

文章编号:1005-0523(2022)02-0077-09



基于碳足迹的城市轨道交通项目碳回收期研究

张跃斌¹, 易欣¹, 李双双¹, 邱慧², 宋璋玉¹

(1.中南林业科技大学土木工程学院, 湖南长沙 410004; 2.中南林业科技大学风景园林学院, 湖南长沙 410004)

摘要:为了研究城市轨道交通项目因碳减排带来的环境效益,融合建设与运营数据,构建了城市轨道交通项目的碳回收期测算模型。以长沙市5条轨道交通线路为研究对象,在合理预测未来客运量的基础上,定量分析了这5条线路在2014—2050年间建设、运营的碳足迹变化。研究发现:城市轨道交通项目具有显著的碳减排效益,5条线路均能在2050年前完全回收建设阶段的碳排放,之后通过碳排放交易还将产生正效益。同时,还发现轨道交通项目的碳减排效益大小受客运量饱和情况的直接影响。

关键词:城市轨道交通项目;碳回收期;碳足迹;碳减排效益

中图分类号:U292;F572

文献标志码:A

本文引用格式:张跃斌,易欣,李双双,等.基于碳足迹的城市轨道交通项目碳回收期研究[J].华东交通大学学报,2022,39(2):77-85.

Research on Carbon Payback Period of Urban Rail Transit Project Based on Carbon Footprint

Zhang Yuebin¹, Yi Xin¹, Li Shuangshuang¹, Qiu Hui², Song Zhangyu¹

(1. School of Civil Engineering, Central South University of Forestry & Technology, Changsha 410004, China;

2. School of Landscape Architecture, Central South University of Forestry & Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: In order to study the environmental benefits of urban rail transit projects brought by carbon emission reduction, construction and operation data were integrated to construct a carbon payback period calculation model for urban rail transit projects. Taking 5 rail transit lines in Changsha city as the research object, based on a reasonable forecast of future passenger traffic, the carbon footprint changes of these 5 lines during construction and operation from 2014 to 2050 were quantitatively analyzed. It is found that the urban rail transit project has significant carbon emission reduction benefits. All five lines can fully recover the carbon emissions of the construction stage by 2050, and afterwards, carbon emissions trading will also generate positive benefits. At the same time, it maintains that the carbon emission reduction benefits of rail transit projects are directly affected by the saturation of passenger traffic.

Key words: urban rail transit project; carbon payback period; carbon footprint; carbon reduction benefits

Citation format: ZHANG Y B, YI X, LI S S, et al. Research on carbon payback period of urban rail transit project based on carbon footprint[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022, 39(2): 77-85.

收稿日期: 2021-08-20

基金项目: 湖南省哲学社会科学基金项目(19YBA376); 国家级大学生创新训练项目(201910538038)

交通运输业是国民经济发展和居民生活必需的基础产业之一,是国民经济和社会发展的基础性、先导性和服务性产业,也是国家节能减排和应对气候变化的重点领域^[1-2]。作为全社会碳排放总量的重要构成部分,交通运输业是碳排放量增速较快的部门,其中道路运输碳排放对交通排放总量的贡献率高达 71.7%^[3],而在人口密度高的大城市公共交通中其占比甚至更高。推行低碳交通运输方式成为了节能减排和绿色发展的重要手段^[4-5]。

