

DOI: 10.20103/j.stxb.202403100483

刘贤赵, 王一笛, 肖海, 陈铸, 王天浩, 罗政英. 长株潭都市圈碳盈亏时空变化及其驱动因素. 生态学报, 2025, 45(2): 669-684.

Liu X Z, Wang Y D, Xiao H, Chen Z, Wang T H, Luo Z Y. Spatiotemporal changes and driving factors of carbon surplus and deficit in Chang-Zhu-Tan metropolitan area. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(2): 669-684.

长株潭都市圈碳盈亏时空变化及其驱动因素

刘贤赵^{1,*}, 王一笛¹, 肖海², 陈铸², 王天浩¹, 罗政英¹

1 湖南科技大学地球科学与空间信息工程学院, 湘潭 411201

2 湖南省第二测绘院, 长沙 410009

摘要:明晰碳盈亏时空变化及其驱动因素是制定低碳经济发展战略和有序推进“双碳”目标的重要依据。基于碳排放系数法和改进的 CASA 模型对长株潭都市圈 2005、2010、2015、2020 年的碳源、碳汇进行了估算。以此为基础利用空间自相关、标准差椭圆、地理探测器和 GWR 模型分析了都市圈碳盈亏的时空变化及其驱动因素。结果表明: (1) 研究期间长株潭都市圈碳盈亏整体处于亏损状态且呈逐年增加趋势, 但各区县变化趋势明显不同。 (2) 从空间上看, 都市圈碳亏损从中部向四周呈减少的格局, 碳盈亏重心持续向几何中心的西北方向移动, 县域碳盈亏整体呈显著的空间正相关性, 但在局部空间上表现出非均衡发展的集聚特征。 (3) 在影响长株潭都市圈碳盈亏的因素中, 年太阳辐射 (ASR)、经济发展 (PGDP) 和能源强度 (EI) 是影响碳盈亏的重要因素, 人口规模 (PS)、城市化水平 (UL)、产业结构 (IS) 和绿化覆盖面积 (GCA) 也影响碳盈亏的时空变化。其中 PGDP 和 ASR 对碳盈亏的影响呈先增强后减弱的趋势, PS、IS 和 EI 的影响则呈先减弱后增强的特征, 而 GCA 和 UL 的影响逐年下降。各因素对碳盈亏的影响存在明显的空间异质性。PGDP、EI、UL 和 IS 对碳亏损起促进作用, ASR 和 GCA 则起抑制作用。GCA 对碳亏损影响的空间异质性最强, EI 的空间异质性最弱。研究结果可为长株潭都市圈低碳发展和生态保护提供参考。

关键词:碳盈亏; 时空变化; 影响因素; 长株潭都市圈

Spatiotemporal changes and driving factors of carbon surplus and deficit in Chang-Zhu-Tan metropolitan area

LIU Xianzhao^{1,*}, WANG Yidi¹, XIAO Hai², CHEN Zhu², WANG Tianhao¹, LUO Zhengying¹

1 College of Earth Science and Spatial Information Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China

2 The Second Surveying and Mapping Institute of Hunan Province, Changsha 410009, China

Abstract: Clarifying the spatiotemporal changes in carbon surplus and deficit and their driving factors is an important basis for formulating low-carbon economic development strategies and orderly promoting the dual carbon goals. The Chang-Zhu-Tan metropolitan area is the core growth pole of Hunan's economic development and the region with the strongest population carrying capacity. How to promote green and low-carbon transformation and ecological environment protection has become a practical problem faced in the development process. Based on the carbon emission coefficient method and improved CASA model, the carbon sources and sinks of the Chang-Zhu-Tan metropolitan area were estimated in 2005, 2010, 2015 and 2020. Then, spatial autocorrelation, standard deviation ellipse, geographic detector and GWR model were used to analyze the spatiotemporal changes and driving factors of carbon surplus and deficit in the metropolitan area. The results showed that: (1) During the research period, the overall carbon surplus and deficit of the Chang-Zhu-Tan metropolitan area was in a state of carbon deficit and displayed an increasing trend year by year, but the changing trends varied significantly among different districts and counties. The carbon deficit in Furong, Kaifu, Liuyang, Ningxiang, and Liling showed an increasing trend

基金项目: 湘自资料重点项目 (2022-05); 湖南省教育厅重点项目 (23A0353)

收稿日期: 2024-03-10; 网络出版日期: 2024-10-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xianzhaoliu@sina.com

followed by a decreasing trend, while the carbon loss in Lukou continued to decline. (2) From a spatial perspective, the carbon deficit showed a decreasing pattern from the central to the surrounding areas, and the center of carbon surplus and deficit continued to move towards the northwest direction of the geometric center. Overall, the carbon surplus and deficit of the county showed a significant spatial positive correlation, but exhibited a clustering characteristic of unbalanced development in local space. (3) Among the factors that affect the carbon profit and loss of the Chang-Zhu-Tan metropolitan area, annual solar radiation (ASR), per capita gross domestic product (PGDP), and energy intensity (EI) were the important factors affecting carbon surplus and deficit; population size (PS), urbanization level (UL), industrial structure (IS) and green coverage area (GCA) played secondary roles. The impact of PGDP and ASR on carbon profit and loss showed a trend of first strengthening and then weakening, the impact of PS, IS, and EI indicated a characteristic of first weakening and then strengthening, while the impact of GCA and UL had been decreasing year by year. There was spatial heterogeneity in the impact of various factors on carbon surplus and deficit. PGDP, EI, UL and IS promoted carbon deficit, while ASR and GCA inhibited carbon deficit. GCA had the strongest spatial heterogeneity in its impact on carbon loss; while EI had the weakest spatial heterogeneity. The above results can provide reference for low-carbon development and ecological protection in the study area.

Key Words: carbon surplus and deficit; spatiotemporal changes; influencing factors; Chang-Zhu-Tan metropolitan area

以气候变暖、自然灾害频发为特征的全球变化成为 21 世纪人类社会面临的巨大挑战之一,其中人类活动导致的化石能源消费碳排放与陆地生态系统碳汇博弈是加剧气候变化的主要原因^[1]。据发布的碳排放数据显示,2022 年全球化石能源消费产生的碳排放约为 366 亿 t,其中中国温室气体碳排放占全球的 26.5%^[2]。为减缓 CO₂排放与应对全球气候变化,中国政府提出将采取更加有力的政策和措施,力争在 2030 年前实现碳达峰和 2060 年前实现碳中和。在此背景下,中国将面临能源技术升级、产业结构调整和经济放缓的巨大压力,如何有效推进区域增汇减排在很大程度上有赖于明晰区域碳源、碳汇基础和碳盈亏状况及其影响因素^[3]。由于中国地域辽阔,不同区域的碳源、碳汇及其时空变化差异很大,因此查清“双碳”目标下碳盈亏的时空变化及其影响因素对制定区域低碳发展战略和减排路径具有重要意义。

目前,国内外围绕区域碳源、碳汇估算及其影响因素开展了多项研究。一是众多学者从碳排放视角探讨人类活动对碳源/碳汇的影响,表明土地利用方式、经济发展、能源强度和产业结构是驱动碳源/碳汇转化及其空间差异的主要因素^[4-10]。Holmberg 等^[5]基于森林生长与碳平衡模型得出林地碳汇可使当地净碳排放减少 72%;Vauhkonen 等^[6]认为原始森林年龄等级会影响区域碳源、碳汇分布。Ali 等^[7]基于土地利用变化探讨了泰国曼谷都市圈碳源、碳汇的关联特征,发现碳源、碳汇之间的差距在逐年扩大。国内鲁先丰等^[8]基于能源消费和土地利用数据分析了中国省域碳源、碳汇的空间格局。二是一些学者采用改进的 CASA 模型对自然生态系统的碳源/碳汇进行了探讨^[11-12]。如 Wang 和 Epstein 分析了弗吉尼亚河谷植被演替对碳源/碳汇转换的影响^[13];赵宁等^[14]从国家层面探讨了中国主要植被类型的碳源/碳汇及碳平衡,认为从 20 世纪 60 年代至 21 世纪初中国陆地生态系统碳汇总体呈上升趋势;Chuai 等^[15]和 Li 等^[16]基于碳汇计算分别对中国和中亚地区植被的碳源/碳汇进行了分析,得出中国陆地生态系统总体为净碳汇作用,而中亚地区碳源/碳汇地带性特征明显。尽管这些研究较好地揭示了自然生态系统的碳源/碳汇特征,但大多未涉及人为碳源与自然碳汇之间的关系。随着人们对碳平衡在区域发展战略中的重要性的认识,一些学者开展了人地关系博弈下的碳盈亏研究。如陈帝伯等^[17]探讨了 2005—2020 年中国省域碳盈亏的时空变化,认为多数省域均处于碳亏损状态,西北和中部省域以碳亏为主,西南与京津地区则为碳盈趋势;王喜等^[18]基于能源消费和土地利用分析发现河南省内地区间碳盈亏差异显著;周姝含等^[19]对东北三省的碳源/碳汇分析发现,碳盈亏与自然因素呈正相关,而与人口、GDP 和产业结构呈负相关;王菲等^[20]基于“双碳”目标得出黄河流域碳盈亏呈东亏西盈格局,总体处于碳亏损状态。

上述成果为研究区域碳盈亏提供了可借鉴的理论和方法,但仍存在完善的空间。首先,现有的文献主要

是把人为碳源(如能源消费碳排放)与生态系统碳源汇分开单独进行研究,而将两者之间的碳平衡纳入同一框架展开探讨的较少;其次,已有的研究主要是集中在省域及其以上区域尺度或较小的县域尺度^[21],而对都市圈尺度的碳盈亏研究并不多见。再次,已有的研究在估算自然碳源汇时,大多数是基于土地利用视角借助非本地化的碳汇系数进行计算,很少考虑影响植被碳汇的气象条件,因而有可能使计量的碳盈亏与实际不符。尽管也有学者探讨过气候因素对区域碳盈亏的影响,但忽视了各因素对碳盈亏影响的空间异质性。长株潭是我国中部首个国家级都市圈,也是长江中游城市群生态文明建设的主战场,在引领碳达峰、碳中和过程中具有显著的示范作用。近年来,其快速的经济发展和人口聚集对碳源/碳汇产生了深刻影响,进而成为制约长株潭都市圈经济高质量发展的瓶颈。据此,本文在估算长株潭都市圈人为碳源和自然碳汇的基础上,探讨 2005—2020 年都市圈碳盈亏的时空变化及其影响因素,为推进长株潭都市圈绿色低碳转型制定增汇减排措施提供科学依据。

