

文章编号:1001-8360(2016)12-0047-09

高速铁路全生命周期碳排放计算

陈进杰^{1,3}, 王兴举^{1,3}, 王祥琴², 马晓元¹, 陈 瑶¹

(1. 石家庄铁道大学 交通运输学院, 河北 石家庄 050043; 2. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043; 3. 河北省交通安全与控制重点实验室, 河北 石家庄 050043)

摘 要:根据全生命周期理论,对高速铁路全生命周期碳排放计算的边界进行界定,将全生命周期划分为建材生产阶段、施工建设阶段、运营维护阶段和报废拆除处置4个阶段。考虑全生命周期内各年度碳排放因子时空动态变化,分析高速铁路碳排放分解结构体系,建立高速铁路全生命周期碳排放数学模型。应用该模型对京沪高速铁路全生命周期碳排放进行定量分析及敏感性分析,对高速铁路各专业碳排放进行定量分解分析。结果表明,京沪高速铁路全生命周期碳排放为304 256.97万t,各阶段的碳排放所占比重依次为12.66%、1.32%、84.97%和1.05%。运营维护阶段碳排放最大,是全生命周期控制重点。敏感性分析结果表明电力碳排放因子敏感性最强,考虑碳排放因子时空动态因素变化,京沪高速铁路全生命周期碳排放比静态因子减少15.06%。

关键词: 高速铁路; 全生命周期; 碳排放; 敏感性分析; 清单分析

中图分类号: U238; X11 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1001-8360.2016.12.008

Calculation of Carbon Dioxide Emissions in the Life Cycle of High-speed Railway

CHEN Jinjie^{1,3}, WANG Xingju^{1,3}, WANG Xiangqin², MA Xiaoyuan¹, CHEN Yao¹

(1. School of Transportation, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
3. Key Laboratory of Traffic Safety and Control of Hebei Province, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: According to the life cycle theory, the boundary of life cycle carbon emission calculation model of high-speed railway (HSR) was defined based on the following four stages: production stage of building materials and operation equipment, construction stage, operation and maintenance stage and demolition stage. The components of the carbon emission system were analyzed considering the spatiotemporal dynamic variations of annual carbon emission factors in the life cycle. The mathematic calculation models of carbon emissions of the four stages were developed in the quantitative analysis and sensitivity analysis of life cycle carbon emissions of Beijing-Shanghai HSR. The life cycle carbon emissions of every field of the HSR system were also analyzed by using these calculation models. The results indicated that the life cycle carbon emissions of Beijing-Shanghai HSR were 304 256.97 kt. The contribution of the carbon emissions from the above mentioned four stages to the total amount was 12.66%, 1.32%, 84.97% and 1.05%, respectively. The operation and maintenance stage, with the highest carbon emissions produced, was the key stage in the control of the life cycle total carbon emissions. The results of the sensitivity analysis showed that the total emissions were most sensitive to the electricity consuming. The total amount of the life cycle carbon emissions of Beijing-Shanghai HSR considering the emission factors as spatiotemporal dynamic variations was 15.06% lower than that considering the emission factors as static ones.

Key words: high-speed railway, life cycle; carbon dioxide emission; sensitivity analysis; inventory analysis

收稿日期:2016-01-11; 修回日期:2016-03-06

基金项目:国家自然科学基金(51008201);河北省自然科学基金(E2016210131);河北省高等学校科学技术研究(ZD2014084);河北省自然科学基金(E2014210152)

第一作者:陈进杰(1963—),男,河北宁晋人,教授,博士。E-mail:cjjwxq@126.com

通信作者:王兴举(1978—),男,辽宁海城人,教授,博士。E-mail:wangxingju@stdu.edu.cn

目前,我国高速铁路运营里程已达到 2 万 km,居世界第一位,高速铁路服务范围覆盖 28 个省区市^[1]。中国已成为世界上高速铁路运营里程最长、在建规模最大的国家。

高速铁路在建筑材料生产、施工建设、运营维护以及报废拆除处置等过程都消耗了大量资源和能源,产生了大量温室气体排放。高速铁路碳排放备受关注,运用全生命周期理论研究高速铁路碳排放^[2],对高速铁路节能减排工作具有重要意义。

目前高速铁路碳排放研究较多的是对其建设阶段以及运营维护阶段的用电等进行研究,而对其全生命周期其他阶段的碳排放研究较少。

文献^[2]对加利福尼亚州高速铁路进行环境影响估算。文献^[3]对建设阶段的加利福尼亚州高速铁路碳排放进行研究。文献^[4]从土地占用、利用新能源与可再生能源和“以电代油”三方面分析了高速铁路的节能减排效应。文献^[5]以武广高铁为背景研究得出每公里高速铁路比普通铁路每年减排二氧化碳 2 190.55 t,综合效应高速铁路比普通铁路更节能减排。文献^[6]对高速铁路生命周期二氧化碳排放计算的边界进行界定,将高速铁路的生命周期划分为基础设施建造、运营和回收 3 个阶段;根据对各阶段高速铁路二氧化碳排放清单的分析,分别给出各个阶段二氧化碳排放的计算公式;通过算例分析高速铁路在建造和运营阶段碳排放的特点。文献^[7]将高速铁路按全生命周期划分为设计、建设、运营、维护和拆解 5 个阶段,分析各阶段的典型活动,总结生命周期视角下高速铁路的能源消耗和碳排放。

