

中文图书分类号: F512.3; X820.3

密 级: 公开

UDC: 31

学 校 代 码: 10005



硕 士 学 位 论 文

MASTERAL DISSERTATION

论 文 题 目: 材料生命周期分析之内河水路货物运输的
基础研究

论 文 作 者: 张宇峰

学 科: 材料科学与工程

指 导 教 师: 龚先政

论文提交日期: 2011. 6. 29

UDC: 31
中文图书分类号: F512.3; X820.3

学校代码: 10005
学 号: S200809099
密 级: 公开

北京工业大学工学硕士学位论文

题 目: 材料生命周期分析之内河水路货物运输的基
础研究

英文题目: THE RESEARCH ON INLAND WATERWAY
FREIGHT TRANSPORTATION FOR
MATERIALS LIFE CYCLE ASSESSMENT

论 文 作 者: 张宇峰

学 科: 材料科学与工程

研 究 方 向: 材料环境负荷评价

申 请 学 位: 工学硕士

指 导 教 师: 龚先政 研究员

所 在 单 位: 材料科学与工程学院

答 辩 日 期: 2011 年 5 月

授 予 学 位 单 位: 北京工业大学

独创性声明

本人声明所提交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得北京工业大学或其它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。

签 名： 张宇峰

日 期： 2011.6.28

关于论文使用授权的说明

本人完全了解北京工业大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

（保密的论文在解密后应遵守此规定）

签 名： 张宇峰

导师签名： 龚先政

日 期： 2011.6.28

摘要

交通运输是整个工业生产系统中必不可少的重要环节,同时也造成大量资源消耗和环境污染。研究与交通运输相关联的环境污染及资源、能源利用问题,不仅是交通运输业能否健康、持续发展的一個关键,也是对材料产业乃至整个社会经济系统进行生命周期清单分析(LCI)或生命周期评价(LCA)的基础。内河运输是我国货物运输的一种重要方式。本论文选择我国内河水路货物运输作为主要研究内容,对我国内河货运涉及的资源消耗以及环境排放进行系统分析和评价,获得我国材料产业 LCA 研究中的内河货运数据。同时其结果也能表明内河货运本身的资源消耗和环境排放状况。

本文结合我国内河水路货运的基本情况,对长江货船、长江船队、长江支流货船和珠江货船这几种典型的内河货运方式进行了研究。依据我国的实际情况,建立了这几种典型水路货运方式的模型,对这四种情况的生命周期清单展开编制和分析,从而为我国各类材料及产品开展生命周期管理提供了基础数据。同时在清单分析的基础上,论文还对我国内河货运生命周期过程中涉及的资源能源利用和环境污染排放情况进行了影响评价与分析。

清单分析结果显示,我国内河货运排放量最大的污染物是 CO_2 。完成 $1000\text{t}\cdot\text{km}$ 货物周转量时,长江货船、长江船队、长江支流货船和珠江货船的 CO_2 排放量分别为 25.2kg 、 6.68kg 、 31.7kg 和 34.5kg 。影响评价结果显示,四种内河货运方式中,影响最大的环境影响类型为酸化效应,分别占这四种运输方式总环境影响的 37.30% 、 38.17% 、 34.61% 和 38.17% ;内河货运对环境影响最大的环境负荷项是 NO_x 的排放,它对这四种运输方式环境影响的贡献分别占 56.31% 、 57.72% 、 52.09% 和 57.72% ;四种内河货运方式完成单位货物周转量的环境影响从小到大依次为长江船队、长江货船、长江支流和珠江货船。

本文还对内河水路、公路和铁路运输的环境影响情况进行了比较,结果显示,完成相同的货物周转量,重型货车环境影响最大,铁路货运环境影响最小,长江船队的环境影响与铁路货运接近。同时还对 2005 年各运输方式的总体环境影响进行了比较。结果显示,这一年各货运方式总环境影响从大到小依次为公路货运、铁货运路、长江货运和珠江货运。

关键词: 生命周期清单; 生命周期评价; 长江货运; 珠江货运; 内河货运

Abstract

Transportation is of a great importance to the whole industrial production system, with serious energy consumption and environmental pollution. The research on its related energy and environmental problems is crucial to the sustainable development of transportation, and what's more, transportation is a major consideration for almost all of the life cycle assessment (LCA) and its life cycle inventory (LCI) is fundamental for related LCI and LCA. Inland waterway freight is an important mode of transport in China. In this paper, energy and environmental problems of inland waterway freight in China was analyzed and assessed. It is not only providing the basic transportation data for related materials LCA research but also clarifying related conditions of energy and environment from transportation itself.

In this paper, river freights in the Yangtze River cargo vessel, The Yangtze River barge fleet, the Yangtze River tributary and the Pearl River cargo vessel were investigated. Based on the actual situation in China, the model of these four typical conditions was established, and the life cycle inventories for inland waterway transportation were established by the models. The inventoried obtained shall become the basis of life cycle management of all kinds of materials and products. This paper also analyzed and assessed resource consumption and environmental emission from river freight transportation on the basis of life cycle inventory.

LCI results show that CO₂ is the largest emission of pollutants for inland waterway freight transport in China. CO₂ emission of 1000t · km freight turnover is 25.2kg, 6.68kg, 31.7kg and 34.5kg for the Yangtze River cargo vessel, the Yangtze River barge fleet, the Yangtze River tributary cargo vessel and the Pearl River cargo vessel respectively. LCIA results show that the biggest impact category of river transportation is acidification potential, accounting for the total environmental impact of 37.30%, 38.17%, 34.61% and 38.17% for each ways of transportation respectively. The most important environmental load of river freight transport is NO_x emission, which contributes 56.31%, 57.72%, 52.09% and 57.72% to the environmental impact of the four ways of transport respectively. The environmental impact of completing the same cargo turnover in small to large order is the Yangtze River barge fleet, the Yangtze River cargo vessel, the Yangtze River tributary cargo vessel and the Pearl River cargo vessel.

The results show that accomplishing the same cargo turnover, heavy truck have the largest environmental impact, and the railway freight has the minimum environmental impact; environmental impact of the Yangtze River fleet is close to the railway freight. In this paper, the overall environmental impact in 2005 was compared. The comparison shows that the overall environmental impact of shipping methods in decreasing order is roads, railways, Yangtze River cargo and Pearl River cargo.

Keywords: Yangtze River transportation, Pearl River transportation, inland waterway transport, life cycle inventory, life cycle impact assessment

目录

| | |
|----------------------------------|-----------|
| 摘 要..... | 1 |
| Abstract..... | 2 |
| 第 1 章 绪论 | 7 |
| 1.1 研究背景..... | 7 |
| 1.2 生命周期评价概述..... | 8 |
| 1.3 论文选题依据..... | 9 |
| 1.4 论文来源与研究内容..... | 11 |
| 第 2 章 评价方法体系的构建与选取 | 13 |
| 2.1 LCA 的原则..... | 13 |
| 2.2 LCA 方法学框架..... | 13 |
| 2.2.1 目的与范围的确定..... | 14 |
| 2.2.2 清单分析..... | 14 |
| 2.2.3 影响评价..... | 14 |
| 2.2.4 结果解释..... | 14 |
| 2.3 影响评价模型及方法的确定..... | 15 |
| 2.3.1 影响类型、类型参数和特征化模型的选择..... | 15 |
| 2.3.2 分类..... | 16 |
| 2.3.3 特征化..... | 16 |
| 2.3.4 选择性步骤..... | 18 |
| 2.4 本章小结..... | 19 |
| 第 3 章 长江水系货运的生命周期分析 | 21 |
| 3.1 长江水系货运概况..... | 21 |
| 3.2 研究目的与范围的确定..... | 22 |
| 3.2.1 研究目的..... | 22 |
| 3.2.2 研究范围..... | 22 |
| 3.2.3 研究对象..... | 22 |
| 3.2.4 功能单位..... | 23 |
| 3.3 生命周期清单分析..... | 23 |
| 3.3.1 长江典型货船生命周期清单..... | 23 |
| 3.3.2 长江典型船队生命周期清单..... | 28 |
| 3.3.3 长江支流典型货船生命周期清单..... | 30 |
| 3.3.4 长江水系三种运输方式清单结果比较..... | 32 |
| 3.4 生命周期影响评价..... | 34 |
| 3.4.1 影响类型、类型参数和特征化模型的选择..... | 34 |

| | |
|-----------------------------------|-----------|
| 3.4.2 特征化..... | 34 |
| 3.4.3 归一化..... | 35 |
| 3.5 结果解释..... | 36 |
| 3.6 本章小结..... | 39 |
| 第4章 珠江水路货运的生命周期分析..... | 41 |
| 4.1 珠江水系货运概况..... | 41 |
| 4.2 研究目的与范围的确定..... | 41 |
| 4.2.1 研究目的..... | 41 |
| 4.2.2 研究范围..... | 42 |
| 4.2.3 研究对象..... | 42 |
| 4.2.4 功能单位..... | 42 |
| 4.3 生命周期清单分析..... | 42 |
| 4.3.1 珠江典型货船运输阶段生命周期清单编目..... | 43 |
| 4.3.2 珠江典型货船消耗燃油生产过程生命周期清单编目..... | 44 |
| 4.3.3 功能单位珠江典型货船的生命周期清单..... | 44 |
| 4.4 生命周期影响评价..... | 45 |
| 4.4.1 影响类型、类型参数和特征化模型的选择..... | 45 |
| 4.4.2 特征化..... | 45 |
| 4.4.3 归一化..... | 46 |
| 4.5 结果解释..... | 46 |
| 4.6 本章小结..... | 48 |
| 第5章 内河货运与陆路货运的环境行为比较..... | 49 |
| 5.1 道路货运的生命周期评价..... | 49 |
| 5.1.1 目的、范围以及生命周期清单..... | 49 |
| 5.1.2 生命周期影响评价..... | 50 |
| 5.2 铁路货运的生命周期评价..... | 50 |
| 5.2.1 目的与范围的确定..... | 50 |
| 5.2.2 生命周期清单分析..... | 51 |
| 5.2.3 生命周期影响评价..... | 52 |
| 5.3 功能单位环境行为的比较..... | 52 |
| 5.4 运输方式的总体比较..... | 54 |
| 5.5 本章小结..... | 55 |
| 结论与展望..... | 57 |
| 参考文献..... | 59 |
| 攻读硕士学位期间所发表的学术论文..... | 63 |
| 致 谢..... | 65 |

第1章 绪论

随着社会生产力的飞速发展，人类社会活动的规模和深度不断扩大，人类对自然界的索取和改造也越来越多。然而，随着这些活动的深化，人们开始越来越多的面对自身活动所造成的负面影响，例如资源枯竭、土地荒漠化、生物多样性的破坏、气候异常等一系列环境问题。人们意识到只有采用人与自然和谐发展的可持续发展模式来替代原有的粗放型发展模式，才能实现自身的可持续发展。作为人类社会物质基础的材料产业的发展，尤其应该如此。改进和改造传统材料和开发新型生态环境材料，使材料的生产和使用能够与环境相协调，是材料产业实现可持续发展的必由之路。而评价材料的环境性能，目前通常采用生命周期评价（Life Cycle Assessment，简称 LCA）的基本概念、原则和方法。

1.1 研究背景

材料是国民经济和社会发展的基础和先导，纵观人类发展的历史可以清楚地看到，每一种重要新材料的发现和应用，都把人类支配自然的能力提高到一个新的水平。从 18 世纪钢铁技术的发明与应用，到 20 世纪 50 年代硅单晶和其它半导体材料应用，再到 20 世纪 90 年代以来新型光电子材料、光导纤维等新材料的进展，材料科学技术的每一次重大突破都会引起生产技术的重大变革，给社会生活带来巨大的变化。新材料技术不仅在现代工业、国防和高技术发展中是一项共性的关键技术，而且发展的新型材料还有可能引导新兴技术和新型行业，产生出新的支柱产业^[1]。

材料产业一方面推动着社会经济的发展和人类文明的进步，另一方面，在材料的采矿、提取、加工、生产、运输以及使用和废弃的过程中，需要消耗大量的资源和能源；同时，排放出的大量废水、废气和废渣又会造成生态环境的污染，威胁着人类的生存和健康。因此材料产业还要对地球的资源能源消耗和环境破坏承担责任。

材料与环境如何协调发展的问题日益受到人们的重视。20 世纪 90 年代出现了“生态环境材料”（Ecomaterials）的概念，要求材料在满足使用性能要求的同时还具有良好的全寿命过程的环境协调性^[1]。该概念的出现展示出了材料领域适应社会可持续发展的潮流。目前，被较为普遍接受的观点认为，生态环境材料应是同时具有满意的使用性能和优良的环境协调性能，或者是能够改善环境的材料。环境协调性是指对资源能源消耗少、对环境污染小和循环再生利用率高。

在生态环境材料研究与开发过程中，首先遇到的问题就是如何解决材料生产和应用过程中对环境系统的影响和评价问题，即环境协调性评价问题。由于材料是一个大系统，其全生命周期内的每个阶段都是相互联系和相互影响的，因此必

须采用系统的和相互联系的观点来看待材料生命过程的环境影响问题。在这种思想的指导下,生命周期评价这种全面评价产业活动生态影响潜力的方法逐渐成为对材料及其产品进行环境协调性的主导方法。

1.2 生命周期评价概述

随着环境保护意识的提高和对产品(包括服务)生产与消费中可能伴随的影响进一步了解,人们希望建立一些方法,来更好的理解和说明这些影响。生命周期评价就是基于这一目的而发展起来的技术之一。LCA 强调贯穿于从获取原材料、生产、使用、生命末期的处理、循环和最终处理(即从摇篮到坟墓)的产品生命周期的环境因素和潜在的环境影响,例如资源的使用和废弃物排放的环境结果。

在生命周期评价方法的研究方面,由国际标准化组织制定的环境管理标准 ISO14040 和 ISO14044 中的相关研究最有影响,体现了世界范围内 LCA 研究的基本共识。根据 ISO 14040 规定,LCA 必须包括目的与范围的确定、清单分析、影响评价和结果解释四个阶段^[2,3]。生命周期清单分析(Life Cycle Inventory, LCI)是生命周期评价中对所研究产品系统整个生命周期中输入和输出进行汇编和量化的阶段,即收集产品系统中定量或定性的输入输出数据、计算并量化的过程。输入和输出可包括与该系统有关的对资源的使用,以及向空气、水体和土地的排放。生命周期影响评价是理解和评价产品系统潜在环境影响的大小和重要性的阶段。它的最初的定义是一种技术性的、定量和(或)定性的过程来特征化和评价清单分析中的环境负荷的效应^[4]。其目的是通过使用与 LCI 结果相关的影响类型和类型参数,从环境角度审查一个产品系统,并为生命周期解释阶段提供信息。

目前的主要研究方向包括清单分析方法和生命周期影响评价(Life Cycle Impact Assessment, LCIA)方法。其中,清单分析的理论方法趋于完善,侧重于结合工业应用要求而对数据采集及其处理进行规范化。影响评价方法研究包括评价指标体系研究、影响评价特征化模型研究以及评价结果的规范化等。这是最容易引起争论的研究方向。影响评价的方法学和理论框架尚还在发展之中,各类影响类型模型也还处在不同的形成阶段。目前尚不存在普遍接受的方法在清单数据和具体的潜在环境影响之间建立一致、准确的联系^[5]。国际上对影响评价的实施提出了多种多样的方法,如生态稀缺法(Eco-scarcity)^[6]、环境优先级方法(EPS)^[7]、生态指数法(Eco-Indicator)^[8]和工业产品环境设计法(EDIP)^[9]等。这个方向的主要进展体现在系列环境损害类型的提出和寿命损害数学模型的建立,以及污染物对人体健康和生态系统毒性的衡量与确定^[10-14]。

LCA 对我们的经济社会运行、可持续发展战略、环境管理系统带来了新的

要求和内容,其应用十分广泛^[1]:对于工业企业部门,LCA可用于产品系统的生态辨识与诊断,产品生命周期影响评价与比较,产品改进效果评价,产品设计与新产品开发,循环回收工艺设计和清洁生产审计;对于政府环境管理部门和国际组织,可用于制定环境政策与建立环境产品标准,实施生态标志计划,优化政府的能源、运输和废物管理方案,向公众提供有关产品和原材料的资源信息,以及建立国际环境管理体系;对于消费者组织,可以引导绿色消费。LCA克服了传统环境评价片面性、局部化的弊病,对于企业改进产品的环境性能、实施清洁生产、政府制定环境政策优化环境管理和引导消费者绿色消费都具有非常重要的意义。

1.3 论文选题依据

交通运输是国民经济和社会发展的基础性、支撑性行业,在整个经济活动中发挥着重要的纽带作用。由于交通运输特殊的生产特点,决定了其在提供服务的同时,必然伴随着大量的能源消耗和环境污染排放。

交通运输系统的能源消耗及环境污染获得了较多的关注^[15-22],因此有不少研究人员利用LCA的方法对其进行了相关的研究。Cristiano^[23]等人使用了生命周期评价的方法得出了美国公路、铁路和航空三种货物运输方式运输单位吨英里货物的空气污染物排放清单,并进行了分析;Chester^[24]则利用生命周期评价方法比较了在美国私家车、公共汽车、铁路和航空等方式在不同条件下进行旅客运输时的温室气体排放;马丽萍^[25]则研究了两种典型货运汽车在三种技术条件下三种路况中运送货物的环境影响,并得出了详尽的生命周期清单数据和生命周期影响评价结果;刘颖昊等^[26]提出了一种货物运输的生命周期清单模型,但是依然缺乏及具体的清单数据,也没有影响评价。对水路运输进行LCA评价的则相对较少。挪威船级社和Aalesund College领衔的“Life Cycle Evaluation of ship Transportation”项目,将简化的LCA(Simplified LCA)方法用在M/V Color Festival上以获得用现有工具(Eco-indicator95)对船舶进行LCA评估的经验。该研究显示,NO_x和SO_x是船舶的主要的污染排放物,对环境的影响最大,且船舶营运阶段相对于其它生命周期的阶段对环境的影响更大^[27]。李碧英^[28]的研究也显示,在船舶的整个生命周期中,运营阶段对各类环境影响的贡献最大。较多的研究是对船舶本身进行LCA评价^[27, 29-31],船舶运营阶段只作为船舶生命周期的一部分进行计算。使用LCA的方法单独对国内内河货运涉及的资源能源消耗及环境排放进行系统评价和分析目前还是空白。

随着我国经济社会快速发展对交通运输需求的不断增加,以及机动化水平的快速提高,交通运输领域的能源消费呈现快速增长态势。根据统计年鉴^[32-34],2004

至 2007 年四年间，我国交通运输、仓储和邮政业的能源消耗达到了 15104.00、16671.81、18582.72 和 20643.37 万吨标准煤，分别占到了全年能源消耗的 7.43%、7.47%、7.55%和 7.77%，见图 1-1。考虑到仓储业和邮政业能源消耗相对有限，估计这四年交通运输的能源消耗占到了全国能源消耗总量的 7%左右，而且有增加的趋势。

