

目 次

中国城市碳排放强度的时空演变、动态跃迁及收敛趋势	杨清可, 王磊, 朱高立, 李颖, 范业婷, 王雅竹 (1869)
交通运输业碳排放效率时空演变及趋势预测	郑琰, 蒋雪梅, 肖玉杰 (1879)
基于扩展 STIRPAT 模型 LMDI 分解的碳排放脱钩因素	张江艳 (1888)
基于 LEAP 模型的工业园区碳达峰路径: 以南京某国家级开发区为例	李慧鹏, 李荔, 殷茵, 何文大, 宿杰, 赵秋月 (1898)
高校碳排放核算与分析: 以北京 A 高校为例	曹睿, 封莉, 张立秋 (1907)
北京市制造业减排降碳协同效应分析和驱动因素	俞珊, 韩玉花, 牟洁, 张双, 张增杰 (1917)
碳排放权交易价格与全要素生产率: 来自中国的证据	吴雪萍 (1926)
中国城市 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 时空分布特征和影响因素分析	李江苏, 段良苏, 张天娇 (1938)
2017~2021 年苏皖鲁豫交界区域 PM _{2.5} 和 O ₃ 时空变化特征及影响因素	陈伟, 徐学哲, 刘文清 (1950)
疫情管控期西安 PM _{2.5} 和 O ₃ 污染特征及成因分析	原晓红, 张强, 李琦, 谢文豪, 刘跃廷, 樊亭亭, 姜旭朋 (1963)
苏南五市秋冬季 PM _{2.5} 化学组成特征和空间差异	冯蔚, 丁峰, 尚玥, 谢鸣捷 (1975)
湖北咸宁细颗粒物 PM _{2.5} 来源	罗怡, 朱宽广, 陈璞琰, 田军, 谢旻, 战杨志豪, 赵润琪 (1983)
邢台氨减排对京津冀 PM _{2.5} 改善的溢出效益	边泽君, 闻超玉, 郎建奎, 范晓茜, 夏祥晨, 周颖 (1994)
聊城市冬季 PM _{2.5} 载带金属元素污染特征、风险评价及来源分析	张敬巧, 朱瑶, 曹婷, 燕丽, 王淑兰, 刘铮 (2003)
高原城市拉萨典型 VOCs 排放源成分谱特征	郭淑政, 叶春翔, 林伟立, 陈熠, 曾立民, 尹晴晴, 刘雪莉 (2011)
北京市工业园区 VOCs 污染特征及健康风险评估案例: 高新技术产业的环境影响	王洁, 姚震, 王敏燕, 陈速敏, 龙腾, 王海林, 李红, 郭秀锐, 郝江虹, 聂磊 (2019)
高温极端天气影响下的成都平原一次典型臭氧污染过程分析	雷丽娟, 张懿, 罗伊娜, 张潇, 冯森 (2028)
水环境中抗病毒药物的存在、行为与风险	葛林科, 李璇艳, 曹胜凯, 郑金帅, 张蓬, 朱超, 马宏瑞 (2039)
黄河小浪底水库地表水中重金属的时空变化与概率健康风险	王亮, 邓雪娇, 王潇磊, 李明, 刘奕尧, 姜亚敏, 涂响, 张坤峰 (2054)
藏东多曲河流域总富集水化学特征及控制因素	李敬杰, 连晟, 王明国, 张智印, 张涛 (2067)
西北内陆区降水稳定同位素时空分布特征及其水汽来源	张炎炎, 辛存林, 郭小燕, 张博, 陈宁, 史延飞 (2080)
基于水化学和氢氧同位素的泰安城区岩溶地下水补给来源及演化过程	孟令华 (2096)
丹江流域山区地表水-地下水水化学特征及其影响因素	张子燕, 伏永朋, 王宁涛, 谭建民, 刘亚磊 (2107)
金塔盆地鸳鸯池灌区地下水水化学特征及控制因素	王晓燕, 韩双宝, 张梦南, 尹德超, 吴玺, 安永会 (2118)
德阳市平原区浅层地下水水化学特征与健康风险评价	刘楠, 陈盟, 高东东, 吴勇, 王橹橹 (2129)
典型城市河网沉积物微塑料时空分布特征	许万璐, 范一凡, 钱新 (2142)
抚仙湖流域尺度氮排放清单构建及关键源解析	王延杰, 梁启斌, 王艳霞, 侯磊, 陈奇伯, 王伟, 李晓琳, 高俊淑 (2150)
过氧化钙/海泡石海藻酸钠缓释凝胶复合材料的制备及其对内源磷的控制性能	曲思彤, 单苏洁, 王崇铭, 吴玲予, 李大鹏, 黄勇 (2160)
矿物超细颗粒的形成机制、结构特征及其环境行为和效应	刘振海, 张展华, 袁语欣, 朱盼盼, 陈威, 张勇 (2171)
生物炭固定化菌复合材料在环境修复中的应用研究进展	孙淑玉, 黄梦鑫, 孔强, 张焕新, 刘继伟 (2185)
微塑料对沸石吸附水体氨氮的影响及其机制	练建军, 谢诗婷, 吴培, 孟冠华, 陈波 (2195)
紫外老化作用对纳米生物炭吸附环丙沙星的影响机制	马锋锋, 薛之一, 赵保卫 (2203)
土地利用影响下永定河流域浮游植物群落与环境因子响应	郭善嵩, 胡恩, 丁一桐, 张嘉渭, 孙长顺, 卢悦, 潘保柱 (2211)
鄱阳湖湿地细菌群落多样性和可培养细菌功能基因丰度	喻江, 王淳, 龙永, 刘贵花, 李春杰, 范国权, 于镇华 (2223)
典农河沉积物细菌群落结构特征及其与重金属的关系	刘双羽, 蒙俊杰, 邱小琮, 周瑞娟, 李霖 (2233)
污水处理厂尾水排放对受纳河流细菌和真菌微生物群落的影响	郭有顺, 余仲, 郝文彬, 孟凡刚 (2246)
宏基因组学分析深度处理阶段污水中细菌的赋存特征及其功能	胡健双, 王燕, 周政, 汪雅琴, 王秉政, 李激 (2259)
大别山区生境质量时空特征及自然-人为因素驱动机制	郑亚平, 张俊华, 田惠文, 朱航成, 刘舒, 丁亚鹏 (2268)
基于连续小波变换、SHAP 和 XGBoost 的土壤有机质含量高光谱反演	叶森, 朱琳, 刘旭东, 黄勇, 陈蓓蓓, 李欢 (2280)
秸秆还田、覆膜和施氮对旱地麦田土壤质量的影响	叶子壮, 王松燕, 陆潇, 史多鹏, 吕慎强, 李嘉, 杨泽宇, 王林科 (2292)
长期施用有机肥对土壤微塑料赋存及迁移特征的影响	王长远, 马啸驰, 郭德杰, 刘新红, 马艳, 罗佳 (2304)
土壤盐分变化对 N ₂ O 排放影响: 基于 Meta 分析	黄艺华, 余冬立, 史祺琦, 胡磊, 潘永春 (2313)
基于土地利用/覆被动态变化的粤港澳大湾区碳储量评价与预测	郑慧玲, 郑辉峰 (2321)
基于 InVEST 模型的伏牛山地区生态系统碳储量时空变化模拟	张哲, 时振钦, 朱文博, 孙梓欣, 赵体侠, 邓文萍, 刘志强 (2332)
防护林建设过程中土壤微生物养分限制与有机碳组分之间的关系	徐凤璟, 黄懿梅, 黄倩, 申继凯 (2342)
长期秸秆还田褐土有机碳矿化特征及其驱动力	赵宇航, 殷浩凯, 胡雪纯, 解文艳, 刘志平, 周怀平, 杨振兴 (2353)
冬绿肥覆盖对土壤团聚体及有机碳和 AMF 多样性的影响	鲁泽让, 陈佳钰, 李智贤, 李永梅, 罗志章, 杨锐, 田明洋, 赵吉霞, 范茂攀 (2363)
辽河流域氮素时空分布及其对土地利用和降雨的响应	周波, 李晓光, 童思陈, 吕旭波, 郭朝臣, 雷坤 (2373)
高强度农业种植区不同景观池塘氧化亚氮排放特征	张欣悦, 肖启涛, 谢晖, 刘臻婧, 邱银国, 罗菊花, 徐向华, 段洪涛 (2385)
生物炭与不同类型氮肥配施对菜地土壤反硝化细菌群落的影响	柳晓婉, 刘杏认, 高尚洁, 李贵春 (2394)
太岳山不同林龄人工油松林土壤微生物特征	马义淑, 曹亚鑫, 牛敏, 张明昱, 程曼, 文永莉 (2406)
基于稀疏样点的土壤重金属含量模拟方法	张佳琦, 潘瑜春, 高世臣, 赵亚楠, 景胜强, 周艳兵, 邹允兵 (2417)
基于特定源-风险评估模型的兰州黄河风情线绿地土壤重金属污染优先控制源分析	李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 台喜生, 臧飞, 陈伟, 脱新颖 (2428)
西南不同类型紫色土 pH 变化、重金属累积与潜在生态风险评估	张海琳, 张雨, 王顶, 谢军, 张跃强, 张宇亭, 王洁, 石孝均 (2440)
重庆某铁矿区周边耕地土壤重金属污染评价及来源解析	廖泽源, 李杰芹, 沈智杰, 李彩霞, 罗程钟, 梅楠, 张成, 王定勇 (2450)
金属矿区周边农田土壤与农作物重金属健康风险评估	魏洪斌, 罗明, 向奎, 查理思 (2461)
赤泥基纳米零价铁对多金属污染土壤修复效果	刘龙宇, 杨世利, 赵黄诗雨, 常凯威, 余江 (2473)
施锌对碱性土壤-小麦幼苗体系累积镉的影响	张瑶, 王天齐, 牛硕, 杨阳, 陈卫平 (2479)

