electricity/heat)						
Name	Amount	Unit	Distribution	SD*2 or 2*SD Min	Max	
Steam china	3.84	ton	Undefined			
电能	23.18	kWh	Undefined			
(insert line here)						
Outputs						
Emissions to air						
Name	Sub-compartment	Amount	Unit	Distribution	SD*2 or 2*SD Min	Max
Formaldehyde	high. pop.	12.788	g	Undefined		
(insert line here)						
Emissions to water						
Name	Sub-compartment	Amount	Unit	Distribution	SD*2 or 2*SD Min	Max
COD, Chemical Oxygen Demand	river	524.78	kg	Undefined		
BOD5, Biological Oxygen Demand	river	200.65	kg	Undefined		
Suspended substances, unspecified	river	514.49	kg	Undefined		
Nitrogen, total	river	12.6	kg	Undefined		
Furfural	river	0.175	g	Undefined		
Fatty acids as C	river	0.385	g	Undefined		

图 5.8 蒸馏单元的数据输入界面

在 SimaPro 中，通过输入各单元的物质、能量数据，可以形成一个完整的能流、物流结构，图 5.9 即为本案例中酒精生产的树状结构图。需要注意的是，图中电能的单位为 MJ， $1\text{kW}\cdot\text{h}=3.7\text{MJ}$ 。

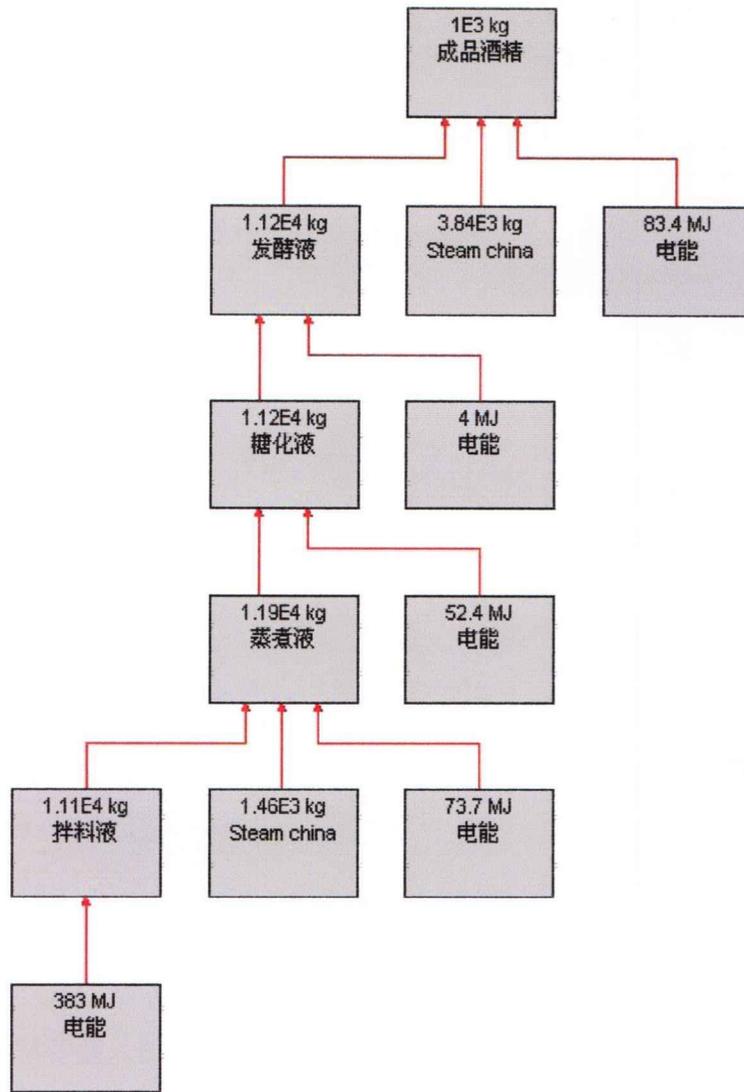


图 5.9 酒精生产流程树状结构图

5.2.4 影响评价

目前，国际上关于生命周期影响评价尚无统一的方法。目前一般采用 SETAC(1991,1993)建立的框架，如前所述将 LCIA 分为分类，特征化和评估三个步骤。而在最新的 ISO14042 标准中基本上承认了 SETAC 的方案，但进行了必备要素和可选要素的划分，即将分类和特征化以及影响类型、参数、评价模型作为必备要素，而将评价阶段列为可选要素，又进一步将其划分为归一化、分类、加权以及数据质量评价四个步骤。本文选用的评价模型为荷兰 Leiden 大学的环境科学中心开发的 CML 1992 v2.1。^{[71][72]}本案例对必选步骤进行了深入分

析，即只涉及了生命周期影响评价的分类和特征化的阶段。

5.2.4.1 分类

根据开展 LCA 目的以及对酒精生产过程中环境数据的分析，对酒精生产清单结果进行归类，影响类型分类是将生命周期清洁分析的结果划归到不同的影响类型中，使其能够更清晰地显现与该结果相关的环境问题。本文选择了温室效应、富营养化、酸化影响、人体毒性、光化学烟雾和资源消耗作为本案例研究的影响类型。

5.2.4.2 特征化

特征化是对 LCI 的结果进行统一的单位换算，并在同一影响类型内对换算结果进行合并。其目的是将每一个影响类型中的不同物质转化和汇总成为统一的单元。这一转换采用特征化因子，特征化的结果是一个量化指标。任何一种特征化方法，都受限于开发者对环境问题认识的深度和广度，由于本案例所采用的评价模型 CML 1992 v2.1 以欧美国家的情况为背景而开发的，所以在具体因子对于其他国家和地区具有局限性。随着后来不断的修正，该模型已在全世界范围内获得了推广，并且应用较广泛。因此，本案例中具体特征化因子采用 CML 1992 v2.1 中的因子。详细因子选取见附录。下面具体介绍环境影响潜值的计算方法。

(1) 全球变暖潜能

大气中的 CO₂ 和其他温室气体的增加一般来说会产生“温室效应”，从而提高全球平均气温和引起气候变化。全球变暖潜能(GWP)是指这种变暖物质对圈住地球的热量的贡献值。影响评价采用相关性因子方法来计算，排放的相关气体与相关性因子相乘得到。GWP 相关性因子是评估某种物质在大气的生存时间、可能对全球气候变化影响的辐射强度与 CO₂ 的相关性质相比较。因而，GWP 是与 CO₂ 有相关性的。

$$P_{GWP} = \sum \phi_i \cdot E_{GWPi} \quad (5.1)$$

式中， ϕ_i 为第 i 种温室气体排放的 GWP 系数； E_{GWPi} 是清单分析每功能单位第 i 种温室气体排放量。

(2) 水体富营养化的影响

由于氮磷含量过多造成水体富营养化是水污染的一种常见形式。水体富营

养化影响特征化是基于经处理后污水的集中排放。富营养化相关性系数是假定 N 和 P 是主要影响因素。

$$P_{EP} = \sum \theta_i \cdot E_{EPi} \quad (5.2)$$

式中, θ_i 为第 i 种富营养化物质排放的 EP 系数; E_{EPi} 是清单分析每功能单位第 i 种富营养化物质排放量。

(3) 酸化影响

污染物的酸化影响潜力(Acid Potential, AP)指污染物排放导致酸性降雨的能力,以 SO_2 为参考物(系数为 1.0)进行计算。酸化潜力为其相关污染物排放与相关 AP 系数乘积的和。

$$P_{AP} = \sum \gamma_i \cdot E_{APi} \quad (5.3)$$

式中, γ_i 为第 i 种酸化排放的 AP 系数; E_{APi} 为清单分析每功能单位第 i 种酸化污染物排放量。

(4) 人体毒性

人体毒性影响表示污染物质导致人体毒性的能力,用每千克污染物质暴露于环境中可能污染的人体重量来表示。

$$P_{HTP} = \sum \alpha_i \cdot E_{HTPi} \quad (5.4)$$

式中, α_i 为第 i 种排放的人体毒性特征化系数; E_{HTPi} 为清单分析每功能单位第 i 种人体毒性污染物排放量。

(5) 光化学烟雾的影响

光化学烟雾是大气中的自由基、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。光化学氧化反应潜能因子(POCP)是以化合物乙烯(系数为 1.0)为参照物对这种效应的贡献的相关度。影响评价是各种基于识别 POCP 相关性系数和相关化合物的数量的乘积的和。

$$P_{POCP} = \sum \beta_i \cdot E_{POCPi} \quad (5.5)$$

式中, β_i 为第 i 种光化学烟雾排放的 POCP 系数, E_{POCPi} 为清单分析每功能单位光化学烟雾污染物排放量。

(6) 资源和能量的消耗

自然资源是在自然界中得到的非人造的原材料,如水、矿石、化石燃料和木材等。能量的消耗是对整个能量生产循环而言非常有潜在意义影响。而清单分析中,燃料生产中排放的各种污染物根据分配的原则按其相关的性质均被计算入其相应的类目。在 CML 1992 v2.1 的特征化模型中,资源和能量均被成为

Energy sources, 而统一进行计算。计算方法同上面的几步。

5.2.4.3 特征化结果与分析讨论

在清单分析的基础上, 根据 CML 1992 v2.1 的特征化计算方法, 得出特征化结果。

表 5.6 影响类型分类及特征化结果汇总表 1

	单位	Total	除杂、拌料	蒸煮	糖化	发酵	蒸馏
全球变暖	kg GWP	2170	67.2	309	9.77	937	845
CO ₂	kg GWP	2170	67.2	309	9.77	937	845
人体毒性	HC	31	1.67	8.01	0.243	0.0174	21
SO ₂	HC	25.8	1.41	6.46	0.204	0.0147	17.7
NO ₂	HC	4.84	0.264	1.21	0.0384	0.00275	3.32
氢氰酸	HC	0.339	0	0.339	0	0	0
CO	HC	0.0019	0.000104	0.000476	1.51E-05	1.08E-06	0.0013
碳氢化合物	HC	0.00137	0.000075	0.000345	1.09E-05	7.81E-07	0.000943
富营养化	kg NP	17.7	0.044	0.202	0.0257	0.0753	17.4
COD	kg NP	11.6	0	0	0.0193	0.0748	11.5
总氮	kg NP	5.29	0	0	0	0	5.29
NO ₂	kg NP	0.807	0.044	0.202	0.0064	0.000459	0.554
酸化效应	kg AP	25.8	1.41	6.47	0.205	0.0147	17.7
SO ₂	kg AP	21.5	1.17	5.38	0.17	0.0122	14.7
NO ₂	kg AP	4.35	0.237	1.09	0.0345	0.00247	2.98
光化学烟雾	kg POCP	0.0305	0.00136	0.00653	0.000197	1.41E-05	0.0224
碳氢化合物	kg POCP	0.0249	0.00136	0.00623	0.000197	1.41E-05	0.0171
甲醛	kg POCP	0.00538	0	0	0	6.33E-21	0.00538
甲醇	kg POCP	0.000296	0	0.000296	0	0	0
资源消耗	MJ LHV	7830	369	1700	207	342	5210
原煤	MJ LHV	6760	369	1700	53.7	3.85	4640
水	MJ LHV	1060	0.0835	0	153	338	569

