https://doi.org/10.3799/dqkx.2026.231

震后九寨沟地质灾害生态化治理与地质环境保护研究

裴向军[1,2,3]

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. 西南石油大学,四川成都 610500
3. 天府永兴实验室,四川成都 610213

摘 要: 九寨沟以其罕见的自然美所赋存的"突出普遍价值"(OUV)被列入世界自然遗产名录,2017年"8·8"九寨沟*Ms*7.0地震是继2008年"5·12"汶川特大地震后川西北地区遭遇的又一次强震,是我国遗产地内发生的首次强震,震后世界自然遗产地规模性治理尚无先例.本研究聚焦震后九寨沟地质灾害防治与地质环境保护重大需求,融入"基于自然的解决方案"(NbS)理念,在生态地质环境全要素调查、地质灾害发育分布规律解析、生态问题系统诊断基础上,(1)研发了水环境糯米石灰华胶凝材料(水下养护60 d抗压强度>12 MPa),构建了"振冲碎石桩固基-糯米灰浆筑坝-碳化竹锚护坡-乡土植物绿化-分形景观设计"的震损钙华坝生态修复技术,实现了钙华湖群原真保育;(2)创新了震损高陡岩质边坡崩塌灾害的"结构补强-生态固土-生物诱导"生态化治理技术,提出了大型松散堆积体滑坡与水土灾害的"阻渗-植生-结皮"生态位重构技术,治理后抗降雨冲刷强度>150 mm/h、水土流失量降低90%,实现了地质灾害治理与生态兼容;(3)提出了地质灾害"场地-单元-流域"多级调控技术,实现了震后地质灾害防治、生态地质环境保护、生态功能恢复协同增效,治理后土壤有机质、养分含量及生物量达到未扰区的90%;(4)跨学科考虑地质稳定、水土保持、生态恢复、景观融合等7个一级、13个二级、17个三级目标要素,构建了地质灾害生态化治理成效多维评估方法体系.本研究以期为九寨沟灾害防治、生境质量提升、生物多样性保护提供科学路径,为世界自然遗产地生态地质环境保护与可持续发展提供理论和技术支撑.

关键词: 九寨沟;世界自然遗产地;地质灾害;生态化治理;生态地质环境保护;可持续发展.

中图分类号: P642 **文章编号:** 1000-2383(2026)09-3251-23 **收稿日期:** 2026-03-27

Research on Post-Earthquake Eco-Geological Conservation and Restoration in the Jiuzhaigou World Natural Heritage Site

Pei Xiangjun[1,2,3]

1. *State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu* 610059, *China*
2. *Southwest Petroleum University, Chengdu* 610500, *China*
3. *Tianfu Yongxing Laboratory, Chengdu* 610213, *China*

Abstract: The *Ms*7.0 Jiuzhaigou earthquake on August 8, 2017, struck the Jiuzhaigou Valley, a World Natural Heritage site. This

基金项目: 国家重点研发计划项目(No. 2023YFC3007100);天府永兴实验室科技攻关任务重大项目(No. 2023KJGG05);四川省科技计划-基础研究领衔科学家项目(No. 2025JDKXJ0006).

作者简介: 裴向军(1970-),男,二级教授,博士生导师,主要从事工程地质与生态修复方面的科研与教学工作. ORCID:0009-0007-6529-2605. E-mail:pxj@cdut.edu.cn

引用格式: 裴向军,2026.震后九寨沟地质灾害生态化治理与地质环境保护研究.地球科学,51(9):3251-3273.

Citation: Pei Xiangjun, 2026. Research on Post-Earthquake Eco-Geological Conservation and Restoration in the Jiuzhaigou World Natural Heritage Site. *Earth Science*, 51(9): 3251-3273.

event represents another significant seismic impact on Northwest Sichuan following the 2008 Wenchuan earthquake, the first within a Chinese heritage site. Listed for its "Outstanding Universal Value" (OUV) based on exceptional natural beauty, Jiuzhaigou faced an unprecedented challenge: managing regional-scale restoration within a World Heritage site after a major earthquake-A task with no prior domestic or international parallel. Based on a comprehensive survey of eco-geological environment elements, an analysis of geohazard distribution patterns, and a systematic diagnosis of ecological issues, this study focuses on the critical needs of post-disaster geohazard prevention and geological environment protection, integrating Nature-based Solutions (NbS). This study obtains the following results: (1) Developed a water environment-friendly glutinous rice lime travertine cementitious material that achieves a compressive strength of >12 MPa after 60 days of underwater curing; established an ecological restoration technology for damaged travertine dams using "vibro-replacement gravel piles for foundation reinforcement-glutinous rice mortar dam construction-carbonized bamboo anchors for slope protection-native plant greening-fractal landscape design", successfully preserving the authenticity of travertine lake clusters. (2) Innovated an ecological approach for managing collapse hazards in steep rock slopes affected by earthquakes, combining structural reinforcement, ecological soil stabilization, and bioinduction; proposed a niche reconstruction technique involving "barrier construction-vegetation establishment-crust formation" for large-scale loose debris landslides and soil-water disasters; with rainfall erosion resistance >150 mm/h and 90% soil loss reduction, achieving effective integration between geological hazard control and ecological recovery. (3) Put forward a multi-level regulation technology for geohazards across " site-unit-watershed" scales, realizing synergistic effects between geohazard prevention, ecological functional recovery, and eco-geological environment protection, and after treatment, soil organic matter, nutrients, and biomass reached 90% of undisturbed levels. (4) Constructed a multi-dimensional evaluation method, incorporating 7 primary, 13 secondary, and 17 tertiary objectives, for the effectiveness of ecological geohazard mitigation by interdisciplinary integration of geological stability, soil and water conservation, ecological restoration, and landscape harmony. This research provides a scientific trajectory for disaster prevention, habitat quality enhancement, and biodiversity conservation in Jiuzhaigou, offering theoretical references and technical support for the protection and sustainable development of eco-geological environments in World Natural Heritage sites.

Key words: Jiuzhaigou; world natural heritage site; geohazards; ecological mitigation; eco-geological environment protection; sustainable development.

0 引言

九寨沟世界自然遗产地位于四川省阿坝藏族羌族自治州,是以高原钙华湖群、钙华瀑群、钙华滩流为核心的独特水景体系,构成了全球罕见的自然地理景观.该遗产地是我国首个以保护自然风景为核心目标的自然保护区,具备不可替代的"突出普遍价值(Outstanding Universal Value,OUV)",于1992年被列入联合国《世界自然遗产名录》,成为全球自然遗产地保护典范.

然而,2017年8月8日,九寨沟(北纬33.2°,东经103.8°)突发*M*s7.0级强烈地震.此次地震是继2008年"5·12"汶川特大地震后,我国川西北地区遭遇的又一次破坏性地震,共造成29人遇难、1人失联、543人不同程度受伤、17.65万人受灾(含游客),7.37万间房屋受损,基础设施和游客服务设施遭受严重破坏,直接经济损失超80亿元(陈旭和盛丹萍,2017;孙刚等,2018).地震导致共计27处核心世界自然遗产点出现不同程度损毁,160余处地质灾害隐患点威胁景区2 800余人的生命安全,地质安全面临严峻挑战(梁靖等,2019),生态系统的完整性与稳定性遭到严重破坏.

世界自然遗产地具有不可替代的生态保护价值,但全球257处世界自然遗产地中有近半数分布于地质构造活跃带(Canet *et al.*, 2024).地质构造的长期演化虽塑造了遗产地独特的地貌景观与生态格局,却也导致其生态地质环境呈现敏感性高、抗干扰能力弱、恢复难度大的极端脆弱特征.以九寨沟为例,震前区内崩滑流、冰岩崩、水土流失等地质灾害频发,加之生态系统结构简单、生物多样性低,土壤抗蚀性弱、养分贫瘠,使得震后生态系统自然恢复能力极弱,生态地质环境保护面临严峻挑战.

强震对我国世界自然遗产地造成如此规模的破坏尚属首次,传统治理模式难以满足遗产地可持续发展需求,需在维持OUV、保障遗产原真性与完整性的前提下,实现地质灾害防治与生态系统及景观格局的保护协同.本研究突破传统地质灾害治理的理论局限,基于震后地质灾害详查与生态问题识别诊断,深度融合生态化治理与OUV保护目标,构建基于自然的解决方案(NbS)的地质灾害生态化治理技术体系,为遗产地灾害

应对与可持续发展提供科学依据与技术支撑.

1　九寨沟生态地质环境条件与震损生态问题

1.1　生态地质环境条件与地震概况

1.1.1　生态地质环境条件　九寨沟区域属于巴彦喀拉地块东部之川西北断块,地处著名的“南北向地震构造带”中段,位于虎牙断裂、塔藏断裂和岷江断裂的交汇处(徐锡伟等,2017;Fan *et al.*, 2018; 闻学泽,2018;李君等,2019).该区域是青藏高原东缘构造活跃带,广泛发育逆冲推覆构造,具有多期构造叠加与强烈挤压变形特征.

九寨沟遗产地以其独特的高山岩溶水景著称,包括 114 个高山湖泊、17 处瀑布群和钙华滩流,以及翠湖、彩林、雪山和蓝冰等胜景,其景观的形成与演化是一个漫长的地质历史过程,可概括为以下 4 个阶段(郭建强等,2000;张瑞英和何政伟,2007;晏浩等,2013):

(1)被动陆源沉积阶段(约 2.08 亿年前):九寨沟地区是一片浅海,生物长期化学作用使得海底逐渐积累了大量钙质,以碳酸盐岩形式沉积.历经亿万年的积累,最终形成了厚达 4 000 m 的沉积岩,为后续景观的形成奠定了物质基础.

(2)造山运动与岩溶化阶段(约 2.08 亿年至 332 万年前):该地区经历了褶皱造山、推覆造山与陆内断块造山等复杂构造运动,逐渐由海洋隆升为陆地,并产生众多褶皱和断裂.在强烈的岩溶作用下,地表逐渐被改造为一片海拔近 3 000 m 的岩溶准平原地貌.

(3)第四纪冰川雕刻与堰塞成景阶段(约 332 万年至 1 万年前):经历 3 次冰川作用,尤其在第 2 次冰期,冰川侵蚀将平坦的古高原面刻蚀出 U 型谷,进而形成了日则沟、则查洼沟等主干沟谷;同时,冰川、地震、滑坡和泥石流等多种内外营力耦合作用,通过堰塞河道形成了积水湖泊或跌水瀑布,如长海、下季节海、五花海、天鹅海以及诺日朗瀑布和树正瀑布等著名景点.

(4)冰后期景观细化阶段(1 万年以来):岩溶、流水和生物作用等外营力继续对已有地貌进行精雕细琢,九寨沟自然景观逐渐成形并趋于稳定.

九寨沟的自然景观是在长期地质演化过程中,由地质构造、岩溶、冰川等多重地质营力协同作用塑造的结果.区内地貌类型多样,主要发育有寒冻风化地貌、冰缘地貌、第四纪冰川遗迹地貌、坡地灾害地貌、河谷地貌、喀斯特干谷地貌,以及核心的喀斯特钙华堆积地貌.地层结构上,在以灰岩、白云岩、生物碎屑灰岩为主的碳酸盐岩基底之上,覆盖第四系崩塌堆积物、冲积土夹砾石层及谷底河湖相沉积.在气候条件方面,则查洼气象站多年监测数据显示,区内多年平均气温 6.5 ℃、多年平均降水量约 550~780 mm,其中 5 月至 10 月降水约占全年总量的 75%.在生物多样性方面,遗产地内已知分布森林植物和栽培植物 264 科 2 822 种,其中珍稀濒危 82 种,包括 I 级重点保护植物 3 种、II 级重点保护植物 75 种(刘少英等,2007).

1.1.2　“8.8”九寨沟地震概述　2017 年 8 月 8 日 21 时 19 分(UTC+8)发生的九寨沟 *Ms*7.0(*Mw*=6.5)地震(Fan *et al.*,2018),最大烈度达到 IX 度,等震线长轴总体呈北北西走向,九寨沟世界自然遗产地烈度范围达 Ⅶ~IX 度(Sun *et al.*, 2018).本次地震震源深度 20 km,主震震中位于遗产地丹祖沟北侧支沟(33.20°N,103.82°E).从历史地震背景看,在震中 200 km 范围内,近百年共发生 5 级以上地震 49 次,其中最大震级为 1933 年 8 月 25 日阿坝州理县叠溪 *Ms*7.5 级地震,最大烈度 X 度,其震中距本次地震仅 100 km(Fan *et al.*, 2018);1976 年 8 月 16 日至 23 日间,在相距本次震中约 150 km 的四川松潘至平武交界处的虎牙断裂带中南段,曾连续发生了 *M*s7.2 级、6.7 级、7.2 级三次强烈地震(Chen *et al.*, 1994).

