

城市群交通碳排放的空间相关性与优化策略研究 ——以长三角城市群为例

Study on the Spatial Correlation and Optimization Strategies of Transportation Carbon Emissions in Urban Agglomerations: A Case Study of the Yangtze River Delta Urban Agglomeration

嵇薪颖 JI Xinying

摘要 城市交通领域的碳排放比重高且增速快,是城市减碳的重要领域。立足城市群尺度,结合城市统计年鉴和多源空间数据,基于ArcGIS平台和Geoda软件,采用地理探测器和空间自相关模型,从城市土地利用、交通网络和交通能力3个维度选取一系列指标,分析其与城市交通碳排放的空间关联性。研究表明:城市建成环境中的建成区面积、道路面积、公共汽(电)车营运车辆数和出租汽车营运车数是影响交通碳排放的显著性因子。此外,城市空间密度、路网密度等因子与城市交通碳排放呈现高(低)值集聚的空间正相关分布特征,而城市公路里程与城市交通碳排放呈现出空间负相关的分布特征。最后,结合长三角地区交通和建设规划,提出城市群交通低碳化发展的相关空间优化策略。

Abstract In the field of urban transportation, the carbon emission proportion is high and growing rapidly, making it a crucial area for urban decarbonization. This article focuses on the urban agglomeration scale, utilizing urban statistical yearbooks and multisource spatial data. Based on the ArcGIS platform and Geoda software, the study employs geographic detectors and spatial autocorrelation models. It selects a series of indicators from three dimensions: urban land use, transportation network, and transportation capacity, analyzing their spatial correlations with urban transportation carbon emissions. Research findings indicate that factors such as built-up area, road area, the number of public buses (electric) in operation, and the number of operating taxis significantly impact transportation carbon emissions in urban built environments. Additionally, the spatial density of the city and road network density exhibit spatial clustering characteristics positively correlated with high (low) values of urban transportation carbon emissions. In contrast, the urban road mileage shows a spatially negative correlation with urban transportation carbon emissions. Finally, combining the study with transportation and construction planning in the Yangtze River Delta region, this article proposes relevant spatial optimization strategies for the low-carbon development of urban agglomeration transportation.

关键词 空间相关性; 交通碳排放; 长三角城市群

Key words spatial correlation; transportation carbon emissions; the Yangtze River Delta Urban Agglomeration

文章编号 1673-8985 (2024) 06-0087-07 中图分类号 TU984 文献标志码 A

DOI 10.11982/j.supr.20240611

作者简介

嵇薪颖

上海市松江区规划和自然资源局 规划科
科员, 硕士, 2130126@tongji.edu.cn

0 引言

随着全球气候变暖和中国碳达峰碳中和(以下简称“双碳”)目标的提出,减碳增汇成为国土空间规划的关注重点。城市温室气体排放占全球总量的75%左右,主要集中在城市交通、城市建筑、废弃物处理和市政领域,这是实现城市减碳的3大领域^[1]。其中,交通运输业作为能源消耗和二氧化碳增长最快的行业^[2],是制约城市未来实现双碳目标的重要因素^[3]。

城市群作为我国实现快速城镇化的重要载体,其内向集聚与外向带动的双重作用在推动我国经济发展过程中起到不可或缺的作用,但也带来城市能源消耗、环境恶化等一系列问题。随着城镇化进程的持续推进,长三角、珠三角等成熟城市群的工业化进程已经步入后半段,其工业领域的碳减排潜力较为有限,而城市间的交通需求随着区域一体化的深化和经济活动的持续,将会不断上升。因此,有必要立

足城市群,从空间规划视角解析交通碳排放的空间关系,提出减少交通碳排放的优化策略。

目前,国内外已有大量学者对交通碳排放做了研究,主要可分为以下3类:第一类文献关注低碳交通的理论研究,如低碳交通的评价指标^[4]和评价方法^[5],并对标国际大城市^[6-7],提出一系列空间减碳策略。第二类文献关注交通碳排放的定量测算与预测,学者针对不同学科和研究目标,提出一系列差异化计算交通碳排放的方法。在空间规划领域,陈飞等^[8,40]结合交通低碳发展的特点对低碳城市模型进行修正,形成低碳交通的碳测算模型。第三类文献关注影响交通碳排放的驱动因素,如通过灰色关联度分析、LMDI等方法^[9],探究城市GDP^[10,217]、产业结构、能源结构^[11]、能源强度^[12,40]等因子对交通碳排放量的影响,但这些研究多关注上述社会经济因素对城市交通碳排放量的影响,目前探究城市建成环境中的空间要素对交通碳排放量的研究较少^[13]。在以城市为分析单元的研究中,有学者选取城市路网密度^[14,32]、路网长度等指标来衡量城市道路交通设施的建设水平,探究其对交通碳排放的影响,但研究得出的结论各异。比如,王绍建等^[15]以北京、上海、广州、天津4个城市为对象展开研究,认为城市道路密度和交通耦合因子等对二氧化碳排放水平产生显著的负向效应,而Yang等^[10,218]认为城市道路密度对交通碳排放具有增长促进作用。

总的来说,已有文献对于不同尺度城市交通碳排放的测算与预测已进行了大量研究,但仍存在以下探讨空间:首先,以城市群为尺度的交通碳排放研究较少,维度单一且多偏重社会经济层面^[14,28],缺乏对城市建成环境中空间要素的关注;其次,城市与城市之间的资源禀赋和经济基础存在一定差异,已有研究运用的常规数理统计方法会忽略研究空间单元之间的相互作用和空间异质性^[16],可能会高估某些空间数据的影响。