表 5.7 影响类型分类及特征化结果汇总表 2 (以百分比表示)

		除杂、拌料	蒸煮	糖化	发酵	蒸馏
	总和	3%	14%	0%	43%	39%
温室效应	CO ₂	3%	14%	0%	43%	39%
	总和	5%	26%	1%	0%	68%
	SO ₂	5%	25%	1%	0%	69%
	NO ₂	5%	25%	1%	0%	69%
	氢氰酸	0%	100%	0%	0%	0%
	CO	5%	25%	1%	0%	69%
人体毒性	碳氢化合物	5%	25%	1%	0%	69%
	总和	0%	1%	0%	0%	98%
	COD	5%	25%	1%	0%	69%
	总氮	0%	0%	0%	0%	100%
富营养化	NO ₂	0%	0%	0%	1%	99%
	酸化效应	5%	25%	1%	0%	69%
	SO ₂	5%	25%	1%	0%	69%
酸化效应	NO ₂	5%	25%	1%	0%	69%
	光化学烟雾	4%	21%	1%	0%	74%
	碳氢化合物	0%	0%	0%	0%	100%
	甲醛	5%	25%	1%	0%	69%
光化学烟雾	甲醇	0%	100%	0%	0%	0%
	资源消耗	5%	22%	3%	4%	67%
	原煤	5%	25%	1%	0%	69%
资源消耗	水	0%	0%	15%	32%	54%

通过表 5.6 和表 5.7, 我们可以得出酒精生产中各单元与环境影响之间的定量关系。对于温室效应(全球变暖影响)来说, CO₂ 是造成该环境影响的主要物质, 从表中的结果可以看出, 发酵和蒸馏两个单元是产生 CO₂ 的主要环节, 而这两个单元也是对温室效应贡献最大的阶段, 按环境影响的贡献率来看, 发酵过程占整个酒精生产系统的 43%, 蒸馏过程占 39%, 二者的总和占生产系统的

82%。发酵过程是酒精生产中 CO_2 产生的来源，然而蒸馏阶段消耗大量蒸汽，而生产蒸汽需要燃煤，因此，蒸馏阶段 CO_2 来自锅炉燃烧。与造成人体毒性这种环境影响关系最大的物质是 SO_2 和 NO_2 ，从表上看，蒸煮和蒸馏是贡献最大的两个环节，因为这两个环节也是蒸汽供应的主要单元，因而这两种物质也是来自于锅炉的燃烧。造成水体富营养化的主要来源是水体中的 COD，酒精生产中富营养化的总环境影响潜值为 17.7(kgNP)，而 COD 对富营养化的贡献为 11.6(kgNP)。酸化效应的潜值为 25.8(kg AP)， SO_2 的酸化效应潜值为 21.5(kg AP)。因此 SO_2 是造成该环境影响的主要物质来源，蒸煮和蒸馏对该环境影响的贡献率分别为 25%和 69%，同样来自锅炉的燃烧。光化学烟雾也是与酒精生产有关的一类环境影响，在本案例中，光化学烟雾潜值为 0.0305(kg POCP)，各种碳氢化合物是主要物质来源，结合前面清单分析的结果，碳氢化合物主要来自锅炉的燃烧。蒸煮和蒸馏阶段是使用能源最多的环节，主要因为这两个单元过程消耗了大量的蒸汽，水的利用方面，蒸馏是主要的耗水阶段，占 54%。

由以上分析，我们可以得出，整个酒精生产系统中，与环境影响关系最大的是蒸馏产生的废醪液，以及锅炉燃烧产生的各种污染物，主要是 SO_2 、 CO_2 、 NO_2 等，另外，发酵过程中也会产生大量的二氧化碳。图 5.10—5.16 可以更加清楚的说明酒精生产系统中各过程对不同环境影响的贡献。

