

基于土地利用的驻马店市碳源/汇时空分布及预测

冯国平, 田国行

(河南农业大学风景园林与艺术学院, 郑州 450002)

摘要: 土地覆盖变化是引起陆地生态系统碳源/汇变化的重要原因, 研究土地利用转型与碳源/汇关系对优化区域土地利用规划, 实现可持续发展与“双碳”目标具有重要意义。运用空间分析技术对碳源/汇的时空变化进行分析, 通过预设 3 种未来发展情景对驻马店市未来碳源/汇变化进行预测。结果表明: (1) 驻马店市净碳排放量由 2005 年的 268.13×10^4 t 增加到 2020 年的 578.04×10^4 t, 增加 309.91×10^4 t, 呈现逐年增加趋势。 (2) 驻马店市土地利用转型表现为碳储量减少的过程主要为耕地转为建设用地和林地转为耕地, 碳储量增加主要为耕地转为林地、建设用地转为水域。 (3) 通过灰色模型以及 PLUS 模型预测驻马店市未来土地利用及碳源/汇的时空变化, 预测结果为驻马店市未来净碳排放量持续上升, 但在耕地保护情景下上升趋势明显减缓。在保护耕地基础上, 驻马店市在未来土地规划中, 要控制建设用地向生态用地的扩张, 加快农业技术改革, 实现低碳循环发展。

关键词: 土地利用变化; 碳源; 碳汇; 时空特征; 多情景模拟; 驻马店市

中图分类号: F301.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)06-0219-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbxb.2023.06.028

Spatio-temporal Distribution and Prediction of Carbon Source and Sink Based on Land Use in Zhumadian City

FENG Guoping, TIAN Guohang

(School of Landscape Architecture and Art, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002)

Abstract: Land cover change is a significant factor contributing to the variation in carbon sources and sinks in terrestrial ecosystem. Investigating the relationship between land use transition and carbon dynamics is crucial for optimizing regional land use planning and achieving sustainable development and the "dual carbon" goals. This study employed spatial analysis technology to analyze the temporal and spatial changes of carbon sources and sinks. By considering three future development scenarios, it predicted the future dynamics of carbon sources and sinks in Zhumadian City. The results showed that: (1) The net carbon emission of Zhumadian City had exhibited an increasing trend, rising from 268.13×10^4 t in 2005 to 578.04×10^4 t in 2020, with an increment of 309.91×10^4 t. (2) Land use transitions in Zhumadian City involved a reduction in carbon stocks primarily due to the conversion of cropland to construction land and forestland to cropland, while the increase in carbon stocks primarily stemmed from the conversion of cropland to forestland and construction land to water area. (3) Applying the grey model and PLUS model, future spatiotemporal changes in land use and carbon dynamics in Zhumadian City were projected. The results indicated a continuous rise in net carbon emissions, although the rate of increase significantly slowed down under the scenario of cultivated land protection. Based on the preservation of cultivated land, Zhumadian City should restrain the expansion of construction land into ecological areas, expedite agricultural technological reforms, and foster low-carbon circular development.

Keywords: land use change; carbon source; carbon sink; spatial-temporal dynamics; multi-scenario simulation; Zhumadian City

收稿日期: 2023-05-16

资助项目: 国家自然科学基金青年项目(51808198); 河南省城乡绿地资源与景观生态设计学科创新引智基地项目(GXJD006)

第一作者: 冯国平(1998—), 女, 河南安阳人, 硕士研究生, 主要从事城乡绿地资源调控与碳循环研究。E-mail: guopingck@163.com

通信作者: 田国行(1964—), 男, 河南封丘人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事城乡绿地资源调控与碳循环研究。E-mail: tgh@henau.edu.cn

陆地生态系统碳循环在全球气候调节和减缓温室效应进程中都起到重要作用^[1],而城市化发展对陆地生态系统功能造成严重影响,其碳源/汇效能的变化主要是由于土地利用转型导致的土地覆盖变化所引起的^[2-4]。随着城镇化快速发展,土地利用转型造成的碳排放量不断上升。目前,国内外已有多数学者^[5-7]从土地利用变化角度出发开展陆地生态系统碳源/汇研究。在此背景下,剖析土地利用转型与碳源/汇的关系,通过土地利用规划降低陆地生态系统碳排放量,实现土地资源可持续发展是当务之急。

针对土地利用空间扩展的预测已开展大量研究^[8],主要集中于 CA-MarKov 模型、元胞自动机(CA)、GoeSOS-FLUS 模型、PLUS 模型等。针对以上模型,有学者^[9]对各模型之间预测效果进行评估,得出 PLUS 模型的预测效果更优。已有众多学者^[4,10-12]运用多种模型模拟预测土地利用变化与碳储量的关系,但将 PLUS 模型应用于陆地生态系统碳源/汇定量评估的较少。目前,针对市域碳源/汇的整体定量评估和时空变化特征剖析及预测得较少,尤其是中原地区鲜见。因此,从土地利用角度分析驻马店市的碳排放量和碳吸收量变化与土地利用转型之间的响应,对驻马店市的土地利用未来扩张进行预测,以期能为驻马店市双碳目标的实现以及土地利用的合理配置提供基础数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

驻马店市位于河南省中南部(图 1),市辖 1 个区,9 个县,总面积为 15 083 km²。由于其地理境域

位于淮河以北的平原地带,气候属温带大陆季风性湿润气候,是我国重要的粮油生产地。辖区内有嵯岈山、铜山、金顶山、竹沟革命纪念馆、南海禅寺、宿鸭湖、薄山湖等风景区。截至 2020 年 11 月 1 日 0 时的人口普查,驻马店常住人口为 7 008 427 人。

