

广州市土地利用变化对碳代谢的影响

梁江森, 梅志雄, 黎思辰, 王心雨

(华南师范大学 地理科学学院, 广州 510631)

摘要: [目的] 揭示广州市土地利用变化对碳代谢的影响, 为促进其碳代谢系统的平衡提供参考。[方法] 测算 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年广州市垂直碳代谢, 利用地理加权回归模型探究垂直碳代谢的驱动因素, 运用生态网络分析方法分析水平碳代谢, 结合 GIS 空间分析探讨 2000—2020 年广州市土地利用变化对碳代谢的影响。[结果] (1) 广州市碳排放量呈先增后减趋势, 建设用地影响最大; 耕地、林地碳吸收量趋于减少, 草地、水域和未利用地碳吸收量较小且变化不大; 建设用地面积对垂直碳代谢具正向影响, 高程、GDP、年均降雨量和夜间灯光亮度的影响空间异质明显。(2) 正、负碳流总量均先增后减再增, 正碳流呈离散分布, 负碳流主要集中在研究区中部和西部。(3) 地类间生态关系基本以掠夺/限制为主且由集中分布逐渐转为离散分布, 影响了碳代谢系统平衡。(4) 碳代谢系统共生水平呈先降后升再降趋势。[结论] 各因素对垂直碳代谢的影响空间异质明显, 正、负碳流的空间分布特征不同, 掠夺/限制关系占主导地位, 广州市土地利用变化对碳代谢平衡的作用为先促进后破坏。

关键词: 碳代谢; 碳流; 土地利用变化; 生态网络分析; 广州市

中图分类号: F301.2; X321

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)03-0289-10

Impact of land use changes on carbon metabolism in Guangzhou

Liang Jiagsen, Mei Zhixiong, Li Sichen, Wang Xinyu

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

Abstract: [Objective] This study aims to reveal the impact of land use changes on carbon metabolism in Guangzhou and provide a reference for promoting the balance of its carbon metabolism system. [Methods] Vertical carbon metabolism in Guangzhou was calculated for the years 2000, 2005, 2010, 2015, and 2020. A geographically weighted regression (GWR) model was used to explore the driving factors of vertical carbon metabolism. Ecological network analysis (ENA) was applied to analyze horizontal carbon metabolism, and GIS spatial analysis was combined to investigate the impact of land use changes (2000—2020) on carbon metabolism in Guangzhou. [Results] (1) Carbon emissions in Guangzhou first increased and then decreased, with construction land having the greatest impact. Carbon adsorption by cultivated land and forest land tended to decrease, while adsorption by grassland, water bodies, and unused land remained relatively low and showed limited variation. Construction land area had a positive impact on vertical carbon metabolism, and the effects of elevation, GDP, mean annual precipitation, and nighttime light intensity exhibited significant spatial heterogeneity. (2) Total positive and negative carbon flows both increased initially, then decreased, and subsequently increased again. Positive carbon flows exhibited a dispersed distribution, while negative carbon flows were mainly concentrated in the central and western parts of the study area. (3) Ecological relationships among land types were mainly characterized by predation/constraint interactions and gradually shifted from concentrated to dispersed distribution, affecting the

收稿日期: 2025-07-10

修回日期: 2025-08-02

接受日期: 2025-08-14

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: 梁江森(2000—), 男, 广东惠州人, 硕士研究生, 研究方向为土地利用变化模拟与碳排放效应。E-mail: 2023022862@m.scnu.edu.cn

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

<https://stbeyj.publish.founderss.cn>

balance of the carbon metabolism system. (4) The symbiosis level of the carbon metabolism system first decreased, then increased, and finally decreased again. [Conclusion] The effects of various factors on vertical carbon metabolism exhibit pronounced spatial heterogeneity. Positive and negative carbon flows show distinct spatial distribution characteristics, and predation/constraint relationships dominate the ecological interactions. Land use changes in Guangzhou first promoted but later disrupted the carbon metabolism balance.

Keywords: carbon metabolism; carbon flow; land use change; ecological network analysis; Guangzhou

21世纪以来,世界面临着碳排放量日益严重的问题^[1]。土地在城市化的推进下,其利用结构和方式发生重大变化^[2]。城市约有 1/3 碳排放来源于其土地利用变化^[3]。土地利用变化对二氧化碳循环过程的影响仅次于化石能源,通过土地利用调整来促进低碳发展已成为焦点^[4]。研究表明,基于生态网络分析(Ecological Network Analysis, ENA),通过输入和输出两方面评估城市碳代谢,可以揭示土地利用变化对城市碳代谢的影响^[5]。因此,从土地利用变化视角,利用 ENA 方法研究土地和碳的关系,探索地类的扩张或收缩对水平碳代谢的作用机理,对于促进未来的碳代谢系统平衡具有重要意义。

碳代谢是指依靠自身的碳汇能力吸收二氧化碳的一个收支平衡过程^[6]。碳代谢分为垂直碳代谢和水平碳代谢,垂直碳代谢指土地与环境之间的碳流交换,水平碳代谢指不同地类之间的碳流交换。学者们在土地利用变化对碳循环的影响^[7]、不同尺度下的土地利用碳排放时空演变^[8]、模拟未来土地碳代谢格局^[9]等方面做了较多研究。这些研究主要集中在地类的垂直碳代谢,基于过去或预测的土地利用结构评估碳排放的驱动因素和时空变化,而忽视了地类之间的水平碳流动。ENA 是分析生态系统组成成分作用关系、从整体上辨识系统内在关系和整体属性的一种分析方法,已成为城市水平碳代谢研究应用最广泛的方法^[10]。目前水平碳代谢研究主要集中在地类之间的关系和碳流动、结合“三生空间”分析。例如,李晶等基于 ENA 方法研究了厦漳泉地区碳代谢系统以及不同地类之间的生态关系^[11];魏徽等将地类划分为“三生空间”,研究了“三生空间”的变化对武汉市碳代谢的影响^[12]。这些研究通过 ENA 探索各地类之间的碳流动和内在关系,分析土地利用变化与城市碳代谢之间的响应机制,为本文提供了有益借鉴。然而,现有成果缺乏结合地理加权回归(Geographically Weighted Regression, GWR)和 ENA 方法对碳代谢的综合研究,未能同时对两个方向的碳代谢进行深入研究。