本次地震形成了两条具有构造破裂特征的 NW 向地裂缝带:一条沿“九寨天堂”-震中-五花海一线延伸,长度约 230 km,是此次地震的主控构造破裂带;另一条沿上四寨村-中查-比芒一线延伸,长度约 190 km,是上四寨南侧一条 NW 向次级断层的同震复活与扩展.两条破裂带均为九寨沟“隐伏性”地震断裂错动所形成的地表同震破裂.此次地震的震源断层错动过程受 NW331°走向、陡倾角∠87°的走滑型断层所控制,断裂两端的剪切破裂表现出持续扩展趋势(Sun *et al.*, 2018).地震的震源构造动力学过程为:在高法向应力条件下左旋剪断“构造凸出体”,其破裂扩展趋势是向 NW 及 SE 两端逐步贯通玛沁断裂与“文县凸出体”顶部的弧形断裂(李渝生等,2017).遥感解译结果显示,此次地震诱发了 1 800 余处同震地质灾害(罗路广,2023),对火花海、熊猫海、诺日朗瀑布等钙华湖

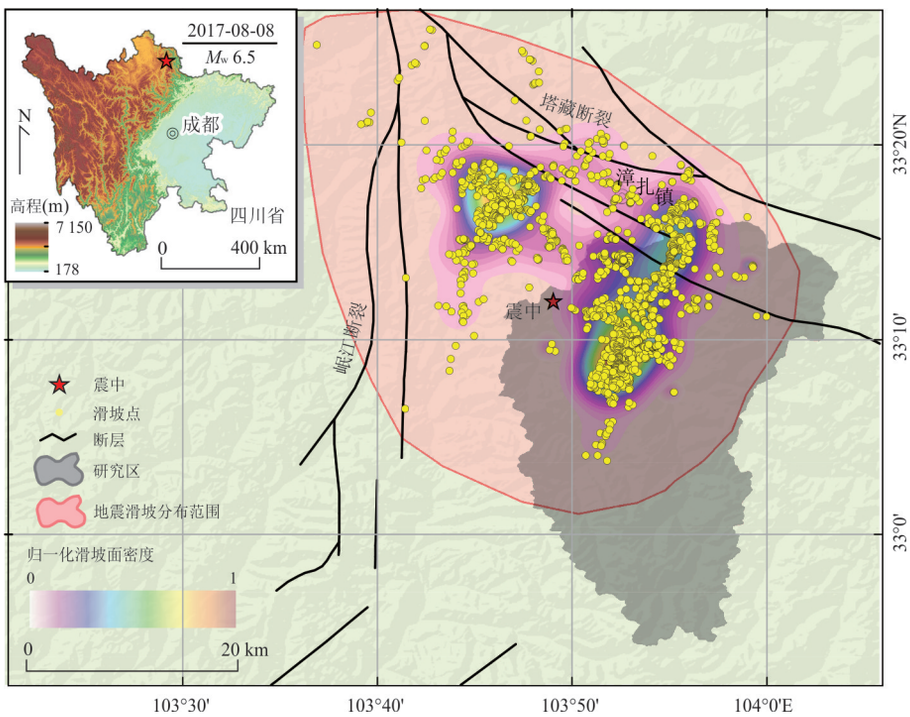


图 1 九寨沟地质构造与地震地质灾害分布

Fig.1 Geological structure and distribution of co-seismic geohazards in Jiuzhaigou

灰色阴影区为九寨沟遗产地

群,以及斜坡和流域地质环境造成严重破坏(图 1).

1.2 生态地质环境震损特征

九寨沟地震对遗产地生态地质环境震损主要体现在:以火花海、诺日朗瀑布等为代表的钙华湖群震损、退化,以及水生态破坏;地震诱发的斜坡地质灾害和水土流失灾害;与地震物源相关的流域地质灾害;以植被损害、土壤质量下降为代表的地震生态扰损.对钙华湖群震损特征、斜坡和流域地质灾害发育分布特征、强震生态扰损特征分析如下:

1.2.1 钙华湖群震损特征 九寨沟地震导致世界自然遗产地内的典型钙华湖群遭受严重破坏,以火花海与诺日朗瀑布最为显著.火花海钙化坝体发生溃坝,形成长约 40 m、宽约 12 m、深约 15 m 的缺口;湖区发育裂缝 100 余条,其中长度超过 5 m 的有 23 条(LF1~LF23),最长可达 50 m,宽度 0.8~20 cm.溃坝导致湖区水位较震前下降了 12.84 m(Zhao *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2021),原本约每秒 9 m^3 的湖水流量瞬间流失近 90%,致使 80% 的湖底暴露于空气中(图 2).此次溃坝还引发火花海瀑布断流,泥沙涌入下游的双龙海和芦苇海,造成湖水浑浊.

诺日朗瀑布震前宽 270 m、高 24.5 m,是我国已发现的最宽钙华瀑布.地震造成顶部钙华台地坍塌,一度导致瀑布局部断流,水流改道

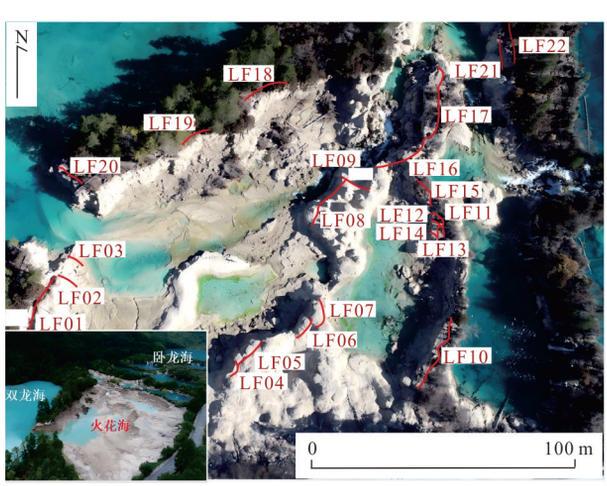


图 2 九寨沟火花海钙华坝震损及湖泊退化

Fig.2 Earthquake-induced damage to the travertine dam and lake-degradation features of Huohuahai Lake in Jiuzhaigou

形成“宽谷溪流”;此外,箭竹海、五花海、熊猫海、熊猫海瀑布、剑岩飞泉等景点也受到地震影响,出现了局部岸坡垮塌、泉流量改变、水体浑浊等不同次生灾害(Zheng *et al.*, 2022b).

1.2.2 斜坡地质灾害发育分布特征 九寨沟地震诱发的地质灾害总面积为 8.1~11.8 km^2,类型以中小型浅层滑坡和崩塌为主,估算体积 26.2×10^6~

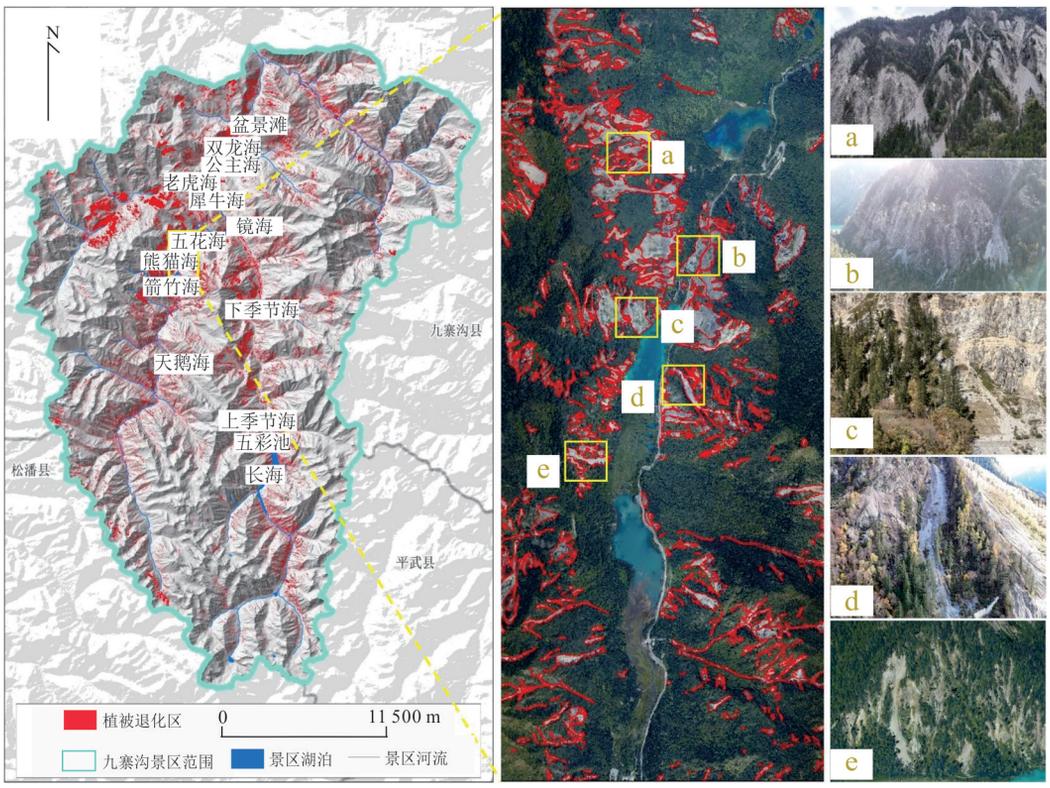


图 3　九寨沟地震地质灾害发育特征

Fig.3　Development characteristics of earthquake-induced geohazards in Jiuzhaigou

以五花海、熊猫海、箭竹海为例

$28.9\times10^6\ m^3$(戴岚欣等,2017).地质灾害主要沿北西-南东向呈带状分布,沿公路、沟谷较为发育;沿发震断层两侧 2 km 范围内地质灾害高度集中,随着距断层距离的增加,灾害密度整体呈衰减趋势;在距断层 7 km 范围以外,基本未产生地质灾害,呈现明显的断层效应(梁靖等,2019).九寨沟遗产地核心区是受灾最为严重的区域,共发育地质灾害 1 000 余处(图 3),总面积约 3.88 km^2,尤其在树正沟、熊猫海附近地质灾害集中分布(梁靖等,2019).

九寨沟地震地质灾害主要分布在高程 2 600~3 200 m 范围,该高程范围的面积虽仅占研究区总面积的 30%,却覆盖了 61% 的灾害面积;地质灾害主要分布于 35°~55°的坡度范围,在 40°~45°范围内灾害发育数量达到峰值;石炭系是地质灾害最为发育的岩组(占总灾害面积的 72.1%).总之,地震因子对九寨沟震后斜坡失稳有着绝对控制作用,地形地貌则是重要的影响因素(罗路广等,2021).

1.2.3　流域地质灾害发育分布特征　地震及其次生地质灾害(滑坡、崩塌、泥石流等)产生的松散物质在震后发生剧烈迁移,给九寨沟震区地质环境与生态安全造成深远影响.前人采用 InSAR、高分辨率遥感、LiDAR 等解译和实地调查,解析了流域物源空间分布特征.树正寨流域震后物源量为 $399\times10^4\ m^3$,崩滑物源占比 70.80%(李昕娟等,2021);日则沟存在 155 处物源,包括崩滑物源 88 处、坡面物源 58 处、沟道物源 9 处,其总体积分别约为 $1\ 226.66\times10^4\ m^3$、$6.17\times10^4\ m^3$ 和 $200.95\times10^4\ m^3$,泥石流沟内物源总体积为 $1\ 433.78\times10^4\ m^3$(刘小莎,2022).赵松江等(2021)对震区 29 处泥石流流域面积、相对高差、主沟长度、主沟纵坡、震中距及物源量进行分析,累加物源总量达到 $1\ 858.62\times10^4\ m^3$、动储量 $421.03\times10^4\ m^3$.

2024 年,团队运用机载激光雷达和三维激光扫描等技术对全流域范围调查发现,九寨沟遗产地松散物源总量约 $8\ 000\times10^4$~$9\ 200\times10^4\ m^3$.其中,坡面物源量为 $4\ 734.75\times10^4$~$5\ 718.11\times10^4\ m^3$;沟道物源估算规模约为 $3\ 464.6\times10^4\ m^3$,涉及 40 条泥石流沟、沟道物源平均厚度 3.67 m.仅威胁箭竹海、镜海、五花海、熊猫海、犀牛海 5 个海子的流域物源总量就达 $4\ 798.47\times10^4\ m^3$.

1.2.4　强震生态扰损特征　团队研究发现,九寨沟地震导致遗产地内植被覆盖率由震前的 82.11% 降

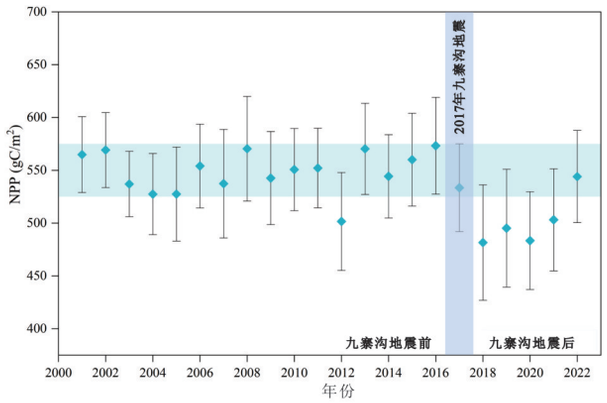


图 4 九寨沟遗产地 NPP 时序变化特征

Fig.4 Temporal variation characteristics of NPP in the Jiuzhaigou heritage site

至 79.91%，植被净初级生产力（Net Primary Productivity，NPP）由震前的 525～575 gC/m²下降至震后约 533 gC/m². 受 2018－2020 年极端降雨持续影响，NPP 进一步下降至 483 gC/m²；自 2021 年起，NPP 呈恢复回升趋势，至 2022 年反弹至 544 gC/m²（图 4）.

震后裸地面积显著扩大，森林与草地面积大幅缩减. 到 2022 年，遗产地内震损区仍处于恢复初期，仅有 18.88% 的地震地质灾害区植被 NPP 超过震前水平. 恢复期内，草地面积明显回升，但森林面积总体变化较小，表明震后植被恢复以草本恢复为主.

地理探测器单因子探测结果表明，温度、降水和海拔是控制共振滑坡区植被碳通量（NPP）恢复的三大主导因子. 其中，温度的解释力最高（q=0.308），其次为降水（q=0.273）和海拔（q=0.250），三者均表现出显著的空间一致性解释能力. 这表明，震后植被碳通量恢复初期主要受气候条件调控.

双因子交互探测结果进一步揭示了震后植被碳通量恢复过程中的多因子协同控制机制. 总体来看，所有因子组合的 q 值均高于对应的单因子 q 值，且交互类型以非线性增强为主，表明碳通量恢复并非由单一环境因子主导，而是受多重因子复杂耦合作用的共同调控. 尽管岩性在单因子分析中的解释力较弱（q=0.082），但其与降水和温度交互时 q 值均接近 0.49，与海拔交互时 q 值约为 0.41，表现出最强的非线性增强效应（Duan *et al.*, 2024）.

温度植被干旱指数（Temperature Vegetation Dryness Index，TVDI）反演结果表明，遗产地内非干旱区域面积较震前增加了 47.16%，而湿润与较湿润区域面积分别下降了 94.11% 和 98.88%（陈云等，2021）. 归一化植被指数（Normalized Difference Vegetation Index，NDVI）和归一化水体指数（Normalized Difference Water Index，NDWI）反演结果显示，震后遗产地内森林面积和水系面积分别减少 63.61% 和 22.69%.