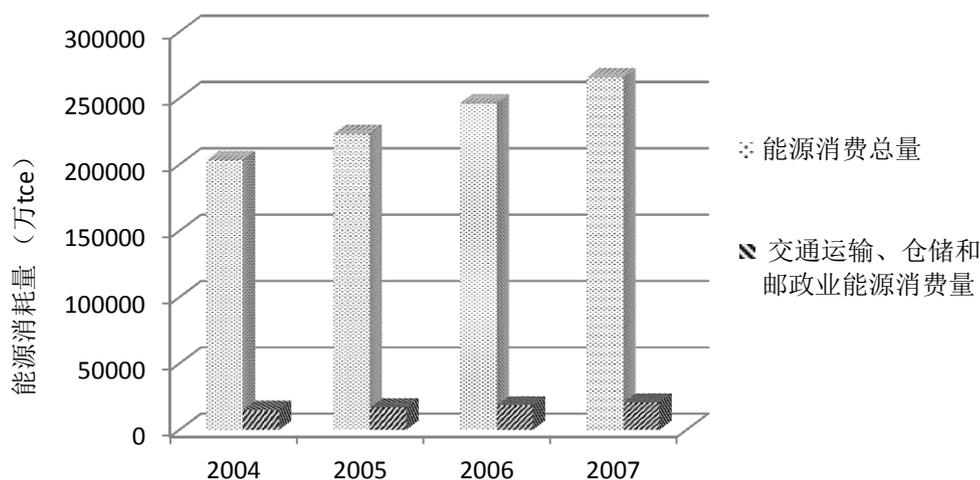


图 1-1 2004 年至 2007 年我国能源消费量情况

Figure 1-1 The situation of energy consumption from 2004 to 2007 in China

根据 2004 年中国政府公布的《中华人民共和国气候变化初始国家信息通报》^[35]，1994 年我国按照二氧化碳当量估算的温室气体的总排放量（净排放）水平为 364951.7 万 t/a，其中二氧化碳 266599 万 t/a，按 CO₂ 当量占 73%；甲烷和氧化亚氮按 CO₂ 当量折算分别占 20%和 7%；1994 年交通运输行业共排放二氧化碳 16556.7 万 t/a，占全国二氧化碳排放量的 6.21%。如果按照 3 种温室气体折合二氧化碳当量计算，交通运输行业二氧化碳排放占全国二氧化碳当量排放水平的 4.54%。另外，若考虑国际燃料舱（国际航空和国际航海）排放的二氧化碳，估算 2004 年中国全部交通运输业二氧化碳排放量约为 17641.7 万 t/a，占全国二氧化碳（CO₂）排放量的 6.6%，占全国二氧化碳当量折合总排放水平的 4.82%。交通运输业除排放二氧化碳外，还排放一氧化碳（CO）、氮氧化物（NO_x）、总碳氢（THC）^[36]、二氧化硫（SO₂）、非甲烷碳氢化物（NMVOC）、甲烷（CH₄）、氧化亚氮（N₂O）^[37]、颗粒物^[38, 39]等其它有害物质。

可以看出，交通运输业既是工业生产系统的重要环节，同时也造成大量的资源消耗大户和环境污染。内河水路运输是交通运输业的重要组成部分。据统计^[40-42]，2005、2006 和 2007 年我国全社会水路货运量分别达到了 22.0、24.9 和 28.1 亿 t，其中内河水路货运量分别为 10.6、11.6 和 13.0 亿 t，接近水运总量的一半。

因此，使用 LCA 方法对我国内河水路货运涉及的资源能源消耗及环境排放进行系统分析和评价是必要的。

由于我国水运网络复杂，各水系的航运情况各不相同，水运造成的资源能源消耗及环境排放也会有差别。在内河水运系统中，长江和珠江的货运量最大，2007 年两者的货运量及货运周转量^[42]分别占到了全国内河水运的近一半。本课题将选择这两个有代表性的水系分别进行研究。

1.4 论文来源与研究内容

本论文依托国家 863 项目“材料全生命周期环境负荷研究及应用示范”，对我国材料产业 LCA 评价中的内河水路货运基础数据进行分析和研究。

本文的主要研究内容分以下几个部分：1) 根据长江和珠江水系运输工具的整体状况，获得两水系典型货运工具完成一定货物周转量的生命周期清单。2) 分析、评价我国内河水路货物运输在其生命周期过程中涉及的资源、能源利用及环境污染排放状况，诊断并辨识与目前内河水运体系相关的重大资源和环境问题，寻求改善货运相关环境问题的机会与措施。3) 通过比较不同水系以及与陆路运输的生命周期环境行为的差异，为相关交通规划及污染物排放控制措施的改善提供相关依据。

第2章 评价方法体系的构建与选取

2.1 LCA 的原则

LCA 考虑产品的整个生命周期，其从原料的获取、能源和材料的生产、产品制造和使用、到产品生命末期的处理以及最终处置。通过这种系统的观点，可以识别并可能避免整个生命周期各阶段或各环节的潜在环境负荷的转移。这种方法以环境为焦点，关注产品系统中的环境因素和环境影响，通常不可考虑经济和社会因素及其影响。它是围绕功能单位构建的一个相对的方法，功能单位定义了研究的对象，所有的后续分析以及 LCI 中的输入输出和 LCIA 结果都与功能单位相对应。LCA 是一种反复的技术，它的每个阶段都使用其他阶段的结果，在每个阶段中以及各阶段之间应用这种反复方法将使研究工作以及报告结果具有全面性和一致性。同时实施 LCA 还需要考虑透明性和全面性。LCA 中的决策更适宜以自然科学为基础，如果不可能则可以应用其他的科学方法或者参考国际惯例；如果都没有则所做的决策可建立在价值选择的基础上。

2.2 LCA 方法学框架

最早提出生命周期评价概念框架的是环境毒理与环境化学学会（SETAC）。国际标准化组织（ISO）于 1997 年 6 月颁布了 ISO14040（环境管理-生命周期评价-原则和框架）标准，在原来 SETAC 框架的基础上做了一些改动，成为指导企业界进入 ISO14000 环境管理的一个国际标准^[43]。ISO14040 将生命周期评价分为相互联系、不断重复进行的四个步骤：目的与范围的确定、清单分析、影响评价和结果解释。其技术框架图如图 2-1 所示：

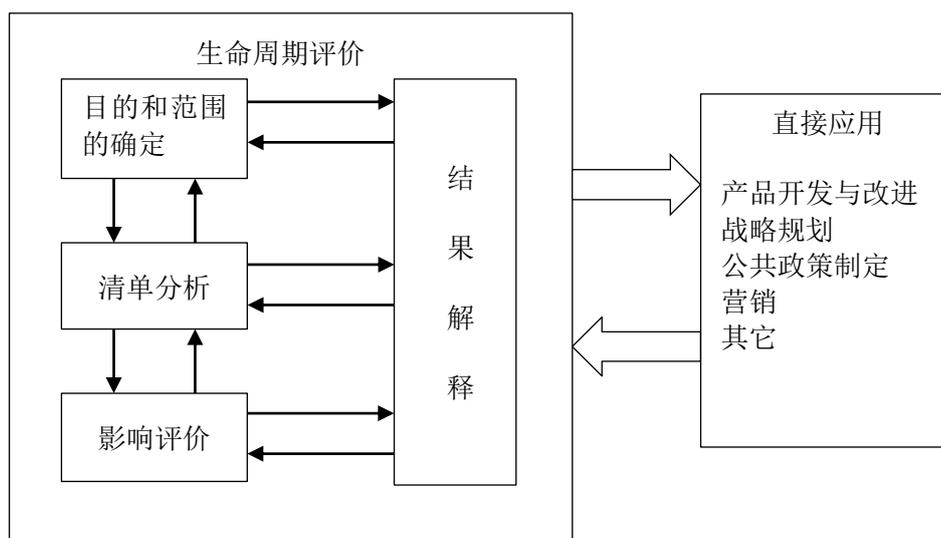


图 2-1 生命周期评价技术框架

Figure 2-1 The technique framework of life cycle assessment

2.2.1 目的与范围的确定

LCA 研究目的中须明确陈述其应用意图、开展该项研究的理由以及它的使用对象。然后,按照评价的目的界定研究范围,它包括评价系统的定义、边界的确定、假设条件以及有关数据要求和限制条件等。目的和范围的确定应重点考虑:目的、范围、功能单元、系统边界、数据质量和关键复核过程几个方面,以确保生命周期评价的顺利进行^[44]。

LCA 研究是一个反复的技术,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。

2.2.2 清单分析

生命周期清单分析是生命周期评价中对所研究产品系统整个生命周期中输入和输出进行汇编和量化的阶段,即收集产品系统中定量或定性的输入输出数据、计算并量化的过程。该阶段是 LCA 最重要的阶段,也是环境影响评价阶段的基础。生命周期清单分析的主要步骤包括数据的收集、数据计算和物流能流以及排放物的分配。

进行清单分析是一个反复的过程。当取得了一批数据,并对系统有进一步的认识后,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。有时也会要求对研究目的和范围加以修改。

2.2.3 影响评价

LCA 中影响评价的目的是根据 LCI 的结果对潜在环境影响的程度进行评价。一般来说,这一过程包括与清单数据相关联的环境影响类型和类型参数,这样便于认识这些影响。LCIA 还为生命周期解释阶段提供必要的信息。影响评价可以包括一个反复评审 LCA 研究目的和范围的过程,通过这个过程来确定是否达到研究目的,如果研究目的无法实现,则需要对目的和范围进行修改。

影响评价是 LCA 研究中争议较大的阶段,在已进行的 LCA 研究中采用了多种不同的环境影响评价模型,并且至今仍不存在一种普遍接受的方法,使清单数据和具体的潜在环境影响之间建立一致、准确的联系。有关本研究中评价模型的选取将在本章 2.3 中详细讨论。

2.2.4 结果解释

生命周期结果解释是用来识别、判定、检查和评估来自于产品系统 LCI 或 LCIA 结果的信息并对此加以表述,以满足研究目的与范围所规定的应用要求。它是形成结论、建议和决策的基础。

生命周期解释阶段的要素包括对重大问题的识别、评估和结论建议及报告。

其中,重大问题可分为清单数据类型(如能源、污染物排放等)、影响类型(如资源消耗、温室效应等)和生命周期各阶段(如运输、能源生产等单元过程或过程组)对生命周期清单或生命周期影响评价结果的主要贡献。

2.3 影响评价模型及方法的确定

生命周期影响评价是 LCA 中理解和评价产品系统潜在环境影响大小和重要性的阶段,LCIA 结合 LCA 其他阶段为一个或多个产品系统提供了一个关于环境和资源问题的系统的全景。LCIA 将 LCI 的结果划归到相应的影响类型,每种类型选择一个类型参数,并计算得出类型参数结果。全部类型参数结果提供了关于产品系统输入和输出中环境问题的相关信息。

根据 ISO14040^[2]的规定,LCIA 阶段的必备要素包括选择影响模型、类型参数以及特征化模型、将 LCI 结果归类(分类)和类型参数结果计算(特征化),可选要素包括根据基准计算类型参数结果的相对值(归一化)、分组和加权。

2.3.1 影响类型、类型参数和特征化模型的选择

影响类型、类型参数和特征化模型的选择应通过验证并符合 LCA 的目的和范围^[3]。所选择的影响类型在考虑到研究的目的和范围的同时,应能全面反映产品系统所涉及的环境问题。

本论文中依据目前国际上采用较多而且易于实现的 CML 方法,根据内河货运的环境特点,将环境影响类型分为不可再生资源消耗(abiotic depletion potential, ADP)、温室效应(global warming potential, GWP)、酸化效应(acidification potential, AP)、光化学臭氧形成(photochemical oxidation potential, POCP)、水体富营养化(eutrophication potential, EP)和人体健康损害(human toxicity, HT)六种,并采用国际上已基本达成共识的类型参数。与本文相关的影响类型和类型参数如表 2-1 所示:

表 2-1 内河货运相关的影响类型和类型参数
Table 2-1 Impact category and category indicator for the inland waterway transportation

| 环境影响类型 | 类型参数 |
|---------------|--------------------------------------|
| 不可再生资源消耗(ADP) | kg(铈当量) |
| 温室效应(GWP) | kg(CO ₂ 当量) |
| 酸化效应(AP) | kg(SO ₂ 当量) |
| 光化学臭氧形成(POCP) | kg(乙烯当量) |
| 富营养化(EP) | kg(PO ₄ ³⁻ 当量) |
| 人体健康损害(HT) | kg(1,4-二氯苯当量) |

目前,主要的特征化模型有以下几种:1) 负荷模型,这类模型仅通过物理量大小来评价清单提供的数据。2) 当量模型,这类模型使用当量系数来汇总清

单提供的数据。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。4) 总体暴露·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·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。

当量评价模型的优势在于它是建立在科学研究基础之上, 同一种压力因子, 无论其暴露途径、暴露地点等条件如何不同, 它所能产生的潜在环境影响都认为是一样的, 所以其结果不受时间因素的影响, 其在 LCA 研究中得到广泛应用。因此本论文采用当量模型法。

2.3.2 分类

分类是将清单结果与环境影响类型相联系并分组排列的过程, 它是一个定性的过程。当清单结果中污染物涉及的环境问题不止一种时, 通常采用并联、串联或符合机制将污染物分配至不同的影响类型。但在实际操作中, 对分类没有特别的要求, 可对其进行简化处理。本文中清单结果的影响类型分类如表 2-2 示:

表 2-2 环境影响类型分类
Table 2-2 Classification of environment impact categories

| 环境影响类型 | 环境负荷项目 |
|----------|---|
| 不可再生资源消耗 | 原煤, 原油, 天然气 |
| 温室效应 | CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O |
| 酸化效应 | NO _x , SO ₂ , NH ₃ |
| 光化学臭氧形成 | CO, NO _x , SO ₂ , NMVOC |
| 富营养化 | NO _x , NH ₃ |
| 人体健康损害 | NO _x , SO ₂ , NH ₃ , 颗粒物 |

涉及多个环境影响类型的环境负荷项目 (NO_x、N₂O、NH₃ 和 SO₂) 的分配本文采取了简化处理, 假设它们都采用串联机制分配到不同的影响类型中, 即它们的分配系数都是 1。

2.3.3 特征化

特征化步骤是利用不同影响类型的参数结果来共同展现产品系统的生命周期影响评价特征。其计算过程采用特征化因子将生命周期清单结果换算成统一单位, 并在一种影响类型内对换算结果进行合并以得到量化的指标结果。不同的清单种类造成的同一种环境损害效果的程度不同, 例如二氧化硫和氮氧化物都可能产生酸化效应, 但同样的量所引起的损害程度不同。特征化就是对比分析和量化这种程度的过程。

在特征化阶段, 清单数据被转化为各环境影响类型的指标结果, 其转化过程

在原理上基于用环境问题因果关系体系中包含的环境影响机制来构建影响类型特征模型。本文采用当量模型对清单结果进行特征化描述，当量模型中所定义的各类环境影响潜值计算公式^[45]分列如下：

(1) 不可再生资源消耗，采用式(2-1)进行计算：

$$IR_{ADP} = \sum_i ADP_i \times m_i \quad (2-1)$$

式中， IR_{ADP} ——不可再生资源消耗的特征化结果；

ADP_i ——第*i*资源的消耗潜力，即资源消耗的特征化因子；

m_i ——资源*i*的消耗量；

(2) 温室效应，采用式(2-2)进行计算：

$$IR_{GWP} = \sum_i GWP_i \times m_i \quad (2-2)$$

式中， IR_{GWP} ——温室效应的特征化结果；

GWP_i ——物质*i*相对于CO₂的温室效应当量因子；

m_i ——物质*i*的排放量；

(3) 酸化效应，采用式(2-3)进行计算：

$$IR_{AP} = \sum_i AP_i \times m_i \quad (2-3)$$

式中， IR_{AP} ——酸化效应的特征化结果；

AP_i ——物质*i*相对于SO₂的酸化效应当量因子；

m_i ——物质*i*的排放量

(4) 人体健康损害，采用式(2-4)进行计算：

$$IR_{HT} = \sum_i HT_i \times m_i \quad (2-4)$$

式中， IR_{HT} ——人体健康损害的特征化结果；

HT_i ——物质*i*相对于1,4-二氯苯的人体健康损害效应当量因子；

m_i ——物质*i*的排放量；

(5) 光化学臭氧形成，采用式(2-5)进行计算：

$$IR_{POCP} = \sum_i POCP_i \times m_i \quad (2-5)$$

式中， IR_{POCP} ——光化学臭氧形成的特征化结果；

$POCP_i$ ——物质*i*相对于乙烯的光化学臭氧形成效应当量因子；

m_i ——物质*i*的排放量；

(6) 水体富营养化，采用式(2-6)进行计算：

$$IR_{EP} = \sum_i EP_i \times m_i \quad (2-6)$$

式中， IR_{EP} ——水体富营养化的特征化结果；

EP_i ——物质*i*相对于PO₄³⁻的水体富营养化效应当量因子；

m_i ——物质*i*的排放量；

研究中所确定的ADP、GWP、AP、POCP、HT和EP六种环境影响类型的

当量因子如表 2-3 所示:

表 2-3 各影响类型的当量因子
Table 2-3 The equivalency factor of impact categories

| 环境影响类型 | 当量因子 |
|--------|----------------------------------|
| ADP | kg-铈 |
| GWP | kg-CO ₂ |
| AP | kg-SO ₂ |
| POCP | kg-乙烯 |
| HT | kg-1,4-二氯苯 |
| EP | kg-PO ₄ ³⁻ |

本文所涉及的相关环境排放的环境影响特征化因子采用 CML 体系的特征化因子,化石能源耗竭特征化因子采用高峰^[46]博士修正 CML 模型计算得到的特征化因子。本文采用的环境影响特征化因子见表 2-4:

表 2-4 环境影响特征化因子
Table 2-4 Characterization factors for environment impact

| 影响类型 | ADP | GWP | AP | HT | POCP | EP |
|------------------|----------|--------------------|--------------------|--------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 特征化基准 | kg-铈 | kg-CO ₂ | kg-SO ₂ | kg-(1,4)-二氯苯 | kg-C ₂ H ₄ | kg-PO ₄ ³⁻ |
| 原煤 | 5.69E-08 | | | | | |
| 原油 | 1.42E-04 | | | | | |
| 天然气 | 1.18E-07 | | | | | |
| NO _x | | | 0.7 | 1.2 | 0.028 | 0.13 |
| N ₂ O | | 270 | | | -0.427 | |
| CH ₄ | | 21 | | | | |
| CO | | | | | 0.027 | |
| NMVOC | | | | | 0.416 | |
| PM | | | | 0.82 | | |
| NH ₃ | | | 1.88 | 0.1 | | 0.35 |
| CO ₂ | | 1 | | | | |
| SO ₂ | | | 1 | 0.096 | 0.048 | |

