**DOI**：10.19789/j.1004-9398.2025.05.010
**文献引用**：蔡佳雪，代智彬，赵良仕，等．东北三省碳排放时空异质性分析及其影响因素［J］．首都师范大学学报（自然科学版），2025，46（5）：72-82. CAI J X，DAI Z B，ZHAO L S，et al. Analysis of spatio-temporal heterogeneity of carbon emissions in the three provinces of northeast China and its influencing factors［J］. Journal of Capital Normal University（Natural Science Edition），2025，46（5）：72-82.

# 东北三省碳排放时空异质性分析及其影响因素*

蔡佳雪[1]，代智彬[1]，赵良仕[2]，许淑婷[1**]

（1. 辽宁师范大学地理科学学院，辽宁 大连　116029；2. 辽宁师范大学海洋可持续发展研究院，辽宁 大连　116029）

**摘要**：研究东北三省这一关键工业区域的能源消耗及碳排放情况，对促进该地区高质量发展具有典型意义。基于2012—2021年东北三省35个地级市的夜间灯光数据拟合碳排放值，利用空间自相关模型和GTWR-STIRPAT组合模型，分析碳排放的时空异质性及其影响因素。结果表明：（1）东北三省碳排放量存在显著的时空变化差异，时间上总体变化趋势呈“U”字形，空间上高值区以省会城市为核心、点状分布；（2）碳排放量整体没有明显的空间集聚性，局部关联特征呈现以“低-低”集聚为主；（3）各影响因子对不同城市间的碳排放量存在显著的时空异质性，其中东北三省人口总量、第二产业比例和人均GDP对碳排放量有正向驱动效应，而城镇化率、人口老龄化率和专利授权数量对碳排放量具有正负双向效应。为此，建议制定政策要因地制宜进行科学规划，加快实现碳达峰、碳中和目标的步伐，为建设美丽中国贡献力量。

**关键词**：碳排放；GTWR-STIRPAT模型；时空异质性；影响因素；东北三省
**中图分类号**：X321；F127　　**文献标志码**：A

# Analysis of spatio-temporal heterogeneity of carbon emissions in the three provinces of northeast China and its influencing factors *

CAI Jiaxue[1]，DAI Zhibin[1]，ZHAO Liangshi[2]，XU Shuting[1**]

（1. School of Geography，Liaoning Normal University，Dalian Liaoning　116029；2. Institute of Marine Sustainable Development，Liaoning Normal University，Dalian Liaoning　116029）

**Abstract**：Studying energy consumption and carbon emissions in the three provinces of northeast China，a key industrial region，is crucial for advancing high-quality development in the region. Based on the fitted carbon emission values of nighttime light data of 35 prefectural-level cities in the three northeastern provinces from 2012 to 2021，the paper analyzes the spatio-temporal heterogeneity of carbon emissions and the influencing factors by using spatial autocorrelation model and the GTWR-STIRPAT combined model. The results indicate that（1）there are marked spatio-temporal variations in carbon emissions across the three northeastern provinces，exhibiting an overall “U”-shaped trend over time，and spatial distribution of high-value areas with a point-like pattern centered around provincial

收稿日期：2024-10-17
*辽宁省社会科学规划基金资助重点项目（L22AJY010）
**通信作者：xushuting2020@163.com

capitals.(2) Carbon emissions as a whole show no obvious spatial agglomeration, and the local correlation characteristics show the spatial aggregation characteristics of "low-low" agglomeration.(3) There is significant spatial and temporal heterogeneity in the carbon emissions across different cities, attributable to a range of influencing factors. Among these, the total population, the proportion of the secondary industry, and the per capita GDP exert a positive driving influence on the carbon emissions within the three northeastern provinces. Conversely, the urbanization rate, the aging rate of the population, and the number of patents granted have a dual impact on the carbon emissions. In response to these findings, it is recommended that policies be developed with scientifically informed planning tailored to local conditions to hasten the achievement of carbon peaking and neutrality goals, and to contribute to the construction of a beautiful China.

**Keywords**: carbon emissions; GTWR-STIRPAT model; spatio-temporal heterogeneity; influencing factors; the three provinces of northeast China

**CLC**: X321; F127 **DC**: A

## 0 引 言

政府间气候变化专门委员会第六次评估报告第三工作组报告《气候变化2022:减缓气候变化》指出,人口和经济增长是全球温室气体排放增加的主要驱动因素[1]。而东北三省作为中国重要的老工业基地,在国家经济发展中占据重要地位,工业结构以重工业为主,能源消耗量大,碳排放强度高。同时,在区域经济一体化的发展趋势下,东北三省之间合作日益密切,从时空角度分析碳排放的动态变化关系,探究碳排放的影响因素,可促进区域间的协同减排,实现资源共享、优势互补,推动区域绿色发展,对实现东北振兴和走可持续发展乃至提升国际合作中的地位和影响力具有重要的现实意义。

国内外学者关于碳排放的研究主要集中在碳排放量的测算、时空分异特征和影响因素等。碳排放量的测算主要依据能源消费平衡表,采用碳排放系数法[2]以及实测法进行计算。为解决城市尺度碳排放数据缺失,结合夜间灯光数据模拟反演城市尺度碳排放成为了新的测算热点[3-5]。在时空分异特征方面,学者们采用探索性时空数据分析方法居多[6-7],同时,采用超效率基于松弛值测算模型(super-slack based measure model, Super-SBM)测定城市碳排放效率,并建立马尔可夫相关矩阵探究其时空动态演化[8]。另有研究利用局部空间关联指标(local indicators of spatial association, LISA)时间路径、时空跃迁及标准椭圆模型等方法探究其迁移路径[9]。对其影响因素的研究,学者们通常根据基于人口、财富和技术回归分析的随机环境影响模型(stochastic impacts by regression on population, affluence, and technology, STIRPAT),将人口、经济和技术等因素视为碳强度的主要影响因素,还将能源消费结构、能源强度和对外开放程度等因素纳入研究中[10-11]。部分学者扩展研究路径,尝试采用时空分解模型[12]、扩展乘数结构分解法[13]、对数平均迪氏指数(logarithmic mean divisia index, LMDI)分解法[14]等研究碳排放影响因素。目前,基于计量分析方法开展碳强度的研究中,主要集中于全局效应的估计,未能考察模型参数在局部空间的时空异质性[15-16]。在此背景下,一些学者试图通过地理加权或拓展模型[17]等,探究影响因子的时空局部特征,识别影响因素对局部不同发展阶段中的作用,从而挖掘各区域的碳减排潜力。对于碳排放空间异质性的研究地图可视化、核密度估计和标准差椭圆等方法将碳排放时空演变以及路径进行描述,利用时空地理加权回归模型(geographically and temporally weighted regression, GWR)对影响因素的时空异质性进行量化[18-21]。