交通运输业碳排放效率时空演变及趋势预测

郑琰¹, 蒋雪梅¹, 肖玉杰^{2*}

(1. 南京林业大学汽车与交通工程学院, 南京 210037; 2. 南京财经大学营销与物流管理学院, 南京 210023)

摘要: 为探索周围邻域对交通运输业碳排放效率演变的影响, 分析了交通运输业碳排放效率的时空演变特征, 并对其长期演变趋势进行预测. 首先, 采用超效率SBM模型测度我国30个省份的交通运输业碳排放效率, 利用核密度估计方法分析其随时间演变的特征; 其次, 构建传统与空间马尔可夫概率转移矩阵进一步分析了交通运输业碳排放效率的时空演变特征; 最后, 针对不同类型的省份提出相关建议. 结果表明: ①交通运输业碳排放效率的平均水平低于0.6, 但呈逐年递增的趋势, 且区域差异逐渐缩小. ②各省份交通运输业碳排放效率至少有71%的概率维持原有状态, 且短期内难以实现跨阶段转移. ③地理空间格局影响交通运输业碳排放效率的演变过程, 当某省份与碳排放效率高的省份相邻时, 转移到高效率的概率增加, 而与碳排放效率低的省份相邻时则相反. 此外, 在空间溢出效应的影响下, 交通运输业碳排放效率的演变逐渐呈现“俱乐部收敛”的趋势. ④从长期演变趋势来看, 各省份交通运输业碳排放效率向高水平转移的可能性增大, 呈现出由低到高递增的态势, 同时“俱乐部收敛”现象逐渐消失.

关键词: 交通运输业; 碳排放效率; 超效率SBM模型; 空间马尔可夫链模型; 时空演变; 趋势预测

中图分类号: X24 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)04-1879-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202305261

Spatio-temporal Evolution and Trend Prediction of Transport Carbon Emission Efficiency

ZHENG Yan¹, JIANG Xue-mei¹, XIAO Yu-jie^{2*}

(1. College of Automobile and Traffic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. School of Marketing and Logistic Management, Nanjing University of Finance and Economics, Nanjing 210023, China)

Abstract: In order to explore the influence of the surrounding neighborhood on the evolution of the carbon emission efficiency of the transportation industry, the temporal and spatial evolution characteristics of the carbon emission efficiency of the transportation industry were analyzed, and its long-term evolution trend was predicted. Firstly, the carbon emission efficiency of the transportation industry in 30 provinces of China was assessed using the highly efficient SBM model. Subsequently, the characteristics of carbon emission efficiency over time were analyzed using the nuclear density estimation method. Furthermore, the temporal and spatial evolution characteristics of carbon emission efficiency within the transportation industry were analyzed by utilizing both the traditional and spatial Markov probability transition matrix. Finally, relevant recommendations for different types of provinces were presented based on the above analysis. The results indicated that: ① the average carbon emission efficiency level within the transportation industry remained below 0.6. However, there was a gradual annual increase observed in this efficiency, and the regional disparities were gradually diminishing. ② There was a minimum probability of 71% that the carbon emission efficiency of the transportation industry in each province would maintain its original state, and it was difficult to achieve cross-stage transfer in the short term. ③ The evolution of carbon emission efficiency within the transportation industry was influenced by geographical and spatial patterns. When a province was neighboring a province with high carbon emission efficiency, there was an increased probability of transitioning towards higher efficiency. Conversely, when adjacent to a province with low carbon emission efficiency, the probability of transferring to higher efficiency decreased. Moreover, due to the impact of the spatial spillover effect, the evolution of carbon emission efficiency within the transportation industry gradually exhibited a “club convergence” trend. ④ From the perspective of long-term evolution, the possibility of transferring the carbon emission efficiency of the transportation industry in various provinces to a high level increased and exhibited an increasing trend from low to high. Simultaneously, the phenomenon of “club convergence” gradually disappeared.

Key words: transportation industry; carbon emission efficiency; super efficient SBM model; spatial Markov chain model; spatio-temporal evolution; trend prediction

全球变暖对人类社会的可持续发展构成了严重威胁, 尽管已经实施了《联合国气候变化框架公约》、《京都议定书》和《巴黎协定》等一些国际法律文件来减少碳排放, 但二氧化碳作为全球变暖的主要原因, 其排放量仍在持续增加^[1,2]. 因此, 实现二氧化碳快速峰值和净零排放已成为国际社会不可避免的现实问题^[3]. 我国政府于2020年9月制定了“双碳”战略目标, 根据该目标, 我国将争取在2030年实现碳排放的峰值, 而在2060年实现碳排放的全面中和^[4-6]. 作为我国国民经济的基础性和支撑性产业, 交通运输业具有高能耗和高污染的特点^[7],

政府间气候变化专门委员会(IPCC)称若不及时采取有效的政策和措施, 到2100年与交通运输相关的二氧化碳排放量将增加两倍^[8]. 在此背景下, 减少能源使用和相关排放已成为我国交通运输业的重要任务.

鉴于减少交通运输业碳排放对于缓解全球气候变化至关重要, 许多学者从不同角度对交通运输业碳排放开展了研究. 蒋自然等^[9]通过构建三阶段DEA

收稿日期: 2023-05-30; 修订日期: 2023-07-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(71871111, 72271116)

作者简介: 郑琰(1983~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为低碳交通与环境经济, E-mail: yanzheng@njfu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: yujiexiao@nufe.edu.cn

模型对长江经济带交通碳排放效率值进行了评价与比较,总结出碳排放效率的空间格局以及演化特征,提出交通碳排放的治理要因地制宜. Liu 等^[6]的研究引入了扩展的 STIRPAT 和 GTWR 模型,旨在探索影响交通运输业碳排放强度变化的驱动因素的时空异质性,通过该研究,可以清楚地了解影响区域碳排放强度差异的原因,并为政府制定区域低碳交通政策提供参考. Zhao 等^[8]和 Dong 等^[10]的研究表明,我国大部分省份的交通运输碳排放效率仍有很大的提升空间,基础设施建设和技术进步可以有效促进碳排放效率的提高. 马奇飞等^[11]创新性地将社会发展指数纳入到综合交通运输效率指标体系中,发现我国综合交通运输效率总体水平较低,空间异质性显著. 周琪等^[12]从交通运输业的子部门出发,利用超效率 SBM 模型以及 GML 指数从静态和动态两方面综合分析了 23 个省会城市轨道交通碳排放效率,旨在探索城市轨道交通的绿色发展路径. 杨绍华等^[13]的研究表明,提升技术水平对减少长江经济带交通碳排放起到积极作用,并通过采用泰尔指数揭示了长江经济带交通碳排放量的区域差异. Ferrer 等^[1]和 Liu 等^[14]对以往文献进行了梳理并提供了分析框架,阐明了交通运输领域碳排放现状,为深入理解交通运输业碳排放的问题提供了重要的文献支持. Sun 等^[2]利用 EXIOBASE 最新的世界投入产出表,采用环境扩展的多区域投入产出模型和结构路径分析模型,从全球、区域、传输层和最终需求结构的角度研究了交通运输业的需求侧减排绩效,为提高交通运输业的减排绩效提供了重要参考. Lu 等^[7]利用泰尔指数分析了区域差异,并运用 LMDI 从二氧化碳排放量、二氧化碳排放强度和单位转换运输周转量这 3 个方面分解了平均二氧化碳排放的影响因素,其研究结果表明,政府应转变经济发展方式,优化能源结构,提高运输效率,并根据实际情况制定差异化政策. 上述研究为了解交通运输业碳排放效率的影响因素、时空异质性以及减排政策的制定提供了重要的理论支持.

然而,上述对于交通运输业碳排放效率的研究

多集中于单一的碳排放效率测度^[8,15,16]、空间特征^[7,9,11]及影响因素^[12,17]等方面,探讨交通运输业碳排放效率时空演变及其长期演变趋势的研究尚不多见^[18]. 由于交通运输业碳排放效率的演变受地理环境及经济发展状况的影响,呈现出时空差异,因此,在探索交通运输业碳排放效率的时空演变过程时,有必要考虑周围邻域对其演变的影响. 鉴于此本文以全国 30 个省份为研究对象,通过超效率 SBM 模型测算出 2006~2020 年各省份交通运输业的碳排放效率,利用核密度估计的方法总结不同区域的碳排放效率分布规律及演化模式. 在此基础上,通过构建传统与空间马尔科夫链转移概率矩阵,分析了交通运输业碳排放效率的时空发展趋势和空间分布特征,并预测了其长期的演变趋势,通过深入探讨交通运输业碳排放效率在长期演变过程中周围邻域对其自身演变的影响,以期为各地区制定和实施有针对性的差异化低碳交通发展策略提供重要的政策参考.