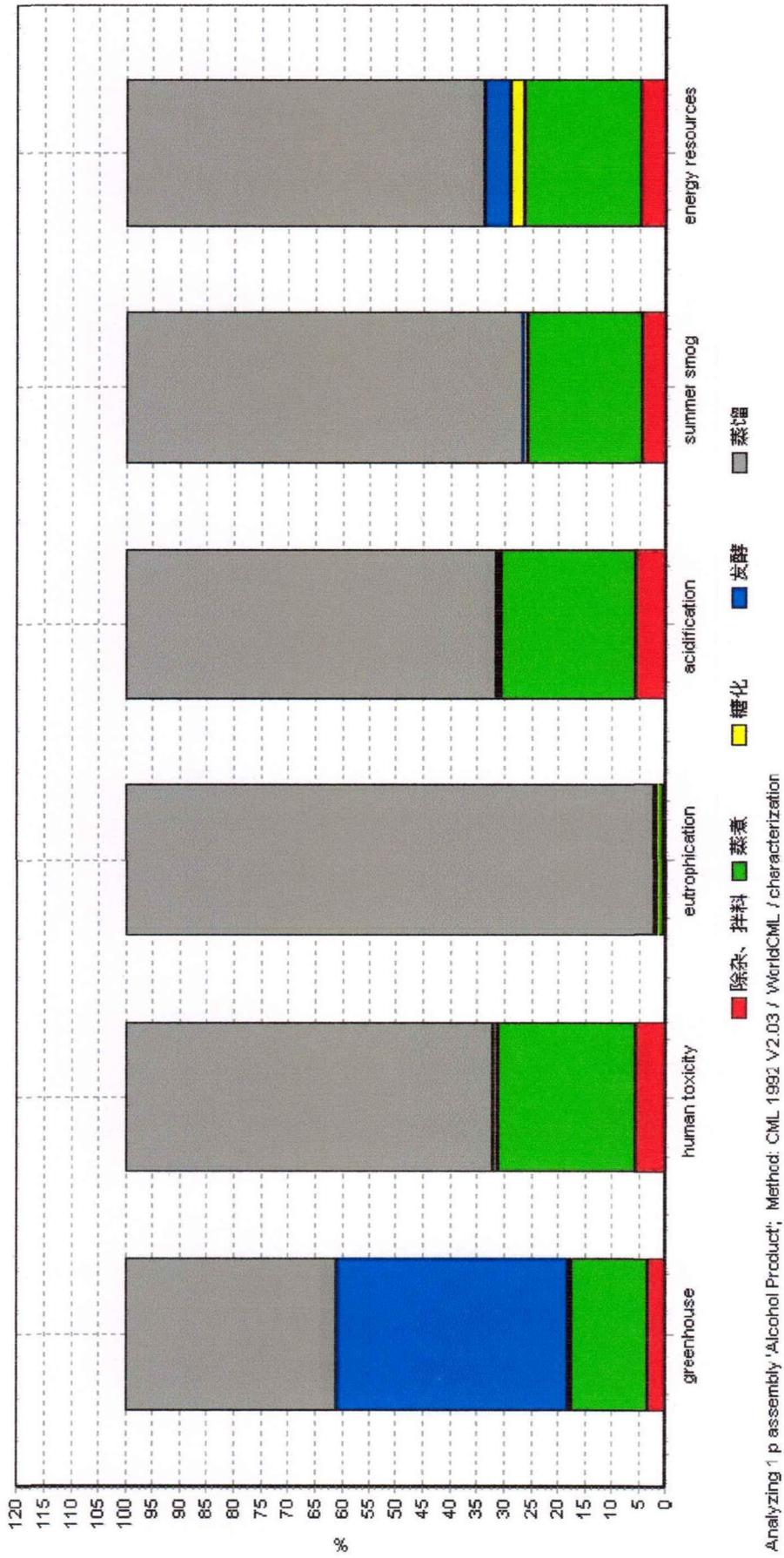


图 5.10 酒精生产的 LCA 特征化结果

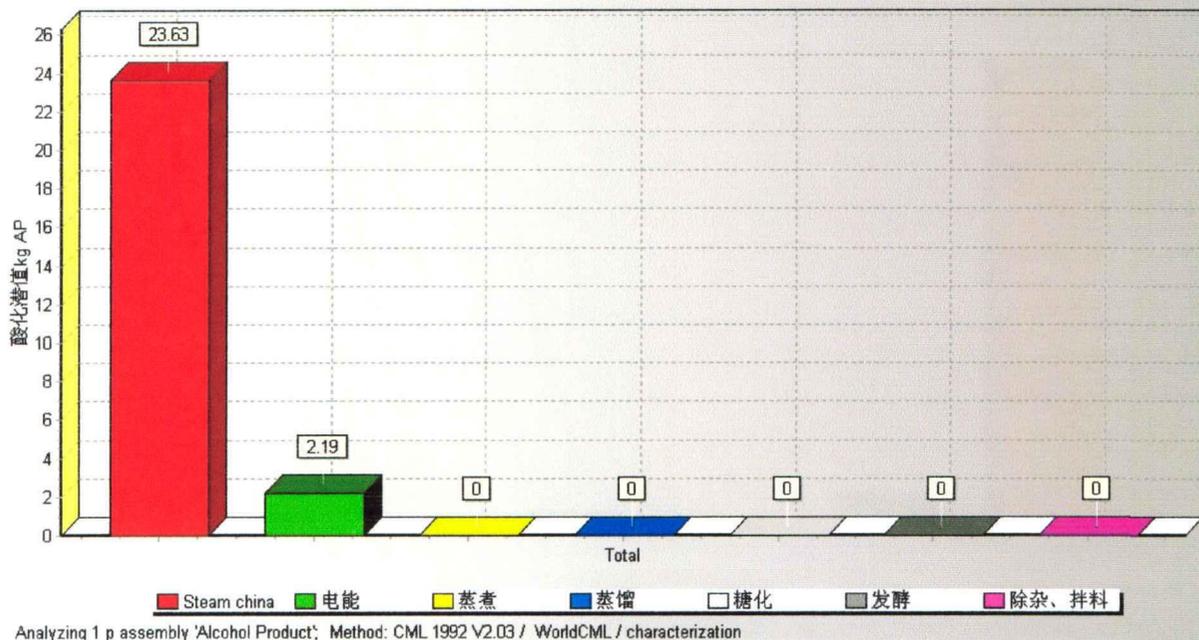


图 5.11 各单元过程对酸化效应的贡献

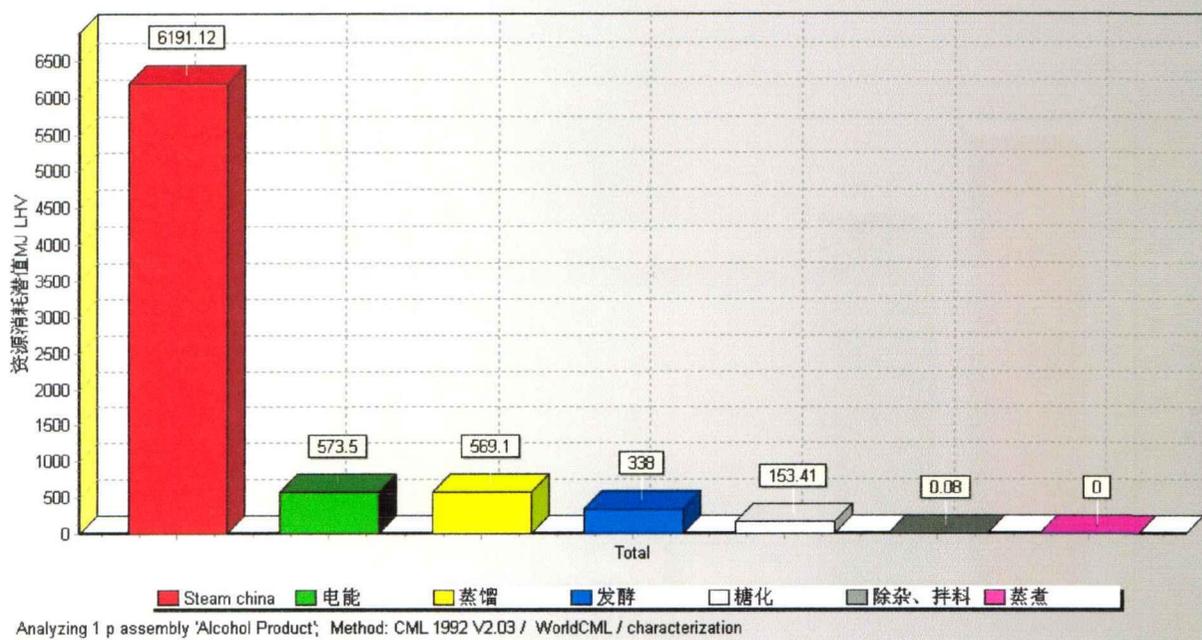


图 5.12 各单元过程对资源消耗的贡献

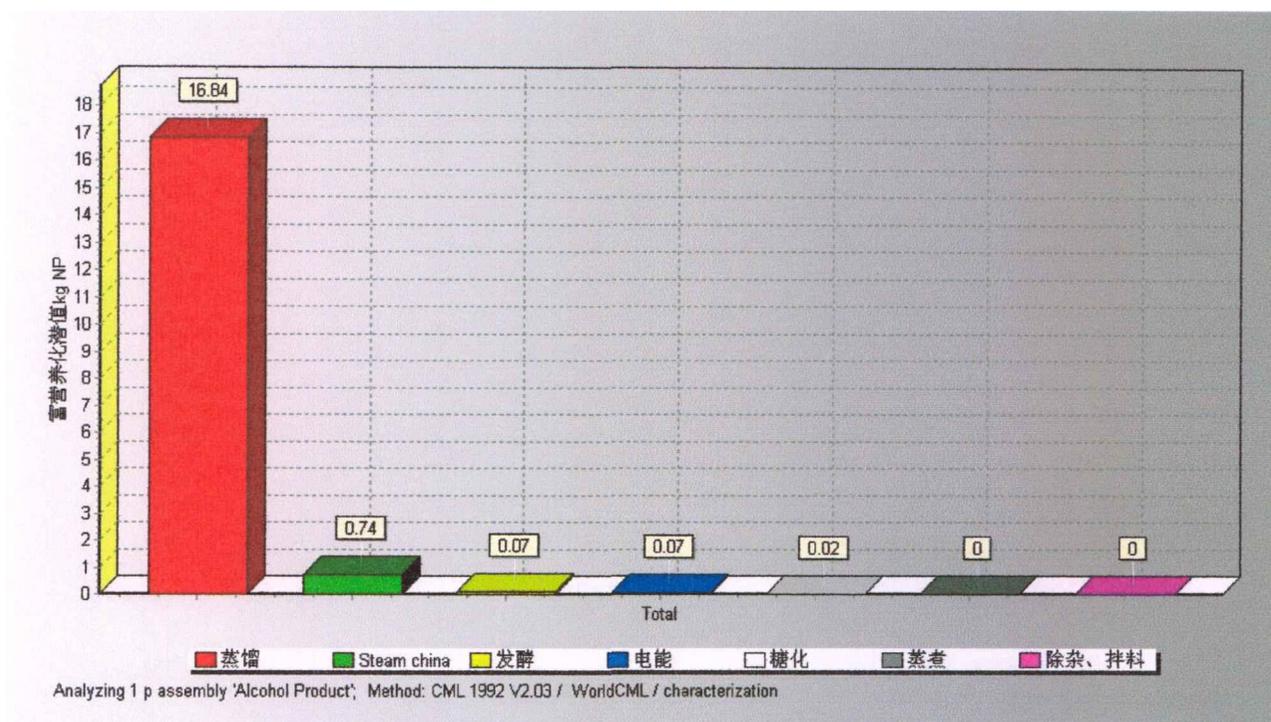


图 5.13 各单元过程对富营养化的贡献

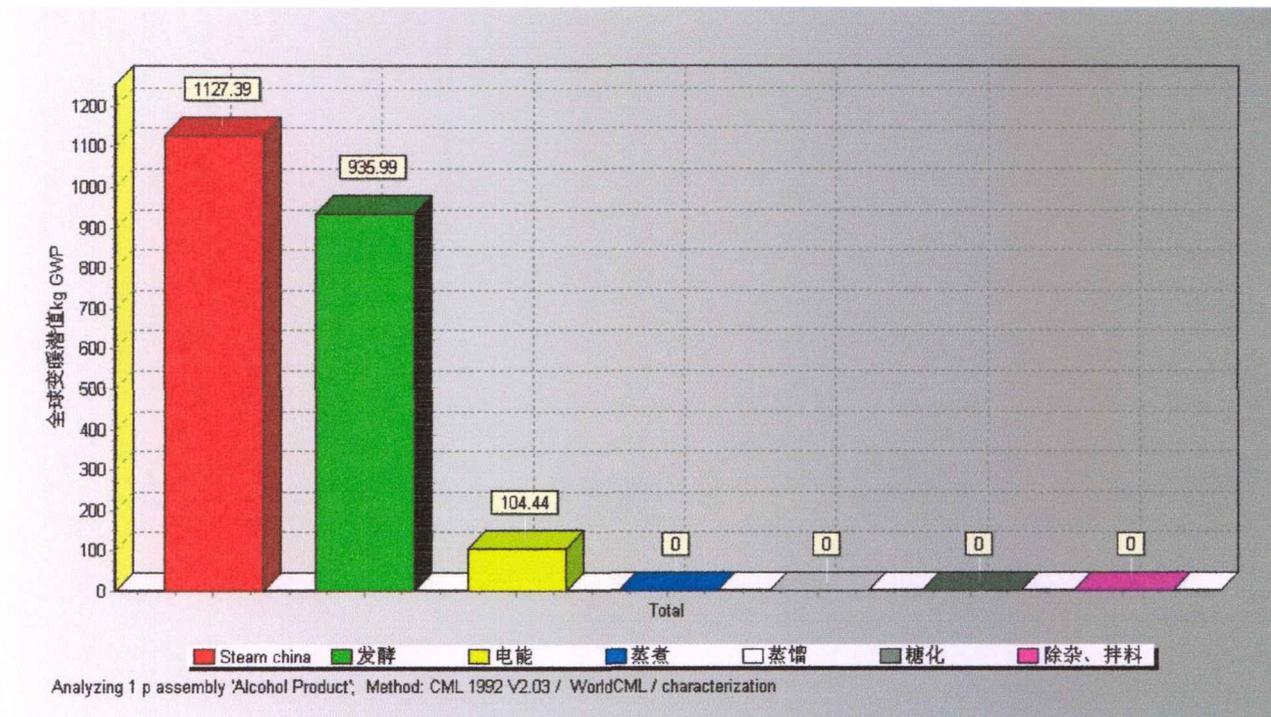


图 5.14 各单元过程对全球变暖影响的贡献

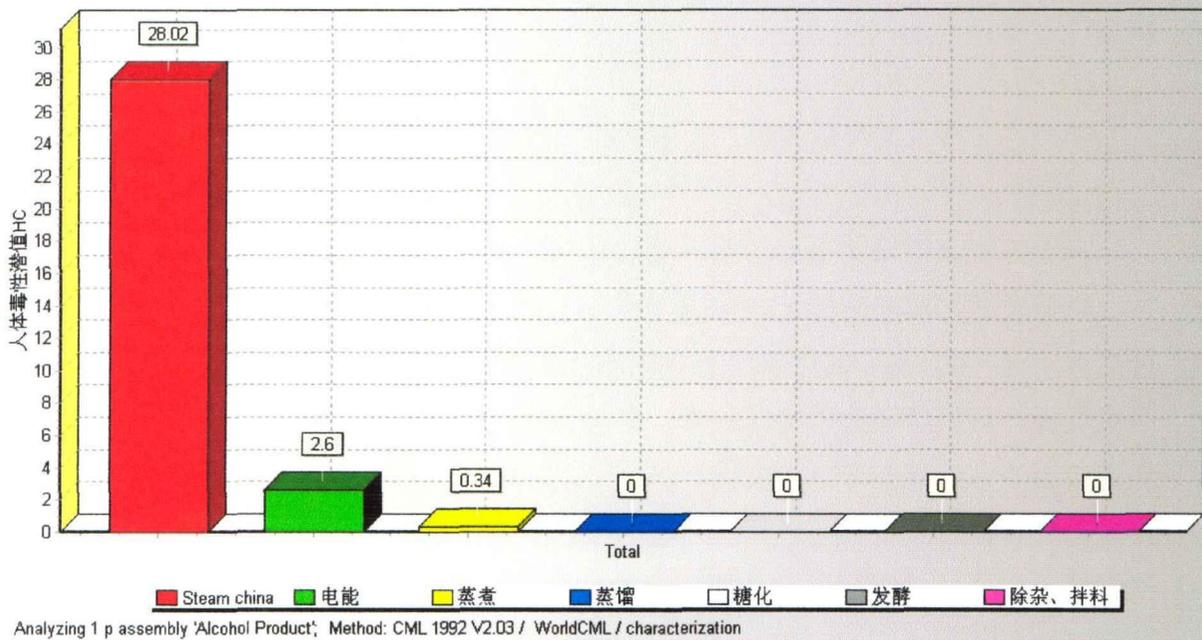


图 5.15 各单元过程对人体毒性的贡献

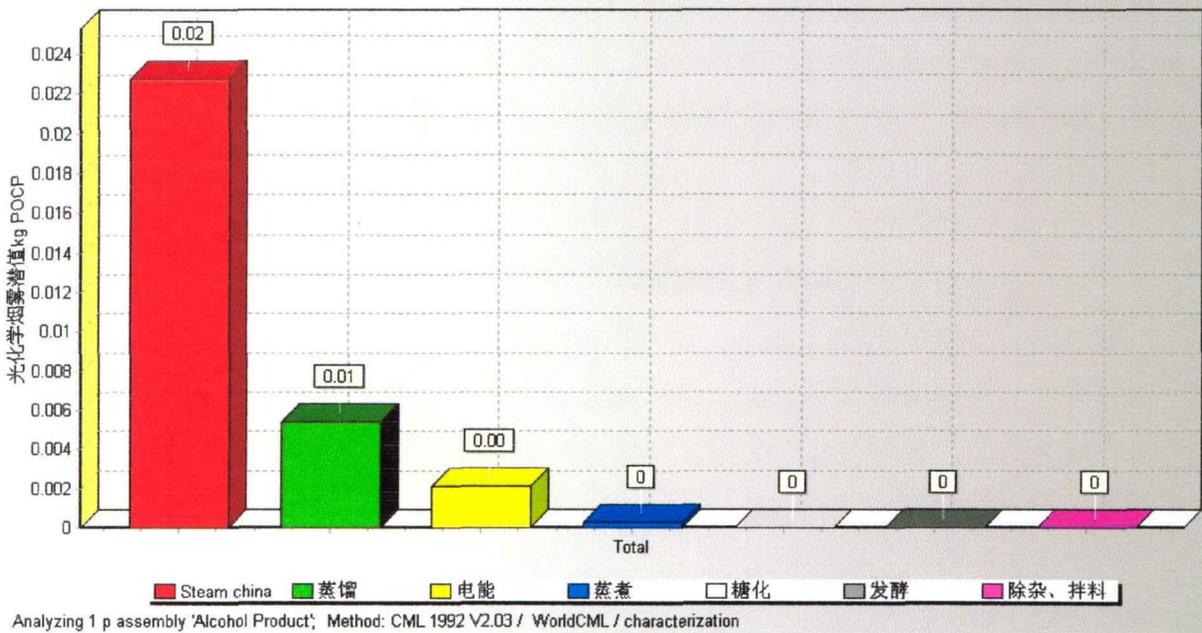


图 5.16 各单元过程对光化学烟雾的贡献

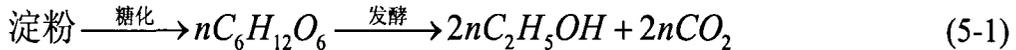
5.2.4.4 清洁生产方案的提出

通过以上影响评价的分析，下面本文将结合企业生产中造成的环境压力的

重要环节的分析,进一步深入分析生产机理,同时应用“清洁工艺”,制定出清洁生产方案。

(1) 生产方案 F1

针对 CO_2 排入大气的问题,由于淀粉发酵时,其反映方程式为:



理论上生成的酒精与 CO_2 质量比为 1:0.96。

酒精发酵过程产生的 CO_2 纯度较高,尤其是密闭式发酵所产生的 CO_2 ,纯度高达 99.0~99.5%,其中以气态存在的杂质主要有:水蒸气、酒精、有机酸及醛类物质,只要经过简单提纯处理,即可得到几乎纯净的 CO_2 。2003 年该厂收集并制成 2 万吨液态 CO_2 ,获利 600 万元。此举还意味着减排温室气体 2 万 t/a。虽然木薯种植时,通过光合作用吸收的 CO_2 与排放的 CO_2 量相抵,不会增加温室气体,但是减排温室气体,同时又给企业带来经济效益,也不失为一种好的选择。

(2) 生产方案 F2

本方案针对锅炉燃烧中产生的环境问题,建议采用优质煤,减少废气排放。目前企业出于经济因素考虑,大量采用低价低质煤,不仅热效低,而且废气排放严重。针对企业现阶段的技术状况,可在锅炉车间安置更为有效的除硫、除氮、除尘装置;但更有效的办法是改变燃煤质量,采用无烟煤等大气排放较少的优质煤。

(3) 生产方案 F3

本方案主要是针对酒精生产流程中,废醪液的产生造成的环境压力问题。木薯经糖化、发酵后成为醪液,其中有机物,除大部分淀粉和少量纤维转化为酒精外,其余则降解为各种醛、醇、酸等有机物。通过精馏醪液,酒精挥发到汽相成为产品,残留在液相的剩余有机物便成为废醪液的主要污染物,COD 浓度高达 51000mg/L。

清洁生产方案 F3 为解决废醪液产生的环境问题,采用了发酵制沼气,UASB 厌氧处理,SBR 好氧处理三步污水处理措施。如图 5.17 所示。

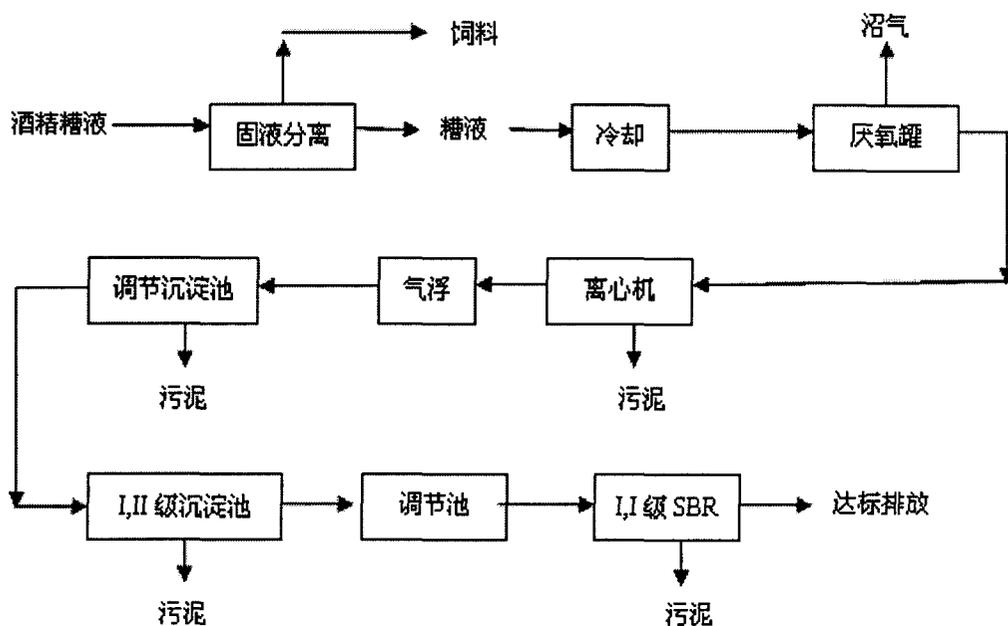


图 5.17 新太酒精厂废醪液处理流程图

图 5.17 中，蒸馏塔排放的废醪液，先泵送到糟液贮槽，在进入沉砂池，沉砂池溢流的废水通过离心机过滤，滤渣即为酒糟。滤液泵入厌氧发酵罐，厌氧发酵罐溢流出的废水通过集水池进入离心分离机，进行固液分离。

废水进入调节池，调节池出水泵入 I、II 级 UASB 进行中温厌氧处理，大量的有机物得到降解；再经 SBR 好氧分解后进入斜板沉淀池固液分离出水达标排放。所有污泥都排入污泥井，再进入污泥浓缩池，浓缩后的污泥经过滤机分离，滤渣可做成肥料出售，或作燃料。滤液通过溢流井泵入调节沉淀池循环处理。