研究者们对碳排放领域进行了深入探索,仍存在一定局限。首先,由于缺乏市域、县域及以下尺度能源统计数据,使得碳排放的研究大多从全国和省级[22-24]视角出发;其次,少有研究将STIRPAT模型的理论层面与GTWR模型相结合研究时空异质性的影响因素;再者,从人口老龄化角度研究东北三省碳排放问题较少,"十四五"规划中积极应对人口老龄化已被上升为国家战略,鉴于东北三省的人口

老龄化率高于全国平均水平,这意味着人口老龄化对该地区碳排放的影响可能更加深远和显著[25],同时人口老龄化对碳排放影响的探究结果存在着较大的分歧[26-29]。因此,文章基于2012—2021年东北三省的夜间灯光数据和能源消耗数据计算碳排放量,从时空角度出发,采用空间自相关模型探究碳排放之间的空间异质性,GTWR-STIRPAT模型从人口、经济、技术3个维度探究东北三省碳排放的影响因素,并将人口老龄化引入到影响因素分析模型中以期增进认知深度,据此为东北三省实现"双碳"目标的对策提供依据。

## 1 研究区概况

东北三省位于中国东北部,涵盖辽宁省、吉林省和黑龙江省,属温带季风区,冬季寒冷漫长的气候特点导致供暖需求大。森林资源颇为丰富,在碳储存和调节碳排放等方面发挥重要作用。作为我国重要的老工业基地,传统工业所占比例较大,能源消费仍以煤炭、石油、天然气等传统化石能源为主,2022年能源消费总量高达43 770.1万t标准煤。从社会角度看,截至2022年,东北三省人口总量为9 787.85万人,面临人口增长缓慢的挑战,部分地区出现人口外流现象。辽宁省、吉林省、黑龙江省人均GDP分别为6.878、5.535和5.110万元,城镇化率分别为73.51%、49.08%和66.20%,人口老龄化率分别为28.17%、25.89%和25.59%,表明经济社会积极发展的同时,人口老龄化问题进一步加剧,为此带来新的考验。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源

以东北三省35个地级市为研究对象,因缺乏大兴安岭数据而剔除。东北三省省级能源消费数据均源于《中国能源统计年鉴》中的地区能源平衡表。地级市夜间灯光数据来源于美国国家海洋和大气管理局平台(https://www.ngdc.noaa.gov/eog/download.html),选取2012—2021年国家极轨环境卫星系统预备计划可见红外-成像辐射段所获取的夜间灯光数据集进行处理。人口总量、人口老龄化率、城镇化率、人均GDP、第二产业比例和专利授权数量数据来自历年《辽宁省统计年鉴》《吉林省统计年鉴》《黑龙江省统计年鉴》,各地级市发布的国民经济和社会发展统计公报,国家知识产权局专利数据库以及各省知识产权局。

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 碳排放量计算方法

2012—2021年东北三省的碳排放量通过统计数据计算得出。采用IPCC(2006)法将缺失数据进行补充,计算碳排放量时选取10种主要能源,其折算标准煤系数和碳排放系数见相关参考文献[30]。引入夜间灯光数据对地级市能源消费碳排放量进行辅助估算,具体方法参考苏泳娴等[31]、Liu等[32]和Wang和Li[33]的研究。构建省级夜间灯光总值与省级能源消费碳排放总量之间的拟合关联模型,在0.001水平上呈显著相关,$R^2$为0.907,具有较好的线性相关关系,拟合后得到公式为

$$C_j = 0.073\,61 \times N_j, \tag{1}$$

式中:$C_j$为$j$区域全年能源消费所产生的碳排放模拟值;$N_j$表示$j$区域的夜间灯光总值;0.073 61为拟合系数。

#### 2.2.2 空间自相关

空间自相关用于评估空间数据的分布特性及其相互关联性,测度方法主要分为全局与局部2类。全局空间自相关侧重于分析整个区域内碳排放的空间关联性,通常采用全局莫兰指数(Moran's $I$)进行度量,在标准差倍数$Z$得分与概率($P$)值差异显著($P$<0.05)的条件下,取值范围为[−1,1],Moran's $I$>0为空间正相关,值越大相关性越明显;Moran's $I$<0为空间负相关,值越小空间差异越明显;当Moran's $I$=0时,空间呈随机性[34]。空间局部自相关运用LISA集聚图对局部空间的集聚性进行检测。

#### 2.2.3 GTWR-STIRPAT模型

GTWR模型是对地理加权回归模型的基础上加入时间维度参数,从而能够在时空维度上对各地理位置的参数变化进行估算,显著降低参数估计的偏差。在使用GTWR模型分析之前进行共线性检验以确保模型的稳定性和后续估计的系数准确性[35]。STIRPAT模型是Dietz和Eugene[36]在IPAT模型[37]基础上提出,此模型全面体现了人口、财富及环境间的相互作用。将上述2种模型相结合更有效地展现了各影响变量对于环境(具体指碳排放)的弹性程度。文章依托GTWR-STIRPAT模型,将碳排放量作为被解释变量,根据已有研究[38-39],从人口、经济和技术3个维度出发,人口角度选取人口总量、人口老龄化率[40-41]和城镇化率[42-43],经济角度选取

人均GDP和第二产业比例,技术角度选取专利授权数量作为解释变量,以此探究东北三省碳排放影响因素。

## 3　实证结果与分析

### 3.1　东北三省碳排放时空分布特征

**3.1.1**　2012—2021年东北三省碳排放时间变化

受地理位置和发展阶段影响,东北三省碳排放呈现出显著的时空动态差异。根据式(1)计算得出2012—2021年东北三省碳排放量整体变化趋势呈“U”字形(图1)。2012—2015年,东北三省碳排放量呈现出下降趋势,逐渐开始注重发展服务业和战略性新兴产业,淘汰落后产能,促进能源结构优化;2016—2021年碳排放量呈明显增长趋势,随着经济形势变化,对工业产品的需求有所回升,作为传统的工业基地,工业生产活动逐渐增加,同时为了推动区域经济发展而加大基建投入,碳排放量随之增加,这充分说明目前我国东北三省碳减排压力仍然面临着巨大压力。

