

# 西南高山峡谷区坡耕地水土流失图斑 识别及宜治理性评价

——以四川省美姑县为例

王娟<sup>1,2</sup>, 史燕东<sup>1,2</sup>, 赵辉<sup>3</sup>, 金平伟<sup>1,2</sup>, 黄婷婷<sup>3</sup>, 刘晓林<sup>1,2</sup>, 黄俊<sup>1,2</sup>

(1. 珠江水利委员会珠江流域水土保持监测中心站, 广东 广州 510611;

2. 珠江水利委员会珠江水利科学研究所, 广东 广州 510611; 3. 水利部水土保持监测中心, 北京 100053)

**摘要:** [目的] 开展西南高山峡谷区坡耕地水土流失图斑识别及宜治理评价研究, 为区域坡耕地水土流失治理的任务分解、规划制定与工程布局提供科学数据支撑和决策依据。[方法] 以西南高山峡谷区坡耕地水土流失严重典型区域美姑县为例, 结合遥感监测技术, 建立复杂地形条件下区域坡耕地水土流失图斑识别方法, 并从坡耕地水土流失图斑的自然适宜性和区位适宜性两个维度, 开展坡耕地水土流失治理适宜性评价。[结果] ①美姑县坡耕地水土流失面积占坡耕地面积的 88.96%, 该县 15°以上坡耕地上的水土流失比例均高于 95%; ②美姑县高强度侵蚀问题相对突出, 强烈及以上高强度侵蚀占耕地水土流失总面积的 38.11%, 主要集中在 15°以上区域; ③研究区共获取  $2.10 \times 10^4$  个坡耕地水土流失图斑, 57.53% 的坡耕地水土流失图斑高强度侵蚀所占比例高于 50%, 是坡耕地治理重点关注对象; ④研究区高适宜、中适宜、低适宜和不适宜治理坡耕地水土流失图斑面积比例分别为 19.72%, 66.36%, 13.50% 和 0.42%, 其中高适宜治理坡耕地水土流失图斑平均坡度小于 20°, 侵蚀强度以轻度为主, 是易实现“减量, 降级”目标的优先治理区域。[结论] 掌握研究区坡耕地水土流失严重典型区的空间分布特征并分析确定了可优先治理的区域, 中适宜及以上治理图斑面积占比 86.08%, 表明该区域治理潜力总体较大。

**关键词:** 坡耕地; 水土流失图斑; 宜治理评价; 西南高山峡谷区

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2026)01-0172-09

中图分类号: S157.1

**文献参数:** 王娟, 史燕东, 赵辉, 等. 西南高山峡谷区坡耕地水土流失图斑识别及宜治理性评价[J]. 水土保持通报, 2026, 46(1): 172-180. Wang Juan, Shi Yandong, Zhao Hui, et al. Soil erosion mapping patches identification and conservation suitability evaluation of sloping farmland in high mountain and canyon region of southwest China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(1): 172-180.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.01.033

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.01.033

## Soil erosion mapping patches identification and conservation suitability evaluation of sloping farmland in high mountain and canyon region of southwest China

—A case study of Meigu County in Sichuan Province

Wang Juan<sup>1,2</sup>, Shi Yandong<sup>1,2</sup>, Zhao Hui<sup>3</sup>, Jin Pingwei<sup>1,2</sup>, Huang Tingting<sup>3</sup>, Liu Xiaolin<sup>1,2</sup>, Huang Jun<sup>1,2</sup>

(1. Soil and Water Conservation Monitoring Center of Pearl River Basin, Pearl River Water Resources

Commission of the Ministry of Water Resources, Guangzhou, Guangdong 510611, China; 2. Pearl River Water Resources

Research Institute, Pearl River Water Resources Commission of the Ministry of Water Resources, Guangzhou, Guangdong

510611, China; 3. Monitoring Center of Soil and Water Conservation, Ministry of Water Resources, Beijing 100053, China)

**Abstract:** [Objective] Soil erosion patches on sloping farmland in the high mountain and canyon region of

收稿日期: 2025-08-22

修回日期: 2025-10-15

采用日期: 2025-10-20

资助项目: 国家重点研发计划项目“西南高山峡谷区土壤侵蚀预报优化与智慧监测体系”(2022YFF1302902); 长江水利委员会长江科学院开放研究基金项目(CKWV2016389/KY)

第一作者: 王娟(1992—), 女(汉族), 河南省沈丘县人, 博士, 高级工程师, 主要从事遥感和地理信息系统在水土流失监测方面的应用研究。E-mail: wangjuan6231@163.com。

通信作者: 赵辉(1971—), 男(汉族), 湖南省衡阳市人, 博士, 正高级工程师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持监测技术方面的研究。Email: 7166zhaohui@163.com。

southwest China were mapped, and their conservation suitability was evaluated in order to provide scientific data support and a decision-making basis for task decomposition, planning formulation, and engineering layout of soil erosion control in this region. [Methods] Taking Meigu County, a typical area with severe soil erosion on sloping farmland in the high mountain and canyon region of southwest China, as an example, a method to identify soil erosion patches under complex topographic conditions was established based on remote sensing monitoring. The conservation suitability of these patches was evaluated from two dimensions: natural suitability and locational suitability. [Results] ① In Meigu County, the soil erosion area on sloping farmland accounted for 88.96% of the total sloping farmland area. On slopes steeper than 15°, the proportion of soil erosion exceeded 95%. ② High-intensity erosion was prominent, accounting for 38.11% of the total soil erosion area on sloping farmland, and was mainly concentrated on slopes steeper than 15°. ③ A total of  $2.10 \times 10^4$  soil erosion patches on sloping farmland were identified. Among these, 57.53% had a high-intensity erosion proportion exceeding 50%, making them key targets for conservation. ④ The area proportions of soil erosion patches classified as highly suitable, moderately suitable, lowly suitable, and unsuitable for treatment were 19.72%, 66.36%, 13.50%, and 0.42%, respectively. The highly suitable patches were primarily distributed on slopes below 20° and were characterized by mild erosion intensity, making them priority areas for achieving the goals of ‘reducing erosion area and downgrading erosion intensity’. [Conclusion] The spatial distribution characteristics of typical severe soil erosion areas on sloping farmland are clarified, and priority areas for conservation are identified. The area proportion of patches with moderate suitability or higher reaches 86.08%, indicating considerable overall potential for soil and water conservation in the region.

