https://doi.org/10.3799/dqkx.2026.850

贡嘎山东坡2022年泸定地震灾后滑坡区植被绿度演化特征

陈瑞琛[1,2,3],陈 剑[1,2,3*],谭华容[1],麻 晟[1],葛润泽[1],马泓尧[1]

1. 中国地质大学(北京)工程技术学院,北京 100083
2. 中国地质大学(北京)地质安全研究院,北京 100083
3. 中国地质大学(北京)工程技术学院,深部探测与成像全国重点实验室,北京 100083

摘 要: 强震诱发滑坡往往造成大范围植被剥离、土壤扰动与生境破碎,其生态损伤与自然恢复过程是震后生态修复和灾害影响评估的重要内容.2022年泸定地震在贡嘎山高山峡谷区诱发大量滑坡,为揭示高植被本底山区地震滑坡的植被绿度损伤及早期恢复特征提供了重要窗口.本文基于2019—2026年Sentinel-2遥感影像和滑坡单元边界,利用归一化植被指数(NDVI)分析贡嘎山东坡滑坡区震前植被绿度本底、震后损伤、恢复过程及其影响因素.结果显示,滑坡单元NDVI均值由2022年震前的0.785降至2023年震后的0.488,下降37.9%,且不同滑坡单元受损程度差异显著.随后,研究区植被绿度呈较快但非线性的恢复,2024年82.7%的滑坡单元转为增绿,2025年受区域物候变化影响恢复减弱,2026年再次普遍增绿,截至2026年7月整体恢复比值均值达到0.832.根据震前基准、震后异常、恢复连续性和终点状态,可将植被绿度演化划分为恢复型、波动型和持续低绿型,其中恢复型占79.8%,持续低绿型仍占16.5%.震前NDVI和滑坡面积与植被绿度损伤及恢复的关系最为明显,长宽比关联次之,平均坡度和坡向未表现出稳定关系.总体而言,贡嘎山东坡地震滑坡表现出快速但非线性的早期返绿特征,恢复路径具有明显的滑坡单元间分异特点,部分滑坡在震后第四个可观测生长季仍存在绿度亏损.本研究从滑坡单元尺度揭示了地震滑坡植被绿度由损伤向差异化恢复演化的过程,可为持续低绿滑坡识别和震后生态修复优先区划分提供依据.

关键词: 贡嘎山;地震;滑坡;生态损伤;植被绿度恢复;影响因素.

中图分类号: P642 **文章编号:** 1000-2383(2026)09-3391-14 **收稿日期:** 2026-09-01

Post-Earthquake Vegetation Greenness Dynamics in Landslide-Affected Areas on the Eastern Slope of Mount Gongga Following the 2022 Luding Earthquake

Chen Ruichen[1,2,3], Chen Jian[1,2,3*], Tan Huarong[1], Ma Sheng[1], Ge Runze[1], Ma Hongyao[1]

1. *School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing* 100083, *China*
2. *Institute of Geosafety, China University of Geosciences (Beijing), Beijing* 100083, *China*
3. *State Key Laboratory of Deep Earth Exploration and Imaging, School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing* 100083, *China*

Abstract: Strong earthquake-induced landslides often cause extensive vegetation removal, soil disturbance, and habitat

基金项目: 国家重点研发计划项目(No. 2023YFC3007101);中央高校基本科研业务费专项(No. 2652025019);国家自然科学基金面上项目(No. 42377167);国家自然科学基金青年科学基金项目(No. 42607297).

作者简介: 陈瑞琛(1994-),男,讲师,主要从事工程地质与地质灾害研究.ORCID: 0000-0001-7988-8900. E-mail: chenruichen@cugb.edu.cn

* **通讯作者:** 陈剑,ORCID:0000-0002-3323-7560. E-mail: jianchen@cugb.edu.cn

引用格式: 陈瑞琛,陈剑,谭华容,麻晟,葛润泽,马泓尧,2026.贡嘎山东坡2022年泸定地震灾后滑坡区植被绿度演化特征.地球科学,51(9):3391-3404.

Citation: Chen Ruichen, Chen Jian, Tan Huarong, Ma Sheng, Ge Runze, Ma Hongyao, 2026. Post-Earthquake Vegetation Greenness Dynamics in Landslide-Affected Areas on the Eastern Slope of Mount Gongga Following the 2022 Luding Earthquake. *Earth Science*, 51(9): 3391-3404.

fragmentation, making their ecological impacts and natural recovery important considerations in post-earthquake ecological restoration and hazard-impact assessment. The 2022 Luding earthquake triggered numerous landslides in the alpine gorge region of Mount Gongga. To investigate vegetation-greenness damage and early recovery of earthquake-induced landslides in a densely vegetated mountain environment, this study used Sentinel-2 imagery from 2019 to 2026 and landslide-unit boundaries to analyze the pre-earthquake vegetation-greenness baseline, post-earthquake damage, recovery process, and associated factors on the eastern slope of Mount Gongga based on the normalized difference vegetation index (NDVI). Mean NDVI across landslide units decreased from 0.785 before the earthquake in 2022 to 0.488 in 2023, representing a decline of 37.9%, with marked differences in damage among individual landslide units. Vegetation greenness subsequently showed rapid but nonlinear recovery. In 2024, 82.7% of landslide units exhibited increasing NDVI; recovery weakened in 2025 under the influence of regional phenological variability, followed by widespread greening again in 2026. By July 2026, the mean recovery ratio had reached 0.832. Based on the pre-earthquake baseline, post-earthquake anomalies, recovery continuity, and endpoint status, vegetation-greenness trajectories were classified into three types: recovery, fluctuating, and persistently low-greenness. The recovery type was dominant, accounting for 79.8% of landslide units, whereas 16.5% remained persistently low in greenness. Pre-earthquake NDVI and landslide surface area showed the clearest associations with vegetation-greenness damage and recovery, while the length-to-width ratio showed weaker associations, and mean slope and aspect showed no consistent relationships. Overall, earthquake-induced landslides on the eastern slope of Mount Gongga exhibited rapid but nonlinear early greening, with pronounced differences in recovery trajectories among individual landslide units, and some landslides still showing greenness deficits by the fourth observable post-earthquake growing season. This study reveals, at the landslide-unit scale, the transition of vegetation greenness from post-earthquake damage to differentiated recovery, providing a basis for identifying persistently low-greenness landslides and prioritizing areas for post-earthquake ecological restoration.

Key words: Mount Gongga; earthquake; landslide; ecological damage; vegetation-greenness recovery; influencing factors.

0 引言

地震滑坡不仅会对生命财产、人居环境、工程设施造成极大威胁,还会对山区生态格局和生境质量造成严重干扰(Wang *et al.*, 2024; 邬凯等, 2025).2008 年汶川地震、1999 年集集地震及 1923 年关东大地震等极端事件诱发了大量滑坡(许冲等, 2013; Shao *et al.*, 2021; Endo and Iwahashi, 2024).这些大规模的地表物质运动导致了植被的瞬间剥离、土壤基质层的剧烈重塑和水文循环条件的改变,造成了生境破碎、碳库损失及生态系统服务功能的退化.与滑坡造成的直接经济损失相比,滑坡灾害对生态环境造成的破坏往往具有影响范围更广、恢复周期更长且作用过程更复杂的特点,是评估灾害后果的重要维度(Geertsema and Pojar, 2007; 欧阳志云等, 2008; 王慧芳等, 2019; 申艳军等, 2024; Swarada *et al.*, 2024).