1.3 震后生态地质环境问题

九寨沟地震引发的生态地质环境问题主要体现在以下几个方面：在地质方面，包括地质灾害和水土流失等问题；在生态方面，表现为生物多样性减少、生态承载力下降；在环境方面，则涉及景观破坏和水质恶化. 这些问题具有以下特征：（1）生态-地质叠加作用：强震不仅直接触发地质灾害，还造成植被损害等生态破坏，而生态退化反过来会降低土壤质量和斜坡稳定性，从而进一步加剧地质灾害风险；（2）生态-环境叠加作用：植被退化削弱了坡面截留和阻渗能力，导致径流更易集聚并携带泥沙进入河湖，增强水沙过程，进而引发水体浊度上升、湖泊淤积加剧等环境灾害；而河湖水质退化和岸坡形态变化，又会压缩生境空间，破坏生态平衡，加剧生态退化和景观破坏；（3）环境-地质叠加作用：岸坡冲刷等环境条件会改变斜坡坡脚的支撑条件和水循环条件，诱发滑坡、崩塌等地质灾害，导致湖泊沼泽化；（4）生态-环境-地质叠加作用则表现为生态地质环境失衡（图 5）. 对遗产点退化风险、斜坡水土侵蚀加剧、湖泊沼泽

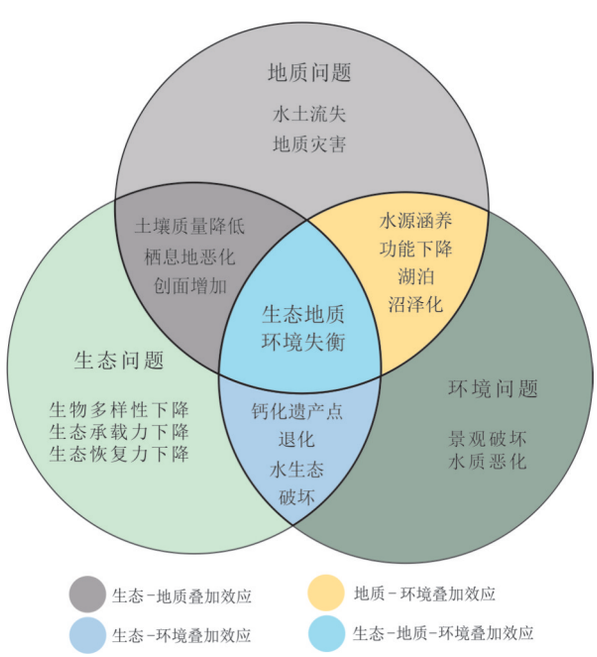


图 5 震后九寨沟生态地质环境问题

Fig.5 Post-earthquake eco-geological environmental problems in Jiuzhaigou

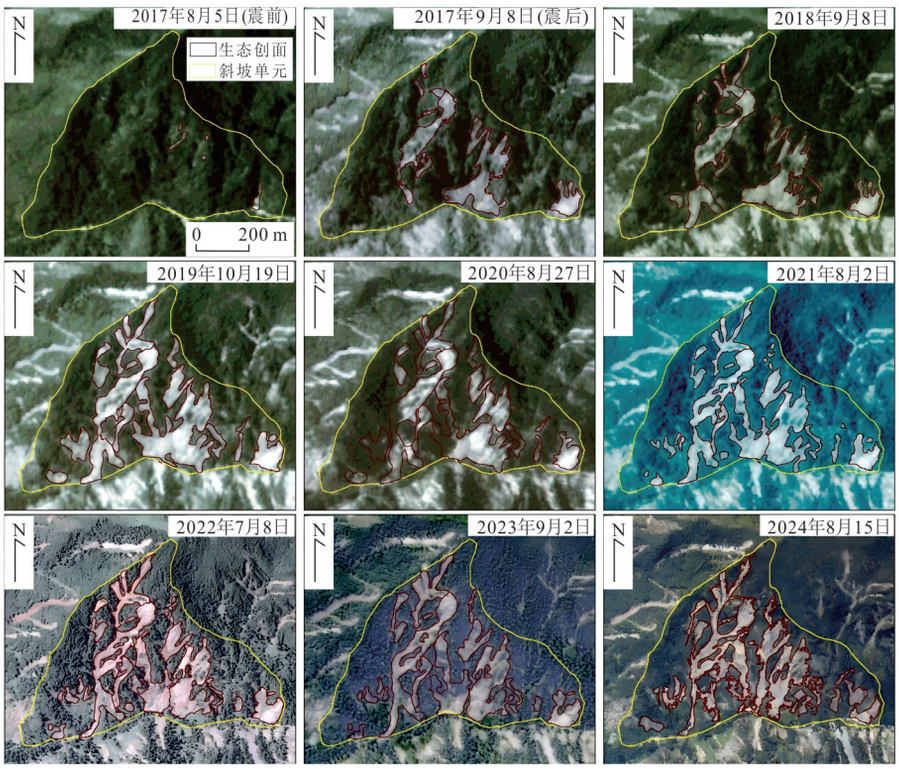


图 6　震后九寨沟斜坡水土侵蚀演化特征(以箭竹海西侧斜坡为例)

Fig.6　Post-earthquake evolution characteristics of slope soil and water erosion in Jiuzhaigou (taking the western slope of Jianzhuhai as an example)

化加速等典型生态地质环境问题分析如下:

1.3.1　遗产点面临退化风险　地震导致遗产点面临退化风险,如火花海.震后火花海等钙华堤坝溃决和震损,湖水大量流失,湖体大面积干涸;钙华丘及堤坝发育大量地震裂缝,在渗流、动水冲刷等因素持续作用下,裂缝将扩展和加深,导致堤坝与钙华丘稳定性进一步降低,钙华遗产点将面临持续退化,甚至局部消亡的风险(肖瑶,2022).

1.3.2　斜坡水土侵蚀加剧　震后斜坡平均侵蚀模数由震前的 152.72 t/km^{2}增至震后的 483.86 t/km^2,水土流失面积扩大了 71 km^2,平均土壤侵蚀强度增强了 58%.轻度以上侵蚀面积达 65%,其中强烈和极强烈侵蚀面积占流域面积的 16.3%.土壤侵蚀严重区域主要集中于九寨沟流域内海拔高、植被稀少的裸岩地带,3 600～4 200 m 高程段贡献了全区总产沙量的 72.3%(刘建成等,2025).

团队以箭竹海小沟泥石流沟道右岸沟口处的斜坡作为统计单元,对比分析多时序斜坡水土流失创面演化发展特征发现,斜坡面积约 0.42 km^2,在 2024 年航空影像中,该区域创面图斑面积 0.132 km^2.根据多期影像特征分析,在 2017 年"8.8"地震前,斜坡表面植被覆盖较好;在 2017 年 9 月 8 日的影像图中,斜坡中部出现了大面积裸露;震后的 2018 和 2019 两年时间,创面整体呈显著扩张趋势;2020 年创面面积无明显变化,2021 年创面开始少量减少;在后续两年的影像中,直观上看创面没有显著减小趋势.截至 2024 年基于高清航空影像的解译结果,创面范围仍在变动(图 6).

从震后第一个雨季开始,裸露创面面积开始增加,其后几个雨季增加趋势减小,但仍维持在持续增加过程中.团队调查表明,裸露创面面积增加趋势减小,得益于灾后重建恢复治理工程,以及生态系统的自然恢复.裸露创面面积的增长,则是生态恢复力不足的体现,主要体现在:震后坡面物源长期运移,造成反复扰动与破坏;地形陡峭,土壤结构松散、稳定性差;土壤水分保持能力不足,土壤养分贫瘠等.降雨是导致斜坡水土侵蚀加剧的主要因素,持续强降雨和生态恢复力不足共同导致震后灾损创面持续增加,如 2017 年"9.27"、2018 年"6.25"与"7.10"、2020 年"8.16"以及 2024 年"7.17"与"7.24"的强降雨事件,均致使灾损创面增加(Duan *et al.*, 2024).结合区域震后灾害活跃期规律(例如,1999



图 7 强降雨后九寨沟遗产地湖泊浑浊现象

Fig.7 Lake turbidity in the Jiuzhaigou heritage site following heavy rainfall

年台湾集集 *M*s7.6 地震后地质灾害活跃期持续约 10～15 年；2008 年汶川 *M*s8.0 地震后活跃期长达 20～25 年（Wang *et al.*, 2024））来看，九寨沟震后水土流失灾害同样表现出显著的长期效应.

1.3.3 湖泊沼泽化加速 在强降雨条件下，震后产生的大量地表松散物源被地表径流裹挟，以山洪或泥石流形式输入海子，导致湖泊浑浊与淤积显著加剧（图 7）. 以五花海核心景点为例，其水体浊度峰值达震前的约 300 倍（最高 335.5 NTU），湖泊沉积速率由 1864－2008 年的 0.32 cm/年骤增至 2017－2020 年的 6 cm/年（沈小雪等，2023）.

在外界环境稳定条件下，湖泊自然演化总体趋势表现为水域面积缩小、水深变浅直至湖泊消亡，湖泊沼泽化通常是一个漫长的自然演化过程. 然而，九寨沟区震后裸露创面和松散碎屑堆积体大量发育，在强降雨驱动下，松散物质以推移质（山洪泥石流）或悬移质（地表径流）形式进入湖泊，造成湖泊浑浊、淤积、湖床抬高，水生植物蔓延，最终可能引发“海子退化”乃至“海子消亡”. 团队跟踪调查显示，目前犀牛海、镜海、五花海、熊猫海、箭竹海等均出现了不同程度的淤积与沼泽化迹象.

2024 年以来，团队结合机载激光雷达数据、高分辨率航空影像、历史卫星影像与现场调查，对九寨沟受影响较大的犀牛海、镜海、五花海、熊猫海、箭竹海的湖面变化进行了解译（图 8）. 结果表明，箭竹海在入水口、出水口、湖泊两岸均出现了不同程度的沼泽化，其中入水口区域最为显著. 相较于 2015 年，震后仅 2017 年海子边界向前推移了 109.23 m，到 2024 年总共推移了 156.36 m. 熊猫海在入水口及湖泊两岸均发育不同程度的沼泽化特征；五花海在入水口及湖泊四周普遍出现沼泽化现象，且水底环境发生明显改变；镜海在入水口沼泽化突出，且水深变浅；犀牛海在入水口、出水口、湖泊两岸均表现出不同程度的沼泽化迹象. 总体上，九寨沟湖泊沼泽化进程呈加速趋势，震后核心海子

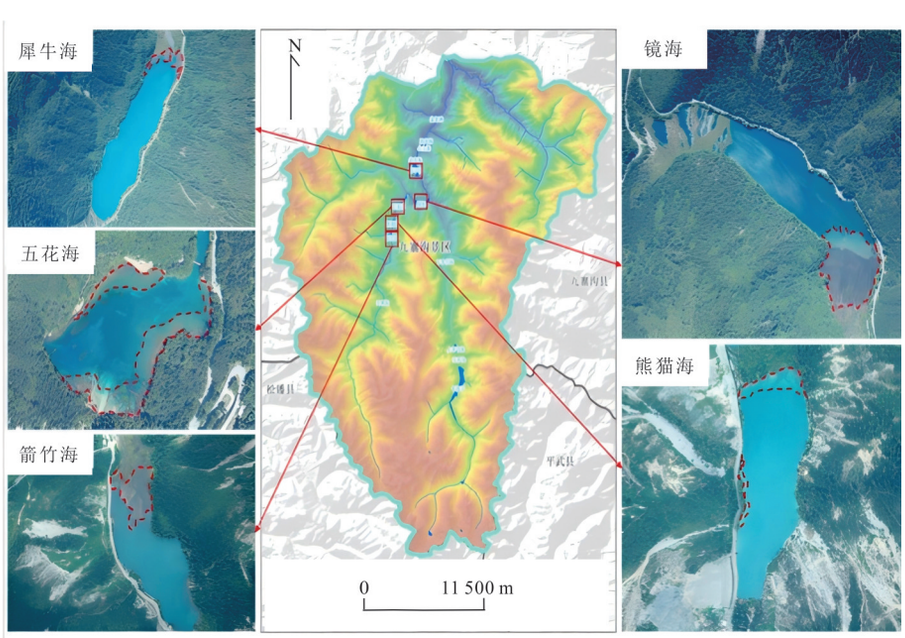


图 8 九寨沟遗产地湖泊沼泽化现象

Fig.8 Lake paludification in the Jiuzhaigou heritage site

以犀牛海、五花海、箭竹海、镜海、熊猫海为例

库容缩减20%~33%,景观面临不可逆退化风险.

2　震后九寨沟地质灾害生态化治理与地质环境保护总体框架

传统地质灾害治理工程以灾害治理为目标,难以充分满足世界自然遗产地生态保护、景观协调和遗产价值维持的综合需求.九寨沟震后生态地质环境保护不仅需要解决地质安全问题,更需要进一步统筹考虑地质灾害治理、水土保持、水源涵养、生物多样性保护、景观融合和突出普遍价值(OUV)维持等多重目标,考量治理工程的流域整体性、连通性、生态系统完整性和景观协调性,以实现地质灾害防治与生态相融合.本文研究内容包括生态地质环境震损特征调查、生态问题识别诊断、生态化治理技术构建、生态化治理成效评估等,解决的关键科技问题如下:

科学问题:包括强震诱发生态地质环境扰损失衡与递进演化机制,震后生态地质环境互馈作用与长期效应,融入NbS理念的地质灾害生态化治理"地质体-工程结构-生物体"互馈作用,地质灾害治理功能材料-工程结构-生物措施有机适配与多级调控机理等.

