

中国居民直接能源消费碳排放时空跃迁特征及影响因素分析

余清项^{1,2}, 贾俊松^{1,2*}, 朱春敏^{1,2}, 彭宸^{1,2}

1. 江西师范大学地理与环境学院, 江西 南昌 330022

2. 江西师范大学鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室, 江西 南昌 330022

摘要: 动态把握居民直接能源消费碳排放的时空演化特征及影响因素, 对于建立绿色低碳的能源消费模式以及推进碳减排具有重要的理论价值和现实意义。本文基于 2000—2021 年中国居民直接能源消费量数据、社会经济数据等, 利用全局空间自相关、LISA 时间路径以及 LISA 时空跃迁分析中国居民直接能源消费碳排放量整体和局部空间格局演化特征, 并使用随机森林模型探究其影响因素。结果表明: ①2000—2021 年居民直接能源消费碳排放总量和居民人均直接能源消费碳排放量均呈上升趋势, 但二者增速均有所下降。②居民人均直接能源消费碳排放量整体上具有较强的空间正相关性且空间关联性有所增强, 空间差异呈缩小的变化趋势。局部空间结构较为稳定, 且局部空间依赖方向的波动性较弱。省域及其邻域的居民人均直接能源消费碳排放量随时间推移均不发生跃迁的概率较大, 空间格局存在一定的路径依赖特征。③能源消费结构对居民人均直接能源消费碳排放量的增长起抑制作用, 经济发展水平、城乡居民消费水平、受教育程度和专利授权数量均起促进作用, 人口密度和老龄化程度在一定范围内起抑制作用, 而超过阈值则起促进作用。能源消费结构对居民人均直接能源消费碳排放量的影响最大, 均方误差增量为 58.60%; 老龄化程度的影响最小, 均方误差增量为 3.96%。研究显示, 中国居民直接能源消费碳排放时空演变及影响因素存在一定差异, 因此建议各省份因地制宜构建低碳发展方案, 加强区域间碳减排的交流与合作, 从能源、人口和经济等方面综合推动居民能耗碳减排, 走各具特色的高质量发展道路。

关键词: 居民直接能源消费; 碳排放; 时空格局; 影响因素; 随机森林模型

中图分类号: X24

文章编号: 1001-6929(2024)06-1193-11

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2024.04.06

Analysis of Spatiotemporal Evolution Characteristics and Influencing Factors of Carbon Emissions from Direct Energy Consumption of Chinese Residents

YU Qingxiang^{1,2}, JIA Junsong^{1,2*}, ZHU Chunmin^{1,2}, PENG Chen^{1,2}

1. School of Geography and Environment, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China

2. Key Laboratory of Poyang Lake Wetland and Watershed Research, Ministry of Education, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China

Abstract: Dynamically grasping the spatiotemporal evolution characteristics and influencing factors of carbon emissions from residents' direct energy consumption has important theoretical value and practical significance for establishing a green and low-carbon energy consumption pattern and promoting carbon emission reduction. This paper analyzes the evolution characteristics of the overall and local spatial pattern of carbon emissions from Chinese residents' direct energy consumption by using global spatial autocorrelation, LISA time paths, and LISA spatiotemporal transition, and explores the influencing factors of carbon emissions with the help of random forest model based on the direct energy consumption data of Chinese residents and socio-economic data during 2000-2021. The results show that: (1) Both the total carbon emissions from direct energy consumption of residents and the per capita carbon emissions from direct energy consumption of residents showed an upward trend, but the growth rate of both declined. (2) Overall, the per capita carbon emissions from

收稿日期: 2023-12-27 修订日期: 2024-02-05

作者简介: 余清项(2001-), 女, 江西上饶人, yuqingxiang@163.com

* 责任作者: 贾俊松(1981-), 男, 江西高安人, 教授, 博士, 博导, 主要从事资源环境与能源研究, jiaaniu@126.com

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.72264016, 71473113); 江西省哲学社会科学基金项目 (No.21JL03)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.72264016, 71473113); Jiangxi Provincial Philosophy and Social Science Foundation Program, China (No.21JL03)

direct energy consumption have a strong positive spatial correlation, and the spatial correlation has increased, with spatial difference showing a narrowing trend. The local spatial structure is more stable, and the volatility of the local spatial dependence direction is weaker. The probability of the per capita carbon emissions from direct energy consumption of residents in provinces and their neighbors did not change over time is large, and there is a certain path dependence in the spatial pattern. (3) The energy consumption structure has an inhibitory effect on the growth of per capita carbon emissions from direct energy consumption of residents, while the levels of economic development, urban and rural residents' consumption, education, and number of patents granted all play a driving role. The population density and the degree of aging show an inhibiting effect on the growth of carbon emissions within a certain range, but once they exceed the threshold, they can become driving factors. The energy consumption structure has the greatest impact, with an incremental mean square error of 58.60%, and the degree of aging has the least impact, with an incremental mean square error of 3.96%. (4) The study shows that there are some differences in the spatiotemporal evolution and influencing factors of carbon emissions from direct energy consumption of Chinese residents. It is recommended that all provinces should construct their respective low-carbon development programs according to local conditions and strengthen inter-regional exchanges carbon emission reduction cooperation. Then, they should also promote carbon emission reduction of residents' energy consumption from the comprehensive perspective of energy, population, and economy, and take a high-quality development path based on their unique endowments.

Keywords: direct residential energy consumption; carbon emissions; spatio-temporal pattern; influencing factors; random forest model

气候变化会对自然生态系统和社会经济系统产生多方面、多层次的影响,因此积极应对气候变化逐渐成为了全球共识^[1-3]。中国积极承担减排责任,将碳达峰、碳中和作为重大战略决策列入 2021 年八大重点任务、“十四五”规划和 2035 年远景目标之一,展现了大国担当。当今社会经济快速发展的过程中居民的生活质量和福利水平得到提高,居民消费水平也迅速上升^[4]。因此,查清居民生活能源消费碳排放的动态及演变对于转变绿色低碳生活方式及推进绿色消费具有重大作用。联合国环境规划署《2020 年排放差距报告》指出,基于消费的温室气体排放核算法计算,全球约 2/3 的排放与家庭活动有关。居民生活部门成为仅次于工业的第二大能源消耗部门,具有较大的减排潜力^[5]。可见,加强我国居民生活能源消费碳排放研究,有助于科学评估各地区碳排放量的分布和碳减排的潜力,厘清碳排放量增长的驱动机制以及因地制宜进行节能减排管理。

居民生活能源消费碳排放根据排放源可分为直接排放和间接排放,直接排放是指居民在炊事、取暖、照明以及交通等生活活动中直接消耗能源所产生的碳排放,间接排放是指居民使用的各种产品与服务在其生产、流通、使用和回收的整个生命周期中消耗的能源所产生的碳排放^[6-9]。目前,国内外学者针对居民生活能源消费碳排放问题开展了广泛而深入的研究,内容包括以下几个方面:一是常基于空间自相关^[10]、核密度估计^[11]、Theil 指数^[12]以及 Dagum 基尼系数^[13]等方法,分析居民生活能源消费碳排放的时空特征和地区差异;二是借助 LMDI 模型、时空地理加权回归模型等探讨居民消费水平^[14]、农村人口城镇化^[15]、居