广州市是粤港澳大湾区的核心城市,据《广州统计年鉴 2021》,2000 年以来其经济和城市化快速发

展,2020 年其城镇化率超过 86.36%,土地利用结构发生了剧烈变化,导致碳排放明显增加^[13],严重破坏了广州市的碳代谢平衡。目前有关广州市碳代谢的研究主要集中在垂直方向上,如 Cui 等评估了广州市垂直碳代谢的空间格局,通过模拟未来的情景,为碳减排政策的制定提供参考^[14];刘锋等分析了广州市 2000—2020 年土地利用变化引起的碳排放效应^[15]。这些研究未从水平方向进行研究,缺乏追踪地类之间的转换所引起的碳流动,未能揭示土地利用变化对城市碳代谢的影响。因此,在核算垂直碳代谢基础上,有必要对广州市进行水平碳代谢研究,探索地类间的碳流动和生态关系,揭示土地利用变化对碳代谢的影响机制,为促进广州市碳代谢系统的平衡和粤港澳大湾区其他城市的低碳发展规划提供参考。

为此,本文在参考前人研究的基础上,以广州市为研究区,基于多个年份的土地利用数据和统计数据,采用碳汇系数法、农作物生长周期估算法、碳排放系数法、GDP 推算法等测算广州市各年份的垂直碳代谢,利用地理加权回归(GWR)模型探究垂直碳代谢的驱动因素,再通过 ENA 研究地类之间的水平碳代谢,分析土地利用变化对碳代谢的影响,为“双碳”目标下广州市土地资源的合理布局和管理提供决策依据。

1 研究区及数据

1.1 研究区概况

广州市(22°26′—23°56′N, 112°57′—114°03′E)位于广东省南部,东连惠州市,西邻佛山市,北靠清远市,南接东莞市和中山市,与中国香港特别行政区、澳门特别行政区隔海相望。改革开放以来,其工业化快速发展,环境保护和城市开发的矛盾愈发严重,建设用地大量占用耕地、林地,对资源环境造成严重负面影响^[16],加之传统能源低效利用,导致碳排放量一直居高不下。为了推进绿色低碳发展,早日实现碳达峰碳中和目标,关键在于高碳排放区的碳减排。因此,对广州市进行垂直方向和水平方向的碳代谢研究具有重要意义。

1.2 数据来源及处理

本文所用数据包括土地利用数据、社会经济统计数据、行政区划数据和碳代谢驱动因素数据,详见表 1。从中国科学院资源环境科学数据中心(<https://www.resdc.cn/>)获取 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年 30 m 分辨率的土地利用数据,根据研究需要,将土地利用数据重归类为耕地、林地、草地、水域、城镇用地、农村居民点、其他建设用地(主要是工业用地和交通用地)、未利用地 8 种地类,并根据面积信息损失评价模型^[17]计算结果将其重采样为 60 m 分辨率。行政区划图来源于国家地理信息公共服务平台(<https://www.tianditu.gov.cn/>)。社会经济统计数据

来源于《广州统计年鉴》、广州市国民经济和社会发展统计公报,包括农业、能源、人口、工业、经济、交通等数据,主要用于计算垂直方向的碳代谢。参考相关研究^[18-19]并结合研究区实际及数据可获取性,选取年均降雨量、高程、夜间灯光亮度、GDP、建设用地面积等因子分析其对垂直方向碳代谢的影响。建设用地面积通过土地利用数据提取得到,其他因子数据来源于地球资源数据云(<http://www.gis5g.com/home>)和中国科学院资源环境科学数据中心。通过景观格局指数和移动窗口法^[17],计算得到研究区的特征尺度(网格尺度)为 600 m,基于该网格尺度提取 2020 年的上述驱动因子数据和 2020 年的净碳排放量。

表 1 数据说明

Table 1 Data description

数据类型	数据名称	年份	分辨率	数据来源			
基础数据	土地利用数据	2000,2005,2010,2015,2020	30 m	中国科学院资源环境科学数据中心 (https://www.resdc.cn/)			
	广州市行政区划图	2024	矢量	国家地理信息公共服务平台 (https://www.tianditu.gov.cn/)			
统计数据	农业	2000,2005,2010,2015,2020		《广州统计年鉴》、广州市国民经济和社会发展统计公报			
	能源						
	人口						
	工业						
	经济						
驱动因素	交通						
	年均降雨量				2020	1 km	地球资源数据云(http://www.gis5g.com/home)
	高程/DEM				2020	250 m	
	夜间灯光亮度				2020	500 m	中国科学院资源环境科学数据中心 (https://www.resdc.cn/)
	GDP				2020	1 km	
建设用地面积	2020		基于 2020 年土地利用数据提取				

2 研究方法

本文基于社会经济统计数据对广州市垂直碳代谢进行核算,运用 GWR 模型分析垂直碳代谢的影响因素,采用 ENA 研究水平碳代谢。基于垂直方向和水平方向的分析结果,评价土地利用变化对城市碳代谢的影响。

2.1 垂直方向碳代谢测算

2.1.1 碳吸收量测算 耕地的碳吸收量通过农作物生长周期估算法来核算,广州市主要农作物为稻谷、大豆、甘蔗、花生、木薯、蔬菜、瓜类,计算公式为^[20]:

$$C_{p,sink} = \sum_{i=1}^n C_i Y_i W_i / Q_i \quad (1)$$

式中: $C_{p,sink}$ 为耕地的碳吸收量(t); C_i, Y_i, W_i, Q_i 分别为第 i 种农作物的碳吸收率(%),产量(t),干比重(%),经

济系数。农作物的碳吸收率、干比重、经济系数等的取值借鉴胡安焱^[20]、韦增欣^[21]等的研究。

林地、草地、水域、未利用地的碳吸收通过碳汇系数法来核算,计算公式为^[22-23]:

$$C_{i,sink} = S_i \alpha_i \quad (2)$$

式中: $C_{i,sink}$ 为地类 i 的碳吸收量(t); S_i 为地类 i 的面积(hm^2); α_i 为地类 i 的碳吸收系数(t/hm^2),其取值参考胡安焱^[20]、刘国华^[22]、赵荣钦^[23]、方精云^[24]等的研究。

2.1.2 碳排放量测算 耕地的碳排放主要考虑农作物种植面积、机械总动力、农用柴油消耗量、化肥消耗量、农作物灌溉面积等农业活动因子,计算公式为^[25]:

$$C_{p,discharge} = \sum_{i=1}^n A_i B_i \quad (3)$$

式中: $C_{p,discharge}$ 为耕地的碳排放量(t); B_1, B_2, B_3, B_4, B_5

分别表示农作物种植面积(hm^2)、机械总动力(kW)、柴油消耗量(t)、化肥消耗量(t)、农作物灌溉面积(hm^2); A_i 为对应的碳排放系数,其取值参考杜金霜等^[25]的研究。

