

兰州市多情景土地利用变化对碳储量的影响

Carbon Storage Impacts of Land Use Change in Lanzhou under Multi-Scenario Simulations

王小虎 唐红* 杨崇鉴

WANG Xiaohu, TANG Hong*, YANG Chongjian

基金项目: 国家自然科学基金“甜菜碱提高草地早熟禾干旱高温交叉胁迫抗性的机理研究”(编号: 32060247); 甘肃省研究生“创新之星”项目“时空分异下兰州市碳中和碳达峰研究”(编号: GS202234)

摘要

评估不同情景下土地利用变化对碳储量的影响, 有助于识别关键的生态保护区和恢复区域, 为制定科学的土地利用规划、碳减排政策和生态保护措施提供依据。基于 GIS、PLUS 模型和 InVEST 模型, 分析兰州市 2000—2020 年土地利用及碳储量变化, 并预测了 2030 年在 3 种不同情景下碳储量的演变趋势。结果表明, 2000—2020 年, 兰州市耕地和草地面积减少, 建设用地大幅扩张, 碳储量整体呈下降趋势; 2030 年在城镇发展情景下建设用地显著扩张, 碳储量大幅下降; 自然发展情景下碳储量降幅较小; 生态保护情景下林地碳储量有所回升。其中植被覆盖度与碳储量正相关, 人口密度与碳储量负相关。最后提出落实生态保护政策, 合理控制城市扩张, 优化交通基础设施布局等策略。

Abstract

Assessing the impact of land use changes on carbon storage under different development scenarios is crucial for identifying priority areas for ecological protection and restoration, and for informing land use planning and carbon mitigation strategies. This study integrated GIS, the PLUS model, and the InVEST model to analyze land use and carbon storage dynamics in Lanzhou from 2000 to 2020. It projected future changes under three scenarios: urban development, natural development, and ecological protection. Results indicate that from 2000 to 2020, arable and grassland areas declined while construction land expanded significantly, leading to a marked reduction in overall carbon storage. By 2030, carbon storage is expected to decline sharply under the urban development scenario, decrease moderately under natural development scenario, and partially recover under ecological protection scenario, particularly in forest areas. Positive correlations were found between carbon storage and vegetation coverage, while negative correlations were observed with population density. Policy recommendations include implementing robust ecological protection, limiting urban sprawl, and optimizing transportation infrastructure to enhance regional carbon sequestration and sustainability.

文章亮点

1) 结合 PLUS 和 InVEST 模型, 多情景模拟探讨土地利用变化对碳储量的影响; 2) 揭示生态保护政策对碳储量的显著恢复作用, 优于城镇化发展和自然发展情景; 3) 通过驱动力分析, 明确了植被覆盖度 (NDVI) 和人口密度分别为碳储量的关键正向和负向驱动因子。

关键词

土地利用; 碳储量; PLUS 模型; InVEST 模型; 驱动力; 可持续发展

Keywords

Land use; Carbon storage; PLUS model; InVEST model; Driving force; Sustainable development

收稿日期: 2025-01-21

修回日期: 2025-03-08

土地利用变化是全球环境变化的重要驱动力之一, 对生态系统的结构与功能产生深远影响。在快速城市化和工业化的背景下, 土地利用方式的转变引发了诸如森林砍伐、农田扩展、城市扩张等一系列现象, 这些变化显著影响了碳储量及其循环过程^[1-2]。碳储量作为衡量生态系统固碳能力的重要指标, 与全球气候变化密切相关。在城市环境中, 土地利用变化通常表现为从自然生态用地向人工建设用地的转变。城市扩张占用了大量的森林、草地和湿地, 这不仅削弱了生态系统的碳储存能力, 还导致碳排放量增加^[3-4]。因此, 对土地利用变化与碳储量之间的定量研究, 能够为实际的土地管理和生态保护措施提供指导, 特别是在城市化进程中的绿色基础设施建设和碳管理方面。通过优化土地利用方式, 加强城市生态系统的碳汇能力, 不仅能够减少碳排放, 还能增强城市的可持续发展能力。

土地利用预测是研究土地利用动态变化的重要内容。当前常用的预测方法主要包括统计模型、空间模拟模型、机器学习模型、综合模型, 以及结合地理信息系统 (Geographic Information System, GIS) 和遥感 (Remote Sensing Image, RS) 的模型。如 Hasnain Abbas 等^[5]使用马尔可夫链模型对巴基斯坦伊斯兰共和国的首都伊斯兰堡 (Islamabad) 的土地利用变化进行分析, 发现该模型在预测区域土地利用动态变化方面具有较强的适用性; Maher Milad Aburas 等^[6]应用 CA-Markov 模型对马来西亚芙蓉市 (Seremban) 的土地利用变化进行预测, 成功反映了城市扩张的空间动态过程; M.Pal^[7]使用随机森林模型对遥感影像数据进行土地利用分类研究, 结果表明该模型具有较高的准确性; Peter H Verburg 等^[8]通过 CLUE-S 模型研究珠江三角洲的土地利用变化, 揭示了快速城市化对区域土地利用格局的深远影响。与上述模型相比, PLUS 模型凭借其多源数据整合的灵活性、较强的情景适应性以及可动态调整的特点, 能够在处理复杂、多变的土地利用变化时展现出更为优越的性能^[9-11]。InVEST 模型则专注于定量评估生态服务功能, 特

别是碳储量的空间分布。黄计等^[12]运用 InVEST 模型对湖南省碳储量进行评估; 张爽等^[13]利用 InVEST 模型分析了云南纳帕河流域 20 年的碳储量变化, 结果表明林地的减少和建设用地的增加将导致碳储量减少; Huang Xiaodong 等^[14]运用 InVEST 模型估算青藏高原的碳储量, 发现研究区碳储量呈现先减少后增加的趋势。结合 PLUS 模型和 InVEST 模型^[15-16], 可同时考虑土地利用变化与生态服务的综合影响, 精确评估不同情景下的碳储量变化, 尤其是在空间分布和长期动态预测方面。

目前针对兰州市土地利用变化与碳储量之间关系的定量研究较少, 难以支撑精细化的碳管理与可持续发展规划。基于此, 本研究利用 GIS 软件解译兰州市 1990—2020 年的土地利用变化, 并利用 PLUS 模型设定了 3 种情景模拟 2030 年兰州市土地利用数据, 接着基于 InVEST 模型对兰州市碳储量进行量化, 探讨经济发展与生态保护

