https://doi.org/10.3799/dqkx.2026.304

地质环境扰损区灾害生态化防治多元技术配置方法研究

蒋卓君[1],崔圣华[1,2*],裴向军[1,2*],张晓超[1,2],雷泞菲[1,2],李景吉[1,2],杨晴雯[1,2]

1. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护全国重点实验室,四川成都 610059
2. 天府永兴实验室,四川成都 610213

摘 要: 针对地质环境扰损区灾害生态化防治中技术与环境失配、措施割裂及适配依据不足的问题,构建了多元技术有机配置方法.基于工程-灾害-生态-地质子系统耦合关系,建立场景属性识别与生态地质环境问题诊断框架;按照主导功能将治理技术归并为力学补强、水热调控、土壤改良、植被恢复、景观融合和水肥供给六类技术单元.在安全红线和工程适用边界约束下,采用组合赋权与综合评分方法对单元内候选技术进行适宜性评价,并依据技术单元间的前置依赖、功能互补、兼容并存和制约冲突关系生成多元技术配置方案.以震后九寨沟大型崩塌堆积体为例,面向强降雨扰动、高陡松散堆积体、粗粒贫瘠基质和景观敏感等复合约束,构建了以局部稳坡、水土过程调控、土壤生境重构、近自然植被恢复和精准管护为核心的配置方案.该方法可将生态化防治技术选型由经验判断转向场景约束下的系统适配,为复杂地质环境扰损区灾害生态化治理技术配置提供方法支撑.

关键词: 地质环境扰损区;生态化防治;技术配置;边坡韧性治理;耦合系统;地质灾害;生态修复.

中图分类号: P642.5 **文章编号:** 1000-2383(2026)09-3290-19 **收稿日期:** 2026-06-21

An Integrated Multi-Technology Configuration Method for Ecological Hazard Prevention and Control in Geologically Disturbed Areas

Jiang Zhuojun[1], Cui Shenghua[1,2*], Pei Xiangjun[1,2*], Zhang Xiaochao[1,2], Lei Ningfei[1,2], Li Jingji[1,2], Yang Qingwen[1,2]

1. *State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu* 610059, *China*
2. *Tianfu Yongxing Laboratory, Chengdu* 610213, *China*

Abstract: To address technology-environment mismatch, fragmented implementation of individual measures, and insufficient basis for technology adaptation in the ecological prevention and control of hazards in geologically disturbed areas, an integrated multi-technology configuration method is developed. Based on the coupling relationships among the engineering, hazard, ecological, and geological subsystems, a framework for scenario attribute identification and eco-geological environmental problem diagnosis is established. According to their dominant functions, treatment technologies are classified into six technical

基金项目: 国家重点研发计划项目(No. 2023YFC3007100).

作者简介: 蒋卓君(2002-),女,博士研究生,主要研究方向是地质灾害与生态减灾. ORCID: 0009-0005-6466-0301. E-mail: 1967997334@qq.com

* **通讯作者:** 崔圣华,ORCID: 0000-0002-6638-230X. E-mail: cuishenghua18@cdut.edu.cn; 裴向军,ORCID: 0009-0007-6529-2605. E-mail: pxj@cdut.edu.cn

引用格式: 蒋卓君,崔圣华,裴向军,张晓超,雷泞菲,李景吉,杨晴雯,2026.地质环境扰损区灾害生态化防治多元技术配置方法研究.地球科学,51(9):3290-3308.

Citation: Jiang Zhuojun, Cui Shenghua, Pei Xiangjun, Zhang Xiaochao, Lei Ningfei, Li Jingji, Yang Qingwen, 2026. An Integrated Multi-Technology Configuration Method for Ecological Hazard Prevention and Control in Geologically Disturbed Areas. *Earth Science*, 51(9): 3290-3308.

units: mechanical reinforcement, hydrothermal regulation, soil improvement, vegetation restoration, landscape integration, and water-fertilizer supply. Subject to safety redlines and engineering applicability constraints, candidate technologies within each technical unit are evaluated for suitability using combined weighting and comprehensive scoring methods, and multi-technology configuration schemes are generated according to prerequisite dependencies, functional complementarity, compatibility, and potential conflicts among the technical units. A large post-earthquake collapse deposit in Jiuzhaigou is taken as a case study. Under the combined constraints of intense rainfall disturbance, steep and loose deposits, coarse and infertile substrates, and high landscape sensitivity, a configuration scheme centered on local slope stabilization, soil and water process regulation, soil habitat reconstruction, near-natural vegetation restoration, and targeted maintenance is developed. The proposed method can transform ecological prevention and control technology selection from experience-based judgment to systematic adaptation under scenario constraints, thereby providing methodological support for technology configuration in the ecological treatment of hazards in complex geologically disturbed areas.

Key words: geologically disturbed areas; ecological prevention and control; technical configuration; slope resilience management; coupled system; geological hazards; ecological restoration.

近年来,极端气候变化和重大工程建设加剧了我国生态地质环境的脆弱性,灾害孕育和发生表现出岩土-水-生多要素耦合、多过程叠加、多灾种链生的显著特征(Ghestem *et al.*, 2011;Shi *et al.*, 2020),防灾减灾对象从地质灾害延拓到水土流失、生境质量降低、生物多样性丧失、生态系统服务功能下降等生态地质环境灾害(Liu *et al.*, 2022;Joseph *et al.*, 2024),灾害治理由支挡、锚固、截排水等传统措施转变为与生态材料、韧性结构、生物措施协同应用(Shen *et al.*, 2023),灾害治理目标由地质体稳定性转变为生态地质环境系统平衡(Zhang and Wang, 2022;张振国等, 2025).

面对生态地质环境灾害,防灾成效并不取决于单一技术,而依赖于多元技术的有机配置,通过产生叠加效应实现地质体-工程结构-生物体之间的动态适应(裴向军, 2024).然而,在现有工程实践中,多元技术配置仍基于经验筛选和简单叠加(Adhikari *et al.*, 2021),缺乏场景约束与多维评价,难以明确不同技术的适用边界、组合逻辑及协同机制,尚未形成从场景识别、问题诊断、技术筛选到方案配置的科学路径.遵循环境胁迫、立地条件、工程属性和生态目标的多维度评价框架(Guo *et al.*, 2020),构建多元技术有机适配方法,推动防灾减灾技术向生态化、多元化、标准化发展,是地质环境保护与生态可持续发展转型的重要需求.

针对现有生态化防治技术配置对场景差异、问题类型及多技术协同关系考虑不足的问题,本文从工程、灾害、生态和地质四个子系统的耦合关系出发,构建地质环境扰损区灾害生态化防治多元技术配置框架.通过场景分类与属性识别刻画治理对象的关键约束,诊断地质体失稳、水土流失、生境退化等生态地质环境问题,并依据治理功能划分技术单元;进一步构建环境适宜性、场地适应性、工程针对性和目标匹配性评价体系,开展单元内候选技术筛选,并依据技术间的前置依赖、功能互补、兼容并存和制约冲突关系进行组合配置与效益评估,形成“场景识别-问题诊断-技术筛选-方案配置”的生态化防治技术配置方法.

1　地质环境扰损区灾害生态化防治多元技术有机适配框架

1.1　地质环境扰损区灾害类型与成因

地质环境扰损区灾害是岩石圈、土壤圈、水圈、大气圈和生物圈在地震、极端气候及工程建设等内外动力作用下生态地质系统失衡的表现(Crozier, 2010; Fan *et al.*, 2019),灾害类型包括地质灾害、侵蚀灾害、生态损害等.

地质环境扰损区灾害是地震、极端降雨、冻融、干旱及工程开挖与填筑等外部扰动作用于脆弱地质环境后,引起岩土结构、坡面形态、水土过程和生态功能连续变化的结果.根据主要表现形式,可将其归纳为地质体失稳、侵蚀灾害和生态损害三类(图1).地质体失稳主要包括崩塌、滑坡、泥石流、地面塌陷、地裂缝和地面沉降等,表现为岩土体变形破坏及物质快速迁移;侵蚀灾害则由降雨径流、风力、冻融及重力等作用驱动,经历坡面物质的剥离、搬运和沉积过程,可进一步表现为水力侵蚀、风力侵蚀、冻融侵蚀和重力侵蚀等类型(Lin *et al.*, 2006; Preti, 2013;Xu *et al.*, 2021);地质体失稳和侵蚀过

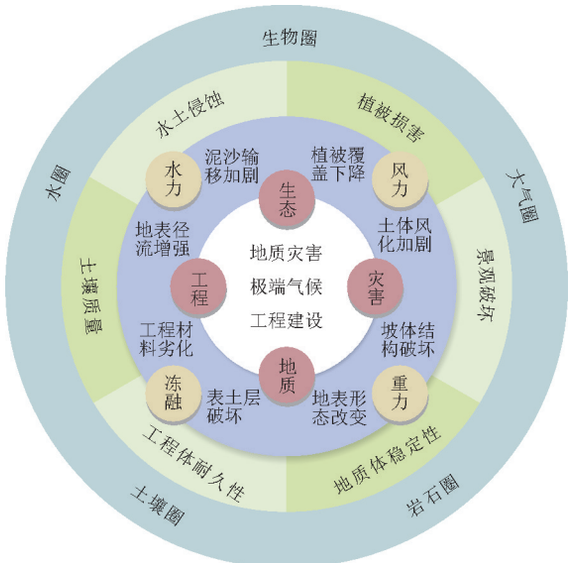

图1 地质环境扰损区灾害类型与成因

Fig.1 Types and causes of hazards in geologically disturbed areas

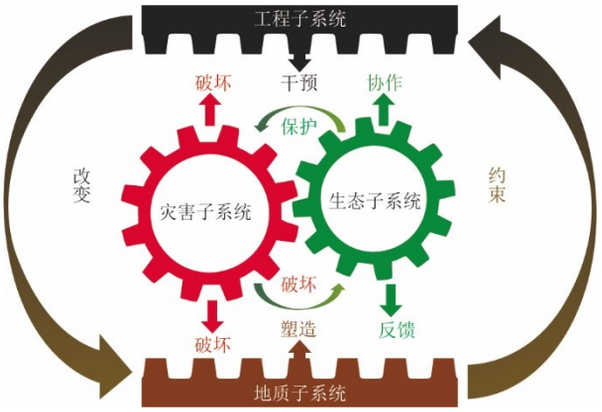

图2 工程、灾害、生态、地质子系统耦合关系

Fig.2 Coupling relationships among the engineering, hazard, ecological, and geological subsystems

程不仅改变坡面形态和物质组成,还会造成表土流失、土壤结构破坏及水分和养分条件恶化,进而限制植物定植与群落恢复,引发植被覆盖度下降、生物多样性降低、景观破碎和生态系统服务功能减弱(Li *et al.*, 2023;Broquet *et al.*, 2024).

1.2 生态地质环境多系统作用关系

上述灾害均发生于生态地质环境灾害减灾系统之中,该系统由地质、灾害、生态和工程四个相互关联的子系统共同构成.