本文其他建设用地的碳排放主要包括工业用地和交通用地的碳排放,工业用地主要考虑煤炭、燃料油、汽油、柴油、焦炭、原油、煤油、热力、电力等能源和水泥生产的碳排放,交通用地主要考虑公路、铁路的年客货周转量和公交车、出租车、私人汽车拥有量,计算公式为^[20,26]:

$$C_{o,\text{discharge}} = C_{i,\text{discharge}} + C_{t,\text{discharge}} \quad (4)$$

$$C_{i,\text{discharge}} = \text{AD} \times \text{EF} + \sum_{i=1}^n C_i \times \text{EF}_i \quad (5)$$

$$C_{t,\text{discharge}} = \sum_{j=1}^n P_j \times R_j + \sum_{k=1}^n M_k \times N_k \times V_k \quad (6)$$

式中: $C_{o,\text{discharge}}$ 为其他建设用地的碳排放量(t); $C_{i,\text{discharge}}$ 和 $C_{t,\text{discharge}}$ 分别表示工业用地和交通用地的碳排放量(t); AD 为水泥生产量(t), EF 为水泥碳排放系数(kg/t); C_i 为第 i 类能源消耗量(t), EF_i 为第 i 类能源的碳排放系数(kg/t); P_j 为公路、铁路的年客货周转量($\text{万 t} \cdot \text{km}$); R_j 为公路、铁路的碳排放系数($\text{kg}/(\text{t} \cdot \text{km})$); M_k 为第 k 类交通工具的数量(辆); N_k 为第 k 类交通工具的碳排放系数($\text{kg}/100 \text{ km}$); V_k 为第 k 类交通工具的年行驶里程(10^4 km)。相关系数参考胡安焱^[20]、王诗逸^[26]等的研究及国家发展改革委发布的温室气体排放核算方法与报告指南。

城镇用地的碳排放主要考虑城镇人口呼吸、城镇居民生活用电、液化石油气、建筑业、批发零售业、住宿餐饮业等产生的碳排放,计算公式为^[26-27]:

$$C_{r,\text{discharge}} = \sum_{i=1}^n Q_1 \times D_i + Q_a \times C_{i,\text{discharge}} \quad (7)$$

式中: $C_{r,\text{discharge}}$ 为城镇用地的碳排放量(t); Q_1 为城镇常住人口数量(人); Q_2 为城镇居民生活用电量($10^4 \text{ kW} \cdot \text{h}$); Q_3 为液化石油气消耗量(t); D_i 为第 i 类因子的碳排放系数; Q_a 为建筑业、批发零售业和住宿餐饮业的产值占研究区GDP的百分比(%); $C_{i,\text{discharge}}$ 为工业用地的碳排放量(t)。相关系数参考王诗逸^[26]、匡耀求^[27]等的研究。

农村居民点的碳排放主要考虑农村人口呼吸、农村居民生活用电、牲畜呼吸等产生的碳排放,计算公式为^[20,27]:

$$C_{c,\text{discharge}} = L_a \times H_a + L_b \times H_b + \sum_{i=1}^n L_{ci} \times H_{ci} \quad (8)$$

式中: $C_{c,\text{discharge}}$ 为农村居民点的碳排放量(t); L_a 为农村常住人口数量(人); H_a 为农村常住人口呼吸碳排

放系数($\text{t}/\text{人}$); L_b 为农村居民生活用电量(10^4 kWh), H_b 为电力碳排放因子(kg/kWh); L_{ci} 为第 i 类牲畜的数量(头),牲畜种类包括猪、牛、羊、家禽; H_{ci} 为第 i 类牲畜的碳排放系数($\text{kg}/\text{头}$)。相关系数参考胡安焱^[20]、匡耀求^[27]等的研究及中华人民共和国生态环境部发布的《关于加强企业温室气体排放报告管理相关工作的通知》。

2.2 生态网络分析法

(1) 碳流分析。两种地类的碳代谢密度差和转换的面积产生了“碳流”,碳流可以衡量这种变化对碳代谢系统平衡的直接影响^[28],其计算公式为^[28]:

$$f_{ij} = (W_j - W_i) \times \Delta S \quad (9)$$

式中: f_{ij} 为地类 j 流向地类 i 的“碳流”; W_i 和 W_j 分别为地类 i 和 j 的碳代谢密度; ΔS 为地类 j 向地类 i 转换的面积。

(2) 碳通量分析。假设 T_k 为地类 k 的碳通量,平衡变量 x_k 为流入地类 k 的总碳流量减去流出的总碳流量。若 $x_k < 0$,则 T_k 等于所有流入地类 k 的碳流量减去 x_k ;若 $x_k > 0$,则 T_k 等于所有流出地类 k 的碳流量加上 x_k ^[28]。碳通量计算公式为^[28]:

$$T_k = \sum_{j=1}^n f_{kj} - x_k \quad (10)$$

$$T_k = \sum_{i=1}^n f_{ik} + x_k \quad (11)$$

式中: T_k 为地类 k 的碳通量; f_{kj} 为地类 j 流向地类 k 的“碳流”; f_{ik} 为地类 k 流向地类 i 的“碳流”; x_k 为地类 k 的平衡变量。

(3) 效应分析。通过水平方向的碳流和碳通量可以求得地类之间的直接效用矩阵 D ,进而求出综合效应矩阵 U ^[28]。通过矩阵 U 的元素的正负符号来表示两个地类之间的生态关系,这里的生态关系指两种地类由于碳代谢系统的水平碳流的流动,导致其碳效应的增加或减少^[28]。常见的生态关系有4种:(-,-)竞争,(+,-)掠夺,(-,+)限制,(+,+)互惠共生,由于掠夺和限制的性质类似,因此把掠夺和限制归为一类。其计算公式为^[28]:

$$D_{ij} = (f_{ij} - f_{ji}) / T_i \quad (12)$$

$$U = (u_{ij}) = D^0 + D^1 + D^2 + \dots + D^m = (I - D)^{-1} \quad (13)$$

式中: U 为综合效应矩阵; I 为单位矩阵; m 为地类数量; D 为直接效应矩阵。

互惠指数可以反映土地利用变化对整个碳代谢系统的影响^[28],其公式为^[28]:

$$M = N_+ / N_- \quad (14)$$

式中: N_+ 和 N_- 分别表示综合效应矩阵 U 中正、负元

素的个数。若 $M > 0$, 说明土地利用变化对碳代谢系统是有利的; 当 $M < 0$ 时, 土地利用变化对碳代谢系统的影响是消极的。

2.3 地理加权回归模型

由于地理加权回归(GWR)模型能够揭示不同位置之间影响因素的空间异质性^[29], 本文选用GWR研究垂直方向上的碳代谢与影响因素之间的空间关系, 其公式如下^[29]:

$$y_i = \beta_0(\mu_i, \vartheta_i) + \sum_{k=1}^n \beta_k(\mu_i, \vartheta_i) x_{ik} + \varepsilon_i \quad (15)$$