之间的权衡。研究的主要目标包括: 解析兰州市土地利用变化的时空演变特征, 识别关键变化过程; 利用 PLUS 模型模拟不同情景下的未来土地利用格局, 探讨不同发展模式对土地利用的影响; 应用 InVEST 模型分析兰州市碳储量的时空分布特征; 综合 PLUS 和 InVEST 模型的模拟结果, 提出优化土地利用模式的策略, 以增强碳储存能力并减少碳排放, 为兰州市的绿色基础设施建设、低碳发展和土地管理政策提供科学支撑。

1 数据来源及研究方法

兰州市 (103° 40' E, 36° 03' N) 是甘肃省省会, 位于中国西北部, 地处黄河上游, 其周边环绕着祁连山和荒漠^[17]。兰州市面积约 1.32 万 km², 人口超过 200 万, 是甘肃省的政治、经济和文化中心 (图 1)。兰州市属于温带大陆性气候, 四季分明, 降水较少, 依赖黄河及其支流供水^[18]。

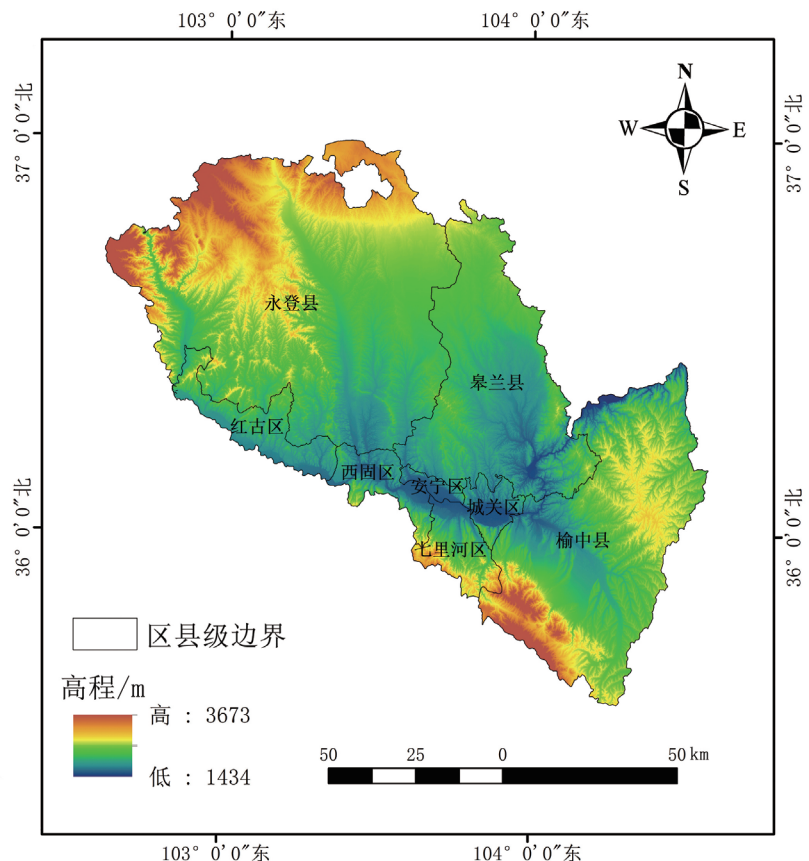


图1 研究区位图

Fig.1 Study area: Geographic location of Lanzhou

1.1 数据来源

研究依据 GDEM V2 数字高程模型, 在 GIS 中进行表面分析, 获得兰州市的坡度及高程数据; 土地利用数据来源于 GlobeLand30 (<http://www.globallandcover.com>), 根据 LULC (Land Use and Land Cover, 土地利用和土地覆盖) 体系, 利用重分类工具将地类划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地 6 类; 国内生产总值、人口分布、年平均降水量、年平均气温、归一化植被指数 (NDVI) 和土壤类型数据来自资源环境科学与数据研究中心; 高速、铁路、河流和一级道路数据从 OpenStreetMap 中获取。将各类数据栅格化后, 统一整合为 30 m×30 m 分辨率的 TIF 格式数据。并通过计算欧氏距离获得相关因子数据, 将其设置于同一坐标系 Krasovsky_1940_Albers 中 (表 1)。

1.2 研究方法

本研究利用 PLUS 模型, 通过整合多种数据与方法, 模拟不同情景下土地利用的变化趋势, 从而预测未来土地利用的空间分布和变化过程^[19~20]。研究根据地形、人文、气候、社会及环境等多维因素, 设定了 3 种未来情景。为确保研究的科学性, 利用 2000 年和 2010 年的土地利用数据预测 2020 年的土地利用情况, 并与实际 2020 年土地利用情况作比较, 得出 kappa 系数为 0.871, 这表明模型精度符合研究要求。再利用 2010 年与 2020 年的土地利用数据预测 2030 土地利用数据。

同时运用 InVEST 模型, 通过整合土地利用、气候、土壤和植被等数据, 模拟碳的吸收、存储和释放过程, 从而估算碳储量。通过输入区域的基础数据, 结合碳密度和生物量的关系, 可评估不同土地利用类型下的碳储量。研究基于相关文献^[21~26]提出的碳密度修正公式 (1~7), 计算研究区的碳密度数据 (表 2)。因死亡有机质对碳储量结果影响小且数据难以获得, 故设定为 0^[27]。

$$C_{SP} = 3.3968 \times MAP + 3996.1 \tag{1}$$

$$C_{BP} = 6.789 \times e^{(0.0054 \times MAP)} \tag{2}$$

$$C_{BT} = 28 \times MAT + 398 \tag{3}$$

$$K_{BP} = \frac{C_{BP}^1}{C_{BP}^2} \tag{4}$$

$$K_{BT} = \frac{C_{BT}^1}{C_{BT}^2} \tag{5}$$

$$K_B = K_{BP} \times K_{BT} \tag{6}$$

$$K_S = \frac{C_{SP}^1}{C_{SP}^2} \tag{7}$$

式中, C_{SP} 为依据年降水量得到的土壤碳密度, C_{BP} 、 C_{BT} 分别为依据年降水量、年均温得到的植被碳密度, MAP 、 MAT 分别为年均降水量、年均气温; K_{BP} 、 K_{BT} 分别为地上生物量碳密度的降水因子和气温因子修正系数; C^1 和 C^2 分别为根据 MAP 和 MAT 得到的全国和研究区的系数; K_B 为地上生物量碳密度修正系数; K_S 为土壤碳密度修正系数。