1 材料与方法

1.1 数据来源与指标体系构建

本文研究重点是交通运输业的碳排放效率,以省份分析为例,覆盖全国 30 个省份(中国香港、澳门、台湾和西藏数据暂缺). 本研究期间为 2006~2020 年,因 2006 年为我国“十一五”计划的开始之年,故将 2006 年作为起始年份,鉴于数据的可得性,选择 2020 年为终止年份. 在先前研究的基础上^[9,11,19~21],结合我国交通运输业的实际发展状况构建交通运输业评价指标体系,如表 1 所示. 为消除通货膨胀的影响将交通运输业增加值与交通运输业固定资产投资折算为 2006 年的不变价格,其中固定资产投资价格指数自 2019 年之后不再公布,本文参考单豪杰等^[22]的方法计算出 2020 年的固定资产投资价格指数用以计算交通运输业实际固定资产投资^[23]. 投入产出指标体系的数据均来自国家统计局、《中国能源统计年鉴》(2007~2021 年)、《中国统计年鉴》(2007~2021 年)和《中国固定资产投资统计年鉴》(2007~2021 年).

表 1 交通运输业碳排放效率指标体系

Table 1 Carbon emission efficiency index system of transportation industry

指标	二级指标	三级指标	单位
投入指标	劳动力	交通运输业从业人员	万人
	资本	交通运输业固定资产投资	亿元
	能源	交通运输业终端能源消耗量(以标准煤计)	万 t
产出指标	期望产出	交通运输业产业增加值	亿元
	非期望产出	交通运输业 CO ₂ 排放量(以标准煤计)	万 t

1.2 研究方法

1.2.1 超效率SBM模型

在Tone^[24,25]两次改进DEA方法后,超效率SBM模型已成为计算碳排放效率的重要方法,这种方法不仅可以测量松弛变量,还可以评估效率值为1的单元^[26,27].因此,本文使用具有非期望的产出的超效率SBM模型来解决问题. x 和 y 分别表示投入和产出变量, y^g 和 y^b 分别表示期望产出和非期望产出, m 和 s 分别表示投入和产出变量的数量(s_1 和 s_2 分别表示期望产出变量和非期望产出变量的数量,即 $s_1 + s_2 = s$).矩阵 X 、 Y^g 和 Y^b 可以定义为: $X = (x_{ij}) \in R^{m \times n} \neq Y^g = (y_{ij}^g) \in R^{s_1 \times n}$ 和 $Y^b = (y_{ij}^b) \in R^{s_2 \times n}$; X 、 Y^g 和 Y^b 根据实际的投入和产出值设置为大于0,生产可能性集定义为: $P = \{(x, y^g, y^b) | x \geq X\lambda, y^g \geq Y^g\lambda, y^b \leq Y^b\lambda, \lambda \geq 0\}$,其中 X 、 Y^g 和 Y^b 分别表示投入、期望产出和非期望产出的矩阵,模型的表达式如下:

$$\rho^* = \min \frac{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \bar{x}_i}{\frac{1}{s_1 + s_2} \left(\sum_{r=1}^{s_1} \bar{y}_r^g + \sum_{r=1}^{s_2} \bar{y}_r^b \right)} \quad (1)$$

$$s.t. \begin{cases} \bar{x} \geq \sum_{j=1, \neq 0}^n \lambda_j x_j \\ \bar{y}^g \leq \sum_{j=1, \neq 0}^n \lambda_j y_j^g \\ \bar{y}^b \geq \sum_{j=1, \neq 0}^n \lambda_j y_j^b \\ \bar{x} \geq x_k, \bar{y}^g \leq y_k^g, \bar{y}^b \geq y_k^b, \bar{y}^g \geq 0, \bar{y}^b \geq 0, \lambda \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中, ρ 表示交通运输业碳排放效率; n 表示决策单元的个数即文中省份个数; $\bar{x}_j$ 、 $\bar{y}_j^g$ 和 $\bar{y}_j^b$ 分别表示被评估单元的投入、期望产出和非期望产出量; λ 表示权重向量; m 、 s_1 和 s_2 分别表示决策单元的投入变量、期望产出变量和非期望产出变量的指标数量; $\bar{x}_i$ 、 $\bar{y}_i^g$ 和 $\bar{y}_i^b$ 分别表示投入要素、期望产出要素和非期望产出要素的松弛变量; x_{ik} 、 y_{ik}^g 和 y_{ik}^b 分别表示改进后的决策单元中最优的投入量、期望产出量和非期望产出量。

1.2.2 核密度估计

采用核密度估计方法来解释我国交通运输业碳排放效率的分布模式和演变特征,公式(3)和公式(4)显示了核密度估计的方程^[28].

$$f(x) = \frac{1}{Nh} \sum_{i=1}^N K\left(\frac{X_i - \bar{X}}{h}\right) \quad (3)$$

$$K(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} \quad (4)$$

式中, $f(x)$ 表示密度函数; N 表示观测的样本数量; $K(x)$ 表示核函数; X_i 表示具体观测值; $\bar{X}$ 表示平均

值; h 表示带宽.

1.2.3 空间马尔可夫链模型

马尔科夫链模型用于通过初始概率和相互转移概率来确定所有状态类型对象的变化趋势,本文首先利用传统马尔科夫链模型,基于我国交通运输业碳排放效率构建一个 $N \times N$ 的马尔可夫转移概率矩阵(表2),进而探讨交通运输业碳排放效率的动态演化特征^[21].某省份交通运输业碳排放效率从 t 年的状态 E_i 转移至 $t+1$ 年的状态 E_j 的转移概率为:

$$P_{ij}(E_i \rightarrow E_j) = \frac{n_{ij}}{n_i} \quad (5)$$

式中, P_{ij} 表示某省份交通运输业碳排放效率从 t 年的状态 E_i 转移至 $t+1$ 年的状态 E_j 的转移概率,并且转移频率可以用来表示交通运输业碳排放效率的转移概率; n_{ij} 表示 i 级至 j 级省份的总数;当交通运输业碳排放效率从状态 E_i 转移到状态 E_j 时, n_i 表示状态 E_i 处于 i 级的省份数量.

表2 马尔科夫链状态转移概率矩阵¹⁾

Table 2 Markov transition probability matrix

$t/(t+1)$	1	2	3	4
1	P_{11}	P_{12}	P_{13}	P_{14}
2	P_{21}	P_{22}	P_{23}	P_{24}
3	P_{31}	P_{32}	P_{33}	P_{34}
4	P_{41}	P_{42}	P_{43}	P_{44}

1) $N=4$; t 表示初始年份, $t+1$ 表示初始年份的下一年份

空间马尔科夫链模型是在传统马尔科夫链模型的基础上,将“空间滞后”引入马尔科夫概率转移矩阵,该参数用于探索地理空间中相邻对象相同属性值的影响.通过设置空间权重矩阵,可以将 $N \times N$ 马尔科夫链转移概率矩阵分解为 $N \times N \times N$ 的转移概率矩阵(表3), $P_{ij}(N)$ 表示当评估单元的滞后类型为 N_i 时,交通运输业碳排放效率从 t 年的状态 E_i 到 $t+1$ 年的状态 E_j 的转移概率,以揭示空间效应对交通运输业碳排放效率的影响.评估单元的空间滞后类型可以根据其空间滞后值来确定,该空间滞后值是评估单元的相邻区域的属性值的空间加权平均值,具体表达式如下:

$$\text{Lag} = Y_i W_{ij} \quad (6)$$

式中, Lag 表示评估单元 i 的空间滞后值; Y_i 表示评估单元 i 的属性值; W_{ij} 表示评估单元与相邻区域之间的关系矩阵.

经过长时间转移后,系统会达到终极状态,即此时状态不会受时间的影响而发生改变,此时的概率分布称之为平稳分布.通过计算马尔可夫转移概率矩阵的极限,可以求出随机过程的平稳分布,从而预测交通运输业的碳排放效率的动态演变趋势^[26].