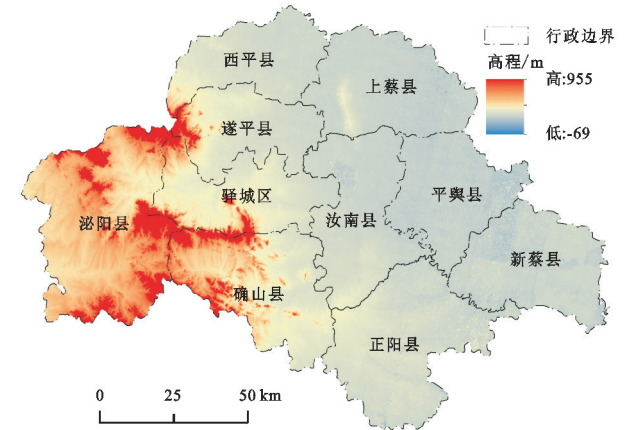


图 1 研究区地理位置概况

1.2 数据来源

驻马店市碳排放量计算的有关数据均来源于《驻马店统计年鉴》^[13-15]。土地利用数据来源于中国科学院地理科学与资源研究所(<https://www.resdc.cn/>);数字高程数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>);1 km×1 km 的 GDP 栅格数据来源于 Zhao 等^[16];100 m×100 m 的人口栅格数据来源于 WorldPop website([www.worldpop.org.](http://www.worldpop.org/));道路、铁路、河流等矢量数据来源于 Open Street Map 网站(<https://www.openstreetmap.org/>),资料具体情况见表 1。

表 1 数据信息

数据类型	数据名称	时间分辨率	空间分辨率/m	单位	数据来源
土地利用数据	土地利用数据	2005—2020 年	30		中国科学院地理科学与资源研究所(https://www.resdc.cn/)
	DEM			m	地理空间数据云平台(http://www.gscloud.cn)
自然因子	坡度			(°)	基于 DEM 提取
	坡向		30		
	距河流距离	2020		m	Open Street Map 网站(https://www.openstreetmap.org/) ArcGIS 欧氏距离分析
	人口密度	2020	100	人/km ²	WorldPop website(www.worldpop.org.)
	地均 GDP	2020	1000	元/km ²	Zhao et al.2017
社会经济因子	距一级道路距离				
	距二级道路距离				
	距三级道路距离	2020	30	m	Open Street Map 网站(https://www.openstreetmap.org/) ArcGIS 欧氏距离分析
	距铁路道路距离				
	距区县、乡镇距离				

1.3 研究方法

1.3.1 碳排放量计算 能源消费、工业生产、交通、人体呼吸、生活垃圾、农作物生产等均可以对碳排放

量产生显著影响。由于部分数据的缺乏,驻马店市的碳排放量的计算主要考虑能源消费、人口呼吸、农业生产过程以及工业生产带来的碳排放。其中能

源消费、人口呼吸以及工业生产带来的碳排放归为建设用地碳排放量,农作物生产过程产生的碳排放则为耕地碳排放量。具体计算方法、相关系数和指标意义见表 2 和表 3。

表 2 碳源核算公式

类别	公式	指标解释
能源消费	$C_E = \sum_{i=1}^n E_i \times Z_i \times C_i$	E_i 为能源 i 消耗量; Z_i 为第 i 种能源的标准煤折算系数; C_i 为能源 i 的碳排放系数 (t/t) (表 3)
建设用地	$C_I = \sum_{i=1}^n T_i \times \eta_i \times \frac{12}{44}$	T_i 为第 i 种工业产品生产的总量 (t); η_i 为第 i 种工业产品生产的含碳因子, 其中水泥、合成氨、钢铁的含碳因子值 ^[17] 分别为 0.136, 3.273, 1.060 t/10 ⁴ t
人口呼吸	$C_P = k_1 \times Q \times 365$	k_1 为人体碳排放系数, 值为 0.328 t/人; Q 为驻马店市总人口
水稻 CH ₄ 碳排放	$C_R = 6.82 \times KR$	K 为水稻 CH ₄ 排放系数, 值为 17.85 g/m ² ^[18] ; R 为稻田种植面积 (hm ²)
土壤硝化及呼吸	$C_B = 81.27 \times \sum_{i=1}^n H_i N_i + Rk_2 + Dk_3$	H_i 为农作物 i 的播种面积 (hm ²); N_i 为农作物 i 的土壤 N ₂ O 排放系数, 其中小麦、玉米、大豆、水稻、果蔬、其他农作物土壤 N ₂ O 排放系数分别为 2.05, 2.53, 0.77, 0.24, 0.95, 3.00 kg/hm ² ^[19-21] ; D 为旱地作物的播种面积 (hm ²); k_2 为水稻的土壤呼吸碳排放系数, 值为 10.23 t/hm ² ; k_3 为旱地作物土壤呼吸的碳排放系数 4.42 t/hm ²
耕地		F_e 为各肥料使用量 (t); S 为灌溉面积 (hm ²); F_r 为农药使用量 (t); F_c 为农用塑料薄膜的使用量 (t); S_m 为农作物的种植面积 (hm ²); W_m 为农业机械总动力 (kW); k_4 为氮肥、磷肥和钾肥的 CO ₂ 排放系数, 分别为 2.116, 0.636, 0.18 t/t; k_5 为灌溉 CO ₂ 排放系数, 值为 0.266 t/hm ² ; k_6 为农药 CO ₂ 排放系数, 值为 4.93 t/t; k_7 为农用塑料薄膜 CO ₂ 排放系数, 值为 5.18 t/t; a 和 β 为转换系数, 其值分别为 16.47 kg/hm ² 和 0.18 kg/kW
农资投入	$C_A = F_e \times k_4 + S \times k_5 + F_r \times k_6 + F_c \times k_7 + S_m \times a + W_m \times \beta$	

注:在能源消耗量中,天然气单位为 10⁴ m³,电力单位为 10⁴ kWh,热力的单位为 10⁶ kJ,其余单位为 t;标准煤折算系数中,天然气的单位是 t/10⁴ m³,电力的单位是 t/10⁴ kWh,热力的单位为 t/10⁶ kJ,其余的单位为 t/t。

表 3 能源转换标准煤和碳排放系数

能源	标准煤折算系数	碳排放系数	能源	标准煤折算系数	碳排放系数
原煤	0.7143	0.7559	燃料油	1.4286	0.6185
洗精煤	0.9000	0.7559	天然气	13.3000	0.4483
焦炭	0.9714	0.8550	液化石油气	1.7143	0.5042
原油	1.4286	0.5857	热力	0.0341	0.7330
汽油	1.4714	0.5538	电力	0.1229	0.7476
煤油	1.4714	0.5714	其他石油制品	1.4514	0.5857
柴油	1.4571	0.5921	其他燃料		0.7559

