基于PLUS-InVEST耦合模型的武汉长江新区碳汇服务空间优化策略研究

徐伟婷[1], 安 琪[1], 周芷欣[1], 江 佳[1], 陈 年[2]
(1.湖北工业大学 艺术设计学院, 湖北 武汉 430068; 2.湖北工业大学 计算机学院, 湖北 武汉 430068)

摘 要: [目的]探究武汉长江新区在"双碳"目标下碳汇服务的空间优化路径,为类似城市新区低碳规划提供科学参考。[方法]运用PLUS模型预测2035年多情景土地利用格局,耦合InVEST模型解析2015—2024年及2035年碳储量变化,并运用空间自相关和冷热点识别碳汇关键区。[结果]①研究期内碳储量由9.05×10^6 t降至8.97×10^6 t,呈逐年递减态势,降速逐步减缓。耕地为区域主导碳库,其碳储量变化受水域与建设用地变化的显著影响,是驱动区域碳汇变化的关键地类。②2035年多情景碳储量模拟结果显示,耕地保护情景>生态保护情景>自然发展情景>产业发展情景。生态保护情景因生态用地碳汇贡献值较低,难以弥补耕地流失带来的碳损失。自然发展情景和产业发展情景中建设用地持续扩张导致生态用地退化,碳储量降幅显著。故在耕地主导的城市新区,耕地保护可实现碳汇最优。③碳储量空间格局呈现"北热南冷"特征。据此识别出碳汇稳定区、碳流失风险区与生态修复区3类碳汇服务单元,并提出差异化协同策略,有效实现产业发展、碳汇稳固目标。[结论]土地利用对碳汇服务空间有显著影响,而小尺度城市新区中耕地主导被证实为碳汇最优情景。3类碳汇服务单元调控策略能实现产业发展与碳汇稳固目标,以弥补现有"城市-农村"过渡带研究在量化实践层面的不足,更具应用价值。

关键词: 土地利用; 碳汇服务; PLUS-InVEST模型; 空间自相关; 空间格局优化; 武汉长江新区
文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2026)05-0313-10 **中图分类号:** X171.1, F301.24, X24

文献参数: 徐伟婷, 安琪, 周芷欣, 等.基于PLUS-InVEST耦合模型的武汉长江新区碳汇服务空间优化策略研究[J].水土保持通报,2026,46(5):313-322. Xu Weiting, An Qi, Zhou Zhixin, et al. Spatial optimization strategies for carbon sink services based on coupled PLUS and InVEST models [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2026,46(5):313-322.

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.05.026 **CSTR:32312.14.stbctb.2026.05.026**

Spatial optimization strategies for carbon sink services based on coupled PLUS and InVEST models

—A case study of Yangtze River New District, Wuhan City

Xu Weiting[1], An Qi[1], Zhou Zhixin[1], Jiang Jia[1], Chen Nian[2]
(1.*School of Art and Design, Hubei University of Technology, Hubei, Wuhan* 430068, *China*;
2.*School of Computer Science, Hubei University of Technology, Hubei, Wuhan* 430068, *China*)

Abstract: [Objective] The spatial optimization pathways of carbon sink services at Yangtze River New District of Wuhan City under the "dual carbon" target were explored in order to provide references for low-carbon planning in similar new urban areas. [Methods] The PLUS model was employed to project land use patterns under multiple scenarios for 2035. The InVEST model was coupled to assess carbon storage dynamics from 2015 to 2024 and in 2035. Spatial autocorrelation and hot-spot and cold-spot analysis were further applied to identify critical carbon sink zones. [Results] ① During the study period, total carbon storage decreased from 9.05×10^6 t to 8.97×10^6 t, exhibiting a year-by-year decline with the rate of decline gradually slowing. Cultivated land served as the dominant carbon pool, and its carbon storage dynamics were significantly influenced by changes in water bodies and built-up

收稿日期:2026-03-07 **修回日期:**2026-04-05 **采用日期:**2026-04-11
资助项目:教育部人文社会科学研究青年项目"基于韧性健康城市的社区景观空间适老性评价与优化研究"(22YJC760053)
第一作者:徐伟婷(2002—),女(汉族),湖北省武汉市人,硕士研究生,研究方向为碳汇景观空间格局优化。Email:102401315@hbut.edu.cn。
通信作者:安琪(1970—),女(汉族),湖北省武汉市人,硕士,副教授,硕士生导师,主要从事环境规划及景观设计。Email:19930001@hbut.edu.cn。

land, positioning it as a key land use type driving regional carbon sink dynamics. ② Projected carbon storage under multiple 2035 scenarios ranked as follows: cultivated land protection scenario>ecological protection scenario>natural development scenario>industrial development scenario. Under the ecological protection scenario, the relatively low carbon sink contribution of ecological land was insufficient to offset carbon losses caused by the loss of cultivated land. In both the natural development and industrial development scenarios, continued expansion of built-up land led to ecological land degradation and a marked decline in carbon storage. These findings suggested that, in new urban areas characterized by a predominance of cultivated land, prioritizing cultivated land protection could achieve optimal carbon sequestration outcomes. ③ Spatially, carbon storage exhibited a "hot in the north, and cold in the south" pattern. Based on this distribution, three types of carbon sink service units were identified: carbon sink stability zones, carbon loss risk zones, and ecological restoration zones. Differentiated collaborative strategies were proposed and effectively achieved the goals of industrial development and carbon sink stability. [Conclusion] Land use exerts a significant influence on the spatial distribution of carbon sink services. In small-scale new urban areas, the cultivated-land-dominated scenario has been demonstrated to be the optimal scenario for carbon sequestration. The proposed regulation strategy for the three carbon sink service units can achieve the goals of industrial development and carbon sink stability, thereby addressing gaps in the quantitative application of existing research on urban-rural transitional zones and offering substantial practical value.