就这样，通过沼气发酵系统，废醪液中的有机物降解为沼气和其他小分子物质，其 COD 也相应从 51000mg/L 降低到 9000mg/L 左右。接着相继用 UASB 和 SBR 系统进一步处理残余有机物，使 COD<300mg/L，达标排放。

(4) 生产方案 F4

由前面的分析得知，锅炉燃烧在酒精厂内是造成环境问题比较突出的问题。污水处理过程中发酵产生的沼气进入气液分离器，通过脱硫罐、水封罐进入沼气贮柜，然后送锅炉燃烧。由于沼气燃烧过程中不产生 SO_2 和 NO_2 ，对比煤的燃烧，具有很大的优越性，而且从经济上来看，沼气是酒精废醪液经过污水处理后的产物，属于废物的回收利用，1 万立方米沼气的热值相当于 8 吨原煤，因此，沼气发电也具有很大的经济前景。

5.3 案例总结

本案例主要研究了以下内容：

(1) 设定了酒精生产 LCA 的目的和范围，考察了新太酒精厂的酒精生产系统，并细化系统边界，将酒精生产系统分为 5 个过程，作为研究的基础单元。

(2) 采集系统各单元资源消耗和环境排放数据，并进行整理，对各单元的输入输出流进行分析，建立了 LCA 数据清单。

(3) 根据清单分析结果，进行生命周期影响评价，主要运用分类和特征化方法分析了清单结果与环境影响之间的定量关系。本案例中选择 CML 1992 v2.1 为影响评价的模型。

(4) 对影响评价结果进行了分析与解释，识别生产系统中造成环境影响的主要来源。分析结果显示，酒精生产中的主要环境影响来自于蒸馏阶段产生的废醪液、锅炉燃烧过程中排放的污染物，以及发酵过程中产生的 CO₂。

(5) 根据对环境问题的评价结果，提出了相应的清洁生产方案：

①回收发酵过程产生的 CO₂。

②建议采用优质煤，减少废气排放。

③采用发酵制沼气，UASB 厌氧处理，SBR 好氧处理三步污水处理措施。

④运用处理过程中所产生的沼气进行燃烧发电、供汽。

通过本案例的研究，我们可以得出，与清洁生产审计相比，生命周期评价的可以通过对酒精生产系统做更加详细、系统的输入、输出分析，对数据进行全面的盘查。另外，LCA 可以分析清单结果与环境影响的定量关系，使得生产系统各个环节与环境影响的关系更加清晰，更加做到有的放矢，从环境的角度提出企业实施清洁生产更加有力的依据。本案例中，通过清单分析和环境影响评价，找出了企业中在环境方面存在的主要问题，除了一般企业较重视的废醪液治理和 CO₂ 回收的问题外，针对新太酒精厂，发现了锅炉燃烧也是一个重要的环境问题产生根源。比如，锅炉燃烧产生的 SO₂、NO₂ 是主要的环境影响因素，与其相关的环境影响有酸化效应、富营养化等，鉴于酒精生产的高能耗性，能量的使用量大，此类物质排放的环境影响才会在酒精系统中比较突出。因此，本案例提出了针对锅炉燃烧的改善措施和清洁生产方案。因此，LCA 可以是清洁生产审计有益的补充和延伸，是企业实施清洁生产的有效评价工具。

第6章 结论与展望

6.1 结论

本文较系统地研究了生命周期理论，首先回顾了生命周期评价理论的发展历程，对生命周期评价的特点做了简要的叙述；其次，在总结生命周期评价研究和应用现状的基础上，重点对其技术方法做了描述与分析；并将 LCA 方法运用到酒精企业的清洁生产审计中去，在分析中国酒精行业特点的基础上，建立了酒精生产的 LCA 技术方法。同时，引入了 LCA 应用软件 SimaPro，并详细介绍软件原理与应用方法。最后，本文以太仓市酒精厂为案例，详细阐述了我国酒精生产 LCA 的过程和方法。通过前面的研究，本文主要得出以下几点结论：

