

焦作缝山公园植被遥感监测与碳储量变化分析

郑二文, 李 萍, 王 萍, 金中昊, 宁立波

Remote sensing monitoring of vegetation and analysis of carbon storage changes in Fengshan Park, Jiaozuo

ZHENG Erwen, LI Zhe, WANG Ping, JIN Zhonghao, and NING Libo

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202501047>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于Landsat遥感影像的围场县植被覆盖时空格局变化

Change in temporal-spatial pattern of vegetation coverage in Weichang County based on Landsat remote sensing image

周智勇 水文地质工程地质. 2020, 47(6): 81-90

基于时间序列植被指数资料的承德市植被覆盖时空演变分析

Temporal and spatial evolution of vegetation cover in Chengde based on time series NDVI data

贺军亮, 韦锐, 李丽, 金雁琳 水文地质工程地质. 2020, 47(6): 91-98

毛乌素沙地裸地与植被覆盖下非冻结期土壤水分时空分布特征

Spatial and temporal distribution characteristics of soil moisture in the non-freezing period under the bare land and vegetation cover in the Mu Us desert

高佳, 王文科, 赵明, 马稚桐, 侯昕悦, 李婉歆 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 34-42

柴达木盆地生态植被的地下水阈值

Groundwater threshold of ecological vegetation in Qaidam Basin

党学亚, 卢娜, 顾小凡, 金晓媚 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 1-8

民勤绿洲天然植被生长与地下水埋深变化关系

Changes in natural vegetation growth and groundwater depth and their relationship in the Minqin oasis in the Shiyang River Basin

曹乐, 聂振龙, 刘敏, 卢辉雄, 汪丽芳 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 25-33

内蒙古西辽河平原植被指数时空变化及其影响因素研究

Spatial and temporal variations in vegetation index and its impact factors in the West Liaohe Plain in Inner Mongolia

高萌萌, 刘琼, 王轶, 李小磊, 石鹏 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 175-182



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202501047

郑二文, 李喆, 王萍, 等. 焦作缝山公园植被遥感监测与碳储量变化分析 [J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(4): 75-86.

ZHENG Erwen, LI Zhe, WANG Ping, et al. Remote sensing monitoring of vegetation and analysis of carbon storage changes in Fengshan Park, Jiaozuo[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(4): 75-86.

焦作缝山公园植被遥感监测与碳储量变化分析

郑二文¹, 李 喆², 王 萍², 金中昊³, 宁立波³

(1. 中国地质大学(武汉)地质调查研究院, 湖北 武汉 430074; 2. 河南省自然资源监测和国土整治院, 河南 郑州 450016; 3. 中国地质大学(武汉)环境学院, 湖北 武汉 430078)

摘要: 全球气候变化使生态系统碳储量研究备受关注, 矿山修复后植被碳储量核算是生态修复效果评价的关键内容之一, 也是建设“双碳社会”的需要。传统植被碳储量估算方法存在局限, 而遥感技术和地理信息系统等的发展为该研究提供了新方向。焦作市缝山公园曾因不规范矿山开采活动导致生态环境严重破坏, 自 2005 年始, 当地政府投入资金进行生态修复, 采用挂网喷播复绿、鱼鳞坑复绿等修复工程模式, 种植大量乔灌木, 使公园植被覆盖度显著提升。研究利用 2013 年、2018 年、2023 年 3 期 2 m 分辨率的高分 1 号卫星数据, 结合遥感-多元线性回归模型, 通过样地调查与取样, 结合遥感数据预处理, 提取植被指数等特征因子, 构建并检验植被碳储量估测模型。结果表明: (1) 公园植被碳储量在 2013—2018 年明显增加, 从 1.56×10^3 t 增加到 1.90×10^3 t, 2018—2023 年轻微减少至 1.78×10^3 t, 10 a 间总体呈上升趋势; (2) 植被碳储量受坡度和人为因素影响, 不同坡度区间植被碳密度有差异, 如 $0.46^\circ \sim 8.32^\circ$ 缓坡区域植被碳密度较高, 而 $30.45^\circ \sim 48.82^\circ$ 陡坡区域碳密度相对较低; (3) 植被碳储量与植被覆盖度呈正相关, 变化趋势一致。研究填补了废弃矿山转型为城市公园过程中植被碳储量研究的空白, 为矿山生态修复效果评价及当地“双碳社会”建设提供了科学依据和数据支持。

关键词: GF-1 号影像; RS-MLRM 模型; 植被碳储量; 植被覆盖度; 缝山公园

中图分类号: TD167; X87

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2025)04-0075-12

Remote sensing monitoring of vegetation and analysis of carbon storage changes in Fengshan Park, Jiaozuo

ZHENG Erwen¹, LI Zhe², WANG Ping², JIN Zhonghao³, NING Libo³

(1. Institute of Geological Survey, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China;
2. Institute of Natural Resources Monitoring and Comprehensive Land Improvement of Henan Province, Zhengzhou, Henan 450016, China; 3. School of Environment, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430078, China)

Abstract: Global climate change has attracted much attention to the study of ecosystem carbon storage, with vegetation carbon estimation after mine restoration emerging as a critical component for evaluating ecological restoration effectiveness and supporting the development of a “dual-carbon society”. Traditional methods for estimating vegetation carbon storage have limitations, while advances in remote sensing technology offer promising alternatives. The fractured mountain park in Jiaozuo City has caused serious damage to the ecological environment due to non-standard mining activities. Since 2005, the local government has invested in ecological restoration, using engineering models such as hanging net spray seeding and fish-scale pits to plant a large number

of trees and shrubs, significantly improving the vegetation cover of the park. Using the GF-1 satellite data with a resolution of 2 m in 2013, 2018 and 2023, combined with the remote sensing and multiple linear regression model, the vegetation index and other characteristic factors were extracted, and the estimation model of carbon storage was constructed and tested. The results showed that the vegetation carbon storage in the park increased significantly from 2013 to 2018, from 1.56×10^3 t to 1.90×10^3 t, and slightly decreased to 1.78×10^3 t from 2018 to 2023. Vegetation carbon storage is affected by slope and human activities. There are differences in vegetation carbon density in different slope ranges. The vegetation carbon density is higher in the 0.46° – 8.32° gentle slope area, while the carbon density is relatively low in the 30.45° – 48.82° steep slope area. Vegetation carbon storage is positively correlated with vegetation coverage, and the change trend was consistent. The research fills the gap in the study of vegetation carbon storage in urban parks transformed from abandoned mines, and provides scientific basis and data support for the evaluation of mine ecological restoration effects and the construction of local “dual-carbon society”.

