

杨洁,王洪涛,周君. 铁路运输生命周期评价初探 [J]. 环境科学研究, 2013, 26(9): 1029-1034.

YANG Jie, WANG Hongtao, ZHOU Jun. Life cycle assessment of Chinese railway transportation [J]. Research of Environmental Sciences, 2013, 26(9): 1029-1034.

铁路运输生命周期评价初探

杨洁¹, 王洪涛^{1*}, 周君²

1. 四川大学建筑与环境学院, 四川 成都 610065

2. 中央财经大学管理科学与工程学院, 北京 100081

摘要: 基于生命周期评价方法,建立了我国铁路运输的生命周期模型,包含电力机车和内燃机车的运行、基础设施建设、上游能源和原料生产等主要过程;采用我国2010年铁路货运统计数据、中国生命周期核心数据库(CLCD)等数据源,通过eBalance软件对铁路运输生命周期的环境影响进行了计算和分析。归一化分析表明,铁路运输生命周期的主要环境影响类型为富营养化、酸化和可吸入无机物,三者分别占全国相应环境影响类型总量的0.92%、0.70%和0.62%。对大理—保山段铁路实际建设数据的研究表明,铁路基础设施建设及原材料生产的各项环境影响类型对铁路运输生命周期环境影响的贡献在9.45% (富营养化) ~ 73.55% (非能源资源消耗)之间,影响十分显著。生命周期节能减排综合评价表明,铁路运输节能减排综合指标的主要贡献来自于初级能耗、NO_x和CO₂,三者分别占ECER(节能减排综合指标值)的30.90%、27.50%和21.60%。电力机车运输的节能减排效果优于内燃机车运输,其节能减排综合影响比内燃机车低41.91%。

关键词: 生命周期评价; 铁路运输; 基础设施; 内燃机车; 电力机车; 生命周期节能减排评价

中图分类号: X32, X820.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6929(2013)09-1029-06

Life Cycle Assessment of Chinese Railway Transportation

YANG Jie¹, WANG Hong-tao¹, ZHOU Jun²

1. College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China

2. School of Management Science and Engineering, Central University of Finance and Economics, Beijing 100081, China

Abstract: Railway transportation is an indispensable component in any life cycle assessment (LCA) study and database, however, full-length LCA of railway transportation was seldom found in China. Following the ISO-LCA method, a life cycle model of Chinese railway transportation for cargo was developed, which included major life cycle processes such as operation of electric and diesel locomotive, construction of railway, production of major energy carriers and materials. Based on Chinese railway statistics data in 2010, Chinese Core Life Cycle Database (CLCD) and relative research papers, the life cycle of Chinese railway transportation for cargo was analyzed in eBalance software. Normalization analysis showed that eutrophication, acidification and respiratory inorganics were the main environmental impact categories of the rail transportation, accounting for 0.92%, 0.70% and 0.62% of the national total amount respectively. According to the analysis based on actual bill of materials of the railway from Dali City to Baoshan City, the life cycle contribution of railway construction ranged from 9.45% (eutrophication) to 73.55% (resource consumption), which was too large to be neglected in LCA study. According to the weighting method based on Chinese energy conservation and emission reduction targets (ECER method), the overall life cycle impact of electric locomotive transportation was lower than diesel locomotive transportation by 41.91%. This indicated that electric locomotive was superior to diesel locomotive. The analysis of life cycle of Chinese railway transportation provided a basis for the further LCA study of railway transportation. Especially, given the significant contribution of railway construction as indicated, more data on railway construction would be needed for LCA studies.

Key words: life cycle assessment; railway transportation; infrastructure; diesel locomotive; electric locomotive; life cycle energy conservation and emission reduction evaluation method (ECER)

收稿日期: 2013-01-10

修订日期: 2013-04-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(71372192); 四川省环境保护科技计划项目(2011HB009)

作者简介: 杨洁(1989-), 女, 河南洛阳人, yangjie207@gmail.com.

