

基于 PLUS-InVEST 模型的江西省萍乡市 碳储量时空演变与多情景模拟

赖玉莹¹, 童锦文², 陈志平¹, 罗志军²

(1. 江西有色地质矿产勘查开发院, 江西南昌 330001;

2. 江西农业大学 国土资源与环境学院, 江西南昌 330045)

摘要: [目的] 分析区域土地利用和碳储量的时空演变特征, 并预测未来土地利用和碳储量变化, 为实现“双碳”目标和可持续发展提供科学依据。[方法] 以江西省萍乡市为例, 通过冷热点分析, 识别需要保护修复的区域; 采用 PLUS 模型, 预测 2035 年不同情景下的土地利用和碳储量状况。[结果] ① 2010—2024 年, 萍乡市耕地和人造地表扩张, 侵占了碳密度较高的林地, 导致碳储量减少 2.29×10^6 t; ② 萍乡市中南部有 2 个热点强度较高的区域, 该区域及周边的碳储量显著高于萍乡市的平均水平; ③ 在自然发展情景、耕地保护情景、生态保护情景和城镇发展情景的预测中, 生态保护情景的碳储量仅减少 0.24%, 其他 3 种情景由于中南部林地内部新增的零散人造地表而有明显减少。[结论] 萍乡市因人造地表与耕地扩张导致林地减少、碳储量下降。需保护中南部林地, 优化人造地表布局, 使林地集中连片, 提升固碳效率。

关键词: 碳储量; 多情景模拟; PLUS-InVEST 模型; 冷热点分析; 萍乡市

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2026)02-0295-11

中图分类号: X171.1, F301.24

文献参数: 赖玉莹, 童锦文, 陈志平, 等. 基于 PLUS-InVEST 模型的江西省萍乡市碳储量时空演变与多情景模拟[J]. 水土保持通报, 2026, 46(2): 295-305. Lai Yuying, Tong Jinwen, Chen Zhiping, et al. Spatiotemporal evolution and multi-scenario simulation of carbon storage in Pingxiang City, Jiangxi Province based on PLUS-InVEST model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(2): 295-305.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.02.012

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.02.012

Spatiotemporal evolution and multi-scenario simulation of carbon storage in Pingxiang City, Jiangxi Province based on PLUS-InVEST model

Lai Yuying¹, Tong Jinwen², Chen Zhiping¹, Luo Zhijun²

(1. Jiangxi Nonferrous Geological Mineral Exploration and Development Institute, Nanchang, Jiangxi 330001, China;

2. College of Land Resources and Environment, Jiangxi Agricultural University, Nanchang, Jiangxi 330045, China)

Abstract: [Objective] The spatiotemporal evolution characteristics of regional land use and carbon storage were analyzed, in order to predict future changes in land use and carbon storage, thereby provide a scientific basis for achieving the ‘dual carbon’ goals and sustainable development. [Methods] Taking Pingxiang City as a case study, this study analyzed the spatiotemporal evolution characteristics of land use and carbon storage, explored the impact of land use change on carbon storage, and identified areas requiring protection and restoration through hot and cold spot analysis. Subsequently, the PLUS model was used to predict land use and carbon storage under different scenarios in 2035. [Results] ① From 2010 to 2024, the expansion of cultivated land and artificial surfaces encroached on forests with higher carbon density, leading to a reduction of carbon storage of 2.29×10^6 t. ② Two areas with relatively high hot spot intensity in the central-southern region were fragmented. Measures should be taken to make them more concentrated to improve carbon sequestration efficiency. ③ Among the predictions under the natural development, cultivated land protection, ecological protection, and urban development scenarios, carbon storage under the ecological protection scenario decreased by only 0.24%, while

收稿日期: 2025-09-12

修回日期: 2025-10-30

采用日期: 2025-11-16

资助项目: 自然资源部环鄱阳湖区域矿山环境监测与治理重点实验室开放基金“国土空间生态修复下流域废弃矿山土地整治研究”(MEMI-2021-2022-16)

第一作者: 赖玉莹(1988—), 女(汉族), 江西省萍乡市人, 硕士, 高级工程师, 主要从事土地规划与利用研究。Email: 56648538@qq.com。

通信作者: 罗志军(1976—), 男(汉族), 江西省新余市人, 博士, 教授, 主要从事土地管理研究。Email: luozj10@163.com。

the other three scenarios showed significant reductions due to newly scattered artificial surfaces within forests in the central-southern region. [Conclusion] In Pingxiang City, the expansion of artificial surfaces and cultivated land leads to a reduction in forests and a decline in carbon storage. Therefore, it is necessary to protect forests in the central-southern region, optimize the layout of artificial surfaces, and minimize carbon loss under the ecological protection scenario.

Keywords: carbon storage; multi-scenario simulation; PLUS-InVEST model; hot and cold spot analysis; Pingxiang City

全球气候变暖已成为国际社会高度关注的重大环境议题,减排与碳汇能力建设也成为应对气候变化的核心研究方向^[1]。近年来,多国相继提出“净零碳排放”目标,旨在实现人为排放量与生态系统吸收量之间的平衡^[2]。立足自身碳排放实际情况,中国将碳减排工作纳入实现可持续发展的重要议程,多措并举推动落实^[3]。2020年“双碳”目标的明确提出,使碳储量的精准测算和有效提升成为推动减排进程的关键环节^[4]。影响区域碳储量的一个重要因素是区域土地利用类型,每种土地利用类型都有不同的碳密度,并且土地利用类型之间的相互转换也会伴随着碳交换^[5],因此,研究土地利用时空演变特征有助于了解区域碳储量的时空变化特征,对未来土地利用类型的预测可为分析碳储量的变化趋势提供依据,从而为相关部门进行碳排放管理提供参考,对区域合理高效利用有限的土地资源实现碳减排具有现实意义。

目前,区域未来碳储量的评估都是基于预测的未来土地利用状况,对未来土地利用状况的预测多采用模型模拟法^[6-8],包括但不限于CA-Markov模型^[9]、FLUS模型^[10]和PLUS模型等^[11]。CA-Markov模型融合了元胞自动机与马尔科夫链,在长时序土地利用预测方面表现出较强优势,但其模拟流程相对复杂,对景观斑块演变细节的响应能力有限^[12]。FLUS模型仅需单一时期的土地利用数据,借助自适应惯性竞争机制,能够较好地反映不同地类之间转化的不确定性与复杂性,且操作简便,然而,该模型仅能提供各地类的整体适宜性概率,在对土地利用变化内在机制的解析方面存在不足^[13]。相比之下,PLUS模型不仅模拟精度较高,数据处理效率突出,还能有效模拟多种地类的演化过程,深入挖掘土地利用扩张的驱动因素,并支持对规划政策响应的情景研究^[14-15]。

随着对碳储量研究的深入,也有学者把不同的模型与这些预测模型进行结合从而使研究结果更加准确,例如InVEST模型因其数据需求少且运行速度快的优点,在长时序和大尺度碳储量评估中得到了广泛应用^[16-17],如国内外学者将InVEST模型应用于