技术问题:包括地震地质灾害生态问题识别诊断技术、震损钙华湖群生态修复与原真保

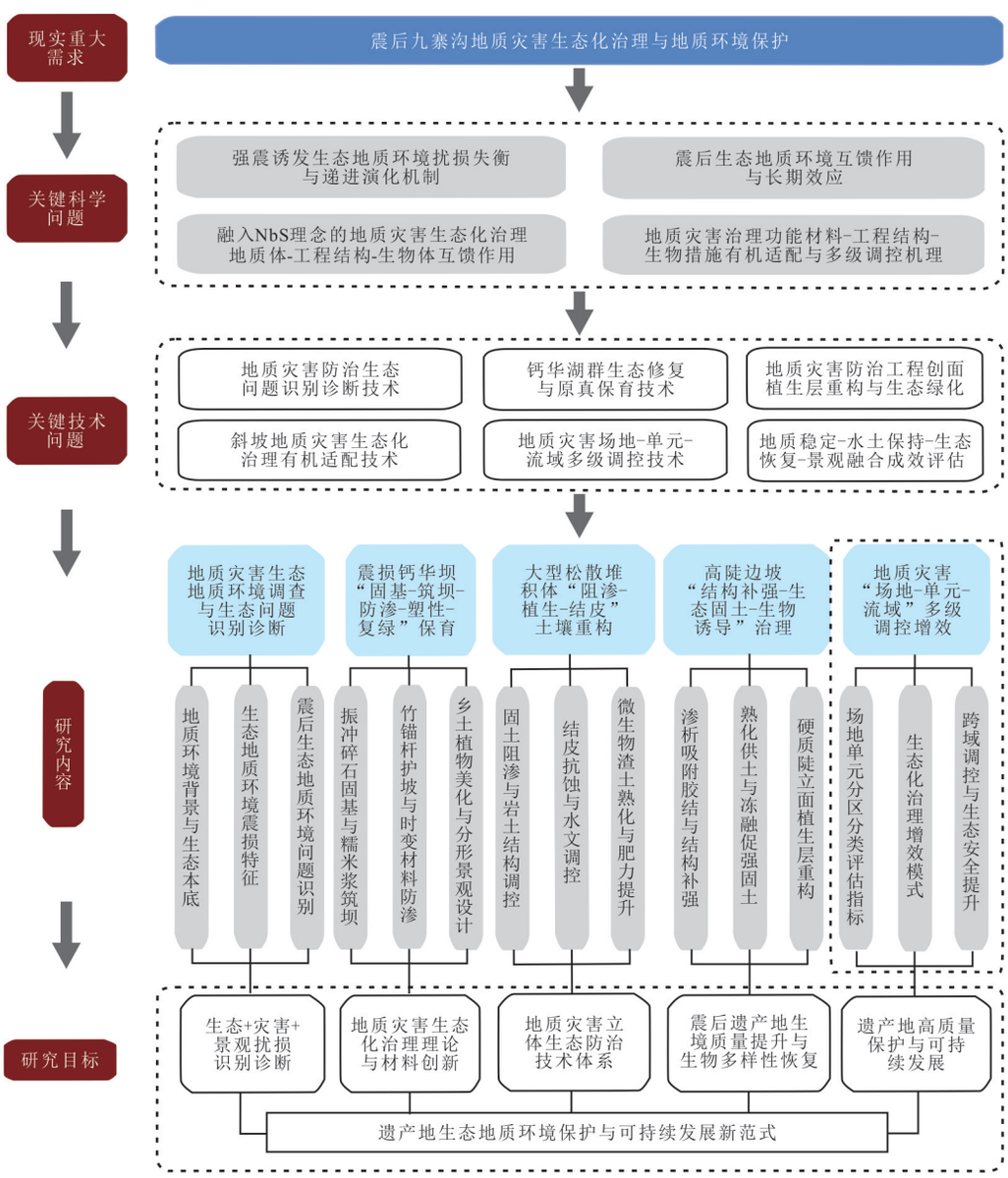


图9　震后九寨沟地质灾害生态化治理与地质环境保护研究总体框架

Fig.9　Integrated conservation and restoration framework for Jiuzhaigou following the earthquake

育技术、斜坡地质灾害生态化治理有机适配技术，地质灾害“场地-单元(小流域)-流域”多级调控技术、地质灾害防治工程创面植生层重构与生态绿化技术，地质稳定-水土保持-生态恢复-景观融合跨学科多维成效评估方法.

针对上述关键科技问题，本研究以震后地质灾害生态化治理和生态地质环境保护为目标，围绕世界自然遗产地地质与生态安全的综合需求，构建“调查评价与识别诊断→耦合机制与互馈作用→有机配置与韧性防控→多级调控与生态价值提升”一体化技术框架体系.该体系以震损生态地质环境系统诊断为基础，以地质体、工程结构、生物体及生态过程的协同互馈为核心，通过“场地-单元-流域”跨尺度延拓，实现地质灾害治理与生态修复、生物多样性保护相融，向生态价值实现跃升.在此框架下，集成糯米灰浆筑坝、“阻渗-植生-结皮”土壤重构、冻融促强固土、生物诱导增效、乡土植物群落构建等生态化治理关键技术，进一步构建“场地-单元-流域”多级调控技术，提出地质稳定-水土保持-生态恢复-景观融合多维成效评估方法，最终形成适用于世界自然遗产地生态地质环境保护修复与可持续发展的系统治理新范式.该范式可辐射推广到国内外受损遗产地生态保护，以及极端环境地质环境扰损区生态修复韧性提升.技术框架体系如图9所示.

3 钙华湖群保育修复技术体系

火花海天然堤坝由钙华、土壤碎屑与藻类共同构成.九寨沟地震对其造成了严重破坏，致使45×10^4 m^3湖水几乎完全排干，美景顷刻消失(Wang *et al.*, 2021).同时，火花海坝体及周边发育了大量震裂缝，堆积了大量松散物源，无水体养护的火花海钙华丘进一步失稳，发生垮塌.地震引起的坍塌主要集中于坝体上游侧，导致坝体局部变薄.持续的流水侵蚀进一步削弱了坝壁的稳定性，导致坝壁在不同位置发生倾倒、碎片堆积和植被扰损.溃口上下游形成的水头差，进一步增加了坝体失稳的风险.在坝体内，地震和坝体变薄导致其内部孔隙水压力积累，水压升高会降低钙华坝体的抗剪强度和刚度，进而引发塑性变形并产生裂缝，最终导致剪切带贯穿坝体和整体溃决.此外，局部液化、剪切塑化、内部侵蚀、管涌都可能导致坝体坍塌(Wang *et al.*, 2021).

钙华是富含碳酸氢钙的地下水出露地表后，因二氧化碳逃逸而发生沉淀所形成的天然次生碳酸钙.火花海湖水位降低导致超过80%的钙华小丘暴露，加剧了其风化退化和结构性崩塌进程.震后一年内出现显著的风化、沙化、黑化和坍塌等钙华退化现象.团队在火花海震损坝体处开展了200次圆锥超重型动力触探试验，结果表明，0～7.6 m埋深为较软弱的地层，在地震荷载下易发生液化，较浅(较新)的钙华地层其承载力明显低于较深(较老)地层，表明浅部钙华体具有更低的密度(任和，2020).

火花海是九寨沟钙华水景格局的关键节点，其决口改变了局部水循环，加剧了下游湖泊淤积，削弱了水体的自净与调蓄功能.地震不仅破坏了原有的阶梯式湖盆结构，还改变了地下水与地表水的交换路径.作为双龙海与卧龙海的重要节点，火花海的水位与水量变化直接影响下游芦苇海、盆景滩等景点的水文连通性.若坝体得不到及时修复，在暴雨、地震等自然因素触发下，会出现新的堤坝坍塌，导致火花海及其上下游湖泊呈现逐级决堤的“多米诺效应”.

NbS被认为是应对侵蚀和山体滑坡等地质灾害挑战的可持续策略(Moreau *et al.*, 2022)，可以提供一种综合方法来提升受损地质体的复原力与韧性(王文俊等，2024).团队基于该策略首创“振冲碎石桩固基、糯米灰浆筑坝、碳化竹锚护坡、乡土植物绿化、分形景观设计”方案(图10).

(1)振冲碎石桩固基.以山体震损碳酸岩块石为骨料，采用振冲碎石桩技术加固火花海决堤坝体地基.实测表明处理后坝基承载力≥305 kPa，震损坝体底部地下有一层厚度约2.9 m的钙华砂，振冲碎石桩可以更高效地、经济地处理地震区软弱地基，在满足承载要求的同时保证了地下水渗流(陈俊宇，2020).

(2)糯米灰浆筑坝.采用糯米-石灰华有机-无机复合材料浇筑震损灰岩、钙华体，修复坝体缺口，水下养护60天后抗压强度达到12 MPa.九寨沟作为岩溶喀斯特地区，地下水中富含钙离子，这些钙离子在糯米灰浆中的支链淀粉成分诱导下发生生物矿化作用，可于浆体孔隙中逐渐析出碳酸钙，有利于新生钙华的沉积，实现了自然、生态兼容(图11)(赵芹江，2021；王文俊，2023).

(3)碳化竹锚护坡.竹子是一种轻质、高强度的绿色工程材料，具有高刚度、良好的韧性、低变形和尺寸稳定性等优点.在火花海修复中，竹锚杆取代传统钢筋，在保证稳定性的同时减少了钢筋在高矿化

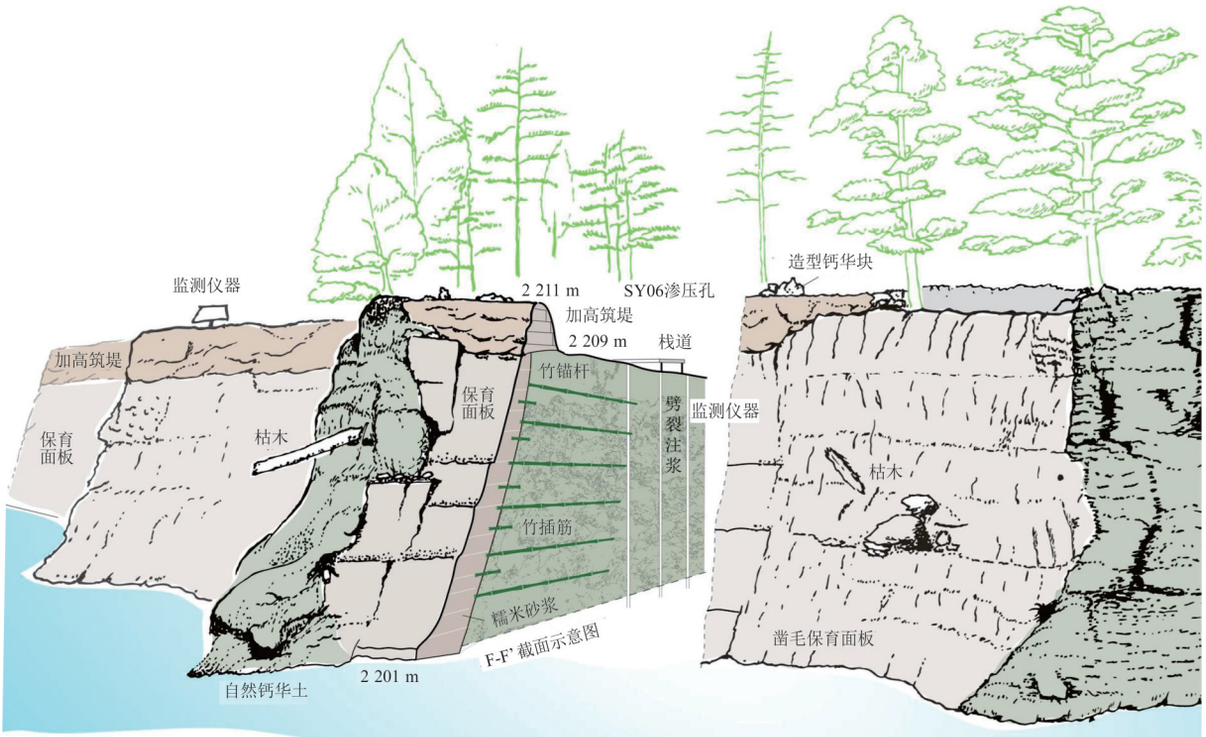


图 10　火花海生态化治理工程典型剖面图

Fig.10　Typical cross-section of the ecological restoration project at Huohuahai Lake

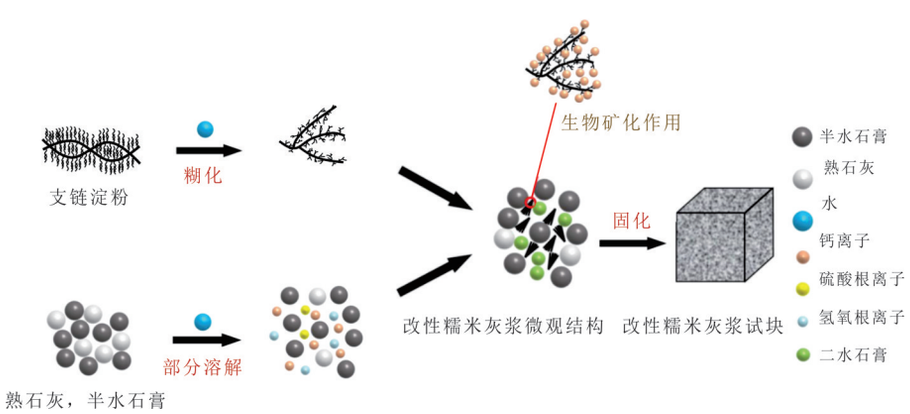


图 11　糯米诱导下碳酸钙生物矿化过程

Fig.11　The biomineralization process of calcium carbonate induced by sticky rice

度水中受侵蚀和污染环境的隐患.灌注糯米灰浆加固火花海残留坝体及上游湖群堤坝后,其持续应变波动<800 με,保障了岸堤安全(贾栋钦,2020).

(4)乡土植物绿化与分形景观设计.利用分形几何理论,解析火花海所在地——树正群海地形与植物群落空间分布的分形特征.利用分形维数模拟自然形态,构建火花海灾后地形重塑与植物群落构建方法.为评估修复成效,采用问卷调查和眼动实验相结合的方法,对比分析地震前后不同阶段火花海的景观美学价值与世界自然遗产价值(谢瑶等,2021;邹瓒,2025).研究表明地震对其产生明显的负面影响,少量的人为辅助修复显著提升了火花海的美学价值和世界自然遗产价值,实现了"环境友好、影响最小"的火花海湖群近自然修复(Zou *et al.*, 2025).

火花海生态化治理工程在恢复水化学环境与促进自然钙华演化方面取得了显著成效(图 12).监测表明,修复后地表水的方解石饱和指数稳定维持在 0.77±0.11,水体呈现持续析出碳酸钙的特征,为池水自然涵养与堤坝的"自我修复"提供了核心水化学条件.目前,堤坝表面已成功观测到新生



a 治理前整体实景 b 治理后整体实景 c 治理前局部实景 d 治理后局部实景

图 12 火花海治理前后对比

Fig.12 Comparison of the restoration of the Huohuahai Lake before and after

钙华坝:a. 2017 年 10 月,b. 2025 年 7 月;海子:c. 治理前;d. 治理后

钙华,修复材料未对水质造成显著扰动.同位素与元素分析进一步证实,新钙华的钙含量(34.9%~36.3%)与天然老钙华高度一致,且其碳同位素值(−1.39‰±0.49‰)远低于人工改性糯米灰浆(0.93‰~2.07‰),表明新生沉积物主要源于地表水的作用,实现了钙华自然沉积(刘秦等,2023).