注:标准煤转换系数和碳排放系数均来自于《IPCC 国家温室气体排放清单指南(2006)》^[21]。

1.3.2 碳吸收量计算 驻马店市碳汇主要包括土壤、植被、水域和裸地。植被碳汇主要包括林地、草地等绿色植被光合作用固定的 CO₂ 量。耕地是绿地生态系统中最为活跃的碳库之一,农作物在其生长过程中也同样吸附大量的 CO₂^[17]。因此,耕地也是驻马店市的碳汇之一。林地、草地、水域、耕地和裸地采用已有研究^[22-25]估测的碳吸收系数 (t/hm²) 与各土地类型的面积之积来计算,分别为 3.800, 0.390, 0.402, 7.830, 0.005。

$$V_c = \sum S_i \times k_i \tag{1}$$

式中: V_c 为碳吸收总量 (t); S_i 为第 i 类土地利用类型的面积 (hm²); k_i 为第 i 类土地利用类型的固碳系数 (t/hm²)。

1.3.3 碳转型过程分析 定义碳转型过程密度 ($\Delta W_{d_{ij}}$, t/hm²) 为土地利用由 j 向 i 转移引起的固碳密度 (W_S , t/hm²) 或碳排放密度 (W_E , t/hm²)。若 $\Delta W_{d_{ij}} < 0$, 表明此土地利用转移使碳储量增加;

$\Delta W_{d_{ij}} > 0$, 则碳储量减少^[26]。因此,碳转型过程 (ΔW_{ij} , t) 可由土地利用转移面积和碳转型过程密度来计算,计算公式为:

$$\Delta W_{ij} = \Delta S_{ij} \times \Delta W_{d_{ij}} = \Delta S_{ij} \times \left(\frac{v_i}{S_i} - \frac{v_j}{S_j} \right) \tag{2}$$

式中: ΔS 为从 j 到 i 的土地利用转移面积 (hm²), 由 Arcgis 从土地利用转移矩阵中获取; $\Delta W_{d_{ij}}$ 为碳过渡过程密度 (t/hm²); v 为组分 i 和 j 中的碳排放或碳吸收值 (t)。

1.3.4 灰色 GM(1,1) 预测模型 采用灰色预测模型对驻马店市 2030 年的碳排放量进行预测,其一阶线性常系数微分方程标准型计算公式为:

$$\frac{dx^{(1)}(t)}{dt} + ax^{(1)}(t) = u \tag{3}$$

GM(1,1) 模型对应的标准型解为:

$$x^{(1)}(t+1) = \left[x^{(1)}(0) - \frac{u}{a} \right] e^{-at} + \frac{u}{a} \tag{4}$$

式中: a 为发展灰数; u 称为内生控制灰数; t 为时间。

1.3.5 PLUS 模型 PLUS 模型是在 FLUS 模型的基础上, 耦合土地扩张分析策略(LEAS)和多类型随机种子 CA 模型(CARS), 弥补现有 CA 模型在转换规则挖掘策略和土地利用动态变化模拟策略的不足, 同时, 加入未来规划政策对土地利用变化的影响和驱动作用^[27]。

以 2010 年作为基本年, 10 年为步长, 预测驻马店市 2030 年土地利用类型。从自然因素、经济因素等方面选取 11 个影响因子, 运用 PLUS 模型的 LEAS 模块获取各用地类型扩张与影响因子之间的关系, 得到各地类增长概率, 并通过 Markov Chain 计算得到驻马店市 2030 年各类用地需求, 之后基于 PLUS 模型的 CARS 模块, 在各用地类型增长概率约束下计算各用地类型总体概率, 结合土地数量预测结果、土地利用成本转移矩阵和邻域权重, 得到驻马店市 2030 年土地利用空间分布结果。

为探究不同发展目标下驻马店市土地利用变化情况, 根据已有研究^[28], 并考虑驻马店市历史土地利

用转型规律及规划政策, 设定土地利用成本矩阵(表 4)。设置自然发展、耕地保护和生态保护 3 种情景。其中自然发展情景是利用 PLUS 模型的 Markov Chain 模块, 预测驻马店市 2030 年自然发展情景下各土地利用类型需求; 耕地保护情景是在土地利用需求预测时, 将耕地向建设用地转移概率降低 40%, 林地、草地向建设用地转移概率降低 20%; 生态保护情景是将林地、草地和水域向建设用地转移概率降低 30%, 耕地向建设用地转移概率降低 20%^[29]。邻域权重参数代表不同土地利用类型的扩张强度, 基于前人^[30]经验, 依据驻马店市土地利用变化情况以及各预设情景的各土地利用类型面积(total area, TA)变化量确定(表 5)。计算公式为:

$$X_i = \frac{\Delta TA_i - \Delta TA_{\min}}{\Delta TA_{\max} - \Delta TA_{\min}} \quad (5)$$

式中: X_i 为某一地类 i 的邻域权重参数; TA_i 为该地类 TA 的变化量, $TA_{\max}$ 、 $TA_{\min}$ 分别为 TA 的最大、最小变化量。

表 4 各情景土地利用转换成本矩阵

2020—2030 年	自然发展情景						耕地保护情景						生态保护情景					
	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅	L ₆	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅	L ₆	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅	L ₆
L ₁	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
L ₂	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0
L ₃	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0
L ₄	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0
L ₅	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
L ₆	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

注: L₁、L₂、L₃、L₄、L₅、L₆ 分别代表耕地、林地、草地、水域、建设用地和裸地; 其中 0 表示不允许转化, 1 表示允许转化; 矩阵内行表示转出, 列表示转入。

表 5 驻马店市 3 种模拟情景下各地类邻域权重

模拟情景	耕地	林地	草地	水域	建设用地	裸地
自然发展情景	1.000	0.300	0.060	0.024	0.800	0
耕地保护情景	1.000	0.390	0.028	0.029	0.660	0
生态保护情景	1.000	0.320	0.023	0.020	0.730	0

2 结果与分析

2.1 碳源/汇计算结果

根据各类碳源/汇的计算公式, 结合驻马店市 2005 年、2010 年、2015 年、2020 年的土地利用数据, 得到驻马店市 2005 年、2010 年、2015 年、2020 年碳排放和碳吸收情况。

由表 6 可知, 驻马店市碳排放量在 15 年呈现逐年上升趋势, 碳排放量由 $1\,274.76 \times 10^4$ t 增加到 $1\,560.57 \times 10^4$ t, 增幅为 22.42%。驻马店市主要的碳源为耕地, 其碳排放量占比一直高于 53%。建设用地碳排放量由 2005 年的 34.28% 增加到 2020 年的 41.29%, 主要与驻马店市城市化发展有关。在建设用地碳源中的能源消费产生的碳排放量在 2005—