表3 空间马尔科夫链状态转移条件概率矩阵¹⁾
Table 3 Spatial Markov transition probability matrix

空间滞后	$t/(t+1)$	1	2	3	4
1	1	$P_{11/1}$	$P_{12/1}$	$P_{13/1}$	$P_{14/1}$
	2	$P_{21/1}$	$P_{22/1}$	$P_{23/1}$	$P_{24/1}$
	3	$P_{31/1}$	$P_{32/1}$	$P_{33/1}$	$P_{34/1}$
	4	$P_{41/1}$	$P_{42/1}$	$P_{43/1}$	$P_{44/1}$
2	1	$P_{11/2}$	$P_{12/2}$	$P_{13/2}$	$P_{14/2}$
	2	$P_{21/2}$	$P_{22/2}$	$P_{23/2}$	$P_{24/2}$
	3	$P_{31/2}$	$P_{32/2}$	$P_{33/2}$	$P_{34/2}$
	4	$P_{41/2}$	$P_{42/2}$	$P_{43/2}$	$P_{44/2}$
3	1	$P_{11/3}$	$P_{12/3}$	$P_{13/3}$	$P_{14/3}$
	2	$P_{21/3}$	$P_{22/3}$	$P_{23/3}$	$P_{24/3}$
	3	$P_{31/3}$	$P_{32/3}$	$P_{33/3}$	$P_{34/3}$
	4	$P_{41/3}$	$P_{42/3}$	$P_{43/3}$	$P_{44/3}$
4	1	$P_{11/4}$	$P_{12/4}$	$P_{13/4}$	$P_{14/4}$
	2	$P_{21/4}$	$P_{22/4}$	$P_{23/4}$	$P_{24/4}$
	3	$P_{31/4}$	$P_{32/4}$	$P_{33/4}$	$P_{34/4}$
	4	$P_{41/4}$	$P_{42/4}$	$P_{43/4}$	$P_{44/4}$

1) $N=4$; t 表示初始年份, $t+1$ 表示初始年份的下一年份

按照极限的定义有:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \omega(k) = \lim_{k \rightarrow \infty} \omega(k+1) = \omega \quad (7)$$

将公式(7)代入马尔科夫预测模型的递推公式得:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \omega(k+1) = \lim_{k \rightarrow \infty} \omega(k)P \quad (8)$$

式中, ω 表示马尔科夫过程演变的终极状态矩阵; 终极状态矩阵满足的条件为: $\omega = \omega P$, $0 \leq \omega \leq 1$,

$\sum_{i=1}^n \omega_i = 1$. 计算空间马尔科夫过程最终状态的方法可参照传统马尔科夫链, 根据其原理计算在不同空间滞后的条件下马尔科夫过程的最终状态, 以此来预测在考虑空间滞后时其马尔科夫过程的演变趋势^[29].

2 结果与讨论

2.1 交通运输业碳排放效率测算及时间序列分析

本文利用超效率SBM模型测算2006~2020年我国30个省份的交通运输业碳排放效率, 并计算各年份碳排放效率的平均值, 对不同区域交通运输业碳排放效率均值进行对比分析(图1)^[26], 结果如下.

(1)由图1可知, 我国交通运输业碳排放效率呈逐年递增的态势. 这主要得益于在“十一五”到“十三五”期间, 国家实施了一系列有助于交通运输业绿色发展的政策, 如: 推广使用低排放和新能源汽车, 发展公共交通和非机动交通, 推动绿色物流和智能交通等, 大幅度提升了交通运输业的碳排放效率.

(2)“十一五”期间交通运输业碳排放效率呈现出中部 > 东部 > 西部的态势, 但东部地区与中部

地区碳排放效率差距较小, 进入“十二五”期间后, 碳排放效率呈东部 > 中部 > 西部的态势, 且东部地区的碳排放效率明显高于中部地区, 主要是因为东部地区大多属于沿海省份, 交通便利, 经济水平高, 且技术水平相对比较先进, 使得交通运输业的发展速度快于其他区域.

(3)全国交通运输业碳排放效率的平均水平低于0.6, 说明我国交通运输业碳排放效率整体水平不高, 进步空间较大; 各区域的碳排放效率值存在一定的差异, 表明我国交通运输业碳排放效率存在空间异质性.

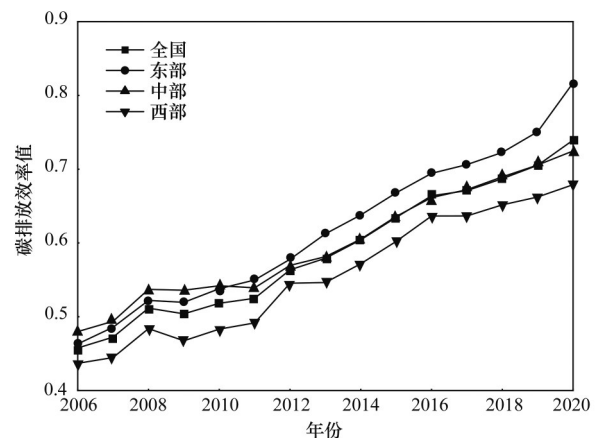


图1 2006~2020交通运输业碳排放效率走势

Fig. 1 Carbon emission efficiency trend of transportation industry from 2006 to 2020

为进一步探索交通运输业碳排放效率随时间演变特征, 选取2006年、2011年、2016年和2020年为观测年份, 对交通运输业碳排放效率进行核密度估计(图2), 据此总结出交通运输业碳排放效率随时间的演变特征^[30,31]: 首先, 从核密度曲线重心位置的变化来看, 全国、东部、中部和西部重心均向右迁移, 表明全国及不同地区交通运输业碳排放效率不断提高, 呈现出良好的发展态势. 其次, 从曲线主峰角度来看, 全国、东部、中部及西部主峰位置也向右迁移, 表明全国及各地区的碳排放效率均衡性增大, 呈现出较高的收敛性. 东部地区波峰高度持续下降, 宽度不断增大, 表明东部地区的碳排放效率平衡程度有所提高. 而全国、中部及西部波峰高度波动上升表明全国、中部及西部交通运输业碳排放效率差异虽有所减小, 但存在波动变化. 最后从全国范围来看, 交通运输业碳排放效率在2011年与2016年呈现轻微的两级分化现象, 在2006年与2020年出现明显的双峰现象, 且第一波峰明显高于第二波峰, 但两波峰的差距逐渐缩小, 说明在研究期间内低碳排放效率省份的比重始终高于高碳排放效率的比重, 且这种差异呈现逐年缩小的趋势.

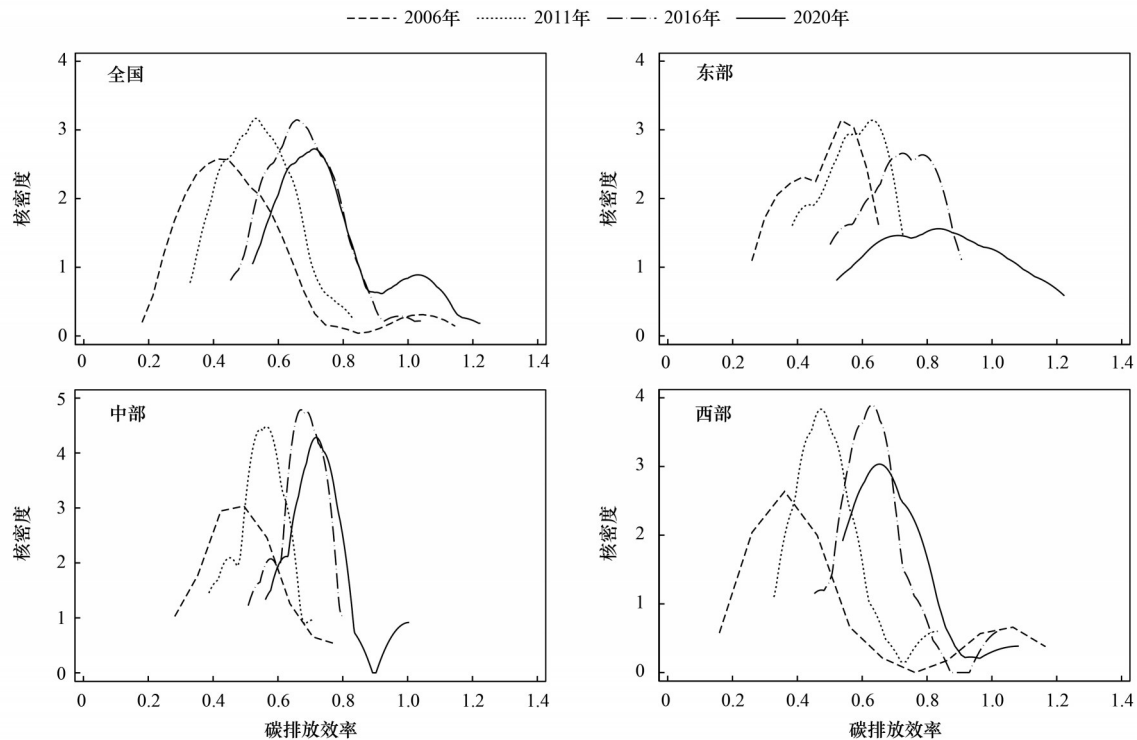


图2 交通运输业核密度估计

Fig. 2 Kernel density estimation of carbon emission efficiency of transportation industry

2.2 交通运输业碳排放效率时空演变特征

2.2.1 交通运输业碳排放效率时间演变特征

为深入了解交通运输业碳排放效率的时间演变特征,对交通运输业碳排放效率进行时间序列分析与核密度估计,从而得到碳排放效率随时间变化的走势以及演变差异.为进一步研究其演变特征,构建传统马尔科夫链转移概率矩阵(表2).根据四分位数划分标准,将2006~2020年间30个省份的交通运输业碳排放效率分为4种状态:低效率(0.246 4, 0.497 6]、较低效率(0.497 6, 0.591 2]、较高效率(0.591 2, 0.706 2]和高效率(0.706 2, 1.223 2],并用 $N=1,2,3,4$ 分别表示这4种状态^[26].