不同情景^[18-19]和不同尺度^[20-21]下的碳储量评估。近年来,诸多学者将土地利用模拟模型与InVEST模型相结合,用于碳储量的预测与分析,其中,PLUS-InVEST耦合模型因其广泛的应用与验证,已成为一种行之有效的研究工具,该模型融合了过程驱动与统计方法,兼具模拟精度高和数据处理速度快的特点,能够有效模拟多土地类型复杂演变过程,从而为社会经济发展与土地资源保护提供科学依据,助力推动土地资源的可持续利用^[22]。陈红香等^[23]、陈秋计等^[24]和曹振江等^[12]利用PLUS-InVEST耦合模型分别对不同地区的碳储量进行研究,证明了PLUS-InVEST模型的可靠性。然而,现有研究中,大多单一地利用PLUS-InVEST耦合模型对区域碳储量进行分析,在此基础上引入空间自相关分析和冷热点分析的研究较少。

因此,本文以萍乡市为例,分析土地利用和碳储量的时空演变特征,探讨土地利用变化对碳储量的影响。对2010,2015,2020和2024年的碳储量进行冷热点分析,并通过ArcGIS软件显示冷点区域和热点区域以及冷热点的强度,从而为萍乡市确定核心碳库,发现潜在碳源以及进行生态修复工程提供有利信息。基于PLUS模型预测2035年不同情景下的土地利用和碳储量状况,以期萍乡市实现“双碳”目标和可持续发展提供科学依据。

1 研究区和数据来源

1.1 研究区概况

萍乡市地处江西省西部,东与宜春市、南与吉安市、西与湖南省株洲市、北与湖南省浏阳市接壤。属江南丘陵地区,南北高中间略低,东南部有武功山脉,北部杨岐山至大屏山一带地势较高,西部地势较低。境内水系发达,有袁水、草水、栗水、萍水、莲水等5条主要河流,丰富的水资源为农业灌溉、工业生产、水运交通和居民生活提供了重要支撑。全市林地面积约2 100 km²,活立木蓄积量超1.20×10⁷ m³,年固碳量约1.00×10⁶ t。区域内的武功山高山草甸土壤有机碳密度高,是独特的高海拔碳汇区。近年来,萍乡市正从传统资源型城市向生态城市转型,森

林、湿地、修复矿区构成核心碳汇体系,未来需持续提升森林质量、深化矿区土壤固碳、挖掘竹林碳汇潜力,助力江西省实现“双碳”目标。

1.2 数据来源

参考已有研究^[6-11]并考虑萍乡市实际情况,选取DEM、坡度、坡向、年降水量、NDVI、人口、GDP、离铁路距离、离高速公路距离、离普通公路距离、离河流距离等11个指标作为模拟未来土地利用变化的关键驱动因素。本研究采用的数据包括2010,2015,2020,2024年4个时期。其中,土地利用数据来源于武汉大学杨杰教授和黄昕教授团队公布的全国土地覆盖数据集;DEM、坡度、坡向数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>);年降水量和NDVI数据来源于青藏高原数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn/>);离铁路、高速公路、普通公路、河流的距离数据来源于OpenStreetMap(<https://www.openstreetmap.org/>),人口和GDP数据来源于萍乡市统计年鉴。为了确保分析过程中空间数据的一致性和可比性,所有数据均统一在WGS_1984_UTM_Zone_50 N投影坐标系下进行处理和分析。

2 研究方法

2.1 碳储量计算

运用InVEST软件中的Carbon Storage and Sequestration模块,以土地利用类型数据及其相对应的碳库为基础,对萍乡市的碳储量进行计算(表1)。碳库的具体指标根据已有研究^[25-28]和萍乡市实际情况进行设定。

表1 土地利用类型碳库数据
Table 1 Carbon pool data by land use type

| 土地利用类型 | 碳密度/(t·hm ⁻²) | | | |
|--------|---------------------------|-------|--------|-------|
| | 地上 | 地下 | 土壤 | 死亡有机物 |
| 耕地 | 12.06 | 1.46 | 85.44 | 0.04 |
| 林地 | 31.57 | 6.48 | 132.10 | 4.64 |
| 灌木 | 12.15 | 29.51 | 69.09 | 3.43 |
| 草地 | 3.16 | 5.66 | 90.92 | 1.36 |
| 水体 | 4.49 | 0.52 | 66.20 | 0.25 |
| 荒地 | 0.88 | 0.01 | 26.38 | 0.01 |
| 人造地表 | 0.72 | 0.01 | 48.07 | 0.00 |

2.2 空间自相关分析

采用莫兰指数进行空间自相关分析。莫兰指数是一种用于衡量空间自相关的统计量。它用于检测空间数据中的聚集模式或离散模式,判断地理现象

在空间上是否存在相关性。计算公式为

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

式中: n 为空间单元的数量; x_i 和 x_j 为第 i 和第 j 个空间单元的观测值; \bar{x} 为所有观测值的平均值; ω_{ij} 为空间权重矩阵的元素,表示单元 i 和 j 的空间关系。

2.3 冷热点分析

冷热点分析是一种空间统计方法,用于识别地理空间中显著聚集的高值或低值区域,即热点区域和冷点区域,广泛应用于社会、经济、环境、公共卫生等领域,其核心是通过局部空间自相关检验,确定统计显著性的聚集模式^[29]。本研究采用ArcGIS软件中的热点分析工具完成对试验结果的冷热点分析,计算公式为

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n h_{ij} a_j - \bar{A} \sum_{j=1}^n h_{ij}}{S \times \sqrt{\frac{n \sum_{j=1}^n h_{ij}^2 - \left(\sum_{j=1}^n h_{ij} \right)^2}{n-1}}} \quad (2)$$

式中: G_i^* 表示冷热点的空间聚类度,其值 <0 和 >0 分别表示冷点和热点区域; a_j 为第 j 个空间单元的观测值; h_{ij} 为空间权重矩阵; \bar{A} 为所有观测值的均值; S 为标准差; n 为空间单元总数。

G_i Bin用于直观标识各要素统计显著性的热点、冷点及无显著聚类区域。 $|G_i^*| > 2.56$, $1.96 < |G_i^*| \leq 2.56$ 和 $1.56 < |G_i^*| \leq 1.96$ 对应的 G_i Bin值分别为3和-3,2和-2,1和-1。

2.4 基于PLUS模型的土地利用多情景模拟

PLUS模型是一种基于斑块的土地利用变化模拟模型,通常用来预测未来土地利用状况,它结合了机器学习、空间统计和元胞自动机,能够更加精细地模拟复杂的人类-自然交互作用下的土地利用变化。

2.4.1 精度验证

以2015年和2020年的土地利用数据为基础,运用PLUS模型预测2024年的土地利用状况,再将预测结果与2024年的实际土地利用状况进行对比,通过对比结果的kappa系数确定模型预测的准确性,确保多情景预测结果的可靠性。

2.4.2 多情景设置

本研究将2035年土地利用的多情景模拟分为4种:自然发展情景、耕地保护情景、生态保护情景和城镇发展情景。自然保护情景是根据2010—2024年的土地利用变化趋势不做任何限制的进行预测;耕

地保护情景是对耕地的转出数量进行严格限制,同时增加林地、草地等地类对耕地的转入;生态保护情景是限制林地、草地和灌木地的转出,增加其他用地对林地、草地和灌木地的转入;城镇发展情景是限制城镇建设用地的转出,增加未利用地、荒地等用地对城镇建设用地的转入。