* 责任作者, 王洪涛(1970-), 男, 四川成都人, 副教授, 博士, 主要从事生命周期评价(LCA)及其应用研究, wanght.scu@gmail.com

铁路运输是我国综合交通运输体系的骨干, 2010年铁路货物周转量为 2.76×10^{12} t·km, 占全国总货物周转量的19.5%^[1]; 同时, 铁路运输的生命周期过程也造成了大量的资源能源消耗和环境污染。因此,

研究铁路运输的生命周期环境影响和资源能源利用情况,不仅有利于铁路行业的环境保护和节能减排,也可工业产品的生命周期评价提供必不可少的基础数据。

国内对铁路运输的环境影响问题研究很多。宋金鹏等^[2-3]对我国铁路运输的能源消耗情况进行了研究;曹大勇等^[4-7]对铁路、公路、水运等交通方式的能耗及CO₂排放进行了对比分析。但上述研究仅包含运输阶段,并未包含能源生产、基础设施建设等其他生命周期阶段。近年来国内外很多学者提出采用LCA(life cycle assessment,生命周期评价)法对铁路运输的环境影响进行评价^[8-11]。Hakan等^[12-13]分别以Bothnia铁路和California高速铁路为例,对铁路运输的基础设施建设(包括铁轨铺设、隧道、桥梁建设、车站建设)、机车制造、燃料生产及运行阶段进行了全生命周期评价。国内廖千家骅^[14]在阐述规划环境影响评价指标体系理论的基础上,提出了基于LCA模式下的铁路规划环境影响评价指标体系;陈淑连等^[15]论述了节能技术的生命周期评价技术框架及其在铁路节能评估中的应用;张宇峰^[16]对铁路货运的运输阶段和燃油生产阶段进行了生命周期评价,得到了生命周期清单及生命周期中的资源能源利用和污染排放情况。但国内已有的铁路运输LCA研究中主要存在2个问题:①系统边界不完整。现有研究中系统边界多仅包括运输阶段和燃料生产阶段,未包括基础设施建设阶段。②评价指标不够全面。现有研究中评价指标多为运输阶段的能耗及CO₂排放,较少涉及SO₂、NO_x、颗粒物等其他污染物及其他资源消耗,尤其是没有针对我国目前非常关注的节能减排政策目标进行评价。此外,电力机车作为铁路运输近年来发展的重点,其与内燃机车的对比一直是研究的热点,而现有研究多数仅针对二者在运输阶段的能源消耗的对比^[3,17],鲜见对二者整个生命周期的环境影响的量化研究,易导致忽视上游动力燃料生产带来的环境影响转移的问题。

该研究以2010年我国铁路运输货运为例,采用LCA方法对铁路运输基础设施建设、上游动力及燃料生产、机车运行等生命周期阶段进行数据收集和建模,计算铁路运输生命周期的清单、环境影响评价指标以及节能减排指标,分析铁路运输的主要环境影响类型及基础设施建设在铁路运输全生命周期环境影响中的所占比例;同时,对内燃机车和电力机车的生命周期环境影响进行对比,以期铁路部门实现行业

节能减排提供参考。

1 评价方法

1.1 目标与范围定义

该研究旨在分析铁路运输生命周期的环境影响,因此选取完成1 t·km货物周转量作为LCA功能单位。系统边界包括铁路基础设施建设、上游动力及燃料生产、机车运行。根据国外的研究^[18-19],铁路基础设施中的辅助性建筑对铁路运输生命周期的影响比例较小,故该研究不包括信号设施、噪音隔绝墙等基础设施建设。此外,鉴于目前数据缺乏,该研究未包括机车生产及铁路维护和报废阶段。

