

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2024.05.004

引用格式:余书宇,朱广演,刘柯良,等.市域尺度下交通碳排放的时空分异特征分析[J].公路与汽运,2024,40(5):26-32+36.

Citation: YU Shuyu, ZHU Guangyan, LIU keliang, et al. Temporal and spatial heterogeneity of transportation carbon emissions at the city scale [J]. Highways & Automotive Applications, 2024, 40(5): 26-32+36.

市域尺度下交通碳排放的时空分异特征分析*

余书宇¹, 朱广演¹, 刘柯良², 王涛³, 张凯⁴

(1.重庆设计集团有限公司 市政设计研究院, 重庆 400014; 2.重庆交通大学 交通运输学院, 重庆 400074; 3.重庆市交通规划研究院, 重庆 400074; 4.山西省交通环境保护中心站(有限公司), 山西 太原 030032)

摘要:通过对交通碳排放相关研究的梳理,对中国284座城市交通碳排放进行测算,分析交通碳排放的时间变化趋势、空间分布特征及空间关联特征,从微观尺度评价交通碳排放的时空分异特征。结果显示,从时间维度来看,2006—2017年中国交通碳排放整体呈上升趋势,各省区市交通碳排放平均增长率差异较大,经济相对发达地区增长缓慢,欠发达地区增长较快;从空间特征来看,交通碳排放在全局呈现空间自相关,在局部呈现显著的高-高集聚和低-低集聚空间分布正相关特征,且高-高类型集聚集中于东部经济发达地区,低-低类型集聚集中在西部经济相对落后地区。构建交通碳排放强度空间溢出模型,分析交通碳排放的空间溢出效应,结果显示高交通碳排放强度会产生高交通碳排放区域的溢出,这种正向溢出主要体现在城市群中心城市与周边城市,负向溢出效应主要集中在西北地区。

关键词:城市交通;碳排放;时空分异特征;市域尺度

中图分类号:U491.92

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2024)05-0026-07

交通运输行业是全球温室气体排放的主要来源之一。中国作为全球最大的温室气体排放国之一,其交通运输行业碳排放量占比超过25%。中国政府已宣布力争在2030年达到碳排放峰值,并在2060年实现碳中和。交通运输业作为国民经济和社会发展的基础产业,如何控制其碳排放对实现这些目标至关重要^[1]。中国的疆域广袤,各地交通运输行业发展水平差异较大,不同地区交通运输行业的能耗和效率存在较大差异,如东部沿海地区交通运输行业发达,交通工具更新换代速度较快,而西部地区交通运输行业相对滞后,交通工具使用寿命较长、能效较低。研究中国交通碳排放时空分布规律对制定有针对性的碳减排策略具有重要意义。

现有碳排放估算方法主要有“自上而下”法和“自下而上”法。武翠芳等利用“自上而下”法对2000—2013年甘肃省交通系统CO₂排放量进行了估算^[2]。宁晓菊等利用“自下而上”法对郑州市城市道路交通系统进行了碳排放测量^[3]。针对碳排放时变,已有研究多从“脱耦合”的视角对其进行分析,难

以掌握其时变规律。武红等对河北省的能源消费与经济增长、碳排放三者间的相互作用进行了测算与分析,从脱钩度指标来看,河北省大多数时间都处在“弱脱钩度”的状态,说明河北省的低碳经济发展程度不高^[4]。张陶新等从中国城镇扩展的实际背景出发,对全国各省区市交通系统的碳排放进行了空间分析^[5]。张扬等采用遥感图像处理系统(ERDAS)与地理信息系统(GIS)相结合的方法,分析了中国省域(含省、自治区、直辖市)地区交通活动碳排放的时空变化特征,结果显示交通活动碳排放在不同地区的空间分布及增长速度存在较大差异^[6]。张诗青等的研究表明,2000—2013年中国交通碳排放呈现显著的高低值域分布,且高值域分布相对稳定,高值域以京津冀及周边省市为主,而以新疆和青海为代表的西部区域则始终位于低值域^[7]。

学者们开发了相对成熟的交通碳排放测算方法^[8],但大多数研究是从国家、省域尺度进行分析,忽略了中国省域内不同城市的地理位置、经济发展水平及资源禀赋差异等因素,而这些因素对交通碳

* 基金项目:重庆市社会科学规划重点项目(2020ZDZX04)

