

文章编号: 1674—8247(2024)01—0058—05

DOI: 10.12098/j.issn.1674-8247.2024.01.011

# 面向铁路选线的全生命周期减碳效益估算方法

宋洪锐<sup>1</sup> 胥岚月<sup>2</sup> 曾 勇<sup>2</sup>

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031; 2. 西南交通大学, 成都 610031)

**摘 要:** 铁路选线方案设计对于铁路能否充分发挥减碳能力具有显著影响。为了评估铁路选线方案的减碳能力, 分析了铁路全生命周期减碳效益影响因素, 提出了相应的减碳效益估算方法, 并结合实例进行了应用分析, 研究结果表明: (1) 某城际铁路研究地段全生命周期碳排放量为  $21.42 \times 10^8$  kg, 而间接减碳量为  $79.58 \times 10^8$  kg, 减碳效益达到  $58.16 \times 10^8$  kg; (2) 本文提出的铁路全生命周期减碳效益估算方法可有效评估选线设计方案带来的减碳效益。

**关键词:** 铁路选线; 全生命周期; 碳排放; 减碳效益

**中图分类号:** U212.32 **文献标志码:** A

## A Method for Estimating Full Life Cycle Carbon Reduction Benefit for Railway Route Selection

SONG Hongrui<sup>1</sup> XU Lanyue<sup>2</sup> ZENG Yong<sup>2</sup>

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China;

2. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** The design of railway route selection schemes has a significant impact on whether the railway can fully exert its carbon reduction capabilities. To assess the carbon reduction capability of railway route selection schemes, an analysis was conducted from the perspective of the full life cycle to identify the factors impacting the carbon reduction benefits of the railway's full life cycle. A corresponding carbon reduction benefit estimation method was proposed, and an application analysis combined with case studies was performed. The results show that: (1) The full life cycle carbon emissions of a certain intercity railway research section amount to  $21.42 \times 10^8$  kg, while the indirect carbon reduction is  $79.58 \times 10^8$  kg, resulting in a carbon reduction benefit of  $58.16 \times 10^8$  kg. (2) The proposed estimation method for the carbon reduction benefits of a railway's full life cycle can effectively evaluate the carbon reduction benefits brought by the route design schemes.

**Key words:** railway route selection; full life cycle; carbon emission; carbon reduction benefits

在“十四五”规划中,我国提出要在2030年前实现碳达峰,2060年前实现碳中和。铁路作为一种低碳运输方式,在节能减排方面有显著优势<sup>[1]</sup>,可以促使

其他运输方式的客货运量向铁路转移,从而降低整个运输系统的碳排放量<sup>[2]</sup>。然而,铁路在其全生命周期内,仍然会产生大量的碳排放。为了充分发挥铁路的

收稿日期:2023-11-08

作者简介:宋洪锐(1988-),男,高级工程师。

引文格式:宋洪锐,胥岚月,曾勇. 面向铁路选线的全生命周期减碳效益估算方法[J]. 高速铁路技术,2024,15(1):58-62.

SONG Hongrui, XU Lanyue, ZENG Yong. A Method for Estimating Full Life Cycle Carbon Reduction Benefit for Railway Route Selection[J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(1):58-62.

低碳功能,有必要在选线设计阶段,从全生命周期角度建立减碳效益估算方法,为低碳线路方案的优选奠定了基础。

已有学者在铁路减碳方面进行了研究: Strauss<sup>[3]</sup>等通过对航空和高速铁路线路的研究发现,从航空旅行到高速铁路的模式替代导致近年来空气碳排放下降18%,每年为环境净碳排放节省了1 200万t。Akerman<sup>[4]</sup>基于生命周期理论对瑞典修建的高速铁路进行分析,发现修建高速铁路可减少碳排放量,修建铁路所产生的大量碳排放可以通过航空和公路的需求减少而得到平衡。为了得到更直观的数据,一些学者还对个体能耗及碳排放量进行了研究: Chester<sup>[5]</sup>等基于全生命周期理论,研究了美国铁路和民航的能耗及碳排放,得出了个体的能耗和碳排放指标; Sanches<sup>[6]</sup>等发现在生命周期中,每行驶1 km每名乘客排放13.9 g二氧化碳,该系统启用14年后,非运行排放将得到补偿。

