

# LCA 法比较太阳能热水器和燃煤锅炉 系统的环境效益

## Comparison Study of Environmental Effects between Solar Water Heating System and Coal-fired Boiler System with LCA

(申请硕士学位)

专业: 环境工程

姓名: 黄海耀

指导教师: 郭静 教授

环境科学与工程学院

2004 年 1 月

## 独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果，除了文中特别加以标注和致谢之处外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得 天津大学 或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名： 签字日期： 年 月 日

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 天津大学 有关保留、使用学位论文的规定。特授权 天津大学 可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，并采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编以供查阅和借阅。同意学校向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘。

(保密的学位论文在解密后适用本授权说明)

学位论文作者签名： 导师签名：

签字日期： 年 月 日 签字日期： 年 月 日

# 中 文 摘 要

生命周期评价 (LCA) 是近年来发展起来的一种新的环境管理和分析工具，是一种评价产品、工艺或活动从原材料采集到产品生产、运输、销售、使用、维护和最终处置整个生命周期阶段有关的环境负荷的有效方法。

本论文首次应用 LCA 方法，对太阳能热水器系统和燃煤锅炉系统从原材料的获取、产品制造、使用运行到最终废弃处理整个生命周期过程进行了环境效益对比分析。研究结果表明，太阳能热水器系统和燃煤锅炉系统整个生命周期过程中导致环境污染的关键环节分别是：制造过程中原材料的生产和运行过程中煤的燃烧。通过资料分析和大量计算，结果表明，锅炉系统每产生 1kWh 能量分别产生 411.75gCO<sub>2</sub>、11.48gNO<sub>x</sub>、4.89gSO<sub>2</sub> 和 28.03gTSP，而太阳能热水器系统每产生 1kWh 能量分别产生 31.66gCO<sub>2</sub>、0.10gNO<sub>x</sub>、0.27gSO<sub>2</sub> 和 0.66gTSP，分别为锅炉系统的 1/13、1/115、1/18 和 1/42。由此表明，太阳能热水器系统对于改善环境空气质量的效果是非常显著的。

本论文的另一个创新点在于将 TRACI (Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other Environmental Impacts) 模型和层次分析法 (AHP) 应用于 LCA 研究，结合经济、技术指标评价了两个系统的综合效益。结果表明，当侧重于环境效益时，太阳能热水器系统和锅炉系统的权重分别为 0.6368 和 0.3632，此时太阳能热水器系统的综合效益明显优于锅炉系统的综合效益；当更注重经济效益时，太阳能热水器系统和锅炉系统的权重分别为 0.4768 和 0.5232，此时太阳能热水器系统的综合效益稍差于锅炉系统的综合效益。

本论文通过两个特定系统的环境效益对比分析，对 LCA 的应用进行了初步探讨。研究结果发现，LCA 是科学的评价方法，对清洁生产以及环境管理有着很好的指导作用。相信这种方法必将在可持续发展战略研究以及我国今后的环境管理中得以广泛应用。

**关键词：** 清洁生产； 生命周期评价 (LCA)； TRACI 模型； 层次分析法移 (AHP)； 太阳能热水器系统； 燃煤锅炉系统； 环境影响评价

# ABSTRACT

Life Cycle Assessment (LCA) is a new tool of environmental management and analysis that develops during these years. It's an effective method to assess the environmental load of products, processes or activities in the whole life cycle from raw materials acquisition to its production, transportation, distribution, utilization, maintenance and disposal.

In this dissertation, LCA was applied for the first time to compare the environmental effects between Solar Water Heating System and Coal-fired Boiler System from raw materials acquisition to system production, utilization and disposal. The results show that the key process of environmental pollution for the Solar Water Heating System is raw materials production in the product manufacturing process and that of the Boiler System is coal consumption in the running process. After lots of data processing and calculating, the result shows that to produce 1kWh of energy, the Boiler System will produce 411.75g of CO<sub>2</sub>, 11.48g of NO<sub>x</sub>, 4.89g of SO<sub>2</sub> and 28.03g of TSP, and the Solar Water Heating System will produce 31.66g of CO<sub>2</sub>, 0.10g of NO<sub>x</sub>, 0.27g of SO<sub>2</sub> and 0.66g of TSP, which is respectively 1/13, 1/115, 1/18 and 1/42 that of the Boiler System. So we can make conclusions that the improvement of environmental air quality resulting from the utilization of Solar Water Heating Systems is remarkable.

Another innovation of this dissertation is that TRACI (Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other Environmental Impacts) model and Analytical Hierarchy Process (AHP) are applied into LCA study to assess the comprehensive effect combining with the economic and technical indexes. Results show that when emphasis was particularly given to the environmental effect, the weight of Solar Water Heating System is 0.6368 and that of the Boiler system is 0.3632, which shows that the comprehensive effect of Solar Water Heating System is better than that of the Boiler System. And when emphasis was particularly given to the economic effect, the weight of Solar Water Heating System is 0.4768 and that of the Boiler system is 0.5232, which shows that the comprehensive effect of Solar Water Heating System is a little bit worse than that of the Boiler System at this situation.

In this dissertation, the application of LCA was discussed elementarily through comparison study of the environmental effects between two specific systems. During study we found that LCA is a scientific assessment methodology and it can play a good role in directing Cleaner Production and Environmental Management. We believe that LCA will be applied widely in the sustainable development strategies study and environmental management in future.

**Key Words:** Cleaner Production; Life Cycle Assessment (LCA); TRACI model; Analytical Hierarchy Process (AHP); Solar Water Heating System; Coal-fired Boiler System; Environmental Impact assessment

# 目 录

<b>第一章 绪论</b>	1
1.1 课题来源及研究内容	1
1.2 LCA 综述	3
<b>第二章 太阳能热水器系统清单分析</b>	15
2.1 清单数据来源	15
2.2 系统边界及功能单位的确定	15
2.3 单体清单分析	16
2.4 管路系统清单分析	20
2.5 系统经济效益、技术性能参数清单	21
<b>第三章 燃煤锅炉系统清单分析</b>	22
3.1 研究范围及系统边界的确定	22
3.2 单体清单分析	22
3.3 锅炉房清单分析	28
3.4 辅助设备清单分析	31
3.5 系统经济效益、技术性能参数清单	35
<b>第四章 影响评价</b>	36
4.1 分类	36
4.2 特征化	41
4.3 量化	44
<b>第五章 改善评价</b>	56
5.1 我国太阳能资源概况	56
5.2 我国太阳能热水器应用现状	57
5.3 太阳能热水器改善评价	57
5.4 燃煤锅炉改善评价	59
<b>第六章 太阳能热水器系统对于改善环境空气质量的效果分析</b>	61
6.1 总量分析	61
6.2 CO <sub>2</sub> 排放分配情况分析	62
6.3 NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub> 和 TSP 排放分配情况分析	63
<b>第七章 结论和建议</b>	66
7.1 研究结果和结论	66
7.2 研究过程中问题与建议	67
<b>参考文献</b>	69
<b>发表论文和参加科研情况说明</b>	73
<b>附录</b>	74
附录 1 太阳能热水器系统数据汇总	74
附录 2 燃煤锅炉系统数据汇总	81
附录 3 两个系统每功能单位数据汇总	89
<b>致谢</b>	90

## 第一章 绪论

### 1.1 课题来源及研究内容

#### 1.1.1 课题来源

本课题是铁道科学研究院环控劳卫所铁路车辆、机务系统清洁生产项目的一个子项目。

铁路系统是煤、水、油、电的耗能大户，铁路运输生产中排放的废水、废气、废渣、噪声等对环境的污染亦相当严重，其节能、降耗、减污、增效的潜力很大。铁路车辆、机务系统的主要污染源包括：机车运转、检修过程产生的废油、废水，机车配件煮洗过程产生的含油废水，机车冷却水，跑冒滴漏的散油、检修废油，燃油、燃煤过程产生的大气污染物，电焊，喷漆等产生的有机废气以及检修过程产生的擦机布、棉丝等固体废弃物。调查表明，目前铁路系统的污染治理设施多为末端治理型，远远不能达到清洁生产的要求。随着可持续发展理念的深入人心，清洁生产在各个行业逐步得到开展。在此情况下，铁道部“十五”环保规划明确指出，环保工作重点从末端治理为主向全过程为主转移，污染防治工作重点从固定源为主向流动源为主转移，铁路主要运输、生产站段要初步实现清洁生产。在这样的背景下，铁道科学研究院决定在铁路车辆、机务系统率先实施清洁生产。

清洁生产是一种全新的发展战略，它借助于各种相关理论和技术，在产品的整个生命周期的各个环节采取“预防”措施，通过将生产技术、生产过程、经营管理及产品等方面与物流、能量、信息等要素有机结合起来，并优化运行方式，从而实现最小的环境影响、最少的资源和能源使用、最佳的管理模式以及最优化的经济增长水平。清洁生产一方面用节能、降耗、减污降低生产成本，增强企业的竞争力，另一方面可以大大降低末端治理的污染负荷，节省环保投入。另外，清洁生产可以最大限度的利用资源和能源，通过循环套用或重复利用，使原材料最大限度的转化为产品，把污染消灭在生产过程中，从而实现可持续发展。以燃煤锅炉为例，按过去末端治理的思路，锅炉治理的着眼点是保证锅炉大气污染物排放达到国家规定的浓度指标，环保设备的管理对象仅是锅炉除尘器；而按照清洁生产的思路，锅炉大气污染物排放不仅要满足浓度指标，还要控制排放总量，

而污染物排放总量削减的关键是千方百计的降低煤耗、提高效率、或者改用更加清洁的能源，这就要求从污染源头入手，全过程的控制污染。

推广可再生能源的利用，以减少由于化石矿物能源的使用而导致的环境污染，是清洁生产的主要内容之一，也是铁路车辆、机务系统清洁生产的重要方法之一。调查表明，天津机务段作为一个特等机务段，是铁路系统清洁生产试点之一，也是较早使用可再生能源的机务段之一。该机务段位于天津市内环线以内的中心城区，是铁路运输行业的污染大户，多年来由于环境问题而引起的社会投诉逐年增加。在此情况下，根据上级部门要求，该机务段于 1997 年开始实施清洁生产工作。随着环保意识的逐渐加强，该机务段的清洁生产工作也在持续深入的开展。为了减轻锅炉燃煤带来的大气污染问题，2001 年，该段建成了规模 500 平方米的全天候太阳能热水工程，供应职工洗浴热水。该工程环境效益相当明显，达到了天津机务段节能降耗、减少污染的目的。

如何评价实施清洁生产方案所带来的环境效益，是清洁生产的重要步骤之一。然而，调查发现，天津机务段对该太阳能热水工程只是从单一角度进行了简单的可行性评价以及环境效益评价，并没有从整体考虑，全面、详细的进行环境影响评价。生命周期评价（LCA）是一种有效的环境问题识别、诊断和评估工具，同时也是一种有效的清洁生产工具，在国外清洁生产审计、产品生态设计、环境管理、生态工业等方面发挥了应有的作用，然而其在我国的应用还相对较少。本论文正是以此为切入点，将 LCA 这种全新的方法应用到铁路系统清洁生产领域，对太阳能热水器系统和燃煤锅炉系统的综合效益进行评价，重点考虑环境效益，结合经济、技术指标进行全面分析，从而为各机务段开展清洁生产提供方法上的指导，为环境政策决策者提供借鉴，为企业环境管理者提供行为改善依据，同时也为太阳能热水器、锅炉设计者提供产品改进的方法参考。

### 1.1.2 研究内容

本论文选取了较为典型的太阳能热水器系统以及燃煤锅炉系统，应用 LCA 的方法，对两种系统整个生命周期过程的能耗以及环境影响进行分析和评价，包括系统生命周期排放的大气污染物、水体污染物和固体废弃物对环境的影响。并且结合经济、技术指标对比分析太阳能热水器系统以及锅炉系统的综合效益。

具体的讲，本论文主要进行以下几个方面的研究：

- (1) 通过对太阳能热水器系统和锅炉系统整个生命周期过程的能耗和环境影响对比分析，结合经济、技术指标比较分析两种不同系统的综合效益；
- (2) 通过两种不同系统整个生命周期过程的环境影响对比分析，确定哪种系统对环境更加友好；
- (3) 通过对太阳能热水器单体各生命周期过程的环境影响分析，确定太阳能热水器各生命周期过程的环境影响比例，从而为太阳能热水器优化设计提供借鉴和参考；
- (4) 通过对锅炉单体各生命周期过程的环境影响分析，确定锅炉各生命周期过程的环境影响比例，从而为锅炉优化设计提供借鉴和参考。
- (5) 通过对太阳能热水器系统和锅炉系统整个生命周期排放的大气污染物的对比，分析太阳能热水器系统对于改善大气污染的环境效益。

## 1.2 LCA 综述

### 1.2.1 LCA 的概念

LCA，即 Life Cycle Assessment，中文翻译是生命周期评价，又称为生命周期分析。LCA 的通俗定义很多，但国际标准组织（ISO）和国际环境毒物学和化学学会（SETAC）的定义最具有权威性。

ISO 定义：对在一个产品系统的生命周期中输入、输出及其潜在环境影响的汇编和评价<sup>[1]</sup>。

SETAC 定义：全面的审视与一种工艺或产品“从摇篮到坟墓”的整个生命周期有关的环境后果<sup>[2]</sup>。

### 1.2.2 LCA 的特点

- (1) 是一种全过程评价：涉及产品或行为的从原材料采集、加工、产品制造、使用消费、回收利用到废物处理全“生命周期”。
- (2) 是一种系统评价：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，辨别和评价改善环境影响的机会。

(3) 是一种注重环境影响的评价：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。LCA 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。

(4) 是一种开放型评价：LCA 研究尚不存在统一的模式，用户可以根据应用意图和要求，实际的予以实施。

### 1.2.3 LCA 的起源和发展<sup>[3,4]</sup>

LCA 最早出现于 20 世纪 60 年代末、70 年代初，其最初应用可追溯到 1969 年由美国中西部资源研究所开展的针对可口可乐公司饮料包装瓶进行评价的研究。可口可乐公司在考虑是否以一次性塑料瓶替代可回收玻璃瓶时，试图从原材料的采掘到最终的废弃物处理，进行全过程（从摇篮到坟墓）的跟踪与定量分析，来比较两种方案的环境友好情况。该项研究是公认的 LCA 研究开始的标志<sup>[5]</sup>，也奠定了生命周期清单分析的基础。70 年代早期，美国和欧洲的其他一些公司相继进行了类似的生命周期清单分析，1975 年东京野村研究所为日本的利乐公司进行了首次包装 LCA 研究，通过不同的销售方案对纸杯和玻璃瓶进行比较，完成研究报告《对纸盒牛奶包装的评价》<sup>[6]</sup>。随后美国 Franklin 协会也通过研究提出了“15 种一次性饮料瓶的能量比较”的报告，这些都可被视为 LCA 的早期研究成果。这一时期的研究普遍采用能源分析法，其资源使用和产品的环境释放的量化方法当时被称为资源与环境状况分析(Resource and Environmental Profile Analysis, REPA)。与此同时，欧洲国家的一些研究人员（以英国的 IanBoustead 为代表）提出了类似清单分析的“生态衡算”(Ecobalance) 方法。该方法以能源和物料平衡和生态试验为基础，对产品生命周期对环境的所有输入、输出进行核算，目前已发展成为一种物料和产品的环境评价工具<sup>[7]</sup>。

然而，70 年代所作的工作并不是完全意义上的生命周期评价，而主要以清单分析为主，这也就是最初的 LCA 同时也是 Life Cycle Analysis 的缩写的原因。

随着 70 年代末到 80 年代中期出现的全球性固体废弃物问题，使得 REPA 的

研究方法又逐渐成为一种资源分析工具。欧洲和美国的一些咨询机构依据 REPA 的思想发展了有关废弃物管理的一系列方法论，更深入地研究环境排放和资源消耗的潜在影响。如英国的 Boustead 咨询公司针对清单分析方法做了大量研究，逐步形成了一套较为规范化的分析方法，为后来著名的 Boustead 模型打下了坚实的理论基础。1984 年，受 REPA 方法的启发，瑞士联邦“材料调试与研究实验室”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。该研究引起了国际学术界的广泛关注，并为后来的许多研究所采用。该实验室据此理论建立了一个详细的清单数据库，包括了一些重要工业部门的生产工艺数据和能源利用数据。在 1991 年该实验室又开发出了一个商业化的计算机软件，为后来的 LCA 方法论的发展奠定了重要的基石。苏黎世大学冷冻工程研究所也利用荷兰 Leiden 大学环境部、现瑞士联邦森林景观厅的数据库，从生态平衡和环境评价等角度出发，对 LCA 进行了较为系统的研究，对开拓 LCA 领域起到了决定性的作用。

80 年代末以后，随着区域性与全球性环境问题的日益严重，以及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，公众和社会也开始日益关注 LCA 研究的结果。LCA 研究得到了广泛关注，逐渐由单纯的清单分析转为综合评价。同时，随着开展 LCA 研究的组织和机构的增多，有关 LCA 的方法和术语产生了混乱，由此导致了对相同产品的评价往往会产生相互冲突的结果，因此急需制定统一的规范。

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 LCA 的基本方法和数据进行标准化。1993 年在葡萄牙的 Sesimbra 举办的研讨班上确定了统一的规范，并将名称正式定为 Life Cycle Assessment (LCA)。

SETAC 是目前国际上在该领域内的领导组织，是 LCA 的主要论坛和研究机构，对 LCA 的发展做出了很大的贡献。1990 年由 SETAC 首次主持召开了有关 LCA 的国际研讨会。在该会议上首次提出了 LCA 的概念。在以后的几年里，SETAC 又主持和召开了多次学术研讨会，对 LCA 的理论与方法进行了广泛的研究。1993 年 SETAC 根据在葡萄牙的一次学术会议的主要结论，出版了一本纲领

性报告：“LCA 纲要：实用指南”。该报告为 LCA 方法提供了一个基本技术框架，成为 LCA 评价方法论研究起步的一个里程碑。此外，荷兰的 CML（荷兰 Leiden 大学环境科学中心）也是这方面比较活跃的研究机构，在荷兰能源和环境署及荷兰国家公共健康和环境保护研究所的资助和支持下，作了大量的工作。

目前 LCA 的方法论还处在研究和发展阶段，SETAC 与 ISO 正积极促进 LCA 方法论的国际标准化研究。ISO 已将 LCA 作为了正在制定的 ISO14000 环境管理体系的一个重要步骤。ISO 于 1993 年 6 月正式成立了环境管理标准技术委员会 (TC—207)，负责环境管理体系的国际标准化工作。TC—207 技术委员会在 ISO14000 系列环境管理标准中为 LCA 预留了 10 个标准号(ISO14040—ISO14049)，其中 ISO14040（环境管理—生命周期评价—原则与框架）已于 1997 年 6 月正式颁布，ISO14041（环境管理—生命周期评价—目的与范围的确定和清单分析）于 1998 年颁布，2000 年颁布了 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—生命周期解析）和 ISO14049/TR（环境管理—生命周期评价—ISO14041（目的与范围的确定和清单分析）的应用实例），2002 年又颁布了 ISO14049/TS（环境管理—生命周期评价—数据文件信息），相应的其他标准正在制定过程中。

LCA 将成为 ISO14000 系列标准中产品评价标准的核心和确定环境标志和产品环境标准的基础，它同时也是环境标志计划与清洁生产实施的重要基础。

我国对 LCA 的认识和研究还处于起步阶段，国内在该领域内所作的工作还很少，主要有中科院、清华大学、兰州大学、重庆大学、大连理工大学等机构进行了初步的研究和应用。同时，我国对 LCA 的工作也极为重视，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 月又出版了 GB/T24042《环境管理 生命周期评价 生命周期影响评价》和 GB/T24043《环境管理 生命周期评价 生命周期解释》。

#### 1.2.4 LCA 的方法学框架

1993 年 SETAC 在“LCA 纲要：实用指南”中将 LCA 的基本结构归纳为有机联系的部分：定义目标与确定范围（Goal and Scope Definition）；清单分析

(Inventory Analysis); 影响评价 (Impact Assessment) 和改善评价 (Improvement Assessment), 如图 1-1 所示。

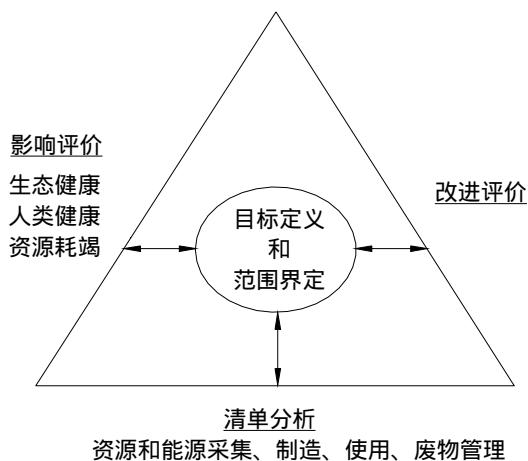


图 1-1 生命周期评价的技术框架 (SETAC, 1993)

1997 年, ISO14040 标准又把 LCA 实施步骤分为目标和范围界定、清单分析、影响评价和结果解析 4 个部分, 如图 1-2 所示。

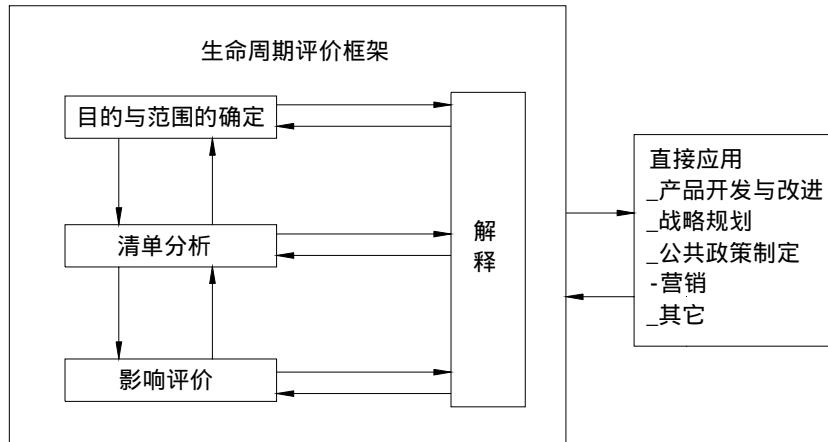


图 1-2 LCA 实施步骤 (ISO14040, 1997)

#### 1.2.4.1 目的与范围的确定

目的与范围的确定是 LCA 研究的起点, LCA 的所有阶段都以目的与范围确定为指导。这一步工作随任务的不同变化很大, 没有标准模式套用, 但必须反映资料收集与影响分析的根本方向。

(1) LCA 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<sup>[8]</sup>。LCA 的结果通常是服务于以下三种不同

的组织：

- 1) 消费者，这类组织需要的是购买决策信息；
  - 2) 生产者，一般是为了产品改进或其他用途（如广告宣传）；
  - 3) 公共部门，指政府，是为了制定法规或标准，同时也为了向公众公布信息。
- (2) 研究范围也应妥善规定，要保证研究的广度、深度和详尽程度与研究目标相符。
- (3) LCA 研究是一个反复的过程，随着对数据和信息的收集，可能须要对研究范围的各个方面加以修改，以满足原定的研究目的。在某些情况下，由于未曾预知的局限、制约或获得了新的信息，可能要对研究目的本身加以修改<sup>[8]</sup>。
- (4) LCA 研究范围中必须明确规定所研究系统的功能。功能单位指为某一用户或某一过程所提供的一种服务或使用价值<sup>[9]</sup>，是产品系统输出功能的量度。功能单位的基本作用是为有关的输入输出提供一个数学意义上的参照基准，以保证 LCA 结果的可比性。在评估不同系统时，LCA 结果的可比性是必不可少的，否则无法在同一基础上进行比较。一个系统可能同时具备若干种功能，研究中选择哪一种取决于研究的目的和范围。同时，必须对有关功能单位做出定义，并使之可测量。例如，比较饮料包装容器的环境影响，其功能单位可以定义为所包装的一定量的饮料；比较不同灯泡的环境影响，假设甲灯泡使用寿命为 9000 小时，而乙灯泡的使用寿命为 900 小时，那么可以拿 10 个乙灯泡和 1 个甲灯泡进行比较。
- (5) 此外，确定系统边界也是确定研究范围的重要步骤，它决定 LCA 中必须包括的单元过程，产品生命周期所有过程都应落入系统的边界内，边界外就是系统环境（见图 1-3<sup>[8]</sup>）。由图 1-3 可以看出，产品一方面与环境系统发生关系，另一方面由于其生产过程中往往需要辅助产品的投入而与其他产品相联系，而 LCA 只包括与产品直接有关的过程。所以必须将产品系统的边界从其他系统中划分出来，这是整个评价中十分重要的一步。一项完善的 LCA 研究应有一个明确的定义系统边界的标准，这个标准对于保证研究结果的可靠性和实现研究目的具有决定性作用。任何忽略生命周期的阶段、过程或输入输出的决定都必须予以明确陈述和论证。

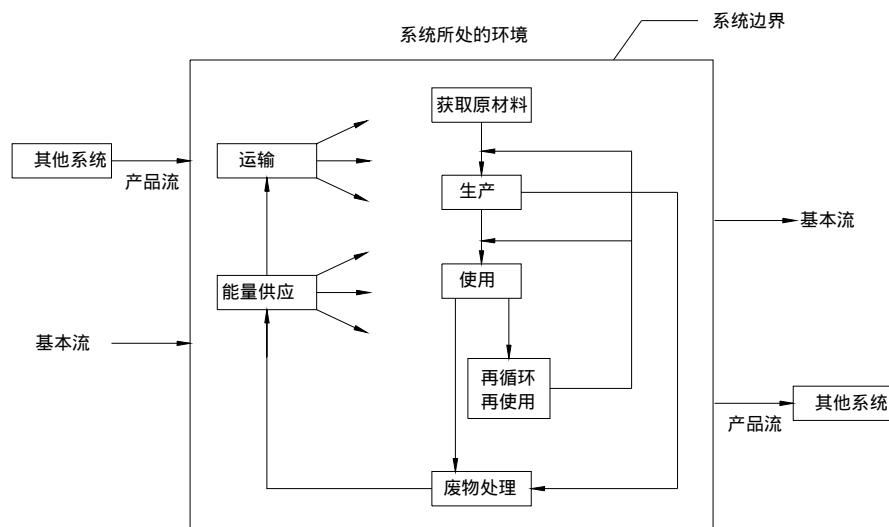


图 1-3 生命周期清单分析的产品系统示例

#### 1.2.4.2 清单分析

研究目的与范围的确定为开展 LCA 研究提供了一个初步计划，生命周期清单分析（LCI）则涉及到数据的收集和计算程序，目的是对产品系统的有关输入和输出进行量化。输入和输出可包括与该系统有关的对资源、原材料的使用以及向空气、水体和土地的排放。清单分析应根据图 1-4<sup>[8]</sup>所示的步骤进行。

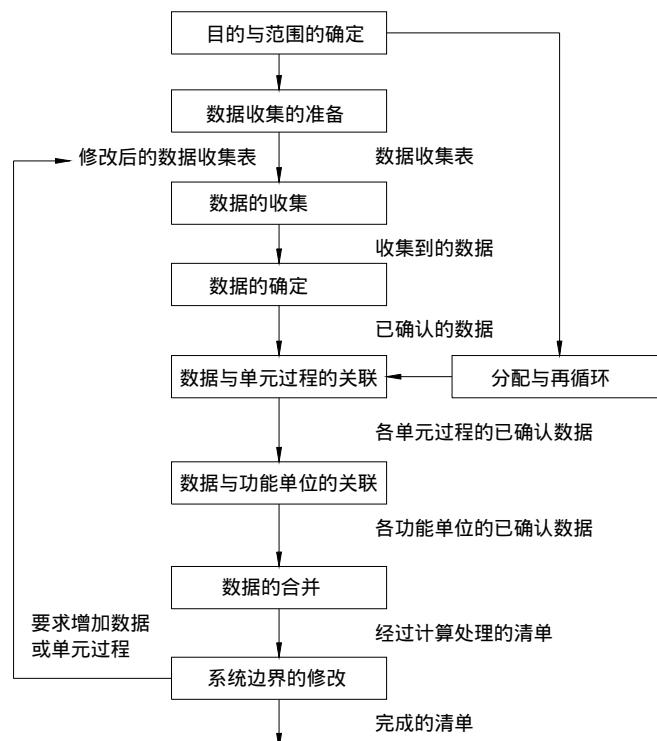


图 1-4 清单分析程序略图（某些反复性过程未予显示）

清单分析贯穿于产品的整个生命周期，即原材料的提取，产品的加工、制造、销售、使用和后处理等，是生命周期影响评价和结果解释的基础。一个完整的生命周期清单分析应该能为所有与系统相关的投入和产出提供一个总的概括。数据收集的齐全及精确与否是决定分析结果正确与否的关键<sup>[10]</sup>。

进行清单分析是一个反复的过程，当取得了一批数据，并对系统又进一步的认识后，可能会出现新的数据要求，或发现原有的局限性，因而要求对数据收集程序做出修改，以适应研究目的。有时也要求对研究目的或范围加以修改。

清单分析是目前 LCA 中发展较为完善的阶段。

#### 1.2.4.3 影响评价

影响评价就是对清单分析阶段所识别的环境影响压力进行定性或定量的评价，即确定产品系统的物质、能量交换对外部环境的影响。这种评价应包括对生态系统、人体健康、资源消耗以及其它方面的影响。

可以说影响评价是 LCA 的核心内容，也是难度最大的部分。相对于目的和范围的确定、清单分析来说，影响评价的方法学和理论框架尚处于发展阶段，目前还没有一种可以接受的通用的科学基准体系和评估模式。