近年来,滑坡生态学在恢复动态监测和影响因子解析方面取得显著进展.植被遥感指标为滑坡扰动后的大范围、长时序监测提供了有效手段,其中归一化植被指数(NDVI)作为表征植被生长活力的关键指标被广泛应用于长时序生态恢复评估中(Lin *et al.*, 2004; Chen *et al.*, 2021; Zhong *et al.*, 2023; Thapa *et al.*, 2024).然而,滑坡后的植被演替并非线性过程,而是受地形地貌、气候条件及生物遗留等因素交互控制的一个复杂的、长期的过程(Pang *et al.*, 2018).已有研究表明,地形效应(海拔、坡向)和气候因子(降水)可能对植被恢复速率具有影响(Yang *et al.*, 2018; Kang *et al.*, 2021; Zhong *et al.*, 2023).在时间尺度上,多项研究指出震后生态系统的结构与功能重构是一个漫长过程,完全恢复往往需数十年之久(Duan *et al.*, 2024; Wang *et al.*, 2024; Chen *et al.*, 2025).然而,现有研究多聚焦于生态恢复的整体速率或恢复程度评估,缺乏对滑坡区生态恢复演化路径及其与滑坡特征关系的深入解析.事实上,不同地区的滑坡生态恢复特征并不相同,而不同滑坡单元受扰动程度与生境本底的差异也可能表现出不同的恢复路径.高植被覆盖山区的滑坡生态响应具有双重特征.一方面,较高的震前植被覆盖度和生物量意味着滑坡发生时可能造成更大的植被和生境损失;另一方面,适宜的水热条件和较丰富的周边种源,可能会促进裸露坡面植被的早期定居.现有研究较多关注区域平均恢复速率,对滑坡单元间恢复路径差异的研究仍不足.这限制了震后差异化生态修复策略的制定.

贡嘎山东坡地处青藏高原东南缘,是大渡河

干流的重要生态区，也是全球36个生物多样性热点地区之一，具有极高的植被覆盖度与复杂的生态系统.2022年9月5日发生的泸定*Ms* 6.8级地震在此处诱发了数以千计的同震滑坡，造成了区域生态破坏，为研究高山峡谷区强震滑坡的植被绿度损伤和早期恢复提供了典型案例.

本文以2022年泸定地震诱发的贡嘎山东坡滑坡群为对象，基于2019—2026年高分辨率Sentinel-2遥感数据和滑坡单元边界，开展震前NDVI本底、震后植被绿度损伤与恢复演化的长时序分析，旨在揭示高植被本底区域滑坡植被绿度损伤的时空特征与恢复进程，解析滑坡区植被绿度演化路径及其相关因素，为理解强震区滑坡生态损伤与早期恢复模式、制定差异化修复策略提供科学依据（裴向军，2024）.

1　研究区概况

本研究选取青藏高原东缘贡嘎山东坡(101°29′E～102°12′E，29°01′N～30°05′N)作为研究区.贡嘎山东坡是贡嘎山主山脊线以东至大渡河右岸的斜坡地带(图1)，该区域是中国国家级自然保护区，也是全球生物多样性热点地区（郑笑傲等，2023）.

研究区属典型高山峡谷地貌，地形高差显著，河流深切，冰川发育.在地质构造上，研究区位于鲜水河断裂带南段的磨西断裂附近，该断裂为全新世强烈活动的左旋走滑断裂，也是2022年9月5日泸定地震的发震断裂（Zhang *et al.*，2023）.区内岩性复杂，主要包括基底超基性侵入岩、花岗岩类和闪长岩类，同时第四系冰水堆积发育（铁永波等，2022）.研究区气候属亚热带季风型，受西南季风、东南季风和高原气候的共同影响，年平均降水量为800～900 mm，主要集中在6月至10月的湿季（郑笑傲等，2023），而干季降水不足年降水的15%，气候条件随海拔变化显著.近几十年来，该地区经历了显著的气候变暖和降水波动，整体呈暖干化趋势（刘巧和张勇，2017）.在泸定地震发生之前，该地区就在历史地震活动、降雨和人类工

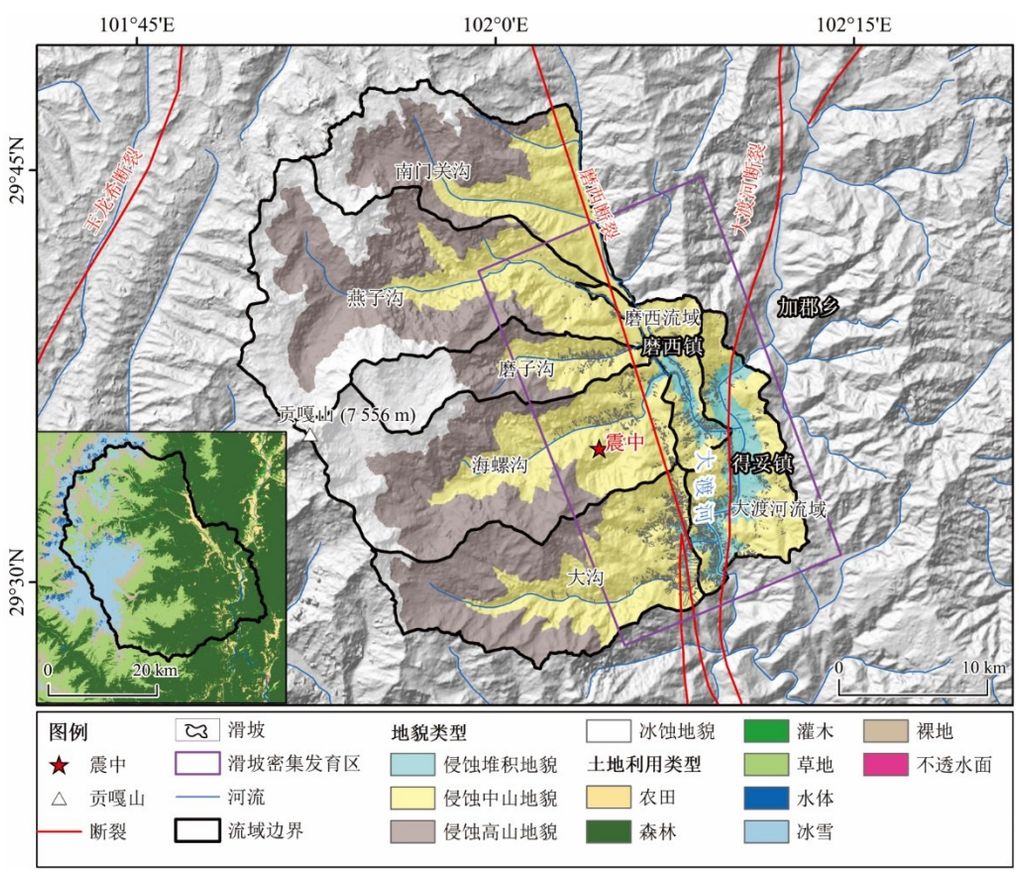

图1　贡嘎山东坡研究区位置、地貌单元、土地利用与植被类型及2022年泸定地震诱发滑坡分布

Fig.1　Location of the study area on the eastern slope of Mount Gongga, geomorphic units, land-use and vegetation types, and distribution of landslides triggered by the 2022 Luding earthquake

程的共同影响下广泛发育崩塌、滑坡等地质灾害.