**Keywords: sloping farmland; soil erosion mapping patches; conservation suitability evaluation; high mountain and canyon region of southwest China**

土壤侵蚀具有类型复杂,分布广泛,侵蚀强度大等特点<sup>[1-2]</sup>。它作为世界上最严重的生态环境灾害之一<sup>[3]</sup>,已成为全球可持续发展进程中面临的突出挑战。土壤侵蚀不仅直接导致土地退化,耕地资源损失,还会引发泥沙淤积,水质恶化等连锁生态问题,治理难度大,生态恢复周期长。在农业方面,其危害表现为作物产量的短期下降,以及土壤肥力、结构和生产力的长期衰退<sup>[4-5]</sup>,严重制约农业可持续发展和区域经济稳定。近年来,中国依托水土流失动态监测网络,逐步实现对水土流失状况的系统化、常态化掌握。监测数据显示,6°以上坡耕地是中国高强度水力侵蚀分布最为集中的地类,强烈及以上水蚀面积比例超过60%,这类高风险坡耕地主要集中于地形起伏大、降雨条件特殊的云、贵、川、鄂、渝5省(市),水土流失敏感性高,治理需求迫切,成为当前中国水土流失实现“减量,降级”目标的关键区域。

西南高山峡谷区地处中国大横断地带,是中国生态安全屏障体系的重要组成部分,同时也是生态脆弱性突出的典型区域<sup>[6]</sup>。该区以高山峡谷地貌为主,受特殊地形构造、地质条件与气候因素共同影响,面临土壤侵蚀和石漠化等土地退化问题的严峻挑战<sup>[6]</sup>。其中,川西南高山峡谷保土减灾区作为坡耕地土壤侵蚀治理的重点区域,由于特殊的自然地理条件和水土流失客观实际,存在大量不宜治理或治

理潜力较低的区域。目前,该区域的土壤侵蚀研究相对较少,在区域尺度主要采用中国土壤侵蚀模型(Chinese soil loss equation, CSLE)开展<sup>[7-8]</sup>,导致坡耕地水土流失空间位置定位难度大,且存在侵蚀强度分布边界不清问题,难以满足坡耕地水土流失治理任务的分解和落实,对坡耕地水土保持精准治理的工作带来了一定困难。在微观尺度,研究多集中于区内典型小流域或坡面尺度的侵蚀特征与影响因素分析<sup>[9-11]</sup>,虽有助于机理认识,却难以支撑区域的坡耕地水土流失监测与治理规划工作。因此,如何准确识别并空间定位坡耕地水土流失图斑,实现精准治理,对保障国家生态安全、粮食安全及推进生态文明建设具有重要意义<sup>[12-13]</sup>。

在水土保持领域,部分学者提出“土壤侵蚀图斑”“水保斑”“划分设计图斑”等<sup>[14-15]</sup>基础空间单元的新概念,但目前仍处于初步试验阶段,存在与水土保持综合治理工作契合度不高,针对性不强,划分方法不完善,实际应用效果欠佳等问题。自2014年以来,水利部推动水土保持“图斑化”精细管理,并于2021年进一步提出了“水土流失落地图斑”的新概念,但目前还未有相对完善的“水土流失图斑”识别方法,在实际应用中仍然面临着内部要素复杂,空间位置准确率低,高强度侵蚀区域未能准确识别或难以在区域尺度应用等问题。为此,本研究以川西南

高山峡谷保土减灾区美姑县为例,基于水土流失遥感监测结果,构建坡耕地水土流失图斑识别方法,并利用坡耕地水土流失图斑开展宜治理坡耕地水土流失图斑评价,以期为区域坡耕地水土流失治理的任务分解、规划制定与工程布局提供科学数据支撑和决策依据。

## 1 研究区概况

美姑县(102°53′—103°21′E, 28°02′—28°54′N)地处横断山脉东北缘与四川盆地西南边缘的交汇地带,位于四川省凉山彝族自治州东北部,属于典型的

高山峡谷向山原过渡区域(图1)。在地貌类型上,该县以中山山原窄谷地貌为主,整体地势呈现北高南低、东高西低的特征,山体起伏显著,河谷深切,地形破碎度高<sup>[16]</sup>。县域内水系极为发育,溪河密布,共有大小河流159条,主要分属金沙江水系和岷江水系,河流密度大,水文网络错综复杂<sup>[17]</sup>。据2023年水土流失监测统计,美姑县全域水土流失类型均为水力侵蚀,坡耕地水土流失面积占坡耕地面积的88.96%,水土流失比例高,在西南高山峡谷—川西南高山峡谷保土减灾区这一生态功能区划中,美姑县坡耕地水土流失强度与比例均居首位,具有代表性。

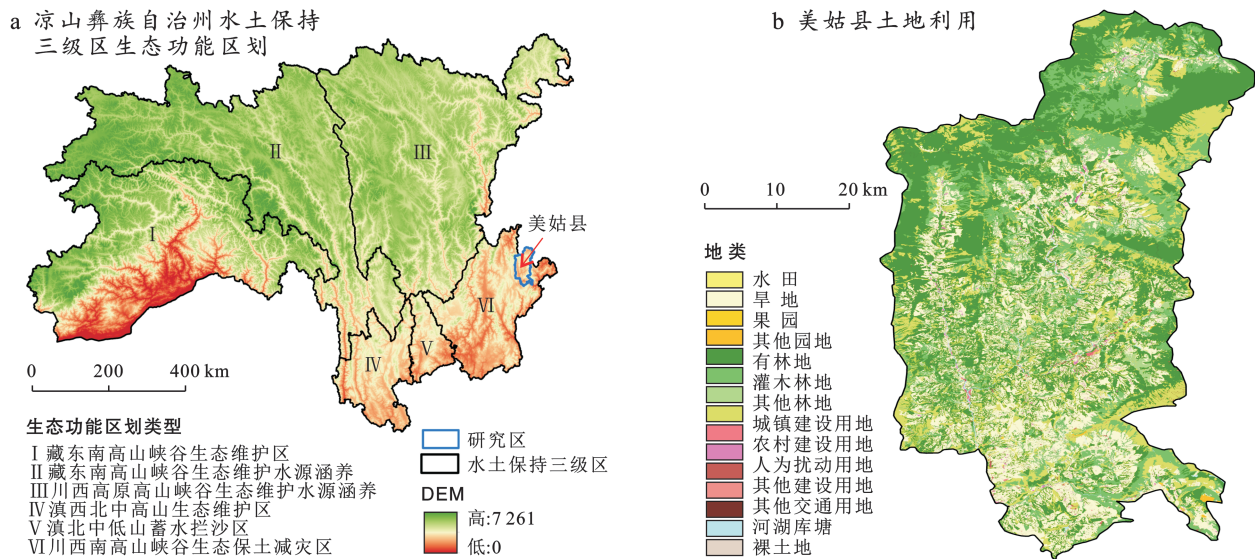


图1 凉山彝族自治州水土保持生态功能分区及美姑县土地利用类型

Fig.1 Ecological function zoning for soil and water conservation in Liangshan Yi Autonomous Prefecture and land use types in Meigu County

