

基于 PLUS-InVEST 模型的四川省乐山市 碳储量时空变化及预测

杨茹荔, 罗怀良, 桑子榕

(四川师范大学 地理与资源科学学院, 四川 成都 610101)

摘要: [目的] 探究土地利用演变及其对碳储量的影响, 为维持区域碳平衡和提高区域碳储量研究提供科学依据。[方法] 结合 PLUS-InVEST 模型分析 2000—2020 年乐山市碳储量时空特征, 并预测 2030 年自然发展情景和生态保护情景下的碳储量情况, 最后利用重心转移模型探究碳储量重心空间变化。[结果] ① 2000—2020 年该市碳储量呈现增长趋势, 共增加 2.33×10^6 t, 其中, 各地类贡献的碳储量依次为: 林地 > 建设用地 > 水域 > 草地 > 未利用地 > 耕地。② 2030 年 2 种情景下的碳储量均呈增加趋势, 其中, 自然发展情景增加 2.43×10^6 t, 生态保护情景增加 2.58×10^6 t。③ 近 20 a 来该市碳储量重心整体向偏西方移动 3 121.86 m, 移动范围在沙湾区内。自然发展和生态保护情景下碳储量重心也在沙湾区内移动, 分别向东南移动 1 236.62 m, 向东北移动 4 226.55 m。[结论] 土地利用变化和碳储量变化具有一致性, 固碳能力强的地类对碳储量影响明显, 通过控制该地类的转出来实现区域生态环境保护。

关键词: 碳储量; 土地利用变化; PLUS-InVEST 模型; 重心转移; 乐山市

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2026)01-0260-11

中图分类号: X171.1, F124.5, X24

文献参数: 杨茹荔, 罗怀良, 桑子榕. 基于 PLUS-InVEST 模型的四川省乐山市碳储量时空变化及预测 [J]. 水土保持通报, 2026, 46(1): 260-270. Yang Ruli, Luo Huailiang, Sang Zirong. Spatiotemporal variation and prediction of carbon storage in Leshan City of Shichuan Province based on PLUS-InVEST model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(1): 260-270.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.01.018

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.01.018

Spatiotemporal variation and prediction of carbon storage in Leshan City of Shichuan Province based on PLUS-InVEST model

Yang Ruli, Luo Huailiang, Sang Zirong

(Faculty of Geography and Resources Science, Sichuan Normal University, Chengdu, Sichuan 610101, China)

Abstract: [Objective] The evolution of land use and its impact on carbon storage were investigated, in order to provide a scientific basis for maintaining regional carbon balance and improving regional carbon storage. [Methods] The PLUS-InVEST model was employed to analyze the spatiotemporal characteristics of carbon storage in Leshan City from 2000 to 2020. The carbon storage under the natural development scenario and the ecological protection scenario in 2030 was predicted. Finally, the center-of-gravity shift model was used to explore the spatial variation of the center of gravity of carbon storage. [Results] ① From 2000 to 2020, carbon storage in the city showed an increasing trend, with a total increase of 2.33×10^6 t. The contributions of different land use types to carbon storage were ranked as follows: forest land > construction land > water bodies > grassland > unused land > cultivated land. ② In 2030, carbon storage under both scenarios was projected to show an increasing trend. Specifically, it was expected to increase by 2.43×10^6 t under the natural development scenario and by 2.58×10^6 t under the ecological protection scenario. ③ Over the past 20 years, the center of gravity of carbon storage in the city shifted westward by 3 121.86 m, with the movement occurring within the Shawan

收稿日期: 2025-04-23

修回日期: 2025-10-12

采用日期: 2025-10-13

资助项目: 国家社会科学基金项目“山地丘陵农产品主产区种养关联的县域农业碳源/汇效应及调控机制研究”(17GBL137)

第一作者: 杨茹荔(1999—), 女(汉族), 四川省成都市人, 硕士研究生, 研究方向为土地利用变化碳源/汇效应。Email: 15397627336@163.com。

通信作者: 罗怀良(1966—), 男(汉族), 四川省洪雅县人, 博士, 教授, 主要从事全球变化、自然资源利用与区域地理方面的研究。Email: huaill@163.com。

District. Under the natural development and ecological protection scenarios, the center of gravity of carbon storage moved within the Shawan District, shifting 1 236.62 m to the southeastward and 4 226.55 m to the northeastward, respectively. [Conclusion] Land use change and carbon storage change are consistent, and land types with strong carbon sequestration capacity have a significant impact on carbon storage. Regional ecological environmental protection can be achieved by controlling the transfer of these land types.

Keywords: carbon storage; land use change; PLUS-InVEST model; center-of-gravity shift; Leshan City

合理的土地利用和配置有助于社会经济的可持续发展。深入探究土地利用变化及其对碳储量的影响,有利于保持城市发展进程中生态系统的固碳能力^[1]。目前,“双碳”目标已被纳入生态文明建设,探究如何规划国土空间,构建有利于碳达峰碳中和的国土空间格局,以高质量的生态环境带动社会经济发展具有深远意义。当前,国内学者对土地利用变化与碳储量演变关系的研究不断深入,具体表现在研究范围、研究方法等方面。首先,研究范围从北京山区和长江中上游地区^[2-3],扩展至省市县三级行政区^[4-6]、不同流域^[7-8]和不同特殊地貌类型等^[9-10]。区域碳储量的研究方法包括实地调查法^[11]、遥感反演^[12]和模型模拟等^[13]。其中模型模拟方法由于便于操作、数据易获取和对不同尺度区域适应性强等特点被广泛应用于各项研究。众多模型中,InVEST 模型具有运行速度快,数据要求简单,评估精确度高和评估结果可视化等优点,被广泛应用于碳储量计算^[14]。土地利用模拟的常见模型有 CA-Markov^[15], FLUS^[16], CLUE-S^[17], ANN-CA^[18]和 PLUS^[19]模型等。这些模型中,PLUS 模型能灵活处理斑块变化的机制,准确模拟预测未来发展情景下的土地利用变化,具有模拟精度高,数据处理速度快等优点。近年来,通过 PLUS-InVEST 模型研究未来土地利用变化对碳储量的影响已经成为热点,但是预测不同发展情景下区域土地利用与碳储量变化的研究相对较少。探究不同发展情景下土地利用类型变化和碳储量变化之间的关系,对于优化国土资源配置,实现“双碳”目标具有重要意义。

四川省乐山市位于长江上游,是长江上游地区重要的生态屏障地^[20]。因此保护乐山市的生态用地和生态环境具有重要意义。目前对乐山市碳储量演变的研究还较为鲜见。为此,本研究基于 2000—2020 年乐山市土地利用情况,利用 InVEST 模型测算该市碳储量,再结合 PLUS-InVEST 模型,模拟 2030 年自然发展情景和生态保护情景下土地利用变化并预测碳储量;最后使用重心转移模型,探究乐山市碳储量重心转移情况,以期为该市优化配置土地利用和碳政策提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

乐山市地处四川盆地西南部,介于 102°15′—104°15′E, 28°28′—29°56′N。地势西南高,东北低,地貌以山地为主,山地面积占总面积的 66.5%,丘陵、平原分别占 21%, 12.5%。属于亚热带气候,具有四季分明,雨热同期的特点,垂直气候带谱完整,动植物资源丰富。境内江河众多,有大渡河、青衣江、岷江等。乐山市总面积 12 720.03 km²。截至 2023 年末,该市地区生产总值(GDP)2 447.53 亿元,人均 GDP 为 77 699 元/人,常住人口的城市化率为 55.79%。