1.2 建模与数据收集

铁路运输的生命周期过程如图1所示。采用eBalance^[20]软件完成LCA建模计算与分析。

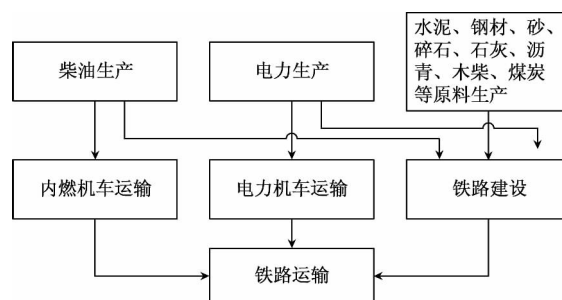


图1 铁路运输生命周期流程

Fig. 1 Life cycle flow chart of railway transportation

1.2.1 机车运行阶段

内燃机车和电力机车分别以柴油和电力为动力,根据《中国统计年鉴》对铁路客、货运的统计^[1],内燃机车柴油消耗量为2.640 g/(t·km),电力机车电力消耗为0.010 24 kW·h/(t·km)。该研究近似将上述能耗数据作为货运内燃机车和电力机车的数据^[14]。

内燃机车在运行过程中会产生多种污染物,如表1所示。污染物排放数据根据内燃机车的排放系数及耗油量计算得到。采用我国铁路行业实测排放系数(每g燃油消耗的污染物排放量)来计算内燃机车的环境排放,其中,CO₂的排放系数取3.16 g/g^[21];CO、NO_x、SO₂的排放系数则采用蔡惟谨等^[22]对3种内燃机车测试的平均值,分别为7.1×10⁻³、50.3×10⁻³和2.2×10⁻³ g/g;烟尘和碳氢化合物排放系数则采用铁道部劳动卫生研究所及铁道机车车辆研究所的试验数据,分别为15.2×10⁻³和5.1×10⁻³ g/g^[23]。

电力机车在运行过程中使用电力,其运行过程本身不会直接产生污染物,因此不考虑其运行过程的污染物排放^[24]。表1列出了内燃机车、电力机车完成

1 t·km 货物周转量的清单数据.

表 1 2 种机车运行阶段的清单数据

Table 1 Inventory data of operation phase of two locomotives

项目	内燃机车	电力机车
能源投入	柴油/kg	2.64×10^{-3}
	电力/kW·h	1.02×10^{-2}
环境排放	CO ₂ /kg	8.34×10^{-3}
	CO/kg	1.87×10^{-5}
	SO ₂ /kg	5.81×10^{-6}
	NO _x /kg	1.33×10^{-4}
	PM _{2.5} /kg	4.01×10^{-5}
	碳氢化合物/kg	1.35×10^{-5}

注: 以每 1 t·km 周转量计.

1.2.2 铁路基础设施建设阶段

由于缺乏全国平均的铁路基础设施建设数据, 该研究以大瑞铁路大理—保山段的建设数据作为全国平均数据的近似, 以分析铁路基础设施建设的环境影响. 大理—保山段全长 133.641 km, 根据其建设资料得到该段铁路的能源和材料消耗清单, 包括电力、汽油、柴油、水泥、石灰、碎石及钢管、型钢、

钢轨等, 以 1 t·km 货物周转量的消耗量进行折算和统计.

假设全国铁路单位长度的周转量基本接近, 2010 年全国年货物周转量为 2.76×10^{12} t·km, 年营业铁路长度为 66 239 km^[1]. 根据式 (1) 计算全国平均分摊到 1 t·km 货物周转量的铁路建设所需的各项材料消耗量 (Q).

$$Q = M / (Y \times S_1 \times \frac{T}{S_2}) \quad (1)$$

式中: M 为铁路基础设施建设的材料消耗量, kg; Y 为铁路的使用年限, a; S₁ 为铁路长度, km; T 为全国年货物周转量, t·km; S₂ 为全国年营业铁路长度, km.

铁路各部分的使用年限有差异, 该研究中大理—保山段铁路主体工程 (包括路基、桥梁和隧道等) 的使用年限设为 100 a^[2], 铁轨的使用年限为 20 a^[2]. 由于铁路建设阶段施工程序复杂, 并且其建设过程中的污染物排放数据难以获得, 故在该研究中未包含. 表 2 中列出了均摊到 1 t·km 货物周转量的铁路建设阶段的能耗与材料消耗数据.