## 2 数据与方法

### 2.1 研究数据

(1) 土地利用。土地利用解译和水土保持措施解译采用研究区2023年3—5月2 m分辨率的高分一号卫星(GF-1)遥感影像(<https://data.cresda.cn/#/home>)获取。

(2) 土壤侵蚀因子。降雨侵蚀力<sup>[18]</sup>、土壤可蚀性<sup>[19]</sup>、坡度因子和坡长因子<sup>[20]</sup>、植物覆盖与生物措施<sup>[21-22]</sup>、耕作措施数据均来源于2023年水土流失动态监测成果数据库,空间数据分辨率均为10 m。

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 水土流失遥感监测

采用中国土壤流失方程(CSLE)计算土壤侵蚀模数<sup>[23]</sup>,按照《土壤侵蚀分类分级标准(SL 190—2007)》获取5个强度等级的水土流失面积。

#### 2.2.2 坡耕地水土流失图斑识别方法

利用缓冲区空间聚类的分析方法,针对耕地的

水土流失空间分布特征,通过设置缓冲参数,将空间离散分布的土壤侵蚀栅格聚类形成集中连片的坡耕地水土流失图斑。具体方法为:①将土壤侵蚀强度栅格数据转化为二值化栅格图层,将微度等级赋值为0,轻度及以上等级均赋值为1,得到水土流失栅格图层A。②将土地利用矢量数据转为土地利用栅格数据,保留耕地、园地、林地和草地这4类1级土地利用类型;土地利用类型具体可细分为水田、水浇地、旱地、果园、茶园、其他园地、有林地、灌木林地、其他林地、天然牧草地、人工牧草地、其他草地;将水土流失栅格二值化图层A和土地利用栅格数据通过空间相乘运算,获取每个水土流失栅格的土地利用类型信息,得到附有土地利用信息的水土流失栅格图层B。③将水土流失栅格图层B转为矢量图斑,提取耕地水土流失图斑并导出为独立图层;随后开展缓冲区分析,以每个图斑中心为圆心,分别设置10,20和30 m的正向缓冲半径(依据本研究采用的10 m分辨率空间数据,以10 m为步长设定),统计研究区不同

缓冲范围内耕地图斑内的水土流失面积所占比例。结果显示,随着缓冲半径增大,水土流失面积所占比例逐步下降,分别为 99.58%, 92.34% 和 88.57%。④根据步骤 3 结果,当缓冲半径为 10 m 时,所含非水土流失面积极少,与原始耕地水土流失栅格在空间上高度一致,表明该尺度下边界吻合性最佳。因此,选定 10 m 作为缓冲半径,并进一步设置 -10 m 的反向缓冲距离,以剔除冗余边界、还原真实地块形态,最终获取更精确的耕地水土流失图斑结果。⑤为实现图斑边界与实际地理边界相吻合,采用高精度土地利用解译矢量数据(基于 2 m 分辨率遥感影像人工目视解译生成,已综合考虑地物边界、地形要素及道路等人工设施)对初步聚合结果进行切割与边界校正。具体校正步骤包括:将水土流失图斑与全地类土地利用矢量数据进行相交处理,即利用不同土地利用类型的解译矢量边界对连片聚合图斑进行分割;保留相交后地类属性为耕地的水土流失图斑,去除非耕地图斑,确保其空间位置与土地利用解译数据一致;最后,依据《年度水土流失动态监测指南》要求,剔除面积小于 400 km<sup>2</sup> 的图斑,最终完成图斑优化。⑥分别计算耕地水土流失图斑内的水土流失面积及所占比例、中度及以上高强度侵蚀面积及所占比例、图斑内平均坡度信息,得到不同坡度等级的水土流失图斑结果。

### 2.2.3 坡耕地水土流失图斑识别精度验证方法

(1) 面积精度。对比坡耕地水土流失总面积、各侵蚀强度等级水土流失面积与水土流失遥感监测面积的相对误差。相对误差计算公式如下:

$$Q = |S_a - S_b| \div S_b \times 100\% \quad (1)$$

式中:Q 为面积相对误差(%);S<sub>a</sub> 为基于水土流失图斑计算的水土流失面积(km<sup>2</sup>);S<sub>b</sub> 为基于遥感监测统计的水土流失面积(km<sup>2</sup>)。

(2) 野外复检验证。依据《年度全国水土流失动态监测技术指南》,选择该县坡耕地水土流失图斑总数的 0.5% 共 105 个水土流失图斑,进行实地复核是否为坡耕地水土流失图斑。结果得到,判断结果确为坡耕地水土流失图斑的准确率为 91.43%,其空间位置精度高于 85%,可满足后续宜治理评价的相关分析研究。

### 2.2.4 宜治理评价分析方法

综合考虑坡耕地水土流失图斑治理的自然适宜度和区位适宜度 2 个因素层,涉及 6 个因子层,具体详见表 1。其中,自然适宜度基于水土流失图斑空间叠加坡度栅格数据和土壤侵蚀模数栅格数据获取。欧式距离法是一种常用距离定义方法,用于衡量多维空间中两点间的绝对距离<sup>[24]</sup>。因此,区位适宜度采用欧氏距离法进行评价坡耕地水土流失图斑到道路、水体和城镇用地的距离。

表 1 坡耕地水土流失图斑治理适宜性评价指标

Table 1 Evaluation indicators for conservation suitability of soil erosion patches on sloping farmland

评价因子	指标	指标说明
自然适宜度	坡度/(°)	反映坡耕地水土流失治理难易程度
	高强度侵蚀强度比例/%	反映坡耕地水土流失治理降级难易程度
区位适宜度	与居民地距离/m	反映坡耕地水土流失图斑易到达性
	与主干道距离/m	坡耕地水土流失图斑应远离高速公路、国道等主干道
	与一般道路距离/m	反映坡耕地水土流失图斑易到达性
	与水系距离/m	坡耕地水土流失图斑治理的非保护区水源易获取性

指标权重反映了各指标对适宜性评价的影响程度,本文采用层次分析法(AHP)与专家打分法相结合的方式,确定不同层次指标的权重及量化标准<sup>[12]</sup>。具体过程包括:首先,基于评价指标体系构建层次结构模型;其次,邀请专家使用 1~9 标度法对同一层次内各指标的相对重要性进行两两比较,构建判断矩阵。本轮共邀请 10 位专家参与咨询,专家专业背景涵盖水土保持、地理信息系统、遥感监测与土地资源管理等领域,均具备高级职称或 10 a 以上相关研究与实践经验,以确保判断的科学性与权威性。最后,借