Keywords: land use; carbon sink services; PLUS-InVEST model; spatial autocorrelation; spatial pattern optimization; Wuhan Yangtze River New District

联合国气候变化专门委员会报告显示全球地表平均温度上升约1.1 ℃,气候变暖正持续加剧生态系统结构破坏与功能退化。在"碳达峰碳中和"战略目标背景下,碳储量已成为衡量生态系统碳汇能力的重要指标,其反映生态系统的固碳能力,提升碳储量对于减缓气候变化和促进碳循环发挥着重要作用[1-2]。土地利用变化是影响碳储量变化的关键驱动因素,通过改变陆地生态系统的结构与功能,对碳源碳汇转化、气候土壤等环境要素产生影响[3]。因此,深入研究土地利用变化对碳储量的响应,从而优化碳汇服务空间具有重要意义。

近年来,国内外学者基于碳储量对土地利用变化响应的研究主要集中于多模型耦合评估土地利用变化对碳储功能的潜在影响。吴佩君等[4]基于InVEST模型和元胞自动机(CA)模型模拟发现未来城市扩张引起的碳储量减少比例持续上升27.5%;史名杰等[5]通过MCE-CA-Markov耦合InVEST模型探讨碳储量演变格局,发现伊犁河谷林草地面积退缩是导致碳储量下降的主要因素;杨德文等[6]基于PLUS-InVEST模型研究发现耕地侵占生态用地导致碳储量呈逐年下降趋势。其中,土地利用变化模拟应用较为广泛的模型包括CLUE-S[7],SD[8],CA-Markov[9],FLUS[10],PLUS[11]模型等,PLUS模型融合了土地扩展分析策略模块和空间图斑演化模块,既保留了像元级演化模拟的空间逻辑,又增强了"块状演化"的真实感。将PLUS模型与数据需求少、获取速度快且可进行空间可视化的InVEST模型耦合,用于评估土地利用变化下碳储量的波动情况。

综合现有研究,当前研究范围已覆盖流域生态保护区[5]、城市群[12]及省市域等[13]宏观空间单元,对小尺度城市新区的关注相对匮乏。对此,本文选取城市新区中"农业-城市"过渡带为研究对象,以期弥补小尺度碳储量量化研究的不足。针对既有研究仅依据地类转换对碳储量的影响结论提出宏观调控策略,忽视了策略的落地性和独特性。本文尝试融合空间自相关分析与热点分析,构建"空间冲突识别-分区优化策略"模式,结合相关政策提出生态修复微观策略,以期提升策略科学性与可实施性。

本文研究思路包括:①本研究选取武汉长江新区2015,2020和2024年土地利用数据,通过PLUS模型模拟2024年土地利用数据并与实际数据对比,Kappa系数达标后进一步预测2035年土地利用数据;②运用InVEST模型中碳储量模块测算2015—2024年及2035年多情景下碳储量情况;③解析2015—2024年及2035年不同情景下土地利用演变对碳储量的影响特征,结合空间自相关分析和热点分析识别碳汇服务空间,提出分区化城镇发展、碳汇提升策略。研究旨在探索新区在"双碳"目标下的碳汇空间规划路径,以期为同类城市新区的低碳规划提供理论与实践参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

武汉长江新区(30°36′—30°54′N,114°18′—114°40′E)位于武汉市东北部长江之滨,全区总面积

619 km²,涉及江岸、黄陂、新洲3个行政区域。该区域地势平坦,以平原为主,土地利用类型以耕地和水域为主。属亚热带季风气候,雨热同期,气温呈现由江面向内陆略有递增的分布特征,降水量自东南向西北呈逐渐减少趋势[14]。新区作为武汉城市圈的重要生态屏障,在长江经济带生态保护与绿色发展中发挥着关键作用。

1.2　数据来源与处理

本研究区所用数据来源详见表1。依据国家土地利用现状分类标准,本文将土地利用数据重新划分为耕地、林地、草地、水域、未利用地和建设用地6类。本研究综合考虑驱动因子的可获取性、时效性和显著性等因素,借助PLUS模型CARS模块筛选土地利用贡献率≥5%的驱动因子,选取数字高程模型(DEM)、气温、降水量等因子,用于土地利用变化模拟。该驱动因子是PLUS模型开展土地利用变化模拟的关键输入参数,是保证模型精度,支撑碳储量分析的基础。基于PLUS模型的数据输入需求,使其行列数与像元大小保持一致,统一空间分辨率为30 m,投影坐标系为WGS_1984_UTM_Zone_50N。

表1　研究区数据来源及说明

Table 1　Data sources and descriptions for study area

分类	数据类型	数据名称	空间分辨率/m	数据来源
基础地理数据	土地利用	2015,2020和2024年	30	https://doi.org/10.5281/zenodo.12779975
PLUS模型驱动因子	自然环境	年均气温、年均降水量	1 000	国家青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn/)
		DEM、坡度、NDVI	30	资源环境科学数据平台(https://www.resdc.cn/)、地理空间数据云(https://www.gscloud.cn/)运用坡度提取工具计算
	社会经济	人口分布、人均GDP、夜间灯光	1 000	资源环境科学数据平台(https://www.resdc.cn/)、国家地球系统科学数据中心(https://www.geodata.cn/)
	交通区位	交通路网距离、距铁路距离、距水域距离、距地铁距离、距居民点距离	30	OpenStreetMap(https://www.openstreetmap.org/)运用欧式距离法计算

1.3　研究方法

1.3.1　多情景设置

本研究参考《武汉市国土空间总体规划(2021—2035年)》及《武汉长江新区国土空间总体规划(2021—2035年)》中“严守耕地保护红线”“锚固武湖生态绿心”“核心片区优先开发”的政策导向,综合考量前人情景设置及新区未来发展情况[15-16]。最终设定自然发展情景(NDS)、耕地保护情景(FPC)、生态保护情景(EPS)和产业发展情景(IDS)这4种发展模式。①自然发展情景(NDS)。该情景基于2015—2024年新区土地利用发展趋势,模拟无限制因素、无政策导向下的自然发展趋势情景。②耕地保护情景(FPC)。该情景参考“武汉市永久基本农田保护面积不低于2.07×10^5 hm²”的刚性指标,设置耕地向建设用地转移概率降低50%,向林地、草地、水域和未利用地转移概率降低30%。③生态保护情景(EPS)。该情景考虑“生态保护红线面积不低于794.54 km²”的刚性约束,设置耕地、建设用地和未利用地向林地、草地和水域转移概率提升40%,林地、草地和水域向建设用地和未利用地转移概率降低50%。④产业发展情景(IDS)。该情景考虑“城镇开发边界面积控制在1 813.35 km²以内”的市域上限约束,设置建设用地向其他地类转移概率降低30%,其他地类向建设用地转移概率提升40%。

1.3.2　PLUS模型

PLUS模型[13]主要耦合土地扩展分析策略模块(LEAS)和多类型随机斑块种子模块(CARS)。其中,LEAS模块基于随机森林算法计算各驱动因子,并提取新区各类用地转化发展潜力数据集及贡献度;CARS模块结合土地转移矩阵和邻域权重值(表2),模拟发展概率约束下未来土地斑块生成。转移矩阵地类赋值为0或1,其中0表示不允许发生转换,1表示允许发生转换。邻域权重的取值范围为[0,1],其值越大,表明该地类的扩张能力越强[17],计算公式为

$$X'=\frac{X-X_{\min}}{X_{\max}-X_{\min}} \tag{1}$$

式中:X'表示离差标准化值;X表示研究期初和研究期末各地类变化的面积(km²);$X_{\min}$为不同地类中面积变化的最小值(km²);$X_{\max}$为不同地类中面积变化的最大值(km²)。