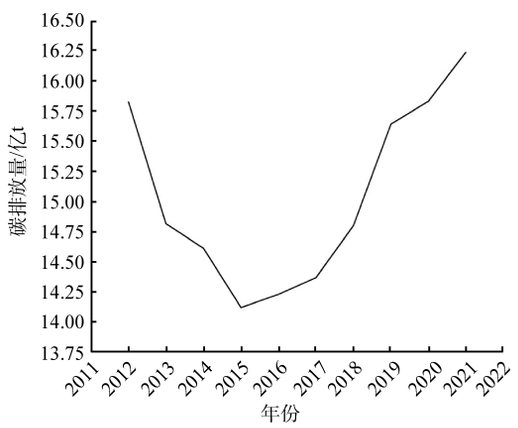



**图1　2012—2021年碳排放量总体变化趋势**

碳排放的时空差异与局部变化趋势,见表1。从时间层面来看,东北三省各市域碳排放量变化趋势除黑龙江省所有城市年均变化率均为正。具体而言,四平与白城的碳排放起始水平相对较低,但其增长速度却相当迅猛,年均增长率分别达到6.913%和8.028%,这类情况可归为低基数高增长型;相比之下,吉林、齐齐哈尔及大庆的碳排放起始值较高,但增长速度相对平缓,年均增长率分别为2.248%、0.681%和2.215%,属于高基数低增长型;而锦州、鞍山和长春的碳排放不仅起始值较高,增长速度也同样迅速,年均增长率分别是5.834%、5.836%和6.867%,为高基数高增长型;白山碳排放初始值较低且增长缓慢,年均增长率是3.600%,属于低基数低增长型;哈尔滨和伊春属于负增长缓慢型;黑河、双鸭山和七台河属于负增长快速型,除黑龙江省大部分城市外,其余城市的碳排放随着时间呈现波动增长态势。

**表1　东北三省碳排放量变化**

| 省份 | 城市 | 2012年/亿t | 2021年/亿t | 年均变化率/% |
|---|---|---|---|---|
| 辽宁省 | 沈阳 | 0.962 | 1.416 | 4.396 |
| | 大连 | 0.858 | 1.219 | 3.978 |
| | 鞍山 | 0.375 | 0.625 | 5.836 |
| | 抚顺 | 0.246 | 0.319 | 2.959 |
| | 本溪 | 0.204 | 0.293 | 4.117 |
| | 丹东 | 0.226 | 0.331 | 4.334 |
| | 锦州 | 0.331 | 0.551 | 5.834 |
| | 营口 | 0.426 | 0.598 | 3.835 |
| | 阜新 | 0.184 | 0.271 | 4.400 |
| | 辽阳 | 0.332 | 0.481 | 4.216 |
| | 盘锦 | 0.369 | 0.526 | 4.033 |
| | 铁岭 | 0.330 | 0.438 | 3.210 |
| | 朝阳 | 0.435 | 0.588 | 3.411 |
| | 葫芦岛 | 0.327 | 0.464 | 3.971 |
| 吉林省 | 长春 | 0.898 | 1.632 | 6.867 |
| | 吉林 | 0.473 | 0.578 | 2.248 |
| | 四平 | 0.191 | 0.348 | 6.913 |
| | 辽源 | 0.114 | 0.186 | 5.556 |
| | 通化 | 0.205 | 0.330 | 5.420 |
| | 白山 | 0.152 | 0.209 | 3.600 |
| | 松原 | 0.288 | 0.472 | 5.659 |
| | 白城 | 0.157 | 0.315 | 8.028 |
| | 延边州 | 0.313 | 0.410 | 3.055 |
| 黑龙江省 | 哈尔滨 | 1.276 | 1.235 | −0.361 |
| | 齐齐哈尔 | 0.552 | 0.586 | 0.681 |
| | 牡丹江 | 0.415 | 0.332 | −2.440 |
| | 佳木斯 | 0.525 | 0.489 | −0.769 |
| | 大庆 | 0.786 | 0.957 | 2.215 |
| | 鸡西 | 0.263 | 0.226 | −1.691 |
| | 双鸭山 | 0.351 | 0.236 | −4.333 |
| | 伊春 | 0.189 | 0.187 | −0.115 |
| | 七台河 | 0.170 | 0.135 | −2.530 |
| | 鹤岗 | 0.208 | 0.181 | −1.492 |
| | 黑河 | 0.337 | 0.256 | −3.020 |
| | 绥化 | 0.603 | 0.570 | −0.612 |

**3.1.2**　2012—2021年东北三省碳排放空间变化

选取2012、2015、2018和2021年东北三省各市域碳排放量绘制空间分布(图2底图边界审图号为GS(2019)1822),2021年东北三省碳排放较高的城市数量相较于2012年有了明显增加,呈现出显著的扩张态势。2012—2021年东北三省碳排放高值区