影响评价环节可以包含下列要素<sup>[11]</sup>：分类—将清单数据纳入影响类型；特征化—按照影响类型建立清单数据模型；量化—在特定情况下，且仅当有意义时，将结果进行合并，即加权。

##### (1) 分类

分类是将清单分析中的输入和输出数据组合成相对一致的环境影响类型。影响类型通常可分为资源的耗竭、对生态环境的影响和对人类健康的影响三个大类，每一类又可分为不同的小类，见表 1—1<sup>[11]</sup>。

根据这样的分类，管理者就能够识别不同类型的环境污染。在定义具体影响类型时，应该关注相关的环境过程，这样有利于尽可能的根据这些过程的科学知识来进行影响评价。

##### (2) 特征化

对数据进行分类之后，将每一种影响大类中的不同影响类型进行汇总，称之

表 1—1 生命周期分析对环境影响的分类

资源的消耗	对生态环境的影响	对人体健康的影响
能源	气候变暖	中枢神经系统破坏
原材料	臭氧层破坏	生殖系统破坏
水	酸雨	呼吸系统效应
土地	水体富营养化 光化学烟雾 生态毒性影响 生态环境破坏 生物多样性破坏	致癌效应

为特征化。特征化必须以相关的物理、化学、生物和毒理知识为基础，它主要是开发一种模型，这种模型将清单分析提供的数据转译成描述影响的叙词（Descriptor），如：影响全球变暖潜力（GWP）的因子有 CO<sub>2</sub>，CO，CH<sub>4</sub> 等温室气体，通常采用 CO<sub>2</sub> 作为标准对其它因子进行归并，最终用 CO<sub>2</sub> 表示全球变暖影响大小。类似如酸化采用 SO<sub>2</sub> 当量，臭氧层破坏（ODP）采用 CFC-11 当量。目前国际上使用的特征化模型主要有：负荷模型，当量模型、固有的化学特征模型、总体暴露（Exposure）—效应模型，点源（Site-specific）暴露—效应模型<sup>[12]</sup>。

1) 负荷模型：这类模型仅根据物理量大小来评价清单提供的数据。假定条件是量越少，产生的影响就越小。如一个制造系统产生的二氧化硫为 1kg，另一个系统生产等效量的产品时释放二氧化硫为 2kg，则认为前者对大气的影响更小。

2) 当量模型：这类模型使用当量系数(如 1kg 甲烷相当于 69kg 二氧化碳产生的全球变暖潜力)来汇总清单提供的数据。前提是汇总的当量系数能测度潜在的环境影响。

3) 固有的化学特性模型：这类模型以释放物的化学特性，如毒性、可燃性、致癌性和生物富集等为基础来汇总清单数据。前提是这些标准能将清单数据归一化，以测度潜在的环境影响。

4) 总体暴露(exposure)—效应模型：这类模型以一般的环境和人类健康信息为基础来估计潜在的环境影响。

5) 点源(site—specific)暴露—效应模型：这类模型以点源相关区域或场所的影响信息为基础来确定产品系统实际的影响。

### (3) 量化

由于在特征化过程中得到的结果是以几种不同的环境影响的形式表达的，不利于最终确定和比较不同产品之间对环境影响的大小，不同的影响类型经标准化后可能得出相同的数值，这并不意味着他们的潜在环境影响一样。所以，在这一步骤中，通过对不同的环境影响赋以权重，然后经过加权之后得到一个综合的表达产品或处理方案对环境影响的值，称之为量化。对于具体赋值方法，目前国际上尚无统一标准。

### (4) 结果解释

生命周期结果解释是根据规定的目地和范围，综合考虑清单分析和影响评价的发现，从而形成结论并提出建议。如果仅仅是生命周期清单研究，则只考虑清单分析的结果。解释“发现”可根据研究目的和范围，采取向决策者提交结论和建议的形式。解释环节中可包含一个根据研究目的对 LCA 的范围，以及所收集数据的性质和质量进行评审与修订的反复过程。解释“发现”应能反映所作的所有敏感性分析的结果，作为后续的决策与措施制定的依据。

## 1.2.5 LCA 在国内外的应用

### 1.2.5.1 LCA 在国际上的应用

LCA 作为一种评价产品、工艺或活动整个生命周期环境影响的分析工具，已经在国际上得以广泛应用。

在企业层次上，主要用于产品的比较和改进。在这一方面，国际上比较著名的研究案例有：布质婴儿尿布和一次性婴儿尿布的比较<sup>[13]</sup>，塑料杯和纸杯的比较<sup>[14, 15]</sup>以及汉堡包聚苯乙烯和纸质包装盒的比较<sup>[16]</sup>等。

在公共政策支持层次上，很多发达国家已经借助于 LCA 制定“面向产品的环境政策”，北欧以及欧盟已制定了一些“从摇篮到坟墓”的环境政策。特别是“欧盟产品环境标志计划”，已对一些产品颁布了环境标志，如洗碗机、洗衣机、卫生间用纸巾、浓缩土壤改善剂、油漆、洗衣粉以及电灯炮等，而且正在准备对

更多的产品授予环境标志。

近年来，一些国家相继在环境立法上开始反映产品和产品系统相关联的环境影响。如美国环保局在“清洁水法”中正在考虑使用 LCA 来完善工业洗涤污水指南；在“空气清洁法修正案”中使用生命周期理论来评价材料清洁方案；能源部用 LCA 来检查托管电车使用的效应和评价不同能源方案的环境影响；EPA 已将 LCA 用于制定污染防治政策<sup>[12]</sup>等等。

### 1.2.5.2 LCA 在我国的应用

尽管 LCA 在国际范围内已经得到广泛应用，但在我国的应用研究还处于起步阶段。国家自然科学基金项目先后资助了一些生命周期项目的研究，包括“我国企业环境行为生命周期管理对策研究”、“城镇生活垃圾生命周期分析及过程管理对策研究”、“考虑环境因素的产品生命周期的评价”、“保护区生态旅游生命周期与承载力的关系及风险评价”等<sup>[17]</sup>。在国家 863 科技计划资助下，中国成立了材料生命周期评价中心，对钢材、铝材、水泥、陶瓷以及建筑材料等的生产制造技术和工艺进行生命周期评价<sup>[2]</sup>。

在 LCA 实践方面，我国一些研究机构利用与国外机构合作的机会，进行了一些探索。例如：中美合作项目“中国山西省和其他富煤地区把煤转化成为汽车燃料”的研究、中欧合作项目“工业初级产品生产过程中的生态可持续性研究”等<sup>[17]</sup>。到目前为止，在水泥工业<sup>[18]</sup>、城市生活垃圾管理<sup>[19~21]</sup>、建筑物能耗和环境影响分析<sup>[22, 23]</sup>、包装材料<sup>[24, 25]</sup>、钢铁工业<sup>[26]</sup>、城市污水处理<sup>[27]</sup>、城市交通方式选择<sup>[28]</sup>、能源技术<sup>[29]</sup>、生态材料<sup>[10]</sup>、生态标志<sup>[30]</sup>等领域已经有应用 LCA 思想或方法的初步尝试。如同济大学的杨健<sup>[27]</sup>运用 LCA 方法对 AB 活性污泥法处理系统和普通活性污泥法处理系统从其原材料开采和加工开始直至污水厂施工建设、处理运行以及废弃拆除的全过程能耗进行了对照分析，并且对比分析了两个系统在微孔曝气和穿孔管曝气两种条件下的能耗水平以及两个系统的比能耗水平。徐成、杨建新等<sup>[19]</sup>以四川省广州市生活垃圾处理为例，通过对卫生填埋、简单填埋、焚烧回收部分热能及综合处理四种处理方案中的物质、能量的输入与输出及其污染物排放的环境影响进行评价，研究的功能单位为该市人均年排放的生活垃圾量，研究范围包括从垃圾产生开始，经收集、运输直至最终处理整个过程，生活垃圾的环境影响类别分成全球变暖、酸化、富营养化三种，并以 CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>

和 NO<sub>3</sub> 为参照物。

然而,由于缺乏基础数据和实际案例分析,总的来说,中国目前所进行的生命周期评价大多还停留在理论研究阶段,还没有同具体的工业企业相结合,直接指导工业企业产品工艺的设计和研发。在可再生能源的应用领域,应用 LCA 进行可再生能源与化石矿物能源的比较分析在国外已经得到广泛应用,但在国内,到目前为止还没有相关文献报道。本论文正是基于 LCA 在国内外应用情况的基础上,结合铁道科学研究院清洁生产项目,试图从一个较为全面的角度,将 LCA 方法应用于太阳能热水器系统和燃煤锅炉系统的比较研究,从而为环境管理者提供一定的方法参考。

## 第二章 太阳能热水器系统清单分析

### 2.1 清单数据来源

清单分析是对产品、工艺过程或活动等研究系统整个生命周期阶段资源和能源的使用及向环境排放进行定量的技术过程。清单分析始于原材料的获取，中间过程包括原材料的制造/加工、分配/运输、产品制造/使用/维护，结束于产品的最终处置。清单分析是整个生命周期分析操作中工作量最大的一部分。有关清单分析的操作步骤，美国环保局制定了详细的指南<sup>[31]</sup>，然而对于发展中国家来说，由于统计数据的欠缺以及企业管理水平的限制，很多必要数据不能按照生命周期分析所规定的方法直接获得。在本论文中，大部分数据通过文献检索获得，少部分数据通过调研获得。从理论上讲，生命周期分析是环环相扣的过程，即每个生命周期过程中套着多个生命周期过程。那么，所有的清单数据也都应该是生命周期分析的结果。然而，由于我国生命周期分析还处于起步阶段，在这方面的数据还比较缺乏。因此，本论文中只有少部分数据采用了生命周期分析的结果，而大部分数据只是基于某一单一阶段或者单一过程的数据，数据来源主要包括四方面：

- (1) 企事业单位、生产厂商；
- (2) 正式出版的文献、环境数据手册、国家规定的相关标准或相关研究论文、部分已完成的生命周期评价或公开的数据库；
- (3) 行业协会、网络调查、专家咨询；
- (4) 个别数据通过计算获得，个别数据是在咨询和估计的过程中获得，可能会带有一定的主观性，希望在应用中得以改进与完善。

### 2.2 系统边界及功能单位的确定

图 2-1 为自然循环式太阳能热水器系统结构简图<sup>[32]</sup>，由图 2-1 可知，太阳能热水器系统主要由两部分组成：热水器系统以及配套管路系统。此外，强制流动热水器系统除热水器和管路外还包括一定的辅助设备，如电加热器、水泵、控制仪表等，这部分设备在整个太阳能热水器系统中所占比例较小，所以本论文不予考虑。这样，太阳能热水器系统的系统边界可以定义如图 2-2 所示。

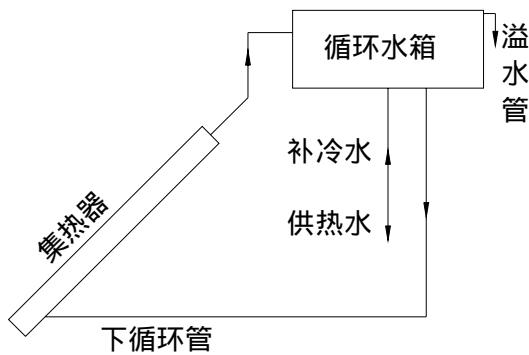


图 2-1 自然循环式太阳能热水器系统结构简图

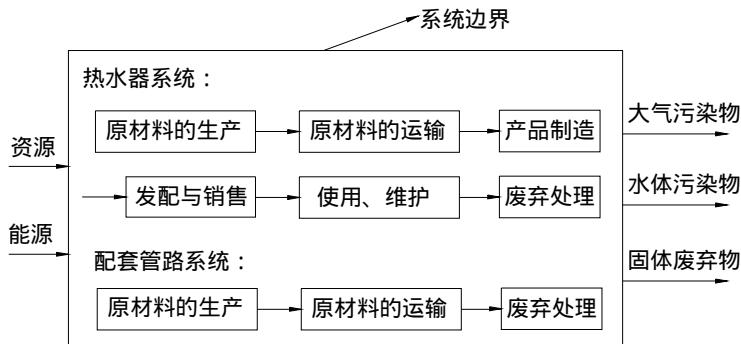


图 2-2 太阳能热水器系统边界

由于所分析的太阳能热水器系统和燃煤锅炉系统的规模不一样，所以本论文将系统的功能单位定为 1kWh 热量，这样，锅炉系统以及太阳能热水器系统的技术、经济、环境效益指标可以折合成一个功能单位进行比较。

## 2.3 单体清单分析

### 2.3.1 原材料清单

太阳能热水器大体上分闷晒式、平板式和真空管式三种。市场调查发现，真空管式太阳能热水器是目前市场上的主流产品，并且呈增长趋势，1999 年占市场份额 56%，2000 年上升到 66%<sup>[33]</sup>。通过网络调查以及厂家调研，本文最终选取天津市津普太阳能热水器厂生产的 JPCY-100 型真空管太阳能热水器为研究对象，该产品在目前的市场上具有一定的代表性。图 2-3 为 JPCY-100 型真空管太阳能热水器示意图。如图 2-3 所示，JPCY-100 型真空管太阳能热水器的主要部



图 2-3 JPCY-100 型真空管太阳能热水器示意图

件包括：真空玻璃集热管、热管、水箱、反射板、支架等。其中，水箱外筒、内胆、支架和反射板是由钢材制作的，而真空管的主要材料是玻璃，真空管内部起导热作用的热管是由铜管制成的，水箱内部的保温材料通常采用聚氨酯整体发泡。除此之外，制造太阳能热水器所需的其他材料还包括塑料、喷漆、吸热涂层、焊接材料等等。本论文所研究的 JPCY-100 型真空管太阳能热水器主要原材料消耗量如表 2-1 所示。

表 2-1 JPCY-100 型真空管热水器主要原材料消耗量(kg)

材料名称	钢材	玻璃	铜	保温材料	塑料	漆、涂料	焊接材料
消耗量	38.4467	2.3540	9.8	2.7143	1.5	0.8	1.2

### 2.3.2 原材料制造输入输出清单

原材料加工过程所产生的污染物，主要根据《工业污染物产生和排放系数手册》<sup>[34]</sup>中的排放系数乘以材料消耗量计算而得，同时参阅了相关文献<sup>[35~40]</sup>的研究成果。本论文研究的 JPCY-100 型真空管太阳能热水器原材料制造过程清单如表 2-2 所示。

### 2.3.3 运输

在太阳能热水器整个生命周期过程中，运输主要包括三部分：原材料运到热水器加工厂，热水器的分配与销售和废弃热水器运到固体废弃物处理厂。由于固体废弃物的处理较为复杂，本论文中不考虑系统废弃处理阶段，所以运输主要考虑两部分：原材料的获得以及热水器的分配与销售。

运输能耗以及运输环境污染可以根据单位运输里程能耗、污染物排放系数、运输距离以及材料重量计算而得，运输的环境污染单项值计算公式如下：

表 2-2 JPCY-100 型真空管热水器原材料制造过程清单

清 单 项 目	原 材 料 名 称	钢	玻 璃	铜	聚 氨 酯 整 体 发 泡	塑 料
	能 耗 (MJ)	2178.006	45.50282			
环 境 排 放 物 (kg)	废 气 排 放					
	烟 尘	1.730102	0.004543	0.129752		
	C O	4.229137				
	C O <sub>2</sub>	315.2629	4.61384	325.4923	6.6147491	1.41
	S O <sub>2</sub>	1.960782	0.022128	3.797206	0.04587167	0.009
	N O <sub>x</sub>	0.615147	0.013229	1.4798	0.05591458	0.015
	碳 氢 化 合 物	0.073049				0.0315
	甲 烷	0.692348				
	H <sub>2</sub> S	0.003345				
	H C l	0.033602				
	氟 化 物		0.000132			
	排 入 水 体 的 污 染 物					
	悬 浮 物	4.634365				
	N H <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0.038062				
	S S		3.74E-05			0.00315
	C O D	0.010842	0.000188			0.0003
	B O D	0.000192	0.000113			0.00015
	酚	0.000192				
	N a <sup>+</sup>	0.01461				
	铜			0.013078		
	铅			0.001911		
	锌			0.008062		
	镉			0.000337		
	砷			0.003582		
	石 油 类		0.00001883			
	固 体 废 弃 物			3.214694		
	矿 渣	153.0179				
	工 业 混 合 固 废	33.44863	0.060027			0.048
	粉 尘、灰 尘	11.34178	0.37094			

$$\text{运输污染单项值} = \text{污染单项排放因子} \times \text{运输里程} \times \frac{\text{材料重量}}{\text{运输车辆载重量}} \quad (2-1)$$

查阅文献<sup>[41, 42]</sup>可知，城市机动车大货车（假设运输量为 10 吨）能耗及排放因子如表 2-3 所示。

通过调研得知，本论文研究的太阳能热水器原材料均从山东德州购买，通过公路运输，运输里程假设为 150 公里。另外，分配与销售阶段的运输距离假设为 20 公里。那么，运输阶段的清单统计如表 2-4 所示。

表 2-3 城市机动车综合能耗及排放因子 (kJ/km·辆)

清单项目	能耗 (kJ/t·km)	环境排放物 (g/km·辆)				
		NO <sub>x</sub>	CO	SO <sub>2</sub>	THC	PM <sub>10</sub>
数值	1836	4.27	25.75	0.33	6.02	4.67

表 2-4 JPCY-100 型太阳能热水器运输清单

运输过程 清 单 项 目	能耗 (MJ)	环境排放物 (g)				
		NO <sub>x</sub>	CO	SO <sub>2</sub>	THC	PM <sub>10</sub>
原材料的获得	15.647	3.639	21.95	0.28	5.13	3.98
分配与销售	2.086	0.485	2.925	0.0375	0.685	0.53

### 2.3.4 产品制造

生命周期评价的思想包括了从“摇篮”到“坟墓”的整个生命周期，因此各工艺阶段的输入和输出都是其它相关联工艺阶段输入和输出的累积<sup>[26]</sup>。在我国，太阳能热水器的半成品（包括真空管、热管、水箱内胆、板材等）生产已经形成了各自独立的生产线，所以，整个太阳能热水器的制造过程应该包括各半成品的加工制造以及最后的焊接组装、喷漆过程，产品制造过程的输入输出也应由这几个部分相加而得。本论文主要考虑产品制造、焊接以及喷漆三个过程。通过厂家调研以及相关文献<sup>[43~46]</sup>，太阳能热水器制造过程中主要污染物排放清单汇总如表 2-5 所示。

### 2.3.5 使用运行

太阳能热水器使用过程不消耗化石矿物能源，亦无污染。只是在阴雨天气水

表 2-5 JPCY-100 型真空管太阳能热水器制造过程污染物排放清单

过 程 名 称 清 单 项 目	环 境 排 放 物 (g)					
产品制造	CO <sub>2</sub>	37260	SO <sub>2</sub>	198	NO <sub>x</sub>	86.04
焊接	Fe	2.664	TiO <sub>2</sub>	0.1368	NO <sub>2</sub>	0.2025
	FeO	0.3555	MgO	0.1233	O <sub>3</sub>	0.0045
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.3579	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.0387	HF	0.045
	CaO	0.7371	PbO	0.0252	COCl <sub>2</sub> 光气	0.01125
	SiO <sub>2</sub>	0.5796	CuO	0.00396	氯乙烯 (CH <sub>2</sub> CHCl)	0.675
	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.2736	CO	1.2375		
	MnO	0.2178	CO <sub>2</sub>	202.5		
喷漆	异佛尔酮	400	甲苯	40	乙酸乙酯	40
	苯	20	二甲苯	40	其他	20

温较低的情况下需要使用电补偿加热，但耗电量相对较少。调研得知，天津机务段太阳能热水器系统集热面积为 500 平方米，全年耗电约为 9000 度。那么，每平方米集热面积每年耗电约为  $9000/500=18$  度。JPCY-100 型真空管太阳能热水器集热面积为  $1.8\text{m}^2$ ，所以，其年耗电量为  $18 \times 1.8 = 32.4$  度，即 116.64MJ，整个生命周期耗电量为  $116.64 \times 15 = 1749.6$  MJ。

## 2.4 管路系统清单分析

### 2.4.1 管路材料制造

天津机务段太阳能热水器管路系统主要有两种管线，包括：Φ100 管线 60 米，Φ50 管线 300 米。管线材料均为不锈钢。查文献<sup>[47]</sup>可知，Φ100 管线每米 10.85 公斤，Φ50 管线每米 4.83 公斤，计算可得管线总耗钢量为 2.1 吨。这样，根据管线总耗钢量以及钢材生命周期清单可以计算管路系统材料制造清单，计算结果如表 2-6 所示。

### 2.4.2 管路系统运输清单

表 2-6 管路系统材料制造清单

能耗 (MJ)	118965				
环境排放物 (kg)	废气排放		排入水体的污染物		固体废弃物
	烟尘	94.5	悬浮物	253.134	矿渣
	CO	231	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	2.079	工业混合固废
	CO <sub>2</sub>	17220	COD	0.5922	粉尘、灰尘
	SO <sub>2</sub>	107.1	BOD	0.0105	
	NO <sub>x</sub>	33.6	酚	0.0105	
	碳氢化合物	3.99	Na <sup>+</sup>	0.798	
	甲烷	37.8168			
	H <sub>2</sub> S	0.1827			
	HCl	1.8354			

同样，管路系统原材料运输清单也是根据单位运输里程能耗、污染物排放系数、运输距离以及材料重量由式 2-1 计算而得。假设运输距离为 20 公里。则管路系统原材料的运输清单计算结果如表 2-7 所示。

表 2-7 太阳能热水器管路系统运输清单

清单项目	能耗 (MJ)	环境排放物 (g)				
		NO <sub>x</sub>	CO	SO <sub>2</sub>	THC	PM <sub>10</sub>
数值	77.112	17.934	108.15	1.386	25.284	19.551

## 2.5 系统经济效益、技术性能参数清单

通过调研，将收集到的太阳能热水器系统经济效益、技术性能参数统计如表 2-8 所示。

表 2-8 太阳能热水器系统经济效益、技术性能参数

集热面积	500m <sup>2</sup>	日供应热水量	0~100L/人·天
投资	45 万元	热水温度	40~50℃
使用时间	全年使用	日供应洗浴人数	1000 人
效率	60%	运行能耗 (电耗)	9000 度/年
预计使用寿命	15 年		

## 第三章 燃煤锅炉系统清单分析

### 3.1 研究范围及系统边界确定

生命周期分析中清单数据的收集很繁琐，且有许多相关数据是跨行业甚至跨国的信息交流[48]。在本论文研究过程中，作者联系了多家供热站并取得了一些锅炉房的相关数据，但大部分数据并不完整，不足以进行生命周期分析。最后，在天津市化工设计院暖通设计室的热情帮助下，作者取得了天津市南开区四纬路延生里锅炉房的相关完整数据。所以本论文将对该锅炉房进行生命周期分析，将最终结果折合成一个功能单位与太阳能热水器系统进行比较分析。

图 3-1 为天津市南开区四纬路延生里锅炉房设备布置及流程图，由图可知，锅炉系统主要由三部分组成：锅炉房、锅炉本体以及锅炉主要的附属设备（包括运煤、除灰系统，送引风系统，水、汽系统和仪表控制系统）。整个锅炉系统除了锅炉房是砖混结构以外，其他大部分设备是由钢材制造的。本论文将对主体设备锅炉以及锅炉房的建设进行详细的生命周期分析，对其他辅助设备只计算其钢材的生产及运输清单。根据锅炉系统组成，将锅炉系统边界定义如图 3-2 所示。

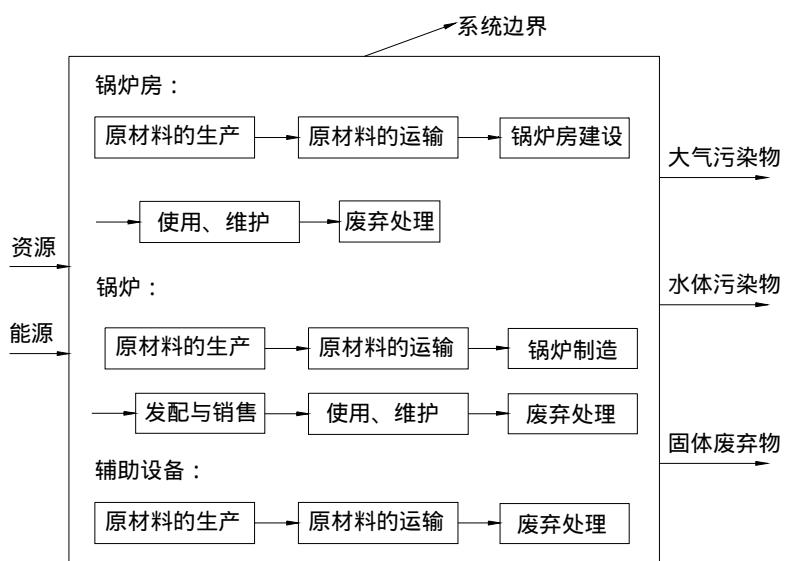


图 3-2 锅炉系统边界

### 3.2 单体清单分析

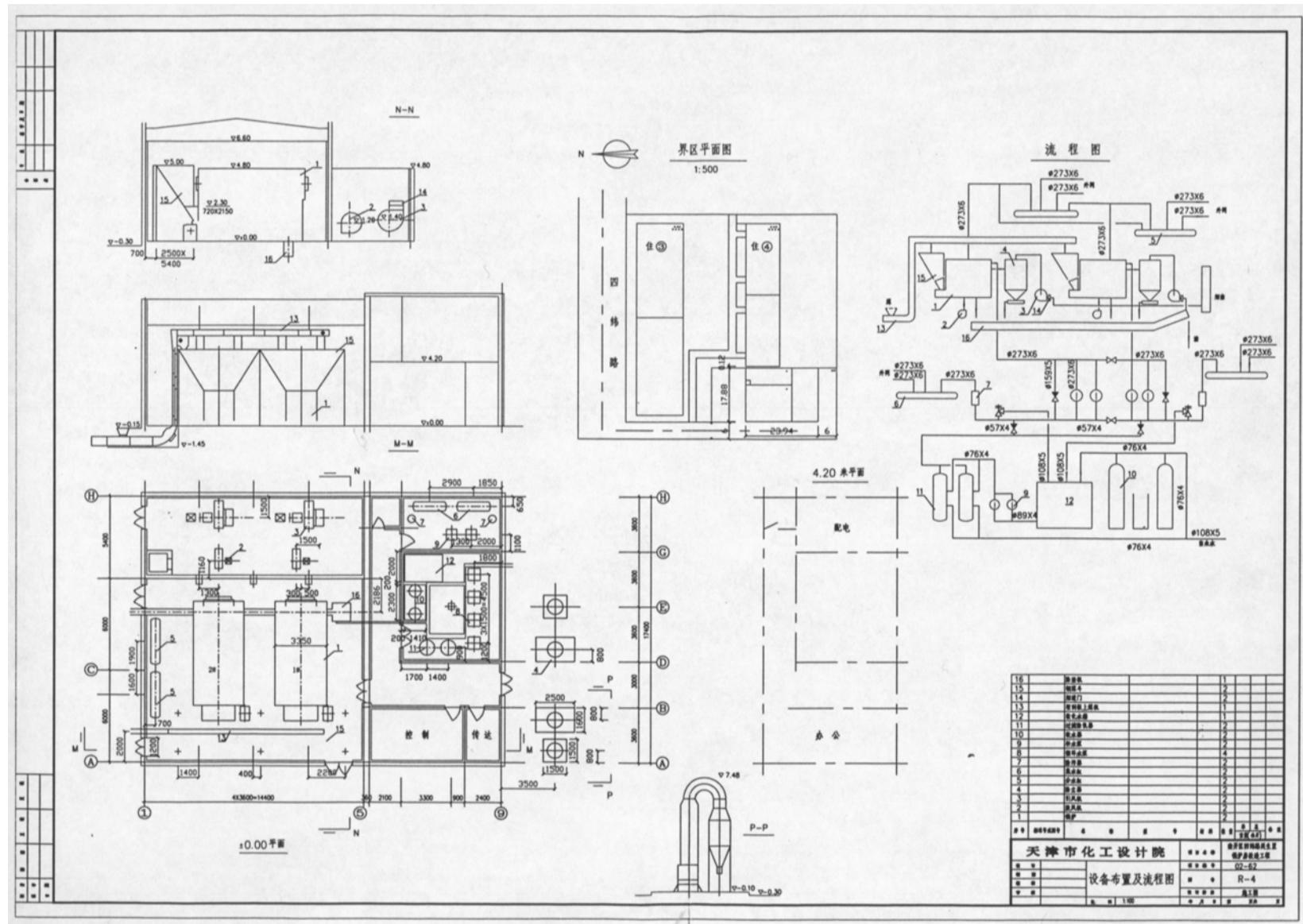


图 3-1 天津市南开区四纬路延生里锅炉房设备布置及流程图

天津市南开区四纬路延生里锅炉房所用的锅炉型号是 DZL7-1-95/70A II，燃料是煤。在对锅炉单体进行生命周期分析时，作者对天津市东方暖通设备股份合作公司进行了调研，取得了 DZL7-1-95/70A II 型锅炉的主要数据，具体分析如下。

### 3.2.1 材料生产

表 3-1 是 DZL7-1-95/70A II 型锅炉的主要材料消耗表，由表 3-1 可知，锅炉设备主要消耗两种材料：钢材和耐火材料。根据锅炉消耗材料的重量以及钢材<sup>[26]</sup>和耐火砖<sup>[49~51]</sup>的生命周期分析清单，可以计算锅炉材料生产阶段的清单。计算结果如表 3-2 所示。