火花海生态化治理工程在重构“植被-土壤-土壤动物”耦合系统方面展现出显著的正向效应.监测表明,修复区植被群落多样性逐步趋同于原生生境,土壤总有机碳(TOC)、铵态氮及胞外酶(NAGase 等)活性均呈显著增长趋势,土壤动物多样性显著提高,其群落丰度、植物多样性及土壤理化指标呈显著正相关.生态化治理工程能够激活地上与地下群落的协同反馈机制,促使受损坝体生态系统稳步融入周边自然生态系统(曾泊文,2023).

在 NbS 理念下,团队在火花海生态化治理实践中形成了“保育与加固并重、分类施策”的技术思路.对于结构相对完整但存在潜在风险的区域,侧重于“保育”,即通过维持水文连通、补砌细微裂隙、引导钙华自然沉积等方式,强化地质体的自修复能力,防止退化进一步蔓延;例如在珍珠滩,针对表层裂缝采用了糯米灰浆灌缝补砌,在不破坏原有景观的前提下抑制因水流下渗引发的潜蚀掏空;在树正群海,则通过对湖岸堤坝的适度加固,提升其整体稳定性,防止因局部垮塌引发连锁溃决.而对于火花海这类已发生严重溃口的区域,则侧重于“加固”,即通过振冲碎石桩深层固基、糯米灰浆构筑坝体、竹锚固坡等工程手段,快速重建稳定的地质体,为后续生态恢复提供基础.这一分类施策将被动防护转变为主动干预,使人工修复与自然演替有机结合.

4 斜坡地质灾害生态化治理技术

传统斜坡地质灾害治理工程侧重力学支挡,减少灾害带来的直接损害,虽提升了地质体稳定性,却无法满足生态需求.地质灾害生态化治理目标从单一的安全稳定,向水土保持、土壤与植被恢复、生境景观维护等多目标协同转变,强调整体性、适应性和韧性提升.

首先,通过厘清极端降雨和冻融侵蚀扰损过程与模式,实现生态化治理限制因子的精准诊断,进而阐明水热侵蚀过程植被退化的“生态水负平衡效应”及植被有效水利用的土体水蚀粗化与岩体冻融劣化约束效应,揭示大型松散堆积体植被养分供给及陡立边坡土壤附着机制,为强冲蚀松散堆积体、冻融环境高陡岩质边坡典型复杂场景生态化治理提供岩土-水-生互作与调控理论基础.

其次,通过厘清干旱、高寒环境土壤水/热生态位迁移过程及其对土壤组构的影响规律,揭示环境胁迫下微生物-植物联合驱动土壤矿物溶蚀与养分循环机制,明确土壤物理结皮-生物结皮演进规律及对水肥热的关键调节作用,进而建立基于土壤生态位和水土保持功能的植物优化配置方案.通过阐明工程结构与生物措施动态适配及交互效应,揭示扰损区生物工程韧性稳态与自适应维持机制,建立了极端环境生态化治理工程系统平衡与韧性提升理论体系,为基于过程调控、促进自然恢复的生态化治理技术方案提供理论基础.

4.1　高陡岩质边坡生态化治理技术

九寨沟高陡岩质边坡治理是地质安全与生态景观双重约束下的多目标协同需求.地震崩塌产生大量高陡裸岩边坡,严重破坏了遗产地的景观协调性,受崩源区岩体震损影响,震后浅表碎落、浅层崩塌灾害时有发生.传统崩塌治理以“硬性防控”为核心,强调通过被动防护网、拦石墙等工程手段快速消减灾害风险,虽能短期保障安全,却无法实现“地质-生态-景观”协同治理.本文突破单个工程学视角,将崩落源控制置于区域地质演化、生态系统恢复与突出普遍价值(OUV)保护的宏观框架中,探索“灾害治理-生境重建-景观融合”生态化治理路径.

九寨沟高陡岩质边坡在冻融-水力复合作用下,浅表岩层易剥落、植生层附着难,在通过结构加固工程保障地质安全的基础上,采用传统黏结剂构建人工植生层虽能快速附着并实现短期绿化,但其工程韧性修复能力及材料抗冻融性能不足,难以适应长期地质营力作用,导致耐久性较差(Habumugisha *et al.*, 2022; Jeon *et al.*, 2024).实现崩落灾害防治从“抵抗地质作用力”的被动防御向“利用生态过程增强地质体韧性”的主动调控转变,核心在于通过自主研发冻融适应性基质材料,将工程措施、功能材料与生物过程进行有机结合,实现岩质边坡从“致灾体”向“生态载体”的功能跃迁.

采用多孔纤维棒等结构辅助措施进行坡面“造粗”(提高坡面粗糙度);基于仿生贻贝足丝黏附机制,研发岩-土界面强黏附抗冻融固土材料,增强基质层-岩体界面的胶结黏附能力,从而建立裸露岩面与植生土壤的界面融合功能层.同步注入熟化菌剂与苔藓孢子,通过功能微生物固氮溶磷、矿物风化等代谢活动激活岩土养分释放并改善基质微环境;通过抗逆物种筛选与快速成坪工艺完成苔藓结皮抗蚀与保水减蒸,重构了具有自维持能力的微生境.结合机载喷射装置、自动喷射系统与大载重无人机自动喷播装备,建立陡立边坡大扬程、宽级配的生态重构层3D打印技术(图13).

4.2　大型松散堆积体生态位重构技术

九寨沟崩塌堆积体具有结构松散、大孔隙(通常孔隙率>30%)、强渗透性(渗透率>10^{-4} m/s)的特点,使得降雨渗流侵蚀成为震后主导灾害类型之一.传统格宾石笼、挡土墙等治理工程在提升堆积体整体稳定性方面成效显著,但硬性措施侧重力学加固,对水土侵蚀柔性调控不足,易产生从微观尺

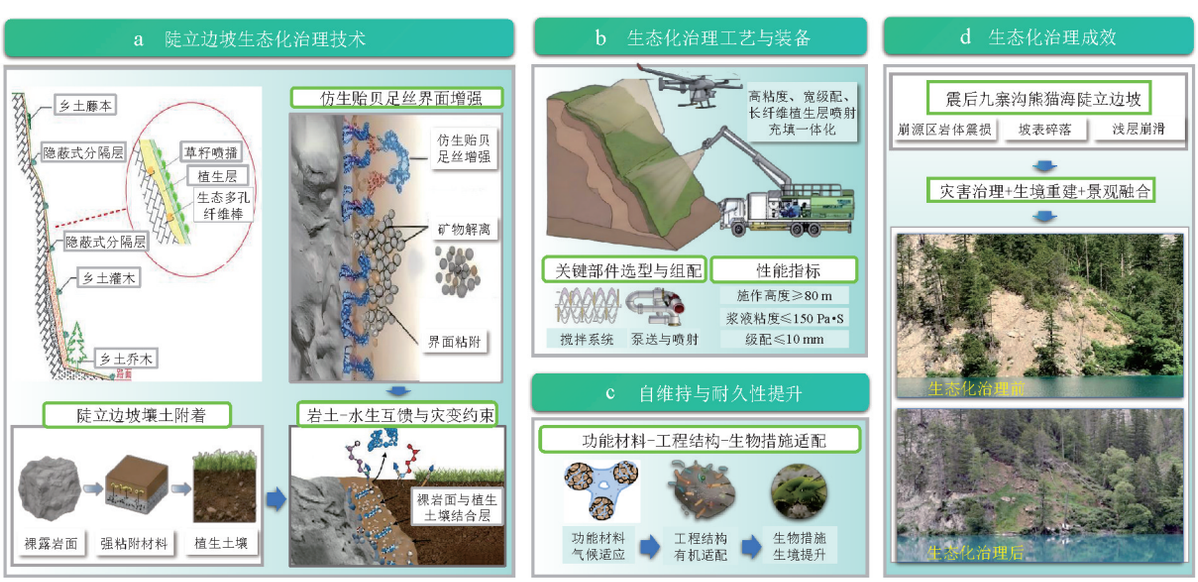


图13　高陡岩质边坡崩塌灾害生态化治理技术

Fig.13　Ecological mitigation technology for rockfall hazards on high-steep rock slopes

度的驱动细粒选择性流失到介观尺度的引发孔隙结构分异，最终导致宏观尺度的管涌、坍塌、溃散等多类型侵蚀灾害链，加剧了土壤质量下降、水源涵养功能衰退、生物多样性降低等一系列生态问题（Wang *et al.*，2021；Zheng *et al.*，2022a）. 如何协同坡面侵蚀防控阻断灾害演化、构建适宜的土壤生态位以促进植被恢复，成为松散堆积体生态化治理亟待突破的技术瓶颈.

基于崩坡积土固有的粗颗粒架空结构，以调节土壤-水分-大气之间的互馈过程为核心，确定适宜坡面生态恢复的土壤级配范围与适配方案，通过原位级配调控与精细化分层结构设计，将其重塑为具备特定生态功能的稳定土（Zhang *et al.*，2025）. 基于土壤水分动态与势能空间轨迹，揭示土壤级配分层改良对修复层持水性、保水性以及有效水赋存的影响机制；结合土壤结构和生态材料的同步优化，形成可持续的“蒸发抑制-凝结捕获”双向调控机制，实现土壤水文功能的分层提升. 生态重构土体稳定性，不仅取决于级配与分层设计，还需改善土壤颗粒间的原始胶结状态. 通过有机质胶结，优化颗粒界面性质，调节胶体颗粒间静电斥力、范德华力，使土壤基本结构单元在生态化治理后得到根本性改良（Qiu *et al.*，2025）.

在此基础上，采取“土壤改良＋坡面防护＋径流调控”的协同措施，构建大型松散堆积体“固土阻渗-熟化植生-结皮抗蚀”生态位重构技术（图 14）. 基于无机矿物改性聚合物凝胶材料，调控堆积体入渗固化特性与水/养分运移过程，研发强渗层水肥阻滞技术；筛选解磷、解钾、固氮等功能微生物，优化微生物组配及植物生长调控方案，研发微生物碎石土原位熟化与植生层构建技术；基于改良粗粒土的水分动态与水势响应，协同调控堆积体土壤抗蚀稳定性与有效水赋存功能，研发保水抗蚀功能结皮层构建技术.

生态位重构减灾的深层作用机理与颗粒间作用力的系统性调控密切相关. 阻渗层通过胶凝材料填充颗粒间孔隙，降低颗粒表面双电层斥力，增强范德华引力与机械咬合力，实现湿润条件下土体密实结构自维持和抑制养分漏失；植生层构建过程中，微生物代谢活动与有机质输入可改变颗粒界面性质，调节颗粒间作用力，形成以有机-无机复合体为核心的稳定微团聚体，为根系穿插与养分赋存提供适宜的孔隙微生境；结皮层作为表层界面，通过生物结皮与土壤颗粒的胶结作用进一步降低颗粒间排斥力，抑制团聚体破碎与细颗粒释放，从微观尺度强化表层土壤的结构稳定性.

“阻渗-植生-结皮”土壤生态位重构技术能满足大型松散堆积体“控渗-植生-减蒸-抗蚀”的耦合需求，从微观、介观、宏观实现跨尺度土壤重构，由内到外根本性地改变土壤物理结构与生态

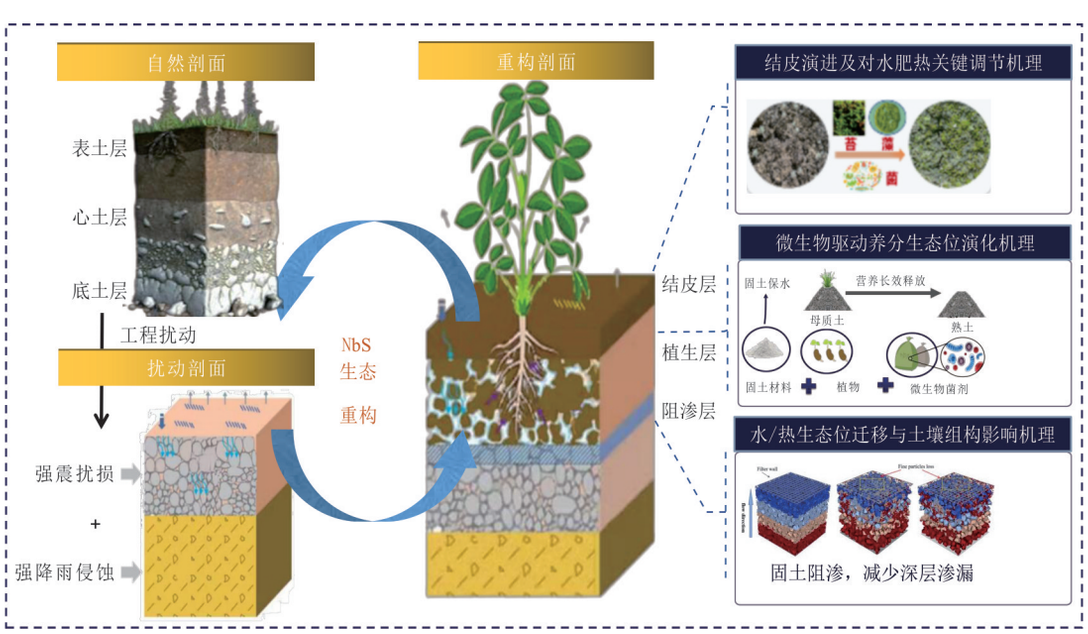


图 14 地震崩塌堆积体结皮抗蚀-熟化植生-固土阻渗生态位重构技术

Fig.14 Niche reconstruction technology for earthquake-induced rockfall accumulations: Crust anti-erosion, soil maturation for vegetation, and seepage prevention

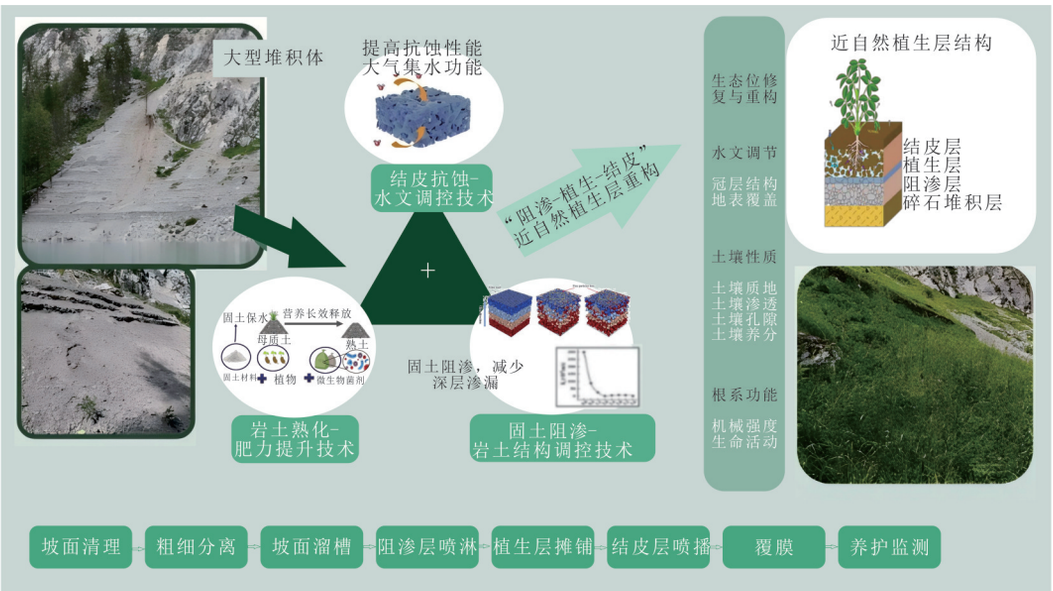


图 15　地震崩塌堆积体生态化治理技术

Fig.15　Ecological management technology for earthquake-induced rockfall accumulations

功能,打破了传统生态修复方式仅停留于植被恢复层面的表象治理局限.传统模式侧重于地上生物量的快速重建,而“阻渗-植生-结皮”土壤生态位重构技术体系则是从调控颗粒间作用力入手,从源头上对土壤结构本体进行改良,从而使重构土体具备自维持的稳定性和抗蚀能力.