城市轨道交通是一种低污染的绿色交通工具,对推动我国交通运输方式实现低碳转型具有重要意义^[6]。近年来,许多专家学者针对城市轨道交通的碳排放问题进行了大量的研究。Xu 等^[7]建立了 STIRPAT 模型,通过相关参数来预测轨道交通的碳排放。Fan 等^[8]运用长期能源替代规划模型(LEAP)分析了互联网时代共享交通发展和传统发展情景下北京轨道交通温室气体排放的发展趋势。Zheng 等^[9]认为轨道交通减排效果是通过替代原有高耗能、高污染的出行方式而产生的,且这种减排效果具有一定的规模效应。冯国强等^[10]用断点回归评估了轨道交通线路对空气污染的治理效应。高明等^[11]通过断点回归证明了轨道交通运营对大气污染的减排效应显著,而这一效应主要是轨道交通替代私人汽车、出租车及公共汽车实现的。上述成果主要分析了轨道交通自身碳排放和对未来排放量的预测等,也有些从定性角度提到了轨道交通替代其他出行方式具有减排效果,但却没有定量分析具体的碳减排量,无法体现轨道交通对交通运输业碳减排的贡献程度。碳足迹一词源自 1996 年 Wackernagel 提出的生态足迹^[12],目前已广泛应用于项目全生命周期碳足迹的测算^[13-14]。赵恺彦等^[15]将高速公路与虚拟普通公路的,进行对比,建立了碳回收期计算模型,用来评价高速公路的碳减排效益。基于此,本文从轨道交通项目全生命周期角度出发,将其与虚拟的道路运输进行碳足迹比较,通过碳回收期来测算其碳减排效果。同时,上述方法和模型还可推广至其他城市的轨道交通线路,随着我国碳交易市场逐步完善,若能利用市场手段将轨道交通项目的碳减排效益货币化,这将是城市轨道交通可持续发展的理想途径。

1 研究思路与方法

1.1 研究思路

基于项目全生命周期理论,对轨道交通的碳足迹研究分为建设和运营两个阶段。将建设阶段碳足迹视为瞬时产生的,运营阶段碳足迹视为年度变化的,且此变化一次性发生于年初。

为准确评价城市轨道交通的碳减排效益,首先虚拟化通行需求,即假设当轨道交通线路不存在时,市民的公共出行需求仍然存在,且该需求将完全被道路运输替代,由此便设定了对比轨道交通有无两种情况的参考基准。由此产生了两种不同通行方式碳足迹的量:一是轨道交通线路运行产生的实际碳足迹;二是同样的客运量在替代道路运输上产生的虚拟碳足迹,即轨道交通线路的客运量转由具有替代效应的市政道路车辆运输而产生的碳足迹。然后将轨道交通线路运行产生的实际碳足迹与同样的客运量在替代道路运输上产生的虚拟碳足迹两者差值作为测算轨道交通碳减排效益,若差值为正,则轨道交通增加了碳排放,碳减排效益为负。反之,若为负,则其碳减排效益为正。根据假设条件,定义轨道交通的年度碳足迹为当年运营碳足迹和上述实际碳足迹与虚拟碳足迹两者差值之和,定义多年累计碳足迹为建设碳足迹与运营各年度碳足迹的累加和。碳回收期是以碳减排回收全部碳排放所需要的时间,即多年累计碳足迹首次由负值转向正值的年份。

1.2 研究对象概况

为使研究结果更具准确性和代表性,需筛选基础数据准确且连续性好、代表性强的区域为研究对象。长沙是长江中游地区重要的中心城市,轨道交通发展迅猛。截至 2020 年底,长沙市轨道交通运营线路 5 条,线网覆盖主城区,运营里程 161.05 km。长沙市轨道交通管理制度完善,在客运量等方面具有详细且连续的运营数据。基于此,本文选取了长沙市轨道交通为研究对象,并以 2016 年建成运营的 1 号线作为研究样本。

2 城市轨道交通项目碳回收期的理论模型构建

城市轨道交通以电力为能源驱动,碳足迹主要来源于项目的建设、运营两个阶段。长沙市内主要

区域的自然地理条件相似,各线路的施工方案相近。本文以长沙市轨道交通1号线为样本线路,将其建设阶段的碳足迹作为基准数据,其他线路建设阶段的碳足迹只需经过换算便可得到相应结果。各线路运营阶段的碳足迹则据实计算。最后,根据前述替代假设计算各线路的碳减排效益,由此得出各自的碳回收期。

2.1 建设阶段的碳足迹测算

目前对轨道交通项目建设阶段碳足迹的分析多采用施工要素碳足迹,即依据轨道交通项目在各个施工工序中的工程量来计算相应的碳足迹,将轨道交通项目建设阶段的碳足迹分为生产和施工两部分进行测算。

2.1.1 生产阶段碳足迹

生产阶段碳足迹是指建筑材料在生产阶段产生的碳排放,主要包括生产原材料的消耗、化石燃料的消耗以及生产机械设备消耗的电力能源。首先依据项目施工组织设计和工程量清单求出轨道交通项目所需材料的总量,然后根据每种材料对应的碳排放因子与相应的耗用量,便可得出材料生产阶段的碳足迹,主要消耗材料一般包括钢筋、混凝土、汽油等。各项材料的碳排放因子数据来源于中国生命周期基础数据库(Chinese life cycle database, CLCD)及相关文献[15-16],具体数据详见表1。