1 研究区概况

长株潭都市圈地处湖南省中东部,位于 $27^{\circ}12'—28^{\circ}41'N$ 和 $112^{\circ}25'—113^{\circ}28'E$ 之间,包括长沙市、株洲市中心城区(含醴陵市)、湘潭市中心城区以及韶山市和湘潭县,总面积 1.89 万 km^2 (图 1)。都市圈属亚热带季风气候,雨热同期,年均气温 $17.2^{\circ}C$,年均降水量 $1361.6mm$ 。2021 年末常住人口 1484 万人,GDP 为 1.79 万亿元,是湖南省经济发展的核心增长极和人口承载能力最强的地区。近年来,随着长株潭都市圈“一核、三带、多组团”发展格局的形成,其产业化和规模化竞争优势凸显。但由于经济发展加快,城市扩张导致大量自然地表转化为建设用地,城市绿色空间剧减,碳源汇变化显著。如何促进绿色低碳转型和生态环境保护,成为长株潭都市圈发展面临的紧迫现实问题。

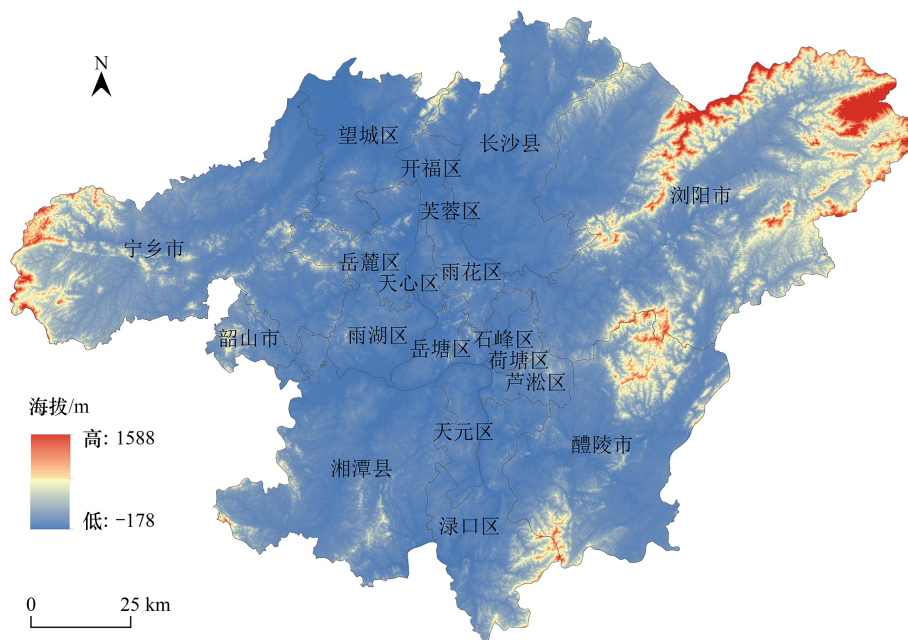


图 1 长株潭都市圈地理位置及其所辖区县

Fig.1 Geographical location and counties under the jurisdiction of Chang-Zhu-Tan metropolitan area

2 研究方法与数据来源

2.1 碳盈亏估算

碳盈亏(Carbon surplus and deficit, CSD)是综合表征某一区域碳收支平衡关系以及减排增汇效果的重要

指标,其值通常用植被净生态系统生产力(Net ecosystem productivity, NEP)与碳源(Carbon emission, CE)的差值表示。当 $NEP > CE$ 时,表示区域存在碳盈余;当 $NEP < CE$ 时,表示存在碳亏损;二者相等时,则表示区域碳收支平衡。碳源、碳汇的估算如下。

2.1.1 碳源估算

由于化石能源消费是碳排放的主要来源,因此本文选取原煤、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油和天然气 8 种主要化石能源估算碳排放。考虑到县域尺度的能源消费数据难以获取,本文利用各区县的经济增长、人口规模和第二产业占比将估算的市级碳排放分配至各区县,市级碳排放采用碳排放系数法进行计算^[22]。为确定各指标在分配中的权重,作者采用熵值法根据各指标传递的信息量进行计算,具体方法参见文献^[23]。根据熵值法确定的上述 3 个指标权重,结合前人的研究成果^[24]建立县域碳排放分配模型:

$$E_j = \frac{Q}{\sum_{j=1}^n P_j} P_j \times a + \frac{Q}{\sum_{j=1}^n G_j} G_j \times b + \frac{Q}{\sum_{j=1}^n C_j} C_j \times c \quad (1)$$

式中, E_j 为 j 县分配的碳排放量; Q 为长株潭都市圈总的碳排放量; P_j 为第 j 县的人口规模; G_j 为 j 县的 GDP; C_j 为 j 县的第二产业比重; n 为区县个数; a 、 b 和 c 分别为人口、GDP 和第二产业比重在碳排放分配中的权重,且满足 $a+b+c=1$ 。

2.1.2 碳汇估算

植被 NEP 是指植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)减去土壤呼吸(Heterotrophic Respiration, R_h)消耗后所剩余的有机物数量,通常作为生态系统净碳交换量的度量,用式表示为:

$$NEP(x, t) = NPP(x, t) - R_h(x, t) \quad (2)$$

式中, $NEP(x, t)$ 、 $NPP(x, t)$ 和 $R_h(x, t)$ 分别为像元 x 在 t 月的净生态系统生产力、植被净初级生产力和土壤呼吸量,单位均为 gC/m^2 。其中, NPP 采用改进的 CASA 模型^[25-26]进行估算。CASA 模型是基于过程的生态-遥感耦合模型,因其具有结构简单、输入参数少且易于获取等优点,已广泛用于全球和区域尺度的 NPP 估算,具体表达式为:

$$NPP(x, t) = APAR(x, t) \times \varepsilon(x, t) \quad (3)$$

式中, $APAR(x, t)$ 表示像元 x 在 t 月植被吸收的光合有效辐射($gC \cdot m^{-2} \cdot 月^{-1}$); $\varepsilon(x, t)$ 表示像元 x 在 t 月的实际光能利用率(gC/MJ)。 $APAR(x, t)$ 的计算公式为:

$$APAR(x, t) = SOL(x, t) \times FPAR(x, t) \times 0.5 \quad (4)$$

式中, $SOL(x, t)$ 为像元 x 在 t 月接收到的太阳总辐射(MJ/m^2); 0.5 为植被能利用的光合有效辐射占太阳总辐射的比例; $FPAR(x, t)$ 为植被吸收的光合有效辐射比例,假设在 t 月内保持不变,其值用归一化植被指数(NDVI)进行估算^[27],即当 $NDVI \leq 0.075$ 时, $FPAR(x, t) = 0$; 当 $NDVI > 0.075$ 时, $FPAR(x, t) = \min[1.16 \times NDVI(x, t) - 0.0439, 0.9]$ 。

$\varepsilon(x, t)$ 受温度、降水和植被类型等因素的影响,其值通常用下式进行计算:

$$\varepsilon(x, t) = T_1(x, t) \times T_2(x, t) \times W(x, t) \times \varepsilon_0 \quad (5)$$

式中, ε_0 为理想状态下植被的最大光能利用率,参考 Zhu 等^[25]的成果结合研究区植被状况确定如表 1; $T_1(x, t)$ 、 $T_2(x, t)$ 和 $W(x, t)$ 分别表示低温、高温和水分条件对光能利用率的影响。 $T_1(x, t)$ 、 $T_2(x, t)$ 和 $W(x, t)$ 的计算公式如下:

$$T_1(x, t) = 0.8 + 0.02 \times T_{opt}(x) - 0.0005 \times T_{opt}(x)^2 \quad (6)$$

$$T_2(x, t) = \frac{1.184}{1 + \exp[0.2 \times (T_{opt}(x) - 10 - T(x, t))]} \times \frac{1}{1 + \exp[0.3 \times (-T_{opt}(x) - 10 - T(x, t))]} \quad (7)$$

$$W(x, t) = 0.5 + 0.5 \times \frac{E(x, t)}{E_p(x, t)} \quad (8)$$

式中, $T_{opt}(x)$ 为一年内 NDVI 最大时的最适温度($^{\circ}C$); $T(x, t)$ 为月平均气温($^{\circ}C$),当月平均气温小于或等于

-10°C 时, $T_1(x, t)$ 等于 0; 当月平均温度比 $T_{\text{opt}}(x)$ 高 10°C 或低 13°C 时, $T_2(x, t)$ 取月平均气温为最适温度时的一半。 $E(x, t)$ 为实际蒸散量, $E_p(x, t)$ 为潜在蒸散量, 分别用蒸散模型和植被-气候关系模型求得^[28]。

表 1 研究区植被类型最大光能利用效率

Table 1 Maximum light energy utilization efficiency of various vegetation types in the study area

植被类型 Vegetation type	MUELE(ε_0)/ (gC/MJ)	植被类型 Vegetation type	MUELE(ε_0)/ (gC/MJ)
常绿阔叶林 Evergreen broad-leaved forest	0.985	灌木 Shrub	0.429
常绿针叶林 Evergreen coniferous forest	0.389	草地 Grassland	0.542
落叶阔叶林 Deciduous broad-leaved forest	0.692	作物 Crop	0.542
针阔混交林 Theropencedrymion	0.475	竹林 Bamboo forest	0.542