进一步,利用固土抗渗-高延展纤维材料构建仿自然径流排导结构,创建适宜微地形与坡体结构特征的抗蚀固强-韧性防护-柔性截排技术;考虑土壤水分胁迫阈值与植物生理响应信号间耦合关系,建立基于胁迫环境触发的水肥智能管养技术,实现震后崩塌堆积体防治工程结构与生物措施动态适配与生态化治理韧性提升,最终实现堆积体“径流调控-坡面防护-植被重建”的生态减灾目标(图 15).

4.3　地质灾害防治工程硬质结构体生态绿化技术

在高陡岩质边坡和崩塌堆积体生态化治理基础上,基于九寨沟遗产地峡谷高陡的地貌特点、景观与植被生态保护要求高、治理工程用地紧张、搬迁避让和灾害物源排导不可行等限制条件,通过(1)工程小型化、分散隐蔽设计;(2)源头排危、适量安装主动防护网;(3)林间布设谷坊坝、被动网、导流堤等设施;(4)坡底设置桩板拦石墙、棚洞、停淤坝等被动防护工程;(5)栽种本土植物绿化美化等方式,开展了九寨沟遗产地斜坡地质灾害综合防治.在上述防治工程中,混凝土拦石墙、挡土墙等颜色突兀,与周围环境严重不和谐,大量“白色污染”破坏了沿线生态连续性与景观协调性.

综合利用改性糯米基土壤改良材料再结合矿物缓释肥,改良硬质陡立面表层基质,使土壤形成具有多级孔隙的团粒结构,保水性、抗剪强度和抗冲蚀性大幅度提高,适于须根系植物生长.通过对硬质陡立面表层基质的改良,三年内完成草本植物覆绿、藤本植物定植生长及乡土植物演替,结合周边乔灌木遮挡措施,有效消解了工程硬质景观对自然美学价值的影响,依靠乡土植物形成连续性原状景观,使得挡墙与局部生态环境完全融合.

挡墙植生层通过材料-结构-植被协同作用,形成了独立的生态水文系统,具有显著的土壤持水能力与水汽传输性能,促进了土壤水汽扩散与表面水汽吸附(蒸发与凝结)过程的交互进行.

在该系统中,降雨和凝结水作为两个主要的自然水分来源,对植生层水分补给和维持系统功能具有重要贡献(Guo *et al.*, 2022).修复初期,生态材料通过促进土壤团聚、降低容重、优化孔隙结构等途径,增强表层土壤对凝结水的截留、储存与利用,改善表层土壤水分保持性能.叶片对凝结水的有效利用,为生长初期分布在土壤浅层的大量根系提供水分.后期,材料自然降解伴随根系的腐烂、深扎,形成向更深层入渗的水分通道,允许水分向更深层土壤补给.同时长期有机质含量的增加维持并增强了土壤的持水能力,使得更

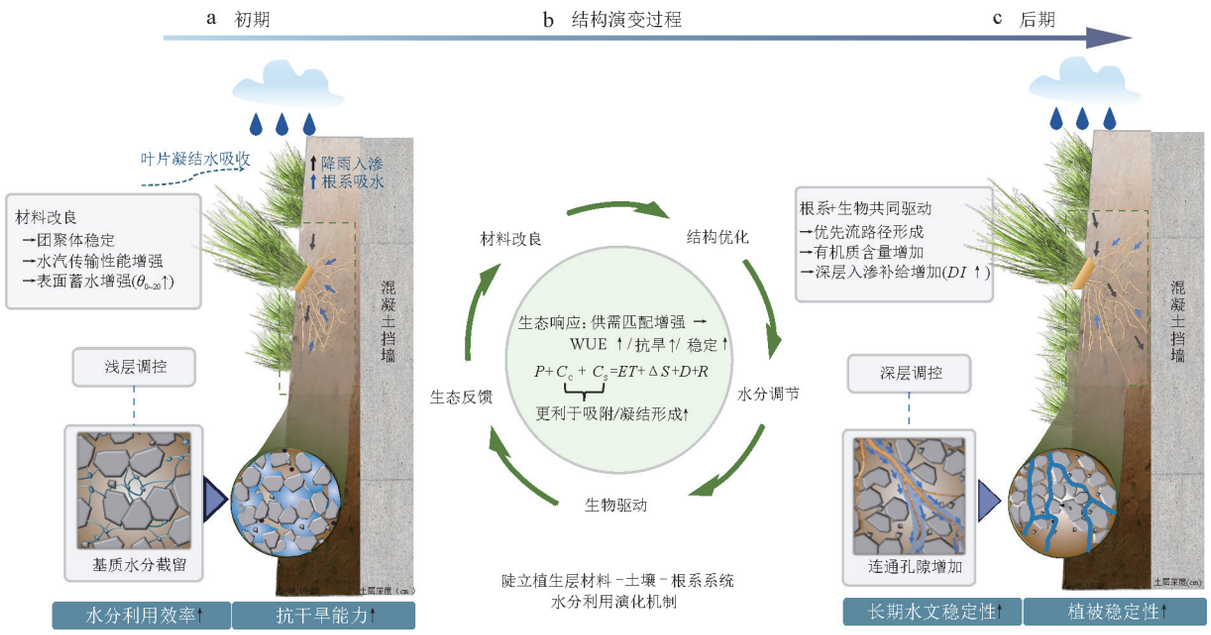


图 16 垂直绿化系统的水分补给和植物用水过程演化机制

Fig.16 Evolution mechanism of water supply and plant water use in vertical greening systems



图 17 九寨沟地质灾害挡墙生态绿化前后效果对比

Fig.17 Comparison of the retaining wall at initial construction stage and after vegetation layer reconstruction

以诺日朗挡墙为例，左图：2018 年；右图：2025 年

多水分可以入渗并贮存在深层土壤层，供给更多深扎根系进行水分吸收利用(Hu *et al.*, 2026).

该调节过程中水分补给分配模式与植被根系生长特征相辅相成，形成了陡立植生层材料-土壤-根系系统独特的水分利用演化机制(图 16)，缓解了因植生层接收降雨面积小、水分流失多等特性造成的水分胁迫问题.并且植生层土壤具有更高保温性能，能够通过降低表面温度缓解混凝土挡墙造成的局部热效应.以上综合作用显著提升了生态与景观美学价值，实现了对此类硬质景观的柔化与生态重塑(图 17).

5 地质灾害生态化治理评价指标体系构建与多维成效评估

地质灾害治理成效评价从侧重结构稳定性向生态功能恢复转变，基于“压力-状态-响应”框架，从治理工程子系统与生态环境子系统耦合关系出发，突破传统静态评价局限，跨学科考虑地质稳定、水土保持、生态恢复、景观融合等多目标要素，建立 地质灾害生态化治理评价指标体系(吕雅兰等，2026).从 2018 年以来，以九寨沟树正沟、日则沟、则渣洼沟等 25 处地质灾害生态化治理对象作为长期监测对象，对生态化治理成效进行量化评估.

5.1 水土保持与土壤质量提升

生态化治理在确保地质体稳定性的同时，提升了水土保持功能.土壤可蚀性 K 值调控至 0.015，较未治理区降低 70.15%.生态化治理显著改善土壤结构，泥沙输出区域均衡，坡面粗化进程逐渐停止.对 50°以上高陡边坡、孔隙率＞30% 堆积体修复 3 年后，土壤有机质、养分含量达到未扰损区的 90% 以上.

5.2　生物多样性恢复

初期植被覆盖度超过 80%,较自然恢复区高 1.3 倍,香农指数和根系长度显著优于其他区域;未治理区依赖先锋草本,年盖度增幅 12.2%,但物种均匀度指数(0.83)较低.

挡墙生态绿化后 2~6 年间,其土壤微生物多样性和丰富度呈持续上升趋势;乡土植物种类 3~5 年间从 10~15 种增长到 25 种以上,新增物种最多达到 12 种.微生物多样性指数提升了 0.24~0.59 倍.部分区域植被类型逐渐由草本向灌木、乔木群落演替.治理 4~6 年后,挡墙的总有机碳提升了 4.5%~12.4%;治理 5 年区域的氨氮含量较治理 2~3 年区域提升了 35.1%~213.8%,土壤养分含量明显优于同期自然恢复区域(修宇鑫等,2025).同时,生态化治理促进了土壤钙结合态无机磷的积累,使碱性磷酸酶(ALP)活性显著增强,提升了土壤磷素的转化与利用效率(Xiu *et al.*, 2025).偏最小二乘路径模型结果(PLS-PM)进一步显示,修复时间对植物和微生物多样性提升具有显著正向影响,植物、土壤和细菌群落之间存在显著协同作用关系,生态修复增强了微生物介导的磷循环,优化了磷素供给与储存格局.

边坡生态化治理后,土壤 TOC、TN、TK、TP、AP、AK 含量显著高于自然恢复区,对植物根际土壤微生物采取了一种有利于将硝酸盐转化为铵态氮和有机氮储备的策略.植物根系分泌物在碳氮比调控下,通过核心微生物群落的介导作用,影响土壤理化性质及氮循环过程(图 18).在治理区共检测到 230 个微生物门,其中变形菌门(Proteobacteria)、放线菌门(Actinobacteriota)和酸杆菌门(Acidobacteriota)始终为优势菌门,相对丰度分别为 31.26%~32.96%、28.06%~30.15% 和 14.50%~15.95%,表明治理后边坡已形成较为稳定的微生物群落基础.微生物共现网络分析显示,治理区网络模块化程度更高、结构更稳定,关键枢纽物种数量增加,表明治理措施加速了稳定微生物群落结构的构建.生态化治理通过强化土壤-植物-微生物之间的互馈机制,推动了受损区域生态地质环境由初期恢复向稳定、正向演替阶段的持续转变.

5.3　景观融合

生态化治理后火花海坝体地形、迎水面堤岸线、退水面叠瀑分形维数分别为 1.433 2(R^2=0.998 6)、1.273 2(R^2=0.990 1)和 1.384 2(R^2=0.988 4),接近原始景观的分形维数,实现了治理后的空间形态与

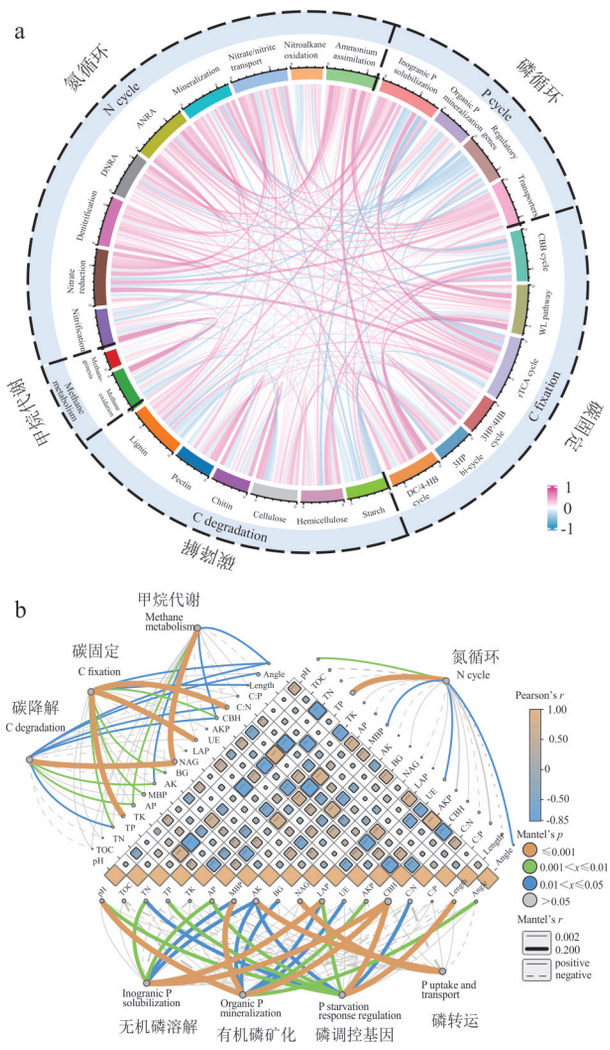


图 18　挡墙和边坡生态化治理成效

Fig.18　Effectiveness of ecological restoration on retaining walls and slopes

a.功能基因丰度的皮尔逊相关性分析;b.功能基因丰度与土壤理化性质和酶化学计量的相关性

周围环境自相似性;火花海残留坝体林冠线计盒维数为 1.220 9(R^2=0.993 1),治理后植被林冠线计盒维数值为 1.229 3(R^2=0.996 3),表明植被立面形态分形特征与原始形态具有一致连贯性;火花海治理坝体油松种群计盒维数为 1.376 9(R^2=0.989 9),信息维数为 1.079 8(R^2=0.990 3),表明油松处于优势建群种地位,以油松为中心进行植被设计,从而保障了火花海植被在空间占据程度、空间点位分布与周边环境的自然协调性(Zou *et al.*, 2023).以上量化评估表明,治理后火花海景观视觉上与周边景观自然相融,保持了遗产地原真性与完整性.本文构建了火花海美学价值评价模型:$S=-0.386+0.445A+0.148T+0.287H+0.125I$,明确了在遗产地生态化

治理中应着重考虑自然美学(*A*)、地形地貌(*T*)、自然生境(*H*)以及完整性(*I*)这4项因素(Zou *et al.*, 2025).