接着, 研究根据《兰州市“十四五”生态环境保护规划》(兰政办发〔2022〕11 号) 和《甘肃省“十四五”生态环境保护规划》(甘政办发〔2021〕105 号), 以及已有研究^[28], 制定了 3 种发展情景。自然发展情景 (Q1) 以 2000—2020 年的土地利用现状为基础, 仅限制水域转变为其他地类。生态保护情景 (Q2) 参考周道媛等^[29] 研究, 以自然发展为基础, 设置耕地向林地转移的概率提高 25%, 向草地转移的概率提高 60%, 向建设用地转移的概率降低 50%; 林地转向其他地类转移的概率降低 90%; 未利用地转为草地和林地的概率提高, 向建设用地转移的概率降低 80%; 其余土地类型间相互转移的概率保持不变。城镇发展情景 (Q3) 参考席梅竹等^[30] 研究, 设置耕地向建设用地转移的概率提高 60%, 林地、草地向建设用地转移的概率提高 40%, 水域向建设用地转移概率提高 20%, 未利用地向建设用地转移的概率提高 10%, 限制建设用地向其他地类的转化。

最后, 采用斯皮尔曼相关性分析法评估变量之间的等级相关性^[31]。先对每个研究变量的观测值进行排序, 然后计

表 1 模型驱动数据来源
Tab.1 Date sources for model inputs

数据名称	数据分辨率 /m	数据类型	数据来源
高程	30	地形	地理空间数据云平台 (https://www.gscloud.cn/search)
坡度	30		
GDP	1 000	人文	
人口密度	1 000		
年平均温度	1 000	气候	资源环境科学与数据研究中心 (https://www.resdc.cn)
年平均降水	1 000		
NDVI	1 000	生态	
土壤类型	1 000		
距河流距离	30	社会	OpenStreetMap (https://osm.mapplus.cn/)
距一级道路距离	30		
距高速的距离	30		
距铁路距离	30		

表 2 研究区碳密度数据
Tab.2 Carbon density data of the study area
单位: t/hm²

土地利用类型	地上生物量碳密度	地下生物量碳密度	土壤碳密度
耕地	0.25	3.80	8.70
林地	2.10	5.34	12.80
草地	1.42	3.99	8.00
水域	0.11	0	0
建设用地	0.12	0	1.30
未利用地	0.06	0	0.70

算每个变量的秩次。通过比较 2 个变量的秩次来计算斯皮尔曼相关系数,其值范围在 -1 到 1 之间。当相关系数接近 1 时,表示 2 个变量之间存在强正相关;当相关系数接近 -1 时,表示存在强负相关;当相关系数接近 0 时,表示两者之间无显著相关性。本研究将每个因子数据与 2030 年不同情景下碳储量进行分析,得到 2030 年不同情景下碳储量变化与各变量间的关系。

2 结果与分析

2.1 2000—2020 年土地利用与碳储量变化分析

2.1.1 土地利用变化

兰州市不同土地利用类型的分布情况呈现出明显的区域性差异(图 2)。耕地主要集中在城市周边及部分平原地区,尤其是在南部和西部地带,耕地面积较大。草地则广泛分布在兰州市的北部和东部山区,覆盖面积较广,是该地区的主要土地类型之一。林地主要分布在山区,尤其是在西北和西南海拔较高地区,表现出一定的集中趋势。水域主要分布在城市附近的河流和湖泊区域,面积相对较小。建设用地则主要集中在以城关区为核心的城区、东北部地势较为平坦的县城地区及周边的交通枢纽区。2000—2010 年建设用地呈集中分布趋势,到 2020 年逐步向周边区域扩张。未利用地的分布较为零散,主要集中在城市外围的部分未开发区域,并且面积较小。

2000—2020 年,兰州市耕地面积不断减少,林地面积略微增加;草地的面积在 2000 年和 2010 年变化不大,但到 2020 年面积略微减少;建设用地的增加最为显著,说明城市扩展和基础设施建设迅速;水域面积有所增加,但增幅较小;未利用地的面积先增后减(表 3)。

2.1.2 碳储量变化

2000—2020 年兰州市整体碳储量呈现下降趋势(表 4)。

表 3 2000—2020 年兰州市土地利用类型面积及占比

Tab.3 Land use area and proportion in Lanzhou, 2000—2020

土地利用类型	2000 年		2010 年		2020 年	
	面积 /km ²	占比 /%	面积 /km ²	占比 /%	面积 /km ²	占比 /%
耕地	3 849.57	29.16	3 685.86	27.92	3 487.59	26.42
林地	905.10	6.86	945.07	7.16	930.37	7.05
草地	7 986.78	60.50	8 002.83	60.62	7 826.07	59.28
水域	67.69	0.51	69.03	0.52	76.24	0.58
建设用地	340.30	2.58	411.34	3.12	806.08	6.11
未利用地	52.55	0.40	87.86	0.67	75.64	0.57

表 4 2000—2020 年兰州市碳储量

Tab.4 Carbon storage by land use type in Lanzhou, 2000—2020
单位:万吨

土地利用类型	2000 年	2010 年	2020 年
耕地	490.82	469.95	444.68
林地	183.19	191.28	188.31
草地	1 071.02	1 073.18	1 049.48
水域	0.07	0.08	0.08
建设用地	4.83	5.84	11.45
未利用土地	0.40	0.67	0.60
总计	1 750.33	1 741.00	1 694.60