助 Yaahp 软件计算各判断矩阵的权重值,并进行一致性检验,所有判断矩阵的一致性比率(CR)均小于 0.1,通过检验,表明专家判断逻辑一致,权重结果可信。其中,适宜性影响因子中的地面坡度、土壤侵蚀强度的分类标准参考《土壤侵蚀分类分级标准(SL 190—2007)》,与水源、道路等距离的分类标准参考《水土保持技术规范》及相关研究,并结合美姑县实际情况和城镇用地分布特征,综合上述 AHP 分析结果,得到坡耕地水土流失图斑治理适宜性评价因子权重与分级标准(表 2)。

表 2 评价指标因子权重与分级标准

Table 2 Weights and grading standards of evaluation indicators

准则层	指标	分级标准					指标权重
		1级	2级	3级	4级	5级	
自然适宜度 (0.333)	坡度/(°)	≥25	15~25	6~15	2~6	<2	0.250
	高强度侵蚀强度比例/%	80~100	60~80	40~60	20~40	0~20	0.083
区位适宜度 (0.667)	与居民地距离/m	≥5 000	4 000~5 000	3 000~4 000	2 000~3 000	1 000~2 000	0.046
	与主干道距离/m	1 000~2 000	2 000~3 000	3 000~4 000	4 000~5 000	≥5 000	0.175
	与一般道路距离/m	≥5 000	4 000~5 000	3 000~4 000	2 000~3 000	1 000~2 000	0.363
	与水系距离/m	≥5 000	4 000~5 000	3 000~4 000	2 000~3 000	1 000~2 000	0.083

### 3 结果与分析

#### 3.1 坡耕地水土流失分布特征

通过土地利用遥感解译,美姑县耕地面积 603.18 km<sup>2</sup>,其中水平梯田面积为 57.62 km<sup>2</sup>,所占比例为 9.55%。空间叠加坡度栅格数据,统计不同坡度等级下的耕地面积(不包括水平梯田面积),结果得到耕地主要集中在 15°~25°和 6°~15°区域,分别占美姑县不同坡度等级耕地总面积的 42.45%和 34.29%(图 2)。

通过遥感监测,美姑县 2023 年耕地水土流失面积为 485.24 km<sup>2</sup>,以轻度侵蚀和中度侵蚀为主,分别占耕地水土流失总面积的 33.87%和 28.02%;强烈及

以上侵蚀占耕地水土流失总面积的 38.11%,高强度侵蚀问题相对突出。总体上,耕地水土流失呈现出随坡度等级升高,水土流失占比逐渐增大趋势,在 15°以上坡耕地上的水土流失比例均高于 95%,水土流失发生率高。从侵蚀强度看,轻度侵蚀集中在 6°~15°,占该县坡耕地轻度侵蚀面积的 57.14%;中度侵蚀主要集中在 6°~15°和 15°~25°,分别占该县坡耕地中度侵蚀面积的 36.75%和 45.77%;强烈侵蚀集中在 15°~25°,占该县坡耕地强烈侵蚀面积的 68.21%;极强烈和剧烈侵蚀主要集中在 15°~25°和 ≥25°,15°~25°和 ≥25°极强烈侵蚀占该县坡耕地极强烈侵蚀面积的 40.69%和 47.78%,15°~25°和 ≥25°剧烈侵蚀占该县坡耕地剧烈侵蚀面积的 50.05%和 49.42%。

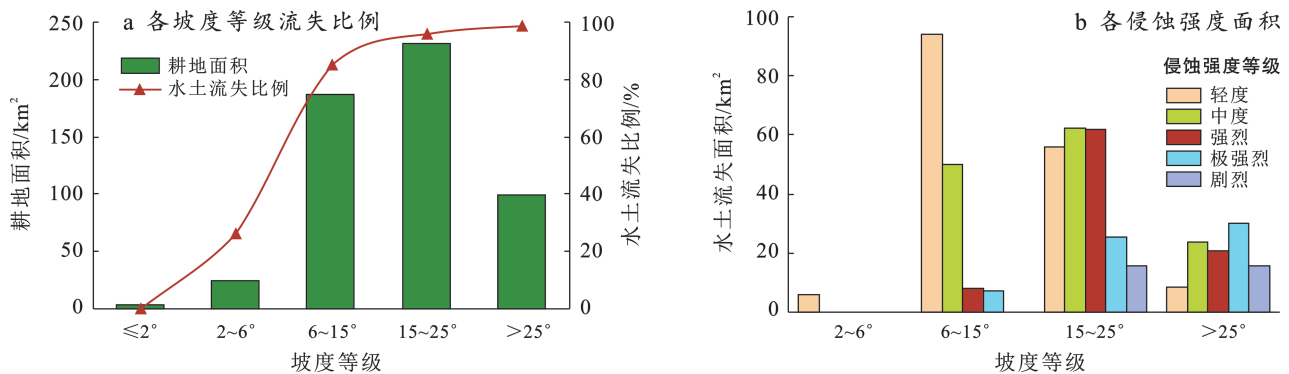


图 2 美姑县坡耕地水土流失分布

Fig.2 Distribution of soil erosion on sloping farmland in Meigu County

#### 3.2 坡耕地水土流失图斑识别

为评估坡耕地水土流失图斑识别的精度,对识别结果与遥感监测数据进行系统对比分析。统计结果表明(表 3),坡耕地水土流失图斑总面积与遥感监测结果相差 2.04 km<sup>2</sup>,相对误差仅为 0.42%,显示出较高的一致性。在各侵蚀强度等级上,坡耕地水土流失图斑面积与遥感监测结果的相对误差均控制在 5%以内。其中轻度、中度、强烈及以上侵蚀等级的误差分别为 0.32%,-0.79%和 1.38%。总体上,各侵蚀强度等级的水土流失图斑分级准确率均超过

95%,说明坡耕地水土流失图斑识别结果具有较好的可靠性与适用性。

表 3 坡耕地水土流失图斑识别精度评价  
Table 3 Accuracy evaluation of soil erosion patch identification on sloping farmland

指标	轻度侵蚀	中度侵蚀	强烈及以上	合计
遥感监测/km <sup>2</sup>	164.33	135.96	184.95	485.24
流失图斑/km <sup>2</sup>	164.86	134.88	187.54	487.28
面积差值/km <sup>2</sup>	0.53	-1.08	2.59	2.04
相对误差/%	0.32	-0.79	1.38	0.42