(1) 生命周期评价是基于产品全生命周期的环境影响评价方法，一个完整的使用寿命包括原材料一个完整的食品生命周期评价应该包括从最初原材料的获取、产品原料的收集、产品加工、废物产生、副产品的产生、处理、处置以及产品最终废弃物的处置整个过程。而对于具体的 LCA 工作，研究范围依据 LCA 的目的以及研究条件来确定。具体到酒精企业，已建成并投入运行的酒精企业清洁生产集中在企业内部的流程改进上，包括技术、工艺改造，本文 LCA 的范围便主要考虑酒精产品一个重要的生命周期阶段，生产环节。

(2) LCA 方法用于清洁生产是有一定理论基础的。因为 LCA 的思想与清洁生产思想是相吻合的。而且，LCA 只是一种评价工具，它必须与企业具体的生产和管理活动相结合才能发挥作用。清洁生产是支持酒精行业可持续发展的重要一环。企业不仅仅需要生产绿色的产品，也必须注重生产过程中的环保行为。通过 LCA，企业生产与环境之间的关系是可量化的。

(3) 本文对酒精生产系统的 LCA 方法进行了初步探索，并通过具体案例分析做了详细阐述，并初步提供了酒精生产系统的清单分析数据可以为以后的酒精企业 LCA 分析提供借鉴。

(4) LCA 应用软件，作为计算机和信息技术的发展产物，其强大的量化分析功能和数据库资源，可以有效地支持我们的研究活动。本文所应用的 SimaPro 是目前较为成熟，并在世界上应用很广的 LCA 软件。因此，本文通过该软件中

的模型作出的分析对我国酒精行业 LCA 具有一定的借鉴意义。

(5) 通过影响评价,分析特征化结果中酒精生产系统的各单元对不同环境影响类型的环境影响潜值和贡献大小,可以得出蒸馏过程产生的废醪液,锅炉燃烧产生的大气污染物(主要是 CO_2 、 SO_2 、 NO_2),以及发酵产生的 CO_2 气体是主要的环境影响来源,改善措施和清洁生产方案的选取应针对这些环节来实施。

6.2 进一步工作的方向

整体而言,生命周期评价的研究和应用在我国才刚刚起步,从研究的角度看,尚属于消化吸收阶段。酒精生产的 LCA 研究更是如此,本课题的研究也还有许多需要进一步深入的地方。

(1) 尽管国际标准化组织 ISO 和国际环境毒理学与化学学会 (SETAC) 均对 LCA 的框架和实施步骤作了说明,目前国内外仅对清单分析研究的较为深入,影响评价和改进评价研究进展缓慢,遇到的技术困难也较多。因此,本文对国内酒精生产系统 LCA 的初步尝试是根据现有资料所作的探索,有待于根据今后数据的完善作进一步深化研究。

(2) 由于 LCA 研究需要大量的数据支撑,数据的搜集和整理便是 LCA 工作的重点。尤其对于酒精生产系统,涉及到的化学反应,以及各生产单元间能流、物流的循环都很复杂。限于本文研究条件,酒精生产的清单数据还需要进一步充实、完善。建议后续研究工作,逐步建立基于中国国情的生命周期评价通用基础数据库,以减少数据采集工作量及避免重复工作。

(3) 本论文的改善评价和清洁生产方案的选择仅限于定性研究。在今后工作中,应加强对改善评价的研究,通过具体的数据分析,对改善措施或生产方案进行评价,提出更为合理的改善措施。

(4) 在酒精生产的 LCA 研究中,本文着重考虑的是环境因素的影响,而缺乏对经济因素、技术因素及社会因素进行研究的条件,在以后的研究中还要对其进行深入探索,使得酒精生产系统 LCA 体系更加完善。

(5) 虽然本研究的目的是针对酒精企业内部的生产管理问题,而且由于时间和相关数据的关系,仅仅是对酒精生产系统进行了评价,但要真正全面了解酒精产品的环境性能,还应涵盖其他几个阶段,包括原材料获取及最终废弃物回收等阶段。

(6) LCA 的定量分析模型并非十分成熟。本文在案例分析中仅选择了影响评价模型中的两个必要步骤。另外，目前国内 LCA 研究多采用了国外开发的评价模型，本文也应用了国外的 LCA 软件作为分析工具。因此，基于 LCA 结果，可进一步开发适合中国国情的生命周期评价软件，为企业技术更新和新产品开发提供可靠的依据。当影响评价方法论发展更为成熟时，LCA 对于清洁生产的实现便具有更广泛的应用价值。

本文是对我国酒精行业的 LCA 做的首次尝试。由于研究条件和水平有限，文中难免有不当之处，敬请各位专家批评指正！

致谢

随着论文的研究与整理工作的完成，我在同济的求学生涯也将要划上一个句号。凝视着刚刚撰写完成的论文，想着即将离开美丽的校园，离开朝夕相处的老师和同学，心中不免升起一丝惆怅。回首往事，我要感谢所有关心和帮助过我的老师、同学和亲友。

在此，我首先要感谢我的导师蒋大和教授。在我求学的近三年的时间里，他始终对我耐心指导，蒋老师渊博的学术知识、严谨的治学态度、踏实的科研作用以及对学术孜孜不倦的追求使我受益匪浅，对我今后的工作学习也将产生重大的影响。值此论文完成之际，再次向蒋老师表示衷心的感谢。

感谢舒廷飞老师对我的鼓励与指点，他从开题、到中期考核直至最终定稿的过程中，都给了我极大的帮助，并提出了非常宝贵的意见。感谢包老师自始至终对我论文的指导。感谢课题组及学院里所有指导过我的各位老师。

我还要感谢所有朝夕相处的学友们。和你们一道参与项目的调研、一起切磋探讨课题的思路和框架，相互交流心得，使我获益匪浅。在此特别要感谢已毕业离校的博士师姐郭素荣，你在我的论文从选题、调研到资料的获取给予了我极大的帮助，使我的论文得以顺利进行。

尤其要感谢我的父母，他们在我就读研究生期间，一直给我最大的关怀和鼓励，是我最大的支持！

最后对评阅和答辩专家的辛勤劳动表示诚挚的谢意。

参考文献

- [1] 章克昌. 发展“燃料酒精”的建议. 中国工程科学, 2000 (6): 8.
- [2] 李卓丹. 论我国的酒精工业推行清洁生产的潜力和机会. 环境科学研究, 1999; 12(2): 1.
- [3] 梅允福. 快速发展节能清洁车用乙醇汽油. 广州化工, 2004,32(5): 49-51.
- [4] 周祖鹏, 秦连城. 木薯酒精汽油全生命周期经济性分析. 桂林电子工业学院学报, 2004,24(3): 86-89.
- [5] Bayer AG. Bayer: Health, Safety, Environment Report 2004. Leverkusen, Germany: Kunst-and werbedruk, 2004, 24-25.
- [6] 郭素荣, 生态工业园建设的物质和能量集成, 同济大学博士论文, 2006: 8-9.
- [7] 国家环境保护总局. 清洁生产技术要求—酒精制造业, HJ/T XX-2002.
- [8] 李卓丹. 论我国的酒精工业推行清洁生产的潜力和机会. 环境科学研究, 1999; 12(2): 1.
- [9] 叶文虎. 环境管理学. 北京:高等教育出版社, 2001年1月: 102-104.
- [10] 邓南圣, 吴峰. 工业生态学—理论与应用. 北京:化学工业出版社, 2002,5: 135.
- [11] T.E. Graedel, B.R. Allenby, 产业生态学. 清华大学出版社, 2004: 220.
- [12] 段宁. 清洁生产、生态工业和循环经济. 环境科学研究, 2001,14(6): 1-4,8.
- [13] Pollock, Doug, and Coulon, Remi, Life cycle assessment of an inkjet print cartridge, IEEE International Symposium on Electronics & the Environment, 1996: 154—160.
- [14] Brinkley, Anne, Kirby, J. Ray, Wadehra, Inder L., Besnainou, Jacques, Coulon, Remi, and Goybet, Stephanie, Life cycle inventory of PVC: Disposal options for a PVC monitor housing, IEEE International Symposium on Electronics & the Environment, 1995: 145—151.
- [15] Brinkley, Anne, Kirby, J. Ray, Wadehra, Inder L., Besnainou, Jacques, Coulon, Remi, and Goybet, Stephanie, Life cycle inventory of PVC: manufacturing and fabrication processes, IEEE International Symposium on Electronics & the Environment, 1996: 94—101.
- [16] Keoleian, Gregory A. , Glantschnig, Werner, Life cycle design: AT&T demonstration project, IEEE International Symposium on Electronics & the Environment, 1994, p 134-135
- [17] Touchton, George L., Quentin, George H., and Mastrodonato, Bart, Lessons learned

from durability surveillance of advanced gas turbines, American Society of Mechanical Engineers (Paper), 1997, 97-AA-123.

[18] I Boustead, Eco-Profile of Plastics and Related Intermediates Methodology The European Centre for Plastics in the Environment of The Association of Plastics Manufactures in Europe (APME), Brussels, April 1999: 45.

[19] Singhofen, A., C.R. Hemming, B.P. Weidema, L. Grisel, R. Bretz, B. de Smet, D. Russell: Development of a Common Format for Life-Cycle Inventory Data, Int.J. LCA 1(3): 171-178 (1996).

[20] Steen, B., R. Carlson, G Löfgren: SPINE, A Relation Database Structure for Life Cycle Assessments, NEP (Nordic Project on Environmentally sound Product Development) 12/95, Göteborg (1995): 36-39.

[21] A.B. Culaba and M.R.I. Purvis, A methodology for the life cycle and sustainability analysis of manufacturing processes, Journal of Cleaner Production 7 (1999): 435-445.

[22] Goran Finnveden, Methodological aspects of life cycle assessment of integrated solid waste management systems, Resources, Conservation and Recycling 26 (1999): 173-187.

[23] M.A.J. Huijbregts, U. Thissen, J.B. Guinee, T. Jager, D. Kalf, D. van de Meent, A.M.J. Ragas, A. Wegener Sleeswijk and L. Reijnders, Priority assessment of toxic substances in life cycle assessment. Part I: Calculation of toxicity potentials for 181 substances with the nested multi-media fate, exposure and effects model USES-LCA, Chemosphere 41 (2000): 541-573.

[24] 杨建新、王如松, 生命周期评价的回顾与展望, 环境污染治理技术与设备, 1998, 6(2): 21-28.

[25] 陆惠琴、陈剑锋、万君康, 面向产品系统的生命周期评价环境管理工具, 武汉汽车工业大学学报, 1999, 21(5): 62-65.

[26] 宋彦勤、李俊峰、张正敏, 生命周期的概念及其应用, 中国能源, 2000 (11):20-22.