3 结果与分析

3.1 土地利用变化特征

2010—2024年,研究区耕地、人造地和水体面积整体呈增加趋势(表2,表3,表4)。耕地面积变化是所有地类中最明显的,从2010年的960.22 km²增加到2024年的1083.51 km²,增加了123.29 km²,其中,2010—2015年增长幅度最大,增加了105.27 km²;

2015—2020年增加趋势放缓,仅增加了37.78 km²;2020—2024年耕地面积出现小幅下降。人造地面积呈持续增大的趋势,其变化过程较为平缓,由2010年的115.51 km²增加到2024年的194.34 km²,增加了78.83 km²,其中,2010—2015年增加了32.39 km²,2015—2020年增加了25.96 km²,2020—2024年增加了20.70 km²。2010—2024年水体面积经历了先增加后减小的变化过程,其中,2010—2015年增加了1.09 km²,2015—2020年减小了0.52 km²,2020—2024年减小了0.30 km²。2010—2024年,林地面积呈持续减小的趋势,其中,2010—2015年减小幅度最大,面积减小138.93 km²,2015—2020年减小了63.28 km²,2020—2024年减小了6.63 km²,可以看出,减小幅度在不断下降。草地、荒地和灌木地面积变化极小。

表2 2010—2015年萍乡市土地利用转移矩阵

Table 2 Land use transfer matrix at Pingxiang City (2010—2015)

单位:km²

| 土地利用类型 | 2015年 | | | | | | | 总计 |
|-------------|----------|----------|------|------|-------|------|--------|----------|
| | 耕地 | 林地 | 灌木 | 草地 | 水体 | 荒地 | 人造地表 | |
| 2010年 耕地 | 916.32 | 16.39 | 0.00 | 0.34 | 1.68 | 0.01 | 25.48 | 960.22 |
| 林地 | 148.47 | 2 587.68 | 0.03 | 0.02 | 0.03 | 0.00 | 6.81 | 2 743.04 |
| 灌木 | 0.01 | 0.00 | 0.12 | 0.10 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.23 |
| 草地 | 0.06 | 0.01 | 0.00 | 0.19 | 0.00 | 0.00 | 0.14 | 0.40 |
| 水体 | 0.62 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 9.32 | 0.00 | 0.10 | 10.06 |
| 荒地 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 人造地表 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.13 | 0.00 | 115.38 | 115.51 |
| 总计 | 1 065.48 | 2 604.11 | 0.16 | 0.64 | 11.15 | 0.01 | 147.91 | 3 829.46 |

表3 2015—2020年萍乡市土地利用转移矩阵

Table 3 Land use transfer matrix at Pingxiang City (2015—2020)

单位:km²

| 土地利用类型 | 2020年 | | | | | | | 总计 |
|-------------|----------|----------|------|------|-------|------|--------|----------|
| | 耕地 | 林地 | 灌木 | 草地 | 水体 | 荒地 | 人造地表 | |
| 2015年 耕地 | 1 002.86 | 39.42 | 0.00 | 0.26 | 0.57 | 0.00 | 22.37 | 1 065.48 |
| 林地 | 99.15 | 2 501.38 | 0.03 | 0.01 | 0.02 | 0.00 | 3.53 | 2 604.11 |
| 灌木 | 0.01 | 0.02 | 0.10 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.16 |
| 草地 | 0.14 | 0.02 | 0.01 | 0.40 | 0.00 | 0.01 | 0.07 | 0.64 |
| 水体 | 1.12 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 9.95 | 0.00 | 0.08 | 11.15 |
| 荒地 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.01 |
| 人造地表 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.10 | 0.00 | 147.81 | 147.91 |
| 总计 | 1 103.27 | 2 540.84 | 0.14 | 0.71 | 10.63 | 0.01 | 173.86 | 3 829.46 |

萍乡市人造地表、耕地和林地面积占比较大,其余用地面积占比极小。人造地表大部分集中在研究区的中部,小部分集中在北部和南部地区,并且由于地势原因,南、北、中3个区域的人造地表都在某一点较为集中,其余部分则以这一点为中心横向蔓延且分布较为零散。耕地多分布在地势较低的区域,并以人造地表为中心向四周扩张,分布格局与人造地

表相似。林地是最大的用地类型,中部地区集中连片,南北部较为零散。2010—2024年,研究区的人造地表和耕地都有明显的扩张趋势,林地的覆盖范围则不断缩小(图1)。

3.2 碳储量变化特征

3.2.1 碳储量时空变化特征

2010—2024年,萍乡市碳储量呈下降趋势(图2),

从 2010 年的 5.81×10^7 t 下降到 2015 年的 5.69×10^7 t, 减少幅度为 2.09%, 共减少了 1.21×10^6 t。2015—2020 年, 碳储量下降趋势较前一时期明显减缓, 从 2015 年的 5.69×10^7 t 下降到 2020 年的 $5.63 \times$

10^7 t, 减少幅度为 1.07%, 共减少了 6.07×10^5 t。2020—2024 年萍乡市的碳储量总量继续减少, 从 2020 年的 5.63×10^7 t 减少到 2024 年的 5.58×10^7 t, 减少幅度为 0.84%, 减少了 4.71×10^5 t。

表 4 2020—2024 年萍乡市土地利用转移矩阵
Table 4 Land use transfer matrix at Pingxiang City (2020—2024)

单位: km²

| 土地利用类型 | 2024 年 | | | | | | | 总计 |
|--------|----------|----------|------|------|-------|------|--------|----------|
| | 耕地 | 林地 | 灌木 | 草地 | 水体 | 荒地 | 人造地表 | |
| 耕地 | 927.41 | 125.73 | 0.05 | 0.33 | 2.33 | 0.01 | 41.92 | 1 097.77 |
| 林地 | 130.51 | 2 387.21 | 0.36 | 0.14 | 0.90 | 0.00 | 3.12 | 2 522.24 |
| 灌木 | 0.01 | 0.04 | 0.07 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.14 |
| 草地 | 0.18 | 0.12 | 0.08 | 0.25 | 0.01 | 0.00 | 0.04 | 0.69 |
| 水体 | 2.72 | 1.04 | 0.00 | 0.00 | 6.58 | 0.00 | 0.24 | 10.58 |
| 荒地 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.01 |
| 人造地表 | 22.69 | 1.46 | 0.00 | 0.01 | 0.46 | 0.00 | 149.01 | 173.64 |
| 总计 | 1 083.51 | 2 515.61 | 0.56 | 0.74 | 10.28 | 0.02 | 194.34 | 3 829.46 |

