

基于 InVEST-PLUS 模型的郑州市碳储量 时空演变及空间自相关分析

孙一帆, 徐梦菲, 汪霞

(郑州大学 建筑学院, 河南 郑州 450000)

摘要: [目的] 陆地生态系统碳储量的主要驱动因素之一是土地利用变化,以“过去—现在—未来”的逻辑,分析河南省郑州市土地利用与碳储量时空演变之间响应关系,为实现城市的生态安全可持续发展提供参考。[方法] 首先基于 GIS 和 InVEST 模型,对 2005—2020 年碳储量时空分布进行定量评估,然后结合 PLUS 模型,模拟 2050 年自然发展情景和生态保护情景下土地利用和碳储量时空变化特征;并辅以莫兰指数和热点分析在网格尺度下评估其空间关联程度。[结果] ① 2005—2020 年,耕地不断调整为建设用地,累计转入 1 004.98 km²,致使郑州市土地利用结构发生显著变化,生态保护情景下生态用地减少趋势相对自然发展情景得到较好改善。② 受城镇化快速扩张的影响,2005,2020 年郑州市碳储量分别为 6.59×10⁷, 5.67×10⁷ t,15 a 间高碳密度地类用地转移,碳储量空间分布呈“西高东低,南北中等,中部低”的特点,自然发展情景和生态保护情景下碳储量变化分别减少了 8.27×10⁶ t 和 1.80×10⁶ t,其中耕地发挥着重要碳汇作用。③ 碳储量空间分布上具有集聚性,冷热点分布不均,生态保护情景下热点破碎化程度缓和。巩义市和登封市始终为碳储量集聚程度较高区域。[结论] 碳储量时空分布特征与土地利用结构变化密切相关,郑州市未来土地利用规划应当采取生态保护措施,优化土地利用格局,增强生态系统固碳能力。

关键词: 碳储量; 土地利用变化; 空间自相关; 热点分析; 河南省郑州市

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)05-0374-11

中图分类号: X321, F301.2

文献参数: 孙一帆, 徐梦菲, 汪霞. 基于 InVEST-PLUS 模型的郑州市碳储量时空演变及空间自相关分析[J]. 水土保持通报, 2023, 43(5): 374-384. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.05.043; Sun Yifan, Xu Mengfei, Wang Xia. Spatial-temporal evolution of carbon storage and spatial autocorrelation analysis in Zhengzhou City based on InVEST-PLUS model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(5): 374-384.

Spatial-temporal Evolution of Carbon Storage and Spatial Autocorrelation Analysis in Zhengzhou City Based on InVEST-PLUS Model

Sun Yifan, Xu Mengfei, Wang Xia

(School of Architecture, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450000, China)

Abstract: [Objective] One of the main drivers of terrestrial ecosystem carbon storage is land use change. The spatial-temporal response relationship between land use and carbon storage evolution in Zhengzhou City, Henan Province was analyzed based on the logic of “past-present-future” in order to provide references for realizing ecological security and sustainable development. [Methods] The spatial-temporal distribution of carbon storage from 2005 to 2020 was quantitatively evaluated using GIS and the InVEST model. Then, combined with the PLUS model, the spatial-temporal changes of land use and carbon storage were simulated for 2050 under a natural development scenario and an ecological conservation scenario. The degree of spatial correlation was evaluated at the grid scale using Moran's *I* and the Getis-Ord *G_i^{*}* statistic for hot spot analysis. [Results] ① From 2005 to 2020, cultivated land was continuously converted to construction land, with a cumulative transfer of 1 004.98 km², resulting in significant changes in the land use structure of

收稿日期: 2023-02-21

修回日期: 2023-05-27

资助项目: 河南省科技攻关项目“韧性城市理念下基于气候适应性的景观基础设施规划设计方法与技术研究”(182102210177)

第一作者: 孙一帆(1998—), 女(汉族), 河南省洛阳市人, 硕士研究生, 研究方向为生态服务功能评估及城乡规划与设计。Email: syf0612@gs.zzu.edu.cn.

通信作者: 汪霞(1974—), 女(汉族), 四川省简阳市人, 博士, 教授, 主要从事可持续发展的城市规划理论与方法研究及景观生态规划。Email: wx1208@zzu.edu.cn.

Zhengzhou City. The decrease in ecological land area under the ecological conservation scenario was better than under the natural development scenario. ② The rapid expansion of urbanization in Zhengzhou City produced carbon storage in 2005 and 2020 of 6.59×10^7 t and 5.67×10^7 t, respectively. Over the past 15 years, the high-carbon-intensity land class was transferred, and the spatial distribution of carbon storage was characterized by a pattern of “higher in the west, lower in the east, medium in the north and south, and lower in the central region”. Under the scenarios of natural development and ecological conservation, the carbon storage decreased by 8.27×10^6 t and 1.80×10^6 t, respectively, and cultivated land played an important role as a carbon sink. ③ The spatial distribution of carbon storage was agglomerative, with an uneven distribution of cold and hot spots. The degree of fragmentation of hot spots was moderate under the ecological conservation scenario. Gongyi City and Dengfeng City were always the regions with a high degree of carbon storage agglomeration. [Conclusion] The spatial-temporal distribution characteristics of carbon storage were closely related to changes in land use structure. In future land use planning of Zhengzhou City, people should take appropriate ecological conservation measures to optimize the land use pattern and to enhance the carbon sequestration capacity of the ecosystem.

Keywords: carbon storage; land use change; spatial autocorrelation; Getis-Ord G_i^* ; Zhengzhou City, Henan Province

陆地生态系统作为人类赖以生存和可持续发展的生命维持系统,是大气中重要的碳汇之一,其固碳作用能有效缓解温室效应,在全球碳循环和气候变化中起着极其重要的作用^[1],陆地生态系统固碳作用是各国政府和学者共同关注的研究热点。陆地生态系统碳储量的主要驱动因素之一是土地变化^[2],通过调整陆地生态系统原有土地利用类型及生态系统功能和结构等,改变生态系统的物质循环和能量流,直接或间接地影响其碳储量的变化^[3-5]。客观评估碳储量和土地利用变化之间的反应机制,对促进区域自然环境与社会经济生态和谐发展有重大价值。

目前,对于土地利用碳储量评估及二者之间的关系和影响机制,国内外学者进行了大量研究,在传统方面多采用样地清查法和微气象学法等^[6-7]。Raqeeb A.等^[8]研究了森林地区土地利用动态变化对巴基斯坦吉尔吉特碳储量的影响;中国学者卢雅焱等^[9]分析了新疆天山土地利用与碳储量变化之间的关系,进一步说明碳储量空间分布与土地利用变化密切相关。

20 世纪 90 年代以来,随着信息技术发展,模型为主结合 RS 和 GIS 技术的碳储量评估方法日益兴起,在获取土地利用数据基础上结合相关数字预测模型进行研究。其中,生态系统服务评估模型(InVEST)具有操作简单、估算精度高以及可将结果进行动态化和空间化表达等优势,被广泛应用于碳储量计算。郝晓慧等^[10]采用 Dyna-CLUE 模型和 InVEST 模型,动态评估不同情景下中原城市群碳储量演变规律,证明了建设用地的无序扩张是导致碳储