因此,本文以长三角城市群为研究对象,结合城市统计年鉴和多源空间数据,通过单变量全局和局部空间自相关分析,明确长三角城市交通碳排放现状特征。接着在考虑数据可获

取性的基础上,从城市土地利用、交通网络、交通能力3个维度,选取11个指标,分析影响城市交通碳排放的相关空间要素。为进一步探究上述显著性因子在不同城市的影响差异,引入双变量局部空间自相关模型,并进行原因剖析。最后提出长三角城市群交通低碳化发展的相关策略,以期为其后续的空间建设提供交通碳减排的现实路径,进而为全国其他城市群的交通碳减排提供借鉴。

1 研究方法

1.1 研究对象

长三角城市群位于我国长江下游地区,包括上海、江苏、浙江、安徽三省一市内的41个城市。截至2020年,长三角城市群陆域总面积为35.8万km²,常住人口总量达2.35亿人,生产总值为24万亿元,占全国比重为24.1%^①。

长三角城市群是我国经济发展前沿区域,其创新能力强、开放程度高,是城镇化进程中不可或缺的重要区域。长三角城市群以全国3.7%的国土面积,排放了21.52亿t二氧化碳,占全国总排放量的16.9%,是我国实现双碳目标、进行碳排放控制的重点区域。

1.2 数据来源

本文在分析过程中使用的数据包括社

会经济数据、城市空间矢量数据、城市碳排放数据。其中社会经济数据中的人口数据来源于各城市第七次全国人口普查公报和各城市统计年鉴,城市公共汽车和出租车拥有情况、公路运输量等数据来自中国城市统计年鉴。各城市矢量空间数据来源于开放街道地图(OpenStreetMap)。各城市2020年碳排放数据来自中国城市温室气体工作组(CCG)^②。

1.3 变量选取

影响城市交通碳排放的因素有很多,包括城市人口规模、经济发展水平、城镇化率、交通燃料类型等多个方面^[17]。本文在变量选取时主要是基于空间规划视角,从各城市的土地利用、交通网络建设、城市交通运输能力3个维度选取一系列变量指标,探寻上述指标与交通碳排放的关系,初步选取的研究变量如表1所示。

1.4 探索性空间数据分析

本文主要运用地理探测器和空间自相关模型这两种探索性空间数据分析技术^[18],梳理城市交通碳排放与上述一系列因子的关系。其中,地理探测器是一种用于探索空间数据分异性并揭示其驱动力的分析统计模型,包含分异及因子探测、交互作用探测、风险区

表1 城市交通碳排放影响因子选取

Tab.1 Selection of influencing factors on urban transportation carbon emissions

影响因子维度	因子名称	因子含义
土地利用	建成区面积/km ²	一般指建成区外轮廓线所能包括的地区,即城市实际建设用地的范围
	空间密度/(km ² /km ²)	城市内建筑投影面积与城市建成区面积之比
	路网密度/(km/km ²)	城市市域范围内道路长度与市域面积的比值
交通网络	交叉口密度/(个/km ²)	城市市域范围内交叉口数量与市域面积的比值
	年末实有城市道路面积/万m ²	指道路实际铺装面积和与道路相通的广场、桥梁、隧道的铺装面积
	年末实有巡游出租汽车营运车数/辆	指年末已经领取巡游出租汽车专用牌照的运营车辆,包括技术完好、在修的、长期行驶的,以及拟报废尚未经上级机关批准的车辆
交通能力	年末实有公共汽(电)车营运车辆数/辆	指年末实际运营的公共汽车、公共电车的数量
	全年公共汽(电)车客运总量/万人次	指一年内公共汽车、公共电车总共搭载的人次
	公路客运量/万人	指在一定时期内,公路运输实际运送的旅客数量
	公路货运量/万t	指在一定时期内,公路运输实际运送的货物重量
	境内公路总里程/km	指在一定时期内实际达到《公路工程技术标准 JTG B01-2003》规定的技术等级的公路,并经公路主管部门正式验收交付使用的公路里程数

资料来源:笔者参照各区统计年鉴及其附录整理。

注释: ① 统计数据来自长三角地区2020年41个城市经济增长报告(sass.org.cn)。

② 中国城市温室气体工作组是由生态环境部环境规划院气候变化与环境政策研究中心发起、于2017年6月组织成立的城市温室气体研究与合作平台(<http://www.cityghg.com/>)。

探测和生态探测4个模型^[19]。本文主要应用分异及因子探测模型,探测某个自变量在多大程度上揭示了因变量的空间分异程度。

空间自相关是测度空间数据依赖性的统计指标,可分为全局空间自相关统计量和局部空间自相关统计量。全局空间自相关是衡量空间的某种属性在地理位置上是否具有明显聚类或离散特征,本文采用Global Moran's I 统计量,对长三角城市群交通碳排放和相关影响因素进行全局自相关性检测,以证实空间影响的客观存在。局部空间自相关是表明局部层面的空间自相关水平,本文运用Getis-Ord G* 指数来识别各城市交通碳排放量的局部空间聚集特征。此外,为了刻画多个变量与城市交通碳排放量在空间分布上的相关性,本文在上述基础上拓展了双变量全局空间自相关和双变量局部空间自相关,为测量不同因子对交通碳排放的相关性提供可行方法。在本次研究中,为了全面反映城市与城市之间的地理邻近关系和空间相关性分析的准确,避免部分城市因与周边城市空间不直接相邻(如舟山市)而造成结果误差,选取标准化后K=12,作为空间相关性分析的空间权重矩阵。