2022年9月5日泸定县发生*Ms* 6.8级地震,震中位于海螺沟内(29.59°N, 102.08°E),震源深度16 km,极震区烈度达Ⅸ度(铁永波等, 2022).此次地震诱发大量滑坡、崩塌等次生地质灾害,造成巨大经济损失、人员伤亡和生态破坏(Zhang *et al.*, 2023; Ge *et al.*, 2024).

2 数据与方法

2.1 滑坡单元与非滑坡对照区

本文采用Ge *et al.*(2024)构建的2022年泸定6.8级地震滑坡数据集(广义滑坡,即包括滑坡和崩塌两类块体运动类型).该数据集基于分辨率2 m的GF-6和GF-1卫星影像,利用目视解译方法获得.裁剪至贡嘎山东坡研究范围后筛选获取了3 286个具有2019—2026年NDVI完整序列的滑坡单元,用于震后损伤、恢复及路径分析.基于DEM和滑坡边界,提取滑坡面积、平均坡度、平均坡向等参数(表1).

对上述3 286个滑坡单元进行统计发现,研究样本以中小型、狭长且坡度较大的滑坡为主(图2).滑坡坡面面积中位数为2 293 m^2,少数大型滑坡最大值达到3.53×10^5 m^2,长宽比中位数为2.73,多数滑坡具有较明显的纵向延伸特征.滑坡平均海拔主要集中于1 340~1 930 m,中位数为1 602 m;平均坡度主要集中于35.5°~43.5°,反映出研究样本总体发育于陡峻坡面.同时,坡向分布以东向及偏南坡向为主,其中东向、东南向、西南向和南向滑坡分别占19.7%、16.6%、15.5%和12.7%.上述结果描述了进入植被绿度时序分析的滑坡样本构成,为后续比较不同滑坡形态和地形条件下的植被损伤与恢复差异提供了基础.

同时,为区分滑坡区生态扰动响应与同期物候、天气和成像条件变化,本文构建了邻近非滑坡区用于对比.邻近非滑坡区被定义为滑坡边界外60~300 m范围.为降低边界误差和邻近扰动的可能干扰,距滑坡边界60 m以内区域被排除.

2.2 植被指数(NDVI)数据

本文采用2019—2026年植被生长季Sentinel-2 MSI Level-2A地表反射率数据(COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED).该数据已经过辐射定标和大气校正,红光和近红外波段空间分辨率为10 m.首先在Google Earth Engine中调取年度代表性单景(表2,图3).需要注意的是,2022年9月5日地震发生后至当年生长季结束期间,缺少满足研究区有效覆盖要求的光学影像.因此,本文以2023年7月影像表示震后首个可观测生长季.该影像取自地震后约10个月,部分滑坡可能已发生初期自然恢复.因此,本文得到的是震后首个可观测生长季相对震前的净绿度损伤,而非地震发生瞬间的植被损失.

在上述数据基础上计算归一化植被指数(NDVI)如下:

$$\mathrm{NDVI}=(\mathrm{NIR}-\mathrm{Red})/(\mathrm{NIR}+\mathrm{Red}), \quad (1)$$

其中,NIR表示近红外波段的反射率,Red表示红光波段的反射率.

同时,为了进一步校验年度单景是否准确反映NDVI特征并用于识别震后突变,本文利用各年7

表1 滑坡形态特征指标及其定义

Table 1 Definitions and calculation methods of landslide morphometric parameters

指标名称	单位	定义与计算公式
滑坡面积(A_s)	m^2	滑坡边界内所有栅格单元的坡面面积之和.通过对每个栅格的投影面积依据其自身坡度进行修正后累加得到:$A_s=\sum_{i=1}^{n}\frac{A_{cell}}{\cos(\beta_i)}$,其中$n$为栅格总数,$A_{cell}$为单个栅格投影面积,$\beta_i$为第$i$个栅格的坡度.
滑坡平均坡度($\bar{\beta}$)	°	滑坡边界内所有栅格单元坡度的算术平均值:$\bar{\beta}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\beta_i$,其中$\beta_i$为第$i$个栅格的坡度,$n$为栅格总数.
滑坡平均坡向($\bar{\alpha}$)	°	滑坡边界内坡向的矢量平均值.通过正/余弦分量分解计算:$\bar{\alpha}=\arctan 2\left(\sum_{i=1}^{n}\sin\alpha_i,\sum_{i=1}^{n}\cos\alpha_i\right)$,其中$\alpha_i$为第$i$个栅格的坡向值.
滑坡长度(L)	m	滑坡后缘顶点至前缘趾部的内部主轴线长度.
滑坡长宽比($R_{L/W}$)	-	滑坡主轴线长度与平均宽度的比值,反映滑坡形态的细长程度:$R_{L/W}=\frac{L}{\bar{W}}=\frac{L}{A_p/L}=\frac{L^2}{A_p}$,其中$\bar{W}$为平均宽度,$A_p$为滑坡总投影面积.

表 2　所用 Sentinel-2 MSI Level-2A 遥感数据列表

Table 2　List of Sentinel-2 satellite images used in this study

成像日期	影像编号	影像图幅云量	太阳天顶角
2019-09-27	20190927T034541_20190927T035839_T48RTT	18.61%	34.10°
2020-08-27	20200827T034539_20200827T035537_T48RTT	5.53%	25.59°
2021-08-02	20210802T034539_20210802T035615_T48RTT	0.33%	20.92°
2022-07-03	20220703T034551_20220703T035550_T48RTT	37.73%	17.75°
2023-07-08	20230708T034541_20230708T035504_T48RTT	2.34%	18.14°
2024-08-01	20240801T034541_20240801T035025_T48RTT	5.12%	20.82°
2025-07-17	20250717T034601_20250717T035837_T48RTT	16.61%	18.94°
2026-07-22	20260722T034541_20260722T035831_T48RTT	5.73%	19.52°