现有碳排放研究成果有的侧重全生命周期施工建设或铁路运营某一阶段;对碳排放因子采用国内外平均值,没有考虑碳排放因子地域性差异;铁路系统全生命周期长达数十年甚至上百年,以往的研究把碳排放因子当成常数固定值,没有考虑随时间的动态变化;由于高速铁路基础数据收集困难,对高速铁路建设及运营阶段碳排放分析建模采用简化宏观估算。种种因素导致全生命周期碳排放计算模型建立不科学,计算结果误差较大。事实上,世界范围内不同地区碳排放因子差异性较大,不能简单的移植。高速铁路是一个复杂的系统,一是其站前工程包括路基工程、桥涵工程、隧道工程、轨道工程、车站站场等,站后工程包括机务、给排水、通信信号、电力及电气化工程等等,工程量统计分析困难;二是高速铁路原材料生产、施工建设、运营维护、报废拆除处置等全生命周期需要材料设备种类达数万种以上,要对

其全生命周期碳排放进行系统分析,需要借助众多碳排放因子统计数据,数据量庞大而且获取困难;三是我国地域广阔,不同区域不同年代碳排放因子是有差异的,而一条高速铁路常常跨越不同区域,全生命周期时间跨度常常达几十年,在全生命周期内如何选取碳排放因子比较困难。

本文以横跨我国多个省市的京沪高速铁路为背景,考虑不同区域碳排放因子差异,考虑全生命周期不同年度碳排放因子动态变化,通过对京沪高速铁路建设运营详细数据进行分析,建立建材生产、施工建设、运营维护和报废拆除处置等阶段的碳排放模型,计算其碳排放量。

1 高速铁路全生命周期碳排放计算依据

1.1 高速铁路全生命周期阶段划分

高速铁路全生命周期是指高速铁路项目从规划设计、建材生产、施工建设、运营维护和报废拆除处置等整个过程。

高速铁路的规划设计阶段需要完成项目论证、项目建议书、可行性研究、工程勘察、初步设计、施工图设计等工作。该阶段的碳排放主要包括地形勘测、地质勘察(工程地质调绘,工程勘探,地质测试,路基、桥涵、隧道等各类建筑物的工程地质勘察,岩土工程地质勘察)等过程中仪器设备使用消耗能源产生的碳排放,设计计算绘图及办公产生碳排放,勘测设计过程交通运输工具使用产生的碳排放。

尽管高速铁路规划设计阶段消耗了大量人力物力,也产生了一定的碳排放,但文献^[8]研究表明,规划设计阶段能耗碳排放量远远小于其他任何一个阶段碳排放量,在全生命周期碳排放计算中可以忽略不计。

为了便于分析高速铁路整个生命周期碳排放,本文把高速铁路整个生命周期划分为四个阶段,即建材生产阶段、施工建设阶段、运营维护阶段及报废拆除处置阶段^[9-12]。

1.2 高速铁路全生命周期碳排放计算边界

高速铁路生命周期碳排放是指在高速铁路全生命周期各阶段向外界环境排放的温室气体数量。为了计算高速铁路全生命周期碳排放,需要确定其计算边界。

高速铁路全生命周期碳排放计算边界之内应包含形成高速铁路实体和功能的一系列中间产品和单元过程组成的集合,包括高速铁路基础设施建设所需材料的生产、运输和高速铁路的施工建设、运营与维护、报废拆除等,如图 1 所示。

1.3 高速铁路全生命周期碳排放清单分析

高速铁路全生命周期碳排放清单分析是对其整个

生命周期阶段对内输入和对外输出过程的定量分析, 量化高速铁路在整个生命周期内输入资源、能源的消耗, 量化分析及其向外部环境排放的温室气体等。基于过程的清单分析主要是对其各单元过程输出的排放进行定量的统计分析, 并可对所研究的清单数据进行汇总, 建立相应的清单数据库。

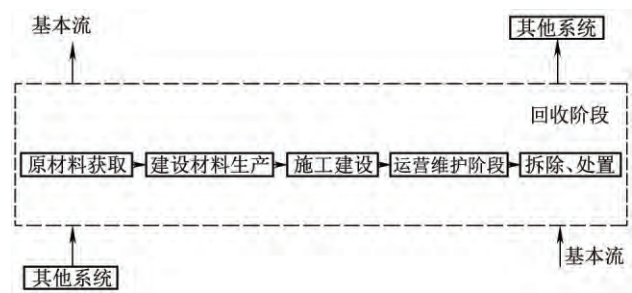


图 1 高速铁路全生命周期碳排放计算边界

2 高速铁路全生命周期碳排放模型

2.1 高速铁路全生命周期碳排放构成

高速铁路全生命周期碳排放是指其全生命周期内各阶段碳排放的总和, 即高速铁路建材生产阶段、施工建设阶段、运营维护阶段及报废拆除处置阶段碳排放

总和。按时间顺序, 高速铁路全生命周期各阶段的碳排放构成见表 1。按高速铁路结构内容可归纳为路基工程系统、轨道工程系统、桥涵工程系统、隧道工程及明洞系统、车站和车辆基地工程系统、电气化工程系统、动车组系统等七大系统, 其中电气化系统包括通信、信号、信息、电力、牵引供电等。高速铁路碳排放构成三维结构图如图 2 所示, 高速铁路碳排放分解结构体系如图 3 所示。

表 1 高速铁路全生命周期碳排放情况表

全生命周期阶段	碳排放构成
建材生产阶段	各种建筑材料、运营设备装备在生产、制造、加工过程中所消耗的能源和产生的排放
施工建设阶段	路基、桥涵、隧道及明洞、轨道工程施工建设、牵引供电、电力、通信、信号等电气化系统安装调试及试运营、车站和车辆基地建设、动车组制造等过程中产生的排放
运营维护阶段	运营期间高速列车运行, 铁路电气化系统运行, 车站和车辆基地运行等产生的排放; 工务工程设施维护, 动车组、电气化系统维护维修更新产生的排放
报废拆除处置阶段	工务工程建筑物、构筑物、设备装备等报废拆除、废弃建筑垃圾处置及回收过程产生的排放