表1 主要消耗材料的碳排放系数

Tab.1 Carbon emission factor of main consumable material

Item	Commercial concrete	Steel	Waterproof material	Water	Gasoline	Diesel oil	Electricity
Carbon emission factor	278.8	0.49	4.65	0.91	0.81	0.86	1.088

$$E_1 = \sum_{x=1}^n g_x l_x \quad (1)$$

式中: E_1 为生产阶段总的碳足迹; g_x 为第 x 种材料的消耗量; l_x 为第 x 种材料对应的碳排放因子; n 为材料种类。

2.1.2 施工阶段碳足迹

施工阶段碳足迹分为建筑材料在运输过程产生的碳足迹和施工过程中施工机械产生的碳足迹,施工阶段总的碳足迹用 E_2 表示。

1) 运输过程碳足迹。运输过程碳足迹是指建筑材料运输过程中产生的碳足迹。假设材料采用公路运输,基于生产阶段主要材料的耗用量,根据国家货运统计年鉴,我国平均货运距离为171公里,公路运输过程中的碳排放量为每吨公里29.26 kg。

$$E_{21} = \eta \times 171 \times 29.26 \quad (2)$$

式中: E_{21} 为运输过程的碳足迹; η 为运输材料的总质量,t。

2) 施工过程的施工机械碳足迹。首先依据城市轨道交通定额,对其包括的隧道工程、地下结构工程和轨道工程三部分进行分析;然后依据施工组织设计和工程量清单得出投入的施工机械总台班,再根据《全国施工机械台班费用定额》得出每类机械

设备消耗的能源量,并对所消耗的各种能源汇总并分类;最后乘相应碳排放因子便可得出施工阶段的机械碳足迹。

$$E_{22} = \sum_{y=1}^n m_x k_{yx} \alpha_y \quad (3)$$

式中: E_{22} 为施工过程所有施工机械总的碳足迹; m_x 为第 x 种机械的使用数量; k_{yx} 为第 x 种机械消耗的 y 种能源; α_y 为第 y 种能源的碳排放因子。

2.1.3 其他线路建设阶段的碳足迹

$$p_i = \frac{p_1}{c_1} \alpha \beta c_i \quad (4)$$

$$p_1 = k(E_1 + E_2) \quad (5)$$

式中: p_1 为样本线路(1号线)建设阶段的碳足迹; k 为建设碳足迹的修正系数,表示除主要设备材料以外的其他设备材料可能产生的碳足迹,根据文献[15]可取经验值1.02; c_i 为 i 线路长度, α 为路况修正系数, β 为工况修正系数。参考各线路的施工概算, α 在穿越湘江的线路和未穿越的线路分别取经验值1.2和1.0。对于存在高架区间的线路, β 取经验值1.25,否则取1.0。

2.2 运营阶段的碳足迹测算

轨道交通运营阶段的碳足迹主要是站厅以及

站内照明系统、通风空调系统和自动扶梯系统消耗的电力能源产生的碳足迹。设 i 线路 j 年度运营阶段总的碳足迹为 k_{ij} 。

1) 照明系统。根据用途,车站的照明分为一般照明、广告照明和应急照明。考虑到实际照明情况,车站照明系统的碳足迹主要计算一般照明设备和广告照明设备消耗电力能源所产生的碳足迹。

2) 通风空调系统。车站通风空调系统运行耗电量随季节变化,空调季节和非空调季节消耗的电力能源不同。可依据空调季和非空调季分别计算出通风空调设备消耗电力能源所产生的碳足迹。