MUELE(ε_0): 最大光能利用效率 Maximum utilization efficiency of light energy

土壤 R_h 的准确测度是估算区域 NEP 的关键, 本文借助裴志永等^[29]建立的普适模型计算土壤 R_h 。该模型基于影响土壤微生物呼吸的两个关键因子温度和降水估算土壤呼吸的碳排放量, 并在全国尺度以及西南、西北、东北、黄河流域和青藏高原等地区进行了广泛的应用和验证, 效果十分理想^[30]。具体模型如下:

$$R_h(x, t) = 0.22 \times (\exp(0.0912T(x, t)) + \ln(0.3145R(x, t) + 1)) \times 30 \times 46.5\% \quad (9)$$

式中, $T(x, t)$ 为像元 x 在 t 月的平均温度($^{\circ}\text{C}$); $R(x, t)$ 为像元 x 在 t 月的平均降水量(mm)。

2.2 标准差椭圆法

标准差椭圆能够定量揭示要素的空间格局特征, 本文采用椭圆重心、长轴、短轴和方位角等分析碳盈亏空间分布的方向性及其演变过程。各参数的计算公式如下^[31]:

$$(\bar{x}, \bar{y}) = \left(\frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{\sum_{i=1}^n w_i}, \frac{\sum_{i=1}^n w_i y_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right) \quad (10)$$

$$\tan\theta = \frac{\left(\sum_{i=1}^n w_i^2 \tilde{x}_i^2 - \sum_{i=1}^n w_i^2 \tilde{y}_i^2 \right) + \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n w_i^2 \tilde{x}_i^2 - \sum_{i=1}^n w_i^2 \tilde{y}_i^2 \right)^2 - 4 \sum_{i=1}^n w_i^2 \tilde{x}_i \tilde{y}_i}}{2 \sum_{i=1}^n w_i^2 \tilde{x}_i \tilde{y}_i} \quad (11)$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (w_i \tilde{x}_i \cos\theta - w_i \tilde{y}_i \sin\theta)^2}{\sum_{i=1}^n w_i^2}}, \quad \sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (w_i \tilde{x}_i \sin\theta + w_i \tilde{y}_i \cos\theta)^2}{\sum_{i=1}^n w_i^2}} \quad (12)$$

式中, $(\bar{x}, \bar{y})$ 为重心坐标, 表示碳盈亏空间分布的相对位置; x_i, y_i 为研究区域各单元的中心坐标; w_i 表示研究单元的权重; θ 为椭圆方位角, 反映碳盈亏分布的主趋势方向; $\tilde{x}_i, \tilde{y}_i$ 分别表示研究单元中心坐标到重心的偏差; σ_x, σ_y 分别是沿长轴和短轴的标准差, 反映地理要素的方向与密集性。

2.3 空间自相关分析

揭示长株潭都市圈碳盈亏空间自相关的方法很多, 本文采用全局莫兰指数(I_G)和局部莫兰指数(I_i)分别测度都市圈碳盈亏整体空间关联特性和局部关联聚集程度。二者的计算公式分别如下:

$$I_G = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (y_i - \bar{y})(y_j - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \sum_{i=1}^n (y_j - \bar{y})} \quad (13)$$

$$I_i = \frac{n(y_i - \bar{y}) \sum_{j=1}^n W_{ij}(y_j - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (14)$$

式中, y_i 和 y_j 分别为县域 i 和县域 j 的碳盈亏量, $\bar{y}$ 为所有县域碳盈亏量的平均值, n 为县域个数, W_{ij} 为县域 i 和县域 j 的空间权重。 $I_c > 0$ 表示都市圈碳盈亏整体呈空间正相关且空间差异较小, $I_c < 0$ 表示碳盈亏整体呈负相关且空间差异较大, $I_c = 0$ 表示碳盈亏呈随机分布。若 $I_i > 0$, 则表示相邻县域碳盈亏存在高-高或低-低聚集; $I_i < 0$, 表示相邻县域碳盈亏存在高-低或低-高聚集。

2.4 地理探测器

地理探测器是研究地理现象空间分异并探讨其驱动因子贡献率的一种分析方法,其原理是某个因子对因变量的影响较大,则两者在空间分布上相似且具有一定的解释力^[32]。本文选择地理探测器中的单因子探测分析各因子对碳盈亏的影响,具体公式如下:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (15)$$

式中, q 为驱动因子对碳盈亏的解释能力,其值为 $[0, 1]$, q 值越大,说明驱动因子对碳盈亏的解释能力越强; L 为因子分层数; N 和 N_h 分别为研究区所有单元数和分层数为 h 时的单元数; σ^2 和 σ_h^2 为碳盈亏总方差和因子为 h 层时的方差。

2.5 地理加权回归模型

基于地理探测器识别出的关键因子,利用地理加权回归 (Geographically weighted regression, GWR) 建立考虑碳盈亏空间效应的局部回归模型,通过优化空间单元的权重得到与空间位置相对应的回归系数,进而分析碳盈亏影响因素的空间异质性。GWR 模型的表达式如下^[33]:

$$y_i = \beta_0(\mu_i, v_i) + \sum_{k=1}^n \beta_k(\mu_i, v_i) x_{ik} + \eta_i \quad (16)$$

式中, y_i 为第 i 个县域的碳盈亏量; β_0 为截距; (μ_i, v_i) 为第 i 个县域的地理坐标; $\beta_k(\mu_i, v_i)$ 为第 k 个变量的回归系数; x_{ik} 为第 i 个县域的第 k 个变量; η_i 为服从正态分布的随机误差项; n 为县域个数。

2.6 数据来源与处理

本文涉及的数据主要包括 2005、2010、2015、2020 年的土地利用数据、气象数据、植被指数 (NDVI) 和社会经济数据。其中,土地利用数据来自中科院资源环境数据中心 (<http://www.resdc.cn/>), 气象数据 (月均气温、月降水量和月总太阳辐射) 来自国家气象科学数据中心 (<http://data.cma.cn/>), NDVI 数据来自地理空间数据云平台 (<https://www.gscloud.cn/>)。为使空间分辨率一致,上述数据经镶嵌、投影变换、掩膜处理后在 ArcGIS 10.2 软件中通过重采样统一为 30m 分辨率。社会经济数据 (包括化石能源消费量、年末人口、GDP 和产业结构) 和绿化覆盖面积等来自 2006—2021 年长沙、株洲、湘潭三市的统计年鉴,化石能源碳排放系数与标准煤折算系数来自文献^[33],其中经济数据折算成 2005 年的不变价。

3 结果与分析

3.1 碳盈亏时空变化

基于长株潭都市圈碳源/碳汇的测算,得到都市圈各年的碳盈亏量。表 2 显示,2005、2010、2015、2020 年长株潭都市圈碳盈亏总体均呈亏损状态,且随着年份的增加碳亏损呈持续上升趋势,即从 2005 年的 6150.10 万 t 增加到 2020 年的 9866.77 万 t,年均增幅达 4.03%,这说明都市圈的碳排放一直大于碳吸收且呈增加态势,意味着长株潭都市圈碳减排任务十分艰巨。就区县而言,2005—2020 年都市圈各区县的碳收支也一直处于亏损状态。其中,长沙市各区县与株洲的醴陵市碳亏损呈先增加后减少的趋势,浏口区碳亏损呈持续

表 2 长株潭都市圈县域碳盈亏统计
Table 2 Statistics of carbon surplus and deficit at the county level in Chang-Zhu-Tan metropolitan area

区县 County	2005 年					2010 年					2015 年					2020 年				
	CE	NEP	CSD	ACSD	CE	NEP	CSD	ACSD	CE	NEP	CSD	ACSD	CE	NEP	CSD	ACSD	CE	NEP	CSD	ACSD
芙蓉区	272.70	1.36	-271.34	-6.37	515.51	0.66	-514.85	-12.09	547.19	0.71	-546.48	-12.83	472.77	0.69	-472.08	-11.08				
天心区	310.68	2.50	-308.18	-2.24	467.50	3.27	-464.23	-3.38	601.63	3.25	-598.38	-4.36	615.75	3.34	-612.41	-4.46				
岳麓区	291.03	1.68	-289.35	-0.54	788.71	2.83	-785.88	-1.46	833.19	0.59	-832.60	-1.55	1124.26	2.75	-1121.51	-2.08				
开福区	302.00	1.87	-300.13	-1.59	557.91	2.54	-555.37	-2.94	610.91	2.74	-608.17	-3.22	604.42	3.10	-601.32	-3.19				
雨花区	359.26	0.19	-359.07	-1.23	712.27	0.51	-711.76	-2.44	831.28	0.77	-830.51	-2.84	931.49	1.31	-930.18	-3.18				
望城区	522.81	4.29	-518.52	-0.55	515.21	2.08	-513.13	-0.54	580.86	7.85	-573.01	-0.60	655.61	9.21	-646.40	-0.68				
长沙县	548.50	23.52	-524.98	-0.30	963.53	21.66	-941.87	-0.54	923.42	19.08	-904.34	-0.52	1012.25	16.22	-996.03	-0.57				
浏阳市	990.27	187.82	-802.45	-0.16	1258.77	180.47	-1078.30	-0.22	1317.98	215.92	-1102.06	-0.22	1052.63	186.71	-865.92	-0.17				
宁乡市	972.97	24.06	-948.91	-0.33	1147.21	39.47	-1107.74	-0.38	1245.50	33.47	-1212.03	-0.42	930.39	42.94	-887.45	-0.30				
雨湖区	149.31	1.01	-148.30	-0.33	258.79	0.21	-258.58	-0.57	342.06	0.42	-341.64	-0.76	416.11	2.75	-413.36	-0.92				
岳塘区	136.47	1.52	-134.95	-0.66	236.46	1.56	-234.90	-1.14	267.45	1.65	-265.80	-1.29	326.06	1.45	-324.61	-1.58				
湘潭县	449.10	26.44	-422.66	-0.20	473.22	27.43	-445.79	-0.21	490.08	27.56	-462.52	-0.22	532.26	30.63	-501.63	-0.24				
韶山市	40.67	3.29	-37.38	-0.15	44.40	5.09	-39.31	-0.16	55.91	3.94	-51.97	-0.21	69.52	4.46	-65.06	-0.26				
渌口区	220.08	16.49	-203.59	-0.19	208.29	18.43	-189.86	-0.18	170.52	24.35	-146.17	-0.14	149.79	24.18	-125.61	-0.12				
芦淞区	95.37	0.88	-94.49	-0.44	134.39	2.47	-131.92	-0.61	172.83	4.13	-168.70	-0.78	176.59	3.03	-173.56	-0.80				
石峰区	120.43	0.19	-120.24	-1.32	153.77	0.66	-153.11	-1.68	190.05	0.52	-189.53	-2.08	195.22	0.67	-194.55	-2.13				
荷塘区	113.35	0.31	-113.04	-0.79	167.78	0.78	-167.00	-1.17	179.94	1.58	-178.36	-1.25	200.68	0.48	-200.20	-1.40				
天元区	90.78	0.61	-90.17	-0.27	116.96	0.13	-116.83	-0.36	169.01	1.31	-167.70	-0.51	275.15	2.98	-272.17	-0.83				
醴陵市	494.38	32.03	-462.35	-0.21	514.42	36.86	-477.56	-0.22	565.64	56.04	-509.60	-0.24	509.47	46.75	-462.72	-0.21				
总计 Total	6480.16	330.06	-6150.10	-0.33	9235.10	347.11	-6877.99	-0.47	10095.45	405.88	-9689.57	-0.57	10250.42	383.65	-9866.77	-0.52				