式中: y_i 为单元 i 的净碳排放量; $\beta_0(\mu_i, \vartheta_i)$ 为单元 i 的常数项; x_{ik} 为单元 i 第 k 个影响因素; $\beta_k(\mu_i, \vartheta_i)$ 为因素 k 在单元 i 的回归系数, (μ_i, ϑ_i) 为单元 i 的二维平面坐标; ε_i 为独立同分布的随机误差项。

以自适应核函数为基础, 采用 bi-square 函数确定空间权重, 使用 AICc 方法计算 GWR 模型的最优带宽, 当 AICc 最小时, 即为最优带宽^[29]。通过 R^2 和校正 R^2 判断净碳排放量与驱动因素的拟合效果, 当 R^2 和校正 R^2 越趋近 1, 说明拟合效果越好。

3 结果与分析

3.1 广州市 2000—2020 年垂直碳代谢变化

从表 2 可以看出, 广州市的碳排放从 2000 年的 5 043.77 万 t 增加到 2010 年的 10 446.62 万 t, 增长 107.11%。这与城镇用地和其他建设用地的扩张密切相关, 且它们的碳排放占总碳排放的 93% 以上。2010—2020 年碳排放的变化率在 $\pm 4\%$ 以内波动, 说明 2010 年后, 广州市碳排放管控效果明显。碳汇方面, 由于林地和耕地采用的计算方法不同, 导致耕地的碳汇大于林地的碳汇, 林地的碳吸收从 2000 年的 20.73 万 t 减少到 2020 年的 19.84 万 t, 减少 4.29%。由于耕地上农作物的产量从 2000—2020 年呈减少趋势, 耕地的碳吸收从 2000 年的 90.89 万 t 减少到 2020 年的 55.24 万 t, 减少 39.22%。草地、水域的碳吸收之和约占总碳汇的 3%。垂直碳代谢研究结果表明, 2000—2020 年广州市的碳排放远超碳吸收, 碳收支不平衡, 因此限制城镇用地和其他建设用地的碳排放是碳代谢平衡的关键。

表 2 碳排放/碳汇数据

Table 2 Carbon emission/sink data

万 t

地类	2000年		2005年		2010年		2015年		2020年	
	碳排放	碳吸收	碳排放	碳吸收	碳排放	碳吸收	碳排放	碳吸收	碳排放	碳吸收
P	16.39	90.89	15.43	75.72	16.15	65.60	16.15	74.21	13.16	55.24
F	0	20.73	0	20.36	0	20.12	0	19.98	0	19.84
G	0	0.02	0	0.02	0	0.02	0	0.02	0	0.02
W	0	2.41	0	2.28	0	2.55	0	2.45	0	2.52
C	1715.38	0	2296.93	0	3348.97	0	3308.66	0	3544.82	0
R	341.06	0	353.09	0	481.15	0	540.58	0	607.28	0
B	2970.94	0	4801.57	0	6600.35	0	6725.34	0	6010.09	0
U	0	0.0002	0	0.0002	0	0.0001	0	0.0001	0	0.0001
合计	5043.77	114.05	7467.02	98.39	10446.62	88.29	10590.73	96.66	10175.35	77.62

注: P 代表耕地, F 代表林地, G 代表草地, W 代表水域, C 代表城镇用地, R 代表农村居民点, B 代表其他建设用地, U 代表未利用地, 下同。

3.2 广州市 2020 年垂直碳代谢驱动因素分析

从表 3 可看出, 利用高程、GDP、年均降雨量、夜间灯光亮度、建设用地面积等因子构建的 GWR 模型拟合效果较好, 其中: 最优带宽为 51, AICc 为 -20901.960, 校正 R^2 为 0.983, 说明可以利用这些影响因素对垂直碳代谢进行回归分析。由回归系数的平均值可知, 建设用地面积、夜间灯光亮度、GDP、高程对垂直碳代谢都具有正向影响, 而年均降雨量具有负向影响。

由图 1 可知, 建设用地面积因子在大部分区域呈正向影响, 说明其对垂直碳代谢影响占主导地位。高程、GDP 的回归系数基本上呈正负对半分布, 年均降雨量在大多数区域呈负向影响, 夜间灯光亮度对北部和南部之外的区域基本呈正向影响。从回归系数的

值及其分布来看, 所有驱动因素的回归系数均有正有负, 说明各个驱动因素对垂直碳代谢的影响在空间上具有异质性。总体上, 建设用地面积、夜间灯光亮度、GDP 这 3 个因素对垂直碳代谢的影响是最大的, 其次是高程和年均降雨量。垂直碳代谢驱动因素分析表明局部区域的净碳排放量与社会经济因素的关系比较紧密, 而与自然因素的关系则相反。

3.3 广州市 2000—2020 年水平碳代谢

2000—2020 年部分碳流量的交换见表 4。2000—2005 年、2005—2010 年、2010—2015 年、2015—2020 年的负碳流总量分别为 -3 419.34 万 t, -5 002.69 万 t, -1 539.6 万 t, -2 849.7 万 t。负碳流主要是由耕地和林地向其他建设用地转换所产生的, 分别占各时