表4为2006~2020年交通运输业碳排放效率的马尔可夫概率转移矩阵,从中可知:首先,在维持状态稳定方面,对角线4种状态的概率均显著高于非对角线上的概率,最小值为0.710 3,表明在未来的演化过程中,各省份交通运输业碳排放效率至少有71%的概率维持原有状态.其次,在极值收敛性方面,对角线两端(类型1和类型4)的碳排放效率高于一端(类型2和类型3),表明碳排放效率趋于凝聚到一个高(低)水平,存在明显的“俱乐部收敛现象”现象.然后,在状态转移方面,非对角线上的最大概率(0.028 0)明显低于对角线上的最小概率(0.710 3),表明短期内很难实现跨阶段转移.最后,在状态转移预测方面,类型2转移到类型1的概率小

于类型2转移到类型3的概率,同时类型3转移到类型2的概率小于类型3转移到类型4的概率,即: $P_{21}(0.028\ 0) < P_{23}(0.243\ 0)$ 、 $P_{32}(0.047\ 6) < P_{34}(0.171\ 4)$,由此可知交通运输业碳排放效率转移到低状态的概率很低.

表4 2006~2020年交通运输业碳排放效率的马尔可夫概率转移矩阵¹⁾

Table 4 Markov matrix for carbon emission efficiency of transportation industry from 2006 to 2020

n	$t/(t+1)$	1	2	3	4
113	1	0.805 3	0.185 8	0	0.008 8
107	2	0.028 0	0.710 3	0.243 0	0.018 7
105	3	0	0.047 6	0.781 0	0.171 4
95	4	0.010 5	0.021 1	0.042 1	0.926 3

1) t 表示初始年份, $t+1$ 表示初始年份的下一年份, n 表示该类型的省份总数,空白处表示没有该转移路径

2.2.2 交通运输业碳排放效率空间演变特征

为直观了解交通运输业碳排放效率的空间分布,绘制30个省份(中国香港、澳门、台湾和西藏数据暂缺)的交通运输业碳排放效率空间分布(图3)^[5],由图3可知:2006~2020年间我国交通运输业碳排放效率明显提高,进入2016年后已无低值区域(0.2~0.4),这得益于国家对交通运输业的支持以及绿色发展政策的实施.碳排放效率提升显著的省份主要集中在东部地区,东部地区多为平原地带,交通发达,具有深厚的发展基础.中部地区碳排放效率

发展较稳定无大幅度提升或下降.而西部地区碳排放效率虽有提升,但提升速度较慢.其原因为西部地区地形复杂,交通系统不够完善,地多人少限制经济发展,导致经济发展水平较低,技术相对落

后.总体上呈现出东高西低的空间格局.山东、河北、江苏和广东等省份率先进入高值区(0.8~1.3),以上省份的共同特点是资源丰富,临近海域,海运便利且经济发展水平较高.

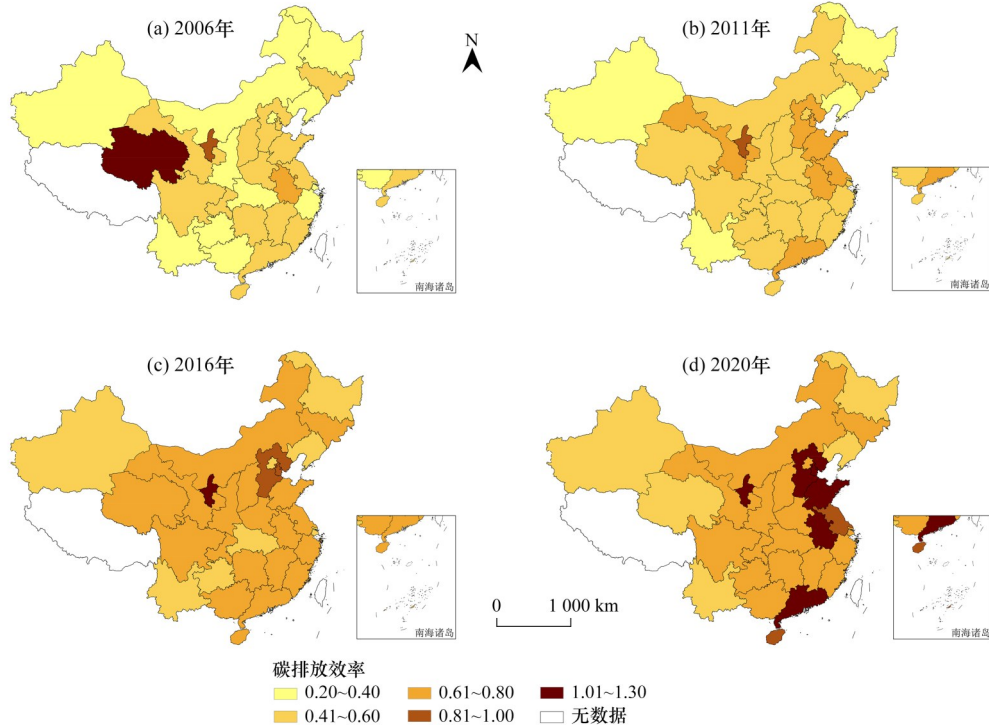


图3 2006~2020年中国交通运输业碳排放效率分布

Fig. 3 Carbon emission efficiency distribution of China's transportation industry from 2006 to 2020

传统马尔可夫概率转移矩阵与空间马尔可夫概率转移矩阵相比,没有考虑地理环境因素对状态类型转移的影响.因此,将基于地理距离的空间权重矩阵引入到传统马尔科夫链中,并根据初始年份每个省份的空间滞后类型构建空间马尔科夫链转移概率矩阵(表5),根据计算结果可得如下结论.

(1)地理空间格局影响碳排放效率的动态演变过程.在传统的马尔科夫链转移概率矩阵中,从类型3转移到类型4的概率为0.171 4,用 $P_{34} = 0.171 4$ 表示.在空间马尔科夫链转移概率矩阵中,当一个省份与类型2的省份相邻时,从类型3转移到类型4的概率为0.152 0($P_{34/2} = 0.125 0$),低于传统马尔科夫链测量的结果;相反,若一个省份与类型3的省份相邻时 $P_{34/3} = 0.200 0$,则高于传统马尔科夫链测量的结果.因此,地理空间格局对中国交通运输业的碳排放效率的动态演化具有显著的影响.

(2)地理空间格局影响碳排放效率的动态转移过程.当一个省份与碳排放效率高的省份相邻时其向高状态转移的概率增加,与碳排放效率低的省份相邻时,与之相反.例如: $P_{21/1} = 0.055 6 > P_{21} = 0.028 0 > P_{21/2} = 0.025 0$; $P_{23/2} = 0.200 0 < P_{23} =$

$0.243 0 < P_{23/3} = 0.393 9$.

(3)交通运输业的碳排放效率与区域碳排放效率类型之间呈现协同关系.当某个省份与类型1的省份相邻时,在 t 时段,该省份的状态类型为类型1的概率明显高于其他类型的概率;类似地,当某个省份与类型4的省份相邻时,在 t 时段,该省份的状态类型为类型4的概率也明显高于其他类型的概率.

由上述分析可知,空间溢出效应在交通运输业的碳排放效率的动态演化过程和动态转移过程中起到重要作用.为验证地理空间格局对交通运输业碳排放效率的影响是否具有统计学上的显著意义,借助假设检验的方法来验证空间滞后效应在统计学上是否显著.假设交通运输业碳排放效率类型的转移在空间上相互独立且与邻域状态类型无关,其检验公式为^[29]:

$$Q_b = -2 \log \left\{ \prod_{l=1}^k \prod_{i=1}^k \prod_{j=1}^k \left[\frac{M_{ij}}{m_{ij}(l)} \right]^{n_{ij}(l)} \right\} \quad (9)$$

式中, Q_b 表示统计量, Q_b 服从自由度为 $k(k-1)^2$ 的卡方分布; k 表示交通运输业碳排放效率状态类型数量; M_{ij} 、 $m_{ij}(l)$ 和 $n_{ij}(l)$ ($l=1,2,\dots,k$)分别表示传统马

尔可夫转移概率、邻域类型为 l 时的空间马尔可夫转移概率和邻域状态为 l 时所研究的空间马尔可夫省份数量；未调整自由度的情况下，自由度为 36，在 $\alpha = 0.005$ 的置信水平下， $Q_0 = 91.30 > \chi^2(40) = 66.77$. 因此拒绝接受交通运输业碳排放效率类型转移在空间上是互相独立的假设.