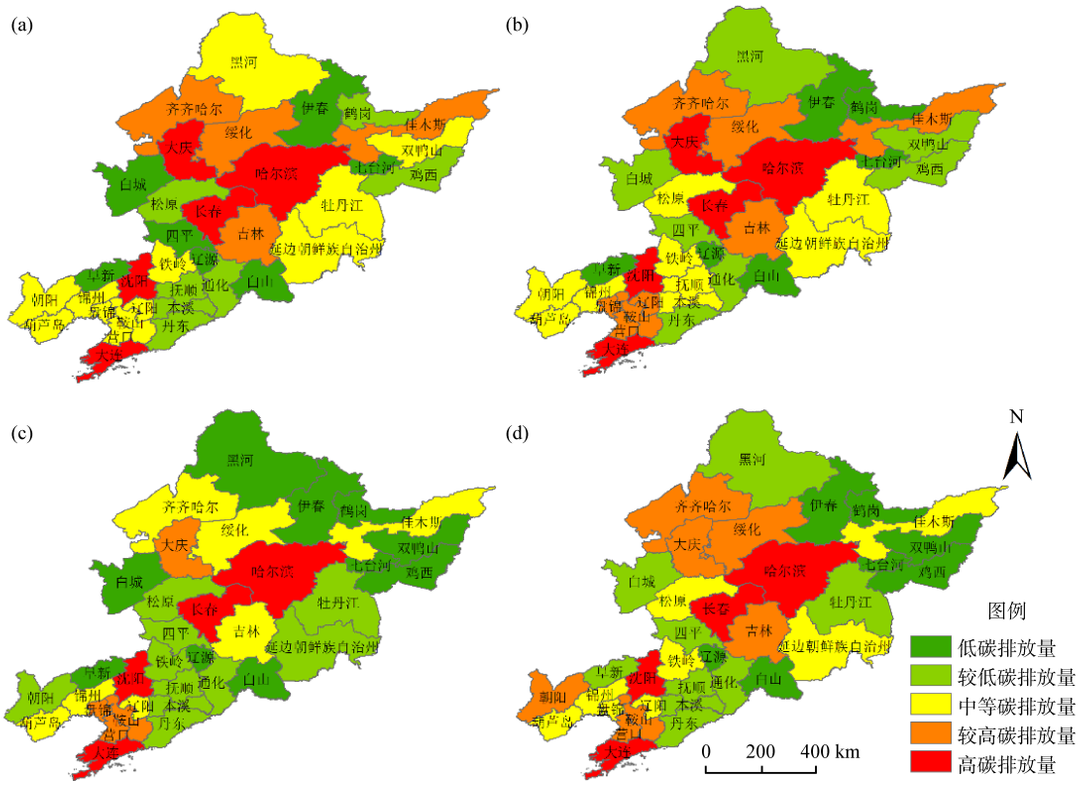



**图2　东北三省碳排放量空间分布**

**(a)2012年;(b)2015年;(c)2018年;(d)2021年**

主要围绕其各自省会城市(哈尔滨、沈阳以及长春),并辐射至这些城市周边的地级市,形成以省会城市为核心、点状分布的格局。高值区还扩展到了工业化程度较高的城市,这些城市作为东北老工业基地的重要组成部分,其经济结构往往以第一、二产业为主导,尤其是重工业和能源密集型产业占比较大,直接导致较高的碳排放水平。碳排放低值区则主要分布在东北三省的北部和东部地区。在北部地区,如伊春、鹤岗和七台河等地,经济活动主要以林业和农业为主,这些行业的碳排放强度相对较低。而在东部地区,尽管也存在一定工业生产活动,但相较于高碳排放区域,其高耗能、高排放工业生产活动较少,因此碳排放水平也相对较低。

## 3.2　东北三省碳排放空间关联性特征

### 3.2.1　全局空间自相关结果分析

计算2012、2015、2018和2021年东北三省各地级市碳排放的全局Moran's *I*指数(表2)以分析东北三省碳排放的整体空间相关性。2012—2021年碳排放的Moran's *I*>0且呈波动变化趋势,但*P*检验值均>0.05,在95%的置信水平下碳排放在空间上随机分布,*Z*统计值均>0,且绝对值较小,表明空间自相关程度较弱。

**表2　2012—2021年东北三省碳排放量的全局Moran's *I*指数**

| 年份 | 莫兰指数 | *P*检验值 | *Z*统计值 |
|---|---|---|---|
| 2012 | 0.039 | 0.413 | 0.817 |
| 2015 | 0.036 | 0.443 | 0.766 |
| 2018 | 0.067 | 0.260 | 1.127 |
| 2021 | 0.045 | 0.382 | 0.873 |

### 3.2.2　局部空间自相关结果分析

为进一步分析东北三省各地级市碳排放局部空间关联特征和空间集聚区位置,运用Arcgis10.8软件进行局部空间自相关计算与分析,并绘制LISA空间聚集图(图3)。2012—2021年间,东北三省各市域的碳排放量在空间上以低-低集聚类型占主导地位且分布在黑龙江省和吉林省。具体来看,高-高集聚区分布在中北部地区,包括哈尔滨和绥化。哈尔滨市人口相对较多且冬季取暖时间较长,同时拥有机械制造、装备工业等大型工业基地,能源需求量大增,碳排放也随之增加。周边城市长春作为吉林省省会城市,其人口集聚且是老工业基地之一,工业在经济中的比重较大,化石能源依赖程度高。绥化经济以种植玉米、水稻和大豆等为主的农业和以装备制造、能源化工为主的工业,大规模的农业

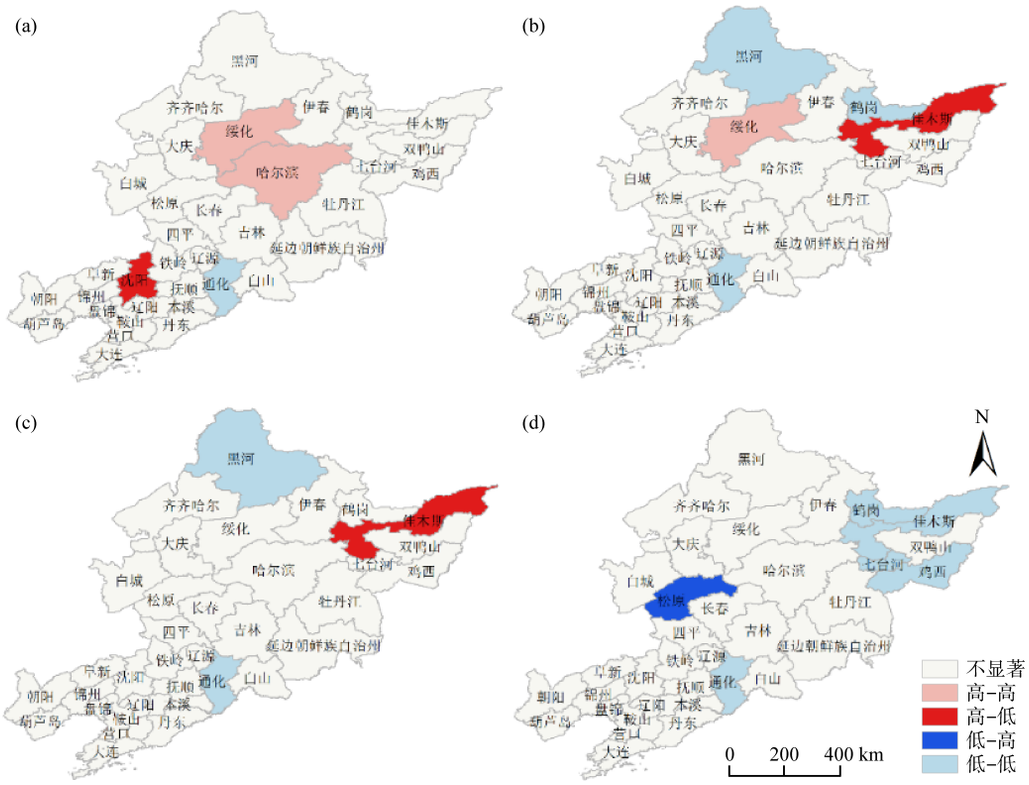



**图 3　东北三省碳排放量 LISA 空间聚集**

**(a)2012 年;(b)2015 年;(c)2018 年;(d)2021 年**

种植和工业的制造和生产会增加碳排放。紧邻绥化的大庆是石油城市,石油开采、炼化等生产过程中产生大量碳排放,清洁能源比例仍然较低,导致降碳步伐缓慢。因此,形成以哈尔滨和绥化为中心的高-高集聚区。高-低集聚区在沈阳和佳木斯。沈阳作为辽宁省省会城市,具有较大城市规模和相对较高人口密度,导致交通、建筑和取暖等领域的能源需求和碳排放较大,同时也是重要工业城市,拥有众多钢铁、化工和机械制造等重工业企业,这些产业在生产过程中会产生大量碳排放,与周围城市阜新、抚顺和本溪等存在明显差异。佳木斯市也位于高-低集聚区,形成原因则与其地处由黑龙江、松花江和乌苏里江汇流冲击形成的三江平原腹地、粮食作物播种面积大以及装备制造业、能源等支柱产业集群化发展有关。伊春与佳木斯接壤,森林资源丰富具有很强的固碳作用;而鹤岗大力发展新兴产业同时清洁能源利用增加,具有较为丰富的森林资源,导致佳木斯碳排放量相较于相邻城市偏高。低-低集聚区 2012—2021 年分布范围有所扩大,包括通化、黑河、佳木斯、鹤岗、七台河和鸡西,这些城市大多位于北部,拥有较为丰富的森林资源,同时积极开展生态修复工程,提高碳汇作用与固碳能力,经济上致力于产业结构多元化和能源结构调整,一定程度降低碳排放量。低-高集聚区 2021 年出现在松原,该市积极打造东北循环经济产业基地和低碳创新发展示范区,减少碳排放产生。