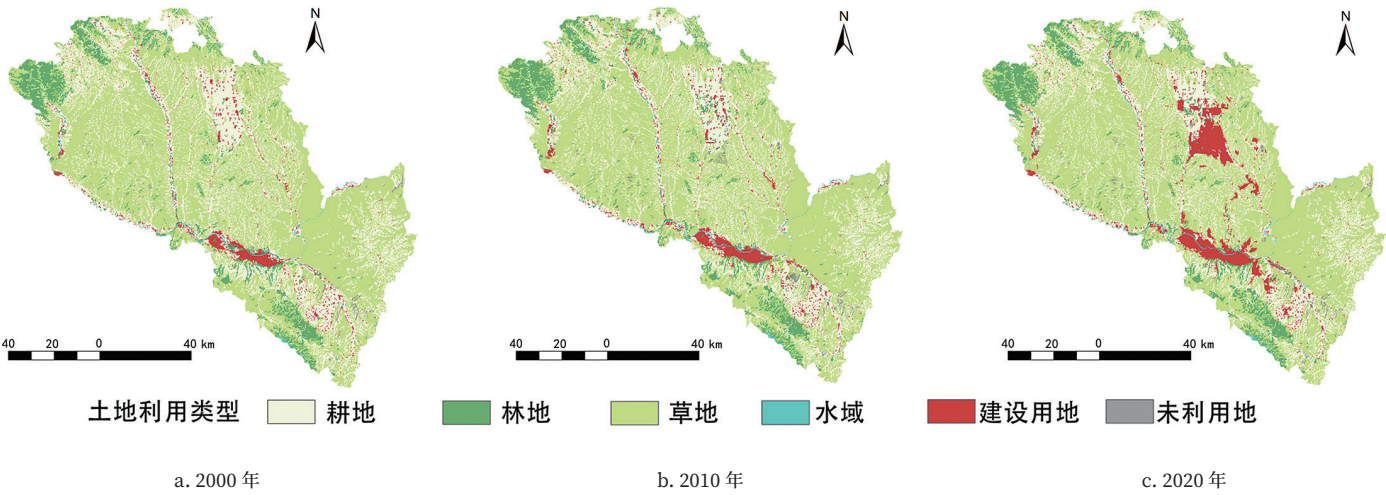


图 2 2000—2020 年兰州市土地利用变化
Fig.2 Land use changes in Lanzhou, 2000—2020

耕地碳储量逐年下降；林地的碳储量略有波动，整体维持较为稳定的水平；草地的碳储量也呈现下降趋势；建设用地碳储量的增加与兰州市总碳储量的变化呈反向趋势，表明城市建设扩张对整体碳储量产生了负向影响。

2000—2020 年，兰州市的碳储量在不同土地类型上的分布特征表现出明显的时空变化（图 3）。首先，集中在城市周边的耕地区域的碳储量逐年下降，尤其是在城市化进程较快的地区，碳储量下降趋势更明显；主要分布在城市西部和北部山区的林地的碳储量相对稳定，保持在较高的水平；草地的碳储量较大，且分布范围广泛，主要集中在兰州市的北部和东部；建设用地和未利用地的碳储量较小。整体来看，碳储量的变化呈现出一定的区域性特征，城市化进程带来的土地类型变化对碳储量的影响显著。

2.2 2030 年土地利用变化与碳储量预测分析

2.2.1 不同情景下土地利用变化分析

研究利用 2010 年与 2020 年的土地利用数据预测 2030 年土地利用数据（表 5）。在城镇发展情景下，预测 2030 年建设用地面积为 1 247.53 km²，相比 2020 年增加了 441.45 km²，尤其是在城市核心区和周边地区；耕地面积为 3 269.48 km²，较 2020 年减少了 218.11 km²；草地面积为 7 622.94 km²，较 2020 年略有减少，这主要是因为城市扩张和低效草地转为其他用途。在自然发展情景下，预测 2030 年建设用地面积为 1 166.24 km²，较 2020 年有所增加；耕地和草地面积分别为 3 311.18 km² 和 7 656.54 km²，较 2020 年小幅度减少。在生态保护情景下，预测 2030 年建设用地面积为 1 067.26 km²，较 2020 年增加了 261.18 km²；林地面积增加至 966.22 km²，较 2020 年有所回升，这表明生态保护措施有效促进了林地恢复；耕地面积增加至 3 371.53 km²。在城镇发展情景下，城镇化进程推动了建设用地的扩张，导致耕地和草地的减少；而在生态保护情景下，严格管控和生态保护措施有效限制了建设用地扩张，促进了林地和耕地的恢复，体现了生态保护与城市化

之间的平衡需求，更有利于城市的可持续发展。

2030 年兰州市土地利用变化在不同情景下呈现出不同的特点（图 4）。在城镇发展情景下，2030 年的建设用地持续扩张，主要集中在兰州市的东北部和东南部，部分耕地和草地被转变为建设用地。这表明城市化进程加速，城市规模不断扩大，建设用地的需求急剧上升。在自然发展情景下，尽管城市扩张受到一定控制，但建设用地的增加依然明显，特别是在兰州市东北部的县城区域及城关区附近的平原地带。这一情景下，草地和耕地的面积变化较为平缓，但仍有部分土地转变为建设用地。在生态保护情景下，建设用地的扩展得到严格限制，较多的草地和林地得以保留，尤其是兰州市西北部 and 东南部的山区。这说明通过实施生态保护策略，可有效遏制建设用地扩张，保护和恢复关键生态区域，促进土地的可持续利用，从而实现环境、社会和经济的协调发展。

2.2.2 不同情景下碳储量变化分析

以 2020 年为基准年，兰州市 2030 年在不同情景下的

表 5 2030 年不同情景下土地利用类型面积及占比
Tab.5 Area and proportion of land use types under three scenarios in 2030

土地利用类型	自然发展情景 Q1		生态保护情景 Q2		城镇发展情景 Q3	
	面积 /km ²	占比 /%	面积 /km ²	占比 /%	面积 /km ²	占比 /%
耕地	3 311.18	25.08	3 371.53	25.54	3 269.48	24.77
林地	916.66	6.94	966.22	7.32	911.78	6.91
草地	7 656.54	58.00	7 657.21	58.00	7 622.94	57.74
水域	82.73	0.63	77.33	0.59	82.24	0.62
建设用地	1 166.24	8.83	1 067.26	8.08	1 247.53	9.45
未利用地	68.65	0.52	62.45	0.47	68.03	0.52