表 2 铁路建设阶段的能耗与材料消耗清单数据

Table 2 Inventory data of energy and materials in railway construction

材料	水泥	电力 ¹⁾	型钢	钢轨	砂	碎石
消耗量/kg	3.00×10^{-3}	7.12×10^{-4}	2.17×10^{-4}	1.72×10^{-4}	8.56×10^{-5}	4.95×10^{-5}
材料	柴油	无缝钢管	石灰	钢丝	钢板	膨润土
消耗量/kg	2.22×10^{-5}	1.16×10^{-5}	9.23×10^{-6}	8.36×10^{-6}	8.31×10^{-6}	6.47×10^{-6}
材料	钢	铁	焊接钢管	石屑	沥青	木柴
消耗量/kg	5.84×10^{-6}	2.60×10^{-6}	2.32×10^{-6}	9.46×10^{-7}	6.26×10^{-7}	5.14×10^{-7}
材料	纯碱	煤沥青	汽油	硫磺	煤炭	钢筋
消耗量/kg	4.54×10^{-7}	3.19×10^{-7}	3.18×10^{-7}	1.68×10^{-7}	1.10×10^{-7}	8.93×10^{-8}
材料	玻璃	石英砂	玻璃纤维	焦炭	电石	煤油
消耗量/kg	7.27×10^{-8}	4.48×10^{-8}	4.45×10^{-8}	4.18×10^{-8}	1.09×10^{-8}	7.34×10^{-9}

1) 电力的消耗量单位为 kW·h.

1.2.3 铁路运输上游原料及能源生产过程

内燃机车运输和电力机车运输的上游过程分别为柴油生产和电力生产, 铁路建设的上游过程包括煤炭、石灰、碎石等原料的开采与运输, 以及水泥、汽油、电力、钢铁、钢筋等的生产. 这些过程的生命周期清单数据绝大部分来自于中国生命周期核心数据库 (CLCD)^[2], 并且假设铁路行业所使用的电力与全国电网电力相同. 另外, 钢丝、膨润土、石屑、沥青、木柴、玻璃纤维这 6 种数据来自国外 Ecoinvent^[2] 数据库, 其对计算结果的贡献均不超过 1%.

2 结果与讨论

2.1 特征化指标与归一化分析

生命周期中具有同类环境影响的物质, 按照其相

对于基准物质的当量因子 (即 LCA 特征化因子), 可以折算并累加在一起, 称为该影响类型的生命周期特征化指标. 如生命周期中各种温室气体排放可以折算为 CO₂ 当量值并累加得到温室效应指标, 而生命周期中含有 N、P 元素的各种污染物排放可以折算为 PO₄³⁻ 当量值并累加得到富营养化指标.

选择 6 种常见的生命周期环境影响类型指标进行分析, 包括非能源资源消耗 (kg, 以煤资源计)^[2]、一次能源消耗 (kg, 以标准煤计)^[2]、富营养化效应 (kg, 以 PO₄³⁻ 计)^[2]、酸化效应 (kg, 以 SO₂ 计)^[2]、温室效应 (kg, 以 CO₂ 计)^[2] 及可吸入无机物 (kg, 以 PM_{2.5} 计)^[2]. 由于基础数据库中能源及原材料等生产过程的有毒物质排放数据尚不完整, 故未对铁路运

输生命周期所造成的毒性影响进行分析。同时,由于生命周期评价与传统环境影响评价方法的侧重点不

同,故该研究未考虑铁路建设对周边生态环境的破坏。铁路运输生命周期环境影响各项指标值如表3所示。

表3 铁路运输生命周期环境影响分析

Table 3 Analysis of life cycle environmental impact indicators of railway transportation