地质子系统、灾害子系统、生态子系统和工程子系统共同构成地质环境扰损区灾害生态化防治的作用体系(图2).地质子系统由地形地貌、岩性、地质构造和水文地质条件等要素构成,为灾害发生、生态恢复和工程建设提供基础边界(黄发明等, 2025);灾害子系统反映坡体失稳、侵蚀和物质迁移等扰损过程(Gill and Malamud, 2014);生态子系统由土壤、植被、微生物和水土过程等构成,承担固土护坡、径流调节和生境维持等功能(Cardinale *et al.*, 2012;Stokes *et al.*, 2014);工程子系统通过稳坡、排水、固土和基质构建等措施对灾害过程进行人工干预(Anderson *et al.*, 2022).

四个子系统之间具有明确的作用与反馈关系.地质条件塑造生态本底,并约束工程选址、结构形式和技术适用边界;工程建设及治理措施会改变局部地形、岩土结构和水分运移条件,同时对灾害过程形成干预.灾害活动则会破坏地质体完整性、工程设施和生态结构;生态子系统通过植被覆盖、根系加筋和土壤结构改善坡面侵蚀与浅表失稳,并与工程措施共同发挥防护作用.

1.3 地质环境扰损区灾害治理发展历程

地质环境扰损区灾害防治经历了由经验避险与避让、工程治理主导向工程-生态协同治理逐步演进的过程,其治理理念也由单纯规避灾害、强调结构强度,逐渐转向兼顾工程安全与生态适应性的系统治理(图3)(Rey *et al.*, 2019;刘传正和陈春利, 2020).

(1)经验避险与避让阶段.古代灾害防治主要依靠长期生产生活经验,通过迁避、绕避以及简单拦挡等方式降低灾害威胁,防护材料多就地取用石头、木材等天然材料.这类措施施工简单、具有一定柔性,但支护强度和耐久性相对有限,治理效果主要表现为局部拦挡和避险.

(2)工程治理主导阶段.进入20世纪以后,随着工程建设和现代岩土工程技术的发展,灾害治理逐渐形成以稳定性和结构强度控制为核心的"强度观".混凝土、钢筋、石灰等硬性材料得到广泛应用,抗滑、支挡、锚固及刚性护坡等工程措施成为主要治理手段,大幅提高了对灾害体的稳定控制能力与工程防护效果.但此阶段主要关注结构安全与抗灾能力,对坡面生态恢复、环境协调及长期生态适应性的考虑相对不足.

(3)工程-生态协同治理阶段.进入21世纪以后,灾害防治逐步由单一结构安全控制向工程安全与生态功能协同提升转变,治理理念由"强度观"进一步发展为面向生态地质环境整体恢复的"系统观".植生护坡、纤维材料等具有生态适应性和柔韧性的策略和材料与传统工程措施协同应用,在维持较高支护和防护能力的同时,进一步



图 3　地质环境扰损区灾害防治发展沿革

Fig.3　Evolution of hazard prevention and control in geologically disturbed areas

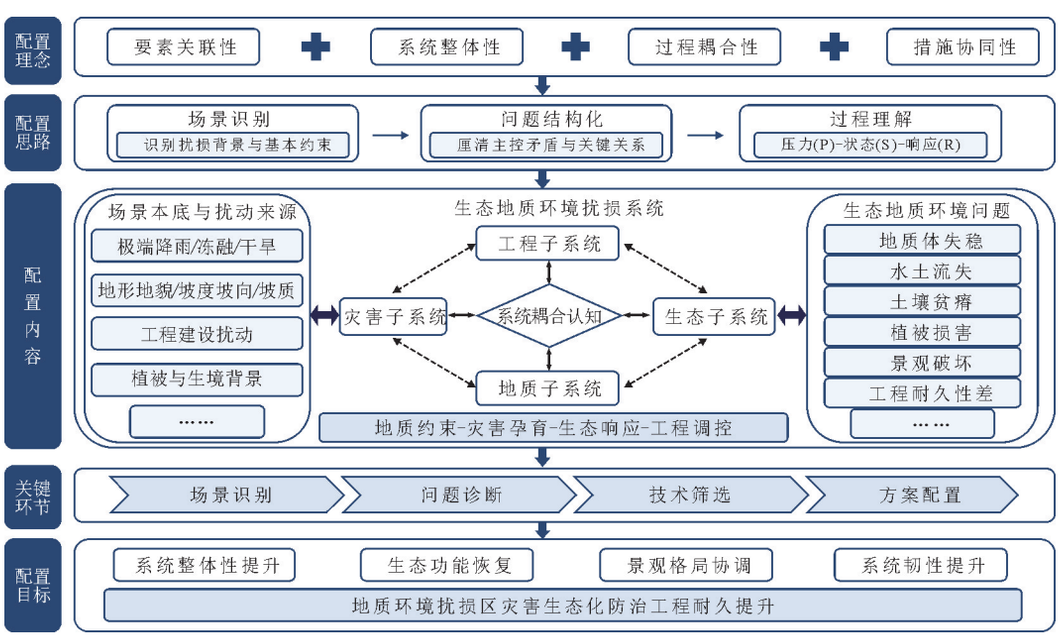

图 4　地质环境扰损区灾害生态化防治多元技术配置框架

Fig.4　Framework for multi-technology configuration in the ecological prevention and control of hazards in geologically disturbed areas

发挥固土、植被恢复、景观协调及生境改善等作用.灾害治理由单纯追求“拦得住、稳得住”逐步转向安全、生态和环境效益协同提升.

1.4　地质环境扰损区灾害生态化防治多元技术配置框架

地质环境扰损区灾害往往受到地质结构、地形地貌、气象水文、工程扰动、生态承载力、环境容量等因素综合影响(Reichenbach *et al.*, 2018),多元技术配置首先从生态地质环境系统整体出发,将工程、灾害、生态和地质视为相互联系、相互制约的有机整体.技术配置的重点不再只是选择某一种“有效技术”,而是通过判断治理对象所处的扰损背景、主控问题和关键约束(Gann *et al.*, 2019),明确不同措施在系统恢复中的功能位置及其相互关系.

在上述系统认知基础上,本文遵循要素关联性、系统整体性、过程耦合性和措施协同性的配置理念,构建了由场景识别、问题诊断、技术适配与协同配置组成的总体框架(图 4).从极端降雨、冻融、干旱等环境胁迫,以及地形地貌、坡度坡向、坡质组成、工程建设扰动和植被生境背景等维度,识别治

理场景的本底特征与关键约束;进一步将地质、灾害、生态和工程四个子系统纳入统一分析框架,厘清地质约束、灾害孕育、生态响应、工程调控的作用关系,诊断地质体失稳、水土流失、土壤质量降低、植被损害、景观破坏和工程耐久性差等主要生态地质环境问题.在此基础上,以问题诊断结果确定治理所需技术单元,以场景条件和工程边界开展候选技术适宜性筛选,并依据不同技术单元间的前置依赖、功能互补、兼容并存和制约冲突关系进行多元技术协同配置,最终实现系统整体性提升、生态功能恢复、景观格局协调和系统韧性提升.

2 地质环境扰损区灾害生态化防治多元技术配置方法

2.1 生态地质环境调查与问题诊断

2.1.1 场景类型划分 多维度场景分类能够反映扰损区治理对象的形成背景、物质基础和工程约束,为后续场景识别、问题诊断及技术适配评价提供分类依据(图 5)(赵冰琴等,2017).

灾害防治场景分类需综合考虑地形坡度、坡质成因、坡质和工程属性等因素.地形坡度反映坡面基本形态与治理难度,可依据坡面倾斜程度划分为微斜坡、缓坡、陡坡和崖坡等类型;坡质成因主要表征坡面的形成背景,包括工程挖填创面、工程结构体、自然斜坡和受损土地等,不同成因类型坡体在结构、扰动程度及生态恢复基础等方面存在明显差异.

依据坡面物质组成可将坡质划分为岩质、土石质和土质三类(Hu *et al.*, 2021),不同坡质在结构稳定性、抗蚀能力、持水保肥能力及植被建植条件等方面具有差异.对于工程扰动形成的治理对象,还需进一步结合工程属性进行分类,包括道路边坡、填方边坡、桥隧边坡、弃渣边坡和水利工程边坡等,以反映不同工程类型对坡面形态、施工条件及治理技术选择的影响.

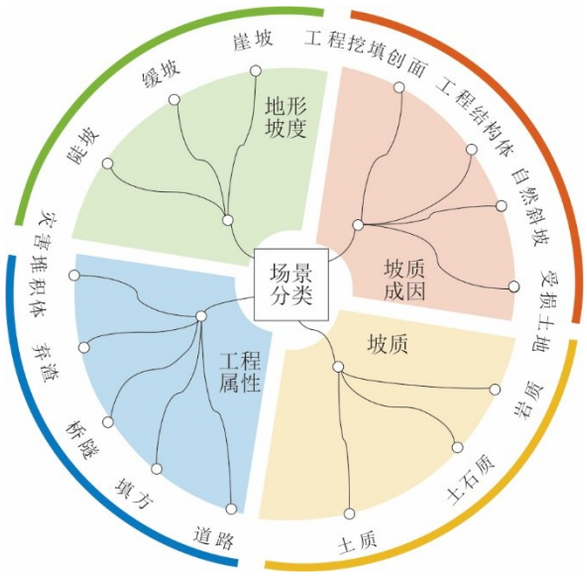

图 5 典型场景分类分树图

Fig.5 Hierarchical classification tree of typical scenarios

坡度和坡面物质为现在大多数技术筛选的优先考虑条件.为便于生态化防治技术的前期筛选,综合参考《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330—2013)、《水土流失危险程度分级标准》(SL/T 718—2015)、《土壤侵蚀分类分级标准》(SL 190—2008)、《边坡喷播绿化工程技术标准》

表 1 坡面物质组成-坡度分类及生态化防治配置指向

Table 1 Classification of slope material composition and slope gradient and its configuration orientation for ecological prevention and control

坡质		微坡 (<5°)	缓坡 (5°~15°)	斜坡 (15°~25°)	陡坡 (25°~35°)	急坡 (35°~45°)	险坡 (45°~55°)	崖坡 (55°~65°)	陡崖 (65°~75°)	崖壁 (>75°)
土质	松散土质	Ⅰ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	—	—	—	—
	粉土质	Ⅰ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅳ	—	—	—
	黏土质	Ⅰ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅳ	—	—
土石质	砂砾质	Ⅰ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	—	—	—	—
	砾石质	Ⅰ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅳ	—	—	—
	块碎石质	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅳ	—	—	—
岩质	强风化岩质	Ⅰ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅳ	—	—
	较软岩质	Ⅰ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅳ	—
	较硬岩质	Ⅰ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅳ
	坚硬岩质	Ⅰ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅳ

表 2　生态化防治场景属性

Table 2　Scenario attributes for ecological prevention and control

维度	一级分类	二级分类	属性描述	类型名称
环境	降雨	小雨/中雨/大雨/暴雨	日最大降雨量	降雨时序特征＋降雨等级;示例:集中型暴雨
	冻融	弱冻融/中等冻融/强冻融	年冻融循环次数、最低地表温度、最大冻结深度	冻融等级＋冻融频次特征;示例:严寒高频冻融
	干旱	无旱/轻旱/中旱/重旱/特旱	气象干旱指数	干旱等级＋水分亏缺特征;示例:中旱季节性失水坡面
	强风	一般大风/较强大风/特强大风	风力等级	风力等级＋风蚀扰动特征;示例:特强大风风蚀坡面
地形	坡度	缓坡/中等坡/陡坡/急坡/	坡度	坡面形态＋坡度等级;示例:直线急坡
	坡向	阴坡/半阴坡/半阳坡/阳坡	坡向(日照时长)	光热特征＋坡向等级;示例:长日照阳坡
	坡高	低边坡/中高边坡/高边坡	坡高及相对高差	高差特征＋坡高等级;示例:大高差高边坡
	坡面形态	直线形/凹形/凸形/阶梯形/复合形	坡面凹凸起伏、粗糙度、平整度,以及喷混凝土、浆砌石、格构等不同既有工程覆盖形式和完整程度	形态类型＋表面特征＋覆盖状态;示例:局部硬化凹形粗糙坡面
坡质	岩质	沉积岩/岩浆岩/变质岩	包括岩体、坚硬程度、岩体结构、软弱夹层等;坚硬程度以岩石饱和单轴抗压强度 R_c 划分,包括极软岩/软岩/较软岩/较坚硬岩/坚硬岩;风化程度:未风化、微风化、中等风化、强风化和全风化;岩体结构包括块状结构、层状结构、碎裂结构、散体结构;坡体结构包括顺层、斜向、反倾;软弱夹层及其与坡体结构的关系:顺向坡型、反向坡型、斜交坡型、横切坡型、无软弱夹层	坚硬程度或风化程度(成土能力＋特征元素＋岩石类型);示例:强风化富钾花岗岩
	土质	土质	第四纪成因:冲积土/风积土/湖积土/人工填土;土层厚度:薄层、中厚层、厚层、巨厚层	渗透性(高中低)＋特征元素＋二级类;示例:渗透性好富硒风积土
		泥质	第四纪成因:湖泥/海泥;泥层厚度:薄层、中厚层、厚层、巨厚层	有机质含量＋二级类;示例:富有机质湖泥
	土石质	砾石	第四纪成因:冲洪积砾/坡积砾/冰积砾/崩积砾/残积砾/泥石流堆积砾/滑坡堆积砾/人工堆积砾;堆积厚度:薄层堆积、中厚层堆积、厚层堆积、巨厚层堆积	方案一:土质含量＋特征组分＋二级类;示例:高含土硅质冲洪积砾石 方案二:级配结构＋母岩类型＋二级类;示例:均匀粗粒结构砂岩滑坡堆积砾
		沙砾	第四纪成因:冲洪积沙/风积沙/湖积沙/海积沙;沙层厚度:薄层、中厚层、厚层、巨厚层	分选性＋粒度(粗中细)＋特征元素＋二级类;示例:分选好粗粒硅质冲积沙
植物	植物盖度	低/中/高/极高覆盖	植被覆盖度	覆盖等级＋空间分布特征;示例:低覆盖斑块状植被坡面
	植物群落	单层/双层/多层结构	群落垂直结构层次	结构层级＋生长型组合特征;示例:双层结构(草本-灌木)群落坡面
	植物多样性	低/中/高多样性	物种丰富度	多样性等级＋群落稳定性特征;示例:低多样性单优势种群落坡面

(CJJ/T 292—2018)和《土地复垦质量控制标准》(TD/T 1036—2013),按照安全控制要求、水土流失危险程度和生态建植可行性,将坡面物质组成-坡度组合划分为Ⅰ～Ⅳ配置控制类别(表 1).

配置类别采用安全优先和最不利项控制原则.Ⅰ为生态措施主导区,适宜以土壤改良、植被恢复和水肥管护为主;Ⅱ为水土保持强化区,需加强坡面覆盖、截排水、抗蚀基质和根系固土;Ⅲ为工程-

表3 生态地质环境问题分类

Table 3 Classification of eco-geological environmental problems

维度	一级分类	二级分类	程度分级	量化描述
地质体稳定性问题	崩塌	滑移式 倾倒式 坠落式	不稳定/欠稳定/基本稳定/稳定	稳定性系数
	滑坡	牵引式 推移式	不稳定/欠稳定/基本稳定/稳定	稳定性系数
	泥石流	黏性 稀性	高易发/中易发/低易发	泥石流沟易发程度评判表得分
水土侵蚀问题	轻度/中度/强烈			侵蚀模数
土壤质量问题	有机质		低/中/高	有机质含量
	养分		低/中/高	有效磷、碱解氮、速效钾
	微生物		低/中/高	微生物量
	酸碱度		酸性/中性/碱性	pH值
植被损害问题	植物盖度		低/较低/中/较高/高	植被覆盖度
	植物多样性指数		低/中/高	香农多样性指数
景观破坏问题	景观多样性		低/中/高	景观多样性指数
	景观连通性		低/中/高	连通性指数
	色彩丰富度		单一/中等/丰富	色彩种类
	季节变化性		低/中/高	物候期
工程体耐久性问题	完整性		差/中/好	形态完整性系数
	疲劳寿命		短/中/长	达到疲劳破坏的循环次数或服役寿命
	老化速率		低/中/高	强度或性能随时间的衰减率

生态协同区，应在局部固土、水热调控或轻型防护基础上开展生态恢复；Ⅳ为安全控制优先区，应以清危、防护、锚固、支挡或分区固土为前置措施；当坡高、结构面、地下水及工程荷载等条件超出本表判别能力时，标记为“—”，并开展专项勘察和工程设计.表中结果仅用于技术配置阶段的初步筛选，不能替代稳定性计算及施工图设计.

2.1.2 场景属性识别 场景属性识别包括环境、地形、坡质和植物4个方面(表2).其中，环境条件主要反映降雨、冻融、干旱和强风等外部胁迫，决定坡面水热变化及侵蚀动力；地形条件包括坡度、坡向、坡高和坡面形态，坡面形态进一步考虑坡面凹凸起伏、粗糙度、平整度以及喷混凝土、浆砌石、格构等不同既有工程覆盖形式和完整程度；坡质条件包括岩质、土质和土石质等类型，重点描述坡面物质组成、成因来源、风化程度、结构特征及堆积厚度；植物条件包括植物盖度、群落结构和植物多样性，用于表征场地现有生态恢复基础.

2.1.3 生态地质环境问题诊断 基于多源生态地质环境调查，综合获取地质、水文、土壤、植被及工程等关键要素信息，识别灾害区生态地质环境特征及其主要制约因素.在此基础上，将生态地质环境问题归纳为6类：地质体失稳、水土流失、土壤质量降低、植被损害、工程耐久性差和景观破坏(Keesstra *et al.*, 2018；吕雅兰等，2026)，它们共同覆盖了从灾害孕育到生态与景观响应的关键过程，是灾害风险控制与系统恢复能力评价中不可回避的主控因子(表3).

基于多源、多尺度生态地质环境数据，综合分析地质、生态与工程等关键要素，识别灾害区生态环境状态及主要制约因素，判定生态问题关键参数及其影响程度，可为灾害生态防治工程的方案选择与技术配置提供依据.重点判识灾害防治工程中生态地质环境与工程措施协调性不足、技术对区域自然条件适应性不强、防治方案与治理对象适配度不高、灾害体资源化利用水平偏低以及技术装备与防治目标匹配不足等问题.

2.2 生态化防治技术功能划分

已有研究多依据修复对象、技术路径或实施方式对工程边坡生态修复技术进行归类(Wang *et al.*, 2021；Shen *et al.*, 2023)，面向多元技术方案的构建，还需进一步明确不同技术在治理过程中的功能定位及其相互关系.在此基础上，从工程作用对象、主导过程及技术在方案中的功能位置出发，围

表 4　生态化防治技术

Table 4　Fundamental technologies for ecological prevention and control

技术单元	技术亚类	主要措施	适用场景	核心功能	选用的关键标准
力学补强(稳坡)	清危	危岩清理、浮石清除	岩体破碎,坡面存在松动块体,崩落、碎落、掉块活动明显	消除局部不稳定源,降低崩塌落石风险	稳定性系数＜安全要求
	支挡	抗滑桩、挡土墙、石笼	坡体、堆积体存在滑坡风险,坡面松散物质溜滑	提高坡体稳定性	稳定性系数＜安全要求
	护坡	主/被动防护网、格构	岩体破碎,坡面存在松动块体,崩落、碎落、掉块活动明显,坡面侵蚀明显	提高坡面稳定性	侵蚀强度＞安全要求 稳定性系数＜安全要求
	锚固	土钉、锚索、锚杆	岩体破碎,坡体存在滑坡风险	提高坡体稳定性	稳定性系数＜安全要求
	注浆	注浆	裂隙发育岩体,松散土体	增强岩土体强度	岩土体抗剪强度＜安全要求
	拦挡	谷坊坝、拦挡坝	物源区,泥石流沟道	稳定物源,调控物源	来沙来石量＞坡脚可自然消纳能力
固土	表面固土	地膜覆盖、无纺布覆盖、植生袋/椰丝毯覆盖、纤维复合固土基材	坡面裸露面积大、土壤易流失	稳定坡面表层,减轻风蚀水蚀,促进植被建植	截排水后冲蚀强度＜固土抗蚀能力
	分区固土	格宾石笼、植生混凝土生态复绿、格构护坡	强冲蚀坡段,土质不良、易侵蚀边坡	对重点部位分区加固和固土,提高抗冲刷能力	整体边坡稳定性满足安全要求,局部坡段冲蚀强度＞表面固土抗蚀能力
水热调控(耐候)	保蓄水	土壤保水剂、生物炭	干旱或季节性缺水,土体保水性差	提升持水能力,缓解水分胁迫	土壤含水量＜植物正常生长需水下限,田间持水能力＜建植要求
	阻渗	地膜覆盖、土壤调理剂	表层结构松散、细粒流失强、渗漏明显	减少水分过快下渗和养分流失,稳定表层结构	下渗强度＞基质保水允许值,深层渗漏量＞坡面稳定允许值
	截排水	线性排水沟、砾石排水沟、暗沟排水沟、柔性排水沟、截水沟	降雨集中,坡面汇流明显,冲刷或渗透破坏风险高	调控地表与浅层水分运移	允许冲蚀水量＜汇水流量,坡面自然消纳水量能力＜汇水流量
	减蒸	遮阳网、生物炭、覆盖材料	蒸发强烈	减小蒸发,保水	蒸发强度＞表层供水能力,表层失水速率＞幼苗耐受范围
	隔热	遮阳网、生物炭、覆盖材料	高温、低温或冻融循环显著	缓解温度胁迫,减轻冻融劣化	温度波动幅度＞植物或基质耐受范围,冻融频次＞坡面材料耐受阈值
土壤改良(提质)	活力改良	微生物菌剂修复、生物炭改良技术	贫瘠、退化或受污染土壤	提高土壤活性与养分转化能力	土壤微生物量碳、总 PLFA 含量或关键酶活性＜相应恢复目标下限
	肥力改良	有机肥施用、缓释肥料	贫瘠、板结或养分不足土壤	补充养分,提升土壤肥力	有机质含量＜植物生长要求,有效养分含量＜恢复目标下限
	结构改良	土壤调理剂、生物炭改良技术、复配改良技术、天然高分子调理剂	土壤结构松散、团聚性差、保水性差区域	改善土壤结构、肥力与抗蚀性	土壤容重＞植物根系生长允许值,孔隙度或团聚体稳定性＜恢复目标下限
	土壤重构	客土喷播、种植土回填、三层重构、渣土熟化	土层缺失、基质贫瘠、剥离土或矿区复垦区	恢复成土条件,提供植物生长基底	有效土层厚度＜植物建植要求,细颗粒含量＜基质稳定下限