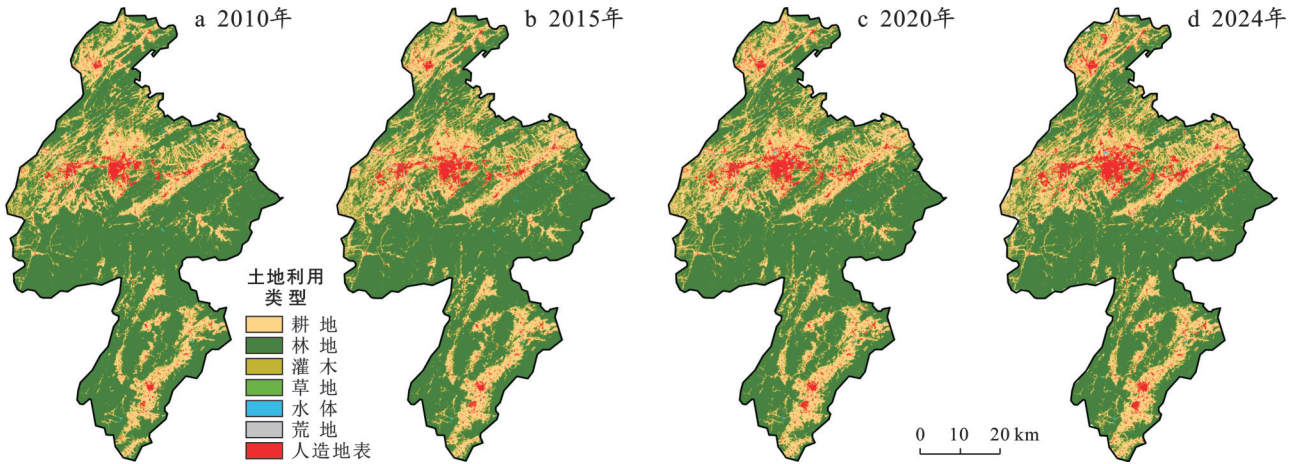


图 1 2010—2024 年萍乡市土地利用时空变化

Fig.1 Spatiotemporal changes in land use at Pingxiang City (2010—2024)

在空间分布上, 萍乡市中部存在面积较大的低值区域, 北部和南部低值区域较少, 同时 2010—2024 年低值区域逐渐向四周扩张(图 2)。碳储量高值区域集中分布在中南部地区, 这与该地区大部分为林地和草地有关, 林地和草地相较于其他地类拥有更显著的固碳能力。

3.2.2 空间自相关分析

采用全局莫兰指数对萍乡市的碳储量进行空间自相关的分析, 探究萍乡市碳储量的空间分布特征。表 5 表明, 2010, 2015, 2020, 2024 年的 Moran's 指数均大于 0, 说明其具有空间正相关性, 同时, p 值小于 0.05, Z 值大于 1.96, 说明萍乡市的碳储量具有明显的空间聚类特征。

3.2.3 土地利用变化对碳储量的影响

将 2010 年和 2024 年的土地利用数据进行对比分

析, 把用地类型发生转变的部分转化为图斑, 并以该图斑和碳储量数据为基础, 提取出各地类之间相互转化对碳储量的影响以及相应碳储量的变化量。

表 5 碳储量空间自相关分析结果
Table 5 Results of spatial autocorrelation analysis of carbon storage

| 年份 | Moran's 指数 | p 值 | Z 值 |
|------|------------|-------|---------|
| 2010 | 0.281 2 | 0 | 8.590 2 |
| 2015 | 0.299 1 | 0 | 9.131 8 |
| 2020 | 0.306 3 | 0 | 9.349 9 |
| 2024 | 0.317 7 | 0 | 9.696 2 |

由表 6 可知, 耕地转为林地增加的碳储量较多, 增加了 5.89×10^5 t, 转为灌木和草地增加较少, 转为水体和人造地表减少的碳储量较多, 分别为 8 400 t

和 3.70×10^4 t, 转为荒地减少较少, 整体表现为减少。林地作为碳储量的重要来源, 其转出导致了碳储量的大量损失, 共减少 2.02×10^6 t。草地转化为人造地表, 碳储量减少了 988.47 t, 对其他地类的转换, 碳储量变化较小, 草地的转出使碳储量整体减少了 689.71 t。人造地表本身不具备生物固碳能力, 其他地类对其转入均导致该区域的碳储量大量减少, 其转出均使碳储量增加, 整体增加了 7.60×10^4 t。灌木、荒地和水体的转出对碳储量的影响分别为减少

2.43×10^5 t、不变和增加 1.80×10^4 t。其中林地和人造地表对碳储量的影响最为显著, 从表 6 可以看出, 林地的变化与碳储量呈正相关, 人造地表的变化与碳储量呈负相关。

2010—2024 年, 萍乡市为了应对经济结构转型的挑战, 同时作为江西省对接长株潭的门户, 需要积极承接产业转移项目落地, 带来工业用地需求, 导致林地被大量占用, 林地面积大幅减少, 人造地表处于增加趋势, 因此萍乡市碳储量整体呈减少的趋势。

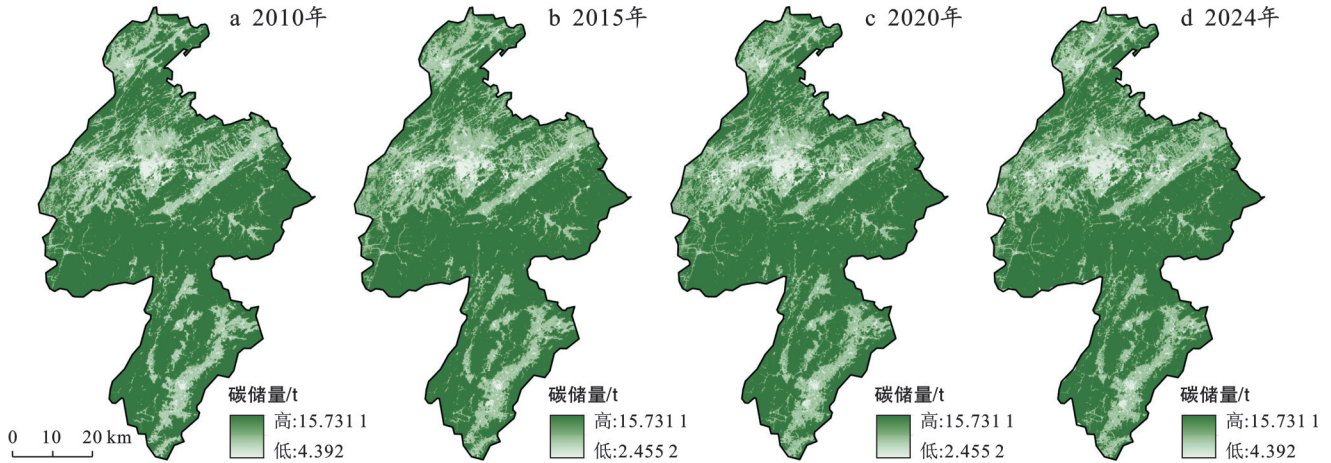


图 2 2010—2024 年萍乡市碳储量时空变化

Fig.2 Spatiotemporal changes in carbon storage at Pingxiang City (2010—2024)

表 6 2010—2024 年萍乡市土地利用类型变化对碳储量的影响

Table 6 Impact of land use type change on carbon storage at Pingxiang City in 2010—2024

单位: t

| 土地利用类型 | 2024 年 | | | | | | |
|--------|---------------|------------|-----------|-----------|------------|--------|-------------|
| | 耕地 | 林地 | 灌木 | 草地 | 水体 | 荒地 | 人造地表 |
| 耕地 | 0.00 | 588 953.59 | 104.04 | 53.71 | -8 381.72 | -77.85 | -370 602.76 |
| 林地 | -2 003 738.86 | 0.00 | -2 247.42 | -2 447.24 | -15 428.20 | 0.00 | -66.38 |
| 灌木 | -243 076.26 | -29.34 | 256.38 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 草地 | -55.33 | -14.88 | 371.40 | 8.24 | 0.00 | -10.67 | -988.47 |
| 水体 | 9 147.57 | 9 560.09 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | -925.89 |
| 荒地 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 人造地表 | 65 789.68 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 10 670.09 | 0.00 | 23.54 |

