

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2022.04.001

基于多源数据的城市用地强度对碳排放的影响研究

——以青岛市为例

张雪洁^{1,2}, 王成新^{1,2}, 苗毅^{1,2}, 王建事^{1,2}, 李梦程^{1,2}

(1. 山东师范大学 地理与环境学院, 山东 济南 250358;

2. 山东省高校人地协调与绿色发展协同创新中心, 山东 济南 250358)

摘要:“双碳”目标背景下,为探索县域城市用地强度变化下的碳排放响应及其内在关系,基于POI、Landsat与统计数据的多源数据,采用三维空间曲面插值、核密度估计(KDE)、时空地理加权回归(GTWR)等研究方法,探索2010年、2013年和2017年城市用地强度对碳排放的影响。结果表明:①青岛市碳排放指数三维曲面从“山峰状”转为“鞍部状”,三类用地强度的时空分布呈现多中心分布;②不同年份内碳排放指数对不同用地强度变化的敏感程度不同;③不同城镇化率背景下,用地强度驱动的碳排放变动存在一定规律:随城镇化率的提升,碳排放主导驱动要素由居住用地向工业用地转变。研究结论:为有效降低城市用地影响下的碳排放,应考虑影响作用的空间异质性与不同城镇化水平的城市差异。

关键词:土地利用;碳排放;GTWR;莫兰指数;多源数据;青岛市

中图分类号: K921; K927 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4710(2022)04-0451-11

Study on the impact of urban land intensity on carbon emissions based on multi-source data: a case study of Qingdao City

ZHANG Xuejie^{1,2}, WANG Chengxin^{1,2}, MIAO Yi^{1,2}, WANG Jianshi^{1,2}, LI Mengcheng^{1,2}

(1. College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250358, China; 2. Collaborative Innovation Center of Human-Land Coordination and Green Development in Shandong Universities, Jinan 250358, China)

Abstract: In the background of the “dual carbon” goal, in order to explore the carbon emission response and its internal relationship with the change of urban land use intensity at county level, and based on the multi-source data of POI, Landsat and statistical data, research methods such as three-dimensional spatial surface interpolation, Kernel Density Estimation (KDE), Geographically and Temporally Weighted Regression (GTWR) were used to explore the impact of urban land use intensity on carbon emissions in 2010, 2013 and 2017. The results show that: ① The three-dimensional surface of Qingdao's carbon emission index changes from a “peak” to a “saddle,” and the spatial and temporal distribution of the three types of land use intensity presents a multicenter distribution; ② The sensitivities of carbon emission index to the change of land use intensity are different in different years; ③ In the background of different urbanization rates, there is a certain rule for the change of carbon emissions driven by land use intensity; with the increase of urbanization rate, the leading driving factor of carbon emissions changes from residential land to industrial land. Research conclusions are drawn that in order to effectively reduce carbon emissions under the influence of urban land use, the spatial heterogeneity of the impact and the urban differences of different urbanization levels should be considered.

Key words: land use; carbon emissions; GTWR; Moran index; multi-source data; Qingdao City

收稿日期: 2022-04-29; 网络出版日期: 2022-08-15

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.n.20220815.1103.002.html>

基金项目: 国家社会科学基金资助项目(20BJY070); 山东省自然科学基金项目(ZR2019MD043)

第一作者: 张雪洁,女,硕士生,研究方向为城市地理、区域发展与产业规划。E-mail:626430288@qq.com

通信作者: 王成新,男,博士,教授,博导,研究方向为城市化与区域发展。E-mail:404122665@qq.com

城市土地利用变化是影响区域碳排放的重要因素^[1,2]。不同城市发展阶段背景下,城市用地结构与强度存在显著的时空差异性^[3]。据此,在城市发展与“双碳”目标的双重背景下,关注城市用地变化对碳排放的影响具有理论与现实意义。

由此,相关研究受到了多领域学者的共同关注,研究成果呈现出成熟化、丰富化、体系化态势。众多学者从国家、城市群、城镇等不同尺度分析了碳排放与城市用地之间的关系^[4-7],提出不同的土地利用类型对碳排放的影响作用不同。大量研究选用重心转移模型^[8]、热点分析^[5]、社会网络分析^[9]或灰色模型^[10]等方法,探讨了不同城市用地类型下碳排放的核算与时空分异^[3,11,12]、基于用地类型转换的碳排放变化及其驱动机理^[13]以及如何预测模拟土地利用碳排放^[14-16]等,并取得了丰硕成果。如魏燕茹^[9]、李彦旻^[10]等分别分析了安徽省、福建省、广州市的土地利用碳排放时空特征及其影响因素;吴巍等^[17]依据美国的调查数据,预测了碳排放随用地的变化情况,发现高密度住宅区碳排放更多。总体来看,现有研究大多基于多时空尺度,围绕城市用地的碳排放核算、分布与预测展开,而从全域与局部两个层面出发,分析时空维度下城市用地强度对碳排放的影响作用变化情况,探索不同城市发展阶段下驱动要素的变化规律,仍是碳排放研究领域需要不断深入的问题。

由此,基于现有研究,考虑城市人文属性^[18],引入兴趣点(POI)等多源数据来弥补传统数据的不足,成为碳排放分析的发展趋势之一^[19]。同时,已有大量研究证实,POI数据在表达城市土地利用强度方面具有独特的优势。因地制宜是中国“碳中和”的实现方式之一,在分析区域异质性时,县级单位比省、市级单位更加有效,对于规划针对性更强。因此基于多源数据,以青岛市县域为基本评价单元,运用三维空间曲面插值分析、核密度分析及GWTR模型,研究城市用地强度对碳排放的影响,并进行不同城市发展阶段下碳排放驱动因素及趋势规律的初步探索,以期为低碳城市建设和“双碳”背景下的城市科学规划、区域高质量发展提供决策参考。

1 研究区概况

青岛市是中国东部沿海地区的区域性中心城市,在环渤海经济圈等多项战略规划中具有重要的功能定位。青岛市总面积 11 282 km²,位于东经 119°30′~121°00′、北纬 35°35′~37°09′,下辖 7 区 3 市(市南区、市北区、李沧区、崂山区、黄岛区、城阳