Keywords: GF-1 satellite image; RS-MLRM model; vegetation carbon storage; vegetation cover; Fengshan Park

全球气候变化对社会发展的影响日益显著,生态系统的碳储量研究已成为社会关注热点之一。传统的植被碳储量估算主要依赖实地调查和统计分析,但这种方法存在空间局限性和人力物力消耗大等缺点^[1]。随着遥感技术和地理信息系统的发展,利用遥感影像数据结合模型进行植被碳储量估算成为研究热点^[2-4]。

自 20 世纪 80 年代起, Eriksson 等^[2]利用多时相的 JERS 数据用过重复通道相干性方法来估算西伯利亚森林的生长量。20 世纪 90 年代, Sales 等^[5]开始尝试利用遥感数据研究森林覆盖,并尝试将其与碳储量估算联系起来,为后续研究奠定了基础。进入 21 世纪,随着高分辨率卫星影像(如 QuickBird)的出现,研究精度显著提升^[6]。徐小军等^[7]自 2002 年开始在竹林与全球气候变化方面开展研究,提出用太阳入射角余弦值分层建模估算碳储量,有效提高模型精度,为竹林碳储量遥感估算提供了新方法。Bailetto 等^[8]学者利用高分辨率影像精确识别森林生态系统中的不同树种组成,并结合生物量方程估算碳储量,使研究成果更加细化和精准。在湿地生态系统领域,王建步等^[9]利用 GF-1 WFV 卫星数据,对黄河口湿地植被碳储量进行估算,得出植被碳储量排序为:互花米草>芦苇草甸>怪柳林>潮滩芦苇>盐地碱蓬,为湿地生态保护与修复提供了关键数据依据。此外,遥感-多元线性回归模型(RS-MLRM)作为一种有效的碳储量估算方法,在国内外研究中得到广泛应用^[10-11]。

综上,尽管国内外在植被碳储量遥感监测和高分辨率影像应用方面取得显著进展,但研究多聚焦于大

尺度自然生态系统,对城市内部特定生态修复区域(如焦作缝山公园这类由废弃矿山转型的城市公园)的生态碳储量研究相对较少。针对缝山公园的研究主要集中在生态修复的工程措施、植被恢复状况及景观效果^[12],对植被碳储量变化的研究较少。因此,本研究利用高分辨率的 GF-1 影像和先进的 RS-MLRM 模型,系统分析生态修复工程竣工后缝山公园植被碳储量的时空变化特征,为矿山生态修复效果评价提供科学依据,同时也为当地“双碳社会”建设提供支持。

1 研究区概况

缝山公园位于河南省焦作市北部,公园以山地地形为主,地势起伏较大,受长期地壳运动影响,山体节理裂隙较发育,局部可见宽约 2~5 cm 的构造裂隙,但经植被根系固土和生物结皮覆盖,表层岩土稳定性显著提升。总占地面积 11.67 km²,属温带性大陆季风气候,四季分明,常年平均气温在 14.1~14.4℃。无霜期 200 d,降水量 600~700 mm。20 世纪 80—90 年代由于不规范矿山开采活动形成总体呈东西向坡度较陡且裸露的岩质边坡,矿渣、采坑占用了大量的林地,森林面积的大量减少,严重破坏了当地的生态环境。自 2005 年始,当地政府投入资金进行生态修复,包含有挂网喷播复绿、台阶复绿、鱼鳞坑复绿等修复工程模式,其中挂网喷播复绿工程模式实施面积占比超 50% 以上。主要种植刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、松树(*Pinus L.*)、构树(*Broussonetia papyrifera (L.)*)、黄荆(*Vitex negundo L.*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor Turcz.*)等乔灌木近 9 万

株,复绿山体 6 万 m^2 ,绿化面积占公园总面积 80% 以上。生态修复工程于 2013 年竣工后,大部分裸露岩面被植被覆盖,该研究区域进入植被自主生长与环境自我恢复的阶段。

2023 年 9 月在研究区内开展样方调查工作。根据不同的复绿技术和地形地貌,最终确定选取 27 个 5 m×5 m 的样方进行调查和采样(图 1),记录植物的

种类、数量及生长特征,共调查 27 种乔木与灌木植物。其中,乔木类有 17 种,隶属于 15 个科和 17 个属,主导种类包括刺槐、侧柏、构树和松树;灌木类有 10 种,隶属于 7 个科和 10 个属,主导种类包括黄荆和胡枝子。每个样方内取植物优势种的根、茎、叶作为样本,共计 72 份。其中,18 个样方点用于建模,6 个样方点用于验证。

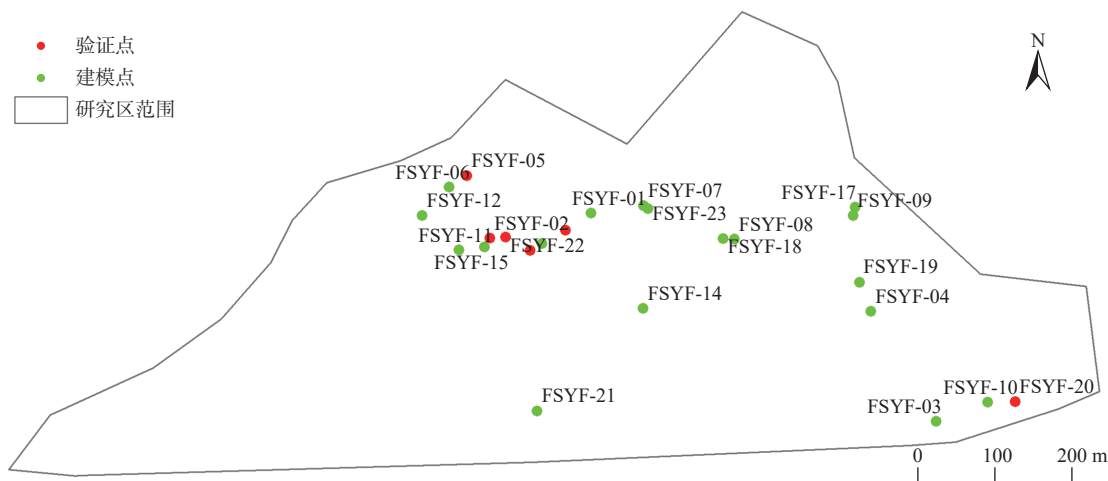


图 1 样方点位图

Fig. 1 Sample site location map

2 数据来源与研究方法

2.1 遥感数据及预处理

缝山公园历经多年规划建设,于 2013 年完工。为全面且精准地分析公园植被碳储量的时空变化特征,本研究选取 2013 年 10 月 11 日、2018 年 10 月 10 日、2023 年 10 月 30 日 3 期 10 月份植被覆盖度较好的时期,利用 2 m 分辨率的高分 1 号卫星数据进行分析。

数据处理严格遵循遥感图像处理的标准流程,确保数据质量和可用性。先利用卫星传感器的辐射定标参数,将数字量化值转换为辐射亮度值。然后采用 FLAASH 算法,结合研究区的地理位置、海拔高度和气象数据,对大气散射和吸收的影响进行校正。再利用 DEM 数据和影像自带的 RPC 文件,对多光谱图像和全色图像进行正射校正,消除地形起伏和卫星姿态变化引起的几何变形。最后以全色数据为基准,使用 G-S Pan Sharpening 方法对多光谱数据进行配准和融合,进行影像拼接和透明值设置等增强处理,突出植被与其他地物的光谱差异,提高植被分布和细节的清晰度,便于后续特征提取和分析。

2.2 植被指数

在建立基于 RS-MLRM 的植被碳储量估测模型

时,结合 GF-1 号影像的多光谱特性与该区植物的光学需求特点,积极汲取过往的研究经验^[13],本研究提取 6 个复合段数据,具体为: Band 2、Band 3、Band 4、Band (4-2)、Band (3-2)、Band (4/2)。在 ENVI 中利用 PCA Rotation 模块,进行主成分(principal components, PC)变换,分别提取样点所在像元的 b1_PC、b2_PC、b3_PC 的值。在 ENVI 软件中,利用 Co-occurrence measures 模块对研究区的 GF 影像 4 个波段分别进行纹理分析。对高分 1 号影像采用 ENVI5.3 中 Band math 工具分别计算各个植被指数,植被指数提取参数公式如表 1 所示^[14]。综上,每个样方点数据都包含 21 个遥感特征因子数值,6 个复合波段数据、1 个主成分、6 个植被指数、8 个纹理特征值。