3.3 基于碳储量的冷热点分析

研究结果(图 3)表明, 2010—2024 年萍乡市热点区域整体变化不大, 在热点区域中, Gi Bin 值为 3 的比例增多, 这可能与生态治理使林地的碳汇能力增强有关。2024 年在萍乡市中北部地区的城市扩张使该地区出现了明显的冷点区域, 其冷点强度逐渐增强, 应当增加对该区域的关注, 采取相应措施避免碳的持续流失。

热点区域主要分布在研究区中南部地区, 且呈现集中连片格局, 而高强度区集中在分布范围的上方, 该区域 Gi Bin 值为 2, 3 的部分占比较多, 说明萍乡市

中南部地区的碳储量存在明显的空间聚集, 该区域及其周边区域的碳储量显著高于整个萍乡市的平均水平, 对于这一区域的林地应实施优先保护措施。冷点区域分布较为零散, 主要分布在研究区域的边缘, 这些区域耕地和人造地表较多, 可以推广保护性耕作或在城镇中培养绿植建设绿廊, 将一些较为零散的碳汇功能区联系起来, 增强区域碳汇的连续性和强度。

3.4 土地利用多情景模拟及碳储量分析

3.4.1 土地利用多情景模拟

以 2010, 2015, 2020, 2024 年的土地利用数据为基础, 运用 PLUS 模型对 2035 年的土地利用情况进

行多情景模拟。为了保证模拟结果的可靠性,需要进行精度验证,利用 2010,2015,2020 年的土地利用数据对 2024 年的土地利用情况进行模拟,并与 2024

年的实际土地利用数据进行对比分析。结果显示, kappa 系数为 0.874 2, 大于 0.75, 说明模拟结果可靠。土地利用多情景模拟结果如图 4 所示。

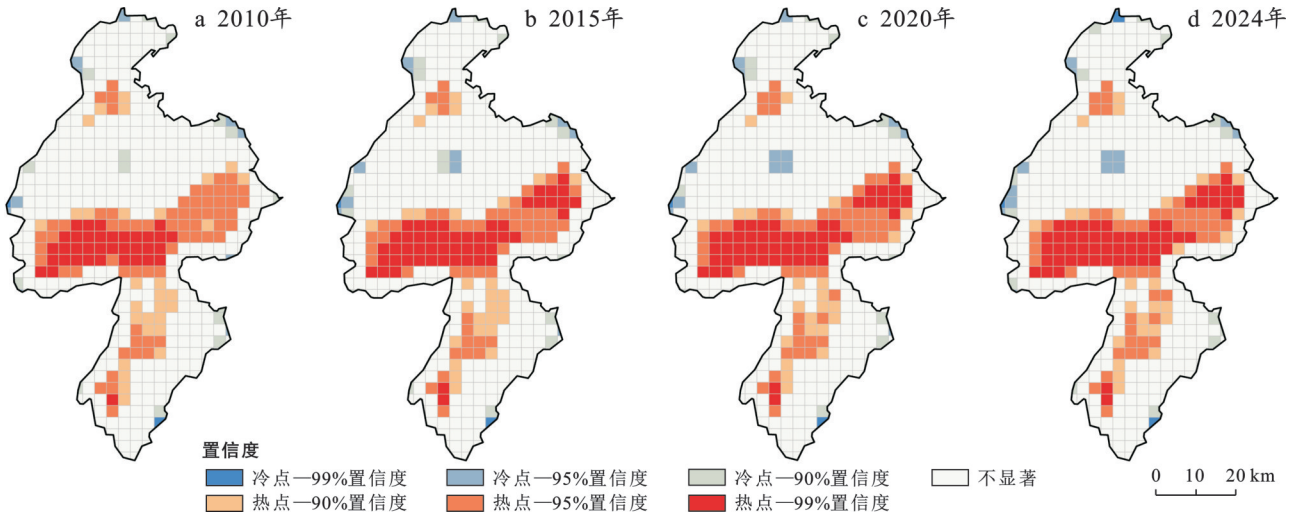


图 3 2010—2024 年萍乡市碳储量冷热点的时空演变

Fig.3 Spatiotemporal evolution of carbon storage hot and cold spots at Pingxiang City (2010—2024)

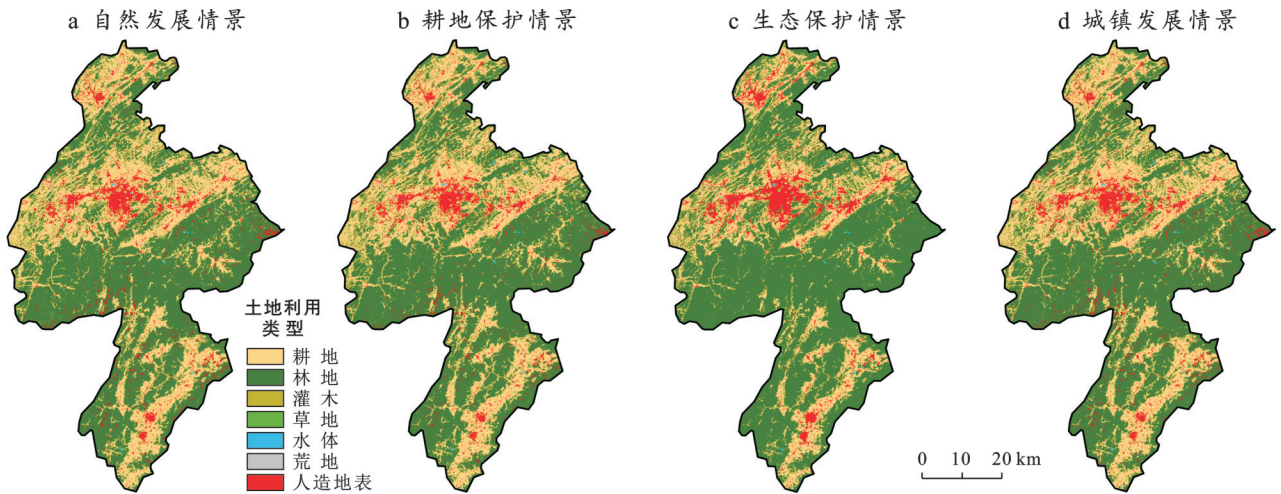


图 4 2035 年萍乡市土地利用多情景模拟

Fig.4 Multi-scenario simulation of land use at Pingxiang City in 2035

自然发展情景下,耕地和人造地表面积扩张,依然集中在研究区中部偏北的区域,南北部区域小量聚集,与 2024 年不同的是中部偏南的区域开始出现零散的人造地表,相较于 2024 年耕地面积增加 6.29%,人造地表面积增加 1.21%,林地延续 2010—2024 年的变化趋势,面积减少了 7.46%。

耕地保护情景下,人造地表增加 0.85%,且从空间上看,人造地表增加的地区大部分为林地所在区域,说明耕地被占面积较少,同时,耕地向四周扩张,面积增加了 5.68%,林地延续 2010—2024 年的变化趋势,面积减少了 6.51%。