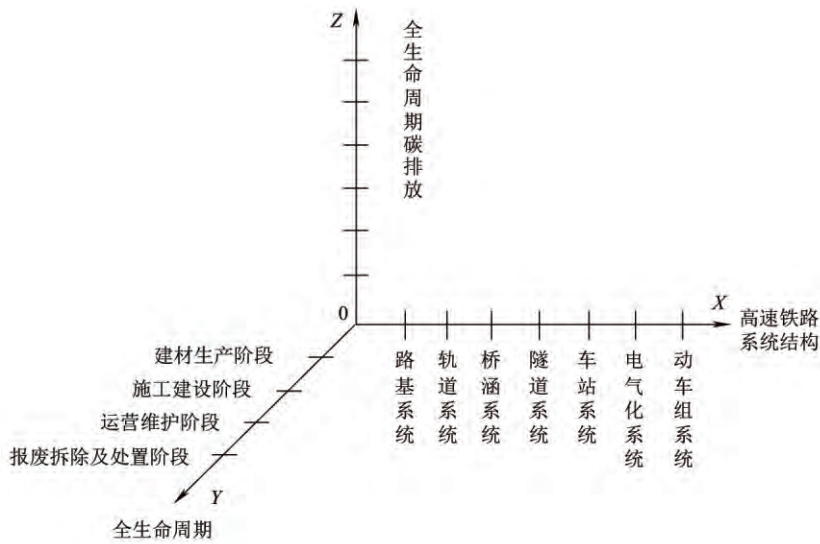


图 2 高速铁路全生命周期碳排放构成三维结构图

2.2 高速铁路全生命周期碳排放模型

根据表 1、图 2、图 3, 构建出高速铁路全生命周期碳排放模型为

$$C = C_{sc} + C_{sg} + C_{yy} + C_{cz} \tag{1}$$

式中: C 为高速铁路全生命周期碳排放 ($\text{kg} \cdot \text{CO}_2$); C_{sc} 、 C_{sg} 、 C_{yy} 、 C_{cz} 分别为建材生产阶段碳排放、施工建设阶段碳排放、运营维护阶段碳排放及报废拆除处置阶段碳排放 ($\text{kg} \cdot \text{CO}_2$)。

3 高速铁路全生命周期分阶段碳排放模型

3.1 建材生产阶段碳排放模型

高速铁路的路基工程、轨道工程、桥涵工程、隧道工程及明洞、车站和车辆基地工程、电气化工程, 动车组系统等七大系统建造过程中, 建筑材料消耗量巨大, 生产这些建筑材料需要消耗能源, 产生大量的碳排放。

高速铁路施工建设期间所使用的建材生产的碳排放计算公式为

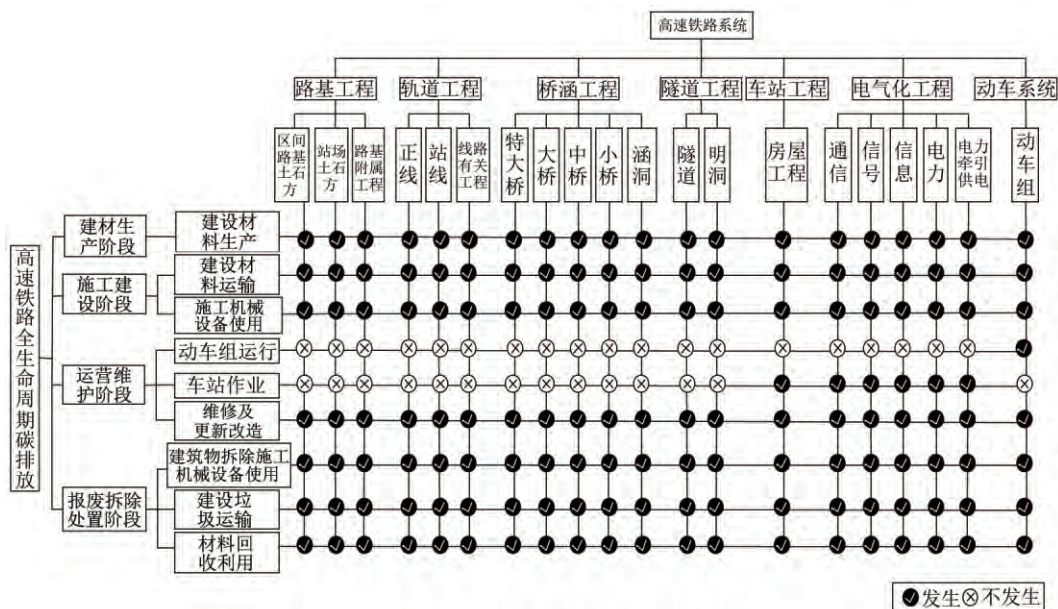


图 3 高速铁路碳排放分解结构体系图

$$C_{sc} = \sum_{j=1}^u C_{scj} = \sum_{j=1}^u \sum_{i=1}^n m_{ij} \times (1 + \omega_i) \times V_i(t, d) \quad (2)$$

