

不同空间尺度耕地埂坎提取方法及其分布特征

梁露^{1,2}, 韦杰^{1,2}, 娄义宝^{1,2}, 陈柏娜¹, 唐强³, 贺秀斌⁴

(1. 重庆师范大学 地理与旅游学院, 重庆 401331; 2. 三峡库区地表生态过程重庆市野外科学观测研究站, 重庆 401331; 3. 西南大学 地理科学学院, 重庆 400715; 4. 中国科学院、水利部 成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610299)

摘要: [目的] 针对埂坎人工调查效率低, 现有遥感影像提取尺度适配性不足等问题, 构建多源数据协同的“宏观识别-微观提取”多尺度提取方法体系, 提升埂坎识别与参数估算的精度与效率。[方法] 在县域尺度, 基于卫星遥感影像与数字高程模型(DEM)建立埂坎(石坎/土坎)特征解译方法, 分析埂坎类型与地形的分布响应关系; 在小流域尺度, 融合无人机获取的数字正射影像图(DOM)与数字地表模型(DSM)数据, 提取埂坎的埂长、埂宽、坎高及埂坎系数等几何参数, 并通过偏离度(DE)、决定系数(R^2)与均方根误差(RMSE)评估精度, 构建几何参数的实测与反演值的线性回归模型。[结果] ①卫星遥感影像适用于县域尺度耕地埂坎的识别与特征分析, 虾子岭小流域验证埂坎条数与面积识别精度均超过91%。重庆市忠县耕地埂坎总数超过300 000条, 总面积约8 km², 埂坎系数约3%。②无人机影像可高精度提取小流域尺度的埂坎参数, 埂长、埂宽、坎高及埂坎系数的绝对偏差分别小于2 m, 0.1 m, 0.3 m和2%, 提取精度表现为: 埂长>埂宽>坎高>埂坎系数, 土坎各项参数提取精度均优于石坎。参数回归模型拟合度良好(R^2 多在0.78以上), RMSE控制在1.6以内。③忠县埂坎集中分布于高程300~600 m和坡度6°~15°之间, 数量随高程和坡度增加呈“先增后减”的变化趋势; 土坎多于石坎; 槽谷区埂坎斑块面积大、数量多, 山岭区埂坎密度较高且分布破碎。[结论] 构建的多源遥感协同方法适用于县域尺度埂坎分布格局识别与小流域尺度参数精细提取, 回归模型可有效估算关键埂坎参数。

关键词: 耕地埂坎; 多源数据; 参数提取; 分布特征; 重庆市忠县

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2026)02-0214-11

中图分类号: TP751, S157.3

文献参数: 梁露, 韦杰, 娄义宝, 等. 不同空间尺度耕地埂坎提取方法及其分布特征[J]. 水土保持通报, 2026, 46(2): 214-224. Liang Lu, Wei Jie, Lou Yibao, et al. Extraction methods and distribution characteristics of farmland bunds at different spatial scales [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(2): 214-224.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.02.002

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.02.002

Extraction methods and distribution characteristics of farmland bunds at different spatial scales

Liang Lu^{1,2}, Wei Jie^{1,2}, Lou Yibao^{1,2}, Chen Baina¹, Tang Qiang³, He Xiubin⁴

(1. School of Geography and Tourism, Chongqing Normal University,

Chongqing 401331, China; 2. Chongqing Observation and Research Station of Earth

Surface Ecological Processes in the Three Gorges Reservoir Area, Chongqing 401331, China;

3. School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China; 4. Institute of Mountain

Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Chengdu, Sichuan 610299, China)

Abstract: [Objective] To address the low efficiency of manual surveys and limited scale adaptability of existing remote sensing techniques in bund extraction, a multi-source data coordinated extraction framework of ‘macro-identification and micro-extraction’ was constructed in order to enhance the accuracy and efficiency of farmland bund identification and parameter estimation. [Methods] At the county scale, satellite remote sensing imagery and digital elevation models (DEM) were used to develop a feature interpretation method for bunds (stone and soil

收稿日期: 2025-08-23

修回日期: 2025-10-30

采用日期: 2025-11-03

资助项目: 重庆师范大学博望学者领军人才项目“三峡库区侵蚀阻控机制与水土保持技术优化研究”(BWLJ2023012)

第一作者: 梁露(2000—), 女(汉族), 四川省泸县人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀与水土保持。Email: bambilew@foxmail.com。

通信作者: 韦杰(1979—), 男(汉族), 四川省苍溪县人, 博士, 教授, 硕士研究生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。Email: wei_jie@mails.ucas.ac.cn。

bunds) and to analyze distribution response of bund types to terrain. At the small watershed scale, UAV-derived digital orthophoto maps (DOM) and digital surface models (DSM) were fused to extract geometric parameters of bunds, such as bund length, bund width, bund height, and bund coefficient. Additionally, the extraction accuracy was evaluated using deviation error (DE), coefficient of determination (R^2), and root mean square error (RMSE), and linear regression models between measured and inverted values of geometric parameters were constructed. [Results] ① Satellite remote sensing imagery demonstrated strong applicability for the identification and characterization of farmland bunds at the county scale. Validation in the Xiaziling small watershed indicated that recognition accuracies for both the number and area of bunds exceeded 91%. At Zhongxian County of Chongqing City, the total number of farmland bunds exceeded 300 000, with a total area of approximately 8 km² and a bund coefficient of about 3%. ② UAV imagery enabled high-precision extraction of bund parameters at the watershed scale, with absolute deviations of less than 2 m for bund length, 0.1 m for bund width, 0.3 m for bund height, and 2% for the bund coefficient. The extraction accuracy ranked as follows: bund length > bund width > bund height > bund coefficient, with soil bunds exhibiting higher extraction accuracy than stone bunds across all parameters. The parameter regression models showed good fit (R^2 mostly above 0.78), and RMSE was controlled within 1.6. ③ At Zhongxian County, bunds were primarily distributed within elevation ranges of 300~600 m and slope ranges of 6°—15°, showing a trend of ‘first increasing and then decreasing’ with increasing elevation and slope. Soil bunds had a wider distribution compared to stone bunds. Bund patches in valley areas had larger areas and higher numbers, while those in mountainous areas showed higher density but fragmented distribution. [Conclusion] The developed multi-source remote sensing coordinated method is suitable for the identification of bund distribution patterns at the county scale and for fine parameter extraction at the small watershed scale. The regression models can effectively estimate key bund parameters.