民收入^[16-17]、家庭规模^[18]以及城乡结构^[19]等因素对居民生活能源消费碳排放产生的影响;三是从全国^[20]、省域^[21]、农村^[22]以及中国西北地区^[23]等角度预测分析居民生活能源消费碳排放在不同条件和情境下的碳达峰时间及峰值。

尽管如此,仍有以下方面需深入研究:①研究内容上,多集中于居民生活能源消费碳排放空间关联与差异的截面特征,空间维度的总体研究和时间维度的静态研究对时空特征的揭示相对有限^[24-25];②影响因素研究方法上,多以传统的分解方法和回归分析为主,机器智能中随机森林模型等使用较少,该方法对影响因素的非线性度量 and 自变量重要性解释力较强,能够有效回避变量共线性及过拟合问题。

因此,该研究以中国省域为研究对象,在核算碳排放量的基础上,运用全局空间自相关、LISA 时间路径、LISA 时空跃迁以及随机森林等方法,从时空交互的视角分析中国居民直接能源消费碳排放量整体和局部空间格局动态演化规律,探究导致碳排放量增减的驱动因素,提出相应的建议,以期为各省份构建居民低碳能源消费模式提供参考,助力“双碳”目标的实现。

1 研究方法 with 数据

1.1 碳排放系数法

参考 IPCC (政府间气候变化专门委员会)提供的方法计算居民直接能源消费碳排放量,计算原理是用各省份居民生活直接能源消费量乘以相应的碳排放系数。核算公式:

$$C_{\text{dir}} = \sum_{i=1}^{24} E_i \times F_i \quad (1)$$

式中: C_{dir} 为居民直接能源消费碳排放量, Mt; E_i 为第 i 种类能源的居民直接能源消费量, 按子类计有 24 类, 但主要又可归纳为以下六大类, 如煤类 (单位为 10^4 t 或 10^8 m³)、油品 (单位为 10^4 t)、天然气 (单位为 10^8 m³ 或 10^4 t)、热力 (单位为 10^4 GJ)、电力 (单位为 10^8 kW·h)、其他能源 [单位为 10^4 t (以标准煤计)]; F_i 表示第 i 种类能源的碳排放系数 (以 CO₂ 计), 如煤类 [单位为 t/t 或 t/(10^4 m³)]、油品 (单位为 t/t)、天然气 [单位为 t/(10^4 m³) 或 t/t]、热力 (单位为 t/GJ)、电力 [单位为 kg/(kW·h)]、其他能源 [单位为 t/t (以标准煤计)]。

1.2 全局空间自相关

采用全局 Moran's I 指数进行全局空间自相关分析, 其值域为 [-1,1]。若指数大于 0, 表明呈正相关; 若指数小于 0 则呈负相关。Moran's I 指数越趋向 1, 表明其空间正相关性越显著, 具有相似属性的空间单元集聚作用越强; Moran's I 指数越趋向 -1, 表明其空间负相关性越明显, 也反映出具有相异属性的空间单元集聚作用越强; 当 Moran's I 指数等于 0, 则表明空间相关性不显著, 空间单元属性属于随机分布状态。

表 1 LISA 时空跃迁类型

Table 1 Types of LISA spatio-temporal transition

跃迁类型	跃迁含义	跃迁特征
I 型	自身跃迁, 邻域稳定	HH _t →LH _{t+1} , LH _t →HH _{t+1} , LL _t →HL _{t+1} , HL _t →LL _{t+1}
II 型	自身稳定, 邻域跃迁	HH _t →HL _{t+1} , LH _t →LL _{t+1} , LL _t →LH _{t+1} , HL _t →HH _{t+1}
III 型	自身跃迁, 邻域跃迁	HH _t →LL _{t+1} , LH _t →HL _{t+1} , LL _t →HH _{t+1} , HL _t →LH _{t+1}
IV 型	自身稳定, 邻域稳定	HH _t →HH _{t+1} , LH _t →LH _{t+1} , LL _t →LL _{t+1} , HL _t →HL _{t+1}

注: HH_t→LH_{t+1} 表示由 t 时的高高集聚型向 $t+1$ 时的低高集聚型转变, 其他依次类推。

1.5 随机森林模型

随机森林模型是一种通过集成学习的思想将多棵决策树集成的有监督机器学习算法, 基本单元是决策树, 可以用于开展分类、回归以及评估变量的重要性等研究^[29-31]。该方法具有容易实现和可解释性强的特点, 对异常值和噪声具有很好的容忍度^[32]。模型精度主要采用决定系数 (R^2)、平均绝对误差 (MAE) 以及均方根误差 (RMSE) 来衡量。基于 R4.2.3 软件构建随机森林模型, 按 7:3 的比例划分训练集和测试集, 基于均方误差增量 (IncMSE) 分析影响因子驱动力大小, 并通过偏依赖图揭示影响因素与居民人均直接能源消费碳排放量之间的响应关系。

1.6 数据来源和变量说明

居民直接能源消费量数据来源于历年《中国能源统计年鉴》中的地区能源平衡表, 影响因素数据来源于《中国统计年鉴》以及各省份统计年鉴, 缺失数

全局 Moran's I 指数的计算公式参考相关文献^[24]。

1.3 LISA 时间路径

LISA 时间路径是基于 LISA 坐标在莫兰散点图中的时空迁移态势来有效结合时间属性与空间属性, 从而使静态的局部空间关系特征转化为动态连续性特征^[26-27]。LISA 时间路径的几何特征主要通过相对长度和弯曲度来描述, 相对长度可以揭示研究单元局部空间结构的动态特征, 弯曲度能够反映局部空间依赖方向的波动性。二者计算公式参考相关文献^[25]。

1.4 LISA 时空跃迁

LISA 时间路径描述了各研究单元在莫兰散点图中迁移轨迹所具有的几何规律, LISA 时空跃迁则进一步揭示了单元与邻域空间关系的时序变化情况。Rey 等^[28]在 LISA 的基础上将莫兰散点图中各测度单元迁移的距离、方向、聚集等属性嵌入传统马尔可夫链中, 进一步提出 LISA 时空跃迁, 并将跃迁划分为 4 种类型。在跃迁特征中, HH 为高高集聚型, LL 为低低集聚型, HL 为高低集聚型, LH 为低高集聚型, 具体如表 1 所示。

据采用插值法填补。各类能源碳排放系数参考文献^[33]中推荐方法计算可得, 电力碳排放系数来源于《2010 年中国区域及省级电网平均二氧化碳排放因子》^[34], 热力碳排放系数根据国家发展和改革委员会公布的各行业温室气体核算指南确定为 0.11 t/GJ。考虑到数据的完整性和可获得性, 不包含港澳台地区和西藏自治区数据。