量收益下降的主要原因;任胤铭等^[11]耦合 FLUS-InVEST 模型,分析了 2045 年 3 种不同情景下京津冀城市群的土地利用空间格局并构建综合生态系统服务指数,结论为在生态保护情景中,碳储量上升幅度最大;Qin Menglin 等^[12]将 FLUS 和 InVEST 模型相结合,对中国北部湾城市群的土地利用及其对碳储量影响进行不同发展情景下的模拟。以上研究结果表明,探究土地利用变化对陆地生态系统碳储量具有重要意义。目前,土地利用模拟模型与生态系统服务模型相结合成为当下研究主要方法,并取得了一定的研究成果^[13]。孙欣欣等^[14]基于 PLUS 和 InVEST 模型模拟 2000—2040 年南京市在耕地保护和生态保护情景下的碳储量变化趋势,其土地利用预测结果的准确性较高;Yu Yang 等^[15]通过使用 CA 和 PLUS 模型,加入植被类型碳密度表,预测 2030—2060 年不同发展情景下京津冀地区生态系统碳储量变化情况,说明了在生态保护措施下,土地利用碳储量有所提高,有利于区域碳平衡的稳定,但较少考虑到政策因素的影响。

以往研究主要基于不同土地利用预测模型和 InVEST 模型的结合,分析不同发展模式下的土地利用及其碳储量变化情况^[16];PLUS 模型作为土地利用预测模型之一,在模拟未来发展情景方面具有较大优势,目前利用该模型及 InVEST 模型同时开展碳储量相关分析并在此基础上进行空间分布相关性研究较少。

在 2030 碳达峰及 2060 碳中和目标带来生态建设新机遇的背景下,2023 年 1 月,郑州市入选河南省碳达峰试点,但目前土地资源短缺和生态承载力不足

成为制约郑州发展的瓶颈。基于此,本文将郑州市作为研究区,按照“过去—现在—未来”的逻辑角度,研究郑州市土地利用变化和碳储量之间的关系。在获取土地利用数据基础上,首先借助 InVEST 模型中 Carbon 模块对区域碳储量进行评估,关注土地利用变化对碳储量的影响;其次分析郑州市 2005—2020 年碳储量时空分布,探析郑州市区域内部碳储量空间分布关联特征;最后通过 PLUS 模型,分析自然发展和生态保护两种不同情景的发展趋势对土地利用变化和碳储量的影响。本文旨在为未来郑州市陆地生态系统碳储量资源优化配置和用地结构合理科学提供参考,以期充分发挥生态用地的碳汇作用。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

郑州市(112°42′—114°13′E,34°16′—34°58′N)为河南省省会、国家级中心城市,地处中国中部平原地区。该区域地形起伏较大,西部为山地,东部为平原,中部是低山丘陵地带,拥有“依嵩山戴黄河”的自然景观格局(图 1)。郑州市属北温带大陆性季风气候,年平均气温为 15℃,年均降水量为 577.70~691.60 mm^[17]。该区域原始林区较少,多为人工林和原始次生林,西部森林面积占市域森林面积的 71%,平均森林覆盖率 34.3%^[18]。市内水系发达,分属黄河流域和淮河流域,以贾鲁河水系为主,伊洛河、双洎河和颍河 3 个小流域为辅。北部黄河湿地国家级自然保护区和 13 处自然公园具有重要生态价值。郑州市土地种类以耕地和建设用地为主,受人类活动影响大,土地利用类型变化较为显著。

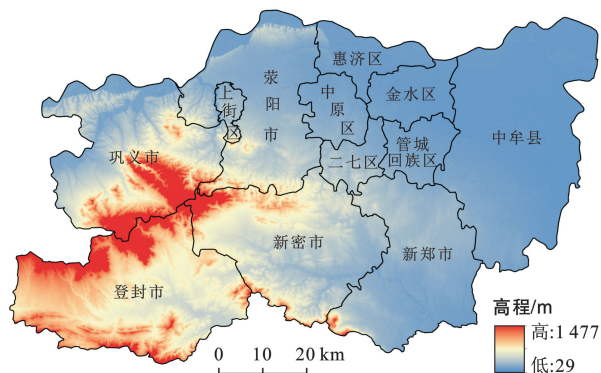


图 1 河南省郑州市地形图

Fig.1 Topographic map of Zhengzhou City, Henan Province

1.2 数据来源

本研究以 2005 年和 2020 年两期郑州市土地利用数据为主要数据源,其中 2020 年土地利用类型数据结合遥感影像,进行几何校正等预处理,将区域内

用地类别划分为 6 大类,分别为耕地、林地、草地、水域、建设用地及未利用地。郑州市土地利用数据,年均温、年均降水等自然环境数据,人口密度、中国 GDP 空间分布 km 网格数据集等社会经济数据,均来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<https://www.resdc.cn/>)。高程来源于地理空间数据云平台(<https://www.gscloud.cn/>),坡度数据通过对高程进行提取后获得。土壤数据来源于联合国粮农组织(FAO)和维也纳国际应用系统研究所(IIASA)所构建的世界土壤数据库中的中国土壤数据集(1:100 万)。道路矢量数据来源于 Open Street Map(<https://www.openstreetmap.org/>),借助 ArcGIS 10.2 软件进行分类处理,使用欧氏距离工具得到各级道路、政府和水体距离的可达性分析栅格图。碳密度通过查阅不同文献综合整理获得。空间分辨率统一为 30 m × 30 m,坐标系为 WGS 84。

1.3 研究方法

1.3.1 PLUS 模型与情景模拟 PLUS 模型是由中国地质大学(武汉)高性能空间计算智能实验室研发^[19],在传统元胞自动机改进的基础上开发的新模型,基于土地扩张分析策略(LEAS)和基于多类随机斑块种子的元胞自动机模型(CARS)两部分组成。相较于以往土地利用预测模型,其模拟精度更高,在研究土地利用影响机制和模拟生态用地斑块变化方面更具优势。该模型的应用,首先对两期土地利用数据之间地类相互转化的样本进行训练;其次在 LEAS 模块中,基于转化概率模拟未来土地利用,采用随机森林算法对各类土地利用扩张和驱动因子进行计算。本研究模拟阶段参数设置如下:决策树数量 20,采样率 0.01,训练特征个数 16,经计算得到各类用地的发展潜力和驱动因子对该时段各类用地扩张的作用成效;最后在 CARS 模块中,结合自动模拟生成的随机斑块,进行各项参数的设置:斑块生成阈值 0.2,扩散系数 0.1,随机种子比例 0.000 1,并行线程数 8,由此确定未来土地利用情况。

综合已有研究成果及研究区实际情况,从自然、社会经济和可达性 3 个维度选择高程、坡度、人口密度、每 1 km 网格 GDP、距道路距离、距铁路距离等 16 个驱动因子。除此之外,政策因素在土地利用变化的影响因素中也占据重要位置,但由于该因子在量化方面存在一定难度,因此将其作为情景标准与限制,融入模拟当中^[20]。邻域权重是衡量不同土地利用类型之间扩张难易程度的重要指标^[21],以 2005 年和 2020 年两期土地利用数据为基础,计算各类用地扩张面积比例确定邻域权重(表 1)。

表 1 不同土地利用类型的邻域权重参数

Table 1 Neighborhood weight parameters of different land use types

土地利用类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
邻域权重	0.299	0.050	0.021	0.056	0.373	0.000