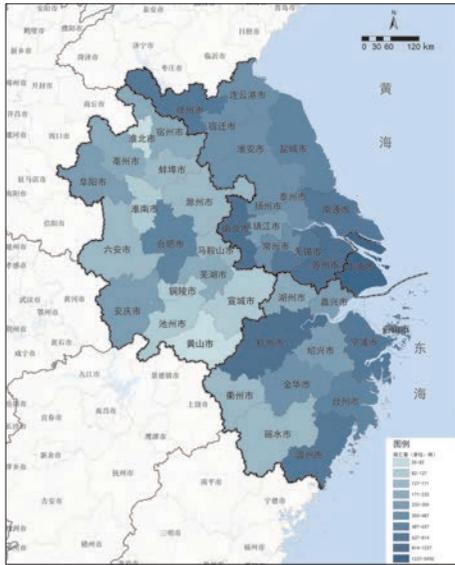


图1 2020年长三角地区城市交通碳排放量图
Fig.1 Carbon emissions from urban transportation in the Yangtze River Delta region in 2020
资料来源:笔者自绘。底图来源:自然资源部审图号:GS(2020)3189号。

2 长三角城市群交通碳排放的空间特征

2.1 空间分布

从中国城市温室气体工作组^③获取到长三角各城市2020年二氧化碳排放数据集,借助ArcGIS平台进行可视化分析,得到各城市交通碳排放的空间分布图(见图1)。城市交通碳排放量较高的城市主要集中在长三角沿江沿海两侧,与长三角城市发展带的空间结构高度一致。其中上海市交通碳排放量为5 900 t,高居长三角地区的交通碳排放量第一名。其次为苏州市(1 237 t)、南京市(1 029 t)、杭州市(1 027 t)、徐州市(814 t)等城市。各城市交通碳排放占整体碳排放^④比重的均值为12.16%(见图2),而黄山市、宿迁市、丽水市等人均GDP较低的城市,其交通碳排放占整体比重重要明显高于其他城市,是实现未来交通碳排放减量的潜力城市。

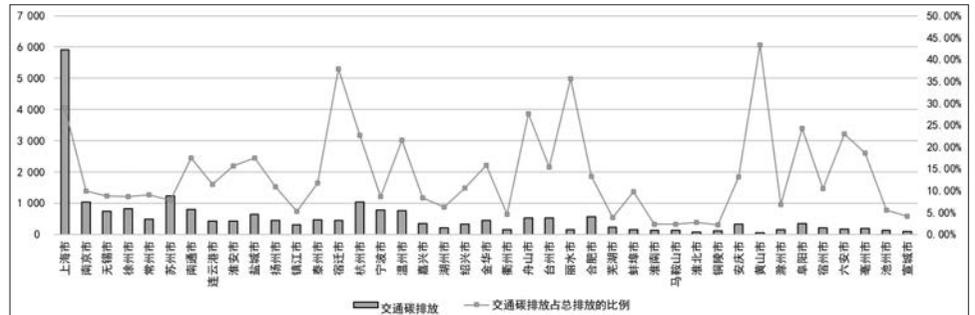


图2 长三角地区各城市交通碳排放量(单位:t)与占总碳排放的比例
Fig.2 Carbon emissions from transportation in various cities in the Yangtze River Delta region (in tons) and their proportion to total carbon emissions
资料来源:笔者自绘。

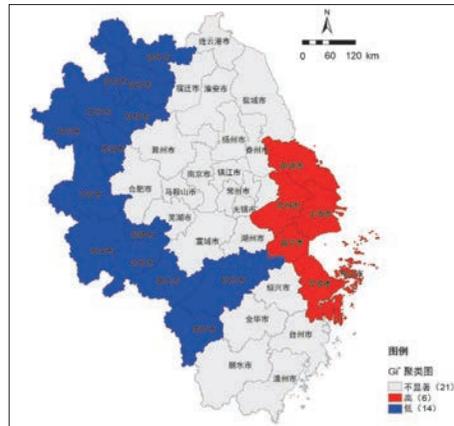


图3 长三角地区城市交通碳排放量的局部G*统计聚类与显著性图
Fig.3 Local G* statistical clustering and significance map of urban transportation carbon emissions in the Yangtze River Delta region
资料来源:笔者根据相关资料自绘。

2.2 空间依赖性

通过对长三角地区2020年各城市交通碳排放的全局Moran's I的检验可知,其莫兰指数为正值,且通过了5%水平的显著性检验,表明其在空间分布上具有依赖性特征。为进一步探究长三角城市群交通碳排放的具体结构和各城市交通碳排放量在空间上的关联关系,本文对长三角地区各城市交通碳排放进行局部(G*)统计,将交通碳排放划分为2种空间聚集类型(见图3):①热点分布型(HH):城市自身与相邻城市交通碳排放均为高值区,且二者呈正相关;②冷点分布型(LL):城市自身与相邻城市交通碳排放均为低值区,且二者呈正相关。总的来说,交通碳排放的高值聚类区主要集中在上海、苏州、南通、宁波等城市,与上海大都市圈的空间范围高度重合。上海作为长三角地区人口与经济高度集聚城市,与周边

注释: ③ 同②。

④ 本文所指各城市碳排放总量为各城市行政边界内的所有直接排放,未考虑城市由于向外界购买电力所导致的间接排放。

城市的功能联系密切,交通往来频繁。城市交通能耗和碳排放量增加,进而使碳排放呈现出围绕上海的高值集聚特征。而14个低值聚类区集中在长三角的西部外围区域,其中11个城市位于安徽省内,这与长三角地区的经济发展水平的空间分布情况也基本相似。