2.3.4 选择性步骤

为了更进一步从整体上概括系统对环境的影响,生命周期影响评价阶段还包括归一化、分组和加权等选择性步骤,其目的在于比较和衡量不同环境影响类型之间的环境损害。因此,本论文研究的可选性步骤选择归一化。

归一化是通过确定各种环境影响类型的基准值,将特征化结果与基准值进行比较而得到类型结果相对值的过程。指标结果归一化的目的在于增加对所研究系统中每一项指标结果相对值的了解,使来自于不同影响类型的影响值具有可比性。

该步骤是以类型参数计算结果除以选定的基准值来加以转换。目前国际上推荐采用的世界范围内的归一化基准值^[46]，如表 2-5 所示。我国不可再生资源消耗的归一化基准值采用高峰博士计算出的结果： 2.14×10^{10} kg 铈当量。

表 2-5 世界范围内的归一化基准值

Table 2-5 Factors for normalization with the annual extent of the baseline impact categories

| 环境影响类型 | 单位 | 归一化基准 |
|---------------|--|----------|
| 温室效应(GWP) | kg(CO ₂ 当量)·yr ⁻¹ | 3.86E+13 |
| 酸化效应(AP) | kg(SO ₂ 当量)·yr ⁻¹ | 2.99E+11 |
| 光化学臭氧形成(POCP) | kg(C ₂ H ₄ 当量)·yr ⁻¹ | 4.55E+10 |
| 人体健康损害(HT) | kg(1,4-二氯苯当量)·yr ⁻¹ | 4.98E+13 |
| 水体富营养化(EP) | kg(PO ₄ ³⁻ -当量)·yr ⁻¹ | 1.29E+11 |

2.4 本章小结

本章的主要工作是对生命周期评价方法进行了辨识、选择与系统化，提出了适合我国货运的生命周期评价方法体系。确定了研究中考虑的不可再生资源消耗、温室效应、酸化效应、光化学臭氧形成效应、人体健康损害和富营养化六种环境影响类型，选择以当量模型为环境影响评价模型，并对其计算方法以及各种环境影响类型的当量因子进行了阐述，最后选择了归一化步骤和等权重加权，作为对不同产品间的环境影响进行分析的手段。

第3章 长江水系货运的生命周期分析

3.1 长江水系货运概况

由于我国水运网络复杂，各水系的航运情况各不相同，水运造成的资源能源消耗及环境排放也会有差别。在内河水运系统中，长江的货运量最大，2005年至2007年长江的货运总量及货运周转总量如表3-1所示：

表3-1 我国内河以及长江货运概况^[40-42, 47-50]

Table 3-1 Overview of the Yangtze River Shipping and inland waterway shipping in China

| 年份 | 内河货运 | | 长江水系货运 | | 长江水系货运 占内河货运比例 | |
|------|--------------|-------------------|--------------|-------------------|-------------------|------------------|
| | 货运量 (亿 t) | 货物周转量 (亿 t·km) | 货运量 (亿 t) | 货物周转量 (亿 t·km) | 货运量 所占比例(%) | 货物周转量 所占比例(%) |
| 2001 | 7.1 | 1537.7 | 3.1 | 847.3 | 43.66 | 55.10 |
| 2002 | 7.6 | 1508.7 | 3 | 795.3 | 39.47 | 52.71 |
| 2003 | 8.2 | 1708.8 | 3.2 | 922.2 | 39.02 | 53.97 |
| 2004 | 9.2 | 2184 | 3.57 | 1200.43 | 38.80 | 54.96 |
| 2005 | 10.6 | 2626 | 4.21 | 1484.54 | 39.72 | 56.53 |
| 2006 | 11.6 | 3025.3 | 4.6 | 1675.87 | 39.66 | 55.40 |
| 2007 | 13 | 3553.1 | 5.34 | 2022.15 | 41.08 | 56.91 |

从3-1表中可以看到，2001年至2007年间，随着我国经济社会的发展，内河以及长江的货运量和周转量都在稳步提升。这七年间，我国内河货运量平均每年增长10.64%，货物周转量平均每年增长15.35%；长江水系货运量平均每年增长9.71%，货物周转量平均每年增长16.20%。我国内河货运以及长江水系货运的货物周转量增长率均高于货运量的增长率，这说明内河货运中远距离运输的增长较快。这与内河航运更适合较远距离货运相一致。

这七年间，长江水系货运量占内河货运量的比例保持在40%左右，2001年至2004年所占比例有所下降，而2005年至2007年略有回升。这说明在新世纪的前四年，长江水系货运量虽然总体有所增长，但增长的幅度不如内河货运整体的增长，而在2005年和2007年两年其货运量增长率超过了内河总体货运量增长率。但这七年长江货运的货运量增速总体是低于内河货运量增速的，这导致长江水系货运量占内河货运总量的比例略有下降。在2002年，长江水系货物周转量有明显下降，其占内河货物周转量的比例也下降了约2.4%。但从2003年开始，其货物周转量开始显著增长，且其整体增长幅度要大于内河货物周转量总体增长幅度。至2007年，其占内河货物周转量的比例较2001年上升了约1.8%。就2001年至2007年总体而言，长江水系周转量增速高于内河货物周转量增速，这说明相对于其它的内河水系，长江水系的远距离货运增速更快。

考虑到运输工具拥有量数据收集的可行性，本文以2005年作为基准来研究

长江水系货运的总体环境影响。在 2005 年，长江水系货物周转量达 1484.54 亿吨公里，占到了内河货物周转总量的 56.53%。

长江水系货运方式主要有机动货船运输以及船队进行运输。船队运输是内河货运的一种重要方式，它是由一艘提供动力的船舶与一艘或数艘载货船舶组成编队进行货运。有动力的船舶可以是推（拖）船或者是机动货船；载货船舶可以是本身无动力的驳船也可以是载货但是不提供动力的机动货船。船队运输具有载货量大，吃水相对较小，编组灵活等特点，适合在长江干流运输货物。本文为了便于分析将假定长江典型船队由推船和驳船组成。长江支流由于通航条件和干流差别较大，其机动货船运输在本文被单独考虑。

3.2 研究目的与范围的确定

3.2.1 研究目的

研究目的是：1) 获得长江典型货运工具完成一定货物周转量的生命周期清单。2) 分析、评价长江水路货物运输在其生命周期过程中涉及的资源、能源利用及环境污染排放状况，诊断并辨识与目前内河水运体系相关的重大资源和环境问题，寻求改善货运相关环境问题的机会与措施。3) 长江不同运输方式的生命周期环境行为的差异，为相关交通规划及污染物排放控制措施的改善提供相关依据。

3.2.2 研究范围

根据生命周期评价方法的定义以及本课题研究的具体目的和针对性，同时结合我国内河水运本身的特点，论文将研究范围界定为：典型船舶和船队的运输阶段和燃油生产两个生命阶段。由于使用阶段在船舶生命周期过程中占据着非常重要的地位，因此对水路货运体系进行评价，关键在于运输阶段。由于船舶运输阶段造成的环境影响的类型及原因也非常复杂，而在这一阶段船舶发动机的运行对资源消耗、环境污染的贡献最大^[27]，因此运输阶段的评价仅限于船舶发动机的消耗与排放，且仅考虑燃油消耗。同时，研究船舶使用过程的环境影响必须考虑燃油的生产过程造成的影响，所以燃油的生产阶段也是评价水路运输体系的一个非常重要的组成部分。另外，本研究对船舶制造、维护、港口及航道基础设施的建设和运营等过程以及所有的运输和销售活动均未作考虑，这是因为考虑到产品生命周期评价运输阶段的变数主要存在于船舶的运行状况上，而其他相关过程产生的影响较小。此外由于缺乏相关资料，本研究也未考虑船舶报废后处置阶段。

3.2.3 研究对象

内河水路货运方式主要有机动货船运输，以及推船与驳船组成船队进行运输。

船队运输是长江货运的典型运输方式之一。因此,本文研究对象包括长江典型货船,长江典型船队,长江主要支流典型货船。

3.2.4 功能单位

为比较恰当表示船舶运输所涉及的资源、环境性能,且使其能与道路运输研究具有一定的可比性,本研究将功能单位确定为典型船舶完成 1000t·km 的货物周转量。

3.3 生命周期清单分析

3.3.1 长江典型货船生命周期清单

首先要建立长江典型货船运输的模型。2005 年长江沿线主要省份的内河船舶拥有量如表 3-2 所示:

表 3-2 2005 年长江沿线主要省份的内河船舶拥有量^[51]

Table 3-2 The amount of ships in major provinces along the Yangtze River in 2005

| 省份 | 货船数 (艘) | 净载重量 (t) | 货船功率 (kW) | 平均净载重量 (t) | 货船平均功率 (kW) |
|----|------------|-------------|--------------|---------------|----------------|
| 四川 | 3763 | 364853 | 168226 | 97 | 45 |
| 重庆 | 2130 | 1806418 | 522439 | 848 | 245 |
| 湖南 | 6122 | 730269 | 319961 | 119 | 52 |
| 湖北 | 2945 | 1352984 | 430548 | 459 | 146 |
| 江西 | 4772 | 952969 | 355405 | 200 | 74 |
| 安徽 | 29567 | 12798959 | 4977938 | 433 | 168 |
| 江苏 | 31117 | 6226702 | 2851207 | 200 | 92 |
| 上海 | 1008 | 215314 | 116701 | 214 | 116 |
| 总量 | 81424 | 24448468 | 9742425 | 300 | 120 |

根据表 3-2, 2005 年长江沿线主要省份拥有的内河船舶平均净载重吨位为 300t, 平均主机功率为 120kW。因此,将长江典型货船模型的参数确定为净载重吨 300t, 主机额定功率为 120kW, 消耗燃油为柴油。该模型代表长江水系整体货运工具情况。根据长江干线船舶平均航速^[52], 将长江典型货船模型的航速确定为 12km/h。

表 3-3 某厂生产的 135 系列柴油机技术指标

Table 3-3 Technical specifications of 135 series diesel engine

| 柴油机型号 | 超负荷功率/转速 (kw/r/min) | 额定功率/转速 (kw/r/min) | 12 小时功率燃油消耗率 (g/kwh) |
|------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|
| (A)4135CA | 62/1545 | 50.3/1500 | ≤233 |
| 4135ACA | 77/1545 | 62.9/1500 | ≤233 |
| 6135ACZ | 115.7/1545 | 94.6/1500 | ≤233 |
| (A)6135ZCA | 137.5/1545 | 112/1500 | ≤229 |
| 6135AZCA | 161.8/1545 | 132.4/1500 | ≤229 |

135 系列柴油机为我国内河船舶主机较为常用的柴油机型。表 3-3 为某柴油机生产厂家生产的 135 系列船用柴油机技术指标。这些柴油机中，额定功率与长江典型货船额定功率最为接近的是 (A) 6135ZCA 型柴油机，其 12 小时功率燃油消耗率最大为 0.229kg/kWh。由于功率接近，本文以 0.229kg/kWh 作为典型货船主机的耗油率。

货船完成单位周转量时，主机输出的功率可由式 (3-1) 求出：

$$\text{单位周转量主机输出功} = \frac{\text{主机输出总功}}{\text{货运量} \times \text{运距}} \quad (3-1)$$

式 (3-1) 可化为：

$$\text{单位周转量主机输出功} = \frac{\text{主机功率} \times \text{主机运行时间}}{\text{载货量} \times \text{航速} \times \text{航行时间}} \quad (3-2)$$

假设主机运行时间与航行时间相同，且始终处于额定功率，载货量与净载重量相同，则式 (3-2) 可化为：

$$\text{单位周转量主机输出功} = \frac{\text{主机功率}}{\text{净载重量} \times \text{航速}} \quad (3-3)$$

根据式 (3-3) 以及确定的参数，长江典型货船模型每完成 1000t·km 货物周转量时，船舶主机输出功为 33.33kwh。再根据主机的耗油率可得典型货船完成 1000t·km 货物周转量的油耗为 7.63kg。

参与评价的生命周期过程包括典型船舶的运输阶段和所消耗燃油的生产两个生命阶段，其清单编目涉及了初级能源资源的投入和各类环境排放物。其中大气排放物主要涉及燃油生产和燃烧产生的大气污染物，包括 CO₂、CO、非甲烷挥发性有机化合物 (NMVOC)、NO_x、SO₂、CH₄、N₂O、颗粒物 (PM) 等。

3.3.1.1 长江典型货船运输阶段的清单编目 为了对货船运输阶段进行清单编目，首先要获得船舶的污染物排放因子。排放因子反映了船舶主机输出单位功时所排放污染物的数量，单位为 g/kWh。

(1) 污染物排放因子 关于货船运输过程中的环境排放，研究中主要考虑燃油燃烧产生的排放。船舶排放的大气污染物中的 NO_x、N₂O、CH₄、CO、NMVOC、PM 和 NH₃，其排放因子计算方法则通过修正欧洲环境署 (EEA) 公布的《排放清单指南 2007》(Emission Inventory Guidebook.2007) 中非控制状态下柴油机排放因子计算方法得到。未修正的计算方法如表 3-4 所示：

表 3-4 未修正的非控制状态下柴油机排放因子^[53]

Table 3-4 Not modified emission factors for uncontrolled diesel engines

| 消耗与排放 | 功率范围 | | |
|------------------|-------|---------------------------|---------|
| | g/kWh | P≤130kW | P>130kW |
| NO _x | | 14.36 | 14.36 |
| N ₂ O | | 0.35 | 0.35 |
| CH ₄ | | 0.05 | 0.05 |
| CO | | 26.0-14·P ^{0.1} | 3.0 |
| NMVOC | | 12.0-6.5·P ^{0.1} | 1.3 |
| PM | | 6.0-3.0·P ^{0.1} | 1.1 |
| NH ₃ | | 0.002 | 0.002 |
| FC ₀ | | 272-0.12·P | 254 |

表 3-4 中的 FC_0 为这套方法体系下的柴油理论耗油率。由于典型货船模型的主机功率和实际耗油率 FC 都已经知道，可依据实际耗油率 FC 对表 3-4 中的排放因子计算方法进行修正，如式 (3-4) 和 (3-5) 所示：

$$f_i = f_0 \cdot \eta \quad (3-4)$$

$$\eta = \frac{FC}{FC_0} \quad (3-5)$$

f_i 为修正后的排放因子，单位为 g/kWh； f_0 为修正前的排放因子，单位为 g/kWh； η 为修正系数； FC 为典型货船模型的实际耗油率，单位为 g/kWh； FC_0 为在原《排放清单指南 2007》方法体系下计算出的理论耗油率，单位为 g/kWh。

长江典型货船的主机功率为 120kW，油耗为 0.229g/kWh，根据表 3-4 和式 (3-5) 可计算出修正系数 η 的值为 0.889。再根据表 3-4 和式 (3-4)，则可计算出这部分大气污染物的排放因子，见表 3-5：

表 3-5 长江典型货船部分污染物的排放因子

Table 3-5 Yangtze River typical vessel emission factors of pollutants

| 污染物 | NO _x | N ₂ O | CH ₄ | CO | NMVOC | PM | NH ₃ |
|------------|-----------------|------------------|-----------------|------|-------|------|-----------------|
| 排放因子(g/kg) | 12.77 | 0.31 | 0.044 | 3.03 | 1.34 | 1.03 | 0.0018 |

关于 CO₂，其排放因子可以依照排放清单指南给出的简单方法结合燃烧化学平衡进行计算，见式 (3-6)：

$$f_{CO_2} = 44.011 \cdot \left(\frac{FC}{12.011 + 1.008 \cdot r_{H/C}} - \frac{f_{CO}}{28.011} - \frac{f_{VOC}}{13.85} - \frac{f_{PM}}{12.011} \right) \quad (3-6)$$

f_{CO_2} 为 CO₂ 的实际排放因子，单位为 g/kWh； f_{CO} 和 f_{PM} 分别为修正后 CO 和 PM 的排放因子，单位为 g/kWh； f_{VOC} 为挥发性有机化合物 (VOC) 的排放因子，其在数值上等于修正后的 NMVOC 与 CH₄ 的实际排放因子之和，单位为 g/kWh； FC 为船舶主机实际耗油率，单位为 g/kWh； $r_{H/C}$ 为燃料中氢原子数与碳原子数

之比,在这里其数值取 $2.0^{[53]}$ 。根据式(3-6)可以算出 CO_2 排放因子为 705.62g/kwh 。

SO_2 的排放因子可根据燃油中的硫含量及其转化率确定。根据我国轻柴油标准 GB 252-2000 规定的轻柴油硫含量限值,确定柴油中硫含量为 0.2% (m/m)。由于燃料中的硫元素会以 $1\% \sim 3\%$ 的比例转化为硫酸盐成为微粒的一部分^[54],因此可假设 98% 的硫元素转化成了 SO_2 。从而可以计算出每消耗 1kg 柴油,将排放 0.00392kg 的 SO_2 。由船舶耗油率即可算出,长江典型货船 SO_2 的排放因子为 0.898g/kwh 。

(2) 长江典型货船运输阶段排放清单 根据已确定的污染物排放因子,可以进一步计算得到长江典型货船在运输阶段中的环境排放,从而建立功能单位运输阶段排放清单,如表 3-6 所示:

表 3-6 长江典型货船运输阶段中的环境排放清单

Table 3-6 A typical cargo ship in the Yangtze River running list of environmental emissions

| 污染物 | 单位 | 排放量 |
|----------------------|-------------|----------|
| NO_x | kg/1000t-km | 4.26E-01 |
| N_2O | kg/1000t-km | 1.04E-02 |
| CH_4 | kg/1000t-km | 1.48E-03 |
| CO | kg/1000t-km | 1.01E-01 |
| NMVOG | kg/1000t-km | 4.47E-02 |
| PM | kg/1000t-km | 3.43E-02 |
| NH_3 | kg/1000t-km | 5.93E-05 |
| CO_2 | kg/1000t-km | 2.35E+01 |
| SO_2 | kg/1000t-km | 2.99E-02 |