环境影响类型	特征化指标 ¹⁾			归一化基准值/kg ²⁾	归一化值 ³⁾ / %
	铁路运输生命周期环境影响总量/kg	机车运行及能源生产阶段所占比例/%	基础设施建设及上游原料生产阶段所占比例/%		
非能源资源消耗	1.80×10^{-2}	26.45	73.55	1.55×10^{13} ⁴⁾	0.32
富营养化	1.25×10^{-5}	90.55	9.45	3.76×10^9	0.92
酸化	9.18×10^{-5}	87.12	12.88	3.64×10^{10}	0.70
可吸入无机物	4.23×10^{-5}	88.58	11.42	1.88×10^{10}	0.62
一次能源消耗	6.48×10^{-3}	74.99	25.01	2.95×10^{12}	0.61
温室效应	1.48×10^{-2}	72.03	27.97	1.05×10^{13}	0.39

1) 以 $1 \text{ t} \cdot \text{km}$ 周转量计; 2) 归一化基准值为某影响类型的 2010 年全国总量^[24], 其单位与特征化指标的单位相同; 3) 归一化值 = (铁路运输单位周转量的生命周期环境影响总量 $\times 2.76 \times 10^{12} \text{ t} \cdot \text{km}$ (即 2010 年的全国铁路货物周转总量)) / 2010 年归一化基准值; 4) 由于缺乏 2010 年非能源资源的全国归一化总量, 故采用 2005 年的值代替;

由表3可见,铁路基础设施建设及上游原材料生产各环境影响类型对铁路运输生命周期环境影响的贡献在 9.45% (富营养化) ~ 73.55% (非能源资源消耗) 之间,说明其在铁路运输生命周期评价中不容忽视。

归一化分析结果表明,2010 年铁路运输生命周期的各项环境影响在全国总量中所占比例(即归一化值)不大,均小于 1%,其中最主要的潜在影响是富营养化(0.92%),其次是酸化(0.70%)和可吸入无机物(0.62%)。

铁路运输生命周期的各环境影响类型总量来自于生命周期各阶段、各种相关物质的消耗与排放,据此可进行贡献分析。对于富营养化、酸化和可吸入无机物,最大的贡献来自于内燃机车运输,其次是电力和柴油生产,以及铁路基础设施建设中的水泥和钢材生产,这是因为这几种指标的主要贡献物质—— NO_x 、 SO_2 、 $\text{PM}_{2.5}$ 等大部分都是在内燃机车运输过程中产生的。对非能源资源消耗和一次能源消耗来说,主要贡献来自于柴油、电力生产及铁路基础设施建设中的水泥和钢材生产。对温室效应来说,最大的贡献来自于电力生产,其次是内燃机车运输和铁路基础设施建设中的水泥生产。

2.2 生命周期节能减排综合评价

在《“十二五”国民经济与社会发展规划纲要》(以下简称《纲要》)中规定了 7 种主要的节能减排约束性政策目标。《纲要》指出,到“十二五”末期,单位 GDP 能耗和 CO_2 排放分别削减 16% 和 17%,单位工业增加值的水耗削减 30%,而主要污染物 SO_2 和 COD_{Cr} 年排放总量均削减 8%, NO_x 和氨氮年排放总

量均削减 10%。按照《纲要》预计的 GDP 年增长率 7% 估算,单位 GDP 的 SO_2 和 COD_{Cr} 排放总量削减达 34%,单位 GDP 的 NO_x 和氨氮排放削减总量达 36%。

各种产品的生命周期过程都将产生上述资源消耗和污染物排放,直接影响到节能减排政策目标的实现,因此评价各种产品及技术方案的生命周期节能减排效果十分重要。但由于节能减排评价是一个多目标(多指标)的评价问题,在对比分析不同技术方案的生命周期节能减排指标时(如对比内燃机车和电力机车时),每个方案均可能分别有优势和劣势指标,因而难以确定哪种技术方案更有利于节能减排目标的实现。在这种情况下,需要将每个方案的多个指标加权求和,得出单一的生命周期综合评价指标,才能在方案对比时得出明确的结论。