2.3 植被覆盖度

植被覆盖度(fractional vegetation cover, FVC)是基于归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)反映植被盖度信息的指标,它与植被碳储量及 NDVI 均为正相关,在一定程度上能够反映植被碳储量的变化。用植被覆盖度能够更详细地描述植被碳储量在缝山公园的空间变化。

$$I_{FVC} = \frac{I_{NDV} - I_{NDV \min}}{I_{NDV \max} - I_{NDV \min}} \quad (1)$$

表 1 主要植被指数计算公式
Table 1 Calculation formula for major vegetation indices

植被指数	数学符号	计算公式
比值植被指数(ratio vegetation index, RVI)	I_{RV}	$I_{RV} = \frac{\rho_{NIR}}{\rho_{RED}}$
插值植被指数(interpolated vegetation index, DVI)	I_{DV}	$I_{DV} = \rho_{NIR} - \rho_{RED}$
NDVI	I_{NDV}	$I_{NDV} = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}}$
土壤调整植被指数(soil adjusted vegetation index, SAVI)	I_{SAV}	$I_{SAV} = (1 + L) \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{RED})}{(\rho_{NIR} + \rho_{RED} + L)}$
优化土壤调节植被指数(optimized soil adjusted vegetation index, OSAVI)	I_{OSAV}	$I_{OSAV} = (1 + 0.16) \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{RED})}{(\rho_{NIR} + \rho_{RED} + 0.16)}$
重归一化植被指数(renormalized difference vegetation index, RDVI)	I_{RDV}	$I_{RDV} = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\sqrt{\rho_{NIR} + \rho_{RED}}}$

注: ρ_{NIR} 和 ρ_{RED} 分别代表红外波段和红光波段的反射率, L 为大气校正参数, L 取 0.5。

式中: I_{FVC} ——植被覆盖度;

$I_{NDV \min}$ 、 $I_{NDV \max}$ ——NDVI 最小值与最大值。

利用像元二分模型, 参考前人经验^[15], 依据研究区的植被覆盖情况, 将全域植被覆盖度划分为 5 个等级, $I_{FVC} > 0.7$ 为高植被覆盖度、 I_{FVC} 在 (0.5, 0.7] 为较高植被覆盖度、 I_{FVC} 在 (0.3, 0.5] 为中等植被覆盖度、 I_{FVC} 在 (0.1, 0.3] 为较低植被覆盖度、 $I_{FVC} \leq 0.1$ 为低植被覆盖度。

3 植被碳储量估测模型

3.1 样地植被碳储量计算

基于样地调查数据, 缝山公园生态修复工程的植物以乔灌木为主, 林下草本物种很少。因此本研究对样地植被碳储量(aboveground carbon, AGC)的计算主要是针对乔木和灌木。植被碳储量计算的前提是查明植物的生物量, 目前已有许多生物量模型的研究成果^[16-17], 本研究采用相对生长模型法计算植物生物量。根据各样地每木检尺数据, 依据《造林项目碳汇计量监测指南》(LY/T 2253—2014)^[18] 以及查阅相关文献, 选择同地区或同纬度区域的生物量方程(若没有同属同科的树种方程, 则应用阔叶树、针叶树方程进行计算)(表 2)。

基于植被生物量, 单位面积植被的碳储量是通过将单位面积植被生物量乘以植被有机碳含碳率计算^[27], 本研究选取国际常用的碳含量系数(碳含量系数实际上是有机碳含碳率的数值化表示, 用于简化计算过程)为 0.5^[28], 将生物量转化为碳储量^[29], 公式如下^[13]:

$$I_{AGC} = C \times W \tag{2}$$

式中: I_{AGC} ——植被碳储量/g;

C ——碳含量系数/($gC \cdot g^{-1}$);

W ——植被生物量/($g \cdot m^{-2}$)。

3.2 植被碳储量与遥感因子相关性分析

通过 SPSS 分析 18 个样点植被碳储量数据, (表 3—

表 2 乔灌木主要干生物量方程

Table 2 Equations for major stem biomass of trees and shrubs

树种	计算公式
侧柏 ^[19]	$W_{\text{干}} = 125.31(D^2H)^{0.733}$
	$W_{\text{枝}} = 137.403 + 12.887(D^2H)$
	$W_{\text{叶}} = 53.49 + 9.97(D^2H)$
	$W_{\text{根}} = 11.007(D^2H) - 160.386$
刺槐 ^[20]	$\ln W_{\text{干}} = -2.895531 + 0.86764 \ln(D^2H)$
	$\ln W_{\text{枝}} = -3.71916 + 0.79079 \ln(D^2H)$
	$\ln W_{\text{叶}} = -2.90872 + 0.45739 \ln(D^2H)$
	$\ln W_{\text{根}} = -2.16746 + 0.63276 \ln(D^2H)$
火炬树 ^[21]	$\lg W = 2.3534 + 0.6801 \lg(D^2H)$
栎树 ^[22]	$W = 0.915 + 0.1D^2H$
雪松 ^[22]	$W = 1.26(0.3721D^{1.2928} + 0.2805D^{1.3313})$
构树 ^[22]	$W = 1.7519(D^2H)^{1.5784}$
阔叶树 ^[23]	$W = 0.0396(D^2H)^{0.933}$
针叶树 ^[24]	$W = 0.0254(D^2H)^{0.948}$
黄荆 ^[25]	$W = 4052.84 - 6982.50D + 3761.50D^2 - 518.76D^3$
胡枝子 ^[25]	$W = 32.456 + 5.202(D^2H) + 24.479(D^2H)^2 - 3.751(D^2H)^3$
其他灌木 ^[26]	$W = 100.71A_c^{0.925}$

注: W 为生物量, D 为胸径, C 为冠幅, H 为株高, A_c 为冠幅面积, $A_c = \pi C_1 C_2 / 4$ 。

5), 植被碳储量与主成分及 7 个纹理特征的相关性较差(相关系数均小于 0.4), 而与植被指数和波段及复合段具有显著相关性, 相关系数均达到 0.8 以上, 且与 Band (4/2) 和 Band (4-2) 显著相关。此外, 植被指数间的相关性在 0.70 ~ 0.99 之间, 表明存在较强的多重共线性。

表 3 植被碳储量与单波段和复合段之间的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between sample carbon stocks and single and composite bands

单波段和复合段	B2	B3	B4	B(4-2)	B(3-2)	B(4/2)
相关系数	-0.396	-0.379	0.645**	0.825**	-0.262	0.945**

注: **表示 $p < 0.01$; *表示 $p < 0.05$ (双尾); -表示负相关。

表 4 植被碳储量与植被指数之间的相关系数

Table 4 Correlation coefficients between carbon stocks and vegetation indices in the sample plots

植被指数	RVI	DVI	NDVI	SAVI	OSAVI	RDVI
相关系数	0.868**	0.862**	0.983**	0.983**	0.983**	0.984**

表 5 植被碳储量与 PCA 和纹理特征之间的相关系数

Table 5 Correlation coefficients between sample site carbon stocks and PCA and texture characteristics									
PC和纹理特征	PC	Mean	VA	HOM	CON	DI	EB	SM	COR
相关系数	-0.144	-0.306	0.193	-0.225	0.316	0.298	-0.032	-0.120	-0.098

3.3 基于 RS-MLRM 模型的植被碳储量估测模型构建

RS-MLRM 模型是一种结合遥感数据与多元线性回归分析的方法,旨在通过建立遥感信息与植被碳储量之间的定量关系,实现对大面积区域植被碳储量的高精度估算。其核心基于多元线性回归理论,假设植被碳储量为因变量(y),多个遥感因子为自变量($x_1, x_2, \cdots, x_n$),之间存在线性关系,通过构建如下数学模型来表达:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \cdots + b_nx_n \tag{3}$$