3.3.1.2 燃油的生产过程生命周期清单编目 由于燃油的生产过程也在系统边界之内,对水路货运的环境影响还必须包括燃料生产过程所造成的影响。

表 3-7 生产单位质量(1kg)柴油的生命周期清单

Table 3-7 The inventory for the fuel production of a unit mass

| 环境负荷项目 | 单位 | 环境负荷值 | |
|--------|---------------|--------------|----------|
| 能源消耗 | 原煤 | kg | 4.73E-02 |
| | 原油 | kg | 1.31E+00 |
| | 天然气 | m^3 | 7.87E-05 |
| 环境排放 | NO_x | kg | 8.40E-04 |
| | CH_4 | kg | 2.15E-04 |
| | CO | kg | 1.33E-04 |
| | PM | kg | 1.73E-03 |
| | CO_2 | kg | 2.20E-01 |
| | SO_2 | kg | 1.15E-03 |
| | 液体废弃物 | kg | 7.60E-01 |
| 固体废弃物 | kg | 7.70E-03 | |

根据袁宝荣对中国石化能源生产的生命周期清单研究^[55], 获得了单位质量柴油生产的清单编目, 见表 3-7。该清单中涉及了各类初级能源的投入和生命周期过程各类污染物的排放。

长江典型货船完成 1000t·km 货物周转量的油耗为 7.63kg, 因此可依据表 3-7 中的数据建立了与功能单位运输阶段相对应的燃油生产阶段的清单, 具体结果如表 3-8 所示。

表 3-8 与长江货船功能单位运输阶段相对应的柴油生产清单

Table 3-8 The inventory for the fuel production related to the functional unit of transportation

| 环境负荷项目 | 单位 | 环境负荷值 | |
|--------|-----------------|--------------------------|----------|
| 能源消耗 | 原煤 | kg/1000t·km | 3.61E-01 |
| | 原油 | kg/1000t·km | 1.00E+01 |
| | 天然气 | m ³ /1000t·km | 6.01E-04 |
| 环境排放 | NO _x | kg/1000t·km | 6.41E-03 |
| | CH ₄ | kg/1000t·km | 1.64E-03 |
| | CO | kg/1000t·km | 1.02E-03 |
| | PM | kg/1000t·km | 1.32E-02 |
| | CO ₂ | kg/1000t·km | 1.68E+00 |
| | SO ₂ | kg/1000t·km | 8.78E-03 |
| | 液体废弃物 | kg/1000t·km | 5.80E+00 |
| | 固体废弃物 | kg/1000t·km | 5.88E-02 |

3.3.1.3 功能单位长江典型货船的生命周期清单 将长江运输阶段的生命周期清单和与之相对应的燃油生产的清单加以综合计算, 就可以得到长江典型货船完成功能单位运输的生命周期清单, 如表 3-9 所示。

表 3-9 长江典型货船完成功能单位运输的生命周期清单

Table 3-9 The life cycle inventory for the functional unit of Yangtze River typical ship

| 环境负荷项目 | 单位 | 环境负荷值 | |
|--------|------------------|--------------------------|----------|
| 能源消耗 | 原煤 | kg/1000t·km | 3.61E-01 |
| | 原油 | kg/1000t·km | 1.00E+01 |
| | 天然气 | m ³ /1000t·km | 6.01E-04 |
| 环境排放 | NO _x | kg/1000t·km | 4.32E-01 |
| | N ₂ O | kg/1000t·km | 1.04E-02 |
| | CH ₄ | kg/1000t·km | 3.12E-03 |
| | CO | kg/1000t·km | 1.02E-01 |
| | NM VOC | kg/1000t·km | 4.47E-02 |
| | PM | kg/1000t·km | 4.75E-02 |
| | NH ₃ | kg/1000t·km | 5.93E-05 |
| | CO ₂ | kg/1000t·km | 2.52E+01 |
| | SO ₂ | kg/1000t·km | 3.87E-02 |
| | 液体废弃物 | kg/1000t·km | 5.80E+00 |
| | 固体废弃物 | kg/1000t·km | 5.88E-02 |

3.3.2 长江典型船队生命周期清单

由推船和驳船组成船队进行运输,是长江干线货运的一种重要方式。对于这种运输方式,同样先建立长江典型船队模型,再对其研究。根据相关文献^[56]报道,长江常用顶推船队规模为14000~18000t,单位推载量为9.8t/kw,所以将典型船队模型的参数确定为净载重量16000t,推船主机总额定功率为1633kw。可假定推船的两台主机功率分别为816.5kW。该模型代表长江干流运输船队整体情况。

康明斯船用主机KTA38-M2的持续功率为783-895kW,与典型船舶主机功率接近。KTA38-M2柴油机在783kW和895kW的功率下工作时,其燃料消耗分别为181.7L/h和208.9L/h。利用线性插值的方法可以计算出该发动机在816.5kW的功率下,耗油率为189.8L/h。柴油的密度取0.85kg/L,该发动机在816.5kW的功率下的耗油率为0.198kg/kWh。由于功率相近,本文以0.198kg/kWh作为典型船队推船的主机耗油率。

由于长江中下游船队的实际营运速度普遍处于10km/h左右^[57, 58],因此可将典型船队模型的航速确定为10km/h。根据式(3-3)以及典型船队模型的参数,长江典型船队每完成1000t·km货物周转量时,船舶主机输出功为10.20kwh。再根据主机的耗油率可得典型货船完成1000t·km货物周转量的油耗为2.02kg。

与长江典型货船类似,所考虑的生命过程包括典型船队的运输阶段和燃油的生产。

3.3.2.1 长江典型船队运输阶段生命周期清单编目 与长江典型货船的计算方式类似,为了对船队运输阶段进行清单编目,首先要获得船队的污染物排放因子。

(1) 污染物排放因子 长江典型船队的主机总功率为1633kw,油耗为0.198kg/kWh,根据表3-4和式(3-5)可得出修正系数 η 的值为0.779。再根据表3-4和式(3-4),计算出NO_x、N₂O、CH₄、CO、NMVOC、PM和NH₃的排放因子;二氧化碳的排放因子由式(3-6)得到;二氧化硫的排放因子也根据燃料含硫率以及硫转化率得到。长江典型船队的排放因子如表3-10所示:

表 3-10 长江典型船队的污染物排放因子

Table 3-10 Yangtze River typical fleet emission factors of pollutants

| 污染物 | 单位 | 排放因子 |
|------------------|-------|---------|
| NO _x | g/kWh | 11.19 |
| N ₂ O | g/kWh | 0.27 |
| CH ₄ | g/kWh | 0.039 |
| CO | g/kWh | 2.34 |
| NMVOC | g/kWh | 1.01 |
| PM | g/kWh | 0.86 |
| NH ₃ | g/kWh | 0.00156 |
| CO ₂ | g/kWh | 611.08 |
| SO ₂ | g/kWh | 0.776 |

(2) 长江典型船队运输阶段排放清单 根据已确定的污染物排放因子, 可以进一步计算得到长江典型船队在运输阶段中的环境排放, 从而建立功能单位运输阶段排放清单, 如表 3-11 所示:

表 3-11 长江典型船队运输阶段的环境排放清单

Table 3-11 A typical fleet in the Yangtze River running list of environmental emissions

| 污染物 | 单位 | 排放量 |
|------------------|-------------|----------|
| NO _x | kg/1000t·km | 1.14E-01 |
| N ₂ O | kg/1000t·km | 2.78E-03 |
| CH ₄ | kg/1000t·km | 3.98E-04 |
| CO | kg/1000t·km | 2.39E-02 |
| NM VOC | kg/1000t·km | 1.03E-02 |
| PM | kg/1000t·km | 8.75E-03 |
| NH ₃ | kg/1000t·km | 1.59E-05 |
| CO ₂ | kg/1000t·km | 6.24E+00 |
| SO ₂ | kg/1000t·km | 7.92E-03 |

3.3.2.2 燃油生产过程生命周期清单编目 典型船队完成 1000t·km 货物周转量的油耗为 2.02kg, 同时依据表 3-7 中的数据, 建立与功能单位运输阶段相对应的燃油生产阶段的清单, 具体结果如表 3-12 所示:

表 3-12 与长江船队功能单位运输阶段相对应的柴油生产清单

Table 3-12 The inventory for the fuel production related to the functional unit of transportation

| 环境负荷项目 | | 单位 | 环境负荷值 |
|--------|-----------------|--------------------------|----------|
| 能源消耗 | 原煤 | kg/1000t·km | 9.56E-02 |
| | 原油 | kg/1000t·km | 2.65E+00 |
| | 天然气 | m ³ /1000t·km | 1.59E-04 |
| 环境排放 | NO _x | kg/1000t·km | 1.70E-03 |
| | CH ₄ | kg/1000t·km | 4.34E-04 |
| | CO | kg/1000t·km | 2.69E-04 |
| | PM | kg/1000t·km | 3.50E-03 |
| | CO ₂ | kg/1000t·km | 4.44E-01 |
| | SO ₂ | kg/1000t·km | 2.32E-03 |
| | 液体废弃物 | kg/1000t·km | 1.54E+00 |
| | 固体废弃物 | kg/1000t·km | 1.56E-02 |

3.3.2.3 功能单位长江典型船队的生命周期清单 将运输阶段的生命周期清单和与之相对应的燃油生产的清单加以综合计算, 就可以得到长江典型船队完成功能单位运输的生命周期清单, 如表 3-13 所示:

表 3-13 长江典型船队完成功能单位运输的生命周期清单

Table 3-13 The life cycle inventory for the functional unit of Yangtze River typical fleet

| 环境负荷项目 | 单位 | 环境负荷值 | |
|--------|------------------|--------------------------|----------|
| 能源消耗 | 原煤 | kg/1000t-km | 9.56E-02 |
| | 原油 | kg/1000t-km | 2.65E+00 |
| | 天然气 | m ³ /1000t-km | 1.59E-04 |
| 环境排放 | NO _x | kg/1000t-km | 1.16E-01 |
| | N ₂ O | kg/1000t-km | 2.78E-03 |
| | CH ₄ | kg/1000t-km | 8.32E-04 |
| | CO | kg/1000t-km | 2.41E-02 |
| | NMVOOC | kg/1000t-km | 1.03E-02 |
| | PM | kg/1000t-km | 1.22E-02 |
| | NH ₃ | kg/1000t-km | 1.59E-05 |
| | CO ₂ | kg/1000t-km | 6.68E+00 |
| | SO ₂ | kg/1000t-km | 1.02E-02 |
| | 液体废弃物 | kg/1000t-km | 1.54E+00 |
| | 固体废弃物 | kg/1000t-km | 1.56E-02 |

3.3.3 长江支流典型货船生命周期清单

在四川、湖南、江西三省，长江支流货运占了绝大部分，2005 年它们支流港口的吞吐量分别占自身内河港口吞吐量^[51]的 68%、89%和 73%。因此，可以根据这三省的船舶拥有量情况建立长江支流货船模型，来研究长江支流货运的环境影响情况。

根据表 3-2, 2005 年四川、湖南、江西三省内河货船的平均净载重吨位为 140t, 平均主机功率为 58kw。因此将长江支流典型货船模型参数确定为净载重量 140t, 主机额定功率为 58kw。根据内河船舶航速^[52]，将长江支流典型货船航速确定为 10km/h。该模型用于代表长江支流货运工具总体情况。

比较表 3-3 中的柴油机参数，4135ACA 型柴油机的功率与支流典型货船的主机功率最为接近。与确定长江典型货船主机耗油率的方法类似，根据表 3-3 的数据和主机功率，将长江支流典型货船主机的耗油率确定为 0.233kg/kwh。

根据式 (3-3) 以及典型支流船舶模型的参数，长江典型支流船舶每完成 1000t-km 货物周转量时，船舶主机输出功为 41.43kwh。再根据主机的耗油率可得典型货船完成 1000t-km 货物周转量的油耗为 9.65kg。

长江货船运输生命周期清单类似，所考虑的生命过程包括典型船舶的运输阶段以及燃油的生产。

3.3.3.1 长江典型支流货船运输阶段生命周期清单编目 与长江典型货船相同，首先要获得支流货船的污染物排放因子，然后对支流货船运输阶段进行清单编目。

(1) 污染物排放因子 长江支流典型货船的主机功率为 58kw，油耗为 0.233kg/kWh，根据表 3-4 和式 (3-5) 可计算出修正系数 η 的值为 0.879。再根据

表 3-4 和式 (3-4), 计算出 NO_x 、 N_2O 、 CH_4 、 CO 、 NMVOC 、 PM 和 NH_3 的排放因子; 二氧化碳的排放因子由式 (3-6) 得到; 二氧化硫的排放因子的计算方法与长江典型货船的二氧化硫排放因子计算方法相同。长江支流典型货船的污染物排放因子如表 3-14 所示:

表 3-14 长江支流典型货船的污染物排放因子

Table 3-14 Emission factor of the typical cargo ship in the Yangtze River tributary

| 污染物 | 单位 | 排放因子 |
|----------------------|-------|---------|
| NO_x | g/kWh | 12.62 |
| N_2O | g/kWh | 0.31 |
| CH_4 | g/kWh | 0.044 |
| CO | g/kWh | 4.38 |
| NMVOC | g/kWh | 1.97 |
| PM | g/kWh | 1.32 |
| NH_3 | g/kWh | 0.00176 |
| CO_2 | g/kWh | 712.94 |
| SO_2 | g/kWh | 0.913 |

(2) 长江支流典型货船运输阶段排放清单 根据已确定的污染物排放因子, 可以进一步计算得到长江支流典型货船在运输阶段中的环境排放, 从而建立功能单位运输阶段排放清单, 如表 3-15 所示:

表 3-15 长江支流典型货船在运输阶段中的环境排放清单

Table 3-15 A typical cargo ship in the Yangtze River tributary running list of environmental emissions

| 污染物 | 单位 | 排放量 |
|----------------------|-------------|----------|
| NO_x | kg/1000t-km | 5.23E-01 |
| N_2O | kg/1000t-km | 1.27E-02 |
| CH_4 | kg/1000t-km | 1.82E-03 |
| CO | kg/1000t-km | 1.82E-01 |
| NMVOC | kg/1000t-km | 8.17E-02 |
| PM | kg/1000t-km | 5.45E-02 |
| NH_3 | kg/1000t-km | 7.28E-05 |
| CO_2 | kg/1000t-km | 2.95E+01 |
| SO_2 | kg/1000t-km | 3.78E-02 |

3.3.3.2 燃油的生产过程生命周期清单编目 典型货船完成 1000t-km 货物周转量的油耗为 9.65kg, 同时依据表 3-7 中的数据, 建立与功能单位运输阶段相对应的燃油生产阶段的清单, 具体结果如表 3-16 所示:

表 3-16 与长江支流货船功能单位运输阶段相对应的柴油生产清单

Table 3-16 The inventory for the fuel production related to the functional unit of transportation

| 环境负荷项目 | 单位 | 环境负荷值 | |
|--------|-----------------|--------------------------|----------|
| 能源消耗 | 原煤 | kg/1000t·km | 4.57E-01 |
| | 原油 | kg/1000t·km | 1.26E+01 |
| | 天然气 | m ³ /1000t·km | 7.60E-04 |
| 环境排放 | NO _x | kg/1000t·km | 8.11E-03 |
| | CH ₄ | kg/1000t·km | 2.08E-03 |
| | CO | kg/1000t·km | 1.28E-03 |
| | PM | kg/1000t·km | 1.67E-02 |
| | CO ₂ | kg/1000t·km | 2.12E+00 |
| | SO ₂ | kg/1000t·km | 1.11E-02 |
| | 液体废弃物 | kg/1000t·km | 7.34E+00 |
| | 固体废弃物 | kg/1000t·km | 7.43E-02 |

3.3.2.3 功能单位长江典型船队的生命周期清单 将运输阶段的生命周期清单和与之相对应的燃油生产的清单加以综合计算,就可以得到长江支流典型货船完成功能单位运输的生命周期清单,如表 3-17 所示。

表 3-17 长江支流典型货船完成功能单位运输的生命周期清单

Table 3-17 The life cycle inventory for the functional unit of Yangtze River tributary typical ship

| 环境负荷项目 | 单位 | 环境负荷值 | |
|--------|------------------|--------------------------|----------|
| 能源消耗 | 原煤 | kg/1000t·km | 4.57E-01 |
| | 原油 | kg/1000t·km | 1.26E+01 |
| | 天然气 | m ³ /1000t·km | 7.60E-04 |
| 环境排放 | NO _x | kg/1000t·km | 5.31E-01 |
| | N ₂ O | kg/1000t·km | 1.27E-02 |
| | CH ₄ | kg/1000t·km | 3.90E-03 |
| | CO | kg/1000t·km | 1.83E-01 |
| | NM VOC | kg/1000t·km | 8.17E-02 |
| | PM | kg/1000t·km | 7.12E-02 |
| | NH ₃ | kg/1000t·km | 7.28E-05 |
| | CO ₂ | kg/1000t·km | 3.17E+01 |
| | SO ₂ | kg/1000t·km | 4.89E-02 |
| | 液体废弃物 | kg/1000t·km | 7.34E+00 |
| | 固体废弃物 | kg/1000t·km | 7.43E-02 |

3.3.4 长江水系三种运输方式清单结果比较

长江典型货船、典型船队和支流典型货船三种运输方式完成功能单位运输的生命周期消耗和排放结果如图 3-1 所示,除 CO₂ 以外的大气污染物排放如图 3-2 所示。

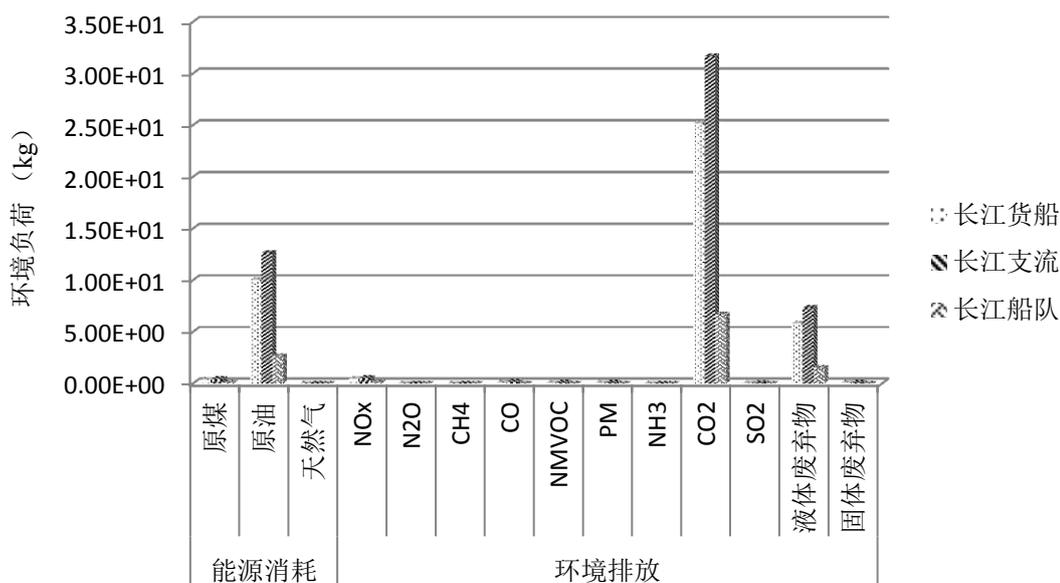


图 3-1 长江水系三种运输方式完成功能单位运输的消耗和排放
Figure 3-1 Consumption and emissions of three transport modes in Yangtze River