区、即墨区、胶州市、平度市和莱西市),城区人口 434 万,2020 年总人口突破 1 000 万,建成区面积 638.4 km²(图 1)。

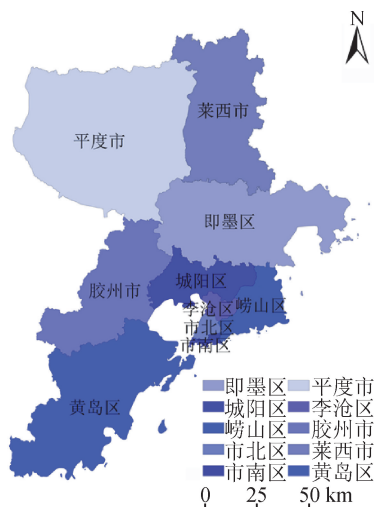


图 1 研究区示意图

Fig. 1 Diagram for the study area

注:该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2019)3266 的标准地图制作,底图无修改。

自 2010 年以来,青岛市的城镇化率超过 65%,并于 2016 年进入城市化后期(图 2),是中国特大城市。同时,青岛市于 2012 年成为全国第二批、山东省第一座低碳试点城市。伴随着青岛市城市建设用地面积与利用强度的急速增长,如何平衡城市用地结构发展与碳排放有效控制是当前亟待解决的问题之一。

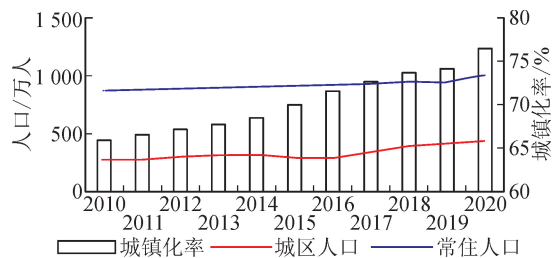


图 2 青岛市城镇化率与人口变化

Fig. 2 Urbanization rate and population change in Qingdao City

2 假设模型与数据来源

2.1 假设模型:库兹涅茨比较曲线

库兹涅茨曲线最早被用于解释经济发展与不平等收入间的倒“U”型变化关系:随着经济的不断发展,收入分配状况先趋于恶化,再逐步改善,最后达到比较公平的收入分配状况,呈颠倒的 U 的形状。后期该假说也被应用于交通^[20]、工业化^[21]、生态环

境^[22]等领域,且已有研究证实了建设用地与碳排放之间存在库兹涅茨曲线特征^[23],并将该理论引入到用地与碳排放的探索中,而城市用地强度与碳排放之间是否存在该特征仍有待进一步探索。

在假设模型中,研究参照 EKC 模型原理及其相关成果,结合阿隆索地租模型中的分类对比原理,用城市土地利用强度表征 x 轴, y 轴为碳排放指数,将城市土地利用强度对碳排放指数的影响可视化。

基于以上操作和对当前研究成果的查阅,研究提出以下假设(图 3):①随着城市土地利用强度的提高,碳排放指数先呈上升趋势且增速较快,然后跨过临界值(碳排放指数到达峰值),碳排放情况得到改善,最后逐步降低,最终达到低碳排放的目标;②商业、工业以及居住三类用地对碳排放的影响各不相同。预测工业用地强度在提升初期对碳排放的影响将超过商业用地与居住用地,且较快达到峰值,而商业用地强度在提升后期将会有效控制碳排放情况,表现为碳排放数据随商业用地强度的提升而快速降低。

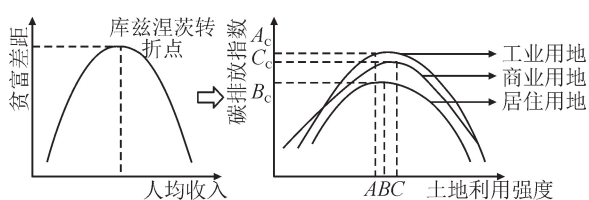


图 3 库兹涅茨比较曲线

Fig. 3 Kuznets comparison curve

2.2 数据来源与预处理

研究数据主要来源于高德地图开放平台(<https://restapi.amap.com/v3/place/text?parameters>)、中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/DataList.aspx?FieldTypID=1,3>)以及 CEADs 中国碳核算数据库(<https://www.ceads.net.cn/data/county?#1059>)。从高德地图开放平台可获取到 2010 年到 2017 年的青岛市 POI 数据集,同时,利用中国科学院资源环境科学数据中心的同年份区间的 Landsat 陆地卫星系列遥感数据,提取城市建成区对 POI 数据进行辅助检验,使数据清洗更加科学,确保 POI 数据可以有效表征该城市土地利用分布结构以及土地利用强度。最终,对筛选后的 POI 数据进行类型识别与归纳,以此判定商业用地、工业用地和居住用地强度。

县级市的碳排放数据来源于 CEADs 中国碳核算数据库。该数据库中 2010 年到 2017 年县域尺度下的碳排放数据是基于 DMSP/OLS 和 NPP/VIIRS 卫星图像,通过粒子群优化-反向传播(PSO-

BP)算法估算得到的,是相关研究中碳排放数据的常用来源^[24,25]。此外,2010—2017 年间,青岛市行政区划由 7 区 5 市调整合并为 7 区 3 市,本研究以 2017 年区划情况为准。

3 研究方法

3.1 三维空间曲面插值分析

空间插值分析能够将离散数据转换为连续数据。二维平面地理空间内,样本的平面坐标代表离散数据的坐标;三维空间内,第三维数据代表离散点属性或高程。本文基于 Matlab 平台,通过调用 *griddata* 函数来实现三维空间曲面插值,用以分析三维视角下青岛市县域碳排放指数的演变特征。其调用格式为^[26]:

$$Z = \text{griddata}(X, Y, Z, X_1, Y_1, 'method') \quad (1)$$

其中, Z 为 X 、 Y 的构造插值函数,此时存在响应数据点 (X_1, Y_1) , 该处函数值为 $Z_1 = g(X_1, Y_1)$ 。Matlab 中的 '*method*' 可选用线性插值、三次多项式插值、最近邻插值以及 Matlab 随机数据点插值四类。经比较,随机数据点插值所产生的三维曲面效果最好,因此采用 Matlab 随机数据点插值法。

3.2 核密度估计

核密度估计(kernel density estimation, KDE)是基于一定范围内要素密度的空间平滑操作,它是通过将离散点数据转换为有密度变化的图层来识别要素的空间分布特征。选用 ArcGIS 的核密度估计工具,进行重分类后 POI 点要素空间分布的可视化。二维空间的核密度方程为^[27]:

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{nh^2\pi} \sum_{i=1}^n \left[1 - \frac{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}{h^2} \right]^2 \quad (2)$$

式中: h 为阈值; n 为阈值范围内点数; $(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2$ 为 (x_i, y_i) 与 (x, y) 之间的离差。

在计算过程中,对于核密度的搜索半径,在默认值(2 588 m)的基础上分别增减不同长度进行试验。多次调试得到阈值在 2 500 m 时,图像数据平滑度较好且局部特征明显。

3.3 全局空间自相关分析

空间自相关分析是基于地理学第一定律,以空间视角分析事物是否存在自相关性的方法。全局空间自相关表征空间整体中事物分布的集聚程度^[28]:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n W_{ij} z_i z_j}{\sigma^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n W_{ij}} \quad (3)$$