式中： m_{ij} 为高速铁路子系统 j 施工建设所使用建材品种 i 消耗量； ω_i 为建设过程中建材品种 i 施工工艺损耗（%）； n 为建材品种数量； u 为高速铁路子系统数量，一般分为路基工程系统、轨道工程系统、桥涵工程系统、隧道工程及明洞系统、车站和车辆基地工程系统、电气化工程系统、动车组系统； $V_i(t, d)$ 为第 t 年在 d 区域生产单位质量的建材 i 的碳排放。全国不同行政区域的碳排放有所不同，根据建筑碳排放计量标准划分为华北、东北、华东、华中、西北、南方及海南等几个区域。

高速铁路全生命周期长达数十年甚至上百，随着科学技术进步及国家节能减排政策实施，期间不同年度碳排放系数是逐年变化的。京沪高速铁路某区域基期材料碳排放系数见表 2。

表 2 京沪高速铁路某区域基期材料碳排放系数表

序号	物资品名	基期碳排放系数 (kg · CO ₂)
1	钢筋及钢绞线/kg	2.6
2	型钢/kg	2.6
3	钢轨/kg	2.6
4	普通水泥/kg	0.87
5	碎石/t	6.3
6	砂/t	6.3
7	片石/t	6.3
8	混凝土外加剂/kg	0.69
9	滑动层材料/m ²	2.55
10	防水涂料/m ²	0.43

续上表

序号	物资品名	基期碳排放系数 (kg · CO ₂)
11	防水卷材/m ²	0.85
12	土工格栅/m ²	0.433
13	乳化沥青/kg	0.26
14	电/(kW · h)	0.780 45
15	柴油/kg	3.16
16	汽油/kg	2.98

3.2 施工建设阶段碳排放模型

高速铁路施工建设阶段碳排放包括两部分，一是建筑材料由产地运输到施工现场的运输碳排放；二是建筑物、构筑物施工过程中的机械设备碳排放，其数学模型为

$$C_{sg} = C_{sg1} + C_{sg2} \quad (3)$$

式中： C_{sg1} 为建筑材料从产地运输到施工现场的运输碳排放； C_{sg2} 为施工建设过程中的机械设备碳排放。

3.2.1 建筑材料从产地运输到施工现场的运输碳排放
在高速铁路施工建设阶段，需要将建筑材料从产地运输至施工地点，由此产生的碳排放计算公式为

$$C_{sg1} = \sum_{j=1}^u \sum_{i=1}^n \sum_{r=1}^z m_{ijr} (1 + \omega_i) \times l_{ir} \times Y_r(t, d) \quad (4)$$

式中： z 为运输方式种类； m_{ijr} 为高速铁路子系统 j 施工建设所使用建材品种 i 采用 r 运输方式从产地运送到施工现场的消耗量； l_{ir} 为建筑材料品种 i 采用 r 运输方式从产地运送到施工现场的平均运输距离； $Y_r(t, d)$ 为第 t 年在 d 区域采用 r 运输方式的运输碳排放系数。基期碳排放系数见表 3。

表 3 不同运输方式基期的单位碳排放系数

序号	运输方式	基期碳排放系数/ [(g · CO ₂ · (t · km) ⁻¹]
1	铁路	9. 11
2	公路	161. 4
3	水路	18. 3

3. 2. 2 建筑物、构筑物施工过程机械设备碳排放

在高速铁路各个子系统基础设施施工建设安装调试过程中使用了许多施工机械和设备, 根据建设工程工程量及相应定额可计算出施工过程施工机械设备的台班消耗量, 进而计算出其电力、燃料消耗, 从而计算出其碳排放量。

$$C_{sg2} = \sum_{j=1}^u \sum_{k=1}^b \sum_{h=1}^g Q_{jkh} \times O_h \times P_h \times V(t, d) \quad (5)$$

式中: b 为施工方法种类; g 为某施工方法需要机械设备种类; Q_{jkh} 为子系统 j 采用施工方法 k 应用机械设备 h 的施工工程数量; O_h 为机械设备 h 的台班定额, 即完成单位工程量需要台班数量; P_h 为台班能源消耗量, 即机械设备每个台班燃油或电力消耗量; $V(t, d)$ 为第 t 年在 d 区域单位数量燃油或电力碳排放。

3. 3 运营维护阶段碳排放模型

高速铁路运营维护阶段碳排放包括三部分^[13-14], 一是动车组运行消耗电能及碳排放, 二是动车组运行以外车站设备等消耗电能及碳排放, 三是高速铁路维修及更新改造等碳排放。其计算表达式为

$$C_{yy} = C_{yy1} + C_{yy2} + C_{yy3} \quad (6)$$

式中: C_{yy1} 为动车组运行碳排放; C_{yy2} 为车站设备运行碳排放; C_{yy3} 为高速铁路更新改造碳排放。

高速铁路运营维护阶段每个年度的碳排放是逐年变化的, 其大小与高速铁路最高行车速度、停站间距、座位利用率直接相关, 此外还受季节因素、动车组类型、车站规模、线路条件等影响。由于高速铁路客运量是逐年增长的, 因此运营维护阶段第 t 年的年碳排放也是逐年变化的, 而并非常数。高速铁路运营维护阶段的总碳排放为全生命周期内各年度碳排放之和。

3. 3. 1 动车组运行碳排放数学模型

动车组运行耗电包括车辆牵引耗电、动车组空调耗电、动车组照明耗电、动车组信号系统耗电等。高速铁路运营期间动车组运行碳排放可以表示为

$$C_{yy1} = \sum_{t=1}^T q(t) \cdot e(t) \cdot R(t) \cdot V(t, d) \quad (7)$$

式中: $q(t)$ 为铁路投入运营第 t 年客运量, 人; $e(t)$ 为运营第 t 年旅客平均运距, km; $R(t)$ 为第 t 年运输每人千米耗电量, kW · h/(人 · km); $V(t, d)$ 为第 t 年在 d 区域电力二氧化碳排放因子, kg/(kW · h); T 为高速铁路的全生命周期。