CE:碳源 Carbon emissions($\times 10^4$ t); NEP:净生态系统生产(即碳汇) Net ecosystem productivity (i.e. carbon sink) ($\times 10^4$ t); CSD:碳盈亏 Carbon surplus and deficit($\times 10^4$ t); ACSD:地均碳盈亏 Average CSD on land($\times 10^4$ t/ km^2)

下降态势,而剩余的湘潭市各区县和株洲市各区县的碳亏损则呈增长态势。这是因为在 2013 年后,长沙各区县和株洲的醴陵市依法关停和转移了部分高耗能产业,产业结构和能源布局优化以及推广清洁能源使单位 GDP 能耗降低,碳排放由上升转为下降,加上这些区县绿地面积有所增加^[34],从而导致碳亏损呈先增加后减少的趋势。而同期的湘潭市各区县和株洲市部分区县在 2013 年后承接了来自长沙地区转移的部分高耗能产业,加上这些区县本身大多以高耗能的重工业为主^[35],导致其碳排放增速始终大于碳汇,最终使碳亏损呈增长状态。至于浏口区碳亏损呈持续下降,这可能与该区对经济发展和绿色产业同等重视密不可分,特别是在 2013 年后落实《绿色湖南建设纲要》和开展“三年造绿大行动”,导致其碳排放逐年减少而碳汇稳步增加。

为揭示碳盈亏的空间特征,采用 ArcGIS 10.2 软件中的自然断点法并参考已有的分级成果^[21]将 4 个年份县域单位面积的碳盈亏量(地均碳盈亏)划分成 5 个等级:微碳亏损(<0.50 万 t)、轻碳亏损(0.51—1.50 万 t)、中碳亏损(1.51—4.50 万 t)、重碳亏损(4.51—7.5 万 t)和超重碳亏损(>7.5 万 t)。图 2 显示,长株潭都市圈县域碳亏损在空间上从中部向四周呈减少的格局,尤以 2015 年和 2020 年更加明显。原因是在研究期间部分高耗能产业仍聚集在都市圈中部,加上这里人口密集,大量的化石能源消耗使碳排放增加;而周边区县产业分散且相对较少,因而碳亏损相对较低^[34]。具体而言,2005 年芙蓉区为重碳亏损,开福区和天心区为中碳亏损,其余区县均为微碳和轻碳亏损。但自 2010 年开始,中碳亏损的区县数量逐渐增多,由 2005 年的 2 个增加到 2020 年的 6 个(天心区、岳麓区、岳塘区、雨花区、开福区和石峰区);芙蓉区由重碳亏损转变为超重碳亏损且处于稳定状态,这可能与较大的地均碳排放密切相关(2010—2020 年芙蓉区地均碳排放大于 11.09 万 t)。此外,轻碳亏损的县域也有所增加,由 2005 年的 5 个增加至 2020 年的 6 个;而宁乡市、浏阳市、韶山市、浏口区、醴陵市和湘潭县的碳亏类型在此期间一直处于微碳亏损状态,这可能与较高的植被覆盖有关。

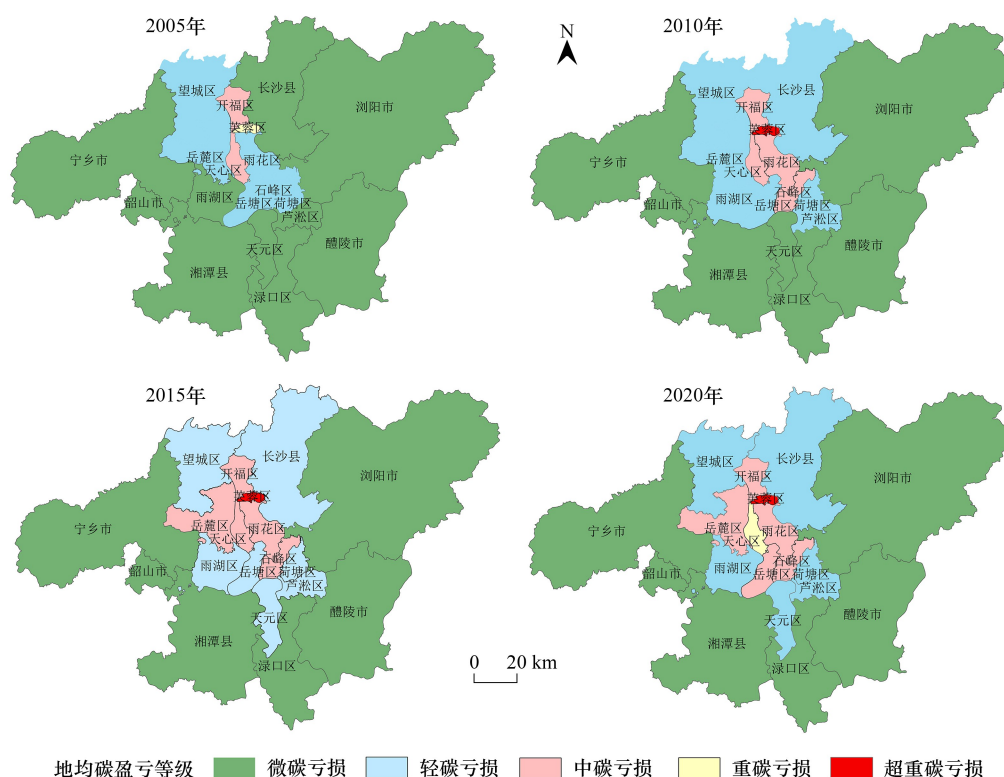


图 2 长株潭都市圈地均碳盈亏空间分布

Fig.2 Spatial distribution of average CSD on land in Chang-Zhu-Tan metropolitan area

CSD:碳盈亏 Carbon surplus and deficit

3.2 碳盈亏空间格局

3.2.1 碳盈亏重心变化

标准差椭圆分析显示(图3),2005—2020 年长株潭都市圈碳亏损重心持续向都市圈几何中心(113.124°E, 28.018°N)的西北方向移动,迁移距离约 1.727km,移动区间变化在 113.022°—113.033°E 和 28.104°—28.115°N 之间,即雨花区境内,表明都市圈雨花区的碳亏损最为严重。这是因为都市圈几何中心的西北部处在长沙市境内,由于长沙属于省会城市,其所辖区县大多是都市圈的核心区域,其快速的经济发展、高密度的人口聚集和较发达的制造业必然消耗大量的化石能源,从而导致较其它区县更多的碳排放量;加上长沙市各县域绿地面积相对较少,绿色发展体系不够完善^[36],从而使其碳排放量远高于碳汇量,进而成为碳亏中心。从椭圆参数看,椭圆长轴标准差、短轴标准差的变化范围分别为 38.887—40.693km 和 31.690—36.668km,相较于 2005 年,2020 年的长半轴和短半轴均更长,且短半轴变化相对更大,说明长株潭都市圈碳亏损分布空间在东西方向上有所收敛,而在南北方向上有所发散。进一步分析发现,自 2010 年开始,椭圆长轴、短轴标准差变化均较小(表3),意味着 2010 年以后长株潭都市圈碳亏损的空间格局相对稳定。这可能与长株潭地区自 2007 年获批国家“两型”社会建设以来,一体化建设推进加快、产业与能源结构调整优化使得都市圈碳排放差距不断缩小有关。此外,标准差椭圆的方位角从 2005 年的 7.448°增加到 2020 年的 9.403°,说明都市圈碳亏损的空间分布以西北方向为主导格局。