1.2 数据来源及处理

乐山市 3 期(2000, 2010 和 2020 年)土地利用数据来自全国地理信息资源目录服务系统(<http://www.webmap.cn>);人口、GDP 值、NDVI 值、土壤类型、年均温和年降水等来自资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn>);各级道路、水域数据全国地理信息资源目录服务系统(<http://www.webmap.cn>);高程数据来自地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn>),基于高程数据,利用 ArcGIS 中的坡度提取工具获得坡度数据。所有数据均采用 WGS_1984 投影坐标系。

1.3 研究方法

以乐山市为研究区域,分析 2000—2020 年乐山市土地利用变化特征,利用 InVEST 模型,估算 2000—2020 年该市碳储量;基于 PLUS-InVEST 模型,预测 2030 年自然发展和生态保护情景下该市土地利用变化和碳储量;最后利用重心转移模型,探究该市碳储量重心迁移情况。

1.3.1 InVEST 模型

InVEST 模型是一种综合生态系统服务和权重的评估模型,其 Carbon 模块根据地上生物量、地下生物量、死亡有机体和土壤的储量来计算存储在各类中的碳储量或者随时间变化封存的碳储量^[21]。该模块包括 4 个碳库:地上碳密度、地下碳密度、死亡有机质碳密度和土壤碳密度^[22]。本文利用 InVEST 模

型中的 Carbon 模块测算乐山市 2000—2020 年和预测情景下的碳储量。计算公式为

$$C_i = C_{i-above} + C_{i-below} + C_{i-soil} + C_{i-dead} \quad (1)$$

式中： C_i 表示第 i 类土地利用类型的总碳密度； $C_{i-above}$ 表示第 i 类土地利用类型的地上碳密度； $C_{i-below}$ 表示第 i 类土地利用类型的地下碳密度； C_{i-soil} 表示第 i 类土地利用类型的土壤碳密度； C_{i-dead} 表示第 i 类土地利用类型的死亡有机质碳密度。

$$C_{i-total} = C_i \cdot A_i \quad (2)$$

式中： $C_{i-total}$ 表示第 i 类土地利用类型的总碳储量； A_i 表示第 i 类土地利用类型的面积。为了较少误差，本研究优先选择乐山市周边地区和同一气候区的研究结果^[23-24]，采用 Giardina 等^[25]和 Alam 等^[26]提出的公式对其进行修正，结果详见表 1。

表 1 乐山市各土地利用类型碳密度取值

Table 1 Carbon density values of land use types in Leshan City 单位:t/hm²

土地利用类型	地上碳密度	地下碳密度	土壤碳密度	死亡有机质碳密度
耕地	38.70	80.70	92.90	1.00
林地	39.09	115.98	190.45	3.50
草地	29.30	52.90	135.00	1.00
水域	21.40	73.10	113.00	1.00
未利用地	22.60	136.90	171.80	0.00
建设用地	3.30	87.30	115.30	0.00

1.3.2 PLUS 模型

PLUS 模型(patch-level land use simulation model)是一种基于斑块的土地模拟预测模型,包括土地扩张分析策略模块(land expansion analysis strategy, LEAS 模块)、基于多类型随机斑块种子的 CA 模型(CA based on multiple random seeds, CARS 模块)和 Markov 模型^[27]。其中通过 LEAS 模块,叠加

研究区初期和末期的土地利用数据,利用随机森林算法(RFC),可以生成某一区域各地类的潜在发展规律;CARS 模型能结合土地利用需求分析和竞争机制,通过设置不同情景下相应的邻域权重和转移成本矩阵,展开各情景下土地利用仿真模拟分析,揭示不同情景下土地利用变化趋势。

kappa 系数是用于精准度检验,使用 PLUS 模型预测 2030 年土地利用数据之前,要先预测 2020 年数据,再同真实的 2020 年数据相比,从而检验 kappa 系数值,通常 kappa 系数大于 0.75,表明数据精度高度一致。本文 kappa 系数为 0.77,说明本研究选用的数据精度较高,能满足模拟的需要。

基于前人经验及相关文献,主要从自然因素和社会经济因素两方面,选取气温、降水量、GDP、人口、高程、坡度、土壤类型和距河流距离等 11 项驱动因子。根据已有研究^[28-29],基于乐山市发展特点,设置两种情景,即自然发展情景和生态保护情景:①自然发展情景。基于 2010—2020 年土地利用变化规律,不设置各类用地之间的转换概率,不考虑政策影响,只顺应已有的自然变化规律,预测 2030 年乐山市在自然发展情景下的土地利用需求,该情景也是模拟其他情景的基础。②生态保护情景。《乐山市国土空间总体规划(2021—2035 年)》指出要优化国土空间开发保护格局,加强西南部生态屏障保护,全面提升国土空间开发保护利用水平,严格控制建设用地面积。限制林地、草地和水域向其他地类转换,限制城镇过度扩张。将耕地、草地向林地的转移概率提高 30%,林地和草地向建设用地的转移概率降低 50%,耕地向建设用地的转移概率降低 30%。③土地利用转移成本矩阵表示地类间转换的可能性,数值为 0 或 1。该值为 1,表明允许地类向其他地类转换;该值为 0,则不允许转换。参考相关文献^[28-29],设置本文 2 种情景的土地利用转移成本矩阵(表 2)。

表 2 不同情景下的土地利用转移成本矩阵

Table 2 Land use transfer cost matrix under different scenarios

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

1.3.3 重心转移模型

重心迁移模型通过各土地利用类型的重心迁移

轨道和距离反映大尺度区域上土地利用类型的空间位置变化^[30]。本文利用重心迁移模型讨论乐山市碳

储量重心转移情况,计算公式为

$$(X_t, Y_t) = \left(\frac{\sum_{i=1}^n C_{it} \cdot X_i}{\sum_{i=1}^n C_{it}}, \frac{\sum_{i=1}^n C_{it} \cdot Y_i}{\sum_{i=1}^n C_{it}} \right) \quad (3)$$

式中:\$(X_t, Y_t)\$表示 \$t\$ 年碳储量重心的经纬度坐标; \$C_{it}\$ 表示 \$t\$ 年第 \$i\$ 个区县的碳储量值; \$(X_{it}, Y_{it})\$ 表示 \$t\$ 年第 \$i\$ 个区县的几何重心经纬度坐标。

根据不同年份的重心坐标,可以计算相邻年份间重心转移的距离。具体的计算公式为

$$D = H \times \sqrt{(X_t - X_{t-1})^2 + (Y_t - Y_{t-1})^2} \quad (4)$$

式中: \$D\$ 表示重心转移距离; \$H\$ 为常数,通常取值为 111.111; \$(X_t, X_{t-1}), (Y_t, Y_{t-1})\$ 分别表示第 \$t\$ 年和第 \$t-1\$ 年的碳储量重心经纬度坐标。