注:在 PLUS 模型中,邻域权重值根据两期土地利用数据中各类用地扩张比例经计算获得。

本研究以 2005,2020 年两期郑州市土地利用作为模型训练数据,将 2020 年模拟结果与实际土地利用状况进行对比(表 2),采用 FoM 系数对其精度进行

验证,FoM 值为 0.253 5(范围在 0~1 之间,值越高代表模拟结果精度越高。),表示预测结果可信度较高,适用于郑州市未来土地利用变化模拟。

表 2 郑州市 2020 年模拟土地利用与 2020 年实际土地利用对比

Table 2 Comparison of simulated land use and actual land use of Zhengzhou City in 2020

土地利用类型	2020 年实际		2020 年模拟		误差	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
耕地	4 229.00	56.20	4 229.00	56.20	0.00	0.00
林地	557.74	7.41	557.74	7.41	0.00	0.00
草地	388.11	5.16	402.24	5.35	-14.13	-0.19
水域	309.68	4.12	295.45	3.93	14.23	0.19
建设用地	2 040.14	27.11	2 040.14	27.11	0.00	0.00
未利用地	0.05	0.001	0.15	0.002	-0.10	-0.001
FoM 系数	0.253 5					

基于郑州市“山河魅力名城”的发展愿景,依据郑州市历史年份土地利用变化情况以及未来空间发展规划,本研究分别设置自然发展和生态保护发展两种情景,对郑州市 2050 年土地利用变化情况进行预测。自然发展情景基于 2005—2020 年郑州市土地利用发展规律,不考虑任何规划政策对土地利用的约束影响,未限制建设用地的扩张;生态保护情景在自然发展情景的基础上,参考《郑州市国土空间总体规划(2021—2035 年)》^[22] 中划定的生态空间范围,同时

考虑郑州市未来将打造北部黄河生态文化保护带和西部嵩山文化生态保护区,保护“一带一区”山河生态基地的规划愿景。在此情景下设定约束条件:建设用地、耕地不宜占用林地、草地和水域,适当减少生态用地向其他地类的转换,以遏制建设用地扩张趋势,从而加强对林地、草地和水域的保护。结合以上情景,设定过渡转移矩阵,当取值为 0 时,表示该地类禁止转换为其他地类,当取值为 1 时,则情况相反(表 3)。

表 3 2020—2050 年郑州市土地利用多种模拟情景转换矩阵参数

Table 3 Parameters of conversion matrix for multiple simulation scenarios of land use in Zhengzhou City during 2020—2050

土地利用类型	自然发展情景						生态保护情景					
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
耕地	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1
林地	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0
草地	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0
水域	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
建设用地	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1
未利用地	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1

1.3.2 InVEST 模型与碳储量估算 InVEST 模型是由美国斯坦福大学、大自然保护协会(TNC)和世界自然基金会(WWF)联合开发的,是用于评估生态系统服务功能及其经济价值的模型^[23],包含碳储量、水土保持和生境质量等多个模块。本研究基于 InVSET 模型的 Carbon 模块进行研究,将陆地生态系统中的碳储量分为地上植被碳储量、地下植被碳储量、土壤

有机碳储量和死亡有机质碳储量四部分。由于死亡有机质碳库数据难以获取,因此仅选用三大碳库碳储量进行计算,计算公式为:

$$C_{\text{total}} = C_{\text{above}} + C_{\text{below}} + C_{\text{soil}} \quad (1)$$

式中: C_{total} 为研究区总碳储量; C_{above} 为地上植被碳储量; C_{below} 为地下植被碳储量; C_{soil} 为土壤碳储量,单位均为 t。

为了更加准确估算碳储量,参考刘晓娟等^[16]和“2010 年中国陆地生态系统碳密度数据集”^[24]获得地上植被和土壤有机碳密度数据,以此作为 2005, 2020, 2050 年 3 大碳库碳储量的基础数据,同时运用方精云提出的“生物量转换因子法”对 2050 年地下植被碳密度进行估算^[25]。计算公式为:

$$C_{i\text{below}} = b \times C_{i\text{above}} \quad (2)$$

式中: $C_{i\text{below}}$ 为第 i 种土地利用类型地下植被碳密度; i 为土地利用类型; $C_{i\text{above}}$ 为第 i 种土地利用类型地上碳密度; b 为地下和地上植被根茎比值^[26]。其中, $C_{i\text{below}}$ 和 $C_{i\text{above}}$ 单位为 t/hm^2 。

建设用地地表多为不透水面,对碳的释放和储存影响不大;随着城市不断发展,未利用地面积逐渐减少,且多为沙地等^[27],结合多个研究成果,将二者生物量碳密度均设置为 0;地上、地下植被根茎比值参考朴世龙等^[28],Mokany K 等^[29]对不同地类的研究成果,草地取值 4.25,其余用地取值 0.2 进行计算(表 4)。

1.3.3 莫兰指数与空间自相关分析 空间自相关可表明具有空间单元和属性的要素与其周围要素是否存在空间关联,运用 Moran's I 指数分析区域内整体要素的聚散程度,可分为全域自相关和局部自相关两种类型^[30-31]。本研究基于格网尺度,借助 ArcGIS 在研究区域上创建 800×800 格网及格网点,将碳储量赋予格网点,从而获取各格网的碳储量值,通过计算 Moran's I 指数,得到全域自相关结果,利用 Getis-Ord G_i^* 进一步分析研究区碳储量热点分布情况。计算公式为:

$$G_i^* = \frac{\sum_j^n W_{ij} x_j}{\sum_j^n x_j} \quad (3)$$

式中: W_{ij} 为斑块 i 与斑块 j 之间的空间权重矩阵; x_j 是斑块 j 的属性值; n 为总的斑块数。

表 4 2005—2050 年郑州市土地利用类型碳密度

土地利用类型	植被碳密度		土壤碳密度
	地上	地下	
耕地	26.41	0.906	43.94
林地	44.75	8.950	52.71
草地	38.67	164.348	53.70
水域	22.32	4.464	44.29
建设用地	0.00	0.000	41.61
未利用地	0.00	0.000	50.77

2 结果与分析

2.1 郑州市土地利用时空变化特征

2.1.1 2005—2020 年郑州市土地利用变化特征分析

由图 2,表 5 可知,郑州市土地利用类型以耕地和建设用地为主,其次是林地和草地。耕地主要分布在中部低山丘陵地区和东部平原地区,建设用地主要分布于东北部地区,林地和草地集中分布在西部和南部山地地区,水域呈线性分布于北部,包括部分黄河和水库等,未利用地以沙地和裸露岩石为主,零星分布在东部及西部山区。