从空间分布来看(图 3),美姑县共识别出坡耕地水土流失图斑约 2.1 万个,水土流失主要集中分布于县域中部以南区域。强烈及以上高强度侵蚀图斑在空间上呈现集聚特征,主要分布于中部地区。统计显示,高强度侵蚀面积占比超过 50% 的水土流失图斑数量占总图斑数量的 57.53%,进一步印证了美姑县坡耕地水土流失中以高强度侵蚀为主导的现状,也凸显该区域在治理过程中应重点关注高强度侵蚀图斑的识别与防控。

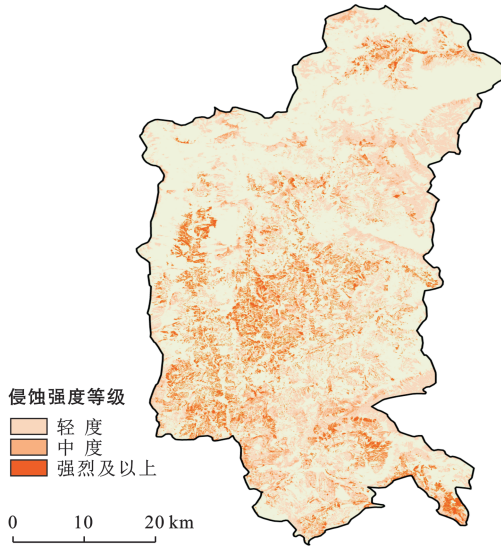


图 3 美姑县坡耕地水土流失图斑空间分布  
Fig.3 Spatial distribution of soil erosion patches on sloping farmland in Meigu County

### 3.3 宜治理坡耕地评价分析

基于综合适宜性评价结果,高适宜治理、中适宜治理、低适宜治理和不适宜治理 4 类坡耕地水土流失图斑的空间分布如图 4a 所示。从数量结构来看,高

适宜、中适宜、低适宜和不适宜治理的图斑个数分别为 2 817, 13 695, 4 239 和 253 个,其对应的面积比例分别为 19.72%, 66.36%, 13.50% 和 0.42%。中适宜治理图斑在数量与面积上均占主导地位,表明该区域治理潜力总体较大,但治理条件存在显著梯度差异。在治理适宜性较高的类别中,高适宜与中适宜治理图斑除受道路可达性和水源获取条件影响外,其差异主要体现在坡度与侵蚀强度两方面。其中,高适宜治理坡耕地水土流失图斑平均坡度小于 20°,侵蚀强度以轻度为主,高强度侵蚀比例低于 20%,立地条件良好,治理难度较小,治理后易于实现水土流失的“减量,降级”目标。中适宜治理坡耕地水土流失图斑平均坡度集中在 15°~28°,侵蚀强度以中度及以上为主,其中超过 60% 的图斑中高强度侵蚀占比超过 50%,表明该类区域侵蚀问题较为突出,治理需求迫切。低适宜与不适宜治理图斑受交通条件限制显著,主要集中在高速公路、国道及其他主干道路难以覆盖的偏远区域,基础设施支撑能力弱,治理难度大、经济性较差,近期治理可行性较低。总体上,以上评价结果初步明确了美姑县坡耕地水土流失治理的优先顺序与空间布局,可为分类施策、分级治理提供科学依据,有助于提升水土保持工程实施的精准性与实效性。针对高适宜与中适宜治理区域,本研究进一步依据坡度等级提出差异化治理措施建议(图 4b)。在 2°~6° 缓坡区,建议推进高标准农田建设,提升土地生产能力与抗蚀性能;6°~15° 区域宜修筑水平梯田,有效截短坡长,减缓径流;15°~25° 陡坡耕地可采用坡式梯田或植物篱措施,结合结构性与生物性治理;25° 以上极陡坡耕地则应以退耕还林还草为主,或实施保土耕作制度,控制面源侵蚀,恢复植被覆盖。

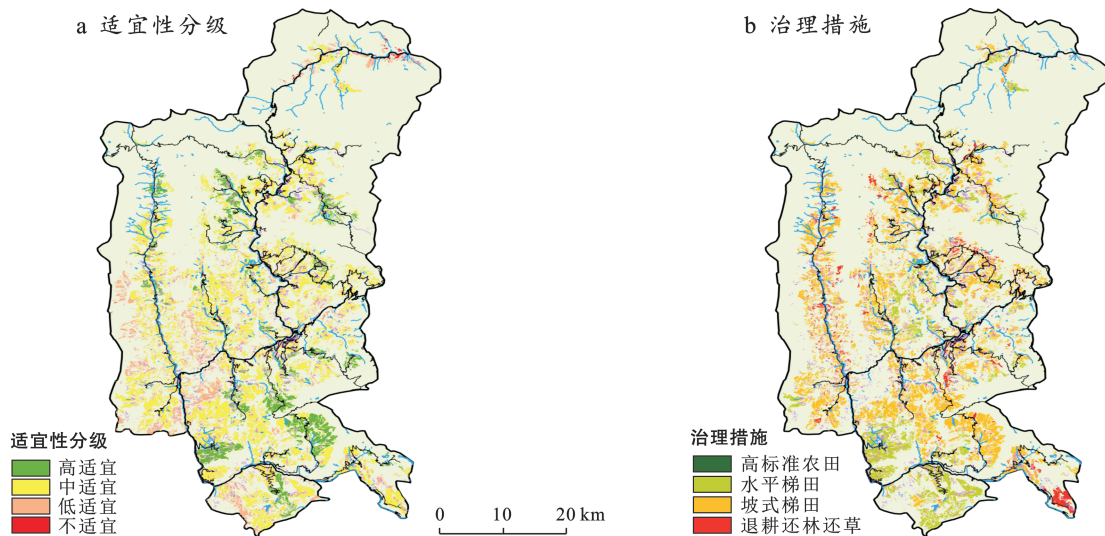


图 4 美姑县坡耕地水土流失图斑治理适宜性评价及治理措施布局  
Fig.4 Conservation suitability evaluation and layout of control measures for soil erosion patches on sloping farmland in Meigu County