在总结现有研究^[35-37]的基础上, 综合考虑能源、经济以及人口等因素, 选取 8 个指标变量来分析中国居民人均直接能源消费碳排放量的影响因素。能源消费结构采用电力占能源消耗总量的比重来表征; 经济发展水平以人均地区生产总值来衡量; 城乡居民消费水平以城乡居民人均消费支出来表征; 人口密度以常住人口数与区域面积的比值来度量; 老龄化程度以 65 岁及以上人口比例来表征; 受教育程度以人均受教育年限来衡量; 专利授权数量以平均每万人的国内专利申请授权数来表征。

2 结果与分析

2.1 时序演进特征

通过碳排放核算得到 2000—2021 年中国居民直接能源消费碳排放总量和居民人均直接能源消费碳排放量,受篇幅所限,仅列出 2000 年、2010 年和 2021 年的核算结果(见表 2)。中国居民直接能源消费碳排放时序变化如图 1 所示。由图 1 可见,中国居民直接能源消费碳排放总量呈增长趋势,由 2000 年的 394.24 Mt 增至 2021 年的 1 582.53 Mt,增长了 1 188.29 Mt。居民人均直接能源消费碳排放量也呈上升趋势,从

2000 年的 0.31 t 增至 2021 年的 1.12 t,增长了 0.81 t。中国居民直接能源消费碳排放总量和居民人均直接能源消费碳排放量在 2000—2012 年的年均增长率分别为 8.56% 和 7.92%,而在 2013—2021 年的年均增长率分别为 4.79% 和 4.34%,年均增长率均有所下降,表明碳排放量增长速度放缓,中国正在扎实稳步推进居民直接能源消费碳减排。这可能是因为在《节能减排“十二五”规划》《“十三五”节能减排综合工作方案》中都强调要推动能源结构优化、推动能效水平提高以及开展节能减排全民行动,进而促进了居民能

表 2 2000 年、2010 年和 2021 年中国居民直接能源消费碳排放总量和居民人均直接能源消费碳排放量

Table 2 Total and per capita carbon emissions from direct energy consumption by Chinese residents in 2000, 2010 and 2021

省份	居民直接能源消费碳排放总量/Mt			居民人均直接能源消费碳排放量/t		
	2000年	2010年	2021年	2000年	2010年	2021年
北京市	13.72	31.18	49.63	1.01	1.59	2.27
天津市	9.03	19.24	33.24	0.90	1.48	2.42
河北省	37.02	58.86	130.43	0.55	0.82	1.75
山西省	18.10	33.15	47.42	0.56	0.93	1.36
内蒙古自治区	6.30	48.22	67.05	0.27	1.95	2.79
辽宁省	22.15	45.82	74.86	0.53	1.05	1.77
吉林省	10.47	24.77	27.68	0.39	0.90	1.17
黑龙江省	13.70	47.27	59.05	0.36	1.23	1.89
上海市	8.95	21.84	31.81	0.56	0.95	1.28
江苏省	15.86	41.70	86.85	0.22	0.53	1.02
浙江省	11.88	36.64	73.56	0.25	0.67	1.12
安徽省	12.02	21.83	49.44	0.20	0.37	0.81
福建省	8.89	23.53	45.75	0.26	0.64	1.09
江西省	6.61	12.46	31.86	0.16	0.28	0.71
山东省	18.60	68.87	133.40	0.21	0.72	1.31
河南省	24.10	38.91	77.82	0.25	0.41	0.79
湖北省	16.73	31.10	52.97	0.30	0.54	0.91
湖南省	9.88	32.74	61.01	0.15	0.50	0.92
广东省	23.57	57.03	119.84	0.27	0.55	0.94
广西壮族自治区	4.95	14.75	31.59	0.10	0.32	0.63
海南省	0.71	2.33	6.77	0.09	0.27	0.66
重庆市	7.30	12.78	25.73	0.26	0.44	0.80
四川省	19.87	36.96	63.76	0.24	0.46	0.76
贵州省	22.82	21.23	37.24	0.61	0.61	0.97
云南省	10.64	17.53	28.37	0.25	0.38	0.60
陕西省	9.21	25.31	44.89	0.25	0.68	1.14
甘肃省	10.92	16.34	25.58	0.43	0.64	1.03
青海省	2.71	4.94	7.78	0.52	0.88	1.31
宁夏回族自治区	2.24	4.24	6.67	0.40	0.67	0.92
新疆维吾尔自治区	15.29	21.76	50.49	0.83	1.00	1.95
平均值	13.14	29.11	52.75	0.38	0.75	1.24

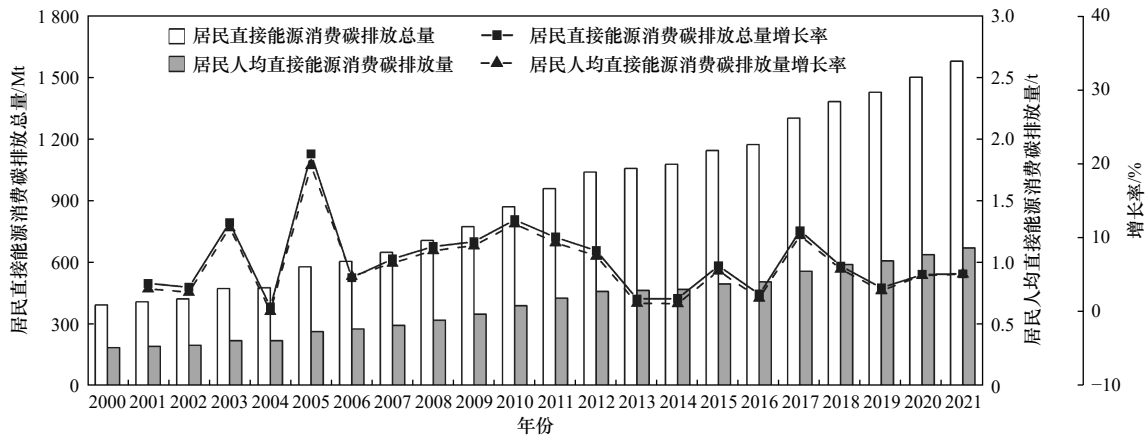


图 1 中国居民直接能源消费碳排放总量和居民人均直接能源消费碳排放量时序变化

Fig.1 Time-series changes in total and per capita carbon emissions from direct energy consumption of Chinese residents