2015 年是逐年上升的, 其值由 2005 年的 162.95×10^4 t 涨至 376.97×10^4 t, 增幅达 100.88%, 但在 2020 年呈下降趋势, 与近年来国家和地方对能源调控的政策有关。

在驻马店碳汇用地中, 耕地是其主要碳汇, 碳吸收量占比高达 90%。耕地和林地驻马店市各碳汇中碳吸收作用最为明显, 草地、水域的固碳能力较弱, 与驻马店市土地利用有很大的关系, 耕地占总面积比例超 80%, 但驻马店市碳吸收总量呈现逐年下降趋势, 15 年减少 24.10×10^4 t, 造成此现象的主要原因来源于耕地的减少, 杨立等^[24]和谭美秋等^[31]对于北方农作物碳汇能力的相关研究表明, 玉米、小麦等农作物具有巨大的碳汇潜力, 由于驻马店市耕地的减少导致其区域内的碳汇能力有所下降。

根据驻马店市碳排放量和碳吸收量的计算结果得到, 该区域土地利用净碳排放量(图 2)。对比各类型 15 年测算结果, 耕地随着面积的减少, 其碳汇能力下降; 林地、草地、水域在碳吸收方面较为稳定, 变化

不大。耕地既是驻马店市主要的碳源也是主要的碳汇,其整体表现为碳汇特征,耕地单位面积净碳吸收量在 2005—2015 年间呈现整体上升趋势,从 2005 年的 1.08 t/hm²增加到 2015 年的 1.55 t/hm²,但 2020 年仅为 0.25 t/hm²,直接原因是在农业生产过程中产生的碳排放逐年上升。总体来看,驻马店市 2005—

2020 年土地利用碳吸收量不足以抵消其所产生的碳排放,土地利用净碳排放量呈现整体上升趋势,在 2020 年其值达到最高 578.04×10⁴ t。因此,驻马店市距双碳目标的实现还有较大的差距,还需加大对林地、绿地的抚育,提高农业生产技术,在碳汇建设方面还有较大的发展空间和减排潜力。

表 6 2005—2020 年驻马店市碳源/汇情况

单位:×10⁴ t

碳源/汇	土地利用类型	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年
碳源	能源消费	162.95	283.99	376.97	327.32
	建设用地	273.97	289.65	296.91	317.06
	工业生产	0.01	0.01	0.02	0.01
	耕地	837.83	830.17	761.84	916.18
	合计	1274.76	1403.81	1435.74	1560.57
碳汇	林地	33.16	32.20	37.16	35.55
	草地	0.29	0.15	0.11	0.09
	水域	0.90	0.88	0.89	0.85
	耕地	972.28	969.62	950.59	946.04
	合计	1006.63	1002.85	988.75	982.53
净碳排放量		268.13	400.96	447.00	578.04

注:由于裸地的碳吸收量极少,在此忽略不计。

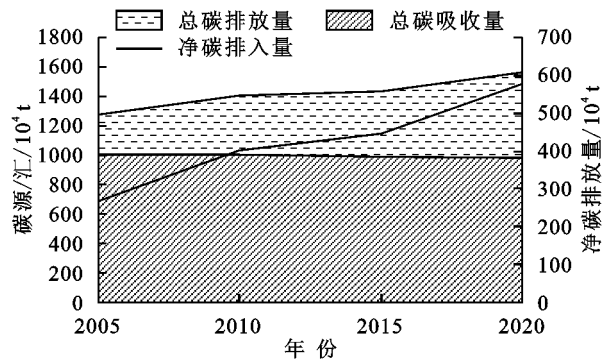


图 2 驻马店市 2005—2020 年碳源/汇变化

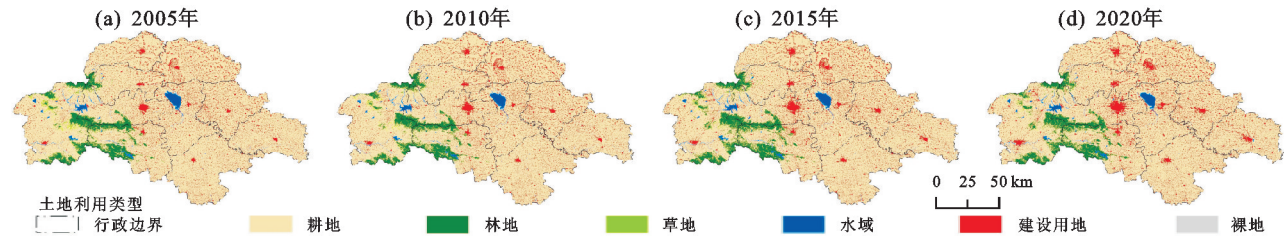


图 3 驻马店市土地利用空间分布

由图 4、图 5 可知,各类用地之间均发生改变。裸地由于占地面积少,相比之下变化不太明显,耕地、林地和草地是主要转出地类。其中,耕地转为其他地类共 49 525.29 hm²,向建设用地、林地转出 34 023.24, 13 621.68 hm²,分别占总转面积的 68.70%,27.50%;林地共转出 7 913.34 hm²,分别向建设用地、耕地转出 179.28,7 560.00 hm²,分别占总转面积的 2.27%, 95.53%;草地共转出 5 997.51 hm²,分别向耕地和林地转出 5 151.15,521.55 hm²,分别占总转面积的 85.89%,8.70%。

2.2 土地利用转型分析

利用 ArcGIS10.7 软件对 2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年 4 期土地利用数据与驻马店市历史影像图进行对比人工矫正之后得到驻马店市土地利用空间分布和变化情况(图 3)。驻马店市的用地类型以耕地为主,建设用地和林地次之,其余用地所占比例较少。由图 3 可知,驻马店市的林地主要分布在西部;建设用地主要分布在中部,其他地方呈现点状分布;耕地占比很大,其主要分布于中部和东部地区。2005—2020 年的土地利用转型的具体情况借助 ArcGIS 10.7 软件进行分析得出。

除裸地与草地之外,其他地类都有明显转入。其中,耕地共承接 16 005.15 hm²,主要由林地、草地和水域贡献 7 560.00,5 151.15,3 021.12 hm²,分别占总共转入面积的 47.23%,32.18%,18.88%;林地共承接 14 211.90 hm²,主要由耕地和草地贡献 13 621.68, 521.55 hm²,分别占比为 95.85%,3.67%;水域共承接 2 341.80 hm²,主要由耕地和建设用地贡献 1 289.88,921.60 hm²,分别占比为 55.08%,39.35%;建设用地共承接 34 807.42 hm²,主要由耕地贡献 34 023.24 hm²,占比为 97.75%。