3) 自动扶梯系统。根据每天运营时间计算出自动扶梯的运行时间(由于乘客进站的不确定性可忽略自动扶梯间歇时间),可依据运行时间计算自动扶梯产生的碳足迹。

显然,照明系统、通风空调系统和自动扶梯系统的碳足迹来源均为电力能源消耗,故同样可以结合耗电量和电力碳排放因子来计算运营阶段的碳足迹。

2.3 城市轨道交通项目的实际碳足迹与虚拟碳足迹差值测算

根据虚拟化和替代假设,目标线路目标年度的实际碳足迹与虚拟碳足迹差值计算公式

$$O_{ij}=P_{ij}-L_{ij} \quad (6)$$

式中: O_{ij} 为 i 线路第 j 年度的实际碳足迹与虚拟碳足迹之差; P_{ij} 为 i 线路第 j 年度的实际碳足迹; L_{ij} 为 i 线路第 j 年度的虚拟碳足迹。针对实际碳足迹,根据长沙市轨道交通车辆参数,其车辆牵引功率为 200 kW,1 号线每日运营时间为 16.5 h,单程运行时长为 45 min,每隔 7 min 发车。故 1 号线每天运行需耗电量 42 300 kW·h,结合电力碳排放因子,可得出 1 号线年度实际碳足迹。同理,根据其他线路相关参数及运行条件,汇总 2 号线~5 号线的年度耗电量及碳足迹,如表 2 所示。

实际碳足迹的计算公式如下

$$P_{ij}=l_e\mu_{ij} \quad (7)$$

式中: l_e 为电力的碳排放因子; μ_{ij} 为 i 线路第 j 年度的耗电量。

$$\mu_{ij}=T_i\times 365 \quad (8)$$

式中: T_i 为 i 线路每日的耗电量。

表 2 长沙市轨道交通运行参数及日耗电量表

Tab.2 Changsha rail transit operation parameters and daily power consumption meter

Line	Full length/km	Departure interval/min	One-way time/min	Daily departure times number	Daily power consumption/(kW·h)
Line 1	23.55	7	45	282	42 300
Line 2	26.38	6	48	330	52 800
Line 3	36.5	8	64	248	52 906
Line 4	33.5	9	60	220	44 000
Line 5	22.5	9	41	220	30 067

虚拟碳足迹表现在轨道交通线路的客运量转由具有替代效应的市政道路车辆运输而产生的碳排放。考虑到轨道交通线路经过的区域以普通市政道路为主,为分析计算简便,本文将虚拟替代轨道交通的所有市政道路均视为一级道路。

首先,依据长沙市交通运输局发布的城市公共交通客运量数据分析报告,汇总后得出 1 号线~5 号线的年度客运量。其次,采用 Eviews 软件对客运量进行最小二乘法回归预测,得到 2022—2050 年的

客运量数据。然后,考虑到大部分乘客并非自始至终地全程乘坐整条线路,故简单以轨道交通线路的全长作为替代市政道路的距离并不合理。最后,本文根据该线路的营业额与客运量比值来推测人均消费,再结合票价可间接求得人均乘坐里程,结果为 0.69,由此得出实际和预测客运量如表 3 和表 4 所示。

据长沙市交通运输局公布,自 2016 年长沙推行新能源公共汽车以来,纯电动型公共汽车每年的占

表 3 长沙市轨道交通的实际客运量(万人)
Tab.3 Actual passenger volume of Changsha rail transit(ten thousand people)

Year	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4	Line 5
2014	—	6 752.50	—	—	—
2015	—	6 945.95	—	—	—
2016	7 628.50	11 899.00	—	—	—
2017	8 942.50	14 089.00	—	—	—
2018	9 709.00	15 001.50	—	—	—
2019	11 697.48	17 799.03	—	7 788.24	—
2020	9 902.51	14 555.02	7 237.96	7 388.96	4 610.19
2021	11 992.12	16 910.64	7 791.36	8 549.04	5 322.08

表 4 长沙市轨道交通的预测客运量(万人)
Tab.4 Forecasted passenger volume of Changsha rail transit(ten thousand people)

Year	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4	Line 5
2022	12 754.59	18 431.65	8 344.76	8 669.54	6 033.97
2023	13 517.06	19 952.66	8 898.16	9 049.94	6 745.85
2024	14 279.53	21 473.67	9 451.56	9 430.34	7 457.74
2025	15 042.00	22 994.68	10 004.96	9 810.74	8 169.62
2026	15 804.47	24 515.69	10 558.36	10 191.14	8 881.51
2027	16 566.94	26 036.7	11 111.76	10 571.54	9 593.39
2028	17 329.41	27 557.71	11 665.16	10 951.94	10 305.28
2029	18 091.88	29 078.72	12 218.56	11 332.34	11 017.17
2030	18 854.35	30 599.73	12 771.96	11 712.74	11 729.05