2 结果与分析

2.1 2000—2020 年乐山市土地利用变化特征

基于 2000—2020 年乐山市土地利用数据,根据研究需要,在 ArcGIS 中对该市土地利用类型进行重

分类,主要分为 6 种:耕地、林地、草地、水域、未利用地和建设用地,得到乐山市各类土地利用分布图(图 1)。由图 1 可知,20 a 间乐山市各土地利用类型所占比例依次为:林地(57.86%)>耕地(39.21%)>建设用地(1.40%)>水域(1.13%)>草地(0.40%)。其中,林地主要分布在南部、西部丘陵山地;耕地主要分布在东北部平原河谷地区。水域主要分布在各河流及其流域,建设用地主要分布在北部平原以及河流两岸。草地分布在建设用地和耕地周边。20 a 间,乐山市林地、草地、水域和建设用地面积均有不同幅度的增加,耕地和未利用地面积均减少。其中,面积增加最多的是林地(177.06 km²),增加地区主要集中在市中区、犍为县和沐川县;其次是建设用地(增加 96.33 km²),主要在原有建设用地的基础上向周边郊区扩张。草地面积增加 6.13 km²,增加地区主要分布在市中区、井研县;水域面积增加 17.39 km²,主要沿河道向两侧扩张。此外,耕地面积减少最多(296.87 km²),这与该市城市扩张占用农田和政府实施的“退耕还林还草”政策有关。未利用地由于原有基数较小,变化量并不大。

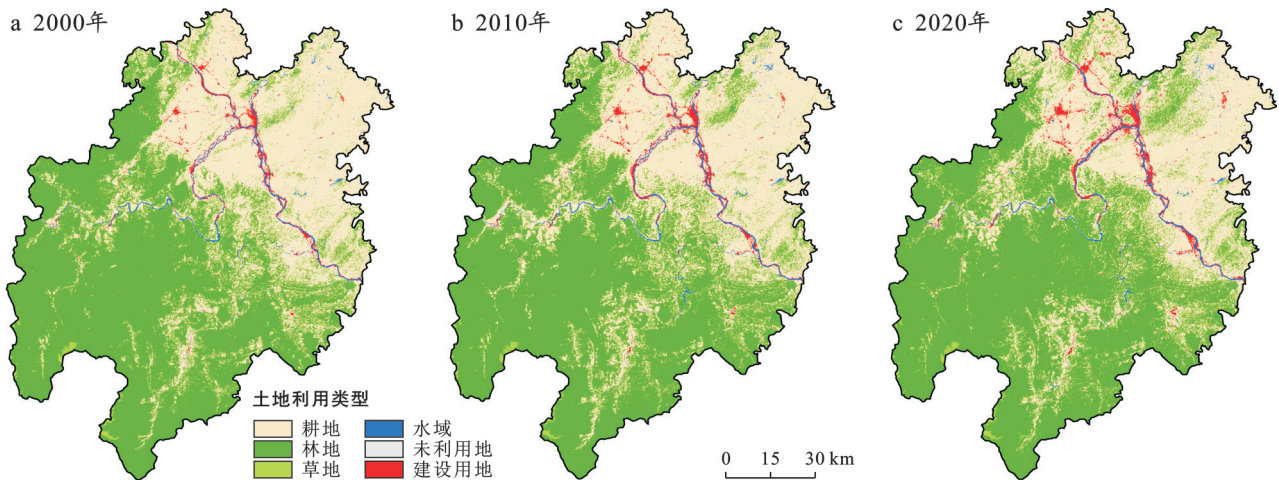


图 1 乐山市 2000—2020 年土地利用空间分布

Fig.1 Spatial distribution of land use in Leshan City from 2000 to 2020

2.2 2000—2020 年乐山市碳储量变化

2.2.1 碳储量时空演变特征

基于 InVEST 模型,测算 2000—2020 年乐山市的碳储量,得到区域碳储量分布及变化图(图 2)。由图 2 可知,2000—2020 年期间该市碳储量时空分布基本一致,总体呈“西南高,东北低”的分布特点。这 20 a 间该市总碳储量共增加 2.33×10^6 t。其中,林地、草地、水域和建设用地碳储量整体呈上升趋势,分别增加 6.18×10^6 t, 1.34×10^5 t, 3.63×10^5 t 和 1.98×10^6 t。耕地减少 6.33×10^6 t,未利用地减少 1 000 t。碳储量高值区集中在该市南部山区,北部也有零星分布,这

些地区土地类型以林地和草地为主,固碳能力高;碳储量中值区集中在中部和东北部的平坝,以及南部山谷地带,这些地区的土地利用以耕地为主,而农作物也具有一定的固碳能力;碳储量低值区在中北部沿河流呈带状分布,南部山谷也有分布,这些地区以建设用地为主,人类活动频繁,生态环境脆弱,植被覆盖度低,固碳能力弱。碳储量减少区域主要分布在西部和东南部,增加地区集中在中部和北部,东部也有少量分布。碳储量分布与土地利用情况关系密切,该市碳储量高值区与林地和草地的分布一致,低值区与建设用地分布一致。