续表4

技术单元	技术亚类	主要措施	适用场景	核心功能	选用的关键标准
植被恢复(建植)	栽植	草皮移植、灌木植苗、乔灌草配置	平坦或微倾斜地面、恢复空间较大区域	建立稳定植被群落,提升覆盖度	有效土层厚度<植物根系生长下限,且土壤水分、养分条件满足栽植要求
	植生	生态袋、先锋植物配置、固土植物配置、耐旱植物配置、种子丸粒化	土质不良、易侵蚀边坡,贫瘠或干旱边坡	快速建植,固土护坡,改善微环境	袋体或植生结构稳定上限>坡面坡度,且表层基质保持能力>建植要求
	喷播	客土喷播、化工OH液植草、植生混凝土生态复绿	贫瘠土质边坡、风化岩边坡、垂直或陡峭坡面	快速形成覆盖,提高坡面抗蚀和绿化效率	坡面粗糙度和附着条件>喷播要求,且喷播后基材流失风险<允许值
景观融合(塑景)	连通性	生态滞留池、人工湿地	生境破碎、生态廊道中断的景区、保护地及滨水区域	加强景观与生境连通,提升水源涵养功能	生境连通度<恢复目标值,或斑块隔离程度>允许值,且项目具有明确的生态连通需求
	多样性	群落演替植被优化、复合草本+灌木绿化	群落结构单一、景观协调性较差的景区、城市边坡及矿山复绿区	提高景观多样性,增强生态功能	群落层次、物种丰富度或景观多样性<恢复目标值,且多样性提升属于项目明确目标
	季节变化性	立体绿化景观再造、仿生岩石景观塑造	具有明确季相和视觉协调需求的景区、自然遗产地及城市重要视域	提升景观季相表现和环境协调性	景观季相丰富度或全年景观持续性<目标值,且场地具有明确季相优化需求
水肥供给(管护)	水	滴灌、微喷灌	干旱、半干旱或恢复初期缺水区域	提供稳定水分供给,保障植被成活	土壤含水量<植物正常生长需水下限
	肥	有机肥施用、缓释肥料	贫瘠或板结土壤、坡地或沙地	提供持续养分支持,促进植被恢复	土壤肥力水平<恢复目标要求,或植物养分供应不足

绕岩土体受力、水热循环、土壤基质、植被群落、景观格局和水肥维持6个方面,将底层技术划分为力学补强、水热调控、土壤改良、植被恢复、景观融合和水肥供给6类技术单元,分别对应稳坡、耐候、提质、建植、塑景和管护等治理功能.同时,归纳各类技术的关键适用条件,包括适用坡度、温度范围、降雨条件及主要技术优势等,用于识别其工程适用边界、硬约束条件和优势应用场景(表4).

"力学补强"是构成生态载体和环境容器的地质安全保障,针对灾害场景中的整体与局部岩土体不稳,通过锚固、支挡、护坡、注浆、固土等力学强化措施提高坡体的抗拉、抗滑、抗剪能力."水热调控"和"土壤改良"构成地表生长基质层,承担生境营造功能;前者通过截排水、阻渗、保水、冻融缓冲等手段调节径流强度、入渗蒸发路径与温度场,削弱水动力和冻融对岩土体及表层基质的不利影响;后者通过土壤活力改良、肥力改良、结构改良等技术,在贫瘠或硬质基底上重建具备保水、保肥和抗蚀能力的类壤土结构;二者协同作用,可实现工程体向适宜植被定植与演替的生境转化,为生态恢复提供物质与水热基础."植被恢复"通过栽植、植生、喷播等技术形成生物群落层,通过优选乡土物种、构建多层次植物群落,利用根系加筋和冠层拦截等生态过程进一步提高表层土体的抗蚀与稳定能力,并通过蒸腾、遮蔽等过程调节坡面水热状况,增强系统对侵蚀、干旱和冻融等胁迫的综合响应能力.在结构安全和生态功能得到保障的前提下,"景观融合"可实现坡面形态与景观格局的空间重组与优化,通过平台与微地形整形、景观要素组织及视域控制,使工程体在景观连通性上与周边自然地貌相协调,最终实现安全性、生态性与景观感知的统一."水肥供给"贯穿全生命周期管养,为上述各层级提供运行保障,通过水肥一体化供给、补植补播、病害防控和日常巡查维护,保障植被建群与演替过程的稳定性(图6).

2.3 生态化防治技术适宜性评价

早期工程实践多依赖类似案例和技术人员经验进行措施选取,近年来逐步引入适宜性评价、多指标决策及综合效益分析方法,使技术选择能够综合考虑地质条件、环境约束、施工可行性与生态绩

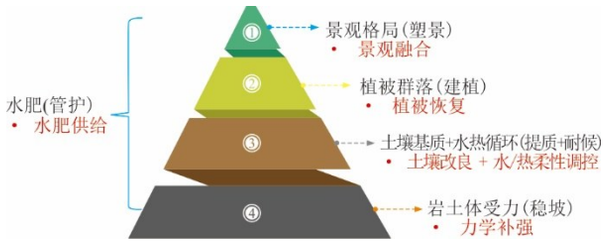

图 6　地质灾害生态化防治技术单元关系

Fig.6　Relationships among technical units for ecological prevention and control of geological hazards

效等因素(Liu *et al.*, 2022;Zhao *et al.*, 2025).随着复杂场景生态修复研究的深入,技术配置逐渐由单项适宜性判断转向多技术之间顺序衔接、空间组合及协同效应的系统优化(Metzger *et al.*, 2017).

AHP、TOPSIS、模糊综合评价等方法均属于多准则决策分析方法,主要用于指标权重确定、备选对象排序及模糊信息综合,其应用通常以已给定的候选方案集为前提.地质环境扰损区灾害生态化防治多元技术配置方法采用的指标标准化、熵权-CRITIC组合赋权及综合评分均为成熟的评价工具,重点在于将多指标评价嵌入地质灾害生态化防治技术配置过程,在评价前通过生态地质环境问题诊断和场景边界约束确定必要技术单元及候选技术范围,在评价后依据技术单元之间的前置依赖、功能互补、兼容并存和制约冲突关系生成多技术组合方案.

2.3.1　技术适宜性评价指标体系　在综合既有研究成果与工程实践经验的基础上,前人构建了多准则一体化的技术评价指标体系(Vaidya and Kumar, 2006;Huang *et al.*, 2011),以更为定量化的方式评价不同修复技术的适用条件.将“环境适宜性、场地适应性、工程针对性、目标匹配性”4个准则层维度作为技术适配的核心控制层面,从而实现对不同地质环境、不同灾害类型与不同治理目标下技术配置优劣的可度量表达.总体思路是以安全与红线约束为前提(Fell *et al.*, 2008),以过程与功能为抓手,以长期绩效为导向(Wortley *et al.*, 2013),通过分级指标与权重耦合,形成从单项技术到组合方案的评价框架.技术适宜性评价指标体系见表5.

在指标构成上,环境适宜性维度聚焦环境压力场(如降雨、冻融、干湿),反映修复技术对外界气候与环境胁迫的适应能力;场地适应性维度刻画介质与场地要素,包括地形(坡度、坡向、坡高)、坡质(岩质、土质、土石质),反映技术与地形地貌及土壤条件的适配性;工程针对性维度强调边坡不同成因类型,包括人工挖填边坡(路基边坡、隧道进出口边坡、公路边坡、矿山边坡等)、灾害创面(灾源区创面、运动侵蚀区创面、堆积区创面)、生态退化创面(沙化、荒漠化、石漠化)等,反映技术针对不同边坡成因类型的有效性;目标匹配性维度则关注功能与效益的达成度,以确保技术配置与修复目标之间的一致性,反映技术在既定生态修复方案中,对实现社会目标的贡献.

2.3.2　多元技术适宜性评价　为实现不同治理场景下生态化防治技术的定量筛选与组合优选,本文基于2.3.1节所构建的技术适宜性评价指标体系,建立了由指标评分、分层赋权、综合聚合、约束修正和方案生成组成的技术适宜性评价方法.设候选技术集合为 $T=\{t_1,t_2,\cdots,t_n\}$,准则层集合为 $C=\{A,B,C,D\}$,分别对应环境适宜性、场地适应性、工程针对性和目标匹配性;在每个准则层下进一步设置要素层与指标层.对任一候选技术 t_i,其在指标层第 k 个指标上的原始响应值记为 x_{ik},经无量纲化后得到标准化得分 $r_{ik}\in[0,1]$(Greco *et al.*, 2019).在此基础上,通过分层权重逐级聚合,得到技术 t_i 在目标场景下的综合适宜性得分 S_i,并生成候选技术清单与方案矩阵.该方法与前述指标体系一一对应,可将环境胁迫、场地条件、工程类型和目标需求统一纳入同一比较尺度.

(1)指标层评分.依据表5,指标层可分为区间适宜型、阈值型、类别匹配型和目标贡献型四类.对于区间适宜型指标,如耐最低温度、抗最大风蚀强度、抗最大水蚀强度、适应的最大坡度、适应的最大坡高、适应的最大孔隙率等,采用分段线性函数评分.设场景在指标 k 上的实际值为 x_k,技术 t_i 在该指标上的可接受区间为 $[L_{ik},U_{ik}]$,最优适宜区间为 $[L'_{ik},U'_{ik}]$,则其得分被定义为:

$$r_{ik}=\begin{cases}0, & x_k<L_{ik}\ \text{or}\ x_k>U_{ik}\\ \dfrac{x_k-L_{ik}}{L'_{ik}-L_{ik}}, & L_{ik}\leqslant x_k<L'_{ik}\\ 1, & L'_{ik}\leqslant x_k\leqslant U'_{ik}\\ \dfrac{U_{ik}-x_k}{U_{ik}-U'_{ik}}, & U'_{ik}<x_k\leqslant U_{ik}\end{cases},\quad(1)$$

当场景值落在技术最优区间内时取1,处于可接受边界与最优区间之间时按线性递减赋值,超出适用边界时赋值为0.该处理适用于环境适宜性和场地适应性中的大多数连续型指标.