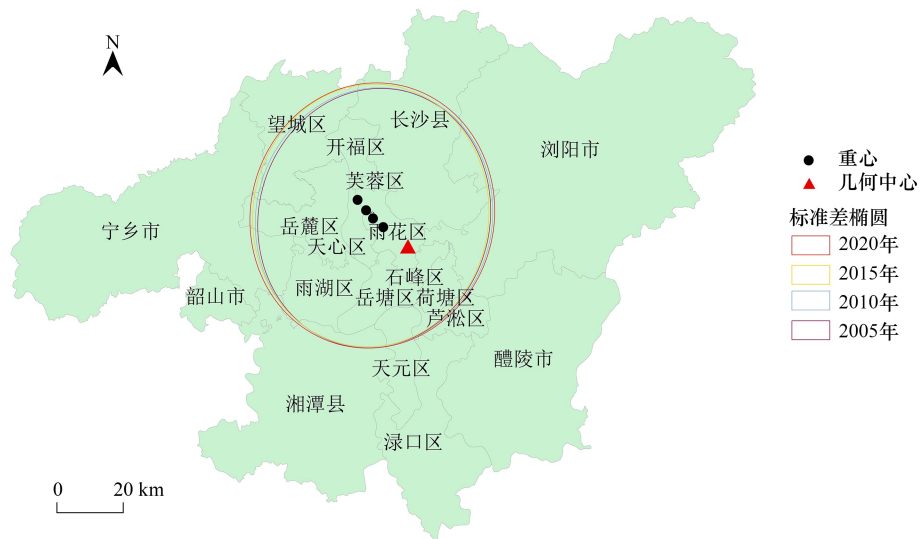


图3 长株潭都市圈碳盈亏标准差椭圆

Fig.3 Standard deviational ellipses of carbon surplus and deficit in Chang-Zhu-Tan metropolitan area

表3 长株潭都市圈碳盈亏标准差椭圆参数

Table 3 Standard deviation elliptic parameters of carbon surplus and deficit in Chang-Zhu-Tan metropolitan area

年份 Year	重心坐标		重心迁移			长轴 Long axis/ km	短轴 Short axis/ km	方位角 Azimuth/(°)
	Barycentric coordinate		Migration of the gravity cente					
	经度 Longitude/(°)	纬度 Latitude/(°)	方向 Direction	距离 Distance/km	速度 Speed/ (km/a)			
2005	113.033	28.104	—	0.000	0.000	38.887	31.690	7.448
2010	113.029	28.106	西北	0.451	0.090	40.170	36.352	7.576
2015	113.024	28.112	西北	0.828	0.166	40.432	36.329	7.756
2020	113.022	28.115	西北	0.387	0.077	40.693	36.668	9.403

3.2.2 碳盈亏空间关联特征

长株潭都市圈碳盈亏的空间关联分析发现,全局 Moran's I 值在 2005、2010、2015、2020 年分别为 0.295、0.297、0.264 和 0.245,并在 $P=0.05$ 的水平下通过显著性检验,表明碳盈亏在县域之间呈显著正相关性。但随着时间的推移,全局莫兰指数呈下降趋势,表明研究期间长株潭都市圈县域碳盈亏的空间“俱乐部效应”在减弱。从局部空间看(图 4),长株潭都市圈县域碳盈亏表现出非均衡发展格局。碳亏损低-低聚集的区域主要分布在株洲和湘潭所辖的部分区县,原因是这些区县林地面积增加较大,碳汇能力增强。尽管在 2015—2020 年低值范围有所缩小,但低值县域个数从 2005 年的 5 个增加到 2020 年的 8 个,说明此期间都市圈碳亏损低-低聚集的程度在增强。高-高集聚的区域主要集中在长沙市所辖的区县,原因是这些区县规模以上工业企业相对较多,对化石能源的需求较大,导致碳排放较多而出现较大的碳亏损。与 2005 年相比,2020 年高-高集聚的区县减少了 2 个,这可能是“十三五”期间长沙市重视能源结构调整,大幅提升了清洁能源和新能源汽车的使用比例,从而使县域碳亏损高-高集聚的程度有所减弱。高-低集聚的区域主要分布在湘潭县和岳塘区,这是因为两者规模以上工业企业比重较高,碳排放量较大所致;低-高集聚的区域集中在浏阳市、宁乡市和雨湖区,原因是浏阳、宁乡两市森林资源丰富,碳吸收能力较强,而雨湖区第三产业比例较高,因而碳排放量相对较低。

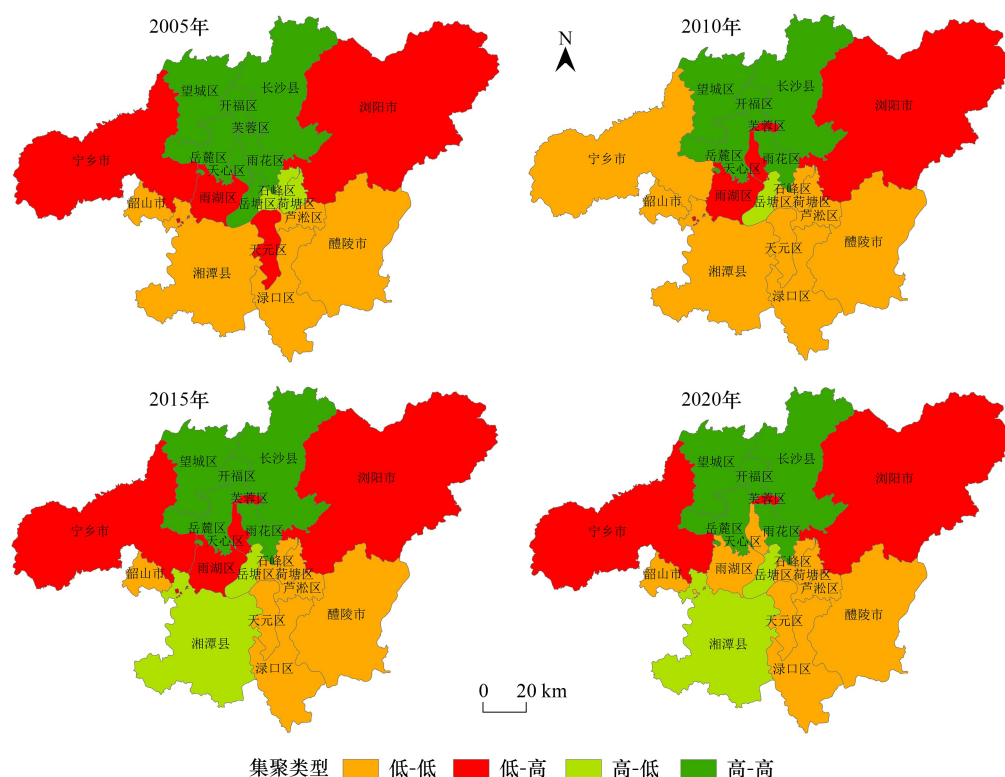


图 4 长株潭都市圈碳盈亏 LISA 空间集聚图

Fig.4 LISA spatial agglomeration plots of carbon surplus and deficit in Chang-Zhu-Tan metropolitan area

LISA:局部空间关联指标 Local indicators of spatial association

3.3 碳盈亏驱动因素分析

3.3.1 地理探测器分析

考虑数据的可获得性,选取年太阳辐射 (Annual solar radiation, ASR)、年均温度 (Annual average temperature, AAT)、年降水量 (Annual precipitation, AP)、经济发展水平 (Per capita GDP, PGDP)、人口规模 (Population size, PS)、产业结构 (Industrial structure, IS, 用第二产业占 GDP 的比重表示)、能源强度 (Energy

intensity, EI) 和城市化水平 (Urbanization level, UL) 以及绿化覆盖面积 (Green coverage area, GCA) 9 个指标采用地理探测器对碳盈亏的影响程度进行分析。表 4 显示, ASR、PGDP 和 EI 是影响碳盈亏变化的重要因素, 平均 q 值分别为 0.807、0.787 和 0.629; PS、IS、UL 和 GCA 是影响碳盈亏的次要因素, 平均 q 值分别为 0.464、0.360、0.325 和 0.389, 而 AAT 和 AP 对碳盈亏的解释能力较弱。此外, 各因素对碳盈亏的影响随时间变化存在明显差异。如 PGDP 的 q 值在 2015 年增至峰值, 而在 2020 年有所下降, 表明随着长株潭经济一体化战略的实施, 经济发展导致的碳排放对碳盈亏的影响在增强, 但随着《2014—2015 年节能减排低碳发展行动方案》的落实, 经济发展的影响在减弱; ASR 与之变化相似, 意味着 ASR 对碳盈亏的影响也存在先增强后转弱的过程。GCA 和 UL 对碳盈亏的影响逐年下降, q 值分别从 2005 年的 0.812、0.395 下降至 2020 年的 0.213 和 0.258。PS、IS 和 EI 对碳盈亏的影响表现出先减弱后增强的“U”型特征。其中, IS 的 q 值从 2005 年的 0.513 波动减少到 2020 年的 0.352, 意味着产业结构总体上对碳盈亏的影响在减弱, 这可能与长株潭都市圈近年淘汰落后产能、大力发展先进制造业和科技创新推动产业转型抑制碳排放增长有关。

表 4 基于地理探测器的碳盈亏影响因素分析

Table 4 Analysis of factors influencing carbon surplus and deficit based on geographic detectors

年份 Year	影响因子的 q 值 The q values of the influencing factors								
	ASR	AAT	AP	PGDP	PS	IS	EI	UL	GCA
2005	0.764 **	0.028	0.172	0.647 **	0.553 **	0.513 **	0.848 **	0.395 *	0.812 **
2010	0.776 **	0.024	0.021	0.815 **	0.454 **	0.259	0.425 *	0.371 *	0.266
2015	0.860 **	0.079	0.083	0.848 **	0.348 *	0.316 *	0.527 **	0.277	0.264
2020	0.829 **	0.064	0.095	0.837 **	0.502 **	0.352 *	0.714 **	0.258	0.213
平均值 Mean value	0.807 **	0.049	0.093	0.787 **	0.464 *	0.360 *	0.629 **	0.325 *	0.389 *

ASR: 年太阳辐射 Annual solar radiation; AAT: 年均温度 Annual average temperature; AP: 年降水量 Annual precipitation; PGDP: 人均国民生产总值 Per capita gross domestic product; PS: 人口规模 Population size; IS: 产业结构 Industrial structure; EI: 能源强度 Energy intensity; UL: 城市化水平 Urbanization level; GCA: 绿化覆盖面积 Green coverage area; * *: 1% 的显著性水平; * : 5% 的显著性水平