式中: n 为观测值数量; z_i 、 z_j 为位置 i 与 j 的观测值; W_{ij} 为空间权重; σ 为要素属性与平均值的均差。

在假设的显著性水平下, I 为正值表示事物存在集聚现象, I 为负值表示相邻地区之间存在较大差异, 若 I 趋近于 0, 则说明该事物呈随机分布。

3.4 GTWR 模型

时空地理加权回归(GTWR)模型是基于地理加权回归(GWR)模型的优化改进模型。它在 GWR 关注空间异质性的基础上, 引入时间坐标, 充分考虑了时空非平稳性。本文采用该模型分析局部视角下城市用地强度对碳排放指数的影响作用^[29]:

$$y_i = \beta_0(\mu_i, v_i, t_i) + \sum_{k=1}^m \beta_k(\mu_i, v_i, t_i) x_{ik} + \epsilon_i \quad (4)$$

式中: (μ_i, v_i, t_i) 是第 i 个样本点的时空坐标, μ_i 、

v_i 、 t_i 分别为第 i 个样本点的经度、纬度和时间; $\beta_0(\mu_i, v_i, t_i)$ 为常数项, 表示第 i 个样本点的回归常数; x_{ik} 为第 k 个自变量在第 i 点的值; ϵ_i 为残差; $\beta_k(\mu_i, v_i, t_i) x_{ik}$ 为第 i 个样本点的第 k 个回归参数。

回归参数由位置与时间共同决定, 其中时空权重由高斯函数与 bi-square 空间权重函数得到。GTWR 模型与 GWR 模型在带宽的选择方法上具有一定的一致性, 均采用 AIC_C 法则获取最佳带宽。

4 结果分析

4.1 碳排放时空分布特征

基于 Matlab 软件, 运用三维空间曲面插值法, 对 2010 年、2013 年及 2017 年的青岛市碳排放指数进行插值三维可视化, 得到图 4。

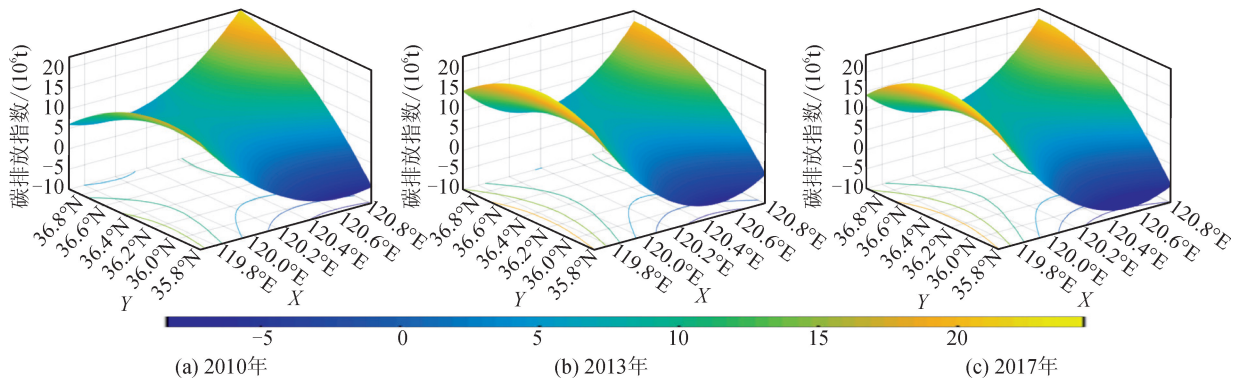


图 4 三维空间曲面插值图

Fig. 4 3D space surface interpolation

图 4 中, X 轴为经度, Y 轴为纬度, 碳排放指数则用 Z 轴表示, 等值线落在 XY 面。分析可知, 青岛市碳排放总体呈现北高南低的格局, 并随时间的推移略有变化。基于曲面立体视角可知, 2010 年研究区西北方向的碳排放较少, 排放主要集中在东北方向; 而在 2010—2013 年间, 西北方向碳排放指数急速上升, 青岛市碳排放三维空间曲面进而由“山峰状”转化为一直延续到 2017 年的“鞍部状”, 低值区由“西北—东南”一线变为“西南—东南”一带; 2013—2017 年间, 碳排放量逐渐趋于稳定且呈缓慢下降趋势。表明平度市与莱西市的碳排放一直处于较高水平, 而青岛市六区的生态环保要求较高, 碳排放量较低。基于坐标切割面分析, 三维曲面的各个平面落点变化各不相同: XZ 面上的指数型增长曲线于 2017 年呈现出“U”形, YZ 面中的曲线逐渐趋于上凸形, 表明青岛市碳排放的重点区域具有向北聚集的趋势。因此, 青岛市碳排放指数的动态发展具有明显的时空异质性。

4.2 土地利用强度分布特征

运用 ArcGIS 软件试验了多种带宽, 确定 2 500 m 为研究区 POI 点核密度分析的可视化最优带宽(图 5)。

由图 5 可知, 青岛市商业用地、工业用地以及居住用地的强度均具有明显的时空异质性。在时间维度上, 三类用地 2017 年的核密度值总体显著高于 2010 年的情况。在空间维度上, 青岛市全域呈现出明显的不同规模的以市南区、市北区及各区政府所在地为核心的多中心模式; 从各区县来看, 主要表现为中心—外围结构特征, 且高值区的分布具有高度一致性与趋向性, 集中分布于青岛市东岸城区(市南区、市北区、李沧区、崂山区)、北岸城区(城阳区)和西海岸新区沿海地区以及其余各市城区与跨区交通要道周围。从三类用地强度来看, 商业用地呈现扩张趋势, 工业用地虽无显著的结构演替, 但是西海岸新区沿海地区的工业强度提升明显, 而居住用地与商业用地相反, 2017 年的分布结构较 2010 年更为集聚。