对于阈值型指标,如耐受最小年降雨量、耐受

表 5 技术适宜性评价指标

Table 5 Technical suitability evaluation indicators

目标层	准则层	要素层	指标层	
			一级指标	二级指标
技术适宜性评价	A 环境适宜性	A_1抗蚀；A_2耐旱；A_3抗冻	$A_{1\text{-}1}$抗风蚀能力；$A_{1\text{-}2}$抗水蚀能力；$A_{2\text{-}1}$耐干旱能力；$A_{3\text{-}1}$耐低温能力	$A_{1\text{-}1\text{-}1}$抗最大风蚀强度(风蚀作用下固土能力)；$A_{1\text{-}2\text{-}1}$耐最大水蚀强度(水蚀作用下固土能力)；$A_{2\text{-}1\text{-}1}$耐受最大年蒸发量；$A_{2\text{-}1\text{-}2}$耐受最小年降雨量；$A_{3\text{-}1\text{-}1}$耐最低温度
	B 场地适应性	B_1地形；B_2坡质	$B_{1\text{-}1}$坡度适应能力；$B_{1\text{-}2}$坡向适应能力；$B_{2\text{-}1}$孔隙适应能力；$B_{2\text{-}2}$级配适应能力；$B_{2\text{-}3}$贫瘠适应能力	$B_{1\text{-}1\text{-}1}$适应的最大坡度；$B_{1\text{-}2\text{-}1}$适应的最小方位角(光照时间)；$B_{2\text{-}1\text{-}1}$适宜的孔隙率范围；$B_{2\text{-}1\text{-}2}$适应的最大含石量；$B_{2\text{-}2\text{-}1}$适应的最低细颗粒含量；$B_{2\text{-}3\text{-}1}$适应的最低有机质含量；$B_{2\text{-}3\text{-}2}$适应的最低养分含量
	C 工程针对性	C_1边坡成因	$C_{1\text{-}1}$开挖边坡；$C_{1\text{-}2}$堆积体边坡	$C_{1\text{-}1\text{-}1}$道路开挖边坡；$C_{1\text{-}1\text{-}2}$桥梁开挖边坡；$C_{1\text{-}1\text{-}3}$隧道开挖边坡；$C_{1\text{-}2\text{-}1}$弃渣堆积体边坡；$C_{1\text{-}2\text{-}2}$排土场边坡
	D 目标匹配性	D_1匹配参照系统；D_2时间要求；D_3成本要求；D_4景观需求	$D_{1\text{-}1}$匹配植被覆盖；$D_{1\text{-}2}$匹配物种丰富性；$D_{2\text{-}1}$匹配恢复时效；$D_{3\text{-}1}$匹配单位面积造价；$D_{3\text{-}2}$匹配后期管护成本；$D_{4\text{-}1}$匹配景观需求	$D_{1\text{-}1\text{-}1}$植被覆盖度(植被存活率)；$D_{1\text{-}2\text{-}1}$物种丰富度；$D_{2\text{-}1\text{-}1}$植物生长速度；$D_{2\text{-}1\text{-}2}$达到参照生态系统时间；$D_{3\text{-}1\text{-}1}$单位面积造价；$D_{3\text{-}2\text{-}1}$后期管护成本；$D_{4\text{-}1\text{-}1}$景观多样性；$D_{4\text{-}1\text{-}2}$景观连通性；$D_{4\text{-}1\text{-}3}$景观季节变化性

最短光照时间、适应的最低细颗粒含量、最低有机质含量和最低养分含量等，设技术 t_i 对指标 k 的阈值要求为 θ_{ik}，则得分可表示为：

$$r_{ik}=\begin{cases}1, & x_k\geqslant\theta_{ik}\text{(正向阈值)}\\ 0, & x_k<\theta_{ik}\end{cases}. \tag{2}$$

若考虑临界过渡带，可进一步引入缓冲区间 $\left[\theta_{ik}^{-},\theta_{ik}\right]$，在该区间内采用线性插值赋予 0～1 的过渡值．对于类别匹配型指标，主要对应工程针对性中的道路开挖边坡、桥梁开挖边坡、隧道开挖边坡、弃渣边坡、滑坡堆积体边坡、崩塌堆积体边坡、泥石流堆积体边坡及崩滑灾害物源减损边坡等，设场景类别为 q_k，技术 t_i 的适用类别集合为 Ω_{ik}，则可定义：

$$r_{ik}=\begin{cases}1, & q_k\in\Omega_{ik}^{(1)}\\ 0.5, & q_k\in\Omega_{ik}^{(2)}\\ 0, & q_k\notin\Omega_{ik}\end{cases}, \tag{3}$$

其中，$\Omega_{ik}^{(1)}$ 表示完全匹配类别集合，$\Omega_{ik}^{(2)}$ 表示可替代适用但效果受限的基本匹配集合．这样可将工程类型由定性判断转换为离散可计算变量．

对于目标贡献型指标，如植被覆盖度、物种丰富度、植物生长速度、达到参照生态系统时间、单位面积造价、后期管护成本、景观多样性、景观连通性和景观季节变化性等，可根据技术对目标达成的贡献强度进行分级赋值．对正向指标，采用：

$$r_{ik}=\frac{x_{ik}-x_k^{\min}}{x_k^{\max}-x_k^{\min}}, \tag{4}$$

对逆向指标，采用：

$$r_{ik}=\frac{x_k^{\max}-x_{ik}}{x_k^{\max}-x_k^{\min}}, \tag{5}$$

其中，$x_k^{\max}$ 和 $x_k^{\min}$ 分别为样本集中指标 k 的最大值和最小值．若缺乏连续观测数据，也可按“高、较高、中、低”赋值为 1.00、0.75、0.50、0.25．经上述处理后，可得到技术 t_i 在全部指标层上的标准化评分向量．

$$\boldsymbol{r}_i=(r_{i1},r_{i2},\cdots,r_{im}). \tag{6}$$

(2)分层权重确定．本文已构建“目标层-准则层-要素层-指标层”的层级结构，权重亦按层级分别确定．设准则层权重向量为：

$$\boldsymbol{W}^{(c)}=(w_A,w_B,w_C,w_D),\ \sum w_c=1, \tag{7}$$

其中，w_A、w_B、w_C、w_D 分别对应环境适宜性、场地适应性、工程针对性和目标匹配性．对任一准则层 c，其下设要素层权重向量为：

$$\boldsymbol{W}_c^{(e)}=(w_{c1},w_{c2},\cdots,w_{cp_c}),\ \sum\nolimits_j w_{cj}=1, \tag{8}$$

对任一要素层 j，其下指标层权重向量为：

$$\boldsymbol{W}_{cj}^{(i)}=(w_{cj1},w_{cj2},\cdots,w_{cjq_j}),\ \sum\nolimits_l w_{cjl}=1, \tag{9}$$

则指标 l 的全局权重可写为：

$$\omega_{cjl}=w_c\cdot w_{cj}\cdot w_{cjl}, \tag{10}$$

并满足：

$$\sum\nolimits_c\sum\nolimits_j\sum\nolimits_l w_{cjl}=1. \tag{11}$$

为降低单一赋权方式带来的偏差,指标层和要素层可采用熵权法与CRITIC法的组合赋权.设熵权法得到的权重为w_{cjl}^{E},CRITIC法得到的权重为w_{cjl}^{C},则组合权重记为:

$$w_{cjl}=\alpha w_{cjl}^{E}+(1-\alpha)w_{cjl}^{C},\ 0\leqslant\alpha\leqslant1. \tag{12}$$

要素层权重亦可按相同方式构建.指标权重用于表征不同评价指标在候选技术之间的信息差异及区分能力,不用于表达评价者对特定场景的主观偏好.本文采用熵权法和CRITIC法分别计算指标权重.熵权法依据指标评价值的离散程度确定权重,CRITIC法综合考虑指标的变异性及指标间冲突性,两者按照等比例组合并归一化,得到最终客观权重:

$$w_j=\frac{0.5w_j^{\mathrm{E}}+0.5w_j^{\mathrm{C}}}{\sum_{j=1}^{n}\left(0.5w_j^{\mathrm{E}}+0.5w_j^{\mathrm{C}}\right)}, \tag{13}$$

其中,w_j^{E}和w_j^{C}分别为第j项指标的熵权法权重和CRITIC法权重,w_j为组合后的客观权重.准则层权重由其下属指标的全局权重汇总获得,不再设置人为情景修正系数.

场景差异不通过调整权重表达,而是分别在指标评分和硬约束筛选环节体现.对于连续型指标,根据场景实测值与技术最优区间、可接受区间之间的关系计算适宜性得分;对于分类变量,根据场景类型与技术适用类别的匹配程度赋值;对于稳定性、坡度、坡高、施工可达性、既有工程兼容性和生态保护红线等约束,不满足要求的技术直接从候选集中剔除.由此,客观权重负责表征指标的信息贡献,场景参数负责表征技术与治理对象的匹配程度,避免同一场景因素同时通过评分和权重修正被重复计入.

(3)分层聚合与综合适宜性得分.在得到指标层标准化得分r_{ik}及其全局权重ω_k后,可分层计算技术t_i的适宜性得分.首先,技术在要素层j上的得分为:

$$E_{ij}=\sum_{l=1}^{q_j}w_{jl}r_{ijl}, \tag{14}$$

其次,在准则层c上的得分为:

$$C_{ic}=\sum_{j=1}^{p_c}w_{cj}E_{ij}, \tag{15}$$

最终,技术t_i的综合适宜性得分为:

$$S_i=\sum_{c=1}^{4}w_cC_{ic}. \tag{16}$$

根据综合适宜性得分可将候选技术划分为四级:当$S_i\geqslant0.80$时为Ⅰ级优选技术,可作为主体技术优先纳入配置方案;当$0.60\leqslant S_i<0.80$时为Ⅱ级必要补充技术,可在补足主体技术短板或适应局部空间差异时作为配套技术;当$0.40\leqslant S_i<0.60$时为Ⅲ级条件技术,原则上不单独成项,仅在与主体技术存在功能嵌入或过程支撑关系时纳入;当$S_i<0.40$时为Ⅳ级不选技术,不进入方案配置.必要时,还可引入关键短板约束,即当某一硬约束相关准则层得分低于阈值η时,即使综合得分较高,仍不进入优先推荐集合.设该约束函数为:

$$\delta_i=\begin{cases}1, & \min(C_{iA},C_{iB},C_{iC})\geqslant\eta\\ 0, & \text{otherwise}\end{cases}, \tag{17}$$

则修正后的技术适宜性得分为:

$$S_i^{*}=\delta_iS_i. \tag{18}$$

(4)工程约束筛选.综合得分较高并不意味着技术一定可实施,因此需进一步进行工程约束筛选.设技术t_i的第h个工程硬约束判别函数为:

$$g_{ih}=\begin{cases}1, & z_h\leqslant z_{ih}^{\max}\text{ 或 }z_h\in\Gamma_{ih}\\ 0, & \text{otherwise}\end{cases}, \tag{19}$$

其中,z_h为场景在约束条件h上的实际值,$z_{ih}^{\max}$为技术t_i的可接受上限,Γ_{ih}为其允许类别集合.则技术的工程可行性函数可写为:

$$G_i=\prod_{h=1}^{H}g_{ih}, \tag{20}$$

若$G_i=0$,则说明该技术至少违反一个硬约束条件,应从候选集中剔除;若$G_i=1$,则进入后续优选.坡度、坡高、施工可达性、既有支护兼容性及生态红线约束等均可纳入该判别函数.

(5)技术清单生成与矩阵表达.设第m个技术单元中的候选技术集为:

$$U_m=\left[T_{m1},T_{m2},\cdots,T_{mN_m}\right]. \tag{21}$$

对于某一具体场景,从各技术单元中选择一个或若干技术进行组合,可形成一个备选方案.第q个技术方案可表示为:

$$P_q=\left[T_{1a}|T_{2b}|T_{3c}|T_{4d}|T_{5e}|T_{6f}\right]^{\mathrm{T}}, \tag{22}$$

其中,$T_{1a},T_{2b},\cdots,T_{6f}$分别表示从6类技术单元中筛选出的具体技术;若某一技术单元在该场景中不启用,则记为0.由此,可将多个备选方案进一步组织为方案矩阵:

$$\boldsymbol{P}(S)=\begin{bmatrix}t_{11} & t_{12} & \cdots & t_{1K}\\ t_{21} & t_{22} & \cdots & t_{2K}\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ t_{M1} & t_{M2} & \cdots & t_{MK}\end{bmatrix}, \tag{23}$$

其中,K为方案数量,M为技术单元数量,矩阵中每一行表示一个技术单元,每一列表示一个完整技术配置方案,元素t_{mq}表示第q个方案在第m个技术单元中所选取的具体技术;当该技术单元未启用时,$t_{mq}=0$.