生命周期节能减排综合评价方法 (energy conservation and emission reduction evaluation method, ECER 方法) 是基于我国节能减排政策目标的一种综合加权算法^[34-35],计算如式(2)所示:

$$S = \sum_{i=1}^7 \frac{A_i}{P_i \times N_i} \quad (2)$$

式中, S 为产品生命周期节能减排综合评价值(简称 ECER 值), i 分别代表初级能耗、工业用水量、 CO_2 、 SO_2 、 COD_{Cr} 、 NO_x 和氨氮排放, A_i 为产品的第 i 项生命周期消耗或排放指标值, P_i 为《纲要》节能减排政策规定的第 i 项削减目标(均折算为单位 GDP 的削减幅度), N_i 为 2010 年第 i 项的全国总消耗量或总排放量。

采用 ECER 方法评价铁路运输的环境影响,结果表明,初级能耗、 NO_x 、 CO_2 、 COD_{Cr} 、 SO_2 、氨氮和工业用水量分别占 ECER 的 30.90%、27.50%、21.60%、

8.75%、8.45%、1.70%和1.14%。此外,通过贡献分析和敏感度分析发现,对 ECER 主要的贡献来自于电力生产过程、内燃机车运输过程和柴油生产过程。内燃机车和电力机车运输过程数据敏感度最大。

2.3 内燃机车与电力机车的对比

采用 ECER 方法对内燃机车和电力机车的综合环境影响进行对比研究,结果见表4。由表4可见,电力机车与内燃机车相比,除 SO₂ 的 ECER 值明显高于内燃机车外,其他污染物的 ECER 值与内燃机车持平或小于内燃机车,其综合节能减排影响比内燃机车低 41.91%。

2.4 生命周期检查

2.4.1 完整性检查

完整性检查^[34]的目的是确保影响评价及解释所需的所有相关信息和数据已经获得且保持完整。该研究以内燃机车运输过程为例进行完整性检查,结果

见表5。与 Ecoinvent 数据库中相近的数据集列表进行对比发现,除前文说明因贡献不大而忽略和因缺乏数据而未包含的信息外,该研究所涉及的单元过程清单数据和系统边界基本完整。

表4 内燃机车和电力机车运输的 ECER 对比

Table 4 The contrast of ECER indicator between diesel and electric locomotive

节能减排指标	内燃机车	电力机车
初级能耗	1.02×10^{-14}	1.04×10^{-14}
工业用水	2.27×10^{-16}	0
CO ₂	6.58×10^{-15}	6.98×10^{-15}
SO ₂	1.70×10^{-15}	4.13×10^{-15}
COD _{Cr}	5.51×10^{-15}	2.23×10^{-16}
氨氮	1.33×10^{-15}	4.38×10^{-17}
NO _x	1.83×10^{-14}	3.77×10^{-15}
ECER	4.39×10^{-14}	2.55×10^{-14}

表5 内燃机车运输过程的完整性检查

Table 5 Completeness check of diesel locomotive transport process

Ecoinvent 内燃机车运输过程清单	该研究是否包括	备注
产品投入	是	
柴油	是	该研究的 NO ₂ 和 N ₂ O 包含在 NO _x 中
CO ₂ 、CO、SO ₂ 、NO ₂ 、N ₂ O、PM _{2.5}	是	该研究中以碳氢化合物代替
苯、甲苯、二甲苯、甲烷、NMVOC	否	排放量较小,该研究中忽略
氨、PM _{>10} 、PM _{2.5-10}	否	不在影响评价范围内
汞、铅、镉、铜、铬、镍、硒、锌、铁、废热	否	

2.4.2 一致性检查

一致性检查^[34]的目的是确认假设、方法和数据是否与目的和范围的要求相一致,主要包括技术、时间、地域的一致性检查和数据来源。一致性检查发现,机车运行、柴油生产及电力生产等单元过程的数据基本代表了全国的技术平均水平,时间代表了 2007—2010 年的数据,地域代表了中国,数据主要来源于统计年鉴等权威数据,基本符合目的与范围定义的要求。但由于缺乏全国平均的铁路建设阶段的数据,该研究中铁路建设过程以大理—保山段建设数据代替全国平均,可能会造成结果偏差。考虑到铁路建设在生命周期中的重要性,下一步研究应补充更多铁路建设数据并进行数据质量评估^[37-38]。