综上所述,目前对铁路减碳效益方面已有不少研究,但现有成果无法有效应用于线路设计阶段减碳效益的评估,更无法指导铁路线路方案的优选。因此,本文将基于铁路选线设计阶段,针对线路设计方案建立减碳效益估算方法,以实现山区低碳线路方案的优选。

## 1 铁路全生命周期减碳效益影响因素分析

### 1.1 全生命周期减碳效益定义

铁路全生命周期减碳效益可定义为全生命周期内铁路的间接碳减排量与碳排放总量之间的差值,表达为:

$$C = C_{ji} - C_z \quad (1)$$

式中:  $C$ ——铁路全生命周期减碳效益,本文主要考虑施工阶段和运维阶段(kg);

$C_{ji}$ ——铁路全生命周期间接碳减排量(kg);

$C_z$ ——铁路全生命周期碳排放总量,包括直接碳排放、间接碳排放(kg)。

### 1.2 碳排放量影响因素

铁路施工阶段的直接碳排放主要是施工建设时机械设备的使用。间接碳排放主要包括建设材料的生产、运输、机车车辆的生产所产生的碳排放。运维阶段的直接碳排放包括车站及机车车辆运行所产生的碳排放。间接碳排放主要来源于设备维护更新、车辆及车站的报废拆除。施工、运维两个阶段铁路都会

占用土地,并且在修建工程中占用的土地逐渐增多,占用农田和林地会使上面的植被被破坏、土壤受到扰动,使其碳汇能力大幅下降<sup>[7]</sup>。

因此,铁路碳排放量在施工阶段影响因素主要包括工程量、建材碳排放因子、材料及废弃物运输碳排放因子、施工机械能耗、施工工艺等;运维阶段影响因素主要包括车站设备的能耗、机车车辆结构、能源结构、机车能耗强度、换算周转量、线路长度、建筑垃圾利用率、土地占用量等。

### 1.3 间接减碳量影响因素

#### (1) 节地效应

铁路与公路相比,节地效果明显,有研究表明铁路与公路运输完成相同的换算周转量,所需公路用地是铁路用地的3.7~13.6倍<sup>[8]</sup>。

#### (2) 客运增量替代效应

随着人民生活水平的提高,对出行的快捷性和舒适性要求日益增加。由于铁路网逐渐形成,减少了换乘次数,省会到周边城市、首都到省会城市的时间大大缩短,而且铁路不仅速度快还准时,极大满足了人们的出行需求,使得其将分担部分公路、民航客流,形成对公路及航空的替代效应<sup>[9]</sup>。据研究,铁路每人每百公里的碳排放量为1.56~1.91 kg,分别是中型客机的20%,汽车的30%~50%,减排效果显著<sup>[10]</sup>。

#### (3) 货运增量替代效应

近些年我国推行“公转铁”政策,促使货运量从公路转移到铁路。随着铁路网络建设逐渐完善,铁路货运的潜力将逐渐释放<sup>[11]</sup>。由于铁路的能耗和碳排放都显著优于公路和航空,且随着“公转铁”政策的实施,二氧化碳排放量将逐渐下降。

因此,本文研究间接减碳量主要考虑节地效应、客运增量替代效应、货运增量替代效应3个方面。

## 2 铁路全生命周期减碳效益估算方法

### 2.1 碳排放量估算

铁路全生命周期碳排放量为施工和运维两阶段排放值之和,而两阶段碳排放量又被分为直接碳排放与间接碳排放。

#### (1) 施工阶段碳排放量估算

施工阶段直接碳排放是由于施工建设时机械设备的使用所产生。机械设备碳排放 $C_{sz}$ 表达为:

$$C_{sz} = \sum_{k=1}^{nk} \sum_{i=1}^{ni} \sum_{j=1}^{nj} G_{n,i,j} J_j H_j V_d \quad (2)$$

式中:  $nk$ ——子系统类型;

$ni$ ——施工方法种类;