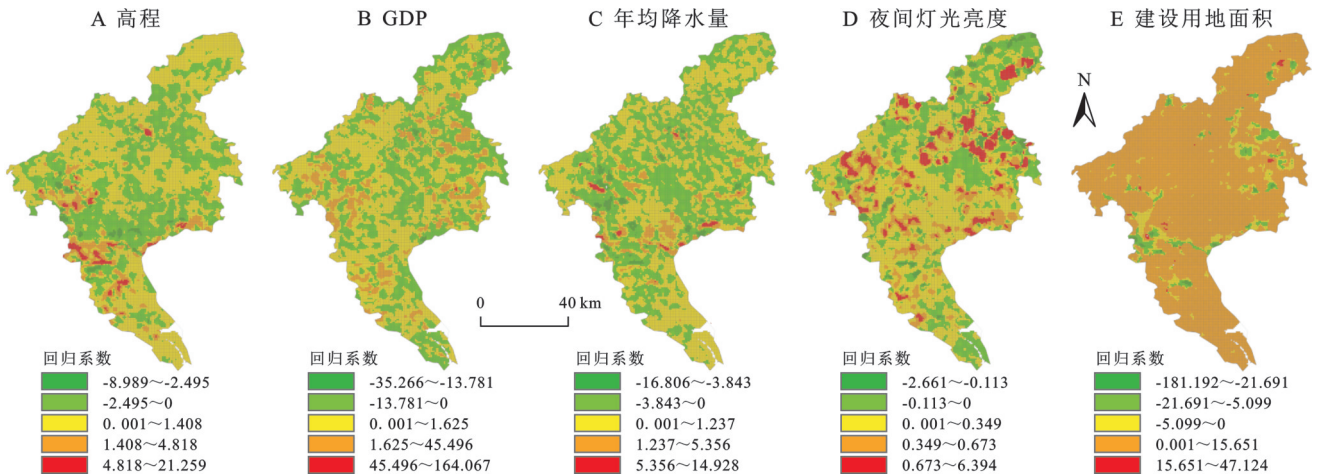
段负碳流总量的 60.67%, 57.50%, 82.95%, 61.82%, 说明其他建设用地的碳排放是影响广州市碳代谢平衡的重要因素。2000—2005 年正碳流只有负碳流的 10% 左右, 且 90% 以上的正碳流是由其他建设用地向耕地、城镇用地、农村居民点转换所贡献。2005—2010 年正碳流增加且主要是由其他建设用地向城镇用地和水域转换产生的, 占正碳流总量的 54.51%。2010—2015 年正、负碳流都明显减少, 其中负碳流和正碳流分别为上个时段的 30.78% 和 7.01%。2015—2020 年正碳流和负碳流均比上个时段多, 正碳流是

上个时段的 13.58 倍, 负碳流是上个时段的 1.85 倍, 净碳流量为 4 个时段中最小。

表 3 地理加权回归结果

Table 3 Geographically weighted regression results

驱动因素	平均值	标准差	最小值	中位数	最大值
高程	0.185	1.352	-8.9890	0.001	21.259
GDP	0.257	2.880	-35.266	0.035	164.067
年均降雨量	-0.074	1.425	-16.806	0.000	14.928
夜间灯光亮度	0.210	0.502	-2.6610	0.050	6.394
建设用地面积	0.432	4.364	-181.192	0.940	47.124



注: 本图基于国家地理信息公共服务平台下载的审图号为 GS(2024)0650 号的标准地图制作, 底图未作修改, 下同。

图 1 影响因素的回归系数空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of regression coefficients of driving factors

2000—2020 年的碳流空间分布见图 2。2000—2005 年广州市的负碳流分布比较密集, 主要集中在番禺区、花都区、黄埔区, 正碳流较少且稀疏分布, 这是由于这些区域的高速发展推动了工业与交通设施激增。2005—2010 年负碳流的强度稍微减弱, 但其分布范围更加广泛, 离散分布在中部、西部和南部, 正碳流主要集中在番禺区和南沙区, 该时期城市扩张仍然迅速, 但发展的重心逐渐向南北转移。2010—2015 年正、负碳流明显减少, 且其分布比较稀疏, 说明该时期发生的地类转换面积较少。2015—2020 年正、负碳流明显比上个时段多, 其主要分布在中部、西部和南部, 正碳流的分布是 4 个时期中最广的, 在生态保护、耕地保护政策指导下, 大量建设用地恢复为耕地、林地。

总体上, 其他建设用地对正、负碳流的影响占据主导地位。2000—2010 年建设用地快速扩张, 城市周边产生大量的正、负碳流。2010—2020 年由于建设用地扩张速度放缓和耕地保护政策的加强, 导致负碳流明显减少。正、负碳流的空间分布与广州市 2000 年提出的“南拓、北优、东进、西联”空间战略相呼应, 从广州市中心区域逐渐向四周扩散。

表 4 2000—2020 年广州市部分碳流量交换表

Table 4 Partial carbon flow exchange in Guangzhou (2000—2020) 万 t

碳流	2000—2005 年	2005—2010 年	2010—2015 年	2015—2020 年
正碳流	345.30	2342.25	164.23	2230.26
负碳流	-3419.34	-5002.69	-1539.60	-2849.70
净碳流	-3074.04	-2660.44	-1375.37	-619.44
P→C	-609.95	-358.66	-53.50	-175.02
P→B	-1460.23	-2043.13	-789.28	-1343.72
F→C	-108.98	-91.01	-6.47	-86.13
F→B	-614.20	-833.27	-487.77	-418.08
W→B	-209.00	-322.78	-98.10	-234.82
C→B	0	-254.73	-20.03	-359.40
R→C	-120.80	-233.24	-0.07	-3.79
R→B	-98.91	-694.76	-10.77	-68.11
B→P	21.67	464.05	42.52	688.01
B→F	9.17	338.19	33.54	451.65
B→W	2.80	592.94	61.74	205.62
B→C	277.47	683.72	6.12	76.92
B→R	23.89	80.28	1.43	263.93

