

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.04.028.

魏俊超, 梅志雄, 马君杰, 等. 广州市土地利用碳排放时空演变及影响因素[J]. 水土保持研究, 2024, 31(4): 298-307.

Wei Junchao, Mei Zhixiong, Ma Junjie, et al. Spatiotemporal Evolution and Influencing Factors of Land-Use Carbon Emissions in Guangzhou[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(4): 298-307.

广州市土地利用碳排放时空演变及影响因素

魏俊超, 梅志雄, 马君杰, 王心雨

(华南师范大学 地理科学学院, 广州 510631)

摘 要: [目的] 探究不同空间尺度下的土地利用碳排放时空演变特征及影响因素, 为制定合理的碳减排措施并实现“双碳”目标提供参考依据。[方法] 从乡镇级和 1 km 格网两个空间尺度测算了 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年广州市土地利用碳排放量, 运用 GIS 空间分析、空间自相关方法、探索性回归和地理地权回归(GWR)模型探讨了广州市土地利用碳排放的时空演变特征及影响因素。[结果] (1) 两个尺度下中、高度碳排放区面积逐渐增加, 负碳排放和低度碳排放区面积逐渐减小。(2) 区域土地利用碳排放总体上具较强的正空间集聚特征, 且集聚程度趋于增强; 高一高集聚和低一低集聚单元居多, 低一高集聚区零星分布且变化不大。(3) 局部空间集聚格局也发生了一些变化: 高一高集聚区逐渐扩大; 低一低集聚区在乡镇级尺度下有所收缩, 而 1 km 格网尺度下略微扩大。(4) 土地利用结构、投资水平和人口规模对土地利用碳排放具正向作用, 95.32% 的乡镇单元的人口密度具抑制作用。[结论] 广州市土地利用碳排放水平逐渐增加, 且整体上呈现正空间集聚特征, 各影响因素对其的影响差异明显, 研究成果可为广州市制定精准化碳减排措施提供参考依据。

关键词: 土地利用碳排放; 空间自相关; 探索性回归; GWR 模型; 广州市

中图分类号: F301.2; X16

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)04-0298-10

Spatiotemporal Evolution and Influencing Factors of Land-Use Carbon Emissions in Guangzhou

Wei Junchao, Mei Zhixiong, Ma Junjie, Wang Xinyu

(School of Geography, South China Normal University, Guangzhou 510631, China)

Abstract: [Objective] The purposes of this study are to explore the spatiotemporal evolution characteristics and influencing factors of land-use carbon emissions at different spatial scales, and to provide a reference basis for formulating reasonable carbon emission reduction measures and realize the goal of ‘dual carbon’. [Methods] The land-use carbon emissions in Guangzhou in 2000, 2005, 2010, 2015 and 2020 were measured at township scale and 1 km grid scale. GIS spatial analysis, spatial autocorrelation, exploratory regression and geographically weighted regression (GWR) model were used to explore the spatiotemporal evolution characteristics and influencing factors of land-use carbon emissions in Guangzhou. [Results] (1) At the two scales, the areas of medium and high carbon emission areas were gradually increasing, while the areas of negative carbon emission areas and low carbon emission areas were gradually decreasing. (2) The land-use carbon emissions in the region generally had strong positive spatial agglomeration characteristics, and the degree of agglomeration tended to strengthen. The high—high agglomeration and low—low agglomeration units were dominant, and the distribution of low—high agglomeration areas were sporadic and did not change much. (3) The local spatial agglomeration pattern also involved some changes: the distribution of high—high

收稿日期: 2023-08-28

修回日期: 2023-09-22

资助项目: 教育部人文社会科学研究规划基金项目“面向生态安全的大区域土地利用优化配置——以珠江三角洲地区为例”(23YJAZH101)

第一作者: 魏俊超(1997—), 男, 广东清远人, 硕士研究生, 研究方向为土地利用碳排放。E-mail: weijunchao1997@163.com

通信作者: 梅志雄(1976—), 男, 湖北黄梅人, 博士, 教授, 主要从事空间分析与建模、土地利用模拟与优化研究。E-mail: zhixiongmei76@126.com

<http://stbcj.paperonice.org>

agglomeration areas was expanding gradually; the distribution of low—low agglomeration areas were shrinking at township scale, but expanding slightly at 1 km grid scale. (4) Land use structure, investment level and population size had positive effects on land-use carbon emissions, while population density of 95.32% of township units had inhibitory effects. [Conclusion] The level of land-use carbon emissions Guangzhou gradually increased and showed positive spatial agglomeration characteristics on the whole, and the impacts of various influencing factors on it were significantly different. The results of this study can provide the reference for Guangzhou to formulate precise carbon emission reduction measures.

Keywords: land-use carbon emissions; spatial autocorrelation; exploratory regression; GWR model; Guangzhou City

随着经济和城市化的快速发展,二氧化碳排放量持续增加,导致全球变暖趋势不断加剧^[1]。影响碳排放的因素众多,其中土地利用变化是一个不可忽视的重要因素。研究表明,合理利用和管理土地,可减少60%~70%的碳排放量^[2]。中国是世界上最大的碳排放国,近年来碳排放量不断增长,引发的环境问题日益突出^[3]。2019年,中国碳排放量达100亿t,约占全球总量的1/3^[4]。在此背景下,2020年9月,中国在联合国大会上提出:“二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,争取2060年前实现‘碳中和’”(简称“双碳”目标)。为实现碳达峰碳中和目标,中国政府已采取了一系列促进碳减排措施,学界近年也做了较多相关研究。碳排放在不同空间尺度上呈现不同的空间格局,具有尺度效应^[5]。作为第二大碳排放来源,土地利用在“双碳”目标的实现方面发挥重要作用^[6]。因此,探究不同空间尺度下的土地利用碳排放时空演变特征及影响因素,有助于制定合理的碳减排措施,为实现“双碳”目标奠定基础。

学者们通过灰色关联模型^[7]、对数平均分割指数(LMDI)模型^[8]、可拓展随机性的环境影响评估(STIRPAT)模型^[9]、地理加权回归(Geographically Weighted Regression, GWR)模型等^[10]方法揭示出碳排放的主要影响因素包括能源消耗、土地利用变化、经济发展水平、人口规模等,其中土地利用变化是碳排放的核心影响因素之一^[11]。因而土地利用碳排放近年引起了学界极大关注,学者们也对土地利用碳排放进行了较多研究,其研究内容主要集中在土地利用碳排放量估算^[12-14]、土地利用碳排放时空演变特征^[14-16]、土地利用碳排放影响因素等^[7-10]方面;研究方法主要有模型模拟法^[12]、遥感估算法^[13]、碳排放系数法^[14-16]、空间自相关法^[14-16]、灰色关联模型^[7]、LMDI模型^[8]、STIRPAT模型^[9]、GWR模型等^[10]。与模型模拟法、遥感估算法等碳排放量计算方法相比,碳排放系数法具有计算方法成熟、数据易获取、应用简单、可操作性强等优点^[17],并得到广泛应用,如孙赫^[14]、苑韶峰^[15]、Lin^[16]等采用