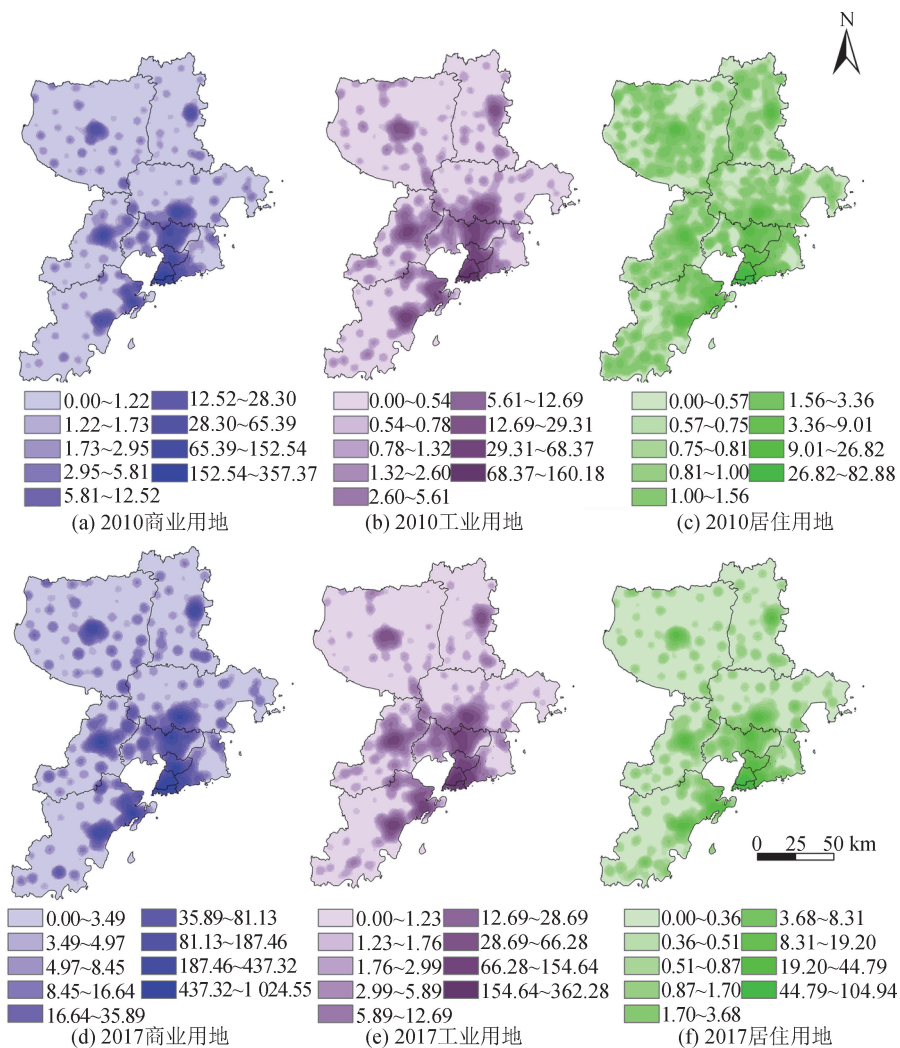


图5 三类用地强度的核密度分布(单位:个/m²)

Fig. 5 Nuclear density distribution of three types of land use intensity (unit: 个/m²)

4.3 相关分析

4.3.1 空间自相关分析

全局莫兰指数可以有效判断在整个区域上要素

所有的空间单元与周边地区的关联度。本文基于GeoDa平台计算了所有要素全年份的全局莫兰指数(表1),以探索各要素本身是否受空间影响。

表1 莫兰指数

Tab. 1 Moran index

年份	碳排放指数		商业用地		工业用地		居住用地	
	<i>I</i>	<i>p</i>	<i>I</i>	<i>p</i>	<i>I</i>	<i>p</i>	<i>I</i>	<i>p</i>
2010	0.499	0.007	-0.040	0.300	0.012	0.190	-0.097	0.270
2011	0.501	0.007	0.030	0.261	0.020	0.301	0.009	0.136
2012	0.505	0.006	0.011	0.235	0.026	0.196	0.106	0.197
2013	0.504	0.010	0.085	0.175	0.037	0.226	0.259	0.043
2014	0.520	0.006	-0.180	0.213	-0.026	0.234	0.006	0.234
2015	0.495	0.009	-0.256	0.239	-0.036	0.323	-0.021	0.279
2016	0.486	0.009	-0.185	0.196	-0.034	0.309	-0.015	0.175
2017	0.503	0.006	-0.201	0.346	-0.030	0.314	-0.013	0.268

由表 1 可知,碳排放指数的 I 值大于 0,且 p 值小于 0.01,表明碳排放指数在空间上呈正相关,即碳排放高值地区在空间上更为聚集。而土地利用强度方面, p 值均大于 0.1,即数据本身的空间相关性极弱,结果不具有显著性。因此,县域尺度上的商业用地、工业用地以及居住用地强度几乎不受城市用地自身空间布局的影响,故研究这三类用地对碳排放的影响作用更为科学。

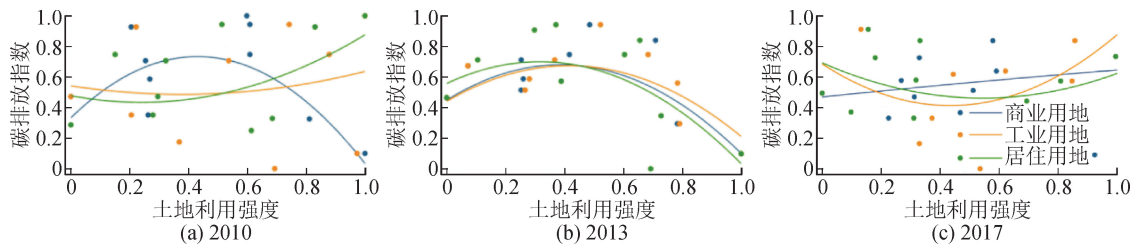


图 6 碳排放指数和土地利用强度的散点拟合

Fig. 6 Scatter fitting of carbon emission index and land use intensity

对比假设模型发现,结果与原假设存在一定的差异。2010 年,仅商业用地拟合线呈现倒“U”形,表明商业用地在提高初期对碳排放量具有促进作用,当土地利用强度提高到一定程度,碳排放量达到峰值;峰值过后,商业用地分布越密集的地区,碳排放量越少。这是因为土地利用初期,商业聚集对人口吸引力较强,巨大的人流使得该地碳排放指数升高,当土地利用强度达到一定门槛,该地经济发展良好,城市对生态要求逐步提高,因而碳排放指数逐渐降低。

土地利用对碳排放的影响。总体上,2010 年工业用地与居住用地强度的提升加大了该地的碳排放,这与制造业的发展和人口的增加密切相关。2013 年的拟合结果与假设模型相似度较高:三类用地对碳排放的正向影响将会在峰值后转为负向影响。但是,比较三类用地可以发现,在土地利用强度提升初期,居住用地的强度增加对碳排放的影响要大于商业与工业用地,且居住用地的峰现时间比工业、商业用地有所提前;在用地强度提升后期,居住用地与商业用地拟合线的斜率显著低于工业用地。

4.3.2 相关性分析

不同用地类型与碳排放之间的正负影响不同,不同时间下单一用地与碳排放之间的关系也相差较大。为探索青岛市不同类型用地强度对碳排放量影响作用的变化情况,利用 Stata 16 软件分别对 2010 年、2013 年及 2017 年的归一化数据进行散点拟合(图 6)。