选取九寨沟9处挡墙,采集其生态化处理前后的量化物理参数(几何参数:高度、坡度、长度;视觉参数:色彩协调度、空间位置),并结合多方利益相关者感知数据(来自游客、学生及当地工作人员的355份有效问卷),运用风景美景度评估法(SBE)对生态化处理背景下多方利益相关者的审美共识进行量化,并将感知洞察转化为经过实地验证的设计准则.结果表明,在所评价的18张大型挡墙样本照片中,SBE值在1.434至1.335之间.8张照片(44.4%)全部被评估为完全负面,所有负面评估均归因于未进行绿化处理的裸露挡土墙;其余10张照片(55.6%)获得正面评价,包括1张半裸露且隐蔽处理的挡土墙.这表明绿化处理对挡土墙的SBE值产生了显著影响.使用355名受访者的行为评分(SBE)作为响应变量,以及生态处理前后挡土墙的客观物理参数作为解释变量,进行了冗余分析(RDA).RDA揭示了生态处理后与处理前之间的清晰分离;在未进行处理之前,颜色距离(R^2=0.496)和坡度(R^2=0.614)之间存在正相关;在处理后,则与植被覆盖率(R^2=0.930)相关(Xi *et al.*, 2025).综合表明,提升挡土墙外部空间的植被覆盖率、缩小挡土墙与周边森林的色彩差异,能显著增强其与景观的视觉融合度.生态化处理后的挡土墙被认为具有自然感与视觉美感,挡土墙顶部形态与空间位置的改造是提升SBE值的关键因素.针对不同区位与尺度的挡土墙,需采用适应性强、环境敏感性高的生态化设计策略(Xi *et al.*, 2025).

6 结论与展望

6.1 结论

地震地质灾害是世界自然遗产地可持续发展面临的最严峻挑战之一,震后九寨沟世界自然遗产地是研究生态地质环境问题调查方法、"地质-材料-生态-工程"多学科交叉理论,以及构建生态化治理韧性技术的理想实践地.当前大量生态化治理工程以恢复生态学理论为基础,仍亟须与地学相融,实现地质环境扰损的生态化治理与韧性提升.震后九寨沟世界自然遗产地生态地质环境保护研究,是推动遗产地生态价值提升与可持续发展的重要工作,也为我国青藏高原等生态地质环境脆弱区灾害防治、生态修复、环境保护提供技术支撑.本文主要结论:

(1)构建了"振冲碎石桩固基-糯米灰浆筑坝-碳化竹锚护坡-乡土植物绿化-分形景观设计"的震损钙华坝生态修复与钙华湖群原真保育技术体系.

(2)创建了震损高陡边坡崩塌灾害的"结构补强-生态固土-生物诱导"生态化治理技术、震后大型松散堆积体水土灾害生态化治理"阻渗-植生-结皮"生态位重构技术.

(3)跨学科考虑地质稳定、水土保持、生态恢复、景观融合等多目标要素,构建了地质灾害生态化治理成效多维评估方法.

6.2 展望

传统流域地质灾害治理主要通过拦挡工程控制物源运移,或在场地尺度上实施土壤改良、水土保持、植被恢复等生态工程,但不同类型工程措施之间功能不协同、缺乏空间统筹,尚未实现协同布置与跨尺度调控.后续研究可从以下方面展开:

(1)通过集成生态地质环境山体、岩土、水、植被强震过程各要素响应规律,识别强震扰损区时空演化主控因子,量化震后生态地质环境空间格局对断裂分布、地震活动、地形地貌、地层岩土、植被水体变化的影响参数,从而揭示震后地质环境长期效应控制因素及互馈作用机制.

(2)统筹考虑流域地质安全与生态安全,以减少流域泥沙淤积、提升水体景观品质、恢复自然景观与生态美化、提高生物多样性、提升生态系统服务功能、促进可持续发展为综合目标,提取岩土、植被、水文、侵蚀、泥沙输移与沉积等关键指标,分析震后多尺度生态损害、物质运移、地质灾害演化,定量评估水土保持、水源涵养、生物多样性维持等核心生态系统服务的受损状况,解析其时空传递路径与空间分异格局;在此基础上,进行流域生态系统服务价值分区、单元水土侵蚀强度分级,制定差异化的单元水土资源优化配置策略.

(3)基于流域地貌、土地利用、灾害风险与生态功能重要性,对流域进行生态保育、灾害控制与水土保持、生态拦截与净化、景观恢复与生态廊道建设等分区治理.针对不同的场地类型,建立场地、单元生态化治理分区分类评估指标体系,从而构建"流域生态目标需求-单元水土保持功能分解-场地治理技术适配"的多级调控方案;形成稳坡护源、固土增植、拦砂净化、清淤复流等调控路径,集成水土保持、物源稳固、工程拦挡、泥沙疏排,以及施作工艺和后期管养等技术清单,建立"环境条件-技术性能-治理目标"多

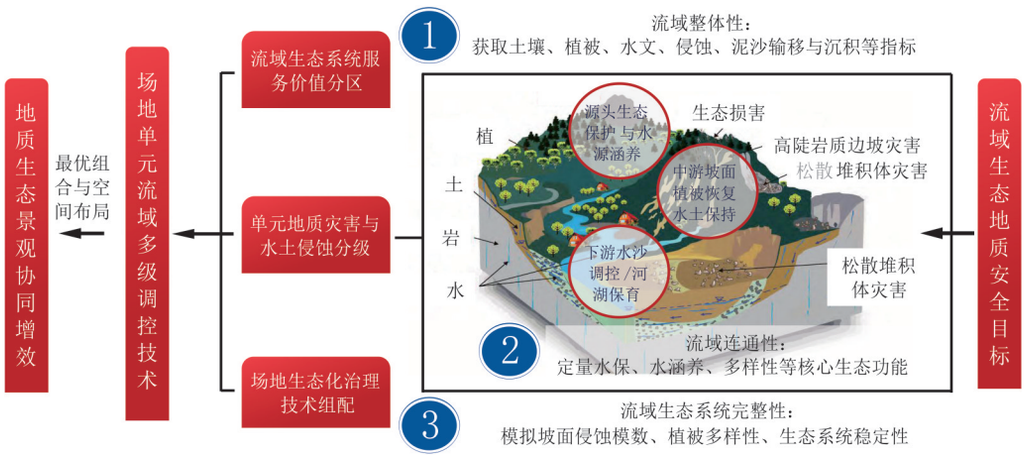


图 19　九寨沟流域地质灾害多级调控技术

Fig.19　Multi-level regulation technology for geohazards in the Jiuzhaigou watershed

维度技术适配性评价体系,构建面向流域生态地质安全系统提升的多级调控技术体系(图 19).

(4)构建九寨沟“精准感知-动态监测-智能评估-科学管控”生态地质环境监管体系,进一步研发复杂场景智能化施作装备;从珍稀动植物保护、调节服务产品(水源涵养、水质净化、土壤保持、洪水调蓄、固碳释氧)及文化服务产品等多维度评价地质灾害生态化治理价值,探索九寨沟世界自然遗产地高水平保护与高质量发展协同创新路径.

致谢:本文工作是作者所在研究团队长期研究攻关完成的,主要完成人员:周立宏、张晓超、雷泞菲、崔圣华、魏玉峰、李琪、邹瓒、罗璟、张佳兴、杨晴雯、李景吉、贾栋钦、任和、赵芹江、王文俊、吴学敏、陈俊宇、郝红超、张文翔、王益、胡烨、邱茂、赵啸怡、张济宁、段宇英、朱锦宇、修宇鑫、蒋卓君、刘芃.本文的完成是在九寨沟风景名胜管理局的统筹规划,以及来自四川大学、四川农业大学、四川省华地建设工程有限责任公司、自然资源投资集团等多位科技工作者协同研究的共同成果!

References

Canet, C., Sánchez-Aguirre, D., García-Sánchez, L., et al., 2024. Geological Heritage in UNESCO's World Heritage List: A Critical Review. *International Journal of Geoheritage and Parks*, 12(4): 531—543. https://doi.org/10.1016/j.ijgeop.2024.09.001

Chen, J. Y., 2020. Study on Vibro-Replacement Stone Column Reinforcement of Earthquake-Damaged Travertine Soil in Jiuzhaigou Induced by the “8.8” Earthquake (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu (in Chinese with English abstract).

Chen, S. F., Wilson, C. J. L., Deng, Q. D., et al., 1994. Active Faulting and Block Movement Associated with Large Earthquakes in the Min Shan and Longmen Mountains, Northeastern Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99(B12): 24025—24038. https://doi.org/10.1029/94jb02132

Chen, X., Sheng, D. P., 2017. Progress in Emergency Rescue and Disaster Relief in Sichuan: Insights from the Response to the Jiuzhaigou Earthquake. *Journal of Sichuan Administration Institute*, (5): 58—62 (in Chinese with English abstract).

Chen, Y., Dong, F. Q., Han, Y., et al., 2021. Dynamic Evolution of Vegetation and Drainages in the Jiuzhaigou Valley Scenic Area before and after the “8 August 2017” Earthquake under Conditions of Travertine Habitat Conservation and Restoration. *Carsologica Sinica*, 40(1): 68—76 (in Chinese with English abstract).

Dai, L. X., Xu, Q., Fan, X. M., et al., 2017. A Preliminary Study on Spatial Distribution Patterns of Landslides Triggered by Jiuzhaigou Earthquake in Sichuan on August 8th, 2017 and Their Susceptibility Assessment. *Journal of Engineering Geology*, (4): 1151—1164 (in Chinese with English abstract).

Duan, Y. Y., Pei, X. J., Luo, J., et al., 2024. Disentangling the Spatiotemporal Dynamics, Drivers, and Recovery of NPP in Co-Seismic Landslides: A Case Study of the 2017 Jiuzhaigou Earthquake, China. *Forests*, 15(8): 1381. https://doi.org/10.3390/f15081381

Fan, X. M., Scaringi, G., Xu, Q., et al., 2018. Coseismic Landslides Triggered by the 8th August 2017 *Ms*7.0 Jiuzhaigou Earthquake (Sichuan, China): Factors Controlling Their Spatial Distribution and Implications for the Seismogenic Blind Fault Identification. *Landslides*, 15(5): 967—983. https://doi.org/10.1007/s10346-018-0960-x

Guo, J. Q., Peng, D., Cao, J., et al., 2000. Geomorphology and Quaternary Geology of Jiuzhaigou, Sichuan. *Acta Geologica Sichuan*, (3): 183－192 (in Chinese with English abstract).

Guo, X. N., Wang, Y. F., Yan, H. M., et al., 2022. Dew/Hoar Frost on the Canopies and Underlying Surfaces of Two Typical Desert Shrubs in Northwest China and Their Relevance to Drought. *Journal of Hydrology*, 609: 127880. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127880

Habumugisha, J. M., Chen, N. S., Rahman, M., et al., 2022. Determining Trigger Factors of Soil Mass Failure in a Hollow: A Study Based in the Sichuan Province, China. *Catena*, 216: 106368. https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106368

Hu, Y., Pei, X. J., Zhang, X. C., et al., 2026. Evolving Soil Water Replenishment and Plant Water-Use Strategies with Degradation of Restoration Materials in Vertical Greenery Systems. *Ecological Engineering*, 226: 107917. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2026.107917

Jeon, J., Kim, Y., Kim, D., et al., 2024. Flume Experiments for Flow around Debris Accumulation at a Bridge. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 28(3): 1049－1061. https://doi.org/10.1007/s12205-024-1442-4

Jia, D. Q., 2020. Study on the Strength Characteristics and Application of Modified Sticky-Rice Lime Mortar for Reinforcing Travertine Soil (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu (in Chinese with English abstract).

Li, J., Wang, Q. C., Cui, Z. J., et al., 2019. Characteristics of Focal Mechanisms and Stress Field in the Eastern Boundary of sichuan-Yunnan Block and Its Adjacent Area. *Seismology and Geology*, 41(6): 1395－1412 (in Chinese with English abstract).

Li, X. J., Lin, J. Y., Hu, G. S., et al., 2021. Remote Sensing-Based Debris Flow Source Area Extraction before and after Earthquake for a Typical Mountain Basin in Southwest China: A Case Study in the Shuzheng Village Basin. *Remote Sensing Technology and Application*, 36 (3): 638－648 (in Chinese with English abstract).

Li, Y. S., Huang, C., Yi, S. J., et al., 2017. Study on Seismic Fault and Source Rupture Tectonic Dynamic Mechanism of Jiuzhaigou *Ms*7.0 Earthquake. *Journal of Engineering Geology*, 25(4): 1141－1150 (in Chinese with English abstract).

Liang, J., Pei, X. J., Wen, Y., et al., 2019. Research on Development and Distribution Rules of Geohazards in Jiuzhaigou Earthquake in 2017. *Journal of Natural Disasters*, 28(5): 181－188 (in Chinese with English abstract).

Liu, J. C., Zhong, Y. H., Xiao, W. Y., et al., 2025. Driving Factors of Soil Erosion and Sediment Yield in Jiuzhaigou Based on InVEST Model. *Research of Soil and Water Conservation*, 32(5): 20－30, 38 (in Chinese with English abstract).

Liu, Q., Yan, H., Xiao, W. Y., et al., 2023. Water Chemistry and Tufa Deposition on the Restored Dam of Huohua Lake in the Jiuzhai Valley. *Carsologica Sinica*, 42 (3): 495－508 (in Chinese with English abstract).