生态保护情景下,林地被占用比率大幅下降,且存在小幅扩张,面积增加了 0.37%。由于对林地的占

用受到限制,同时为了经济结构转型的顺利进行,耕地被人造地表大量占用,耕地面积较 2024 年减少了 1.75%,人造地表面积增加了 1.39%。该情景下农业发展受到影响,林地受到保护,从而增强了萍乡市的整体固碳能力。

城镇发展情景下,萍乡市全域出现了零散的人造地表,其面积较 2024 年增加了 1.21%,耕地有所扩张,面积增加了 4.88%,林地面积减少了 6.10%。灌木地、草地、水体和荒地面积积极小,在此不做具体分析。

3.4.2 多情景下碳储量分析

自然发展情景下,2035 年的碳储量比 2024 年减少 2.09×10^6 t, 降幅为 3.75%。城市和耕地的对外扩

张是碳储量损失的主要原因。人造地表通过侵占林地获得面积的增加,同时,耕地扩张5.95%,这2种地类的碳密度都显著低于林地,导致萍乡市整体碳汇能力降低。在空间上碳储量的高值区和低值区集中

的区域与2024年的情况相似(图5),与2024年不同的是在中南部的高值集中区域中由于人造地表的扩张出现了一些零散的低值区,切割了中南部的连片高碳汇区,进一步削弱了固碳的连续性。

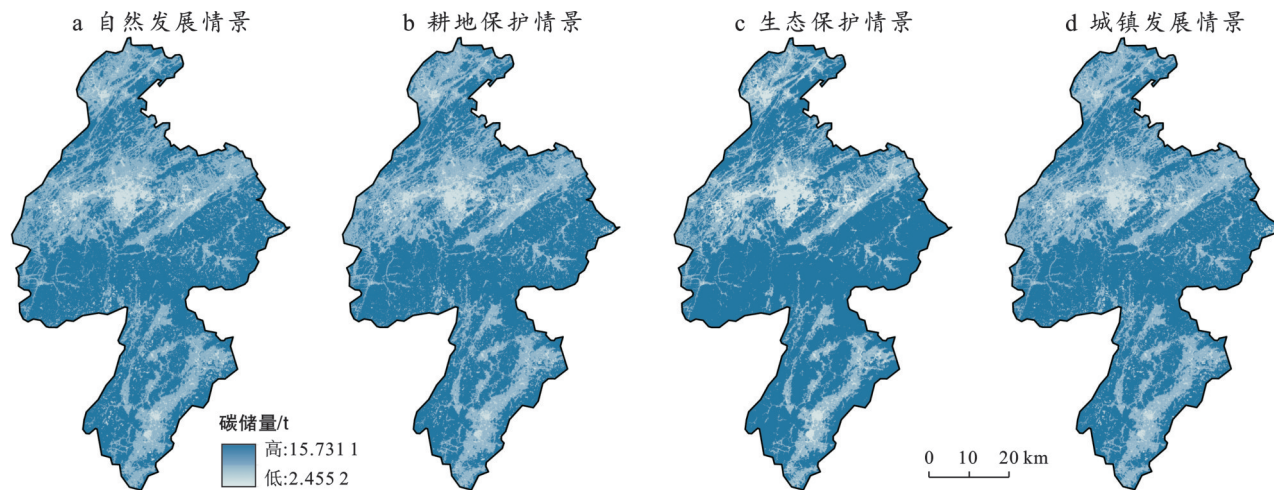


图5 2035年萍乡市4种情景下碳储量空间分布

Fig.5 Spatial distribution of carbon storage under four scenarios at Pingxiang City in 2035

耕地保护情景下,2035年的碳储量较2024年减少 1.75×10^6 t,降幅为3.13%。在该情景下,耕地面积增加5.34%,但其碳汇效率被林地的缺失抵消,所增加的人造地表部分均由林地转化而来,而林地的碳密度远高于耕地,因此碳储量显著减少。该情景虽然能够实现耕地总量红线的目标,但忽视了对高碳密度生态用地的保护与发展,说明单一的耕地保护政策在当今双碳目标下存在局限性。

生态保护情景下,2035年的碳储量较2024年减少 1.31×10^5 t,为 5.59×10^7 t,降幅为0.24%。在空间上,高值区域和低值区域分布均较为集中,零散部分较少。该情景中,严格限制了林地的转出,避免了对高碳汇区域的破坏,碳储量损失的主要原因是耕地转化为人造地表。

城镇发展情景下,2035年的碳储量较2024年减少了 1.70×10^6 t,降幅为3.05%。其高值区域和低值区域在空间上的分布与自然发展情景相似。

4 讨论

4.1 土地利用及碳储量时空演变特征

2010—2024年萍乡市的耕地、人造地表和水体的面积有所增加,耕地和人造地表的增加趋势最显著,分别增加了 123.29 km^2 和 78.83 km^2 ,林地整体呈减少趋势,减少了 227.43 km^2 ,人造地表和耕地的扩张侵占了周围的林地,导致萍乡市的核心碳源受到一定程度的破坏,碳储量下降,从2010年的 5.81×10^7 t减少到

2024年的 5.58×10^7 t,共减少了 2.29×10^6 t,减少幅度为3.95%。需加强对林地的保护,同时对人造地表进行利用,在人造地表内种植植物,提升人造地表的碳密度和固碳能力,同时能确保核心碳源区域的连片性和集中性,提高固碳效率,提升整体碳储量。

4.2 碳储量冷热点分析

2010—2024年碳储量热点区域范围变化较小,强度增强,有2个Gi Bin值最高的集中区域,这2个区域并不连片,被耕地和人造地表隔断。冷点区域在3个时期都较为分散,中北部地区的冷点因该地区城镇扩张,冷点强度逐渐增强。在空间上,中南部的林地是萍乡市的核心碳库,必须对这片区域进行严格保护,尽量减少碳储量的损失。

4.3 土地利用及碳储量预测分析

采用PLUS模型以2010,2015,2020,2024年土地利用数据为基础,同时,通过改变限制条件和转移矩阵分别预测自然发展情景、耕地保护情景、生态保护情景和城镇发展情景下的土地利用状况。预测结果显示,2035年的林地面积只有在生态保护情景中为增加,增加幅度为0.37%,其余都为减少,在自然发展情景中减少了7.46%,在耕地保护情景中减少了6.51%,在城镇发展情景中减少了6.10%;耕地面积只有在生态保护情景中减少,减少了1.75%,其余均为增加,在自然发展情景中增加了6.29%,在耕地保护情景中增加了5.68%,在城镇发展情景中增加了4.88%;人造地表面积在4种情景中的变化趋势均为

增加,在自然发展情景中增加了1.21%,在耕地保护情景中增加了0.85%,在生态保护情景中增加了1.39%,在城镇发展情景中增加了1.21%。为了适应人口的增长和经济的发展,萍乡市需要更多的人造地表,但为了提高林地的固碳效率,人造地表的位置是需要考虑的重要因素,在自然发展情景、耕地保护情景和城镇发展情景中,新增加的人造地表有一部分在林地集中连片的区域出现,这对高碳汇区域造成了一定程度的破坏,导致碳储量的损失。把人造地表集中于某一区域,能够更好地对生态进行保护,进一步提升林地的碳汇能力和效果^[30]。