$n_j$ ——机械设备种类;  
 $G_{n,i,j}$ ——子系统  $k$  采用施工方法  $i$  时用到的  
机械设备  $j$  的施工工程数量(台班);  
 $J_j$ ——机械设备  $j$  完成单位工程量需要的机械  
设备  $j$  的台班数量(台班);  
 $H_j$ ——机械设备  $j$  的能源消耗量(tce/台班);  
 $V_d$ ——在  $d$  区域内的碳排放因子,即单位数量  
燃油或电力的碳排放量(t 碳/t 标准煤)。

施工阶段间接碳排放主要包括建设材料的生产、  
运输所产生的碳排放以及土地占用后植被碳汇降低  
从而间接增加的碳排放,本文植被碳汇包括农田、林  
地碳汇<sup>[12]</sup>。

建设材料生产碳排放  $C_{jg}$  计算公式为:

$$C_{jg} = \sum_{k=1}^{nk} \left( \sum_{b=1}^{nb} m_{k,b} / (1 - \varphi_b) P_b \right) \quad (3)$$

式中:  $nb$ ——建设材料种类;  
 $m_{k,b}$ ——施工建设工程中子系统  $k$  使用的建设  
材料  $b$  的质量(kg);  
 $\varphi_b$ ——建设材料  $b$  在运输、施工过程中的损  
耗率;  
 $P_b$ ——生产单位质量建设材料  $b$  所产生的碳排  
放量(kg)。

建设材料运输碳排放  $C_{jy}$  计算公式为:

$$C_{jy} = \sum_{k=1}^{nk} \left( \sum_{a=1}^{na} \sum_{b=1}^{nb} m_{k,a,b} / (1 - \varphi_b) L_{k,a,b} R_a \right) \quad (4)$$

式中:  $m_{k,a,b}$ ——采用交通方式  $a$  运输子系统  $k$  的建  
设材料  $b$  的质量(kg);  
 $L_{k,a,b}$ ——采用交通方式  $a$  将子系统  $k$  的建设  
材料  $b$  从产地运输到施工现场的平均距离(km);  
 $R_a$ ——交通方式  $a$  的碳排放因子(tCO<sub>2</sub>/GJ)。

农作物碳汇  $W_{crops}$  计算公式为:

$$W_{crops} = \sum_{t=1}^T \left( \sum_{m=1}^{nm} \sum_{n=1}^{nn} S_m \varphi_{m,n} C_{m,n} \right) \quad (5)$$

式中:  $T$ ——铁路全生命周期年限(年);  
 $nm$ ——农作物种类;  
 $nn$ ——划分的区域;  
 $S_m$ ——铁路在  $m$  区域内占用耕地的面积(m<sup>2</sup>);  
 $\varphi_{m,n}$ —— $m$  区域内农作物  $n$  所占比例;  
 $C_{m,n}$ —— $m$  区域内农作物  $n$  单位面积年碳汇量  
(kg)。

森林碳汇  $W_{forests}$  计算公式为:

$$W_{forests} = ACT \quad (6)$$

式中:  $A$ ——铁路线路沿线所占林地面积(m<sup>2</sup>);

$C$ ——森林单位面积年碳汇量(kg);  
 $T$ ——铁路全生命周期年限(年)。

(2) 运维阶段碳排放量估算

运维阶段的直接碳排放包括车站及机车车辆运  
行所产生的碳排放,铁路运输包括客运和货运。

客、货运碳排放  $C_{cy1}$ 、 $C_{cy2}$  的计算公式为:

$$C_{cy1} = \sum_{t=1}^{T_2} Y_t L_t R_{t1} \quad (7)$$

$$C_{cy2} = \sum_{t=1}^{T_2} H_t L_t R_{t2} \quad (8)$$

式中:  $T_2$ ——铁路运营年限(年);  
 $Y_t$ ——铁路开始运营后第  $t$  年的客运量(万人/a);  
 $R_{t1}$ ——铁路碳排放指标[kgCO<sub>2</sub>/(人·100 km)];  
 $H_t$ ——铁路开始运营后第  $t$  年的货运量(t/km);  
 $R_{t2}$ ——铁路历年碳排放指标[gCO<sub>2</sub>/(t·km)]。