比分别为 18.86%,33.3%,49.40%，截至 2018 年末已经实现纯电动型公共汽车占比超过一半。通过以上分析可知目前长沙纯电动型公共汽车普及率达 50%，在选取 30 座及以上的三型车(代表公共汽车)计算虚拟碳足迹时，考虑柴油消耗的公共汽车和纯电动型公共汽车两种车型。三型车（柴油消耗）以 40 km/h(城市公交车时速一般在 25~50 km/h，取平均值)的运行速度、4 座的一型车（代表私家车）以 60 km/h 平均速度，在虚拟的替代道路出行。已知一型车在此条件下每百公里油耗 19.6 L(柴油)，三型车(柴油)在此条件下每百公里油耗 25.9 L，纯电动型公共汽车在此条件下每百公里耗电量 100 km/h。依据景鹏等^[17]研究城市居民对公共汽车、小型车出行方式的选择行为表明了城市居民会以相同概率选择公共汽车、小型车两种出行方式，基于以上分析本文在研究客运量分配时，假定市民将以同样概

率选择这两种替代出行方式，故三型车和一型车将平均分配所替代的轨道交通客运量，其中三型车（柴油）和纯电动公共汽车将继续平均分配三型车的轨道交通客运量。

虚拟碳足迹的计算公式如下

$$L_{ij}=0.69\times c_i\frac{v_{ij}}{4\times 2}\times 0.196l_u+0.69c_i\times \left(\frac{v_{ij}}{30\times 2\times 2}\times 0.259l_u+\frac{v_{ij}}{30\times 2\times 2}\times 10l_d\right) \tag{9}$$

式中： l_u 是柴油的碳排放因子； l_d 是电力的碳排放因子； c_i 为 i 线路全程长度； v_{ij} 为 i 线路 j 年度客运量。

2.4 城市轨道交通项目的碳回收期测算

投资回收期源于工程经济学领域，是为了测算项目的投资额在多少年内通过项目运营过程中的收益额(包括上缴的利润和税金)全部回收的时间^[18]。从现有的文献分析，许多学者关于投资回收期应用

的研究已经广泛分布于各个领域^[19]。赵恺彦等^[15]利用江苏省 8 条干线高速公路产生的碳排放建立了碳回收期模型来评价碳减排效益。基于以上分析,将投资回收期概念引入轨道交通碳减排测算领域,定义碳回收期为运营碳足迹和实际碳足迹与虚拟碳足迹差值全部回收建设碳足迹所需要的时间,也就是多年累计碳足迹首次由负值转向正值的年份。

多年累计碳足迹计算公式为

$$R_{it}=E_i+\sum_{j=n_0}^{n_0+t}(O_{ij}-K_{ij})$$

(10)

式中: R_{it} 为 i 线路 t 年度累计碳足迹; n_0 为城市轨道交通建成年份。

碳回收年份计算公式为

$$\begin{cases} R_{iY_{i-1}}>0 \\ R_{iY_i}\leq 0 \end{cases}$$

(11)

式中: Y_i 为 i 线路的碳回收期。

表 5 长沙市轨道交通建设及运营阶段碳足迹

Tab.5 Carbon footprint of rail transit construction and operation in Changsha

Line	Construction stage(10 000 t)	Operation stage(10 000 t)
Line 1	66.963 467 43	0.583 626 897
Line 2	75.010 457 36	0.671 170 932
Line 3	103.786 265 9	0.700 352 276
Line 4	95.255 887 86	0.729 533 621
Line 5	63.977 835 13	0.525 264 207