### 3.3　东北三省碳排放时空异质性分析

拟合 GTWR-STIRPAT 模型之前,对各变量间的协方差关系实施了共线性检验,人口总量、人口老龄化率、城镇化率、人均 GDP、第二产业比例和专利授权数量的检验结果分别为 4.809、1.350、2.782、3.178、2.291 和 3.443。表明多重共线性问题不显著,所有变量的方差膨胀因子均≤10,为后续回归分析奠定基础。所应用的模型中 $R^2$ 为 0.932,修正赤池信息准则值为 81.239,说明该模型能较好地反映东北三省碳排放影响的时空异质性。

#### 3.3.1　各影响因素时间演变规律

采用 GTWR-STIRPAT 模型,计算了 2012—2021 年各因素对碳排放的平均回归系数,并据此绘制出随时间变迁的折线(图 4),并分析各因素的影响趋势。

人口总量回归系数均为正,表明人口增长对碳排放呈现正相关。由于东北三省人口不断增长,直

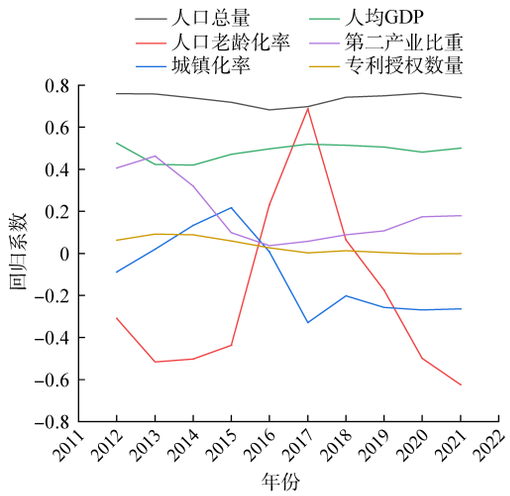



**图4　GTWR-STIRPAT模型回归系数的时间分布趋势**

接导致对各种资源和能源的消耗,如用于取暖、制冷、照明和出行等,而能源的生产和使用往往伴随着碳排放。同时人口增加可能会带来生活方式和消费模式的改变,更多的家庭拥有汽车、使用电器设备等都会增加能源消耗和碳排放。

人口老龄化率的回归系数由负转正、再由正转负,呈现倒"V"型变化趋势。因为人口老龄化对碳排放的影响路径较为复杂,随着东北三省人口老龄化初期,生产和消费模式没有立刻改变,后期老年人口消费模式相对较为简单和节能,导致碳排放量减少。同时,劳动力数量的不断减少,一些高耗能、高污染的产业可能会因为劳动力的不足进行产业转型升级甚至外迁,一定程度上会降低碳排放量。为满足老年人口的医疗护理需求,建设医疗机构和医疗设备养老护理等低碳行业,从而减少碳排放。

城镇化率回归系数有正有负,大体呈现出"M"形变化趋势。这表明在城镇化初期阶段,城镇化进程加快,需大规模基础设施建设,这些建设活动需要大量的能源进行消耗,导致碳排放增加。2016年后东北三省城镇化进程基本稳定,生态文明理念得到贯彻和落实,居民环保意识普遍提高,城镇化率的回归系数开始下降。

人均GDP回归系数均为正值,总体呈波动变化。人均GDP反应一个地区的经济发展水平,经济发展水平不断提高,带动能源的需求量不断增长,产生大量碳排放。"十三五"规划中强调绿色发展的重要性,包括推动产业升级、优化能源结构、鼓励发展清洁能源、通过市场机制促进企业减少碳排放等,这些政策不断实施,使得经济发展优化升级,经济发展带来的碳排放在研究后期得到一定的控制,使得回归系数有所下降。

第二产业比例回归系数均为正值且明显下降,说明第二产业比例与碳排放呈正相关,且对碳排放的促进作用在一定程度上减小。第二产业主要包括工业、制造业等,在生产过程中往往消耗大量化石能源,化石能源的燃烧是碳排放主要来源之一。其次第二产业中一些高耗能、高排放的企业相对集中,大规模的生产活动导致碳排放总量增大。另外,东北三省致力于经济结构调整和转型升级,从高消耗高排放的传统重工业向现代工业转变,使得第二产业比例下降的同时碳排放也得到控制。

专利授权数量回归系数明显的下降,逐渐由正向负过渡。从发展过程来看,这意味着东北三省在前期经历技术快速发展和创新阶段。这一阶段,新的技术不断涌现,有利地推动工业生产规模逐渐扩大,对能源需求也有所上升,进而导致更多碳排放产生。随着对国家政策的积极响应,部分专利开始涉及低碳技术或清洁能源领域,可能会对碳排放的减少起到积极作用,导致回归系数下降。

### 3.3.2　各影响因素空间演变规律

为更好地反映各影响因素在空间上的变化,将GTWR-STIRPAT模型中不同影响因素的回归系数平均值进行可视化(图5)。

人口总量对碳排放量影响与人口经济学理论相契合,在人口快速增长阶段,消费需求增加,导致碳排放量随人口总量上升而增加[44];影响较大的城市是吉林省东部部分城市,这些城市人口不断增长,促使碳排放量增加。影响较小的城市大都分布在西南部和北部,如黑河、伊春、鹤岗、佳木斯、双鸭山、朝阳和葫芦岛等,这些城市人口总量可能相较于其他地方来说较少,或人口分布相对密集,利于集中使用能源,进一步减少能源消耗。

人口老龄化率对碳排放的影响具有复杂性和区域性,生命周期理论为此提供了重要分析视角,强调不同年龄段人群消费模式不同[45]。研究区域大范围呈负相关,说明随着人口老龄化的发展,老年人群体对高碳排放的消费领域需求较少,老年人口出行相对减少,经济活跃度降低。呈正相关的区域为东北三省中部地区,老年人在医疗保健、取暖和交通等方面的特殊消费需求增加,部分老年人更倾向于传统的生活方式和能源利用方式,对于新技