铁路运输人均碳排放量如表 1 所示。2005—  
2016 年铁路内燃与电力机车历年运输每 t 碳排放量  
如表 2 所示。

表 1 铁路运输人均碳排放量表

高速 铁路	速度 /(km/h)	载客定员 /人	主要 能源	碳排放量 /[kgCO <sub>2</sub> /(人·100 km)]
D 字头动车组	200	600	电力	1.56
G 字头动车组	300	600	电力	1.91

表 2 铁路运输每 t 碳排放量表 [gCO<sub>2</sub>/(t·km)]

年份	铁路	
	内燃	电力
2005 年	7.626	10.732 8
2006 年	7.533	10.56
2007 年	7.626	10.512
2008 年	7.719	10.617 6
2009 年	7.812	10.358 4
2010 年	8.184	9.830 4
2011 年	8.215	9.657 6
2012 年	8.308	9.801 6
2013 年	8.463	9.782 4
2014 年	8.432	9.916 8
2015 年	8.587	10.252 8
2016 年	9.083	10.483 2

根据历年内燃与电力机车比例,对表中内燃与电  
力机车的碳排放系数进行加权计算,得到历年铁路碳  
排放系数,最后使用时间序列法进行预测得到铁路碳  
排放因子随时间变化的公式:

$$R_{t2} = 0.004 2 (t - 200 4)^2 + 0.034 1 (t - 200 4) + 8.524 6 \quad (9)$$

车站碳排放  $C_{zy}$  为:

$$C_{zy} = \sum_{t=1}^{T_2} Y_t D \alpha_t V_{t,d} \quad (10)$$

式中:  $D$ ——铁路车站的占地面积( $\text{m}^2$ );

$\alpha_t$ ——铁路车站耗电量<sup>[13]</sup> [ $0.016 \text{ kWh}/(\text{万人} \cdot \text{m}^2)$ ];

$V_{t,d}$ ——第  $t$  年  $d$  区域的电力碳排放因子<sup>[14]</sup> ( $\text{tCO}_2/\text{MWh}$ )。

运维阶段间接碳排放主要来源于设备维护更新时建筑材料生产、运输、机械设备的使用,以及车辆及车站的报废拆除时机械设备的使用、建设垃圾的运输。

设备维护碳排放  $C_{cs}$  计算公式为:

$$C_{cs} = \sum_{b=1}^{nb} m_b / (1 - \varphi_b) \left[ \frac{T}{T_b} - 1 \right] P_b + \sum_{a=1}^{na} \sum_{b=1}^{nb} m_{a,b} / (1 - \varphi_b) \left[ \frac{T}{T_b} - 1 \right] L_{a,b} R_{t,a} + \sum_{i=1}^{ni} \sum_{j=1}^{nj} G_{i,j} J_j H_j V_d \quad (11)$$

式中:  $T_b$ ——建筑材料  $b$  的寿命年限(年);

$m_b$ ——维护更新过程中使用的建筑材料  $b$  的质量( $\text{kg}$ );

$\left[ \frac{T}{T_b} - 1 \right]$ ——运营期建筑材料  $b$  需要维护更新的次数,计算结果取整数。

报废拆除碳排放  $C_{js}$  的计算公式为:

$$C_{js} = \sum_{i=1}^{ni} \sum_{j=1}^{nj} G_{i,j} J_j H_j V_d + \sum_{a=1}^{na} \sum_{b=1}^{nb} m_{a,b} L_{a,b} R_{t,a} \quad (12)$$

## 2.2 间接减碳量估算

(1) 基于节地效应的碳减排量  $C_{jd}$  的计算公式为:

$$C_{jd} = \sum_{t=1}^T \left( \sum_{m=1}^{nm} \sum_{n=1}^{nn} S_m \varphi_{m,n} C_{m,n} \right) + ACT \quad (13)$$

式中:  $S_m$ ——节省的土地在  $m$  区域内占用耕地的面积( $\text{m}^2$ );

$A$ ——节省的土地占林地的面积( $\text{m}^2$ );