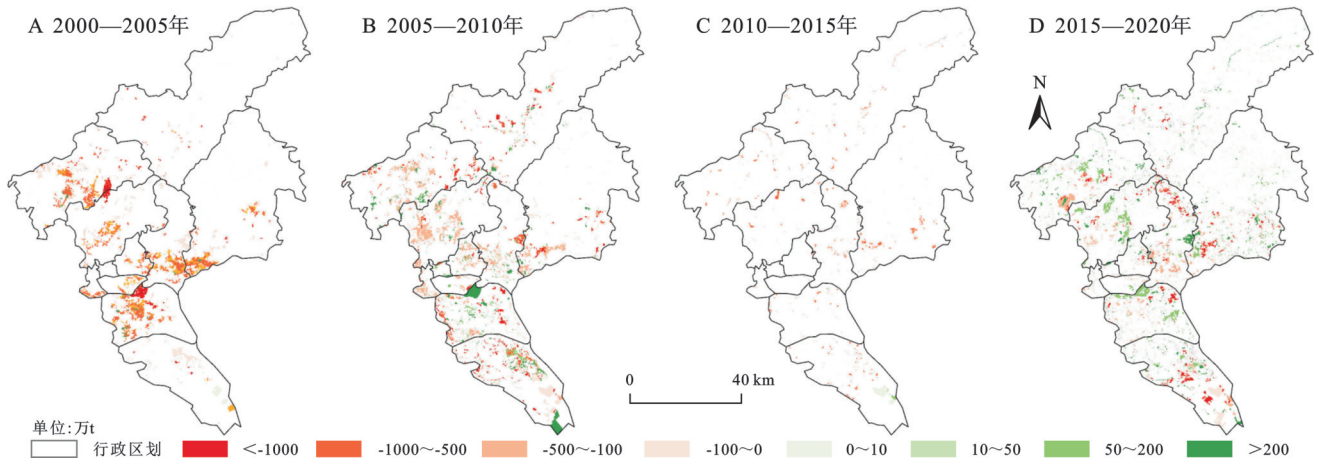


图 2 碳流空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of carbon flows

3.4 广州市 2000—2020 年地类间生态关系分析

2000—2020 年广州市地类间生态关系的数量见表 5。4 个时期中,只有 2000—2005 年的互惠共生关系数量大于竞争关系,2000—2005 年、2005—2010 年、2015—2020 年这 3 个时期的生态关系以掠夺/限制关系为主,2010—2015 年竞争关系占主导地位。2000—2020 年的生态关系空间分布和不同地类之间的生态关系见图 3 和表 6。2000—2005 年掠夺/限制关系主要集中在番禺区、花都区、白云区、黄埔区,是因为这些区域的耕地、林地被大量占用;竞争关系主要分布在南沙区、花都区,主要是由这些地区的耕地、林地、草地、水域之间的转换及农村居民点和其他建设用地之间的转换所引起。2005—2010 年对比上个时段,竞争、掠夺/限制关系在空间上的分布较稀疏,少量的互惠共生关系分布在花都区,大量的农村居民点向城镇用地转换,大量的耕地被其他建设用地占用,导致竞争关系分布增加。2010—2015 年竞争、掠夺/限制关系在空间上的分布较少,掠夺/限制和互惠共生关系零星地分布在整个广州市内,

竞争关系集中分布在南沙区的南部。2015—2020 年由于其他建设用地和其他地类之间的互相转换,导致掠夺/限制关系的空间分布较上个时段增多;互惠共生关系相对加强,竞争关系分布比较分散。

总体上,地类间的生态关系基本以掠夺/限制关系为主。掠夺/限制关系主要存在于城镇用地、农村居民点、其他建设用地等高碳排放地类,互惠共生、竞争关系同时存在于高碳排放地类和具有碳汇功能的地类;生态关系的空间分布,由集中分布逐渐转为离散分布,这是由于早期发展较快的区域比较集中,随着时间的推移其他区域也逐渐发展起来。

表 5 各时期地类间生态关系数量
Table 5 Quantities of ecological relationships among various land types in different periods

时期	竞争	掠夺/限制	互惠共生
2000—2005	12	30	14
2005—2010	20	32	4
2010—2015	24	14	18
2015—2020	24	26	6

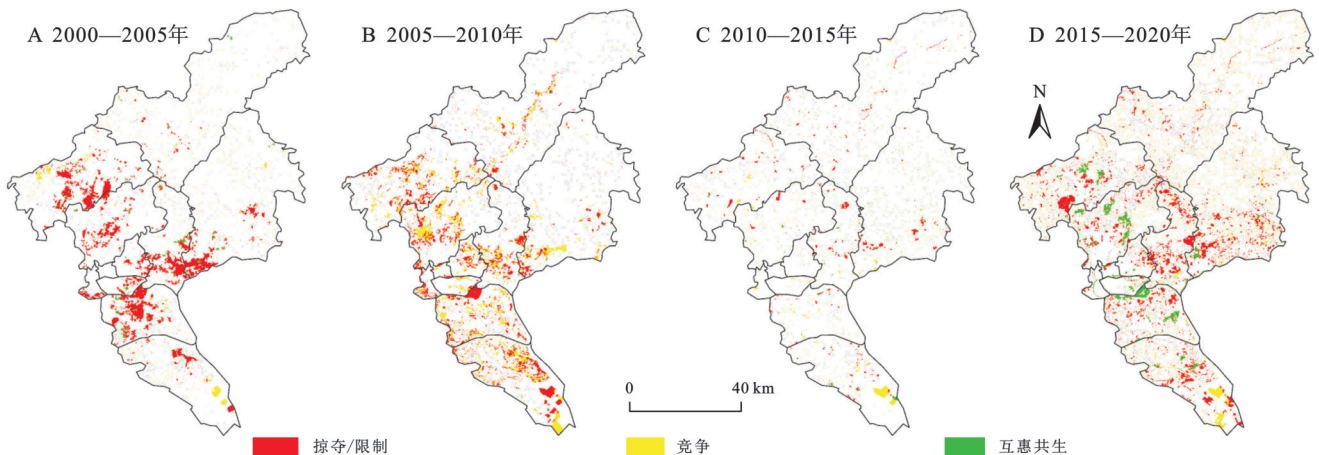


图 3 生态关系空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of ecological relationships

表 6 各时期不同地类的生态关系
Table 6 Ecological relationships among different land types in different periods

2000—2005年	P	F	G	W	C	R	B	U	2005—2010年	P	F	G	W	C	R	B	U
P		-	-	-	+	-	+	-	P		-	-	+	-	-	+	+
F	-		+	+	+	+	-	+	F	+		-	+	-	-	-	+
G	-	+		+	+	-	-	+	G	+	-		+	-	-	-	+
W	-	+	+		+	-	-	+	W	-	-	-		-	-	-	+
C	-	-	-	-		-	+	-	C	+	-	-	+		-	-	-
R	+	+	-	+	+		-	+	R	-	-	-	-	-		-	-
B	-	+	+	+	+	-		+	B	-	+	+	-	+	+		+
U	+	-	-	-	-	+	+		U	-	-	+	-	+	+	+	

2010—2015年	P	F	G	W	C	R	B	U	2015—2020年	P	F	G	W	C	R	B	U
P		+	+	-	-	-	-	-	P		-	-	-	-	-	+	-
F	+		-	-	+	+	+	+	F	-		-	-	-	-	+	-
G	+	-		+	+	+	+	+	G	-	-		-	-	-	-	-
W	-	-	-		-	-	+	-	W	-	-	-		+	+	+	-
C	-	+	+	-		-	-	-	C	+	+	-	+		+	+	+
R	-	+	+	-	-		-	-	R	+	+	-	+	+		+	+
B	+	-	-	+	+	+		+	B	-	-	+	-	-	-		-
U	-	+	+	-	-	-	-	-	U	-	-	-	-	-	-	+	