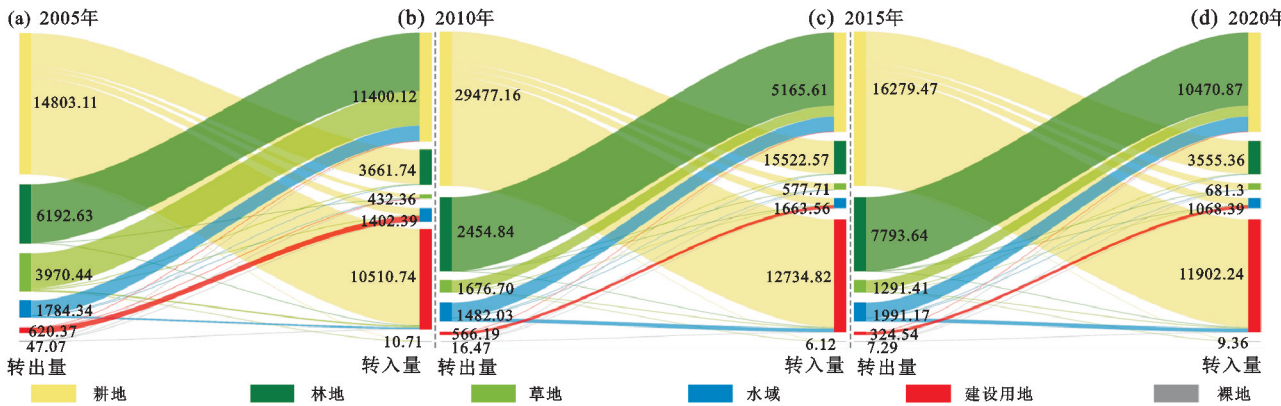


图 4 2005—2020 年驻马店市土地利用转情况

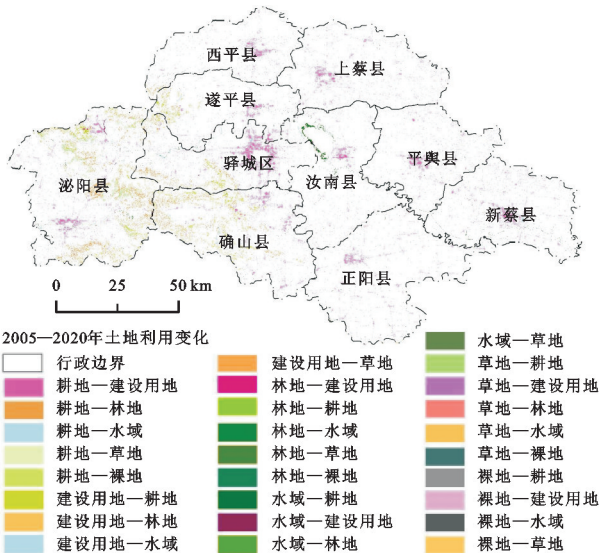


图 5 2005—2020 年驻马店市土地利用转移空间变化

综上所述,驻马店市 2005—2020 年除各碳汇地类之间的相互转换之外,则主要表现为耕地向建设用地转变,建设用地作为驻马店市主要的碳源,其面积增加导致驻马店市碳排放量大幅增加。为提升生态系统的碳汇能力,在保证经济发展的条件下,驻马店市需遏制碳汇用地向碳源用地的转变,此外,还需引导用地类型向主要的碳汇用地转变,并逐步提升各用地的碳汇能力,以助于驻马店市生态系统碳汇能力整体提高。

2.3 碳转型过程结果分析

由表 7 可知,驻马店市碳代谢系统中土地利用变化各类型之间的碳转移。土地利用转移使碳储量增加过程较少,净转换过程值是逐年增高的,增幅达 59.14%。在 2005—2010 年、2010—2015 年、2015—2020 年的土地利用转型导致碳储量减少过程中对其贡献最大的均为耕地转为建设用地,分别占各期间总碳储量减少值的 91.52%,97.01%,92.15%,大量耕地转为建设用地,导致碳储量急剧减少。对比各阶段碳储量增加过程,对其贡献最大的均为耕地转为林地、建设用地转为水域,分别占各期间总碳储量增加值的 30.12%,54.35%;63.61%,32.04%;32.37%,

51.45%。由图 6 可知,研究期内碳转型过程空间格局,驻马店市碳储量增加的土地转型过程主要发生于西部山区和中部城区,前者受益于“退耕还林”工程,明显的是西部山区的碳储量增加值并没有抵消太多的碳排放,但对陆地生态系统的生态恢复意义重大;后者是由于城区建设加重对城市园林绿化健康发展的重视,拓宽绿化空间,提升绿地建设品质。

表 7 2005—2020 年驻马店市碳转型过程计算结果

过程	转储量		
	2005—2010 年	2010—2015 年	2015—2020 年
碳储量减少	33.86	48.16	50.59
碳储量增加	−3.22	−6.43	−2.41
净转换过程	30.64	41.73	48.18
耕地→建设用地	30.99	46.72	46.62
耕地→草地	0.03	0.04	0.08
耕地→水域	0.05	0.08	0.09
耕地→林地	−0.97	−4.09	−0.78
林地→耕地	1.66	0.65	1.74
林地→草地	0.01	—	—
林地→建设用地	0.16	0.11	0.14
草地→建设用地	0.43	0.27	0.26
草地→林地	−0.03	−0.05	−0.02
草地→耕地	−0.25	−0.10	−0.13
水域→建设用地	0.53	0.30	1.66
水域→林地	—	−0.02	−0.01
水域→耕地	−0.11	−0.10	−0.18
建设用地→草地	−0.11	−0.01	−0.05
建设用地→水域	−1.75	−2.06	−1.24

2.4 驻马店市碳排放预测分析

根据驻马店市 2005—2020 年碳排放量计算结果,运用 GM(1,1)模型预测 2030 年碳排放量。经检验得出残差 $\bar{\Phi}, \varphi_n < 0.02$, 方差比 $C < 0.35$, 小残差概率 $P > 0.95$, 说明该模型精度很高,可以用于驻马店市碳排放量的预测,于是建立模型为:

$$x^{(1)} = 25015.54e^{0.054t} - 23740.79 \tag{6}$$

经模型(6)可得驻马店市 2005—2030 年碳排放量

(图 7)。由碳排放量预测可知未来驻马店市碳排放量仍持续增加,到 2030 年达到 $1\,722.46\times 10^4\text{ t}$,驻马店市碳排放量呈现规律上升趋势,在 2030 年并未达到最大值,而是持续上升。表明在 2030 年驻马店市还有很大的减排压力,需提高人们低碳意识,逐渐改变生产生活方式,加大力度推进绿色低碳循环发展。