碳排放系数法估算行政单元的土地利用碳排放量,并运用空间自相关法分析其空间关联性。灰色关联模型、LMDI模型、STIRPAT模型等方法忽视了影响因素的空间异质性,而GWR模型能够充分考虑空间单元位置,根据数据的空间特性及地理要素非平稳性,得到影响因素对不同单元的土地利用碳排放的影响程度^[10],如曹周亮等^[10]基于GWR模型探究陕西省县域的土地利用碳排放影响因素,揭示其空间异质性。目前多数研究仅基于单一空间尺度,如省级^[14]、地市级^[15]、县级^[10]、样方(格网)等^[7],也有少数学者研究了多个空间尺度上的土地利用碳排放,如Liu等^[2]基于地市级、县级和1 km格网3个空间尺度分析了厦漳泉都市圈2000—2020年土地利用碳排放量的时空特征。这些研究为本文提供了重要借鉴思路,但普遍缺乏不同空间尺度下的土地利用碳排放空间关联性对比分析,未能揭示不同尺度下的土地利用碳排放的空间集聚特征差异。此外,尽管部分研究探究了土地利用碳排放影响因素的空间异质性^[9-10],但仅从单一尺度入手,缺乏不同尺度下土地利用碳排放影响因素的空间异质性的对比分析,对差异化碳减排措施和政策制定的指导价值不足。

广州市是我国重要的经济中心城市,改革开放尤其近20多年来其经济和城市化快速发展,土地利用结构发生了剧烈变化,导致碳排放量不断增长^[18]。目前,也有少数学者对广州市土地利用碳排放开展了研究,如Xu等^[7]采用灰色关联模型分析了2000—2012年广州市土地利用变化对碳汇和碳排放的影响;张伟^[8]核算了广州市1994年、2004年、2014年的土地利用碳排放量,并采用LMDI模型分析了其影响因素。但这些研究缺乏从不同尺度进行比较,未能揭示土地利用碳排放的尺度效应,这不利于精准化碳减排措施的制定和落实;未对2014年后广州市土地利用碳排放进行探究,而这期间广州市土地利用结构变化频繁,其引起的碳排放可能出现新的特征;未考虑土地利用碳排放影响因素的空间异质性。因此,有

必要再从土地利用视角,对广州市土地利用碳排放进行不同尺度的测度,系统深入研究其不同尺度上的时空演变特征与过程及影响因素的空间异质性,有助于制定精准化碳减排措施和政策,为广州市“双碳”目标下的相关土地利用规划和管理提供有价值的参考。

为此,本文在借鉴相关研究的基础上,以 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年 5 个时间断面代表 20 a 的时间尺度,测算各年广州市乡镇级和 1 km 格网尺度上的土地利用碳排放量,采用 GIS 空间分析和空间自相关方法探究两个尺度下土地利用碳排放的空间特征与演变规律,并运用探索性回归和 GWR 模型筛选两个尺度下土地利用碳排放影响因素并分析其空间异质性,为广州市制定合理的碳减排措施并实现“双碳”目标提供依据。

1 研究区与数据

广州市(22°26′—23°56′N, 112°57′—114°03′E)位于广东省南部,总面积达 7 434.40 km²,包括荔湾区、越秀区、海珠区、天河区、白云区、黄埔区、番禺区、花都区、南沙区、从化区和增城区 11 个行政区,下辖 171 个乡镇(街道)。改革开放以来特别是 2000 年后,随着广州“东进、南扩、西联、北优、中调”城市发展战略的实施,其经济与城市化快速发展,导致土地利用结构发生了剧烈变化,其中作为主要碳源的建设用地面积不断增加,耕地、林地和草地面积不断减少,且较快的城镇化消耗了大量能源,导致该区碳排放量不断增加^[8]。因此,对该区土地利用碳排放时空演变特征及其影响因素进行研究具有重要意义。

本文所用数据包括土地利用数据、社会经济数据和行政区划数据。从武汉大学杨杰和黄昕教授团队^[19]发布的中国土地覆盖数据集(CLCD)获取 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年 30 m 分辨率的土地利用栅格数据,根据研究区实际和研究需要,将原始获取的土地利用数据重新归类得到耕地、林地、草地、建设用地、水体和未利用地 6 种地类。2000—2020 年能源消费总量、GDP、第二产业产值、第三产业产值、固定资产投资额、社会消费零售总额等社会经济数据均来源于《广州市统计年鉴》,用于广州市建设用地碳排放量的计算及影响因素分析。从中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>)获取 5 个年份的 1 km 分辨率的人口和 GDP 栅格数据,利用 ArcGIS 软件从这些数据中提取得到两个尺度下的人口和 GDP 数据,用于影响因素分析。研究区最新的乡镇行政区划图通过遥感家园网站(<https://www.rserforum.com/>)获取。

2 研究方法

2.1 评价单元划分

选取行政单元和格网单元两种空间尺度,来实现不同尺度土地利用碳排放量的空间表达。具体划分情况为:(1) 根据景观生态学原理,一般以斑块平均面积的 2~5 倍定义格网划分尺度^[20]。根据研究区实际并经反复试验,最后选取 1 km 格网单元,得到 7 655 个格网评价单元;(2) 以研究区下辖 171 个乡镇为行政区评价单元。

2.2 土地利用碳排放量估算

土地利用碳排放量估算分为直接估算和间接估算。耕地、林地、草地、水体和未利用地的碳排放量采用直接估算法进行估算,计算公式为^[14]:

$$E = \sum_{i=1}^n e_i = \sum_{i=1}^n S_i \times V_i \quad (1)$$

式中: E 为各地类的碳排放量之和(t); e_i 为地类 i 的碳排放量(t); S_i 、 V_i 分别为地类 i 的面积(hm²)和碳排放系数(t/hm²); n 为地类总数。参考相关文献^[14,21]并结合研究区实际,本文耕地、林地、草地、水体和未利用地的碳排放系数分别取 0.422, -0.644, -0.021, -0.253, -0.005 t/hm²。