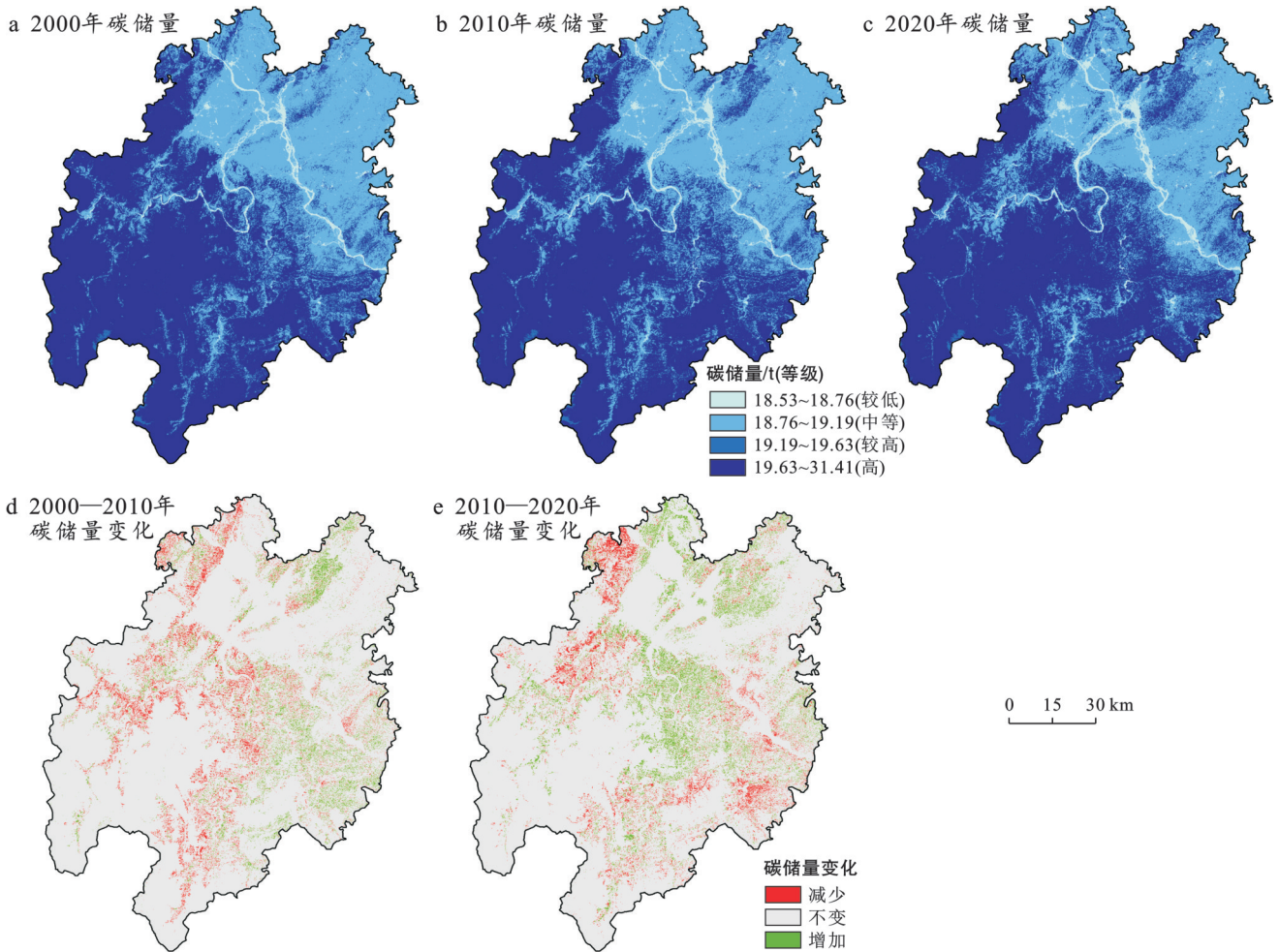


图 2 乐山市 2000—2020 年碳储量空间分布及其变化

Fig.2 Spatial distribution and changes of carbon storage in Leshan City from 2000 to 2020

2.2.2 土地利用变化对碳储量的影响

根据 2000—2020 年乐山市土地利用变化引起的碳储量变化(表 3)可知,乐山市地类转变对碳储量的影响主要体现在耕地和林地的转入与转出。20 a 间,该市耕地主要向林地、建设用地、水域、草地转变,共转出 1 005.67 km²,碳储量增加 1.18×10^7 t。其中,86.87% 转为林地,碳储量增加 1.19×10^7 t,10.24% 转为建设用地,损失碳储量 7.60×10^4 t。林地主要转出为耕地,这损失碳储量 9.37×10^6 t。草地、水域、建设用地分别转出 6.82,28.69 和 21.13 km²,使增加碳储量增加 4.70×10^4 t, 3.30×10^4 t, 6 000 t。未利用地的转出,损失碳储量 1 000 t。

综上所述,林地转为耕地、草地、建设用地和水域是乐山市碳储量减少的主要原因。耕地、草地和水域转为林地一定程度上弥补区域碳储量损失。研究表明,林地是稳定区域碳储量的关键,保护林地和控制建设用地无序扩张,对于缓解地区碳储量压力具有重要意义。因此,在规划土地利用时,要充

分考虑地类转换对碳储量的影响,控制林地的开发与破坏,限制林地转出,加强对公益林和天然林的保护,提高生态系统质量,发挥生态用地的固碳能力,提高区域碳储量。

2.3 2030 年多情景下乐山市土地利用和碳储量预测

2.3.1 2 种情景下土地利用变化特征

利用 PLUS 模型的预测功能,基于乐山市已知的土地利用数据,预测 2030 年自然发展情景和生态保护情景下该市土地利用分布情况,得到 2 种情景下 2030 年乐山市土地利用情况图(图 3)。由图 3 可知,2030 年 2 种情景下该市的土地利用存在差异。自然发展情景下林地增加 181.32 km²,草地增加 8.93 km²;生态保护情景下林地增加 192.57 km²,草地减少 1.70 km²。2 种情景下耕地均减少 239.63 km²,建设用地均增加 48.77 km²,说明该市的城市建设符合生态保护观念,顺应区域生态安全。水域面积基本保持不变,稳定在 149 km²左右,仍要加强对研究区水域的保护。整体来说,不同情景下各地类面积变化

差异较小,土地利用空间分布特征整体不变,说明该市的生态保护政策效果明显,并在未来也发挥重要作用。研究区严格实施林地保护政策,布局造林绿化空间,保护和修复林地资源,提高其生态功能,林地面积持续增加。该区域草地主要分布在峨边彝族自治

县和马边彝族自治县,受到退耕还草工程、草地保护与改良措施和自然环境演替的影响,自然发展情景下草地面积增加。而生态保护情景以最大限度的林地转入为主,这使得一些适宜树木生长的草地转为林地,这是造成该情景下草地减少的主要因素。

表 3 乐山市 2000—2020 年土地利用变化引起的碳储量变化

Table 3 Changes in carbon storage caused by land use change in Leshan City from 2000 to 2020

地类转换	面积/km ²	碳储量变化/10 ⁵ t	合计/10 ⁵ t	地类转换	面积/km ²	碳储量变化/10 ⁵ t	合计/10 ⁵ t
耕地—林地	873.71	118.58		水域—耕地	13.624 2	0.07	
耕地—草地	3.34	0.02		水域—林地	2.115	0.30	
耕地—水域	25.57	-0.12	117.71	水域—草地	0.060 3	0.00	0.33
耕地—未利用地	0.00	0.00		水域—未利用地	—	—	
耕地—建设用地	103.06	-0.76		水域—建设用地	12.897	-0.03	
林地—耕地	690.71	-93.74		未利用地—耕地	0.002 7	0.00	
林地—草地	9.56	-1.25		未利用地—林地	—	—	
林地—水域	0.98	-0.14	-95.31	未利用地—草地	—	—	-0.01
林地—未利用地	—	—		未利用地—水域	0.036	0.00	
林地—建设用地	1.13	-0.16		未利用地—建设用地	0.013 5	0.00	
草地—耕地	2.68	-0.01		建设用地—耕地	1.788 3	0.01	
草地—林地	3.62	0.47		建设用地—林地	0.002 7	0.00	
草地—水域	0.16	0.00	0.47	建设用地—草地	—	—	0.06
草地—未利用地	0.01	0.00		建设用地—水域	19.341	0.05	
草地—建设用地	0.36	0.00		建设用地—未利用地	—	—	

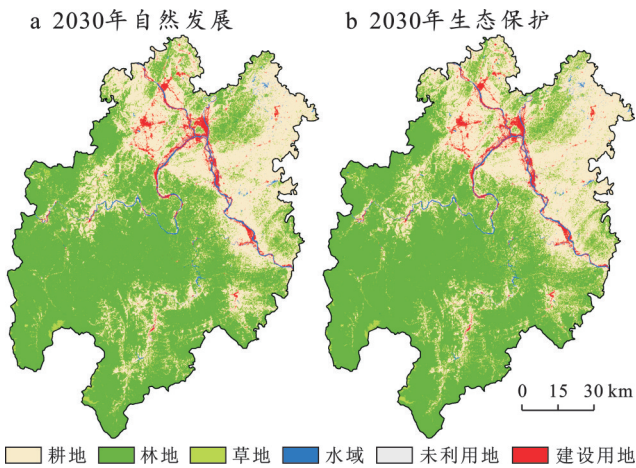


图 3 乐山市 2030 年 2 种情景下土地利用空间分布情况
Fig.3 Spatial distribution of land use under two scenarios in Leshan City in 2030