表 3-1 DZL7-1-95/70A II 型锅炉主要材料消耗清单

材料	项目	重量(kg)
耐火材料	炉墙	57369
钢	炉排	17000
	平台扶梯	709
	风道	210
	锅炉基础	312.5
	钢架	2100
	管路阀门仪表	927.1
	后烟箱	88.3
	前烟箱	216.2
	锅筒装置	9873.3
	水管系统	3002
合计	耐火材料： 57369kg； 钢材： 34438kg	

表 3-2 锅炉材料生产清单

钢的生产						
能耗 (MJ)	1950913					
环境 排放物 (kg)	废气排放		排入水体的污染物		固体废弃物	
	烟尘	1549.710	悬浮物	4151.157	矿渣	137063.240
	CO	3788.180	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	34.09362	工业混合固废	29961.060

续表 3-2

钢的生产						
环境 排放物 (kg)	废气排放		排入水体的污染物		固体废弃物	
	CO <sub>2</sub>	282391.6	COD	9.711516	粉尘、灰尘	10159.210
	SO <sub>2</sub>	1756.338	BOD	0.17219		
	NO <sub>x</sub>	551.008	酚	0.17219		
	碳氢化合物	65.4322	Na <sup>+</sup>	13.08644		
	甲烷	620.1595				
	H <sub>2</sub> S	2.996106				
	HCl	30.09881				
耐火材料的生产						
能耗 (MJ)	70908.084					
环境 排放物 (kg)	烟尘	86.0535	F	7.400601	沥青烟尘	$1.4342 \times 10^{-5}$
	SO <sub>2</sub>	345.36138	HCl	8.60535		
	NO <sub>2</sub>	143.99619	苯并芘	$2.3521 \times 10^{-5}$		

### 3.2.2 材料运输

材料运输计算方法同太阳能热水器系统，计算结果如表 3-3 所示。

表 3-3 锅炉材料运输清单

清单项目	能耗 (MJ)	环境排放物 (g)				
		NO <sub>x</sub>	CO	SO <sub>2</sub>	THC	PM <sub>10</sub>
数值	3371.2	784.03	4728.06	60.59	1105.36	857.48

### 3.2.3 锅炉制造

在锅炉制造厂里，原材料进厂后首先通过切割机切割或者由剪板机剪切进行下料，然后卷制、折弯、冲压成型，最后进行焊接。组装完毕后要对锅炉进行探伤实验，以检查锅炉有无裂缝、缺陷等。检查通过的产品要进行水压试验以检验其是否符合规定的技术要求。最后，在锅炉出厂前要进行除锈，刷油漆，包装打包等程序。

在整个锅炉制造过程中，消耗的能源主要是电，据估计，锅炉制造过程中每加工一吨钢材大概需要耗电 170 度，再加上照明等其他用电大概每吨钢材耗电

200 度。这样，锅炉制造过程中的耗电量=200×锅炉耗钢量=200×34.438=6887.6 度=6887.9kWh=2.49644×10<sup>4</sup>MJ。

在锅炉制造过程中还需要消耗的其他主要材料有：

(1) 焊条：按每吨钢消耗焊条 25 公斤计算，总共消耗焊条量=0.025×34.438=0.86 吨；

(2) 油漆：一台锅炉消耗油漆大约为 40~50 公斤，本论文按 45 公斤计算；

(3) 水：主要是水压试验耗水，一台型号为 DZL7-1-95/70A II 的锅炉进行水压试验大约需要耗水 20 吨，考虑到水的循环使用性，按 80% 循环率计算，则每台锅炉耗水 16 吨。

锅炉制造过程中的环境污染主要是焊接污染和油漆污染。根据焊条、油漆的污染排放系数<sup>[43~46]</sup>以及所消耗的焊条量、油漆量，可以计算锅炉制造过程的污染清单，计算结果如表 3-4 所示。

表 3-4 锅炉制造过程的污染清单

过 程 名 称 清 单 项 目	环境排放物 (g)					
焊接	Fe	1909.2	TiO <sub>2</sub>	98.04	NO <sub>2</sub>	145.125
	FeO	254.775	MgO	88.365	O <sub>3</sub>	3.225
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2406.495	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27.735	HF	32.25
	CaO	528.255	PbO	18.06	COCl <sub>2</sub> 光气	8.0625
	SiO <sub>2</sub>	415.38	CuO	2.838	氯乙烯 (CH <sub>2</sub> CHCl)	483.75
	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	196.08	CO	886.875		
	MnO	156.09	CO <sub>2</sub>	145125		
喷漆	异佛尔酮	22.5	甲苯	1.125	乙酸乙酯	2.25
	苯	1.125	二甲苯	4.5	其他	1.125

### 3.2.4 锅炉运输

锅炉运输计算方法同太阳能热水器系统，计算结果如表 3-5 所示。

表 3-5 锅炉运输清单

清单项目	能耗 (MJ)	环境排放物 (g)				
		NO <sub>x</sub>	CO	SO <sub>2</sub>	THC	PM <sub>10</sub>
数值	1297.8	301.83	1820.16	23.33	425.53	330.10

### 3.2.5 使用运行

锅炉使用过程中消耗的能源主要为煤和电。根据锅炉的额定功率以及整个生命周期过程中的供热时间、传热效率可以计算锅炉整个生命周期过程中所供应的总热量，计算式如下：

$$\text{锅炉整个生命周期过程中供应的总热量} = \text{额定功率} \times \text{供热时间} \times \text{传热效率} \quad (3-1)$$

据规定，天津市供热时间为每年 11 月 15 日开始至次年 3 月 15 日结束，平均共计 122 天。另外，锅炉寿命一般为 20~30 年，本论文假设为 20 年。锅炉的传热效率大约为 95%。这样，锅炉整个生命周期过程中所供应的总热量计算过程如下：

$$\begin{aligned} \text{锅炉整个生命周期过程中供应的总热量} &= \text{额定功率} \times \text{供热时间} \times \text{传热效率} \\ &= 7 \times 10^6 \times 3600 \times 24 \times 122 \times 20 \times 95\% \\ &= 1.402 \times 10^9 \text{ MJ} \\ &= 3.894 \times 10^8 \text{ kWh} \end{aligned}$$

由锅炉的供热量以及煤的热值（5500 大卡/千克）、燃烧效率可以反算锅炉的耗煤量，计算式如下：

$$\text{锅炉整个生命周期过程中的耗煤量} = \frac{\text{锅炉整个生命周期过程中供应的总热量}}{\text{煤的热值} \times \text{煤的燃烧效率}} \quad (3-2)$$

这样，

$$\begin{aligned} \text{锅炉整个生命周期过程中的耗煤量} &= \frac{\text{锅炉整个生命周期过程中供应的总热量}}{\text{煤的热值} \times \text{煤的燃烧效率}} \\ &= \frac{1.402 \times 10^{15}}{5500 \times 4200 \times 76\%} \\ &= 7.9859 \times 10^7 \text{ kg} \\ &= 79859 \text{ t} \end{aligned}$$

另外，根据调研数据可知，该锅炉房供热每年耗电 50 万度，那么，20 年耗电总共为 1000 万度(注：这里指的是锅炉房两台锅炉的总耗电量)。经计算后得每台锅炉整个生命周期过程中耗电  $1.8 \times 10^7 \text{ MJ}$ 。

在锅炉运行过程中，导致环境污染的主要工序是煤的燃烧，燃烧 1 公斤煤的清单<sup>[34]</sup>如表 3-6 所示。根据表 3-6 的数据以及耗煤量可以计算锅炉运行过程中的污染清单，结果如表 3-7 所示。

表 3-6 燃烧 1kg 煤所排放的污染物清单

污染物项目	$\text{CO}_2$	$\text{SO}_2$	$\text{NO}_x$	烟尘	废渣
数值 (g/kg 煤)	2000	23.80	5.58	136.37	30

表 3-7 锅炉运行过程中排放的污染物清单

污染物项目	$\text{CO}_2$	$\text{SO}_2$	$\text{NO}_x$	烟尘	废渣
数值 (kg)	$1.5972 \times 10^8$	$1.9006 \times 10^6$	$4.4561 \times 10^5$	$1.0890 \times 10^7$	$2.3958 \times 10^6$

### 3.3 锅炉房清单分析

#### 3.3.1 建材生产

南开区四纬路延生里锅炉房为砖混结构，建筑面积 408.204 平方米。查文献《建筑工程概预算管理简明手册》<sup>[52]</sup>中民用、工业建筑工程平均综合参考指标可知，框架及砖混结构的锅炉房每平米主要消耗材料指标包括：水泥 209 公斤；木材  $0.043 \text{ m}^3$ ；钢材 43 公斤；红砖 160 块；砂子  $0.35 \text{ m}^3$ ；毛石  $0.15 \text{ m}^3$ ；石子  $0.26 \text{ m}^3$ ；石灰 7kg 等等。这样，根据锅炉房建筑面积可以计算建设锅炉房所消耗的主要建材数量，结果如表 3-8 所示（注：一些建材以单位  $\text{m}^3$  表示，为了便于计算，根据其堆积密度<sup>[53]</sup>将其转化为以单位 kg 表示）。

表 3-8 建设锅炉房所消耗的建材数量清单

水泥	木材	钢材	红砖	砂子	毛石	石子	石灰
85314.636kg	$17.5528 \text{ m}^3$	17552.77kg	65312.64 块	$142.87 \text{ m}^3$	$61.23 \text{ m}^3$	$106.13 \text{ m}^3$	2857.43kg
	12287kg		173078.5kg	214305kg	384928kg		

在清单数据统计过程中,由于水泥的生命周期清单分析过程中功能单位是以1立方米标准混凝土所用水泥的质量表示的,所以需要将水泥用量转化为标准混凝土用量。1立方米标准混凝土的配比为270kg水泥,60kg飞灰,1850kg集料。由建设锅炉房水泥耗量可以计算出混凝土的消耗量为315.98kg,这样,根据查得的混凝土LCA清单<sup>[18]</sup>就可以计算整个锅炉房建设过程中水泥的LCA清单了。红砖生产过程的污染清单可以参考文献<sup>[49, 50]</sup>。这样,整个锅炉房建设过程中建材生产清单计算结果如表3-9所示。

表3-9 锅炉房建设过程中建材生产清单

清单项目 建 材 名 称	钢	水泥	砖
能耗 (MJ)	994364.4	949687.6	$2.12 \times 10^5$
环境排放物 (kg)	废气排放		97.969
	烟尘	789.8747	
	CO	1930.805	10.42734
	CO <sub>2</sub>	$1.44 \times 10^5$	98585.76
	SO <sub>2</sub>	895.1913	56.8764
	NO <sub>x</sub>	280.8443	262.2634
	碳氢化合物	33.35026	7.26754
	甲烷	316.0903	
	H <sub>2</sub> S	1.527091	
	HCl	15.34112	9.797
	F		8.425
	排入水体的污染物		
	悬浮物	2115.811	
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	17.37724	
	COD	4.949881	
	BOD	0.087764	
	酚	0.087764	
	Na <sup>+</sup>	6.670053	
	矿渣	69860.025	
	工业混合固废	15270.910	5624.444
	粉尘、灰尘	5178.067	

另外，其他建筑材料生产能耗可以参考文献<sup>[42, 54]</sup>。计算结果如下：木材；  
 $31.6\text{MJ}$ ；砂： $2.14 \times 103\text{MJ}$ ；碎石： $7.80 \times 103\text{MJ}$ 。

### 3.3.2 建材运输

建材运输能耗可根据建材消耗量、运输里程及运输单耗进行计算。建材运输污染可以根据式 2-1 进行计算，其中建材总重量为 890.323 吨，运输里程平均取 20 公里。计算结果如表 3-10 所示。

表 3-10 锅炉建设建材运输清单

清单项目	能耗 (MJ)	环境排放物 (g)				
		NO <sub>x</sub>	CO	SO <sub>2</sub>	THC	PM <sub>10</sub>
数值	$3.27 \times 10^3$	7603.36	45851.63	587.61	10719.49	8315.62

### 3.3.3 建筑施工

#### 3.3.3.1 施工能耗

施工能耗可根据施工面积以及单位面积的施工能耗进行计算，单位面积的施工能耗见表 3-11<sup>[42]</sup>。

表 3-11 锅炉房建设单位面积施工能耗

序号	项目	单位能耗	序号	项目	单位能耗
1	场地清扫	10000	8	人员运输	459930
2	材料堆放	5220	9	材料运输	198740
3	起重机运行	39750	10	卫生与采暖	4540
4	场地布置	52240	11	铺设屋面	1140
5	基础开挖	27260	12	绿化	2270
6	土方挖填	17030	13	临时供电	22650
7	空气压缩机	2270	14	临时供热	484960
合计 $1328000 (\text{kJ/m}^2)$					

这样，总的施工能耗 =  $1328000 \times 408.204 = 5.421 \times 10^5 \text{ MJ}$

### 3.3.3.2 施工污染<sup>[55]</sup>

施工现场中的废渣主要来源于拆除废弃物、基槽回填后的渣土以及施工过程中大量产生的建筑垃圾等。其数量比较多，按建筑面积测算，一般在  $8\sim 12\text{t}/\text{km}^2$  左右。

施工过程中的废水来源于机械的冲刷、楼地及墙面的冲刷、构件与建筑材料的保潮、墙体的浸润、材料的拌制与洗刷以及职工的生活污水。按建筑面积测算  $150\sim 180 \text{ t}/\text{km}^2$ 。另外，桩基础施工中排出的泥浆、施工降水中抽出的地下水、现制水磨石产生的水泥浆等，也是现场废水的来源。

施工过程中的废气污染主要是粉尘污染，总污染量按各建材的污染排放系数计算，其中，水泥、砂子、砖的产粉尘系数分别为其用量的 1.5%，0.5% 以及 5g/块<sup>[46]</sup>，计算后得：水泥、砂子、砖分别产生粉尘 1280kg，1072kg，326.5632kg。

### 3.3.3.3 拆除<sup>[42]</sup>

拆除阶段的能耗主要与进行拆除作业的机械设备有关，主要包括：1、拆除作业能耗；2、覆土、填充材料运输能耗两部分。根据有关文献，拆除能耗按建设能耗的 90% 计算；覆土、填充材料运输能耗则按照施工面积、覆土填充平均深度（1.5 米）、覆土填充材料平均比重（2.0）和平均运输里程（2.0 公里）进行计算。另外，覆土、填充材料运输污染计算方法同其他运输污染，材料总重 1225t。计算结果见表 3-12。

表 3-12 锅炉房拆除阶段运输污染清单

清单项目	能耗 (MJ)	环境排放物 (g)				
		NO <sub>x</sub>	CO	SO <sub>2</sub>	THC	PM <sub>10</sub>
数值	449.82	1046.15	6308.75	80.85	1474.9	1144.15

## 3.4 辅助设备清单分析

### 3.4.1 材料生产

根据调研，锅炉房主要辅助设备及其耗钢量如表 3-13 所示。表中所列的数据为耗钢量相对较大的设备，而其他设备耗钢量没有统计数据，所以，总耗钢量按表中所列耗钢量的 1.1 倍计算。

另外，锅炉房管道系统耗钢量可以根据锅炉房设计材料规格表以及各种管材的单位重量<sup>[56]</sup>统计而得，计算过程见表 3-14。这样，锅炉房辅助设备总耗钢量 = 锅炉房辅助设备耗钢量+锅炉房管道系统耗钢量 = 25688.3+36260.29 = 61948.59kg。根据总耗钢量计算而得的材料生产清单如表 3-15 所示。

表 3-13 锅炉房主要辅助设备及其耗钢量

序号	设备名称	重量 (kg)	序号	设备名称	重量 (kg)
1	鼓风机		11	软化水箱	900
2	引风机		12	埋刮板上煤机	
3	除尘器		13	烟道门	
4	分水缸		14	钢煤斗	4513×2
5	集水缸		15	除渣机	
6	除污器		16	减震消声装置	
7	循环水泵		17	磁铁分离器	
8	补水泵 (变频)		18	钢烟囱	7277
9	组合式软水器	3500	19	装载机	2650
10	过滤式除氧器				
合计 $23353 \times 1.1 = 25688.3\text{kg}$					

表 3-14 锅炉房管道系统耗钢量计算表

序号	名称	型号及规格	单位	数量	单重	总重 kg
1	钢管	Φ 273×6	米	260	42.72kg/m	11107.2
	钢管	Φ 159×5	米	8	18.99kg/m	151.92
	钢管	Φ 108×5	米	50	12.70kg/m	635
	钢管	Φ 89×4	米	5	8.38kg/m	41.9
	钢管	Φ 76×4	米	69	7.10kg/m	489.9
	钢管	Φ 57×4	米	12	5.23kg/m	62.76
2	弯头 (90 R=3.5D)	Φ 273×6	个	6	40	240
	弯头 (90 R=1.5D)	Φ 273×6	个	36	27.5	990
	弯头 (90 R=1.5D)	Φ 159×5	个	2	6.06	12.12
	弯头 (90 R=1.5D)	Φ 108×5	个	9	2.99	26.91
	弯头 (90 R=1.5D)	Φ 89×4	个	2	1.39	2.78
	弯头 (90 R=1.5D)	Φ 76×4	个	4	1.03	4.12

	弯头 (90 R=1.5D)	Φ 57×4	个	10	0.54	5.4
	大小头	DN250/150	个	8	8.5	68
	大小头	DN80/50	个	4	4	16
	法兰 HG20593-97	PN1.6MPa DN50	个	2	2.8+2.42	10.44
	法兰 HG20593-97	PN1.6MPa DN25	个	8	1.25+1.1	18.8
	法兰 HG5-226-2W	PN1.6MPa DN20	个	2	0.564+0.506	2.14
	蝶阀法兰 GB2555-81	PN1.6MPa DN250	个	32	15.7	502.4
	蝶阀法兰 GB2555-81	PN1.6MPa DN100	个	2	4.8	9.6
	蝶阀法兰 GB2555-81	PN1.6MPa DN80	个	6	3.71	22.26
	蝶阀法兰 GB2555-81	PN1.6MPa DN40	个	2	2	4
	蝶阀法兰 GB2555-81	PN1.6MPa DN25	个	8	1.5	12
	法兰盖 HG20601-97	PN1.6MPa DN250	个	4	12	48
	法兰盖 HG20601-97	PN1.6MPa DN100	个	1	4.1	4.1
	法兰盖 HG20601-97	PN1.6MPa DN80	个	2	2.9	5.8
	法兰盖 HG20601-97	PN1.6MPa DN65	个	8	2.5	20
3	蝶阀	D371X-1.6-250	个	24	37.6	902.4
	蝶阀	D371X-1.6-80	个	6	26.1	156.6
	蝶阀	D371X-1.6-65	个	1	25.4	25.4
	蝶式止回阀	HH49X-1.6-250	个	6	150	900
	蝶式止回阀	HH49X-1.6-100	个	2	36	72
	蝶式止回阀	HH49X-1.6-80	个	2	27.5	55
	止回阀	H44T-1.6 DN50	个	2	13.5	27
	安全阀	A47H-1.6C DN250	个	2	200	400
4	钢板	$\delta = 5$ Q235A	kg	16647		16647
	钢板	$\delta = 4$ Q235A	kg	1160		1160
	槽钢	[ 10 Q235A	kg	518		518
	角钢	$\angle 70 \times 6$ Q235A	kg	62		62
	角钢	$\angle 63 \times 6$ Q235A	kg	84		84
	角钢	$\angle 50 \times 4$ Q235A	kg	116		116
	扁钢	-60×8 Q235A	kg	24		24

	扁钢	-60×6	Q235A	kg	525		525
	扁钢	-50×8	Q235A	kg	20		20
	螺栓 GB5782-86	M16×50	Q235A	个	150	106.3g	15.95
	螺栓 GB5782-86	M12×40	Q235A	个	450	49.29g	22.18
	螺母 GB6170-86	M16	Q235A	个	150	34.12g	5.12
	螺母 GB6170-86	M12	Q235A	个	450	16.32g	7.34
5	圆钢 Φ4		Q235A	米	7	0.25kg/m	1.75
总计: 36260.3kg							

表 3-15 锅炉主要辅助设备材料生产清单

能耗 (MJ)	3509388					
环境排放物(kg)	废气排放		排入水体的污染物		固体废弃物	
	烟尘	2787.687	悬浮物	7467.283	矿渣	2.47E+05
	CO	6814.345	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	61.3291	工业混合固废	53895.273
	CO <sub>2</sub>	5.08E+05	COD	17.4695	粉尘、灰尘	18274.834
	SO <sub>2</sub>	3159.378	BOD	0.309743		
	NO <sub>x</sub>	991.177.4	酚	0.309743		
	碳氢化合物	117.7023	Na <sup>+</sup>	23.54046		
	甲烷	1115.570				
	H <sub>2</sub> S	5.389527				
	HCl	54.14307				

### 3.4.2 材料运输

锅炉房辅助设备材料运输能耗可根据材料消耗量, 运输里程以及运输单耗进行计算。运输污染按式 2-1 进行计算, 其中运输里程平均取 20 公里。这样, 运输过程的清单见表 3-16。

表 3-16 锅炉系统辅助材料运输清单

清单项目	能耗 (MJ)	环境排放物 (g)				
		NO <sub>x</sub>	CO	SO <sub>2</sub>	THC	PM <sub>10</sub>
数值	2274.8	529.04	3190.37	40.89	745.87	578.6

### 3.5 系统经济效益、技术性能参数清单

通过调研，将收集到的锅炉系统经济效益、技术性能参数统计如表 3-17 所示。

表 3-17 燃煤锅炉系统经济效益、技术性能参数

锅炉房总投资	530 万	运行能耗	50 万度电/年
锅炉单体投资	200 万	人力投入	16 人
使用时间	全年使用	设备维护费用	2 万元/年
煤燃烧效率	76%		

## 第四章 影响评价

影响评价是生命周期评价的核心部分，是对清单分析阶段所识别的环境影响压力进行定性或定量的评价，即确定产品系统的物质、能量交换对外部环境的影响。根据清单分析所获得的数据，我们可以进一步对太阳能热水器系统和燃煤锅炉系统进行影响评价。首先要对该系统的输入输出进行分类，然后根据分类结果利用污染负荷指标体系进行特征化处理。最后是量化阶段，量化可以采用不同的量化方法，如线性规划法，层次分析法等等。

### 4.1 分类

本论文在分析环境影响指标时采用了美国环保局最新研发成功的 TRACI (Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other Environmental Impacts) 模型，该模型将影响因子分为 12 类：臭氧破坏，全球变暖，酸化，富营养化，光化学氧化烟雾的形成，生态毒性，致癌物，非致癌物，标准大气污染物，土地的使用，化石燃料的使用以及水的使用<sup>[57]</sup>。分别介绍如下：

#### 4.1.1 臭氧破坏

臭氧破坏是指由于臭氧消耗物质的排放而导致平流层内保护性臭氧的减少。这些消耗臭氧的物质使平流层臭氧厚度变薄或者导致某些位置形成臭氧空洞，从而使到达地面的紫外线辐射量增加，进而对人类健康及其他环境因素产生影响。

这些影响包括皮肤癌、白内障的形成，农作物减产，水生生物破坏等。

TRACI 方法中，臭氧破坏的计量方法是以 CFC-11 的臭氧破坏势为基准，将其他具体物质对臭氧破坏的潜力与 CFC-11 的臭氧破坏势进行比较，从而得出该物质的臭氧破坏势。这样，臭氧破坏指标可以通过下式计算：

$$\text{臭氧破坏指标} = \sum_i e_i \times ODP_i \quad (4-1)$$

式中  $e_i$ —物质 i 的排放量(kg)；

$ODP_i$ —是物质 i 的臭氧破坏势。

#### 4.1.2 全球变暖

近年来，随着全球人口的增长和人类活动的加剧，人类向大气中排放的温室气体越来越多，使大气中温室气体的含量成倍增加。这些温室气体能够吸收地面反射的太阳辐射能，从而破坏地球辐射平衡，导致全球气温的升高。TRACI 应用了国际气候改变专家组（IPCC）提出的全球气候变暖势来计算全球变暖指标。在这个方法中，CO<sub>2</sub>的全球变暖势被定义为 1，其它气体的温室效应都与 CO<sub>2</sub>进行比较，从而得出其相对应的全球变暖势。全球变暖指标计算如下：

$$\text{全球变暖指标} = \sum_i e_i \times GWP_i \quad (4-2)$$

式中  $e_i$ —物质 i 的排放量(kg)；

$GWP_i$ —物质 i 的全球变暖势。

#### 4.1.3 酸化

酸化是指由于酸性气体的排放造成地球表面酸性物质沉积，从而对地表建筑、土壤、水生生物等产生影响。这种沉积包括三种方式：(1) 湿式沉积：酸性气体通过雨、雪、雹等形式沉积到地面；(2) 干式沉积：酸性气体通过颗粒直接沉积在植物叶子表面或土壤和水体中；(3) 云水沉积：酸性气体以云水、雾滴的形式降落在地表。酸化势可以以摩尔 H<sup>+</sup>沉积当量来表示，X+…→ H<sup>+</sup>。

#### 4.1.4 富营养化

富营养化是指地表水体中由于氮、磷等植物必须的矿物元素过多，使得藻类等水生植物过度繁殖而使水质恶化的现象。富营养化对生态环境的破坏包括：影响水生生物的生存，破坏生态平衡，破坏水生生物多样性；破坏水质，造成环境污染，对人体健康造成影响。

在 TRACI 中，各种化学物质的富营养化势都是通过以下方法来计量的，即：将每 kg 的化学物质对水体造成的富营养化效果与 1kg 氮直接排入水体的富营养化效果进行比较，相应得出各种物质对应的富营养化势。

#### 4.1.5 光化学氧化物的形成

光化学氧化物是指挥发性有机化合物 (VOC)、氮氧化物(NO<sub>x</sub>)等一次污染物在空气中经太阳光（紫外光）照射后，各种污染物之间发生相应反应所生成的臭

氧、醛类、过氧乙酰硝酸酯等二次污染物，以臭氧为代表。光化学烟雾的形成会导致人类呼吸困难并破坏生态环境。

TRACI 中，各类挥发性有机化合物 (VOC) 促进光化学烟雾形成的潜力均以 NO<sub>x</sub> 为基准，并且假设 NO<sub>x</sub> 浓度的改变与 O<sub>3</sub> 浓度的改变呈线性关系。

#### 4.1.6 标准大气污染物

空气中颗粒物的存在与人类呼吸道疾病有着直接的联系。在 TRACI 中，颗粒物被分为三种：粒径小于 10 μm 的颗粒 (PM<sub>10</sub>)，粒径小于 2.5 μm 的颗粒 (PM<sub>2.5</sub>) 以及由于二氧化硫和氮氧化物气体的排放导致的二次硫酸盐和硝酸盐颗粒。

标准大气污染物这一影响因子的计算分三步：

- (1) 污染物排放造成空气中 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, 以及二次硫酸盐和硝酸盐颗粒浓度的变化；
- (2) 空气中颗粒物浓度的变化而导致的发病率与死亡率的变化；
- (3) 将发病率与死亡率的变化转化为可以测量的定量因子 DALYs (Disability-adjusted Life Years)。DALYs 可以通过式(4-3)计算。

$$DALYs = N \times D \times S \quad (4-3)$$

式中 N—空气中颗粒物引起的某种疾病的发病人次；

D—该疾病的平均持续时间；

S—该疾病对人体健康造成的影响权重。

#### 4.1.7 致癌作用和非致癌作用

环境中的污染物通过大气、水体、土壤等介质对人体健康产生影响。TRACI 模型中，这些影响被分为致癌作用和非致癌作用两类，分三步计算影响因子。首先，利用多介质命运模型 (Multimedia Fate Model) 来计算污染物排放导致的大气、水体、土壤中该污染物浓度的改变。然后，通过多渠道暴露模型 (Multipathway Exposure Model)，使用暴露因子 (Exposure Factors) 来计算单位污染物对人体健康造成的影响。这里使用了 HTPs (Human Toxicity Potentials) 这个指标来计算各种污染物对人体健康造成的毒理作用。最后，在获得各种污染物的 HTPs 指标

后，以苯和甲苯为基准对比计算各种污染物的致癌作用和非致癌作用毒理学当量。

#### 4.1.8 生态毒性

与人类健康影响指标 HTPs 类似，生态毒性影响指标以 ETP (Ecological Toxicity Potential)为计量单位，分水生生态毒性和陆生生态毒性两种，以 2,4 二氯苯氧基乙酸为参照基准。

#### 4.1.9 土地的使用

TRACI 模型中，某一块特定土地的环境重要性以该土地内濒危物种的密度来表示，并且假设濒危物种越多，该土地的环境重要性越高。另外，对土地的使用还需要考虑其使用程度的不同。如果某一块土地的使用只是在很小程度上发生了改变（例如从一种农业使用方式改为另一种农业使用方式），那么这块土地的使用不应计算在内。但如果该土地的使用发生了相当大的改变（例如从一片森林或绿地改建为一个购物中心），那么，这块土地的使用必须计算在内。土地使用程度可以根据以下四个方面来评估：(1) 改变前后使用性质的比较；(2) 土地使用的范围；(3) 土地占用时间；(4) 土地复原时间。目前，对土地使用程度的评估还停留在定性阶段，还有待深入研究。土地使用指标可以通过式 (4-4) 计算：

$$\text{土地使用指标} = \sum_i A_i \times (T & E_i) / CA_i \quad (4-4)$$

式中  $A_i$ —被分析产品每功能单位的人类活动面积；

$T & E_i$ —人类活动所在区域内濒危物种的数量；

$CA_i$ —人类活动所在区域的面积。

#### 4.1.10 化石燃料的使用

分析化石燃料使用这个影响因子的方法很多，TRACI 采用了“Eco-Indicator 99”中所采用的方法。该方法考虑了开采化石燃料的倾向性问题，即：人类开采化石燃料时，总是先开采最经济、耗费最少且可再生的那部分储存量，即先开采常规能源，如石油、天然气，然后开采非常规能源，如石油页岩。所以，随着化