3 长三角城市群交通碳排放的影响因素与空间关联性分析

3.1 基础分析

本文以长三角地区的地级市为基本研究单元,以城市交通碳排放量为因变量,将上述城市土地利用、交通网络、交通运输能力3个维度共计11个指标作为自变量,借助ArcGIS平台将上述自变量转为类型量,利用Geodetector进行探测分析。接着进行双变量全局空间自相关性分析,明确影响城市交通碳排放的因素及其空间分异情况。

从城市交通碳排放的影响因子探测结果来看,上述一系列自变量中有4个通过了10%水平的显著性检验,说明城市交通碳排放量的大小受到了城市建成区面积、城市道路面积、公共汽(电)车营运车辆数和城市巡游出租汽车营运车数(辆)这4个因素的影响,且其置信水平为90%,各指标具体结果的Q值与P值如表2所示。

从空间分布集聚性上来看,城市建成环境中的建成区面积、城市空间密度、路网密度等因子与城市交通碳排放存在显著正相关,其中,城市交通碳排放与城市路网密度的空间正相关性最强(0.201),与全年公共汽(电)车客运总量的空间正相关性最弱(0.038)。城市公路里程与城市交通碳排放呈显著空间负相关的特征,而城市巡游出租车数量与交通碳排放的空间集聚性并不显著。具体各指标的Moran's I值如表2所示。

3.2 土地利用

在土地利用维度的指标中,城市建成区面积是衡量城市发展程度的重要指标。研究发现,城市建成区面积是影响城市交通碳排放的显著性因子,且城市交通碳排放量与城市建成区面

积在全球也呈现出正相关的空间分布特征(见图4),即随着城市建成区的扩大,城市的交通碳排放也在相应提升。其中高一高型(HH)的城市主要分布在上海、苏州、无锡、南通、舟山和宁波,说明这些城市的交通碳排放量与城市建成区面积相对较高,形成高值集聚区。这可能是由于随着城市建成区扩张,城市平均出行距离增加,降低了城市交通出行效率,交通出行的能源消耗增多,致使交通碳排放量增多。

城市空间密度与城市交通碳排放的双变量莫兰指数为正且通过了5%水平的显著性检验,表明城市空间密度与交通碳排放的空间上呈显著正相关,主要集聚在上海、苏州、南通、无锡等城市。原因可能是较高的空间密度增加

了城市交通需求和基础设施的压力,导致交通碳排放量增多。但滁州、泰州、扬州3个城市呈现出低—高型(LH)集聚区,即三市的交通碳排放低,但周边邻接地区的城市空间密度高,呈现出局部的空间负相关。

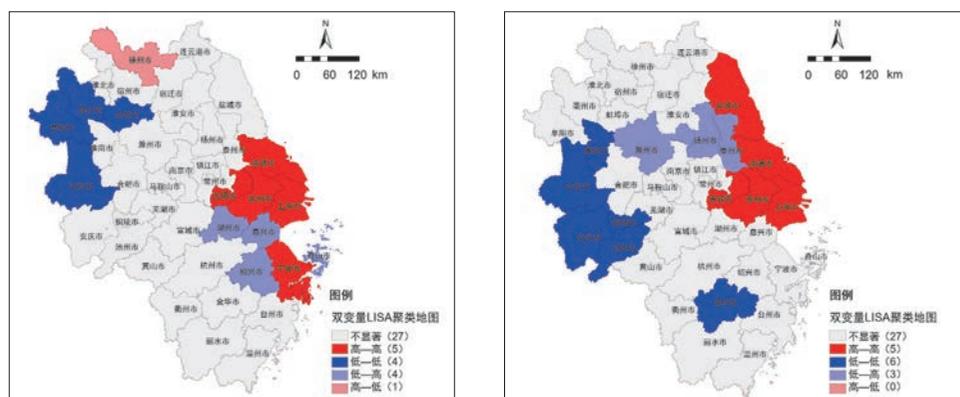
3.3 交通网络

在交通网络维度的指标中,路网密度是衡量城市道路密集程度和交通可达性的重要指标^[20],不同的路网密度也影响着城市的空间形态,是空间规划一直以来关注的重点指标。已有较多学者指出,较高的城市路网密度有利于改善城市交通拥堵,促进居民绿色低碳出行^[21-22]。根据本文对交通碳排放与城市路网密度的双变

表2 2020年长三角地区城市交通碳排放与各指标的地理探测器与空间集聚性检验结果
Tab.2 Geographical detectors and spatial clustering test results of urban traffic carbon emissions and various indicators in the Yangtze River Delta region in 2020

影响因子 维度	因子名称	基于地理探测器的 影响因子检验		基于双变量空间自相关的 空间集聚性检验		
		Q值	P值	Moran's I	P值	Z值
土地利用	建成区面积/km ²	0.329	0.084	0.049	0.03	2.13
	空间密度/(km ² /km ²)	0.270	0.171	0.094	0.008	2.60
	路网密度/(km/km ²)	0.360	0.237	0.201	0.002	5.922
交通网络	交叉口密度/(个/km ²)	0.360	0.236	0.169	0.001	5.269
	年末实有城市道路面积/万m ²	0.441	0.097	0.047	0.021	2.372
	年末实有巡游出租汽车营运车数/辆	0.318	0.096	0.005	0.125	1.17
	年末实有公共汽(电)车营运车辆数/辆	0.329	0.083	0.057	0.018	2.482
交通能力	全年公共汽(电)车客运总量/万人次	0.242	0.085	0.038	0.032	2.138
	公路客运量/万人	0.210	0.672	0.081	0.022	2.307
	公路货运量/万吨	0.331	0.672	0	0.318	0.0413
	境内公路总里程/km	0.236	0.590	-0.082	0.018	-2.151