2.3.2 多情景下碳储量变化特征

利用 InVEST 模型的 Carbon 模块,测算 2030 年自然发展和生态保护情景下乐山市各地类碳储量,得到该市碳储量空间分布及变化(图 4)和地类转换引起的碳储量变化(表 4)。根据图 4 可知,2030 年乐山市在自然发展情景和生态保护情景下的总碳储量分别为 3.75×10^8 t 和 3.76×10^8 t,与 2020 年相比分别

增加 2.43×10^6 t, 2.58×10^6 t。2 种情景下的碳储量存在差异,主要表现为自然发展情景下,林地碳储量为 2.68×10^8 t,草地碳储量为 1.41×10^6 t;生态保护情景下林地碳储量为 2.69×10^8 t,与自然发展相比多 3.92×10^5 t,草地碳储量是 1.15×10^6 t,与自然发展相比减少 2.32×10^5 t。但 2 种情景下耕地、水域、未利用地和建设用地碳储量基本一致。不同情景的碳储量分布均呈“西南高,东北低”的分布特点。高值区集中分布在西南部高山地区,北部也有分布,低值区主要在偏北部的平坝,以及山区的山谷地带。高值区以林地为主,低值区以建设用地为主。自然发展情景下,碳储量增减区分布与 2020 年相似,整体仍保持基本的空间格局特征。生态保护情景下,碳储量以增加为主,主要变化区域在林地与耕地的交界处。该市实行“宜林则林,宜耕则耕”原则,将农业适宜区的林地开垦为耕地,并加强对市域公益林和天然林的保护,完善耕地和林地保护,促进国土资源合理利用。综上所述,乐山市碳储量变化与分布依赖于林地,且林地在全市碳储量中所占比例高,对区域碳储量格局影响明显,在未来的土地规划中,要严格实施退耕还林还草政策,进行合理的生态保护,稳定地区碳储量。

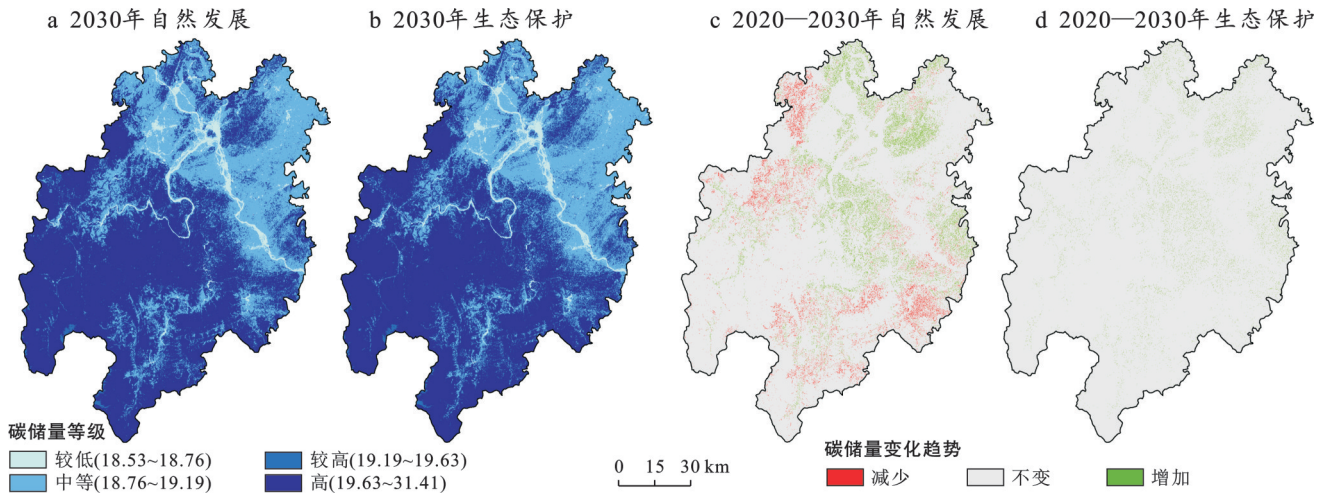


图 4 乐山市 2030 年 2 种情景下碳储量空间分布及 2020—2030 年变化

Fig.4 Spatial distribution in 2030 and changes from 2020 to 2030 of carbon storage under two scenarios in Leshan City

由表 4 可知,林地的转出与转入是该市碳储量损失或增加的关键。在自然发展情景下,耕地主要转出为林地(512.86 km²),弥补碳储量 6.96×10⁶ t,这是本情景中碳储量的主要来源;其次,转出为建设用地(48.64 km²),损失碳储量 3.60×10⁴ t。此外,林地共转出 331.64 km²,造成 4.50×10⁶ t 的碳流失,大部分林地转为耕地(97.39%),损失碳储量 4.38×10⁶ t;少数转为草地(2.56%),损失 1.11×10⁵ t。草地转出

0.26 km²,碳储量增加 1 000 t。而未利用地变化较小,建设用地基本没有转出。在生态保护情景下,土地利用类型的转变较简单,以耕地转出为主。耕地共转出 239.63 km²,其中主要转为林地(79.10%),增加碳储量 2.57×10⁶ t;其次转为建设用地(20.31%),损失碳储量 3.60×10⁴ t,较少转为草地。草地转为林地(3.11 km²),弥补碳储量 4.10×10⁴ t。此外,林地和未利用地转出少,建设用地基本不转出。

表 4 2030 年 2 种情景下土地利用变化引起的碳储量变化

Table 4 Changes in carbon storage caused by land use change under two scenarios in 2030

情景类型	地类转换	面积/km ²	碳储量变化/10 ⁵ t	情景类型	地类转换	面积/km ²	碳储量变化/10 ⁵ t
2030 年 自然发展	耕地—林地	512.86	69.60	2030 年 生态保护	耕地—林地	189.55	25.73
	耕地—草地	0.71	0.00		耕地—草地	1.41	0.01
	耕地—水域	0.57	0.00		耕地—建设用地	48.68	-0.36
	耕地—建设用地	48.64	-0.36		林地—建设用地	0.09	-0.01
	林地—耕地	322.99	-43.84		草地—林地	3.11	0.41
	林地—草地	8.48	-1.11		未利用地—林地	0.00	0.00
	林地—水域	0.05	-0.01		未利用地—草地	0.01	0.00
	林地—建设用地	0.13	-0.02				
	草地—耕地	0.15	0.00				
	草地—林地	0.11	0.01				
	未利用地—耕地	0.00	0.00				
	未利用地—草地	0.00	0.00				

综上所述,2030 年 2 种情景下区域碳储量均有所增加,且空间格局较为稳定。2030 年乐山市耕地转出是建设用地扩张的主要来源,转换区域基本在城镇边界,这与该市合理开发与优化城镇边界政策有关。林地是所有地类中碳储量最主要的来源,生态保护情景顺应区域内自然条件,尽可能扩大森林面积,从而提升区域整体碳储量,这也是该情景下草地

碳储量减少的原因。结果表明,该市未来土地利用规划符合生态保护策略,有效保护西南生态屏障,提高森林生态系统质量。

2.4 乐山市碳储量重心迁移

基于 2000—2020 年、2030 年 2 种情景下乐山市碳储量数据,利用重心迁移模型,得到各年间碳储量重心迁移轨迹(表 5),并在 ArcGIS 中绘制出该市重心转