源消费领域碳减排。

由图 2 可见, 中国居民直接能源消费碳排放总量与居民人均直接能源消费碳排放量整体呈现非均衡性, 存在空间差异与极化现象。在 2000 年和 2021 年居民直接能源消费碳排放总量高于全国同期平均水平(见表 2)的省份分别有 13 和 12 个, 分别占总数的 43.33% 和 40.00%。河北省、江苏省、浙江省、山东省以及广东省等多位于东部沿海经济发达地区, 城镇化水平和居民生活水平较高, 居民能源消费需求量大, 居民直接能源消费碳排放总量相对较多。宁夏回族自治区、青海省、广西壮族自治区、江西省以及海南省等多为欠发达地区, 城镇化进程相对落后, 居民生活水平有待进一步提高, 能源消费需求较小, 居

民直接能源消费碳排放总量相对较少。在 2000 年和 2021 年, 居民人均直接能源消费碳排放量高于全国同期平均水平(见表 2)的省份分别有 12 和 11 个, 分别占总数的 40.00% 和 36.67%。北京市、天津市、内蒙古自治区、新疆维吾尔自治区以及黑龙江省等省份的居民人均直接能源消费碳排放量相对较高, 而江西省、广西壮族自治区、海南省、云南省以及四川省等省份相对较低, 原因可能在于居民人均直接能源消费碳排放量较高的省份多位于北方地区, 冬季平均气温较低, 供暖时间较长, 人均能耗较大。因此, 需要进一步加强对关键省份碳排放强度的有效监测与治理, 适当加大碳排放的约束力度, 进行差异化的碳减排调控。

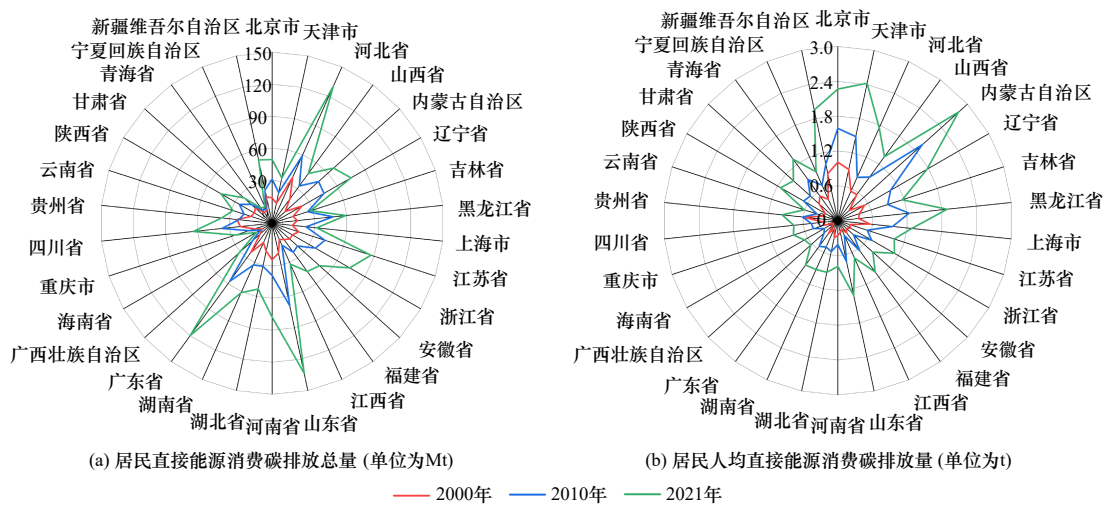


图 2 各省份居民直接能源消费碳排放总量和居民人均直接能源消费碳排放量变化

Fig.2 Changes in total and per capita carbon emissions from direct energy consumption of residents by provinces

2.2 空间格局演化

2.2.1 整体空间格局演化

全局 Moran's I 指数可以用于定量分析空间要素

在空间上的整体分布状况。Theil 指数是广义熵指标体系的一种特殊形式, 被广泛应用于地区差异测算。该研究分别运用全局 Moran's I 指数和 Theil 指数来

综合反映研究期内中国居民人均直接能源消费碳排放量的空间关联程度与差异特征。由表3可见,全局 Moran's I 指数在各年份均为正值且均通过了 1% 水平的显著性检验,这表明中国居民人均直接能源消费碳排放量具有较强的空间正相关性,具有相似碳

排放特征的省份在空间上集聚,即高值或低值集聚的省份在空间上相互邻近。而且全局 Moran's I 指数呈现小幅波动上升的变化趋势,表明其空间关联性总体呈增强态势,即高值或低值集聚的空间分布格局有所强化。

表3 中国居民人均直接能源消费碳排放量的全局 Moran's I 指数和 Theil 指数

Table 3 Global Moran's I index and Theil index of per capita carbon emissions from direct energy consumption of Chinese residents

年份	Moran's I指数	Z得分	P值	Theil指数	年份	Moran's I指数	Z得分	P值	Theil指数
2000	0.442	4.032	0.001	0.164	2011	0.453	4.355	0.002	0.117
2001	0.329	2.922	0.003	0.136	2012	0.411	4.064	0.002	0.115
2002	0.441	3.924	0.001	0.167	2013	0.437	3.925	0.002	0.095
2003	0.457	4.105	0.001	0.168	2014	0.474	4.257	0.002	0.092
2004	0.416	3.997	0.001	0.193	2015	0.504	4.458	0.002	0.092
2005	0.455	4.201	0.001	0.131	2016	0.551	4.894	0.001	0.099
2006	0.440	4.167	0.001	0.123	2017	0.466	4.223	0.003	0.096
2007	0.455	4.276	0.002	0.125	2018	0.486	4.326	0.002	0.100
2008	0.497	4.601	0.001	0.118	2019	0.490	4.380	0.002	0.092
2009	0.491	4.544	0.001	0.120	2020	0.536	4.758	0.002	0.089
2010	0.493	4.625	0.001	0.125	2021	0.512	4.569	0.002	0.090

Theil 指数总体呈“阶梯型”下降的变化趋势,反映出空间差异缩小具有阶段性特征,2005年和2012年是阶段划分的分界点,其中,2005年以前 Theil 指数范围为 0.136~0.193,2005—2012年 Theil 指数范围为 0.115~0.131,而2012年以后的 Theil 指数值均不大于 0.1。原因可能在于区域发展协调性、平衡性不断增强,从而促使居民人均直接能源消费碳排放量差异呈缩小的变化趋势。因此,开展居民能源消费碳减排需要注意发展阶段和空间差异,并充分考虑地区之间的空间关联作用。

2.2.2 局部空间格局演化

2.2.2.1 LISA 时间路径几何特征

LISA 时间路径可以反映各省份居民人均直接能源消费碳排放量的 LISA 坐标在莫兰散点图中的动态迁移态势。计算得到 2000—2021 年的 LISA 时间路径相对长度与弯曲度,探析居民人均直接能源消费碳排放量的局部空间格局演化特征。运用自然断点法将 LISA 时间路径相对长度划分为 5 个等级(见表4),即