Keywords: farmland bunds; multi-source data; parameter extraction; distribution characteristics; Zhongxian County, Chongqing City

埂坎作为坡耕地重要的水土保持措施^[1],具有理水减蚀、保持土壤养分、改善农业生产环境等功能^[2]。埂坎的形态特征与空间分布直接影响其水土保持效果,其几何参数影响坡面径流汇流与泥沙输移过程,从而调控减蚀与蓄水效益。不同类型的埂坎在防止水土流失和提高土地生产力等方面各具优势。准确高效获取埂坎的几何参数及其空间分布信息,对优化埂坎设计及调控坡耕地土壤侵蚀具有重要意义。

当前埂坎信息的提取方式主要有传统的野外调查、卫星遥感与无人机影像等^[3]。传统测量方法精度高但效率低、成本高,难以满足大范围监测需求^[4]。近年来,越来越多的学者开始关注卫星遥感和无人机遥感技术^[5-6]。卫星遥感因其周期性、范围广等优势,已在梯田田埂识别^[7]、城市道路^[8]提取及农作物分类^[9]中取得初步应用,但受限于分辨率,难以反映微地形要素的细节特征。相比之下,无人机遥感则凭借厘米级分辨率在地物几何和纹理表达上优势突出^[10],在耕地作物精细提取中取得显著进展。目前,埂坎研究主要聚焦于入渗性能、结构与利用以及生物埂的构建与效益评价等方面,且多依赖单一数据源,对不同空间尺度下多源遥感影像协同提取耕地微地形结构的研究仍较薄弱,尤其是埂坎的精细识

别与参数估算方法研究比较缺乏。

三峡库区是中国水土流失最为严重的区域之一,坡耕地年均土壤侵蚀量达 1.50×10^8 t,年入库泥沙超 4.00×10^7 t^[11]。作为关键的水土保持措施,埂坎在库区广泛分布,类型包括土坎、石坎、土石复合坎和水泥砖坎等,其中土坎和石坎占比最多,埂坎的空间分布与类型结构对水土流失防治具有重要影响。本研究以三峡库区的忠县耕地埂坎为研究对象,兼顾宏观分布统计与微观参数提取,构建“宏观识别-微观提取”多尺度耕地埂坎识别与参数提取方法体系。在县域尺度,基于卫星遥感影像构建埂坎空间数据库,获取分布特征与类型结构。在小流域尺度,以无人机影像和传统测量为主要数据源,提取埂坎几何参数并评估其提取精度与回归拟合效果。研究结果可为多源遥感协同提取耕地微地形信息提供技术支持,并为三峡库区埂坎措施优化布局与管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于三峡库区中游重庆市忠县(107°32′—108°14′E, 30°03′—30°35′N),以山地、丘陵和河谷地貌

为主,整体呈“三山两槽”格局,坡度 $3^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 。该区域属亚热带湿润季风气候,年均气温 18.2°C ,年降水量 $1\,172\text{ mm}$,集中于5—9月。土壤类型以水稻土和紫色土为主,占全县土壤类型的88%左右,广泛分布于海拔 600 m 以下的丘陵平坝区。研究区内曾实施过坡改梯、保土耕作、退耕还林(草)等坡耕地治理工程,埂坎是坡耕地主要的水土保持措施之一。区域内埂坎分布广泛,有埂坎的耕地占忠县耕地的80.3%。土地利用类型主要为坡耕地、水田和林地,农作物以水稻(*Oryza sativa*)、玉米(*Zea mays*)、小麦(*Triticum aestivum*)和红薯(*Ipomoea batatas*)为主。小流域样地位于忠县东北部石宝镇虾子岭($30^{\circ}25'\text{N}$, $108^{\circ}10'\text{E}$),邻近中国科学院成都山地所忠县试验站,面积约 0.80 km^2 ,地表绝对高程约为 $165\sim 260\text{ m}$,地貌为深丘、浅丘夹山脉。区域土地利用类型及作物种植结构与全县一致,具有典型的坡耕地景观特征(图1)。

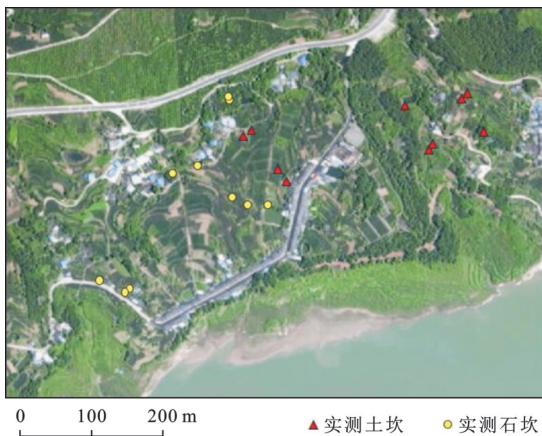


图1 研究区耕地埂坎分布

Fig.1 Distribution of farmland bunds at study area

1.2 埂坎多源数据获取

选取三峡库区忠县县域和小流域2个尺度,采用多源数据提取忠县耕地埂坎信息。其中,卫星影像采用2024年Google Earth(GE)数据(分辨率 0.595 m , RGB三波段),经预处理后生成研究区完整影像^[12],用于忠县埂坎分布信息的宏观提取。DEM数据为ASTER-GDEM V003数据集(数据来源:<https://earthdata.nasa.gov/>,分辨率 30 m),用于提取研究区的高程、坡度等参数,辅助分析埂坎空间分布特征。小流域尺度数据于2023年6月使用大疆P4 Multispectral无人机获取,具备厘米级分辨率与航高可控等优点,在布设像控点并完成航测控制后,用于流域尺度埂坎的精细分割与几何参数的提取。几何参数样本选取裸土或植被覆盖较少的典型埂坎,以降低植被对估算精度的影响。实测虾子岭小流域全部

埂坎数量与面积。选取石坎与土坎各10条,实测其几何参数。

1.3 多尺度影像下埂坎解译标志建立

以石坎与土坎2个类型为研究对象,构建卫星遥感影像与无人机影像的多尺度解译标志体系,解译特征包括形状、大小、颜色、纹理、图案、位置和布局6个方面^[13](表1)。卫星影像下,土坎与石坎均呈不规则长条状,两者多分布于耕地交界或田边道路旁。土坎长度与埂面宽大,颜色偏深色,表面纹理粗糙,伴有不规则块状体;石坎则呈白色,纹理平滑,无明显附着物,空间分布较连续。无人机影像显示埂坎细化特征,土坎呈带弧度的不规则长条形,颜色呈深褐色(生物埂区域偏绿),表面起伏明显,长度与宽度均大于石坎;石坎呈规则直条状,白色,表面平整。上述特征作为不同空间尺度下解译标志的判别依据,用于后续影像识别与分析。

1.4 埂坎参数提取方法与分析

1.4.1 县域尺度埂坎提取

采用人工目视解译提取忠县耕地埂坎。以乡镇为单位,对研究区影像进行分块处理,在ArcGIS平台矢量化埂坎线状特征,生成埂坎分布数据库,通过解译人员交叉复核与样本比对进行质量控制。随后导出矢量化埂坎图层,在Excel中统计数量与面积,获取全县的埂坎规模及分布特征。

1.4.2 埂坎几何参数提取

结合数字正射影像图(DOM)与数字地表模型(DSM),基于ArcGIS平台对预处理后的无人机影像进行空间分析^[14],提取埂坎的几何参数(图2)。依据解译标志绘制埂坎线文件,统一坐标系后,在属性表添加并计算长度字段,提取各埂坎的长度;埂宽采用垂直测量法,在埂面两端及中部(或明显转折处)分别绘制垂直于埂长方向的短线,建立埂宽线文件并计算各线段长度,取三段均值作为埂宽值;埂坎高度在DOM上的埂面及相邻田面选取对应的高程点,利用“值提取到点”工具从DSM中获取高程数据,计算埂坎顶部与田面之间的高程差得到埂坎高度。在每条埂坎上均匀选取3个测量点,取其平均值作为该埂坎的最终高度值。埂坎系数为埂坎面积与所属耕地斑块面积之比,用于衡量坡耕地水土保持配置密度。所有参数重复测量3次。