式中: x_n ——第 n 个遥感因子;

b_n ——第 n 个变量的回归系数;

b_0 ——回归方程中的常数项。

以相关性分析为基础,在 SPSS 中通过多元线性回归分析计算偏回归平方和,比较因子对模型的贡献度,剔除无关变量,迭代选取最优组合。该方法能够评估各变量对模型的解释力度,并有效解决多重共线性问题^[30]。

选取相关度较高的重归一化植被指数(renormalized difference vegetation index, RDVI) 和 Band(4/2)作为自变量,样地植被碳储量为因变量,进行逐步回归分析,建立回归模型(表 6)。

表 6 回归模型与参数

Table 6 Regression model and the parameters					
回归模型	方程	R^2	调整后 R^2	F	Sig
多元逐步回归模型	$y=0.081\ 2x-0.001x_1+0.015$	0.965	0.908	405.94	0.00
一元线性模型	$y=0.077x+0.015$	0.895	0.864	743.94	0.00
二次曲线模型	$y=0.009+0.095x-0.011x^2$	0.842	0.785	673.39	0.00
指数模型	$y=-0.339e^{-0.287x}+0.347$	0.883	0.859	535.84	0.00
幂次方模型	$y=0.093x^{0.785}$	0.832	0.776	472.46	0.00
对数模型	$y=0.095+0.054\ln x$	0.876	0.847	492.40	0.00

结果表明,多元逐步回归模型具有最高的决定系数($R^2 = 0.965$),拟合效果显著优于其他模型。将一元线性模型与多元逐步回归模型对比(图 2—3),多元逐步回归模型拟合效果更优^[31]。因此,缝山公园植被碳

储量估测模型为:

$$y = 0.081\ 2x - 0.001x_1 + 0.015 \tag{4}$$

3.4 植被碳储量模型精度检验和分析

将 24 个采样点划分为建模样本集和验证样本集,

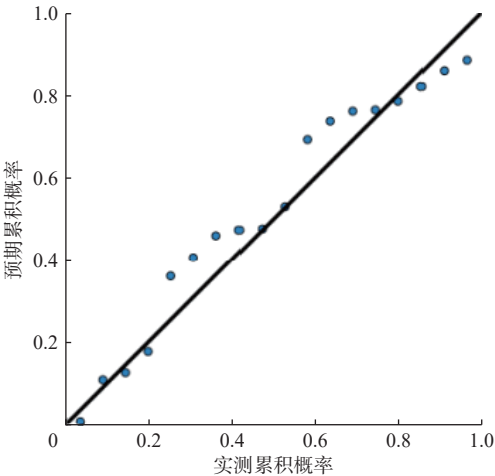


图 2 一元线性模型回归标准化残差的正态 P-P 图

Fig. 2 Normal P-P plot of standardized residuals for a simple linear regression model

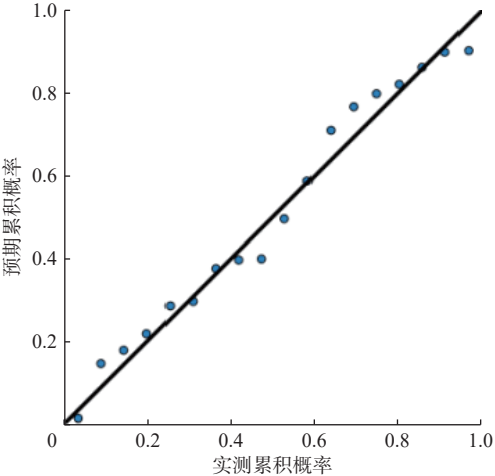


图 3 多元逐步回归模型回归标准化残差正态 P-P 图

Fig. 3 Normal P-P plot of standardized residuals for a multiple stepwise regression model

选取 18 个样方点作为建模样本,其余 6 个样方点数据用于验证,评估植被碳储量模型的精确度^[32]。

为了进一步检验模型的精确度,在 R^2 检验的基础上,采用均方根误差(root mean squared error, RMSE)和相对误差(relative error, RE)评估模型的精度和准确度^[33],公式表达式为:

$$I_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{m} \times \sum_i^m (B_i - B'_i)^2} \quad (5)$$

$$I_{\text{RE}} = 100 \times \frac{|B_i - B'_i|}{B_i} \quad (6)$$

式中: I_{RMSE} ——均方根误差值;

I_{RE} ——相对误差值/%;

B_i ——第 i 个样点实际碳密度数值/($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$);

B'_i ——第 i 个样点预测碳密度数值/($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$);

m ——样点个数。

对剩余 6 个实测样点的验证分析显示,植被碳密度预测值与实测值回归分析的 RMSE 为 10.68 ~ 29.06, RE 均控制在 10% 以内(表 7)。结果表明,模型在实际应用中具有较高的准确性,能够可靠估算缝山公园的植被碳储量。

表 7 缝山公园植被碳储量模型 RE-RMSE 评价表

Table 7 RE-RMSE evaluation of vegetation carbon stocks in Fengshan Park

样方	$B_i/(\text{g} \cdot \text{m}^{-2})$	$B'_i/(\text{g} \cdot \text{m}^{-2})$	$I_{\text{RE}}/\%$	I_{RMSE}
FSYF-02	5.34	5.58	4.46	10.68
FSYF-05	13.10	11.89	9.22	26.19
FSYF-16	14.53	15.85	9.11	29.06
FSYF-20	11.52	12.33	7.10	23.03
FSYF-22	9.05	8.42	6.92	18.09
FSYF-24	25.48	21.03	5.44	13.95

4 结果

4.1 植被碳储量总量变化特征

基于多元线性回归预测模型(式 4),结合 ENVI 软件的 Band Math 功能,估算缝山公园 2013、2018、2023 年的植被碳储量(表 8、图 4)。结果表明,缝山公园植被碳储量在 10 a 间总体呈增加趋势,其中 2013—2018 年显著增加,而 2018—2023 年略有减少。

4.2 植被碳储量时间变化特征

从 10 a 跨度来看,植被碳储量总体呈上升趋势,年均变化量平均值为 22 t。根据表 9 和图 5 分析,2013—2018 年缝山公园植被碳储量显著增加,年均变化量高达 68 t,增加面积占比达 60.52%。这主要得益于生态