高相对长度(1.768~2.388)、较高相对长度(1.268~1.767)、中等相对长度(0.945~1.267)、较低相对长度(0.620~0.944)和低相对长度(0.398~0.619)。LISA 时间路径相对长度小于平均值 1 的省份共有 18 个,占比为 60.00%,表明居民人均直接能源消费碳排放的局部空间结构较为稳定;LISA 时间路径为高相对长度和较高相对长度的省份共有 7 个,占总数的 23.33%;LISA 时间路径为低相对长度和较低相对长度的省份共有 18 个,占总数的 60.00%。西北和东北地区的局部空间结构的动态性强于东南地区,其中北京市、内蒙古自治区、天津市以及青海省等省份的 LISA 时间路径相对长度均大于 1.5,而福建省、安徽省及浙江省等均小于 0.5,原因可能在于近年来东南地区部分省份的居民人均直接能源消费碳排放量的变化有所减小,因此构成相对稳定的局部空间结构。

同样,采用自然断点法将 LISA 时间路径弯曲度分为 5 个等级(见表5),即高弯曲度(8.915~17.832)、较高弯曲度(6.439~8.914)、中等弯曲度(4.353~6.438)、较

表4 LISA 时间路径相对长度

Table 4 Relative length of LISA time path

等级	省份
高相对长度	北京市、内蒙古自治区
较高相对长度	天津市、黑龙江省、青海省、宁夏回族自治区、新疆维吾尔自治区
中等相对长度	山西省、吉林省、广东省、海南省、辽宁省
较低相对长度	河北省、上海市、山东省、湖南省、重庆市、四川省、贵州省、陕西省、甘肃省
低相对长度	江苏省、浙江省、安徽省、福建省、江西省、河南省、湖北省、云南省、广西壮族自治区

表 5 LISA 时间路径弯曲度
Table 5 Curvature of LISA time path

等级	省份
高弯曲度	天津市、江西省、广东省、海南省
较高弯曲度	北京市、河北省、湖北省、安徽省、重庆市、陕西省、青海省、新疆维吾尔自治区
中等弯曲度	江苏省、福建省、湖南省、广西壮族自治区、河南省
较低弯曲度	山西省、辽宁省、浙江省、四川省、甘肃省、宁夏回族自治区
低弯曲度	内蒙古自治区、吉林省、黑龙江省、山东省、云南省、贵州省、上海市

低弯曲度 (3.287~4.352)、低弯曲度 (2.281~3.286)。LISA 时间路径弯曲度的平均值为 6.721, 小于平均值的省份有 18 个, 占比为 60.00%, 表明在局部空间依赖方向具有波动性较弱的特征; LISA 时间路径为高弯曲度和较高弯曲度的省份有 12 个, 占总数的 40.00%; LISA 时间路径为低弯曲度和较低弯曲度的省份有 13 个, 占总数的 43.33%。其中, 广东省弯曲度 (17.832) 最大, 其次为海南省 (17.727) 和天津市 (15.267), 表明这 3 个省份局部空间依赖方向波动性较强, 而波动性较弱的省份主要有云南省 (2.582)、吉林省 (2.446) 及贵州省 (2.281) 等。

2.2.2.2 LISA 时空跃迁特征

LISA 时空跃迁可以揭示局部空间关联类型的转

移特征^[38]。由表 6 可知, 中国居民人均直接能源消费碳排放量时空跃迁矩阵对角线元素的值均远大于非对角线元素, 最普遍的跃迁类型为 IV, 即省份自身和邻域随时间推移均不发生跃迁的概率最大。这表明 2000—2021 年居民人均直接能源消费碳排放的空间关联格局相对稳定, 不同类型之间的跃迁较少, 整体呈现出一定的转移惰性。其中, $LL_t \rightarrow LL_{t+1}$ 的发生概率最大, 为 0.528 6。值得注意的是, I 型、II 型以及 III 型的占比分别为 2.07%、3.01% 和 0.32%, 即仅自身发生跃迁、仅邻域发生跃迁或二者均发生跃迁的概率之和为 5.40%, 应防止居民人均直接能源消费碳排放量进一步向高碳排放量跃迁。

2.3 影响因素分析

表 6 局部 Moran's I 转移概率矩阵

Table 6 Transition probability matrix of local Moran's I

项目	HH _{t+1}	LH _{t+1}	LL _{t+1}	HL _{t+1}
HH _t	0.255 6(IV 型)	0.006 3(I 型)	0(III 型)	0.009 5(II 型)
LH _t	0.004 8(I 型)	0.073 0(IV 型)	0.006 3(II 型)	0(III 型)
LL _t	0.001 6(III 型)	0.004 8(II 型)	0.528 6(IV 型)	0.004 8(I 型)
HL _t	0.009 5(II 型)	0.001 6(III 型)	0.004 8(I 型)	0.088 9(IV 型)

注: I 型总占比为 2.07%, II 型总占比为 3.01%, III 型总占比为 0.32%, IV 型总占比为 94.61%。

该研究建立的随机森林模型的精度较高, 决定系数 (R^2) 为 0.879 7, 均方根误差 (RMSE) 为 0.167 3, 平均绝对误差 (MAE) 为 0.093。影响因素重要性排序结果如图 3 所示, 排序较为靠前的影响因素为能源消费结构、受教育程度以及人口密度, 均方误差增量分别为 58.60%、29.01% 以及 24.23%, 表明与居民人均直接能源消费碳排放量有较为显著的关联效应; 农村居民消费水平、城镇居民消费水平以及老龄化程度对居民人均直接能源消费碳排放量的影响相对较小, 均方误差增量分别为 15.82%、14.16% 以及 3.96%; 经济发展水平和专利授权数量的均方误差增量分别为 20.58% 和 17.70%。