电能作为二次能源, 与不同国家地区的能源结构密切相关, 火电发电比例越高, 单位电能产生的碳排放量越大。我国将电网边界统一划分为华北、东北、华东、华中、西北和南方区域电网。

由中国发展改革委应对气候变化司确定的中国区域电网基准线排放因子中, 公布了各区域电网的排放因子, 见表 4。排放因子采用了 OM 和 BM 两种计算方法, OM 计算方法是计算电量边际排放因子, 即根据电力系统中所有电厂的总净上网电量、燃料类型及燃料总消耗量进行计算。BM 按样本机组排放因子的发电量加权平均而求得。

表 4 历年电力碳排放因子数值

kg · CO₂ · (kW · h)⁻¹

年度/ 区域	因子类别	华北区域电网	东北区域电网	华东区域电网	华中区域电网	西北区域电网	南方区域电网
覆盖省市		北京市、天津市、山西省、内蒙古自治区、河北省、山东省	吉林省、黑龙江省、辽宁省	上海市、浙江省、福建省、安徽省、江苏省	重庆市、河南省、湖南省、湖北省、四川省、江西省	山西省、青海省、甘肃省、宁夏回族自治区、新疆维吾尔自治区	广东省、云南省、贵州省、广西壮族自治区
	2007	EF _{grid, OM, y} 1. 120 8	1. 240 4	0. 942 1	1. 289 9	1. 125 7	1. 011 9
		EF _{grid, BM, y} 0. 939 7	0. 863 1	0. 867 2	0. 659 2	0. 573 9	0. 674 8
	2008	EF _{grid, OM, y} 1. 116 9	1. 256 1	0. 951 8	1. 278 3	1. 122 5	1. 063 4
		EF _{grid, BM, y} 0. 868 7	0. 794 6	0. 815 4	0. 715 6	0. 631 5	0. 696 8
	2009	EF _{grid, OM, y} 1. 006 9	1. 129 3	0. 882 5	1. 125 5	1. 024 6	0. 998 7
		EF _{grid, BM, y} 0. 780 2	0. 724 2	0. 682 6	0. 580 2	0. 643 3	0. 577 2
	2010	EF _{grid, OM, y} 0. 991 4	1. 110 9	0. 859 2	1. 087 1	0. 994 7	0. 976 2
		EF _{grid, BM, y} 0. 749 5	0. 708 6	0. 678 9	0. 454 3	0. 687 8	0. 450 6
	2011	EF _{grid, OM, y} 0. 980 3	1. 085 2	0. 836 7	1. 029 7	1. 000 1	0. 948 9
		EF _{grid, BM, y} 0. 642 6	0. 598 7	0. 662 2	0. 419 1	0. 585 1	0. 315 7
	2012	EF _{grid, OM, y} 1. 002 1	1. 093 5	0. 824 4	0. 994 4	0. 991 3	0. 934 4
		EF _{grid, BM, y} 0. 594	0. 610 4	0. 688 9	0. 473 3	0. 539 8	0. 379 1

续上表

年度/ 区域	因子类别	华北区域电网	东北区域电网	华东区域电网	华中区域电网	西北区域电网	南方区域电网
覆盖省市		北京市、天津市、山西省、内蒙古自治区、河北省、山东省	吉林省、黑龙江省、辽宁省	上海市、浙江省、福建省、安徽省、江苏省	重庆市、河南省、湖南省、湖北省、四川省、江西省	山西省、青海省、甘肃省、宁夏回族自治区、新疆维吾尔自治区	广东省、云南省、贵州省、广西壮族自治区
2013	$EF_{grid,OM,y}$	1.030 2	1.112	0.81	0.977 9	0.972	0.922 3
	$EF_{grid,BM,y}$	0.577 7	0.611 7	0.712 5	0.499	0.511 5	0.376 9
2014	$EF_{grid,OM,y}$	1.058	1.128 1	0.809 5	0.972 4	0.957 8	0.918 3
	$EF_{grid,BM,y}$	0.541	0.553 7	0.686 1	0.473 7	0.451 2	0.436 7

由表 4 可知,碳排放因子随时间变化是动态变化的,且随着火电比例逐年下降,碳排放因子呈逐年减小趋势,由此得出回归公式为

华北地区

$$V(t,d) = 1.056\ 40(t-2\ 006)^{-0.146\ 19} \quad (8)$$

华东地区

$$V(t,d) = 0.940\ 26(t-2\ 006)^{-0.132\ 28} \quad (9)$$

3.3.2 车站运行碳排放数学模型

车站耗电设备包括空调系统、照明系统、监控系统、自动扶梯系统、通信信号系统、电子大屏幕、微机打印机、给排水系统及消防系统、热水器等。根据统计,客运站设备能耗碳排放中,中央空调占 60%~80%,照明占 6%~17%,电梯占 3%左右,这三部分的值都会因发送旅客量不同而有所改变。

$$C_{yy2} = \sum_{t=1}^T q(t) \cdot S(t) \cdot RR(t) \cdot V(t,d) \quad (10)$$

式中: $S(t)$ 为第 t 年车站建筑面积, m^2 ; $RR(t)$ 为单位耗电指标, $(kW \cdot h)/(人 \cdot m^2)$ 。

3.3.3 维护更新改造过程中建材生产碳排放

高速铁路全生命周期期限较长,全生命周期内的某些子系统如钢轨、动车组、无砟轨道等寿命期较短需要更新,各个子系统需要正常维护、维修,在维护更新改造过程中所使用的建材生产碳排放计算公式为

$$C_{YV3} = \sum_{j=1}^u \sum_{i=1}^n m_{ij} \times (1 + \omega_i) \times \left[\frac{T}{T_{ji}} - 1 \right] \times V_i(t,d) \quad (11)$$