表 6 长沙市轨道交通实际碳足迹与虚拟碳足迹差值

Tab.6 Carbon footprint of rail transit in Changsha

Year	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4	Line 5
2014	-	-0.946 0	-	-	-
2015	-	-1.033 2	-	-	-
2016	-1.402 0	-3.267 5	-	-	-
2017	-1.931 1	-4.255 4	-	-	-
2018	-2.239 8	-4.667 1	-	-	-
2019	-3.040 6	-5.929 0	-	-2.711 4	-
2020	-2.317 7	-4.465 6	-2.417 5	-2.482 7	-0.573 8
2021	-3.159 2	-5.528 2	-2.762 9	-3.147 2	-0.847 6
2022	-3.466 3	-6.214 3	-3.108 3	-3.216 3	-1.121 5
2023	-3.773 3	-6.900 5	-3.453 7	-3.434 2	-1.395 4
2024	-4.080 4	-7.586 6	-3.799 1	-3.652 1	-1.669 3
2025	-4.387 4	-8.272 7	-4.144 5	-3.870 0	-1.943 2
2026	-4.694 5	-8.958 8	-4.489 9	-4.087 9	-2.217 1
2027	-5.001 5	-9.644 9	-4.835 3	-4.305 8	-2.491 0
2028	-5.308 6	-10.331 0	-5.180 7	-4.523 7	-2.764 9
2029	-5.615 6	-11.017 2	-5.526 1	-4.741 6	-3.038 8
2030	-5.922 7	-11.703 3	-5.871 5	-4.959 5	-3.312 7

3.2 长沙市轨道交通各线路的碳回收期计算

根据表 5 和表 6 数据得出长沙市轨道交通线路的多年累计碳足迹,如图 1 所示。

根据式(10)~式(11)计算碳回收期。

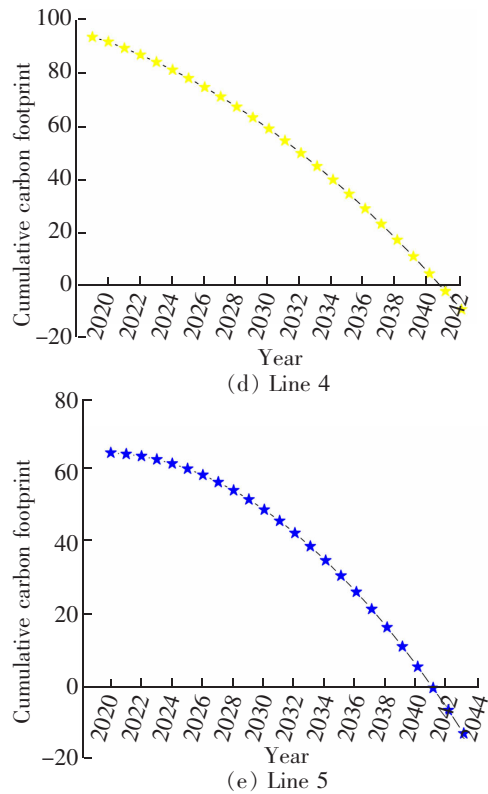
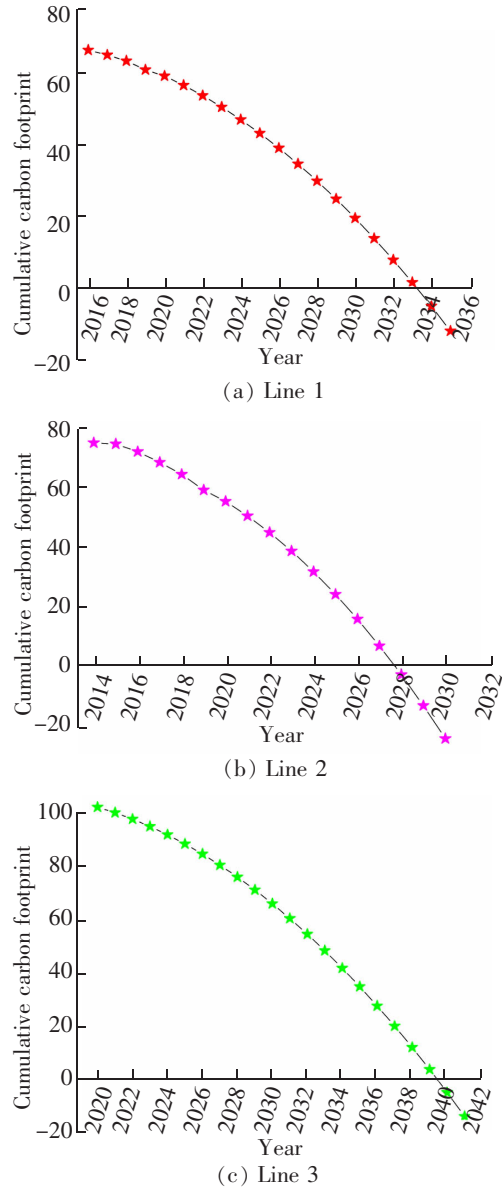