偏依赖图可以表征影响因素与中国居民人均直接能源消费碳排放量的响应关系, 进一步揭示其作用方向和作用强度。由图 4 可见, 能源消费结构与居民

人均直接能源消费碳排放量总体上呈负相关, 主要原

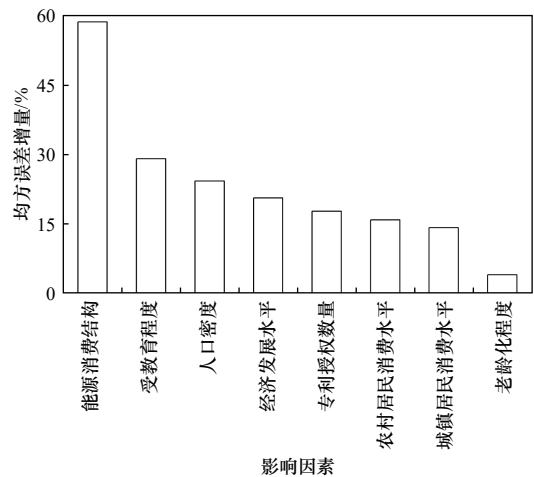


图 3 影响因素重要性排序

Fig.3 Importance ranking of influencing factors

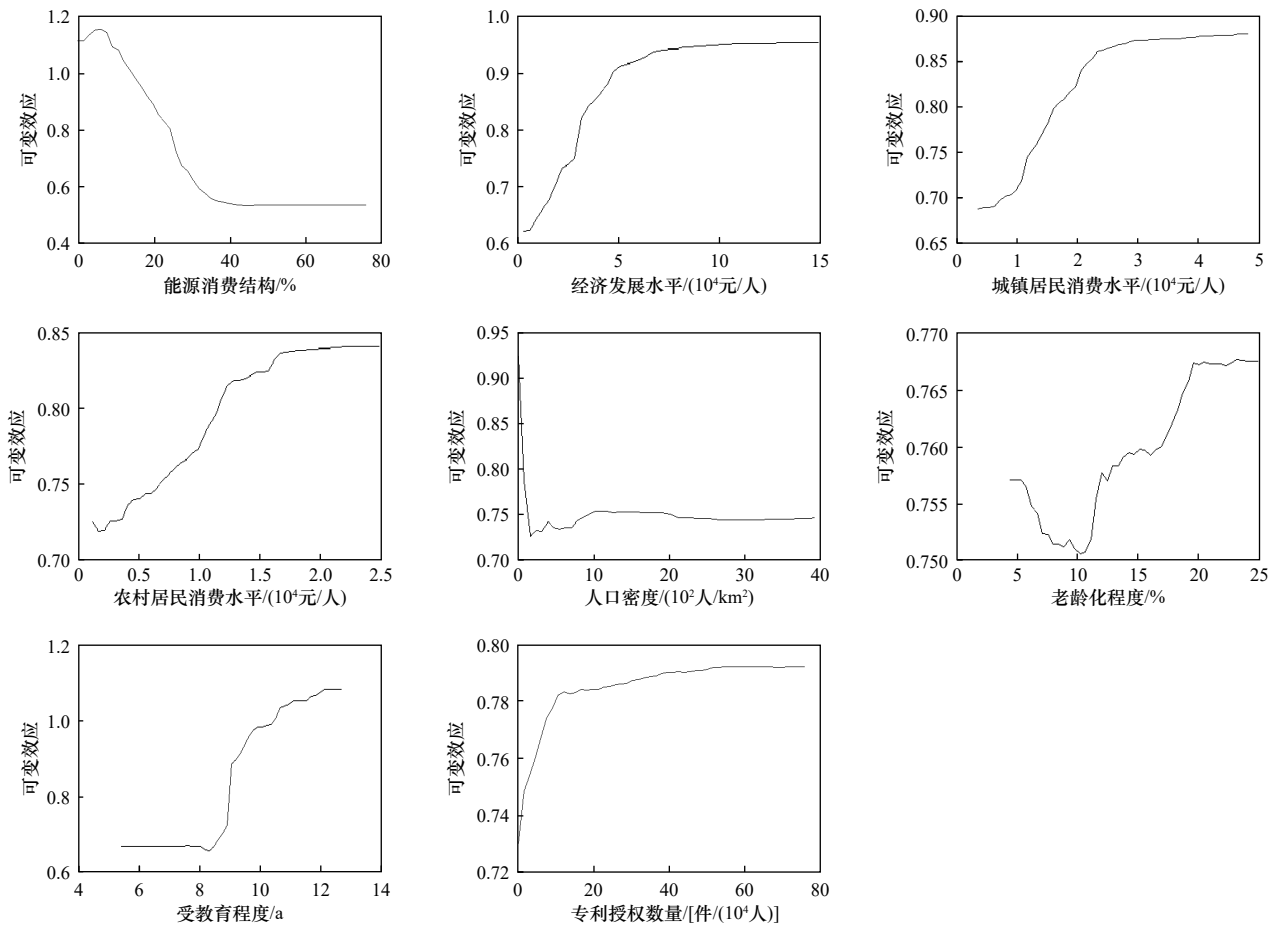


图4 影响因素偏依赖图

Fig.4 Partial dependence plot of the influencing factors

因在于电力比煤炭、油品等一次能源更加清洁, 电力消费比重增加在一定程度上体现了居民能源消费结构的清洁化转变, 可以对碳减排产生积极作用。经济发展水平、城镇居民消费水平以及农村居民消费水平等经济因素均与居民人均直接能源消费碳排放量呈正相关。当经济发展水平达到 7×10^4 元时, 碳排放量的增速趋缓; 当城镇居民消费水平达到 3×10^4 元时, 曲线开始呈现平缓变化的趋势; 当农村居民消费水平达到 1.7×10^4 元时, 碳排放量增长效应开始减弱。这可能是由于随着经济发展水平及居民消费水平的提升, 居民能源消费需求迅速增加, 而当达到一定阈值后, 居民直接能源消费量增速放缓, 从而引起居民人均直接能源消费碳排放量呈先快速增长后趋于平缓的变化趋势。可基于经济因素与居民人均直接能源消费碳排放量之间的非线性关系, 因地制宜调节环境规制强度, 促进经济发展与居民能耗碳排放脱钩。

在人口密度较小时, 其对居民人均直接能源消费碳排放量增长起显著抑制作用, 随着人口密度逐渐增大, 碳排放量又小幅波动上升。人口密度在一定范围

内增大可能会促进居民人均能耗增长, 也可能会带来集聚效应和规模效应, 推动地区基础设施和能源利用效率的提高, 对碳减排产生积极作用。老龄化水平的提升对居民人均直接能源消费碳排放量先起到抑制作用后起到促进作用, 当老龄化程度达 20% 时, 碳排放量的增长变化开始趋缓。随着居民受教育程度的提高, 居民人均直接能源消费碳排放量呈现先平缓后快速上升的变化趋势, 原因在于当居民的受教育年限提升, 收入也显著提高, 从而增强了消费动力。专利授权数量与居民人均直接能源消费碳排放量呈正相关, 当专利授权数量达到 16 件/(10^4 人) 后, 可变效应趋于稳定。因此, 需要进一步强化居民人均直接能源消费碳排放量增长的抑制因素, 充分发挥其碳减排效应, 并弱碳排放量增长的驱动因素。