排放的时空效应有重要影响。为制定更具针对性、更精准的碳减排策略和措施,需要深入研究交通碳排放的时空效应(如大城市和小城镇之间的交通碳排放差异)及对不同地区交通运输行业能源利用情况和交通方式选择习惯等的影响。本文基于中国 284 座城市历年客货运周转量测算城市交通碳排放量历史数据,利用时空统计分析指标对中国交通碳排放特征进行刻画,并构建空间回归模型分析交通碳排放的空间溢出效应,精细化解析交通碳排放的空间交互特征。

1 交通碳排放测算方法

由于中国各地区的多样性和统计数据不完备,难以获取各城市交通运输行业的能源消耗量。本文采用“自下而上”的算法计算各省区市的交通碳排放量,主要包含货运与客运交通碳排放量。根据相关研究成果,货运交通碳排放微观模型如下:

$$C_f = V_{j,k} N_{CF,j,k} r_i \quad (1)$$

式中: C_f 为城市货运交通碳排放; $V_{j,k}$ 为货物运输周转量; j 为运输方式; k 为运输工具; $N_{CF,j,k}$ 为不同运输工具的单位能耗; r_i 为第 i 种能源的碳排放系数,包括汽油、柴油、煤油、电力。

客运交通碳排放模型如下:

$$C_{内} = S_i M_i N_{i,l} r_l \quad (2)$$

式中: $C_{内}$ 为城市客运交通碳排放; S_i 为第 i 种机动车的数量; M_i 为第 i 种机动车的行驶里程; $N_{i,l}$ 为第 i 种机动车单位行驶里程的第 l 种能源消耗量; r_l 为第 l 种能源的碳排放系数。

不同交通工具的保有量数据来源于各市统计年鉴、《中国汽车工业年鉴》、中国经济与社会发展统计数据库、历年国民经济和社会发展统计公报。各种能源的碳排放系数、平均燃料消耗来源于《IPCC2006》和《省级温室气体清单编制指南》。行驶里程来源于《中国城市统计年鉴》和历年城市交通发展年报。各种交通工具的单位能源消耗见表 1。

2 交通碳排放的时间变化趋势

根据城市碳排放测算方法,测算中国 284 座城市 2006—2017 年碳排放数据,并将其分别汇总至市级(含地级市、自治州等)、省级(含省、自治区、直辖市)和国家尺度,从多尺度视角分析中国交通碳排放时间变化趋势。

表 1 各种交通工具的单位能源消耗

运输方式	交通工具	单位能源消耗
公路运输	汽油汽车	0.076 L/(100 km)
	柴油汽车	0.060 L/(100 km)
铁路运输	电力机车	107.9 kW·h/(100 km)
	内燃机车	26.4 kg/(100 km)
	蒸汽机车	330.5 kg/(100 km)
航空运输	飞机	0.284 kg/(100 km)
	轨道交通	240 kW·h/(100 km)
	公共汽车	40 L/(100 km)
城市交通	私人汽车	9 L/(100 km)
	摩托车	2 L/(100 km)
	出租车	9 L/(100 km)

注:计算过程中,城市交通中除轨道交通采用电力驱动外,其余均采用燃油作为动力。

2.1 国家尺度下交通碳排放的时间变化趋势

国家尺度下交通碳排放分布见图 1。整体来看,中国交通碳排放呈上升趋势,2008 年达到 $4.416 5 \times 10^8$ t,2009 年出现第一次下降,之后又保持稳定增长态势;2006—2017 年交通碳排放平均增长率为 6.15%,2010 年达到巅峰,增长率为 11.72%,之后呈现下降态势。2010 年后,随着污染、拥堵等问题的加剧,公交优先战略成为减少城市交通碳排放的重要措施,通过投入大量人力、物力、财力发展多模式公共交通系统,如地铁、轨道交通、有轨电车、公交车等,有效减少了机动车的使用率和交通拥堵,城市交通碳排放增幅减缓,反映了公交优先发展对城市交通碳排放调控的有效性。