[27] 郭文成, 面向产品的环境管理工具: 浅谈生命周期分析与评价, 环境科学动态 1999(1): 13-15.

[28] 彭小燕、席德立, LCA 中清单分析数据的获得, 环境科学, Vol.18, No.5 1997 年 9 月: 45-48.

[29] Yang Jianxin and Nielsen Per H., Chinese normalization reference and weighting factors according to the EDIP method, Proceeding of the third international conference on EcoBanance, Tsukuba, 1998: 81-84.

- [30] 刘顺妮、林宗寿、张小伟, 硅酸盐水泥的生命周期评价方法初探, 中国环境科学 1998, 18(4): 328—332.
- [31] 张成, 替代燃料的生命周期3E评价及可持续设计, 上海交通大学博士学位论文, 2003.
- [32] 冯文、王淑娟、倪维斗、陈昌和, 燃料电池汽车氢源基础设施的生命周期评价环境科学, 2003 24(3): 8-15.
- [33] 田亚峥, 运用生命周期评价方法实现清洁生产, 重庆大学硕士论文, 2003.
- [34] 曹利江, 食品生命周期评价及其应用研究, 吉林大学硕士论文, 2005.
- [35] K. Christiansen. Life Cycle Assessment in a Historical Perspective, Environmental Assessment of Products, UNDPEE, 2nd edition 1993.
- [36] Lidia Lombardi. Life cycle assessment (LCA) and energetic life cycle assessment (ELCA) of a semi-closed gas turbine cycle With CO₂ chemical absorption. Energy Conversion & Management 42 (2001): 101-114.
- [37] 邓南圣, 王小兵. 生命周期评价. 北京: 化学工业出版社, 2003 年: 23—29.
- [38] 贾洪明. 浅谈生命周期评价与应用[J]. 新疆环境科学, 2000, vol.22, No. 4 2 40-244.
- [39] A.H. Verschoor, L. Reijnders. The use of life cycle methods by seven major companies. Journal of Cleaner Production 1999, No.7: 375-382.
- [40] (英)赖斯(Nath, B)等, 吕永龙主译, 环境管理, 中国环境科学出版社, 1996.
- [41] Mary Ann Curran, "Goal-based Environmental Life Cycle Assessment", Environ. Sci. Technol., 1993, 27(3): 431-432
- [42] Thomas Gloria, Odore Saad and Magalie Breville. Life-Cycle Assessment: A Survey of Current Implementation. Total Quality Environmental Management. Spring, 1995: 33—55.
- [43] F. Consoli, et al., Guidelines for Life-Cycle Assessment: "Code of Practice", SETAC, 1993: 11.
- [44] Mary Ann Curran. Life cycle assessment: An international experience. Environmental Progress, 2000, vol.19, No.2: 65—71.
- [45] 孙启宏. 作为清洁生产工具的生命周期评价: 在中国的应用前景, 国家清洁生产中心, 北京 100012.
- [46] 国家环境保护总局科技标准司, 清洁生产审计培训教材, 中国环境科学出版社, 2001.

- [47] 王飞儿、陈英旭.生命周期评价研究进展[J]. 环境污染与防治, 2001,vol.23 ,No .5 249-252.
- [48] 杨建新, 面向产品的环境管理工具: 产品生命周期评价, 环境科学, 1999 年 1 月 pp.101-102.
- [49] 王寿兵, 胡聊, 吴千红, 生命周期评价及其在环境管理中的应用, 中国环境科学, 1999, 19 (1):77—80.
- [50] A.Azapagic and B.Solberg-Johansen olik at the principles and practice of life cycle assessment, Engineering February 1998: 26-27.
- [51] GB/T 24040-1999 《环境管理—生命周期评价原则和框架》国家质量技术监督局, 1999 年 3 月.
- [52] Johanna Berlin. Environmental life cycle assessment (LCA) of Swedish semi-hard cheese. International Dairy Journal 2 002, No.12: 939-953.
- [53] Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC), Guidelines for life-cycle assessment: ‘a code of practice’, Brussels: SETAC, 1993.
- [54] ISO14040: Environmental management life-cycle assessment principles and framework, 1997.
- [55] 贾洪明, 徐萍. 浅谈生命周期评价与应用. 新疆环境保护. 2000, 22(4): 240—242.
- [56] 张键. 生命周期评价(LCA)—环境管理和监察的新概念[J], 环境管理, 1999, No.4. 34—37.
- [57] G8/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》国家质量技术监督局, 2000 年 2 月.
- [58] 李蓓蓓. 生命周期评价—清单分析方法探讨. 上海环境科. 2002, 22(5): 308—310.
- [59] ISO. ISO14041 标准: 环境管理—生命周期评价—目的与范围的确定和清单分析, 1998.
- [60] 席德立, 彭小燕. LCA 环境影响分析新探. 环境科学.1997. 18 (6): 76—80.
- [61] 邓南圣, 王小兵. 生命周期评价. 北京: 化学工业出版社, 2003 年: 125—127.
- [62] 邓南圣, 吴峰. 工业生态学—理论与应用, 北京: 化学工业出版社, 2002: 180.
- [63] 叶文虎. 环境管理学. 北京:高等教育出版社, 2001 年 1 月: 102-104.
- [64] Weijian Han, John L. Sullivan and John M. Henshaw, Life Cycle Assessment Applications to Automobiles, Presentation in Shanghai Jiao Tong

University, Nov. 1999.

[65] Bengt Steen, A systematic approach to environmental priority strategies in product development (EPS). Version2000-General system characteristics, Chalmers University of Technology, Technical Environmental Planning, CPM report 1999: 4.

[66] 栾忠权. 基于 Eco-indicator99 的产品环境特性评估及设计应用, 轻工机械, 2004, 2: 8-9.

[67] Goedkoop. M. and R. Spriensma. The Eco-indicator99: A damage oriented method for life cycle impact assessment. Methodology Report [R]. The Netherlands: Pre consultants, 1999.

[68] 曹利江, 食品生命周期评价及其应用研究, 吉林大学硕士学位论文, 2005: 22.

[69] 胡名操. 环境保护实用数据手册, 机械工业出版社, 北京, 1990年4月.

[70] 杨建. 城镇污水处理工艺的生命周期评价, 同济大学博士论文, 2001: 84-85.

[71] GB/T 24042-2002《环境管理—生命周期评价生命周期影响评价》中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2002年4月.

[72] 邓南圣、吴峰, 工业生态学—理论与应用. 北京:化学工业出版社, 2002年5月: 135—202.

附录 特征化因子(CML 1992 v2.1)

附录 A 温室效应因子 kg GWP (来自 CML 1992 v2.1)

Compartment	Substance	Factor	Unit
Air	Carbon dioxide	1	kg GWP / kg
Air	Carbon dioxide, biogenic	1	kg GWP / kg
Air	Carbon dioxide, fossil	1	kg GWP / kg
Raw	Carbon dioxide, in air	-1	kg GWP / kg
Air	Chlorinated fluorocarbons, hard	7100	kg GWP / kg
Air	Chlorinated fluorocarbons, soft	1600	kg GWP / kg
Air	Chloroform	25	kg GWP / kg
Air	Dinitrogen monoxide	270	kg GWP / kg
Air	Ethane, 1-chloro-1,1-difluoro-, HCFC-142	1800	kg GWP / kg
Air	Ethane, 1,1-dichloro-1-fluoro-, HCFC-141b	580	kg GWP / kg
Air	Ethane, 1,1-difluoro-, HFC-152a	150	kg GWP / kg
Air	Ethane, 1,1,1-trichloro-, HCFC-140	100	kg GWP / kg
Air	Ethane, 1,1,1-trifluoro-, HCFC-143a	3800	kg GWP / kg
Air	Ethane, 1,1,1,2-tetrafluoro-, HFC-134a	1200	kg GWP / kg
Air	Ethane, 1,1,2-trichloro-1,2,2-trifluoro-, CFC-113	4500	kg GWP / kg
Air	Ethane, 1,2-dichloro-1,1,2,2-tetrafluoro-, CFC-114	7000	kg GWP / kg
Air	Ethane, 2-chloro-1,1,1,2-tetrafluoro-, HCFC-124	440	kg GWP / kg
Air	Ethane, 2,2-dichloro-1,1,1-trifluoro-, HCFC-123	90	kg GWP / kg
Air	Ethane, chloropentafluoro-, CFC-115	7000	kg GWP / kg
Air	Ethane, hexafluoro-, HFC-116	6200	kg GWP / kg
Air	Ethane, pentafluoro-, HFC-125	3400	kg GWP / kg
Air	Methane	11	kg GWP / kg
Air	Methane, biogenic	11	kg GWP / kg
Air	Methane, bromochlorodifluoro-, Halon 1211	4900	kg GWP / kg

附录

Air	Methane, bromotrifluoro-, Halon 1301	4900	kg GWP / kg
Air	Methane, chlorodifluoro-, HCFC-22	1600	kg GWP / kg
Air	Methane, chlorotrifluoro-, CFC-13	13000	kg GWP / kg
Air	Methane, dichloro-, HCC-30	15	kg GWP / kg
Air	Methane, dichlorodifluoro-, CFC-12	7100	kg GWP / kg
Air	Methane, fossil	11	kg GWP / kg
Air	Methane, tetrachloro-, CFC-10	1300	kg GWP / kg
Air	Methane, tetrafluoro-, FC-14	4500	kg GWP / kg
Air	Methane, trichlorofluoro-, CFC-11	3400	kg GWP / kg

附录 B 人体毒性因子 HC (来自 CML 1992 v2.1)

Compartment	Substance	Factor	Unit
Water	2-Propanol	0.0019	HC / kg
Air	2-Propanol	0.022	HC / kg
Air	Alcohols, unspecified	0.022	HC / kg
Air	Aldehydes, unspecified	0.022	HC / kg
Water	Ammonia	0.0017	HC / kg
Air	Ammonia	0.02	HC / kg
Water	Ammonium, ion	0.0017	HC / kg
Water	Antimony	0.0036	HC / kg
Air	Arsenic	4700	HC / kg
Water	Arsenic, ion	1.4	HC / kg
Water	Barium	0.14	HC / kg
Air	Barium	1.7	HC / kg
Water	Benzene	0.66	HC / kg
Air	Benzene	3.9	HC / kg
Water	Benzene, chloro-	5.7	HC / kg
Water	Benzene, ethyl-	0.021	HC / kg
Air	Benzene, ethyl-	3.9	HC / kg