3 结论与建议

3.1 结论

a) 在时序演进特征方面, 中国居民直接能源消费碳排放总量和居民人均直接能源消费碳排放量仍保持增长趋势, 2021 年的居民直接能源消费碳排放总

量与2000年相比增加了1 188.29 Mt, 2021年的居民人均直接能源消费碳排放量与2000年相比增加了0.81 t。但中国居民直接能源消费碳排放总量和居民人均直接能源消费碳排放量在2013—2021年的年均增长率均小于2000—2012年的年均增长率,表明碳减排工作取得一定成效。河北省、江苏省、浙江省、山东省以及广东省等居民直接能源消费碳排放总量较大的省份多位于东部沿海经济发达地区,宁夏回族自治区、青海省、广西壮族自治区、江西省以及海南省等居民直接能源消费碳排放总量较小的省份多为欠发达地区。北京市、天津市、内蒙古自治区、黑龙江省以及新疆维吾尔自治区等北方省份的居民人均直接能源消费碳排放量相对较高,而江西省、广西壮族自治区、海南省、云南省以及四川省等南方省份的居民人均直接能源消费碳排放量相对较低。

b) 在整体空间格局演化方面,中国居民人均直接能源消费碳排放量具有空间正相关性和空间差异性,空间关联性有所增强,而空间差异性逐渐减弱。在局部空间格局演化中,中国居民人均直接能源消费碳排放量的局部空间结构较为稳定,且局部空间依赖方向的波动性较弱。时空跃迁矩阵对角线元素的值均远大于非对角线元素,省份自身和邻域的居民人均直接能源消费碳排放量随时间推移均不发生跃迁的概率为94.60%,整体呈现出一定的转移惰性。

c) 在影响因素方面,各要素对中国居民人均直接能源消费碳排放量的影响具有非线性特征。能源消费结构对其影响程度最大,均方误差增量为58.60%;老龄化程度的影响程度最小,均方误差增量为3.96%。抑制中国居民人均直接能源消费碳排放量增长的影响因素主要为能源消费结构,经济发展水平、城乡居民消费水平、受教育程度和专利授权数量均为驱动因素,人口密度和老龄化程度在一定范围内可以起到抑制作用,而超过阈值则起促进作用。

3.2 建议

a) 各省份在经济发展、资源禀赋和技术条件等方面存在较大差异,在推动居民直接能源消费碳减排的过程中,应充分考虑差异问题,因地制宜构建低碳发展方案。碳排放量较高的省份可以借助人口与环境规制、产业结构升级和低碳技术突破以截断碳排放量快速增长的趋势;碳排放量较低的省份应避免因社会经济的快速发展和居民生活水平的提高而过度消耗能源增加碳排放量。

b) 充分把握居民人均直接能源消费碳排放量的空间关联作用与空间异质性,促进不同省份在资金、

技术等方面加强交流与合作,以推动协同减排;同时,结合局部空间格局演化特征,实施差异化的碳减排措施。LISA时间路径相对长度较大的省份局部空间结构动态性较强,应防止其向更高碳排放量状态跃迁;LISA时间路径相对长度较小的省份局部空间结构较为稳定,可以充分发挥优势进一步降低碳排放量。

c) 统筹考虑中国居民人均直接能源消费碳排放的驱动因素和抑制因素,寻求合理发展路径。从能源、经济和人口等角度着手,促进居民直接能源消费碳减排。首先,优化能源消费结构,合理控制各类能源占比,适当提高电力、太阳能等清洁能源在居民生活用能的比重,并提高能源效率;其次,适当加大节能减排技术的研发投入,增加生产者的低碳供给,完善绿色公共服务体系,让社会公众形成节约、低碳的消费方式;最后,顺应人口发展规律,充分发挥人口密度优化所带来的规模效应与集聚效应,着力推进新型城镇化建设,协同推动经济社会的高质量发展和生态环境的高水平保护。

参考文献 (References):

- [1] 秦大河.气候变化科学与人类可持续发展 [J].*地理科学进展*, 2014,33(7):874-883.
QIN D H. Climate change science and sustainable development [J]. *Progress in Geography*, 2014,33(7):874-883.
- [2] GALLAGHER K S, ZHANG F, ORVIS R, et al. Assessing the policy gaps for achieving China's climate targets in the Paris Agreement [J]. *Nature Communications*, 2019,10(1):1256.
- [3] 严刚,郑逸璇,王雪松,等.基于重点行业/领域的我国碳排放达峰路径研究 [J].*环境科学研究*, 2022,35(2):309-319.
YAN G, ZHENG Y X, WANG X S, et al. Pathway for carbon dioxide peaking in China based on sectoral analysis [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022,35(2):309-319.
- [4] 施建刚,段锴丰,吴光东,等.碳排放约束下长三角地区城乡融合发展效率 [J].*经济地理*, 2021,41(6):57-67.
SHI J G, DUAN K F, WU G D, et al. Efficiency of urban-rural integration development in the Yangtze River Delta under the background of carbon emission constraint [J]. *Economic Geography*, 2021,41(6):57-67.
- [5] 曲建升,刘莉娜,曾静静,等.中国居民生活碳排放增长路径研究 [J].*资源科学*, 2017,39(12):2389-2398.
QU J S, LIU L N, ZENG J J, et al. A study on growth path for China's household CO₂ emissions [J]. *Resources Science*, 2017, 39(12):2389-2398.
- [6] 周嘉,时小翠,赵靖宇,等.中国居民直接生活能源消费碳排放区域差异及影响因素分析 [J].*安全与环境学报*, 2019,19(3):954-963.
ZHOU J, SHI X C, ZHAO J Y, et al. On regional difference and influential factors of carbon emissions from direct living energy