$T$ ——铁路全生命周期年限(年)。

(2) 基于客运增量替代效应的碳减排量  $C_{kt}$  的计算公式为式(14)~式(16)。

$$C_{kt} = C_{gk} + C_{fk} - C_{cy1} \quad (14)$$

式中:  $C_{kt}$ ——基于客运增量替代效应的碳减排量( $\text{kg}$ );

$C_{gk}$ ——公路客运产生的碳排放量( $\text{kg}$ );

$C_{fk}$ ——航空客运产生的碳排放量( $\text{kg}$ );

$C_{cy1}$ ——铁路客运产生的碳排放量( $\text{kg}$ )。

$$\text{公路运输: } C_{gk} = \sum_{t=1}^{T_2} Y_{g,t} L_{g,t} R_{g,t} \quad (15)$$

$$\text{航空运输: } C_{fk} = \sum_{t=1}^{T_2} Y_{f,t} L_{f,t} R_{f,t} \quad (16)$$

式中:  $Y_{g,t}$ ——公路运营期第  $t$  年的客运量(万人/a);

$L_{g,t}$ ——第  $t$  年公路上旅客运输的平均运距( $\text{km}$ );

$R_{g,t}$ ——第  $t$  年通过公路运输旅客碳排放量 [ $\text{kgCO}_2/(\text{人} \cdot 100 \text{ km})$ ];

$Y_{f,t}$ ——飞机运营期第  $t$  年的客运量(万人/a);

$L_{f,t}$ ——第  $t$  年通过飞机运输旅客的平均运距( $\text{km}$ );

$R_{f,t}$ ——第  $t$  年通过飞机运输旅客碳排放量<sup>[15]</sup> [ $\text{kgCO}_2/(\text{人} \cdot 100 \text{ km})$ ];

$T_2$ ——铁路运营年限(年)。

公路、航空运输人均碳排放量如表3所示。

表3 公路、航空运输人均碳排放量表

交通方式		速度 /(km/h)	载客定 员/人	主要能源	人均百公里 碳排放/kg
公路	小客车	100	4	汽油	5.85
	客车	90	19	柴油	3.26
航空	大型飞机	800	300	航空煤油	8.05
	中型飞机	800	150	航空煤油	9.05
	小型飞机	800	50	航空煤油	12.07

(3) 基于货运增量替代效应的碳减排量计算模型表达为式(17)~式(19)。

$$C_{ht} = C_{gh} + C_{fh} - C_{cy2} \quad (17)$$

式中:  $C_{ht}$ ——基于货运增量替代效应的碳减排量( $\text{kg}$ );

$C_{gh}$ ——公路货运产生的碳排放量( $\text{kg}$ );

$C_{fh}$ ——航空货运产生的碳排放量( $\text{kg}$ );

$C_{cy2}$ ——铁路货运产生的碳排放量( $\text{kg}$ )。

$$\text{公路运输: } C_{gh} = \sum_{t=1}^{T_2} H_{g,t} L_{g,t} O_{g,t} \quad (18)$$

$$\text{航空运输: } C_{fh} = \sum_{t=1}^{T_2} H_{f,t} L_{f,t} O_{f,t} \quad (19)$$

式中:  $H_{g,t}$ ——公路运营期第  $t$  年的货运量( $\text{t}$ );

$L_{g,t}$ ——第  $t$  年公路上货物运输的平均运距( $\text{km}$ );

$O_{g,t}$ ——第  $t$  年通过公路运输货物碳排放量 [ $\text{kgCO}_2/(\text{t} \cdot 100 \text{ km})$ ];

$H_{f,t}$ ——飞机运营期第  $t$  年的货运量( $\text{t}$ );

$L_{f,t}$ ——第  $t$  年通过飞机运输货物的平均运距( $\text{km}$ );

$O_{f,t}$ ——第  $t$  年通过飞机运输货物碳排放量 [ $\text{kgCO}_2/(\text{t} \cdot 100 \text{ km})$ ];

$T_2$ ——铁路运营年限(年)。

## 3 案例分析

以某山区城际铁路线路设计方案为例进行分析。城际铁路设计速度为  $200 \text{ km/h}$ , 研究地段起点站站房占地面积为  $2498.8 \text{ m}^2$ , 终点站站房占地面积为  $15000 \text{ m}^2$ , 线路长度为  $26.2 \text{ km}$ , 其中桥梁总长