附录

Water	Benzo(a)pyrene	1.4	HC / kg
Air	Benzo(a)pyrene	17	HC / kg
Air	Biphenyl	0.27	HC / kg
Water	Biphenyl, hexachloro-	32	HC / kg
Air	Biphenyl, hexachloro-	370	HC / kg
Air	Boron monoxide	0.033	HC / kg
Water	Bromine	0.0029	HC / kg
Air	Bromine	0.033	HC / kg
Air	Cadmium	580	HC / kg
Air	Cadmium oxide	580	HC / kg
Water	Cadmium, ion	2.9	HC / kg
Air	Caprolactam	0.022	HC / kg
Air	Carbon black	0.022	HC / kg
Air	Carbon disulfide	1.2	HC / kg
Air	Carbon monoxide	0.012	HC / kg
Air	Carbon monoxide, biogenic	0.012	HC / kg
Air	Carbon monoxide, fossil	0.012	HC / kg
Air	Chlorinated fluorocarbons, hard	0.022	HC / kg
Air	Chlorinated fluorocarbons, soft	0.022	HC / kg
Air	Chlorine	0.033	HC / kg
Water	Chloroform	0.095	HC / kg
Air	Chloroform	1.2	HC / kg
Air	Chromium	6.7	HC / kg
Water	Chromium	0.57	HC / kg
Water	Chromium VI	4100	HC / kg
Air	Chromium VI	47000	HC / kg
Water	Cobalt	2	HC / kg
Air	Cobalt	24	HC / kg
Air	Copper	0.24	HC / kg
Water	Copper, ion	0.02	HC / kg

附录

Air	Crude oil	0.7	HC / kg
Water	Crude oil	0.057	HC / kg
Air	Cyanide	2.6	HC / kg
Water	Cyanide	0.22	HC / kg
Air	Diethyl ether	0.022	HC / kg
Water	Disinfectants, unspecified	0.0029	HC / kg
Air	Ethane, 1-chloro-1,1-difluoro-, HCFC-142	0.022	HC / kg
Air	Ethane, 1,1-dichloro-1-fluoro-, HCFC-141b	0.022	HC / kg
Air	Ethane, 1,1,1-trichloro-, HCFC-140	2.4	HC / kg
Air	Ethane, 1,1,2-trichloro-1,2,2-trifluoro-, CFC-113	0.022	HC / kg
Air	Ethane, 1,2-dichloro-	2.4	HC / kg
Air	Ethane, 1,2-dichloro-1,1,2,2-tetrafluoro-, CFC-114	0.022	HC / kg
Air	Ethane, 2-chloro-1,1,1,2-tetrafluoro-, HCFC-124	0.022	HC / kg
Air	Ethane, 2,2-dichloro-1,1,1-trifluoro-, HCFC-123	0.022	HC / kg
Air	Ethane, chloropentafluoro-, CFC-115	0.022	HC / kg
Water	Ethane, dichloro-	0.2	HC / kg
Water	Ethane, tetrachloro-	0.18	HC / kg
Air	Ethanol	0.022	HC / kg
Water	Ethene, chloro-	0.82	HC / kg
Air	Ethene, chloro-	1.2	HC / kg
Water	Ethene, trichloro-	0.0053	HC / kg
Air	Ethene, trichloro-	0.061	HC / kg
Air	Ethylene glycol	0.022	HC / kg
Air	Ethylene oxide	0.022	HC / kg
Air	Fluoranthene	1.7	HC / kg
Water	Fluoride	0.041	HC / kg
Air	Fluorine	0.48	HC / kg
Water	Fluorine	0.041	HC / kg
Water	Fungicides, unspecified	0.57	HC / kg
Air	Heavy metals, unspecified	160	HC / kg

附录

Air	Heptane	1.6	HC / kg
Water	Herbicides, unspecified	0.0095	HC / kg
Water	Hydrocarbons, aliphatic, unsaturated	0.0019	HC / kg
Air	Hydrocarbons, aliphatic, unsaturated	0.022	HC / kg
Water	Hydrocarbons, aromatic	0.66	HC / kg
Air	Hydrocarbons, aromatic	3.9	HC / kg
Water	Hydrocarbons, chlorinated	0.2	HC / kg
Air	Hydrocarbons, chlorinated	2.4	HC / kg
Water	Hydrocarbons, unspecified	0.0019	HC / kg
Air	Hydrocarbons, unspecified	0.022	HC / kg
Air	Hydrogen chloride	0.033	HC / kg
Water	Hydrogen chloride	0.0029	HC / kg
Air	Hydrogen cyanide	2.6	HC / kg
Air	Hydrogen fluoride	0.48	HC / kg
Air	Hydrogen sulfide	0.78	HC / kg
Air	Hydroxy compounds, unspecified	0.022	HC / kg
Water	Insecticides, unspecified	0.29	HC / kg
Water	Iron	0.0036	HC / kg
Air	Iron dust	0.042	HC / kg
Air	Ketones, unspecified	0.022	HC / kg
Water	Lead	0.79	HC / kg
Air	Lead	160	HC / kg
Air	Manganese	120	HC / kg
Water	Mercury	4.7	HC / kg
Air	Mercury	120	HC / kg
Water	Metallic ions, unspecified	0.0036	HC / kg
Air	Metals, unspecified	20.83	HC / kg
Air	Methane	0.022	HC / kg
Air	Methane, biogenic	0.022	HC / kg
Air	Methane, bromo-, Halon 1001	0.069	HC / kg

附录

Air	Methane, chlorodifluoro-, HCFC-22	0.022	HC / kg
Air	Methane, chlorotrifluoro-, CFC-13	0.022	HC / kg
Water	Methane, dichloro-, HCC-30	0.048	HC / kg
Air	Methane, dichloro-, HCC-30	0.069	HC / kg
Air	Methane, dichlorodifluoro-, CFC-12	0.022	HC / kg
Air	Methane, fossil	0.022	HC / kg
Air	Methane, tetrachloro-, CFC-10	1.9	HC / kg
Air	Methane, trichlorofluoro-, CFC-11	0.022	HC / kg
Air	Methyl mercaptan	0.022	HC / kg
Water	Molybdenum	0.29	HC / kg
Air	Molybdenum	3.3	HC / kg
Air	Naphthalene	0.022	HC / kg
Air	Nickel	470	HC / kg
Water	Nickel, ion	0.057	HC / kg
Water	Nitrate	0.00078	HC / kg
Air	Nitric oxide	0.78	HC / kg
Air	Nitrogen dioxide	0.78	HC / kg
Air	Nitrogen oxides	0.78	HC / kg
Air	NM VOC	0.022	HC / kg
Water	PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	1.4	HC / kg
Air	PAH	17	HC / kg
Air	Pentane	0.022	HC / kg
Water	Pesticide, organochloro	2.9	HC / kg
Water	Petrol	0.00092	HC / kg
Air	Petrol	1.7	HC / kg
Water	Phenol	0.048	HC / kg
Air	Phenol	0.56	HC / kg
Water	Phenol, chloro-	0.95	HC / kg
Air	Phenol, chloro-	11	HC / kg
Air	Phenol, pentachloro-	1.1	HC / kg

附录

Water	Phenol, pentachloro-	0.095	HC / kg
Air	Phosphate	0.00048	HC / kg
Water	Phosphate	0.000041	HC / kg
Air	Phthalic anhydride	1.3	HC / kg
Air	Polychlorinated biphenyls	370	HC / kg
Water	Polychlorinated biphenyls	32	HC / kg
Air	Propane	0.022	HC / kg
Air	Propene	0.022	HC / kg
Air	Silicates, unspecified	0.022	HC / kg
Air	Sodium sulfate	0.038	HC / kg
Air	Soot	2.3	HC / kg
Air	Styrene	0.15	HC / kg
Water	Sulfate	0.0033	HC / kg
Air	Sulfur dioxide	1.2	HC / kg
Air	Sulfur oxides	1.2	HC / kg
Water	Sulfur trioxide	0.0033	HC / kg
Air	Terpentine	3.9	HC / kg
Air	Tin	0.017	HC / kg
Water	Tin, ion	0.0014	HC / kg
Air	Toluene	0.039	HC / kg
Water	Toluene	0.0066	HC / kg
Water	Trichlorobiphenyls, unspecified	32	HC / kg
Air	Vanadium	120	HC / kg
Air	VOC, volatile organic compounds	0.022	HC / kg
Water	Xylene	0.29	HC / kg
Air	Xylene	2.2	HC / kg
Air	Zinc	0.033	HC / kg
Air	Zinc oxide	0.033	HC / kg
Water	Zinc, ion	0.0029	HC / kg

附录

附录 C 富营养化因子 kg NP (来自 CML 1992 v2.1)

Compartment	Substance	Factor	Unit
Soil	Ammonia	0.33	kg NP / kg
Water	Ammonia	0.33	kg NP / kg
Air	Ammonia	0.33	kg NP / kg
Air	Ammonium carbonate	0.12	kg NP / kg
Soil	Ammonium nitrate	0.074	kg NP / kg
Air	Ammonium nitrate	0.074	kg NP / kg
Water	Ammonium, ion	0.33	kg NP / kg
Soil	Ammonium, ion	0.33	kg NP / kg
Air	Ammonium, ion	0.33	kg NP / kg
Water	COD, Chemical Oxygen Demand	0.022	kg NP / kg
Water	Kjeldahl-N	0.42	kg NP / kg
Air	Nitrate	0.1	kg NP / kg
Soil	Nitrate	0.1	kg NP / kg
Water	Nitrate	0.1	kg NP / kg
Soil	Nitric acid	0.093	kg NP / kg
Water	Nitric acid	0.093	kg NP / kg
Air	Nitric acid	0.093	kg NP / kg
Air	Nitric oxide	0.2	kg NP / kg
Water	Nitrite	0.13	kg NP / kg
Air	Nitrite	0.13	kg NP / kg
Water	Nitrogen	0.42	kg NP / kg
Air	Nitrogen dioxide	0.13	kg NP / kg
Air	Nitrogen oxides	0.13	kg NP / kg
Soil	Nitrogen oxides	0.13	kg NP / kg
Water	Nitrogen oxides	0.13	kg NP / kg
Soil	Nitrogen, total	0.42	kg NP / kg
Water	Nitrogen, total	0.42	kg NP / kg

附录

Air	Nitrogen, total	0.42	kg NP / kg
Soil	Phosphate	1	kg NP / kg
Air	Phosphate	1	kg NP / kg
Water	Phosphate	1	kg NP / kg
Soil	Phosphoric acid	0.97	kg NP / kg
Air	Phosphoric acid	0.97	kg NP / kg
Water	Phosphoric acid	0.97	kg NP / kg
Water	Phosphorus	3.06	kg NP / kg
Soil	Phosphorus	3.06	kg NP / kg
Air	Phosphorus	3.06	kg NP / kg
Soil	Phosphorus pentoxide	1.34	kg NP / kg
Water	Phosphorus pentoxide	1.34	kg NP / kg
Air	Phosphorus pentoxide	1.34	kg NP / kg
Soil	Phosphorus, total	3.06	kg NP / kg
Water	Phosphorus, total	3.06	kg NP / kg
Air	Phosphorus, total	3.06	kg NP / kg

附录 D 酸化效应因子 kg AP (来自 CML 1992 v2.1)