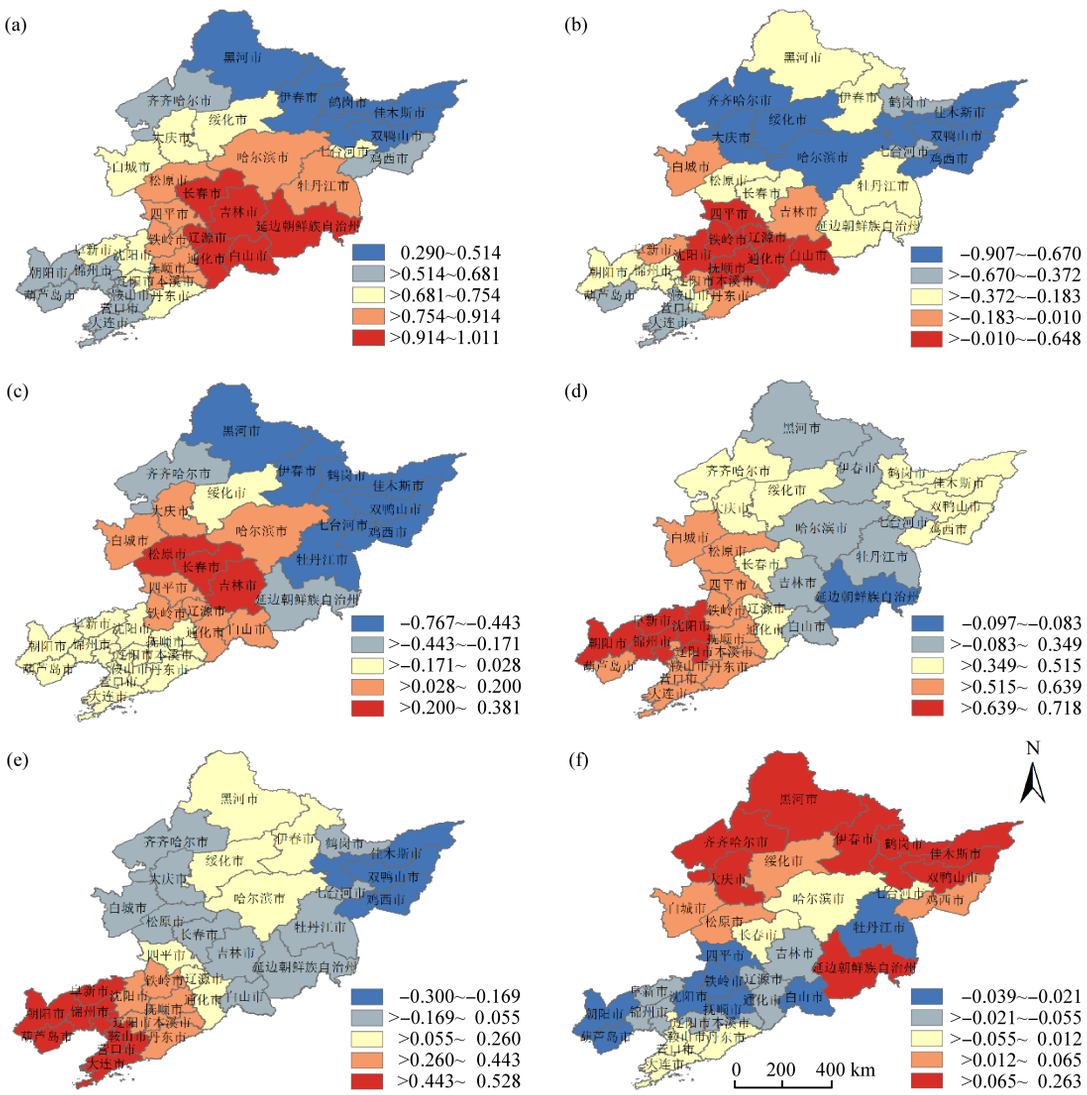



**图 5　GTWR-STIRPAT 模型回归系数的空间分布趋势**

**(a)人口总量;(b)人口老龄化率;(c)城镇化率;(d)人均 GDP;(e)第二产业比例;(f)专利授权数量**

术和新能源的接受程度低,间接产生高碳排放。

城镇化水平对碳排放的影响存在正负双向驱动作用。城镇化是人口、产业等要素积聚的过程,这种集聚产生一定的规模经济和范围经济。负向驱动作用主要分布在黑龙江省北部以及辽宁省除铁岭以外的市域,城镇化水平提高导致人口不断向城市集聚,能源使用效率明显提高,一定程度上降低碳排放量。正向驱动分布区域十分广泛,主要原因是城镇化过程中,人口大量聚集且增多,居民生活和生产活动、城市基础设施建设等能源需求增加间接提高碳排放。

人均 GDP 回归系数高值区位于研究区域西南部,如朝阳、锦州、阜新、盘锦、沈阳和辽阳,说明这些城市人均 GDP 对于碳排放的影响较大,随着人均 GDP 增长意味着经济规模扩大,生产和消费活动更加活跃,个别城市依旧属于粗放型发展换取经济效益,促使碳排放增加。低值区位于研究区域东部,可能与当地经济水平不断提高,人们的需求层次上升,对低碳、环保产品和服务的需求增加,各城市大力发展低碳技术,提高能源的重复利用率有关。

第二产业比例大部分城市呈正相关,主要分布在辽宁省和黑龙江省哈尔滨、绥化等,这些城市能源密集型产业分布较广且集中,经济活动不仅涉及原材料、生产资料和劳动力的投入,还涵盖对环境资源的消耗与转化,大规模的生产过程中,会消耗煤炭、石油等化石燃料,导致碳排放增加。少数城市出现负相关,可能是第二产业内部进行结构调整,向相对低碳的产业进行改革,或将高消耗、高排

放产业进行逐步淘汰外迁。

专利授权数量与碳排放的相关性正负同时存在。其中高值区主要分布在北部,北部传统工业基础雄厚,发展过程中加大科研力度以提高产业效率和大规模设施项目的发展,导致大量碳排放。低值区主要分布在辽宁省以及吉林省部分城市,这些部分地区仍存在大量传统重工业,需投入科技手段以增加生产效率,但同时伴随经济发展,创新活动更为活跃,部分专利致力于低碳绿色发展,响应国家"碳减排"政策,使得系数为负。

## 4 结论与建议

### 4.1 结论

以东北三省为研究区域,建立碳排放与夜间灯光数据相关模型推演各市域碳排放量。运用空间自相关模型从时空角度分析碳排放的时空特征,结合GTWR-STIRPAT模型分析东北三省碳排放的时空异质性及影响因素,研究结论如下:

(1)从时间上看,东北三省受经济发展的直接影响,2012—2021年东北三省的碳排放量呈"U"形变化,2015年达到最低值,随后波动上升;从空间上看,东北三省碳排放高值区主要集中在各省的省会城市以及经济发达或产业集聚的地级市。