注：“+/-”代表综合效应矩阵U中元素的正负；红色代表掠夺/限制关系；黄色代表竞争关系；绿色代表互惠共生关系。

3.5 广州市 2000—2020 年互惠指数分析

2000—2005年、2005—2010年、2010—2015年、2015—2020年的互惠指数 M 计算结果分别为1.13, 0.64, 0.94, 0.68, 说明研究期内广州市的碳代谢系统共生水平呈先下降后上升再下降态势。2000—2005年 M 值大于1, 表示该时段的土地利用变化对碳代谢系统的影响是积极的, 但从水平碳流的角度看(表4), 该时段是4个时段中净碳流最大的, 这说明水平碳流的局限性, 它仅能说明地类的转换导致碳排放或碳吸收的变化, 无法从系统角度出发, 分析土地利用变化对系统整体的综合作用。2005—2020年 M 值先增加再减少, 但3个时段 M 值都小于1, 说明这段时间土地利用变化对碳代谢系统的影响是消极的。2000—2020年互惠指数的平均值为0.85, 说明研究期内广州市土地利用变化对碳代谢系统的影响是消极的, 和净碳流的结果一致。

需说明的是, 互惠指数的计算需用到综合效应矩阵中、正负元素的个数, 其考虑的是地类间生态关系的结果和地类本身的自反馈作用, 而净碳流仅反映了地类间的变化所造成的直接影响, 其结果可能与互惠指数不一致, 这与李晶^[11]、Xiang^[28]等的研究结果相似。因此, 为客观评价城市碳代谢平衡, 需同时考虑水平方向净碳流、互惠指数和互惠指数的平均值。

4 讨论与结论

(1) 研究期内, 广州市碳排放量呈先增后减趋势, 2000—2010年碳排放量急剧增加, 主要因为城镇用地和其他建设用地大幅增加; 2010—2020年碳排放量小幅减少。碳汇方面, 2000—2020年林地、耕地碳吸收量分别减少4.29%, 39.22%, 草地、水域和未利用地碳吸收量总体不大且变化不明显。所选驱动因素对垂直碳代谢的影响在空间上具有异质性, 建设用地面积在大部分区域呈正向影响, 高程、GDP的回归系数基本呈正负对半分布, 年均降雨量在大多区域呈负向影响, 夜间灯光亮度对北部和南部之外的区域基本呈正向影响。

(2) 研究期内, 广州市净碳流量呈逐步减少趋势, 其他建设用地是影响正、负碳流的关键因素。负碳流总量呈先增后减再增趋势, 负碳流主要是由耕地和林地向其他建设用地转换所产生; 正碳流总量呈先增后减再增趋势, 正碳流主要是由其他建设用地向其他地类转换所产生。广州市碳流空间上呈先扩张后收缩再扩张趋势, 总体上, 正碳流离散分布在整个研究区, 负碳流主要集中在研究区的中部和西部。

(3) 2010—2015年地类间的生态关系以竞争关系为主, 而其余3个时段以掠夺/限制关系为主。2000—2005年互惠共生关系占比大于竞争关系, 而

2005—2020年的3个时段竞争关系占比大于互惠共生关系,说明2005—2020年广州市地类间的生态关系比例失衡而影响其碳代谢系统平衡。广州市生态关系在空间上呈先扩张后收缩再扩张趋势,其中掠夺/限制关系和竞争关系变化比较明显,由集中分布逐渐转为离散分布,而互惠共生关系在2015—2020年的分布面积比前3个时段多。

(4) 2000—2005年、2005—2010年、2010—2015年、2015—2020年的互惠指数值分别为1.13, 0.64, 0.94, 0.68,说明2000—2020年广州市碳代谢系统共生水平呈先降后升再降趋势。2000—2005年土地利用变化对碳代谢的影响是积极的;而2005—2020年的3个时段土地利用变化对碳代谢的影响均是消极的。

基于上述结论,本文的政策启示表现在:(1)降低高碳排放区碳代谢密度,促进区域低碳发展。促进城市低碳化,以城市结构为基础,引导城市节约集约用地,增强碳减排能力。引导绿色交通高质量发展,促使交通能源动力系统低碳化发展,推进交通设施绿色化建设;(2)调整地类的扩张策略,优化土地利用配置。积极优化建设用地结构,优先保障新兴产业的发展空间,推进低效工业用地减量化,提升用地效率。鼓励土地混合利用和复合利用,提高土地资源的利用率。合理推进城中村改造,通过整合归宗、土地置换等方法促进区域开发,使低效用地再利用;(3)严格遵守生态保护红线,保护生态碳汇能力。加强森林抚育经营和低效林改造,提升森林碳代谢密度、加强湿地保护,增强海岸带湿地储碳能力、积极发展绿色低碳农业,提升农田碳吸收能力。

本文研究结果可为促进区域碳代谢平衡、“双碳”目标下土地资源的合理利用和布局提供参考。但仍存在一些不足:首先,考虑到林地具体的碳汇能力难以估算,为简化计算而采用固定的碳吸收系数;其次,限于部分数据难以获取和量化,计算碳吸收时未考虑各地类的土壤固碳能力,电力碳排放系数统一采用2020年生态环境部发布的《关于加强企业温室气体排放报告管理相关工作的通知》中的取值,然而这个系数可能会随着时间而变化。这些可能对研究结果造成一定影响,后续将对这些方面进一步研究,以取得更符合实际的研究结论。

参考文献(References):

- [1] Hutyrá L R, Yoon B, Hepinstall-Cymerman J, et al. Carbon consequences of land cover change and expansion of urban lands: a case study in the Seattle metropolitan region [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 103(1):83-93.
- [2] 郑永超,文琦.宁夏自治区土地利用变化及碳排放效应[J].水土保持研究,2020,27(1):207-212.
- [3] Zheng Y C, Wen Q. Change of land use and the carbon emission effect of Ningxia Autonomous Region [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(1): 207-212.
- [4] Zhao C, Liu Y, Yan Z. 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.
- [5] Gu W, Qi W, Zhang M. The forecast and low-carbon performance of land use in rapid urbanization area under the low-carbon oriented spatial planning: evidence from Hangzhou, China [J]. *Transactions in GIS*, 2024, 28(6): 1617-1638.
- [6] Xia L, Zhang Y, Yu X, et al. An integrated analysis of input and output flows in an urban carbon metabolism using a spatially explicit network model [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 239:118063.
- [7] 卢宗亮,吴奕龙,黄坛俊,等.基于LEAP-LANDIS情景模拟的城市碳代谢格局优化研究[J].干旱区资源与环境,2023,37(12):10-20.
- [8] Lu Z L, Wu Y L, Huang T J, et al. Optimizing urban carbon metabolism pattern based on LEAP-LANDIS scenario simulation [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2023, 37(12):10-20.
- [9] Xi F M, Liang W J, Niu M F, et al. Carbon emissions and low-carbon regulation countermeasures of land use change in the city and town concentrated area of central Liaoning Province, China [J]. *The Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(2):577-584.
- [10] 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.
- [11] Wu J S, Jin X R, Wang H, et al. Analysis of carbon emissions and influencing factors in China based on city scale [J]. *Environmental Science*, 2023, 44(5):2974-2982.
- [12] 李俊,杨德宏,吴锋振,等.基于PLUS与InVEST模型的昆明市土地利用变化动态模拟与碳储量评估[J].水土保持通报,2023,43(1):378-387.
- [13] Li J, Yang D H, Wu F Z, et al. Dynamic simulation of land use changes and assessment of carbon storage in Kunming City based on PLUS and InVEST models [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023, 43(1): 378-387.
- [14] Xia C, Chen B. Urban land-carbon nexus based on ecological network analysis [J]. *Applied Energy*, 2020, 276:115465.
- [15] 李晶,陈松林,李晨欣,等.基于生态网络分析的厦漳泉地区土地碳代谢[J].应用生态学报,2023,34(5): 1375-1383.
- [16] Li J, Chen S L, Li C X, et al. Land carbon metabolism in Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou region based on ecological network analysis [J]. *Chinese Journal of Applied*