这是因为人口增多对碳排放的增大作用存在阈值,若超过该阈值,居住人口增多,碳排放量反而趋于降低。2017 年,土地利用对碳排放的影响作用拟合线由倒 U 开始转变,工业用地与居住用地强度在碳排放达到最低值后继续提升,使得碳排放量产生了明显提升。综上所述,随着时间推移,商业用地对碳排放的作用趋于减弱,而工业用地对碳排放的作用愈发显著。因此,青岛市第二产业的发展对碳排放强度有促进作用,工业方面的节能减排将会是重中之重。已有研究表明,产业结构调整和技术进步能降低碳排放强度,因此,工业减排不仅应聚焦于核心城区,还应关注所有工业分布区^[29,30]。

4.4 空间异质性分析

为探索城市用地结构对碳排放影响的局部相关性,考虑到“地理第一定律”的影响,使用 GTWR 模型进行空间异质性分析^[31],结果见表 2,表中 R^2 与校正后的 R^2 均高于 0.95,表明该回归模型优度较高,模型结果(图 7)能够较为科学地揭示影响作用的空间异质性。

表 2 GTWR 参数信息

Tab. 2 GTWR parameter information

带宽/m	残差平方和	标准差	AICc	R^2	调整后 R^2	时空距离比
0.153	31.684	0.890	218.473	0.956	0.952	0.269

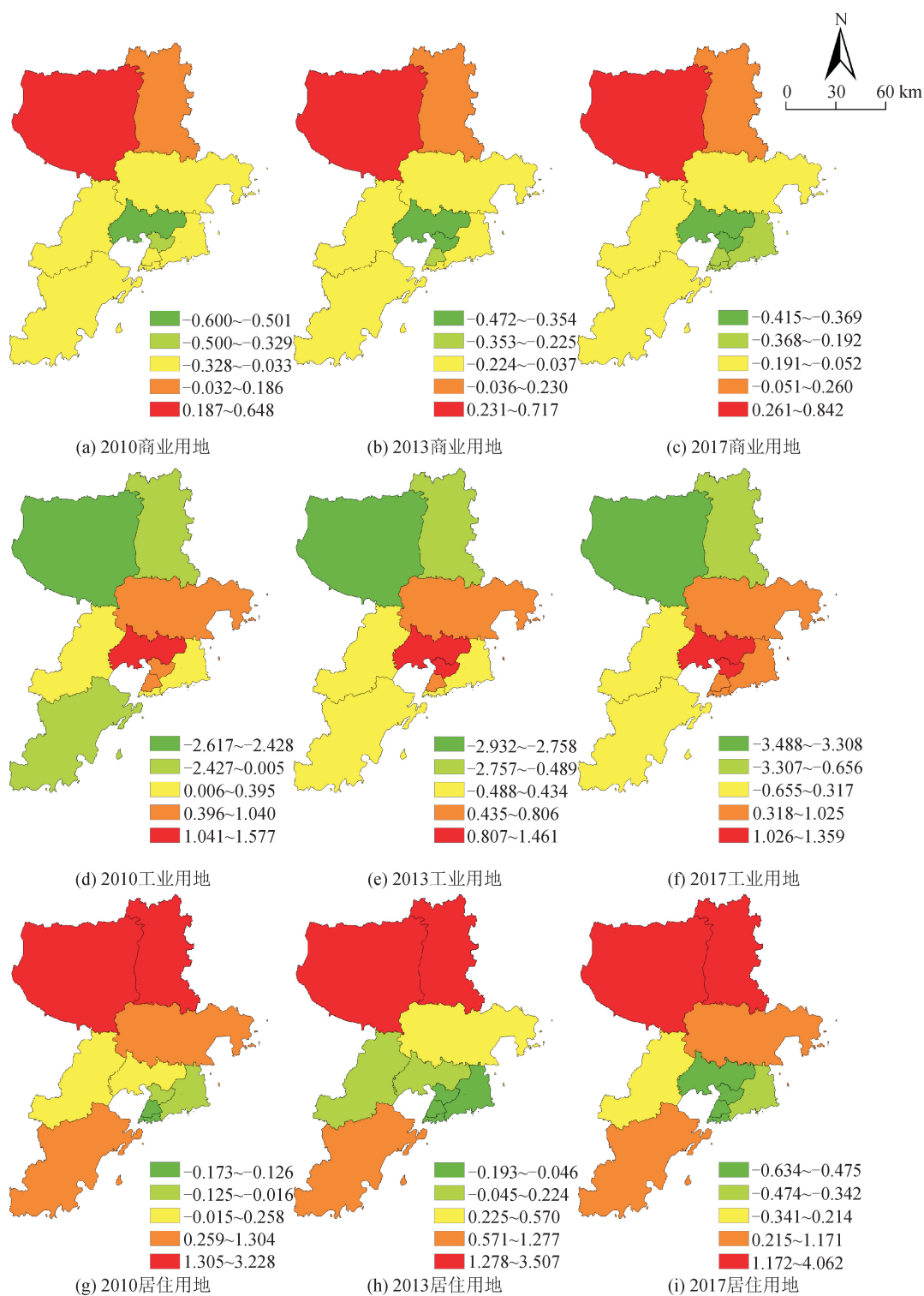


图7 基于多要素GTWR模型的回归系数时空分布

Fig. 7 Spatial and temporal distribution of regression coefficients based on multi-factor GTWR model

图7为GTWR模型中三类用地强度的拟合系数分布。由图7可知,不同时期的不同用地强度对碳排放的影响力存在空间分异,具体来看:①商业用地强度对碳排放的影响力较为稳定,其正向高值区一直集中分布于青岛市北部地区,如平度市,截至2017年,该地区常住人口城镇化率突破40%,户籍

人口城镇化率仅为30%,当城市处在发展初期,其商业用地强度的增强会对人口、资源形成吸引,从而造成较大的碳排放负担;负值地区数量增加、范围扩大,且主要集中在青岛市东岸城区和北岸城区;拟合系数绝对值较低的区县集中在即墨区、胶州市和黄岛区,这些区域的商业用地强度对碳排放量的影响

较低。②工业用地对碳排放的影响相对突出,并以正向影响为主,空间上亦存在较明显的差异性。正向高值区趋于分布在青岛市外围区县,2010年正向高值区为城阳区、即墨区、李沧区与市北区,崂山区与胶州市的工业用地对碳排放影响不显著;2013年李沧区碳排放对工业用地强度的敏感性明显提升;2017年高值区形成了以城阳区为中心,即墨区、李沧区、市北区与崂山区为外围的半环模式,该区域碳排放量对工业用地的响应较为明显。③居住用地在研究期限内对碳排放的影响力变化较大。回归系数绝对值较低的区域集中于胶州市附近,且数量趋于

减少,城阳区与即墨区波动明显。负向高值区由青岛港(市南区)向周围扩散,由东部沿海地区向西部逐渐转移;正向高值区稳定在青岛市北部县市。随着时间推移,回归系数绝对值变化越来越大,表明碳排放对居住用地的变化越来越敏感,受其影响愈发明显。