表 8 不同年份缝山公园植被碳储量

Table 8 Vegetation carbon stocks in Fengshan Park in different years

指标	2013年	2018年	2023年
植被碳储量/(10^3 t)	1.56	1.90	1.78

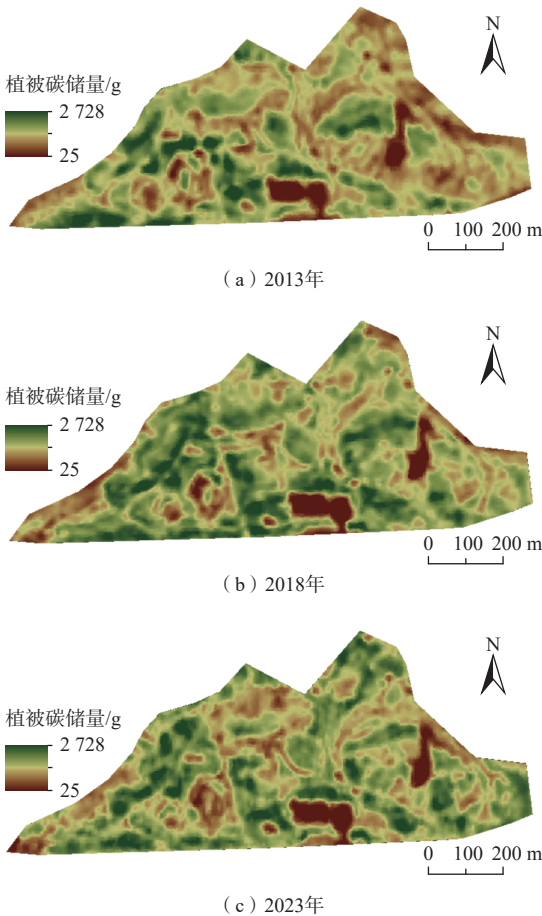


图 4 不同年份植被碳储量空间分布图

Fig. 4 Spatial distribution of carbon stocks in different years

修复工程后植被的持续生长和恢复,群落结构逐渐稳定和复杂,生物量显著增加。然而,2018—2023 年植被碳储量轻微减少,年均变化值为 -24 t,增加面积占比降至 46.28%,减少的面积多于增加的面积。这可能与生态基质的自然损耗和水土流失有关。尽管后期受到不利因素的干扰,但总体植被碳储量仍呈上升趋势。

表 9 不同年份植被碳储量变化

Table 9 Changes of vegetation carbon storage in different years

年份	碳储量变化面积占比/%			碳储量年均变化量/t
	增加	不变	减少	
2013—2018年	60.52	2.24	37.23	68
2018—2023年	46.28	2.34	51.38	-24
2013—2023年	14.24	0.10	14.15	22

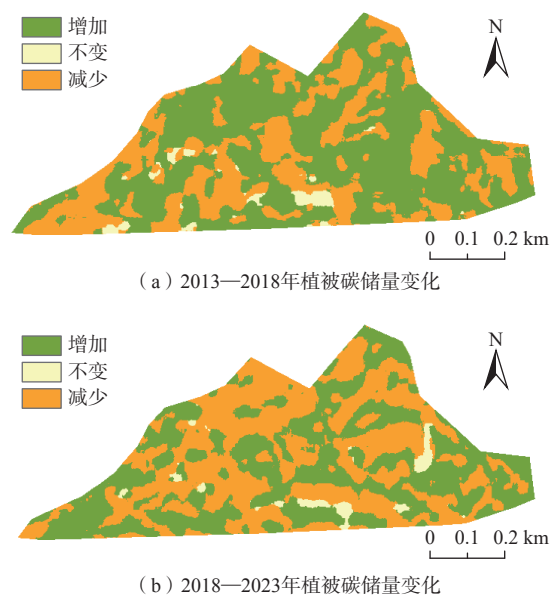


图 5 不同年份植被碳储量分布变化图

Fig. 5 Distribution change map of AGC in different years

势,反映了生态修复工程的长期积极影响,凸显了其重要性和持续性。

4.3 植被碳储量空间变化特征

植被覆盖度与植被碳储量呈正相关关系^[34]。通过研究区植被覆盖度变化特征,可以描述植被碳储量的空间分布特征。研究区 2013 年、2018 年和 2023 年的植被覆盖度分布图(图 6)显示,高植被覆盖度和较高植被覆盖度区域分布广泛,而低植被覆盖度和较低植被覆盖度区域主要集中在人工池塘和平台建筑物区域。

从表 10 的统计结果可以看出,研究区 2013 年、2018 年和 2023 年均以高植被覆盖度为主,且高植被覆盖度占比均高于 48%。高植被覆盖度面积呈先增加后减少的趋势,与植被碳储量变化趋势一致。此外,低、较低和中等植被覆盖度区域总面积在 2013—2023 年间呈现先减少后增加的趋势,而较高和高植被覆盖度区域占比总和均高于 95%,表明研究区植被覆盖情况总体良好。研究区生态修复工程以挂网喷播为主,受气候和营养物质消耗影响较大。2021 年“21·7”特大暴雨导致喷播基质和养分流失,部分区域植被覆盖度下降,高植被覆盖度区域面积减少,部分降为较高或中等覆盖度等级。

植被碳储量的高值区与高植被覆盖度区域空间分布一致,低值区则与低、较低植被覆盖度区域相对应。这表明植被覆盖度是影响植被碳储量的关键因素,覆盖度增加会促进光合作用,固定更多有机碳;反

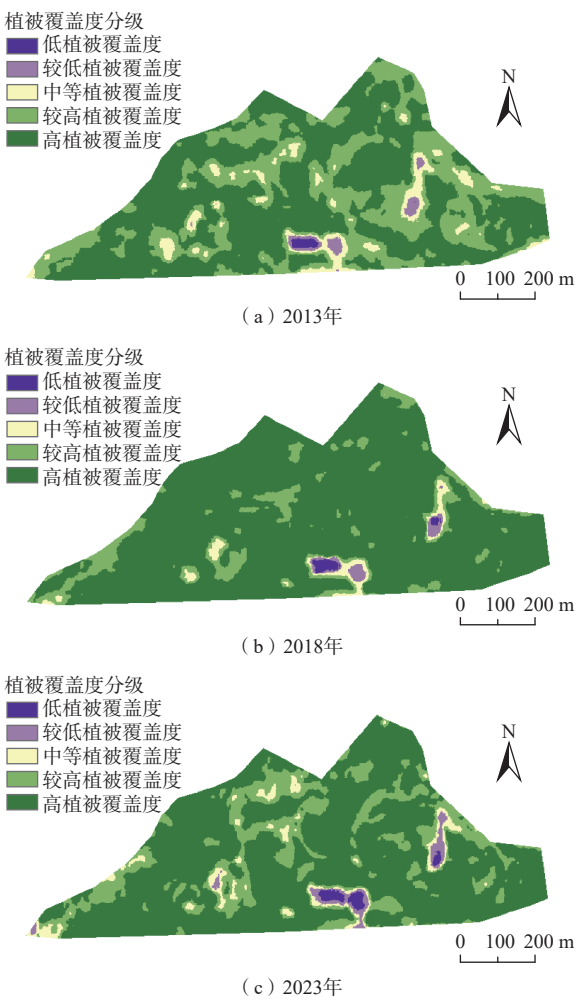


图 6 2013 年、2018 年、2023 年植被覆盖度等级空间分布
Fig. 6 Spatial distribution of vegetation covergrade in 2013, 2018 and 2023

表 10 不同年份各植被覆盖度下植被碳储量
Table 10 Vegetation carbon storage under different vegetation cover in different years

年份	项目	低植被覆盖度	较低植被覆盖度	中等植被覆盖度	较高植被覆盖度	高植被覆盖度
2013年	比例/%	0.42	0.60	3.95	46.09	48.95
	面积/km ²	0.05	0.07	0.46	5.38	5.71
	植被碳储量/t	0.6	1.39	35.50	591.68	931.07
2018年	比例/%	0.52	0.51	2.24	21.24	75.48
	面积/km ²	0.06	0.06	0.26	2.48	8.81
	植被碳储量/t	0.60	1.26	21.70	287.57	1 594.44
2023年	比例/%	0.68	0.89	2.89	26.20	69.34
	面积/km ²	0.08	0.10	0.34	3.06	8.09
	植被碳储量/t	0.80	1.86	26.65	369.97	1 399.90