- Ecology, 2023, 34(5):1375-1383.
- [12] 魏薇, 叶长盛, 蔡鑫, 等. 基于生态网络分析模型的武汉市“三生空间”碳代谢特征[J]. 地球科学与环境学报, 2024, 46(4):528-543.
Wei W, Ye C S, Cai X, et al. Characteristics of Carbon Metabolism of Production-living-ecological Space in Wuhan City of Hubei Province, China Based on Ecological Network Analysis Model[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2024, 46(4):528-543.
- [13] Hu X, Li Z, Cai Y, 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.
- [14] Cui X, Li S, Gao F. Examining spatial carbon metabolism: Features, future simulation, and land-based mitigation[J]. Ecological Modelling, 2020, 438:109325.
- [15] 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 F, Yang M Z, Zhao G W, et al. Analysis of carbon emission effects in guangzhou city based on land use changes: a case study in the last 20a [J]. Agriculture and Technology, 2022, 42(4):73-79.
- [16] 金贵, 邓祥征, 赵晓东, 等. 2005—2014年长江经济带城市土地利用效率时空格局特征[J]. 地理学报, 2018, 73(7):1242-1252.
Jin G, Deng X Z, Zhao X D, et al. Spatio-temporal patterns of urban land use efficiency in the Yangtze River Economic Zone during 2005—2014 [J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(7):1242-1252.
- [17] 王博, 舒晓波, 廖富强, 等. 基于最佳景观尺度的鄱阳湖区土地利用冲突时空演变及多情景模拟[J]. 水土保持研究, 2024, 31(4):336-347.
Wang B, Shu X B, Liao F Q, et al. Spatitemporal of land use conflicts and multi-scenario simulation in Poyang Lake Area based on optimal landscape Scale[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(4):336-347.
- [18] 卢奕帆, 梁颖然, 卢思言, 等. 结合“珞珈一号”夜间灯光与城市功能分区的广州市碳排放空间分布模拟及其影响因素分析[J]. 地球信息科学学报, 2022, 24(6):1176-1188.
Lu Y F, Liang Y R, Lu S Y, et al. Spatialization of carbon emissions in Guangzhou City by combining Luojia1-01 nighttime light and urban functional zoning data[J]. Journal of Geo-Information Science, 2022, 24(6):1176-1188.
- [19] 马慧, 党玲, 刘阳, 等. 太原市绿地碳汇影响因素及其碳汇价值探究[J]. 环境生态学, 2024, 6(12):25-30.
Ma H, Dang L, Liu Y, et al. Study on influencing factors and carbon sink value of green space in Taiyuan[J]. Environmental Ecology, 2024, 6(12):25-30.
- [20] 胡安焱, 王思博, 贺屹, 等. 基于生态网络效用的榆林市碳代谢空间分析[J]. 生态学杂志, 2024, 43(12):3754-3762.
Hu A Y, Wang S B, He Y, et al. Spatial analysis of carbon metabolism in Yulin based on ecological network utility[J]. Chinese Journal of Ecology, 2024, 43(12):3754-3762.
- [21] 韦增欣, 余家佳, 穆琳, 等. 广西甘蔗碳汇测算方法研究及时空格局分析[J]. 广西大学学报: 自然科学版, 2024, 49(2):429-438.
Wei Z X, Yu J J, Mu L, et al. Study on estimation and spatial temporal pattern of sugarcane carbon sink in Guangxi Zhuang Autonomous Region [J]. Journal of Guangxi University: Natural Science Edition, 2024, 49(2):429-438.
- [22] 刘国华, 傅伯杰, 方精云. 中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献[J]. 生态学报, 2000, 20(5):733-740.
Liu G H, Fu B J, Fang J Y. Carbon dynamics of Chinese forests and its contribution to global carbon balance [J]. Acta Ecologica Sinica, 2000, 20(5):733-740.
- [23] 赵荣钦, 黄贤金, 钟大洋, 等. 区域土地利用结构的碳效应评估及低碳优化[J]. 农业工程学报, 2013, 29(17):220-229.
Zhao R Q, Huang X J, Zhong T Y, et al. Carbon effect evaluation and low-carbon optimization of regional land use[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(17):220-229.
- [24] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 1981—2000年中国陆地植被碳汇的估算[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2007, 37(6):804-812.
Fang J Y, Guo Z D, Pu S L, et al. Estimation of carbon sinks in terrestrial vegetation in China, 1981—2000 [J]. Scientia Sinica(Terrae), 2007, 37(6):804-812.
- [25] 杜金霜, 付晶莹, 郝蒙蒙. 基于生态网络效用的昭通市“三生空间”碳代谢分析[J]. 自然资源学报, 2021, 36(5):1208-1223.
Du J S, Fu J Y, Hao M M. Analyzing the carbon metabolism of “Production-LivingEcological” space based on ecological network utility in Zhaotong[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(5):1208-1223.
- [26] 王诗逸. 土地利用变化与碳代谢的驱动和响应关系研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2023.
Wang S Y. Study on the driving and responding relationship between land use change and carbon metabolism [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2023.
- [27] 匡耀求, 欧阳婷萍, 邹毅, 等. 广东省碳源碳汇现状评估及增加碳汇潜力分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(12):56-61.
Kuang Y Q, Ouyang T P, Zou Y, et al. Present situation of carbon source and sink and potential for increase of carbon sink in Guangdong Province [J]. China Population, Resources and Environment, 2010, 20(12):56-61.