移图(图5)。综合表5和图5可知,2000—2020年乐山市碳储量重心基本处于该市中心位置,表明该市经济发展格局整体变动较小。2000—2010年碳储量重心(103°68'E,29°29'N)向西南方向迁移(103°66'E,29°28'N),移动距离2 017.79 m。2010—2020年该市碳储量重心向西北方向继续迁移到(106°65'E,29°29'N),移动距离1 104.07 m。20 a来,该市碳储量重心整体向偏西方移动3 121.86 m,且均在沙湾区境内移动。至2030年,自然发展和生态保护情景下碳储量重心移动差异明显。自然发展情景下,碳储量重心向东南移动到(103°66'E,29°28'N),移动距离为1 236.62 m;生态保护情景下,向东北移动到(103°67'E,29°32'N),移动4 226.55 m。2种情景下的碳重心一直在沙湾区境内变动。研究表明,2000—2030年碳储量重心在沙湾区境内变化,该区也是生态

保护区和城镇建设区的过渡地带。未来该市在生态保护区要严格保护生态系统,强化生态空间的保护与修复,也要遵循绿色低碳的原则,完善生态廊道。在城镇建设区,要严格控制建设用地面积,提高城镇土地利用效率,优化国土空间开发格局,提高开发质量。

表5 乐山市2000—2030年碳储量重心迁移轨迹
Table 5 Migration trajectory of center of gravity of carbon storage in Leshan City from 2000 to 2030

项目	碳储量重心		重心迁移	
	经度	纬度	方向	距离/m
2000年	103°68'E	29°29'N		
2010年	103°66'E	29°28'N	西南	2 017.79
2020年	103°65'E	29°29'N	西北	1 104.07
2030年自然发展情景	103°66'E	29°28'N	东南	1 236.62
2030年生态保护情景	103°67'E	29°32'N	东北	4 226.55

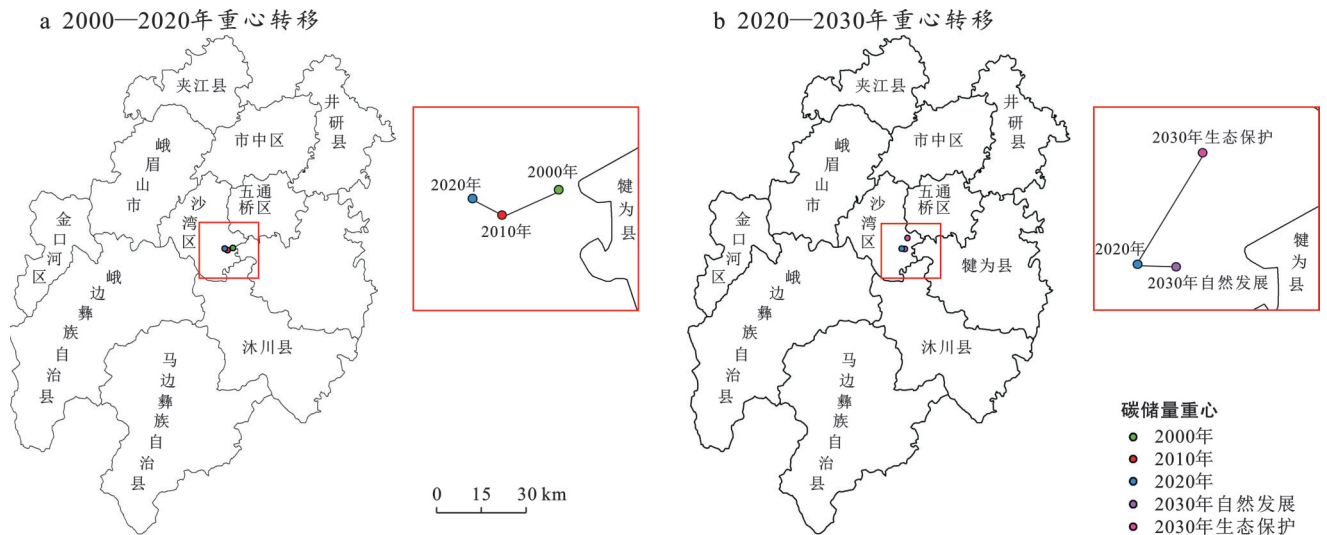


图5 乐山市2000—2030年碳储量重心转移情况

Fig.5 Shift in center of gravity of carbon storage in Leshan City from 2000 to 2030

3 讨论

区域土地利用变化被认为是区域碳储量变化的最重要因素之一,碳储量变化反映生态系统的固碳能力,揭示土地利用变化对碳汇强度的直接影响。研究表明,2000—2020年乐山市林地和草地面积增加,这一变化弥补了建设用地扩张侵占生态用地导致的碳流失,使碳储量增加 2.33×10^6 t。2030年自然发展情景下,耕地转为林地,碳储量呈增加趋势。基于《乐山市国土空间总体规划(2021—2035年)》,在生态保护情景下,碳储量增加 2.58×10^6 t。研究发现2种情景的碳储量变化趋势相似,这表明该市已经将生态保护政策融入土地利用规划中,从而实现区域碳储量持续增长,为“碳中和”提供重要支撑。

2000—2030年碳储量高值区土地利用类型以林地为主,固碳能力强;碳储量低值区土地利用类型以耕地、建设用地为主,低值区人口稠密,经济发达,城镇用地扩张侵占生态用地,造成碳流失。林地的转入与转出是该市碳储量变化的主要原因。沙湾区作为乐山市生态保护区和城镇建设区的交界地带,2000—2030年的碳储量重心均在该区范围内变动。这表明乐山市碳储量空间格局稳定,分区管控制度较完善。一方面保护重点生态系统,提高生态系统质量,完善林地保护与合理利用,尤其是山区生态林地的保护,保障区域碳储量稳定发展;另一方面明确城镇开发边界,严格控制城镇用地面积,推动城市更新,盘活建设用地,推动城市化发展。

综合研究结果,未来乐山市发展要继续合理规

划土地利用,提高区域碳储量。一方面,保护永久基本农田,建立健全农田储备区,优化耕地布局,保护生态红线和严格控制城镇用地总量,减少人类活动对林地、草地等生态用地的不良影响。另一方面,保护西南生态屏障,优化林地和草地布局,提高生态系统质量,巩固“退耕还林还草”已有成果。本文根据PLUS模型预测乐山市未来土地利用变化。该模型是目前所有预测模型中较准确的一种,但是土地利用变化涉及较复杂的气候因素和其他动态政策因素,这导致预测因子的选择存在一些不足。在今后的研究中可以尝试将这些因素融入模拟过程,以得到准确性更高的预测数据。

4 结论

(1) 2000—2020年期间,该市土地利用变化显著。林地、建设用地、水域和草地持续增加,而耕地和未利用地不断减少。各土地利用比例依次为:林地(57.86%)>耕地(39.21%)>水域(1.13%)>建设用地(1.40%)>草地(0.40%)。

(2) 2000—2020年期间,该市碳储量总体呈上升趋势,共增加 2.33×10^6 t。土地利用变化影响碳储量,耕地转为林地使碳储量增加 1.19×10^7 t,而林地转出导致碳储量损失 9.53×10^6 t。