之,覆盖度下降会削弱碳固定能力,降低植被碳储量。

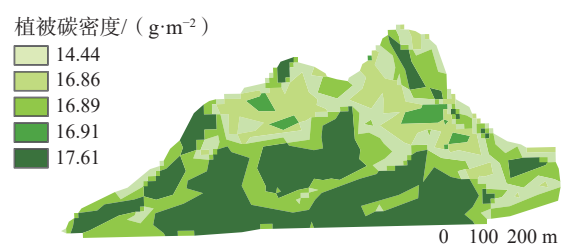
4.4 不同坡度区间植被碳储量变化特征

为进一步真实、科学地分析植被碳储量时空上的

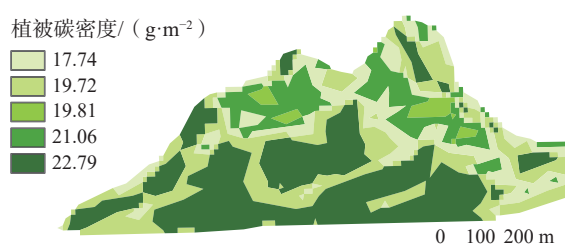
变化特征,利用 ArcGIS 依据不同年份和坡度区间计算植被碳密度。根据表 11 和图 7 的分析结果如下。

在时间上,2013—2023 年间,植被碳密度受坡度和人为因素显著影响。2013—2018 年,各坡度区间植被碳密度均明显增加;2018—2023 年,各坡度区间植被碳密度略有减少。但总体来看,10 a 间各坡度区间内植被碳密度呈增加趋势。

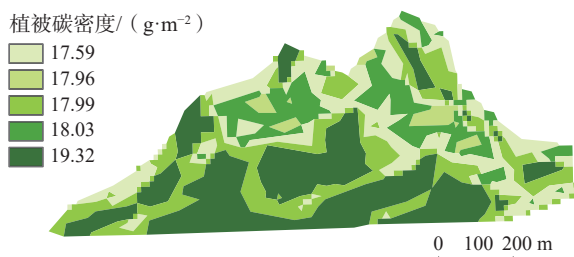
在空间上,0.46°~8.32°的缓坡区域和 21.28°~30.44°区域的植被碳密度较高,植被碳储量较高。这些区域土壤条件较好,坡度适中,有利于植被生长和生物量积累。而在 8.33°~21.27°的区域,植被碳密度较低,主要由于人工池塘、人行步道和平台等区域的分布。



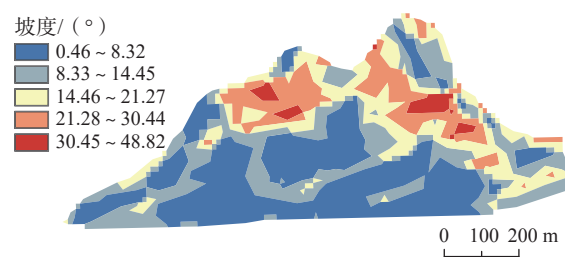
(a) 2013年



(b) 2018年



(c) 2023年



(d) 缝山公园坡度分区图

图 7 不同坡度区间植被碳密度变化图

Fig. 7 Vegetation carbon density changes in different slope intervals

30°以上的陡坡区域植被碳密度虽高于 14.46°~21.27°区域,但总体碳储量较低。这主要是由于陡坡区域土壤浅薄且肥力低下,植被生长困难,但受人为扰动影响较小,因此植被碳储量处于中等水平。

综上所述,人类活动和地形条件对植被生长和碳储量分布具有重要调控作用。在后续生态规划和管理中,应充分考虑这些因素,采取合理措施优化植被分布,提高碳储量。在坡度适宜的区域加强植被保护和培育,减少人类活动对植被的干扰;在陡坡区域采取水土保持措施,改善土壤条件,促进植被恢复;在建筑物周边合理规划绿化空间,选择适宜的植被类型,以增加碳汇功能。

表 11 不同坡度区间的植被碳密度

Table 11 Vegetation carbon density in different slope intervals

坡度/(°)	2013年植被 碳密度/(g·m ⁻²)	2018年植被 碳密度/(g·m ⁻²)	2023年植被 碳密度/(g·m ⁻²)
0.46 ~ 8.32	17.61	22.79	19.32
8.33 ~ 14.45	16.89	19.72	17.99
14.46 ~ 21.27	14.44	17.74	17.59
21.28 ~ 30.44	16.86	21.06	18.03
30.45 ~ 48.82	16.91	19.81	17.96

池塘周边的高土壤湿度和积水现象限制了植被生长,同时人类活动频繁导致土壤压实,不利于植被根系发育,且该区域植被多为低矮草本或小型灌木,生物量较低。

5 讨论

与多数研究一致,本文证实生态修复工程显著促进了植被恢复和植被碳储量的增加^[35],高植被覆盖区通常具有更高的光合作用效率和生物量积累,从而支持更高的碳储量^[36]。缓坡区域(0.46°~8.32°)植被碳密度较高,而陡坡(>30°)和人类活动频繁区域(8.33°~21.27°)碳密度较低^[37]。与郝旺林^[38]关于坡度通过影响土壤侵蚀、水分条件和人类活动间接调控碳分布的结论相符。

前人研究多关注短期修复效果或生态修复的前后对比^[12,39],而本文通过 10 a 跨度揭示了生态恢复的长期动态,因生态修复基质的自然损耗、极端气候事

件干扰,本文发现植被碳储量在生态修复后并非持续增长,而是呈现“先增后减”的波动趋势,2013—2018年显著增加,2018—2023年轻微下降,表明碳汇功能可能随修复措施失效而波动。

因缝山公园作为城市公园,人类活动强度高,其碳汇功能的“空间异质性”更受人为因素干扰主导,而非单纯自然因素。所以本文强调低坡度区(如人行步道、平台)因人类活动(踩踏、土壤压实)导致碳密度显著低于其他区域,而前人研究多关注自然因素(如坡度、土壤类型)对碳分布的影响,对人类活动的局部效应讨论较少^[40-41]。

过往有关生态修复的研究,主要聚焦于修复前后的成效,对比修复前后坡面的植被覆盖度、水土流失状况等,以此展现生态修复的积极作用^[42]。然而,这些研究普遍忽视了对生态修复技术长期可持续性的评估。即生态修复技术(如挂网喷播)存在“有限年限效应”,其碳汇增益作用仅能维持一定年限,需后续养分补充才能持续。

研究发现,生态修复工程的碳汇增益效果会随时间衰减,且易受极端气候事件(如暴雨)破坏。这一结论为生态修复工程的长期维护(如定期补充基质、加固边坡)提供了科学依据。通过高分辨率空间分析,揭示植被碳储量变化与植被覆盖度、坡度分区的动态耦合关系。例如,2018—2023年高植被覆盖度面积减少主要集中于陡坡区域(基质流失),而缓坡区因土壤条件较好仍维持较高碳密度。缝山公园作为城市人工修复生态系统,其碳储量受人类活动(如游客踩踏)和局地微地形(如人工池塘湿度)的显著影响,这一发现拓展了城市生态系统碳循环研究框架。

6 结论

(1)本研究成功构建了基于RS-MLRM的植被碳储量估测模型。通过分析样地数据并比较多种模型,最终选定包含RDVI和Band(4/2)2个因子的多元逐步回归模型作为最优模型。该模型具有较高的决定系数($R^2 = 0.965$),并通过6个验证样点的分析,结果显示其均方根误差较小,相对误差均在10%以内,表明模型能够精确估算缝山公园的植被碳储量,为该区域的碳储量研究提供了可靠的方法支持。

(2)时间上,2013—2018年公园植被碳储量明显增加,2018—2023年略有减少,但10 a间总体呈上升趋势。空间上,植被碳储量受坡度和人为因素影响,不同坡度区间的碳密度存在差异。