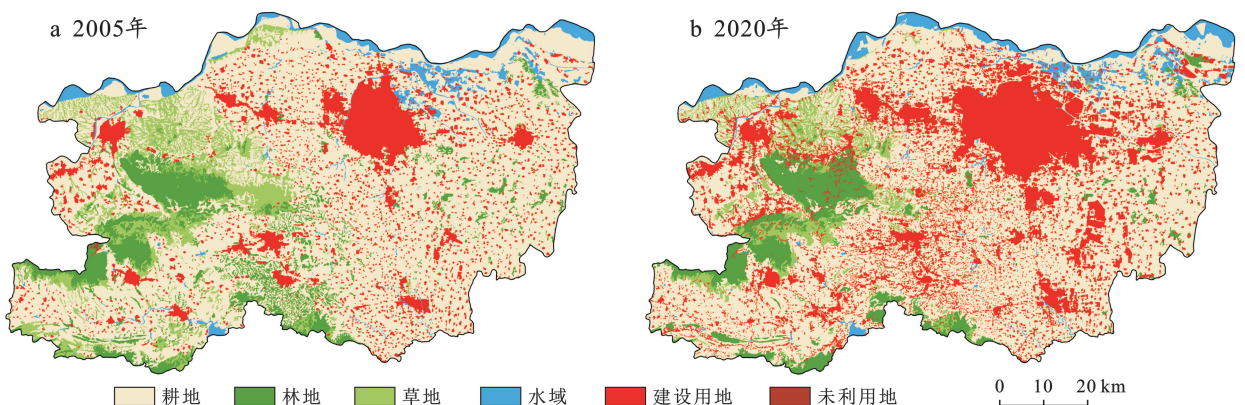


图 2 2005—2020 年郑州市土地利用空间分布

Fig.2 Spatial distribution of land use in Zhengzhou City during 2005—2020

2005—2020 年间,建设用地增加趋势显著,面积由 2005 年的 $1\,019.91 \text{ km}^2$ 增长至 2020 年的 $2\,040.14 \text{ km}^2$,增加趋势显著;水域由 276.32 km^2 增加至 309.68 km^2 ,

建设用地和水域的增幅分别为 13.56% , 0.44% 。郑州市作为黄河沿线地区,黄河水域受到自然和生态保护,引起水域面积增加,另外,南水北调中线工程完成

建设也是引起水域面积变化的原因之一。2005—2020 年,转换幅度较大的主要为耕地、草地和建设用 地 3 类用地。随建设用地面积的增多,耕地、林地和草 地面积相应大幅度减少,耕地共转出 1 199.12 km²,其 中,83.81%转为建设用地;林地共转出 301.35 km², 主要转为耕地、建设用地及草地,其转出的比例分别 为 64.62%,28.60%,5.48%;草地共转出 341.71 km², 56.94%转出为耕地,29.59%转出为建设用地。建设

用地共转入 1 225.24 km²,其中 82.02%来源于耕地, 8.25%来源于草地。

总体来看,郑州市土地利用结构变化表现出“建 设用地面积激增,耕地大幅减少”等特点。究其原因, 由于社会经济的发展需要,郑州开始实行“城乡一体 化”统筹规划,布局中心城区、近郊城市圈、远郊卫星 城和重点小城镇,进行资源重置,产业结构调整 等^[32],土地开发量日渐增大。

表 5 2005—2020 年郑州市土地利用转移矩阵

Table 5 Land use transfer matrix for Zhengzhou City during 2005—2020

km²

年份	土地利用 类型	2020 年面积							转出
		耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	总计	
2005 年面积	耕地	3 589.47	56.83	24.55	112.76	1 004.98	0.00	4 788.59	1 199.12
	林地	194.73	450.20	16.52	3.92	86.19	0.00	751.55	301.35
	草地	194.56	44.92	343.31	1.11	101.13	0.00	685.03	341.71
	水域	51.35	0.92	2.49	189.19	32.38	0.00	276.32	87.14
	建设用地	197.98	3.10	1.23	2.70	814.90	0.00	1 019.91	205.01
	未利用地	0.91	1.78	0.01	0.00	0.56	0.05	3.31	3.26
	总计	4 228.99	557.74	388.11	309.68	2040.14	0.05	7 524.71	2137.60
转入	639.52	107.54	44.80	120.5	1 225.24	0.00	2 137.60	—	

2.1.2 2050 年不同情景下郑州市土地利用变化 郑州市 2050 年不同情景下土地利用空间格局如图 3 和 图 4 所示。自然发展情景下,延续 2005—2020 年发展 规律,各用地类型大规模转为建设用地,截至 2050 年, 郑州市建设用地面积增加 1 031.10 km²,其中 41.20%的土地面积由草地和林地转换而来,58.80% 由耕地转换而来。耕地、林地和草地均呈减少趋势, 分别减少了 568.59,237.40,235.83 km²。由此可见, 自然发展情景下,建设用地无约束扩张,不断侵占耕

地和生态用地,不利于郑州市生态可持续健康发展。 生态保护情景下,生态用地得到较好保护,耕地为郑 州市的优势地类,其面积占总区域面积的 48.28%。 与 2020 年相比,建设用地虽仍呈增长趋势,但增长态 势远低于自然发展情景,生态用地减少趋势得到较好 遏制,其中,耕地面积减少 568.59 km²,林地面积增加 12.39 km²。在生态保护情景下,生态用地呈现总体 向优发展趋势,可作为未来土地利用规划的理想 情景。

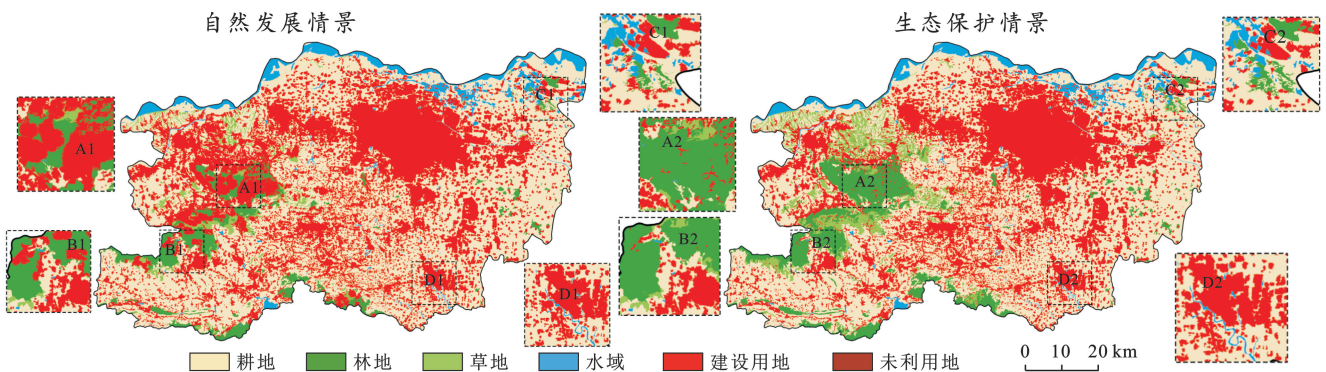


图 3 郑州市 2050 年不同情景下土地利用类型

Fig.3 Land use types under different scenarios in Zhengzhou City in 2050

2.2 郑州市碳储量变化特征

2.2.1 2005—2020 年碳储量时空分布变化特征 2005—2020 年郑州市碳储量空间格局分布如图 5 和

表 6 所示。2005,2020 年郑州市碳储量分别为 6.59×10^7 , 5.67×10^7 t, 对应碳密度分别为 87.62,75.38 t/hm², 二者整体呈减少趋势,降幅 13.96%。2005 年各地类

的碳储量由大到小依次为耕地、草地、林地、建设用地、水域和未利用地。至 2020 年林地碳储量不及建设用地,林地碳密度虽高于建设用地,但林地的转出和建设用地大幅转入是导致该区域碳储量下降的主

要原因;耕地面积比例由 63.64% 下降至 56.20%,但其碳储量仍占区域总碳储量的 50.00% 左右。综上所述,碳密度大的地类面积减少,对区域碳储量将产生较大影响。