3 结论

a) 归一化分析表明,铁路运输生命周期的主要环境影响类型为富营养化、酸化和可吸入无机物,分别占全国相应环境影响类型总量的 0.92%、0.70%和 0.62%,表明铁路运输所造成的环境影响对全国总环境影响的贡献相对不大。

b) 对特征化指标的贡献分析表明,铁路基础设施建设及上游原料生产阶段各环境影响类型在铁路运输生命周期环境影响中所占比例在 9.45% (富营养化) ~ 73.55% (非能源资源消耗) 之间,表明其对铁路运输全生命周期环境影响贡献明显,不容忽视。

c) 从节能减排政策看,铁路运输主要的环境影响指标是初级能耗、NO_x 和 CO₂,其分别占 ECER 的 30.90%、27.50% 和 21.60%。

d) 电力机车的生命周期综合环境影响比内燃机车低 41.91%,电力机车的节能减排效果优于内燃机车。

参考文献 (References):

[1] 中华人民共和国国家统计局. 2011 中国统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2012.

[2] 宋金鹏. 货物运输发展方式研究 [D]. 西安: 长安大学, 2009: 51-53.

[3] 李学东. 铁路与公路货物运输能耗的影响因素分析 [D]. 北京: 北京交通大学, 2009: 7-14.

[4] 曹大勇, 潘晓丹, 冷秀斌. 水运与铁路运输方式的比较 [J]. 交通标准化, 2009(7): 46-48.