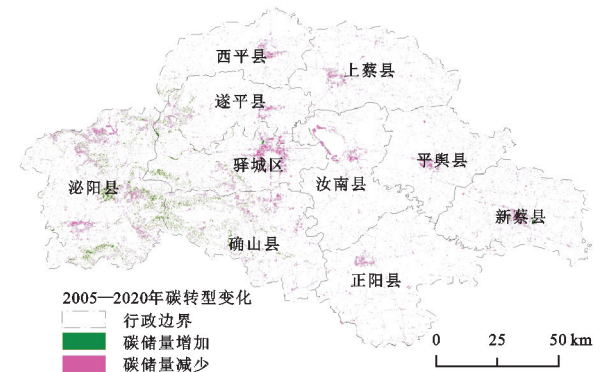


图 6 2005—2020 年驻马店市碳转型空间格局

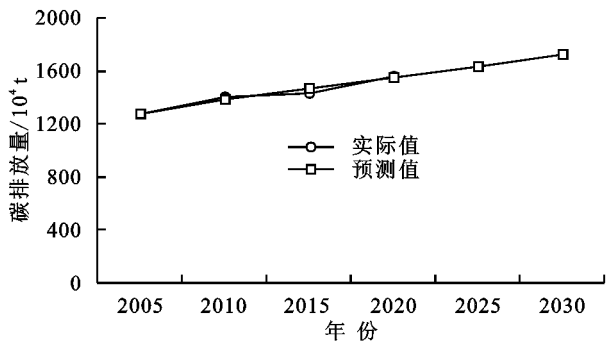


图 7 驻马店市 2005—2030 年总碳排放量变化趋势

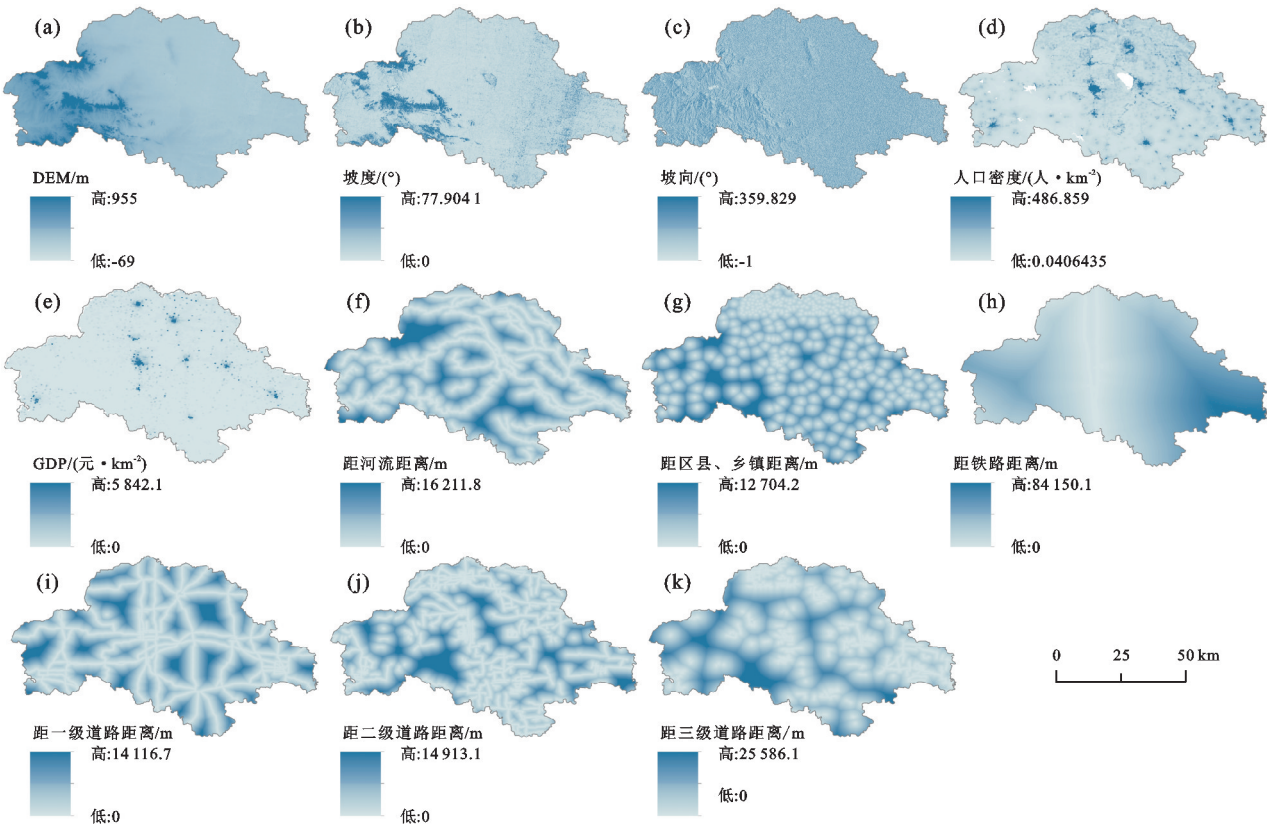


图 8 土地利用模拟的驱动因子

2.5 驻马店市土地利用预测

2.5.1 模型精度检验 结合 2010 年土地利用和驱动力数据,应用 PLUS 模型模拟 2020 年土地利用空间分布,在建设用地空间模拟上精度相对较低,但整体上空间模拟精度较高,采用 Kappa 系数对模拟的 2020 年驻马店市土地利用与实际 2020 年驻马店市土地利用进行精度检验,验证 Kappa 系数为 0.86,说明模型精度高,可用于模拟未来驻马店市土地利用空间变化情况。