图 1 长沙市轨道交通线路多年累计碳足迹
Fig. 1 Cumulative carbon footprint of Changsha rail transit lines for many years

5 条线路在 2050 年前均能全部回收建设阶段的碳排放,其中 2 号线的碳回收期最短,仅需 14 a。截止 2050 年,5 条线路总计碳减排量将高达 1 189.71 万 t。而且在轨道交通线路达到碳回收期后,每年将产生巨大的碳减排效益。湖北碳交易市场是目前全球最大且在中部地区唯一,若以 2021 年 3 月该市场的碳排放交易价格计算(假设以后的碳排放交易均按此价格成交),预计到 2050 年长沙市轨道交通 1 号线~5 号线的碳减排效益可达 2.38 亿元。

表 7 长沙市 5 条轨道交通线路的碳回收年份
Tab.7 Carbon recycling years of 5 rail transit lines in Changsha

Line	25% recycling year	50% recycling year	75% recycling year	100% recycling year
Line 1	2024	2028	2031	2034
Line 2	2020	2024	2026	2028
Line 3	2028	2033	2037	2040
Line 4	2029	2035	2039	2042
Line 5	2031	2035	2039	2041

表 8 长沙市 5 条轨道交通线路至 2050 年的碳减排量及效益
Tab.8 Carbon emission reductions and benefits of 5 rail transit lines in Changsha by 2050

Item	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4	Line 5
Carbon emission reduction/($\times 10^4$ t)	219.96	449.29	213.84	166.73	139.89
Carbon emission reduction benefit/($\times 10^4$ yuan)	4 643.45	11 359.38	3 340.13	2 169.24	2 303.93

4 结论

本文通过收集城市轨道交通建设及运营阶段的碳排放历史数据,结合碳足迹理论构建了轨道交通项目的碳回收期模型,运用该模型对长沙市所有在运营的轨道交通线路碳回收期进行了分析和测算,得到了以下结论:

- 1) 城市轨道交通项目具有显著的碳减排效益,且碳减排效益大小受线路客运量饱和情况直接影响;
- 2) 长沙市 5 条线路在 2050 年前均能全部回收建设阶段的碳排放,其中 2 号线的碳回收期最短为 14 a,4 号线最长为 23 a;
- 3) 碳回收期后每年将产生巨大的碳减排效益,预计到 2050 年 5 条线路通过碳排放交易将产生正效益 2.38 亿元。

参考文献:

[1] 王勇,韩舒婉,李嘉源,等. 五大交通运输方式碳达峰的经验分解与情景预测:以东北三省为例[J]. 资源科学,2019,41(10):1824-1836.
WANG Y,HAN S W,LI J Y,et al. Empirical decomposition and forecast of peak carbon emissions of five major transportation modes:Taking the three provinces in North-east China as examples[J]. Resources Science,2019,41(10):1824-1836.

[2] 张新,马金涛. 交通系统碳交易实现途径研究[J]. 中国人口·资源与环境,2016,26(3):46-53.
ZHANG X,MA J T. Realization method of carbon trading of transportation system[J]. China Population,Resources and Environment,2016,26(3):46-53.

[3] XU B,LIN B Q. Investigating the differences in CO₂ emissions in the transport sector across Chinese provinces:Evidence from a quantile regression model[J]. Journal of Cleaner Production,2018,175(20):109-122.

[4] 李亮,赵星,杜希旺. 城市绿色交通发展综合评价研究[J]. 华东交通大学学报,2021,38(2):51-60.

LI L,ZHAO X,DU X W. Study on comprehensive evaluation of urban green transportation development[J]. Journal of East China Jiaotong University,2021,38(2):51-60.

[5] 张剑寒. 治理发展模式与城市轨道交通项目运营效率的关系研究[J]. 交通运输系统工程与信息,2017,17(5):16-21.
ZHANG J H. Relationship between governance development models and operational efficiency of urban rail transit [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology,2017,17(5):16-21.