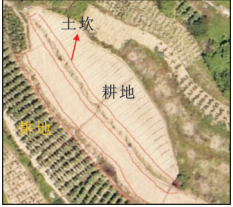
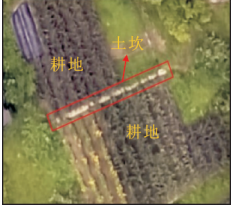
在获取长度与宽度数据的基础上,进一步估算每条埂坎的占地面积,计算公式如下:

$$S = a \times b \quad (1)$$

式中: S 为埂坎面积(m^2); a 为埂坎长度(m); b 为埂坎宽度(m)。

表 1 不同尺度遥感影像中石坎与土坎的典型解译特征

Table 1 Typical interpretation features of stone bunds and soil bunds in remote sensing images at different scales

尺度类型	埂坎类型	形状特征	大小与颜色	纹理特征与图案	位置和布局	解译图像
GE 卫星遥感影像	土坎	不规则长条形	面积较大,长度较长,呈深色	表面粗糙,附有块状体	位于两块耕地之间,少数位于耕地和道路之间	 土坎卫星解译图像
	石坎	不规则长条形	较短较窄,呈白色	表面平滑,附着物较少	位于两块耕地之间,少数位于耕地和道路之间	 石坎卫星解译图像
无人机影像	土坎	不规则长条形	长度和宽度均大于石坎,呈深褐色(生物埂呈绿褐)	表面粗糙,起伏明显	位于两块耕地之间,少数位于耕地和道路之间	 土坎无人机解译图像
	石坎	较规则直条形	相对较小,呈白色	表面平滑且均一	位于两块耕地之间,少数位于耕地和道路之间	 石坎无人机解译图像

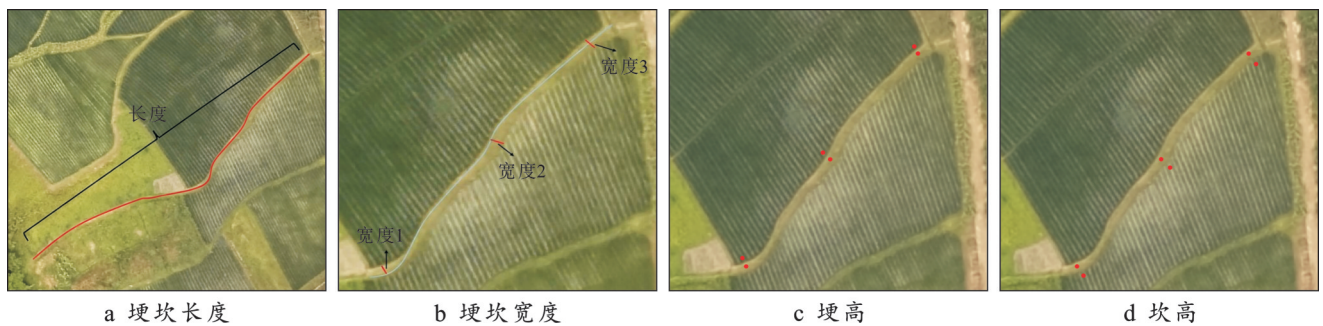


图 2 埂坎形态参数提取示意图
Fig.2 Schematic diagrams of geometric parameter extraction of farmland bunds

1.4.3 提取精度验证

以人工实测数据为对照,分别对卫星遥感与无人机影像提取的埂坎数据进行精度验证。验证埂坎参数(埂长、埂宽、坎高、埂坎系数)、数量及面积的精度,采用偏离度(DE)反映提取值与实测值的偏差程度,并利用决定系数(R^2)和均方根误差(RMSE)评价

线性模型的拟合优度。各指标计算公式如下:

$$DE = \frac{|y_e - y_m|}{y_m} \times 100\% \quad (2)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_m - y_e)^2}{\sum_{i=1}^n (y_m - y_i)^2} \quad (3)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_e - y_m)^2}{n}} \quad (4)$$

式中: y_e 为影像提取值; y_m 为实测值; y_i 为样本均值; n 为样本数。

1.4.4 景观格局指数

景观格局指数是用于描述景观的结构组成和空间配置等特征的一系列量化指标^[15]。本研究选取斑块个数、斑块密度、斑块总面积和平均最邻近距离定量描述忠县埂坎的景观格局。

1.5 数据处理与分析

采用 Bigemap GIS Office 获取卫星影像, 利用 Pix4 D Mapper 与 CloudCompare 完成影像拼接与同名像点匹配^[16], 生成拼接数字正射影像图(DOM)与数字地表模型(DSM), 以确保影像几何配准精度与地形信息的空间一致性。基于 ArcGIS 平台结合目视解译提取埂坎分布, 叠加埂坎分布图与高程、坡度、地貌等进行空间分析与参数提取。统计分析采用 Excel 和 SPSS 软件, 图表绘制使用 Origin 软件。

2 结果与分析

2.1 基于卫星影像的埂坎识别精度验证

小流域尺度下, 基于 GE 卫星影像人工目视解译共识别埂坎 96 条(表 2), 与野外实测(88 条)相比, 识别精度达 91.67%, 表明卫星遥感方法在整体覆盖识别方面效果较好, 可为县域尺度埂坎数量估计提供支撑。

将遥感识别结果与实测样本进行匹配对比, 遥感提取的埂长均方根误差为 9.85 m, 平均误差率 66.47%, 仅 19.32% 的样本误差率低于 10%, 表明卫星影像在埂长识别方面精度不高。

采用实测平均埂宽(0.4 m)对遥感提取结果进行面积估算。估算结果表明, 验证区内埂坎的遥感估算总面积为 953.997 m², 实测总面积为 1 031.521 m², 两者相差 7.5%, 面积识别精度为 92.48%。相对于埂长识别结果, 面积识别精度明显更高, 表明基于卫星遥感的面积估计方法在区域尺度下具有较好的统计可靠性。

表 2 小流域中埂坎数量、面积及埂长对比统计

Table 2 Statistical comparison of number, area and length of farmland bunds in small watersheds

获取方式	埂坎数量		埂坎面积		埂坎长度	
	测量值/条	误差/%	测量面积/m ²	误差/%	均方根误差/m	平均误差率/%
卫星遥感(试验组)	96	9.09	953.997	7.52	9.85	66.47
野外实测(对照组)	88	—	1 031.521	—	—	—

2.2 无人机影像下埂坎几何参数提取精度对比

典型埂坎几何参数提取结果(图 3, 表 3)表明, 埂长绝对偏差为 0.25~3.96 m, 且 55% 的样本偏差低于 1.0 m, 偏离度变化范围为 1.36%~11.04%, 平均偏离度为 5.00%, 表现出线性地物在二维影像识别中的强稳定性。埂坎横断面参数中, 埂宽与坎高的绝对偏差分别为 0.02~0.19 m 和 0.01~0.37 m, 样本偏差值低于 0.10 m 的占比分别为 85% 和 50%, 偏离度分别为 3.43%~46.55% 和 1.80%~65.00%, 表明埂宽提取精度较高且误差偏差较集中, 坎高提取偏差波动较大, 垂向参数解析难度高于水平参数。埂坎系数作为综合参数, 其绝对偏差为 0.11%~2.59%, 75% 的样本绝对偏差低于 1%, 偏离度变化范围为 4.22%~59.55%, 平均偏离度为 18.00%, 整体提取效果良好。