2.5.2 不同情景下土地利用空间变化分析 将研究区 2020 年土地利用数据设为初值,根据土地利用成本转移矩阵和邻域权重,结合 Markov 模型数量预测优势,从自然因素、经济因素等方面选取 11 个影响因子(图 8),运用 PLUS 模型 CARS 模块模拟获得研究区 2030 年土地利用模拟结果(图 9)和预测面积表(表 8)。3 种情景预测中的耕地、林地和水域变化不大,处于相对稳定状态。与 2020 年相比,在自然发展情景下,耕地、草地面积分别减少 $30\,082.14, 580.59\text{ hm}^2$,建设用地、林地增加 $22\,949.00, 7\,124.22\text{ hm}^2$,在不受政策限制情景下,建设用地扩张明显,侵占耕地、草地等其他类型用地,对生态安全、粮食安全造成较大威胁;耕地保护情景下,林地、草地面积分别减少 $5\,653.26, 575.01\text{ hm}^2$,耕地增加 $5\,560.38\text{ hm}^2$,建设用地扩张受到明显的控制,仅扩张 0.06%;生态保护情景下,耕地、草地面积分别减少 $25\,424.46, 576.81\text{ hm}^2$,建设用地、林地分别增加 $18\,134.54, 7\,295.67\text{ hm}^2$,其中林地增加 7.80%,达到保护生态的作用。

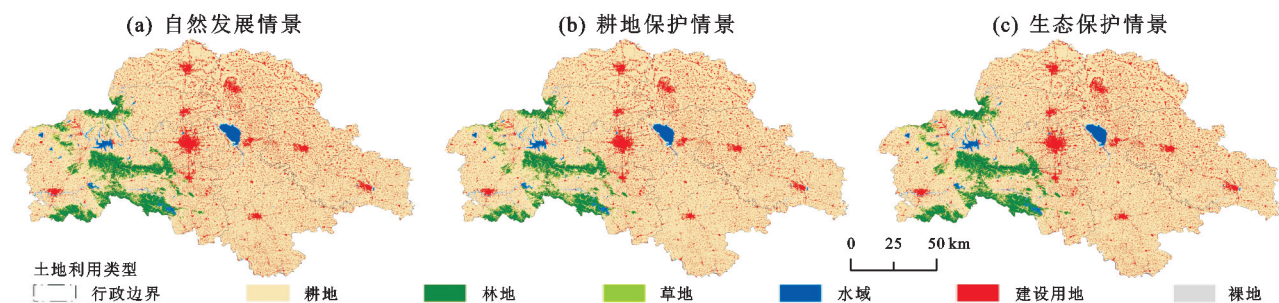


图 9 3 种情景下驻马店市 2030 年土地利用模拟空间分布

表 8 驻马店市 2030 年 3 种情景下预测面积

单位: $\times 10^4 \text{ hm}^2$

情景类别	耕地	林地	草地	水域	建设用地	裸地
自然发展情景	117.81	10.07	0.16	2.11	20.56	11.70×10^{-4}
耕地保护情景	121.38	8.80	0.16	2.11	18.27	11.88×10^{-4}
生态保护情景	118.28	10.09	0.16	2.12	20.08	11.79×10^{-4}

2.5.3 不同情景下的碳源/汇变化分析 根据各用地类型的碳汇系数,计算得出 3 种情景下 2030 年驻马店市总碳吸收量。在自然发展情景下,驻马店市 2030 年的总碳吸收量为 $961.66 \times 10^4 \text{ t}$,与 2020 年相比,碳吸收量减少 $20.87 \times 10^4 \text{ t}$;在耕地保护情景下,总碳吸收量为 $984.71 \times 10^4 \text{ t}$,增加 $2.18 \times 10^4 \text{ t}$;在生态保护情景下,总碳吸收量为 $965.37 \times 10^4 \text{ t}$,减少 $17.16 \times 10^4 \text{ t}$ 。由此可知,耕地保护情景的碳吸收量呈现出上升状态,而自然发展情景和生态保护情景下碳吸收量仍然呈下降趋势,但在生态保护情景下的碳吸收量下降趋势较为平缓。

根据预测结果对 2030 年驻马店市净碳排放量进行计算,在自然发展情景下,2030 年驻马店市净碳排放量达到 $760.80 \times 10^4 \text{ t}$;耕地保护情景净碳排放量为 $737.75 \times 10^4 \text{ t}$;生态保护情景为 $757.09 \times 10^4 \text{ t}$ 。表明在理论状态下,驻马店市在 2030 年净碳排放量并未达到峰值,不能完成碳达峰目标。但采取必要的保护措施,实行低碳政策,可明显降低净碳排放量的增幅,对于降低城市市域净碳排放量有一定的帮助。因此,驻马店市在未来的发展规划中,必须加快低碳循环发展,加大力度推进绿色发展,更快改进农业生产技术,以减少碳排放,助力实现“双碳”目标。

3 讨论

本文碳源/汇计算均基于《IPCC 国家温室气体排放清单指南》^[21]和前人^[22-25]研究结果,具有一定的可靠性,但在碳汇计算方面由于驻马店市在此方面的研究不足,碳汇系数的选取为邻近省份的研究结果,可能造成一定的误差。本研究表明,驻马店市整体呈碳亏状态,距双碳目标的实现还相差较远,耕地虽为驻马店市主要碳源也为主要碳汇,整体呈现碳汇功能,与已有研究^[18,32-33]对河南省碳源/汇的研究结果一致。

在未来情景预测下,驻马店市的净碳排放量持续上升,其生态系统的碳汇能力在自然发展情景下呈现减弱态势,生态保护情景下,由于驻马店市耕地所占土地利用比例最大,在生态用地保护下并不能有效控制其他用地向耕地的扩张,耕地保护情景可以有效控制碳排放的增加。因此,在未来土地利用规划中,需协同耕地保护和生态保护,提高农业生产技术,低质量耕地采取退耕还林,提高生态系统的碳汇能力。

4 结论

(1)驻马店市 2005—2020 年碳排放总量整体上升,由 2005 年的 $1\,274.76 \times 10^4 \text{ t}$ 增加到 2020 年的 $1\,560.57 \times 10^4 \text{ t}$,增幅为 22.42%。碳吸收总量呈现减弱态势,15 年减少 $24.10 \times 10^4 \text{ t}$,耕地既是驻马店市主要的碳源,也是主要的碳汇。净碳排放量逐年上升,由 2005 年的 $268.13 \times 10^4 \text{ t}$ 增加到 2020 年的 $578.05 \times 10^4 \text{ t}$ 。