式中: T_{ji} 为子系统 j 建材品种 i 寿命周期,年; $\left[\frac{T}{T_{ji}} - 1 \right]$ 为取整运算,它表示在运营维护阶段因子系统 j 更新改造再次使用建筑材料 i 的次数。

3.4 报废拆除处置阶段碳排放模型

高速铁路在其生命期末报废处置会产生大量建筑垃圾,需要将这些垃圾运输到垃圾掩埋处或回收厂进

行循环再利用,其碳排放包括拆除过程碳排放和运输处置过程碳排放。

建筑物、构筑物拆除过程碳排放主要来源于拆除机械设备的操作,其动力能源主要是燃油和电力;运输处置过程碳排放是从铁路建筑地点运往处置点的装卸、运输处置碳排放。

报废拆除处置阶段的碳排放为

$$C_{cz} = \sum_{j=1}^u \sum_{k=1}^b \sum_{h=1}^g Q_{jkh} \times O_h \times P_h \times V_h(t,d) + \sum_{j=1}^u \sum_{k=1}^b \sum_{r=1}^z Q_{jkr} \times G_k \times l_{kr} \times Y_r(t,d) \quad (12)$$

式中: Q_{jkr} 为拆除铁路建筑物、构筑物废弃物品种 k 采用运输方式 r 运输的废物量; G_k 为拆除铁路建筑物、构筑物废弃物品种 k 的密度; l_{kr} 为拆除铁路建筑物、构筑物废弃物品种 k 采用运输方式 r 运输到垃圾掩埋处或回收厂的平均运输距离。

按照式(2)将上述各阶段的生命周期碳排放相加,便可得到高速铁路全生命周期碳排放。

4 工程实例及分析

4.1 工程概况及主要工程数量

京沪高速铁路线路全长 1 318 km,2008 年 4 月正式开工,2011 年 6 月 30 日通车运营。线路共设 24 座车站,设计最高行车速度 350 km/h,目前最高运营速度为 300 km/h。

桥梁长度 1 140 km,占正线长度 86.5%;隧道长度 16 km,占正线长度 1.2%;路基长度 162 km,占正线长度 12.3%。全线铺设无砟轨道 1 268 km,占线路长度的 96.2%,有砟轨道约 50 km,占线路长度的 3.8%。动车组类型有 CRH2A、CRH380A(L)、CRH380B(L)、CRH380CL、CRH380D 等。京沪高速铁路施工建设阶段主要材料消耗见表 5。

表 5 京沪高速铁路施工建设阶段主要材料消耗表

序号	主要材料名称	数 量
1	钢材/t	5 843 795
2	木材/m ³	261 964
3	水泥/t	20 504 490
4	砂/t	45 523 208
5	碎石/t	77 430 000
6	片石/t	5 475 000
7	沥青/t	63 866. 6
8	外加剂/t	203 829. 7
9	土工格栅/m ²	22 526 088
10	铜铝电缆光缆/m	11 039 461
11	滑动层材料/m ²	165 002 836
12	防水涂料/m ²	15 382 196
13	防水卷材/m ²	8 033 208
14	动车组/t	554 258. 3

4.2 京沪高速铁路全线客流量及远期客流预测

京沪高速铁路 2011 年 6 月 30 日开通运营以来,历年客流量见表 6。根据京沪高速铁路设计远期规划(交付运营 20 年)年客流量为 1.6 亿人次。

表 6 京沪高速铁路客运量情况表

年 度	2011 年 下半年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年 上半年	远期 2030 年
客 运 量 /万人次	2 445. 2	6 506. 9	8 389. 8	10 588. 2	5 701. 5	16 000

由表 6 历年客运量统计及设计远期年客流量,预测全生命周期年度客流量为

$$q(t) = \frac{15\,999.6 \times 10^4}{1 + 3.552e^{(-0.456(t-2\,010))}}$$

高速铁路旅客平均运距由旅客出行习惯和需求所决定,并受季节因素、本线列车、跨线列车等多个因素影响。季节因素对旅客平均运距影响较大,京沪高速铁路每年不同月份变化很大,尤其是本线列车旅客平均运距波动很大,每年暑期旅客平均运距较大,而春节前后一、二、三月份运距较小,本线列车与跨线列车平均运距差异较大。据统计,2012—2015 年旅客不同月份运距在 500~700 km 之间,平均运距 570 km。

表 8 京沪高速铁路全生命周期碳排放构成

	路基	轨道	桥涵	隧道	站房	电气化系统	动车系统	合计	各阶段比例
运营装备及 建材生产阶段	253. 005	587. 265	2 564. 711	65. 081	202. 558	18. 869	159. 428	3 850. 918	12. 66%
施工建设阶段	34. 183	53. 481	266. 003	6. 339	2. 728	0. 120	38. 356	401. 211	1. 32%
运营维护阶段	—	211. 765	—	—	1 773. 473	23 867. 362	—	25 852. 600	84. 97%
报废拆除 处置阶段	27. 347	42. 785	212. 802	5. 071	2. 183	0. 096	30. 685	320. 969	1. 05%
合计	314. 535	895. 297	3 043. 517	76. 491	1 980. 942	23 886. 448	228. 468	30 425. 698	100. 00%