选取2015年为土地利用初始数据,基于2015—2020年由驱动因子计算得到的地类扩张概率,模拟预测2024年土地利用数据。经过多重参数调整与实

际数据对比，最终模拟结果kappa系数为0.82，整体精度达91.26%，表明该模型与实际数据高度拟合（图1），可用于预测2035年土地利用格局。

表2 邻域权重值

Table 2 Neighborhood weight values

土地利用类型	耕地	林地	草地	水域	未利用地	建设用地
邻域权重值	0.65	0.15	0.35	0.3	0.53	1

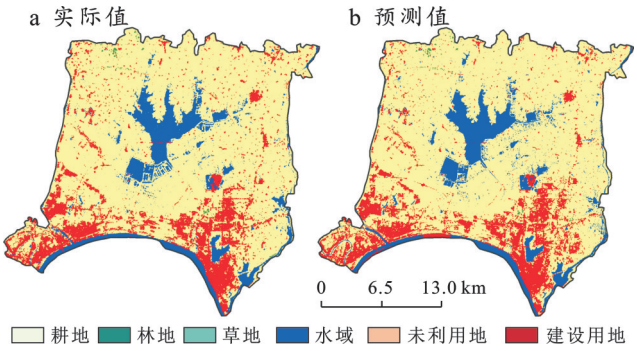


图1 武汉长江新区2024年模型预测与实际土地利用分布对比

Fig.1 Comparison of predicted and actual values land use distributions at Yangtze River New District of Wuhan City in 2024

1.3.3 InVEST模型

本研究基于InVEST模型中的Carbon模块开展碳储量评估与预测。陆地生态系统碳储量包括地上生物碳、地下生物碳、土壤碳和死亡有机碳4类，通过将各年份各地类面积与其对应的平均碳密度相乘得到总碳储量，计算公式为

$$C_{total}=\sum_{i=1}^{n}(C_{above}+C_{below}+C_{soil}+C_{dead})\cdot A_i \quad (2)$$

式中：C_{total}表示所有地类碳储量之和（t）；C_{above}表示地上生物碳密度（Mg/hm²）；C_{below}表示地下生物碳密度（Mg/hm²）；C_{soil}表示土壤碳密度（Mg/hm²）；C_{dead}表示死亡有机碳密度（Mg/hm²）；n表示土地利用类型种类；A_i表示土地利用类型i的面积（hm²）。

碳密度与土壤有机碳密度、降水量、气温均存在相关性，其中与降水量呈显著正相关。本文参考中国陆地生态系统碳密度数据集与相关研究成果[18]，采用Alam等[19]研究公式修正降水量因子，陈光水等[20]研究公式修正平均气温和生物量碳密度，最终获得新区修正后碳密度数据（表3），其修正公式为

$$C_{sp}=3.398\times P+1\,996.1 \quad (3)$$

$$C_{bp}=6.798\,1e^{0.005\,41P} \quad (4)$$

$$C_{bt}=28\times T+398 \quad (5)$$

式中：C_{sp}表示根据年均降水量修正后的土壤碳密度（Mg/hm²）；C_{bp}表示年均降水量修正后的生物量碳密度（Mg/hm²）；C_{bt}表示根据年均气温修正后的生物量碳密度（Mg/hm²）；P表示年均降水量（mm）；T表示年均气温（℃）。将2015—2024年全国和新区的年均降水量和年均温度分别带入公式（6）—公式（9），计算得到新区修正后碳密度系数（表3）

$$K_{bp}=\frac{C_{bp研究区}}{C_{bp全国}} \quad (6)$$

$$K_{bt}=\frac{C_{bt研究区}}{C_{bt全国}} \quad (7)$$

$$K_b=K_{bp}\times K_{bt}=\frac{C_{bp研究区}}{C_{bp全国}}\times\frac{C_{bt研究区}}{C_{bt全国}} \quad (8)$$

$$K_{sp}=\frac{C_{sp研究区}}{C_{sp全国}} \quad (9)$$

式中：K_{bp}表示年均降水量生物量碳密度修正系数；K_{bt}表示年均气温生物量碳密度修正系数；K_b表示生物量碳密度修正系数；K_{sp}表示土壤碳密度修正系数。

表3 武汉长江新区修正后碳密度系数

Table 3 Revised carbon density coefficients of Yangtze River New District, Wuhan City 单位：Mg/hm²

地类	地上碳密度	地下碳密度	土壤碳密度	死亡有机物碳密度	合计
耕地	3.31	0.62	158.55	1.74	164.22
林地	18.64	14.86	204.79	2.29	240.58
草地	2.97	9.64	146.11	6.00	164.72
水域	1.31	0.00	103.46	3.28	108.05
未利用地	0.49	0.53	45.92	0.79	47.73
建设用地	0.68	0.07	70.62	0.00	71.37

1.3.4 空间自相关与热点分析

空间自相关分析[21]是揭示地理要素在空间上的依赖关系和聚集模式的重要方法，常用于判断某一属性在空间分布中是否存在显著的关联性。全局莫兰指数（Moran's I）用于衡量研究区域内整体空间自相关的强弱与方向，而局部莫兰指数（local Moran's I）则进一步识别局部区域的空间异质性及集聚类型。本研究使用GeoDa软件，采用全局Moran's I指数散点图，判断碳储量在研究区内整体聚集态势，并结合局部相关指标（LISA）值识别高-低空间异质性单元。在此基础上，利用Getis-Ord Gi*热点分析评估相邻像元的空间相关性，识别出热点和冷点，以揭示二者空间关联特征[22]。

2 结果与分析

2.1 研究区2015—2024年碳储量时空变化

由图2可知，新区碳储量呈现北增南减的空间分异格局，2015—2024年3个时期碳储量分别为

904.61×10^4 t,899.07×10^4 t和896.57×10^4 t,整体呈逐年递减态势。分阶段看,2015—2020年减少5.53×10^4 t,2020—2024年减少2.51×10^4 t。由图3—4可知,各地类占地面积与其碳储量大小均依次为:耕地>水域>建设用地>林地>草地>未利用地。其中,耕地作为区域核心碳库(耕地平均贡献率83.90%),水域为次要碳库(贡献率8.87%),二者变化主导区域碳汇格局。从各地类面积及碳储量变化来看(图4),2015—2020年耕地和水域的面积及碳储量均呈下降趋势,建设用地面积与碳储量则有所增加,林地、草地和未利用地呈现小幅波动,对碳储量变化的贡献度较低。图3中土地转移呈现耕地向建设用地转出20.8 km^2,水域向建设用地转出2.54 km^2,二者合计贡献新增建设用地的99.82%。因建设用地碳密度仅为耕地的43.46%、水域的66.05%,高碳汇向低碳汇单项转化,是造成总碳储量大幅下降的根本原因。虽水域向耕地转入24.2 km^2(占水域转出90.48%)实现占补平衡,一定程度上弥补了耕地(单位碳储量1.64×10^4 t/km^2)转出的碳损失,但仍无法减缓碳储量下滑速度。表明,该阶段新区城市建设对高碳汇生态用地的侵占显著,城市化发展与生态保护相互冲突,是碳储量大幅下降的核心驱动。