建设用地碳排放量采用间接法估算,可通过估算能源消耗碳排放量来估算建设用地的碳排放量^[14]。由于第二、第三产业产值主要由建设用地贡献,故可采用单位 GDP 能耗与第二、三产业产值之和的乘积来计算建设用地碳排放量^[22]。该估算方法可更清楚地体现建设用地的碳源作用^[23],其公式为:

$$C = (G_1 + G_2) \times \frac{T}{G} \times K \quad (2)$$

式中: C 为建设用地碳排放量(t); G_1 和 G_2 分别为第二产业和第三产业产值(万元); T 为能源消费总量(t 标准煤); G 为 GDP 总量(万元); K 为煤炭消耗碳排放系数,取 0.747 6 t C/t^[22]。

2.3 空间自相关方法

空间自相关用来探测区域单元与邻域单元在同一属性值上的相关程度,并揭示其空间集聚和空间异质,以检验区域化变量的空间结构关系,包括全局和局部空间自相关,常用 Moran's I 指数表示。

全局 Moran's I 可反映观测值在整个研究区的空间集聚特征^[24],其计算公式为:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

式中: x_i 为 i 单元的观测值; w_{ij} 为行标准化的空间权

重矩阵。 I 值范围位于 $[-1,1]$,在给定的显著性水平下,当 I 显著为正时,区域中观测值呈空间集聚分布;当 I 显著为负时,区域中观测值呈空间分散分布;当 I 值为 0 时,观测值之间呈独立随机分布。

全局空间自相关虽可反映区域中同一属性单元的总集聚特征,但无法表示区域单元内部的空间集聚特征。而局部空间自相关不仅可准确识别集聚区的空间位置和范围,也可揭示空间异质^[25]。局部 Moran's I 可表达为:

$$I_i = \frac{x_i - \bar{x}}{s^2} \sum_{j=1, j \neq i}^n w_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad (4)$$

式中: s 为各单元观测值的标准差,其余参数含义同公式(3)。

局部空间自相关计算结果可划分为高一高集聚、低—低集聚、高一低集聚和低—高集聚 4 种类型。高一高(低—低)型表示某单元与其相邻单元间表现为正空间自相关,高(低)值在局域空间呈集聚现象,是空间集聚区域;高一低(低—高)型表示某单元与其相邻单元间表现为负空间自相关,高(低)值单元被其邻域的低(高)值包围,是空间异质区。

2.4 GWR 模型

GWR 模型可将空间数据引入到回归参数中进行局部回归统计^[26],本文用它分析不同空间尺度下土地利用碳排放与影响因素的空间关系,其公式为:

$$y_i = \beta_0(\mu_i, v_i) + \sum_{k=1}^n \beta_k(\mu_i, v_i) x_{ik} + \epsilon_i \quad (5)$$

式中: y_i 为 i 单元的土地利用碳排放量(t); (μ_i, v_i) 为单元 i 的空间位置; $\beta_0(\mu_i, v_i)$ 为单元 i 的常数项; $\beta_k(\mu_i, v_i)$ 为单元 i 的因素 k 的回归系数; x_{ik} 为单元 i 的第 k 个影响因素; ϵ_i 为单元 i 的随机误差。

以自适应核函数为基础,采用 bi-square 函数确定空间权重,使用 Akaike 信息准则(AICc)方法计算 GWR 模型的最优带宽,当 AICc 值最小时,即为最优带宽^[27]。

2.5 影响因素选取

参考相关研究并结合区域实际及数据可获取性,从土地利用、经济、人口等角度出发,初步选取的影响因素变量见表 1。从土地利用栅格数据提取得到建设用地面积,与地类总面积的比值即为建设用地面积占比;各单元的固定资产投资和社会消费零售总额通过该单元 GDP 与其对应县区 GDP 的比值间接测算;利用土地利用面积、GDP、固定资产投资和社会消费零售总额与人口数量的比值分别得到土地规模、经济发展水平、投资水平和消费水平 4 个变量;人口规模为从人口栅格数据提取得到的人口数量;人口密度由人口数量与土地利用面积的比值得到。为消除截面

数据部分指标异常波动及量纲的影响,土地利用碳排放量及各候选变量均取 2000—2020 年的平均值并归一化处理。采用探索性回归方法对土地利用碳排放影响因素进行筛选,该方法可检验变量之间是否存在多重共线性,进而使 GWR 模型的解释能力最大化^[28]。筛选的原则为:(1) 影响因素组合的校正 R^2 大于 0.5;(2) 最大方差膨胀因子(VIF)值低于 7.5;(3) 组合的 AICc 值尽可能小;(4) 各因素尽可能在 5%水平下显著。

表 1 土地利用碳排放候选影响因素变量

Table 1 Candidate influencing factor variables of land-use carbon emissions

变量	具体指标	单位	选取依据
土地利用结构	建设用地面积占比	%	文献[9—10]
土地规模	人均土地利用面积	hm ² /人	文献[29]
经济发展水平	人均 GDP	万元/人	文献[9—10,29]
投资水平	人均固定资产投资额	万元/人	文献[30]
消费水平	人均社会消费零售总额	万元/人	文献[10]
人口规模	人口数量	万人	文献[29—30]
人口密度	单位面积人口数量	人/hm ²	文献[10]

3 结果与分析

3.1 土地利用碳排放量空间格局演变

根据公式(1)—(2)计算两个尺度下各年各单元上各地类碳排放量,采用自然断裂点法将其分为负碳排放、低度碳排放、中度碳排放、高度碳排放 4 级,得到 5 个时间断面的土地利用碳排放量空间分异图(图 1)。

乡镇尺度上,负碳排放区位于从化区东北部,以林地为主,研究期内表现为负碳排放的吕田镇和流溪河林场分别在 2005 年、2015 年转为低度碳排放区,此后未出现负碳排放区,研究期内从化区东北部部分林地逐渐转为耕地,碳汇功能下降,负碳排放区逐渐收缩直至消失;低度碳排放区主要分布在从化区东北部、增城区东部、天河区以及老中心城区等地区,其主要地类为林地和耕地,研究期内呈收缩趋势,这可能与部分耕地和林地逐渐转为建设用地有关;中度和高度碳排放区主要位于从化区西南部、花都区、白云区北部、增城区东南部和西部、黄埔区东部、番禺区、南沙区等,以建设用地为主。研究期内,花都区大多中度碳排放区逐渐转为高度碳排放区;增城区西部和黄埔区东部的中度碳排放区呈由南向北扩张趋势,而从化区西南部由北向南扩张;广州市南部的中、高度碳排放区的范围逐渐扩大。中、高度碳排放区的扩张说明这些区域随着经济的快速发展,建设用地面积逐渐增加,导致碳排放量不断增长。