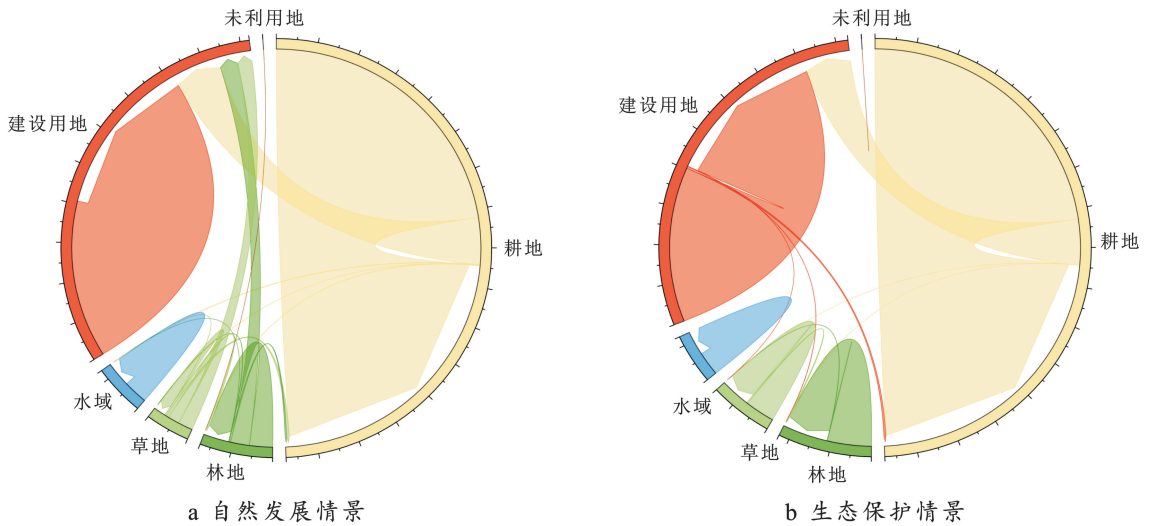


图 4 2020—2050 年郑州市土地利用转移矩阵

Fig.4 Land use transfer matrix in Zhengzhou City during 2020—2050

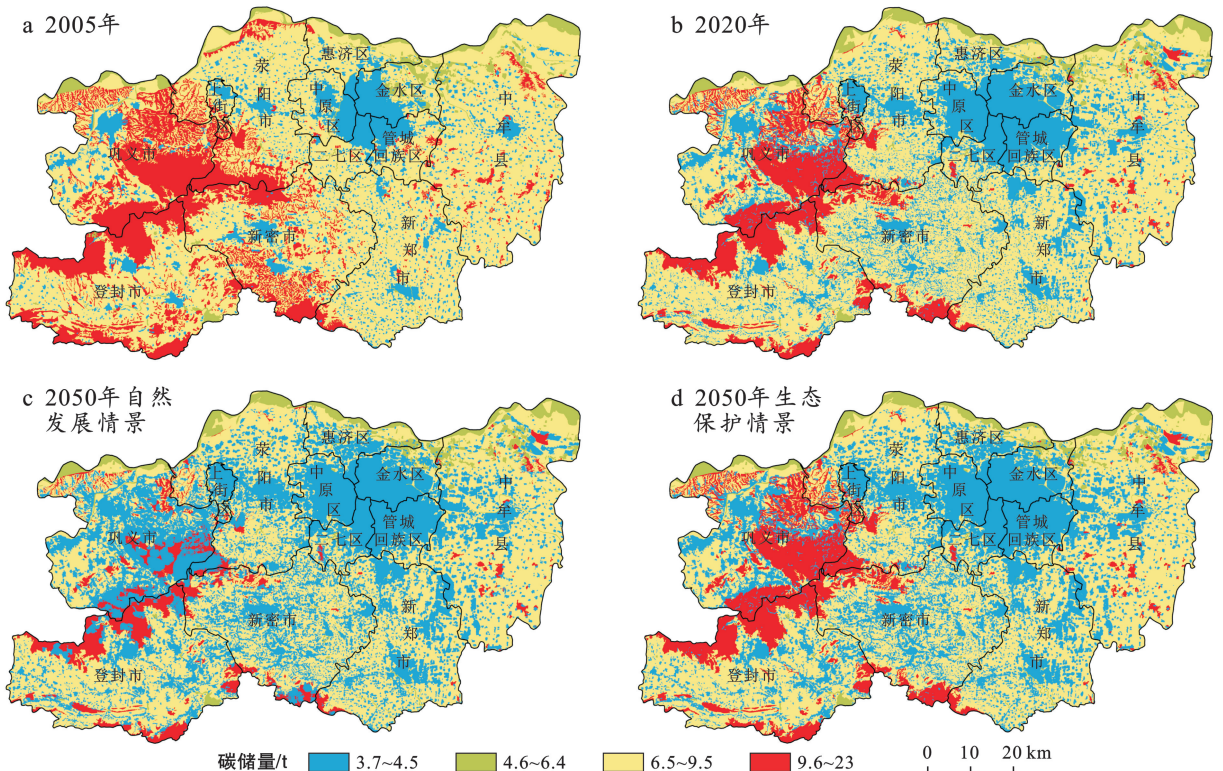


图 5 2005—2050 年郑州市碳储量空间分布

Fig.5 Spatial distribution of carbon storage in Zhengzhou City during 2005—2050

从空间分布来看,碳储量高值区主要集中分布在西部巩义、新密、登封市,少部分位于东部中牟县内;碳储量中值区分布较为均衡;碳储量低值区主要集中

分布于郑州市中心城区和新郑市,2005—2020 年,郑州市碳储量空间分布总体呈“西高东低,南北中等,中部低”的特点。结合郑州市土地利用,碳储量中、高值

区与林地和草地空间分布基本一致,低值区则与建设用地和水域等空间分布相吻合。因此,土地利用类型

与碳储量密切相关,二者存在较强一致性,其变化对区域碳储量具有显著影响。

表 6 2005—2050 年郑州市不同土地利用类型碳储量

Table 6 Carbon storage of different land use types in Zhengzhou City during 2005—2050

土地利用类型	2005 年		2020 年		2050 年			
	面积/km ²	比例%	面积/km ²	比例%	自然发展情景		生态保护情景	
					面积/km ²	比例%	面积/km ²	比例%
耕地	34.12	51.75	30.13	53.13	26.08	53.83	26.08	47.49
林地	8.00	12.13	5.93	10.46	3.41	7.03	6.07	11.05
草地	17.59	26.67	9.96	17.57	3.91	8.07	9.73	17.72
水域	1.96	2.98	2.20	3.88	2.28	4.70	2.20	4.01
建设用地	4.24	6.44	8.49	14.97	12.78	26.37	10.84	19.74
未利用地	0.02	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
总计	65.93	100.00	56.72	100.00	48.46	100.00	54.92	100.00