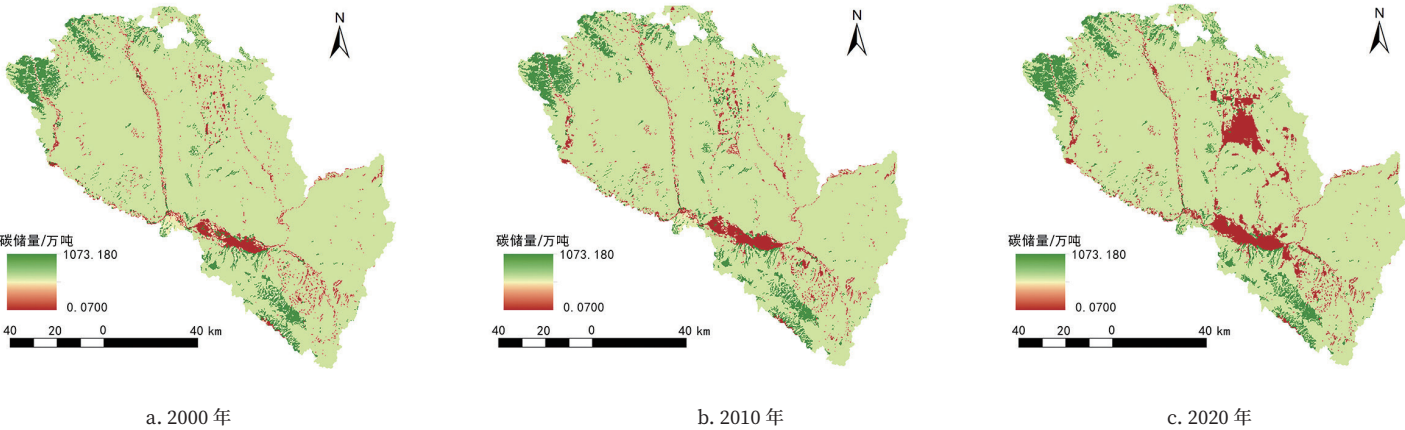


图 3 2000—2020 年碳储量分布变化
Fig.3 Spatial distribution of carbon storage in Lanzhou, 2000—2020

碳储量差异较大（表 6）。在城镇发展情景下，由于城市化进程加快，耕地、林地和草地的碳储量均下降，反映了建设用地扩展对自然碳储量的负面影响。相比之下，在自然发展情景下的耕地和草地的碳储量略高于城镇发展情景，但仍低于 2020 年的水平。在生态保护情景下，总碳储量相较于 2020 年有所下降，但得益于严格的生态保护措施，所减少的碳储量是 2030 年 3 种情景中最少的，且林地的碳储量较 2020 年增加了 7.25 万吨。总体来看，与 2020 年相比，生态保护情景有助于最大程度地抑制碳储量减少。

在 2030 年不同情景下的碳储量分布中，低碳储量区域主要集中在城市核心区及周边建设用地扩展区（图 5）。尤其是在城镇发展情景下，碳储量显著下降。而在自然发展情景下，低碳储量区域与城镇发展情景相似，但由于城市化进程受控，草地和耕地碳储量下降幅度相对缓慢。在生态保护

表 6 2030 年兰州市不同情景下碳储量
Tab.6 Predicted carbon storage in Lanzhou under three scenarios in 2030

单位：万吨

土地利用类型	城镇发展情景	自然发展情景	生态保护情景
耕地	416.86	422.18	429.87
林地	184.54	185.53	195.56
草地	1 022.24	1 026.74	1 026.83
水域	0.09	0.09	0.09
建设用地	17.71	16.56	15.16
未利用土地	0.52	0.52	0.47
总计	1 641.96	1 651.62	1 667.98