(3)植被碳储量与植被覆盖度呈正相关,且变化趋势一致。这证实了植被覆盖度是影响碳储量的关键因素之一,提升植被覆盖度对增加碳储量具有重要意义,为生态修复和碳汇管理提供了明确的方向。

(4)本研究为焦作缝山公园这类由废弃矿山转型的城市公园植被碳储量提供了研究样本,为矿山生态修复效果评价和当地“双碳社会”建设提供了科学依据和数据支持。未来研究可进一步拓展区域和时间序列,考虑更多生态因子的影响,优化模型以提高估算精度,为生态系统碳循环和环境保护提供更深入的理论与实践支撑。

参考文献 (References) :

- [1] 胡海波,刘佳璇,丁冬霞,等.森林固碳计量方法研究综述[J].中南林业科技大学学报,2024,44(11):58-69. [HU Haibo, LIU Jiaxuan, DING Dongxia, et al. A review of measurement methods of forest carbon sequestration[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2024, 44(11): 58 - 69. (in Chinese with English abstract)]
- [2] ERIKSSON L E B, SANTORO M, WIESMANN A, et al. Multitemporal JERS repeat-pass coherence for growing-stock volume estimation of Siberian forest[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41: 1561 - 1570.
- [3] HÄRKÖNEN S, LEHTONEN A, EERIKÄINEN K, et al. Estimating forest carbon fluxes for large regions based on process-based modelling, NFI data and Landsat satellite images[J]. Forest Ecology and Management, 2011, 262(12): 2364 - 2377.
- [4] 杨飞,崔宽宽,张成业,等.露天煤矿排土场长时序植被碳汇分级方法构建及分析[J].煤田地质与勘探,2024,52(5):139-150. [YANG Fei, CUI Kuankuan, ZHANG Chengye, et al. Construction and analysis of a method for grading long-term vegetation carbon sink in waste dumps of an open-pit coal mine[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(5): 139 - 150. (in Chinese with English abstract)]
- [5] SALES M H, SOUZA C M Jr, KYRIAKIDIS P C, et al. Improving spatial distribution estimation of forest biomass with geostatistics: A case study for Rondônia, Brazil[J]. Ecological Modelling, 2007, 205(1/2): 221 - 230.
- [6] 徐丽华,张结存,黄博,等.基于QuickBird影像的城市森林碳储量遥感估测[J].应用生态学报,2014,25(10):2787-2793. [XU Lihua, ZHANG Jiecen,

- HUANG Bo, et al. Remote sensing estimation of urban forest carbon stocks based on QuickBird images[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(10): 2787 – 2793. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 徐小军, 周国模, 杜华强, 等. 样本分层对毛竹林地上部分碳储量估算精度的影响 [J]. 林业科学, 2013, 49(6): 18 – 24. [XU Xiaojun, ZHOU Guomo, DU Huaqiang, et al. Effects of sample plots stratification on estimation accuracy of aboveground carbon storage for *Phyllostachys edulis* forests[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2013, 49(6): 18 – 24. (in Chinese with English abstract)]
- [8] BAIETTO A, HIRIGOYEN A, TORANZA C, et al. Carbon stock estimation in halophytic wooded savannas of Uruguay: An ecosystem approach[J]. *Forest ecosystems*, 2024, 11: 100216.
- [9] 王建步, 张杰, 马毅, 等. 基于 GF-1WV 的黄河口湿地植被碳储量估算研究 [J]. 海洋科学进展, 2019, 37(1): 75 – 83. [WANG Jianbu, ZHANG Jie, MA Yi, et al. Estimation of vegetation carbon storage in the Yellow River estuary wetland based on GF-1 WV satellite image[J]. *Advances in Marine Science*, 2019, 37(1): 75 – 83. (in Chinese with English abstract)]
- [10] BU Xiaoyan, DONG Suocheng, MI Wenbao, et al. Spatial-temporal change of carbon storage and sink of wetland ecosystem in arid regions, Ningxia Plain[J]. *Atmospheric Environment*, 2019, 204: 89 – 101.
- [11] 汤煜, 石铁矛, 卜英杰, 等. 城市绿地碳储量估算及空间分布特征 [J]. 生态学杂志, 2020, 39(4): 1387 – 1398. [TANG Yu, SHI Tiemao, BU Yingjie, et al. Estimation and spatial distribution of carbon storage in urban greenspace[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(4): 1387 – 1398. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 金中昊, 李喆, 张冬冬, 等. 破损山体不同复绿工程模式下生态修复效果评价——以焦作市缝山公园为例 [J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2024, 47(6): 80 – 88. [JIN Zhonghao, LI Zhe, ZHANG Dongdong, et al. Evaluation of ecological restoration effect of damaged mountain under different greening project modes: Take Fengshan park in Jiaozuo as an example[J]. *Journal of Natural Science of Hunan Normal University*, 2024, 47(6): 80 – 88. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 王雪军, 孙玉军. 基于遥感地学模型的辽宁省森林生物量和碳储量估测 [J]. 林业资源管理, 2011(1): 100 – 105. [WANG Xuejun, SUN Yujun. Study on forest biomass and carbon sequestration survey in Liaoning province based on RS and genomic models[J]. *Forest Resources Management*, 2011(1): 100 – 105. (in Chinese with English abstract)]
- [14] HASHEMI S A, FALLAH CHAI M M, BAYAT S. An analysis of vegetation indices in relation to tree species diversity using by satellite data in the northern forests of Iran[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2013, 6(9): 3363 – 3369.
- [15] CUI Lu, ZHAO Yonghua, LIU Jianchao, et al. Vegetation coverage prediction for the Qinling mountains using the CA-Markov model[J]. *International Journal of Geo-Information*, 2021, 10(10): 679.
- [16] 万五星, 王效科, 李东义, 等. 暖温带森林生态系统林下灌木生物量相对生长模型 [J]. 生态学报, 2014, 34(23): 6985 – 6992. [WAN Wuxing, WANG Xiaoke, LI Dongyi, et al. Biomass allometric models for understory shrubs of warm temperate forest ecosystem[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(23): 6985 – 6992. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 陈修官. 20 年生杉木人工林干物质积累及相对生长模型研究 [J]. 防护林科技, 2007(4): 28 – 29. [CHEN Xiuguan. Dm accumulation and growth model of *Cunninghamia lanceolata* plantation[J]. *Protection Forest Science and Technology*, 2007(4): 28 – 29. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 国家林业局. 造林项目碳汇计量监测指南: LY/T 2253—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014. [State Forestry Administration of the People's Republic of China. Guidelines on carbon accounting and monitoring for afforestation project: LY/T 2253—2014[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014. (in Chinese)]
- [19] 陈灵芝, 陈清朗, 鲍显诚, 等. 北京山区的侧柏林 (*Platycladus orientalis*) 及其生物量研究 [J]. 植物生态学与地植物学学报, 1986, 10(1): 17 – 25. [CHEN Lingzhi, CHEN Qinglang, BAO Xiancheng, et al. Studies on Chinese arborvitae (*Platycladus orientalis*) forest and its biomass in beijing[J]. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica*, 1986, 10(1): 17 – 25. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 毕君, 黄则舟, 王振亮. 刺槐单株生物量动态研究 [J]. 河北林学院学报, 1993, 8(4): 278 – 282. [BI Jun, HUANG Zezhou, WANG Zhenliang. Studies on biomass dynamic of black locust tree[J]. *Journal of Hebei Forestry*