4.4 对萍乡市“双碳”路径的启示

萍乡市作为传统资源型城市,正处于生态转型的关键阶段。本研究结果表明,通过优化土地利用结构,保护中南部核心碳汇区,控制城镇无序扩张,可有效提升区域碳汇能力。建议在国土空间规划中明确“碳汇功能区”边界,实施差异化管控,并在城市发展中推广“低影响开发”模式,增强建成区碳汇功能,同时,在农业区域推广生态农业,提升耕地碳汇潜力。这些措施将有助于萍乡市在保障发展的同时,稳步推进“双碳”目标的实现。

5 结论

本研究分析了2010—2024年萍乡市土地利用和碳储量的时空演变特征,探讨了土地利用变化对碳储量的影响,并预测了2035年土地利用和碳储量。主要结论如下:

(1) 萍乡市2010—2024年人造地表和耕地扩张,削减了林地面积,破坏了萍乡市核心碳源区域的连片性和集中性,碳储量从2010年的 5.81×10^7 t减少到2024年的 5.58×10^7 t,共减少了 2.29×10^6 t,需对中南部地区的林地进行保护,并在人造地表中合理布置绿植。

(2) 2010—2024年萍乡市碳储量热点区域面积变化较小。中南部2个热点强度较高的集中区域因人造地表被分隔开,需要采取措施规划人造地表的位置,扩大热点区域范围,提升固碳效率。

(3) 萍乡市2035年的4种预测情景中,只有在生态保护情景下碳储量的表现相对较好,仅减少0.24%,其他3种情景下均显著减少。主要原因是在中南部林地中出现了新增的人造地表,削弱了该地区固碳的连续性和效率。

参考文献(References)

[1] Bossio D A, Cook-Patton S C, Ellis P W, et al. The

role of soil carbon in natural climate solutions [J]. *Nature Sustainability*, 2020,3(5):391-398.

[2] O'Neill S. COP26: Some progress, but nations still fiddling while world warms [J]. *Engineering*, 2022,11:6-8.

[3] 赵震宇,姚舜,杨朔鹏,等.“双碳”目标下:中国CCUS发展现状、存在问题及建议[J]. *环境科学*, 2023,44(2):1128-1138.

Zhao Zhenyu, Yao Shun, Yang Shuopeng, et al. Under goals of carbon peaking and carbon neutrality: Status, problems, and suggestions of CCUS in China [J]. *Environmental Science*, 2023,44(2):1128-1138.

[4] Wang Feng, Shackman J, Liu Xin. Carbon emission flow in the power industry and provincial CO₂ emissions: Evidence from cross-provincial secondary energy trading in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017,159:397-409.

[5] 陈广生,田汉勤.土地利用/覆盖变化对陆地生态系统碳循环的影响[J]. *植物生态学报*, 2007,31(2):189-204.

Chen Guangsheng, Tian Hanqin. Land use/cover change effects on carbon cycling in terrestrial ecosystems [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2007,31(2):189-204.

[6] 宋琼,金贵.共享社会经济路径下湖北省土地利用结构预测及启示:基于CGE模型的实证研究[J]. *自然资源学报*, 2024,39(2):411-425.

Song Qiong, Jin Gui. Land use modelling under the shared socioeconomic pathways: An empirical study of Hubei Province based on CGE model [J]. *Journal of Natural Resources*, 2024,39(2):411-425.

[7] 王南,仲涛,郑江华,等.基于土地利用/覆盖预测模型的昆仑山冰湖分布预测[J]. *人民长江*, 2023,54(11):83-90.

Wang Nan, Zhong Tao, Zheng Jianghua, et al. Distribution prediction and analysis of Kunlun Mountain glacier lakes based on land use/cover prediction model [J]. *Yangtze River*, 2023,54(11):83-90.

[8] 刘赛艳,张永江,解阳阳,等.基于CA-Markov模型的淮河流域土地利用变化研究[J]. *灌溉排水学报*, 2024,43(1):52-59.

Liu Saiyan, Zhang Yongjiang, Xie Yangyang, et al. Research on land use change in Huaihe River basin based on the CA-Markov model [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2024,43(1):52-59.

[9] 刘家福,席兰兰,张尧,等.基于CA-Markov与InVEST模型的吉林省生态系统服务价值模拟及预测[J]. *水土保持通报*, 2020,40(6):153-159.

Liu Jiafu, Xi Lanlan, Zhang Yao, et al. A study on simulation and prediction of ecosystem service value in Jilin Province based on CA-Markov and InVEST model [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020,40(6):153-159.

- [10] 朱志强,马晓双,胡洪.基于耦合FLUS-InVEST模型的广州市生态系统碳储量时空演变与预测[J].水土保持通报,2021,41(2):222-229.
Zhu Zhiqiang, Ma Xiaoshuang, Hu Hong. Spatio-temporal evolution and prediction of ecosystem carbon stocks in Guangzhou City by coupling FLUS-InVEST models [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021,41(2):222-229.
- [11] 谢向东,林孝松,王莹,等.基于PLUS模型的重庆市南川区土地利用多情景模拟[J].长江科学院院报,2023,40(6):86-92.
Xie Xiangdong, Lin Xiaosong, Wang Ying, et al. Multi-scenario simulation of land use in Nanchuan District of Chongqing based on PLUS model [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023, 40(6):86-92.
- [12] 曹振江,张亚丽.基于InVEST-PLUS模型的河南省土地利用和碳储量时空演变[J].环境科学,2025,46(11):7043-7057.
Cao Zhenjiang, Zhang Yali. Spatiotemporal evolution of land use and carbon storage in Henan Province based on InVEST-PLUS model [J]. Environmental Science, 2025,46(11):7043-7057.
- [13] 温芮,高燕燕,吴志豪,等.关中平原城市群土地利用变化对碳储量时空格局的影响[J].中国生态农业学报(中英文),2024,32(4):592-604.
Wen Rui, Gao Yanyan, Wu Zhihao, et al. Effects of land use change on the temporal and spatial pattern of carbon storage in Guanzhong Plain urban agglomeration [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2024, 32(4): 592-604.
- [14] 胡丰,张艳,郭宇,等.基于PLUS和InVEST模型的渭河流域土地利用与生境质量时空变化及预测[J].干旱区地理,2022,45(4):1125-1136.
Hu Feng, Zhang Yan, Guo Yu, et al. Spatial and temporal changes in land use and habitat quality in the Weihe River basin based on the PLUS and InVEST models and predictions [J]. Arid Land Geography, 2022,45(4):1125-1136.
- [15] Liang Xun, Guan Qingfeng, 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, 2021,85:101569.
- [16] 郭佳暉,刘晓煌,李洪宇,等.2000—2030年云贵高原碳储量和生境质量时空格局演变[J].地质通报,2024,43(9):1485-1497.
Guojia Hui, Liu Xiaohuang, Li Hongyu, et al. Evolution of spatial and temporal patterns of carbon stocks and habitat quality on the Yunnan-Guizhou Plateau during 2000—2030 [J]. Geological Bulletin of China, 2024,43(9):1485-1497.
- [17] 闵婕,刘晓煌,肖粤新,等.基于PLUS模型和InVEST模型的新安江流域生态系统碳储量时空变化分析与预测[J].现代地质,2024,38(3):574-588.
Min Jie, Liu Xiaohuang, Xiao Yuexin, et al. Analysis and predictions of the spatiotemporal variations of ecosystem carbon storages in the Xin'an River basin based on PLUS and InVEST models [J]. Geoscience, 2024, 38(3):574-588.
- [18] 王森,甄志磊,席茹阳,等.不同情景下太原市土地利用及碳储量变化研究[J].环境科学与技术,2023,46(10):219-227.
Wang Ben, Zhen Zhilei, Xi Ruyang, et al. Land use and carbon stock changes in Taiyuan under different scenarios [J]. Environmental Science & Technology, 2023,46(10):219-227.
- [19] 陈绮桐,林锦耀.多情景下珠江三角洲地区土地利用变化对生态系统服务的影响预测[J].生态与农村环境学报,2024,40(5):612-621.
Chen Qitong, Lin Jinyao. Prediction of the impact of land use change on ecosystem service in the Pearl River delta under different scenarios [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2024,40(5):612-621.
- [20] 巩晟萱,张玉虎,李宇航.基于PLUS-InVEST模型的京津冀碳储量变化及预测[J].干旱区资源与环境,2023,37(6):20-28.
Gong Shengxuan, Zhang Yuhu, Li Yuhang. Spatiotemporal variation and prediction of carbon storage in Beijing-Tianjin-Hebei region: A PLUS-InVEST model approach [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2023,37(6):20-28.
- [21] 刘涛,刘晓龙,郭利彪,等.基于Markov-PLUS和InVEST模型的锡林郭勒草原碳储量变化预测[J].草原与草坪,2023,43(2):1-12.
Liu Tao, Liu Xiaolong, Guo Libiao, et al. Prediction of carbon storage change in Xilingol grassland based on Markov-PLUS and InVEST models [J]. Grassland and Turf, 2023,43(2):1-12.
- [22] 崔旺来,蔡莉,奚恒辉,等.基于土地利用/覆盖变化的浙江大湾区生态安全评价及多情景模拟分析[J].生态学报,2022,42(6):2136-2148.
Cui Wanglai, Cai Li, Xi Henghui, et al. Ecological security assessment and multi-scenario simulation analysis of Zhejiang Greater Bay Area based on LUCC [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(6):2136-2148.
- [23] 陈红香,辛存林,陈宁,等.基于PLUS-InVEST模型的川渝地区碳储量变化及多情景预测[J/OL].(2025-04-03).环境科学,2025:1-18. <https://link.cnki.net/doi/10.13227/j.hjkk.202412195>.