度为 11.008 km,占正线长度 42%;隧道总长度为 2.375 km,占正线长度 9.1%;路基长度为 12.817 km,占正线长度 48.9%。该铁路规划年客运输送能力为 7 820.93 万人/a。施工阶段年限设为 4 年,运维阶段年限设为 100 年。

利用本文提出的铁路全生命周期减碳效益估算方法,针对城际铁路研究地段选线方案估算其减碳效益。由于此城际铁路主要用于客运,因而估算间接减碳量时仅考虑客运增量替代效应。此城际铁路研究地段全生命周期碳排放量计算结果如表 4 所示,间接碳减排量计算结果如表 5 所示。

表 4 基于选线方案的全生命周期碳排放估算量表

阶段	碳排放量/kg	比例/%
施工阶段	$1.49 \times 10^8$	6.91
运维阶段	$19.94 \times 10^8$	93.09
合计	$21.42 \times 10^8$	100.00

表 5 基于选线方案的全生命周期间接碳减排估算量表

因素	碳减排量/kg	比例/%
节地效应	$0.97 \times 10^8$	1.22
客运增量替代效应	$78.61 \times 10^8$	98.78
合计	$79.58 \times 10^8$	100.00

根据上述分析可知,此城际铁路研究地段选线方案在全生命周期将产生  $21.42 \times 10^8$  kg 的碳排放量,但由于节地效应、客运增量替代效应将间接减少碳排放量  $79.58 \times 10^8$  kg,不仅完全抵消了由于铁路修建所产生的碳排放,还带来了  $58.16 \times 10^8$  kg 的减碳效益,减碳优势非常明显。

4 结论

本文基于铁路线路方案设计阶段,提出了铁路全生命周期减碳效益估算方法,得到主要结论如下:

(1)分析得到了铁路全生命周期碳排放量和间接减碳量影响因素,其中碳排放量包括施工和运维两个阶段的主要影响因素;间接减碳量影响因素包括节地效应、客运增量替代效应、货运增量替代效应等方面的主要影响因素。

(2)分别建立了铁路全生命周期碳排放量和间接减碳量估算方法,并在此基础上提出了铁路全生命周期减碳效益估算方法。

(3)通过某城际铁路选线设计方案分析,得到此城际铁路研究地段全生命周期碳排放量为  $21.42 \times 10^8$  kg,其中施工阶段碳排放量占 6.91%,运维阶段碳排放量占比 93.09%,而间接减碳量

$79.58 \times 10^8$  kg,减碳效益达到  $58.16 \times 10^8$  kg。

参考文献:

[1] 朱长征,杨莎,刘鹏博,等. 中国交通运输业碳达峰时间预测研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22(6): 291 – 299.  
ZHU Changzheng, YANG Sha, LIU Pengbo, et al. Carbon Dioxide Emission Peak Study of Transportation Industry in China [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2022, 22(6): 291 – 299.

[2] 任俊桦. 基于类比分析的高速铁路和城际铁路运量预测研究[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(1): 54 – 58, 75.  
REN Junhua. A Study on Forecast of Traffic Volume for High-speed Railway and Intercity Railway Based on Analog Analysis [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(1): 54 – 58, 75.

[3] STRAUSS J, LI Hongchang, CUI Jinli. High-speed Rail's Impact on Airline Demand and Air Carbon Emissions in China [J]. Transport Policy, 2021, 109: 85 – 97.

[4] AKERMAN J. The Role of High-Speed Rail in Mitigating Climate Change – the Swedish Case Europabanan from a Life Cycle Perspective [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2011, 16(3): 208 – 217.

[5] CHESTER M, HORVATH A. Life-cycle Assessment of High-speed Rail: The Case of California [J]. Environmental Research Letters, 2010, 5(1): 014003.

[6] DE ANDRADE C E S, DE ALMEIDA D'AGOSTO M. Energy Use and Carbon Dioxide Emissions Assessment in the Lifecycle of Passenger Rail Systems: The Case of the Rio de Janeiro Metro [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 126: 526 – 536.

[7] 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.