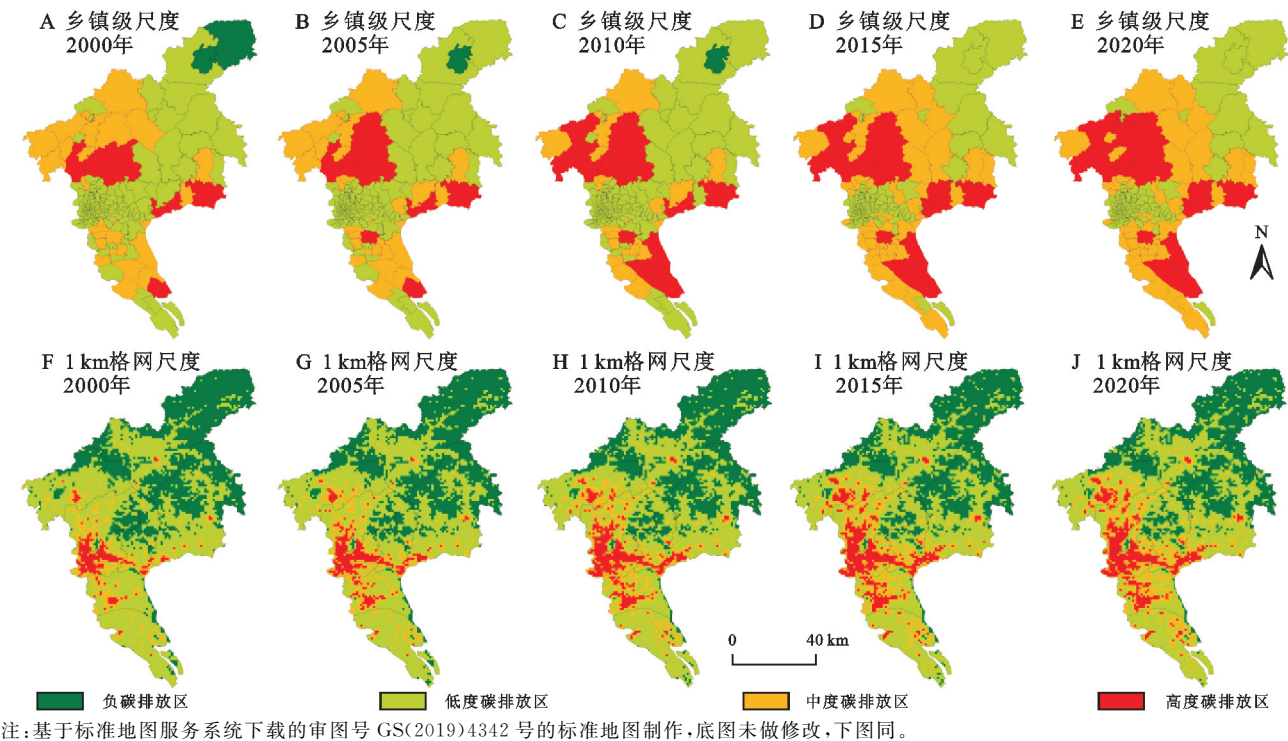


图 1 2000—2020 年两个尺度下土地利用碳排放空间格局

Fig. 1 Spatial pattern of land-use carbon emissions at the two scales from 2000 to 2020

1 km 格网尺度上,负碳排放区主要分布在从化区东北部和增城区北部,且集中在有大片林地的区域,研究期内由于林地面积的减少,该区呈略微收缩趋势;低度碳排放区主要分布在从化区西南部、增城区南部、花都区东北部、白云区北部、南沙区等,其主要地类为耕地和林地,但由于部分耕地和林地转为建设用地,该区面积逐渐缩小;中、高度碳排放区主要集中在广州市老中心城区、天河区南部、番禺区中部及白云区南部,以建设用地为主,也有部分耕地。研究期内,中、高度碳排放区范围主要呈由老中心城区向南北方向逐渐扩大态势,与这些区域建设用地集中分布及扩张趋势较吻合,由于周围的耕地、林地、草地等地类逐渐转为建设用地,这些区域的碳汇功能不断下降,导致碳排放量相对较高。

3.2 土地利用碳排放量空间自相关分析

3.2.1 全局空间自相关分析 根据公式(3)计算各年两个尺度下土地利用碳排放量的全局 Moran's *I* 值和相关指标(表 2)。由表 2 可知,两个尺度下各年的全局 Moran's *I* 值均显著为正,说明 2000—2020 年广州市土地利用碳排放量整体呈正空间集聚特征,即高一高值集聚、低—低值集聚。1 km 格网尺度下全局空间正相关性比乡镇级尺度下更强;研究期内,两个尺度下的这种正空间集聚程度均呈增强态势,说明随着土地利用结构的剧烈变化,地类转化区域的土地利用碳排放量也发生了变化,土地利用碳排放量的

总体空间差异逐渐缩小。

表 2 两个尺度下土地利用碳排放的全局 Moran's *I* 和相关指标

Table 2 Global Moran's *I* and related indicators of land-use carbon emissions at the two scales

尺度	统计量	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年
乡镇级	Moran's <i>I</i>	0.424	0.517	0.556	0.572	0.596
	<i>E(I)</i>	-0.0059	-0.0059	-0.0059	-0.0059	-0.0059
	<i>Z(I)</i>	9.1584	11.0384	11.7385	12.0187	12.4948
	显著性水平	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	Moran's <i>I</i>	0.795	0.808	0.818	0.821	0.822
1 km 格网	<i>E(I)</i>	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0001
	<i>Z(I)</i>	97.8824	98.8948	99.0419	98.9478	99.3570
	显著性水平	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

3.2.2 局部空间自相关分析 利用公式(4)计算各年两个尺度下各单元土地利用碳排放量的局部 Moran's *I* 值,并利用 GIS 软件得到局部空间集聚演化图(图 2)。两个尺度下,高一高集聚和低—低集聚单元相对较多且表现相对突出,未见高一低集聚单元,说明研究区土地利用碳排放量总体上表现为正空间集聚特征,与全局空间自相关分析结果基本一致。高一高集聚区主要集中在中、高度碳排放区,其主要地类为建设用地和耕地;低—低集聚区主要分布在负碳排放和低度碳排放区,除中部多为建设用地外,其余区域以林地为主;低—高集聚区零星分布在高一高集聚区周围且无多大变化,其主要地类为耕地,说明研究期内区域土地利用碳排放的空间异质区并未发

生剧烈的变动,区域内部土地利用碳排放不均衡性虽然总体表现不强烈,但依然存在。从图 2 可知,乡镇级尺度下 2010 年南部的高—高集聚区有扩大趋势,2015 年中北部的高—高集聚区呈扩大趋势,说明这些区域随着建设用地的扩张,土地利用碳排放量的空间分布差异呈缩小趋势;2020 年东北部的低—低集