- [5] 谢汉生,黄茵,史立新,等. 铁路对发展我国低碳经济的影响和效应研究 [M] //中国环境科学学会年会论文集. 北京: 中国环境科学出版社,2010: 232-242.
- [6] 蔡博峰,曹东,刘兰翠,等. 中国交通二氧化碳排放研究 [J]. 气候变化研究进展,2011,7(3): 197-203.
- [7] 赵红艳,耿涌,郝凤明,等. 基于生产和消费视角的辽宁省行业能源消费碳排放 [J]. 环境科学研究,2012,25(11): 1290-1296.
- [8] 李强,杨健慧,李青,等. 燃料电池汽车氢源生命周期分析 [J]. 环境科学研究,2003,16(3): 59-61.
- [9] 王婧,张旭,黄志甲. 基于 LCA 的建材生产能耗及污染物排放清单分析 [J]. 环境科学研究,2007,20(6): 149-153.
- [10] MICHAEL S, MICHAEL F. Comparison of energy demand and emission from road, rail and waterway transport in long-distance freight transport. [EB/OL]. Germany: PE International, 2010 [2012-07-10]. <http://www.pe-international.com>.
- [11] CHESTER M, HORVATH A. Environmental life-cycle assessment of passenger transportation [EB/OI]. Berkeley: UC Berkeley Center for Future Urban Transport, 2007 [2012-06-17]. <http://scholarship.org/uc/item/5bz4s1n3>.
- [12] HAKAN S, STEFAN U. Life cycle assessment of railways and rail transports: application in environmental product declarations (EPDs) for the Bothnia Line [R]. Stockholm: IVL Swedish Environmental Research Institute, 2010: 5-12.
- [13] CHESTER M, HORVATH A. Life-cycle assessment of high-speed rail: the case of California [J]. Environmental Research Letters, 2010,5(1): 1-8.
- [14] 廖千家骅. 铁路规划环境影响评价指标体系研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2007: 47-50.
- [15] 陈淑连,曾毓鑫,吕名云,等. 生命周期评价在铁路节能评估中的应用研究 [J]. 铁路节能环保与安全卫生, 2012,2(2): 56-60.
- [16] 张宇峰. 材料生命周期分析之内河水路货物运输的基础研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2011: 46-51.
- [17] 周新军. 我国铁路能源消耗和节能现状 [J]. 中外能源, 2009, 14(3): 87-92.
- [18] MICHAEL S, THOMA S K. Life cycle inventories of transport services: data v1.1 [EB/OL]. Swiss: Ecoinvent Centre, 2004 [2012-05-20]. <http://www.ecoinvent.ch>.
- [19] MICHAEL S, CHRISTIAN B. Transport services [EB/OI]. Swiss: Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2007 [2012-07-21]. <http://www.ecoinvent.org/frischknecht@ecoinvent.org>.
- [20] 亿科环境科技有限公司. eBalance 评测版 [EB/OI]. 成都: 亿科环境科技有限公司, 2010 [2011-07-25]. http://www.itke.com.cn/index.php?_m=mod_article&_a=article_content&article_id=120.
- [21] 王伟光,郑国光. 应对气候变化报告(2009): 通向哥本哈根 [M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2009.
- [22] 蔡惟谨,赵春亭,杨玉森. 内燃机车用柴油机排放气态污染物的试验研究 [J]. 铁道劳动安全卫生与环保, 1996,23(2): 136-138.
- [23] 何吉成,吴文化. 中国实施铁路电气化的节能减排量估算 [J]. 气候变化研究进展, 2011,7(1): 29-34.
- [24] 王天宁,丁巍. 电力机车的节能减排实效分析 [J]. 节能, 2009, 28(4): 13-15.
- [25] 曹亚林. 对我国铁路固定资产经济使用年限的研究 [J]. 铁道科技动态, 1985(5): 7-11.
- [26] 中华人民共和国铁道部. TB 10082—2005 铁路轨道设计规范 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2005.
- [27] 刘夏璐,王洪涛,陈建,等. 中国生命周期参考数据库的建立方法与基础模型 [J]. 环境科学学报, 2010,30(10): 2136-2144.
- [28] Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Ecoinvent database [EB/OI]. Swiss: Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2010 [2012-07-25]. <http://www.ecoinvent.ch>.
- [29] 侯萍,王洪涛,朱永光,等. 中国资源能源稀缺度因子及其在生命周期评价中的应用 [J]. 自然资源学报, 2012,27(9): 1572-1579.
- [30] 国家发展和改革委员会能源研究所. GB/T 2589—2008 综合能耗计算通则 [S]. 北京: 中国国家标准化管理委员会, 2008.
- [31] GUINEE J, GORREE M, HEIJUNGS R, et al. Handbook on life cycle assessment operational guide to the ISO standards: part 2b. operational annex [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002: 126-180.
- [32] FORSTER P, RAMASWAMY V, ARTAXO P, et al. Changes in atmosphere constituents and in radiative forcing [M] //Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Changes. Climate change 2007: the physical science basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 212-213.
- [33] JOLLIET O, MARGNI M, CHARLES R, et al. IMPACT 2002 +: a new life cycle impact assessment methodology [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2003,8(6): 324-330.
- [34] WANG Hongtao, HOU Ping, ZHANG Hao, et al. A novel weighting method in LCIA and its application in Chinese policy context [J] // FINKBEINER M. Towards life cycle sustainability management. Berlin: Springer, 2011: 65-72.
- [35] 王洪涛. 材料生命周期评价方法及在水泥中的应用研究 [D]. 北京: 清华大学, 2012: 32-45.
- [36] 侯萍. 中国电网电力的生命周期评价研究 [D]. 成都: 四川大学, 2012: 45-48.
- [37] 莫华,张天柱. 生命周期清单分析的数据质量评价 [J]. 环境科学研究, 2003,16(5): 55-58.
- [38] 黄娜,王洪涛,范辞冬,等. 基于不确定度和敏感度分析的 LCA 数据质量评估与控制方法 [J]. 环境科学学报, 2012,32(6): 1529-1536.

(责任编辑: 孙彩萍)