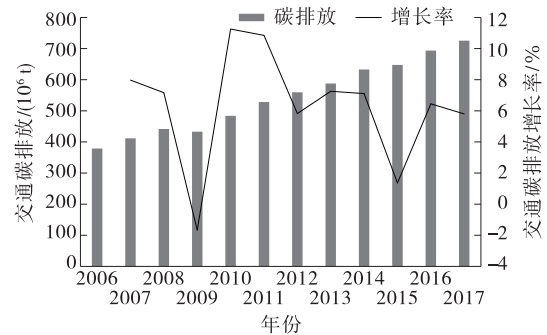


图 1 2006—2017 年中国交通碳排放的变化趋势

2.2 省域尺度下交通碳排放的时间变化趋势

图 2 为 2007—2017 年各省区市交通运输行业 CO_2 排放量的平均增长率。总体而言,各省区市交通运输行业的 CO_2 排放量平均增长速度差别很大,

经济发展水平高的区域增长速度慢,经济发展水平低的区域增长速度快。平均增长率最低的 4 个省市为北京、上海、浙江和山东,平均增长率分别为 0.21%、2.05%、4.41%、4.77%;平均增长率最高的 4 个省区为宁夏回族自治区、新疆维吾尔自治区、海南和青海,平均增长率分别为 13.57%、12.86%、

12.08%、11.71%。其原因很可能与经济发展水平较高的区域在经济发展中所处的困境有关。随着资本、技术、人才等在发达地区的持续积累,发达地区的产业结构不断调整,低排放的第三产业比例提高,同时欠发达地区也在持续进行高能耗、低技术产业的区域转移,导致碳排放量不断提高。

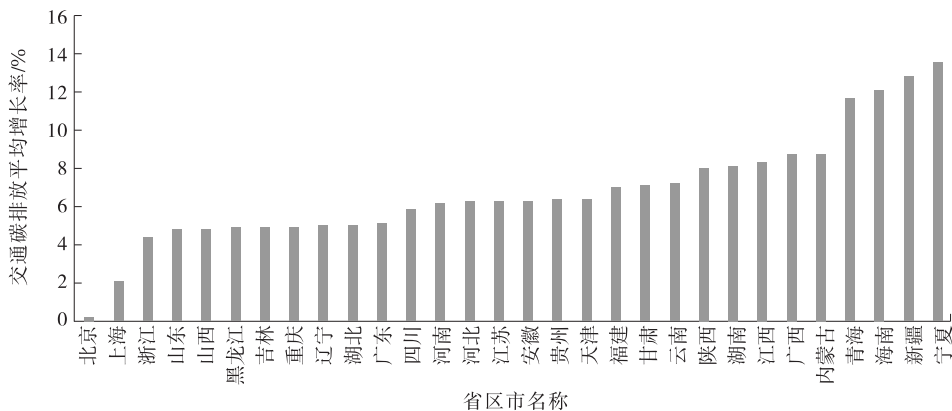
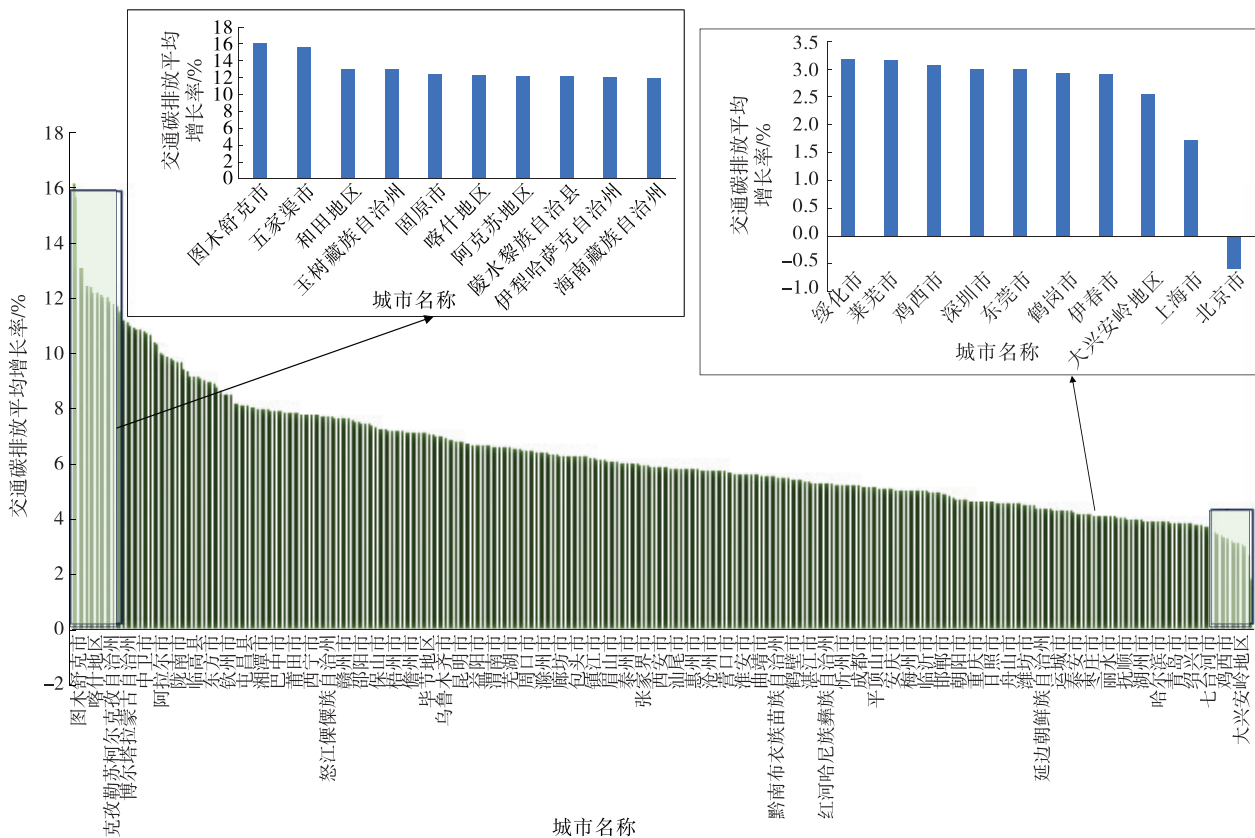