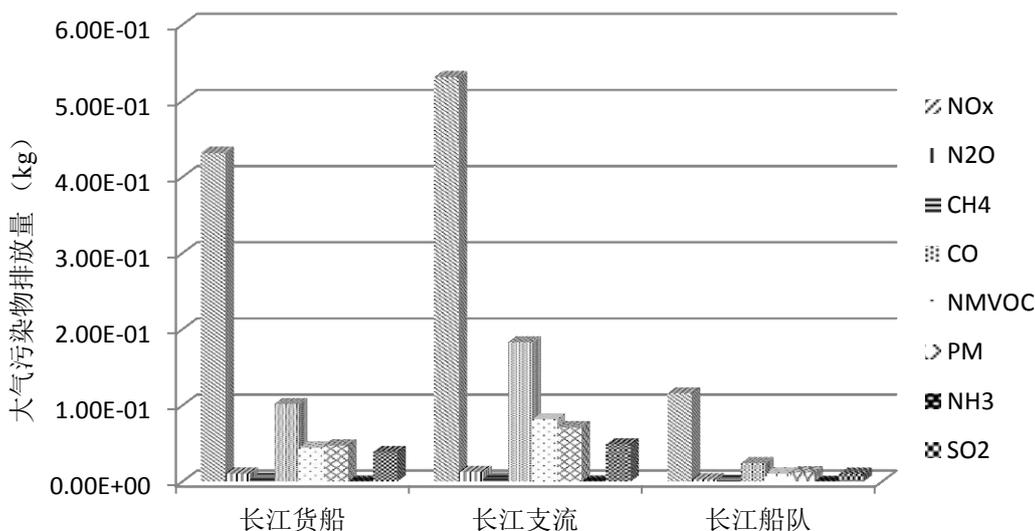


图 3-2 除 CO₂ 以外的大气污染物排放
Figure 3-2 Emissions of air pollutants other than CO₂

从图 3-1 中可以看出，由于三种运输方式都使用柴油，它们的能源中原油消耗量最大。对于环境排放，三种运输方式的 CO₂ 排放量最大，完成 1000t·km 货物周转量时的排放量分别为 25.2kg、6.68kg 和 31.7kg。其次是液体废弃物的排放。完成相同的货物周转量的情况下，无论是消耗的能源还是排放的各种污染物，都是长江支流最大而长江船队最小。其中，原油消耗量长江货船比长江支流货船小 20.92%，长江船队比长江支流货船小 79.07%；CO₂ 排放量长江货船比长江支流货船小 20.41%，长江船队比长江支流货船小 78.90%。

从图 3-2 中可以看到对于长江货船和长江船队,除了 CO₂,排放量最大的大气污染物依次为 NO_x、CO、PM 和 NMVOC。对于长江支流货船排放量仅次于 CO₂的也是 NO_x、CO、NMVOC 和 PM,但是 NMVOC 的排放量比 PM 大了 14.75%。三种运输方式中 SO₂ 也是比较重要的污染物。

3.4 生命周期影响评价

清单分析结果只表达了长江货运所涉及的各类环境消耗与排放数据的大小。为了理解和评价其潜在环境影响的大小和重要性,需要进行生命周期影响评价,从而将所选择的环境问题模型化,并能够使用类型参数来精简与解释生命周期清单结果。

3.4.1 影响类型、类型参数和特征化模型的选择

根据生命周期评价的技术框架,将内河货运的资源消耗和污染物排放清单数据归入到不同的环境影响类型中。考虑到影响评价的可比性和通用性,本文采用在国际上已基本达成共识的影响类型、类型参数和环境负荷分类方法。与本文相关的影响类型、影响参数和环境负荷分类结果见第 2 章的表 2-1 和表 2-2。

在我国,固体和液体废弃物主要造成土地破坏和占用以及水污染,而目前对于这两方面环境影响评价的模型尚未成熟,所以本文对这两类废弃物的影响未予以考虑。本文重点评价不可再生资源消耗、温室效应、酸化效应、光化学臭氧形成、富营养化和人体健康损害影响。

本文采用目前在 LCA 中得到广泛应用的当量评价模型。计算方法见 2.3.3 中的式 (2-1) 至 (2-6)。

3.4.2 特征化

特征化是根据环境影响类型以及所选用的计算模型,将得到的生命周期清单的数据转化为相应的环境影响指标。本文所涉及的相关环境排放的环境影响特征化因子见表 2-4。根据当量模型,结合环境影响特征化因子计算得到长江货船、长江船队和长江支流货船功能单位货物运输清单数据的特征化结果,见表 3-18。

表 3-18 长江货运环境影响特征化结果

Table 3-18 The characterization results of Yangtze River transportation

| 影响类型 | 单位 | 长江货船 | 长江船队 | 长江支流 |
|------|-------------------------------------|----------|----------|----------|
| ADP | kg 铈当量 | 1.42E-03 | 3.75E-04 | 1.79E-03 |
| GWP | kg CO ₂ 当量 | 2.81E+01 | 7.45E+00 | 3.52E+01 |
| AP | kg SO ₂ 当量 | 3.41E-01 | 9.14E-02 | 4.21E-01 |
| HT | kg (1,4)-二氯苯当量 | 5.61E-01 | 1.50E-01 | 7.00E-01 |
| POCP | kg C ₂ H ₄ 当量 | 3.09E-02 | 7.50E-03 | 5.07E-02 |
| EP | kg PO ₄ ³⁻ 当量 | 5.62E-02 | 1.51E-02 | 6.91E-02 |

图 3-3 比较了三种运输方式的各影响类型特征化结果。与清单分析的结果类似,各环境影响类型均为长江支流最大而长江货船最小。其中不可再生资源消耗长江船队比长江货船小 73.5%,支流货船比长江货船大 26.46%;温室效应长江船队比长江货船小 73.46%,支流货船比长江货船大 25.37%;酸化效应长江船队比长江货船小 73.20%,支流货船比长江货船大 23.36%;人体健康损害长江船队比长江货船小 73.24%,支流货船比长江货船大 24.86%;光化学臭氧形成潜值长江船队比长江货船小 75.70%,支流货船比长江货船大 64.30%;水体富营养化长江船队比长江货船小 73.16%,支流货船比长江货船大 22.96%。支流货船运输的光化学臭氧形成潜值要高出许多(比长江货船大 64.30%)主要是因为支流货船的 NMVOC 和 CO 排放较高,比长江货船分别要高 82.84%和 79.60%。各影响类型均是长江支流大于长江货船大于长江船队,这主要是因为完成单位货物周转量,船队消耗的燃油最少,而支流货船消耗的最多。

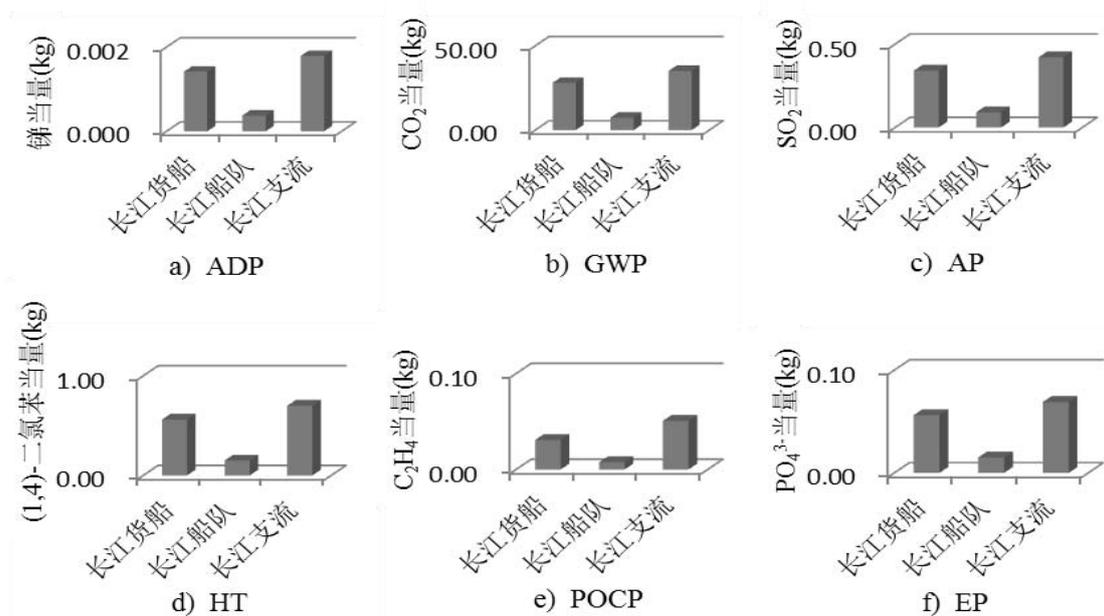


图 3-3 各影响类型特征化结果比较

Figure 3-3 Comparison of characterization results in each impact category

3.4.3 归一化

特征化过程得到了每种环境影响类型的环境负荷值,但它们表示的仅是绝对总量。利用 2.3.4 中确定的归一化基准值,将表 3-18 中的特征化结果与之进行比较从而得到环境负荷的相对大小,这样就可以在不同环境影响类型之间进行比较。

长江各种货运方式的归一化结果列于表 3-19。

表 3-19 长江货运的归一化结果

Table 3-19 The normalization results of Yangtze River transportation

| 影响类型 | 长江货船 | 长江船队 | 长江支流 |
|------|----------|----------|----------|
| ADP | 6.62E-14 | 1.75E-14 | 8.37E-14 |
| GWP | 7.27E-13 | 1.93E-13 | 9.11E-13 |
| AP | 1.14E-12 | 3.06E-13 | 1.41E-12 |
| HT | 1.13E-14 | 3.01E-15 | 1.41E-14 |
| POCP | 6.78E-13 | 1.65E-13 | 1.11E-12 |
| EP | 4.35E-13 | 1.17E-13 | 5.35E-13 |
| 合计 | 3.06E-12 | 8.01E-13 | 4.07E-12 |

图 3-4 为长江水系三种货运方式的归一化结果比较。从图中可以看出，长江水系的三种货运方式中，完成相同的货物周转量，长江支流货船的环境影响最大，其环境影响比长江典型货船大 32.93%；长江船队的环境影响最小，比长江典型货船小 72.82%。

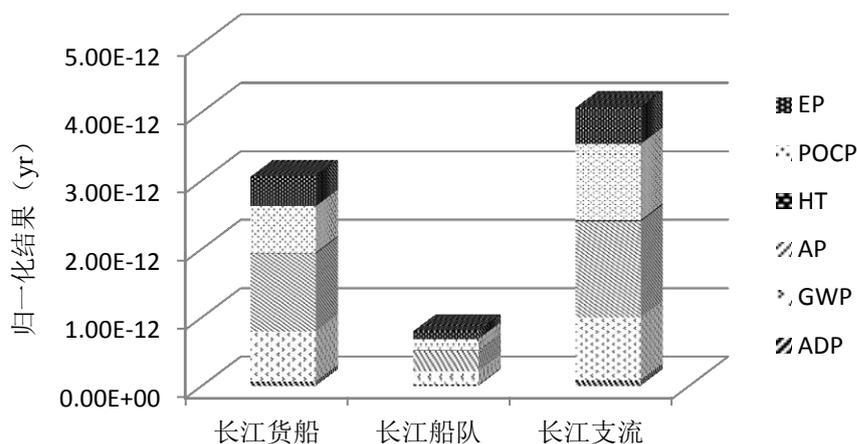


图 3-4 长江货运的归一化结果

Figure 3-4 The normalization results of Yangtze River transportation

3.5 结果解释

长江水系的三种货运方式中，完成相同的货物周转量，长江船队运输的环境影响最小。其原因是长江船队的载货量比另外两种运输方式的载货量大得多。同时船队推船的主机功率也比较大，所以每千瓦时的耗油率也相对较小。尽管船队的航行速度比货船的航行速度稍慢，由于其巨大的载货量和较小的耗油率使得在完成货物周转量的情况下，使船队运输的环境影响远小于长江货船和长江支流货船的环境影响。长江支流货运的环境影响要比长江船队的环境影响大，主要是因为长江支流的货船较小，这样使得单位主机功率运送的货物也较小；同时由于较小的主机功率，使得其主机单位功率的耗油量增加。这两方面都导致了长江支流

货船货运的环境影响增大。

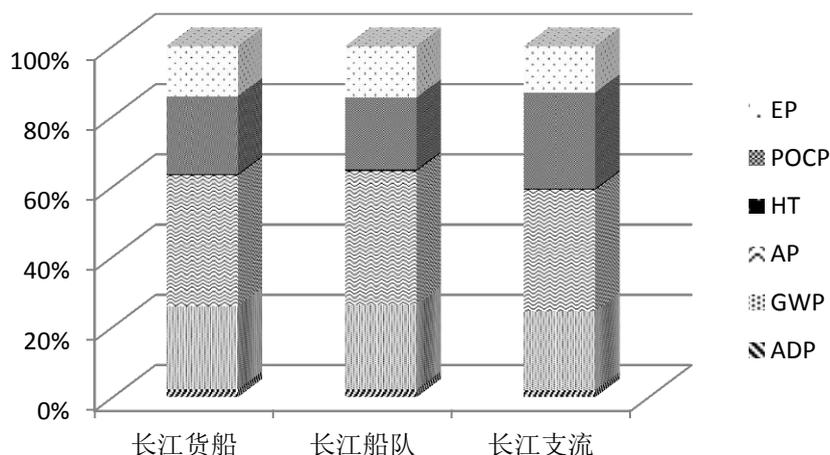


图 3-5 各影响类型所占总环境影响的比例

Figure 3-5 The impact categories' share in environmental impact

图 3-5 为长江水系三种货运方式中各影响类型所占比例。可以看到归一化之后，长江货船、长江船队和长江支流货船运输都是酸化效应影响最大，分别占这三种运输方式总环境影响的 37.30%，38.17%和 34.61%；长江货船和长江船队仅次于酸化效应环境影响类型依次是温室效应和光化学臭氧形成，它们分别占长江货船总环境影响的 23.76%和 22.18%；占长江船队的 24.09%和 20.58%。长江支流货船的光化学臭氧形成潜值相对较大，占到了 27.41%，而温室效应则占到了 22.41%。长江支流货船的光化学臭氧形成潜值相对较大主要是因为其主机功率较小，导致其 NMVOC 排放量较大。

三种运输方式的环境影响类型中水体富营养化的贡献率相对较小，分别为 14.23%、14.59 和 13.17%；而不可再生资源消耗的贡献率都在 2%左右，人体健康损害不到 1%，可以忽略不计。

图 3-6 表示了三种运输方式的能源消耗和环境排放对它们各自环境影响贡献的大小。可以看到虽然 CO_2 排放量最大，但其对环境的影响要小于 NO_x 。长江三种货运方式对环境影响最大的环境负荷项是 NO_x 、 CO_2 和 NMVOC 的排放。这三种污染物的排放对长江货船的环境影响贡献分别为 56.31%，21.34%和 13.36%；对长江船队的环境影响贡献分别为 57.72%、21.61%和 11.80%；对长江支流货船的环境影响贡献分别为 52.09%、20.17%和 18.38%。 N_2O 对环境影响的贡献为负，主要是因为它能和臭氧发生反应，从而降低货运造成的光化学臭氧形成潜力。

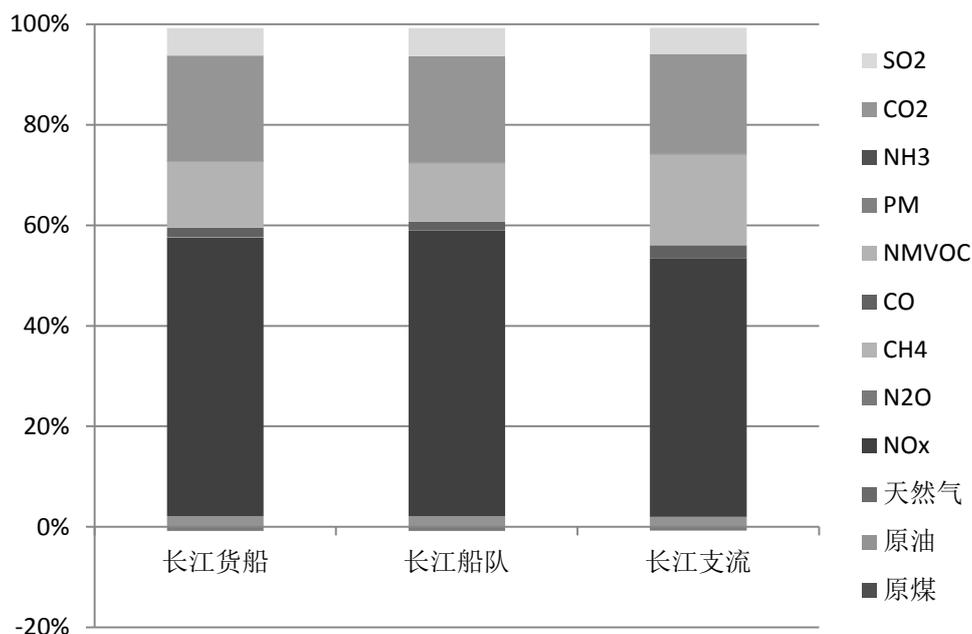


图 3-6 各环境负荷对三种货运方式环境影响的贡献

Figure 3-6 The contribution of environmental load to three ways' environmental impact

图 3-7 表示的是长江典型货船运输阶段和燃油生产这两个生命周期阶段对污染物排放的贡献。从图中看到, 98.52%的 NO_x 、93.34%的 CO_2 和 100%的 NMVOC 都由船舶运输阶段排放。也就是说对于长江典型货船的运输, 三种主要污染物绝大部分都来自货运过程船舶主机发动机的排放。