土坎参数提取精度与稳定性均优于石坎, 埂长偏离度低于 5% 的样本占比分别为 80% 和 40%, 绝对偏差分别为 0.55~2.25 m 和 0.25~3.96 m。埂宽偏离度低于 30% 的样本占比为土坎 90%、石坎 60%,

绝对偏差分别为 0.02~0.19 m 和 0.03~0.10 m。坎高提取中, 土坎坎高偏离度小于 30% 的样本占比为 70%, 亦优于石坎(50%)。埂坎系数绝对偏差小于 1% 的样本占比分别为土坎 80%, 石坎 70%。整体上, 埂长、埂宽、坎高及埂坎系数的绝对偏差分别小于 2 m, 0.1 m, 0.3 m 和 2%, 提取精度排序为: 埂长>埂宽>坎高>埂坎系数。

2.3 无人机影像下埂坎参数反演模型及误差评估

基于无人机影像构建的埂坎几何参数反演模型模拟结果与实测数据之间均呈较高的线性相关性(图 4)。其中, 埂长反演精度最优, 石坎与土坎的 R^2 分别为 0.971 和 0.983, 且表现出强相关性, 土坎的 RMSE 为 0.221 m, 较石坎低 74.7%, 表明其识别误差更小。石坎埂宽的 R^2 为 0.885, 高于土坎(0.663), RMSE 为 0.046 m, 小于土坎(0.119 m), 表明石坎拟合精度更高, 误差更低, 这可能源于其边缘清晰且材质反差明显, 更利于人工判读。坎高模型呈特殊规律, 石坎 R^2 (0.931) 大于土坎(0.784), 但石坎 RMSE

为 0.594 m,是土坎的 3.9 倍,表明石坎拟合效果更好却存在系统性偏差。埂坎系数模型差异较为明显,土

坎 R^2 和 RMSE 分别为 0.857 和 1.386 m,均优于石坎 (0.527,1.600 m),表明土坎提取模型的可靠性更高。

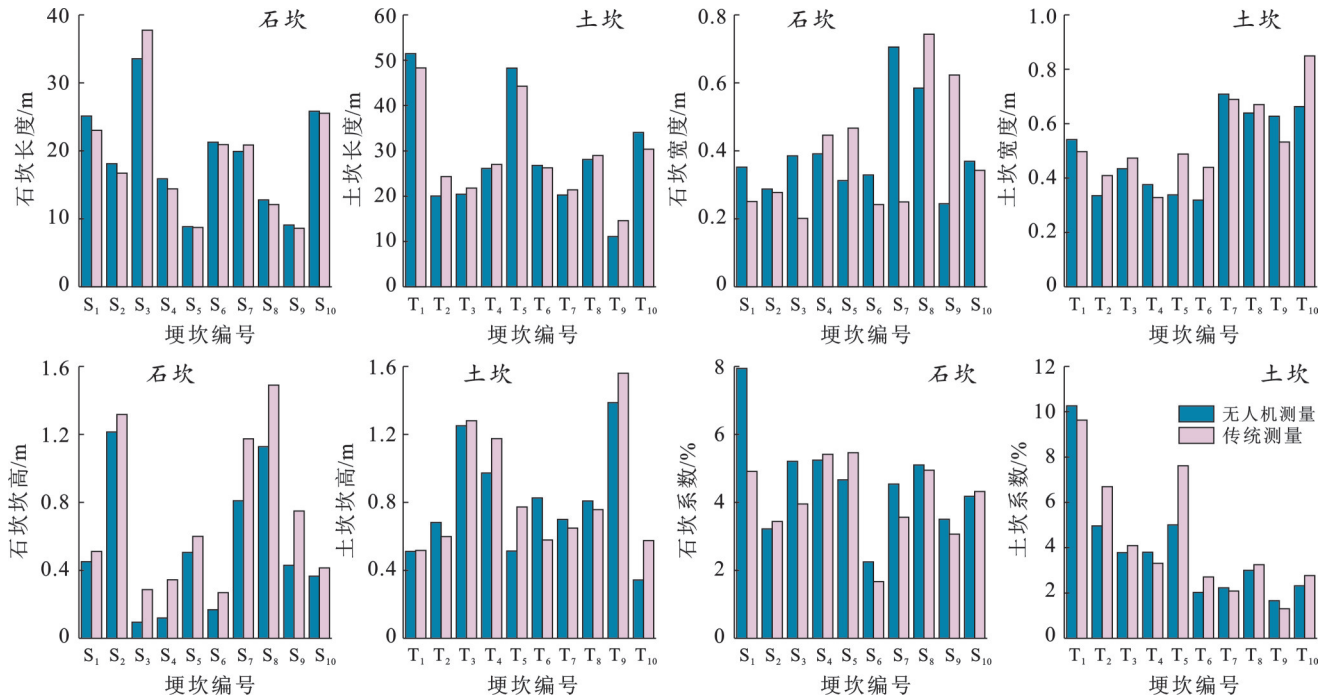


图 3 不同测量方式下典型埂坎的几何参数对比

Fig. 3 Comparison of geometric parameters of typical farmland bunds under different measurement methods

表 3 典型埂坎几何参数提取结果的偏差统计

Table 3 Deviation statistics of geometric parameter extraction results for typical farmland bunds

埂坎类型	埂坎编号	埂长偏离度/%	埂宽偏离度/%	坎高偏离度/%	埂坎系数偏离度/%
石坎	S ₁	9.92	41.51	13.77	59.99
	S ₂	7.56	12.22	7.22	5.77
	S ₃	10.42	46.55	65.00	32.92
	S ₄	11.04	13.63	62.78	4.22
	S ₅	2.65	15.65	16.07	14.05
	S ₆	1.68	31.62	33.70	34.59
	S ₇	4.55	33.73	31.09	28.79
	S ₈	6.85	4.48	23.53	2.17
	S ₉	5.92	4.89	42.11	14.79
	S ₁₀	1.36	5.91	13.26	4.83
土坎	T ₁	2.44	8.95	2.12	6.94
	T ₂	8.61	17.50	13.22	25.83
	T ₃	2.66	8.72	1.80	6.53
	T ₄	1.91	15.94	18.64	14.24
	T ₅	2.77	30.32	34.10	33.88
	T ₆	3.92	27.05	43.45	24.68
	T ₇	4.09	3.43	8.62	7.83
	T ₈	2.94	4.85	7.50	7.88
	T ₉	4.96	19.19	10.76	25.51
	T ₁₀	6.12	21.98	40.31	17.61

总体而言,无人机影像在不同类型埂坎参数反演中具有较强的适应性。石坎在埂宽与坎高的拟合度较高,土坎则在长度与埂坎系数上误差更小,反映出不同坎体材质与结构特性对反演性能的影响存在差异。