图 2 2007—2017 年省域城市交通碳排放的平均增长率

2.3 市域尺度下交通碳排放的时间变化趋势

图 3 为市级层面的交通碳排放平均增长率。与交通相关的 CO₂ 排放量的平均增长率最低的 4 座城市为北京、上海、大兴安岭和伊春,平均增长率分别

为 -0.21%、2.05%、2.60%、2.98%。平均增长率最高的 4 座城市为图木舒克、五家渠、和田和玉树藏族自治州,平均增长率分别为 16.19%、15.67%、13.12%、13.12%,前两座城市在西藏,后两座在青海。



3 交通碳排放的空间分布特征

由于研究数据在研究时间内呈现较为规律的线性变化趋势,选择两头与中间年份作为特征年,以

简明清晰地展现数据变化特征。以 2006、2012、2017 年作为代表年份,以计算得到的 284 座城市交通碳排放数据作为分析样本,各年份城市交通碳排放量排名前 20 和后 20 的数据见表 2~4。

表 2 2006 年城市交通碳排放量 单位:万 t

排名	城市名称	交通碳排放量	排名	城市名称	交通碳排放量	排名	城市名称	交通碳排放量	排名	城市名称	交通碳排放量
1	上海	11,946 382	11	青岛	3,524 293	265	舟山	0,269 292	275	商洛	0,217 203
2	重庆	6,962 269	12	沈阳	3,430 265	266	临沧	0,263 221	276	雅安	0,209 184
3	天津	5,842 514	13	邯郸	3,377 406	267	丽江	0,261 563	277	嘉峪关	0,203 792
4	苏州	5,154 749	14	保定	3,302 784	268	鹰潭	0,252 023	278	金昌	0,201 210
5	北京	4,689 532	15	广州	3,179 047	269	自贡	0,246 457	279	安康	0,196 901
6	石家庄	4,002 731	16	宁波	3,164 266	270	普洱	0,240 289	280	张家界	0,189 637
7	唐山	3,844 086	17	沧州	3,156 351	271	铜川	0,239 389	281	昭通	0,177 789
8	武汉	3,770 878	18	烟台	3,110 913	272	海口	0,232 267	282	防城港	0,169 816
9	成都	3,757 997	19	杭州	3,071 626	273	贺州	0,220 821	283	巴中	0,139 820
10	潍坊	3,579 064	20	济南	2,986 279	274	陇南	0,217 738	284	三亚	0,115 702