石燃料的连续开采，获得单位化石燃料所耗费的能源也在逐渐增加。开采每单位化石燃料所耗费能源的增加量可以用来估算消耗每单位化石燃料能源输入代价的增加。这一指标的建立为不同种类化石燃料的消耗提供了评价依据。

$$\text{化石燃料指标} = \sum_i N_i \times F_i \quad (4-5)$$

式中  $N_i$ —消耗单位化石燃料所需的能源输入量的增加值（煤、石油、天然气的  $N$  值分别为 0.00859MJ, 0.144MJ 和 0.15MJ）；  
 $F_i$ —被分析产品每功能单位消耗的化石燃料  $i$  的量。

#### 4.1.11 水的使用

由于水的使用在生命周期影响评价中是一个相对较新的影响因子，国际上还没有较为统一的方法，所以，TRACI 模型中这个影响因子的评价方法还在研究中。

由于所采集的数据的局限性，本论文中所收集的能耗数据没有按煤、石油、天然气分别统计，而只是将生命周期过程中所消耗的所有能源量进行统计，即全能耗。但考虑到量化过程中各影响因子必须保持一致，所以本论文中根据我国常规能源构成情况，将 4.1.10 中的  $N_i$  值进行加权平均得出我国化石燃料的  $N$  平均值为 0.047MJ。

在对比分析太阳能热水器系统和锅炉系统的综合效益时，除了应考虑其环境影响以外，其技术、经济指标也必须予以考虑。本论文在专家咨询的基础上，综合考虑各种情况，将对比分析太阳能热水器系统和燃煤锅炉系统的综合效益时采用的经济、技术指标统计归纳如表 4-1 所示。

表 4-1 太阳能热水器系统和燃煤锅炉系统对比分析经济、技术指标

项目	分类
经济效益指标	单位产品投资额
	单位产品经营成本
	单位产品总成本
技术性能指标	技术适用范围
	单位产品运行能耗
	运行稳定性
	技术发展前景

其中，总成本费用包括：外购材料，外购燃料，外购动力，工资及福利费，折旧费，摊销费，利息支出，修理费及其他费用。经营成本=总成本费用—折旧与摊销费—利息支出<sup>[58]</sup>。

## 4.2 特征化

在对环境影响进行分类之后，将相同影响因子下的不同物质对该类影响因子的潜在影响值进行汇总，以期得到每一种影响因子的综合影响指标值。该指标是一个量化数值，表示一组排放物质对特定的环境影响因子（如全球变暖等）起到某种影响作用的潜在程度，它既反映出排放物的重量，也包含了每种物质对环境可能造成的潜在影响程度。

对每一种环境影响因子的影响指标值（EB），可以从下式计算得到：

$$EB = (W_a \times PF_a) + (W_b \times PF_b) + (W_c \times PF_c) + \dots \quad (4-6)$$

式中 a、b、c...—排放物中所含的各种化学物质；

W—各种物质的重量；

PF—各种物质对某类环境影响因子的指标值。

TRACI 模型是一个面向用户的模型，该模型中各类影响因子都有一个较为完善的数据库，用户只需将清单分析阶段的数据值输入该模型，则以上计算会由计算机自动完成。

然而，由于 TRACI 模型设计时是以产品（如一台太阳能热水器、一台锅炉等）为单位的，所以，其数据输出结果也是基于产品的基础上，如一台太阳能热水器、一台锅炉，一个锅炉房等。而本论文中分析的是两个不同的系统，每个系统包括了多个产品。为了将单个产品的数据转化为可比的一个功能单位的数据，必须考虑每个产品的寿命，这里假设锅炉的寿命为 20 年，而锅炉房的寿命设为 30 年，锅炉房辅助设备的寿命和锅炉一致，为 20 年，另外，太阳能热水器及其管道系统的寿命均设为 15 年。在汇总数据时，将太阳能热水器系统和锅炉系统所有产品的清单数据折算成系统的寿命加和汇总，并且将汇总后的整个生命周期的数据除以其生命周期过程中所供应的总热量，折合为一个功能单位的具有可比性的数据。

其中，太阳能热水器系统整个生命周期过程所吸收的总热量可以通过下式计

算：

$$Q = H \bullet A \bullet L \bullet \eta \quad (4-7)$$

式中 Q—太阳能热水器系统整个生命周期过程吸收的总热量，kJ；

H—某地区年太阳能热辐射总量，kJ/m<sup>2</sup> • a；

A—太阳能热水器系统集热面积，m<sup>2</sup>；

L—太阳能热水器寿命，a；

η—太阳能热水器集热效率，%。

JPCY-100 型真空管太阳能热水器的使用寿命为 15 年，其集热面积是 1.8m<sup>2</sup>，集热效率为 60%。天津地区年太阳能热辐射总量为 5285116kJ/m<sup>2</sup> • a<sup>[31]</sup>，天津机务段太阳能热水器系统集热面积 500 m<sup>2</sup>。这样，太阳能热水器系统整个生命周期过程中，它所吸收的能量总共为：

$$\begin{aligned} Q &= H \bullet A \bullet L \bullet \eta \\ &= 5285116 \times 500 \times 15 \times 0.6 \\ &= 2.3783 \times 10^7 MJ \\ &= 6.6064 \times 10^6 kWh \end{aligned}$$

另外，一些经济、技术指标计算如下（其中，下标 S<sub>1</sub> 代表太阳能热水器系统，S<sub>2</sub> 代表燃煤锅炉系统）：

(1) 单位产品投资额 C<sub>1</sub>

$$C_{1,S1} = \frac{450000}{6606400} = 0.0681 \text{ 元}$$

$$C_{1,S2} = \frac{5300000}{389400000 \times 2} = 0.00681 \text{ 元}$$

(2) 单位产品经营成本 C<sub>2</sub>

根据调研结果可知，太阳能热水器系统经营成本只包括其在阴雨天补偿水温所耗费的电的费用，其运行过程中基本上没有维护费用以及其他费用。而锅炉系统经营成本主要包括其煤耗、电耗、人力成本和设备维护费用。其中，工业煤每吨 280 元，工业电每度 0.64 元。计算过程如下：

$$C_{2,S1} = \frac{9000 \times 15 \times 0.64}{6606400} = 0.0131 \text{ 元}$$

$C_{2.S2}$  计算过程如下：

$$\text{锅炉单位产品煤耗} = \frac{79859 \times 280 \times 2}{389400000 \times 2} = 0.0574 \text{元}$$

$$\text{锅炉单位产品电耗} = \frac{500000 \times 20 \times 0.64}{389400000 \times 2} = 0.00822 \text{元}$$

假设人力成本投入 1 万元/人·年，那么，

$$\text{锅炉单位产品人力成本} = \frac{10000 \times 16 \times 20}{389400000 \times 2} = 0.00411 \text{元}$$

$$\text{锅炉单位产品设备维护费} = \frac{20000 \times 20}{389400000 \times 2} = 0.000514 \text{元}$$

所以，

$$C_{2.S2} = 0.0574 + 0.00822 + 0.00411 + 0.000514 = 0.070244 \text{元}$$

### (3) 单位产品总成本 $C_3$

单位产品总成本比单位产品经营成本多了一项单位产品折旧费  $D$ ，假设锅炉房总投资中锅炉投资 200 万，辅助设备投资 100 万，锅炉房投资 230 万。计算如下：

$$D_{S1} = \frac{\frac{450000}{15}}{6606400} = 0.0681 \text{元}$$

$$D_{S2} = \frac{\frac{200+100}{20}}{\frac{389400000 \times 2}{30}} = 0.00582 \text{元}$$

所以，

$$C_{3.S1} = C_{2.S1} + D_{S1} = 0.0131 + 0.0681 = 0.0812 \text{元}$$

$$C_{3.S2} = C_{2.S2} + D_{S2} = 0.070244 + 0.00582 = 0.0761 \text{元}$$

### (4) 年运行能耗 $E$

$$E_{S1} = \frac{9000 \times 3600}{6606400 / 15} = 73.57 \text{ kJ/kWh}$$

$$E_{S2} = \frac{500000 \times 3600}{389400000 \times 2/20} + \frac{79859000 \times 5500 \times 4.2}{389400000} = 4783.63 \text{ kJ/kWh}$$

计算结果汇总于表 4-2。

表 4-2 太阳能热水器系统和燃煤锅炉系统生命周期分析影响因子数据汇总表

影响因子	太阳能热水器系统	燃煤锅炉系统	$\frac{\text{燃煤锅炉系统}}{\text{太阳能热水器系统}}$
环境效益指标（单位：(kWh) <sup>-1</sup> ）			
酸化	0.039259562	0.649060865	16.53255496
生态毒性	$6.35462 \times 10^{-5}$	$1.87622 \times 10^{-9}$	$2.95253 \times 10^{-5}$
富营养化	$2.02506 \times 10^{-5}$	0.000112101	5.535668872
全能耗	0.014503894	0.225782008	15.56699295
全球变暖	0.071552482	0.907933567	12.68905754
致瘤物	0.000277549	$1.99802 \times 10^{-7}$	0.00071988
标准大气污染物	$7.59343 \times 10^{-5}$	0.002991822	39.40010953
非致瘤物	0.073504305	0.000222751	0.003030449
光化学氧化物	0.000291691	0.003137759	10.75713058
经济效益指标（单位：元/kWh）			
单位产品投资额	0.0681	0.00681	0.1
单位产品经营成本	0.0131	0.07024	5.3618
单位产品总成本	0.0812	0.0761	0.9372
技术性能指标（单位：kJ/kWh）			
单位产品运行能耗	73.57	4783.63	65.02

### 4.3 量化

通过赋予不同环境影响因子、经济效益指标和技术性能指标一定权重，可以得到一个可供比较的单一指标。通过查阅文献，本论文拟采用层次分析法（AHP）对太阳能热水器系统和锅炉系统进行多目标规划。

#### 4.3.1 层次分析法的原理和步骤

层次分析法（Analytical Hierarchy Process，简称 AHP）是美国学者 Thomas L.Saaty 教授于 20 世纪 70 年代提出的一种可用于对定性因素进行量化处理和排序的运筹学方法<sup>[59]</sup>，该方法将决策者的经验判断给予量化，对目标（或因素）结

构复杂且又缺少必要数据的情况的分析更为适用。这种方法自 80 年代末引进我国后在各个领域中的应用发展相当迅速。其基本原理是把所需解决的问题看成一个系统，将各个影响元素划分为不同的层次，并以同一层次的各种要素按照上一层要素为准则，进行两两的判断比较并计算出各要素的权重，根据综合权重按最大权重原则确定最优方案。

一般来讲，进行层次分析法大致要经过 6 个步骤：

- (1) 明确问题：弄清问题的范围、要求，包含的要素以及各要素之间的关系。
- (2) 建立阶梯层次结构：把问题条理化、层次化，构造出一个层次分析的结构模型。

这些层次大体上可以分为 3 类：

- 1) 最高层：这一层次中只有一个元素，一般它是分析问题的预定目标或理想结果，因此也称目标层；
- 2) 中间层：这一层次包括了为实现目标所涉及的中间环节，它可以由若干个层次组成，包括所需考虑的准则、子准则，因此也称为准则层；
- 3) 最底层：表示为实现目标可供选择的各种措施、决策方案等，因此也称为措施层或方案层。

上述各层次之间的支配关系不一定是完全的，即可以存在这样的元素，它并不支配下一层次的所有元素而仅支配其中部分元素。这种自上而下的支配关系所形成的层次结构，我们称之为递阶层次结构。一个典型的层次结构表示如图 4-1 所示。

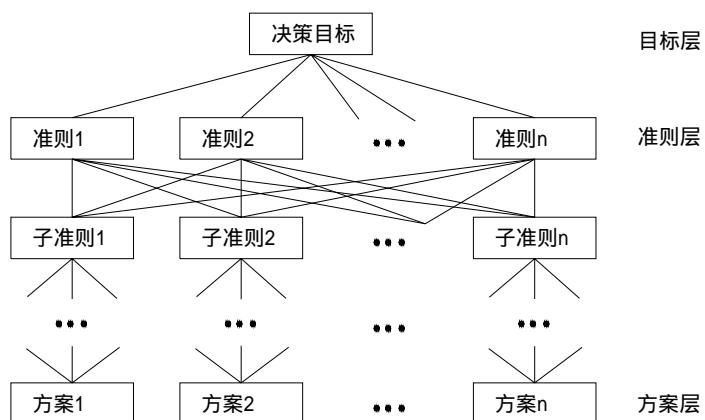


图 4-1 阶梯层次结构示意图

- (3) 构造两两比较判断矩阵：在每一层次上，按照上一层次的对应要求，对

该层次要素进行两两比较，按照规定的标度定量化后写成矩阵形式。构造判断矩阵是层次分析法的关键步骤。这里按 1—9 比例标度对重要性程度赋值。表 4-3<sup>[60]</sup>列出了 1—9 标度的含义。

表 4-3 层次分析法 1—9 标度的含义

标度	含义
1	表示两个元素相比，具有同样重要性
3	表示两个元素相比，一个因素比另一个因素稍微重要
5	表示两个元素相比，一个因素比另一个因素明显重要
7	表示两个元素相比，一个因素比另一个因素强烈重要
9	表示两个元素相比，一个因素比另一个因素极端重要
2, 4, 6, 8	上述两相邻判断的中值
倒数	若元素 i 与元素 j 的重要性之比为 $a_{ij}$ ，那么元素 j 与元素 i 重要性之比为 $a_{ji}=1/a_{ij}$

(4) 进行层次单排序：根据下一层元素对于相邻上一层元素的判断矩阵，求出下一层元素对于上一层元素的相对权重，用向量表示。权重计算方法通常有：求和法、方根法、特征根法、对数最小二乘法和最小二乘法。

本论文采用求和法，其计算步骤如下：第一步：A 的元素按列归一化；第二步：将 A 的元素按行相加；第三步：所得到的行和向量归一化得排序权向量 w。

(5) 进行层次总排序：利用层次单排序的结果，求出阶梯层次结构中每一层所有元素相对于总目标的相对权重。最终计算结果得出最低层次各方案对于目标的排序权重，从而按照最大权重原则确定最佳方案。

(6) 一致性检验：在构造判断矩阵时，不可避免地产生认识上的不一致，为考虑层次分析得到的结果是否基本合理，需要对判断矩阵进行一致性检验，经过检验后得到的结果才可认为是可行的，否则需要重新调整判断矩阵。

无论是层次单排序或是层次总排序，计算权重时都要进行一致性检验。其步骤如下：

1) 计算一致性指标 C.I. (Consistency Index)

$$C.I. = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (4-8)$$

为了检验一致性，必须计算矩阵的最大特征根  $\lambda_{\max}$ 。这里可以在求出 w 后，

由以下公式计算：

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(Aw)_i}{w_i} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} w_j}{w_i} \quad (4-9)$$

式中  $(Aw)_i$  ——向量  $Aw$  的第  $i$  个分量。

2) 查找相应的平均随机一致性指标 R. I. (Random Index), 表 4-4<sup>[60]</sup>列出了 1~15 阶正互反矩阵计算 1000 次得到的平均随机一致性指标。

表 4-4 平均随机一致性指标 R. I.

矩阵阶数	1	2	3	4	5	6	7	8
R. I.	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.14
矩阵阶数	9	10	11	12	13	14	15	
R. I.	1.46	1.49	1.52	1.54	1.56	1.58	1.59	

3) 计算一致性比例 C.R. (Consistency Ratio)

$$C.R. = \frac{C.I.}{R.I.} \quad (4-10)$$

当  $C.R. < 0.1$  时，认为判断矩阵的一致性是可以接受的。当  $C.R. > 0.1$  时应该对判断矩阵作适当修正。一阶、二阶矩阵总是一致的，此时  $C.R.=0$ 。

### 4.3.2 综合效益评价

图 4-2 为太阳能热水器系统与燃煤锅炉系统的综合效益评价阶梯层次结构图，综合效益为最高目标层，准则层为技术性能、经济效益和环境效益，即评价的子目标。在每个子目标下都有自己对应的影响因子，总共 16 个，最低层为方案层，即太阳能热水器系统和燃煤锅炉系统。

对阶梯层次结构图进行权重确定时，对于三个子目标，决策者可以有自己不同的侧重点，企业管理者可能更注重经济效益，而环保人士则可能更看重其环境效益。所以，本论文中分两种不同的观点分析太阳能热水器系统和锅炉系统的综合效益。

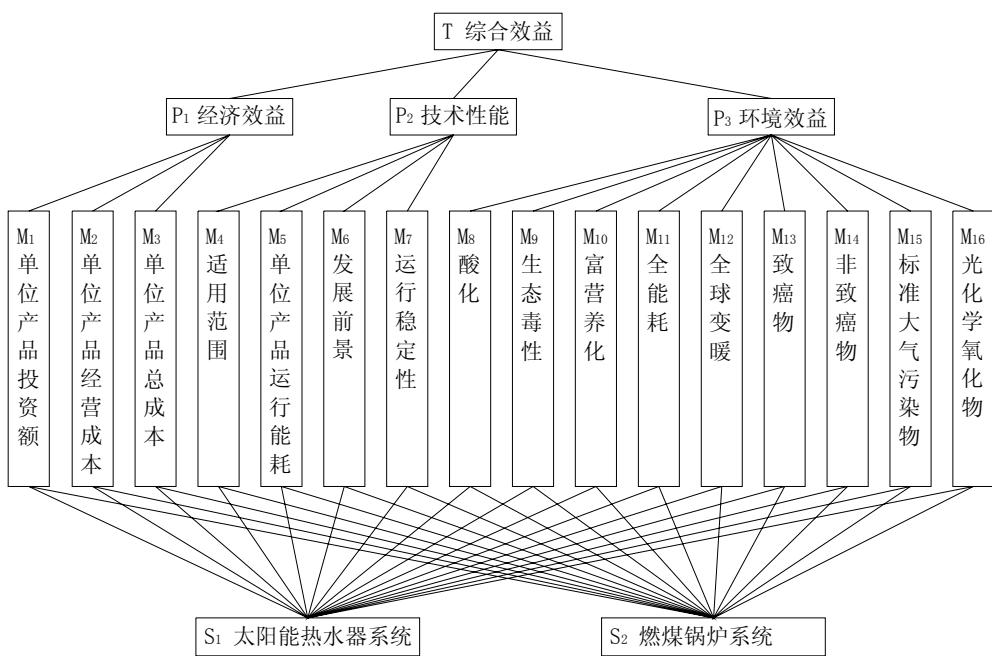


图 4-2 太阳能热水器系统与燃煤锅炉系统的综合效益评价阶梯层次结构图

### (1) 观点一：环境效益比经济效益重要

在确定三个子目标相对于总目标的判断矩阵时，如果决策者认为环境效益比经济效益、技术性能都重要，那么应该给环境效益最高权重，给出的判断矩阵如表 4-5 所示。然后采用和法计算其权重向量  $w$  和最大特征根  $\lambda_{\max}$ ，接着计算一致性指标 C.I.，并且从表 4-4 中查找相应的平均随机一致性指标 R.I.，最后根据一致性比例 C.R. 判断矩阵的一致性。

然后，我们对各个影响因子相对于子目标的重要性给出其相对权重，计算权重向量并且检验一致性，结果如表 4-6，4-7，4-8 所示。

接着，给出比较方案对每一个影响因子的判断矩阵，计算其权重向量，由于二阶矩阵总是一致的，所以不需要判断矩阵的一致性，计算结果如表 4-9~表 4-24 所示。

结合矩阵  $T-P$ ,  $P_1-M$ ,  $P_2-M$ ,  $P_3-M$  的计算结果，计算层次一级总排序，即各影响因子相对于总目标的相对权重并且检验一致性，结果如表 4-25 所示。

最后，结合表 4-25：层次一级总排序的结果和表 4-9~表 4-24 的计算结果给出层次二级总排序(如表 4-26 所示)。结果显示：太阳能热水器系统权重为 0.6368，锅炉系统的权重为 0.3632，数据表明聚焦环境效益时，太阳能热水器系统的综合效益明显优于锅炉系统的综合效益。各影响因子的叠加过程如图 4-3 所示。

表 4-5 聚焦环境效益时判断矩阵 T-P

T	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	W
P <sub>1</sub>	1	3	1/3	0.261
P <sub>2</sub>	1/3	1	1/5	0.106
P <sub>3</sub>	3	5	1	0.633

 $\lambda_{\max}=3.039$ , C.I.=0.02, R.I.=0.52, C.R.=0.038<0.1

表 4-6 判断矩阵 P1-M

T	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>	W
M <sub>1</sub>	1	3	5	0.633
M <sub>2</sub>	1/3	1	3	0.261
M <sub>3</sub>	1/5	1/3	1	0.106

 $\lambda_{\max}=3.039$ , C.I.=0.02, R.I.=0.52, C.R.=0.038<0.1

表 4-7 判断矩阵 P2-M

T	M <sub>4</sub>	M <sub>5</sub>	M <sub>6</sub>	M <sub>7</sub>	W
M <sub>4</sub>	1	1/6	2	1/5	0.090
M <sub>5</sub>	6	1	7	3	0.559
M <sub>6</sub>	1/2	1/7	1	1/5	0.060
M <sub>7</sub>	5	1/3	5	1	0.291

 $\lambda_{\max}=4.141$ , C.I.=0.047, R.I.=0.89, C.R.=0.053<0.1

表 4-8 判断矩阵 P3-M

P <sub>3</sub>	M <sub>8</sub>	M <sub>9</sub>	M <sub>10</sub>	M <sub>11</sub>	M <sub>12</sub>	M <sub>13</sub>	M <sub>14</sub>	M <sub>15</sub>	M <sub>16</sub>	W
M <sub>8</sub>	1	7	1	3	9	5	6	5	9	0.2804
M <sub>9</sub>	1/7	1	1/7	1/5	3	1/3	1/4	1/3	3	0.0371
M <sub>10</sub>	1	7	1	3	7	5	4	5	9	0.2611
M <sub>11</sub>	1/3	5	1/3	1	5	3	4	3	7	0.1479
M <sub>12</sub>	1/9	1/3	1/7	1/5	1	1/5	1/6	1/5	3	0.0259
M <sub>13</sub>	1/5	3	1/5	1/3	5	1	1/3	2	5	0.0745
M <sub>14</sub>	1/6	4	1/4	1/4	6	3	1	3	5	0.0961
M <sub>15</sub>	1/5	3	1/5	1/3	5	1/2	1/3	1	5	0.0592
M <sub>16</sub>	1/9	1/3	1/9	1/7	1/3	1/5	1/5	1/5	1	0.0178

 $\lambda_{\max}=9.9160$ , C.I.=0.1145, R.I.=1.46, C.R.=0.078<0.1

表 4-9 判断矩阵 M1-S

M <sub>1</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	W
S <sub>1</sub>	1	0.1	0.0909
S <sub>2</sub>	10	1	0.9091

 $\lambda_{\max}=2$ , C.I.=0.00, R.I.=0.00

表 4-10 判断矩阵 M2-S

M <sub>2</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	W
S <sub>1</sub>	1	5.3618	0.8428
S <sub>2</sub>	0.1865	1	0.1572

 $\lambda_{\max}=2$ , C.I.=0.00, R.I.=0.00

表 4-11 判断矩阵 M3-S

M <sub>3</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	W
S <sub>1</sub>	1	0.9372	0.4838
S <sub>2</sub>	1.0670	1	0.5162

 $\lambda_{\max}=2$ , C.I.=0.00, R.I.=0.00

表 4-12 判断矩阵 M4-S

M <sub>4</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	W
S <sub>1</sub>	1	1/5	0.1667
S <sub>2</sub>	5	1	0.8333

 $\lambda_{\max}=2$ , C.I.=0.00, R.I.=0.00

表 4-13 判断矩阵 M5-S

M <sub>5</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	W
S <sub>1</sub>	1	65.02	0.9849
S <sub>2</sub>	0.0154	1	0.0151

 $\lambda_{\max}=2$ , C.I.=0.00, R.I.=0.00

表 4-14 判断矩阵 M6-S

M <sub>6</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	W
S <sub>1</sub>	1	7	0.8750
S <sub>2</sub>	1/7	1	0.1250

 $\lambda_{\max}=2$ , C.I.=0.00, R.I.=0.00

表 4-15 判断矩阵 M7-S

M <sub>7</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	W
S <sub>1</sub>	1	1/5	0.1667
S <sub>2</sub>	5	1	0.8333

 $\lambda_{\max}=2$ , C.I.=0.00, R.I.=0.00

表 4-16 判断矩阵 M8-S

M <sub>8</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	W
S <sub>1</sub>	1	16.5326	0.9430
S <sub>2</sub>	0.0605	1	0.0570

 $\lambda_{\max}=2$ , C.I.=0.00, R.I.=0.00表 4-17 判断矩阵 M<sub>9</sub>-S

M <sub>9</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	W
S <sub>1</sub>	1	$2.9525 \times 10^{-5}$	$2.9524 \times 10^{-5}$
S <sub>2</sub>	33870	1	0.99997

 $\lambda_{\max}=2$ , C.I.=0.00, R.I.=0.00

表 4-18 判断矩阵 M10-S

M <sub>10</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	W
S <sub>1</sub>	1	5.5357	0.8470
S <sub>2</sub>	0.1806	1	0.1530

 $\lambda_{\max}=2$ , C.I.=0.00, R.I.=0.00

表 4-21 判断矩阵 M13-S

M <sub>13</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	W
S <sub>1</sub>	1	0.0007199	0.0007194
S <sub>2</sub>	1389.08	1	0.9992806

 $\lambda_{\max}=2$ , C.I.=0.00, R.I.=0.00

表 4-19 判断矩阵 M11-S

M <sub>11</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	W
S <sub>1</sub>	1	15.5670	0.9396
S <sub>2</sub>	0.0642	1	0.0604

 $\lambda_{\max}=2$ , C.I.=0.00, R.I.=0.00

表 4-22 判断矩阵 M14-S

M <sub>14</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	W
S <sub>1</sub>	1	39.4001	0.9752
S <sub>2</sub>	0.0254	1	0.0248

 $\lambda_{\max}=2$ , C.I.=0.00, R.I.=0.00

表 4-23 判断矩阵 M15-S

M <sub>15</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	W
S <sub>1</sub>	1	0.003030	0.0030
S <sub>2</sub>	330.03	1	0.9970

 $\lambda_{\max}=2$ , C.I.=0.00, R.I.=0.00

表 4-24 判断矩阵 M16-S

M <sub>16</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	W
S <sub>1</sub>	1	10.7571	0.9149
S <sub>2</sub>	0.0930	1	0.0851

 $\lambda_{\max}=2$ , C.I.=0.00, R.I.=0.00

表 4-25 层次一级总排序

	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	层次 M 总排序
	0.261	0.106	0.633	权值
M <sub>1</sub>	0.633	0	0	0.1652
M <sub>2</sub>	0.261	0	0	0.0681
M <sub>3</sub>	0.106	0	0	0.0277
M <sub>4</sub>	0	0.090	0	0.0095
M <sub>5</sub>	0	0.559	0	0.0592
M <sub>6</sub>	0	0.060	0	0.0064
M <sub>7</sub>	0	0.291	0	0.0308
M <sub>8</sub>	0	0	0.2804	0.1775
M <sub>9</sub>	0	0	0.0371	0.0235
M <sub>10</sub>	0	0	0.2611	0.1653
M <sub>11</sub>	0	0	0.1479	0.0936
M <sub>12</sub>	0	0	0.0259	0.0164
M <sub>13</sub>	0	0	0.0745	0.0472
M <sub>14</sub>	0	0	0.0961	0.0608
M <sub>15</sub>	0	0	0.0592	0.0375
M <sub>16</sub>	0	0	0.0178	0.0113

C.I.=0.0827, R.I.=1.1542, C.R.=0.0717&lt;0.1

表 4-26 层次二级总排序

	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>	M <sub>4</sub>	M <sub>5</sub>	M <sub>6</sub>	M <sub>7</sub>	M <sub>8</sub>	
	0.1652	0.0681	0.0277	0.0095	0.0592	0.0064	0.0308	0.1775	层次 S 总排序 权值
S <sub>1</sub>	0.0909	0.8428	0.4838	0.1667	0.9849	0.8750	0.1667	0.9430	
S <sub>2</sub>	0.9091	0.1572	0.5162	0.8333	0.0151	0.1250	0.8333	0.0570	权值
M <sub>9</sub>	M <sub>10</sub>	M <sub>11</sub>	M <sub>12</sub>	M <sub>13</sub>	M <sub>14</sub>	M <sub>15</sub>	M <sub>16</sub>		
	0.0235	0.1653	0.0936	0.0164	0.0472	0.0608	0.0375	0.0113	
S <sub>1</sub>	$2.9524 \times 10^{-5}$	0.8470	0.9396	0.9269	0.0007194	0.9752	0.0030	0.9149	0.6368
S <sub>2</sub>	0.99997	0.1530	0.0604	0.0731	0.9992806	0.0248	0.9970	0.0851	0.3632

 $\lambda_{\max}=2$ , C.I.=0.00, R.I.=0.00

由图 4-3 可以看出，当认为环境效益比经济效益、技术性能都重要时，太阳能热水器系统在单位产品经营成本、单位产品运行能耗、酸化、富营养化和全能耗方面明显优于锅炉系统，在技术发展前景、全球变暖、标准大气污染物和光化学氧化物方面略优于锅炉系统，而在单位产品投资额，生态毒性、致癌性和非致癌性方面明显次于锅炉系统，在单位产品总成本、技术适用范围、运行稳定性方面两者相差不大。