聚区有所收缩,可能是东北部部分林地转为耕地,碳排放量空间差异扩大。1 km 格网尺度下高—高集聚区由老中心城区呈向南北逐渐扩散趋向,与这些区域建设用地的扩张趋势基本相符;从化区和增城区的低—低集聚区呈略微扩大趋势,说明这些区域的土地利用碳排放量的空间分布差异呈略微缩小趋势。

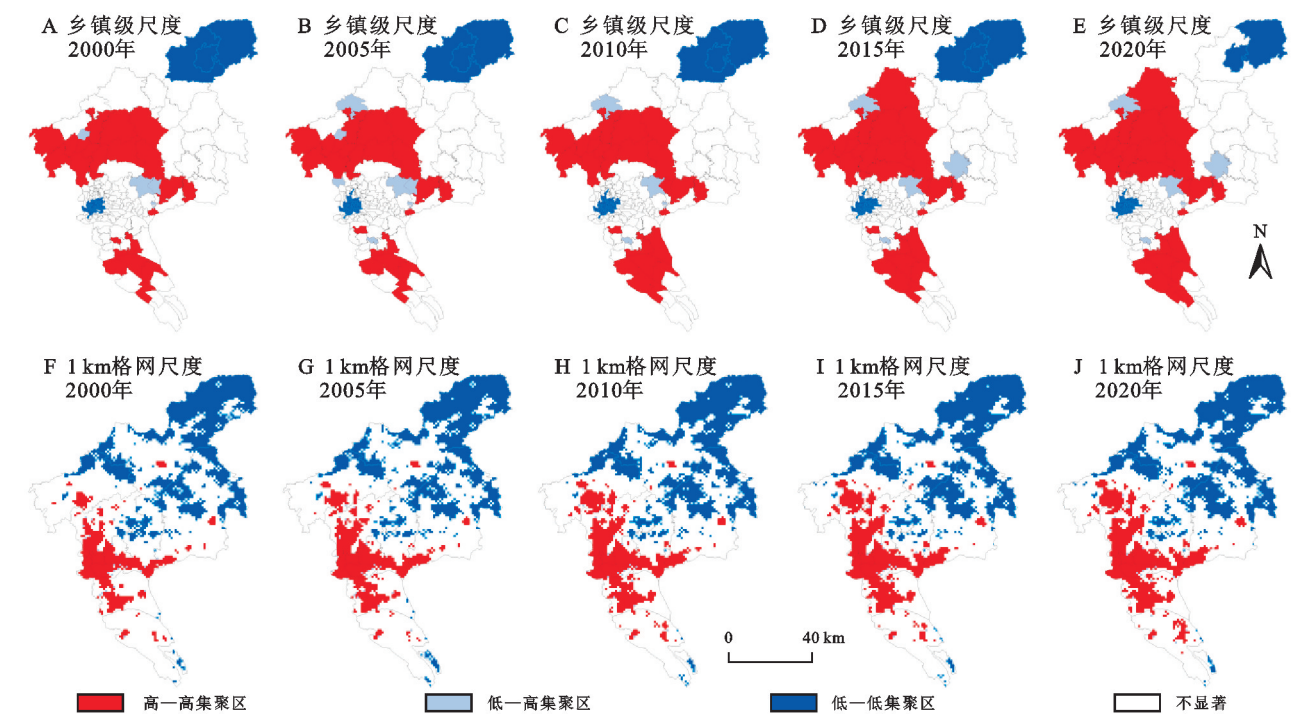


图 2 两个尺度下土地利用碳排放的局部空间集聚格局演化

Fig. 2 Evolution of local spatial agglomeration pattern of land-use carbon emissions at the two scales

3.3 土地利用碳排放的影响因素分析

探索性回归分析结果见表 3。根据 2.5 节的筛选原则,确定乡镇级尺度下对土地利用碳排放具有最强

解释能力的影响因素为土地利用结构、投资水平、人口规模和人口密度,1 km 格网尺度下的影响因素为土地利用结构、投资水平和人口规模。

表 3 影响因素的探索性回归分析结果

Table 3 Results of exploratory regression analysis of influencing factors

尺度	影响因素组合	校正 R^2	AICc	VIF
乡镇级	+土地利用结构**、+投资水平**、+人口规模**、-人口密度**	0.64	-274.48	2.99
	+土地利用结构**、-消费水平*、+人口规模**、-人口密度**	0.63	-269.91	3.42
	+土地利用结构**、+经济发展水平、+人口规模**、-人口密度**	0.62	-267.66	2.93
	+土地利用结构**、+人口规模**、-人口密度**	0.99	-33137.20	70.73
1 km 格网	+土地利用结构**、+投资水平**、+人口规模**	0.97	-29007.68	1.91
	+土地利用结构**、+经济发展水平**、+人口规模**	0.97	-28999.78	1.90

注:+, - 分别表示系数的正负;*, ** 分别表示在 5% 和 1% 水平上显著。

以土地利用碳排放量为因变量、上述筛选的影响因素为解释变量构建 GWR 模型,得到乡镇级和 1 km 格网尺度下该模型校正 R^2 分别为 0.919, 0.995, 最优带宽分别为 36, 85, 说明两个尺度下模型拟合效果较好。采用自然断裂点法将各影响因素的回归系数分成 5 级,得到两个尺度下土地利用碳排放影响因素的回归系数空间分布图(图 3)。

两个尺度下绝大多单元的土地利用结构的回归系数为正值,说明土地利用结构对土地利用碳排放量的增长具有正影响。图 3A 显示,乡镇级尺度下中西部的乡镇受土地利用结构的影响较弱,说明这些乡镇的建设用地面积增长缓慢,对土地利用碳排放量的促进作用不大;影响较强的区域位于增城区大部分乡镇,近年来增城区建设用地面积持续增长,导致该区碳排放量快速增

长;海珠区瑞宝街道的土地利用结构的回归系数为负,这可能是该街道的土地利用方式为集约型,能够提升资源使用效率,从而减少碳排放量。由图 3E 可知,1 km 格网尺度下土地利用结构的回归系数值集中在

0.942~1.089,回归系数值为 1.089 以上的区域主要分布在从化区东北部,少部分位于花都区、增城区、从化区西南部等,说明这部分区域的土地利用结构对土地利用碳排放量的影响较强,应注意限制建设用地扩张。