表 3 2012 年城市交通碳排放量 单位:万 t

排名	城市名称	交通碳排放量	排名	城市名称	交通碳排放量	排名	城市名称	交通碳排放量	排名	城市名称	交通碳排放量
1	上海	13,623 230	11	邯郸	4,949 435	265	铜陵	0,414 145	275	防城港	0,358 907
2	重庆	9,126 159	12	保定	4,947 099	266	舟山	0,413 822	276	自贡	0,347 049
3	天津	8,524 583	13	呼伦贝尔	4,946 332	267	临沧	0,411 302	277	七台河	0,344 178
4	苏州	7,734 385	14	沈阳	4,733 333	268	鹰潭	0,402 938	278	金昌	0,338 817
5	鄂尔多斯	6,410 750	15	潍坊	4,702 457	269	海口	0,390 891	279	雅安	0,316 126
6	唐山	6,265 937	16	沧州	4,670 348	270	萍乡	0,389 250	280	昭通	0,312 006
7	石家庄	5,997 773	17	郑州	4,481 959	271	普洱	0,376 026	281	嘉峪关	0,309 901
8	成都	5,447 341	18	青岛	4,369 237	272	铜川	0,372 370	282	张家界	0,301 946
9	武汉	5,288 556	19	宁波	4,230 622	273	安康	0,368 741	283	三亚	0,253 624
10	北京	5,010 753	20	南京	4,205 006	274	贺州	0,359 860	284	巴中	0,252 878

表 4 2017 年城市交通碳排放量 单位:万 t

排名	城市名称	交通碳排放量	排名	城市名称	交通碳排放量	排名	城市名称	交通碳排放量	排名	城市名称	交通碳排放量
1	上海	14,726 531	8	武汉	6,813 975	265	萍乡	0,566 822	272	铜陵	0,497 150
2	重庆	11,762 048	9	成都	6,766 677	266	临沧	0,553 749	273	普洱	0,497 004
3	天津	11,478 704	10	保定	6,564 429	267	商洛	0,552 378	274	三亚	0,495 360
4	苏州	9,701 207	11	沈阳	6,252 288	268	武威	0,549 857	275	防城港	0,486 282
5	鄂尔多斯	7,997 637	12	呼伦贝尔	6,171 470	269	铜川	0,512 394	276	七台河	0,483 461
6	唐山	7,807 623	13	沧州	6,101 192	270	贺州	0,501 352	277	金昌	0,459 105
7	石家庄	7,263 813	14	潍坊	5,992 587	271	安康	0,497 985	278	舟山	0,454 597

续表 4

排名	城市名称	交通碳排放量	排名	城市名称	交通碳排放量	排名	城市名称	交通碳排放量	排名	城市名称	交通碳排放量
15	邯郸	5.913 240	18	呼和浩特	5.458 125	279	昭通	0.451 564	282	雅安	0.406 344
16	郑州	5.688 543	19	南京	5.368 149	280	嘉峪关	0.438 597	283	张家界	0.375 367
17	青岛	5.486 533	20	长沙	5.294 089	281	自贡	0.437 536	284	巴中	0.351 917

由表 2~4 可知:中国交通碳排放呈现东高西低、北高南低的空间分布特征,且该特征具有稳定性。从区域特征来看,交通碳排放高值区域主要集中在京津冀、长三角、粤港澳与成渝地区的中心城市,低值区域主要集中在川西地区、云南、贵州、青海、甘肃等地区。从城市特征来看,上海、重庆、天津、苏州、石家庄、唐山、武汉、成都稳定排在前 10,而北京排名不断下跌,于 2017 年跌出前 10,鄂尔多斯近年来交通碳排放长期稳定在前 10。从空间分布的时间变化来看,内蒙古东部、新疆中部的城市交通碳排放呈现较快增长态势,京津冀地区城市交通碳排放呈区域性蔓延增长的趋势。

4 交通碳排放的空间关联特征分析

4.1 局部空间自相关

采用局域莫兰指数和 LISA(Local Indicators of Spatial Association)聚集来分析交通碳排放的局部空间自相关。局域莫兰指数计算公式如下:

$$I_i = \frac{n(y_i - \bar{y}) \sum_{j=1}^n w_{ij} (y_j - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} =$$

$$\frac{(y_i - \bar{y}) \sum_{j=1}^n w_{ij} (y_j - \bar{y})}{S^2} \quad (3)$$

式中: I_i 为测度城市 i 与其周围城市的空间相关性指数; n 为研究样本城市总个数; y_i 、 y_j 分别为城市 i 、城市 j 的交通碳排放量; \bar{y} 为所有城市交通碳排放量平均值; w_{ij} 为空间权重,这里采用空间距离权重; S^2 按式(4)计算。

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (4)$$

$I_i > 0$, 表示地区 i 与其周围地区呈现正相关,即表现为高-高类型集聚或低-低类型集聚; $I_i < 0$, 表示负相关,即空间特征相异的地区集聚在一起,表现为高-低类型集聚或低-高类型集聚。