因此,方案矩阵$P(S)$也可写为:

$$P(S)=\left[P_1,P_2,\cdots,P_q,\cdots,P_K\right], \quad (24)$$

其中,每一列向量P_q对应一个完整的技术配置方案.

2.4 生态化防治多元技术有机配置过程

技术清单及适宜性评价解决的是候选技术的识别与筛选问题,但单项技术适宜并不意味着其组合后能够形成合理的治理方案.实际工程中,不同生态地质环境问题往往同时存在,且各技术单元之间具有一定的实施顺序、功能依赖和相互制约关系.因此,在技术适宜性评价基础上,还需进一步将分散的候选技术按照治理目标、场景约束及技术间的协同关系进行组合,实现由"单项技术筛选"向"整体方案配置"的转化.

本文构建了"场景识别-问题诊断-技术筛选-方案配置"的技术配置流程.首先,根据环境胁迫、地形地貌、坡质条件、工程类型以及安全、生态和施工条件等场景边界,对候选技术进行约束;其次,以地质体失稳、水土流失、生境退化等主要问题作为配置入口,确定需要参与治理的技术单元及其功能优先级;在此基础上,利用环境适宜性、场地适应性、工程针对性和目标匹配性评价结果,对各技术单元内部候选技术进行筛选.最终进行技术组合,形成适用于特定场景的多元技术配置方案.

不同场景所涉及的问题类型、主控因素及治理目标不同,并非所有技术单元均需同时配置(Rey *et al.*, 2019).配置过程中应根据问题诊断结果确定必要单元,并结合技术间的前置依赖、功能互补及约束关系调整实施顺序和组合方式.

(1)力学补强配置.力学措施作为涉及坡体安全场景的优先配置单元.首先依据边坡稳定性、变形破坏特征及坡面表层稳定状态,判断是否需要进行整体稳坡或局部表层固持;随后从相应候选技术集中选择与失稳模式和坡面条件相匹配的措施.其配置结果可作为后续水热调控、土壤重构和植被建植的基础边界,避免在坡体稳定条件尚未满足时直接实施生态恢复措施.

(2)水热调控配置.在坡体基本稳定的基础上,根据汇水、径流、入渗、蒸发及冻融等过程识别主要水热胁迫,并判断其是否超过后续土壤和植被恢复的承受范围.优先控制可能持续造成冲刷、渗漏或生境恶化的水热过程,再根据剩余水热胁迫选择保蓄水、减蒸或隔热等辅助措施,为土壤和植被提供适宜的水热条件.

(3)土壤改良配置.土壤配置以满足植物建植和坡面基质稳定的最低条件为目标.首先评价现状土壤是否具备原位利用条件,再根据限制因素分别判断结构、肥力和活力改良需求;当原有土层厚度、组成或稳定性不能满足植生要求时,再进入土壤重构阶段.由此形成由原位利用、局部改良、整体重构逐级递进的配置路径,避免不必要的客土和大规模基质替换.

(4)植被恢复配置.植物配置在坡体安全、水热条件和植生基底达到基本要求后实施.首先根据气候、立地条件和生态目标筛选适生植物,再结合固土、截流、生境恢复等功能需求进行群落组合.配置重点不是单一植物种类优选,而是使植物功能与坡面不同空间部位及前序工程措施相匹配,实现植物措施与稳坡、水土调控和土壤措施之间的协同.

(5)景观融合配置.景观配置属于安全与生态功能基本满足后的优化环节.根据场地景观敏感程度、裸露程度及与周边生态系统的衔接关系,对前述工程和生态措施进行空间整合,重点优化坡面形态、群落结构及生境连续性,使治理措施在满足功能要求的同时与周边环境协调.

(6)水肥供给配置.管护措施贯穿生态恢复后的持续运行阶段.根据植被建植状态、土壤水肥条件及前期治理措施运行效果确定管护需求,并依据恢复过程中的反馈动态调整灌溉、养分补给、补播补植等措施.其作用在于对前述配置方案进行持续校正,使一次性的技术组合转化为可动态调节的恢复过程.

2.5 生态化防治技术配置效益评估框架

在形成面向具体治理场景的多元技术配置方案后,进一步构建基于多元技术配置思路的生态化防治技术配置成效评估框架.设场景S下第i个技术配置方案为P_i,其基础总效益记为$U_0(P_i,S)$.其中,$U_0(P_i,S)$表示在不考虑技术间增益传递条件下,方案中各入选技术基础效益的加权综合,可写为:

$$U_0(P_i,S)=\sum_{m=1}^{M}\omega_m u_0(t_{im},S), \quad (25)$$

其中,t_{im}为方案P_i在第m个技术单元中选取的技术,$u_0(t_{im},S)$为其在场景S下的基础效益,ω_m为技术单元权重.

进一步考虑技术配置过程中不同技术单元及其层级之间存在增益传递与协同放大作用,分别引入跨单元级联增益系数$G(P_i,S)$、单元内递进增益系数$V(P_i,S)$和协同耦合增益系数$H(P_i,S)$.其中,G表征不同技术单元之间的横向级联作用,V表征同一技术单元内部沿层级方向的递进作用,H表征相邻技术单元与相邻层级之间的协同耦合作用.

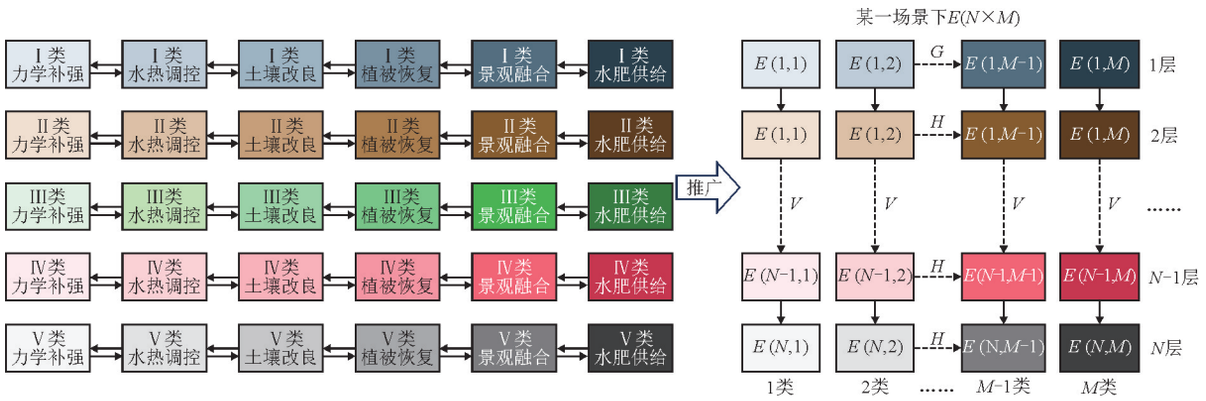

图 7　生态化防治技术配置方案效益评估矩阵

Fig.7　Benefit evaluation matrix for ecological prevention and control technology configuration schemes

由此,方案P_i在场景S下的最终总体效益可表示为:

$$U(P_i,S)=U_0(P_i,S)\cdot G(P_i,S)\cdot V(P_i,S)\cdot H(P_i,S), \tag{26}$$

该式表明,技术配置方案的总体效益本质上是基础总效益在多重增益机制共同作用下形成的综合结果.通过计算备选方案矩阵中各方案对应的$U(P_i,S)$,可实现不同技术配置方案间的定量比较与优选(图 7).

3　震后九寨沟地质灾害生态化治理技术配置

3.1　熊猫海崩塌堆积体技术适宜性评价与配置方案

3.1.1　场景特征与治理目标　熊猫海崩塌堆积体位于九寨沟景区熊猫海左岸,整体处于基本稳定状态,主要问题为中上部浅表层局部溜滑、强降雨条件下坡面冲蚀和泥沙入湖,而非整体失稳.生态修复对象坡面平均坡度约 37°,表层以碎块石为主,土层厚度仅 5~15 cm,植被恢复受到明显限制.堆积体上部汇水区约 0.05 km^2,中部冲沟长约 120 m,侵蚀已发展至溯源侵蚀阶段;既有排水渠和坡面防护工程被部分冲毁,表明径流调控与拦截停滤是该场景的关键治理环节.主要治理需求为局部固源防护、坡面径流调控、原位土壤重构、泥沙入湖控制.

3.1.2　候选技术评价与权重计算　依据表 6 的"主控问题-技术单元"索引,先从表 4 技术库中提取与熊猫海场景直接相关的技术亚类,再进行工程硬约束校核.案例区堆积体整体处于基本稳定状态,主要为中上部浅表层局部溜滑,不具备整体锚固、注浆或大规模支挡的必要条件;强降雨汇流、37°左右高陡坡面、5~15 cm 薄层高砾基质及景观敏感性构成主要配置约束.因此,清危、锚固、注浆、拦挡和隔热等与主控问题不直接对应或缺乏触发条件的技术不进入评价集,支挡作为传统稳定控制技术保留用于对照.最终形成 14 项候选技术.综合得分仅用于同一技术单元内部排序,不用于不同技术单元之间横向比较,是因为各技术单元承担的治理功能不同.候选技术采用A环境适宜性、B场地适应性、C工程针对性和D目标匹配性 4 个准则层进行评价,其中,A主要依据技术对强降雨冲刷、坡面汇流和浅表冲蚀的控制能力;B主要依据其对 37°左右高陡坡面、薄层高砾基质和局部溜滑部位的适应性;C主要依据其对崩塌堆积体边坡、冲沟发育坡面及景区生态化防治技术配置对象的针对性;D主要依据其对泥沙入湖控制、植被建植、景观协调和后期管护目标

表 6　熊猫海崩塌堆积体问题诊断与技术单元索引

Table 6　Problem diagnosis and technical unit indexing for the Panda Lake collapse deposit

主控问题	场景表现	索引技术单元	配置重点
局部失稳	堆积体整体稳定,中上部局部溜滑	力学补强	分区固土
水土流失	汇水量大、冲沟发育	水热调控	截排水、阻渗
土壤质量降低	石砾含量高、植生基质不足	土壤改良	土壤重构、土壤结构改良
植被损害	自然恢复能力弱	植被恢复	适坡植生、乡土群落配置
景观破坏	裸露坡面景观协调	景观融合、水肥供给	景观优化、恢复期管护

表7 熊猫海崩塌堆积体候选技术准则层赋值矩阵

Table 7 Criterion-level scoring matrix for candidate technologies in the Panda Lake collapse deposit

技术单元	候选技术	*A*	*B*	*C*	*D*
力学补强	支挡	0.50	0.50	0.25	0.25
	分区固土	1.00	1.00	1.00	0.75
水热调控	截排水	1.00	1.00	1.00	1.00
	阻渗	0.75	0.75	0.75	0.75
土壤改良	肥力改良	0.25	0.50	0.50	0.75
	结构改良	0.75	1.00	0.75	0.75
	土壤重构	1.00	1.00	1.00	1.00
植被恢复	栽植	0.25	0.25	0.25	0.50
	植生	0.75	1.00	1.00	1.00
	喷播	0.75	0.75	0.75	0.75
景观融合	多样性提升	0.50	0.75	0.75	1.00
	季节变化性优化	0.25	0.50	0.25	0.75
水肥供给	水分供给	0.50	0.75	0.75	0.75
	肥力供给	0.25	0.50	0.50	0.50

的贡献程度.由于案例区部分技术缺乏连续性能参数,采用五级分级赋值,完全匹配、较匹配、一般匹配、弱匹配和不匹配被分别赋值为1.00、0.75、0.50、0.25和0.各项赋值均依据表5中的适用场景和关键标准,并与3.1.1节的现场参数逐项对照,具体结果见表7.