资料来源:笔者自制。



a 城市建成区面积

b 城市空间密度

图4 城市交通碳排放与影响因素的双变量LISA聚类图(土地利用维度)

Fig.4 Bivariate LISA clustering diagram of urban transportation carbon emissions and influencing factors (land use dimension)

资料来源:笔者自绘。

量局部自相关性分析发现(见图5),城市交通碳排放量与城市路网密度全局呈现空间正相关,即城市路网密度和城市交通碳排放呈现高(低)值集聚的空间特征。其中高一高型(HH)的城市主要分布在上海、苏州、无锡和南通,说明这些城市的交通碳排放量与路网密度均相对较高。低一低型(LL)的城市分布在安庆、六安、池州等城市,主要集中在长三角外围边界,说明区域的道路建设水平较低,路网密度处于较低值,相应的交通碳排放量也较低。

此外,城市道路面积是影响交通碳排放的显著性因子,并且两者呈现出高(低)值集聚的空间正相关特征。道路面积的扩展促进了交通碳排放量的提升,这可能是由于城市道路的不断扩建,在一定程度上提升了小汽车、出租车等交通出行的便利度,刺激了这些高能耗交通方式的出行。其碳排放因子(见图6)要明显高于步行与其他非机动车,在一定程度上抵消了居民低碳出行带来的碳排放缓解。此外,过密的城市交叉口致使机动车在运行过程中频繁地制动与启动,降低了机动车的运行效率,在造成交通拥堵的同时也会使得车辆碳排放增多。

3.4 交通能力

从城市内部的交通运输能力维度来看,城市出租汽车营运车数是影响城市交通碳排放的显著性因子,但城市出租汽车营运车数与城市

交通碳排放的空间集聚性并不显著。出租车的有效供给在解决城市内部短距离交通出行中起着重要作用,灵活地满足了城市居民差异性的出行目的。但城市中的传统巡游出租车以传统燃油车为主,其数量的提升必然导致更多的能源消耗。此外,随着长三角地区各城市公共交通的建设完善以及城市网约车的快速发展和个人机动车的购买数量上升,导致传统巡游出租车的使用效率下降,传统出租车的运力供给不能有效地与城市居民出行需求匹配,导致车辆空驶里程增多,也会在一定程度上增加城市交通碳排放。城市公共汽(电)车营运车辆数和公共汽(电)车客运总量与城市交通碳排放的双变量莫兰指数为正,且通过了5%水平的显著性检验,且空间的相关性格局也完全一致(见图7)。其中,高一高型(HH)的代表城市为上海、南通、无锡、苏州、宁波5个城市,形成交通碳排放和运营车辆数均较高的高值空间聚集区。

从城市对外交通运输能力来看,城市公路客运量与城市交通碳排放的双变量莫兰指数为正,且通过了5%水平的显著性检验。说明城市公路客运量和城市交通碳排放呈现高(低)值集聚的空间分布特征。而城市公路总里程与城市交通碳排放的双变量莫兰指数为负,且通过了5%水平的显著性检验,代表性城市为淮北市(LH)。原因可能是城市公路总里程的提升,提高了对外公路运输的效率,从而减少了城市交

通碳排放(见图8)。

4 长三角城市群低碳交通优化策略

4.1 控制城市规模扩张,提高空间利用效率

在土地利用维度,城市建成区面积是影响城市交通碳排放的显著性因子。城市建成区规模扩张一方面使得林地、湿地等碳汇因子较高的用地类型转变为城市建设用地,另一方面增加了城市远距离交通出行,从而导致交通能耗和碳排放量上升。因此,在区域一体化进程持续推进、各项空间要素加速流动的背景下,有必要深化土地用途管控,严格落实生态保护红线,适当增加林地、湿地、草地等高碳汇的用地类型。此外,对于目前城市建成区面积较大的上海、南京、杭州等城市,未来要严格控制城市建成区规模,划定合理的城市开发边界。对于城市的高密度地区,要提升土地利用混合度和空间利用效率,减少不必要的交通出行。对于六安、

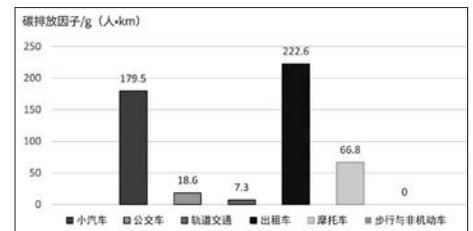
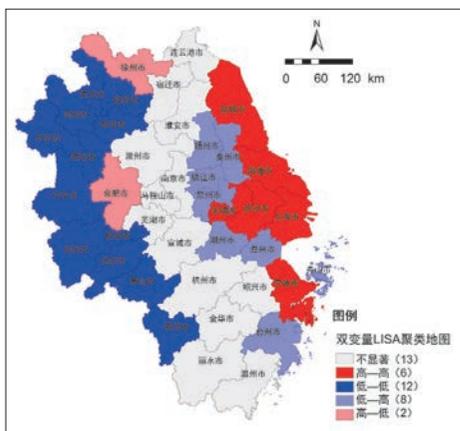
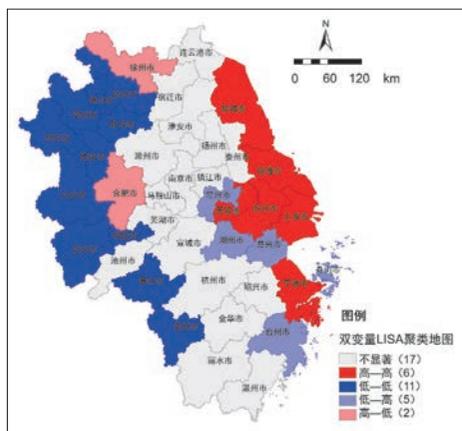