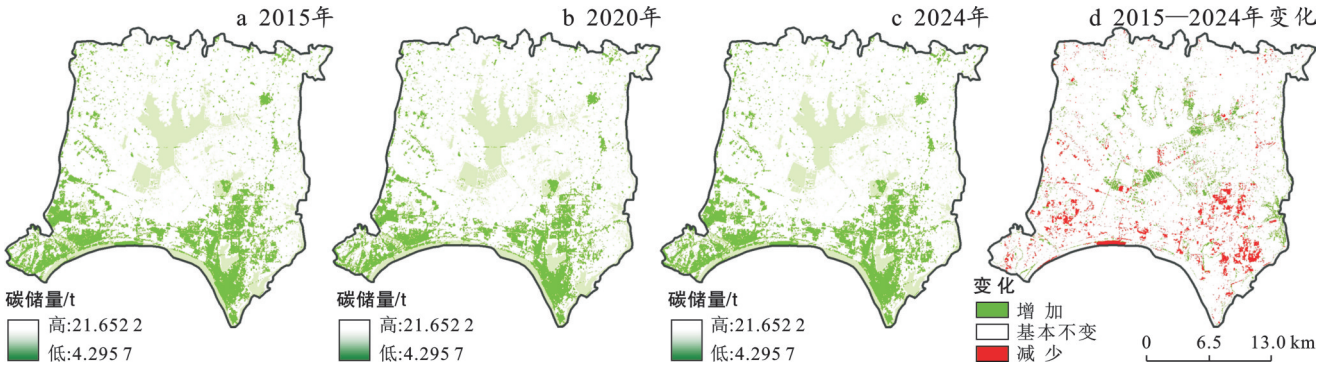


图2　武汉长江新区2015—2024年碳储量空间分布及变化

Fig.2　Spatial distribution and changes of carbon storage at Yangtze River New District of Wuhan City from 2015 to 2024

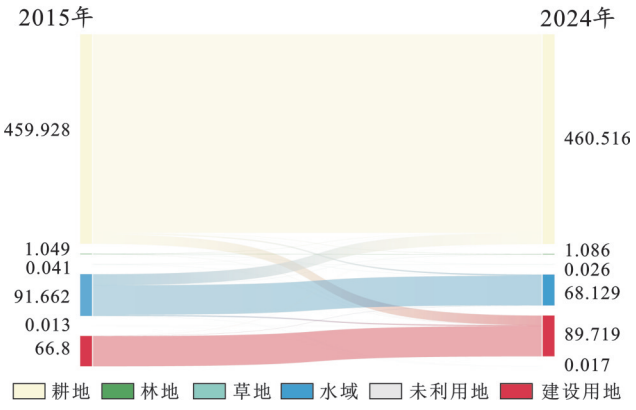


图3　武汉长江新区2015—2024年土地利用转移桑基图

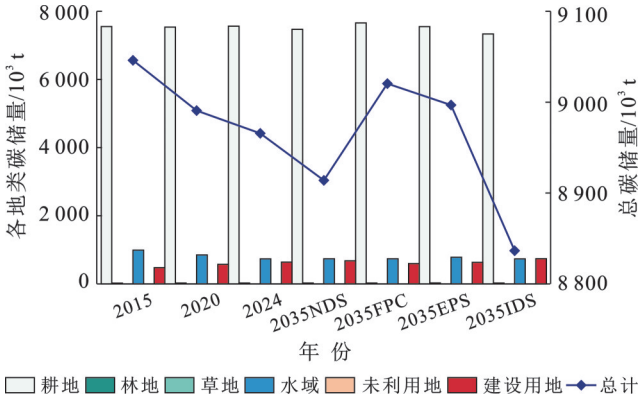
Fig.3　Sankey diagram of land use transitions at Yangtze River New District of Wuhan City from 2015 to 2024

由图4可知,2015—2024年水域面积和碳储量持续下降,耕地面积回升、建设用地扩张放缓,碳储量下降速率显著放缓。结合图3可知,该时期水域面积缩减至68.13 km^2,水域向耕地转入仍占主导,耕地面积增至460.5 km^2(增幅0.36%)。因耕地单位面积碳储量显著高于其他地类,耕地扩张增加碳储量2.69×10^4 t,修复与提升了碳库质量。同时,建设用地扩张幅度从20.75%减缓至11.23%,新增建设用地仅9.06 km^2,补充碳储量6.47×10^4 t,虽仍为低碳汇补充,但扩张规模缩小使得碳储量负向影响有所减弱,故减缓了碳储量下降速率。①2015—2024年研究区水域面积大幅缩减,一方面源于围湖造田式的水域向耕地转化,另一方面是城镇建设用地扩张对滨水空间及农田的侵占。②区域生态管控政策通过约束高碳汇用地向建设用地的转移,推动生态用地内部优化,成功调整了土地利用对碳储量的影响方向与强度,使碳储量下降速率显著放缓。未来应统筹生态保护与城市发展,强化耕地、水域等高碳汇用地的刚性保护,优化土地利用结构,实现区域可持续发展。

2.2　2035年多情景碳储量对比分析

基于PLUS模型,预测2035年新区在不同发展情景下的土地利用变化,包括自然发展情景(NDS)、耕地保护情景(FPC)、生态保护情景(EPS)和产业发展情景(IDS),各地类面积及比例变化结果如图5所示。相较于2024年,NDS中建设用地扩张至95.26 km^2,净增5.54 km^2,增量主要来源于耕地转出5.65 km^2,反映城镇建设对农业空间的持续挤压。IDS体现高强度开发导向下的粗放侵占情景,北部耕地进一步流失13.93 km^2(降幅3.03%),为4种情景中耕地缩减幅度最大的模式。同时建设用地扩张至103.64 km^2(增幅达15.52%),说明城镇建设以牺牲北部核心农田为代价,未体现集约利用本质。FPC通过强化耕地红线约束,耕地面积增长1.28%。同时

建设用地缩减 6.61%，较 NDS 情景减少 11.47 km²，表明其减量并非依赖生态空间牺牲，而是通过盘活存量建设用地实现集约利用。EPS 情景中，林地、水域分别增长 0.20 km²和 2.85 km²，生态用地面积增长变化率达 4.41%，其中水域斑块扩张对应武湖湿地等敏感区退田还湖的生态修复举措，说明局部生态功能得到强化。