表 8 中的全生命周期碳排放考虑了全生命周期内各年度碳排放因子的时空变化,如果不考虑碳排放因

4.3 运营维护阶段碳排放

京沪高速铁路跨越华北、华东两个区域,运营维护阶段碳排放按两个区域分别计算。华北区域用代码 1 表示,华东区域用代码 2 表示, $L(1)$ 表示华北区域铁路线路长度, $L(2)$ 表示华东区域铁路线路长度。京沪高速铁路运营用电情况见表 7。

表 7 京沪高速铁路运营用电情况 万 kW·h

年度	用电类型	华北区域	华东区域	合计
2011 年 下半年	牵引用电	40 581. 2	40 272. 6	80 853. 8
	配电所用电	2 666. 93	3 846. 12	6 513. 05
	合计	43 248. 13	44 118. 72	87 366. 85
2012 年	牵引用电	109 123. 6	100 195. 5	209 319. 1
	配电所用电	5 480. 72	6 784. 84	12 265. 56
	合计	114 604. 32	106 980. 34	221 584. 66
2013 年	牵引用电	124 095. 9	101 559. 1	225 655
	配电所用电	5 810. 1	7 559. 45	13 369. 55
	合计	129 906	109 118. 55	239 024. 55
2014 年	牵引用电	146 456. 9	123 344. 1	269 801
	配电所用电	6 697. 33	12 170. 79	18 868. 12
	合计	153 154. 23	135 514. 89	288 669. 12

京沪高速铁路华北区域车站总建筑面积为 185 787 m²,华东区域车站建筑面积为 365 999 m²。

根据高速铁路设计规范要求,主体工程、路基工程、桥梁工程、隧道工程等子系统按 100 年设计,因此本文研究全生命周期按 100 年计算。而轨道、动车组、电气化等子系统寿命期较短,一般在 20 年至 60 年不等,在全生命周期内需要更新,各个子系统需要正常维护、维修,京沪高速铁路在华北、华东区域维护更新改造过程中所使用的建材生产碳排放分别进行计算。

4.4 全生命周期碳排放计算结果及分析

根据本文建立的全生命周期碳排放数学模型,结合京沪高速铁路建设运营的基础数据,可得到在全生命周期内各个阶段碳排放^[15-20],见表 8。

子时空变化,则碳排放因子按基期值计算,两者比较见表 9。从表 9 可以看出,考虑碳排放因子时空动态变

化计算出的全生命周期碳排放减小 15.06%。

表 9 京沪高速铁路全生命周期碳排放量比较

碳排放因子值	全生命周期碳排放量/万 t	变化率
碳排放因子时空动态变化条件下全生命周期碳排放量	30 425.697	减小 15.06%
碳排放因子按基期值计算全生命周期碳排放量	35 819.979	

4.5 敏感性分析

高速铁路全生命周期碳排放计算模型(1)中包括建材碳排放因子、电力碳排放因子等参数,这些参数取值基于统计分析并进行远期预测。但由于影响因素的复杂性及发展的不确定性,全生命周期内参数的取值仍有可能发生变化。如电力碳排放因子、钢材、水泥碳排放因子、客流量等,这些参数变化对全生命周期碳排放值影响较大,需要进行敏感性分析,找出敏感性因素,进行分析控制。

4.5.1 电力生命周期碳排放因子敏感性分析

目前我国电力生产结构以煤电为主,从近几年统计情况看,这种电力结构正在逐渐改善,煤电比例也正在逐年下降,由于电厂建设效率提升,电力全生命周期碳排放因子也将随之下降。对该参数敏感性分析设为碳排放因子各年度上升 10%、20% 和碳排放因子下降 10%、20%,分别计算全生命周期碳排放,见表 10。

表 10 电力、钢材及水泥碳排放因子敏感性分析 万 t

	电力碳排放因子	钢材碳排放因子	水泥碳排放因子
因子增加 20%	35 733.957	30 778.207	30 781.312
因子增加 10%	33 079.827	30 601.952	30 603.505
基期值	30 425.697	30 425.697	30 425.697
因子减少 10%	27 771.568	30 249.443	30 247.890
因子减少 20%	25 117.438	30 073.188	30 070.083

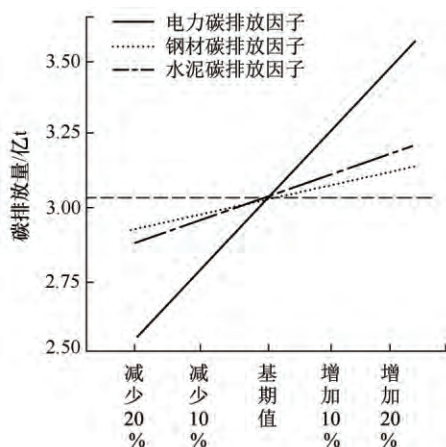


图 4 电力、钢材及水泥碳排放因子敏感性分析图

4.5.2 钢材、水泥碳排放因子敏感性分析

随着科学技术进步,钢材水泥生产工艺提高,生产单位质量钢材水泥的碳排放会逐年下降,本文考虑了钢材水泥碳排放因子的时空变化,同样对该参数敏感性分析设为碳排放因子各年度上升 10%、20% 和碳排放因子下降 10%、20%,分别计算全生命周期碳排放,如表 10、图 4 所示。

由图 4 可以看出,电力碳排放因子敏感性最强,是京沪高速铁路全生命周期碳排放计算中需要重点控制的因素。

5 结束语

本文将全生命周期理论运用于高速铁路,对高速铁路的全生命周期碳排放进行了全面的分析,分别从高速铁路建材生产、施工建设、运营维护以及报废拆除处置等四个阶段建立碳排放数学模型,揭示了各个不同阶段碳排放分布情况及它们之间的联系。