2.4 埂坎空间分布特征及地形因子响应分析

基于 GE 卫星遥感影像提取结果(图 5),埂坎以点状形式表示,因遥感解译数量庞大且制图比例尺有限,局部区域在视觉上呈现出较强的聚集感。忠县辖区内埂坎总量为 30 万余条,总面积约 8 km²,埂坎系数约 3%,整体呈现出高密度、细碎化的地物特征。埂坎类型以土坎和石坎为主,土坎的斑块面积与数量占比均超过 90%,石坎斑块面积和斑块个数占比均不足 10%,表明土坎占主导地位。景观指数分析(表 4)表明,石坎斑块密度略高但平均最邻近距离更大,分布较离散,土坎分布更聚集,斑块间距离较近且相互干扰明显。

由图 6 可知,高程梯度上,斑块面积和数量呈单峰态分布,峰值区为 300~600 m,向两侧相邻区间均呈骤减趋势;平均最邻近距离在 900~1 200 m 达到峰值,表明该高程段埂坎分布最离散,超过 1 200 m 后密度与平均最邻近距离均骤降。坡度梯度上,斑块面积、数量及密度均呈现先增后减的趋势,在 6°~15°区

间达最大值,埂坎占比超 50%,而平均最邻近距离在此区间达到最低;随坡度增加,密度递减而平均最邻近距离递增,坡度大于 25°时埂坎占比不足 1%,平均最邻近距离达最大值。将忠县按地貌划分,槽谷区埂

坎占比约 70%,埂坎斑块面积与数量均高于山岭区;山岭区埂坎占比仅 30%。由于槽谷区耕地总面积更大,埂坎密度略低于山岭区,平均最邻近距离因其分布聚集性更高而小于山岭区。

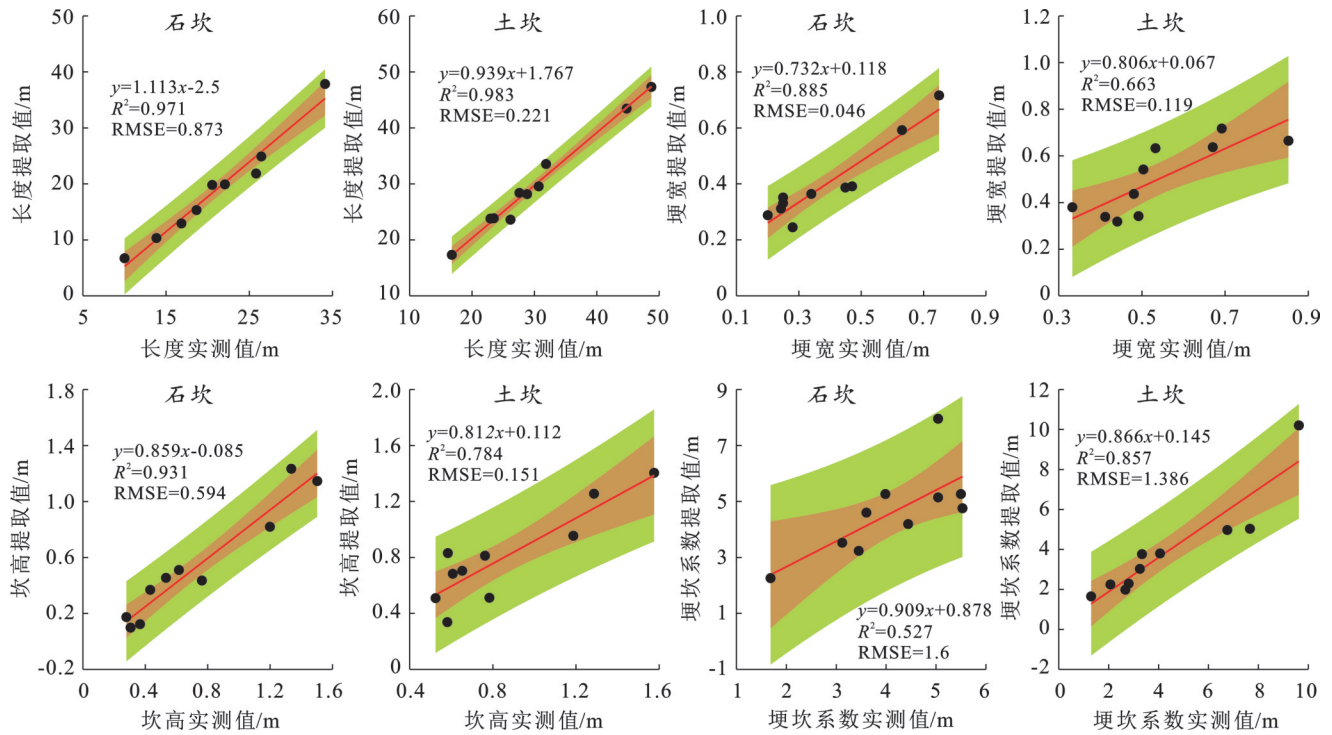
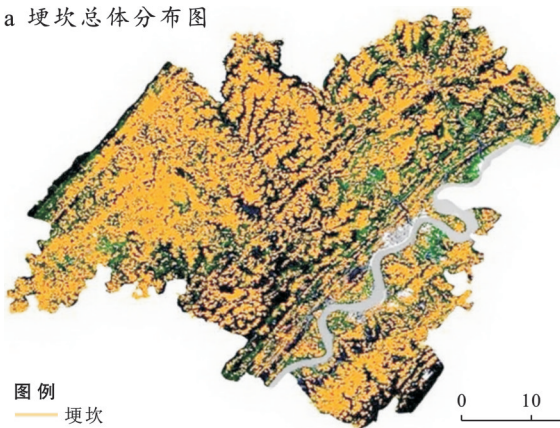


图 4 典型埂坎几何参数提取精度验证

Fig.4 Accuracy verification of geometric parameter extraction for typical farmland bunds

a 埂坎总体分布图



b 土坎与石坎分布图

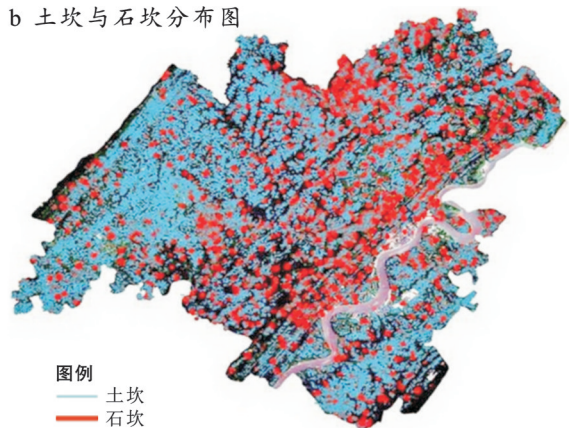


图 5 忠县埂坎分布特征

Fig.5 Distribution characteristics of farmland bunds in Zhongxian County

表 4 不同埂坎类型的景观格局指数

Table 4 Landscape pattern indices of different farmland bund types

埂坎类型	景观格局指数			
	斑块面积/hm ²	斑块个数/个	斑块密度/(个·hm ⁻²)	平均最邻近距离/m
土坎	711.638	290 783	408.610	51.482
石坎	40.559	18 442	454.696	202.682