(3) 2030年2种情景下该市的土地利用存在一定差异。自然发展情景下林地增加 181.32 km^2 ,草地增加 8.93 km^2 ;生态保护情景下林地增加 192.57 km^2 ,草地减少 1.70 km^2 。这2种情景下耕地均减少 239.63 km^2 ,建设用地均增加 48.77 km^2 ,水域增加 2.18 km^2 ,未利用地基本不变。

(4) 2030年2种情景下的碳储量分别增加 2.43×10^6 t, 2.58×10^6 t。自然发展情景下,大量耕地转为林地(512.86 km^2),碳储量增加 6.96×10^6 t;林地转出导致碳储量损失 4.50×10^6 t。生态保护情景下,耕地转为林地是碳储量增加的主要原因,增加 2.57×10^6 t。2种情景下耕地、水域、未利用地和建设用地碳储量基本一致。

(5) 2000—2020年该市碳储量重心整体向偏西方移动 $3\ 121.86 \text{ m}$,且均在沙湾区境内移动。2030年自然发展和生态保护情景下,碳储量重心均在沙湾区,分别向东南移动 $1\ 236.62 \text{ m}$,向东北移动 $4\ 226.55 \text{ m}$ 。

参考文献 (References)

[1] 杨洁,谢保鹏,张德罡.基于InVEST和CA-Markov模型的黄河流域碳储量时空变化研究[J].中国生态农业学报(中英文),2021,29(6):1018-1029.
Yang Jie, Xie Baopeng, Zhang Degang. Spatio-temporal

evolution of carbon stocks in the Yellow River basin based on InVEST and CA-Markov models [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(6): 1018-1029.

- [2] 陈妍,乔飞,江磊.基于InVEST模型的土地利用格局变化对区域尺度生境质量的影响研究:以北京为例[J].北京大学学报(自然科学版),2016,52(3):553-562.
Chen Yan, Qiao Fei, Jiang Lei. Effects of land use pattern change on regional scale habitat quality based on InVEST model: A case study in Beijing [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2016, 52(3): 553-562.
- [3] 潘韬,吴绍洪,戴尔阜,等.基于InVEST模型的三江源区生态系统水源供给服务时空变化[J].应用生态学报,2013,24(1):183-189.
Pan Tao, Wu Shaohong, Dai Erfu, et al. Spatiotemporal variation of water source supply service in three rivers source area of China based on InVEST model [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(1): 183-189.
- [4] 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预测:以广东省为例[J].中国环境科学,2022,42(10):4827-4839.
Lin Tong, Yang Muzhuang, Wu Dafang, et al. Spatial correlation and prediction of land use carbon storage based on the InVEST-PLUS model: A case study in Guangdong Province [J]. China Environmental Science, 2022, 42(10): 4827-4839.
- [5] 智菲,周振宏,赵铭,等.基于PLUS和InVEST模型的合肥市生态系统碳储量时空演变特征[J].水土保持学报,2024,38(2):205-215.
Zhi Fei, Zhou Zhenhong, Zhao Ming, et al. Temporal and spatial evolution characteristics of carbon storage in Hefei ecosystem based on PLUS and InVEST models [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(2): 205-215.
- [6] 李月,罗红芬.基于InVEST模型的黔中普定县域生态系统碳储量时空变化[J].中国水土保持科学(中英文),2023,21(4):28-35.
Li Yue, Luo Hongfen. Spatio-temporal changes of ecosystem carbon storage in Puding County of central Guizhou Province based on InVEST model [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2023, 21(4): 28-35.
- [7] 杨智楷,左其亭,巴音吉,等.基于InVEST的沁河流域产水量-碳储量时空演变及关联分析[J].人民黄河,2025,47(3):1-9.
Yang Zhikai, Zuo Qiting, Ba Yinji, et al. Temporal and spatial evolution and correlation analysis of carbon stocks-water production in Qinhe River basin based on InVEST model [J]. Yellow River, 2025, 47(3): 1-9.
- [8] 盛艳,秦富仓,刘林甫,等.基于InVEST模型的黄河流域砒砂岩区土壤保持功能演化及驱动机制[J].西北林

- 学院学报, 2024, 39(3): 144-152.
- Sheng Yan, Qin Fucang, Liu Linfu, et al. Evolution and driving mechanisms of soil conservation function in Pisha sandstone area of the Yellow River basin based on the InVEST model [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2024, 39(3): 144-152.
- [9] 梁甜, 黄茜, 杨霏, 等. 基于InVEST-PLUS模型的三峡库区(重庆段)生境质量演变及预测[J]. *长江流域资源与环境*, 2023, 32(10): 2184-2195.
- Liang Tian, Huang Xi, Yang Fei, et al. Evolution and prediction of habitat quality in the Three Gorges reservoir (Chongqing section) based on the InVEST-PLUS model [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2023, 32(10): 2184-2195.
- [10] 石建丽, 仲俊涛, 刘美娟. 基于InVEST模型的祁连山地区土壤保持功能时空演变及驱动因素分析[J]. *水土保持通报*, 2024, 44(2): 455-464.
- Shi Jianli, Zhong Juntao, Liu Meijuan. Spatiotemporal evolution and driving factors of soil conservation function in Qilian Mountains based on InVEST model [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2024, 44(2): 455-464.
- [11] 周沛芳, 周涛, 刘霞, 等. 青海省土壤有机碳估算及其不确定性分析[J]. *地理科学进展*, 2022, 41(12): 2327-2341.
- Zhou Peifang, Zhou Tao, Liu Xia, et al. Estimation of soil organic carbon and its uncertainty in Qinghai Province [J]. *Progress in Geography*, 2022, 41(12): 2327-2341.
- [12] 朱宁宁, 杨必胜, 董震, 等. 森林植被碳储量的遥感估测流程与方法[J]. *遥感学报*, 2025, 29(1): 134-146.
- Zhu Ningning, Yang Bisheng, Dong Zhen, et al. A novel framework for forest vegetation carbon stock estimation based on remote sensing [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2025, 29(1): 134-146.
- [13] 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[J]. *生态学报*, 2023, 43(11): 4473-4487.
- Ren Yinming, Liu Xiaoping, Xu Xiacong, et al. Multi-scenario simulation of land use change and its impact on ecosystem services in Beijing-Tianjin-Hebei region based on the FLUS-InVEST model [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(11): 4473-4487.
- [14] 毛永发, 周启刚, 王陶, 等. 耦合PLUS-InVEST-geodector模型的三峡库区碳储量时空变化及其定量归因[J]. *长江流域资源与环境*, 2023, 32(5): 1042-1057.
- Mao Yongfa, Zhou Qigang, Wang Tao, et al. Spatial-temporal variation of carbon storage and its quantitative attribution in the Three Gorges reservoir area coupled with PLUS-InVEST geodector model [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2023, 32(5): 1042-1057.
- [15] 帕茹克·吾斯曼江, 艾东, 方一舒, 等. 基于InVEST与CA-Markov模型的昆明市碳储量时空演变与预测[J]. *环境科学*, 2024, 45(1): 287-299.
- Paruke Wusimanjiang, Ai Dong, Fang Yishu, et al. Spatial and temporal evolution and prediction of carbon storage in Kunming City based on InVEST and CA-Markov model [J]. *Environmental Science*, 2024, 45(1): 287-299.
- [16] 王保盛, 廖江福, 祝薇, 等. 基于历史情景的FLUS模型邻域权重设置: 以闽三角城市群2030年土地利用模拟为例[J]. *生态学报*, 2019, 39(12): 4284-4298.
- Wang Baosheng, Liao Jiangfu, Zhu Wei, et al. The weight of neighborhood setting of the FLUS model based on a historical scenario: A case study of land use simulation of urban agglomeration of the Golden Triangle of Southern Fujian in 2030 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(12): 4284-4298.
- [17] 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.
- Zhang Yan, Shi Xueyi, Tang Qian. Carbon storage assessment in the upper reaches of the Fenhe River under different land use scenarios [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(1): 360-373.
- [18] 颜扬翰, 郭子坚, 王文渊, 等. 基于ANN-CA模型的港口城市景观格局变化与预测研究: 以胶州湾西岸区为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(7): 1507-1514.
- Yan Yanghan, Guo Zijian, Wang Wenyuan, et al. Research on landscape pattern changes and prediction in port city based on ANN-CA model: A case study of the west coast of Jiaozhou Bay [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, 29(7): 1507-1514.
- [19] 张顺鑫, 吴子豪, 闫庆武, 等. 基于PLUS-InVEST模型的天山北坡生态系统碳储量时空变化与预测[J]. *干旱区研究*, 2024, 41(7): 1228-1237.
- Zhang Shunxin, Wu Zihao, Yan Qingwu, et al. Spatio-temporal changes in the ecosystem carbon storage on the northern slope of the Tianshan Mountains and simulations based on the PLUS-InVEST model [J]. *Arid Zone Research*, 2024, 41(7): 1228-1237.
- [20] 吴轩, 张天翼, 王玉贵. 基于Markov-PLUS模型的乐山市土地覆被多情景模拟研究[J]. *湖北民族大学学报(自然科学版)*, 2024, 42(2): 293-300.
- Wu Xuan, Zhang Tianyi, Wang Yugui. Research on multiple scenarios simulation of land cover in Leshan City based on Markov-PLUS model [J]. *Journal of Hubei Minzu University (Natural Science Edition)*, 2024, 42(2): 293-300.
- [21] 李瑾璞, 夏少霞, 于秀波, 等. 基于InVEST模型的河北省陆地生态系统碳储量研究[J]. *生态与农村环境学*