2.2.2 2050 年不同情景下郑州市碳储量变化 本研究基于 PLUS 模型获取 2050 年不同情景下土地利用数据,结合 GIS 和 InVEST 模型评估得到不同情景下郑州市碳储量空间分布格局。在延续 2005—2020 年土地利用发展规律下,自然发展情景下碳储量仍呈减少趋势,各个地类之间相互转化较不均衡,转出和转入方向单一。区域总碳储量相较于 2020 年减少了 8.27×10^6 t,其中,草地减量最高,减少了 6.05×10^6 t;其次是耕地,减少了 4.05×10^6 t;水域面积虽有所增加,但碳储量变化不明显,仅增加 0.08×10^6 t,高碳密度的生态用地,其增减对区域总碳储量有着直接影响。从空间分布来看,碳储量高值区仍分布在西部巩义市和登封市内,但其破碎化程度加深,低值区范围扩大。

生态保护情景下,2050 年的碳储量在 2020 年的基础上减少了 1.80×10^6 t,相较于自然发展情景减速放缓,但仍有大量耕地和林地继续转为建设用地。其中,耕地作为所有地类中最主要的碳储量来源,提供了 2.61×10^7 t;林地和草地相比自然发展情景碳储量增长 2.66×10^6 , 5.82×10^6 t,对生态用地采取的保护措施取得了显著效果,较好的发挥了林地、草地等生态用地的碳汇作用,能够有效减少碳储量损失,恢复区域的碳储量水平,提高生态价值。

2.2.3 2005—2050 年郑州市碳储量分区变化 在 GIS 中将郑州市 4 期碳储量进行分区统计,使用自然断点法将其划分为 5 类(图 6),分别为低碳储量区、较低碳储量区、中等碳储量区、较高碳储量区和高碳储量区。2005—2020 年中,二七区由低碳储量区升级为较低碳储量区,中牟县由较高碳储量区升级为高碳储量区,其余各区县未发生变化。自然发展情景下,荥阳市由中等碳储量区升级为较高碳储量区,巩义市由高碳储量区降为较高碳储量区;生态保护情景下与

2020 年碳储量分区情况基本一致,仅有二七区由较低碳储量区变为低碳储量区。在 4 期碳储量分区统计中,登封市稳定保持在高碳储量区,原因在于耕地、林地作为登封市优势地类,煤炭、水泥和耐材等矿产资源丰富,在生态保护情景下,东部山区和北部嵩山山地的自然生态环境得到较好保护。

2.3 郑州市碳储量空间自相关分析

为进一步探究郑州市碳储量空间分布,本文采用莫兰指数分析县区行政尺度下的空间关联程度。郑州市 2005,2020 年和 2050 年不同情景下碳储量空间 Moran's *I* 值均大于 0,分别为 0.498 0,0.460 3,0.331 8,0.462 9,在空间分布上均表现出聚集现象。为持续分析碳储量空间聚集程度,采用 Getis-Ord G_i^* 进行热点分析。由图 7 可知,2005—2020 年,碳储量热点区域分布在登封、巩义、荥阳、新密市,冷点区域分布在中原、金水、二七、管城回族区和新郑市。至 2020 年,冷点聚集范围扩大,整体表现出“东西高低值集聚差异过大”的特点。2050 年不同情景下冷热点集聚程度具有一定差异性,自然发展情景下,受到建设用地扩张的影响,热点集聚破碎化程度加剧,巩义、登封、荥阳、新密市和中牟县均有分布,东部巩义市、上街区和登封市冷点集聚增多,形成“高值集聚区围绕低值集聚区”的结构分布特点。生态保护情景下,由于东部生态用地得到较好保护,高值集聚区呈集中分布状态。

综上所述,碳储量高低集聚区受到土地利用变化的重要影响,在土地开发程度高的郑州中心城区,仅有较少碳密度高的生态用地为其提供碳储存,因此呈现出低值集聚的分布状态。尽管在生态保护情景下,热点破碎化程度有所缓和,但整体冷热点分布不均,较大区域碳储量表现出无显著聚集分布的特点,有关部门应对其给予重视。