图6 不同交通出行方式的碳排放因子
Fig.6 Carbon emission factors of different transportation modes

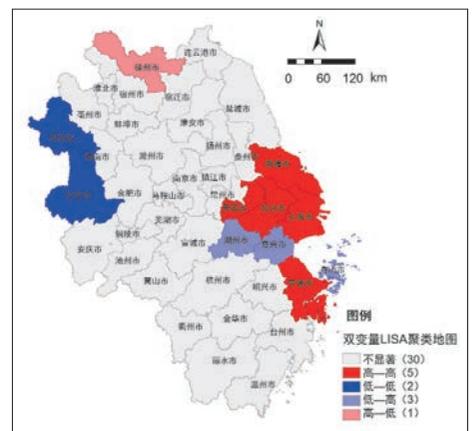
资料来源:参考文献[23-25]。



a 路网密度



b 交叉口密度



c 城市道路面积

图5 城市交通碳排放与影响因素的双变量LISA聚类图(交通网络维度)

Fig.5 Bivariate LISA clustering diagram of urban transportation carbon emissions and influencing factors (transportation network dimension)

资料来源:笔者自绘。

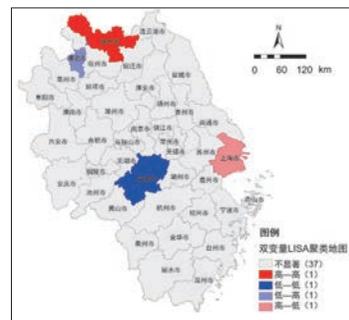
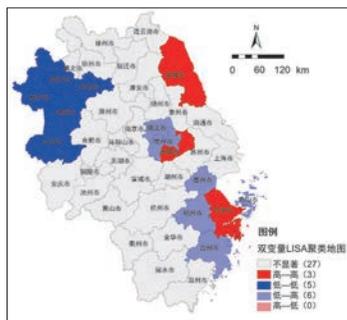
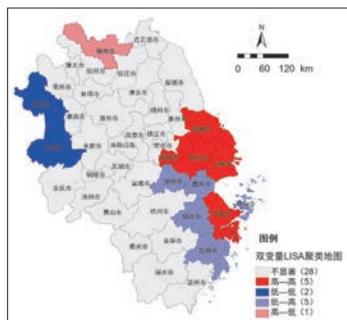
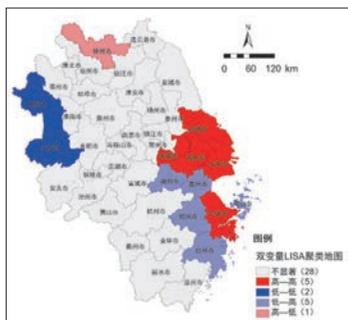


图7 城市交通碳排放与影响因素的双变量LISA聚类图(城市内部交通运输能力)
Fig.7 Bivariate LISA clustering diagram of urban transportation carbon emissions and influencing factors (urban internal transportation capacity)

图8 城市交通碳排放与影响因素的双变量LISA聚类图(城市外部交通运输能力)
Fig.8 Bivariate LISA clustering diagram of urban transportation carbon emissions and influencing factors (urban external transportation capacity)

资料来源:笔者根据相关资料自绘。

资料来源:笔者根据相关资料自绘。

阜阳、蚌埠等目前建成区面积较小的城市,在未来城市建成区扩大的过程中,结合城市空间形态和结构优化,提升城市交通出行效率,避免城市蔓延造成远距离交通出行需求的增加。

4.2 优化城市道路网络,促进居民低碳出行

在交通网络维度,城市道路面积的提升促进了交通碳排放量的提升,且当前城市道路网密度、交叉口密度和道路面积均与城市交通碳排放呈现高值集聚的空间正相关特征。因此对于目前道路网络建设已较为完善的上海、无锡、常州等城市,在未来城市道路建设中,要注意到较高的城市道路面积可能在一定程度上会刺激小汽车等高能耗交通出行,也会导致城市街区规模过小、破碎化程度提升^[26],进而导致交通出行效率降低,增加城市交通碳排放。此外,局部道路拓扑关系的改善可能也会提升路网的整合度和可达性,提升城市路网的连通性。对于池州、安庆、丽水等未来道路建设增量较多的地区,首先要转变扩建道路可以减少交通拥堵^{[8]42}的传统思路,而将重点放在优化出行结构上;其次在路网完善过程中,不仅要关注路网长度与面积的提升,还要合理配置道路的等级结构,避免仅关注城市快速路、主干路等高等级道路而忽略城市支路的建设^[27],造成级配结构失衡。

4.3 协同区域交通运输,提升城市交通能力

在交通能力维度,研究发现,城市巡游出租车数量是影响交通碳排放的显著性因子。在空

间集聚性上,城市公共汽(电)车营运车辆数、公共汽(电)车客运总量和公路客运量与城市交通碳排放呈现显著的空间正相关性,城市公路里程与城市交通碳排放呈显著负相关。长三角城市群内有多个全国性综合交通枢纽(南京、杭州、合肥、宁波)和一个国际性综合交通枢纽(上海),加强城市公共交通、铁路、水运等低碳化的交通系统建设,提升城市交通辐射能力与水平,也是实现长三角区域一体化的必然要求。此外,还要增强城市交通供给与居民交通需求的匹配程度,减少出租车的空驶里程。优化交通供给结构,提升纯电动出租车和公交车的数量,提升能源使用效率,形成可持续发展的城市交通。在公路建设方面,要优化城市公路网络布局,提升城市省际公路的通达能力,提升公路客运效率,减少不必要的交通碳排放。在快速轨道交通建设方面,长三角地区呈现明显的空间不均匀现象,因此要加强城际快速轨道交通的发展,将城市公路客运转移到铁路客运^{[12]40},通过低耗能的轨道交通减少客运量的碳排放,也是实现区域交通碳减排的重要举措。