## 4 讨论

(1) 坡耕地宜治理评价合理性分析。在西南高山峡谷区,地形破碎、立地条件异质性强,目前全国尚缺乏统一的山区复杂地形下坡耕地治理适宜性评价指标体系。为此,本文以坡耕地水土流失图斑为基本评价单元,遵循“分坡度,先易后难,分步治理”的原则,从自然适宜度与区位适宜度两个维度构建评价框架,共涵盖6个核心因子。在自然适宜度方面,采用平均坡度反映工程治理的难易程度,以高强度侵蚀占比表征治理过程中实现侵蚀“降级”的挑战性;在区位适宜度方面,以农村道路等一般道路条件评价治理可达性,将高速公路、国道等主干道视为治理的不利因素(因其出口稀疏,直接接入性差),同时结合河流、沟渠、坑塘水面等水域要素评估灌溉水源的获取便利性。所选指标数据源可靠,易于获取,剪操作性强,能够支撑区域尺度下的治理优先性初步判别。然而,本研究构建的宜治理评价方法及其后续治理措施配置仍存在一定局限性。在评价层面,当前指标体系尚未纳入土壤质地、有机质含量、耕层厚度及降水量等关键自然因子<sup>[25-26]</sup>,导致评价结果在反映坡耕地真实地力条件与水文响应方面存在不足,可能影响治理适宜性的精确判别。在治理措施设计方面,当前主要依据坡度等级推荐相应工程类型,如缓坡区推行高标准农田建设,陡坡区建议坡式梯田或退耕还林,该分类方式仍较为粗放,未进一步结合土层厚度、石砾含量、水源保障等立地条件进行差异化设计,导致措施配置的针对性和实操性有所不足。受数据获取限制与模型复杂度制约,未对上述因子开展系统分析,因此在自然立地条件方面的评价仍存在盲区,当前结果更适用于宏观层面的治理分区与初步规划。未来研究应在现有框架基础上,逐步引入土壤属性、气候水文特征及微地形信息,构建多因子、多层级的精细化评价体系;在治理措施设计上,应结合区域土地质量本底,开展治理措施精细化、差异化设计。如在土层薄弱,石砾含量高或水源匮乏区域,优化梯田结构,增强植被恢复的生态适应性,从而提升治理措施的科学性与实际应用效益。

(2) 坡耕地土壤侵蚀防治途径。坡耕地水土流失治理是土地整治与农业可持续发展的重要环节,其核心在于通过系统性工程与生物措施改善农业生产条件<sup>[27]</sup>,减少水土流失面积,提升土地质量与农业抗灾能力<sup>[28]</sup>。美姑县内紫色土广泛分布,有机质含量低,表层土浅薄,抗侵蚀能力弱<sup>[29]</sup>,区域内大部分坡耕地土壤侵蚀速率远大于土壤恢复能力。即大于

《土壤侵蚀分类分级标准(SL 190—2007)》提出的西南紫色土区域土壤允许流失量标准。长期高强度侵蚀不仅造成耕层土壤流失,更会加剧土地质量退化进程<sup>[5]</sup>。作为西南高山峡谷区耕地资源的重要组成部分,坡耕地的水土流失与养分损失直接影响区域农业产能与农村经济稳定<sup>[30]</sup>,也削弱了农业生态系统的韧性与减灾能力。因此,推进坡耕地水土流失治理,必须采取以“保护—改良—合理利用”为主线的综合治理路径,结合水土保持措施体系,实现坡面水土资源的可持续管理。

本研究基于坡耕地水土流失图斑的分布规律与属性特征,提出了针对不同坡度等级的治理措施建议,如缓坡区推进高标准农田建设,中陡坡区布设梯田工程,陡坡区实施退耕还林还草等。需要说明的是,坡耕地治理措施布设成果是基于坡耕地水土流失的分布规律和水土流失图斑属性,制定的可布设措施建议,成果仅作为参考案例并不代表实际规划安排。由于在实际推进中,坡耕地治理策略需综合考虑地方政策导向,行业规划衔接,多部门协同机制、资金投入规模等现实因素。同时还需响应群众在配水、通路、产业结构调整等方面的实际需求,综合实施工程措施、林草生物措施、优化种植模式和坡面水系工程措施等措施体系,建立坡耕地水土流失治理模式体系。此外,应积极探索多元化投入机制,引导社会力量与民间资本参与产业开发型治理项目,加强涉农资金整合与项目协同<sup>[31]</sup>,提升治理工作的持续性和实效性,从而实现坡耕地水土流失治理从单点治理向系统治理、从政府主导向多元共治的转变。

## 5 结论

(1) 美姑县坡耕地水土流失问题较为突出,坡耕地水土流失面积占坡耕地面积的88.96%,是西南高山峡谷川西南高山峡谷保土减灾区中坡耕地流失严重区域的典型代表。全县15°以上坡耕地上的水土流失占比均高于95%,强烈及以上高强度侵蚀占耕地水土流失总面积的38.11%,反映出该区域高强度侵蚀问题相对突出,治理紧迫性高的特点。

(2) 坡耕地水土流失图斑识别共计获取2.1万个坡耕地水土流失图斑,流失面积与遥感监测的面积相对误差为0.42%,各侵蚀强度等级的识别面积相对误差均控制在5%以内,表明图斑识别精度较高、结果可靠。进一步分析发现,近60%坡耕地水土流失图斑中高强度侵蚀比例高于50%,说明高强度侵蚀不仅范围广,而且空间集中性明显,治理难度较大。

(3) 从自然适宜度与区位适宜度两个维度综合

评价坡耕地水土流失图斑的治理可行性,结果显示:高适宜治理、中适宜治理、低适宜治理和不适宜治理的坡耕地水土流失图斑面积比例分别为19.72%,66.36%,13.50%和0.42%。结果总体掌握了宜治理坡耕地水土流失图斑的空间分布情况,研究结果可为西南高山峡谷区推进坡耕地分级治理、差异化布设水土保持措施提供科学依据和规划支撑。