为探讨青岛市碳排放对土地利用的具体响应模式,助力青岛市实现高质量发展、高品质生活与高效能治理,基于拟合系数的时空分布,凝练各类用地强度在不同区县范围内对碳排放的作用程度与主导驱动要素(图8)。

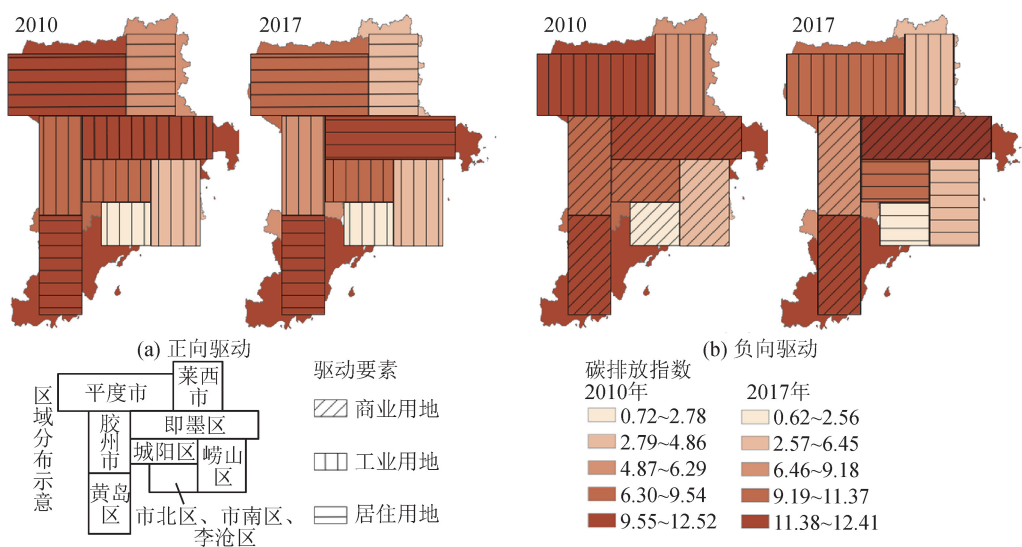


图8 青岛市碳排放主导驱动要素分析

Fig. 8 Analysis of main driving factors of carbon emissions in Qingdao City

对于青岛市碳排放 in 土地利用方面的主导驱动要素,虽然各区县具有空间差异性,但各区县随时间变化表现稳定。具体来看,中部的市北区、市南区、李沧区、城阳区、崂山区以及胶州市的碳排放强度一直受工业用地强度影响较大,上述市区是青岛市面积最小的6个县级单位,但却是经济发展最突出的地区。市南区是青岛市的商务区、旅游区,同时也是青岛的政治、经济、文化中心;市北区是青岛市的商业区,与市南区同属老城区;李沧区由老工业区向商业区转型,已成为青岛市北部的商业中心。这三个区与胶州市依托青岛港、胶州湾与众多交通要道,成为青岛市的门户、交通枢纽,其商业与交通运输业的发展愈渐成熟且绿色可持续,因此工业用地扩张将对该区域碳排放产生明显的促进作用。崂山区的中心是新兴的商务区,背靠崂山风景区,旅游、商务是该区的主导产业,工业用地在此处布局会导致崂山区碳排放量大幅增长。而城阳区是新兴的高新区,碳排放对其工业用地的敏感度远远高于商业与

居住用地。平度市和莱西市属于青岛的外围市区,以第一产业为主导产业,仍处在城镇化的快速增长阶段,在研究时段内人口的快速增长与集聚增大了两市的碳排放负担。对比2010年与2017年的主导驱动要素发现,土地利用层面中,推动即墨区碳排放量增大的主导驱动要素由工业用地转为居住用地,这是因为2010年即墨区的定位是以商贸为主体特色的沿海开放型中等城区,工业用地的布局给该区的环境保护造成了一定困扰。而2017年即墨区作为青岛都市圈核心区的北翼,已形成较为成熟的先进制造业带与国技工贸发展带,成为以商贸、轻工业、旅游和农副产品出口加工为主导产业的现代化中等城区,工业用地的变化对碳排放的影响减弱,居住用地的正向影响开始显露。

负向主导驱动要素的变化主要集中于青岛市东岸城区和北岸城区,在2010年,该地区商业用地强度越高,碳排放指数越低,而在2017年,碳排放指数对居住用地的敏感性更强。该区域作为青岛市的经

济中心,在2010年到2017年间迅速发展,城镇化率突破95%,高强度的商业用地对碳排放的影响甚微,居住用地内的人口对高质量发展的要求越来越高,高经济条件下的人口集聚带来的环境优化效应越发显著,即居住用地对碳排放的负向效应逐渐变大。平度市与莱西市属于青岛市的远郊发展区,但其发展方向截然不同。平度市以农业为主导产业,虽注重工矿区的规划,但工业发展缓慢且分布松散;2010年后,平度市城市工业建设用地面积增长甚微,但是工业用地强度提升较快,即平度市近年来工业分布逐渐集聚,这对碳排放指数起到了一定的削弱作用。莱西市于2002年被定位为青岛北部重要的工业城市,主要关注加工业与新兴工业的发展,同时注重产业升级。高质量工业用地强度的提高在为莱西市的经济带来机遇的同时,并未增加该市的生态环境压力,可在“双碳”背景下促进该市的节能减排。

5 结论与讨论

5.1 结论

在城镇化快速发展以及“双碳”目标背景下,研究城市土地利用对碳排放的影响具有重要意义。采用2010年、2013年和2017年的POI与碳排放指数,运用ArcGIS、Geoda、Matlab以及Stata多个软件,分别从全局和局部视角研究了青岛市县域商业用地、工业用地与居住用地对碳排放的影响作用,并进一步探索了碳排放在城市用地方向的主导驱动力。

1) 青岛市碳排放指数的时空分布具有明显的异质性。总体曲面从“山峰状”变为“鞍部状”,高值区从东北莱西市向西北平度市转移,低值区位于青岛市东南方位,且市南区、市北区、李沧区、崂山区附近碳排放指数一直较为稳定。商业用地、工业用地以及居住用地的用地结构具有明显的空间差异,呈现不同规模的多中心分布,高值区主要位于环胶州湾地区,次中心分布在各区市政府驻地附近;用地强度随时间推移存在不同程度的增强。

2) 在全局与局部视角下,碳排放指数与土地利用皆密切相关。从全局视角分析可知,青岛市三类用地对碳排放的影响各不相同,单一用地在不同时段内的影响作用也存在差异。商业用地对碳排放的作用趋于减弱,而工业用地对碳排放的作用愈发显著。对比假设模型,发现土地利用强度对碳排放的影响作用较为复杂,不同年份内即不同的发展阶段中,碳排放对各类用地的敏感程度相差较大,推进与