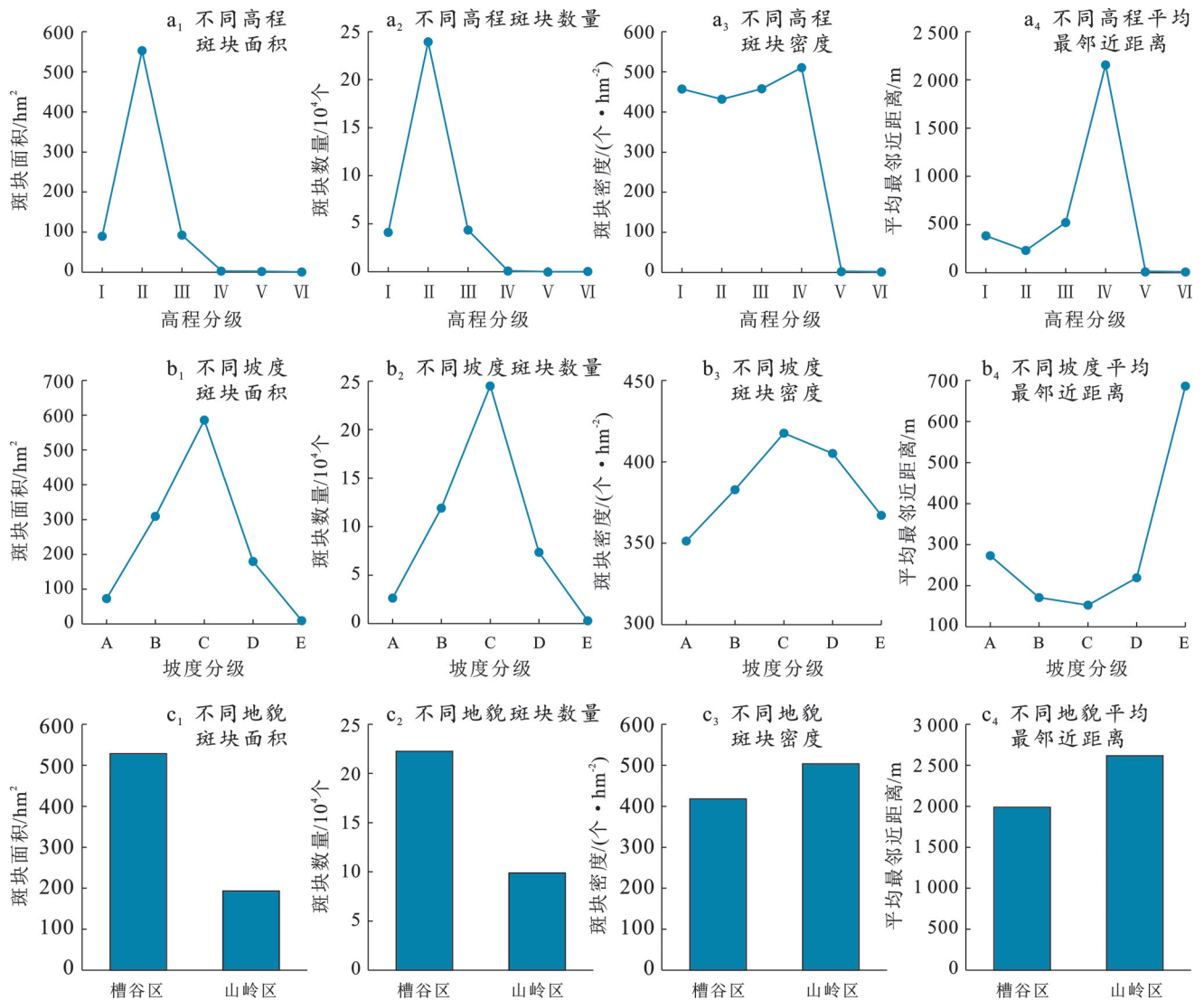
3 讨论

3.1 卫星影像与无人机影像提取埂坎的适用性及互补分析

本研究构建了基于卫星遥感与无人机影像协同应用的多尺度埂坎提取体系,兼顾区域覆盖效率与提取精度的平衡,实现“宏观识别-微观测量”的结构融合。研究表明,GE 卫星影像在宏观尺度上的识别

精度可达 91%, 明显优于张海冬等^[17]基于 GF-1 号影像所获取的 80%。此外, 通过构建 RGB 波段解译标志可有效区分土坎与石坎, 初步实现了埂坎类型分级识别。然而, 卫星影像在实际应用中仍存在一定局限。一方面, 识别效果易受光照条件和植被覆盖干扰, 尤其在作物旺盛生长期, 植被会遮蔽埂坎线性特征, 降低识别精度。本研究使用裸土期影像, 埂坎边界相对清晰, 因此解译特征主要针对无植被覆盖时期。由于不同地区植被覆盖差异显著, 因此结合时间序列影像选取作物枯黄期或翻耕期数据, 并利

用植被指数(如 NDVI)剔除高覆盖像元。同时, 引入多光谱或雷达影像提取地表结构信息, 融合纹理特征构建多源特征空间, 从而增强埂坎识别在复杂植被背景下的稳定性与适用性。另一方面, GE 影像受限于分辨率在破碎化区域易误判埂坎边界, 即便是 WorldView-3(0.31 m)等商业卫星^[18]也仅接近埂宽可判读下限, 难以满足微尺度特征的精确提取, 需依赖经验均值^[2](如埂宽 0.4 m)估算面积。相较而言, 无人机影像具备厘米级分辨率、获取灵活与航高可控等优势, 可有效弥补卫星遥感在微观尺度的不足。



注: ①高程划分为6级, 分别为 I 级(102~300 m)、II 级(>300~600 m)、III 级(>600~900 m)、IV 级(>900~1 200 m)、V 级(>1 200~1 500 m)和 VI 级(>1 500~1 621 m)。②依据《土地利用现状调查技术规程(1984)》将耕地坡度划分为5级, 分别为 A 级($S \leq 2^\circ$)、B 级($2^\circ < S \leq 6^\circ$)、C 级($6^\circ < S \leq 15^\circ$)、D 级($15^\circ < S \leq 25^\circ$)和 E 级($S > 25^\circ$)。

图 6 忠县不同地形因子下埂坎景观指数变化趋势

Fig.6 Variation trends of landscape indices of farmland bunds under terrain factors in Zhongxian County

本研究采用低空航测(<100 m)方式, 相较于王美琪等^[19]提出的 120 m 航高模式, 在影像分辨率与地物细节表达方面更具优势。通过融合 DOM 与 DSM

数据、结合多视角影像匹配与高密度控制点布设, 实现了埂坎的二维与三维信息协同提取, 埂宽提取偏差度可控制在 0.1 m 以内, 整体提取效果明显优于单

一遥感方法,满足生态修复与农业工程设计需求,这与李镇等^[20]基于QuickBird影像提取切沟沟长的偏差结果基本一致。可见,卫星遥感适用于县域尺度的大范围快速识别,无人机影像更适合小流域或复杂地形的高精度提取,二者在适用尺度上互为补充。本研究构建的多尺度协同提取体系在三峡库区坡耕地中具有良好的适用性,可实现埂坎的高精度识别与几何参数获取,为区域坡耕地整治与水土保持规划提供科学支撑。