### 参考文献 (References)

- [1] Gil E, Kijowska-Strugała M, Demczuk P. Soil erosion dynamics on a cultivated slope in the western Polish Carpathians based on over 30 years of plot studies [J]. *Catena*, 2021,207:105682.
- [2] 王红岩,李强子,吴利桥,等.基于RS和GIS的水土流失敏感性评价及动态监测[J].*水土保持研究*,2015,22(2):64-68.  
Wang Hongyan, Li Qiangzi, Wu Liqiao, et al. Dynamic monitoring and sensitivity evaluation of soil erosion based on RS and GIS [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015,22(2):64-68.
- [3] Lal R, Pimentel D. Soil erosion: A carbon sink or source? [J]. *Science*, 2008,319(5866):1040-1042.
- [4] 王美娜,范顺祥,舒翰俊,等.河南省土壤侵蚀时空分异特征及土壤保持经济价值[J].*生态环境学报*,2024,33(5):730-744.  
Wang Meina, Fan Shunxiang, Shu Hanjun, et al. Spatio-temporal variations in soil erosion and its economic value of soil conservation in Henan Province [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2024,33(5):730-744.
- [5] 陈正发,李靖,段青松,等.基于USLE模型的云南省坡耕地土壤侵蚀和养分流失评价[J].*农业工程学报*,2022,38(16):124-134.  
Chen Zhengfa, Li Jing, Duan Qingsong, et al. Evaluation of soil erosion and nutrient loss of slope farmland in Yunnan Province using USLE model [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022,38(16):124-134.
- [6] 丁琳,黄婷婷,秦伟,等.西南高山峡谷区土壤侵蚀空间分异特征[J].*泥沙研究*,2023,48(6):51-58.  
Ding Lin, Huang Tingting, Qin Wei, et al. Spatial variation of soil erosion in southwest alpine canyon area [J]. *Journal of Sediment Research*, 2023,48(6):51-58.
- [7] 高艳丽,李红波.汉江流域景观格局变化对土壤侵蚀的影响[J].*生态学报*,2021,41(6):2248-2260.  
Gao Yanli, Li Hongbo. Influence of landscape pattern change on soil erosion in Han River basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021,41(6):2248-2260.
- [8] 吴淑芳,张彪,石学瑾,等.FLUS-CSLE模型预测黄土高原典型流域不同土地利用变化情景土壤侵蚀[J].*农业工程学报*,2022,38(24):83-92.  
Wu Shufang, Zhang Biao, Shi Xuejin, et al. Prediction of soil erosion under different land uses in the typical watershed of the Loess Plateau based on FLUS-CSLE model [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022,38(24):83-92.
- [9] 罗佳茹,李斌斌,张凤宝,等.黄丘区特色治理开发小流域土壤侵蚀变化对景观格局演变的响应[J].*应用生态学报*,2021,32(12):4165-4176.  
Luo Jiaru, Li Binbin, Zhang Fengbao, et al. Responses of soil erosion to changes in landscape pattern and its evolution in watershed in the loess hilly region under characteristic management and development [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021,32(12):4165-4176.
- [10] 陆淑宁,张泽瑜,李荣融,等.等高耕作对不同坡度坡面土壤侵蚀过程的影响[J].*水土保持学报*,2023,37(2):37-44.  
Lu Shuning, Zhang Zeyu, Li Rongrong, et al. Effects of contour tillage on soil erosion process in different slope [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023,37(2):37-44.
- [11] 陈浩,王豆豆,崔钦凯,等.草地植被冠层与根系对黄土坡面侵蚀过程的影响[J].*生态学报*,2024,44(15):6841-6853.  
Chen Hao, Wang Doudou, Cui Qinkai, et al. Effects of canopy and root of grassland vegetation on erosion processes of the Loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024,44(15):6841-6853.
- [12] 毕玮,党小虎,马慧,等.“藏粮于地”视角下西北地区耕地适宜性及开发潜力评价[J].*农业工程学报*,2021,37(7):235-243.  
Bi Wei, Dang Xiaohu, Ma Hui, et al. Evaluation of arable land suitability and potential from the perspective of “Food Crop Production Strategy based on Farmland Management” in northwest China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021,37(7):235-243.
- [13] 汪景宽,徐香茹,裴久渤,等.东北黑土地地区耕地质量现状与面临的机遇和挑战[J].*土壤通报*,2021,52(3):695-701.  
Wang Jingkuan, Xu Xiangru, Pei Jiubo, et al. Current situations of black soil quality and facing opportunities and challenges in northeast China [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021,52(3):695-701.
- [14] 罗志东.水土保持基础空间管理单元划分理论与方法研究[D].北京:北京林业大学,2019.  
Luo Zhidong. Study on the theory and method of division of the basic space management unit of soil and water conservation [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.

- [15] 李智勇. 小流域综合治理规划设计基础斑块划分研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2017.  
Li Zhiyong. The study on the division of minimum basic management unit of small watershed comprehensive harnessing [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2017.
- [16] 李向东. 四川省美姑县居住用地地质环境适宜性研究 [D]. 四川 成都: 成都理工大学, 2015.  
Li Xiangdong. Residential land suitability study of the geological environment in Sichuan Meigu [D]. Chengdu, Sichuan: Chengdu University of Technology, 2015.
- [17] 周吾珍, 刘仕川, 郑晓莉. 基于最小累积阻力模型的生态安全格局构建与优化: 以四川省美姑县为例 [J]. 自然资源信息化, 2023(2): 62-70.  
Zhou Wuzhen, Liu Shichuan, Zheng Xiaoli. Construction and optimization of ecological security pattern based on the MCR model: A case of Meigu, Sichuan [J]. Natural Resources Informatization, 2023(2): 62-70.
- [18] 殷水清, 章文波, 谢云, 等. 基于高密度站网的中国降雨侵蚀力空间分布 [J]. 中国水土保持, 2013(10): 45-50.  
Yin Shuiqing, Zhang Wenbo, Xie Yun, et al. Spatial distribution of rainfall erosivity in China based on high-density station network [J]. Soil and Water Conservation in China, 2013(10): 45-50.
- [19] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持, 2013(10): 2-3.  
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Bulletin on soil and water conservation: The first national water census [J]. Soil and Water Conservation in China, 2013(10): 2-3.
- [20] 符素华, 刘宝元, 周贵云, 等. 坡长坡度因子计算工具 [J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(5): 105-110.  
Fu Suhua, Liu Baoyuan, Zhou Guiyun, et al. Calculation tool of topographic factors [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2015, 13(5): 105-110.
- [21] 刘宝元, 谢云. 土壤侵蚀预报模型 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2001.  
Liu Baoyuan. Soil Loss Prediction Model [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2001.
- [22] 李嘉麟, 陈家慧, 华丽, 等. 基于 CSLE 的湖北省土壤侵蚀时空变化特征 [J]. 水土保持学报, 2022, 36(4): 43-52.  
Li Jialin, Chen Jiahui, Hua Li, et al. Spatial and temporal characteristics of soil erosion in Hubei Province based on CSLE [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(4): 43-52.
- [23] 陈锐银, 严冬春, 文安邦, 等. 基于 GIS/CSLE 的四川省水土流失重点防治区土壤侵蚀研究 [J]. 水土保持学报, 2020, 34(1): 17-26.  
Chen Ruiyin, Yan Dongchun, Wen Anbang, et al. Research on soil erosion in key prevention and control region of soil and water loss based on GIS/CSLE in Sichuan Province [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(1): 17-26.
- [24] 王奎博, 闫敏, 张丽, 等. 基于 LandUSEM 模型的海南岛海岸带土地利用适宜性评价 [J]. 遥感技术与应用, 2022, 37(5): 1140-1148.  
Wang Kuibo, Yan Min, Zhang Li, et al. Evaluation of land use suitability in the coastal zone of Hainan Island based on LandUSEM [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2022, 37(5): 1140-1148.
- [25] 陈正发, 龚爱民, 张刘东, 等. 基于质量评价的省域尺度坡耕地质量调控体系构建 [J]. 农业工程学报, 2021, 37(20): 136-145.  
Chen Zhengfa, Gong Aimin, Zhang Liudong, et al. Construction of the quality regulation system for provincial scale slope farmland based on quality evaluation [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(20): 136-145.
- [26] 黄鑫, 郑江坤, 任雨之, 等. 川中丘陵区紫色土坡耕地植物篱措施对土壤抗蚀性的影响 [J]. 山地学报, 2024, 42(1): 27-36.  
Huang Xin, Zheng Jiangkun, Ren Yuzhi, et al. Effect of hedgerow on anti-erodibility of sloping farmlands consisted of purple soil in the hilly area of central Sichuan basin [J]. Mountain Research, 2024, 42(1): 27-36.
- [27] 潘佩佩, 杨桂山, 苏伟忠, 等. 太湖流域土地利用变化对耕地生产力的影响研究 [J]. 地理科学, 2015, 35(8): 990-998.  
Pan Peipei, Yang Guishan, Su Weizhong, et al. Impact of land use change on cultivated land productivity in Taihu Lake basin [J]. Scientia Geographica Sinica, 2015, 35(8): 990-998.
- [28] 彭继权, 刘毅南, 陈莉莉. 高标准农田建设对农田减灾的影响及作用机制 [J]. 生态学报, 2024, 44(17): 7589-7603.  
Peng Jiquan, Liu Yinan, Chen Lili. Influence and mechanism of high standard farmland construction on farmland disaster reduction [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(17): 7589-7603.
- [29] 牛俊, 张平仓, 邢明星. 长江上游紫色土坡耕地水土流失特征及其防治对策 [J]. 中国水土保持科学, 2010, 8(6): 64-68.  
Niu Jun, Zhang Pingcang, Xing Mingxing. Characteristics of soil and water loss on purple slope farmland and its control in upper reaches of the Yangtze River [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2010, 8(6): 64-68.