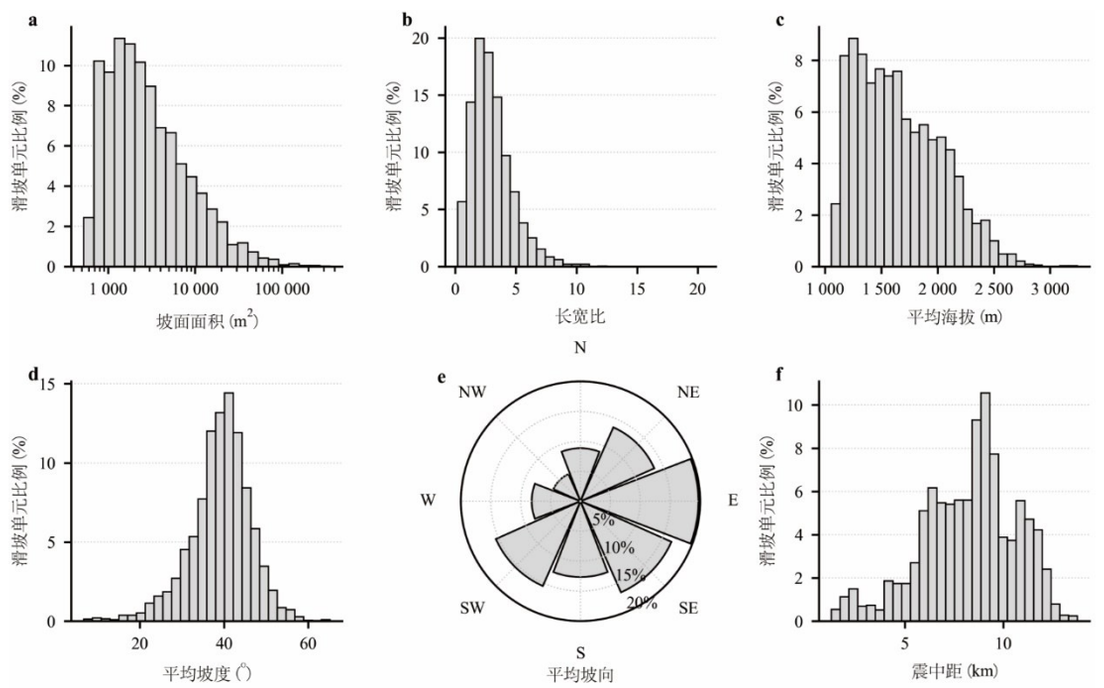

图 2　贡嘎山东坡 3 286 个滑坡单元的形态、地形与空间分布特征

Fig.2　Morphometric, topographic, and spatial distributions of the 3 286 landslide units on the eastern slope of Mount Gongga

a. 坡面面积；b. 长宽比；c. 平均海拔；d. 平均坡度；e. 平均坡向；f. 震中距. 直方图纵轴表示各区间滑坡单元占全部样本的比例，坡向采用 8 个 45°方位区间统计

月 1 日至 9 月 30 日全部可用影像构建生长季中位数组合. 2019—2025 年分别纳入 18、19、18、18、21、20 和 23 景影像. 以邻近非滑坡区变化作为对比指标，年度单景和生长季组合得到的变化差分别为 −0.392 3 和 −0.362 2，绝对差为 0.030 1，约占年度单景变化差绝对值的 7.7%，两者方向一致，量级接近. 上述结果支持将年度单景作为识别震后植被绿度变化的基础数据.

2.3　滑坡单元植被损伤与恢复指标

以滑坡边界为统计单元，计算每个滑坡单元在各年份的平均 NDVI（滑坡单元内所有像元的平均值）. 记第 i 个滑坡单元第 t 年的平均值为 $\mathrm{NDVI}_{i,t}$，则第 i 个滑坡单元 NDVI 年际变化量为：

$$\Delta\mathrm{NDVI}_{i,t}=\mathrm{NDVI}_{i,t}-\mathrm{NDVI}_{i,t-1}. \tag{2}$$

震后首个可观测生长季（第一年，2023 年）第 i 个滑坡单元（共 n 个滑坡单元）的绝对损失量、损伤比值分别为：

$$L_i=\mathrm{NDVI}_{i,2022}-\mathrm{NDVI}_{i,2023}, \tag{3}$$

$$D_i=\frac{\mathrm{NDVI}_{i,2022}-\mathrm{NDVI}_{i,2023}}{\mathrm{NDVI}_{i,2022}}. \tag{4}$$

2026 年第 i 个滑坡单元相对震前基准的绝对变化量、恢复比值分别为：

$$G_i=\mathrm{NDVI}_{i,2026}-\mathrm{NDVI}_{i,2022}, \tag{5}$$

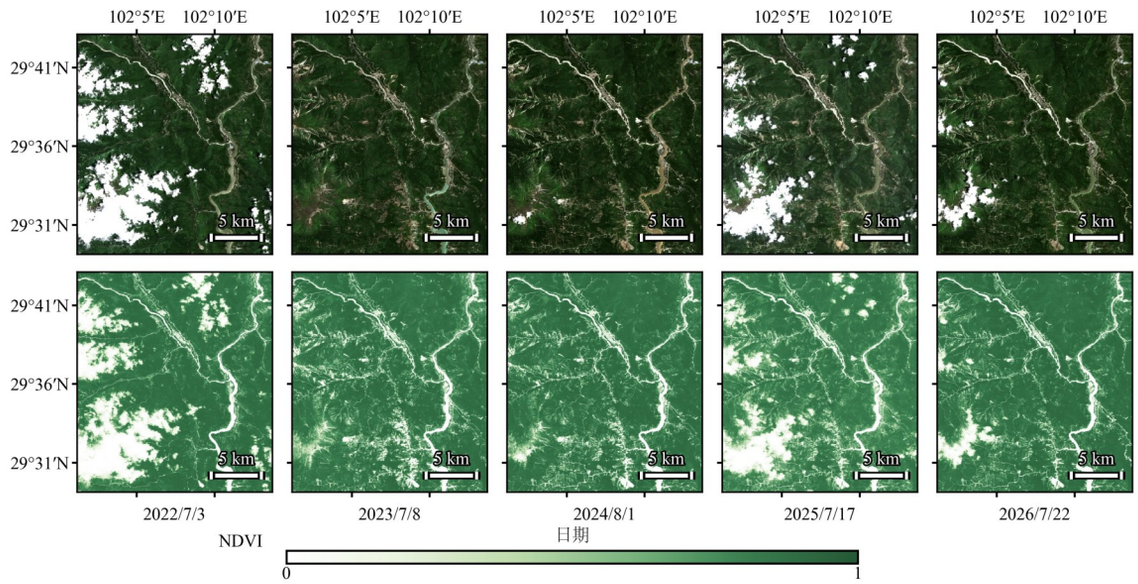

图 3 2022—2026 年贡嘎山东坡滑坡密集区 Sentinel-2 真彩色影像及 NDVI 空间分布

Fig.3 Sentinel-2 true-color imagery and spatial distributions of NDVI in the landslide-dense area on the eastern slope of Mount Gongga from 2022 to 2026

$$R_i=\frac{\mathrm{NDVI}_{i,2026}}{\mathrm{NDVI}_{i,2022}}. \tag{6}$$

为进一步刻画灾后植被绿度恢复的时序特征，本文参考生态稳定性评估框架（White *et al.*, 2020），结合震前基准、震后异常、恢复连续性与终点状态四个维度，对滑坡单元的 NDVI 恢复路径进行分类. 该分类旨在反映遥感观测到的滑坡单元 NDVI 演变轨迹.