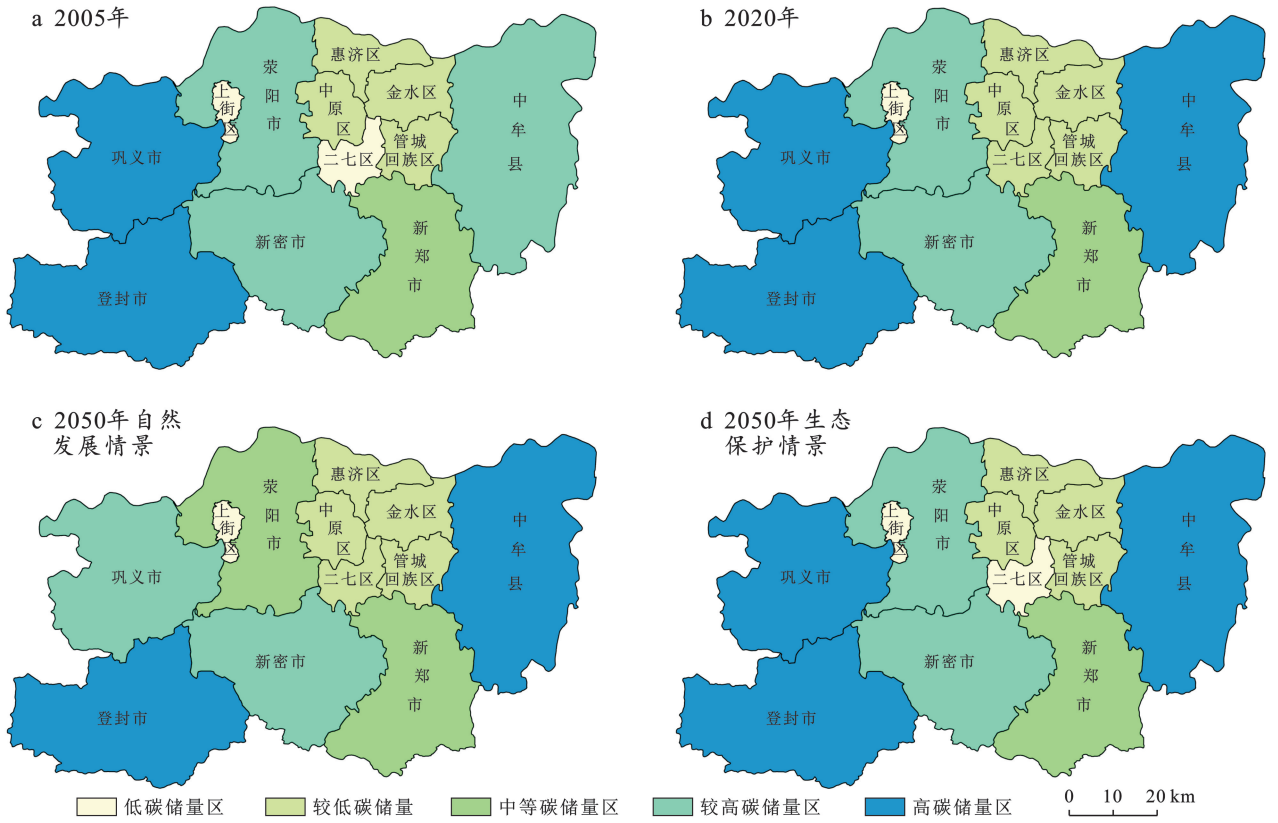


图 6 2005—2050 年郑州市土地利用碳储量分区

Fig.6 Land use carbon storage zoning in Zhengzhou City during 2005—2050

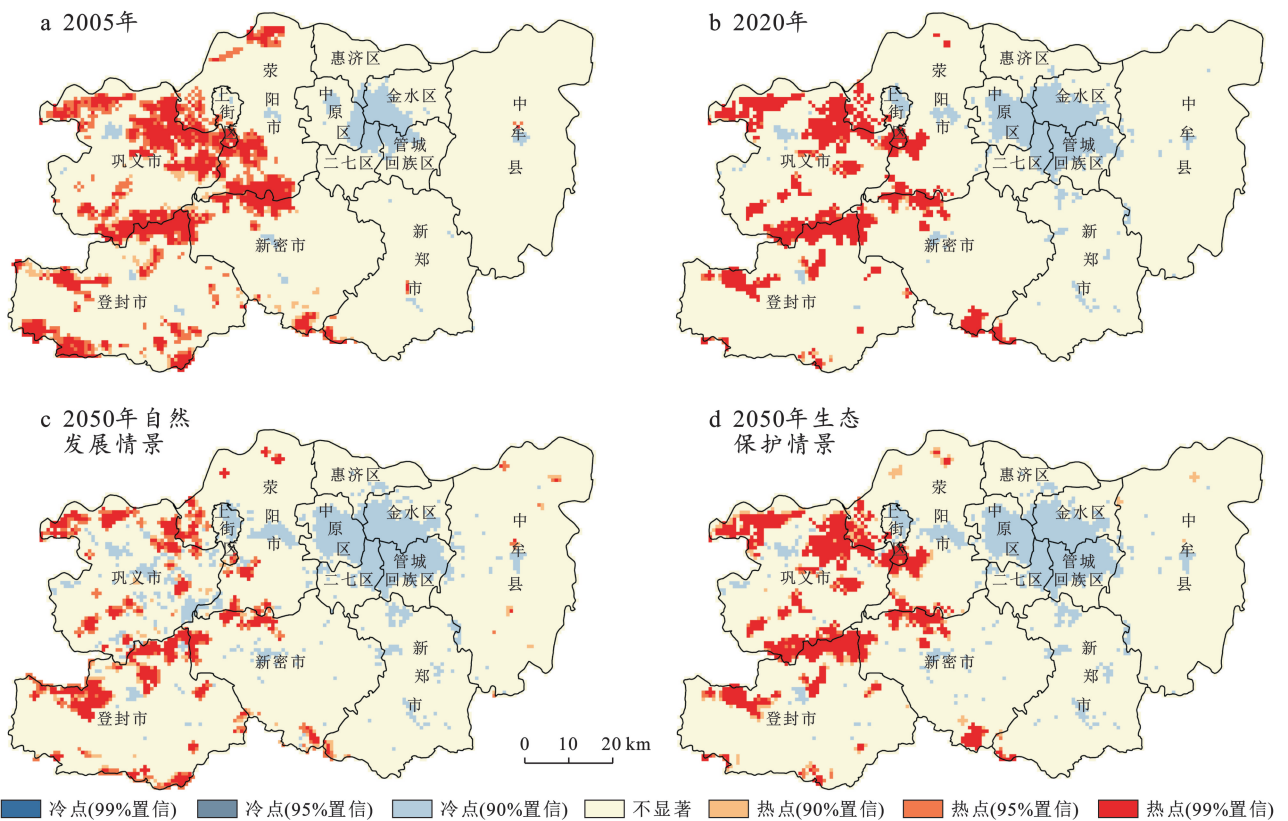


图 7 2005—2050 年郑州市碳储量冷热点分布

Fig.7 Hot and cold spot distribution of carbon storage in Zhengzhou City during 2005—2050

3 讨论

(1) 碳储量时空变化及其影响因素。本研究结果表明,2005—2020年,郑州市建设用地由 1 019.91 km² 增长至 2 040.14 km²,呈现出外延式扩展为主,内涵填充发展为辅的发展态势;15 a 间,郑州市碳储量共减少 9.21×10⁶ t,并呈现逐年下降的趋势。碳储量与土地利用变化情况基本一致。草地和耕地面积分别减少 296.92,559.59 km²,是区域内碳储量变化最大的两个地类,分别减少 7.62×10⁶,3.99×10⁶ t。

由于生产、生活空间需求的增加,耕地转化为建设用地以适应城市建设发展。杨小婉等^[33]研究表明土地城镇化和人口城镇化对区域碳储量具有重要影响,社会经济迅速发展促使建设用地扩张导致耕地和林地等生态用地面积减少,直接影响区域碳储量并危及生态安全;周汝波等^[34]研究也表明区域内林地、草地等生态用地的转出是碳储量减少的重要原因之一,与本研究成果相互印证。2005年之后,郑州市在加快国家中心城市建设和打造高质量发展区域增长极的背景下,城镇用地面积扩张加速,耕地转入建设用地 1 004.98 km²,随着南水北调中线工程完成,使水域面积有所增加。在今后发展中,应注重土地的集约高效利用,重点管控高碳储量区林地、草地的转出,发挥生态用地的碳汇作用。

基于精度检验,验证结果显示 Fom 系数为 0.253 5,满足研究要求,即通过模拟 2050 年不同情景的土地利用类型空间分布和碳储量功能,结合空间自相关分析,可知在自然发展情景和生态保护情景下因建设用地扩张,不断侵占生态用地,导致区域碳储量减少且陆地生态系统服务功能减弱。相较于自然发展情景,生态保护情景下的碳储量增加 6.46×10⁶ t,主要原因在于模拟过程中加入环境保护政策,黄河湿地自然保护区和嵩山生态保护区在一定程度上约束了人类对生态用地的破坏^[35],有助优化区域城市空间发展格局和土地利用结构,提高陆地生态系统碳储量。未来郑州市西部山区应重视林草管控,预防城乡建设的持续扩张侵占生态用地,完善生态保护规划政策的规范规程,减少人类活动干扰对生态造成的环境污染及破坏,保证区域生态社会的可持续发展。

(2) 不确定性及不足。本研究运用 InVEST 模型和 PLUS 模型能较为清晰地反映和预测郑州市碳储量时空变化,但仍存在一些不确定因素。①PLUS 模型中存在部分经验性参数设置,虽有助于达到理想模拟状态,但具有一定主观性;②各类土地利用的碳密度缺少年际和区域的变化,弱化了碳循环具体过

程,得到的碳储量变化仅由土地利用类型的转换引起,与实际碳储量存在一定误差;对于碳库数据的选择,在前人数据的基础上仅加入生物量因子进行修正,未考虑到气候变化等对碳密度的影响;③土地利用变化数据多基于遥感影像解译,在处理过程中存在主观因素。

4 结论

(1) 2005—2020年郑州市土地利用变化主要为耕地、林地、草地,未利用地面积减少,水域和建设用地增加,国土空间开发格局基本形成。2050年不同发展情景下,建设用地增长率分别为 13.7%和 7.5%,相较于自然发展情景,生态保护情景下建设用地扩张受到遏制,生态用地发展整体向优。

(2) 2005—2020年,郑州市碳储量空间分布与国土空间开发格局吻合,整体呈现出“西高东低,南北中等,中部低”的特点。受到土地利用类型的直接影响,碳储量中高值区与具备生态功能的耕地、草地和林地分布基本一致,低值区则与建设用地和水域等空间分布一致。相较于 2020年,自然发展情景下区域总碳储量减少了 8.27×10⁶ t,而生态保护情景下的碳储量减速放缓。耕地作为最主要的碳储量来源,在 4 期碳储量分区统计中,登封市稳定保持在高碳储量区。