- College, 1993, 8(4): 278 – 282. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 高喜荣, 赵辉, 杨海青, 等. 太行山低山丘陵区外来种火炬树群落生物量与碳贮量 [J]. 中南林业科技大学学报, 2012, 32(12): 172 – 175. [GAO Xirong, ZHAO Hui, YANG Haiqing, et al. Biomass and carbon storage of *Rhus typhina* in hilly area of Taihang Mountain[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2012, 32(12): 172 – 175. (in Chinese with English abstract)]
- [22] JO H K, KIM J Y, PARK H M. Carbon reduction and planning strategies for urban parks in Seoul[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2019, 41: 48 – 54.
- [23] 刘国华, 傅伯杰, 方精云. 中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献 [J]. 生态学报, 2000, 20(5): 733 – 740. [LIU Guohua, FU Bojie, FANG Jingyun. Carbon dynamics of Chinese forests and its contribution to global carbon balance[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(5): 733 – 740. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 王如松, 方精云, 高林, 等. 现代生态学的热点问题研究 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1996. [WANG Rusong, FANG Jingyun, GAO Lin, et al. Research on hot issues of modern ecology[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1996. (in Chinese)]
- [25] 黎燕琼, 郑绍伟, 龚固堂, 等. 不同年龄柏木混交林下主要灌木黄荆生物量及分配格局 [J]. 生态学报, 2010, 30(11): 2809 – 2818. [LI Yanqiong, ZHENG Shaowei, GONG Gutang, et al. Biomass and its allocation of undergrowth *Vitex negundo* L. in different age classes of mixed cypress forest[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(11): 2809 – 2818. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 吴光明. 森林资源抽样调查中样地数量与精度计算 [J]. 现代农业科技, 2016(9): 173 – 174. [WU Guangming. Calculation method of quantity and precision of sampling survey in forest resource survey[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2016(9): 173 – 174. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 卜晓燕. 银川平原不同类型湿地碳汇评估研究 [D]. 银川: 宁夏大学, 2016. [BU Xiaoyan. Research of evaluation on carbon sequestration for different types of wetlands in Yinchuan Plain[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [28] FANG J, CHEN A, PENG C, et al. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998[J]. *Science*, 2001, 292(5525): 2320 – 2322.
- [29] NOWAK D J, GREENFIELD E J, HOEHN R E, et al. Carbon storage and sequestration by trees in urban and community areas of the United States[J]. *Environmental Pollution*, 2013, 178: 229 – 236.
- [30] 殷炜达, 苏俊伊, 许卓亚, 等. 基于遥感技术的城市绿地碳储量估算应用 [J]. 风景园林, 2022, 29(5): 24 – 30. [YIN Weida, SU Junyi, XU Zhuoya, et al. Estimation and application of urban green space carbon storage based on remote sensing technology[J]. *Landscape Architecture*, 2022, 29(5): 24 – 30. (in Chinese with English abstract)]
- [31] 吕美蓉, 任国兴, 李雪莹, 等. 可见-近红外光谱的潮间带沉积物有机碳含量的几种模型预测方法 [J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(4): 1082 – 1086. [LV Meirong, REN Guoxing, LI Xueying, et al. Prediction of organic carbon content of intertidal sediments based on visible-near infrared spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2020, 40(4): 1082 – 1086. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 韩云亭, 李思悦, 罗协. 基于 GF-2 影像的武汉市九峰山国家森林公园地上碳储量估算 [J]. 地质通报, 2024, 43(4): 611 – 619. [HAN Yunting, LI Siyue, LUO Xie. Estimation of above-ground carbon storage in the Jiufengshan National Forest Park of Wuhan based on GF-2 images[J]. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(4): 611 – 619. (in Chinese with English abstract)]
- [33] 张婷婷, 石昊, 芦晓峰, 等. 辽河口湿地自然植被碳储量研究 [J]. 人民黄河, 2020, 42(10): 92 – 95. [ZHANG Tingting, SHI Hao, LU Xiaofeng, et al. Study on carbon reserves of natural vegetation in Liaohe river estuary wetland[J]. *Yellow River*, 2020, 42(10): 92 – 95. (in Chinese with English abstract)]
- [34] WANG Yan, WANG Qixiang, WANG Mengben. Similar carbon density of natural and planted forests in the Lüliang Mountains, China[J]. *Annals of Forest Science*, 2018, 75(3): 87.
- [35] 苏军德. 矿山废弃地生态修复区植被碳库研究 [J]. 水土保持通报, 2018, 38(5): 234 – 237. [SU Junde. A study on vegetation carbon storage in ecological restoration area of abandoned mines[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, 38(5): 234 – 237. (in Chinese with English abstract)]
- [36] LIAO Zhanmang, YUE Chao, HE Binbin, et al. Growing biomass carbon stock in China driven by expansion and

- conservation of woody areas[J]. *Nature Geoscience*, 2024, 17(11): 1127 – 1134.
- [37] 胡茸茸, 郭杨, 欧阳勋志, 等. 赣中杉木林碳密度空间分布格局及其影响因素 [J]. 生态学杂志, 2025, 44(2): 365 – 372. [HU Rongrong, GUO Yang, OUYANG Xunzhi, et al. Spatial distribution pattern of carbon density and its influencing factors of Cunninghamia lanceolata plantations in central Jiangxi[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2025, 44(2): 365 – 372. (in Chinese with English abstract)]
- [38] 郝旺林. 黄土丘陵区土壤 CO₂ 排放对水蚀的响应及模拟研究 [D]. 杨陵: 中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心), 2022. [[HAO Wanglin. Response and modeling of soil CO₂ emission to water erosion in loess hilly areas[D]. Yangling: University of Chinese Academy of Sciences(Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education), 2022. (in Chinese with English abstract)]]
- [39] 梁森, 张建军, 王柯, 等. 区域生态保护修复碳汇潜力评估方法与应用——基于第一批山水林田湖草生态保护修复工程的研究 [J]. 生态学报, 2023, 43(9): 3517 – 3531. [LIANG Sen, ZHANG Jianjun, WANG Ke, et al. Methodology and application of carbon sink potential assessment for regional ecological conservation and restoration: Based on the research of the first batch of pilots for ecological protection and restoration project of mountains-rivers-forests-farmlands[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(9): 3517 – 3531. (in Chinese with English abstract)]
- [40] 肖烨, 黄志刚, 令玉林, 等. 赤水河流域不同植被恢复类型土壤有机碳储量特征及其影响因素 [J]. 土壤通报, 2024, 55(6): 1636 – 1646. [XIAO Ye, HUANG Zhigang, LING Yulin, et al. Characteristics and influencing factors of Soil organic carbon storage in different vegetation restoration types in the Chishui River Basin[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2024, 55(6): 1636 – 1646. (in Chinese with English abstract)]
- [41] 叶小曼, 魏天兴, 于欢, 等. 黄土丘陵区典型森林生态系统碳储量及其影响因素 [J]. 生态学杂志, 2025, 44(5): 1409 – 1416. [YE Xiaoman, WEI Tianxing, YU Huan, et al. Carbon storage and its influencing factors of typical forest ecosystems in the loess hilly region[J]. *Journal of Ecology*, 2025, 44(5): 1409 – 1416. (in Chinese with English abstract)]
- [42] 邓念东, 张硕伦, 梁毅轩, 等. 黄土边坡植被恢复技术研究进展 [J]. *科学技术与工程*, 2025, 25(2): 448 – 458. [DENG Niandong, ZHANG Shuolun, LIANG Yixuan, et al. Research progress in vegetation restoration technology for loess slopes[J]. *Science Technology and Engineering*, 2025, 25(2): 448 – 458. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 宗 爽