首先，以地震发生前的 2022 年 NDVI 作为第 i 个滑坡单元的震前基准：

$$B_i=\mathrm{NDVI}_{i,2022}, \tag{7}$$

为剔除区域共同物候和成像条件带来的背景波动，引入邻近非滑坡区同期 NDVI 作为对照（记第 t 年为 C_t），定义滑坡单元相对于邻近非滑坡背景的对照校正异常（$A_{i,t}$）为：

$$A_{i,t}=\left(\mathrm{NDVI}_{i,t}-B_i\right)-\left(C_t-C_{2022}\right), \tag{8}$$

当 $A_{i,t}<0$ 时，表明滑坡单元的相对变化落后于非滑坡区背景水平. 结合对照校正后的震前年际变化绝对值的统计分布，将 $\delta=0.10$ 作为区分有效恢复信号与正常年际波动的主要阈值. 定义 2023—2026 年的净改善量为：

$$I_i=A_{i,2026}-A_{i,2023}. \tag{9}$$

基于上述指标分析本研究中涉及的 3 286 个滑坡单元，并按以下标准进行分类判别：(1)持续低绿型：若 $A_{i,2026}<-\delta$ 且 $I_i\leqslant\delta$，表明截至 2026 年既未恢复到震前相近水平，也未展现出较好的震后改善状态；(2)波动型：在其余单元中，若 2023—2026 年间任意相邻年份的异常变化满足 $\Delta A<-\delta$，表明恢复过程中曾发生显著的绿度回落；(3)恢复型：不满足上述两类的剩余单元，代表了具备连续净增绿趋势、已回到震前波动范围或震后未见明显损伤的单元. 在本研究中，根据震前 2019—2022 年滑坡单元 NDVI 年际变化量的统计分布，92.6% 的震前年际变化位于 −0.10～0.10，因此将 $\delta=0.10$ 作为区分正常年际波动与有效变化的主要阈值.

3 结果

3.1 滑坡区植被绿度损伤特征

为明确地震灾害对研究区生态系统影响的基准，本文分析了泸定地震发生前 2019—2022 年滑坡单元的 NDVI 水平. 各年滑坡单元 NDVI 均值为 0.775～0.793，震前三个年际变化区间的单元间标准差为 0.052～0.068，整体保持较高且相对稳定的植被绿度水平（图 4a）. 同时，从震前三年 NDVI 年际变化量上看，92.6% 的单元年际变化量位于 −0.1 至 0.1 之间，变化量均值为 0.004（图 4b）. 滑坡区和邻近非滑坡区震前面积加权变化同样表明区域植被绿度变化稳定（图 4c）. 上述结果支持研究区震前 NDVI 具有相对稳定的水平，可作为震后绿度扰动分析的基准.

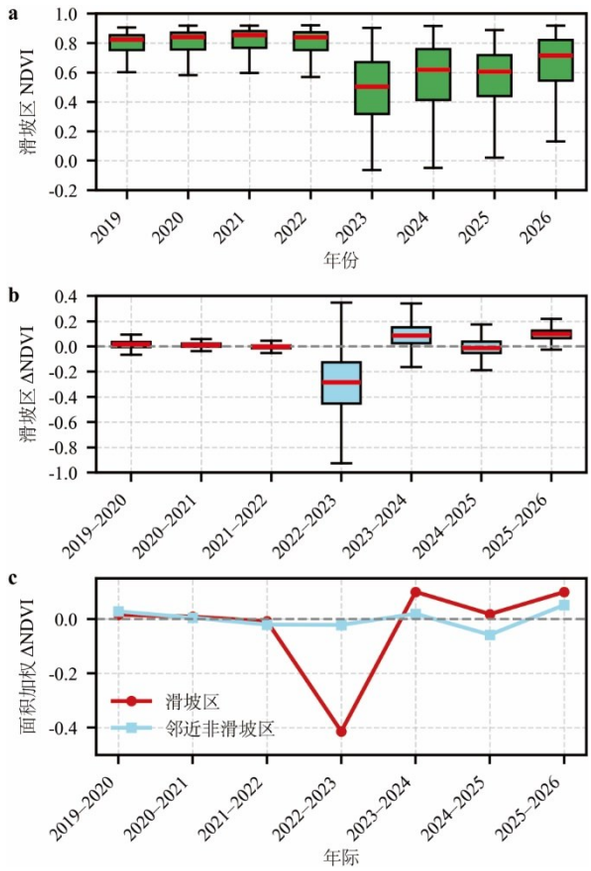

图 4　2019—2026 年贡嘎山东坡滑坡区植被 NDVI 时序演化特征

Fig.4　NDVI time-series characteristics from 2019 to 2026

a. 滑坡单元平均 NDVI 年际分布箱型图；b. 滑坡单元平均 NDVI 年际变化量分布箱型图；c. 滑坡区与非滑坡区面积加权 NDVI 年际变化

2022 年 9 月 5 日的泸定地震构成了该区域生态演变的重要转折点. 基于滑坡单元统计，震后首个可观测生长季（2023 年）的 NDVI 均值由震前（2022 年）的 0.785 降至 0.488，NDVI 变化量均值为 −0.298，按总体均值计算下降 37.9%. 同时，在单元尺度上，损伤比值 D 的均值为 37.7%，与 NDVI 均值降幅接近. 结合灾害前后 NDVI 年际变化的频率分布（图 5）可知，震前 NDVI 变化集中于 0 值附近且波动微弱，而灾后首年（2022—2023 年）分布曲线整体显著向负向偏移并展宽，核心区间处于 −0.6 至 −0.1 之间. 这种展宽特征揭示了强烈且异质的空间损伤格局. 其中 94.4% 的滑坡单元 NDVI 出现下降，部分单元甚至降至 0 以下，指示原生地表可能已被冲沟或岩屑彻底掩埋. 需要注意的是，由于距地震发生已近 10 个月，少数滑坡区也已启动初期自然恢复，表现为局部区域 NDVI 的逆势增长（约占 5.6%）.

综上所述，贡嘎山东坡滑坡区在震前保持了相对稳定的植被生长本底，而泸定地震则引发了广泛且显著的植被退化. 尽管局部区域遭受了显著破坏，但从整体分布来看，滑坡区生态系统并非被彻底破坏，灾后第一个生长季的平均损失比值仅为 37.7%. 该损伤评估结果初步定量揭示了高生态水平区经历极端地质灾害后的植被响应特征.

3.2　滑坡区灾后植被绿度恢复特征及类型

识别滑坡区的灾后植被绿度恢复进程是系统评估滑坡灾害生态影响的重要内容. 图 4 和图 5 表明了贡嘎山东坡滑坡区在灾后很快呈现出了植被绿度恢复的趋势. 2024 年滑坡单元 NDVI 相较于 2023 年平均增加 0.083 1，82.7% 的滑坡单元为正变化，表明多数滑坡单元开始增绿. 2025 年滑坡单元 NDVI 平均变化为 −0.008 9，其中 43.88% 的单元增加、56.12% 的单元下降. 对比非滑坡区的 NDVI 均值变化特征，2025 年较低的恢复度可能与 2025 年区域 NDVI 水平整体下降有关. 与之对应的，在 2026 年，非滑坡区 NDVI 呈现出了较强烈的增长，同年滑坡区 NDVI 也表现出了更为强烈的增绿. 2026 年滑坡单元 NDVI 平均增加 0.093 7，94.7% 的单元为正变化，滑坡区植被绿度恢复加速.

图 5b 展示了灾后各年份 NDVI 年际变化量的频率分布特征. 灾后三个恢复年，其频率分布呈现出明显的负偏态特征（偏度分别为 −0.646、−0.402 和 −0.740），分布曲线具有较长的左侧拖尾. 这种较为明显的负偏分布表明，尽管滑坡区整体呈现恢复趋势，但仍有相当一部分滑坡单元表现出持续退化或极其微弱的生态恢复能力，这反映了灾后滑坡区植被恢复进程在空间和个体上的不均衡性.