为了验证模型,以京沪高速铁路为研究对象进行分析。分析客流、旅客平均运距及其变化规律,研究高速铁路路基工程系统、轨道工程系统、桥涵工程系统、隧道工程及明洞系统、站场工程系统、电气化工程系统、动车组系统等七大系统,计算各个子系统的碳排放量,计算出京沪高速铁路全生命周期碳排放量并进行敏感性分析。结果表明,高速铁路运营维护阶段碳排放占全生命周期 84.97%,建材生产阶段占 12.66%。运营维护阶段是碳排放最大的阶段,节能潜力巨大,应重点研究线路节能坡设计、优化站间距离、车辆节能等。在原材料使用时考虑使用绿色节能材料,对于减少建材生产阶段碳排放有重要作用。研究表明,由于高速铁路工程建设周期一般为 4~5 年,相对于全生命周期 100 年较短。计算结果表明,建设阶段碳排放因子变化不大,因此该阶段是否考虑碳排放因子随时间变化总碳排放差异不明显,但应考虑碳排放因子空间因素。

对高速铁路的全生命周期碳排放进行分析涉及到装备、建材种类繁多、碳排放环节复杂,需要巨大的基础数据作为基础,是一项复杂的系统工程,需要建立一套完善的建材基础碳排放数据库。考虑电力碳排放因子时空动态变化后,京沪高速铁路全生命周期碳排放量比按基期静态因子计算的碳排放量减小 15.06%,因此考虑碳排放因子时空动态变化很有必要。

参考文献:

- [1] <http://www.chnrailway.com/html/20160927/1435114.shtml>.
- [2] CHESTER M, HORVATH A. Life-cycle Assessment of

- High-speed Rail: the Case of California[J]. Environmental Research Letters, 2010, 5(1): 14-20.
- [3] CHANG B, KENDALL A. Life Cycle Greenhouse Gas Assessment of Infrastructure Construction for California's High-speed Rail System[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2011, 16(6): 429-434.
- [4] 谢汉生, 黄茵, 马龙. 高速铁路节能环保效应及效益分析研究[J]. 铁路节能环保与安全卫生, 2011, 1(1): 19-22.
- XIE Hansheng, HUANG Yin, MA Long. Study on the Effects of Energy Conservation and Environmental Protection of High-speed Railway [J]. Railway Energy Saving and Environmental Health, 2011, 1(1): 19-22.
- [5] 张汉斌. 我国高速铁路的低碳比较优势研究[J]. 宏观经济研究, 2011(7): 17-19.
- ZHANG Hanbin. Research on the Comparative Advantage of Low Carbon of High-speed Railway in China[J]. Macro Economic Research, 2011(7): 17-19.
- [6] 付延冰, 刘恒斌, 张素芬. 高速铁路生命周期碳排放计算方法[J]. 中国铁道科学, 2013, 34(5): 140-144.
- FU Yanbing, LIU Hengbin, ZHANG Sufen. Calculation Method for Carbon Dioxide Emission in the Life Cycle of High-speed Railway[J]. China Railway Science, 2013, 34(5): 140-144.
- [7] 冯旭杰. 基于生命周期的高速铁路能源消耗和碳排放建模方法[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- [8] 陈进杰, 高桂凤, 王兴举, 等. 城市轨道交通全生命周期能耗计算方法 [J]. 交通运输工程学报, 2014, 14(4): 82-87.
- CHEN Jinjie, GAO Guifeng, WANG Xingju, et al. Calculation Method of Whole Life-cycle Energy Consumption for Urban Rail Transit[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2014, 14(4): 82-87.
- [9] 周新军. 高速铁路助推中国低碳经济效应 [J]. 中国科学院院刊, 2011, 26(4): 452-461.
- ZHOU Xinjun. The Low-Carbon Effect with the Help of High-speed Railway in China[J]. China Science Journal, 2011, 26(4): 452-461.
- [10] 中华人民共和国铁道部. TB 10621—2009 高速铁路设计规范 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2009.
- [11] 郭鑫楠. 基于生命周期评价的铁路建设项目二氧化碳排放评价研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- [12] 马超. 京沪高速铁路开行方案评价及优化调整方法研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- [13] 崔心力. 高速铁路与其他交通方式节能减排比较研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
- [14] 北京交通大学, 中国综合交通研究中心. 不同交通方式能耗与排放因子及其可比性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
- [15] 宋晓东, 付延冰, 刘恒斌. 基于生命周期评价的高速铁路减排效果[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2014, 45(9): 3 301-3 307.
- SONG Xiaodong, FU Yanbing, LIU Hengbin. Carbon Dioxide Emission Reduction of High-speed Railway [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2014, 45(9): 3 301-3 307.
- [16] YOHANIS Y G, NORTON B. Life-cycle Operational and Embodied Energy for a Genetic Single-storey Office Building in the UK[J]. Energy, 2002.
- [17] 陈莹, 朱熾. 住宅建筑生命周期能耗及环境排放模型[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2010, 50(3): 325-329.
- CHEN Ying, ZHU Ya. Models for Life-cycle Energy Consumption and Environmental Emissions in Residential Buildings [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2010, 50(3): 325-329.
- [18] 中国建筑设计研究院. CECS 374: 2014 建筑碳排放计量标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [19] 龚志起. 建筑材料生命周期中物化环境状况的定量评价研究 [D]. 北京: 清华大学, 2004.
- [20] 潘美萍. 基于 LCA 的高速公路能耗与碳排放计算方法研究及应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.

(责任编辑 田 甜)