(2)驻马店市主要用地类型以耕地为主,建设用地和林地次之,裸地极少。2005—2020 年间,转出土地以耕地、林地和草地为主,转入土地类型主要为耕地、林地和建设用地。在土地转移过程中,对碳转移影响最大的为耕地转为建设用地和林地转为耕地,2 种土地转型使得碳排放增加,固碳减少。

(3)2030 年自然发展、耕地保护和生态保护情景下的驻马店市净碳排放量预测结果分别为 760.80×10^4 , 737.75×10^4 , $757.09 \times 10^4 \text{ t}$ 。表明 2030 年的净碳排放量仍呈上升趋势,采用耕地保护和生态保护措施,可有效保障西部林草的自然演替,控制建设用地的快速扩张,有助于恢复陆地生态系统碳汇能力。未来土地利用规划中在保证基本农田的基础上,需要更新农业生产技术,以降低农业生产过程中所带来的碳排放,同时,在建设用地基本增长的前提下控制扩张速度,可有效提高区域碳吸收量。

参考文献:

- [1] 张燕,师学义,唐倩.不同土地利用情景下汾河上游地区碳储量评估[J].生态学报,2021,41(1):360-373.
- [2] Jin G, Wang P, Zhao T, et al. Reviews on land use change induced effects on regional hydrological ecosystem services for integrated water resources management [J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2015, 89/90:33-39.
- [3] Stocker B D, Yu Z C, Massa C, et al. Holocene peatland and ice-core data constraints on the timing and magnitude of CO₂ emissions from past land use[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(7):1492-1497.
- [4] 谢宇剑,沈正平,赵洁.基于土地利用变化情景的徐州市生态系统碳储量评估[J].国土与自然资源研究,2022(4):13-21.
- [5] 赵荣钦,黄贤金,钟太洋,等.南京市不同土地利用方式的碳储量与碳通量[J].水土保持学报,2012,26(6):164-170.
- [6] 胡欢,章锦河,熊杰,等.河北省碳源/汇测算及碳减排压力分析[J].地理与地理信息科学,2016,32(3):61-67.
- [7] 王少剑,莫惠斌,方创琳.珠江三角洲城市群城市碳排放动态模拟与碳达峰[J].科学通报,2022,67(7):670-684.
- [8] Liang X, Guan Q F, Clarke K C, et al. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: A case study in Wuhan, China[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2021, 85: e101569.
- [9] 蒋小芳,段翰晨,廖杰,等.基于 PLUS-SD 耦合模型的黑河流域中游甘临高地区土地利用研究[J].干旱区研究,2022,39(4):1246-1258.
- [10] 吴佩君,刘小平,黎夏,等.基于 InVEST 模型和元胞自动机的城市扩张对陆地生态系统碳储量影响评估:以广东省为例[J].地理与地理信息科学,2016,32(5):22-28.
- [11] Liang Y J, Liu L J, Huang J J. Integrating the SD-CLUE-S and InVEST models into assessment of oasis carbon storage in northwestern China[J]. *PLoS One*, 2017, 12(2): e0172494.
- [12] 杨淑威,赵娟,朱家田,等.基于 PLUS 和 InVEST 模型的西安市生态系统碳储量时空变化与预测[J].自然资源遥感,2022,34(4):175-182.
- [13] 驻马店市统计局.驻马店统计年鉴[Z].北京:中国统计出版社,2011.
- [14] 驻马店市统计局.驻马店统计年鉴[Z].北京:中国统计出版社,2016.
- [15] 驻马店市统计局.驻马店统计年鉴[Z].北京:中国统计出版社,2021.
- [16] Zhao N Z, Liu Y, Cao G F, et al. Forecasting China's GDP at the pixel level using nighttime lights time series and population images[J]. *GIScience and Remote Sensing*, 2017, 54(3):407-425.
- [17] 曾娟.基于碳排放约束的广州市土地利用数量结构优化研究[D].广州:广州大学,2013.
- [18] 曹志宏,秦帅,郝晋珉.河南省农业生产碳汇的演变趋势及其集聚特征分析[J].中国生态农业学报,2018,26(9):1283-1290.
- [19] 王伟歌.城市碳排放测算研究:以郑州市为例[J].环境科学与管理,2015,40(4):13-16.
- [20] 王莉,刘莹莹,张亚慧,等.河南省农田生态系统碳源/汇时空分布及影响因素分解[J].环境科学学报,2022,42(12):410-422.
- [21] 陈舜,逯非,王效科.中国氮磷钾肥制造温室气体排放系数的估算[J].生态学报,2015,35(19):6371-6383.
- [22] 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.
- [23] 段晓男,王效科,逯非,等.中国湿地生态系统固碳现状和潜力[J].生态学报,2008,28(2):463-469.
- [24] 杨立,郝晋珉,艾东,等.基于区域碳平衡的土地利用结构调整:以河北省曲周县为例[J].资源科学,2011,33(12):2293-2301.
- [25] 李健,毛德华,蒋子良,等.长株潭城市群土地利用碳排放因素分解及脱钩效应研究[J].生态经济,2019,35(8):28-34,66.
- [26] Xia C Y, Li Y, Xu T B, et al. Quantifying the spatial patterns of urban carbon metabolism: A case study of Hangzhou, China[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 95: 474-484.
- [27] Zhang S H, Zhong Q L, Cheng D L, et al. Landscape ecological risk projection based on the PLUS model under the localized shared socioeconomic pathways in the Fujian Delta region [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 136: e108642.
- [28] 陈理庭,蔡海生,张婷,等.基于 Markov-FLUS 模型的饶河流域土地利用多情景模拟分析[J].生态学报,2022,42(10):3947-3958.
- [29] 袁雪.基于 PLUS 模型的武汉市土地利用变化情景模拟与景观生态风险研究[D].江西 抚州:东华理工大学,2022.
- [30] 牛统莉,熊立华,陈杰,等.基于 PLUS 模型的长江流域土地利用变化模拟与多情景预测[J/OL].武汉大学学报(工学版):1-16(2023-06-14).<https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1675.T.20230313.1823.002.html>.
- [31] 谭美秋,崔耀平,马晓哲等.河南省农田生态系统碳汇核算研究[J].生态与农村环境学报,2022,38(9):1129-1137.
- [32] Chambers A, Lal R, Paustian K. Soil carbon sequestration potential of US croplands and grasslands: Implementing the 4 per thousand initiative[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 71(3):68A-74A.
- [33] 王喜,鲁丰先,秦耀辰,等.河南省碳源/汇的时空变化研究[J].地理科学进展,2016,35(8):941-951.