5 结语

长三角城市群作为我国人口、资金等资源要素集聚的地区,区域一体化的社会发展趋势不断深化,人员跨城流动和交通联系的需求也随着一体化深入而逐步增加。长三角各城市的交通碳排放的空间分布上具有依赖性的特征,对具有相同碳排放聚类特征的城市,比如南通、

苏州、上海等碳排放高值聚类区,可通过一定的区域协调政策共同制定碳减排措施。本文主要基于空间规划视角,结合城市统计年鉴和多源空间数据,采用地理探测器和空间自相关模型,分析影响城市群交通碳排放的影响因子和空间关联特征,为其后续的空间建设提供交通碳减排的空间优化策略。但低碳研究是涉及能源、建筑、交通、市政等多学科的综合领域,要实现城市交通碳排放的减量化,还离不开清洁能源的高效利用、节能技术的推广与普及等多方面因素。此外,由于数据获取的限制,本文仅选取了3个影响因子,后续可结合POI数据、轨交线网数据,进一步拓展影响因子,探究城市土地利用混合度、各类交通设施建设规模及密集程度、公交线网密度等因素对城市交通碳排放的影响,从而为交通低碳化发展提供更为精准的基础分析和策略建议。

(感谢同济大学建筑与城市规划学院张立副教授和高润艺博士研究生对本文的指导。)

参考文献 References

- [1] 刘宝涛,杨兴龙,郭佳. 东北地区城镇化发展与土地健康利用空间关联特征[J]. 水土保持研究, 2018, 25(4): 386-392.
LIU Baotao, YANG Xinglong, GUO Jia. Spatial correlation characteristics between urbanization development and land health utilization[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(4): 386-392.
- [2] MA J, LIU Z, CHAI Y. The impact of urban form on CO₂ emission from work and non-work trips:

- the case of Beijing, China[J]. *Habitat International*, 2015, 47: 1-10.
- [3] 张诗青, 王建伟, 郑文龙. 中国交通运输碳排放及影响因素时空差异分析[J]. *环境科学学报*, 2017, 37 (12): 4787-4797.
ZHANG Shiqing, WANG Jianwei, ZHENG Wenlong. Spatial and temporal analysis of carbon emissions and influencing factors in Chinese transportation sector[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(12): 4787-4797.
- [4] 刘亮, 刘伟, 陈超凡, 等. 区域能流视角的低碳城市评价指标体系研究[J]. *生态经济 (学术版)*, 2013 (1): 6-9.
LIU Liang, LIU Wei, CHEN Chaofan, et al. Research on the evaluation indicator system of low-carbon cities from the perspective of functional flow[J]. *Ecological Economy*, 2013(1): 6-9.
- [5] 吕雄鹰, 潘海啸. 新城低碳交通影响要素及优化策略——以上海市松江新城为例[J]. *城市交通*, 2022, 20 (4): 99-110.
LYU Xiongying, PAN Haixiao. Factors affecting low-carbon transportation in newly developed cities and optimization strategies: a case study of Songjiang New Town in Shanghai[J]. *Urban Transport of China*, 2022, 20(4): 99-110.
- [6] 金昱. 国际大城市交通碳排放特征及减碳策略比较研究[J]. *国际城市规划*, 2022, 37 (2): 25-33.
JIN Yu. Comparative study on characteristic and planning strategies of transportation carbon emissions in global megacities[J]. *Urban Planning International*, 2022, 37(2): 25-33.
- [7] 胡蕊, 吕斌. 大都市低碳交通策略的国际案例比较分析[J]. *国际城市规划*, 2012, 27 (5): 102-111.
HU Yao, LYU Bin. International comparative analysis of low carbon transportation strategies in megacities[J]. *Urban Planning International*, 2012, 27(5): 102-111.
- [8] 陈飞, 诸大建, 许琨. 城市低碳交通发展模型、现状问题及目标策略——以上海市实证分析为例[J]. *城市规划学刊*, 2009 (6): 39-46.
CHEN Fei, ZHU Dajian, XU Kun. Development model, current issues, and targeted strategies for urban low-carbon transportation - a case study of Shanghai[J]. *Urban Planning Forum*, 2009(6): 39-46.
- [9] 曾晓莹, 邱荣祖, 林丹婷, 等. 中国交通碳排放及影响因素时空异质性[J]. *中国环境科学*, 2020, 40 (10): 4304-4313.
ZENG Xiaoying, QIU Rongzu, LIN Danting, et al. Spatio-temporal heterogeneity of transportation carbon emissions and its influencing factors in China[J]. *China Environmental Science*, 2020, 40(10): 4304-4313.
- [10] YANG W, LI T, CAO X. Examining the impacts of socio-economic factors, urban form and transportation development on CO₂ emissions from transportation in China: a panel data analysis of China's provinces[J]. *Habitat International*, 2015, 49: 212-220.
- [11] 张伟, 孙燕玲, 朱萌. 区域性中心城市的碳排放测定及影响因素分析——以青岛市为例[J]. *经济与管理评论*, 2012, 28 (4): 150-156.
ZHANG Wei, SUN Yanling, ZHU Meng. Carbon emission measurement and analysis of regional central city: a case study of Qingdao City[J]. *Review of Economy and Management*, 2012, 28(4): 150-156.
- [12] 李健, 景美婷, 苑清敏. 绿色发展下区域交通碳排放测算及驱动因子研究——以京津冀为例[J]. *干旱区资源与环境*, 2018, 32 (7): 36-42.
LI Jian, JING Meiting, YUAN Qingmin. Calculation of regional transportation carbon emissions and study of driving factors under green development: a case study of the Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2018, 32(7): 36-42.
- [13] 杨文越, 曹小曙. 多尺度交通出行碳排放影响因素研究进展[J]. *地理科学进展*, 2019, 38 (11): 1814-1828.
YANG Wenyue, CAO Xiaoshu. Progress of research on influencing factors of CO₂ emissions from multi-scale transport[J]. *Progress in Geography*, 2019, 38(11): 1814-1828.
- [14] 李晓江, 何舸, 罗彦, 等. 粤港澳大湾区碳排放空间特征与碳中和策略[J]. *城市规划学刊*, 2022 (1): 27-34.
LI Xiaojiang, HE Ge, LUO Yan, et al. Spatial characteristics of carbon emissions and carbon neutralization strategies for Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. *Urban Planning Forum*, 2022(1): 27-34.
- [15] WANG S, LIU X, ZHOU C, et al. Examining the impacts of socioeconomic factors, urban form, and transportation networks on CO₂ emissions in China's megacities[J]. *Applied Energy*, 2017, 185: 189-200.
- [16] 刘贤赵, 高长春, 张勇, 等. 中国省域碳强度空间依赖格局及其影响因素的空间异质性研究[J]. *地理科学*, 2018, 38 (5): 681-690.
LIU Xianzhao, GAO Changchun, ZHANG Yong, et al. Spatial dependence pattern of carbon emission intensity in China's provinces and spatial heterogeneity of its influencing factors[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(5): 681-690.
- [17] 王靖添, 马晓明. 低碳交通研究进展与启示[J]. *生态经济*, 2021, 37 (5): 57-64.
WANG Jingtian, MA Xiaoming. Research progress of low-carbon transportation and its enlightenment[J]. *Ecological Economy*, 2021, 37(5): 57-64.
- [18] ANSELIN L. Local indicators of spatial association—LISA[J]. *Geographical Analysis*, 1995, 27(2): 93-115.
- [19] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, 72 (1): 116-134.
WANG Jinfeng, XU Chengdong. Geodetector: principle and prospective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134.
- [20] 邹尚霖. 低碳导向下街区尺度和路网密度规划研究[J]. *华中建筑*, 2016 (7): 29-33.
WU Shanglin. Research on the block scale and density of road network planning under the guidance of low-carbon[J]. *Huazhong Architecture*, 2016(7): 29-33.
- [21] 王刚. 小街区密路网的适用性分析[J]. *交通工程*, 2020, 20 (6): 19-23.
WANG Gang. Applicability analysis of "a dense network of streets with short blocks"[J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2020, 20(6): 19-23.
- [22] 方彬, 葛幼松. 街区制发展历程中的街区形态演变与街区适宜尺度探讨[J]. *城市发展研究*, 2019, 26 (11): 34-40.
FANG Bin, GE Yousong. The evolution of block patterns and the discussion on the appropriate scale of block in the development course of block system[J]. *Urban Development Studies*, 2019, 26(11): 34-40.
- [23] 吕雄鹰, 潘海啸. 低碳出行导向下新城居住区建成环境优化研究——以上海市松江新城为例[J]. *住宅科技*, 2021, 41 (5): 60-66.
LYU Xiongying, PAN Haixiao. Research on environmental optimization in newly developed residential areas with low-carbon mobility focus: a case study of Songjiang New Town in Shanghai[J]. *Housing Science*, 2021, 41(5): 60-66.
- [24] 朱洪, 邵丹. 上海城市交通碳排放评估及控制策略[J]. *上海城市规划*, 2014 (2): 33-36.
ZHU Hong, SHAO Dan. Assessment and control strategies of carbon emissions in urban transportation in Shanghai[J]. *Shanghai Urban Planning Review*, 2014(2): 33-36.
- [25] 潘海啸, 郑煜铭. 上海市通勤者交通碳排放的影响因素[C]//第十四届城市发展与规划大会论文集. 北京: 中国城市出版社, 2019.
PAN Haixiao, ZHENG Yuming. Factors affecting commuter CO₂ emissions in Shanghai[C]// Proceedings of the 14th Urban Development and Planning Conference. Beijing: China City Press, 2019.
- [26] 袁青, 郭冉, 冷红, 等. 长三角地区县域中小城市空间形态对碳排放效率影响研究[J]. *西部人居环境学刊*, 2021, 36 (6): 8-15.
YUAN Qing, GUO Ran, LENG Hong, et al. Research on the impact of urban form of small and medium-sized cities on carbon emission efficiency in the Yangtze River Delta[J]. *Journal of Human Settlements in West China*, 2021, 36(6): 8-15.
- [27] 卓健, 王博睿, 沈尧. 重新认识“小街区、密路网”开放街区的绿色交通组织[J]. *时代建筑*, 2022 (1): 6-13.
ZHUO Jian, WANG Borui, SHEN Yao. Appreciating "pedestrian-friendly blocks, dense street networks", green transportation planning in open street blocks[J]. *Contemporary Architecture*, 2022(1): 6-13.