[8] 林博鸿. 典型区域车用能源消耗和二氧化碳排放现状与趋势分析[D]. 北京: 清华大学, 2010.  
LIN Bohong. Oil Consumption and CO<sub>2</sub> Emissions from Automobile Sector in Major Regions of China: Present and Future [D]. Beijing: Tsinghua University, 2010.

[9] 马静,柴彦威,刘志林. 基于居民出行行为的北京市交通碳排放影响机理[J]. 地理学报, 2011, 66(8): 1023 – 1032.  
MA Jing, CHAI Yanwei, LIU Zhilin. The Mechanism of CO<sub>2</sub> Emissions from Urban Transport Based on Individuals' Travel Behavior in Beijing [J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(8): 1023 – 1032.

[10] 张扬,熊小平,康艳兵. 我国交通部门碳排放影响因素及减排路径研究[J]. 环境保护, 2015, 43(11): 54 – 57.  
ZHANG Yang, XIONG Xiaoping, KANG Yanbing. Study on Influencing Factors and Carbon Emission Reduction Pathway for Transportation Sector of China [J]. Environmental Protection,

- Railway Investigation and Surveying, 2023, 49(5): 114 – 118.
- [4] 高涛. 永磁磁浮轨道交通系统的悬浮系统研究与设计[D]. 赣州: 江西理工大学, 2019.
- GAO Tao. Research and Design of Suspension System for Permanent Magnetic Maglev Rail Transit System [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2019.
- [5] 李定南. 国内外悬挂式单轨列车的发展与展望[J]. 国外铁道车辆, 2017, 54(3): 1 – 4, 45.
- LI Dingnan. Development and Prospects of the Suspended Monorail Train in China and Abroad [J]. Foreign Rolling Stock, 2017, 54(3): 1 – 4, 45.
- [6] 李涛, 余浩伟, 姜梅. 悬挂式单轨交通线路设计[J]. 都市快轨交通, 2018, 31(6): 66 – 71.
- LI Tao, YU Haowei, JIANG Mei. Route Selection Design of Suspended Monorail Transit [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2018, 31(6): 66 – 71.
- [7] 王建才. 悬挂式单轨交通线路最小曲线半径的选择[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(9): 56 – 59.
- WANG Jiancai. Selection of the Minimum Curve Radius for Suspended Monorail Transit [J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(9): 56 – 59.

(上接第62页)

- 2015, 43(11): 54 – 57.
- [11] 李龙江, 张俊勇. “公转铁”背景下我国铁路货运增量的分析研究[J]. 铁路采购与物流, 2020, 15(5): 58 – 61.
- LI Longjiang, ZHANG Junyong. Analysis and Research on the Increment of Railway Freight Transportation in China under the Background of “Highway to Railway” Policy [J]. Railway Purchasing and Logistics, 2020, 15(5): 58 – 61.
- [12] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 1981—2000年中国陆地植被碳汇的估算[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2007, 37(6): 804 – 812.
- FANG Jingyun, GUO Zhaodi, PIAO Shilong, et al. Estimation of Carbon Sinks of Terrestrial Vegetation in China from 1981 to 2000 [J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2007, 37(6): 804 – 812.
- [13] 国家铁路大型客站能源消耗专项调查组, 韩砚, 王康平. 2011年国家铁路大型客站能源消耗专项调查情况分析[J]. 铁道经济研究, 2012(5): 8 – 13.
- Investigation Team of Energy Consumption at Large-scale National Railway Passenger Stations, HAN Yan, WANG Kangping. Analysis on 2011 Investigation of Energy Consumption at Large-scale National Railway Passenger Stations [J]. Railway Economics Research, 2012(5): 8 – 13.
- [14] 王常凯, 谢宏佐. 中国电力碳排放动态特征及影响因素研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(4): 21 – 27.
- WANG Changkai, XIE Hongzuo. Analysis on Dynamic Characteristics and Influencing Factors of Carbon Emissions from Electricity in China [J]. China Population, Resources and Environment, 2015, 25(4): 21 – 27.
- [15] 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 & Environmental Protection & Occupational Safety and Health, 2011, 1(1): 19 – 22.