3.2 无人机影像提取埂坎几何参数精度的差异分析

研究表明,无人机航测在埂坎参数提取中具备良好的适用性与较高精度^[21],不同参数间存在提取精度差异,呈现出:水平参数>综合参数>垂向参数的梯度。其中,埂长的平均偏离度(DE)最低(5%),其次为埂宽(18%)、埂坎系数(18%)和坎高(24%)。埂长作为典型的线性水平参数,受益于二维线状地物提取算法的成熟,具备较高的提取精度,误差主要源于地形起伏引起的路径投影偏差^[22]。埂宽虽属于水平参数,但其提取结果对边缘识别精度和三维模型的依赖较大,整体精度普遍低于埂长。坎高是典型的垂向参数,其获取需于埂坎顶部与底部同步设置标志点,并结合DSM插值推算垂直高差^[23],整个过程易受水平偏移与垂向不确定性影响。埂坎系数的误差叠加了埂长与埂宽的估算偏差,对数据提取稳定性依赖更高。值得注意的是,随着几何参数数值增大,提取精度也相应提升,说明无人机在解析大尺度坎体时稳定性更强。对于坎体类型而言,土坎几何参数的提取精度整体优于石坎,尤其在埂长和坎高两个维度表现较为突出,其原因可能是土坎虽形态不规则,但整体结构连续性强,色调区分度高且纹理过渡平缓,有利于边缘分割与提取。夏晨真等^[24]亦指出,结构连续、纹理稳定的线状地物识别精度更高,这与本研究结果一致。而石坎边界虽较为规则,但受石块堆砌导致的高反差与阴影干扰,影响边缘识别效果和三维建模稳定性。赵春敬等^[25]在关于侵蚀沟提取的研究中亦发现,无人机航测对线性和面状参数提取效果优于垂向参数,进一步支持本研究结果。

3.3 地形因子对忠县埂坎空间分布格局的影响

忠县埂坎的空间分布受高程、坡度与地貌单元等因子共同影响,呈现高程集中、坡度分异与地貌分区的空间格局。从高程分布看,超70%的埂坎集中于300~600 m,该区域地形相对平缓、耕地集中且人为活动频繁,广泛修筑埂坎用于稳定坡耕地生产与延缓耕地退化。900 m以上耕地开发受限,埂坎

斑块密度降低且分布离散。坡度特征显示,埂坎密度随坡度增大呈单峰分布,在6°~15°达到峰值,该坡段有利于削减坡面径流与截留泥沙,同时兼顾农业开发与水土保持工程配置。坡度超过25°时,因地形陡峭、机械化作业困难及退耕还林等政策限制,导致耕地及埂坎数量锐减^[25],空间分布疏散,削弱了坡面水土保持的整体连续性。地貌单元加剧了埂坎分布的空间异质性,槽谷区地势平缓、耕作条件优越且人口密集^[26],形成埂坎斑块面积大且集中的典型高密度耕地带,对削弱坡面汇流、保障耕地连片利用具有积极作用。山岭区地形陡峭,侵蚀风险高,埂坎斑块破碎且空间连通性弱,呈现出“破碎高密度”的典型山地分布模式。埂坎优化配置应以地形坡度为主控因子,结合地貌差异实施分区设计。中缓坡区保持埂坎结构连续,削减径流和泥沙汇集。陡坡区需强化坎体稳固性与排水导流,预防滑移与侵蚀。槽谷区宜推广土坎或生物埂以提升蓄水功能,山岭区宜采用石坎或复合结构增强抗冲与稳定性。埂坎走向宜沿等高线布设,局部可顺坡微调,以兼顾拦截与排水需求。间距可根据坡度梯度与径流汇集特征适度调整,坡度越陡,间距越小;坡度越缓,间距越大^[27]。已有研究表明,三峡库区经修筑田埂实施坡改梯工程后,土埂与生物埂可减少侵蚀量94%以上^[28],显著提升坡耕地防蚀与保水能力。在类型分布方面,忠县土坎远多于石坎,这可能是土坎修筑成本低,便于维护且具备植被恢复能力与高价值生态经济。石坎材料成本高,修建技术要求高且维护难度大,导致其在区域范围内分布较稀疏,空间离散性强。因此,忠县埂坎的空间分布规律是多因子协同作用的结果,高程提供了基础框架,坡度控制修筑强度,地貌决定分布模式,三者协同作用形成当前差异化的空间格局。

4 结论

(1) 遥感影像适用于县域尺度埂坎的识别与统计,小流域验证显示埂坎数量与面积识别精度均达91%。无人机影像适用于小流域尺度埂坎参数提取,线性和面状参数提取效果优于垂向参数,提取精度排序为:埂长>埂宽>坎高>埂坎系数。

(2) 忠县埂坎集中于300~600 m高程和6°~15°坡度,数量随高程和坡度增大呈“先增后减”趋势。土坎分布广且连续性强,石坎数量较少且分布离散。槽谷区埂坎分布密集,宜推广土坎以增强蓄水与涵养功能。山岭区埂坎分布破碎,宜采用石坎或复合结构,提升坡面水土保持的整体效能。

参考文献(References)