3.3.2 碳盈亏影响因素的空间异质性

长株潭都市圈各县域的自然和社会经济条件均存在明显差异, 因而各因素对碳盈亏的影响在空间上可能不同。基于地理探测结果, 本文选取平均 q 值大于 0.1 且 $P < 0.05$ 的变量 (表 4) 利用式 (16) 进行空间回归。为保证结果的有效性, 先对选取的变量进行共线性检验, 发现被检测变量仅 PS 的 VIF (Variance inflation factor) 值大于 10, 剔除该变量后利用剩余的 6 个变量分别进行 OLSR (Ordinary least squares regression) 和 GWR 建模, 得到 OLSR 和 GWR 的 R^2 系数分别为 0.734 和 0.853, 说明选择 GWR 模型对碳盈亏的影响因素进行回归效果将更优。为消除变量异常波动以及量纲差异带来的影响, GWR 模型中的所有变量均用 4 个年份各指标的平均值的对数表示。图 5 显示, 除 IS、UL 和 GCA 对碳盈亏的影响较弱外, 其它因素均表现出较强的作用, 各因素影响碳盈亏的空间异质性如下。

(1) 年太阳辐射 (ASR)

图 5 显示, ASR 的回归系数在长株潭都市圈各区县均为负值, 变化范围为 -1.422—-1.367, 说明 ASR 对碳亏损具有显著的抑制作用。从空间分布看, ASR 回归系数的绝对值由北向南呈减少态势, 也即 ASR 对都市圈碳亏损的抑制作用自北向南在逐渐减弱。其原因可能是随着“两型社会”建设的推进, 长株潭都市圈碳排放较大的高耗能产业由北部、东北部向南转移, 使得都市圈南部各区县大气中污染物排放增加和气溶胶增多, 从而削弱了 ASR 到达地表, 导致植物光合作用和碳吸收能力下降, 进而使南部区县 ASR 对碳亏损的抑制作用减弱。此外, 长株潭地区东南西三面环山并逐渐向北倾斜, 形成朝北开口的马蹄形地形, 有利于秋冬季节北方地区秸秆焚烧和燃煤取暖产生的污染物随冷空气南下, 造成都市圈南部区县大气污染物不易扩散, 进而对太阳辐射产生削弱作用, 导致植物光合作用下降, 固碳释氧能力降低。

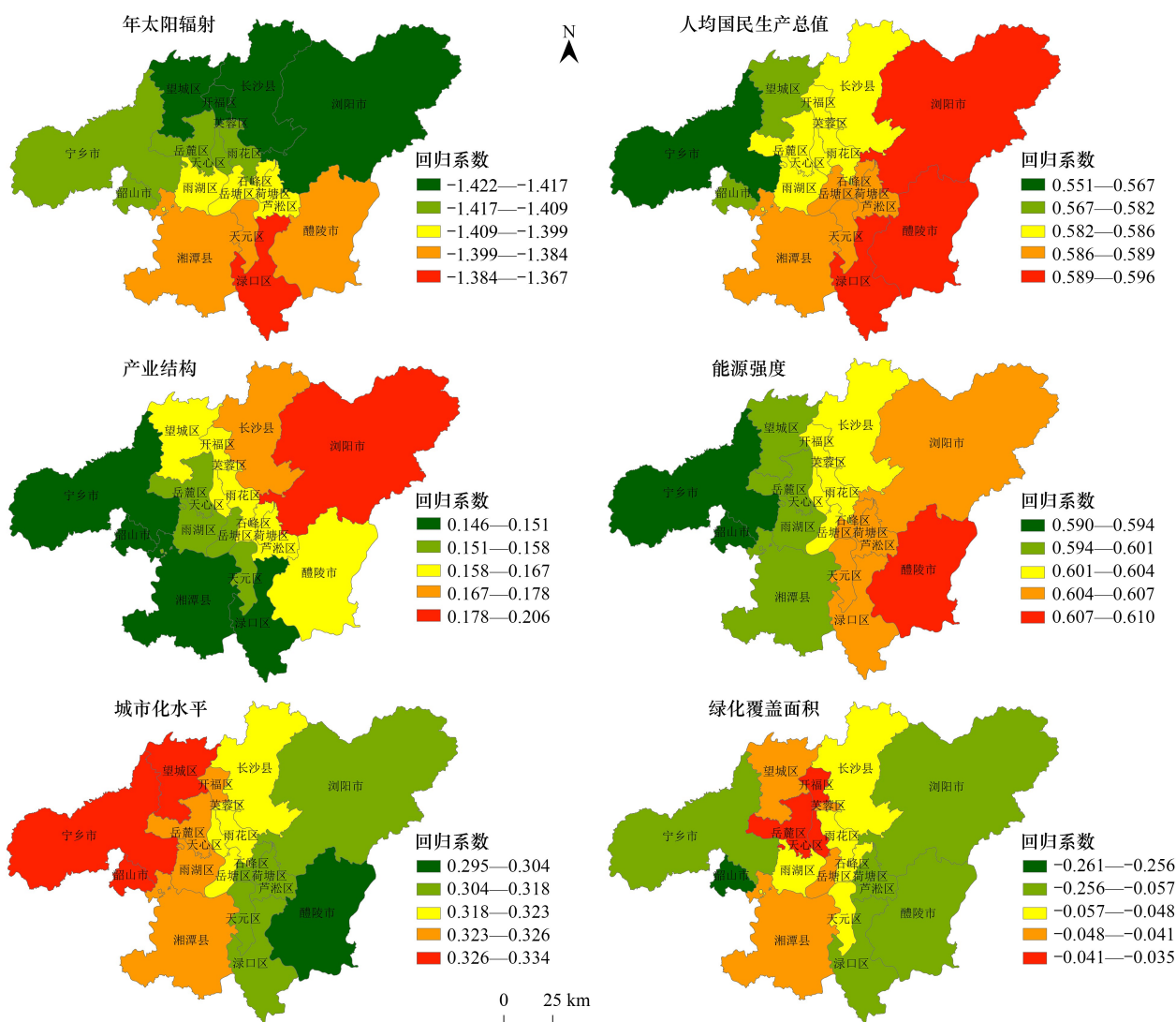


图5 长株潭都市圈碳盈亏影响因素回归系数的空间分布

Fig.5 The spatial distribution of regression coefficients for the influencing factors of carbon surplus and deficit in Chang-Zhu-Tan metropolitan area

(2) 经济发展 (PGDP)

图5显示,都市圈各区县PGDP的回归系数均为正值,变化范围为0.551—0.596,说明快速的经济增长对长株潭都市圈各区县碳亏损均起推动作用,且影响程度由西向东呈增加趋势。如位于都市圈东部的浏阳市,PGDP对碳亏损的回归系数为0.596,而位于都市圈西部的宁乡,PGDP的回归系数只有0.567。出现这种差异的原因可能是浏阳市不仅是省会长沙的副中心城市,而且还是世界著名的烟花爆竹生产基地,其经济发展水平远高于宁乡市(如2020年浏阳市GDP增速为4.70%,PGDP为10.52万元,而宁乡市GDP增速为2.70%,PGDP约8.81万元),故其经济发展对碳亏损的促进作用要强于宁乡市。此外,经济增长对碳亏损的影响主要通过促进区域的碳排放量来实现。尽管EKC曲线表明碳排放与经济发展存在倒U型关系,但在长株潭都市圈,碳排放与经济发展在2005—2020年间呈同步增长关系,即都市圈PGDP从2005年的1.77万元增加到2020年的9.63万元,碳排放量同步从2005年的6480.16万t增长到2020年的10250.42万t。这说明长株潭都市圈经济发展与碳排放的关系仍未达到拐点,实现“碳达峰”仍任重道远。

(3) 产业结构 (IS)

IS 通常会通过影响碳排放间接影响区域的碳盈亏。图 5 显示,IS 对长株潭都市圈碳亏损的回归系数均为正值,变化范围为 0.146—0.206,说明第二产业比重增加对各区县碳亏损具有促进作用。但与经济发展相比,IS 对碳亏损的回归系数显著减小。其原因可能是长株潭都市圈近年来加强了对机械、钢铁和化工等高耗能、高排放企业的取缔和关停,形成了以 IT、电子和新能源汽车等为主的新型产业,从而在一定程度上减少了碳排放,最终使 IS 对碳亏损的推动作用较经济发展弱。

从空间分布看,IS 对各区县碳亏损的促进作用表现出一定的空间差异性,影响程度大致从都市圈东北部的浏阳市向西部和西南部逐渐减弱。这是因为在工业化进程中,长株潭都市圈西部和西南部区县的第二产业占比较低(如 2020 年韶山市第二产业比重为 43.18%),工业发展相对缓慢,而都市圈东北部区县大多为长株潭经济发展的核心区,第二产业比重较高(如 2020 年浏阳市第二产业的比重为 66.60%),导致化石能源消耗的碳排放大增,进而使 IS 对都市圈东北部区县碳亏损的影响大于都市圈西部和西南部区县。

(4) 能源强度(EI)

图 5 显示,长株潭都市圈 EI 的回归系数变化在 0.590—0.610,意味着 EI 对各区县碳亏损均起显著的促进作用。从空间上看,EI 的回归系数由东向西逐渐呈递减趋势,最大值出现在醴陵市(0.609),最小值出现在宁乡市(0.590)。醴陵和宁乡两市 EI 对碳亏损影响存在差异的原因可能与它们的支柱产业有关。众所周知,醴陵享有中国“国瓷”和“花炮之都”的美誉,陶瓷、花炮既是其特色支柱产业(占工业总产值的 73%),又是其能源消耗大户(占规模企业能耗的 65%),加上新兴产业还未形成规模,其经济发展严重依赖处于产业链低端的企业,导致化石能源消耗大增,碳排放量增加,进而对碳亏损的影响较大。而宁乡市聚焦制造业高质量发展,已形成工程机械、储能材料、智能家电三大优势产业链和农产品加工、生命科学两大产业集群,能源利用效率提高较快,单位 GDP 能耗在 2005—2020 年平均下降 5.56%,从而对碳亏损的促进作用较小。