表 5 2006~2020 年交通运输业碳排放效率的空间马尔可夫概率转移矩阵¹⁾
Table 5 Spatial Markov matrix for carbon emission efficiency of transportation industry from 2006 to 2020

领域类型	n	$t/(t+1)$	1	2	3	4
1	26	1	0.769 2	0.192 3	0	0.038 5
	18	2	0.055 6	0.666 7	0.222 2	0.055 6
	4	3	0	0.500 0	0.250 0	0.250 0
	5	4	0	0	0.400 0	0.600 0
2	57	1	0.824 6	0.175 4	0	0
	40	2	0.025 0	0.750 0	0.200 0	0.025 0
	32	3	0	0.062 5	0.812 5	0.125 0
	19	4	0.052 6	0.105 3	0.105 3	0.736 8
3	29	1	0.827 6	0.172 4	0	0
	33	2	0.030 3	0.575 8	0.393 9	0
	50	3	0	0.020 0	0.780 0	0.200 0
	50	4	0	0	0	1
4	1	1	0	1	0	0
	16	2	0	0.937 5	0.062 5	0
	19	3	0	0	0.842 1	0.157 9
	21	4	0	0	0	1

1) t 表示初始年份, $t+1$ 表示初始年份的下一年份, n 表示该类型的省份总数, 空白处表示没有该转移路径

上述演化特征表明，在空间溢出效应的驱动下，交通运输业碳排放效率在地理空间中逐渐出现“俱乐部收敛”现象. 随着城市化率和经济水平的提高，以及信息化和城市基础的不断发展，城市之间的要素流动加快，空间溢出效应对交通运输业碳排放效率的影响将更加显著^[21,26].

2.3 交通运输业碳排放效率时空演变的趋势预测

通过对马尔可夫转移的极限分布进行分析，可以预测出某事物演变的长期发展趋势，即通过计算交

通运输业碳排放效率状态类型的 n 步概率转移矩阵 ($n \rightarrow \infty$ 时得状态转移的极限分布)，可以预测出未来交通运输业碳排放效率的发展趋势. 如表 6 所示，与初始状态相比，终极状态显示出类型 1 和类型 2 的省份数量减少，而类型 3 和类型 4 的省份数量增加. 说明随着时间的推移，中国各省份交通运输业碳排放效率将逐渐提升，只有极少数省份处于低效率和较低效率水平 (4.87% 和 11.42%)，表明“俱乐部收敛”现象将不复存在，而是呈现出由低到高递增的局面.

表 6 2006~2020 年交通运输业碳排放效率的演变趋势预测
Table 6 Evolution trend prediction for carbon emission efficiency of transportation industry from 2006 to 2020

状态类型		1	2	3	4
不考虑空间滞后	初始状态	0.600 0	0.266 7	0.033 3	0.100 0
	终极状态	0.048 7	0.114 2	0.241 2	0.596 0
考虑空间滞后	终极状态	1	0.103 1	0.428 1	0.245 8
		2	0.104 0	0.267 6	0.408 8
		3	0	0	0
		4	0	0	0

由于地理环境因素会对碳排放效率产生一定的影响，在考虑空间滞后的情况下，与不同类型的省份相邻将导致交通运输业碳排放效率的演变趋势出现差异. 从长期来看，当一个省份与低碳排放效率 (类型 1) 的省份为邻时，较低效率类型的省份数量 (42.81%) 明显多于其他类型的省份，呈现出明显的“单峰”式分布. 这表明与类型 1 相邻在一定程度上抑制碳排放效率的提高. 而当与较低碳排放效率 (类

型 2) 的省份为邻时，处于高水平 (类型 3 和类型 4) 的省份数量明显多于低水平 (类型 1 和类型 2) 的省份数量. 这显示出在该地理背景下，交通运输业碳排放效率长期提升的潜力巨大. 另外，当一个省份与高水平 (类型 3 类型 4) 类型的省份相邻时，其保持高碳排放效率类型 (类型 4) 的概率均为 1，表明与高水平 (类型 3 和类型 4) 省份相邻，可显著提高该省份交通运输业的碳排放效率，同时增加向高水平类型转

移的可能性,有效阻止其向低水平类型转移^[26,29]。

3 结论

(1)从时间演化特征来看,2006~2020年我国交通运输业碳排放效率呈上升趋势且东部地区上升的速度明显高于其他地区,但碳排放效率整体水平较低,有较大的提升空间。基于核密度估计得出不同地区的交通运输业碳排放效率的演变特征,为制定和优化低碳发展策略提供了重要的参考依据。

(2)从空间演化特征来看,通过对传统马尔可夫转移概率矩阵进行分析可知,各省份交通运输业碳排放效率水平维持原有状态的概率最大,且存在“俱乐部收敛”的现象,短期内难以实现跨阶段转移。通过对空间马尔可夫概率转移矩阵进行分析可知,地理空间格局在交通运输业碳排放效率的动态转移中起到重要作用,当一个省份与碳排放效率高的省份相邻时,其受到高效率状态的影响,向高效率状态转移的概率增加;相反,当一个省份与碳排放效率低的省份相邻时,其受到低效率状态的影响,向低效率状态转移的概率增加。空间马尔可夫概率转移矩阵为“俱乐部收敛”现象在空间维度上提供了依据。

(3)从长期演变趋势来看,与不同类型的省份相邻将对碳排放效率的长期演变趋势产生不同的影响。与低效率省份相邻会抑制碳排放效率的提升,而与高效率省份相邻则有助于提高碳排放效率。我国交通运输业的碳排放效率长期发展的前景较为乐观,大部分省份向高水平类型转移,并呈现出向高值集中的趋势。

(4)我国交通运输业碳排放效率存在区域差异和不同的空间溢出效应。此外,空间溢出效应加剧了交通运输业碳排放效率俱乐部趋同,制定能够发挥高效率省份的空间溢出效应的政策,对于缩小交通运输业碳排放效率的区域差异至关重要。碳排放效率较低的省份,应积极转变交通运输业的发展模式,此外,适当控制人口规模,提高人口聚集效应,增加与高效率省份之间的流通。高效率省份在保持原有的状态下应进一步提高人们的低碳意识,促进绿色消费和低碳出行,提高公共交通设施的利用率与共享率。

参考文献:

- [1] Ferrer A L C, Thomé A M T. Carbon emissions in transportation: a synthesis framework [J]. Sustainability, 2023, 15(11), doi: 10.3390/su15118475.
- [2] Sun Y F, Zhang Y J, Su B. How does global transport sector improve the emissions reduction performance? A demand-side analysis [J]. Applied Energy, 2022, 311, doi: 10.1016/j.apenergy.2022.118648.
- [3] Zhang R J, Tai H, Cheng K T, et al. Carbon emission efficiency network formation mechanism and spatial correlation complexity analysis: taking the Yangtze River economic belt as an example [J]. Science of the Total Environment, 2022, 841, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.156719.
- [4] 宋苑震, 曾坚, 王森, 等. 中国县域碳排放时空演变与异质性 [J]. 环境科学, 2023, 44(1): 549-559.
Song Y Z, Zeng J, Wang S, et al. Spatial-temporal evolution and heterogeneity of carbon emissions at county-level in China [J]. Environmental Science, 2023, 44(1): 549-559.
- [5] 郝瑞军, 魏伟, 刘春芳, 等. 中国能源消费碳排放的空间化与时空动态 [J]. 环境科学, 2022, 43(11): 5305-5314.
Hao R J, Wei W, Liu C F, et al. Spatialization and spatio-temporal dynamics of energy consumption carbon emissions in China [J]. Environmental Science, 2022, 43(11): 5305-5314.
- [6] Liu J G, Li S J, Ji Q. Regional differences and driving factors analysis of carbon emission intensity from transport sector in China [J]. Energy, 2021, 224, doi: 10.1016/j.energy.2021.120178.
- [7] Lu S R, Jiang H Y, Liu Y, et al. Regional disparities and influencing factors of average CO₂ emissions from transportation industry in Yangtze River economic belt [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2017, 57, doi: 10.1016/j.trd.2017.09.005.
- [8] Zhao P J, Zeng L G, Li P L, et al. China's transportation sector carbon dioxide emissions efficiency and its influencing factors based on the EBM DEA model with undesirable outputs and spatial Durbin model [J]. Energy, 2022, 238, doi: 10.1016/j.energy.2021.121934.
- [9] 蒋自然, 金环环, 王成金, 等. 长江经济带交通碳排放测度及其效率格局(1985~2016年) [J]. 环境科学, 2020, 41(6): 2972-2980.
Jiang Z R, Jin H H, Wang C J, et al. Measurement of traffic carbon emissions and pattern of efficiency in the Yangtze River economic belt (1985-2016) [J]. Environmental Science, 2020, 41(6): 2972-2980.
- [10] Dong F, Li Y F, Gao Y J, et al. Energy transition and carbon neutrality: exploring the non-linear impact of renewable energy development on carbon emission efficiency in developed countries [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2022, 177, doi: 10.1016/j.resconrec.2021.106002.
- [11] 马奇飞, 贾鹏, 匡海波. 中国综合交通运输绿色效率的空间特征研究 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22(6): 300-308.
Ma Q F, Jia P, Kuang H B. Spatial characteristics of comprehensive transportation green efficiency in China [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2022, 22(6): 300-308.
- [12] 周琪, 梁肖, 黄俊生, 等. 城市轨道交通碳排放效率与影响因素研究 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2023, 23(1): 30-38, 85.
Zhou Q, Liang X, Huang J S, et al. Carbon emission efficiency and influencing factors analysis of urban rail Transits [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2023, 23(1): 30-38, 85.
- [13] 杨绍华, 张宇泉, 耿涌. 基于LMDI的长江经济带交通碳排放变化分析 [J]. 中国环境科学, 2022, 42(10): 4817-4826.
Yang S H, Zhang Y Q, Geng Y. An LMDI-based investigation of the changes in carbon emissions of the transportation sector in the Yangtze River economic belt [J]. China Environmental Science, 2022, 42(10): 4817-4826.