(2)2012—2021年东北三省碳排放量全局空间相关性较弱。各市域碳排放量空间集聚类型以低-低集聚为主,分布在黑龙江省和吉林省;其他集聚类型分布较少,焦点城市与周边城市的碳排放关联度不高。

(3)人口、经济和技术均对东北三省碳排放产生或多或少影响,且存在显著的时空异质性。人口增长对碳排放呈正相关,受其影响大的城市分布在中部,影响较小的城市分布在西南部和北部。人口老龄化对碳排放呈现倒"V"变化趋势且正负交替,研究区域人口老龄化问题突出,正相关分布在中部,负相关分布范围广泛。城镇化率回归系数有正有负,大体呈现出"M"形变化,正向驱动作用遍及众多区域,负向驱动作用分布在东北角。人均GDP回归系数总体呈波动变化,高值区位于西南部,低值区位于东部。第二产业比例回归系数大都为正值,但总体呈下降趋势,正相关主要分布在辽宁省和黑龙江省。专利授权数量与碳排放呈由正向负过渡,高值区集中在北部,低值区分布在中南部地区。

### 4.2 建议

东北三省作为中国重要的经济区域,在实现"双碳"目标的过程中起到重要作用。为此,基于研究结果从时空、人口、经济和技术4个方面进行综合分析,进一步优化东北三省向绿色低碳方向发展,提出以下4点对策建议:

(1)注重集聚效应。碳排放低值区继续将发展与低碳环保相结合,高值区则应进行产业升级与优化,加快清洁能源使用比例,严格执行国家碳减排政策。同时,高集聚区可相互联动,提高资源和能源的重复利用效率,共同制定并落实有关碳减排政策,共同打造低碳高效的家园。

(2)重视人口因素。加强低碳教育,倡导绿色家庭理念,引导人们绿色出行,推动人口合理分布;进一步扩大老龄化对碳排放产生的负向驱动作用,积极发展养老服务产业;科学规划城镇布局,打造绿色生态城市,在应对人口问题的同时尽早实现碳达峰、碳中和目标。

(3)推动经济低碳。加快传统产业升级改造,优化制造业内部结构,减少高耗能、高排放重工业比例。大力发展新兴低碳产业和绿色经济,加大对新能源产业的投入,推广节能环保技术,加强资源的循环利用,减少废弃物的产生和排放。

(4)加大创新力度。鼓励企业和科研机构开展低碳技术研发,建立产学研合作机制,促进科技成果转化与应用,制定完善政策支撑体系,利用区域优势加强国际合作,引进国外先进绿色技术的同时推动我国绿色低碳技术"走出去"。

### 参 考 文 献

[1] IPCC. Climate Change 2022: mitigation of climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

[2] 赵映慧,王子彤,詹汶羲,等.黑龙江省耕地利用转型碳排放的时空分异特征与影响因素[J].西南农业学报,2022,35(10):2247-2255.

[3] 杜海波,魏伟,张学渊,等.黄河流域能源消费碳排放时空格局演变及影响因素:基于DMSP/OLS与NPP/VIIRS夜间灯光数据[J].地理研究,2021,40(7):2051-2065.

[4] 王兆峰,李竹,吴卫.长江经济带不同等级城市碳排放的时空演变及其影响因素[J].环境科学研究,2022,35(10):2273-2281.

[5] 郭忻怡,闫庆武,谭晓悦,等.基于DMSP/OLS与NDVI的江苏省碳排放空间分布模拟[J].世界地理研究,

2016,25(4):102-110.
[6] 潘竟虎,张永年.中国能源碳足迹时空格局演化及脱钩效应[J].地理学报,2021,76(1):206-222.
[7] 吴义根,冯开文.中国省际农业碳排放的时空分异特征及关联效应[J].环境科学与技术,2019,42(3):180-190.
[8] 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.
[9] 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.
[10] 朱泳丽,丁利杰.长三角城市群碳排放强度的空间效应及影响因素:基于产业转移视角[J].资源科学,2022,44(7):1373-1387.
[11] 赵桂梅,耿涌,孙华平,等.中国省际碳排放强度的空间效应及其传导机制研究[J].中国人口·资源与环境,2020,30(3):49-55.
[12] SONG C, ZHAO T, WANG J. Spatial-temporal analysis of China's regional carbon intensity based on ST-IDA from 2000 to 2015 [J]. Journal of Cleaner Production, 2019,238:117874.
[13] CAO Y, ZHAO Y, WANG H, et al. Driving forces of national and regional carbon intensity changes in China: Temporal and spatial multiplicative structural decomposition analysis [J]. Journal of Cleaner Production,2018,213(C):1380-1410.
[14] 宋鹏,张慧敏,毛显强.面向碳达峰目标的重庆市碳减排路径[J].中国环境科学,2022,42(3):1446-1455.
[15] YAN B, WANG F, DONG M Q, et al. How do financial spatial structure and economic agglomeration affect carbon emission intensity? Theory extension and evidence from China [J]. Economic Modelling, 2022,(108):105745.
[16] YU Q, LI M, LI Q, et al. Economic agglomeration and emissions reduction: does high agglomeration in China's urban clusters lead to higher carbon intensity? [J]. Urban Climate,2022,43:101174.
[17] 李云燕,张硕.中国城市碳排放强度时空演变与影响因素的时空异质性[J].中国环境科学,2023,43(6):3244-3254.
[18] 许嘉俊,杨晓军,李睿.城市居民生活碳排放及影响因素的时空异质性[J].中国环境科学,2024,44(3):1732-1742.
[19] 张自豪,余斌,郭新伟,等.基于GTWR模型的长江中游城市群碳排放时空异质性分析[J].华中师范大学学报(自然科学版),2024,58(3):324-338.
[20] 杨莉,张雪磊.江苏居民消费碳排放测度与影响因素研究:基于GTWR模型的实证分析[J].生态经济,2020,36(5):31-38.
[21] 赖德琳,胡燕,王玉贵.成渝城市群土地利用碳排放时空异质性及影响因素分析[J].绵阳师范学院学报,2023,42(11):97-105.
[22] 杨青,彭若慧,刘星星,等.基于地理加权回归的省域碳排放影响因素研究[J].环境工程技术学报,2023,13(1):54-62.
[23] 程钰,张悦,王晶晶.中国省域碳排放绩效时空演变与技术创新驱动研究[J].地理科学,2023,43(2):313-323.
[24] 陈帝伯,魏伟,周俊菊,等.中国省域碳源/碳汇强度及碳盈亏的空间演变[J].经济地理,2023,43(1):159-168.
[25] 王晗,刘鉴,房艳刚.东北地区人口老龄化的多尺度时空演变及影响因素[J].地域研究与开发,2021,40(6):147-153.
[26] 刘健强,马晓钰.人口老龄化、产业结构升级与碳排放:基于STIRPAT模型的空间计量分析[J].金融与经济,2021(7):54-62.
[27] 赵晓航,孙碧洋.中国人口年龄结构对碳排放的影响:效应估计与趋势预测[J].调研世界,2023(6):3-13.
[28] 王芳,周兴.人口结构、城镇化与碳排放:基于跨国面板数据的实证研究[J].中国人口科学,2012(2):47-56.
[29] 于洋,孔秋月.京津冀城镇化、人口老龄化与碳排放关系的实证研究[J].生态经济,2017,33(8):56-59+80.
[30] 关伟,李书妹,许淑婷.东北三省碳排放时空演变多尺度分析:基于DMSP/OLS夜间灯光数据[J].生态经济,2022,38(11):19-26.
[31] 苏泳娴,陈修治,叶玉瑶,等.基于夜间灯光数据的中国能源消费碳排放特征及机理[J].地理学报,2013,68(11):1513-1526.
[32] LIU Z F, HE C Y, ZHANG Q, et al. Extracting the dynamics of urban expansion in China using DMSP/OLS nighttime light data from 1992 to 2008 [J]. Landscape and Urban Planning,2012,106(1):62-72.
[33] WANG Y, LI G D. Mapping urban $CO_2$ emissions using DMSP/OLS 'city lights' satellite data in China [J]. Environmental and Planning A,2017,49(2):248-251.
[34] 王法辉,姜世国译.基于GIS的数量方法与应用[M].北京:商务印书馆,2009:205-232.
[35] 刘芳,董奋义.计量经济学中多重共线性的诊断及处理方法研究[J].中原工学院学报,2020,31(1):44-48+55.
[36] DIETZ T, EUGENE A. Effects of population and affluence on $CO_2$ emissions [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences,1997,94(1):175-179.
[37] EHRILICH P R, HOLDREN J P. Impact of populaton growth: complacenoy concerning this component of man's predicament is unjustified and counterproductive [J]. Science,1971,171(3977):1212-1217.
[38] 崔月彤.中国人口老龄化对碳排放影响的时空异质性研究[J].统计理论与实践,2023(1):35-41.