(5) 城市化水平(UL)

UL 是体现城市人口密度和生活方式的综合指标。图 5 显示,UL 对长株潭都市圈碳亏损产生了较强的正向影响,回归系数变化在 0.295—0.334,且在空间上表现出西高东低的格局。出现这种差异的原因可能与长株潭都市圈各区县的城市化增速不同有关。据测算,都市圈西部县域城镇化增速较快,如望城、韶山、宁乡的城市化水平分别由 2005 年的 29.6%、25.4%和 26.7%快速上升到 2020 年的 78.4%、65.0%和 60.1%,15 年间增幅分别达 48.8%(望城)、39.6%(韶山)和 33.4%(宁乡);而都市圈东部的浏阳、醴陵城市化增速相对缓慢,同期增幅仅分别为 29.3%和 33.6%。随着都市圈西部区县城镇化的快速推进,人口集聚和大量基础设施建设必然导致工业生产、交通运输、居民生活方式等对能源的大量消耗,进而推动碳排放增加,同时城市化使部分耕地和林草地转化为建设用地导致自然生态系统碳汇功能下降,最终使城市化对都市圈西部区县碳亏损的影响大于东部区县。此外,都市圈中部县域城市化对碳亏损的影响也小于西部区县,其原因可能是都市圈中部区县的城市化已接近发达国家水平(如 2010—2020 年天心区、开福区和雨花区的城市化为 96.5%—99.5%,芙蓉区达到 100%),在湖南省长株潭城市群区域规划条例明确要求生态保护、严格控制城市用地规模的情况下,城市扩张难以继续;其次是高水平的城镇化可通过基础设施共享引导能源消费在空间上形成聚集,从而提高能源利用效率和减少碳排放^[36],最终使 UL 对都市圈中部区县碳亏损的促进作用减弱。

(6) 绿化覆盖面积(GCA)

图 5 显示,GCA 的回归系数变化在-0.261—-0.035,说明 GCA 增加对都市圈碳亏损具有负向作用,抑制程度在空间上表现为中间低、东西两侧高。这是因为中部区县均处在都市圈经济发展的核心区域,地貌以湘江冲积平原为主,经济发展和城市化水平较高,而绿化覆盖率相对较低(如 2020 年天心区和开福区的绿化覆盖率分别为 40.33%和 42.59%);而都市圈东西两侧的区县低山丘陵广布,森林资源丰富且开发程度较低,绿化覆盖率相对较高(如 2020 年都市圈东部的浏阳和西部的韶山森林覆盖率分别达 66.70%和 52.48%),因而有利于增加碳汇,进而对碳亏损产生较强的抑制作用。

4 讨论

4.1 长株潭都市圈碳盈亏时空格局

长株潭都市圈 2005—2020 年一直处于碳亏损状态,并且碳亏量呈上升趋势,这与陈帝伯等^[17]得出的中国省域同期处于碳亏损且碳亏量呈增加趋势的结论一致,但与肖建武等^[34]对长株潭地区研究的结果略有不同,即长株潭地区在 2007—2017 年一直处于碳赤字状态但随时间呈“M”型变化。出现这种差异的原因可能与碳源汇测度边界以及计算方法有关。尽管肖建武等研究的区域范围和时间跨度与本研究相差甚微,但其在核算碳源时是基于原煤、焦炭和天然气 3 种能源消耗、工业过程和农业生产等三个方面进行的,碳汇的计算是采用林草、湿地和城市绿地面积乘以碳吸收系数进行^[34];而本研究估算的碳源是利用 8 种化石能源的消耗量采用排放因子法进行,并未考虑工业和农业生产的碳排放,碳汇是基于多源遥感数据利用改进的 CASA 模型进行计量。由于两者在碳源测算边界和碳汇估算方法等方面的差异,从而使研究结果并非完全一致。至于周姝含等^[19]得出东北三省自 2005 年碳亏损呈下降趋势的结论与本研究存在差异,这可能与研究区资源禀赋、人类生产活动、产业结构转型力度等不同有关。首先,尽管两者测度碳源汇的边界和方法相同,但东北三省是我国重要的森林储备库,森林植被增加碳汇的能力要明显强于长株潭都市圈;其次是东北三省近年面临人口流失和经济下行的压力,人类活动产生的能源碳排放有所下降,而长株潭都市圈人口密集,人类活动和经济发展对碳排放增加的影响较大^[34];三是在东北全面振兴的推动下,产业转型和结构优化提速,一体化的“大产业”体系使东北三省能源利用效率提高,减少的碳源从而使碳亏损下降。

长株潭都市圈各区县碳亏损变化趋势明显不同,这与肖建武等^[34]的结果一致。尽管研究期间各区县(芙蓉区和长沙县除外)的碳汇也呈增长态势(表 2),但仍不及碳排放的增长速率(浏口区除外),因此长株潭都市圈各区县一直处于碳亏损状态。碳亏损整体表现为“中部高、四周低”的空间分布格局,碳亏损最多的区域主要分布在长沙市各区县,除受规模以上工业企业相对较多影响外,还与这些区县人口密集、人类活动强度大导致碳排放量多和植被碳汇减少有关。

4.2 长株潭都市圈碳盈亏影响因素

区域碳盈亏与碳源汇密切相关,因而影响碳源汇的因素也是驱动碳盈亏变化的因素。目前普遍性的结论认为,经济发展、能源强度、产业结构和土地利用等均是影响区域碳源、碳汇和碳盈亏变化的重要因素^[14,19-21]。如 Xu 等^[37]和 Sharma 等^[38]的研究发现,土地城市化和绿色植被减少(如森林转化为耕地)是驱动碳汇减少的重要因素。本文基于地理探测器和 GWR 模型对碳盈亏时空变化的影响因素研究发现,在各种社会经济因子中,PGDP、EI、UL 和 IS 是导致长株潭都市圈碳亏损变化的主要因素;而在自然因素中,ASR 和 GCA 对碳亏损起显著抑制作用,ASR 是碳盈亏变化的主控自然因子,并具有明显的空间异质性。这与陈帝伯等^[17]对中国省域碳盈亏影响因素以及周姝含等^[19]对东北三省碳盈亏影响因素的研究结果大体一致,即碳亏损与经济发展水平、人口规模、能源强度和产业结构呈正相关关系,而与植被覆盖度等呈负相关关系。但也有与前人研究结果不一致的情形。本研究中长株潭都市圈各县域碳亏损与 UL 均呈较强的正相关性,但周姝含等^[19]发现,碳盈余与 UL 在黑龙江和吉林两省呈正相关关系,而在辽宁省呈负相关关系。丁一萌等^[21]发现 EI 对陕南和陕北碳盈亏影响方向不一,在 2010—2020 年 EI 对陕南秦巴山区碳盈余产生正向驱动,而对陕北地区则产生负向影响;本研究中 EI 与都市圈碳亏损始终呈最强的正相关性,只是对各区县碳盈亏影响的程度不同。此外,陈帝伯等^[17]发现科技发展水平对碳盈亏的影响呈先增加后减少的趋势,而周姝含等^[19]得出碳盈亏与碳强度关系稍弱。尽管本研究没有直接探讨科技水平对碳盈亏的影响,但基于能源强度对碳盈亏影响的结果在一定程度上能够间接指示科技发展水平对碳盈亏影响的程度,这是因为 EI 是反映一个地区能源利用效率和科技水平的综合指标。通常 EI 越低,单位 GDP 所需的能耗和碳排放就越少,碳盈余就越多,本研究中 EI 对碳盈亏的影响随年份表现出先减后增的“U”型特征(表 4),这与刘志华等^[39]的研究结果一致。

4.3 长株潭都市圈碳盈亏核算的不确定性

本文基于碳排放系数法和改进的 CASA 模型估算长株潭都市圈的碳源、碳汇和碳盈亏,弥补了都市圈县

域尺度碳汇清单的缺陷,但在碳源/汇测算方面尚存在不确定性。①受县域尺度能源消费数据缺乏的限制,在碳源核算时本文是以市级能源消费量进行估算的,然后根据各区县的经济发展、产业结构和人口占比采用熵值法将碳源分配至各区县,因而碳源分配指标的选取是否合适尚需讨论,若能直接获取各区县的能源消费数据,则可自下而上估算碳源,从而提高研究精度。②碳排放支出一定程度上依赖于能源参与的工业过程、农业生产和生活消费,而本研究在核算碳源时并未将其产生的碳排放纳入在内,因此在探讨都市圈碳盈亏时需进一步细化,以提高碳源核算的精度。③生态系统碳汇受多种因素的影响,而本文仅考虑了气候因子对植被的碳汇作用;加上遥感数据本身的误差和 CASA 模型参数的非本地化,从而有可能削弱估算碳汇的精度。此外,由于缺乏实测数据,因而本文估算的 NPP 未能得到有效验证。以及利用气象站点数据插值得到的温度和降水数据进行土壤微生物呼吸量估算,必然会使估算的碳汇存在不确定性。因此在未来区域碳盈亏的研究中,需要对碳源边界、指标因素和模型参数等做进一步的修正,以提高碳盈亏研究的精度和可靠性。

5 结论与政策启示

(1)2005—2020 年长株潭都市圈碳盈亏整体处于亏损且呈增长状态,但各区县随时间变化存在明显差异。芙蓉区、开福区、浏阳市和宁乡市以及醴陵市碳亏损呈先增加后减少的趋势,浏口区碳亏损呈持续下降状态,剩余区县碳亏损呈上升态势。在空间分布上,都市圈碳亏损从中部向四周呈减少的空间格局。

(2)2005—2020 年长株潭都市圈碳盈亏重心持续向都市圈几何中心(113.124°E , 28.018°N)的西北方向移动。县域碳盈亏整体呈显著的空间正相关性,全局 Moran's I 呈先上升后下降的变化特征。局部空间上都市圈县域碳盈亏表现出非均衡发展格局,空间集聚特征明显。