(3) 在 4 期土地利用数据当中,研究区的巩义市和登封市始终为碳储量集聚程度较高的区域,在未来发展建设过程中,可将其作为郑州市的核心碳储量区^[36],采用生态保护措施,保障碳储量高聚集区的生态资源,同时重视生态用地发挥的碳汇功能,在建设用地基本增长的前提下提高集约能力,为应对气候变化作出贡献,努力达到碳达峰、碳中和的政策要求。

[参 考 文 献]

- [1] 侯宁,何继新,朱学群.陆地生态系统碳循环研究述评[J].生态经济,2009,25(10):140-143.
- [2] Chuai Xiaowei, Huang Xianjin, Lai Li, et al. Land use structure optimization based on carbon storage in several regional terrestrial ecosystems across China [J]. Environmental Science & Policy, 2013,25:50-61.
- [3] 朱文博,张静静,崔耀平,等.基于土地利用变化情景的生态系统碳储量评估:以太行山淇河流域为例[J].地理学报,2019,74(3):446-459.
- [4] 段璇瑜,龚文峰,孙雨欣,等.海南岛海岸带土地利用变化及其对碳储量时空演变的影响[J].水土保持通报,2022,42(5):301-311.
- [5] Zhu Guofeng, Qiu Dongdong, Zhang Zhuanyia, et al. Land-use changes lead to a decrease in carbon storage in arid region, China [J]. Ecological Indicators, 2021,127:

- 107770.
- [6] 孙清芳,贾立明,刘玉龙,等.中国森林植被与土壤碳储量估算研究进展[J].环境化学,2016,35(8):1741-1744.
- [7] 遇蕾,任国玉.过去陆地生态系统碳储量估算研究[J].地理科学进展,2007,26(3):68-79.
- [8] Raqeeb A, Saleem A, Ansari L, et al. Assessment of land use cover changes, carbon sequestration and carbon stock in dry temperate forests of Chilas watershed, Gilgit-Baltistan [J]. *Brazilian Journal of Biology*, 2024, 84:e25382.
- [9] 卢雅焱,徐晓亮,李基才,等.基于 InVEST 模型的新疆天山碳储量时空演变研究[J].干旱区研究,2022,39(6):1896-1906.
- [10] 赫晓慧,徐雅婷,范学峰,等.中原城市群区域碳储量的时空变化和预测研究[J].中国环境科学,2022,42(6):2965-2976.
- [11] 任胤铭,刘小平,许晓聪,等.基于 FLUS-InVEST 模型的京津冀多情景土地利用变化模拟及其对生态系统服务功能的影响.生态学报,2023,43(11):4473-4487.
- [12] Qin Menglin, Zhao Yincheng, Liu Yuting, et al. Multi-scenario simulation for 2060 and driving factors of the eco-spatial carbon sink in the Beibu Gulf urban agglomeration, China [J]. *Chinese Geographical Science*, 2023,33(1):85-101.
- [13] 雒舒琪,胡晓萌,孙媛,等.耦合 PLUS-InVEST 模型的多情景土地利用变化及其对碳储量影响[J].中国生态农业学报(中英文),2023,31(2):300-314.
- [14] 孙欣欣,薛建辉,董丽娜.基于 PLUS 模型和 InVEST 模型的南京市生态系统碳储量时空变化与预测[J].生态与农村环境学报,2023,39(1):41-51.
- [15] Yu Yang, Guo Bing, Wang Chenglong, et al. Carbon storage simulation and analysis in Beijing-Tianjin-Hebei region based on CA-plus model under dual-carbon background [J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2023,14(1):2173661.
- [16] 刘晓娟,黎夏,梁迅,等.基于 FLUS-InVEST 模型的中国未来土地利用变化及其对碳储量影响的模拟[J].热带地理,2019,39(3):397-409.
- [17] Peng Shouzhong, Ding Yongxia, Liu Wenzhao, et al. 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017 [J]. *Earth System Science Data*, 2019,11(4):1931-1946.
- [18] 郑州市人民政府关于印发森林郑州生态建设规划(2020—2035 年)的通知[J].郑州市人民政府公报,2020(8):6-34.
- [19] Liang Xun, Guan Qingfeng, Clarke K, 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*, 2020,85:101569.
- [20] 张晓瑶,张潇,李冬花,等.城市土地利用变化对生态系统服务价值影响的多情景模拟:以深圳市为例[J].生态学报,2022,42(6):2086-2097.
- [21] 摆万奇,赵士洞.土地利用变化驱动力系统分析[J].资源科学,2001,23(3):39-41.
- [22] 郑州市自然资源和规划局.郑州市国土空间总体规划(2021—2035 年)[EB/OL].<https://zrzyhghj.zhengzhou.gov.cn/ztgh/6752651.jhtml>, (2022-10-15)[2023-05-24].
- [23] Shar P R, Tallis H T, Rickett T, et al. InVEST 3.2.0 User's Guide[M]. Stanford: The Natural Capital Project,2015.
- [24] 徐丽,何念鹏,于贵瑞.2010s 中国陆地生态系统碳密度数据集[J].中国科学数据,2019,4(1):90-96.
- [25] Fang Jingyun, Wang Zhangming. Forest biomass estimation at regional and global levels, with special reference to China's forest biomass [J]. *Ecological Research*, 2001,16(3):587-592.
- [26] 范钦栋.郑汴一体化核心区域景观格局变化对生态系统服务的影响研究[D].河南 开封:河南大学,2016.
- [27] 张育诚,韩念龙,胡珂,等.海南岛中部山区土地利用变化对碳储量时空分异的影响[J].南京林业大学学报(自然科学版),2023,47(2):115-122.
- [28] 朴世龙,方精云,贺金生,等.中国草地植被生物量及其空间分布格局[J].植物生态学报,2004,28(4):491-498.
- [29] Mokany K, Raison R J, Prokushkin A S. Critical analysis of root: shoot ratios in terrestrial biomes [J]. *Global Change Biology*, 2006,12(1):84-96.
- [30] 左倩云,吴娇.奉节县土地利用景观格局分布及影响因素空间相关性分析[J].农村经济与科技,2022,33(17):34-37.
- [31] Getis A, Ord J K. The analysis of spatial association by use of distance statistics [J]. *Geographical Analysis*, 2010,24(3):189-206.
- [32] 周爱梅.郑州城市化进程中城市用地规模扩展研究[D].河南 开封:河南大学,2009.
- [33] 杨小琬,张丽君,秦耀辰,等.1995 年以来黄河下游碳储量时空变化及驱动因素[J].河南大学学报(自然科学版),2022,52(1):20-33.
- [34] 周汝波,林媚珍,吴卓,等.珠江西岸生态系统碳储量对土地利用变化的响应[J].生态科学,2018,37(6):175-183.
- [35] 王海稳.太行山区不同土地利用方式下生态系统碳储量研究[D].河北 保定:河北农业大学,2007.
- [36] 林彤,杨木壮,吴大放,等.基于 InVEST-PLUS 模型的碳储量空间关联性及其预测:以广东省为例[J].中国环境科学,2022,42(10):4827-4839.