众所周知，太阳能热水器系统在运行过程中除了阴雨天消耗小部分电能以外，基本不消耗常规能源，运行过程中基本不需要维护、维修等。而锅炉系统在运行过程中除了必须消耗一次性能源煤以外，还要耗电来使设备运转，而且，锅炉系统运行过程中需要投入一定的人力资源来操作、维护设备，另外，每年都必须进行设备维修、维护和更新等等。这些因素导致了太阳能热水器系统的运营成本、运行能耗明显低于锅炉系统，但太阳能热水器系统单位产品投资额明显高于锅炉系统，这也是目前太阳能热水器推广应用的一大障碍之一。

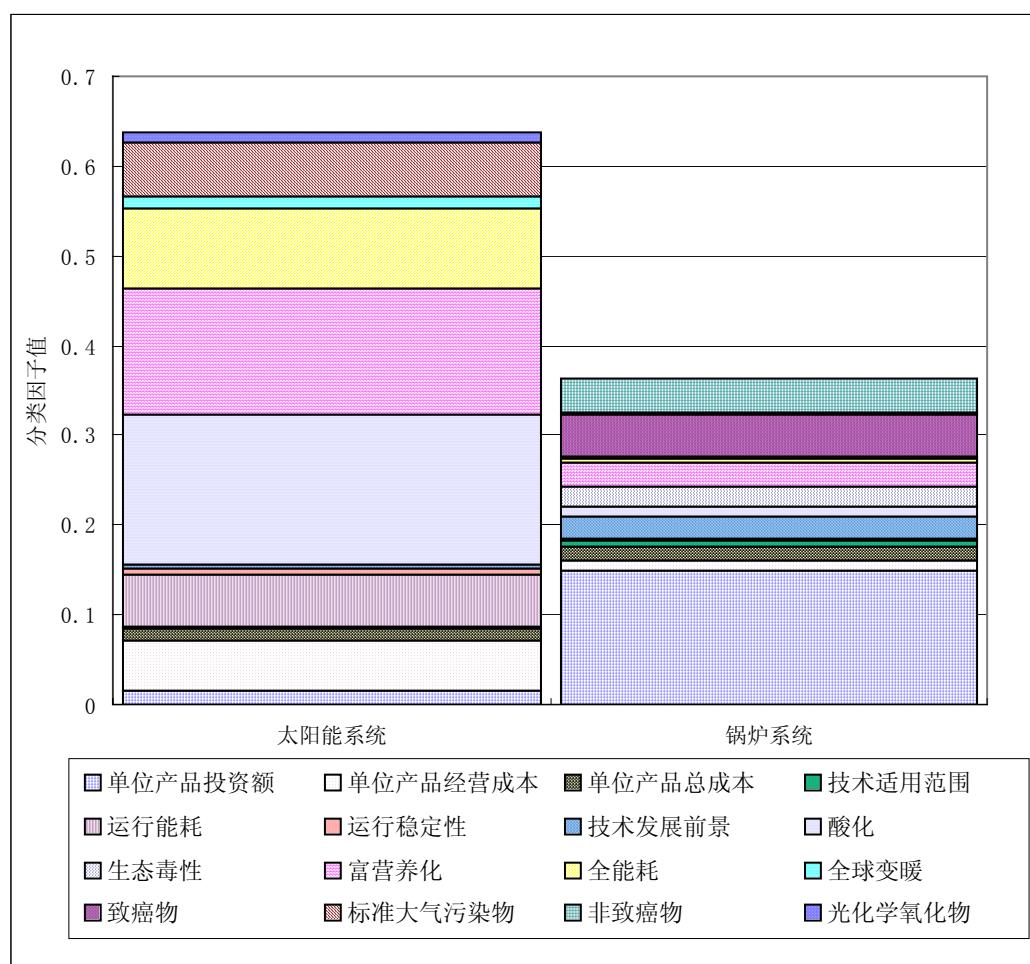


图 4-3 聚焦环境效益时各影响因子的叠加过程图

数据统计分析表明，导致锅炉系统在酸化、富营养化、全能耗、全球变暖、标准大气污染物和光化学氧化物方面明显次于太阳能热水器系统的主要原因是由于锅炉运行过程中消耗大量煤，煤的燃烧过程中排放了大量二氧化硫、氮氧化物、二氧化碳和烟尘，严重污染环境，使得其酸化、富营养化、全能耗、全球变暖、标准大气污染物和光化学氧化物指标明显偏高。而使得太阳能热水器系统在生态毒性、致癌和非致癌等方面明显偏高的主要原因是由于铜的生产过程中向水体排放了铜、铅、锌、镉、砷等重金属元素，其中铅、镉、砷是致癌物，从而使得生态毒性、致癌和非致癌指标明显高于锅炉系统。

## (2) 观点二：经济效益比环境效益重要

在这种观点之下，子目标对于总目标的判断矩阵如表 4-27 所示，层次一级总排序以及层次二级总排序如表 4-28, 4-29 所示。结果显示：太阳能热水器系统权重为 0.4768，锅炉系统的权重为 0.5232，表明聚焦经济效益时，太阳能热水器系统的综合效益稍差于锅炉系统的综合效益。各影响因子的叠加过程如图 4-4 所示。从图 4-4 明显可以看出，聚焦经济效益时，导致太阳能热水器系统权重低于锅炉系统的主要原因是因其单位产品投资额明显高于锅炉系统。

表 4-27 聚焦经济效益时判断矩阵 T·P

T	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	W
P <sub>1</sub>	1	5	3	0.633
P <sub>2</sub>	1/5	1	1/3	0.106
P <sub>3</sub>	1/3	3	1	0.261

$\lambda_{\max}=3.039$ , C.I.=0.02, R.I.=0.52, C.R.=0.038<0.1

表 4-28 聚焦经济效益时层次一级总排序

	<b>P<sub>1</sub></b>	<b>P<sub>2</sub></b>	<b>P<sub>3</sub></b>	层次 M 总排序
	0.633	0.106	0.261	权值
<b>M<sub>1</sub></b>	0.633	0	0	0.400689
<b>M<sub>2</sub></b>	0.261	0	0	0.165213
<b>M<sub>3</sub></b>	0.106	0	0	0.067098
<b>M<sub>4</sub></b>	0	0.090	0	0.00954
<b>M<sub>5</sub></b>	0	0.559	0	0.059254
<b>M<sub>6</sub></b>	0	0.060	0	0.00636
<b>M<sub>7</sub></b>	0	0.291	0	0.030846
<b>M<sub>8</sub></b>	0	0	0.2804	0.073184
<b>M<sub>9</sub></b>	0	0	0.0371	0.009683
<b>M<sub>10</sub></b>	0	0	0.2611	0.068147
<b>M<sub>11</sub></b>	0	0	0.1479	0.038602
<b>M<sub>12</sub></b>	0	0	0.0259	0.00676
<b>M<sub>13</sub></b>	0	0	0.0745	0.019445
<b>M<sub>14</sub></b>	0	0	0.0961	0.025082
<b>M<sub>15</sub></b>	0	0	0.0592	0.015451
<b>M<sub>16</sub></b>	0	0	0.0178	0.004646

C.I.=0.0361, R.I.=0.8046, C.R.=0.0449&lt;0.1

表 4-29 聚焦经济效益时层次二级总排序

	<b>M<sub>1</sub></b>	<b>M<sub>2</sub></b>	<b>M<sub>3</sub></b>	<b>M<sub>4</sub></b>	<b>M<sub>5</sub></b>	<b>M<sub>6</sub></b>	<b>M<sub>7</sub></b>	<b>M<sub>8</sub></b>	层次 S
	0.400689	0.165213	0.067098	0.00954	0.059254	0.00636	0.030846	0.073184	总排
<b>S<sub>1</sub></b>	0.0909	0.8428	0.4838	0.1667	0.9849	0.8750	0.1667	0.9430	序权
<b>S<sub>2</sub></b>	0.9091	0.1572	0.5162	0.8333	0.0151	0.1250	0.8333	0.0570	值
	<b>M<sub>9</sub></b>	<b>M<sub>10</sub></b>	<b>M<sub>11</sub></b>	<b>M<sub>12</sub></b>	<b>M<sub>13</sub></b>	<b>M<sub>14</sub></b>	<b>M<sub>15</sub></b>	<b>M<sub>16</sub></b>	
	0.009683	0.068147	0.038602	0.00676	0.019445	0.025082	0.015451	0.004646	
<b>S<sub>1</sub></b>	2.9524×10 <sup>-5</sup>	0.8470	0.9396	0.9269	0.0007194	0.9752	0.0030	0.9149	0.4768
<b>S<sub>2</sub></b>	0.99997	0.1530	0.0604	0.0731	0.9992806	0.0248	0.9970	0.0851	0.5232

 $\lambda_{\max}=2$ , C.I.=0.00, R.I.=0.00

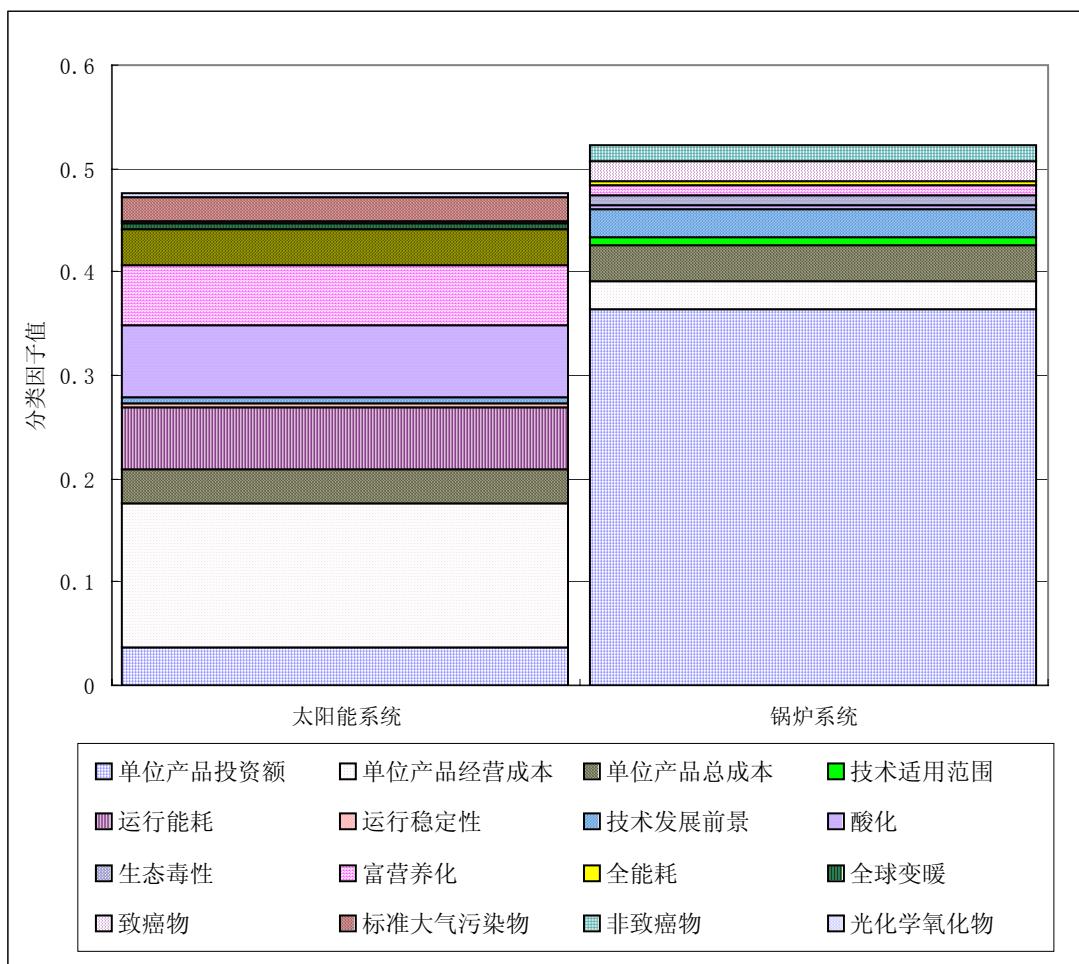


图 4-4 聚焦经济效益时各影响因子的叠加过程图

## 第五章 改善评价

生命周期改善评价是识别、评价并选择能减少研究系统整个生命周期内能源和物质消耗以及环境释放的机会的过程，这些机会包括如改进产品设计、原材料的使用、工艺流程、消费者使用方式及废物管理等<sup>[12]</sup>。在太阳能热水器系统中，太阳能热水器是系统的主体设备，其环境影响在系统环境影响中也占主要比例，所以本章将以太阳能热水器单体为例进行生命周其改善评价。

### 5.1 我国太阳能资源概况<sup>[61]</sup>

我国太阳能资源非常丰富，太阳能年辐照总量大于 5000MJ / m<sup>2</sup>、年日照时数在 2200 小时以上的地区约占我国国土面积的 2 / 3 以上；就分布而言，大致可以分为 5 个太阳能资源带，如表 5-1 所示<sup>[62]</sup>。全国年地表吸收的太阳能相当于 1.7 亿万吨标准煤，相当于我国年消耗能源总量的 1000 多倍；尤其是我国西部地区，太阳能资源尤为丰富，具有良好的开发条件和应用价值。丰富的太阳能资源为太阳能热水器的发展和推广普及提供了良好的资源基础。

表 5-1 我国太阳能资源带分布情况

资源带号	名称	年辐射指标 MJ / m <sup>2</sup> •a	全年日照 时数	代表地区	世界相当区
A	资源丰富带	6700-8400	2800-3300	宁夏北、甘肃北、新疆东、青海西和西藏西等	印度、巴基斯坦北部
B	资源较富带	5850-6700	3000-3200	晋北、冀北、蒙南、宁夏南、甘肃中、青海东、西藏东南和新疆南等	印尼的雅加达一带
C	资源一般带	5000-5850	2200-3000	鲁、豫、冀东南、晋南北、吉、辽、滇及陕北，甘肃东南、广东南、福建南、苏皖北和北京等	美华盛顿地区
D	资源较贫带	4200-5000	1400-2200	湘、鄂、赣、浙、桂、黑龙江等省和广东北部、陕南和苏皖南等	意大利米兰地区
E	资源贫乏带	3400-4200	1000-2200	川、贵两省	巴黎、莫斯科

## 5.2 我国太阳能热水器应用现状

我国太阳能热水器研究历经 20 年，已经形成了品种多样，质量可靠的完整体系。据不完全统计，我国目前各类太阳能热水器生产厂家有 4000 家，总年产量超过 400 万  $m^2$ 。2001 年全国太阳能热水器实用总量 1413 万  $m^2$ ，为 3000 万城乡居民提供生活热水。我国太阳能热水器的产量已居世界之首，但普及率低，质量有待提高。由殷志强<sup>[63]</sup>等人撰写的《我国太阳能热水器发展探讨》一文比较系统的分析了我国家用太阳能热水器的生产销售情况，科学、客观的预测了我国 2001 年到 2015 年太阳能热水器的发展，预测结果如图 5-1 所示。

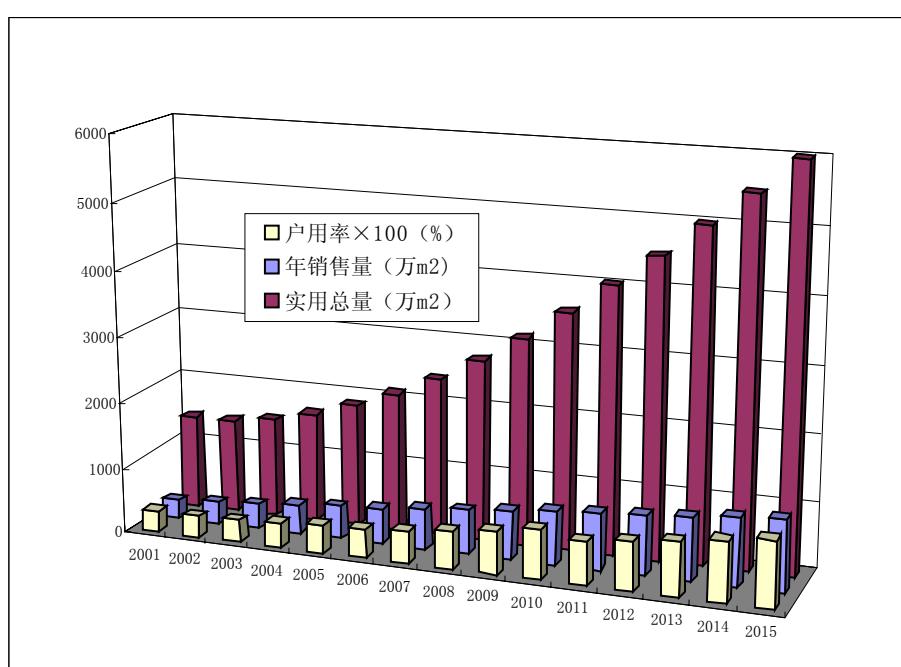


图 5-1 2001-2015 年我国太阳能热水器发展预测图

从图 5-1 可以看出，我国太阳能热水器产业规模在不断扩大，市场份额也在不断增长。据刘文强<sup>[61]</sup>分析，从使用范围和方式上，太阳能热水器正从城市向农村、中小城镇及城乡结合扩展，从提供生活热水向生产和商用发展，从单户分散使用向集中供水系统发展。

## 5.3 太阳能热水器改善评价

在本论文中，根据太阳能热水器系统边界，我们将太阳能热水器整个生命周期分为原材料的获取、原材料生产、产品制造、包装/分配、运行/维护和废弃处

理六个阶段，每个阶段都包括多个过程，如原材料的生产阶段包括了各种不同原材料的生产过程等等。根据影响评价结果，我们可以将太阳能热水器整个生命周期的环境影响分别按阶段、过程加权汇总，由此分析各个阶段、各个过程的环境影响比例，找出需要改进的关键环节，从而为产品设计者提供产品改进的方法参考。

图 5-1 为 JPCY-100 型真空管太阳能热水器生命周期各阶段影响比例。从图 5-1 可以看出，JPCY-100 型真空管太阳能热水器整个生命周期过程中，原材料生产所产生的环境影响占整个生命周期的绝大部分，高达 93%，产品制造阶段和运行/维护阶段各占 4% 和 3%，其他阶段的环境影响相对较小。

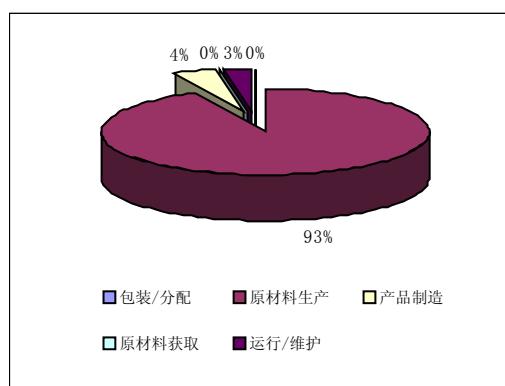


图 5-1 太阳能热水器生命周期各阶段影响比例

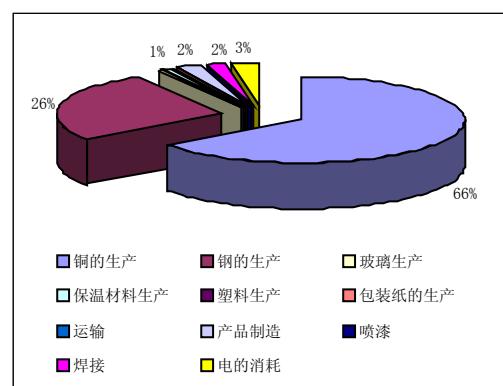


图 5-2 太阳能热水器生命周期各过程影响比例

图 5-2 为 JPCY-100 型真空管太阳能热水器生命周期各过程的影响比例。由图 5-2 可知，在 JPCY-100 型真空管太阳能热水器生命周期过程中，铜、钢的生产在环境影响比例中占了绝大部分，分别为 66% 和 26%。另外，电的消耗、焊接、产品制造和玻璃生产分别占 3%， 2%， 2% 和 1%。其他过程所占比例很小，在整个生命周期过程中几乎可以忽略不计。

从分析结果得出结论：铜、钢的生产是 JPCY-100 型真空管太阳能热水器整个生命周期对环境造成影响的关键环节。

那么，究竟铜、钢的生产是如何对环境造成影响的呢？为此我们将铜、钢的生产过程按影响因子进行加权汇总，结果如图 5-3, 5-4 所示。从图 5-3 可以看出，在铜的生产过程对环境的影响因子中，酸化占最大比例：55%，其次是人类健康：非致癌物，占 35%，全球变暖和全能耗分别占 7% 和 3%，其他影响因子所占比例较小。从图 5-4 可以看出，在钢的生产过程对环境的影响因子中，酸化也占最

大比例：69%，其次是全球变暖，占17%，全能耗占14%，其他影响因子所占比例较小。

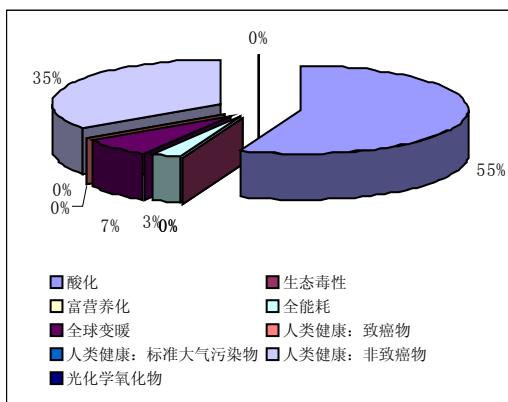


图 5-3 太阳能热水器：铜的生产各影响因子比例

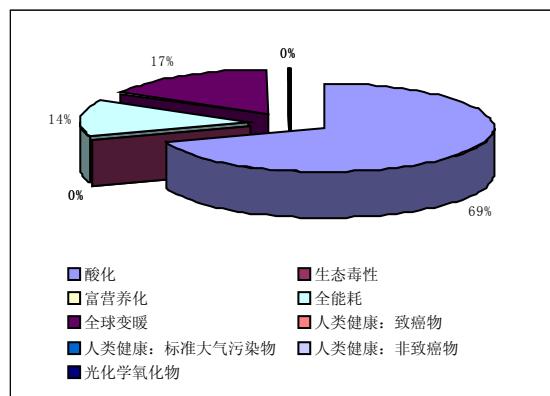


图 5-4 太阳能热水器：钢的生产各影响因子比例

在本论文中，由于时间有限，我们只是对 JPCY-100 型真空管太阳能热水器进行了生命周期分析，并没有对其他类似的太阳能热水器进行生命周期分析。假如我们能够对各种类似的太阳能热水器进行生命周期分析，对比其不同材料、不同过程、不同工艺等等的环境影响，那么我们就可以找出被分析产品的缺点所在，找出被分析产品对环境造成影响的关键环节，针对此环节着手改进必将改善该产品的环境效益。

本论文对太阳能热水器的改善评价研究只是基于提供一种方法、理念的基础上。

#### 5.4 燃煤锅炉改善评价

燃煤锅炉改善评价方法同太阳能热水器。同样，将锅炉单体各影响因子乘以权重后按阶段进行汇总，结果如表 5-2 所示。从表 5-2 可以看出，在锅炉整个生命周期过程中，运行/维护阶段占了绝对优势的比例，这主要是因为煤的燃烧所产生的环境影响相当严重，其他生命周期阶段所产生的环境影响与它相比要小的多，其中材料生产阶段所产生的环境影响相对亦较大。所以，本论文对煤的燃烧所产生的环境影响因子比例进行了统计，结果如图 5-5 所示。

由图 5-5 可以看出，煤的燃烧过程所产生的环境影响以酸化为主，这主要是由煤的燃烧所产生的二氧化硫、氮氧化物所导致的。另外，全能耗和全球变暖分别占 14% 和 10%，其他环境影响加权后数值相对较小。

表 5-2 锅炉生命周期各阶段影响数据汇总

(无量纲)	
原材料获取	44.8194
材料生产	115421.23
产品制造	5139.038
包装/分配	17.25425
运行/维护	92936511

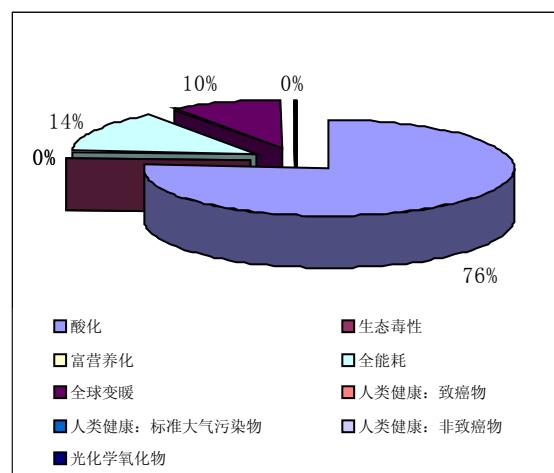


图 5-5 煤的燃烧所产生的环境影响因子比例

从以上分析可以得出结论，要改进燃煤锅炉系统的环境性能，最根本的方法是采用清洁煤技术。

## 第六章 太阳能热水器系统对于改善环境空气质量的效果分析

能源是人类赖以生存的物质基础，它与社会经济的发展和人类的生活息息相关。然而，能源的储量是有限的，能源危机已成为全球问题。据国外一些资料统计，现有开发的资源中，石油估计可使用 30 年，铁可使用 93 年，天然气可使用 58 年，煤可使用 226 年。《2000 年地球生态报告》显示：人类若依照目前的速度继续消耗地球资源，那么所有的自然资源会在 2075 年前耗尽<sup>[9]</sup>。

能源存在于自然，最终回归于自然，其开发利用必然对人类生存的环境产生影响。随着经济的发展以及人民生活水平的提高，能源需求量日益增加，随之而来的环境污染也日益严重，主要表现在大气污染上。我国是一个以煤为主要能源的国家，1995 年，煤炭消费量在我国一次能源消费总量中占到 74.6%，相当于世界水平的 2.7 倍。煤炭与其它能源相比更易引起环境污染。监测表明，大气污染物中 70% 的 TSP，90% 的 SO<sub>2</sub>，60% 的 NO<sub>x</sub> 和 85% 的矿物燃料生成的 CO<sub>2</sub> 均来自燃煤<sup>[64]</sup>。同时，煤炭燃烧排放的 SO<sub>2</sub>，NO<sub>x</sub> 在中国相当大的区域内造成了酸雨的危害。随着经济的发展，能耗的增加，我国今后面临的环境问题将会越来越严重。

面对能源日趋短缺以及环境污染日益严重的困境，人类认识到唯一的解决办法是走可持续发展之路，从源头全过程考虑，推行清洁生产。除了全面提高资源使用效率以外，人类将目光转向了可再生能源。可再生能源主要指水能、生物能、太阳能、风能、潮汐能和地热能<sup>[11]</sup>。可再生能源的使用不产生任何污染，用可再生能源取代化石矿物能源是未来能源发展的趋势所在。

### 6.1 总量分析

究竟可再生能源的使用能够带来多大的环境效益呢？在本论文中，作者将就使用太阳能热水器系统取代燃煤锅炉系统对于改善大气污染的效果进行分析，分别对 CO<sub>2</sub>，NO<sub>x</sub>，SO<sub>2</sub> 和 TSP 四种气体的排放总量进行了分析，结果表明，锅炉系统每产生 1kWh 能量分别产生 411.75gCO<sub>2</sub>、11.48gNO<sub>x</sub>、4.89gSO<sub>2</sub> 和 28.03gTSP，而太阳能热水器系统每产生 1kWh 能量分别产生 31.66gCO<sub>2</sub>、0.10gNO<sub>x</sub>、0.27gSO<sub>2</sub> 和 0.66gTSP，分别为锅炉系统的 1/13、1/115、1/18 和 1/42。以天津地区(太阳辐射年总量为 5285116 kJ/m<sup>2</sup>·a)为例，每安装 1m<sup>2</sup> 集热器代替燃煤锅炉系统在一个

生命周期内可以净减排  $5022.05\text{kgCO}_2$ 、 $150.36\text{kgNO}_x$ 、 $61.04\text{kgSO}_2$  和  $361.63\text{kgTSP}$ ，节煤  $2.71\text{t}$ 。计算过程如下：

$$\text{CO}_2 \text{减排量} = (411.75 - 31.66) \times 5285116 \times 15 \times 1 \times 0.6 / 3600 = 5022.05\text{kg} ;$$

$$\text{NO}_x \text{减排量} = (11.75 - 0.10) \times 5285116 \times 15 \times 1 \times 0.6 / 3600 = 150.36\text{kg} ;$$

$$\text{SO}_2 \text{减排量} = (4.89 - 0.27) \times 5285116 \times 15 \times 1 \times 0.6 / 3600 = 61.04\text{kg} ;$$

$$\text{TSP减排量} = (28.03 - 0.66) \times 5285116 \times 15 \times 1 \times 0.6 / 3600 = 361.63\text{kg} ;$$

$$\text{节煤量} = \frac{7.9859 \times 10^7}{3.894 \times 10^8} \times \frac{5285116 \times 15 \times 1 \times 0.6}{3600} = 2709.71\text{kg} = 2.71\text{t} .$$