- [14] Liu Z, Qiu Z W. A systematic review of transportation carbon emissions based on CiteSpace [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, **30**(19): 54362-54384.
- [15] 陈思茹, 张帅, 袁长伟. 中国交通运输经济发展与碳排放效率评价[J]. *中国公路学报*, 2019, **32**(1): 154-161.
Chen S R, Zhang S, Yuan C W. China's transportation economy development and carbon environmental efficiency evaluation [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2019, **32**(1): 154-161.
- [16] 朱顺应, 廖凌云, 吴景安, 等. 城市客运交通工具碳排放效率差异——以襄阳市为例[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2022, **22**(4): 158-166.
Zhu S Y, Liao L Y, Wu J A, *et al.* Urban passenger transportation mode carbon emission efficiency difference: a case study of Xiangyang City [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2022, **22**(4): 158-166.
- [17] 卢建锋, 傅惠, 王小霞. 区域交通运输业碳排放效率影响因素研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2016, **16**(2): 25-30.
Lu J F, Fu H, Wang X X. Research on the impact of regional transportation emissions efficiency factors [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2016, **16**(2): 25-30.
- [18] 向书江, 杨春梅, 谢雨琦, 等. 近 20 年重庆市主城区碳排放的时空动态演进及其重心迁移[J]. *环境科学*, 2023, **44**(1): 560-571.
Xiang S J, Yang C M, Xie Y Q, *et al.* Spatiotemporal dynamic evolution and gravity center migration of carbon emissions in the main urban area of Chongqing over the past 20 years [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(1): 560-571.
- [19] 李铭泓, 黄羿, 朱伟俊, 等. 中国交通运输业碳排放全要素生产率研究——基于 Global Malmquist-Luenberger 指数[J]. *科技管理研究*, 2021, **41**(9): 203-211.
Li M H, Huang Y, Zhu W J, *et al.* Research on the carbon emission total factor productivity of the transportation industry in China based on the Global Malmquist-Luenberger index [J]. *Science and Technology Management Research*, 2021, **41**(9): 203-211.
- [20] 王世进, 蒯乐伊. 中国交通运输业碳排放驱动因素与达峰路径[J]. *资源科学*, 2022, **44**(12): 2415-2427.
Wang S J, Kuai L Y. Driving factors and peaking path of CO₂ emissions for China's transportation sector [J]. *Resources Science*, 2022, **44**(12): 2415-2427.
- [21] Fan Z G, Deng Z K, Qi Y W, *et al.* Spatial-temporal pattern and evolutionary trend of eco-efficiency of real estate development in the Yangtze River economic belt [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, **10**, doi: 10.3389/fenvs.2022.996152.
- [22] 单豪杰. 中国资本存量 K 的再估算: 1952 ~ 2006 年[J]. *数量经济技术经济研究*, 2008, **25**(10): 17-31.
Shan H J. Reestimating the capital stock of China: 1952~2006 [J]. *The Journal of Quantitative & Technical Economics*, 2008, **25**(10): 17-31.
- [23] 雷辉, 潘欣. 中国分行业资本存量的测算及行业间投资效率比较分析: 1990 ~ 2014 [J]. *上海对外经贸大学学报*, 2016, **23**(6): 40-52, 63.
Lei H, Pan X. The Calculation on the capital stock in different industries of china and the comparison of investment efficiency [J]. *Journal of Shanghai University of International Business and Economics*, 2016, **23**(6): 40-52, 63.
- [24] Tone K. A slacks-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis [J]. *European Journal of Operational Research*, 2002, **143**(1): 32-41.
- [25] Tone K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis [J]. *European Journal of Operational Research*, 2001, **130**(3): 498-509.
- [26] 侯孟阳, 姚顺波. 1978-2016 年中国农业生态效率时空演变及趋势预测[J]. *地理学报*, 2018, **73**(11): 2168-2183.
Hou M Y, Yao S B. Spatial-temporal evolution and trend prediction of agricultural eco-efficiency in China: 1978-2016 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, **73**(11): 2168-2183.
- [27] Huang Y S, Liu S J. Efficiency evaluation of a sustainable hydrogen production scheme based on super efficiency SBM model [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, **256**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120447.
- [28] Peng H, Lu Y B, Gupta S, *et al.* Dynamic and heterogeneity assessment of carbon efficiency in the manufacturing industry in China: implications for formulating carbon policies [J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2022, **97**, doi: 10.1016/j.eiar.2022.106885.
- [29] 王少剑, 高爽, 黄永源, 等. 基于超效率 SBM 模型的中国城市碳排放绩效时空演变格局及预测[J]. *地理学报*, 2020, **75**(6): 1316-1330.
Wang S J, Gao S, Huang Y Y, *et al.* Spatio-temporal evolution and trend prediction of urban carbon emission performance in China based on super-efficiency SBM model [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, **75**(6): 1316-1330.
- [30] 匡兵, 卢新海, 韩璟, 等. 考虑碳排放的粮食主产区耕地利用效率区域差异与变化[J]. *农业工程学报*, 2018, **34**(11): 1-8.
Kuang B, Lu X H, Han J, *et al.* Regional differences and dynamic evolution of cultivated land use efficiency in major grain producing areas in low carbon perspective [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, **34**(11): 1-8.
- [31] 张玥, 代亚强, 陈媛媛, 等. 中国耕地低碳利用效率时空演变及其驱动因素[J]. *农业工程学报*, 2022, **38**(8): 234-243.
Zhang Y, Dai Y Q, Chen Y Y, *et al.* Spatial-temporal evolution and driving factors of low-carbon use efficiency of cultivated land in China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, **38**(8): 234-243.