削弱作用所表现的波动较大。从局部特征来看,不同时期的不同用地对碳排放的影响存在空间分异。商业用地对青岛北部与中心城区的碳排放影响较强,且影响范围逐年扩大;工业用地对碳排放指数的影响越来越突出,且以促进碳排放为主;居住用地的影响作用波动较大,其对碳排放产生较高负向影响的区域由东部沿海地区向西部逐渐转移。

3) 商业用地、工业用地以及居住用地共同影响着青岛市碳排放指数的时空演变。可以发现,同一地区的碳排放往往受多种因素的影响,但处在不同阶段的不同城市定位背景下,其主导驱动要素有着明显的规律。经济较为发达的地区,工业用地分布将对其生态环境造成较大负担,而对处于城镇化快速发展阶段的城市来说,居住用地强度的不断增长产生的生态负效应更加显著。

5.2 讨论

在“双碳”目标背景下,研究不同土地利用类型对碳排放的影响作用,进而分析不同城市发展阶段下碳排放在用地方面的主导驱动要素,对推动城市节能减排,助力城市早日实现“双碳”目标意义重大。以青岛市为例,从碳排放指数与土地利用强度的时空分异切入,创新性地利用空间自相关模型与GTWR模型,从全局与局部两个视角研究土地利用对碳排放的驱动作用,分析了时间与空间两个维度的变化,进而认识到不同城市发展阶段的差异性。因此,本文是对以往研究中较多关注时间、空间分异特征,忽略全局、局部相结合的全面性和不同城市发展阶段的差异性作进一步补充和丰富。

已有研究虽已证实了POI数据在测度土地利用方面的科学性^[32,33],而且它还能够弥补传统遥感数据对土地利用人文属性的忽略,但是在研究对碳排放的影响过程中,POI数据还是存在一定的局限性。在通过Landsat数据对POI数据进行数据优化、校正与清洗时,发现POI数据不足以全面定量描绘城市建设用地中公共管理与公共服务用地、物流仓储用地、公用设施用地、绿地与广场用地的强度,因此,这四类用地对碳排放产生的影响作用仍有待进一步探索。同时,在使用Stata进行散点拟合,分析全局影响时可以发现,虽然拟合结果与青岛市市情符合度较高,能够反映一定的实际问题,但是从数理结果分析发现,其拟合效果较差,这与较少的样本量有关。在今后的研究中,大范围、小尺度评价单元的土地利用对碳排放的影响也许能刻画出更为精准的结果,并更有助于梳理其间的影响关系与驱动机理。

参考文献:

- [1] 刘锋,杨木壮,赵冠伟,等. 基于土地利用变化的广州市碳排放效应分析——以近 20a 为例[J]. 农业与技术, 2022,42(4):73-79.
LIU Feng, YANG Muzhuang, ZHAO Guanwei, et al. Analysis on carbon emission effect of Guangzhou based on land use change-taking nearly 20 years as an example [J]. Agriculture and Technology, 2022, 42(4):73-79.
- [2] YIN Dong, GUI Jin, DENG Xiangzheng. Dynamic interactive effects of urban land-use efficiency, industrial transformation, and carbon emissions[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 270: 122547.
- [3] 赵文武. 土地利用研究的国际比较[J]. 地球环境学报, 2010,1(3):249-256.
ZHAO Wenwu. International comparison of land use research[J]. Journal of Earth Environment, 2010, 1 (3): 249-256.
- [4] 何海珊,赵宇豪,吴健生. 低碳导向下土地覆被演变模拟——以深圳市为例[J]. 生态学报, 2021, 41(21): 8352-8363.
HE Haishan, ZHAO Yuhao, WU Jiansheng. Simulation of land cover evolution under low carbon guidance—a case study of Shenzhen [J]. Journal of Ecology, 2021, 41(21): 8352-8363.
- [5] WU Si, HU Shougeng, FRAZIER A E. Spatiotemporal variation and driving factors of carbon emissions in three industrial land spaces in China from 1997 to 2016[J]. Technological Forecasting & Social Change, 2021, 169: 120837.
- [6] 邓祥征,蒋思坚,李星,等. 区域土地利用影响地表 CO₂ 浓度异质性特征的动力学机制[J]. 地理学报, 2022, 77(4):936-946.
DENG Xiangzheng, JIANG Sijian, LI Xing, et al. Dynamic mechanism of regional land use affecting the heterogeneity of surface CO₂ concentration[J]. Journal of Geography, 2022, 77(4):936-946.
- [7] ZHAO Yabo, MA Shifa, FAN Jianhong, et al. Examining the effects of land use on carbon emissions: evidence from Pearl River Delta[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(7): 3623.
- [8] 赵先超,牛亚文,肖杰,等. 基于土地利用变化的岳阳市碳排放时空格局研究[J]. 湖南工业大学学报, 2022, 36(1):10-19, 2.
ZHAO Xianchao, NIU Yawen, XIAO Jie, et al. Study on temporal and spatial pattern of carbon emission in Yueyang City based on land use change[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2022, 36(1):10-19, 2.
- [9] 魏燕茹,陈松林. 福建省土地利用碳排放空间关联性与碳平衡分区[J]. 生态学报, 2021, 41(14):5814-5824.
WEI Yanru, CHEN Songlin. Spatial correlation and carbon balance zoning of land use carbon emissions in Fujian Province[J]. Journal of Ecology, 2021, 41(14): 5814-5824.
- [10] 李彦旻,沈育生,王世航. 基于土地利用变化的安徽省陆地碳排放时空特征及效应[J]. 水土保持学报, 2022, 36(1):182-188.
LI Yanmin, SHEN Yusheng, WANG Shihang. Temporal and spatial characteristics and effects of land carbon emission in Anhui Province based on land use change[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(1): 182-188.
- [11] 孙赫,梁红梅,常学礼,等. 中国土地利用碳排放及其空间关联[J]. 经济地理, 2015, 35(3):154-162.
SUN He, LIANG Hongmei, CHANG Xueli, et al. Carbon emission from land use and its spatial correlation in China[J]. Economic Geography, 2015, 35(3): 154-162.
- [12] 娄伟. 城市碳排放量测算方法研究——以北京市为例[J]. 华中科技大学学报(社会科学版), 2011, 25(3): 104-110.
LOU Wei. Research on calculation method of urban carbon emission-taking Beijing as an example[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Social Science Edition), 2011, 25(3):104-110.
- [13] 马晓哲,王铮. 土地利用变化对区域碳源汇的影响研究进展[J]. 生态学报, 2015, 35(17):5898-5907.
MA Xiaozhe, WANG Zheng. Research progress on the impact of land use change on regional carbon sources and sinks[J]. Journal of Ecology, 2015, 35 (17): 5898-5907.
- [14] 王剑,薛东前,宋永永,等. 基于农地利用的黄土高原碳排放变化及预测研究[J]. 资源开发与市场, 2018, 34(9):1250-1255.
WANG Jian, XUE Dongqian, SONG Yongyong, et al. Study on the change and prediction of carbon emission in the Loess Plateau based on agricultural land use [J]. Resource Development and Market, 2018, 34 (9): 1250-1255.
- [15] 陈景. 石家庄西部太行山区土地利用变化碳排放演变及预测研究[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2015.
CHEN Jing. Study on the evolution and prediction of carbon emission from land use change in Taihang Mountain Area in the west of Shijiazhuang[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2015.
- [16] 杨坤,胡馨,石越. 基于 RS 和 GIS 的土地利用变化碳排放现状及预测分析[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(7):137-141.
YANG Kun, HU Xin, SHI Yue. Current situation and prediction analysis of carbon emission from land use change based on RS and GIS[J]. Journal of the Yangtze River Academy of Sciences, 2016, 33(7): 137-141.
- [17] 吴巍,宋彦,洪再生,等. 居住社区形态对住宅能耗影响研究——以宁波市为例[J]. 城市发展研究, 2018, 25(1):15-20, 28.