## 6.2 CO<sub>2</sub>排放分配情况分析

图 6—1 为锅炉系统整个生命周期 CO<sub>2</sub> 排放分配情况，由图 6—1 可以看出，锅炉系统整个生命周期过程中导致 CO<sub>2</sub> 排放的关键环节是煤的燃烧，其总量为锅炉系统其他生命周期过程排放 CO<sub>2</sub> 总量的近 500 倍。除了煤的燃烧排放 CO<sub>2</sub> 以外，在锅炉系统其他生命周期过程中，锅炉单体、辅助设备以及锅炉房建设中的钢材生产过程排放的 CO<sub>2</sub> 占了绝大部分，其次是锅炉房建设所需水泥的生产过程排放了部分 CO<sub>2</sub>，其他过程所排放的 CO<sub>2</sub> 量相对较少。

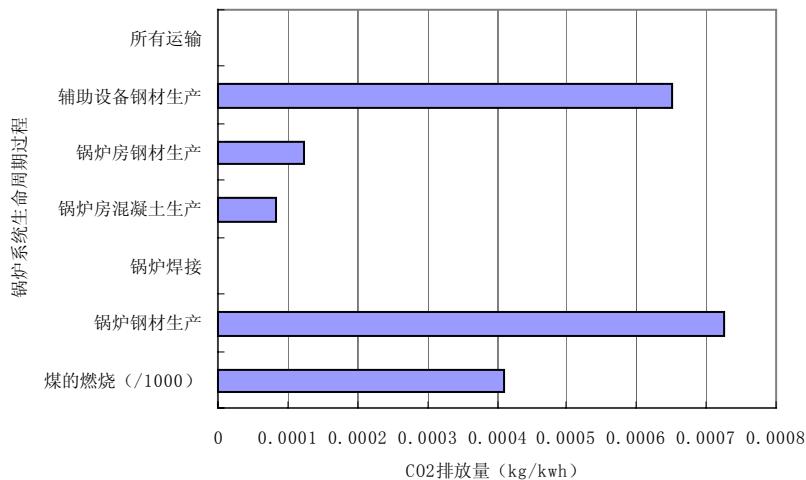


图 6—1 锅炉系统整个生命周期 CO<sub>2</sub> 排放分配

图 6—2 为太阳能热水器系统整个生命周期过程 CO<sub>2</sub> 排放分配情况，由图 6

—2 可以看出，在太阳能热水器系统整个生命周期过程中导致 CO<sub>2</sub> 排放的关键环节是原材料的生产，尤其是钢和铜的生产，分别占了 51% 和 42% 左右，其他材料如玻璃、塑料和绝热材料的生产所排放的 CO<sub>2</sub> 所占比例较小，总共占 1.6% 左右，系统制造所排放的 CO<sub>2</sub> 占了近 5%，焊接过程也排放了少部分的 CO<sub>2</sub>。与锅炉系统相比，其在系统建设阶段排放的 CO<sub>2</sub> 量高于锅炉系统，运行阶段几乎无污染，不排放 CO<sub>2</sub>，而锅炉系统却由于煤的燃烧在不断的排放 CO<sub>2</sub>，致使整个生命周期过程中同等规模的燃煤锅炉系统排放的 CO<sub>2</sub> 量是太阳能热水器系统的 13 倍。

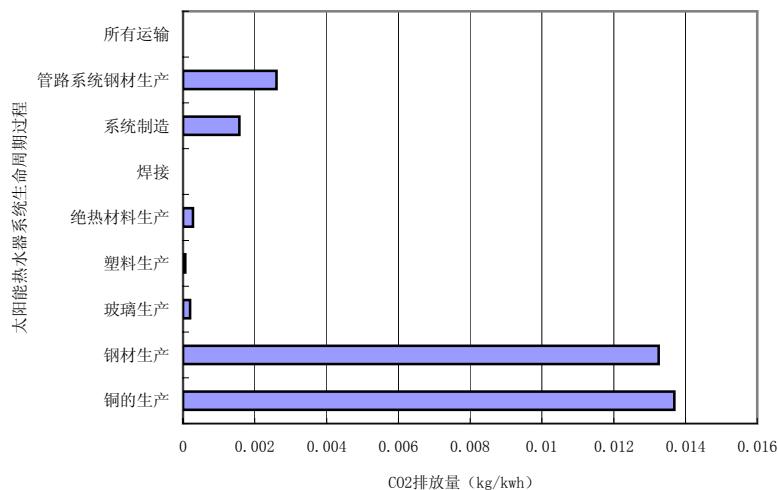
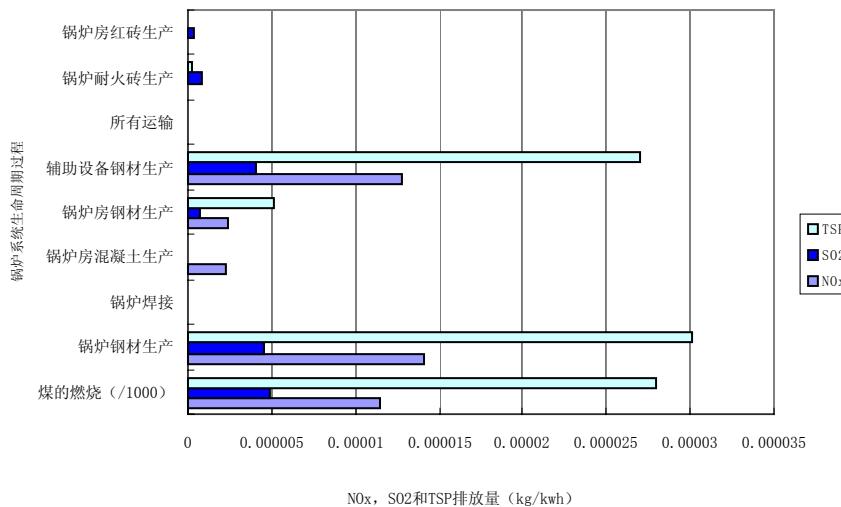
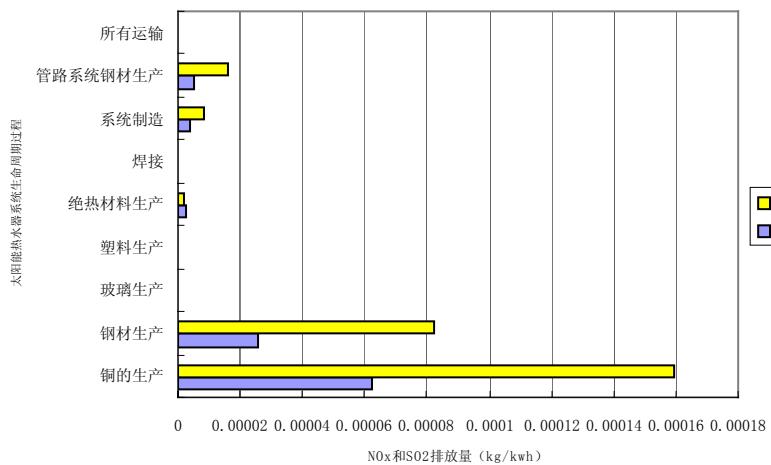


图 6-2 太阳能热水器系统整个生命周期 CO<sub>2</sub> 排放分配

### 6.3 NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> 和 TSP 排放分配情况分析

同样，我们对锅炉系统和太阳能热水器系统在整个生命周期过程中的 NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> 和 TSP 排放分配情况进行了汇总，结果如图 6-3, 6-4 和 6-5 所示。

由图 6-3 可以看出，导致锅炉系统 NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> 和 TSP 排放的关键环节都是煤的燃烧，而其他过程中钢材的生产过程所占比例明显高于其他过程，然后是锅炉房水泥的生产过程排放了部分 NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> 和 TSP。与以上过程相比，运输、锅炉房建设、其他建材生产等阶段的大气污染物排放可以忽略不计。

图 6-3 锅炉系统整个生命周期  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$  和 TSP 排放分配图 6-4 太阳能热水器系统整个生命周期  $\text{NO}_x$  和  $\text{SO}_2$  排放分配

由图 6-4 和 6-5 可以看出，在太阳能热水器系统整个生命周期过程中导致  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$  和 TSP 排放的关键环节依然是钢、铜的生产。

在  $\text{SO}_2$  的排放分配中，铜的生产占了 59.1%，而钢的生产占了 36.5%，系统制造占了 3.1%，其他材料如玻璃、塑料和绝热材料的生产所排放的  $\text{SO}_2$  所占比例较小，总共占 1.2% 左右，运输过程也排放了部分  $\text{SO}_2$ ，但所占比例非常小，不到 1%。

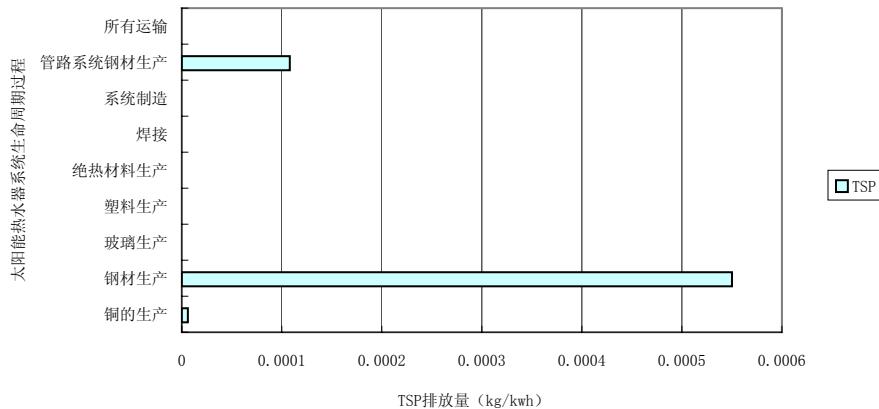


图 6-5 太阳能热水器系统整个生命周期 TSP 排放分配

在  $\text{NO}_x$  的排放分配中，铜的生产也占了相当大的比例，为 61.9%，而钢的生产占了 30.8%，系统制造占了 3.6%，其他材料如玻璃、塑料和绝热材料的生产所排放的  $\text{CO}_2$  所占比例为 3.5% 左右，运输过程也排放了部分  $\text{SO}_2$ ，但所占比例非常小，不到 0.2%。

在 TSP 的排放分配中，钢的生产占了绝大部分比例，近 99%，铜、玻璃、塑料等其他材料的生产过程中排放了极少量的 TSP，不到 1%。

## 第七章 结论和建议

LCA 方法是对产品、系统或活动的生命周期过程中对环境产生的影响进行全面、综合的考察，以提高资源和能源的利用率，削减对环境的污染和破坏的一种具有可持续发展意义的新方法。本论文通过大量查阅国内外文献和资料以及大量调研，以现有的 LCA 方法的原则和技术框架为基础，对 JPCY-100 型真空管太阳能热水器系统和天津市南开区四纬路延生里 DZL7-1-95/70A II 型燃煤锅炉系统整个生命周期从原材料的制造到系统建设、系统运行甚至废弃处理的全过程进行了详细分析，获得了两个系统生命周期评价的清单数据，并且应用 TRACI 模型和 AHP 方法从环境效益、经济效益和技术性能比较了两个系统的综合效益，从而为环境政策决策者提供借鉴，为企业环境管理者提供行为改善依据。同时，本论文还对太阳能热水器单体进行了改善评价，对其在改善环境空气质量方面的效果进行了详细分析，希望能够为可再生能源的推广应用起到一定的促进作用，为太阳能热水器的设计者提供产品改进的方法参考。

### 7.1 研究结果和结论

本论文立足于一种全新的角度，应用 LCA 方法并结合 TRACI 模型和 AHP 方法，对太阳能热水器系统和燃煤锅炉系统从整个生命周期过程进行了综合效益的评价。研究过程中得出的主要结论如下：

- (1) 锅炉系统导致环境污染的关键环节是运行过程中煤的燃烧，而太阳能热水器系统导致环境污染的关键环节是制造过程中原材料的生产，尤其是铜、钢的生产。
- (2) 数据统计分析表明，燃煤锅炉在运行过程中持续性排放大量的 CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> 和 TSP，严重污染环境，使得其酸化、富营养化、全能耗、全球变暖、标准大气污染物和光化学氧化物指标明显偏高。而太阳能热水器系统在原材料铜的生产过程中向水体排放了铜、铅、锌、镉、砷等重金属元素，使得其生态毒性、致癌和非致癌指标明显高于锅炉系统，但这种排放只是产品制造过程中的暂时性排放，而非持续性排放。
- (3) 在 LCA 影响评价中应用 AHP 方法进行权重分析时，决策者可以有不同

的侧重点。当更注重环境效益时，太阳能热水器系统和锅炉系统的权重分别为 0.6368 和 0.3632，此时太阳能热水器系统的综合效益明显优于锅炉系统的综合效益；而侧重经济效益时，太阳能热水器系统和锅炉系统的权重分别为 0.4768 和 0.5232，此时太阳能热水器系统的综合效益稍差于锅炉系统的综合效益，其主要原因是由于太阳能热水器系统的单位产品投资额明显高于锅炉系统。

(4) LCA 方法是一种注重全过程的评价，涉及产品或行为的从原材料采集、加工、产品制造、使用消费、回收利用到废物处理全“生命周期”，所以，通过大量数据分析可以看出哪个过程是造成系统环境影响的关键。对 JPCY-100 型真空管太阳能热水器单体的分析表明：太阳能热水器整个生命周期过程中原材料生产所产生的环境影响占整个生命周期的 93%，尤其是铜、钢的生产分别占 66% 和 26%，玻璃的生产占了 1%；此外，电的消耗、焊接和产品制造分别占 3%，2% 和 2%。对锅炉的分析表明：在锅炉整个生命周期过程中，运行/维护阶段所产生的环境影响占了绝大部分，主要是煤的燃烧；与煤的燃烧过程相比，其他生命周期过程产生的环境影响相对较小。由此得出结论，要改进太阳能热水器系统的环境效益，最根本的方法是改用更加环境友好的产品制造材料，而改进燃煤锅炉系统环境效益最根本的方法是采用清洁煤技术。

(5) 太阳能热水器系统在改善环境空气质量方面的效果是非常显著的。数据分析表明，锅炉系统每产生 1kWh 能量分别产生 411.75gCO<sub>2</sub>、11.48gNO<sub>x</sub>、4.89gSO<sub>2</sub> 和 28.03gTSP，而太阳能热水器系统每产生 1kWh 能量分别产生 31.66gCO<sub>2</sub>、0.10gNO<sub>x</sub>、0.27gSO<sub>2</sub> 和 0.66gTSP，分别为锅炉系统的 1/13、1/115、1/18 和 1/42。以天津地区为例，每安装 1m<sup>2</sup> 集热器代替燃煤锅炉系统在一个生命周期内可以净减排 5022.05kgCO<sub>2</sub>、150.36kgNO<sub>x</sub>、61.04kgSO<sub>2</sub> 和 361.63kgTSP，节煤 2.71t。

## 7.2 研究过程中的问题与建议

在本论文研究过程中，应用 LCA 方法对两个系统的综合效益进行评价还是初次尝试，所以存在很多不足和问题值得深入研究和探讨。

(1) 在确定系统边界时，由于时间有限，本论文没有考虑系统废弃处理时的环境影响。对于太阳能热水器和燃煤锅炉这两个系统来说，大部分废弃物可以回收利用，需要考虑回收利用率以及环境影响的分配问题，比较复杂。希望在该课

题的下一步研究中能够将废弃处理阶段进行深入探讨。

(2) 在数据收集及调研过程中，由于相关文献在统计数据时时间、地点、方法等不同而导致本论文数据匹配并不一致。另外，某些数据是通过经验计算、估计等方法获得，带有一定的主观性。

(3) TRACI 模型是美国环保局最新开发成功的 LCA 评价模型，其中的数据除了某些全球性数据以外，其它都是基于美国的国情基础上研究而得的，带有一定的地域性。从理论上讲，将该模型直接应用于我国有一定的偏差，但据专家估计，该偏差较小，从应用的角度来讲，问题不会太大。另外，该模型的数据库还有待深入研究和开发，某些化学污染物还没有被列入数据库，导致本论文研究过程中个别清单数据的环境影响没有统计在内。

(4) 应用 AHP 方法比较确定各影响因子的权重还是初次尝试，由于时间有限，本论文研究过程中只比较分析了 4 位专家的评价结果，结合作者本人对环境影响因子的理解最终给出了影响因子判断矩阵。评价结果可能带有一定的主观性。希望在以后的研究中能够更加深入理解各影响因子的意义，给出更加合理、更加客观的权重。

## 参考文献

- [1]GB T24040. 环境管理—生命周期评价原则和框架. 北京: 中国标准出版社, 1999
- [2]邓南圣, 吴峰主编. 工业生态学-理论与应用. 北京: 化学工业出版社, 2002
- [3]杨建新, 王如松. 生命周期评价的回顾与展望. 环境科学进展. 1998, 6 (2): 21~28
- [4]霍李江. 生命周期评价 (LCA) 综述. 中国包装. 2003, 23 (1): 42~46
- [5]EPA. Guidelines for Assessing the Quality of Life-Cycle Inventory Analysis. EPA530-R-95-010, PB95-191: 235, 1993
- [6]王毅, 魏江, 徐庆瑞. 生命周期评价的应用、内涵与挑战. 环境导报. 1998, 5: 27~29
- [7]孙启宏, 万年青, 范与华. 国外生命周期评价 (LCA) 研究综述. 世界标准化与质量管理. 2000, (12): 24~25, 31
- [8]GB T24041. 环境管理-生命周期评价-目的与范围的确定和清单分析. 北京: 中国标准出版社, 2000
- [9]熊文强, 郭孝菊, 洪卫编. 绿色环保与清洁生产概论. 北京: 化学工业出版社, 2002
- [10]肖晓, 黄可龙. 生命周期评价 (LCA) 与生态环境材料的开发. 材料导报. 2000, 14 (11): 23
- [11]王学军, 何炳光, 赵鹏高编著. 清洁生产概论. 北京: 中国检察出版社, 2000
- [12]王寿兵, 杨建新, 胡聃. 生命周期评价方法及其进展. 上海环境科学. 1998, 17 (11): 9
- [13]Franklin Associates, Ltd.. Energy and Environmental Profile Analysis of Children's Disposable and Cloth Diapers. Report Prepared for the American Paper Institute's Diaper Manufacturers's Group, Prairie Village, KS, July 1990
- [14]Hocking, Martin B. Paper versus Polystyrene. Science, 251, 504 ~ 505(February 1991)
- [15]Svoboda S. and S. Hart. McDonald's Environmental Strategy. National Pollution Prevention Center for Higher Education, Ann Arbor, MI, doc. 93~3,

December 1993

- [16] Mary Ann Curran. Environmental Life Cycle Assessment. The United States of America McGraw-Hill Companies, Inc., 1996. Chapter 5. David Allen. Application of the Life-Cycle Assessment, P1~16
- [17] 孙启宏. 生命周期评价在清洁生产领域的应用前景. 环境科学研究. 2000, 15 (4): 5
- [18] 刘顺妮, 林宗寿. 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
- [19] 徐成, 胡聃. 城市生活垃圾的生命周期管理. 中国环境科学. 1999, 9 (2): 56~60
- [20] 徐成 杨建新. 广汉市生活垃圾生命周期评价. 环境科学学报. 1999, 19(6): 631~635
- [21] 刘丽孺, 毛建素, 王晓华等. 生命周期评价及其在废物管理中的应用. 沈阳建筑工程学报 (自然科学版). 2002, 18 (1): 54~56
- [22] 王小兵, 邓南圣, 孙旭军. 建筑物生命周期评价初步. 环境科学与技术. 2002, 25 (4): 18~20
- [23] 张旭. 基于生命周期分析的建筑物能耗评价方法. 制冷空调与电力机械. 2002, 23 (4) 1~3, 27
- [24] 李蓓蓓. 绿色包装的评价手段—生命周期评价法. 包装工程. 2002, 23 (4): 150~152
- [25] 陈士明, 刘正乾. 塑料与纸包装材料的生命周期评价研究. 南京航空工业学院学报. 2000, 14 (3)
- [26] 杨建新, 刘炳江. 中国钢材生命周期清单分析. 环境科学学报. 2002, 7, 22 (4): 519~522
- [27] 杨健, 俞庭康. AB 活性污泥法的生命周期能耗分析. 环境污染与防治. 2002, 24 (6): 357~360
- [28] 卫振林, 申金升. 生命周期评价法在城市交通方式选择中的应用. 城市公用事业. 1998, 12 (4): 10~12
- [29] 郑元, 桂萌. 生命周期分析在能源技术比较中的应用. 上海环境科学. 2000, 19 (8): 358~360
- [30] 王寿兵, 杨建新, 胡聃. 生态标志和产品的生命周期评价. 上海环境科学.

- 1999, 18 (1): 10~12
- [31]US EPA, Life-Cycle Assessment: Inventory Guidelines and Principles, Washington, D.C.: 1993
- [32]方荣生,项立成,李亭寒等编. 太阳能应用技术. 中国农业机械出版社. 1985
- [33]朱俊生. 世界新能源和可再生能源发展. 太阳能. 2001, (4): 2~4
- [34]国家环境保护局科技标准司. 工业污染物产生和排放系数手册. 中国环境科学出版社, 1996
- [35]茆令文. 重视环境保护促进玻璃工业可持续发展. 中国玻璃. 2001, 2: 13~16
- [36]陈敏. 建材工业能源消耗及温室气体排放(三). 中国建材. 1994, 11: 17~19
- [37]陈敏. 平板玻璃产品能耗对比研究. 建筑玻璃与工业玻璃. 1997, 4: 5~7
- [38]王承瑜, 陶瑛. 玻璃工业对环境的污染和防治(八). 玻璃与搪瓷. 2001, 29 (3): 61~63
- [39]S.MIRASGEDIS,D.DIAKOULAKI and D.ASSIMACOPOULOS, Solar energy and the abatement of atmospheric emmissions, Renewable Energy, Vol 7, No.4, 1996: 329~338
- [40][日]山本良一编著, 王天民译. 环境材料. 北京: 化学工业出版社, 1997
- [41]王伯光, 张远航, 祝昌健等. 城市机动车排放因子隧道试验研究. 环境科学, 2001, 22 (2): 55~59
- [42]W.F.OWEN. 污水处理能耗和能效[M]. 北京: 能源出版社, 1989
- [43]吴芳谷, 吕琳等. 装焊车间焊接烟尘的危害及治理. 安全. 2002, 23(4): 9~11
- [44]刘和平. 焊接烟尘的危害及其防治措施. 机械工人(热加工). 2001(5): 23~25
- [45]曹雁来. 治理彩色钢板油漆烟雾污染的可行性研究. 武钢技术. 1992(11): 22~25
- [46]张晓鸣. 住宅建筑污染物排放量及排污费的计算方法. 环境保护科学. 1996 (22) 64~66
- [47]赵培森, 竺士文, 赵炳文主编. 建筑给排水·暖通空调·设备安装手册. 中国建筑工业出版社, 1997

- [48]李蓓蓓. 生命周期评价—清单分析方法探讨. 上海环境科学. 2002, 21 (5): 308~310
- [49]湛轩业, 朱雅丽, 李密芳. 建筑粘土制品工业烟气排放过程中的有害气体污染物及其控制(一). 砖瓦. 1998(6): 9~12
- [50]蒋忠良, 李为群. 大气污染源砖瓦厂的排氟量计算. 浙江丝绸工学院学报. 1990, 7(2): 63~68
- [51]罗通秀. 谈沥青煮砖烟气污染的治理. 长城技术. 1990(4): 54~58
- [52]叶运烈, 易玲莉编著. 建设工程概预算管理简明手册. 北京: 中国计划出版社, 1994
- [53]朱志杰, 陈心一等编著. 建筑安装工程概预算师手册. 北京: 中国计划出版社, 1993
- [54]刘江龙著. 环境材料导论. 冶金工业出版社, 1999
- [55]张希舜, 张庆功, 吕雷等. 建筑施工综合环保技术. 山东建筑工程学院学报. 1999 (14): 29~33
- [56]吕世洁, 赵成发, 刘树茂等主编. 采暖通风·空气调节·制冷净化·设备材料手册. 农业部第二设计院出版社, 1980
- [57]Jane C. Bare, Gregory A. Norris, David W. Pennington, and Thomas McKone, TRACI: The Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts, Journal of Industrial Ecology, The MIT Press Journals, 2003(6): 49~78
- [58]陶燕瑜, 张宜松主编. 工程技术经济. 重庆: 重庆大学出版社, 2002
- [59]Saaty , T.L..The Analytical Hierarchy Process:Planning, Priority Setting, Resource Allocation, McGraw-Hill, New York, 1980
- [60]王莲芬, 许树柏编著. 层次分析法引论. 北京: 中国人民大学出版社, 1990
- [61]刘文强. 我国太阳能热水器产业发展现状及展望. 可再生能源. 2002, 4: 4
- [62]袁磊. 住宅中太阳能热水器的应用及一体化设计: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2001
- [63]殷志强. 我国太阳能热水器发展探讨. 太阳能. 2000, 4: 2~4
- [64]胡鞍钢, 吕永龙主编. 能源与发展-全球化条件下的能源与环境政策. 北京: 中国计划出版社, 2001

## 发表论文和参加科研情况说明

本人在天津大学攻读硕士学位期间参加的科研项目主要有：

- (1) 2002,3-2002,5 参加天津市津岛协力公司油烟净化机的研究开发项目，主要负责油烟净化机的试验与优化设计；
- (2) 2002,5-2002,6 参加河北省石家庄市中润制药厂生物脱臭研究项目，主要负责生物脱臭塔的优化设计与制图；
- (3) 2002,5,20-2002,5-25 参加由欧盟与中国科技部联合组织的中欧能源管理培训，培训内容为全球气候变化、当代气候改变政策、京都议定书的责任与义务，排放权交易、清洁发展机制、清洁技术、清洁生产审计等等，为期一周；
- (4) 2002,12-现在 参加中国铁道科学研究院铁路系统清洁生产项目，主要负责国外清洁生产新技术的引进工作；
- (5) 2002,7—现在 在环境无害化技术转移中心北方分中心实习，学习清洁生产、环境管理等方面工作。

发表的论文有：

- (1) 论文《Benchmarking 及其在环境管理中的应用》，在 2002 年海峡两岸环境保护学术研讨会论文集上发表，获 2003 年华北五省市环境科学学会学术年会优秀论文一等奖，并且已经被《环境保护科学》录用，将于 2004 年 1 月在该杂志上发表；
- (2) 2003 年 8 月，在国际水质协会（IWA）“Water in China”专刊上发表论文“Rationally Constructing Small-scale Wastewater Treatment Plant to Raise the Regional Treatment Ratio of Wastewater”，主要论述在中小城镇建立污水处理厂的重要性并且在文章中用层次分析法对污水处理工艺进行了优选。

## 附录

## 附录

## 附录 1 太阳能热水器系统数据汇总

Product Name	Life Cycle Stage	Process Name	Resource/Release	MEDIA	Quantity	UOM	Impact Type	Characteriz -ation	Factor Measure	系统数据汇总
										Result
Essential Auxiliaries of SWHs	Materials Manufacturing	steel manufacturing	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	33.597422	kg	Acidification	2965.7178	moles H+ equiv	2965.7178
Essential Auxiliaries of SWHs	Materials Manufacturing	steel manufacturing	HYDROGEN CHLORIDE	Air	1.835268	kg	Acidification	180.83821	moles H+ equiv	180.83821
Essential Auxiliaries of SWHs	Materials Manufacturing	steel manufacturing	SO2	Air	107.101	kg	Acidification	11992.274	moles H+ equiv	11992.274
Essential Auxiliaries of SWHs	Raw Materials Acquisition	Transportation	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	17.934	g	Acidification	1.5830734	moles H+ equiv	1.5830734
Essential Auxiliaries of SWHs	Raw Materials Acquisition	Transportation	SO2	Air	1.386	g	Acidification	0.1551927	moles H+ equiv	0.1551927
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	copper manufacture	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	1.4798	kg	Acidification	130.62518	moles H+ equiv	36284.773
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	copper manufacture	SO2	Air	3.797206	kg	Acidification	425.17935	moles H+ equiv	118105.38
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	glass manufacturing	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	0.0132295	kg	Acidification	1.1677951	moles H+ equiv	324.38752
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	glass manufacturing	SO2	Air	0.0221276	kg	Acidification	2.4776635	moles H+ equiv	688.23987
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	insulating materials manufacturing	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	0.0559146	kg	Acidification	4.9357023	moles H+ equiv	1371.0284
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	insulating materials manufacturing	SO2	Air	0.0458717	kg	Acidification	5.1363258	moles H+ equiv	1426.7572
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	Plastic manufacturing	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	0.015	kg	Acidification	1.3240827	moles H+ equiv	367.80076
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	Plastic manufacturing	SO2	Air	0.009	kg	Acidification	1.0077447	moles H+ equiv	279.92907
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	steel manufacturing	HYDROGEN CHLORIDE	Air	0.0336	kg	Acidification	3.3107772	moles H+ equiv	919.66033
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	steel manufacturing	SO2	Air	1.9608	kg	Acidification	219.55399	moles H+ equiv	60987.218
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	steel manufacturing	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	0.6151	kg	Acidification	54.296219	moles H+ equiv	15082.283
Solar Water Heater	Product Fabrication	system construction	SO2	Air	0.198	kg	Acidification	22.170383	moles H+ equiv	6158.4398
Solar Water Heater	Product Fabrication	system construction	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	0.08604	kg	Acidification	7.5949388	moles H+ equiv	2109.7052