CONTENTS

Spatio-temporal Evolution, Dynamic Transition, and Convergence Trend of Urban Carbon Emission Intensity in China	YANG Qing-ke, WANG Lei, ZHU Gao-li, <i>et al.</i> (1869)
Spatio-temporal Evolution and Trend Prediction of Transport Carbon Emission Efficiency	ZHENG Yan, JIANG Xue-mei, XIAO Yu-jie (1879)
Research on Carbon Emission Decoupling Factors Based on STIRPAT Model and LMDI Decomposition	ZHANG Jiang-yan (1888)
Carbon Peak Pathways of Industrial Parks Based on the LEAP Model: A Case Study of a National Development Zone in Nanjing	LI Hui-peng, LI Li, YIN Yin, <i>et al.</i> (1898)
Accounting and Analysis of Carbon Emissions in Universities: A Case Study of Beijing A University	CAO Rui, FENG Li, ZHANG Li-qiu (1907)
Synergy Effects and Driving Factors of Pollution and Carbon Emission Reduction in Manufacturing Industry in Beijing	YU Shan, HAN Yu-hua, MU Jie, <i>et al.</i> (1917)
Carbon Emissions Trading Prices and Total Factor Productivity: Evidence from China	WU Xue-ping (1926)
Analysis of Spatio-temporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and PM ₁₀ in Chinese Cities	LI Jiang-su, DUAN Liang-rong, ZHANG Tian-jiao (1938)
Spatial-temporal Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and Ozone in the Border Area of Jiangsu, Anhui, Shangdong, and Henan from 2017 to 2021	CHEN Wei, XU Xue-zhe, LIU Wen-qing (1950)
Analysis of the Characteristics and Causes of PM _{2.5} and O ₃ Pollution in Xi'an During the Epidemic Lockdown Period	YUAN Xiao-hong, ZHANG Qiang, LI Qi, <i>et al.</i> (1963)
PM _{2.5} Chemical Composition and Spatial Variability in the Five Cities of Southern Jiangsu During Fall and Winter	FENG Wei, DING Feng, SHANG Yue, <i>et al.</i> (1975)
Source Apportionment of Fine Particles in Xianning, Hubei	LUO Yi, ZHU Kuan-guang, CHEN Pu-long, <i>et al.</i> (1983)
Spillover Benefits of Ammonia Emission Reduction in Xingtai Area to the Improvement of Atmospheric PM _{2.5} Concentration in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	BIAN Ze-jun, WEN Chao-yu, LANG Jian-lei, <i>et al.</i> (1994)
Characteristics, Risk Assessment, and Sources of the Polluted Metallic Elements in PM _{2.5} During Winter in Liaocheng City	ZHANG Jing-qiao, ZHU Yao, CAO Ting, <i>et al.</i> (2003)
Composition Characteristics of Typical VOCs Sources in the Highland City of Lhasa	GUO Shu-zheng, YE Chun-xiang, LIN Wei-li, <i>et al.</i> (2011)
VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment in Typical Industrial Parks in Beijing: Environmental Impact of High and New Technology Industries	WANG Jie, YAO Zhen, WANG Min-yan, <i>et al.</i> (2019)
Analysis of a Typical Ozone Pollution Process in the Chengdu Plain Under the Influence of High Temperature Extremes	LEI Li-juan, ZHANG Yi, LUO Yi-na, <i>et al.</i> (2028)
Presence, Behavior, and Risk of Antiviral Drugs in the Aqueous Environment	GE Lin-ke, LI Xuan-yan, CAO Sheng-kai, <i>et al.</i> (2039)
Spatio-temporal Variation and Probability Health Risk of Heavy Metals in Surface Water of Xiaolangdi Reservoir in the Yellow River	WANG Liang, DENG Xue-jiao, WANG Xiao-lei, <i>et al.</i> (2054)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Strontium Enrichment of the Duoqu River Basin in Eastern Xizang	LI Jing-jie, LIAN Sheng, WANG Ming-guo, <i>et al.</i> (2067)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Its Moisture Sources in the Inland Regions of Northwest China	ZHANG Yan-yan, XIN Cun-lin, GUO Xiao-yan, <i>et al.</i> (2080)
Recharge Source and Evolution Process of Karst Groundwater in Tai'an Urban Area Based on Hydrochemistry and Hydrogen and Oxygen Isotopes	MENG Ling-hua (2096)
Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors of Surface Water and Groundwater in the Mountainous Area of Danjiang River Basin	ZHANG Zi-yan, FU Yong-peng, WANG Ning-tao, <i>et al.</i> (2107)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in Yuanyangchi Irrigation Area, Jinta Basin	WANG Xiao-yan, HAN Shuang-bao, ZHANG Meng-nan, <i>et al.</i> (2118)
Hydrochemical Characteristics and Health Risk Assessment of Shallow Groundwater in the Plain Zone of Deyang City	LIU Nan, CHEN Meng, GAO Dong-dong, <i>et al.</i> (2129)
Spatial and Temporal Distribution of Microplastics in the Sediments of Typical Urban River Network	XU Wan-lu, FAN Yi-fan, QIAN Xin (2142)
Construction of Nitrogen Emission Inventory at Sub-basin Scale and Analysis of Key Sources in Fuxian Lake Watershed	WANG Yan-jie, LIANG Qi-bin, WANG Yan-xia, <i>et al.</i> (2150)
Preparation of Lanthanum Crosslinked Calcium Peroxide/Sepiolite/Sodium Alginate Composite Hydrogels and Their Elimination Performance for Endogenous Phosphorus	QU Si-tong, SHAN Su-jie, WANG Chong-ming, <i>et al.</i> (2160)
Formation Mechanism, Structural Characteristics of Ultrafine Mineral Particles, and Their Environmental Effects	LIU Zhen-hai, ZHANG Zhan-hua, YUAN Yu-xin, <i>et al.</i> (2171)
Research Progress in Application of Biochar-immobilized Bacteria Composites in Environmental Remediation	SUN Shu-yu, HUANG Meng-xin, KONG Qiang, <i>et al.</i> (2185)
Effect of Microplastics on Ammonia Nitrogen Adsorption by Zeolite in Water and Its Mechanism	LIAN Jian-jun, XIE Shi-ting, WU Pei, <i>et al.</i> (2195)
Mechanism of Ultraviolet Aging Effect on the Adsorption of Ciprofloxacin by Nano-biochar	MA Feng-feng, XUE Zhi-yi, ZHAO Bao-wei (2203)
Response of Phytoplankton Communities and Environmental Factors Under the Influence of Land Use in the Wuding River Basin	GUO Shan-song, HU En, DING Yi-tong, <i>et al.</i> (2211)
Bacterial Community Diversity and Functional Gene Abundance of Culturable Bacteria in the Wetland of Poyang Lake	YU Jiang, WANG Chun, LONG Yong, <i>et al.</i> (2223)
Bacterial Community Structure and Its Relationship with Heavy Metals in Sediments of Diannong River	LIU Shuang-yu, MENG Jun-jie, QIU Xiao-cong, <i>et al.</i> (2233)
Impacts of Treated Wastewater on Bacterial and Fungal Microbial Communities in Receiving Rivers	GUO You-shun, YU Zhong, HAO Wen-bin, <i>et al.</i> (2246)
Metagenomics Reveals the Characteristics and Functions of Bacterial Community in the Advanced Wastewater Treatment Process	HU Jian-shuang, WANG Yan, ZHOU Zheng, <i>et al.</i> (2259)
Spatio-temporal Characteristics of Habitat Quality and Natural-human Driven Mechanism in Dabie Mountain Area	ZHENG Ya-ping, ZHANG Jun-hua, TIAN Hui-wen, <i>et al.</i> (2268)
Hyperspectral Inversion of Soil Organic Matter Content Based on Continuous Wavelet Transform, SHAP, and XGBoost	YE Miao, ZHU Lin, LIU Xu-dong, <i>et al.</i> (2280)
Effects of Straw Retention, Film Mulching, and Nitrogen Input on Soil Quality in Dryland Wheat Field	YE Zi-zhuang, WANG Song-yan, LU Xiao, <i>et al.</i> (2292)
Effects of Long-term Application of Organic Fertilizer on the Occurrence and Migration Characteristics of Soil Microplastics	WANG Chang-yuan, MA Xiao-chi, GUO De-jie, <i>et al.</i> (2304)
Effect of Different Soil Salinities on N ₂ O Emission: A Meta-analysis	HUANG Yi-hua, SHE Dong-li, SHI Zhen-qi, <i>et al.</i> (2313)
Assessment and Prediction of Carbon Storage Based on Land Use/Land Cover Dynamics in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	ZHENG Hui-ling, ZHENG Hui-feng (2321)
Simulation of Temporal and Spatial Changes in Ecosystem Carbon Storage in Funiu Mountains Based on InVEST Model	ZHANG Zhe, SHI Zhen-qin, ZHU Wen-bo, <i>et al.</i> (2332)
Relationship Between Microbial Nutrient Limitation and Soil Organic Carbon Fraction During Shelterbelts Construction	XU Feng-jing, HUANG Yi-mei, HUANG Qian, <i>et al.</i> (2342)
Characteristics and Driving Forces of Organic Carbon Mineralization in Brown Soil with Long-term Straw Returning	ZHAO Yu-hang, YIN Hao-kai, HU Xue-chun, <i>et al.</i> (2353)
Effects of Winter Green Manure Mulching on Soil Aggregates, Organic Carbon, and AMF Diversity	LU Ze-rang, CHEN Jia-yu, LI Zhi-xian, <i>et al.</i> (2363)
Spatial and Temporal Distribution of Nitrogen in the Liaohe River Basin and Its Responses to Land Use and Rainfall	ZHOU Bo, LI Xiao-guang, TONG Si-chen, <i>et al.</i> (2373)
Nitrous Oxide Emissions from Ponds in Typical Agricultural Catchment with Intensive Agricultural Activity	ZHANG Xin-yue, XIAO Qi-tao, XIE Hui, <i>et al.</i> (2385)
Effects of Biochar Combined with Different Types of Nitrogen Fertilizers on Denitrification Bacteria Community in Vegetable Soil	LIU Xiao-wan, LIU Xing-ren, GAO Shang-jie, <i>et al.</i> (2394)
Investigation of Soil Microbial Characteristics During Stand Development in <i>Pinus tabulaeformis</i> Forest in Taiyue Mountain	MA Yi-shu, CAO Ya-xin, NIU Min, <i>et al.</i> (2406)
Simulation of Heavy Metal Content in Soil Based on Sparse Sample Sites	ZHANG Jia-qi, PAN Yu-chun, GAO Shi-chen, <i>et al.</i> (2417)
Identification Priority Source of Heavy Metal Pollution in Greenspace Soils Based on Source-specific Ecological and Human Health Risk Analysis in the Yellow River Custom Tourist Line of Lanzhou	LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (2428)
Heavy Metal Accumulation and Assessment of Potential Ecological Risk Caused by Soil pH Changes in Different Types of Purple Soils in Southwest China	ZHANG Hai-lin, ZHANG Yu, WANG Ding, <i>et al.</i> (2440)
Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Arable Land Around an Iron Ore Mining Area in Chongqing	LIAO Ze-yuan, LI Jie-qin, SHEN Zhi-jie, <i>et al.</i> (2450)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around Metal Mines	WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, <i>et al.</i> (2461)
Effect of Red Mud-based Nano Zero-valent Iron on Remediation of Polymetallic Contaminated Soil	LIU Long-yu, YANG Shi-li, ZHAO Huang-shi-yu, <i>et al.</i> (2474)
Effects of Zinc Application on Cadmium Accumulation in Alkaline Soil-Wheat Seeding Systems	ZHANG Yao, WANG Tian-qi, NIU Shuo, <i>et al.</i> (2480)