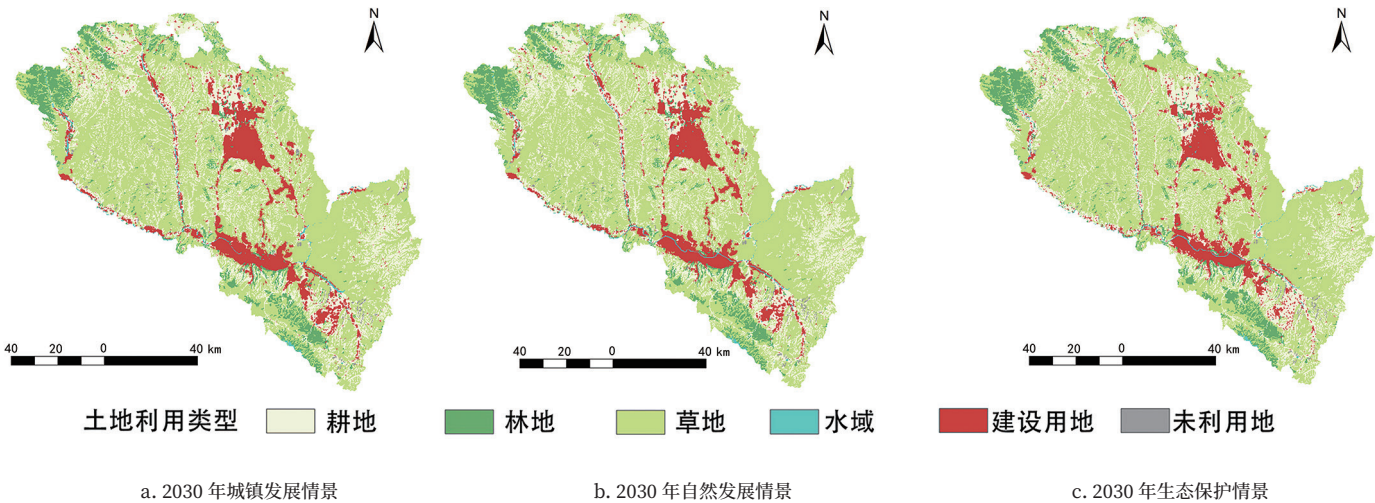


图 4 2030 年不同情景下土地利用分布
Fig.4 Land use patterns under three scenarios in 2030

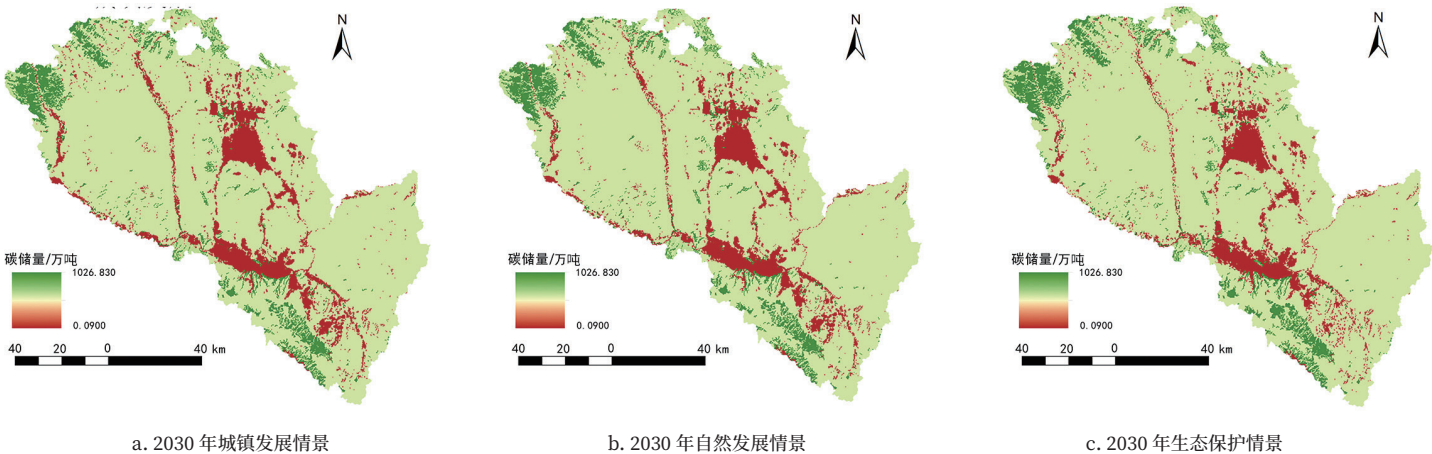


图 5 2030 年不同情景下兰州市碳储量分布
Fig.5 Carbon storage distribution in Lanzhou under scenarios in 2030

情景下碳储量变化最为明显，低碳储量区域大幅减少，建设用地扩展受到严格限制。高碳储量区域则主要分布在兰州市的西北部 and 东南部山区，尤其是林地，碳储量得到有效保护和恢复。在生态保护情景下高碳储量区域明显更大，显示出生态保护措施的积极效果。

2.3 不同情景下碳储量变化驱动力分析

研究基于城镇发展、生态保护和自然发展 3 种情景，分析碳储量的变化（图 6）。从相关性分析结果来看，自然因素（如 NDVI）在生态保护情景下的作用更为突出，而在人类活动较为密集的城镇发展情景和自然发展情景下，人口密度和交通基础设施的影响更加显著。

在生态保护情景下，NDVI 与碳储量呈现正相关关系，表明生态恢复和植被保护措施利于碳储量提升。同时，坡度和碳储量也呈正相关关系，说明生态保护政策在高坡度区域下有助于增强植被固碳能力。人口密度和气温对碳储量产生了明显的负面作用，尽管生态保护措施可缓解这一情况，但依然存在一定的碳损失。此外，与基础交通设施的距离和碳储量为正相关（即距离交通设施越远，碳储量越高），表明道路等基础设施建设抑制碳储量的增长。

在城镇发展情景下，2030 年碳储量受人为因素影响更大。尤其是交通基础设施和人口密度对碳储量的影响更明显，与一级道路、铁路和高速公路的距离与碳储量存在正相关性，人口密度与碳储量负相关，这说明城镇扩张和基础设施扩建将进一步导致碳储量的减少。同时，NDVI 仍对碳储量有正向作用，但相较于生态保护情景有所减弱，这表明植被固碳能力在城镇化过程中减弱。

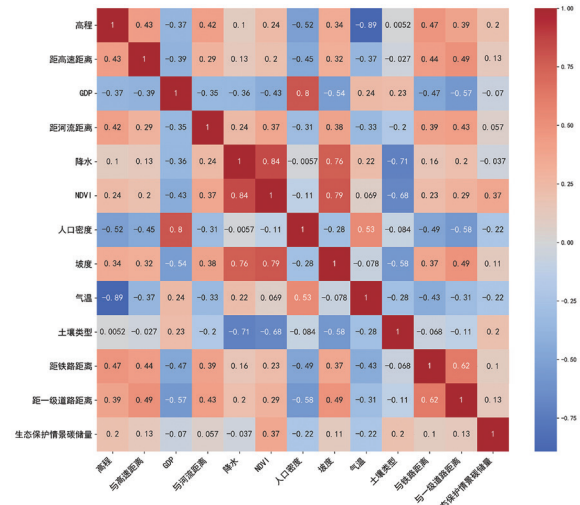
在自然发展情景下的 2030 年碳储量的变化趋势与生态保护情景相似，但受到一定程度的人为干扰。NDVI 仍是碳储量的主要正向驱动因素，而人口密度的负面影响依然存在，这说明在无额外保护政策的情况下，碳储量仍会受到经济增长和城市扩张的影响，而有所下降。

综上，生态保护情景下 2030 年碳储量受自然因素影响较大，而城镇发展情景和自然发展情景下人为因素主导碳储量变化。因此，合理控制城市扩张、优化生态保护政策对于维持碳储量至关重要，尤其是在城镇化快速推进的背景下，应加强绿地保护，优化交通基础设施布局，以减少人为活动对碳储量的不利影响。

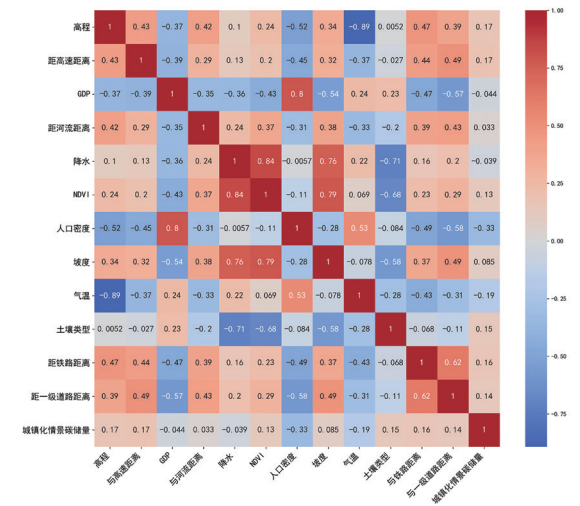
3. 讨论

3.1 土地利用对碳储量的影响

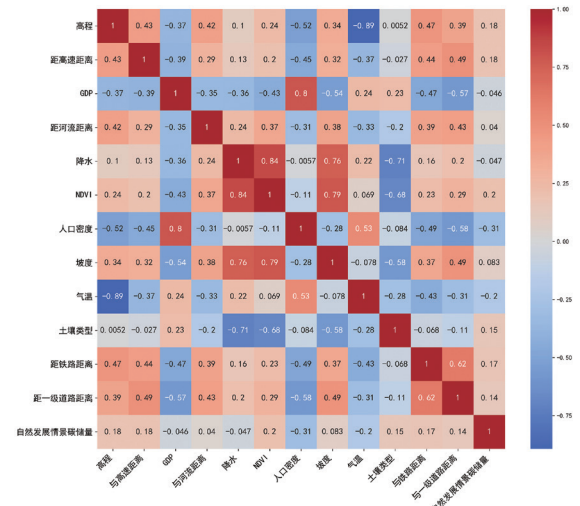
通过分析土地利用和碳储量的变化可知，碳储量变化的主要原因是土地利用类型的转变，特别受耕地、草地以及建设用地的影响。耕地和草地的大量转变为建设用地，会导致碳储量显著下降，尤其是在城市化进程较快的区域。在城镇发展情景中，2030 年建设用地的扩张导致碳储量进一步减少，特别是耕地和草地的碳储量下降。在自然发展情景下，虽然城市化受到一定控制，但碳储量依然未能完全恢复。而在生态保护情景下，严格的生态保护措施有效限制了建设用