[39] 吴健生,晋雪茹,王晗,等.中国碳排放及影响因素的市域尺度分析[J].环境科学,2023,44(5):2974-2982.
[40] 李昌宝,高莉,杨德草.人口老龄化背景下中国碳排放的影响因素研究:基于PET模型的实证分析[J].江西财经大学学报,2020(5):32-44.
[41] 田成诗,郝艳,李文静,等.中国人口年龄结构对碳排放的影响[J].资源科学,2015,37(12):2309-2318.
[42] 陈姜全,李效顺,耿艺伟,等.中国城镇化与碳排放机制分析及实证研究:基于经济发展、人口转移和城镇扩张视角[J].自然资源学报,2024,39(6):1399-1417.
[43] 张腾飞,杨俊,盛鹏飞.城镇化对中国碳排放的影响及作用渠道[J].中国人口·资源与环境,2016,26(2):47-57.
[44] 亚当·斯密.国富论[M].北京:商务印书馆,2019.
[45] ATTANASIO P O, WEBER G. Consumption and saving: models of intertemporal allocation and their implications for public policy[J]. Journal of Economic Literature,2010,48(3):693-751.

(责任编辑:李拓宇)

(上接第71页)

[5] CARO F, SHIRANE T, GUIGNARD M, et al. School redistricting: embedding GIS tools with integer programming[J]. Journal of the Operational Research Society,2004,55(8):836-849.
[6] SINGLETON A D, LONGLEY P A, ALLEN R, et al. Estimating secondary school catchment areas and the spatial equity of access[J]. Computers Environment and Urban Systems,2011,35(3):241-249.
[7] HANLEY P F. Transportation cost changes with statewide school district consolidation [J]. Socio-Economic Planning Sciences,2007,41(2):163-179.
[8] TAYLOR R G, VASU M L, CAUSBY J F. Integrated planning for school and community:the case of Johnston County,North Carolina[J]. Interfaces,1999,29(1):67-89.
[9] 宋正娜,陈雯,张桂香,等.公共服务设施空间可达性及其度量方法[J].地理科学进展,2010,29(10):1217-1224.
[10] 涂然,周锐,王新军.城市基础教育设施的空间可达性与公平性研究:以上海市浦西8区小学为例[J].复旦学报(自然科学版),2019,58(6):747-755.
[11] 蔺芳,郭敏,吴红波.基于GIS空间分析的中小学学校区划和可达性研究:以汉中市主城区为例[J].城市勘测,2022(1):8-13.
[12] 张晨龙,陈波,张宸瑀.基于多源数据的郑州市中原区小学空间分布特征及可达性分析[J].河南大学学报(自然科学版),2022,52(2):168-178.
[13] 刘冬,张堂基,李志民,等.基于POI数据的西安市中心城区小学布点特征研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2022,54(5):693-700.
[14] 张一帆,景海涛,王莉.基于GIS的城市教育资源均衡性与优化研究[J].地理空间信息,2020,18(3):55-60+7.
[15] HUANG Q, CUI X, MA L. The Equity of basic educational facilities from the perspective of space[J]. Sustainability,2023,15(15):12031.
[16] 卫杨.基于ArcGIS的郑州市中小学空间分布均衡性研究[D].武汉:湖北大学,2023.
[17] YUAN H F, YANG X G. Spatial distribution of urban basic education resources in Shanghai: accessibility and supply-demand matching evaluation [J]. Open Geosciences,2023,15(1):20220571.
[18] 陈莹.基于GIS的基础教育资源空间布局研究[D].北京:首都师范大学,2008.
[19] 赵欣悦.基于GIS的哈尔滨市中心城区公园绿地可达性研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2022.
[20] 宋洁华,李少伟,赵志忠,等.泰森多边形在居民点空间分布特征分析中的应用研究:以海南省临高县为例[J].海南师范大学学报(自然科学版),2013,26(2):223-226.
[21] 曹竞文,李淑杰,齐鲁,等.基于泰森多边形的汪清县农村居民点空间分布特征及其影响因素[J].世界地质,2019,38(1):268-276.
[22] DUYCKAERTS C, GODEFROY G. Voronoi tessellation to study the numerical density and the spatial distribution of neurones [J]. Journal of Chemical Neuroanatomy,2000,20(1):83-92.
[23] 王何晨阳,赵恒,高仲亮,等.基于缓冲区分析的云南省文山州森林火灾分布研究[J].消防科学与技术,2022,41(11):1556-1562.
[24] 张玉婷,孙建国,杜立钊,等.六盘山地区中学教育资源空间可达性分析[J].测绘科学,2019,44(11):52-58+87.

(责任编辑:李拓宇)