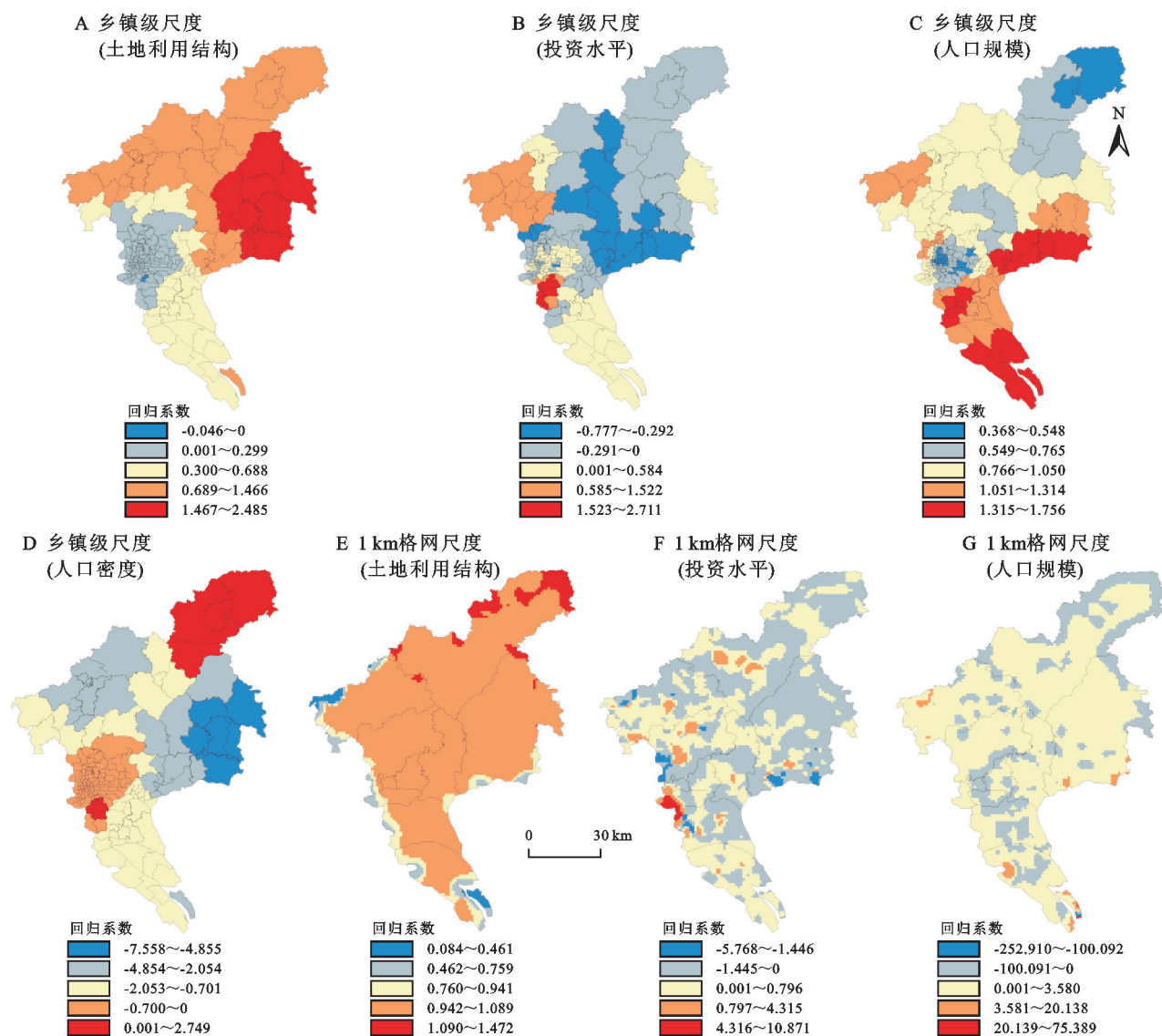


图 3 两个尺度下土地利用碳排放影响因素回归系数分布

Fig. 3 Distribution of regression coefficient of influencing factors of land-use carbon emissions at the two scales

两个尺度下投资水平的回归系数平均值均为正,说明投资水平对土地利用碳排放量总体上具正向作用。图 3B 显示,乡镇级尺度下投资水平对土地利用碳排放量具负影响的区域主要位于增城区、从化区、黄埔区、白云区等;花都区、老中心城区、天河区、番禺区、南沙区等的乡镇投资水平对土地利用碳排放量的增长具正影响,其中番禺区西北部的正影响较强。由图 3F 可知,1 km 格网尺度下,投资水平的回归系数为负值的区域主要位于增城区、番禺区等,说明这些区域的投资水平对土地利用碳排放量具抑制作用;回归系数为正值的区域主要位于花都区、白云区、荔湾区、南沙区等,说明这些区域的投资水平对土地利用

碳排放量具促进作用,其中荔湾区东南部等区域的促进作用较强。可能是回归系数值为负的区域在投资项目时注重环境保护,以投资低碳项目为主,产生的碳排放量较少,而回归系数值为正的区域的高碳排放企业密集,在开展项目的过程中容易对周围环境产生较大影响,产生大量碳排放。

图 3C 显示,乡镇级尺度下人口规模的回归系数值均为正,说明人口规模对土地利用碳排放量具促进作用。促进作用较弱的乡镇集中在从化区东部、老中心城区、天河区、黄埔区等,说明这些区域近年来人口增长较慢,对土地利用碳排放量的影响较弱;增城区南部、番禺区西部、南沙区等的乡镇的促进作用较强,

说明这些区域人口增长速度较快,产生大量的能源消耗,促进碳排放量的增长。由图 3D 可知,95.32% 的乡镇单元的人口密度回归系数值为负,说明人口密度对土地利用碳排放总体上具负影响,其中增城区东部的乡镇的负影响较强,人口规模的聚集效应提高了耗能设施利用率,抑制了碳排放量增长;而位于从化区东北部和番禺区西北部的乡镇的人口密度促进土地利用碳排放量增长,因此这些区域未来应注意降低能源消耗,充分发挥人口聚集所形成的规模效应,以减少碳排放量产生。由图 3G 可知,1 km 格网尺度下人口规模的回归系数值有正有负,其中负值区域主要位于番禺区中部、南沙区中部、海珠区西部、越秀区等,说明这些区域的人口规模对土地利用碳排放量总体上具负向作用,可能是由于人口聚集提高了耗能设施利用率,从而减少碳排放量;从化区、增城区、花都区、白云区、黄埔区等的正值区域面积较大,说明这些区域的人口规模对土地利用碳排放量总体上具正向作用,可能是人口增长带来了能源消耗量的增长,导致碳排放量不断增长。

4 讨论与结论

(1) 研究期内,两个尺度下广州市土地利用碳排放空间分布格局差异明显,中度和高度碳排放区范围逐渐扩大,主要地类为建设用地;负碳排放和低度碳排放区范围逐渐缩小,以耕地和林地为主。土地利用碳排放空间格局的变化与建设用地的扩张和耕地、林地、草地等地类面积的减少有关。