为进一步分析滑坡区的恢复程度，本文对滑坡区恢复比值 R 进行了分析. 图 5d 显示 2026 年恢复比值 R 的均值为 0.832，其中 $R<0.5$、$0.5\leqslant R<0.8$ 和 $R\geqslant 0.8$ 的滑坡单元分别占 9.84%、25.88% 和 64.28%；$R\geqslant 0.9$ 占 48.52%，达到或超过 2022 年水平（$R\geqslant 1.0$）的单元占 19.13%. 因此，截至 2026 年 7 月，多数滑坡单元已表现出较高程度的绿度恢复，但整体仍未恢复至震前水平.

基于本文使用的滑坡区 NDVI 变化路径识别方法，识别区分得到研究区三类滑坡单元 NDVI 变化路径类型，如图 6 和图 7 所示. 三类路径中，恢复型包含 2 621 个滑坡单元，占滑坡单元总数的 79.76%，对应滑坡总面积的 82.42%，其中 62.57% 的恢复型滑坡单元已回到震前波动范围内（考虑非滑坡区同

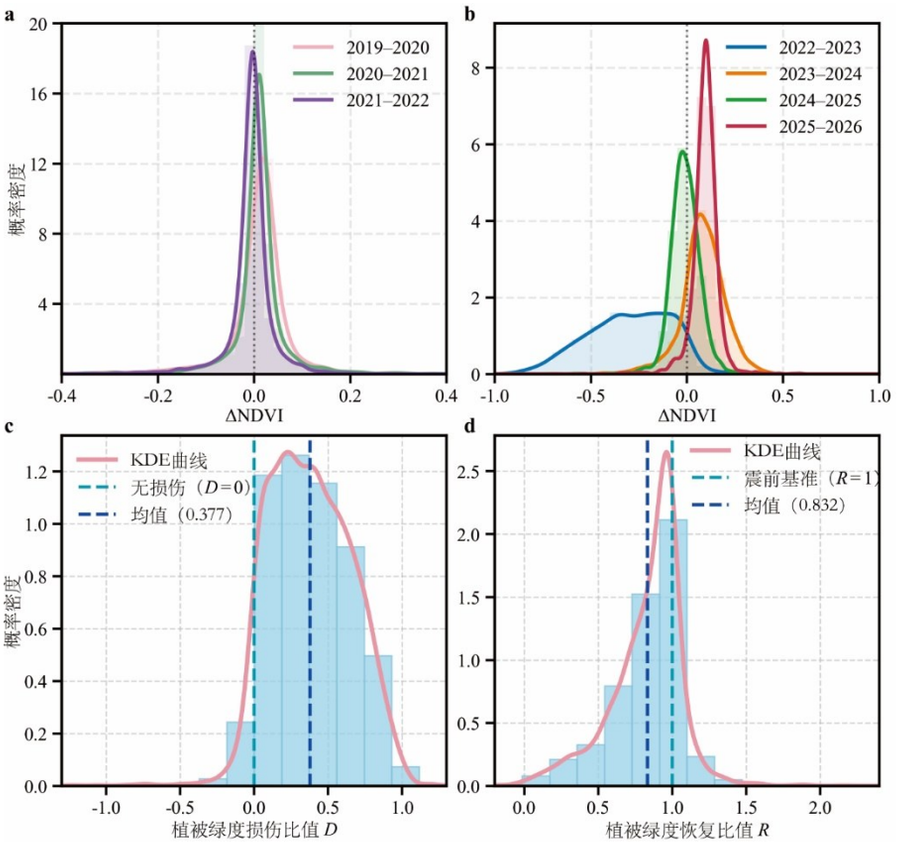

图 5 地震前后滑坡单元年际 NDVI 变化量的频率分布及损伤恢复特征

Fig.5 Frequency distributions of interannual NDVI changes before and after the earthquake and damage/recovery characteristics

a. 震前(2019—2022年)年际变化；b. 震后(2022—2026年)年际变化；c. 震后首年植被绿度损伤比值 (D)；d. 截至2026年植被绿度恢复比值 (R)

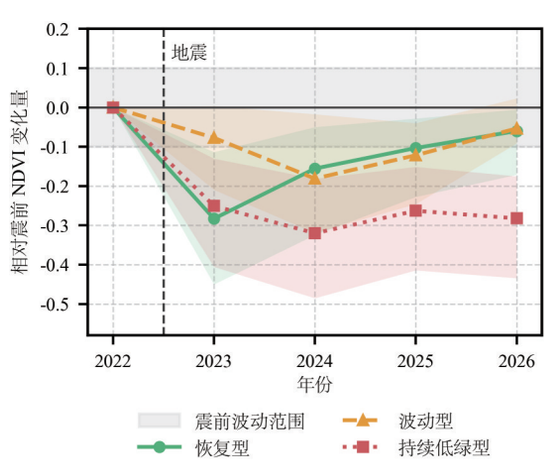

图 6 贡嘎山东坡滑坡单元植被绿度不同恢复路径类型

Fig.6 Different vegetation-greenness recovery trajectories of landslide units on the eastern slope of Mount Gongga

线条表示各类型滑坡单元相对震前NDVI变化量的中位数，彩色阴影表示四分位距．灰色带表示路径判别采用的正常波动阈值范围(−0.10～0.10)，竖向虚线表示2022年泸定地震发生时间

期变化后，2026 年相对于 2022 年的 NDVI 亏损不超过 0.10)．波动型仅包含 124 个单元，占总滑坡单元数量的 3.77% 和滑坡总面积的 2.03%，此类滑坡在恢复进程上呈现阶段性回落后再次增绿的轨迹．持续低绿型包含 541 个单元，占滑坡单元总数的 16.46% 和滑坡总面积的 15.55%，这些单元在震后第四个可观测生长季仍保持显著绿度亏损，其恢复比值中位数仅为 0.582. 同时，图 6 也直观反映出，相较于震后初期三种类型的集中重叠，持续低绿型与恢复型、波动型的 NDVI 轨迹在 2026 年已呈现出较为明显的分异特征．

3.3 滑坡区植被绿度变化的影响因素

为进一步探究植被绿度损伤与恢复的影响因素，本文比较了绝对损失量、损伤比值和恢复比值三个关键表征参数与震前 NDVI、滑坡面积、长宽比、平均坡度和坡向的关系(图 8)．随震前 NDVI 升高，绝对损失量总体增加，说明高绿度单元具有更大的绝对下降空间．损伤比值各组均值约为 0.4，且箱体大范围重叠，表明相对损伤程度与震前绿度的相关性并不强烈．滑坡面积与绝对损失量、损伤比值均呈正相关，即较大滑坡通常表现出更强损伤．长宽比与损伤比值仅呈轻微负相关，平