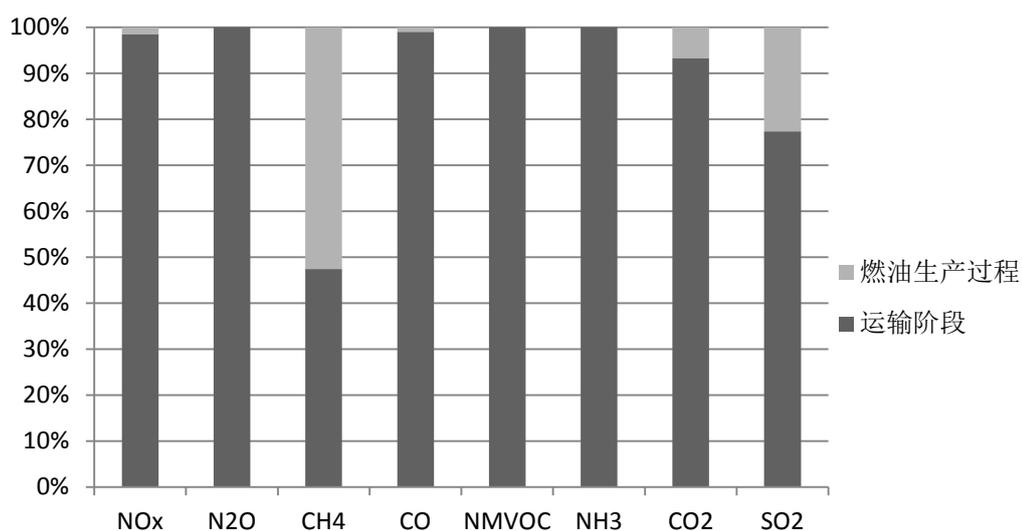


图 3-7 各生命周期阶段对污染物排放的贡献

Figure 3-7 The contribution of life cycle phases to pollutants emission

综上,为了降低长江水系货运的环境影响有两个办法。第一,是应当提高运输工具的货运能力,即应尽量使用较大的船舶运输货物。提高长江货船的整体运输能力对降低水路货运的环境影响有较大的帮助。使用多艘船舶组成的船队运输可以显著降低货运的环境影响,但由于船队的编组较为复杂,实际运输过程中需要综合考虑。第二,就是通过技术手段如改进发动机结构、改善燃油质量等手段降低大气污染物尤其是 NO_x 、 CO_2 和NMVOC这三种主要污染物的排放。

3.6 本章小结

本章利用生命周期评价方法对长江典型货船、长江船队和长江支流货船进行了生命周期分析,得到了它们的生命周期清单,并量化了其对环境产生的负荷。结果表明:长江船队运输对环境产生的影响最小,长江支流货船运输的环境影响最大。这三种运输方式对环境影响最大的三种类型是酸化效应、温室效应和光化学臭氧形成。

第4章 珠江水路货运的生命周期分析

4.1 珠江水系货运概况

珠江是中国境内第三长河流，原指广州到入海口的一段河道，后来逐渐成为西江、北江、东江和珠江三角洲诸河的总称。在内地其干流流经云南、贵州、广西、广东四省。表4-1为2001年至2007年我国内河以及珠江货运概况。

表4-1 我国内河以及珠江货运概况

Table 4-1 Overview of the Pearl River Shipping and inland waterway shipping in China

| 年份 | 内河货运 | | 珠江货运 | | 珠江水系货运 占内河货运比例 | |
|------|--------------|------------------|--------------|-------------------|-------------------|------------------|
| | 货运量 (亿 t) | 货物周转 (亿 t·km) | 货运量 (亿 t) | 货物周转量 (亿 t·km) | 货运量 所占比例(%) | 货物周转量 所占比例(%) |
| 2001 | 7.1 | 1537.7 | 1.1 | 154.1 | 15.49 | 10.02 |
| 2002 | 7.6 | 1508.7 | 0.9 | 150.5 | 11.84 | 9.98 |
| 2003 | 8.2 | 1708.8 | 1.19 | 193.5 | 14.51 | 11.32 |
| 2004 | 9.2 | 2184 | 1.4 | 224.81 | 15.22 | 10.29 |
| 2005 | 10.6 | 2626 | 1.47 | 243.55 | 13.87 | 9.27 |
| 2006 | 11.6 | 3025.3 | 1.8 | 285.54 | 15.52 | 9.44 |
| 2007 | 13 | 3553.1 | 2.09 | 334.92 | 16.08 | 9.43 |

从表4-1中我们可以看到，这7年间除了2002年，珠江货运量和货物周转量都有了显著的增长，货运量和货物周转量的平均增长率分别达到了12.54%和14.21%。其货运量平均增速比内河货运量的平均增速高1.9%，说明珠江水系货运的发展比内河总体货运要略快。其周转量的增速高于货运量的增速，这说明其平均运输距离也在增大；但是由于珠江本身航道长度比长江短，运输被限制在相邻的广东广西两省，平均运输距离的增长不如其它水系，导致珠江水系的货物周转量占内河总货物周转量的比例有所下降。

由于珠江货运的特点，其航运主要依靠机动货船^[59]，而极少使用船队，其推船和驳船的数量都较少。因此，研究珠江水路货运只考虑机动货船运输。首先建立珠江典型货船运输的模型。珠江流域跨度较大，但其水路货运活动主要发生在广东广西两省，所以本文主要依据广东、广西两省运输船舶的总体情况建立珠江典型货船模型。

4.2 研究目的与范围的确定

4.2.1 研究目的

研究目的是：1) 获得珠江典型货运工具完成一定货物周转量的生命周期清单。2) 分析、评价珠江水路货物运输在其生命周期过程中涉及的资源、能源利用及环境污染排放状况，诊断并辨识与目前内河水运体系相关的重大资源和环境

问题，寻求改善货运相关环境问题的机会与措施

4.2.2 研究范围

根据生命周期评价方法的定义以及本课题研究的具体目的和针对性，同时结合珠江水运本身的特点，论文将研究范围界定为：典型船舶的运输阶段和燃油生产两个生命阶段。由于使用阶段在船舶生命周期过程中占据着非常重要的地位，因此对水路货运体系进行评价，关键在于运输阶段。由于船舶运输阶段造成的环境影响的类型及原因也非常复杂，而在这一阶段船舶发动机对资源消耗、环境污染的贡献最大，因此运输阶段的评价仅限于船舶发动机的消耗与排放，且仅考虑燃油消耗。同时，研究船舶使用过程的环境影响必须考虑燃油的生产过程造成的影响，所以燃油的生产阶段也是评价水路运输体系的一个非常重要的组成部分。另外，本研究对船舶制造、维护、港口及航道基础设施的建设和运营等过程以及所有的运输和销售活动均未作考虑，这是因为考虑到产品生命周期评价运输阶段的变数主要存在于船舶的运行状况上，而其他相关过程产生的影响较小。此外由于缺乏相关资料，本研究也未考虑船舶报废后处置阶段。

4.2.3 研究对象

由于珠江航道的特点，珠江航运主要依靠机动货船，而极少使用船队。因此，本文研究对象为珠江典型货船。

4.2.4 功能单位

为比较恰当的代表船舶运输所涉及的资源、环境性能，并和其他运输方式具有可比性，本研究将功能单位确定为典型船舶完成 1000t·km 货物周转量。

4.3 生命周期清单分析

依照广东省交通运输厅给出的数据，2005 年广东省拥有内河货船 10518 艘，内河货船总净载重量 1911104t，总功率 1732519kw。根据广西统计年鉴的数据，2005 年广西货船拥有量为 6030 艘，净载重量为 2034599t。2005、2006 年和 2007 年广西机动船总功率分别为 674658kw、744182kw 和 917377kw，06 年和 07 年总功率分别较上一年增长了 10.31%和 23.27%。依据广西年鉴，2007 年货船总功率为 57.43 万千瓦。由于缺乏 2005 年广西货船总功率数据，在这里假设 2006 年和 2007 年广西货船总功率增长率与机动船总功率的增长率相同，则可以算出 2005 年广西货船总功率为 422352kW。根据之前的数据则可以计算出广东广西两省机动货船的平均净载重量为 238t，平均功率为 130kW。据此，将珠江典型货船模型参数确定为净载重量 238t，主机功率 130kW。假定其航速与长江典型货船航速相同，为 12km/h。

表 3-3 中的 6135AZCA 型柴油机的额定功率为 132.4kW, 与珠江典型货船模型的主机功率接近。该型柴油机的 12 小时功率燃油消耗率最大为 0.229kg/kWh。由于功率接近, 本文以 0.229kg/kWh 作为珠江典型货船主机的耗油率。

根据式 (3-3) 以及典型支流船舶模型的参数, 珠江典型货船每完成 1000t·km 货物周转量时, 船舶主机输出功为 45.52kwh。再根据主机的耗油率可得典型货船完成 1000t·km 货物周转量的油耗为 10.42kg。

4.3.1 珠江典型货船运输阶段生命周期清单编目

(1) 污染物排放因子 珠江典型货船的主机功率为 130kw, 油耗为 0.229kg/kWh, 根据表 3-4 和式(3-5)可计算出修正系数 η 的值为 0.902。再根据表 3-4 和式(3-4), 计算出 NO_x 、 N_2O 、 CH_4 、 CO 、 NMVOC 、 PM 和 NH_3 的排放因子; 二氧化碳的排放因子由式 (3-6) 得到; SO_2 的排放因子根据燃料硫含量及其转化率计算得到计算方式与长江典型货船的 SO_2 排放计算方式相同。则珠江典型货船的污染物排放因子如表 4-2 所示:

表 4-2 珠江典型货船的污染物排放因子
Table 4-2 Pearl River typical vessel emission factors of pollutants

| 污染物 | 单位 | 排放因子 |
|----------------------|-------|--------|
| NO_x | g/kWh | 12.95 |
| N_2O | g/kWh | 0.32 |
| CH_4 | g/kWh | 0.045 |
| CO | g/kWh | 2.70 |
| NMVOC | g/kWh | 1.17 |
| PM | g/kWh | 0.99 |
| NH_3 | g/kWh | 0.0018 |
| CO_2 | g/kWh | 706.76 |
| SO_2 | g/kWh | 0.898 |

(2) 珠江典型货船运输阶段排放清单 根据已确定的污染物排放因子, 可以进一步计算得到珠江典型货船在运输阶段中的环境排放, 从而建立功能单位运输阶段排放清单, 如表 4-3 所示:

表 4-3 珠江典型货船在运输阶段中的环境排放清单
Table 4-3 A typical cargo ship in the Pearl River running list of environmental emissions

| 污染物 | 单位 | 排放量 |
|------------------|-------------|----------|
| NO _x | kg/1000t·km | 5.89E-01 |
| N ₂ O | kg/1000t·km | 1.44E-02 |
| CH ₄ | kg/1000t·km | 2.05E-03 |
| CO | kg/1000t·km | 1.23E-01 |
| NM VOC | kg/1000t·km | 5.33E-02 |
| PM | kg/1000t·km | 4.51E-02 |
| NH ₃ | kg/1000t·km | 8.21E-05 |
| CO ₂ | kg/1000t·km | 3.22E+01 |
| SO ₂ | kg/1000t·km | 4.09E-02 |

4.3.2 珠江典型货船消耗燃油生产过程生命周期清单编目

珠江典型货船完成 1000t·km 货物周转量的油耗为 10.42kg，同时依据表 3-6 中的数据，建立与功能单位运输阶段相对应的燃油生产阶段的清单，具体结果如表 4-4 所示：

表 4-4 与珠江货船功能单位货运过程相对应的柴油生产清单
Table 4-4 The inventory for the fuel production related to the functional unit of transportation

| 环境负荷项目 | | 单位 | 环境负荷值 |
|--------|-----------------|--------------------------|----------|
| 能源消耗 | 原煤 | kg/1000t·km | 4.93E-01 |
| | 原油 | kg/1000t·km | 1.37E+01 |
| | 天然气 | m ³ /1000t·km | 8.20E-04 |
| 环境排放 | NO _x | kg/1000t·km | 8.76E-03 |
| | CH ₄ | kg/1000t·km | 2.24E-03 |
| | CO | kg/1000t·km | 1.39E-03 |
| | PM | kg/1000t·km | 1.80E-02 |
| | CO ₂ | kg/1000t·km | 2.29E+00 |
| | SO ₂ | kg/1000t·km | 1.20E-02 |
| | 液体废弃物 | kg/1000t·km | 7.92E+00 |
| | 固体废弃物 | kg/1000t·km | 8.03E-02 |

4.3.3 功能单位珠江典型货船的生命周期清单

将运输阶段的生命周期清单和与之相对应的燃油生产的清单加以综合计算，就可以得到珠江典型货船完成功能单位运输的生命周期清单，如表 4-5。从表 4-5 中可以看到，各种污染物中的 CO₂ 排放量最大，完成 1000t·km 货物周转量时 CO₂ 的排放量为 34.5kg。

表 4-5 珠江典型货船完成功能单位运输的生命周期清单
Table 4-5 The life cycle inventory for the functional unit of Pearl River typical ship

| 环境负荷项目 | 单位 | 环境负荷值 | |
|--------|------------------|--------------------------|----------|
| 能源消耗 | 原煤 | kg/1000t·km | 4.93E-01 |
| | 原油 | kg/1000t·km | 1.37E+01 |
| | 天然气 | m ³ /1000t·km | 8.20E-04 |
| 环境排放 | NO _x | kg/1000t·km | 5.98E-01 |
| | N ₂ O | kg/1000t·km | 1.44E-02 |
| | CH ₄ | kg/1000t·km | 4.29E-03 |
| | CO | kg/1000t·km | 1.25E-01 |
| | NM VOC | kg/1000t·km | 5.33E-02 |
| | PM | kg/1000t·km | 6.32E-02 |
| | NH ₃ | kg/1000t·km | 8.21E-05 |
| | CO ₂ | kg/1000t·km | 3.45E+01 |
| | SO ₂ | kg/1000t·km | 5.28E-02 |
| | 液体废弃物 | kg/1000t·km | 7.92E+00 |
| | 固体废弃物 | kg/1000t·km | 8.03E-02 |

4.4 生命周期影响评价

表 4-5 中的清单分析结果只表达了珠江货运所涉及的各项环境交换数据的相对大小。为了理解和评价其潜在环境影响的大小和重要性，需要进行生命周期影响评价。

4.4.1 影响类型、类型参数和特征化模型的选择

珠江货运的影响类型、类型参数和环境负荷分类均与长江货运相同，见第 2 章的表 2-1 和 2-2。与长江货运的生命周期影响评价相同，对固体和液体废弃物的影响不予以考虑。特征化模型同样使用当量模型。

4.4.2 特征化

特征化所涉及的相关环境排放的环境影响特征化因子见表 2-4。根据当量模型，结合生命周期清单数据计算得到珠江货船功能单位货物运输的特征化结果如表 4-6 所示：

表 4-6 珠江货运环境影响特征化结果
Table 4-6 The characterization results of Pearl River transportation

| 影响类型 | ADP | GWP | AP | HT | POCP | EP |
|-----------|----------|-----------------------|-----------------------|----------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 单位 | kg 铈当量 | kg CO ₂ 当量 | kg SO ₂ 当量 | kg (1,4)-二氯苯当量 | kg C ₂ H ₄ 当量 | kg PO ₄ ³⁻ 当量 |
| 珠江货运特征化结果 | 1.93E-03 | 3.84E+01 | 4.72E-01 | 7.75E-01 | 3.87E-02 | 7.78E-02 |

4.4.3 归一化

通过确定各种环境影响类型的基准值,将特征化结果与基准值进行比较而得到类型结果相对值的过程成为归一化。指标结果归一化的目的在于增加对所研究系统中每一项指标结果相对值的了解,使来自于不同影响类型的影响值具有可比性。该步骤是以类型参数计算结果除以选定的基准值来加以转换。本文采用表 2-5 中的归一化基准值。不可再生资源耗竭的归一化基准值也与长江货运的相同。珠江货运的归一化结果如表 4-7 所示:

表 4-7 珠江货运的归一化结果
Table 4-7 The normalization results of Pearl River transportation

| 影响类型 | ADP | GWP | AP | HT | POCP | EP | 合计 |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 归一化结果 | 9.03E-14 | 9.96E-13 | 1.58E-12 | 1.56E-14 | 8.51E-13 | 6.03E-13 | 4.13E-12 |

从归一化结果可以看出,珠江货运造成的环境影响类型中,酸化效应最大,温室效应其次,紧接着是光化学臭氧形成和水体富营养化,人体健康损害最小。各影响类型的大小排列和长江货船的相同,这是因为它们都采用了相同的计算方法。珠江货运的总环境影响要比长江支流货船大 1.61%。

4.5 结果解释

从图 4-1 中可以看到珠江水路货运对环境影响最大的环境类别依次是酸化效应、温室效应、光化学臭氧形成和水体富营养化,分别占到了总环境影响的 38.17%、24.09%、20.58%和 14.59%,而人体健康损害的环境影响最小。

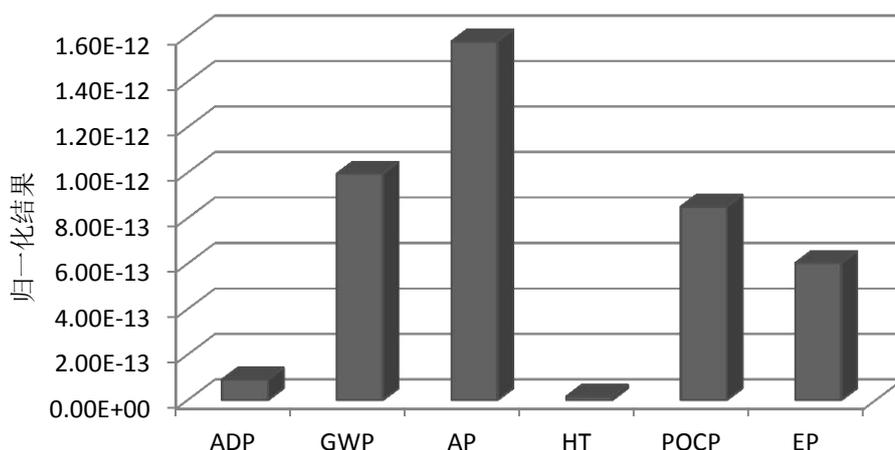


图 4-1 珠江货运的归一化结果

Figure 4-1 The normalization results of Yangtze River transportation

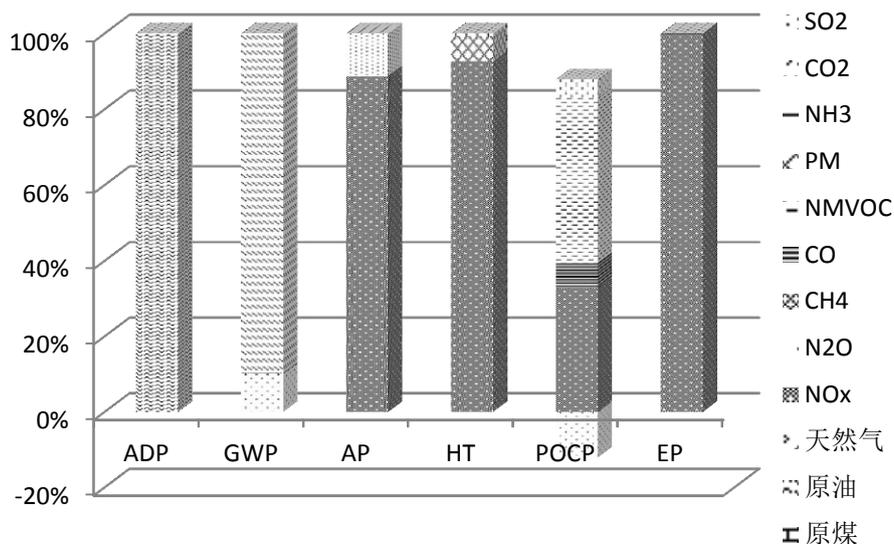


图 4-2 消耗与排放对各环境影响类型影响贡献

Figure 4-2 Contributions of consumption and emissions to the environmental impact category