注：NDS，FPC，EPS，IDS 分别为自然发展、耕地保护、生态保护和产业发展 4 种情景。下同。

图 4 武汉长江新区 2015—2035 年各地类碳储量及总碳储量变化

Fig.4 Changes in carbon storage of different land use types and total carbon storage at Yangtze River New District of Wuhan City from 2015 to 2035

运用 InVEST 模型碳模块估算 2035 年新区 4 种情景下的碳储量变化（图 6），碳储量总值依次为：FPC（9.02×10⁶ t）>EPS（9.00×10⁶ t）>NDS（8.91×10⁶ t）>IDS（8.84×10⁶ t），其中耕地保护情景（FPC）是实现区域碳汇最大化的最优模式。与 2024 年相比，NDS，IDS 碳储量分别减少 5.18×10⁴ t 和 1.29×10⁵ t，FPC，EPS 碳储量则增长 5.48×10⁴ t 和 3.11×10⁴ t。NDS 和 IDS 中，耕地碳储量均下降 1.2% 和 3.0%，而耕地作为最大碳库，碳汇能力被显著削弱。建设用地作为主要碳源，其碳储量增长 6.2% 和 15.5%，且在空间分布上呈现以居民点为核心的圈层式扩散，表明高碳源地持续扩张致其碳储量呈持续递增态势。NDS 和 IDS 结果均表明生态用地面临退化，碳储量降幅较大，故不是最优情景选择。FPC 情景碳储量增长最为显著，其耕地碳储量增幅（9.66×10⁴ t）远高于林地（43.3 t）和水域（612.6 t），核心原因在于耕地呈大面积点状式扩张，稳定了北部高碳汇耕地格局，进而巩固了“最大碳库基底”，实现碳汇最大化。EPS 情景中虽高碳汇林地、水域和草地合计增长约 4.41%，但三者碳储量贡献值仅占全区面积 9.03%，且空间上仅在武湖等局部生态敏感区扩张。而耕地碳储量 7.55×10⁶ t，较 2024 年减少 1.17×10⁴ t，其减少量远高于生态用地碳储量增加总和，以致新增碳汇难以弥补核心片区耕地流失的碳损失，故碳储量低于 FPC 情景。综上，在以耕地主导型的城市新区中，耕地保护情景是新区碳汇最优的核心路径，单一生态修复或粗放的建设开发均无法实现碳汇最大化。

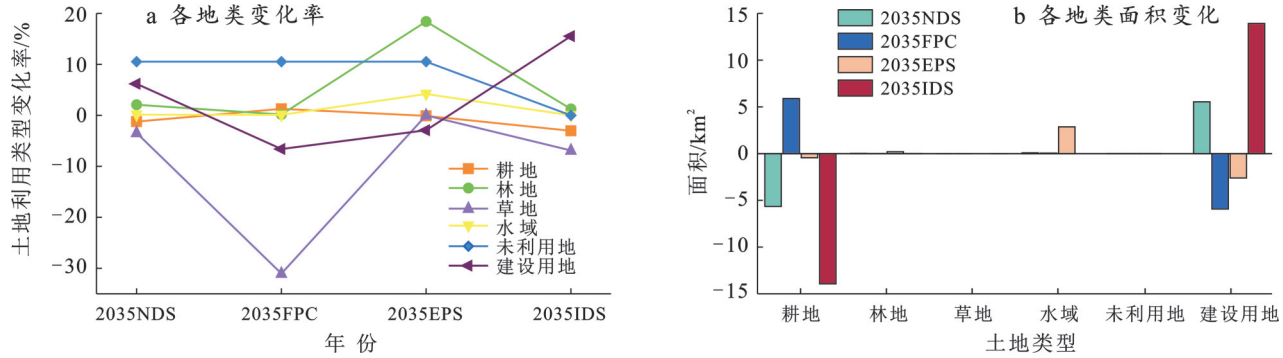


图 5 武汉长江新区 2035 年 4 种发展情景土地利用变化

Fig.5 Land use changes at Yangtze River New District of Wuhan City under four development scenarios in 2035

2.3 碳储量空间格局与优化分区

运用 ArcGIS 分区统计与 GeoDa 空间分析技术，对新区 2035 年 4 种发展情景碳储量开展空间自相关分析，结果显示 NDS，FPC，EPS 和 IDS 情景的全局莫兰指数分别为 0.777，0.787，0.785 和 0.780，均大于 0，表明 4 种情景下碳储量在空间分布上呈显著集聚特征。进一步分析碳储量的局部空间集聚特征与冷热区分布可知（图 7—8），2035 年碳储量 H-H 聚集区与热点区主要分布于北部及中东部，L-L 聚集区与冷点区主要分布于南部沿江地区。同时，H-L 和 L-H 聚集区主要分布于高、低值集聚区的过渡地带及部分水体周边，整体表现出‘北热南冷’的极化特征。综上所述，土地利用格局显著影响碳储量聚集区及冷热区分布，由此可识别出 3 类碳汇服务单元：①碳汇稳定区。主要分布于北部及中东部 H-H 聚集区与热点区，碳储量空间连续性较高；②碳流失风险区。集中于南部沿江 L-L 聚集区与冷点区，受建设用地扩张影响显著，碳汇功能持续减弱；③生态修复区。对

应高、低值集聚区的过渡地带及部分水体周边H-L和L-H聚集区,碳储量空间异质性明显,具备生态修复与功能提升的潜力。3类单元的划分可为后续差异化碳汇保护与策略实施提供科学参考。