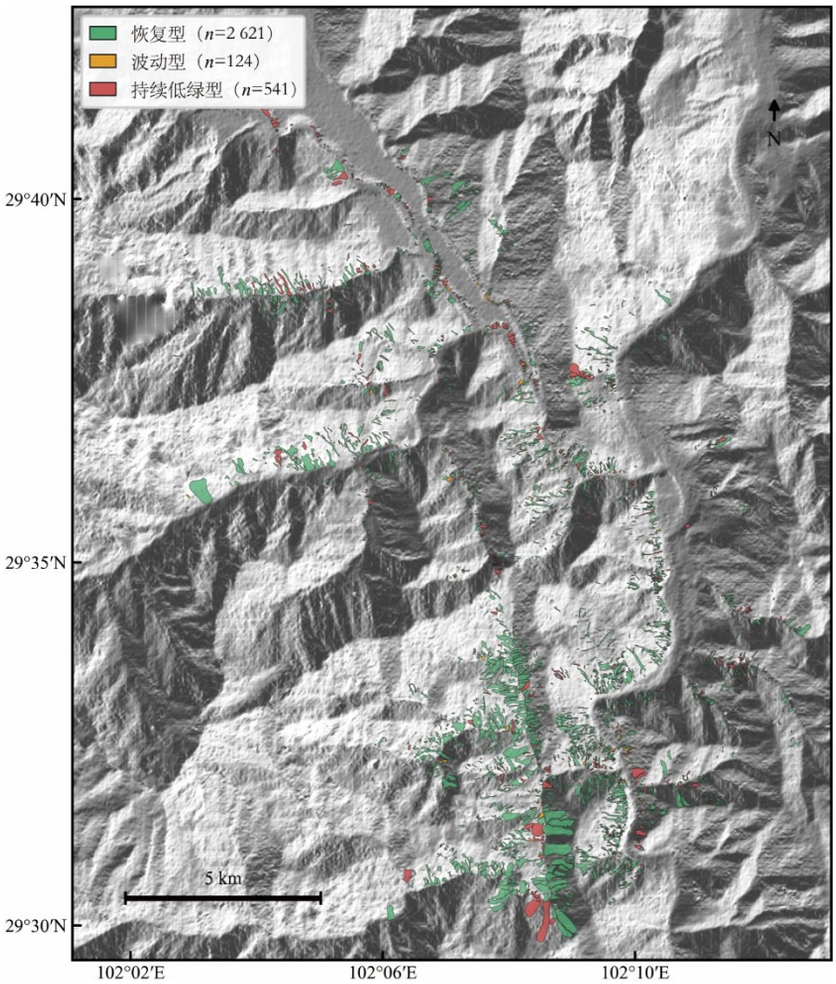

图 7　贡嘎山东坡不同植被绿度恢复路径类型的滑坡单元的空间分布

Fig.7　Spatial distribution of vegetation-greenness recovery trajectories of landslide units on the eastern slope of Mount Gongga

均坡度和坡向与损伤指标之间未见清晰关系.

在植被恢复影响因素方面，恢复比值均值随震前NDVI未呈明显单调变化，但震前NDVI较高的组别的箱体有所收窄，表明恢复结果更集中(图8).随滑坡面积增加，恢复比值均值轻微降低且分布展宽，说明大滑坡的恢复程度相对较低、单元间差异更大.长宽比与恢复比值呈轻微正向变化，而平均坡度和坡向与恢复比值之间未见清晰单调关系.

进一步比较三类恢复路径与影响因素的关系发现(图 9a～9c)，恢复型滑坡的震前 NDVI 中位数为 0.850，高于波动型的 0.773 和持续低绿型的 0.781，且四分位距相对较窄，表明恢复型通常具有较高且更集中的震前植被绿度.尽管较大滑坡通常表现出更强的损伤和较低的恢复比值，长宽比较大的狭长滑坡总体表现出较弱损伤和较好恢复，但恢复型、波动型和持续低绿型三类路径下的坡面面积和长宽比分布仍高度重叠，未形成清晰的类型分界.这表明单因素可以反映不同恢复路径的总体差异，但难以直接确定持续低绿型滑坡.

为进一步探究持续低绿型滑坡单元的影响因素及筛查方法，本文根据单因素二分类ROC分析结果，将震前NDVI、损伤比值和长宽比的Youden切点 0.799、0.115 和 2.037 分别取整为 0.80、0.10 和 2.0，形成震前 NDVI＜0.80、损伤比值 D＞0.10 和长宽比＜2.0 三个经验性筛查条件.三个条件分别表征较低的震前植被绿度、震后首个观测生长季发生超过 10% 的相对绿度损失，以及形态相对宽短的滑坡.上述阈值用于识别持续低绿风险相对集中的滑坡单元，不代表具有普适意义的生态临界值.

在仅考虑单一条件时，震前 NDVI＜0.80、损伤比值 D＞0.10 和长宽比＜2.0 的筛选组中，持续低绿型比例分别为 26.0%、18.0% 和 22.4%，相应覆盖全部持续低绿型单元的 56.0%、89.8% 和 40.7%.当同时满足三个条件时，共筛选出 356 个滑坡单元，其中

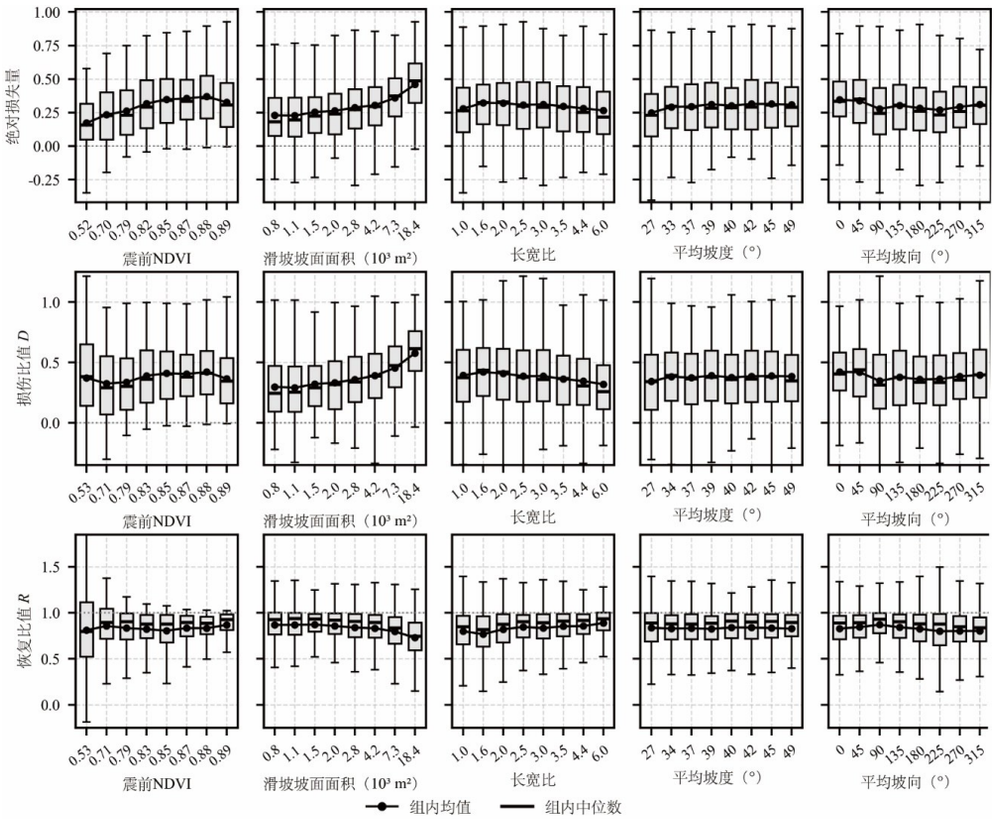

图 8 滑坡植被绿度绝对损失量、损伤比值和恢复比值与震前 NDVI、滑坡面积、长宽比、平均坡度和坡向的分组关系

Fig.8 Grouped relationships of absolute vegetation-greenness loss, damage ratio and recovery ratio with pre-earthquake NDVI, landslide area, length-to-width ratio, mean slope and aspect