## 附录

Solar Water Heater	Raw Materials Acquisition	Transportation	SO2	Air	0.28	g	Acidification	0.0313521 moles H+ equiv	8.708905
Solar Water Heater	Raw Materials Acquisition	Transportation	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	3.639	g	Acidification	0.3212225 moles H+ equiv	89.228468
Solar Water Heater	Filling/Packaging/Distribution	Transportation	SO2	Air	0.0375	g	Acidification	0.0041989 moles H+ equiv	1.1663712
Solar Water Heater	Filling/Packaging/Distribution	Transportation	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	0.485	g	Acidification	0.042812 moles H+ equiv	11.892225
Solar Water Heater	Product Fabrication	welding	NITROGEN OXIDE (NO2)	Air	0.2025	G	Acidification	0.0178751 moles H+ equiv	4.9653106
Solar Water Heater	Product Fabrication	welding	HYDROFLUORIC ACID	Air	0.045	G	Acidification	0.008062 moles H+ equiv	2.2394327
<b>Acidification 汇总</b>									259364.3
7									
Essential Auxiliaries of SWHs	Materials Manufacturing	steel manufacturing	HYDROXYBENZENE	Water	0.0105	kg	Ecotoxicity	0.0215279 lbs 2,4-D equiv	0.0215279
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	copper manufacture	CADMIUM	Water	0.0003371	kg	Ecotoxicity	0.0341879 lbs 2,4-D equiv	9.4966332
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	copper manufacture	ARSENIC	Water	0.0035819	kg	Ecotoxicity	0.0181623 lbs 2,4-D equiv	5.0450861
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	copper manufacture	COPPER	Water	0.0130781	kg	Ecotoxicity	1.441599 lbs 2,4-D equiv	400.44417
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	copper manufacture	ZINC	Water	0.0080625	kg	Ecotoxicity	0.0163525 lbs 2,4-D equiv	4.5423722
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	copper manufacture	LEAD	Water	0.001911	kg	Ecotoxicity	0.0005477 lbs 2,4-D equiv	0.1521358
Solar Water Heater	Product Fabrication	painting	BENZENE	Air	0.02	kg	Ecotoxicity	1.323E-07 lbs 2,4-D equiv	3.674E-05
Solar Water Heater	Product Fabrication	painting	TOLUENE	Air	0.08	kg	Ecotoxicity	7.937E-07 lbs 2,4-D equiv	0.0002205
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	steel manufacturing	HYDROXYBENZENE	Water	0.0001922	kg	Ecotoxicity	0.0003941 lbs 2,4-D equiv	0.1094811
Solar Water Heater	Product Fabrication	welding	CHLOROETHYLENE	Air	0.675	G	Ecotoxicity	2.976E-10 lbs 2,4-D equiv	8.267E-08
<b>Ecotoxicity 汇总</b>									419.81166
Essential Auxiliaries of SWHs	Materials Manufacturing	steel manufacturing	BIOLOGICAL OXYGEN DEMAND	Water	0.0105	kg	Eutrophication	0.0011574 kg N	0.0011574
Essential Auxiliaries of SWHs	Materials Manufacturing	steel manufacturing	CHEMICAL OXYGEN DEMAND	Water	0.5922	kg	Eutrophication	0.0652782 kg N	0.0652782
Essential Auxiliaries of SWHs	Materials Manufacturing	steel manufacturing	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	33.597422	kg	Eutrophication	3.2805104 kg N	3.2805104
Essential Auxiliaries of SWHs	Raw Materials Acquisition	Transportation	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	17.934	g	Eutrophication	0.0017511 kg N	0.0017511
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	copper manufacture	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	1.4798	kg	Eutrophication	0.1444902 kg N	40.136178
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	glass manufacturing	BIOLOGICAL OXYGEN DEMAND	Water	0.000113	kg	Eutrophication	1.246E-05 kg N	0.0034598
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	glass manufacturing	CHEMICAL OXYGEN DEMAND	Water	0.0001883	kg	Eutrophication	2.076E-05 kg N	0.0057663

## 附录

Solar Water Heater	Materials Manufacturing	glass manufacturing	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	0.0132295 kg	Eutrophication	0.0012917 kg N	0.3588193
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	insulating materials manufacturing	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	0.0559146 kg	Eutrophication	0.0054596 kg N	1.5165546
Solar Water Heater	Filling/Packaging/Distribution	Paper production	BIOLOGICAL OXYGEN DEMAND	Water	1.773 kg	Eutrophication	0.1954378 kg N	54.288275
Solar Water Heater	Filling/Packaging/Distribution	Paper production	CHEMICAL OXYGEN DEMAND	Water	0.46485 kg	Eutrophication	0.0512404 kg N	14.233448
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	Plastic manufacturing	BIOLOGICAL OXYGEN DEMAND	Water	0.00015 kg	Eutrophication	1.653E-05 kg N	0.0045929
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	Plastic manufacturing	CHEMICAL OXYGEN DEMAND	Water	0.0003 kg	Eutrophication	3.307E-05 kg N	0.0091858
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	Plastic manufacturing	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	0.015 kg	Eutrophication	0.0014646 kg N	0.4068406
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	steel manufacturing	BIOLOGICAL OXYGEN DEMAND	Water	0.0001922 kg	Eutrophication	2.119E-05 kg N	0.0058861
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	steel manufacturing	CHEMICAL OXYGEN DEMAND	Water	0.010842 kg	Eutrophication	0.0011951 kg N	0.3319751
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	steel manufacturing	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	0.6151 kg	Eutrophication	0.0600594 kg N	16.683176
Solar Water Heater	Product Fabrication	system construction	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	0.08604 kg	Eutrophication	0.0084011 kg N	2.3336375
Solar Water Heater	Raw Materials Acquisition	Transportation	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	3.639 g	Eutrophication	0.0003553 kg N	0.0986995
Solar Water Heater	Filling/Packaging/Distribution	Transportation	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	0.485 g	Eutrophication	4.736E-05 kg N	0.0131545
Solar Water Heater	Product Fabrication	welding	NITROGEN OXIDE (NO2)	Air	0.2025 G	Eutrophication	1.977E-05 kg N	0.0054923
<b>Eutrophication 汇总</b>								133.78384
Essential Auxiliaries of SWHs	Use/Reuse/Maintenance	electricity consumption	OIL	No Media	486000 MJ	Fossil Fuel	69984 MJ	69984
Essential Auxiliaries of SWHs	Materials Manufacturing	steel manufacturing	OIL	No Media	118965 MJ	Fossil Fuel	17130.961 MJ	17130.961
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	copper manufacture	OIL	No Media	1097.6 MJ	Fossil Fuel	158.0544 MJ	43903.999
Solar Water Heater	Use/Reuse/Maintenance	electricity consumption	OIL	No Media	1749.6 MJ	Fossil Fuel	251.9424 MJ	69983.999
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	glass manufacturing	OIL	No Media	45.5 MJ	Fossil Fuel	6.552 MJ	1820
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	Plastic manufacturing	OIL	No Media	72.978 MJ	Fossil Fuel	10.508832 MJ	2919.12
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	steel manufacturing	OIL	No Media	2178.006 MJ	Fossil Fuel	313.63287 MJ	87120.243
Solar Water Heater	Raw Materials Acquisition	Transportation	OIL	No Media	15.647 MJ	Fossil Fuel	2.2531681 MJ	625.88003
Solar Water Heater	Filling/Packaging/Distribution	Transportation	OIL	No Media	2.086 MJ	Fossil Fuel	0.300384 MJ	83.440004
<b>Fossil Fuel 汇总</b>								293571.64

## 附录

											293571.64×0.047/0.144=95818.52218
Essential Auxiliaries of SWHs	Materials Manufacturing	steel manufacturing	METHANE	Air	37.814169 kg	Global Warming	1917.3977	kg CO2	1917.3977		
Essential Auxiliaries of SWHs	Materials Manufacturing	steel manufacturing	CARBON DIOXIDE	Air	17219.998 kg	Global Warming	37963.207	kg CO2	37963.207		
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	Copper manufacture	CARBON DIOXIDE	Air	325.4923 kg	Global Warming	717.58032	kg CO2	199327.87		
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	glass manufacturing	CARBON DIOXIDE	Air	4.61384 kg	Global Warming	10.171672	kg CO2	2825.4644		
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	insulating materials manufacturing	CARBON DIOXIDE	Air	6.6147491 kg	Global Warming	14.582876	kg CO2	4050.7989		
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	Plastic manufacturing	CARBON DIOXIDE	Air	1.41 kg	Global Warming	3.1084859	kg CO2	863.46832		
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	steel manufacturing	METHANE	Air	0.6923 kg	Global Warming	35.103626	kg CO2	9751.0073		
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	steel manufacturing	CARBON DIOXIDE	Air	315.2629 kg	Global Warming	695.02856	kg CO2	193063.49		
Solar Water Heater	Product Fabrication	System construction	CARBON DIOXIDE	Air	37.26 kg	Global Warming	82.143394	kg CO2	22817.61		
Solar Water Heater	Product Fabrication	welding	CARBON DIOXIDE	Air	202.5 G	Global Warming	0.4464315	kg CO2	124.00875		
						<b>Global Warming 汇总</b>					472704.32
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	Copper manufacture	ARSENIC	Water	0.0035819 kg	Human Health Cancer	6.4409943 lbs C6H6 equiv	1789.1651			
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	Copper manufacture	CADMIUM	Water	0.0003371 kg	Human Health Cancer	0 lbs C6H6 equiv	0			
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	Copper manufacture	LEAD	Water	0.001911 kg	Human Health Cancer	0.0107761 lbs C6H6 equiv	2.9933678			
Solar Water Heater	Product Fabrication	painting	BENZENE	Air	0.02 kg	Human Health Cancer	0.044092 lbs C6H6 equiv	12.247778			
Solar Water Heater	Product Fabrication	welding	CHLOROETHYLENE	Air	0.675 G	Human Health Cancer	0.0021925 lbs C6H6 equiv	0.6090361			
Solar Water Heater	Product Fabrication	welding	LEAD COMPOUNDS	Air	0.0252 G	Human Health Cancer	0.0019703 lbs C6H6 equiv	0.5473065			
Solar Water Heater	Product Fabrication	welding	CHROMIUM COMPOUNDS	Air	0.2736 G	Human Health Cancer	0.1009388 lbs C6H6 equiv	28.038546			
						<b>Human Health Cancer 汇总</b>					1833.6011
Essential Auxiliaries of SWHs	Materials Manufacturing	steel manufacturing	SO2	Air	107.101 kg	Human Health Criteria	3.2838924 total DALYs	3.2838924			
Essential Auxiliaries of SWHs	Materials Manufacturing	steel manufacturing	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	33.597422 kg	Human Health Criteria	0.1638878 total DALYs	0.1638878			
Essential Auxiliaries of SWHs	Materials Manufacturing	steel manufacturing	TSP	Air	714.0012 kg	Human Health Criteria	72.245079 total DALYs	72.245079			
Essential Auxiliaries of SWHs	Raw Materials Acquisition	Transportation	PM10	Air	19.551 g	Human Health Criteria	0.0035968 total DALYs	0.0035968			
Essential Auxiliaries of SWHs	Raw Materials Acquisition	Transportation	SO2	Air	1.386 g	Human Health Criteria	4.25E-05 total DALYs	4.25E-05			
Essential Auxiliaries of SWHs	Raw Materials Acquisition	Transportation	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	17.934 g	Human Health Criteria	8.748E-05 total DALYs	8.748E-05			
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	Copper manufacture	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	1.4798 kg	Human Health Criteria	0.0072184 total DALYs	2.0051242			
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	Copper manufacture	SO2	Air	3.797206 kg	Human Health Criteria	0.1164286 total DALYs	32.341269			

## 附录

Solar Water Heater	Materials Manufacturing	Copper manufacture	TSP	Air	0.129752 kg	Human Health Criteria	0.0131288	total DALYs	3.646875
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	glass manufacturing	SO2	Air	0.0221276 kg	Human Health Criteria	0.0006785	total DALYs	0.1884635
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	glass manufacturing	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	0.0132295 kg	Human Health Criteria	6.453E-05	total DALYs	0.0179259
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	glass manufacturing	TSP	Air	0.004543 kg	Human Health Criteria	0.0004597	total DALYs	0.1276878
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	insulating materials manufacturing	SO2	Air	0.0458717 kg	Human Health Criteria	0.0014065	total DALYs	0.3906946
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	insulating materials manufacturing	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	0.0559146 kg	Human Health Criteria	0.0002728	total DALYs	0.0757641
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	Plastic manufacturing	TSP	Air	0.003 kg	Human Health Criteria	0.0003036	total DALYs	0.0843195
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	Plastic manufacturing	SO2	Air	0.009 kg	Human Health Criteria	0.000276	total DALYs	0.0766541
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	Plastic manufacturing	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	0.015 kg	Human Health Criteria	7.317E-05	total DALYs	0.020325
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	steel manufacturing	SO2	Air	1.9608 kg	Human Health Criteria	0.0601213	total DALYs	16.700374
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	steel manufacturing	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	0.6151 kg	Human Health Criteria	0.0030005	total DALYs	0.8334585
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	steel manufacturing	TSP	Air	13.0719 kg	Human Health Criteria	1.3226595	total DALYs	367.40541
Solar Water Heater	Product Fabrication	System construction	SO2	Air	0.198 kg	Human Health Criteria	0.006071	total DALYs	1.6863903
Solar Water Heater	Product Fabrication	System construction	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	0.08604 kg	Human Health Criteria	0.0004197	total DALYs	0.1165839
Solar Water Heater	Raw Materials Acquisition	Transportation	PM10	Air	3.98 g	Human Health Criteria	0.0007322	total DALYs	0.2033889
Solar Water Heater	Raw Materials Acquisition	Transportation	SO2	Air	0.28 g	Human Health Criteria	8.585E-06	total DALYs	0.0023848
Solar Water Heater	Raw Materials Acquisition	Transportation	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	3.639 g	Human Health Criteria	1.775E-05	total DALYs	0.0049308
Solar Water Heater	Filling/Packaging/Distribution	Transportation	PM10	Air	0.53 g	Human Health Criteria	9.75E-05	total DALYs	0.0270844
Solar Water Heater	Filling/Packaging/Distribution	Transportation	SO2	Air	0.0375 g	Human Health Criteria	1.15E-06	total DALYs	0.0003194
Solar Water Heater	Filling/Packaging/Distribution	Transportation	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	0.485 g	Human Health Criteria	2.366E-06	total DALYs	0.0006572
						<b>Human Health Criteria</b>	汇总		501.65268
Essential Auxiliaries of SWHs	Materials Manufacturing	steel manufacturing	SO2	Air	107.101 kg	Human Health Noncancer	0.1751167	lbs C7H7 equiv	0.1751167
Essential Auxiliaries of SWHs	Materials Manufacturing	steel manufacturing	HYDROGEN SULPHIDE (H2S)	Air	0.1827075 kg	Human Health Noncancer	0.0204331	lbs C7H7 equiv	0.0204331
Essential Auxiliaries of SWHs	Materials Manufacturing	steel manufacturing	HYDROXYBENZENE	Water	0.0105 kg	Human Health Noncancer	0.0001245	lbs C7H7 equiv	0.0001245
Essential Auxiliaries of SWHs	Materials Manufacturing	steel manufacturing	HYDROGEN CHLORIDE	Air	1.835268 kg	Human Health Noncancer	1.570335	lbs C7H7 equiv	1.570335
Essential Auxiliaries of SWHs	Materials Manufacturing	steel manufacturing	AMMONIA	Water	2.078878 kg	Human Health Noncancer	0.270304	lbs C7H7 equiv	0.270304
Essential Auxiliaries of SWHs	Raw Materials Acquisition	Transportation	SO2	Air	1.386 g	Human Health Noncancer	2.266E-06	lbs C7H7 equiv	2.266E-06
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	copper manufacture	ARSENIC	Water	0.0035819 kg	Human Health Noncancer	406.76703	lbs C7H7 equiv	112990.84

## 附录

Solar Water Heater	Materials Manufacturing	copper manufacture	CADMIUM	Water	0.0003371	kg Human Health Noncancer	267.11081	lbs C7H7 equiv	74197.447
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	copper manufacture	SO2	Air	3.797206	kg Human Health Noncancer	0.0062087	lbs C7H7 equiv	1.7246292
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	copper manufacture	ZINC	Water	0.0080625	kg Human Health Noncancer	0.6320978	lbs C7H7 equiv	175.58272
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	copper manufacture	LEAD	Water	0.001911	kg Human Health Noncancer	458.29654	lbs C7H7 equiv	127304.59
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	copper manufacture	COPPER	Water	0.0130781	kg Human Health Noncancer	497.85562	lbs C7H7 equiv	138293.23
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	glass manufacturing	SO2	Air	0.0221276	kg Human Health Noncancer	3.618E-05	lbs C7H7 equiv	0.01005
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	insulating materials manufacturing	SO2	Air	0.0458717	kg Human Health Noncancer	7.5E-05	lbs C7H7 equiv	0.0208342
Solar Water Heater	Product Fabrication	painting	ETHYL ACETATE	Air	0.04	kg Human Health Noncancer	0.0107531	lbs C7H7 equiv	2.9869784
Solar Water Heater	Product Fabrication	painting	BENZENE	Air	0.02	kg Human Health Noncancer	0.7309403	lbs C7H7 equiv	203.03898
Solar Water Heater	Product Fabrication	painting	TOLUENE	Air	0.08	kg Human Health Noncancer	0.176368	lbs C7H7 equiv	48.991111
Solar Water Heater	Product Fabrication	painting	XYLENE	Air	0.04	kg Human Health Noncancer	0.0205964	lbs C7H7 equiv	5.721215
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	Plastic manufacturing	SO2	Air	0.009	kg Human Health Noncancer	1.472E-05	lbs C7H7 equiv	0.0040877
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	steel manufacturing	SO2	Air	1.9608	kg Human Health Noncancer	0.003206	lbs C7H7 equiv	0.8905635
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	steel manufacturing	HYDROGEN SULPHIDE (H2S)	Air	0.003345	kg Human Health Noncancer	0.0003741	lbs C7H7 equiv	0.1039136
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	steel manufacturing	HYDROXYBENZENE	Water	0.0001922	kg Human Health Noncancer	2.28E-06	lbs C7H7 equiv	0.0006334
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	steel manufacturing	HYDROGEN CHLORIDE	Air	0.0336	kg Human Health Noncancer	0.0287496	lbs C7H7 equiv	7.9860052
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	steel manufacturing	AMMONIA	Water	0.03806	kg Human Health Noncancer	0.0049487	lbs C7H7 equiv	1.3746423
Solar Water Heater	Product Fabrication	system construction	SO2	Air	0.198	kg Human Health Noncancer	0.0003237	lbs C7H7 equiv	0.0899284
Solar Water Heater	Raw Materials Acquisition	Transportation	SO2	Air	0.28	g Human Health Noncancer	4.578E-07	lbs C7H7 equiv	0.0001272
Solar Water Heater	Filling/Packaging/Distribution	Transportation	SO2	Air	0.0375	g Human Health Noncancer	6.131E-08	lbs C7H7 equiv	1.703E-05
Solar Water Heater	Product Fabrication	welding	LEAD COMPOUNDS	Air	0.0252	G Human Health Noncancer	83.405731	lbs C7H7 equiv	23168.259
Solar Water Heater	Product Fabrication	welding	ALUMINUM (FUME OR DUST)	Air	0.0387	G Human Health Noncancer	2.5958657	lbs C7H7 equiv	721.07381
Solar Water Heater	Product Fabrication	welding	CHLOROETHYLENE	Air	0.675	G Human Health Noncancer	0.162816	lbs C7H7 equiv	45.22668
Solar Water Heater	Product Fabrication	welding	NITROGEN OXIDE (NO2)	Air	0.2025	G Human Health Noncancer	4.497E-06	lbs C7H7 equiv	0.0012492
Solar Water Heater	Product Fabrication	welding	MANGANESE COMPOUNDS	Air	0.2178	G Human Health Noncancer	3.813587	lbs C7H7 equiv	1059.3297
Solar Water Heater	Product Fabrication	welding	COPPER COMPOUNDS	Air	0.00396	G Human Health Noncancer	0.2426915	lbs C7H7 equiv	67.414302
Solar Water Heater	Product Fabrication	welding	CHROMIUM COMPOUNDS	Air	0.2736	G Human Health Noncancer	3.8382099	lbs C7H7 equiv	1066.1694
Solar Water Heater	Product Fabrication	welding	PHOSGENE	Air	0.01125	G Human Health Noncancer	22.444889	lbs C7H7 equiv	6234.6914

## 附录

<b>Human Health Noncancer 汇总</b>										485598.84
Essential Auxiliaries of SWHs	Materials Manufacturing	steel manufacturing	METHANE	Air	37.814169 kg	Photochemical Smog	0.3063668 g NOX equiv	0.3063668		
Essential Auxiliaries of SWHs	Materials Manufacturing	steel manufacturing	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	33.597422 kg	Photochemical Smog	91.845406 g NOX equiv	91.845406		
Essential Auxiliaries of SWHs	Materials Manufacturing	steel manufacturing	CARBON MONOXIDE (CO)	Air	230.99798 kg	Photochemical Smog	8.4536848 g NOX equiv	8.4536848		
Essential Auxiliaries of SWHs	Raw Materials Acquisition	Transportation	CARBON MONOXIDE	Air	108.15 g	Photochemical Smog	0.0039579 g NOX equiv	0.0039579		
Essential Auxiliaries of SWHs	Raw Materials Acquisition	Transportation	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	17.934 g	Photochemical Smog	0.0490262 g NOX equiv	0.0490262		
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	copper manufacture	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	1.4798 kg	Photochemical Smog	4.0453353 g NOX equiv	1123.7042		
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	glass manufacturing	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	0.0132295 kg	Photochemical Smog	0.0361655 g NOX equiv	10.045968		
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	insulating materials manufacturing	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	0.0559146 kg	Photochemical Smog	0.1528539 g NOX equiv	42.459418		
Solar Water Heater	Product Fabrication	Painting	ETHYL ACETATE	Air	0.04 kg	Photochemical Smog	0.0173811 g NOX equiv	4.828074		
Solar Water Heater	Product Fabrication	Painting	BENZENE	Air	0.02 kg	Photochemical Smog	0.0108599 g NOX equiv	3.0166275		
Solar Water Heater	Product Fabrication	Painting	TOLUENE	Air	0.08 kg	Photochemical Smog	0.1820118 g NOX equiv	50.558829		
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	Plastic manufacturing	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	0.015 kg	Photochemical Smog	0.0410056 g NOX equiv	11.390433		
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	steel manufacturing	METHANE	Air	0.6923 kg	Photochemical Smog	0.0056089 g NOX equiv	1.5580414		
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	steel manufacturing	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	0.6151 kg	Photochemical Smog	1.6815014 g NOX equiv	467.08372		
Solar Water Heater	Materials Manufacturing	steel manufacturing	CARBON MONOXIDE (CO)	Air	4.2291 kg	Photochemical Smog	0.1547697 g NOX equiv	42.991572		
Solar Water Heater	Product Fabrication	system construction	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	0.08604 kg	Photochemical Smog	0.2352079 g NOX equiv	65.335524		
Solar Water Heater	Raw Materials Acquisition	Transportation	CARBON MONOXIDE (CO)	Air	21.95 g	Photochemical Smog	0.0008033 g NOX equiv	0.2231361		
Solar Water Heater	Raw Materials Acquisition	Transportation	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	3.639 g	Photochemical Smog	0.0099479 g NOX equiv	2.7633192		
Solar Water Heater	Filling/Packaging/Distribution	Transportation	CARBON MONOXIDE	Air	2.925 g	Photochemical Smog	0.000107 g NOX equiv	0.0297345		
Solar Water Heater	Filling/Packaging/Distribution	Transportation	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	0.485 g	Photochemical Smog	0.0013258 g NOX equiv	0.3682907		
Solar Water Heater	Product Fabrication	welding	CARBON MONOXIDE	Air	1.2375 G	Photochemical Smog	4.529E-05 g NOX equiv	0.01258		
<b>Photochemical Smog 汇总</b>										1927.028

## 附录 2 燃煤锅炉系统数据汇总

Product Name	Life Cycle Stage	Process Name	Resource/Release	MEDIA	Quantity	UOM	Impact Type	Characterizati on Result	Factor Measure	系统 数据汇总
Boiler	Materials Manufacturing	brick manufacturing	SO2	Air	345.36138	kg	Acidification	38670.6797	moles H+ equiv	77341.359
Boiler	Materials Manufacturing	brick manufacturing	NITROGEN OXIDE (NO2)	Air	143.99619	kg	Acidification	12710.8584	moles H+ equiv	25421.717
Boiler	Materials Manufacturing	brick manufacturing	HYDROCHLORIC ACID	Air	8.60535	kg	Acidification	847.928467	moles H+ equiv	1695.8569
Boiler	Use/Reuse/Maintenance	coal consumption	SO2	Air	1900600	kg	Acidification	212813280	moles H+ equiv	425626560
Boiler	Use/Reuse/Maintenance	coal consumption	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	445610	kg	Acidification	39334968	moles H+ equiv	78669936
Boiler	Materials Manufacturing	steel manufacturing	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	550.9657214	kg	Acidification	48634.9492	moles H+ equiv	97269.898
Boiler	Materials Manufacturing	steel manufacturing	SO2	Air	1756.354392	kg	Acidification	196661.875	moles H+ equiv	393323.75
Boiler	Materials Manufacturing	steel manufacturing	HYDROGEN CHLORIDE	Air	30.09664809	kg	Acidification	2965.57446	moles H+ equiv	5931.1489
Boiler	Filling/Packaging/Distribution	Transportation	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	301.83	g	Acidification	26.6431942	moles H+ equiv	53.286388
Boiler	Filling/Packaging/Distribution	Transportation	SO2	Air	23.33	g	Acidification	2.61229825	moles H+ equiv	5.2245965
Boiler	Raw Materials Acquisition	Transportation	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	784.03	g	Acidification	69.2080383	moles H+ equiv	138.41608
Boiler	Raw Materials Acquisition	Transportation	SO2	Air	60.59	g	Acidification	6.78436136	moles H+ equiv	13.568723
Boiler	Product Fabrication	welding	NITROGEN OXIDE (NO2)	Air	145.125	g	Acidification	12.8105011	moles H+ equiv	25.621002
Boiler	Product Fabrication	welding	HYDROFLUORIC ACID	Air	32.25	g	Acidification	5.77773619	moles H+ equiv	11.555472
Boiler Station	Materials Manufacturing	brick manufacturing	SO2	Air	393.182	kg	Acidification	44025.2305	moles H+ equiv	29350.154
Boiler Station	Materials Manufacturing	brick manufacturing	NITROGEN OXIDE (NO2)	Air	163.935	kg	Acidification	14470.9004	moles H+ equiv	9647.2669
Boiler Station	Materials Manufacturing	brick manufacturing	HYDROCHLORIC ACID	Air	9.797	kg	Acidification	965.347778	moles H+ equiv	643.56519
Boiler Station	Materials Manufacturing	concrete manufacturing	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	262.2634	kg	Acidification	23150.5625	moles H+ equiv	15433.708
Boiler Station	Materials Manufacturing	concrete manufacturing	SO2	Air	56.8764	kg	Acidification	6368.54346	moles H+ equiv	4245.6956
Boiler Station	Raw Materials Acquisition	Materials transportation	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	7603.36	g	Acidification	671.165222	moles H+ equiv	447.44348
Boiler Station	Raw Materials Acquisition	Materials transportation	SO2	Air	587.61	g	Acidification	65.7956543	moles H+ equiv	43.86377

## 附录

Boiler Station	Materials Manufacturing	steel manufacturing	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	280.823905	kg	Acidification	24788.9395	moles H+ equiv	16525.96
Boiler Station	Materials Manufacturing	steel manufacturing	SO2	Air	895.20324	kg	Acidification	100237.367	moles H+ equiv	66824.911
Boiler Station	Materials Manufacturing	steel manufacturing	HYDROGEN CHLORIDE	Air	15.34008	kg	Acidification	1511.5354	moles H+ equiv	1007.6903
Boiler Station	Recycle/Waste Management	Transportation	SO2	Air	80.85	g	Acidification	9.05290699	moles H+ equiv	6.0352713
Boiler Station	Recycle/Waste Management	Transportation	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	1046.15	g	Acidification	92.3459473	moles H+ equiv	61.563965
Essential Auxiliaries of Boiler	Materials Manufacturing	steel manufacturing	SO2	Air	3159.407628	kg	Acidification	353764.031	moles H+ equiv	353764.03
Essential Auxiliaries of Boiler	Materials Manufacturing	steel manufacturing	HYDROGEN CHLORIDE	Air	54.139176	kg	Acidification	5334.60596	moles H+ equiv	5334.606
Essential Auxiliaries of Boiler	Materials Manufacturing	steel manufacturing	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	991.1014035	kg	Acidification	87486.6875	moles H+ equiv	87486.688
Essential Auxiliaries of Boiler	Raw Materials Acquisition	Transportation	SO2	Air	40.89	g	Acidification	4.5785203	moles H+ equiv	4.5785203
Essential Auxiliaries of Boiler	Raw Materials Acquisition	Transportation	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	529.04	g	Acidification	46.6995163	moles H+ equiv	46.699516
<b>Acidification 汇总</b>								505488602		
Boiler	Product Fabrication	painting	TOLUENE	Air	4.5	kg	Ecotoxicity	4.4643E-05	lbs 2,4-D equiv	8.929E-05
Boiler	Product Fabrication	painting	BENZENE	Air	1.125	kg	Ecotoxicity	7.4405E-06	lbs 2,4-D equiv	1.488E-05
Boiler	Materials Manufacturing	steel manufacturing	HYDROXYBENZENE	Water	0.17219	kg	Ecotoxicity	0.35303736	lbs 2,4-D equiv	0.7060747
Boiler	Product Fabrication	welding	CHLOROETHYLENE	Air	483.75	g	Ecotoxicity	2.133E-07	lbs 2,4-D equiv	4.266E-07
Boiler Station	Materials Manufacturing	steel manufacturing	HYDROXYBENZENE	Water	0.087764204	kg	Ecotoxicity	0.17994101	lbs 2,4-D equiv	0.1199607
Essential Auxiliaries of Boiler	Materials Manufacturing	steel manufacturing	HYDROXYBENZENE	Water	0.309742955	kg	Ecotoxicity	0.63505918	lbs 2,4-D equiv	0.6350592
<b>Ecotoxicity 汇总</b>								1.4611992		
Boiler	Materials Manufacturing	brick manufacturing	NITROGEN OXIDE (NO2)	Air	143.99619	kg	Eutrophication	14.0600376	kg N	28.120075
Boiler	Use/Reuse/Maintenance	coal consumption	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	445610	kg	Eutrophication	43510.1328	kg N	87020.266
Boiler	Materials Manufacturing	steel manufacturing	BIOLOGICAL OXYGEN DEMAND	Water	0.172190448	kg	Eutrophication	0.01898055	kg N	0.0379611
Boiler	Materials Manufacturing	steel manufacturing	CHEMICAL OXYGEN DEMAND	Water	9.711515642	kg	Eutrophication	1.07050037	kg N	2.1410007
Boiler	Materials Manufacturing	steel manufacturing	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	550.9657214	kg	Eutrophication	53.7972488	kg N	107.5945
Boiler	Filling/Packaging/Distribution	Transportation	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	301.83	g	Eutrophication	0.0294712	kg N	0.0589424
Boiler	Raw Materials Acquisition	Transportation	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	784.03	g	Eutrophication	0.07655405	kg N	0.1531081
Boiler	Product Fabrication	welding	NITROGEN OXIDE (NO2)	Air	145.125	g	Eutrophication	0.01417026	kg N	0.0283405
Boiler Station	Materials Manufacturing	brick manufacturing	NITROGEN OXIDE (NO2)	Air	163.935	kg	Eutrophication	16.006897	kg N	10.671265