图 4-2 表示了珠江货运过程的消耗和排放对各影响类型的贡献率。对于环境影响最大的酸化效应，NO_x 的贡献最为突出，占 88.76%；SO₂ 其次，占 11.21%。对于温室效应，CO₂ 的排放贡献率最大，占到了 89.67%；N₂O 温室效应的贡献率为 10.09；CH₄ 尽管温室效应显著，但其总量较小，对温室效应的贡献率小于 1%。光化学臭氧形成 NMVOC 和 NO_x 的贡献率最大，分别为 57.34%和 43.27%；而由于 N₂O 会与臭氧发生反应，它对光化学臭氧形成潜值的贡献率为负。水体富营养化和人体健康损害的主要贡献者也是 NO_x，它对这两个环境影响类型的贡献分别为 99.96%和 92.66%；不可再生资源耗竭的主要原因则是对石油资源的消耗。NO_x 的排放对酸化效应、光化学臭氧形成、水体富营养化和人体健康损害都有较大影响，对珠江货运环境影响的贡献达到了 57.72%，因此降低水运过程的 NO_x 排放是控制珠江货运环境污染的一个重点。

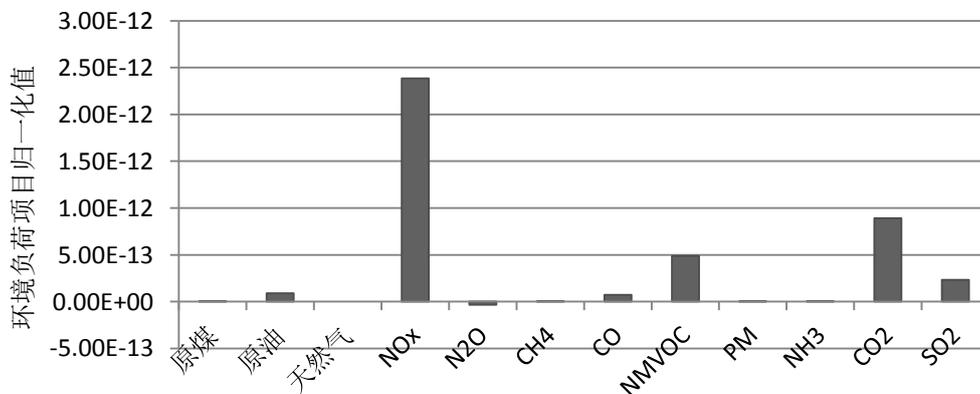


图 4-3 资源消耗和污染物排放对环境的影响

Figure 4-3 Environment impact of resource consumption and pollutant emissions

珠江货运产生资源消耗和环境排放的环境影响大小如图 4-3 所示。从图 4-3 中可以知道,与长江货运相同,对珠江货运环境影响贡献最大的三个污染物依次是 NO_x 、 CO_2 和 NMVOC,它们对环境影响的归一化值分别为 2.39×10^{-12} 、 8.93×10^{-13} 和 4.88×10^{-13} ,分别占到珠江货运总环境影响的 57.72%、21.61%和 11.8%。

4.6 本章小结

本章采用生命周期评价方法对珠江水路货运进行了生命周期分析,得到了它们的生命周期清单,并量化了其对环境产生的负荷。结果表明:对于珠江水路货运,对环境影响最大的环境类别分别为酸化效应、温室效应、光化学臭氧形成和 水体富营养化,人体健康损害的环境影响最小。环境影响最大的三个污染物分别是 NO_x 、 CO_2 和 NMVOC。

第5章 内河货运与陆路货运的环境行为比较

目前,陆路运输仍然是目前交通运输的主要方式。陆路运输主要包括公路运输和铁路运输。根据交通年鉴的统计数据^[61],2005年全社会货运量和货物周转量(包括铁路、公路、内河、海洋、民航以及管道运输)分别为1862066万吨和80258.1亿吨公里,其中公路货运量为1341778万吨,货物周转量为8693.2亿吨公里,分别占全社会货运量和货物周转量的72.1%和10.8%。2005年铁路货运量和货物周转量分别为269296万吨和20726.0亿吨公里,分别占全社会货运量和货物周转量的14.5%和25.8%。为了与内河水路货运进行比较,也对这两者进行了评价。

5.1 道路货运的生命周期评价

5.1.1 目的、范围以及生命周期清单

马丽萍^[25]已经对三种技术状态下的两种货车类型在三种不同道路上的环境影响进行了评价。本文直接引用其清单数据结果,以平均技术状态的重型货车在高速公路上运输作为道路货运的代表运输方式,计算道路运输完成1000t·km货物周转量时产生的环境影响。系统边界与之前的水路运输研究以及马丽萍的研究所规定的范围一致,研究范围只包括运输工具运送货物的阶段以及燃料的生产阶段。依照马丽萍的研究结果,重型货车完成1000t·km周转量货运的生命周期清单如表5-1所示:

表5-1 重型货车完成功能单位运输的生命周期清单
Table 5-1 The life cycle inventory for the function unit of heavy trucking

| 环境负荷项目 | | 单位 | 环境负荷值 |
|--------|------------------|--------------------------|----------|
| 能源消耗 | 原煤 | kg/1000t·km | 1.36E+00 |
| | 原油 | kg/1000t·km | 3.76E+01 |
| | 天然气 | m ³ /1000t·km | 2.26E-03 |
| 环境排放 | NO _x | kg/1000t·km | 1.62E+00 |
| | N ₂ O | kg/1000t·km | 6.20E-03 |
| | CH ₄ | kg/1000t·km | 1.00E-02 |
| | CO | kg/1000t·km | 6.05E-01 |
| | NM VOC | kg/1000t·km | 1.96E-01 |
| | PM | kg/1000t·km | 8.12E+02 |
| | CO ₂ | kg/1000t·km | 9.61E+01 |
| | SO ₂ | kg/1000t·km | 1.02E-01 |
| | 液体废弃物 | kg/1000t·km | 2.19E+01 |
| | 固体废弃物 | kg/1000t·km | 2.21E-01 |

5.1.2 生命周期影响评价

对道路货运的生命周期清单数据进行特征化和归一化处理，影响类型、类型参数和特征化模型的选择与内河货运相同。特征化因子使用表 3-18 中的数据。特征化结果见表 5-2:

表 5-2 重型货车货运环境影响特征化结果

Table 5-2 The characterization results of heavy trucking environment impact

| 影响类型 | ADP | GWP | AP | HT | POCP | EP |
|-----------|----------|-----------------------|-----------------------|----------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 单位 | kg 铈当量 | kg CO ₂ 当量 | kg SO ₂ 当量 | kg (1,4)-二氯苯当量 | kg-C ₂ H ₄ 当量 | kg PO ₄ ³⁻ 当量 |
| 重型货车特征化结果 | 5.32E-03 | 9.80E+01 | 1.24E+00 | 6.67E+02 | 1.46E-01 | 2.11E-01 |

采用表 2-5 中的归一化基准值对特征化结果进行归一化处理，归一化结果见表 5-3:

表 5-3 重型货车货运的归一化结果

Table 5-3 The normalization results of heavy trucking transportation

| 影响类型 | ADP | GWP | AP | HT | POCP | EP | 合计 |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 归一化结果 | 2.49E-13 | 2.54E-12 | 4.14E-12 | 1.34E-11 | 3.20E-12 | 1.64E-12 | 2.52E-11 |

归一化之后可以看出，重型货车运输的各个环境影响类型中，人体健康损害最大，这是由于货车运行中的扬尘造成了颗粒物排放较大而导致的，这一点和水路运输差别较大。紧接着的是酸化效应、光化学臭氧形成、温室效应和不可再生资源消耗，水体富营养化的影响最小。

5.2 铁路货运的生命周期评价

5.2.1 目的与范围的确定

对于铁路运输，研究目的与水路运输和道路运输类似，目的是得到铁路完成一定的货物周转量的生命周期清单，并根据清单分析评价其在生命周期过程中设计的资源能源利用和环境排放情况。功能单位确定为铁路完成 1000t·km 货物周转量所产生的资源耗竭和环境排放效应。为了增加可比性，铁路运输的数据主要依据 2005 年的统计数据，来源为中国统计年鉴。

研究范围与水路运输和道路运输保持一致，系统边界内只包括运输阶段和燃油生产阶段，而对运输工具的制造、维护、报废、铁路及相关的基础设施建设和运营等过程以及所有的运输和销售活动均未作考虑。

5.2.2 生命周期清单分析

根据统计年鉴^[34]的数据, 2005年内燃机车和电力机车的日产量分别为105.6万吨公里和118.3万吨公里。内燃机车和电力机车分别占了总日产量的47.2%和52.8%。内燃机车每万吨公里耗油24.6kg, 电力机车每万吨公里耗电111.8kWh。

由于缺乏货运机车的相关数据, 本文近似的将能耗数据作为货运内燃机车和货运电力机车数据, 并假设内燃机车和电力机车每年各自完成的货物周转量的比例与它们日产量的比例相同。根据内燃机车和电力机车完成单位周转量的能源消耗以及它们各自日产量的比例可以计算出, 铁路整体运输平均每完成1000t·km的货物周转量, 将消耗1.16kg的柴油和5.91kWh的电力。

我国内燃机车主要使用柴油机, 其主要污染物的排放因子使用欧洲环境署的排放清单指南中, 用于铁路运输的柴油机的排放因子, 如表5-4所示:

表5-4 内燃机车部分污染物的排放因子
Table 5-4 Pollutant emission factors for diesel locomotive

| 污染物 | NO _x | NM VOC | CH ₄ | CO | NH ₃ | N ₂ O | PM |
|------------|-----------------|--------|-----------------|------|-----------------|------------------|------|
| 排放因子(g/kg) | 42.5 | 4.72 | 0.18 | 10.9 | 0.007 | 1.29 | 4.12 |

SO₂的排放因子可根据燃油中的硫含量及其转化率确定。与内河水运的计算方法相同, 假定柴油中硫含量为0.2% (m/m), 98%的硫元素转化成了SO₂。从而可以计算出每消耗1kg柴油, 将排放0.00392kg的SO₂。CO₂的排放因子可以根据式(3-6)算出。柴油生产过程采用表3-7中的清单, 单位发电的清单数据采用狄向华^[5]的我国电力工业生命周期清单结果。再根据铁路单位周转量的燃油消耗和电力消耗则可计算出铁路完成功能单位运输的生命周期清单, 见表5-5。

表5-5 铁路完成功能单位运输的生命周期清单
Table 5-5 The life cycle inventory for the functional unit of railway

| 环境负荷项目 | 单位 | 铁路综合 | 内燃机车 | 电力机车 | |
|--------|------------------|--------------------------|----------|----------|----------|
| 能源消耗 | 原煤 | kg/1000t·km | 2.40E+00 | 1.16E-01 | 4.44E+00 |
| | 原油 | kg/1000t·km | 1.57E+00 | 3.22E+00 | 1.03E-01 |
| | 天然气 | m ³ /1000t·km | 4.09E-02 | 1.94E-04 | 7.71E-02 |
| 环境排放 | NO _x | kg/1000t·km | 7.71E-02 | 1.07E-01 | 5.08E-02 |
| | N ₂ O | kg/1000t·km | 1.50E-03 | 3.17E-03 | 0.00E+00 |
| | CH ₄ | kg/1000t·km | 1.40E-02 | 9.72E-04 | 2.57E-02 |
| | CO | kg/1000t·km | 1.96E-02 | 2.71E-02 | 1.29E-02 |
| | NM VOC | kg/1000t·km | 7.20E-03 | 1.16E-02 | 3.25E-03 |
| | PM | kg/1000t·km | 1.80E-02 | 1.44E-02 | 2.12E-02 |
| | NH ₃ | kg/1000t·km | 8.12E-06 | 1.72E-05 | 0.00E+00 |
| | CO ₂ | kg/1000t·km | 8.40E+00 | 8.26E+00 | 8.52E+00 |
| | SO ₂ | kg/1000t·km | 3.15E-02 | 1.25E-02 | 4.85E-02 |

表5-5中, 铁路综合表示铁路总体完成功能单位货运的环境影响, 内燃机车

和电力机车分别表示铁路上这两种机车完成功能单位货运的环境影响。

5.2.3 生命周期影响评价

对铁路货运的生命周期清单数据进行特征化和归一化处理,影响类型、类型参数和特征化模型的选择与内河货运相同。特征化因子使用表 2-4 中的数据。特征化结果见表 5-6。

采用表 2-5 中的归一化基准值对特征化结果进行归一化处理,归一化结果见表 5-7。

表 5-6 铁路货运特征化结果

Table 5-6 The characterization results of railway transportation

| 影响类型 | ADP | GWP | AP | HT | POCP | EP |
|------|----------|-----------------------|-----------------------|----------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 单位 | kg 铈当量 | kg CO ₂ 当量 | kg SO ₂ 当量 | kg (1,4)-二氯苯当量 | kg C ₂ H ₄ 当量 | kg PO ₄ ³⁻ 当量 |
| 铁路综合 | 2.23E-04 | 9.09E+00 | 8.55E-02 | 1.10E-01 | 6.55E-03 | 1.00E-02 |
| 内燃机车 | 4.56E-04 | 9.13E+00 | 8.71E-02 | 1.41E-01 | 7.79E-03 | 1.39E-02 |
| 电力机车 | 1.49E-05 | 9.06E+00 | 8.41E-02 | 8.30E-02 | 5.45E-03 | 6.60E-03 |

表 5-7 铁路货运的归一化结果

Table 5-7 The normalization results of Pearl River transportation

| 归一化结果 | ADP | GWP | AP | HT | POCP | EP | 合计 |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 铁路综合 | 1.04E-14 | 2.36E-13 | 2.86E-13 | 2.22E-15 | 1.44E-13 | 7.77E-14 | 7.56E-13 |
| 内燃机车 | 2.13E-14 | 2.37E-13 | 2.91E-13 | 2.83E-15 | 1.71E-13 | 1.07E-13 | 8.31E-13 |
| 电力机车 | 6.96E-16 | 2.35E-13 | 2.81E-13 | 1.67E-15 | 1.20E-13 | 5.12E-14 | 6.89E-13 |

从归一化结果可以看到,铁路货运的各个环境影响类型中,酸化效应、温室效应和光化学臭氧形成成为影响最大的三个类别,这与内河运输很类似。其次是水体富营养化和不可再生资源消耗,人体健康损害最小。

5.3 功能单位环境行为的比较

图 5-1 为各运输方式环境影响归一化结果的比较。从图中可以看到,完成相同货物周转量环境影响最小的运输方式为铁路运输,影响最大的运输方式为重型货车运输。水路运输方式居于这两种运输方式之间,其中环境影响从小到大分别为长江船队、长江货船、长江支流和珠江货船。尽管内河货运的环境影响大于铁路运输,但其环境影响远远小于道路运输。长江船队的环境影响只比铁路运输高大约 6%,和铁路运输十分的接近。道路运输则在各个环境影响类型的环境影响上都要显著大于内河货运。

铁路货运的环境影响较小有多个方面的原因。首先是因为在本研究中只考虑了运输过程和燃油生产过程,相关基础设施建设诸如铁路的铺设与维护,相关设施的建设等等都没有予以考虑;其次,在考虑的货运过程中,由于火车在铁轨上

运行，其阻力较小，而且火车运输规模较大，使得运输效率较高；再次，由于铁路大量使用了电力机车，尽管我国电厂发电也存在大量污染物排放，但相对与运输工具所使用的内燃机，其能量转化效率更高，因此完成相同的货物周转量，使用电力机车运输的能耗和污染物排放都要小于以内燃机作为动力的运输工具。

对于内河水运本身，环境影响由小到大依次为长江船队、长江货船、长江支流货船和珠江货船。对于长江航运，货运能力较大的运输工具功能单位环境影响较小。珠江航运之所以在所研究的内河航运形式中环境影响最大，除了其船舶整体比长江船舶要小一些之外，还由于珠江航运本身的特点^[60]，导致其运输船舶吃水较深，阻力较大，导致了资源消耗和环境排放都较高。

总体而言，水路运输和铁路运输是环境负荷较小的两种运输方式。尽管这两种运输方式的灵活性不如道路运输，但环境影响要低得多。相对于重型货车高速公路运输，完成相同的货物周转量，长江货船、长江船队、长江支流和珠江货船运输的环境影响分别小 87.8%、96.8%、83.8%和 83.6%，铁路运输的环境影响小 97%。因此，对于大批量长距离的货物运输，首选运输方式应该是水路运输和铁路运输。

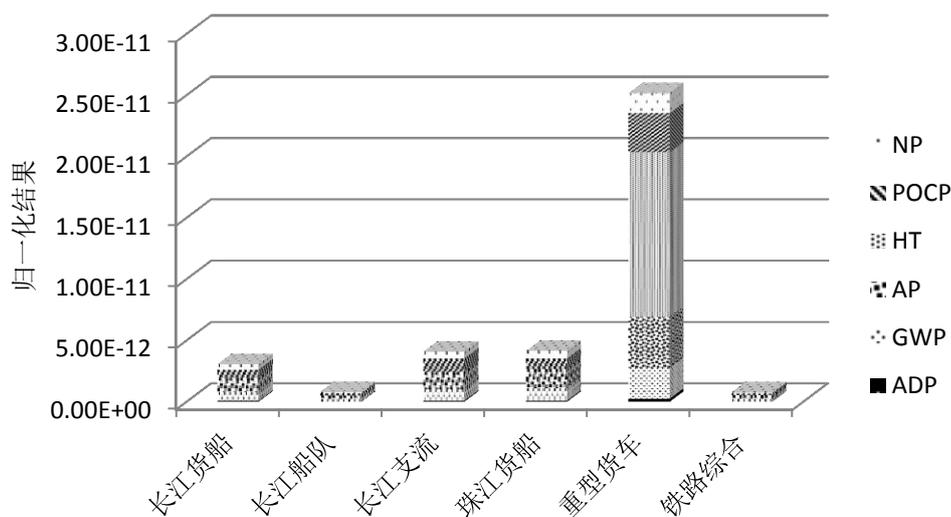


图 5-1 各种运输方式环境影响的归一化结果

Figure 5-1 The normalization results for different ways of transportation

就环境影响类型而言，水路和铁路运输最重要的环境影响类型是酸化效应，而重型货车运输最主要的环境影响类型是人体健康损害。而道路运输造成人体健康损害的污染物主要是由于机动车运输过程产生的大量颗粒物造成的，而道路扬尘在机动车颗粒物的排放中占据着主导地位。其他两种运输方式则没有扬尘或扬尘很少。而对于道路运输，酸化效应是仅次于人体健康损害的影响类型。因此对于水路、铁路和道路运输，酸化效应都是非常重要的环境影响类型。对于交通运