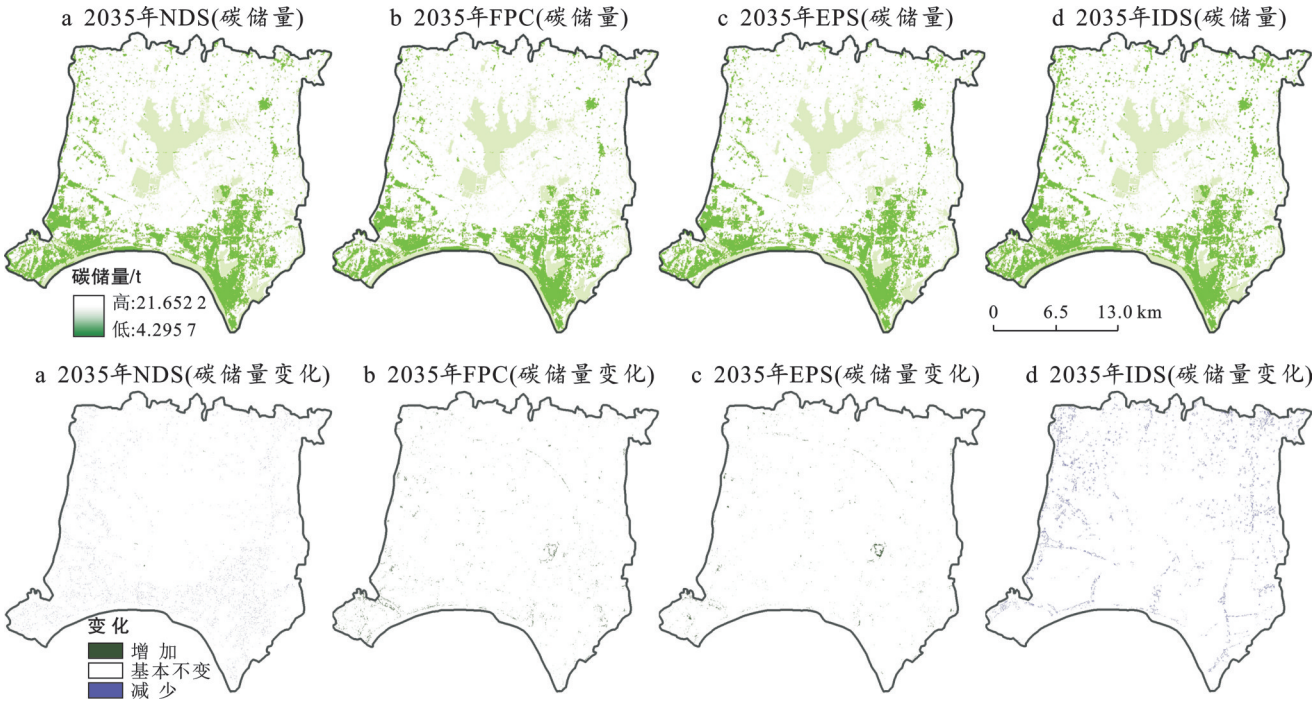


图 6　武汉长江新区 2035 年 4 种发展情景碳储量空间分布及变化

Fig.6　Spatial distribution and changes of carbon storage under four development scenarios at Yangtze River New District of Wuhan City in 2035

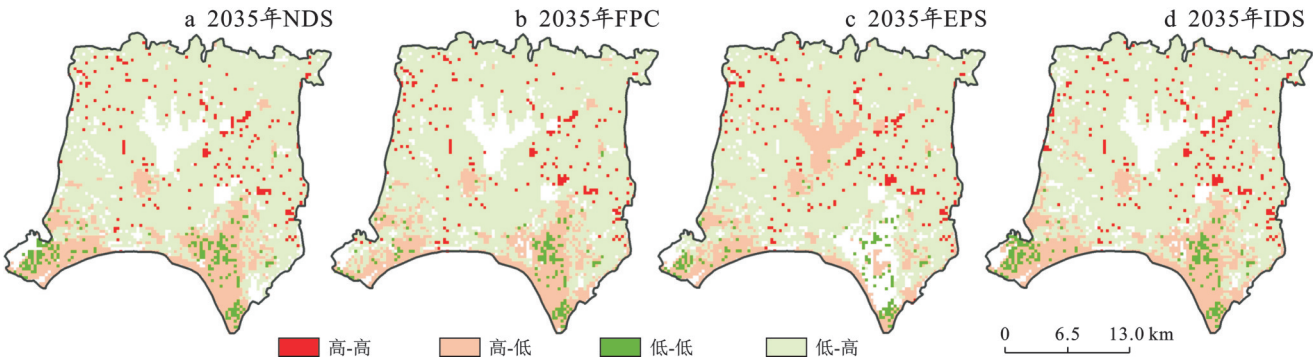


图 7　武汉长江新区 2035 年 4 种发展情景碳储量局部自相关

Fig.7　Local spatial autocorrelation of carbon storage under four development scenarios at Yangtze River New District of Wuhan City in 2035

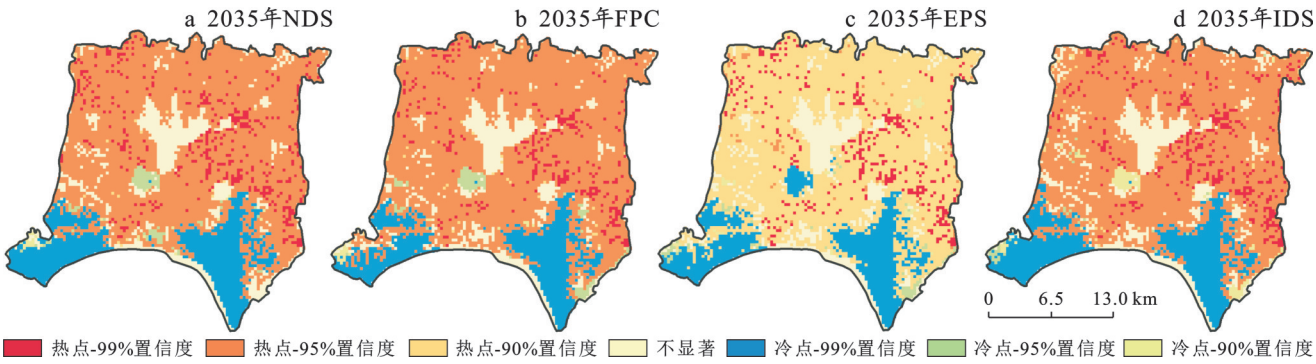


图 8　武汉长江新区 2035 年 4 种发展情景碳储量热点分析

Fig.8　Hotspot analysis of carbon storage under four development scenarios at Yangtze River New District of Wuhan City in 2035

3 讨 论

本研究聚焦小尺度城市新区“农业-城市”过渡带的空间特殊性，揭示了土地利用变化对陆地生态系统碳储量的调控机制。研究结果表明，新区耕地面积占比达74%，碳贡献率达83.90%，构成区域“最大碳库基底”，同时水域缩减、建设用地扩张导致耕地作为主导碳库正面临城镇化扩张下的萎缩风险。此结论与Zhang Yujie等[23]对武汉区域尺度的研究相符，均证实耕地在区域碳库中占比最高，且快速城镇化进程中农田向城镇用地的转化是碳库缩减的重要诱因，印证了“过渡带碳库总量依赖优势地类基数”的共性规律。凸显了小尺度新区研究中耕地保护在维持碳汇基础中的核心作用。

本研究与Wang Rueiyuan等[24]在流域、城市群等宏观尺度揭示的“林草地退缩为碳储量下降主因”的结论存在分异。小尺度过渡带城市新区具有独特的土地利用格局与碳库特征：①生态用地基数极小且呈碎片化分布，2015—2024年林地（1.09 km^2）、草地（0.03 km^2）碳储量波动微弱仅$\pm0.2\times10^4$ t，无法成为碳流失的主导因子。②武湖等水域缩减与南部组团建设用地扩张共同构成碳流失格局，水域高碳密度（108.05 Mg/hm^2）与高缩减率（25.67%）、建设用地低碳密度（71.37 Mg/hm^2）与高扩张率（34.31%）形成耦合效应，建设用地扩张带来的碳增益（1.64×10^5 t）远无法抵消水域的碳流失（2.54×10^5 t），形成“碳源扩张，碳汇缩减”的失衡趋势。这表明在耕地主导的小尺度新区，碳流失具有显著的地类结构与空间异质性，不能简单套用宏观尺度的研究规律。