- consumption of Chinese residents[J].*Journal of Safety and Environment*,2019,19(3):954-963.
- [7] 刘莉娜,曲建升,黄雨生,等.中国居民生活碳排放的区域差异及影响因素分析[J].*自然资源学报*,2016,31(8):1364-1377.
LIU L N,QU J S,HUANG Y S,et al.Analyze on the spatial-temporal pattern and influence factors of China's per capita household carbon emissions[J].*Journal of Natural Resources*,2016,31(8):1364-1377.
- [8] WEI Y M,LIU L C,FAN Y,et al.The impact of lifestyle on energy use and CO₂ emission:an empirical analysis of China's residents[J].*Energy Policy*,2007,35(1):247-257.
- [9] 王莉,曲建升,刘莉娜,等.1995—2011年我国城乡居民家庭碳排放的分析与比较[J].*干旱区资源与环境*,2015,29(5):6-11.
WANG L,QU J S,LIU L N,et al.Analysis and comparison of urban and rural household carbon emissions in China[J].*Journal of Arid Land Resources and Environment*,2015,29(5):6-11.
- [10] RONG P J,ZHANG Y,QIN Y C,et al.Spatial differentiation of carbon emissions from residential energy consumption:a case study in Kaifeng,China[J].*Journal of Environmental Management*,2020,271:110895.
- [11] 赵丽萍,王瑶瑶.中国居民直接生活能源消费碳排放时空特征分析[J].*消费经济*,2018,34(2):45-51.
ZHAO L P,WANG Y Y.Spatial-temporal characteristic analysis on carbon emissions of residents' direct life energy consumption in China[J].*Consumer Economics*,2018,34(2):45-51.
- [12] 万文玉,赵雪雁,王伟军.中国城市居民生活能源碳排放的时空格局及影响因素分析[J].*环境科学学报*,2016,36(9):3445-3455.
WAN W Y,ZHAO X Y,WANG W J.Spatial-temporal patterns and impact factors analysis on carbon emissions from energy consumption of urban residents in China[J].*Acta Scientiae Circumstantiae*,2016,36(9):3445-3455.
- [13] 范建双,周琳.中国城乡居民生活消费碳排放变化的比较研究[J].*中国环境科学*,2018,38(11):4369-4383.
FAN J S,ZHOU L.A comparative study on the changes of residential living consumption carbon emissions in urban and rural China[J].*China Environmental Science*,2018,38(11):4369-4383.
- [14] 冯舒祺,张建平,王瑶瑶.中国居民直接生活能源消费碳排放强度影响因素分析[J].*环境工程*,2018,36(10):184-188.
FENG S Q,ZHANG J P,WANG Y Y.Analsys of affecting factors on carbon intensity of residents direct life energy consumption in China[J].*Environmental Engineering*,2018,36(10):184-188.
- [15] 曹翔,高瑀,刘子琪.农村人口城镇化对居民生活能源消费碳排放的影响分析[J].*中国农村经济*,2021(10):64-83.
CAO X,GAO Y,LIU Z Q.The impact of urbanization of rural residents on carbon emissions from household energy consumption[J].*Chinese Rural Economy*,2021(10):64-83.
- [16] PEROBELLI F S,FARIA W R,de ALMEIDA V V.The increase in Brazilian household income and its impact on CO₂ emissions:evidence for 2003 and 2009 from input-output tables[J].*Energy Economics*,2015,52:228-239.
- [17] 王东,李玥凝.广东省居民生活消费碳排放与居民收入关系研究[J].*中国人口·资源与环境*,2017,27(S1):218-221.
WANG D,LI Y N.Relationship between household CO₂ emissions and residents' income in Guangdong Province[J].*China Population,Resources and Environment*,2017,27(S1):218-221.
- [18] ZHANG Y M,WANG F,ZHANG B.The impacts of household structure transitions on household carbon emissions in China[J].*Ecological Economics*,2023,206:107734.
- [19] 曲建升,刘莉娜,曾静静,等.中国城乡居民生活碳排放驱动因素分析[J].*中国人口·资源与环境*,2014,24(8):33-41.
QU J S,LIU L N,ZENG J J,et al.An analysis on driving factors of China's urban and rural household carbon emissions[J].*China Population,Resources and Environment*,2014,24(8):33-41.
- [20] ZHAO L T,ZHAO T,YUAN R.Scenario simulations for the peak of provincial household CO₂ emissions in China based on the STIRPAT model[J].*Science of the Total Environment*,2022,809:151098.
- [21] XIE Z Q,GAO X N,YUAN W H,et al.Decomposition and prediction of direct residential carbon emission indicators in Guangdong Province of China[J].*Ecological Indicators*,2020,115:106344.
- [22] 张保留,吕连宏,吴静,等.农村居民生活碳达峰路径及对策[J].*环境科学研究*,2021,34(9):2065-2075.
ZHANG B L,LÜ L H,WU J,et al.Rural household carbon-peak path and countermeasures[J].*Research of Environmental Sciences*,2021,34(9):2065-2075.
- [23] 徐丽,曲建升,李恒吉,等.西北地区居民生活碳排放现状分析及预测[J].*干旱区地理*,2019,42(5):1166-1175.
XU L,QU J S,LI H J,et al.Analysis and prediction of household carbon emission in Northwest China[J].*Arid Land Geography*,2019,42(5):1166-1175.
- [24] 王峥,程占红.“双碳”目标下中国服务业碳强度时空交互特征及跃迁机制[J].*地理学报*,2023,78(1):54-70.
WANG Z,CHENG Z H.Spatiotemporal interaction characteristics and transition mechanism of carbon intensity in China's service industry under the targets of carbon peak and carbon neutrality[J].*Acta Geographica Sinica*,2023,78(1):54-70.
- [25] 方世敏,黄琰.长江经济带旅游效率与规模的时空演化及耦合协调[J].*地理学报*,2020,75(8):1757-1772.
FANG S M,HUANG Y.Spatio-temporal evolutions and coordination of tourism efficiency and scale in the Yangtze River Economic Belt[J].*Acta Geographica Sinica*,2020,75(8):1757-1772.
- [26] YE X Y,REY S.A framework for exploratory space-time analysis of economic data[J].*The Annals of Regional Science*,2013,50(1):315-339.
- [27] REY S J.Space-time patterns of rank concordance:local indicators of mobility association with application to spatial income inequality dynamics[J].*Annals of the American Association of Geographers*,2016,106(4):788-803.
- [28] REY S J.Spatial empirics for economic growth and convergence[J].*Geographical Analysis*,2001,33(3):195-214.

- [29] BREIMAN. Random forests[J]. *Machine Learning*, 2001, 45(1): 5-32.
- [30] 夏晓圣, 陈菁菁, 王佳佳, 等. 基于随机森林模型的中国 PM_{2.5} 浓度影响因素分析[J]. *环境科学*, 2020, 41(5): 2057-2065.
XIA X S, CHEN J J, WANG J J, et al. PM_{2.5} concentration influencing factors in China based on the random forest model[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(5): 2057-2065.
- [31] 余文梦, 张婷婷, 沈大军. 基于随机森林模型的我国县域碳排放强度格局与影响因素演进分析[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(6): 2788-2798.
YU W M, ZHANG T T, SHEN D J. County-level spatial pattern and influencing factors evolution of carbon emission intensity in China: a random forest model analysis[J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(6): 2788-2798.
- [32] 方匡南, 吴见彬, 朱建平, 等. 随机森林方法研究综述[J]. *统计与信息论坛*, 2011, 26(3): 32-38.
FANG K N, WU J B, ZHU J P, et al. A review of technologies on random forests[J]. *Statistics & Information Forum*, 2011, 26(3): 32-38.
- [33] IPCC. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: volume II [R]. Kanagawa: Institute for Global Environmental Strategies, 2008.
- [34] 国家发展和改革委员会应对气候变化司. 2010年中国区域及省级电网平均二氧化碳排放因子 [EB/OL]. 北京: 国家发展和改革委员会, (2013-01-15)[2024-01-07]. <https://wendang.xuechi.cn/doc/23ze94h2r12gdcmlfs38-1.html>.
- [35] 王雅楠, 谢艳琦, 谢丽琴, 等. 基于LMDI模型和Q型聚类的中国城镇生活碳排放因素分解分析[J]. *环境科学研究*, 2019, 32(4): 539-546.
WANG Y N, XIE Y Q, XIE L Q, et al. Factor decomposition of Chinese urban household carbon emissions-empirical analysis based on LMDI model and Q-clustering[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, 32(4): 539-546.
- [36] LIAN Y H, LIN X Y, LUO H Y, et al. Distribution characteristics and influencing factors of household consumption carbon emissions in China from a spatial perspective[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 351: 119564.
- [37] LIU J Y, MURSHED M, CHEN F Z, et al. An empirical analysis of the household consumption-induced carbon emissions in China[J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2021, 26: 943-957.
- [38] REY S J, JANIKAS M V. STARS: space-time analysis of regional systems[J]. *Geographical Analysis*, 2006, 38(1): 67-86.

(责任编辑: 刘 方)