表 5~8 为 2006、2012 和 2017 年中国城市及其他地区城市交通 SO_2 排放的 LISA 集聚分布。所有集聚地区都达到 5% 的显著性水平,其中:低-低集聚区表示该城市 and 周围城市均为低交通碳排放;高-高集聚区表示城市本身碳排放较高,与其相邻的城市碳排放也较高;高-低集聚区表示高碳排放区域周围还有低碳排放区域;低-高集聚区表示低碳排放区域周围还有高碳排放区域。不在表 5~8 中的城市,

表 5 特征年 LISA 集聚分布城市(低-低)

年份	低-低集聚区
2006	定西市;甘南藏族自治州;金昌市;酒泉市;陇南市;天水市;张掖市;桂林市;梧州市;白沙黎族自治县;昌江黎族自治县;澄迈县;儋州市;定安县;东方市;海口市;乐东黎族自治县;临高县;陵水黎族自治县;琼海市;三亚市;屯昌县;万宁市;文昌市;五指山市;怀化市;上饶市;果洛藏族自治州;海北藏族自治州;海南藏族自治州;海西蒙古族藏族自治州;黄南藏族自治州;西宁市;玉树藏族自治州;甘孜藏族自治州;乐山市;凉山彝族自治州;绵阳市;南充市;宜宾市;自贡市;阿克苏地区;巴音郭楞蒙古自治州;昌吉回族自治州;喀什地区;塔城地区;保山市;大理白族自治州;迪庆藏族自治州;怒江傈僳族自治州
2012	定西市;甘南藏族自治州;陇南市;张掖市;桂林市;梧州市;白沙黎族自治县;昌江黎族自治县;澄迈县;儋州市;定安县;东方市;海口市;乐东黎族自治县;临高县;陵水黎族自治县;琼海市;三亚市;屯昌县;万宁市;文昌市;五指山市;怀化市;上饶市;果洛藏族自治州;海北藏族自治州;海南藏族自治州;海西蒙古族藏族自治州;黄南藏族自治州;西宁市;甘孜藏族自治州;乐山市;凉山彝族自治州;绵阳市;南充市;宜宾市;自贡市;保山市;大理白族自治州;迪庆藏族自治州;怒江傈僳族自治州;普洱市

续表5

年份	低-低集聚区
2017	定西市;甘南藏族自治州;陇南市;武威市;张掖市;白沙黎族自治县;昌江黎族自治县;澄迈县;儋州市;定安县;东方市;海口市;乐东黎族自治县;临高县;陵水黎族自治县;琼海市;三亚市;屯昌县;万宁市;文昌市;五指山市;怀化市;上饶市;果洛藏族自治州;海北藏族自治州;海南藏族自治州;海西蒙古族藏族自治州;黄南藏族自治州;西宁市;甘孜藏族自治州;乐山市;凉山彝族自治州;绵阳市;南充市;宜宾市;自贡市;保山市;大理白族自治州;迪庆藏族自治州;丽江市;怒江傈僳族自治州

表 6 特征年 LISA 集聚分布城市(低-高)

年份	低-高集聚区
2006	承德市;濮阳市;神农架林区;十堰市;湘西土家族苗族自治州;日照市;阳泉市;广安市;资阳市;舟山市
2012	承德市;濮阳市;大兴安岭地区;神农架林区;吴忠市;日照市;枣庄市;阳泉市;广安市;资阳市;舟山市
2017	承德市;濮阳市;大兴安岭地区;神农架林区;石嘴山市;日照市;枣庄市;阳泉市;广安市;资阳市;湖州市;舟山市

表 7 特征年 LISA 集聚分布城市(高-低)

年份	高-低集聚区
2006	兰州市;南宁市;成都市;重庆市
2012	兰州市;南宁市;成都市;重庆市
2017	兰州市;南宁市;成都市;重庆市

表 8 特征年 LISA 集聚分布城市(高-高)

年份	高-高集聚区
2006	北京市;遵义市;保定市;沧州市;衡水市;廊坊市;唐山市;邢台市;张家口市;南通市;苏州市;泰州市;无锡市;滨州市;德州市;东营市;聊城市;临沂市;青岛市;泰安市;潍坊市;烟台市;枣庄市;淄博市;晋中市;吕梁市;忻州市;长治市;上海市;天津市;湖州市;嘉兴市;绍兴市
2012	北京市;遵义市;保定市;沧州市;衡水市;廊坊市;唐山市;邢台市;张家口市;南通市;苏州市;泰州市;无锡市;巴彦淖尔市;包头市;呼和浩特市;滨州市;德州市;东营市;聊城市;泰安市;潍坊市;烟台市;淄博市;晋中市;吕梁市;忻州市;长治市;榆林市;上海市;天津市;湖州市;嘉兴市;绍兴市
2017	北京市;遵义市;保定市;沧州市;衡水市;廊坊市;唐山市;邢台市;张家口市;南通市;苏州市;泰州市;无锡市;巴彦淖尔市;包头市;鄂尔多斯市;呼和浩特市;吴忠市;滨州市;德州市;东营市;聊城市;临沂市;泰安市;潍坊市;烟台市;淄博市;晋中市;吕梁市;忻州市;长治市;榆林市;上海市;天津市;嘉兴市