- WU Wei, SONG Yan, HONG Zaisheng, et al. Study on the impact of residential community form on residential energy consumption—a case study of Ningbo[J]. *Urban Development Research*, 2018, 25(1): 15-20, 28.
- [18] LIU Xingjian, LONG Ying. Automated identification and characterization of parcels with OpenStreetMap and points of interest[J]. *Environment and Planning B-Planning & Design*, 2016, 43:341-360.
- [19] 牛亚文,赵先超,胡艺觉. 基于 NPP-VIIRS 夜间灯光的长株潭地区县域土地利用碳排放空间分异研究[J]. *环境科学学报*, 2021, 41(9):3847-3856.
- NIU Yawen, ZHAO Xianchao, HU Yijue. Study on spatial differentiation of county land use carbon emission in Chang Zhu Tan area based on NPP-VIIRS night light[J]. *Journal of Environmental Science*, 2021, 41(9):3847-3856.
- [20] 谢守红,蔡海亚,夏刚祥. 中国交通运输业碳排放的测算及影响因素[J]. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(5): 13-18.
- XIE Shouhong, CAI Haiya, XIA Gangxiang. Measurement and influencing factors of carbon emission from China's transportation industry[J]. *Resources and Environment in Arid Areas*, 2016, 30(5):13-18.
- [21] 陈静怡. 我国能源消费与环境库兹涅茨曲线研究[D]. 北京:中国环境科学研究院, 2021.
- CHEN Jingyi. Study on Kuznets curve of energy consumption and environment in China[D]. Beijing: Chinese Research Academy of Environmental Sciences, 2021.
- [22] 李竞,侯丽朋,唐立娜. 基于环境库兹涅茨曲线的我国大气污染防治重点区域环境空气质量与经济增长关系研究[J]. *生态学报*, 2021, 41(22):8845-8859.
- LI Jing, HOU Lipeng, TANG Lina. Study on the relationship between ambient air quality and economic growth in key areas of air pollution prevention and control in China based on environmental Kuznets curve[J]. *Journal of Ecology*, 2021, 41(22):8845-8859.
- [23] 张润森,濮励杰,文继群,等. 建设用地扩张与碳排放效应的库兹涅茨曲线假说及验证[J]. *自然资源学报*, 2012, 27(5):723-733.
- ZHANG Runsen, PU Lijie, WEN Jiqun, et al. Kuznets curve hypothesis and verification of construction land expansion and carbon emission effect[J]. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(5):723-733.
- [24] 鲜军,周新苗. 全要素生产率提升对碳达峰、碳中和贡献的定量分析——来自中国县级市层面的证据[J]. *价格理论与实践*, 2021(6):76-79.
- XIAN Jun, ZHOU Xinmiao. Quantitative analysis of the contribution of total factor productivity improvement to carbon peaking and carbon neutralization—evidence from China's county-level cities[J]. *Price Theory and Practice*, 2021(6): 76-79.
- [25] 徐泽,李储,牛陆. 呼包鄂榆城市群土地混合利用与碳排放的脱钩关系[J]. *环境科学研究*, 2022, 35(1): 299-308.
- XU Ze, LI Chu, NIU Lu. Decoupling relationship between land mixed use and carbon emission in Hubaoeyu urban agglomeration[J]. *Environmental Science Research*, 2022, 35(1):299-308.
- [26] 桂劲松,康海贵. 结构可靠度分析的响应面法及其 Matlab 实现[J]. *计算力学学报*, 2004, 21(6):683-687.
- GUI Jinsong, KANG Haigui. Response surface method for structural reliability analysis and its Matlab implementation[J]. *Journal of Computational Mechanics*, 2004, 21(6):683-687.
- [27] 陈蔚珊,柳林,梁育填. 基于 POI 数据的广州零售商业中心热点识别与业态集聚特征分析[J]. *地理研究*, 2016, 35(4):703-716.
- CHEN Weishan, LIU Lin, LIANG Yutian. Hot spot identification and business agglomeration characteristics analysis of Guangzhou retail business center based on POI data[J]. *Geographic Research*, 2016, 35(4): 703-716.
- [28] 葛莹,姚士谋,蒲英霞,等. 运用空间自相关分析集聚经济类型的地理格局[J]. *人文地理*, 2005, 20(3): 21-25.
- GE Ying, YAO Shimou, PU Yingxia, et al. Using spatial autocorrelation to analyze the geographical pattern of agglomeration economic types [J]. *Human Geography*, 2005, 20(3): 21-25.
- [29] LI Zhihui, DENG Xiangzheng, LU Peng. Uncovering trajectories and impact factors of CO₂ emissions: a sectoral and spatially disaggregated revisit in Beijing[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2020, 158: 120124.
- [30] ZHANG Fan, DENG Xiangzheng, PHILLIPS F, et al. Impacts of industrial structure and technical progress on carbon emission intensity: evidence from 281 cities in China[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2020, 154, 119949.
- [31] HUANG Bo, WU Bo, BARRY M. Geographically and temporally weighted regression for modeling spatio-temporal variation in house prices[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24(3): 383-401.
- [32] CHEN Yimin, CHEN Xinyue, LIU Zihui, et al. Understanding the spatial organization of urban functions based on co-location patterns mining: a comparative analysis for 25 Chinese cities [J]. *Cities*, 2020, 97: 102563.
- [33] HU Changhui, LIU Weidong, JIA Yuqiu, et al. Characterization of territorial spatial agglomeration based on POI data: a case study of Ningbo City, China[J]. *Sustainability*, 2019, 11(18): 5083.

(责任编辑 周 蓓)