(2) 两个尺度下研究区土地利用碳排放总体均具正空间集聚特征,且集聚程度随着时间的推移而增强。局部集聚方面,研究期内以高一高集聚和低一低集聚为主,其中高一高集聚区多为中、高度碳排放区,低一低集聚区多为负碳排放和低度碳排放区;低一高集聚单元零星分布且变化不大,无高一低集聚单元。土地利用结构的剧烈变化使土地利用碳排放量空间分布差异进一步缩小。

(3) 随着土地利用结构的变化,局部空间集聚格局也发生了一些变化:高一高和低一低集聚区位有所变化,乡镇级尺度下南部和中北部的高一高集聚区有扩大趋势,东北部的低一低集聚区有所收缩;1 km 格网尺度下高一高集聚区由老中心城区向南北方向逐渐扩散,从化区和增城区的低一低集聚区略微扩大。

(4) 乡镇级尺度下土地利用结构、投资水平、人口规模和人口密度对研究区土地利用碳排放的解释能力最强;1 km 格网尺度下土地利用结构、投资水平和人口规模具最强的解释能力;土地利用结构、投资

水平和人口规模对土地利用碳排放具有正影响,说明建设用地扩张、投资水平提高和人口增长会促进土地利用碳排放量增长;95.32% 的乡镇单元的人口密度具负影响,说明人口聚集形成的规模效应可提高耗能设施利用率,抑制碳排放量增长。

基于上述结论,本文的政策启示表现在:对于负碳排放和低度碳排放区,应持续全面推进森林保护政策,划定生态保护区和生态缓冲区,加强生态环境保护工作,并提高土地集约利用率;对于中、高度碳排放区,应适当限制建设用地的扩张,优化人口结构,调整产业结构比例,减少能源消耗,以减少建设地上的碳排放量。同时应合理利用土地资源及配置生产、生活和生态空间,发挥人口聚集效应,提高耗能设施利用效率,严格控制对高碳排放项目的投资,在加强耕地保护、守住耕地红线的前提下适度对坡度较大不适合耕作的耕地进行退耕还林,并通过对未利用地植树造林等,来增强区域的碳吸收能力,减少土地利用碳排放的产生,从而促进区域可持续发展。

本文利用直接和间接碳排放量估算法测算了两个空间尺度下的广州市土地利用碳排放量,借助 GIS 空间分析和空间自相关方法,揭示了广州市土地利用碳排放时空演变特征;采用探索性回归和 GWR 模型对土地利用碳排放影响因素进行筛选与局部空间回归分析,既避免影响因素之间的多重共线性,又考虑了多重影响因素对土地利用碳排放的影响,还揭示了土地利用碳排放影响因素的空间异质性。研究结果可为区域“双碳”目标下的国土空间优化利用和碳减排指明方向。但本文仍存在不足之处:首先,计算建设用地碳排放量时仅考虑能源消耗所产生的碳排放,限于数据获取困难而未将人口呼吸、城市建筑等产生的碳排放纳入其中;其次,在划分不同土地利用碳排放等级时主要参考前人的方法,目前还没有统一的标准来确定土地利用碳排放等级,对于不同区域的研究结果对比性不强;此外,限于数据可获得性和难以量化,一些可能对土地利用碳排放产生影响的因素如政策因素、软环境等未进入本文模型。后续可对这些方面进一步研究,以取得更符合实际的研究结论并使政策含义更具针对性。

参考文献(References):

- [1] 王锋,林翔燕,刘娟,等.城镇化对区域碳排放效应的研究综述[J].生态环境学报,2018,27(8):1576-1584.
Wang F, Lin X Y, Liu J, et al. Research progress on the impact of regional urbanization on carbon emissions [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018,27(8): 1576-1584.
- [2] Liu J L, Peng K L, Zuo C C, et al. Spatiotemporal vari-

- ation of land-use carbon emissions and its implications for low carbon and ecological civilization strategies: Evidence from Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou metropolitan circle, China[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022,86:104083.
- [3] Li F F, Xu Z, Ma H. Can China achieve its CO₂ emissions peak by 2030[J]. *Ecological Indicators*, 2018,84: 337-344.
- [4] 刘满平.我国实现“碳中和”目标的意义、基础、挑战与政策着力点[J].*价格理论与实践*,2021(2):8-13.
Liu M P. Significance, foundation, challenge and policy focus of realizing the goal of “carbon neutralization” in China[J]. *Price Theory & Practice*, 2021(2):8-13.
- [5] 王丽丽.多尺度视角下中国碳排放强度时空特征及驱动因素分析[D].兰州:兰州大学,2022.
Wang L L. A Multiscale Analysis on Spatiotemporal Characteristics and Drives of Carbon Emission Intensity in China[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2022.
- [6] Zhao C X, Liu Y L, Yan Z X. Effects of land-use change on carbon emission and its driving factors in Shaanxi Province from 2000 to 2020[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023,30(26):68313-68326.
- [7] Xu Q, Yang R, Dong Y X, et al. The influence of rapid urbanization and land use changes on terrestrial carbon sources/sinks in Guangzhou, China[J]. *Ecological Indicators*, 2016,70:304-316.
- [8] 张伟.广州市土地利用碳排放核算及影响因素研究[D].广州:华南农业大学,2016.
Zhang W. A Study on the Accounting and Effect Analysis of Land-Use Carbon Emissions in Guangzhou[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016.
- [9] 马远,刘真真.黄河流域土地利用碳排放的时空演变及影响因素研究[J].*生态经济*,2021,37(7):35-43.
Ma Y, Liu Z Z. Study on the spatial-temporal evolution and influencing factors of land use carbon emissions in the Yellow River Basin[J]. *Ecological Economy*, 2021, 37(7):35-43.
- [10] 曹周亮,张欣蓉,员学锋,等.基于土地利用变化的陕西省县域碳排放时空变化及影响因素研究[J].*水土保持通报*,2022,42(5):376-385.
Cao Z L, Zhang X R, Yuan X F, et al. Spatio-temporal variation and influencing factors of CO₂ emission at county scale in Shaanxi Province based on land use change[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022,42(5):376-385.
- [11] Yang X, Liu X Z. Path analysis and mediating effects of influencing factors of land use carbon emissions in Chang-Zhu-Tan urban agglomeration[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2023,188:122268.
- [12] Baumann M, Gasparri I, Piquer-Rodríguez M, et al. Carbon emissions from agricultural expansion and intensification in the Chaco[J]. *Global Change Biology*, 2017,23(5):1902-1916.
- [13] Lv Q, Liu H B, Wang J T, et al. Multiscale analysis on spatiotemporal dynamics of energy consumption CO₂ emissions in China: Utilizing the integrated of DMSP-OLS and NPP-VIIRS nighttime light datasets[J]. *Science of the Total Environment*, 2020,703:134394.
- [14] 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 H, Liang H M, Chang X L, et al. Land use patterns on carbon emission and spatial association in China [J]. *Economic Geography*, 2015,35(3):154-162.
- [15] 苑韶峰,唐奕钰.低碳视角下长江经济带土地利用碳排放的空间分异[J].*经济地理*,2019,39(2):190-198.
Yuan S F, Tang Y Y. Spatial differentiation of land use carbon emission in the Yangtze River economic belt based on low carbon perspective[J]. *Economic Geography*, 2019,39(2):190-198.
- [16] Lin Q W, Zhang L, Qiu B K, et al. Spatiotemporal analysis of land use patterns on carbon emissions in China[J]. *Land*, 2021,10(2):141.
- [17] 易丹,欧名豪,郭杰,等.土地利用碳排放及低碳优化研究进展与趋势展望[J].*资源科学*,2022,44(8):1545-1559.
Yi D, Ou M H, Guo J, et al. Progress and prospect of research on land use carbon emissions and low-carbon optimization[J]. *Resources Science*, 2022,44(8):1545-1559.
- [18] Hu X T, Li Z H, Cai Y M, et al. Urban construction land demand prediction and spatial pattern simulation under carbon peak and neutrality goals: A case study of Guangzhou, China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2022,32(11):2251-2270.
- [19] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. *Earth System Science Data*, 2021,13(8):3907-3925.
- [20] 熊鹰,汪敏,袁海平,等.洞庭湖区景观生态风险评价及其时空演化[J].*生态环境学报*,2020,29(7):1292-1301.
Xiong Y, Wang M, Yuan H P, et al. Landscape ecological risk assessment and its spatio-temporal evolution in Dongting Lake area[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020,29(7):1292-1301.
- [21] 杨国清,朱文锐,文雅,等.20年来广东省土地利用碳排放强度与效率空间分异研究[J].*生态环境学报*,2019, 28(2):332-340.
Yang G Q, Zhu W R, Wen Y, et al. Spatial differentiation in the intensity and efficiency of carbon emission from land use in Guangdong Province in past two decades[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(2):332-340.
- [22] 魏媛,简小玉.基于碳达峰碳中和的贵州省土地利用碳排放演变及预测研究[J].*生态经济*,2022,38(4):108-114.
Wei Y, Jian X Y. Research evolution of carbon emissions