- 滑坡易发性评价方法[J].地球信息科学学报,2025,27(5):1113-1128.
- Weng Mingkai, Xiao Guirong. A landslide susceptibility assessment method integrating training sample optimization and machine learning [J]. Journal of Geo-Information Science, 2025,27(5):1113-1128.
- [20] 屈鹏鑫,谢婉丽,刘琦琦,等.基于机器学习方法改进IVM-RF耦合模型的崩滑灾害危险性评价:以延安市志丹县为例[J].地质科技通报,2025,44(3):280-295.
- Qu Pengxin, Xie Wanli, Liu Qiqi, et al. Collapse and landslide risk assessment based on machine learning improved IVM-RF coupling method: A case study of Zhidan County, Yan'an City [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025,44(3):280-295.
- [21] 苏志萍,杨成生,王子倩.结合负样本优化与机器学习模型的怒江峡谷段滑坡易发性评价[J].地球信息科学学报,2025,27(4):979-993.
- Su Zhiping, Yang Chengsheng, Wang Ziqian. Landslide susceptibility assessment in Nujiang canyon using negative sample optimization and machine learning models [J]. Journal of Geo-Information Science, 2025, 27(4):979-993.
- [22] Sholichin M, Othman F, Prayogo T B, et al. Assessing landslide susceptibility and formulating adaptation strategies in the Konto watershed, East Java, Indonesia [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2024,113:104797.
- [23] 张军以,丁悦凯,孙德亮.基于不同样本比例与超参数优化的滑坡易发性评价:以重庆市武隆区为例[J].重庆师范大学学报(自然科学版),2022,39(5):47-57.
- Zhang Junyi, Ding Yuekai, Sun Deliang. Landslide susceptibility evaluation based on different sample proportion and super parameter optimization: Take Wulong District of Chongqing Municipality as an example [J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2022,39(5):47-57.
- [24] Rajappan S P, Babu M, Manoharan A N, et al. Landslide susceptibility evaluation of Iruvazhinji watershed of Chaliyar River, central Kerala, India, using frequency ratio approach [J]. Journal of Degraded and Mining Lands Management, 2025,12(2):7111-7122.
- [25] 王洁,林诚杰,梁峰铭,等.基于不同机器学习模型的滑坡易发性分析及适应性评估[J].科学技术与工程,2025,25(2):513-520.
- Wang Jie, Lin Chengjie, Liang Fengming, et al. Landslide susceptibility analysis and adaptability evaluation based on different machine learning models [J]. Science Technology and Engineering, 2025,25(2):513-520.
- [26] 瞿伟,宫明利,徐荣堂,等.一种基于CBAM注意力机制优化YOLOv8n的滑坡检测方法[J].应用基础与工程科学学报,2025,33(5):1231-1238.
- Qu Wei, Gong Mingli, Xu Rongtang, et al. A landslide detection method based on CBAM attention mechanism optimized for YOLOv8n [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2025,33(5):1231-1238.
- [27] 蒲未来,刘敦龙,桑学佳,等.融合多源异构数据的滑坡变形阶段智能判识方法[J].灾害学,2023,38(4):179-186.
- Pu Weilai, Liu Dunlong, Sang Xuejia, et al. An intelligent identification method of landslide deformation stage based on multi-source heterogeneous data [J]. Journal of Catastrophology, 2023,38(4):179-186.
- [28] 赵鹏,文刚,何展昌,等.基于机器学习的金沙江流域浅层滑坡易发性评价[J].水利水电技术(中英文),2024,55(10):53-70.
- Zhao Peng, Wen Gang, He Zhanchang, et al. Shallow landslide susceptibility assessment in Jinsha River basin based on machine learning models [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024,55(10):53-70.
- [29] Hailu S, Deribew K T, Teferi E, et al. Spatial assessment employing fusion logistic regression and frequency ratio models to monitor landslide susceptibility in the upper Blue Nile basin of Ethiopia: Muger watershed [J]. Environmental Systems Research, 2024,13(1):54.

(上接第180页)

- [30] 陈正发,史东梅,何伟,等.1980—2015年云南坡耕地资源时空分布及演变特征分析[J].农业工程学报,2019,35(15):256-265.
- Chen Zhengfa, Shi Dongmei, He Wei, et al. Spatio-temporal distribution and evolution characteristics of slope farmland resources in Yunnan from 1980 to 2015 [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019,35(15):256-265.
- [31] 李勇,付磊.贵州省坡耕地水土流失综合治理经验措施与对策建议[J].中国水利,2021(14):51-52.
- Li Yong, Fu Lei. Experiences and measures for comprehensive control of soil and water loss in sloping farmland of Guizhou Province [J]. China Water Resources, 2021(14):51-52.