(3)在影响长株潭都市圈碳盈亏的因素中,ASR、PGDP 和 EI 是重要因素,PS、UL、IS 和 GCA 为次要因素,而 AAT 和 AP 对碳盈亏的影响微弱。其中 PGDP 和 ASR 对碳盈亏的影响呈先增强后减弱的趋势,PS、IS 和 EI 的影响则呈先减弱后增强的特征,而 GCA 和 UL 的影响逐年下降。各因素对都市圈碳盈亏的影响存在明显的空间异质性。其中 PGDP、EI、UL 和 IS 对碳亏损产生正向驱动,ASR 和 GCA 则起负向作用;GCA 对碳亏损影响的空间异质性最强,EI 的空间异质性最弱。

从上述结论得到如下启示:①基于长株潭都市圈碳源始终大于碳汇且能源消费是导致碳源增加的这一事实,减排的着力点应通过能源市场化改革、技术创新和能源消费总量控制提高能源使用效率和优化能源结构,以此减少能源消耗进而降低碳源。②在都市圈全面实行跨区县、跨部门的固碳节能减排行动,通过优化产业结构、发展绿色经济和倡导绿色消费全方位全领域实行节能减排行动,力争实现碳亏损向碳盈余转变。③对不同碳亏类型的区县可采取阶梯式碳税和不同的碳权交易政策,实行差异化减排,并探索增汇减排奖惩机制。针对碳亏损严重的长沙县、岳麓区和雨花区,可通过减少高耗能产业的比重和利用科技进步助推产业结构转型升级;针对碳汇相对较强的浏阳市、醴陵市、湘潭县、宁乡市和韶山市,可通过生态补偿机制加强林草保护以提高增汇能力;针对城市化水平高、碳汇能力低的芙蓉区、天心区、开福区和雨花区,应加快传统服务业向低碳新型服务业转型,通过植树造林、限制采伐等提高林草覆盖率,打造绿色低碳产业园。

参考文献(References):

- [1] 高怡凡,宋长青,王元慧,叶思菁,高培超.顾及土地利用强度和生态-经济权衡的四川省陆地生态系统碳储量预测与热点分析.生态学报, 2024, 44(9): 3958-3969.
- [2] Friedlingstein P. Global carbon budget 2022. Earth System Science Data, 2022, 14(11): 4811-4900.
- [3] Yi W J, Zou L L, Guo J, Wang K, Wei Y M. How can China reach its CO₂ intensity reduction targets by 2020? A regional allocation based on equity and development. Energy Policy, 2011, 39(5): 2407-2415.
- [4] Xia M Y, Chuai X W, Xu H B, Cai H H, Xiang A, Lu J Y, Zhang F T, Li M Y. Carbon deficit checks in high resolution and compensation under regional inequity. Journal of Environmental Management, 2023, 328: 116986.
- [5] Holmberg M, Akujärvi A, Anttila S, Autio I, Haakana M, Junttila V, Karvosenoja N, Kortelainen P, Mäkelä A, Minkinen K, Minunno F, Rankinen K, Ojanen P, Paunu V V, Peltoniemi M, Rasilo T, Sallantausta T, Savolahti M, Tuominen S, Tuominen S, Vanhala P, Forsius M. Sources and sinks of greenhouse gases in the landscape: approach for spatially explicit estimates. Science of the Total Environment, 2021,

- 781: 146668.
- [6] Vauhkonen J, Mutanen A, Packalen T, Asikainen A. Initial forest age distribution may generate computational sinks or sources of carbon: A generic approach to test assumptions underlying the EU LULUCF forest reference levels. *Carbon Balance and Management*, 2021, 16(1): 13.
- [7] Ali G, Pumijumong N, Cui S H. Valuation and validation of carbon sources and sinks through land cover/use change analysis: The case of Bangkok metropolitan area. *Land Use Policy*, 2018, 70: 471-478.
- [8] 鲁丰先, 张艳, 秦耀辰, 陈真玲, 王光辉. 中国省级区域碳源汇空间格局研究. *地理科学进展*, 2013, 32(12): 1751-1759.
- [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. *生态学报*, 2021, 41(14): 5814-5824.
- [10] Nguyen T T, Pham T A T, Tram H T X. Role of information and communication technologies and innovation in driving carbon emissions and economic growth in selected G-20 countries. *Journal of Environmental Management*, 2020, 261: 110162.
- [11] 刘凤, 曾永年. 2000—2015 年青海高原植被碳源/汇时空格局及变化. *生态学报*, 2021, 41(14): 5792-5803.
- [12] 潘竞虎, 文岩. 中国西北干旱区植被碳汇估算及其时空格局. *生态学报*, 2015, 35(23): 7718-7728.
- [13] Wang J, Epstein H E. Estimating carbon source-sink transition during secondary succession in a *Virginia* valley. *Plant and Soil*, 2013, 362(1): 135-147.
- [14] 赵宁, 周蕾, 庄杰, 王永琳, 周稳, 陈集景, 宋珺, 丁键浠, 迟永刚. 中国陆地生态系统碳源/汇整合分析. *生态学报*, 2021, 41(19): 7648-7658.
- [15] Chuai X W, Qi X X, Zhang X Y, Li J S, Yuan Y, Guo X M, Huang X J, Park S, Zhao R Q, Xie X L, Feng J X, Tang S S, Zuo T H, Lu J Y, Li J B, Lv X. Land degradation monitoring using terrestrial ecosystem carbon sinks/sources and their response to climate change in China. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(10): 3489-3502.
- [16] Li Z, Chen Y N, Zhang Q F, Li Y. Spatial patterns of vegetation carbon sinks and sources under water constraint in Central Asia. *Journal of Hydrology*, 2020, 590: 125355.
- [17] 陈帝伯, 魏伟, 周俊菊, 杜海波, 郝瑞军, 李缘缘. 中国省域碳源/碳汇强度及碳盈亏的空间演变. *经济地理*, 2023, 43(1): 159-168.
- [18] 王喜, 鲁丰先, 秦耀辰, 孙艳芳. 河南省碳源碳汇的时空变化研究. *地理科学进展*, 2016, 35(8): 941-951.
- [19] 周姝含, 曹永强, 么嘉棋, 王菲, 常志冬. 东北三省碳源/汇和碳盈亏时空分布与影响因素. *生态学报*, 2023, 43(22): 9266-9280.
- [20] 王菲, 曹永强, 周姝含, 范帅邦, 姜雪梅. 黄河流域生态功能区植被碳汇估算及其气候影响要素. *生态学报*, 2023, 43(6): 2501-2514.
- [21] 丁一萌, 韩玲, 黄馨. 陕西省县域碳盈亏驱动因素及时空异质性. *环境科学*: 1-23. <https://link.cnki.net/urlid/11.1895.X.20240530.1412.022>
- [22] Parry M L, Canziani O F, Hanson C E. *Climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [23] 刘贤赵, 杨旭. 夜间灯光数据估算中国省域碳排放与国际碳数据库分配的碳排放比较. *遥感技术与应用*, 2022, 37(2): 319-332.
- [24] 马海良, 张红艳, 吴风平. 基于情景分析法的中国碳排放分配预测研究. *软科学*, 2016, 30(10): 75-78.
- [25] Zhu W Q, Pan Y Z, He H, Yu D Y, Hu H B. Simulation of maximum light use efficiency for some typical vegetation types in China. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(4): 457-463.
- [26] Potter C, Klooster S, Genovese V. Net primary production of terrestrial ecosystems from 2000 to 2009. *Climatic Change*, 2012, 115(2): 365-378.
- [27] 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算. *植物生态学报*, 2007, 31(3): 413-424.
- [28] 周广胜, 张新时. 自然植被净第一性生产力模型初探. *植物生态学报*, 1995, 19(3): 193-200.
- [29] 裴志永, 周才平, 欧阳华, 杨文斌. 青藏高原高寒草原区域碳估测. *地理研究*, 2010, 29(1): 102-110.
- [30] 徐勇, 黄雯婷, 郭振东, 郑志威, 李欣怡, 盘钰春, 戴强玉. 2000—2020 年我国西南地区植被 NEP 时空变化及其驱动因素的相对贡献. *环境科学研究*, 2023, 36(3): 557-570.
- [31] 李玉娟, 彭仕兰. 基于标准差椭圆的长三角地区产业集聚特征分析. *统计与决策*, 2024, 40(1): 136-141.
- [32] 陈田田, 黄强, 王强. 基于地理探测器的喀斯特山区生态系统服务关系分异特征及驱动力解析——以贵州省为例. *生态学报*, 2022, 42(17): 6959-6972.
- [33] 刘贤赵, 高长春, 张勇, 张东水, 谢金宁, 宋焱, 王志强. 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. *地理科学*, 2018, 38(5): 681-690.
- [34] 肖建武, 赵珂艺. 长株潭地区碳赤字时空演变及区际比较 ——基于碳足迹理论与方法. *中南林业科技大学学报: 社会科学版*, 2019, 13(6): 39-45, 73.
- [35] 王雅敬, 谢炳庚, 李晓青, 王金艳, 罗海波. 长株潭经济圈土地利用变化的碳排放量及生态补偿研究. *生态科学*, 2017, 36(4): 160-165.
- [36] 田一豆, 赵先超. 基于 Markov-PLUS 模型的长株潭城市群建设用地扩张模拟及碳排放响应分析. *生态学报*, 2024, 44(1): 129-142.
- [37] Xu Q, Yang R, Dong Y X, Liu Y X, Qiu L R. The influence of rapid urbanization and land use changes on terrestrial carbon sources/sinks in Guangzhou, China. *Ecological Indicators*, 2016, 70: 304-316.
- [38] Sharma P, Rai S C. Carbon sequestration with land-use cover change in a Himalayan watershed. *Geoderma*, 2007, 139(3/4): 371-378.
- [39] 刘志华, 徐军委, 张彩虹. 科技创新、产业结构升级与碳排放效率-基于省际面板数据的 PVAR 分析. *自然资源学报*, 2022, 37(2): 508-520.