- from land use in Guizhou Province based on carbon peak and carbon neutrality and the according predictions[J]. *Ecological Economy*, 2022,38(4):108-114.
- [23] 朱巧娴,梅昀,陈银蓉,等.基于碳排放测算的湖北省土地利用结构效率的 DEA 模型分析与空间分异研究[J].*经济地理*,2015,35(12):176-184.
- Zhu Q X, Mei Y, Chen Y R, et al. Regional differentiation characteristics and optimization of the structural efficiency of land use in Hubei Province based on the carbon emissions[J]. *Economic Geography*, 2015,35(12):176-184.
- [24] 梅志雄,徐颂军,欧阳军.珠三角县域城市潜力的空间集聚演化及影响因素[J].*地理研究*,2014,33(2):296-309.
- Mei Z X, Xu S J, Ouyang J. Spatial agglomeration pattern evolvement and its influencing factors of urban potential at county level in the Pearl River Delta[J]. *Geographical Research*, 2014,33(2):296-309.
- [25] 金贵,邓祥征,董寅,等.发展地理学视角下中国多维贫困测度及时空交互特征[J].*地理学报*,2020,75(8):1633-1646.
- Jin G, Deng X Z, Dong Y, et al. China's multidimensional poverty measurement and its spatiotemporal interaction characteristics in the perspective of development geography[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020,75(8):1633-1646.
- [26] 刘贤赵,高长春,张勇,等.中国省域碳强度空间依赖格局及其影响因素的空间异质性研究[J].*地理科学*,2018,38(5):681-690.
- Liu X Z, Gao C C, Zhang Y, et al. Spatial dependence pattern of carbon emission intensity in China's Provinces and spatial heterogeneity of its influencing factors[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2018,38(5):681-690.
- [27] 龙雪琴,赵欢,周萌,等.成都市建成环境对网约车载客点影响的时空分异性研究[J].*地理科学*,2022,42(12):2076-2084.
- Long X Q, Zhao H, Zhou M, et al. Spatiotemporal heterogeneity of the impact of built environment in Chengdu on online car-hailing passengers' pick-up points[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2022,42(12):2076-2084.
- [28] 张师赫,李宝银,林玉英,等.基于生态系统服务的景观生态风险评价及其驱动因素研究:以福建省为例[J].*水土保持研究*,2022,29(6):174-182.
- Zhang S H, Li B Y, Lin Y Y, et al. Research on landscape ecological risk assessment and driving factors based on ecosystem services: A case study of Fujian Province[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022,29(6):174-182.
- [29] 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 Y W, Zhao X C, Hu Y J. Spatial variation of carbon emissions from county land use in Chang-Zhu-Tan area based on NPP-VIIRS night light[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021,41(9):3847-3856.
- [30] 李建豹,黄贤金,吴常艳,等.中国省域碳排放影响因素的空间异质性分析[J].*经济地理*,2015,35(11):21-28.
- Li J B, Huang X J, Wu C Y, et al. Analysis of spatial heterogeneity impact factors on carbon emissions in China[J]. *Economic Geography*, 2015,35(11):21-28.

(上接第 297 页)

- [30] 周建伟,罗君.安宁河流域土地利用地形梯度分异及其转型驱动因素[J].*西南农业学报*,2023,36(6):1318-1327.
- Zhou J W, Luo J. Terrain gradient differentiation of land use and driving factors of its change in Anning River Basin[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2023,36(6):1318-1327.
- [31] 邵全琴,刘树超,宁佳,等.2000—2019 年中国重大生态工程生态效益遥感评估[J].*地理学报*,2022,77(9):2133-2153.
- Shao Q Q, Liu S C, Ning J, et al. Assessment of ecological benefits of key national ecological projects in China in 2000—2019 using remote sensing[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022,77(9):2133-2153.
- [32] 白淑英,吴梦珂,于焯婷.汉江流域水源涵养功能的关键生态修复区识别与植被优化配置[J].*水土保持通报*,2023,43(3):123-128.
- Bai S Y, Wu M K, Yu Y T. Identification of key ecological restoration areas and optimal allocation of vegetation for water conservation in Hanjiang River Basin[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023,43(3):123-128.
- [33] 孙丕苓,许月卿,王数.环京津贫困带土地利用变化的地形梯度效应分析[J].*农业工程学报*,2014,30(14):277-288.
- Sun P L, Xu Y Q, Wang S. Terrain gradient effect analysis of land use change in poverty area around Beijing and Tianjin[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014,30(14):277-288.