2035年多情景模拟结果显示，FPC和EPS碳储量均高于NDS和IDS，且FPC的碳汇增益显著优于EPS，进一步印证耕地主导型区域碳汇服务空间发展价值。FPC通过建设用地集约管控与耕地保护协同，实现北部绿色农业环带耕地面积增长1.28%，新增碳储量9.66×10^4 t，既保障了粮食安全，又有效抑制了碳源过度增长。这一发现与刘化等[12]针对中原地区高耕地占比区域的研究结论一致，说明在类似“农业-城市”过渡带新区中，耕地保护情景是兼顾绿色发展与固碳增汇的最优选择。相比之下，EPS受限于生态用地基数低、碎片化严重的现实约束，大规模生态修复需占用耕地与建设用地，易引发碳汇增益与发展约束的矛盾，从而削弱政策落地性，其本质是小尺度碎片化用地中生态用地扩张缺乏冗余空间。值得注意的是，FPC，EPS相较于2024年碳储量均有所提升，可证实通过精准政策干预与土地利用优化可有效遏制碳流失并提升新区碳储量，这从政策可行性角度强化了耕地主导型路径在小尺度新区的实践优势。

本研究结合新区规划要求，以区域碳汇特征为核心依据，对3类碳汇服务单元实施差异化碳汇优化策略。碳汇稳定区实施基底强化策略，依据武汉2.07×10^5 hm^2耕地保有量刚性指标，及2024年耕地碳储量7.56×10^6 t仅增幅0.13%的现状，严控化肥施用≤375 kg/hm^2，推广秸秆还田配绿肥种植技术[25]，预计2035年土壤有机碳密度提升8%～10%。碳流失风险区推行低碳管控策略，参考湖北新型城镇化存量更新优先原则，依照IDS南部1.44%碳流失的问题，将江湾等组团纳入开发边界严控区，要求旧区改造占比≥60%，同步构建2 km^2道路碳汇廊道，预计可抵消南部交通约5%年碳排放量。生态修复区采取碳汇补充策略，依据长江保护攻坚方案与新区“锚固武湖生态绿心”部署，针对2015—2024年水域碳流失2.54×10^5 t，零散林草地碳汇潜力未激活的现状，划定≥500 m生态缓冲带，在武湖构建“水域—沼泽—滩涂”梯级缓冲带，预计2035年水域碳储量较2024年回升6%～8%，强化武湖生态绿心碳汇功能。

本研究存在以下局限：①碳密度数据虽通过年均气温、降水修正，但未考虑土壤质地、植被类型的细化差异，统一采用地类均值可能低估林地、耕地的碳汇潜力；②研究仅聚焦土地利用对碳储量的驱动效应，未考虑气候变化的反馈作用（如未来年均气温升高可能加速土壤有机碳分解），无法完整揭示“气候-土地利用-碳循环”耦合机制；③本研究提出的碳汇优化策略，尚需长期定位观测验证其在新区复杂情景下的适配性与长效性。未来研究可结合高分辨率土壤与植被数据，对研究区进行长期观测，以提高碳密度估算精度。量化气候变化对土地利用的影响，并验证碳汇优化策略在不同土地类型和气候条件下的可行性与持续效果。

4 结 论

（1）2015—2024年新区碳储量呈逐年递减态势，由9.05×10^6 t降至8.97×10^6 t，降速由前期5.53×10^4 t减缓至2.51×10^4 t。各地类对碳储量的影响顺序为：耕地＞水域＞建设用地＞林地＞草地＞未利用地。其中，耕地为主导碳库，与水域、建设用地一起三者相互转化，协同影响区域碳汇格局。因此，未来应继续强化耕地与水域的刚性保护，严格控制高碳汇用地向建设用地的转移。

（2）2035年多情景模拟显示，碳储量总值依次为：FPC＞EPS＞NDS＞IDS。FPC通过稳定北部高

碳汇耕地格局,实现了区域碳汇最大化。EPS因生态用地碳汇贡献值较低,难以弥补耕地流失带来的碳损失。NDS和IDS中建设用地持续扩张导致生态用地退化,碳储量降幅显著。综合来看,在以耕地为主导的城市新区,耕地保护情景可实现碳汇最优。

(3)碳储量空间格局呈现“北热南冷”的极化特征。据此可识别出3类碳汇服务单元并提出具体策略:碳汇稳定区实施基底强化策略,碳流失风险区推行低碳管控策略,生态修复区采取碳汇补充策略。构建三区协同碳汇增益策略,有效实现产业发展、碳汇稳固目标。

参考文献(References)

[1] Bellard C, Marino C, Courchamp F. Ranking threats to biodiversity and why it doesn't matter [J]. Nature Communications, 2022,13:2616.

[2] 刘梦园. 基于InVEST模型的河西地区碳储量与生境质量评价[D].甘肃 兰州:兰州大学, 2023.
Liu Mengyuan. Evaluation of carbon storage and habitat quality in Hexi region based on the InVEST model [D]. Lan Zhou, Gansu: Lanzhou University, 2023.

[3] Feng Yongjiu, Chen Shurui, Tong Xiaohua, et al. Modeling changes in China's 2000—2030 carbon stock caused by land use change [J]. Journal of Cleaner Production, 2020,252:119659.

[4] 吴佩君,刘小平,黎夏,等.基于InVEST模型和元胞自动机的城市扩张对陆地生态系统碳储量影响评估:以广东省为例[J].地理与地理信息科学,2016,32(5):22-28.
Wu Peijun, Liu Xiaoping, Li Xia, et al. Impact of urban expansion on carbon storage in terrestrial ecosystems based on InVEST model and CA: A case study of Guangdong Province, China [J]. Geography and Geo-Information Science, 2016,32(5):22-28.

[5] 史名杰,武红旗,贾宏涛,等.基于MCE-CA-Markov和InVEST模型的伊犁谷地碳储量时空演变及预测[J].农业资源与环境学报,2021,38(6): 1010-1019.
Shi Mingjie, Wu Hongqi, Jia Hongtao, et al. Temporal and spatial evolution and prediction of carbon stocks in Yili Valley based on MCE-CA-Markov and InVEST models [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2021,38(6):1010-1019.