Liu, S. Y., Zhang, X. P., Zeng, Z. Y., et al., 2007. Biodiversity of Jiuzhaigou National Nature Reserve. Sichuan Science and Technology Press, Chengdu (in Chinese).

Liu, X. S., 2022. Research and Application of Fine LiDAR Identification and Volume Calculation Methods for Debris-Flow Source Materials in Densely Vegetated Mountainous Areas (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu (in Chinese with English abstract).

Luo, L. G., 2023. Spatiotemporal Evolution and Risk Assessment of Landslide Hazards Triggered by the "8.8" Jiuzhaigou Earthquake (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu (in Chinese with English abstract).

Luo, L. G., Pei, X. J., Cui, S. H., et al., 2021. Study on the Selection of Factor Combinations for Landslide Susceptibility Assessment of the Jiuzhaigou Earthquake. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 40 (11): 2306－2319 (in Chinese with English abstract).

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).

Moreau, C., Cottet, M., Rivière-Honegger, A., et al., 2022. Nature-Based Solutions (NbS): A Management Paradigm Shift in Practitioners' Perspectives on Riverbank Soil Bioengineering. *Journal of Environmental Management*, 308: 114638. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114638

Qiu, M., Pei, X. J., Zhang, R. J., et al., 2025. Vegetation Restoration Affects Soil Erosion Processes by Altering the Soil Net Force. *Catena*, 251: 108823. https://doi.org/10.1016/j.catena.2025.108823

Ren, H., 2020. Study on the Structural Characteristics and Dynamic Failure Mechanism of Vibration-Collapsed Travertine Soil Induced by the "8.8" Jiuzhaigou Earthquake (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu (in Chinese with English abstract).

Shen, X. X., Tang, L. L., Du, J., et al., 2023. Lake Sedi-

mentation Rate and Its Influencing Factors in Jiuzhaigou World Natural Heritage Site. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 59(6): 951－960 (in Chinese with English abstract).

Sun, G., Li, Y. G., Du, X. X., et al., 2018. Overview of Earthquake Disasters and Emergency Response in 2017. *China Emergency Rescue*, (1): 9－14 (in Chinese with English abstract).

Sun, J. B., Yue, H., Shen, Z. K., et al., 2018. The 2017 Jiuzhaigou Earthquake: A Complicated Event Occurred in a Young Fault System. *Geophysical Research Letters*, 45(5): 2230－2240. https://doi. org/10.1002/2017GL076421

Wang, D. P., Zhou, Y., Pei, X. J., et al., 2021. Dam-Break Dynamics at Huohua Lake Following the 2017 Mw 6.5 Jiuzhaigou Earthquake in Sichuan, China. *Engineering Geology*, 289: 106145. https://doi. org/10.1016/j.enggeo.2021.106145

Wang, W. J., 2023. Study on the Microstructure and Erosion Tests of Sticky-Rice Mortar in the Artificial Travertine Dam of Huohua Lake (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu (in Chinese with English abstract).

Wang, W. J., Pei, X. J., Zhou, L. H., et al., 2024. Study on Rheological Properties and Mechanical Properties of Modified Sticky Rice Mortar. *Journal of Engineering Geology*, 32(1): 303－314 (in Chinese with English abstract).

Wang, X., Fan, X. M., Fang, C. Y., et al., 2024. Long-Term Landslide Evolution and Restoration after the Wenchuan Earthquake Revealed by Time-Series Remote Sensing Images. *Geophysical Research Letters*, 51(2): e2023GL106422. https://doi. org/10.1029/2023GL106422

Wen, X. Z., 2018. The 2008 Wenchuan, 2013 Lushan and 2017 Jiuzhaigou Earthquakes, Sichuan, in the last More than One Thousand Years of Rupture History of the Eastern Margin of the Bayan Har Block. *Acta Seismologica Sinica*, 40(3): 255－267 (in Chinese with English abstract).

Xi, H. C., Pei, X. J., Zhang, X. C., et al., 2025. Visual Perception of Retaining Walls in Mountainous Landscapes: An Aesthetic Quality Assessment of Post-Earthquake Geohazard Prevention Projects in Jiuzhaigou, China. *Ecological Indicators*, 181: 114445. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.114445

Xiao, Y., 2022. Study on the Travertine Landscape and Travertine Deposition at Huohua Lake and Its Upstream and Downstream Reaches in Post-Earthquake Jiuzhaigou (Dissertation). Sichuan University, Chengdu (in Chinese with English abstract).

Xie, Y., Du, J., Pei, X. J., et al., 2021. Ecological Rehabilitation of Natural World Heritage Based on Outstanding Universal Value: A Case Study on Jiuzhaigou's Sparkling Lake. *Study on Natural and Cultural Heritage*, 6(6): 107－117 (in Chinese with English abstract).

Xiu, Y. X., Li, Q., Pei, X. J., et al., 2025. Metagenomic Analysis of Phosphorus Dynamics in Calcareous Soils from Karst Restoration Areas. *Environmental Technology & Innovation*, 40: 104570. https://doi.org/10.1016/j.eti.2025.104570

Xiu, Y. X., Pei, X. J., Wang, Y., et al., 2025. Synergistic Restoration Effect of Vegetation and Soil Microorganisms in the Wound Ecological Restoration Area of Jiuzhaigou Project. *Acta Ecologica Sinica*, 45(17): 8570－8582 (in Chinese with English abstract).

Xu, X. W., Chen, G. H., Wang, Q. X., et al., 2017. Discussion on Seismogenic Structure of Jiuzhaigou Earthquake and Its Implication for Current Strain State in the Southeastern Qinghai-Tibet Plateau. *Chinese Journal of Geophysics*, 60(10): 4018－4026 (in Chinese with English abstract).

Yan, H., Liu, Z. H., Deng, G. P., et al., 2013. Origin of the Tufa at Jiuzhaigou Scenic Spot in Sichuan. *Carsologica Sinica*, 32(1): 15－22 (in Chinese with English abstract).

Zeng, B. W., 2023. Evaluation of Ecological Restoration of the Huohua Lake Dam in Jiuzhaigou Based on the Vegetation-Soil-Soil Fauna System (Dissertation). Sichuan Agricultural University, Chengdu (in Chinese with English abstract).

Zhang, R. Y., He, Z. W., 2007. Formation and Development Trend of Jiuzhaigou Scenic Spot, Sichuan Province. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, (1): 54－58 (in Chinese with English abstract).

Zhang, W. X., Pei, X. J., Zhang, X. C., et al., 2025. The Moisture Migration Patterns and Reconstruction Improvement of Colluvial-Deluvial Soil under Different Gradation Conditions. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 84(6): 285. https://doi. org/10.1007/s10064-025-04341-9

Zhao, B., Wang, Y. S., Luo, Y. H., et al., 2018. Landslides and Dam Damage Resulting from the Jiuzhaigou Earthquake (8 August 2017), Sichuan, China. *Royal Society Open Science*, 5(3): 171418. https://doi. org/10.1098/rsos.171418

Zhao, Q. J., 2021. Study on the Micromorphology and Adsorption Properties of $CaCO_3$ Mineralization Induced by Amylopectin (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu (in Chinese with English abstract).

Zhao, S. J., Zhao, Z., Yuan, G., 2021. A Study on Material Source Characteristics of Debris Flow in the Jiuzhaigou Valley Earthquake Area. *Acta Geologica Sichuan*, 41 (1): 93－97 (in Chinese with English abstract).

Zheng, X. L., Du, J., Schmidt, A. H., et al., 2022a. Response of Lake Water Nutrient Condition to Anthropogenic Activities from 1871 to 2013 in the Jiuzhaigou World Natural Heritage Site, China. *Journal of Paleolimnology*, 68(4): 345－360. https://doi. org/10.1007/s10933-022-00248-7

Zheng, X. L., Tang, Y., Du, J., et al., 2022b. Enhanced Soil Erosion Threatens Fluvial Tufa Landscapes after an ms 7.0 Earthquake in the Jiuzhaigou World Heritage Site, Southwestern China. *Science of the Total Environment*, 848: 157632. https://doi. org/10.1016/j. scitotenv.2022.157632

Zou, Z., 2025. Study on Ecological Restoration and Landscape Evaluation of World Natural Heritage Sites Based on Outstanding Universal Value (OUV) (Dissertation). Sichuan Agricultural University, Chengdu (in Chinese with English abstract).

Zou, Z., Du, Y., Du, J., et al., 2025. Impact of Post-Earthquake Restoration on Aesthetic Preferences and Heritage Value of Sparkling Lake in Jiuzhaigou. *npj Heritage Science*, 13: 374. https://doi. org/10.1038/s40494-025-01937-y

Zou, Z., Du, Y., Song, H. X., 2023. Fractal Features in Terrain Restoration of Jiuzhai Valley, a World Natural Heritage Site in China. *Fractal and Fractional*, 7(12): 863. https://doi.org/10.3390/fractalfract7120863

中文参考文献

陈俊宇,2020.“8.8”九寨沟震损钙华土振冲碎石桩加固研究(硕士学位论文).成都:成都理工大学.

陈旭, 盛丹萍, 2017. 从九寨沟地震应对看四川抢险救灾的进步. 四川行政学院学报, (5): 58－62.

陈云, 董发勤, 韩颖, 等, 2021. 九寨沟景区“8•8”地震前后及钙华生境保育修复后植被和水系的动态变化. 中国岩溶, 40(1): 68－76.

戴岚欣, 许强, 范宣梅, 等, 2017.2017年8月8日四川九寨沟地震诱发地质灾害空间分布规律及易发性评价初步研究. 工程地质学报, (4): 1151－1164.

郭建强, 彭东, 曹俊, 等, 2000. 四川九寨沟地貌与第四纪地质. 四川地质学报, (3): 183－192.

贾栋钦,2020. 改性糯米灰浆加固钙华土强度特性与应用研究(硕士学位论文). 成都:成都理工大学.

李君, 王勤彩, 崔子健, 等, 2019. 川滇菱形块体东边界及邻区震源机制解与构造应力场空间分布特征. 地震地质, 41(6): 1395－1412.

李昕娟, 林家元, 胡桂胜, 等, 2021. 西南山地典型流域地震前后泥石流物源遥感精细识别: 以九寨沟树正寨流域为例. 遥感技术与应用, 36(3): 638－648.

李渝生, 黄超, 易树健, 等, 2017. 九寨沟7.0级地震的地震断裂及震源破裂的构造动力学机理研究. 工程地质学报, 25(4): 1141－1150.

梁靖, 裴向军, 温勇, 等, 2019.2017年九寨沟地震地质灾害发育分布规律研究. 自然灾害学报, 28(5): 181－188.

刘建成, 钟益华, 肖维阳, 等, 2025. 基于InVEST模型的九寨沟土壤侵蚀及产沙的驱动因素研究. 水土保持研究, 32(5): 20－30, 38.

刘秦, 晏浩, 肖维阳, 等, 2023. 九寨沟火花海堤坝修复后的水化学与钙华沉积研究. 中国岩溶, 42(3): 495－508.

刘少英,章小平,曾宗永,等,2007. 九寨沟自然保护区的生物多样性. 成都:四川科学技术出版社.

刘小莎,2022. 植被茂密山区泥石流物源LiDAR精细识别与体积计算方法研究及应用(硕士学位论文). 成都:成都理工大学.

罗路广,2023.“8.8”九寨沟地震滑坡灾害时空演化与风险评价(博士学位论文). 成都:成都理工大学.

罗路广,裴向军,崔圣华,等,2021. 九寨沟地震滑坡易发性评价因子组合选取研究. 岩石力学与工程学报,40(11): 2306－2319.

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.

任和,2020.“8.8”九寨沟地震震动溃散钙华土结构特征与动力破坏机理研究(硕士学位论文). 成都:成都理工大学.

沈小雪, 唐丽丽, 杜杰, 等, 2023. 九寨沟世界自然遗产地湖泊沉积速率及其影响因素. 北京大学学报(自然科学版), 59(6): 951－960.

孙刚, 李亦纲, 杜晓霞, 等, 2018. 2017年地震灾害及应急响应总览. 中国应急救援, (1): 9－14.

王文俊,2023. 火花海人工钙华坝糯米砂浆微观结构及侵蚀试验研究(硕士学位论文). 成都:成都理工大学.

王文俊, 裴向军, 周立宏, 等, 2024. 改性糯米灰浆材料流变性及其结石体力学性能研究. 工程地质学报, 32(1): 303－314.

闻学泽, 2018. 巴颜喀拉块体东边界千年破裂历史与2008年汶川、2013年芦山和2017年九寨沟地震. 地震学报, 40(3): 255－267.

肖瑶,2022. 震后九寨沟火花海及其上下游钙华景观与钙华

沉积的研究(硕士学位论文). 成都:四川大学.

谢瑶, 杜杰, 裴向军, 等, 2021. 基于突出普遍价值的世界自然遗产地生态恢复探索: 九寨沟火花海实践. 自然与文化遗产研究, 6(6): 107－117.

修宇鑫, 裴向军, 王岩, 等, 2025. 九寨沟工程创面生态修复区植被–土壤微生物协同恢复效应. 生态学报, 45(17): 8570－8582.

徐锡伟, 陈桂华, 王启欣, 等, 2017. 九寨沟地震发震断层属性及青藏高原东南缘现今应变状态讨论. 地球物理学报, 60(10): 4018－4026.

晏浩, 刘再华, 邓贵平, 等, 2013. 四川九寨沟景区钙华起源初探. 中国岩溶, 32(1): 15－22.

曾泊文, 2023. 基于植被–土壤–土壤动物系统的九寨沟火花海坝体生态修复评价(硕士学位论文). 成都:四川农业大学.

张瑞英, 何政伟, 2007. 四川九寨沟景观形成演化趋势分析及评价. 中国地质灾害与防治学报, (1): 54－58.

赵芹江, 2021. 支链淀粉诱导 $CaCO_3$ 矿化微观形态及吸附性能研究(硕士学位论文). 成都:成都理工大学.

赵松江, 赵峥, 袁广, 2021. 九寨沟震区泥石流物源特征研究. 四川地质学报, 41(1): 93－97.

邹瓒, 2025. 基于突出普遍价值(OUV)的世界自然遗产地生态修复与景观评价研究——以九寨沟火花海震后修复为例(博士学位论文). 成都:四川农业大学.