具体赋值逻辑如下:力学补强单元中,堆积体整体基本稳定,仅局部浅表溜滑,因此分区固土与场景高度匹配,而大尺度支挡的必要性及景观兼容性较低;水热调控单元中,上部汇水区、冲沟发育以及既有排水设施受损使截排水成为核心技术,阻渗仅用于重点部位;土壤改良单元中,5~15 cm薄层高砾基质决定土壤重构优先于单独肥力改良,结构改良作为配套;植被恢复单元中,37°左右坡面限制常规栽植,适坡植生优于喷播和栽植;景观融合单元中,景区视域敏感使多样性提升优于单纯季相优化;水肥供给单元中,水分供给主要服务恢复初期,肥力供给则并入土壤改良和后期管护.

3.1.3 客观权重计算与技术排序 根据2.3节所提出的方法,熵权法依据候选技术在各准则上的离散程度确定信息权重,CRITIC法综合评价值的变异性及准则间冲突性确定对比强度.两类权重按等比例组合,并在保留4位小数后归一化,结果见表8.该处理使权重完全由候选技术评分计算获得.

候选技术综合适宜性得分按下式计算:S_i=0.337 3A_i+0.183 3B_i+0.243 4C_i+0.236 0D_i.以分区固土为例,其A、B、C、D得分分别为1.00、1.00、1.00和0.75,则S=0.337 3×1.00+0.183 3×1.00+0.243 4×1.00+0.236 0×0.75=0.941,位列力学补强单元第1位.支挡得分为0.380,位列该单元第2,因此不作为主体技术.

表8 熊猫海崩塌堆积体技术适宜性评价客观权重

Table 8 Objective weights for technical suitability assessment of the Panda Lake collapse deposit

准则层	熵权法权重	CRITIC权重	客观权重
*A*环境适宜性	0.364 7	0.309 8	0.337 3
*B*场地适应性	0.190 5	0.176 0	0.183 3
*C*工程针对性	0.298 9	0.188 1	0.243 4
*D*目标匹配性	0.145 9	0.326 1	0.236 0
合计	1.000 0	1.000 0	1.000 0

为明确排序结果与方案筛选之间的对应关系,将候选技术划分为4级:$S\geqslant0.80$为Ⅰ级优选技术;$0.60\leqslant S<0.80$为Ⅱ级必要补充技术;$0.40\leqslant S<0.60$为Ⅲ级条件技术,仅作为关联技术的嵌入或配套过程;$S<0.40$为Ⅳ级不选技术.若某一技术违反边坡安全、适用坡度、施工可达性、既有工程兼容性或生态保护要求,则不论得分高低均直接剔除.技术排序与筛选结果见表9.

表9表明,分区固土、截排水、土壤重构和植生在各自技术单元内均排名第1且达到Ⅰ级,构成方案的主体技术.结构改良、阻渗和喷播虽处于Ⅱ级,但分别与土壤重构、截排水和植生存在前置依赖或功能互补关系,因此作为配套技术.景观融合和水肥供给单元无Ⅰ级技术,但问题诊断已明确景观协调与恢复期管护需求,故选取单元内排名第1的多样性提升和水分供给作为目标导向的补充技术.肥力改良和肥力供给为Ⅲ级,不单独形成措施,而是嵌入土壤重构及后期管护过程;支挡和栽植得分低于0.40,不进入方案.

3.1.4 多元技术配置方案 结合表6结果,在各单元内优先选取Ⅰ级且排名第1的技术,Ⅱ级技术仅在能够补足主体技术短板或适应局部空间差异时纳入,Ⅲ级技术只作为嵌入过程,Ⅳ级技术予以剔除;最后校核技术间的前置依赖、功能互补、兼容并存和制约冲突关系.具体而言,先以分区固土控制局部溜滑和表层松散物质,再以截排水削减坡面汇流并在重点部位局部阻渗;在水土过程基本受控后开展土壤重构,并配合结构改良和适量肥力补给;随后采用适坡植生形成乡土草灌群落,局部采用喷播补充覆盖;最终通过群落多样性提升和恢复期水分供给维持景观协调与植被建群.

表 9　熊猫海崩塌堆积体候选技术综合得分、排序及筛选结果

Table 9　Comprehensive scores, rankings and screening results of candidate technologies for the Panda Lake collapse deposit

技术单元	候选技术	综合得分 S	单元内排序	筛选等级	方案去向
力学补强	支挡	0.380	2	Ⅳ	不选
	分区固土	0.941	1	Ⅰ	主体技术
水热调控	截排水	1.000	1	Ⅰ	主体技术
	阻渗	0.750	2	Ⅱ	局部配套
土壤改良	肥力改良	0.475	3	Ⅲ	嵌入土壤重构过程
	结构改良	0.796	2	Ⅱ	配套技术
	土壤重构	1.000	1	Ⅰ	主体技术
植被恢复	栽植	0.309	3	Ⅳ	不选
	植生	0.916	1	Ⅰ	主体技术
	喷播	0.750	2	Ⅱ	局部补充
景观融合	多样性提升	0.725	1	Ⅱ	目标导向优选
	季节变化性优化	0.414	2	Ⅲ	不作为重点
水肥供给	水分供给	0.666	1	Ⅱ	恢复期配置
	肥力供给	0.416	2	Ⅲ	并入土壤改良与管护

表 10　熊猫海崩塌堆积体多元技术配置方案及形成依据

Table 10　Multi-technology configuration scheme and selection basis for the Panda Lake collapse deposit

配置过程	主体技术及排序	配套或嵌入技术	适用部位	形成依据
力学措施	分区固土(0.941,Ⅰ级,第1)	表面覆盖、局部生态袋固土	中上部局部溜滑区、坡面强侵蚀区	控制局部溜滑和表层松散物质流失,避免大尺度支挡对景观和坡体的扰动
水热调控	截排水(1.000,Ⅰ级,第1)	局部阻渗(0.750,Ⅱ级,第2)、消能分流	坡顶汇水区、冲沟及坡面汇流路径	优先削减集中汇流和冲沟冲刷,并控制重点部位深层入渗
土壤改良	土壤重构(1.000,Ⅰ级,第1)	结构改良(0.796,Ⅱ级,第2)、肥力改良(Ⅲ级嵌入)	薄层高砾坡面、植生层缺失区	先补足有效土层,再改善级配、持水和养分条件,构建稳定植生基质
植物恢复	植生(0.916,Ⅰ级,第1)	局部喷播(0.750,Ⅱ级,第2)、乡土草灌配置	分区固土区、重构植生层及坡面恢复区	适应高陡松散坡面,兼顾快速覆盖、根系固土和近自然恢复
景观融合	多样性提升(0.725,Ⅱ级,第1)	近自然群落优化	裸露坡面、工程措施外露区及湖岸视域敏感区	该单元无Ⅰ级技术,按目标必要性选取单元内排名第1技术,提高自然度和景观协调性
水肥供给	水分供给(0.666,Ⅱ级,第1)	肥力供给(Ⅲ级嵌入)、补植补播和坡面巡查	恢复初期植被建植区及水分亏缺区	保障恢复初期成活率,并根据植被长势和坡面状态动态调整管护

由此形成“分区固土–截排水与局部阻渗–土壤重构与结构改良–乡土草灌植生与局部喷播–近自然群落优化–恢复期水分管护”的生态化防治技术配置方案.表10中的表面覆盖、生态袋固土、消能分流、乡土草灌配置及补植补播属于入选技术亚类的工程化实施形式,不再作为独立候选技术重复赋分,从而保证评价层级与方案表达的一致性.

3.2　九寨沟地质灾害生态化防治技术配置成效

受案例区既有监测条件限制,熊猫海崩塌堆积体缺少治理前后全过程连续监测及单项技术对照数据,尚不具备多技术协同效应和综合效益的计算条件.因此,本次针对治理试验区具有明确数据来源的水土保持与土壤生境指标进行配置成效验证.

九寨沟地质灾害生态化防治技术配置方案在维持地质体基本稳定的基础上,提高了坡面水土保持能力.2024年,在堆积体治理区和未治理对照区坡脚分别采集表层土壤样品,并根据土壤颗粒组成、有机质含量等参数,采用EPIC模型计算土壤可蚀性 K 值.结果表明,治理区 K 值为0.46,对照区为0.52,治理区较对照区降低11.5%,表明治理区表层土壤抗侵蚀能力有所提高.在降雨强度为150 mm/h、历时为30 min的人工降雨冲刷试验中,治理区土壤流

失量较未治理对照区减少90%以上,这可能与坡面覆盖增加、地表径流削减及表层土壤抗蚀能力提高共同作用有关.同时,治理区坡脚土壤黏粒含量由对照区的1.94%提高至2.66%,说明治理措施对迁移细颗粒具有一定的截留和富集作用.进一步在治理区和自然恢复区采集表层土壤样品,对土壤总有机碳(TOC)、全氮(TN)、全钾(TK)、全磷(TP)、有效磷(AP)和速效钾(AK)进行测定.结果表明,治理区上述土壤养分指标整体高于自然恢复区,说明人工调控措施改善了坡面土壤养分状况,并可能促进碳、氮、磷和钾等养分的积累.

4 结论

地质环境扰损区灾害生态化防治涉及坡体稳定、水土流失、土壤生境重构和植被恢复等多重目标,技术选择需要同时考虑治理问题、场景条件和工程约束.本文构建了"场景识别-问题诊断-技术筛选-方案配置"的多元技术配置方法,主要结论如下:

(1)基于地质、灾害、生态和工程四个子系统之间的相互作用关系,建立了面向地质环境扰损区的多元技术配置框架,将环境胁迫、场地条件、工程类型和治理目标等关键因素纳入统一配置过程,实现了从治理场景识别、关键问题诊断到适宜技术筛选与方案组合配置的系统衔接.

(2)根据技术的主导作用对象和功能位置,将技术归并为力学补强、水热调控、土壤改良、植被恢复、景观融合和水肥供给六类技术单元,建立了生态地质环境问题与技术单元之间的对应关系,为候选技术检索和组合提供了分类基础.

(3)构建了环境适宜性、场地适应性、工程针对性和目标匹配性四维评价体系,采用熵权法与CRITIC法等比例组合确定客观权重.不同场景的差异通过实测指标评分、类别匹配和工程硬约束体现,并采用Ⅰ~Ⅳ级筛选标准完成候选技术的单元内排序,使技术赋值、权重计算、综合得分和方案去向能够逐项追溯.

(4)熊猫海崩塌堆积体案例完成了候选技术评分、排序和方案矩阵试算.结果表明,在强降雨、高陡粗粒堆积体、薄层贫瘠基质和景观敏感等约束下,分区固土、截排水、土壤重构、适坡植生及恢复期管护具有较高适宜性,可形成针对局部溜滑、坡面侵蚀和植生条件不足的组合配置方案.该案例验证了上述多元技术配置流程的可操作性,但尚不能代表不同气候区和扰损类型下的普遍适用性.