## 附录

Boiler Station	Materials Manufacturing	concrete manufacturing	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	262.2634	kg	Eutrophication	25.6078529	kg N	17.071902
Boiler Station	Raw Materials Acquisition	Materials transportation	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	7603.36	g	Eutrophication	0.74240524	kg N	0.4949368
Boiler Station	Materials Manufacturing	steel manufacturing	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	280.823905	kg	Eutrophication	27.4201336	kg N	18.280089
Boiler Station	Materials Manufacturing	steel manufacturing	CHEMICAL OXYGEN DEMAND	Water	4.949900947	kg	Eutrophication	0.54562759	kg N	0.3637517
Boiler Station	Materials Manufacturing	steel manufacturing	BIOLOGICAL OXYGEN DEMAND	Water	0.087764433	kg	Eutrophication	0.00967427	kg N	0.0064495
Boiler Station	Recycle/Waste Management	Transportation	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	1046.15	g	Eutrophication	0.1021479	kg N	0.0680986
Essential Auxiliaries of Boiler	Materials Manufacturing	steel manufacturing	CHEMICAL OXYGEN DEMAND	Water	17.46950202	kg	Eutrophication	1.92566323	kg N	1.9256632
Essential Auxiliaries of Boiler	Materials Manufacturing	steel manufacturing	BIOLOGICAL OXYGEN DEMAND	Water	0.309743761	kg	Eutrophication	0.03414305	kg N	0.0341431
Essential Auxiliaries of Boiler	Materials Manufacturing	steel manufacturing	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	991.1014035	kg	Eutrophication	96.7728577	kg N	96.772858
Essential Auxiliaries of Boiler	Raw Materials Acquisition	Transportation	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	529.04	g	Eutrophication	0.05165638	kg N	0.0516564
<b>Eutrophication 汇总</b>										87304.14
Boiler	Product Fabrication	Boiler fabrication	OIL	No Media	24964.4	MJ	Fossil Fuel	3594.87354	MJ	7189.7471
Boiler	Materials Manufacturing	brick manufacturing	OIL	No Media	70908.084	MJ	Fossil Fuel	10210.7637	MJ	20421.527
Boiler	Use/Reuse/Maintenance	coal consumption		No Media	1847742900	MJ	Fossil Fuel	15872112	MJ	31744224
Boiler	Use/Reuse/Maintenance	coal consumption	OIL	No Media	18000000	MJ	Fossil Fuel	2592000	MJ	5184000
Boiler	Materials Manufacturing	steel manufacturing	OIL	No Media	1950913	MJ	Fossil Fuel	280931.469	MJ	561862.94
Boiler	Filling/Packaging/Distribution	Transportation	OIL	No Media	1297.8	MJ	Fossil Fuel	186.883194	MJ	373.76639
Boiler	Raw Materials Acquisition	Transportation	OIL	No Media	3371.2	MJ	Fossil Fuel	485.452789	MJ	970.90558
Boiler Station	Materials Manufacturing	brick manufacturing	OIL	No Media	212000	MJ	Fossil Fuel	30528	MJ	20352
Boiler Station	Materials Manufacturing	concrete manufacturing	OIL	No Media	949687.6	MJ	Fossil Fuel	136755.016	MJ	91170.01
Boiler Station	Product Fabrication	construction	OIL	No Media	542100	MJ	Fossil Fuel	78062.3984	MJ	52041.599
Boiler Station	Recycle/Waste Management	demolish	OIL	No Media	488000	MJ	Fossil Fuel	70272	MJ	46848
Boiler Station	Materials Manufacturing	macadam manufacturing	OIL	No Media	7800	MJ	Fossil Fuel	1123.19995	MJ	748.79997
Boiler Station	Raw Materials Acquisition	materials transportation	OIL	No Media	32700	MJ	Fossil Fuel	4708.7998	MJ	3139.1999
Boiler Station	Materials Manufacturing	sand manufacturing	OIL	No Media	2140	MJ	Fossil Fuel	308.160004	MJ	205.44

## 附录

Boiler Station	Materials Manufacturing	steel manufacturing	OIL	No Media	994364.4	MJ	Fossil Fuel	143188.469	MJ	95458.979
Boiler Station	Materials Manufacturing	timber manufacturing	OIL	No Media	31.6	MJ	Fossil Fuel	4.55039978	MJ	3.0335999
Boiler Station	Recycle/Waste Management	Transportation	OIL	No Media	4500	MJ	Fossil Fuel	648	MJ	432
Essential Auxiliaries of Boiler	Materials Manufacturing	steel manufacturing	OIL	No Media	3509388	MJ	Fossil Fuel	505351.875	MJ	505351.88
Essential Auxiliaries of Boiler	Raw Materials Acquisition	Transportation	OIL	No Media	2274.8	MJ	Fossil Fuel	327.571198	MJ	327.5712
<b>Fossil Fuel 汇总</b>								38335121		
(38335121-31744224+31744224×0.144/0.00859) × 0.047/0.144=175839028										
Boiler	Use/Reuse/Maintenance	coal consumption	CARBON DIOXIDE	Air	159720000	kg	Global Warming	352118720	kg CO2	704237440
Boiler	Materials Manufacturing	steel manufacturing	METHANE	Air	620.1163533	kg	Global Warming	31443.4961	kg CO2	62886.992
Boiler	Materials Manufacturing	steel manufacturing	CARBON DIOXIDE	Air	282391.5642	kg	Global Warming	622560.438	kg CO2	1245120.9
Boiler	Product Fabrication	welding	CARBON DIOXIDE	Air	145125	g	Global Warming	319.942566	kg CO2	639.88513
Boiler Station	Materials Manufacturing	concrete manufacturing	CARBON DIOXIDE	Air	98585.76	kg	Global Warming	217342.172	kg CO2	144894.78
Boiler Station	Materials Manufacturing	steel manufacturing	CARBON DIOXIDE	Air	143933.277	kg	Global Warming	317315.313	kg CO2	211543.54
Boiler Station	Materials Manufacturing	steel manufacturing	METHANE	Air	316.069565	kg	Global Warming	16026.5605	kg CO2	10684.374
Essential Auxiliaries of Boiler	Materials Manufacturing	steel manufacturing	METHANE	Air	1115.492606	kg	Global Warming	56561.9453	kg CO2	56561.945
Essential Auxiliaries of Boiler	Materials Manufacturing	steel manufacturing	CARBON DIOXIDE	Air	507978.3818	kg	Global Warming	1119889.13	kg CO2	1119889.1
<b>Global Warming 汇总</b>								707089662		
Boiler	Product Fabrication	painting	BENZENE	Air	1.125	kg	Human Health Cancer	2.48017502	lbs C6H6 equiv	4.96035
Boiler	Product Fabrication	welding	CHLOROETHYLENE	Air	483.75	g	Human Health Cancer	1.57131302	lbs C6H6 equiv	3.142626
Boiler	Product Fabrication	welding	CHROMIUM COMPOUNDS	Air	196.08	g	Human Health Cancer	72.339447	lbs C6H6 equiv	144.67889
Boiler	Product Fabrication	welding	LEAD COMPOUNDS	Air	18.06	g	Human Health Cancer	1.41205072	lbs C6H6 equiv	2.8241014
<b>Human Health Cancer 汇总</b>								155.60597		
Boiler	Materials Manufacturing	brick manufacturing	SO2	Air	345.36138	kg	Human Health Criteria	10.5893469	total DALYs	21.178694
Boiler	Use/Reuse/Maintenance	coal consumption	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	445610	kg	Human Health Criteria	2173.68042	total DALYs	4347.3608
Boiler	Use/Reuse/Maintenance	coal consumption	TSP	Air	10890000	kg	Human Health Criteria	1101887.38	total DALYs	2203774.8
Boiler	Use/Reuse/Maintenance	coal consumption	SO2	Air	1900600	kg	Human Health Criteria	58275.5156	total DALYs	116551.03
Boiler	Materials Manufacturing	steel manufacturing	TSP	Air	11708.93971	kg	Human Health Criteria	1184.75049	total DALYs	2369.501

## 附录

Boiler	Materials Manufacturing	steel manufacturing	SO2	Air	1756.354392	kg	Human Health Criteria	53.8527069	total DALYs	107.70541
Boiler	Materials Manufacturing	steel manufacturing	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	550.9657214	kg	Human Health Criteria	2.68760443	total DALYs	5.3752089
Boiler	Filling/Packaging/Distribution	Transportation	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	301.83	g	Human Health Criteria	0.00147232	total DALYs	0.0029446
Boiler	Filling/Packaging/Distribution	Transportation	PM10	Air	330.1	g	Human Health Criteria	0.06072845	total DALYs	0.1214569
Boiler	Filling/Packaging/Distribution	Transportation	SO2	Air	23.33	g	Human Health Criteria	0.00071534	total DALYs	0.0014307
Boiler	Raw Materials Acquisition	Transportation	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	784.03	g	Human Health Criteria	0.00382449	total DALYs	0.007649
Boiler	Raw Materials Acquisition	Transportation	PM10	Air	857.48	g	Human Health Criteria	0.15775046	total DALYs	0.3155009
Boiler	Raw Materials Acquisition	Transportation	SO2	Air	60.59	g	Human Health Criteria	0.00185779	total DALYs	0.0037156
Boiler Station	Materials Manufacturing	brick manufacturing	TSP	Air	97.969	kg	Human Health Criteria	9.91283798	total DALYs	6.6085587
Boiler Station	Materials Manufacturing	brick manufacturing	SO2	Air	393.182	kg	Human Health Criteria	12.0556049	total DALYs	8.03707
Boiler Station	Materials Manufacturing	concrete manufacturing	SO2	Air	56.8764	kg	Human Health Criteria	1.74392378	total DALYs	1.1626159
Boiler Station	Materials Manufacturing	concrete manufacturing	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	262.2634	kg	Human Health Criteria	1.27931786	total DALYs	0.8528786
Boiler Station	Product Fabrication	construction	TSP	Air	2678.6	kg	Human Health Criteria	271.029877	total DALYs	180.68658
Boiler Station	Raw Materials Acquisition	materials transportation	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	7603.36	g	Human Health Criteria	0.0370891	total DALYs	0.0247261
Boiler Station	Raw Materials Acquisition	materials transportation	PM10	Air	8315.62	g	Human Health Criteria	1.5298233	total DALYs	1.0198822
Boiler Station	Raw Materials Acquisition	materials transportation	SO2	Air	587.61	g	Human Health Criteria	0.01801709	total DALYs	0.0120114
Boiler Station	Materials Manufacturing	steel manufacturing	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	280.823905	kg	Human Health Criteria	1.36985576	total DALYs	0.9132372
Boiler Station	Materials Manufacturing	steel manufacturing	TSP	Air	5967.975945	kg	Human Health Criteria	603.860168	total DALYs	402.57345
Boiler Station	Materials Manufacturing	steel manufacturing	SO2	Air	895.20324	kg	Human Health Criteria	27.4484005	total DALYs	18.298934
Boiler Station	Recycle/Waste Management	Transportation	PM10	Air	1144.15	g	Human Health Criteria	0.21048909	total DALYs	0.1403261
Boiler Station	Recycle/Waste Management	Transportation	SO2	Air	80.85	g	Human Health Criteria	0.00247899	total DALYs	0.0016527
Boiler Station	Recycle/Waste Management	Transportation	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	1046.15	g	Human Health Criteria	0.00510311	total DALYs	0.0034021
Essential Auxiliaries of Boiler	Materials Manufacturing	steel manufacturing	TSP	Air	21062.55639	kg	Human Health Criteria	2131.1814	total DALYs	2131.1814
Essential Auxiliaries of Boiler	Materials Manufacturing	steel manufacturing	SO2	Air	3159.407628	kg	Human Health Criteria	96.8726196	total DALYs	96.87262
Essential Auxiliaries of Boiler	Materials Manufacturing	steel manufacturing	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	991.1014035	kg	Human Health Criteria	4.8345809	total DALYs	4.8345809
Essential Auxiliaries of Boiler	Raw Materials Acquisition	Transportation	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	529.04	g	Human Health Criteria	0.00258065	total DALYs	0.0025807
Essential Auxiliaries of Boiler	Raw Materials Acquisition	Transportation	PM10	Air	578.6	g	Human Health Criteria	0.10644495	total DALYs	0.1064449
Essential Auxiliaries of Boiler	Raw Materials Acquisition	Transportation	SO2	Air	40.89	g	Human Health Criteria	0.00125375	total DALYs	0.0012538

## 附录

<b>Human Health Criteria 汇总</b>											2330030.7
Boiler	Materials Manufacturing	brick manufacturing	SO2	Air	345.36138	kg	Human Health Noncancer	0.56468707	lbs C7H7 equiv	1.1293741	
Boiler	Materials Manufacturing	brick manufacturing	NITROGEN OXIDE (NO2)	Air	143.99619	kg	Human Health Noncancer	3.197788	lbs C7H7 equiv	6.395576	
Boiler	Materials Manufacturing	brick manufacturing	HYDROCHLORIC ACID	Air	8.60535	kg	Human Health Noncancer	7.36311102	lbs C7H7 equiv	14.726222	
Boiler	Use/Reuse/Maintenance	coal consumption	SO2	Air	1900600	kg	Human Health Noncancer	3107.5979	lbs C7H7 equiv	6215.1958	
Boiler	Product Fabrication	painting	XYLENE	Air	2.25	kg	Human Health Noncancer	1.15854597	lbs C7H7 equiv	2.3170919	
Boiler	Product Fabrication	painting	TOLUENE	Air	4.5	kg	Human Health Noncancer	9.92070007	lbs C7H7 equiv	19.8414	
Boiler	Product Fabrication	painting	ETHYL ACETATE	Air	2.25	kg	Human Health Noncancer	0.60486311	lbs C7H7 equiv	1.2097262	
Boiler	Product Fabrication	painting	BENZENE	Air	1.125	kg	Human Health Noncancer	41.1153946	lbs C7H7 equiv	82.230789	
Boiler	Materials Manufacturing	steel manufacturing	HYDROGEN CHLORIDE	Air	30.09664809	kg	Human Health Noncancer	25.7519989	lbs C7H7 equiv	51.503998	
Boiler	Materials Manufacturing	steel manufacturing	SO2	Air	1756.354392	kg	Human Health Noncancer	2.87174749	lbs C7H7 equiv	5.743495	
Boiler	Materials Manufacturing	steel manufacturing	HYDROGEN SULPHIDE (H2S)	Air	2.996228805	kg	Human Health Noncancer	0.33508417	lbs C7H7 equiv	0.6701683	
Boiler	Materials Manufacturing	steel manufacturing	AMMONIA	Water	34.09161983	kg	Human Health Noncancer	4.43272781	lbs C7H7 equiv	8.8654556	
Boiler	Materials Manufacturing	steel manufacturing	HYDROXYBENZENE	Water	0.17219	kg	Human Health Noncancer	0.00204246	lbs C7H7 equiv	0.0040849	
Boiler	Filling/Packaging/Distribution	Transportation	SO2	Air	23.33	g	Human Health Noncancer	3.8146E-05	lbs C7H7 equiv	7.629E-05	
Boiler	Raw Materials Acquisition	Transportation	SO2	Air	60.59	g	Human Health Noncancer	9.9068E-05	lbs C7H7 equiv	0.0001981	
Boiler	Product Fabrication	welding	ALUMINUM (FUME OR DUST)	Air	27.735	g	Human Health Noncancer	1860.37036	lbs C7H7 equiv	3720.7407	
Boiler	Product Fabrication	welding	CHLOROETHYLENE	Air	483.75	g	Human Health Noncancer	116.68483	lbs C7H7 equiv	233.36966	
Boiler	Product Fabrication	welding	NITROGEN OXIDE (NO2)	Air	145.125	g	Human Health Noncancer	0.00322286	lbs C7H7 equiv	0.0064457	
Boiler	Product Fabrication	welding	PHOSGENE	Air	8.0625	g	Human Health Noncancer	16085.5039	lbs C7H7 equiv	32171.008	
Boiler	Product Fabrication	welding	MANGANESE COMPOUNDS	Air	156.09	g	Human Health Noncancer	2733.0708	lbs C7H7 equiv	5466.1416	
Boiler	Product Fabrication	welding	COPPER COMPOUNDS	Air	2.838	g	Human Health Noncancer	173.928894	lbs C7H7 equiv	347.85779	
Boiler	Product Fabrication	welding	LEAD COMPOUNDS	Air	18.06	g	Human Health Noncancer	59774.1055	lbs C7H7 equiv	119548.21	
Boiler	Product Fabrication	welding	CHROMIUM COMPOUNDS	Air	196.08	g	Human Health Noncancer	2750.71704	lbs C7H7 equiv	5501.4341	
Boiler Station	Materials Manufacturing	brick manufacturing	SO2	Air	393.182	kg	Human Health Noncancer	0.64287674	lbs C7H7 equiv	0.4285845	
Boiler Station	Materials Manufacturing	brick manufacturing	NITROGEN OXIDE (NO2)	Air	163.935	kg	Human Health Noncancer	3.64057803	lbs C7H7 equiv	2.427052	
Boiler Station	Materials Manufacturing	brick manufacturing	HYDROCHLORIC ACID	Air	9.797	kg	Human Health Noncancer	8.38273907	lbs C7H7 equiv	5.5884927	
Boiler Station	Materials Manufacturing	concrete manufacturing	SO2	Air	56.8764	kg	Human Health Noncancer	0.09299641	lbs C7H7 equiv	0.0619976	

## 附录

Boiler Station	Raw Materials Acquisition	materials transportation	SO2	Air	587.61	g	Human Health Noncancer	0.00096078	lbs C7H7 equiv	0.0006405
Boiler Station	Materials Manufacturing	steel manufacturing	AMMONIA	Water	17.376293	kg	Human Health Noncancer	2.2593348	lbs C7H7 equiv	1.5062232
Boiler Station	Materials Manufacturing	steel manufacturing	SO2	Air	895.20324	kg	Human Health Noncancer	1.46371233	lbs C7H7 equiv	0.9758082
Boiler Station	Materials Manufacturing	steel manufacturing	HYDROGEN SULPHIDE (H2S)	Air	1.52715975	kg	Human Health Noncancer	0.17079039	lbs C7H7 equiv	0.1138603
Boiler Station	Materials Manufacturing	steel manufacturing	HYDROXYBENZENE	Water	0.087764204	kg	Human Health Noncancer	0.00104103	lbs C7H7 equiv	0.000694
Boiler Station	Materials Manufacturing	steel manufacturing	HYDROGEN CHLORIDE	Air	15.34008	kg	Human Health Noncancer	13.125639	lbs C7H7 equiv	8.750426
Boiler Station	Recycle/Waste Management	Transportation	SO2	Air	80.85	g	Human Health Noncancer	0.00013219	lbs C7H7 equiv	8.813E-05
Essential Auxiliaries of Boiler	Materials Manufacturing	steel manufacturing	SO2	Air	3159.407628	kg	Human Health Noncancer	5.16582584	lbs C7H7 equiv	5.1658258
Essential Auxiliaries of Boiler	Materials Manufacturing	steel manufacturing	HYDROGEN SULPHIDE (H2S)	Air	5.389748325	kg	Human Health Noncancer	0.60276419	lbs C7H7 equiv	0.6027642
Essential Auxiliaries of Boiler	Materials Manufacturing	steel manufacturing	HYDROXYBENZENE	Water	0.309742955	kg	Human Health Noncancer	0.00367406	lbs C7H7 equiv	0.0036741
Essential Auxiliaries of Boiler	Materials Manufacturing	steel manufacturing	AMMONIA	Water	61.3255071	kg	Human Health Noncancer	7.97378635	lbs C7H7 equiv	7.9737864
Essential Auxiliaries of Boiler	Materials Manufacturing	steel manufacturing	HYDROGEN CHLORIDE	Air	54.139176	kg	Human Health Noncancer	46.3238297	lbs C7H7 equiv	46.32383
Essential Auxiliaries of Boiler	Raw Materials Acquisition	Transportation	SO2	Air	40.89	g	Human Health Noncancer	6.6858E-05	lbs C7H7 equiv	6.686E-05
<b>Human Health Noncancer</b>								<b>汇总</b>		173478.53
Boiler	Use/Reuse/Maintenance	coal consumption	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	445610	kg	Photochemical Smog	1218165.88	g NOX equiv	2436331.8
Boiler	Product Fabrication	painting	TOLUENE	Air	4.5	kg	Photochemical Smog	10.238162	g NOX equiv	20.476324
Boiler	Product Fabrication	painting	ETHYL ACETATE	Air	2.25	kg	Photochemical Smog	0.97768497	g NOX equiv	1.9553699
Boiler	Product Fabrication	painting	BENZENE	Air	1.125	kg	Photochemical Smog	0.61086708	g NOX equiv	1.2217342
Boiler	Materials Manufacturing	steel manufacturing	CARBON MONOXIDE (CO)	Air	3788.146858	kg	Photochemical Smog	138.632385	g NOX equiv	277.26477
Boiler	Materials Manufacturing	steel manufacturing	METHANE	Air	620.1163533	kg	Photochemical Smog	5.02412367	g NOX equiv	10.048247
Boiler	Materials Manufacturing	steel manufacturing	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	550.9657214	kg	Photochemical Smog	1506.17725	g NOX equiv	3012.3545
Boiler	Filling/Packaging/Distribution	Transportation	CARBON MONOXIDE	Air	1820.16	g	Photochemical Smog	0.06661123	g NOX equiv	0.1332225
Boiler	Filling/Packaging/Distribution	Transportation	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	301.83	g	Photochemical Smog	0.82511389	g NOX equiv	1.6502278
Boiler	Raw Materials Acquisition	Transportation	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	784.03	g	Photochemical Smog	2.14330602	g NOX equiv	4.286612
Boiler	Raw Materials Acquisition	Transportation	CARBON MONOXIDE	Air	4728.06	g	Photochemical Smog	0.17302978	g NOX equiv	0.3460596
Boiler	Product Fabrication	welding	CARBON MONOXIDE	Air	886.875	g	Photochemical Smog	0.0324564	g NOX equiv	0.0649128
Boiler Station	Materials Manufacturing	concrete manufacturing	CARBON MONOXIDE (CO)	Air	10.42734	kg	Photochemical Smog	0.38160267	g NOX equiv	0.2544018
Boiler Station	Materials Manufacturing	concrete manufacturing	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	262.2634	kg	Photochemical Smog	716.9505	g NOX equiv	477.967

## 附录

Boiler Station	Raw Materials Acquisition	materials transportation	CARBON MONOXIDE	Air	45851.63	g	Photochemical Smog	1.67800272	g NOX equiv	1.1186685
Boiler Station	Raw Materials Acquisition	materials transportation	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	7603.36	g	Photochemical Smog	20.7853355	g NOX equiv	13.85689
Boiler Station	Materials Manufacturing	steel manufacturing	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	280.823905	kg	Photochemical Smog	767.689453	g NOX equiv	511.79297
Boiler Station	Materials Manufacturing	steel manufacturing	METHANE	Air	316.069565	kg	Photochemical Smog	2.5607655	g NOX equiv	1.707177
Boiler Station	Materials Manufacturing	steel manufacturing	CARBON MONOXIDE (CO)	Air	1930.795605	kg	Photochemical Smog	70.6600876	g NOX equiv	47.106725
Boiler Station	Recycle/Waste Management	Transportation	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	1046.15	g	Photochemical Smog	2.85986447	g NOX equiv	1.9065763
Boiler Station	Recycle/Waste Management	Transportation	CARBON MONOXIDE (CO)	Air	6308.75	g	Photochemical Smog	0.23087728	g NOX equiv	0.1539182
Essential Auxiliaries of Boiler	Materials Manufacturing	steel manufacturing	METHANE	Air	1115.492606	kg	Photochemical Smog	9.03761482	g NOX equiv	9.0376148
Essential Auxiliaries of Boiler	Materials Manufacturing	steel manufacturing	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	991.1014035	kg	Photochemical Smog	2709.37793	g NOX equiv	2709.3779
Essential Auxiliaries of Boiler	Materials Manufacturing	steel manufacturing	CARBON MONOXIDE (CO)	Air	6814.285394	kg	Photochemical Smog	249.378036	g NOX equiv	249.37804
Essential Auxiliaries of Boiler	Raw Materials Acquisition	Transportation	NITROGEN OXIDES (NOX)	Air	529.04	g	Photochemical Smog	1.44623876	g NOX equiv	1.4462388
Essential Auxiliaries of Boiler	Raw Materials Acquisition	Transportation	CARBON MONOXIDE (CO)	Air	3190.37	g	Photochemical Smog	0.11675593	g NOX equiv	0.1167559
<b>Photochemical Smog 汇总</b>										2443686.8

## 附录3 两个系统每功能单位数据汇总

分类因子	太阳能热水器系统	燃煤锅炉系统	太阳能热水器系统	燃煤锅炉系统	$\frac{\text{燃煤锅炉系统}}{\text{太阳能热水器系统}}$
	总计	总计	(kwh) <sup>-1</sup>	(kwh) <sup>-1</sup>	
酸化	259364.37	505488602	0.039259562	0.649060865	16.53255496
生态毒性	419.81166	1.4611992	$6.35462 \times 10^{-5}$	$1.87622 \times 10^{-9}$	$2.95253 \times 10^{-5}$
富营养化	133.78384	87304.14	$2.02506 \times 10^{-5}$	0.000112101	5.535668872
全能耗	95818.52218	175839028	0.014503894	0.225782008	15.56699295
全球变暖	472704.32	707098662	0.071552482	0.907933567	12.68905754
致癌物	1833.6011	155.60597	0.000277549	$1.99802 \times 10^{-7}$	0.00071988
标准大气污染物	501.65268	2330030.7	$7.59343 \times 10^{-5}$	0.002991822	39.40010953
非致癌物	485598.84	173478.53	0.073504305	0.000222751	0.003030449
光化学氧化物	1927.028	2443686.8	0.000291691	0.003137759	10.75713058

## 致 谢

首先，我要感谢我敬爱的导师郭静教授，本论文的完成凝聚了导师大量的心血，同时也离不开导师的悉心指导。在两年半的时间里，导师对我在学习上的帮助、生活上的关心以及为人处世上的谆谆教导教会了我太多太多，我将时刻铭记于心。导师严谨的治学风格和兢兢业业的工作作风必将影响学生的一生。在此论文完成之际，千言万语化作一句：感谢您，我敬爱的导师！

同时，本论文的完成得到了很多厂家、专家们的指导和帮助，在此表示感谢！感谢天津津普太阳能热水器厂的齐心经理，感谢天津化工设计院的康泰琪高工，感谢天津市东方暖通设备股份合作公司的吕守明高工、李桥龙高工，感谢铁道科学研究院的杜雅兰高工，感谢天津机务段的沈建麟高工，感谢环境无害化技术转移中心北方分中心的韩晓泉处长、薛绍仁高工和朱萱高工，感谢邢国平老师。你们无私的帮助给了我极大的信心和勇气，使得我最终能够顺利完成本论文的撰写。此外，我要特别感谢的是两位外国专家，来自奥地利的 Dr. G. Jungmeier 以及来自德国的 Prof. Dr. H. J. Wagner，在本论文的撰写过程中，两位专家给我提供了方法指导并为我的论文提出了宝贵意见，对此我深表谢意！

我要感谢所有支持我、帮助我的同学和朋友们，你们的存在为我的学习和生活增添了不少色彩，你们总会在我最需要帮助的时候支持我，鼓励我，让我倍感温馨，谢谢你们！

最后，我要感谢我的家人和亲戚朋友们，你们给了我一个充满爱的世界，无论成功或是失败，你们总是在背后默默的支持我，为我喝彩，给我鼓励，给我信心，给我勇气，教会我乐观的面对生活。在此我要真挚的说一声：感谢你们！祝你们一生平安！