输，酸化效应主要由大气排放物中的 NO_x 和 SO_2 引起，而有效控制这些污染物的排放须要依靠运输工具发动机排放控制技术的开发与应用以及改善燃油的质量。对于铁路运输，还需要减少发电厂的 NO_x 和 SO_2 排放。

5.4 运输方式的总体比较

根据统计年鉴的数据^[61]，2005 年我国铁路货物周转量为 20726 亿吨公里，公路货物周转量为 8693.2 亿吨公里。依据交通运输部发布的统计公报^[40]，2005 年长江水系的货物周转量为 1484.54 亿吨公里，珠江水系的货物周转量为 243.55 亿吨公里。用平均技术状态重型货车在高速公路的运输代表我国道路运输整体情况，则根据 3-19 中的长江典型货船数据、表 4-7 中的珠江典型货船数据、表 5-3 中的重型货车数据和表 5-7 中的铁路综合数据，结合 2005 年货物周转量情况，计算出 2005 年我国公路、铁路和内河水路货运的总体环境影响，见表 5-8：

表 5-8 2005 年我国公路、铁路和内河水路货运的总体环境影响

Table 5-8 Overall environmental impact of China's road, rail and inland waterway freight transport in 2005

| 环境影响类型 | 长江 | 珠江 | 公路 | 铁路 |
|--------|----------|----------|----------|----------|
| ADP | 9.82E-06 | 2.20E-06 | 2.16E-04 | 2.16E-05 |
| GWP | 1.08E-04 | 2.42E-05 | 2.21E-03 | 4.88E-04 |
| AP | 1.69E-04 | 3.84E-05 | 3.60E-03 | 5.93E-04 |
| HT | 1.67E-06 | 3.79E-07 | 1.17E-02 | 4.59E-06 |
| POCP | 1.01E-04 | 2.07E-05 | 2.78E-03 | 2.99E-04 |
| EP | 6.46E-05 | 1.47E-05 | 1.42E-03 | 1.61E-04 |
| 合计 | 4.54E-04 | 1.01E-04 | 2.19E-02 | 1.57E-03 |

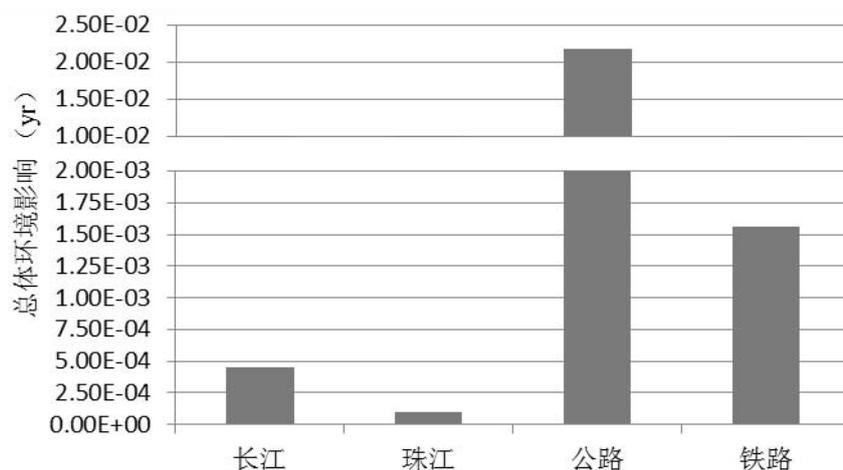


图 5-2 2005 年我国公路、铁路和内河水路货运的环境影响比较

Figure 5-2 China's road, rail and inland waterway freight transport environmental impacts in 2005

图 5-2 为 2005 年我国公路、铁路和内河水路货运的总体环境影响比较。从

图 5-2 和表 5-8 中可以清楚的看到, 2005 年各货运方式的环境影响从大到小依次是公路、铁路、长江和珠江, 其中公路货运的环境污染远远高于其它三种运输方式。尽管铁路货物周转量是公路运输的 2.4 倍, 但由于其单位周转量的环境影响要小得多, 2005 年铁路货运的环境影响仍然比公路货运小 92.84%。长江和珠江货运完成单位周转量的环境影响比较小, 但由于不是目前货物运输的主要方式, 它们的货物周转量比两种陆路运输方式都要小得多, 因此总体环境影响比陆路运输小了 1 到 2 个数量级。长江水系完成单位货物周转量的环境影响只有珠江水系的 74.03%, 但 2005 年长江水系的货物周转量是珠江水系的 6.1 倍, 因此当年长江货运的环境影响达到了珠江的 4.5 倍。

从环境影响的角度考虑, 在我国货物运输应当尽量选择内河水路或者铁路运输。尤其是内河水路运输, 其节能减排的潜力还没有充分发挥出来。

5.5 本章小结

本章用生命周期评价的方法分析了道路运输和铁路运输的环境影响情况, 并与之前所研究的内河货运的环境影响评价结果进行了比较。比较的结果显示, 在不考虑基础设施建设的情况下, 铁路货运的总环境影响最小, 长江船队运输的总环境影响与铁路运输的十分接近, 道路运输的环境影响远远大于其它的货运方式。对于内河货运的环境影响, 从大到小依次为珠江货船、长江支流货船、长江货船和长江船队; 对于 2005 年的货物运输宏观总体情况, 公路运输总的环境影响最大, 其次是铁路运输, 再次是长江货运, 珠江货运最小。

结论与展望

本论文运用生命周期评价方法对我国材料产业 LCA 研究涉及的内河货运问题进行了分析和研究。本文将典型船舶或船队的运输阶段和燃油生产两个生命阶段作为研究范围, 运输工具完成 1000t·km 货物周转量作为功能单位, 对长江货船、长江船队、长江支流货船和珠江货船这四种运输方式开展了生命周期清单编制及环境影响评价研究, 在此基础上对其进行了生命周期结果解释, 并与公路和铁路运输的环境影响进行了对比。论文所得结论主要包括以下几个方面:

(1) 对于长江水系货运排放量最大的污染物是 CO_2 。长江货船、长江船队和长江支流货船完成 1000t·km 货物周转量时的 CO_2 排放量分别为 25.2kg、6.68kg 和 31.7kg。长江水系货运所涉及各类环境影响类型中, 酸化效应是最重要的环境影响类型, 分别占三种运输方式总环境影响的 37.30%、38.17%和 34.61%。长江水系货运影响最大的环境负荷项是 NO_x 的排放, 它对三种货运方式环境影响的贡献分别占 56.31%、57.72%和 52.09%。

(2) 对于珠江货运排放量最大的污染物是 CO_2 , 珠江货船完成 1000t·km 货物周转量时的 CO_2 排放量为 34.5kg。珠江水系货运所涉及各类环境影响类型中, 酸化效应是最重要的环境影响类型, 占总环境影响的 38.17%。对于酸化效应贡献最大的污染物为 NO_x 和 SO_2 , 分别占 88.76%和 11.21%。 NO_x 的排放是影响最大的环境负荷, 对珠江货运环境影响的贡献达到了 57.72%。

(3) 对不同的货运方式进行比较后发现, 在本文的系统边界内, 完成单位货物周转量的环境影响从小到大依次是: 铁路运输、长江船队、长江货船、长江支流货船、珠江货船和重型货车。铁路运输虽然环境影响最小但对长江船队并没有明显优势, 所有内河货运方式的环境影响都远远小于道路运输的环境影响。对于内河货运本身, 运载能力较强的运输工具其单位周转量的环境影响较小。根据货物周转量对内河水路、公路和铁路的整体环境影响情况进行了比较, 结果发现, 在 2005 年公路运输总的环境影响最大且远远大于其它货运方式, 其次是铁路运输, 再次是长江货运, 珠江货运最小。

(4) 对于水路运输, 降低其环境影响的方法包括: 1) 通过船舶发动机排放控制技术的开发与应用以减少污染物尤其是 NO_x 的排放; 2) 提高船舶的运载能力, 以降低船舶完成单位周转量货运的环境影响。为降低交通运输的整体环境影响, 应减少对环境影响较大的公路运输的依赖, 增加水路运输和铁路运输的比例。

本文对我国内河货运的几种情况进行了生命周期清单分析及生命周期影响评价, 提供了 LCA 在交通运输领域的一部分基础数据, 将为 LCA 方法在我国材料工业方面的应用与实践起到促进和推动作用。然而, 由于相关数据缺乏, 这项研究还有一些的不足: 首先, 由于相关研究较为匮乏, 导致系统边界太小, 基础

设施建设与维护、交通工具的制造使用维护与废弃等重要阶段都没有能够考虑进去；其次，缺乏本地化的内河船舶消耗与排放数据，尽管对国外的计算方法进行了本地化的修正，但仍然需要改进以获得更加贴近我国实际情况的数据。这两方面应该是未来工作的重点。

参考文献

- 1 左铁镛, 聂祚仁. 环境材料基础. 北京: 科学出版社, 2003.
- 2 ISO 14040-2006:Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework. 2006.
- 3 ISO 14044-2006:Environmental Management - Life Cycle Assessment - Requirements and Guidelines. 2006.
- 4 J. Owens. Life Cycle Impact Assessment: The Use of Subjective Judgements in Classification and Characterization. The International Journal of Life Cycle Assessment. 1998, 3(1): 43-46.
- 5 狄向华. 资源与材料生命周期分析中若干基础问题的研究. 北京工业大学博士论文. 2005.
- 6 O. Hansen. Status of Life Cycle Assessment (LCA) Activities in the Nordic Region. The International Journal of Life Cycle Assessment. 1999, (4): 315-320.
- 7 B. Steen. A Systematic Approach to Environmental Priority Strategies in Product Development (Eps)-Version 2000-General System Characteristics-Cpm Report. 1999.
- 8 M. Goedkoop and R. Spriensma. The Eco-Indicator 99: A Damage Oriented Method for Life Cycle Assessment-Methodology Report. 1999.
- 9 H. Wenzel, M. Hauschild and L. Alting. Environmental Assessment of Products, Vol. 1. London, UK: Chapman & Hall, 1997.
- 10 G. H. Edgar, E. M. Thomas and S. P. William. Parameter Uncertainty and Variability in Evaluative Fate and Exposure Models. Risk Analysis. 1999, 19(6): 1193-1204.
- 11 杨建新, 王寿兵, 徐成. 生命周期清单分析中的分配方法. 中国环境科学. 1999, 19(03): 285-288.
- 12 杨建新, 徐成. 生命周期环境影响类型分类体系研究. 上海环境科学. 1999, 18(06): 246-248.
- 13 P. H. Nielsen and J. Yang. Chinese Normalization References and Weighting Factors. 1999.
- 14 Z. Nie, X. Di, G. Li and T. Zuo. Material Life Cycle Assessment in China. The International Journal of Life Cycle Assessment. 2001, 6(1): 47-48.
- 15 W. Knörr and F. Dünnebeil. Energy Consumption and Emissions of Transport in Germany 1960-2030. 2006.
- 16 W. Knörr and F. Dünnebeil. Transport in China: Energy Consumption and Emissions of Different Transport Modes. 2008.
- 17 曹大勇, 潘晓丹, 冷秀斌. 水运与铁路运输方式的比较. 交通标准化. 2009, (14): 46-48.
- 18 徐玉巧, 田连升. 浅谈不同运输方式的土地占用. 交通与运输(学术版). 2007, (01): 118-120.
- 19 徐创军, 杨立中, 杨红薇, 贺玉龙, 熊风. 运输系统生态可持续性评价指标体系的研究. 铁道运输与经济. 2007, (05): 4-7.

- 20 马天山, 樊一江. 交通运输与能源和环境战略研究. 交通运输工程学报. 2008, (04): 116-120.
- 21 赵娴. 北京市2008年交通能源需求与环境排放分析. 北京交通大学硕士论文. 2007.
- 22 倪智勇. 船用柴油机NO_x排放及其检测. 上海海事大学硕士论文. 2005.
- 23 F. Cristiano and H. Arpad. Environmental Assessment of Freight Transportation in the U.S. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2006, 11(4): 229-239.
- 24 C. Mikhail. Life-Cycle Environmental Inventory of Passenger Transportation Modes in the United States. University of California, Berkeley, 2008.
- 25 马丽萍. 材料生命周期评价基础之道路交通运输本地化研究. 北京工业大学硕士论文. 2007.
- 26 刘颖昊, 刘涛, 沙高原, 彭新. 货物运输的生命周期清单模型. 安徽工业大学学报(自然科学版). 2008, (02): 205-207.
- 27 周春锋. 基于LCA的船舶环境影响评价方法研究与应用. 武汉理工大学硕士论文. 2009.
- 28 李碧英. 基于生命周期评价的船舶环境影响行为研究. 环境保护与循环经济. 2009, (07): 17-20.
- 29 蒋春林. 基于EEP-LCA的三峡库区船舶绿色度评价体系研究. 武汉理工大学硕士论文. 2007.
- 30 M. A. Shama. Energy and Environment Dimension in Ship Manufacturing Processes. Elsevier Science Ltd, 2001: 381-387.
- 31 M. A. Shama. Life Cycle Assessment of Ships. Alexandria University, 2005.
- 32 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴2006. 北京: 中国统计出版社, 2007.
- 33 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴2007. 北京: 中国统计出版社, 2008.
- 34 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴2008. 北京: 中国统计出版社, 2009.
- 35 吴文化. 我国交通运输行业能源消费和排放与典型国家的比较. 中国能源. 2007, (10): 19-22.
- 36 M. Hwa, C. Hsieh, T. Wu and L. W. Chang. Real-World Vehicle Emissions and Vocs Profile in the Taipei Tunnel Located at Taiwan Taipei Area. *Atmospheric Environment*. 2002, 36(12): 1993-2002.
- 37 K. H. Becker, J. C. Lorzer, R. Kurtenbach, P. Wiesen, T. E. Jensen and T. J. Wallington. Contribution of Vehicle Exhaust to the Global N₂O Budget. *Chemosphere - Global Change Science Atmospheric Nitrous Oxide*. 2000, 2(3-4): 387-395.
- 38 M. Jamriska and L. Morawska. A Model for Determination of Motor Vehicle Emission Factors From On-Road Measurements with a Focus On Submicrometer Particles. *The Science of The Total Environment*. 2001, 264(3): 241-255.
- 39 A. W. Gertler. Diesel Vs. Gasoline Emissions: Does Pm From Diesel Or Gasoline Vehicles Dominate in the Us? *Atmospheric Environment 12th International Symposium, Transport and Air Pollution*. 2005, 39(13): 2349-2355.
- 40 中华人民共和国交通运输部. 2005年公路水路交通行业发展统计公报. 2006.

- 41 中华人民共和国交通运输部. 2006年公路水路交通行业发展统计公报.2007.
- 42 中华人民共和国交通运输部. 2007年公路水路交通行业发展统计公报.2008.
- 43 杨建新, 徐成, 王如松. 产品生命周期评价方法及应用. 北京: 气象出版社, 2002.
- 44 邓南圣, 王小兵. 生命周期评价. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- 45 左铁镛, 冯之浚. 循环型社会材料循环与环境影响评价. 北京: 科学出版社, 2008.
- 46 高峰. 生命周期评价研究及其在中国镁工业中的应用. 北京工业大学博士论文. 2008.
- 47 中华人民共和国交通运输部. 2001年公路水路交通行业发展统计公报.2002.
- 48 中华人民共和国交通运输部. 2002年公路水路交通行业发展统计公报.2003.
- 49 中华人民共和国交通运输部. 2003年公路水路交通行业发展统计公报.2004.
- 50 中华人民共和国交通运输部. 2004年公路水路交通行业发展统计公报.2005.
- 51 黄强. 长江航运年鉴.2006(总第5卷). 武汉: 中国航海史研究会长江片委员会, 2007.
- 52 陈兰. 江苏省内河货运发展分析与预测. 武汉理工大学硕士论文. 2003.
- 53 European Environment Agency. Emep/Corinair Emission Inventory Guidebook - 2007. 2007.
- 54 陈文淼, 王建昕, 帅石金. 柴油硫含量对排放特性的影响. 内燃机工程. 2008, (04): 41-45.
- 55 袁宝荣, 聂祚仁, 狄向华, 左铁镛. 中国化石能源生产的生命周期清单(II)——生命周期清单的编制结果. 现代化工. 2006, (04): 59-61.
- 56 方新康. 浙江省内河运输船舶的船型优化. 2004, : 38-56.
- 57 杨同寿, 张伟. 三峡库区船队拖带效率探讨. 船海工程. 2004, (03): 4-6.
- 58 陈孟, 陈宁, 何隆云, 汪振华. 长江驳船队运输方式发展前景分析. 武汉理工大学学报(社会科学版). 2009, (06): 64-68.
- 59 张俊飞. 珠江水系内河运输船舶现状及标准化发展思路. 交通标准化. 2004, (06): 32-34.
- 60 张俊飞. 珠江标准船型探索. 中国水运. 2004, (08): 43-44.
- 61 中国交通年鉴社编辑. 中国交通年鉴. 2008. 北京: 中国交通年鉴社, 2008.

攻读硕士学位期间所发表的学术论文

张宇峰,龚先政. 长江水路货运的生命周期清单分析.科技和产业.2011, (02):64-67.

致 谢

本论文是我在攻读硕士期间的主要工作总结，整篇论文是在导师龚先政教授的悉心指导下完成的。从论文的选题、研究方案和重点的确定到论文的撰写都凝聚着龚老师的心血。非常感谢龚老师对我科研工作上的指导。同时，龚老师严谨的治学态度和兢兢业业的工作作风将对我以后的学习和工作产生重要影响。

感谢聂祚仁教授为我们提供优越的学习科研环境；感谢王志宏教授还有高峰老师对我论文研究提供的有益建议和热心指导。同时还要感谢课题组的刘宇师兄、孙博学师兄、孟宪策师兄、李琛师姐和沈万霞同学在课题上进行的有益探讨和帮助。

感谢 863 项目和国家科技支撑项目课题的支持。

最后，深深感谢我的父母对我的关心，鼓励和支持！

张宇峰

2011 年 4 月于北京工业大学