(5)该方法主要适用于整体稳定或经主体工程控制后,仍存在浅表失稳、坡面侵蚀、基质贫瘠和植被恢复困难等问题的地表扰损坡面,尤其适用于震后崩塌或滑坡堆积体、矿山弃渣边坡以及工程开挖边坡.对于深层滑坡、地下洞室失稳、采空塌陷等深部地质灾害,该方法仅适用于主体安全治理后的地表生态恢复配置,不能替代专项勘察和工程设计.现阶段研究仅开展了熊猫海单案例试算,部分技术参数采用分级赋值,尚缺少多场景案例、长期监测以及单项技术与组合技术对照数据,因此未对技术间协同增益进行定量验证.后续需通过高寒、干旱和多雨等不同区域案例,进一步检验方法的科学性.

References

Adhikari, I., Baral, A., Zahed, E., et al., 2021. Early Stage Multi-Criteria Decision Support System for Recommending Slope Repair Methods. *Civil Engineering and Environmental Systems*, 38(2): 127－144. https://doi.org/10.1080/10286608.2021.1923699

Anderson, C. C., Renaud, F. G., Hanscomb, S., et al., 2022. Green, Hybrid, or Grey Disaster Risk Reduction Measures: What Shapes Public Preferences for Nature-Based Solutions? *Journal of Environmental Management*, 310: 114727. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114727

Broquet, M., Cabral, P., Campos, F. S., 2024. What Ecological Factors to Integrate in Landslide Susceptibility Mapping? An Exploratory Review of Current Trends in Support of Eco-DRR. *Progress in Disaster Science*, 22: 100328. https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2024.100328

Cardinale, B. J., Duffy, J. E., Gonzalez, A., et al., 2012. Biodiversity Loss and Its Impact on Humanity. *Nature*, 486(7401): 59－67. https://doi.org/10.1038/nature11148

Crozier, M. J., 2010. Deciphering the Effect of Climate Change on Landslide Activity: A Review. *Geomorphology*, 124(3－4): 260－267. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.04.009

Fan, X. M., Scaringi, G., Korup, O., et al., 2019. Earthquake-Induced Chains of Geologic Hazards: Patterns, Mechanisms, and Impacts. *Reviews of Geophysics*, 57(2): 421－503. https://doi.org/10.1029/2018rg000626

Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., et al., 2008. Guidelines for Landslide Susceptibility, Hazard and Risk Zoning for Land Use Planning. *Engineering Geology*, 102(3－4):

85－98. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.022

Gann, G. D., McDonald, T., Walder, B., et al., 2019. International Principles and Standards for the Practice of Ecological Restoration (Second Edition). *Restoration Ecology*, 27(S1): S1－S46.

Ghestem, M., Sidle, R. C., Stokes, A., 2011. The Influence of Plant Root Systems on Subsurface Flow: Implications for Slope Stability. *BioScience*, 61(11): 869－879. https://doi.org/10.1525/bio.2011.61.11.6

Gill, J. C., Malamud, B. D., 2014. Reviewing and Visualizing the Interactions of Natural Hazards. *Reviews of Geophysics*, 52(4): 680－722. https://doi. org/10.1002/2013RG000445

Greco, S., Ishizaka, A., Tasiou, M., et al., 2019. On the Methodological Framework of Composite Indices: A Review of the Issues of Weighting, Aggregation, and Robustness. *Social Indicators Research*, 141(1): 61－94. https://doi.org/10.1007/s11205-017-1832-9

Guo, K., Zhang, X. C., Liu, J. M., et al., 2020. Establishment of an Integrated Decision-Making Method for Planning the Ecological Restoration of Terrestrial Ecosystems. *Science of the Total Environment*, 741: 139852. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139852

Hu, X. D., Gao, J. Z., Zhou, M. T., et al., 2021. Evaluating the Success of Engineering Disturbed Slope Eco-Restoration in the Alpine Region, Southeast Qinghai-Tibet Plateau, China. *Journal of Mountain Science*, 18(11): 2820－2832. https://doi. org/10.1007/s11629-020-6502-8

Huang, F. M., Chen, J., Yang, Y., et al., 2025. A Review and Prospect of Disaster-Causing Environmental Factors Related to Landslide Susceptibility Prediction. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 44(2): 14－37 (in Chinese with English abstract).

Huang, I. B., Keisler, J., Linkov, I., 2011. Multi-Criteria Decision Analysis in Environmental Sciences: Ten Years of Applications and Trends. *Science of the Total Environment*, 409(19): 3578－3594. https://doi. org/10.1016/j.scitotenv.2011.06.022

Joseph, J. K., Akhildev, K., Renjith, V. R., et al., 2024. Eco-DRR Practices and Research: Visualization and Analysis of Global Perspectives. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 102: 104271. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2024.104271

Keesstra, S., Nunes, J., Novara, A., et al., 2018. The Superior Effect of Nature Based Solutions in Land Management for Enhancing Ecosystem Services. *Science of the Total Environment*, 610: 997－1009. https://doi. org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.077

Li, P. X., Wang, B., Chen, P., et al., 2023. Vulnerability Assessment of the Eco-Geo-Environment of Mining Cities in Arid and Semi-Arid Areas: A Case Study from Zhungeer, China. *Ecological Indicators*, 152: 110364. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110364

Lin, W. T., Lin, C. Y., Chou, W. C., 2006. Assessment of Vegetation Recovery and Soil Erosion at Landslides Caused by a Catastrophic Earthquake: A Case Study in Central Taiwan. *Ecological Engineering*, 28(1): 79－89. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.04.005

Liu, C. Z., Chen, C. L., 2020. Achievements and Countermeasures in Risk Reduction of Geological Disasters in China. *Journal of Engineering Geology*, 28(2): 375－383 (in Chinese with English abstract).

Liu, X. J., Tan, T. T., Bai, Y., et al., 2022. Restoration Performance of Regional Soil and Water Resources in China Based on Index of Coupling and Improved Assessment Tool. *Alexandria Engineering Journal*, 61(7): 5677－5686. https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.10.063

Lü, Y. L., Cui, S. H., Pei, X. J., et al., 2026. Exploration of Durability Evaluation for Ecological Remediation Engineering in Geological Hazard Governance. *Earth Science*, 51(9): 3422－3432 (in Chinese with English abstract).

Metzger, J. P., Esler, K., Krug, C., et al., 2017. Best Practice for the Use of Scenarios for Restoration Planning. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 29: 14－25. https://doi.org/10.1016/j.cosust.2017.10.004

Pei, X. J., 2024. Mechanisms of Geological Environment Disturbance and Ecological Restoration Technical Systems for Major Engineering Projects on the Tibetan Plateau. *Journal of Engineering Geology*, 32(5): 1737－1758 (in Chinese with English abstract).

Preti, F., 2013. Forest Protection and Protection Forest: Tree Root Degradation over Hydrological Shallow Landslides Triggering. *Ecological Engineering*, 61: 633－645. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.11.009

Reichenbach, P., Rossi, M., Malamud, B. D., et al., 2018. A Review of Statistically-Based Landslide Susceptibility Models. *Earth-Science Reviews*, 180: 60－91. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.03.001

Rey, F., Bifulco, C., Bischetti, G. B., et al., 2019. Soil and Water Bioengineering: Practice and Research Needs for Reconciling Natural Hazard Control and Ecological Restoration. *Science of the Total Environment*, 648: 1210－1218. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.217

Shen, Y. F., Li, Q., Pei, X. J., et al., 2023. Ecological Restoration of Engineering Slopes in China—A Review.

Sustainability, 15(6): 5354. https://doi. org/10.3390/su15065354

Shi, P. J., Ye, T., Wang, Y., et al., 2020. Disaster Risk Science: A Geographical Perspective and a Research Framework. *International Journal of Disaster Risk Science*, 11(4): 426－440. https://doi.org/10.1007/s13753-020-00296-5

Stokes, A., Douglas, G. B., Fourcaud, T., et al., 2014. Ecological Mitigation of Hillslope Instability: Ten Key Issues Facing Researchers and Practitioners. *Plant and Soil*, 377(1): 1－23. https://doi. org/10.1007/s11104-014-2044-6

Vaidya, O. S., Kumar, S., 2006. Analytic Hierarchy Process: An Overview of Applications. *European Journal of Operational Research*, 169(1): 1－29

Wang, M., Liu, Q. H., Pang, X. Y., 2021. Evaluating Ecological Effects of Roadside Slope Restoration Techniques: A Global Meta-Analysis. *Journal of Environmental Management*, 281: 111867. https://doi. org/10.1016/j.jenvman.2020.111867

Wortley, L., Hero, J. M., Howes, M., 2013. Evaluating Ecological Restoration Success: A Review of the Literature. *Restoration Ecology*, 21(5): 537－543. https://doi.org/10.1111/rec.12028

Xu, Q., Chen, W. L., Zhao, K. Y., et al., 2021. Effects of Land-Use Management on Soil Erosion: A Case Study in a Typical Watershed of the Hilly and Gully Region on the Loess Plateau of China. *Catena*, 206: 105551. https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105551

Zhang, Z. G., Chen, G., Zhang, J. X., 2025. Development Characteristics and Disaster Model of Geological Disasters in Suzhou, Wuxi and Changzhou Areas. *Yangtze River*, 56(S1): 163－169 (in Chinese with English abstract).

Zhang, H. W., Wang, Z. Q., 2022. Human Activities and Natural Geographical Environment and Their Interactive Effects on Sudden Geologic Hazard: A Perspective of Macro-Scale and Spatial Statistical Analysis. *Applied Geography*, 143: 102711. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2022.102711

Zhao, B. Q., Xia, Z. Y., Xu, W. N., et al., 2017. Review on Research of Slope Eco-Restoration Technique for Engineering Disturbed Area. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 48(2): 130－137 (in Chinese with English abstract).

Zhao, Y., Zhao, C. L., Zheng, L. F., et al., 2025. Integrated Ecological Restoration Techniques System for Waste Dumps of Typical Open-Pit Coal Mine in Alpine Grassland: A Case Study of a Six-Year Restoration Project in Huolinhe South Open-Pit Mine. *Ecological Frontiers*, 45(3): 678－688. https://doi. org/10.1016/j. ecofro.2025.01.006

中文参考文献

黄发明, 陈杰, 杨阳, 等, 2025. 滑坡易发性相关致灾环境因子研究的综述与展望. 地质科技通报, 44(2): 14－37.

刘传正, 陈春利, 2020. 中国地质灾害防治成效与问题对策. 工程地质学报, 28(2): 375－383.

吕雅兰, 崔圣华, 裴向军, 等, 2026. 地质灾害生态化治理工程耐久性评估指标研究. 地球科学, 51(9): 3422－3432.

裴向军, 2024. 青藏高原重大工程地质环境扰损机制及生态修复技术体系. 工程地质学报, 32(5): 1737－1758.

张振国, 陈刚, 张纪星, 2025. 苏锡常地区地质灾害发育特征与成灾模式. 人民长江, 56(S1): 163－169.

赵冰琴, 夏振尧, 许文年, 等, 2017. 工程扰动区边坡生态修复技术研究综述. 水利水电技术, 48(2): 130－137.