[6] 白同舟,蔡乐,朱家正,等. 轨道交通与城市协同发展的空间差异性分析:以北京市为例[J]. 交通运输系统工程与信息,2020,20(3):14-19.
BAI T Z,CAI L,ZHU J Z,et al. Spatial differentiation of rail transit and urban development coordination:A case study of Beijing[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology,2020,20(3):14-19.

[7] XU L,CHEN N C,CHEN Z Q. Will china make a difference in its carbon intensity reduction targets by 2020 and 2030[J]. Applied Energy,2017,203(10):874-882.

[8] FAN J L,WANG J X,LI F Y,et al. Energy demand and greenhouse gas emissions of urban passenger transport in the internet era:a case study of Beijing[J]. Journal of Cleaner Production,2017,165:177-189.

[9] ZHENG S,KAHN M E. Understanding china's urban pollution dynamics[J]. Journal of Economic Literature,2013,51(3):731-772.

[10] 冯国强,李菁. 城市轨道交通减排治污效应评估[J]. 中国人口·资源与环境,2019,29(10):143-151.
FENG G Q,L J. Assessment of emission reduction effect of urban rail transit[J]. China Population,Resources and Environment,2019,29(10):143-151.

[11] 高明,陈丽强,郭施宏. 轨道交通、BRT 与空气质量——一个城市异质性的视角[J]. 中国人口·资源与环境,2018,28(6):73-79.
GAO M,CHEN L Q,GUO S H. Rail transit,BRT and air quality:a view of urban heterogeneity[J]. China Population,Resources and Environment,2018,28(6):73-79.

[12] WACKERNAGEL M,REES W. Our Ecological Footprint: reducing human impact on the earth[M]. Philadelphia:New

Society Publishers, 1996.

- [13] 肖雅心,杨建新. 北京市住宅建筑生命周期碳足迹[J]. 生态学报, 2016, 36(18): 5949-5955.
- XIAO Y X, YANG J X. Life cycle carbon footprint of residential buildings in Beijing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(18): 5949-5955.
- [14] DIN A, BROTHAS L. Exploration of life cycle data calculation: Lessons from a Passivhaus case study[J]. Energy and Buildings, 2016, 118: 82-92.
- [15] 赵恺彦, 吴绍华, 蒋费雯, 等. 高速公路建设和运营的碳足迹研究: 以江苏省为例[J]. 资源科学, 2013, 35(6): 1318-1327.
- ZHAO K Y, WU S H, JIANG F W, et al. Carbon footprints of expressway construction and operation in Jiangsu Province [J]. Resources Science, 2013, 35(6): 1318-1327.
- [16] 贺晓彤. 城市轨道交通明挖车站建设碳排放计算及主要影响因素分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- HE X T. Research on the calculation methods and major parameters on CO₂ emission during the construction of urban mass transit open-cut station[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [17] 景鹏, 雋志才, 查奇芬. 考虑心理潜变量的出行方式选择行为模型[J]. 中国公路学报, 2014, 27(11): 84-92.
- JING P, JUAN Z C, CHA Q F. Incorporating psychological latent variables into travel mode choice model[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(11): 84-92.
- [18] 洪增林, 钞中东, 周阳, 等. 关中地区清洁能源供暖方案的经济环境效益研究[J]. 生态经济, 2021, 37(1): 157-163.

HONG Z L, CHAO Z D, ZHOU Y, et al. Study on the economic and environmental benefits of clean energy heating solutions in guanzhong region[J]. Ecological Economy, 2021, 37(1): 157-163.

- [19] 孙軻, 苟志远, 赵琛琛. 小区雨水回收利用系统的经济效益分析[J]. 工程管理学报, 2017, 31(3): 92-96.
- SUN K, XUN Z Y, ZHAO C C. Analysis of the economic benefit of rainwater recycling system in residential district [J]. Journal of Engineering Management, 2017, 31(3): 92-96.



第一作者: 张跃斌(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为轨道交通全寿命周期管理。E-mail: zeahwin@163.com。



通信作者: 易欣(1978—), 男, 副教授, 博士, 研究方向为轨道交通全寿命周期管理。E-mail: ioriyixin@163.com。

(责任编辑: 姜红贵)