其碳排放区域内的空间集聚特征不显著。

总体上看,3 个特征年份中,LISA 集聚的空间

分布呈相对稳定的趋势。新疆、青海、四川西部与南部、云南西部、海南省等地区为低-低集聚区,其中新疆在后期的空间集聚效应不明显。低-低集聚区的整体社会经济发展水平较低、交通基础设施不足。高-高集聚区域主要分布在京津冀部分城市、长三角部分城市,一定程度上反映两个城市群内部城市之间经济往来密切。高-低集聚区主要分布在成渝城市群的成都与重庆,即成都与重庆碳排放都显著高于周边城市碳排放,这与成渝城市群内部城市经济发展差异较大相契合。成渝城市群的两级——重庆和成都 2020 年的 GDP 分别约为 2.5 万亿元、1.77 万亿元,在全国 GDP 城市排行榜中分别排名第 5 位、第 7 位,而城市群内部 GDP 排名第二的绵阳仅刚过 3 000 亿元,在全国 GDP 百强城市中排名第 91 位。两大中心城市与区域城市巨大的发展差异导致各种生产要素分配不平衡,体现在碳排放的差异上。从侧面反映碳排放的高低一定程度上是城市发展水平的体现。

4.2 空间溢出效应

将交通运输碳排放强度的动态效应分解为相邻(溢出)效应和增长效应,结合空间相关分析,构建各城市交通运输碳排放占全国份额变化的空间动态效应模型。交通碳排放强度空间动态面板滞后模型表达式为:

$$\ln [E_{(\text{CO}_2)_{i,t}} / \sum E_{(\text{CO}_2)_{i,t}}] = \alpha + \chi_{1i} (I_{n,t}[\eta_{(\text{CO}_2)}] \mathbf{W}) \ln \eta_{(\text{CO}_2)_{i,t-1}} + \chi_{2i} \ln \eta_{(\text{CO}_2)_{i,t}} + X\delta + \xi_{i,t} + \omega_{i,t} \quad (5)$$

$$\omega_{i,t} \sim N(0, \sigma^2), \xi_{i,t} \sim N(0, \sigma^2)$$

式中: $E_{(\text{CO}_2)_{i,t}}$ 为 i 城市第 t 年的交通碳排放量;

$E_{(\text{CO}_2)_{i,t}} / \sum E_{(\text{CO}_2)_{i,t}}$ 为 i 城市第 t 年交通碳排放量占全国的份额; α 为截距项, 代表固定效应; χ_{1i} 表示 i 城市与相邻城市间交通碳排放份额的竞合关系 ($\chi_{1i} > 0$ 为正向溢出); $I_{n,t}$ 为第 t 年对应变量局部空间自相关系数矩阵; W 为二进制空间邻接矩阵; $\eta_{(\text{CO}_2)_{i,t}}$ 为 i 城市第 t 年交通碳排放强度, $\eta_{(\text{CO}_2)_{i,t}} = E_{(\text{CO}_2)_{i,t}} / G_{\text{GDP},i,t}$; $G_{\text{GDP},i,t}$ 为 i 城市第 t 年 GDP; χ_{2i} 表

示当全国交通碳排放量增长时, 某一城市份额的变化情况 ($\chi_{2i} > 0$ 为收敛效应); X 为控制变量; δ 为控制变量作用效应 (本研究无控制变量); $\xi_{i,t}$ 、 $\omega_{i,t}$ 为随机误差项。