Compartment	Substance	Factor	Unit
Air	Ammonia	1.88	kg AP / kg
Air	Ammonium carbonate	0.67	kg AP / kg
Air	Ammonium nitrate	0.4	kg AP / kg
Air	Ammonium, ion	1.78	kg AP / kg
Air	Hydrogen chloride	0.88	kg AP / kg
Air	Hydrogen fluoride	1.6	kg AP / kg
Air	Nitric acid	0.51	kg AP / kg
Air	Nitric oxide	1.07	kg AP / kg
Air	Nitrogen dioxide	0.7	kg AP / kg
Air	Nitrogen oxides	0.7	kg AP / kg

附录

Air	Sulfur dioxide	1	kg AP / kg
Air	Sulfur oxides	1	kg AP / kg
Air	Sulfur trioxide	0.8	kg AP / kg
Air	Sulfuric acid	0.65	kg AP / kg

附录 E 光化学氧化因子 kg POCP (来自 CML 1992 v2.1)

Compartment	Substance	Factor	Unit
Air	2-Propanol	0.196	kg POCP / kg
Air	Acetaldehyde	0.527	kg POCP / kg
Air	Acetone	0.178	kg POCP / kg
Air	Acetonitrile	0.416	kg POCP / kg
Air	Acrolein	0.603	kg POCP / kg
Air	Acrylonitrile	0.416	kg POCP / kg
Air	Alcohols, unspecified	0.196	kg POCP / kg
Air	Aldehydes, unspecified	0.443	kg POCP / kg
Air	Benzaldehyde	0.334	kg POCP / kg
Air	Benzene	0.189	kg POCP / kg
Air	Benzene, ethyl-	0.593	kg POCP / kg
Air	Benzo(a)pyrene	0.761	kg POCP / kg
Air	Biphenyl	0.761	kg POCP / kg
Air	Biphenyl, hexachloro-	0.761	kg POCP / kg
Air	Butane	0.41	kg POCP / kg
Air	Butene	0.992	kg POCP / kg
Air	Caprolactam	0.761	kg POCP / kg
Air	Chloroform	0.021	kg POCP / kg
Air	Crude oil	0.398	kg POCP / kg
Air	Diethyl ether	0.398	kg POCP / kg
Air	Ethane	0.082	kg POCP / kg
Air	Ethane, 1,1,1-trichloro-, HCFC-140	0.021	kg POCP / kg

附录

Air	Ethane, 1,2-dichloro-	0.021	kg POCP / kg
Air	Ethanol	0.268	kg POCP / kg
Air	Ethene	1	kg POCP / kg
Air	Ethene, chloro-	0.021	kg POCP / kg
Air	Ethene, tetrachloro-	0.005	kg POCP / kg
Air	Ethene, trichloro-	0.021	kg POCP / kg
Air	Ethylene glycol	0.196	kg POCP / kg
Air	Ethylene oxide	0.377	kg POCP / kg
Air	Ethyne	0.168	kg POCP / kg
Air	Fluoranthene	0.377	kg POCP / kg
Air	Formaldehyde	0.421	kg POCP / kg
Air	Heptane	0.529	kg POCP / kg
Air	Hexane	0.421	kg POCP / kg
Air	Hydrocarbons, aliphatic, alkanes, cyclic	0.398	kg POCP / kg
Air	Hydrocarbons, aliphatic, alkanes, unspecified	0.398	kg POCP / kg
Air	Hydrocarbons, aliphatic, alkenes, unspecified	0.906	kg POCP / kg
Air	Hydrocarbons, aliphatic, unsaturated	0.398	kg POCP / kg
Air	Hydrocarbons, aromatic	0.761	kg POCP / kg
Air	Hydrocarbons, chlorinated	0.021	kg POCP / kg
Air	Hydrocarbons, unspecified	0.398	kg POCP / kg
Air	Hydroxy compounds, unspecified	0.377	kg POCP / kg
Air	Kerosene	0.398	kg POCP / kg
Air	Ketones, unspecified	0.326	kg POCP / kg
Air	Methane	0.007	kg POCP / kg
Air	Methane, biogenic	0.007	kg POCP / kg
Air	Methane, dichloro-, HCC-30	0.021	kg POCP / kg
Air	Methane, fossil	0.007	kg POCP / kg
Air	Methane, tetrachloro-, CFC-10	0.021	kg POCP / kg
Air	Methanol	0.123	kg POCP / kg
Air	Methyl ethyl ketone	0.473	kg POCP / kg

附录

Air	Methyl mercaptan	0.377	kg POCP / kg
Air	Naphthalene	0.761	kg POCP / kg
Air	PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	0.761	kg POCP / kg
Air	Pentane	0.408	kg POCP / kg
Air	Petrol	0.398	kg POCP / kg
Air	Phenol	0.761	kg POCP / kg
Air	Phenol, chloro-	0.021	kg POCP / kg
Air	Phenol, pentachloro-	0.021	kg POCP / kg
Air	Phthalic anhydride	0.761	kg POCP / kg
Air	Polychlorinated biphenyls	0.021	kg POCP / kg
Air	Propane	0.42	kg POCP / kg
Air	Propene	1.03	kg POCP / kg
Air	Propionic acid	0.377	kg POCP / kg
Air	Styrene	0.761	kg POCP / kg
Air	Tar	0.416	kg POCP / kg
Air	Terpentine	0.377	kg POCP / kg
Air	Toluene	0.563	kg POCP / kg
Air	Vinyl acetate	0.223	kg POCP / kg
Air	VOC, volatile organic compounds	0.398	kg POCP / kg
Air	Xylene	0.849	kg POCP / kg

附录 F 资源消耗因子 MJ LHV (来自 CML 1992 v2.1)

Compartment	Substance	Factor	Unit
Raw	Biomass, feedstock	1	MJ LHV / MJ
Raw	Coal, 18 MJ per kg, in ground	18	MJ LHV / kg
Raw	Coal, 26.4 MJ per kg, in ground	26.4	MJ LHV / kg
Raw	Coal, 29.3 MJ per kg, in ground	29.3	MJ LHV / kg
Raw	Coal, brown, 10 MJ per kg, in ground	10	MJ LHV / kg
Raw	Coal, brown, 8 MJ per kg, in ground	8	MJ LHV / kg

附录

Raw	Coal, brown, in ground	9.9	MJ LHV / kg
Raw	Coal, feedstock, 26.4 MJ per kg, in ground	26.4	MJ LHV / kg
Raw	Coal, hard, unspecified, in ground	19.1	MJ LHV / kg
Raw	Energy, from biomass	1	MJ LHV / MJ
Raw	Energy, from coal	1	MJ LHV / MJ
Raw	Energy, from coal, brown	1	MJ LHV / MJ
Raw	Energy, from gas, natural	1	MJ LHV / MJ
Raw	Energy, from hydro power	1	MJ LHV / MJ
Raw	Energy, from hydrogen	1	MJ LHV / MJ
Raw	Energy, from oil	1	MJ LHV / MJ
Raw	Energy, from peat	1	MJ LHV / MJ
Raw	Energy, from sulfur	1	MJ LHV / MJ
Raw	Energy, from uranium	1	MJ LHV / MJ
Raw	Energy, from wood	1	MJ LHV / MJ
Raw	Energy, geothermal	1	MJ LHV / MJ
Raw	Energy, gross calorific value, in biomass	1	MJ LHV / MJ
Raw	Energy, kinetic, flow, in wind	1	MJ LHV / MJ
Raw	Energy, potential, stock, in barrage water	1	MJ LHV / MJ
Raw	Energy, recovered	1	MJ LHV / MJ
Raw	Energy, solar	1	MJ LHV / MJ
Raw	Energy, unspecified	1	MJ LHV / MJ
Raw	Gas, mine, off-gas, process, coal mining/kg	49.8	MJ LHV / kg
Raw	Gas, mine, off-gas, process, coal mining/m ³	39.8	MJ LHV / m ³
Raw	Gas, natural, 30.3 MJ per kg, in ground	30.3	MJ LHV / kg
Raw	Gas, natural, 35 MJ per m ³ , in ground	35	MJ LHV / m ³
Raw	Gas, natural, 36.6 MJ per m ³ , in ground	36.6	MJ LHV / m ³
Raw	Gas, natural, 46.8 MJ per kg, in ground	46.8	MJ LHV / kg
Raw	Gas, natural, feedstock, 35 MJ per m ³ , in ground	35	MJ LHV / m ³
Raw	Gas, natural, feedstock, 46.8 MJ per kg, in ground	46.8	MJ LHV / kg
Raw	Gas, natural, in ground	38.3	MJ LHV / m ³

附录

Raw	Gas, off-gas, oil production, in ground	40.9	MJ LHV / m3
Raw	Gas, petroleum, 35 MJ per m3, in ground	35	MJ LHV / m3
Raw	Methane	35.9	MJ LHV / kg
Raw	Oil, crude, 38400 MJ per m3, in ground	38400	MJ LHV / m3
Raw	Oil, crude, 41 MJ per kg, in ground	41	MJ LHV / kg
Raw	Oil, crude, 42 MJ per kg, in ground	42	MJ LHV / kg
Raw	Oil, crude, 42.6 MJ per kg, in ground	42.6	MJ LHV / kg
Raw	Oil, crude, 42.7 MJ per kg, in ground	42.7	MJ LHV / kg
Raw	Oil, crude, feedstock, 41 MJ per kg, in ground	41	MJ LHV / kg
Raw	Oil, crude, feedstock, 42 MJ per kg, in ground	42	MJ LHV / kg
Raw	Oil, crude, in ground	45.8	MJ LHV / kg
Raw	Peat, in ground	13	MJ LHV / kg
Raw	Steam from waste incineration	1	MJ LHV / MJ
Raw	Uranium ore, 1.11 GJ per kg, in ground	1110	MJ LHV / kg
Raw	Uranium, 2291 GJ per kg, in ground	2291000	MJ LHV / kg
Raw	Uranium, 451 GJ per kg, in ground	451000	MJ LHV / kg
Raw	Uranium, 560 GJ per kg, in ground	560000	MJ LHV / kg
Raw	Uranium, in ground	560000	MJ LHV / kg
Raw	Water, barrage	0.01	MJ LHV / kg
Raw	Wood and wood waste, 9.5 MJ per kg	9.5	MJ LHV / kg
Raw	Wood, feedstock	15.3	MJ LHV / kg
Raw	Wood, unspecified, standing/kg	15.3	MJ LHV / kg

个人简历 在读期间发表的学术论文

个人简历:

谭斌, 男, 1981 年 11 月生。

2004 年 7 月毕业于山东轻工业学院, 环境工程专业, 获学士学位。

2004 年 9 月进入同济大学环境科学与工程学院就读硕士研究生。

已发表论文:

[1] 谭斌, 蒋大和. 环境决策支持系统及其案例研究. 中国环境科学学会学术年会优秀论文集, 2006, 7

[2] 郭素荣, 杨柳, 谭斌, 蒋大和. 挥发性有机废气排放现状与减排措施探讨. 四川环境