[6] 杨德文,高铭阳,张碧君,等.基于PLUS-InVEST模型的小兴安岭地区土地利用模拟与碳储量评估[J].水土保持通报,2025,45(3):286-294.
Yang Dewen, Gao Mingyang, Zhang Bijun, et al. Land use simulation and carbon storage assessment in Xiaoxing'an Mountains region based on PLUS-InVEST model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(3):286-294.

[7] 王端睿,毛德华,王宗明,等.东北地区土地覆被格局变化模拟:基于CLUE-S和Markov-CA模型的对比分析[J].地理科学,2024,44(2):329-339.
Wang Duanrui, Mao Dehua, Wang Zongming, et al. Simulation of land cover pattern change in northeast China: A comparative analysis based on CLUE-S and Markov-CA models [J]. Scientia Geographica Sinica, 2024,44(2):329-339.

[8] 李倩,王成军,冯涛,等.基于SD-PLUS耦合模型的陕西省土地利用变化及碳储量多情景预测[J].水土保持学报,2024,38(3):195-206.
Li Qian, Wang Chengjun, Feng Tao, et al. Multi-scenario prediction of land use change and carbon storage in Shaanxi Province based on the SD-PLUS coupled model [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(3):195-206.

[9] 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.

[10] 陈杰,靳宇鑫,倪建华.耦合GeoSoS-FLUS和InVEST模型的吕梁市碳储量时空变化及情景模拟[J].环境工程, 2025,43(12):237-246.
Chen Jie, Jin Yuxin, Ni Jianhua. Spatiotemporal variation and scenario simulation of carbon storage in Lvliang by coupling GeoSoS-FLUS and InVEST model [J]. Environmental Engineering, 2025,43(12):237-246.

[11] 肖文杰,范勇,李玄,等.多情景模拟土地利用对碳储量的影响及驱动机制:以济南都市圈为例[J].环境科学,2025,46(11):7083-7093.
Xiao Wenjie, Fan Yong, Li Xuan, et al. Multi-scenario simulation of land use change and carbon storage assessment in Jinan metropolitan area [J]. Environmental Science, 2025,46(11):7083-7093.

[12] 刘化,潘玉君,林晓婉,等.河南中原城市群多情景土地利用优化与碳储量评估[J].西北林学院学报,2024,39(3):221-230.
Liu Hua, Pan Yujun, Lin Xiaowan, et al. Multi-scenario land use optimization and carbon storage evaluation in central plains city cluster of Henan Province [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2024, 39(3): 221-230.

[13] 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.

[14] 姜琪,秦鹏程,刘火胜,等.1954—2022年武汉短历时强降水时空变化特征[J].气象,2025,51(7):803-816.
Jiang Qi, Qin Pengcheng, Liu Huosheng, et al. Spatio-temporal variation of short-duration heavy rainfall in Wuhan from 1954 to 2022 [J]. Meteorological Monthly, 2025,51(7):803-816.

[15] 袁雪.基于PLUS模型的武汉市土地利用变化情景模拟与景观生态风险研究[D].江西 南昌:东华理工大学,2022.
Yuan Xue. Scenario simulation of land use change and landscape ecological risk research in Wuhan based on PLUS model [D]. Nanchang, Jiangxi: Donghua University of Technology, 2022.

[16] 吴丹,刘艳中,张祚,等.协同"生态-经济"与碳达峰目标的城市增长边界划定研究:以武汉市为例[J].水土保持研究,2025,32(5):308-318.
Wu Dan, Liu Yanzhong, Zhang Zuo, et al. Research on delineation of urban growth boundary coordinating "ecology-economy" and carbon peak goals: A case study of Wuhan City [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025,32(5):308-318.

[17] 李安林,周艳,唐丽毅,等.怒江州土地利用模拟及生态系统服务价值评估:基于PLUS模型的多情景分析[J].中国农业资源与区划,2023,44(1):140-149.
Li Anlin, Zhou Yan, Tang Liyi, et al. Land use simulation and ecosystem services values evaluation in Nujiang prefecture: A multiple-scenario analysis based on PLUS model [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2023,44(1):140-149.

[18] 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):86-92.
Xu Li, He Nianpeng, Yu Guirui. A dataset of carbon density in Chinese terrestrial ecosystems (2010s) [J]. China Scientific Data, 2019,4(1):86-92.

[19] 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.

[20] 陈光水,杨玉盛,刘乐中,等.森林地下碳分配(TBCA)研究进展[J].亚热带资源与环境学报,2007,2(1):34-42.
Chen Guangshui, Yang Yusheng, Liu Lezhong, et al. Research review on total belowground carbon allocation in forest ecosystems [J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2007,2(1):34-42.

[21] 冯昕,杜世宏,舒红.空间权重矩阵对空间自相关的影响分析:以我国肾综合征出血热疾病为例[J].武汉大学学报(信息科学版),2011,36(12):1410-1413.
Feng Xin, Du Shihong, Shu Hong. Influence of spatial weight matrices on spatial autocorrelation: A case study of HFRS in China [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2011,36(12):1410-1413.

[22] Ding Lei, Chen Kunlun, Liu Ting, et al. Spatial-temporal hotspot pattern analysis of provincial environmental pollution incidents and related regional sustainable management in China in the period 1995—2012 [J]. Sustainability, 2015,7(10):14385-14407.

[23] Zhang Yujie, Wang Xiaoyu, Zhang Lei, et al. Changes in Wuhan's carbon stocks and their spatial distributions in 2050 under multiple projection scenarios [J]. Sustainability, 2024,16(15):6684.

[24] Wang Rueiyuan, Cai Huina, Chen Lingkang, et al. Spatiotemporal evolution and multi-scenario prediction of carbon storage in the GBA based on PLUS-InVEST models [J]. Sustainability, 2023,15(10):8421.

[25] Zhou Guopeng, Li Guilong, Liang Hai, et al. Green manure coupled with straw returning increases soil organic carbon *via* decreased priming effect and enhanced microbial carbon pump [J]. Global Change Biology, 2025,31(5):e70232.

(上接第230页)

[25] 贾国栋,张龙齐,余新晓.生态修复的固碳机制、实现途径及碳中和对策[J].水土保持通报,2022,42(5):393-397.
Jia Guodong, Zhang Longqi, Yu Xinxiao. Carbon sequestration mechanism, realization way and carbon neutralization strategy of ecological restoration [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(5): 393-397.

[26] Li Yixiao, Zhao Zhengyuan, Fu Bojie, et al. Ecological restorations enhance ecosystem stability by improving ecological resilience in a typical basin of the Yangtze River, China [J]. Geography and Sustainability, 2025, 6(6):100357.

[27] 张兴义,刘晓冰.东北黑土区沟道侵蚀现状及其防治对策[J].农业工程学报,2021,37(3):320-326.
Zhang Xingyi, Liu Xiaobing. Current scenario of gully erosion and its control strategy in Mollisols areas of northeast China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021,37(3):320-326.