通过 Stata 软件进行交通碳排放强度空间溢出模型求解, 计算结果见表 9。

从城市交通碳排放的占比与交通碳排放强度空

表 9 χ_{1i} 与 χ_{2i} 数值分布

项目	城市名称
χ_{1i} 数值	
>0	淮南市; 安庆市; 黄山市; 宣城市; 嘉峪关市; 石家庄市; 邯郸市; 保定市; 荆州市; 天门市; 娄底市; 通化市; 无锡市; 徐州市; 苏州市; 南通市; 扬州市; 宜春市; 沈阳市; 抚顺市; 营口市; 鄂尔多斯市; 巴彦淖尔市; 兴安盟; 泰安市; 临沂市; 德州市; 太原市; 安康市; 攀枝花市; 泸州市; 德阳市; 绵阳市; 宜宾市; 乐山市; 红河哈尼族彝族自治州; 北京市; 上海市; 成都市
<0	天水市; 平凉市; 庆阳市; 临夏回族自治州; 阳江市; 揭阳市; 桂林市; 北海市; 钦州市; 贺州市; 东方市; 济源市; 鸡西市; 武汉市; 海北藏族自治州; 黄南藏族自治州; 海南藏族自治州; 果洛藏族自治州; 克拉玛依市; 吐鲁番地区; 昌吉回族自治州; 巴音郭楞蒙古自治州; 喀什地区; 塔城地区; 保山市; 丽江市
χ_{2i} 数值	
>0	铜陵市; 宿州市; 延安市; 成都市; 自贡市; 泸州市; 广元市; 宜宾市; 资阳市; 阿坝藏族羌族自治州; 甘孜藏族自治州; 克拉玛依市; 吐鲁番地区; 博尔塔拉蒙古自治州; 巴音郭楞蒙古自治州; 阿克苏地区; 喀什地区; 塔城地区; 阿拉尔市; 昆明市; 昭通市; 普洱市; 楚雄彝族自治州; 文山壮族苗族自治州
<0	安庆市; 黄山市; 福州市; 莆田市; 三明市; 泉州市; 深圳市; 佛山市; 梅州市; 河源市; 清远市; 东莞市; 中山市; 贺州市; 崇左市; 琼海市; 万宁市; 屯昌县; 昌江黎族自治县; 鄂州市; 荆州市; 随州市; 无锡市; 徐州市; 苏州市; 南通市; 连云港市; 淮安市; 淄博市; 东营市; 潍坊市; 济宁市

间滞后变化关系可以得出交通碳排放强度上市域尺度的竞合规律: 发达地区城市如北京、上海、成都交通碳排放对其周边城市如石家庄、苏州、宜宾等呈现正向的溢出效应 ($\chi_{1i} > 0$), 即高的交通碳排放强度会导致高的交通碳排放区域外溢。这主要是由于经济发达地区的城市之间有着紧密的产业关联, 推动交通网络的互联互通, 导致交通流量增加, 从而带动周边地区的交通碳排放份额, 交通碳排放呈现更快的发展趋势。这一规律集中反映于城市群的中心城市和周围城市之间。负向溢出效应主要集中在西北地区 ($\chi_{1i} < 0$), 说明该区域城市间交通联系程度较低。交通碳排放强度与该城市交通碳排放量占全国份额存在显著收敛效应的地区 ($\chi_{2i} > 0$) 主要集中在中西部能源输出城市, 而经济发达的沿海城市的发散效应 ($\chi_{2i} < 0$) 相对显著。

5 结论

本文运用“自下而上”法对城市交通系统碳排放进行测算, 并对其进行时间和空间分布分析、外溢效

应分析。从时间特征来看, 在国家层面, 交通碳排放总体呈上升趋势; 在市域层面, 它与省级层面上的碳排放有着类似的规律, 表现出发达地区增长缓慢、不发达地区增长速度更快的特点。在空间尺度上, 内蒙古和新疆中部地区交通运输碳排放快速增加, 而京津冀地区呈现扩散式增加。在区域尺度上, 交通碳排放具有高度的空间相关性, 且呈明显的区域集聚模式。

参考文献:

- [1] 潘自翔, 李薇, 肖娇妍. “双碳”目标下城市交通减排路径研究[J]. 公路与汽运, 2023(5): 24-28.
- [2] 武翠芳, 熊金辉, 吴万才, 等. 基于 STIRPAT 模型的甘肃省交通碳排放测算及影响因素分析[J]. 冰川冻土, 2015, 37(3): 826-834.
- [3] 宁晓菊, 张金萍, 秦耀辰, 等. 郑州城市居民交通碳排放的时空特征[J]. 资源科学, 2014, 36(5): 1021-1028.
- [4] 武红, 谷树忠, 周洪, 等. 河北省能源消费、碳排放与经济增长的关系[J]. 资源科学, 2011, 33(10): 1897-1905.

(下转第 36 页)