- Chen Hongxiang, Xin Cunlin, Chen Ning, et al. Carbon stock changes and multi-scenario prediction in the Sichuan-Chongqing region based on PLUS-InVEST modeling [J/OL]. *Environmental Science*, 2025;1-18.(2025-04-03). <https://link.cnki.net/doi/10.13227/j.hjlx.202412195>.
- [24] 陈秋计,谢米米,南丹丹,等.基于PLUS-InVEST模型的咸阳市生态系统碳储量时空演变与预测[J].*自然资源遥感*,2025,37(5):172-182.
- Chen Qiuji, Xie Mimi, Nan Dandan, et al. Spatiotemporal evolution and prediction of ecosystem carbon storage in Xianyang City based on the PLUS-InVEST model [J]. *Remote Sensing for Natural Resources*, 2025,37(5):172-182.
- [25] 卿苗,赵军,冯超,等.1980—2030年石羊河流域生态系统碳储存服务对土地利用变化的响应[J].*生态学报*,2022,42(23):9525-9536.
- Qing Miao, Zhao Jun, Feng Chao, et al. Response of ecosystem carbon storage service to land-use change in Shiyang River basin from 1980 to 2030 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022,42(23):9525-9536.
- [26] 陈竹安,柳雪.基于InVEST-PLUS模型的碳储量时空变化与多情景模拟预测:以江西省为例[J].*上海国土资源*,2023,44(4):146-153.
- Chen Zhu'an, Liu Xue. Spatio-temporal variation and multi-scenario prediction of carbon storage based on the InVEST-PLUS model: A case study of Jiangxi Province [J]. *Shanghai Land & Resources*, 2023,44(4):146-153.
- [27] 侯建坤,陈建军,张凯琪,等.基于InVEST和GeoSoS-FLUS模型的黄河源区碳储量时空变化特征及其对未来不同情景模式的响应[J].*环境科学*,2022,43(11):5253-5262.
- Hou Jiankun, Chen Jianjun, Zhang Kaiqi, et al. Temporal and spatial variation characteristics of carbon storage in the source region of the Yellow River based on InVEST and GeoSoS-FLUS models and its response to different future scenarios [J]. *Environmental Science*, 2022,43(11):5253-5262.
- [28] 童锦文,罗志军,罗松开,等.鄱阳湖流域生态系统健康时空演变及区域内联系响应[J/OL].(2025-06-17).*环境科学*,2025:1-19. <https://link.cnki.net/doi/10.13227/j.hjlx.202504104>.
- Tong Jinwen, Luo Zhijun, Luo Songkai, et al. Temporal and Spatial Evolution of Ecosystem Health in the Poyang Lake basin and responses of regional connections [J/OL]. (2025-06-17). *Environmental Science*, 2025:1-19. <https://link.cnki.net/doi/10.13227/j.hjlx.202504104>.
- [29] 汤国安,杨昕.ArcGIS地理信息系统空间分析实验教程[M].2版.北京:科学出版社,2012:211-276.
- Tang Guoan, Yang Xin. ArcGIS Geographic Information System Spatial Analysis Experiment Tutorial [M]. 2nd. Ed. Beijing: Science Press, 2012:211-276.
- [30] 陈嘉诚,罗志军,罗媛.基于低碳导向的南昌市土地利用模拟与优化调控研究[J].*水土保持通报*,2023,43(5):365-373.
- Chen Jiacheng, Luo Zhijun, Luo Yuan. Research on land use simulation and optimization regulation in Nanchang City based on low-carbon orientation [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023,43(5):365-373.

(上接第283页)

- [22] Guo Wenwen, Huang Shengzhi, Huang Qiang, et al. Drought trigger thresholds for different levels of vegetation loss in China and their dynamics [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2023,331:109349.
- [23] Tyree M T. Plant hydraulics: The ascent of water [J]. *Nature*, 2003,423(6943):923.
- [24] Change Intergovernmental Panel on Climate. Climate change 2021: the physical science basis [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2023.
- [25] Huang Mengtian, Piao Shilong, Zeng Zhenzhong, et al. Seasonal responses of terrestrial ecosystem water-use efficiency to climate change [J]. *Global Change Biology*, 2016,22(6):2165-2177.
- [26] Miller D L, Wolf S, Fisher J B, et al. Increased photosynthesis during spring drought in energy-limited ecosystems [J]. *Nature Communications*, 2023,14:7828.
- [27] Anderegg L D L, HilleRisLambers J. Drought stress limits the geographic ranges of two tree species via different physiological mechanisms [J]. *Global Change Biology*, 2016,22(3):1029-1045.
- [28] Ji Yadong, Li Yi, Yao Ning, et al. The lagged effect and impact of soil moisture drought on terrestrial ecosystem water use efficiency [J]. *Ecological Indicators*, 2021,133:108349.
- [29] Deng Ying, Wang Xuhui, Lu Tongping, et al. Divergent seasonal responses of carbon fluxes to extreme droughts over China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2023,328:109253.