a. 驱动因子和生态保护情景碳储量相关矩阵



b. 驱动因子和城镇发展情景碳储量相关矩阵



c. 驱动因子和自然发展情景碳储量相关矩阵

图 6 不同情景下 2030 年碳储量与驱动因子相关性矩阵
Fig.6 Correlation matrix between carbon storage and driving factors under three scenarios in 2030

地的扩张, 保持和恢复了林地、草地和耕地的碳储量。

为促进兰州市未来的城市发展和生态保护, 建议加强城市发展规划管控, 严格控制建设用地的扩张, 优化土地利用结构; 减少对碳储量较高地区的破坏, 优先实施生态保护与恢复措施, 特别是加强对北部和西部山区的林地和草地的保护和恢复; 推动绿色基础设施建设, 增加城市绿地, 增强碳储存功能, 这将有利于兰州市在城市化进程中实现生态保护和碳储量增长的双赢目标, 推动可持续发展。

3.2 多情景下碳储量变化的驱动因素及管理策略

通过分析不同情景下 2030 年碳储量变化的主要驱动因素可知, 气温升高和人口密度增大是普遍的负向驱动因素, 前者加剧了碳释放, 后者通过加大土地开发强度、减少自然植被, 削弱了碳吸收能力。在城镇发展情景下, 交通基础设施对碳储量产生负面影响, 尤其是在道路建设过程中, 土地被开发为建设用地, 导致碳储量下降。合理规划交通设施、避免过度开发成为缓解碳储量减少趋势的关键措施。在生态保护情景下, 土壤类型和 NDVI 的碳固存能力与碳储量呈正相关, 表明特定土壤及植被覆盖度高对碳存储具有重要作用, 加强土壤保护和植被恢复是提升碳储量的有效途径。综上所述, 碳储量变化受气候变化、人口增长及土地利用方式等多重因素影响, 未来发展需根据不同情景制定精准的碳管理策略。

4 结论

本研究利用 PLUS 模型及现有土地利用数据预测出兰州市 2030 年在不同发展情景下的土地利用状况, 并利用 InVEST 模型对兰州市的碳储量进行计算。研究发现: 1) 2000—2020 年, 研究区耕地面积逐年减少, 草地和耕地转变为建设用地; 城市化进程加速导致城市核心区域和周边地带的建设用地面积逐年增加; 林地面积略有增加, 草地面积微幅下降; 水域面积和未利用地的变化较小。2) 2000—2020 年, 兰州市大面积耕地和草地转化为建设用地, 导致总体碳储量显著下降, 特别是在城市扩张区域。林地碳储量略有波动, 相对稳定。高值区集中分布在西北部 and 东南部山区的林地和草地区域, 低值区分布在城市中心及周边县城扩张区。3) 2030 年在不同情景下, 建设用地持续增加, 耕地和草地的面积普遍减少。但在生态保护情景下, 林地等部分自然区域得以恢复和保护。4) 2030 年在不同情景下, 碳储量变化有明显差异。城镇发展情景下建设用地扩张导致碳储量进一步减少; 自然发展情景虽然对城市化进程有所控制, 但其碳储量仍呈下降趋势; 生态保护情景通过严格的生态保护措施, 林地碳储量略有恢复, 总碳储量下降得到有效抑制。5) 兰州市未来碳储量变化受人口密度和土地利用方式变化的影响。人口密度与碳储量呈明显负相关, NDVI 与碳储量呈明显正相关。

本研究通过构建多情景模拟(城镇发展、自然发展和生态保护情景), 系统预测了兰州市 2030 年的土地利用数据及其碳储量变化。相较于以往单一情景的研究, 多情景模拟

不仅能够反映不同政策导向下的土地利用的变化趋势, 还为决策者提供了多样化的选择方案, 具有较强的指导意义。研究通过斯皮尔曼相关性矩阵探讨了自然因子(如 NDVI、坡度、气温)和人为因子(如人口密度、交通基础设施)对碳储量的影响机制。这不仅揭示了碳储量变化的内在驱动因素, 还为未来的政策制定提供了理论支持, 弥补了以往研究多关注土地利用变化的直接影响而忽视驱动因素的不足。研究结合了兰州市的区域特点, 进行了本地化的土地利用和碳储量分析。这种区域性与本地化的结合使得研究结果更具针对性和实用性, 以期为兰州市的土地利用规划和生态保护提供建议。

然而, 研究仍存在一定局限性。首先, 模型参数的本地化程度不足, 碳密度数据主要依赖全国或区域性文献, 缺乏本地实测数据支撑, 可能导致估算偏差。此外, 驱动因子覆盖范围有限, 尚未充分考虑政策干预、技术进步及极端气候事件对土地利用变化的动态影响, 模型在量化市场波动、政策执行力度等社会经济因素方面亦存在不足。

未来研究应从数据收集、模型构建和政策应用等方面进一步完善。一方面, 应构建兰州市高分辨率碳密度数据库, 结合遥感反演与地面监测提升模型精度, 并引入机器学习方法优化驱动因子解析能力, 以增强对复杂人类活动的模拟能力。另一方面, 应拓展多情景分析, 纳入低碳城市建设、极端气候事件等因素, 探索政策干预的多维影响。同时, 推进跨学科融合, 结合生态学、经济学与社会学视角, 评估生态保护政策的社会公平性及成本效益, 提高预测结果的稳健性。未来研究需进一步突破单一学科视角的限制, 实现“数据-模型-政策”的耦合优化, 以提升土地利用规划的前瞻性, 增强调控能力, 促进兰州市生态安全与低碳发展的协同发展。

注: 图1~5底图审图号为GS(2019)3333, 其他图片均由作者自绘。

参考文献:

- [1] 王芳, 李婧, 王建, 等. 成渝经济区多情景模拟土地利用变化及其对碳储量的影响[J/OL]. 环境科学, 1-17[2025-01-21]. <https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202407242>.
- [2] 周佳佳, 刘宇, 奉莉军, 等. 土地利用变化背景下浙中地区生态系统碳储量变化模拟与影响因素分析[J]. 环境科学, 2024, 45(10): 5957-5969.
- [3] 金都, 董文明, 刘新平. 新疆塔里木河流域土地利用变化对碳排放的影响: 考虑能源消耗中介效应和绿色科技调节效应[J]. 环境工程学报, 2023, 17(11): 3754-3762.
- [4] 孙霜梅. 哈尔滨市土地利用变化对碳排放的影响及对策研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2020.
- [5] ABBAS H, TAO W, KHAN G, et al. Multilayer perceptron and Markov Chain analysis based hybrid-approach for predicting land use land cover change dynamics with Sentinel-2 imagery[J]. Geocarto International, 2023, 38(1): 1-21.
- [6] ABURAS M M, HO Y M, RAMLI M F, et al. Improving the capability of an integrated CA-Markov model to simulate spatio-temporal urban growth trends using an Analytical Hierarchy Process and Frequency Ratio[J]. International Journal of Applied

Earth Observation and Geoinformation, 2017, 59: 65-78.

[7]PAL M. Random forest classifier for remote sensing classification[J]. International Journal of Remote Sensing, 2005, 26 (1) : 217-222.

[8]VERBURG P, SOEPBOER W, VELDKAMP A, et al. Modeling the spatial dynamics of regional land use: The CLUE-S model[J]. Environmental Management, 2002, 30 (3) : 391-405.

[9] 赵霁雨, 崔柳, 王佳, 等. 基于土地利用模拟预测模型分析的城市绿色空间发展多情景模拟及建设时序研究——以湛江市中心城区为例 [J]. 生态学报, 2023, 43 (15) : 6307-6320.

[10]XU L, LIU X, TONG D, et al. Forecasting urban land use change based on cellular automata and the PLUS model[J]. Land, 2022, 11 (5) : 652.

[11] 张考, 黄春华, 王志远, 等. 基于 DTTD-MCR-PLUS 模型的三生空间格局优化——以长沙市为例 [J]. 生态学报, 2022, 42 (24) : 9957-9970.

[12] 黄计, 黄琦, 邓森. 基于 PLUS-InVEST 模型的湖南省土地利用模拟规划与碳储量评估 [J]. 城市勘测, 2024 (6) : 69-73.

[13] 张爽, 高启晨, 张戎, 等. 基于 PLUS-InVEST 模型碳储量时空演变及驱动因素分析——以纳帕海流域为例 [J]. 中国环境科学, 2024, 44 (9) : 5192-5201.

[14]HUANG X, LIU X, WANG Y. Spatio-Temporal Variations and Drivers of Carbon Storage in the Tibetan Plateau under SSP-RCP Scenarios Based on the PLUS-InVEST-GeoDetector Model[J]. Sustainability, 2024, 16 (13) : 5711.

[15] 刘洋, 张军, 周冬梅, 等. 基于 InVEST 模型的疏勒河流域碳储量时空变化研究 [J]. 生态学报, 2021, 41 (10) : 4052-4065.

[16]WANG R, ZHAO J, CHEN G, et al. Coupling PLUS-InVEST model for ecosystem service research in Yunnan Province, China[J]. Sustainability, 2023, 15 (1) : 271.

[17] 代栗芩, 王天鹏, 盛尧山. 基于多源数据的兰州城市活力空间分布及影响因素研究 [J]. 华中建筑, 2024, 42 (7) : 94-98.

[18] 邹游, 梁浩峰, 李桂媛. 功能-敏感性视角下市域生态承载力评价及规划策略研究——以兰州市为例 [J]. 林业与生态科学, 2023, 38 (2) : 183-194, 208.

[19]LIU J, LIU B, WU L, et al. Prediction of land use for the next 30 years using the PLUS model's multi-scenario simulation in Guizhou Province, China[J]. Scientific Reports, 2024, 14: 13143.

[20] 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.

[21] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量 [J]. 生态学报, 1996 (5) : 497-508.

[22] 黄玫, 季劲钧, 曹明奎, 等. 中国区域植被地上与地下生物量模拟 [J]. 生态学报, 2006 (12) : 4156-4163.

[23] 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 (4) : 491-498.

[24] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析 [J]. 土壤学报, 2004 (1) : 35-43.

[25] 代杰瑞, 庞绪贵, 曾宪东, 等. 山东省土壤有机碳密度的空间分布特征及其影响因素 [J]. 环境科学研究, 2015, 28 (9) : 1449-1458.

[26]ZHANG S, ZHONG Q, CHENG D, 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: 108642.

[27]TANG X, ZHAO X, BAI Y, et al. Carbon pools in China's terrestrial ecosystems: New estimates based on an intensive field survey[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the

United States of America, 2018, 115 (16) : 4021-4026.

[28]LIN Z, PENG S, MA D, et al. Patterns of change, driving forces and future simulation of LULC in the Fuxian Lake Basin based on the IM-RF-Markov-PLUS framework[J]. Sustainable Futures, 2024, 8: 100289.

[29] 周道媛, 王娟, 周凤娟. 基于 PLUS 模型多情景分析的土地利用变化及生态系统服务价值评估——以福州市为例 [J]. 甘肃农业大学学报, 2023, 58 (3) : 198-209.

[30] 席梅竹, 赵中秋, 赵颖丽. 基于 PLUS 模型的 2030 年滹沱河流域山区段生态承载力时空格局多情景预测 [J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41 (3) : 518-529.

[31] 方维岚, 陆正卿, 张晓杰. 基于斯皮尔曼相关性系数分析的烟支重量自动控制系统优化研究 [J]. 电子元器件与信息技术, 2024, 8 (10) : 268-270, 273.

作者简介:

王小虎/1998 年生/男/甘肃兰州人/甘肃农业大学林学院(兰州 730070)/在读硕士研究生/专业方向为林业遥感及风景园林设计

唐红(*通信作者)/1969 年生/女/山东聊城人/博士/甘肃农业大学林学院(兰州 730070)/副教授/研究方向为林业遥感及园林景观设计/E-mail: tangh@gsau.edu.cn

杨崇鉴/1998 年生/男/甘肃兰州人/兰州大学草地农业科技学院(兰州 730020)/在读博士研究生/研究方向为林业遥感及大地景观