- 报, 2020, 36(7):854-861.
- Li Jinpu, Xia Shaoxia, Yu Xiubo, et al. Evaluation of carbon storage on terrestrial ecosystem in Hebei Province based on InVEST model [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, 36(7):854-861.
- [22] 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.
- Xu Li, He Nianpeng, Yu Guirui. A dataset of carbon density in Chinese terrestrial ecosystems (2010s) [J]. *China Scientific Data*, 2019, 4(1):90-96.
- [23] 谢耕, 吴莉萍, 陈敏. 基于土地利用变化的成都市碳储量时空格局演变特征分析[J]. *环境影响评价*, 2023, 45(6):104-112.
- Xie Geng, Wu Liping, Chen Min. Characterization of the evolution of spatial and temporal patterns of carbon storage in Chengdu based on land use change [J]. *Environmental Impact Assessment*, 2023, 45(6):104-112.
- [24] 伍丹, 朱康文, 张晟, 等. 基于PLUS模型和InVEST模型的成渝经济区碳储量演化分析[J]. *三峡生态环境监测*, 2022, 7(2):85-96.
- Wu Dan, Zhu Kangwen, Zhang Sheng, et al. Evolution analysis of carbon stock in Chengdu-Chongqing economic zone based on PLUS model and InVEST model [J]. *Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges*, 2022, 7(2):85-96.
- [25] Giardina C P, Ryan M G. Evidence that decomposition rates of organic carbon in mineral soil do not vary with temperature [J]. *Nature*, 2000, 404(6780):858-861.
- [26] Alam S A, Starr M, Clark B J F. Tree biomass and soil organic carbon densities across the Sudanese woodland savannah: A regional carbon sequestration study [J]. *Journal of Arid Environments*, 2013, 89:67-76.
- [27] 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.
- [28] 魏熙乐, 李倩, 邓爱平, 等. 基于土地利用变化的四川省碳储量时空演变与预测及驱动因素分析[J]. *水土保持研究*, 2025, 32(3):373-383.
- Wei Xile, Li Qian, Deng Aiping, et al. Spatiotemporal evolution, forecast, and driving factor analysis of carbon storage in Sichuan Province based on land use change [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025, 32(3):373-383.
- [29] 赵桐, 蒙吉军. 基于土地利用变化的成都平原经济区碳储量时空演变与情景模拟[J]. *山地学报*, 2023, 41(5):648-661.
- Zhao Tong, Meng Jijun. Spatio-temporal evolution of land use and resulting change in carbon stock in Chengdu Plain economic zone (CPEZ), China [J]. *Mountain Research*, 2023, 41(5):648-661.
- [30] 汪翡翠, 汪东川, 张利辉, 等. 京津冀城市群土地利用生态风险的时空变化分析[J]. *生态学报*, 2018, 38(12):4307-4316.
- Wang Feicui, Wang Dongchuan, Zhang Lihui, et al. Spatiotemporal analysis of the dynamic changes in land use ecological risks in the urban agglomeration of Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(12):4307-4316.
- (上接第190页)
- [30] 练晶香, 黎焯, 丁佳艺, 等. 坡耕地黑土有机碳含量和活性组分的坡面分异规律与影响因素[J/OL]. *农业资源与环境学报*, 2025; 1-13.(2025-05-19). <https://link.cnki.net/doi/10.13254/j.jare.2025.0096>.
- Lian Jingxiang, Li Ye, Ding Jiayi, et al. Spatial variations and determining factors of the quantity and quality of soil organic carbon along the slope of Mollisols in northeast China [J/OL]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2025; 1-13.(2025-05-19). <https://link.cnki.net/doi/10.13254/j.jare.2025.0096>.
- [31] 刘庆, 沈东辉, 和继军, 等. 黄土坡面细沟侵蚀形态特征及横断面分异性[J]. *水土保持学报*, 2025, 39(2):30-39.
- Liu Qing, Shen Donghui, He Jijun, et al. Morphological characteristics and cross-sectional heterogeneity of rill erosion on loess slope [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2025, 39(2):30-39.
- [32] 吴瑜健, 马海林, 孙姗姗, 等. 巨大芽孢杆菌F₁配施有机物料对土壤理化性质的影响[J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2025, 56(2):353-361.
- Wu Yujian, Ma Hailin, Sun Shanshan, et al. *Bacillus megaterium* F₁ combined with organic materials on soil physical and chemical properties [J]. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2025, 56(2):353-361.
- [33] 夏文. 窄路面加宽改造项目土石方平衡与生态弃土方案优化[J]. *交通科技与管理*, 2025(16):122-124.
- Xia Wen. Optimization of earthwork balance and ecological spoilage scheme for narrow pavement widening reconstruction project [J]. *Transportation technology and management*, 2025(16):122-124.
- [34] Zhang Haohui, Hui Xin, Wang Wentao, et al. A multi-objective approach for optimizing mobile drip irrigation systems: Experimental verifications in northern China [J]. *Journal of Hydrology*, 2025, 659:133334.