- [1] Jiru E B, Wegari H T. Soil and water conservation practice effects on soil physicochemical properties and crop yield in Ethiopia: Review and synthesis [J]. Ecological Processes, 2022, 11(1): 21.
- [2] Demissie S, Meshesha D T, Adgo E, et al. Effects of soil bund spacing on runoff, soil loss, and soil water content in the Lake Tana basin of Ethiopia [J]. Agricultural Water Management, 2022, 274: 107926.
- [3] 田培, 任益伶, 陈妍. 水土保持措施识别与提取方法的研究进展[J]. 水土保持学报, 2024, 38(5): 1-9.
Tian Pei, Ren Yiling, Chen Yan. Research progress on identification and extraction methods of soil and water conservation measures [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(5): 1-9.
- [4] 张庆圆, 邹彦龙, 李金衡. 三维激光扫描技术在自然文物侵蚀剥落监测中的应用研究[J]. 测绘通报, 2023(4): 140-144.
Zhang Qingyuan, Zou Yanlong, Li Jinheng. Application of 3D laser scanning technology in monitoring erosion and spalling of natural relics [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2023(4): 140-144.
- [5] 张慧, 朱文泉, 史培军, 等. 青藏高原植被遥感精细识别方法研究[J]. 地理学报, 2025, 80(1): 12-27.
Zhang Hui, Zhu Wenquan, Shi Peijun, et al. Study on fine identification method of vegetation in the Qinghai-Xizang Plateau based on remote sensing [J]. Acta Geographica Sinica, 2025, 80(1): 12-27.
- [6] 常虎, 左平. 滨海湿地互花米草无人机遥感监测研究进展[J]. 遥感学报, 2025, 29(5): 1074-1088.
Chang Hu, Zuo Ping. Review of research on *Spartina alterniflora* in coastal wetlands based on Unmanned Aerial Vehicle (UAV) [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2025, 29(5): 1074-1088.
- [7] 李梦华, 石云, 马永强, 等. 基于面向对象的黄土丘陵沟壑区梯田信息提取研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2019, 42(5): 50-54.
Li Menghua, Shi Yun, Ma Yongqiang, et al. Terrace information extraction in loess hilly-gully region landscape based on object-oriented classification method [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2019, 42(5): 50-54.
- [8] Kou Ruixiong, Yang Bisheng, Dong Zhen, et al. Mapping the spatio-temporal visibility of global navigation satellites in the urban road areas based on panoramic imagery [J]. International Journal of Digital Earth, 2021, 14(7): 807-820.
- [9] Chen Yaoliang, Xu Zhiying, Xu Hongfeng, et al. Mapping crop types and cropping patterns using multiple source satellite datasets in subtropical hilly and mountainous region of China [J]. Remote Sensing, 2025, 17(13): 2282.
- [10] 王佳玥, 蔡志文, 王文静, 等. 协同多源国产高分影像和面向对象方法的南方农作物遥感识别[J]. 中国农业科学, 2023, 56(13): 2474-2490.
Wang Jiayue, Cai Zhiwen, Wang Wenjing, et al. Integrating multi-source Gaofen images and object-based methods for crop type identification in South China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2023, 56(13): 2474-2490.
- [11] 文安邦, 齐永青, 汪阳春, 等. 三峡地区侵蚀泥沙的¹³⁷Cs法研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(2): 33-36.
Wen Anbang, Qi Yongqing, Wang Yangchun, et al. Study on erosion and sedimentation in Yangtze three gorge region [J]. Journal of Soil Water Conservation, 2005, 19(2): 33-36.
- [12] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2013.
Zhao Yingshi. Principles and methods of remote sensing application analysis [M]. 2nd Ed. Beijing: Science Press, 2013.
- [13] 尹滔, 宋元宝, 张伟, 等. 高分辨率遥感技术在川西毛垭坝地区活动断裂研究中的应用[J]. 自然资源遥感, 2024, 36(3): 174-186.
Yin Tao, Song Yuanbao, Zhang Wei, et al. Application of high-resolution remote sensing technology to research into active faults in the Maoyaba area, western Sichuan Province [J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2024, 36(3): 174-186.
- [14] 杨利民, 孙铁军, 刘专, 等. 面向多对象的耕地田坎系数测算方法探讨[J]. 测绘科学, 2009, 34(5): 36-38.
Yang Limin, Sun Tiejun, Liu Zhuan, et al. The discussion of calculation method based on multi-object oriented cropland ridge coefficient [J]. Science of Surveying and Mapping, 2009, 34(5): 36-38.
- [15] 薛春璐, 郭琳, 胡华浪, 等. 农地确权成果在耕地景观格局分析中的应用[J]. 农业工程学报, 2016, 32(20): 242-249.
Xue Chunlu, Guo Lin, Hu Hualang, et al. Application of landscape pattern analysis in arable land based on right to rural land contractual management registration [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(20): 242-249.
- [16] 许志华, 崔希民, 杨可明, 等. “数字摄影测量”课程教育思考与基础实习方法探索[J]. 测绘通报, 2019(4): 143-147.
Xu Zhihua, Cui Ximin, Yang Kemin, et al. Thinking about curriculum teaching of Digital Photogrammetry and exploration of the basic practice method [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019(4): 143-147.

- [17] 张海东,田婷,张青,等.基于GF-1影像的耕地地块破碎区水稻遥感提取[J].遥感技术与应用,2019,34(4):785-792.
Zhang Haidong, Tian Ting, Zhang Qing, et al. Study on extraction of paddy rice planting area in low fragmented regions based on GF-1 WFV images [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2019, 34(4):785-792.
- [18] 王楠,汪桂生,郭伟玲.安徽省淮南市城市湿地景观格局及其脆弱性:以大通废弃矿生态湿地修复区为例[J].水土保持通报,2020,40(6):168-174.
Wang Nan, Wang Guisheng, Guo Weiling. Landscape pattern and its vulnerability of urban wetland at Huainan County, Anhui Province: A case study at Datong abandoned mine ecological wetland restoration area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(6):168-174.
- [19] 王美琪,杨建英,孙永康,等.废弃矿山植被覆盖度无人机遥感快速提取技术[J].中国水土保持科学,2020,18(2):130-139.
Wang Meiqi, Yang Jianying, Sun Yongkang, et al. Remote sensing rapid extraction technology for abandoned mine vegetation coverage via UAV [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2020, 18(2):130-139.
- [20] 李镇,张岩,杨松,等.QuickBird影像目视解译法提取切沟形态参数的精度分析[J].农业工程学报,2014,30(20):179-186.
Li Zhen, Zhang Yan, Yang Song, et al. Error assessment of extracting morphological parameters of bank gullies by manual visual interpretation based on Quick-Bird imagery [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(20):179-186.
- [21] Capolupo A, Kooistra L, Boccia L. A novel approach for detecting agricultural terraced landscapes from historical and contemporaneous photogrammetric aerial photos [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2018, 73:800-810.
- [22] 潘影,张燕杰,武俊喜,等.基于遥感和无人机数据的草地NDVI影响因子多尺度分析[J].草地学报,2019,27(6):1766-1773.
Pan Ying, Zhang Yanjie, Wu Junxi, et al. Multi-scales analysis of the impacting factors of grassland NDVI based on remote sensing and unmanned aerial vehicle data [J]. Acta Agrestia Sinica, 2019, 27(6):1766-1773.
- [23] Hao Zhenbang, Lin Lili, Post C J, et al. Automated tree-crown and height detection in a young forest plantation using mask region-based convolutional neural network (Mask R-CNN) [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2021, 178:112-123.
- [24] 夏晨真,张月.基于厘米级无人机影像的水土保持措施精准识别[J].水土保持学报,2020,34(5):111-118.
Xia Chenzhen, Zhang Yue. Accurate identification of soil and water conservation measures based on centimeter-resolution UAV images [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(5):111-118.
- [25] 赵春敬,焦菊英,税军锋,等.西藏中南部侵蚀沟形态无人机航测与传统地面测量的对比分析[J].水土保持通报,2019,39(5):120-127.
Zhao Chunjing, Jiao Juying, Shui Junfeng, et al. Comparative analysis on morphological characteristics of erosion gullies measured by an unmanned aerial vehicle and traditional ground survey in south central Tibet [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(5):120-127.
- [26] 张星山,杨恒,马雯秋,等.基于景观格局的丘陵山区耕地生态风险评价:以重庆市潼南区为例[J].智慧农业(中英文),2024(3):58-68.
Zhang Xingshan, Yang Heng, Ma Wenqiu, et al. Ecological risk assessment of cultivated land based on landscape pattern: A case study of Tongnan District, Chongqing [J]. Smart Agriculture, 2024(3):58-68.
- [27] 张彩云,蒋勇军,马丽娜,等.岩溶槽谷区不同土地利用方式下的坡地产流产沙规律[J].水土保持通报,2021,41(1):49-55.
Zhang Caiyun, Jiang Yongjun, Ma Lina, et al. Characteristics of runoff and sediment on slope land with different land use in Karst trough valley area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(1):49-55.
- [28] 任加国,范坤,陈清,等.田埂在农业面源污染治理中的应用现状与展望[J].环境工程技术学报,2023,13(1):262-269.
Ren Jianguo, Fan Kun, Chen Qing, et al. Application status and prospect of field ridge in agricultural non-point source pollution treatment [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, 13(1):262-269.