连续因素按 8 个等频组绘制，横轴数值为各组因素中位数 . 箱体、箱内黑线和带圆点的黑色折线分别表示四分位距、中位数和组内均值

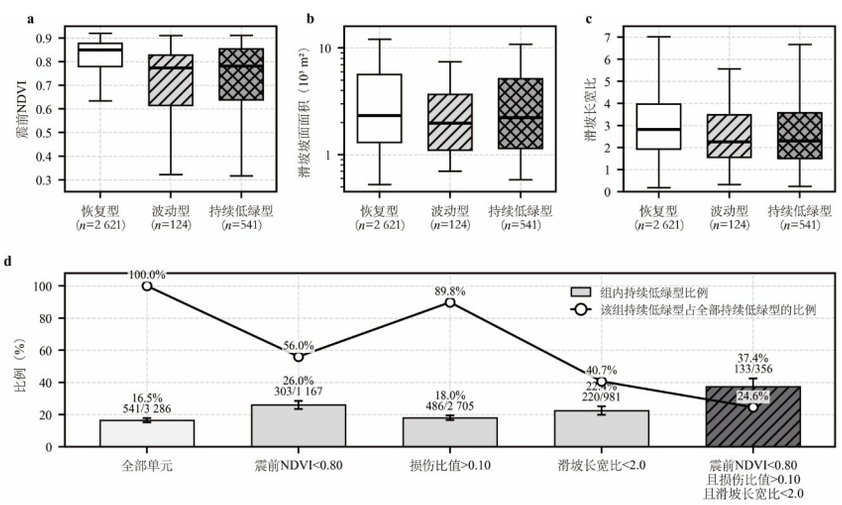

图 9 三类植被绿度恢复路径的滑坡属性分布及基于 ROC 取整阈值的持续低绿型筛查

Fig.9 Landslide-attribute distributions among the three vegetation-greenness recovery trajectories and threshold screening for persistently low-greenness landslides

a～c. 恢复型、波动型和持续低绿型滑坡的震前 NDVI、坡面面积和长宽比分布；横轴括号中的 n 表示各路径类型的滑坡单元数，箱体、箱内黑线和虚线分别表示四分位距、中位数和 1.5 倍四分位距范围，不显示离群值，坡面面积采用对数坐标 .d. 全部单元以及震前 NDVI＜0.80、损伤比值＞0.10、长宽比＜2.0 和三阈值组合条件下的持续低绿型筛查结果 . 柱形及其上方百分数表示各筛选组内持续低绿型所占比例，柱顶分数表示“该组持续低绿型单元数 / 该条件筛出的滑坡单元总数”，误差线表示组内比例的 Wilson 95% 置信区间；折线节点处百分数表示该条件识别出的持续低绿型单元占全部 541 个持续低绿型单元的比例，即覆盖率

133个为持续低绿型，组内占比达到37.4%，覆盖全部持续低绿型单元的24.6%. 该组合将优先核查范围缩小至全部滑坡单元的10.8%，并使组内持续低绿型比例达到总体水平的2.27倍. 因此，该组合能够在缩小核查范围的同时实现持续低绿风险富集，但其判别能力仍然有限，不能用于完整识别或准确预测所有持续低绿型滑坡.

本文进一步开展了探索性多因素回归分析. 坡面面积和长宽比与植被绿度损伤及恢复的关联方向总体与单因素结果一致，持续低绿型仍主要与较低的震前NDVI相关. 然而，除震前NDVI与坡面面积对绝对损失量存在较弱交互外，其余交互作用均未达到统计标准. 因此，探索性多因素分析虽然验证了部分单因素关联的独立性，但未显示不同因素的共同作用能够显著提高对植被绿度恢复差异的解释和识别能力，表明仅依靠现有滑坡形态与地形属性尚不足以充分解释植被绿度损伤与恢复的单元间差异.

4　讨论

地质灾害的生态效应近年来得到越来越多的关注（Gonzalez-Ollauri and Mickovski, 2017；Xiong *et al.*, 2025；Williams *et al.*, 2026）. 已有研究多从震区或典型区域尺度评估地震滑坡造成的植被损伤及总体恢复趋势（Yang *et al.*, 2018；Chen *et al.*, 2021；Wang *et al.*, 2024），但区域平均状态可能掩盖不同滑坡单元之间的恢复差异. 本研究以滑坡单元为基本对象，在量化整体损伤和恢复程度的基础上，进一步识别不同恢复路径及持续低绿风险. 由此，本研究从区域整体恢复视角推进到单元尺度，厘定了贡嘎山东坡震后植被绿度损伤特征和恢复进程.

地震发生前，贡嘎山东坡滑坡发生位置及邻近非滑坡区的NDVI总体稳定，其中滑坡单元2019—2022年各年NDVI均值为0.775～0.793，92.6%的震前年际变化介于－0.10至0.10. 然而，震后首个可观测生长季，滑坡单元NDVI平均下降37.9%（平均损失比值37.7%），且变化分布显著展宽，表明滑坡区经历了由强烈植被剥离到局部植被扰动不等的损伤. 邻近非滑坡区仅出现较小幅度的同期下降，生长季中位数组合也获得一致方向和相近幅度的结果，进一步说明这一突变主要集中于滑坡扰动范围，而非区域物候或单景日期差异所致. 值得注意的是，少数滑坡单元在2023年生长季未表现为NDVI下降. 在震前NDVI＜0.80的1 167个单元中，152个单元表现为NDVI增加，占13.0%；而震前NDVI≥0.80的单元中这一比例仅为1.6%. 这表明震后首个观测生长季的增绿现象更多集中于震前植被绿度相对较低的滑坡单元，可能与地质灾害创造新的生态位有关.

相较于汶川等震区需要较长时间恢复地表植被的研究结果（Chen *et al.*, 2021；Wang *et al.*, 2024），贡嘎山东坡整体表现出较快的早期返绿. 至灾后第二个可观测生长季，即2024年，多数滑坡单元已转为NDVI增长. NDVI均值由2023年的0.488升至0.571. 这可能与研究区湿润的生长季条件、较高的植被本底和丰富的周边种源有关，这些条件有利于先锋植物快速定居（Pang *et al.*, 2018；Freund *et al.*, 2021）.

然而，笔者也注意到区域恢复进程受到了区域物候的控制，2025年NDVI略有回落，2026年又普遍增长，充分反映了区域物候背景与单元恢复差异共同作用下的阶段性波动. 截至2026年，滑坡单元NDVI均值为0.656，相当于2022年均值的83.6%，对应了恢复比值0.832，其中48.5%的单元达到震前NDVI的90%以上. 然而，仍有9.8%的滑坡单元NDVI水平不足震前水平的50%. 因此，贡嘎山东坡当前仍呈现出整体快速返绿与局部持续亏损并存的特征.

在此基础上，本文综合震前基准、震后异常、恢复连续性和终点状态，建立了三类植被绿度演化路径的判别方法. 恢复型占79.76%，其大部分恢复到震前水平，其NDVI均值为0.709，恢复比值均值为88.9%. 持续低绿型占16.46%，其2026年NDVI均值仅为0.396、恢复比值中位数为58.2%，代表当前仍存在显著绿度亏损. 波动型仅占3.77%，但其2026年恢复比值中位数为93.1%. 总体而言，本文构建的识别方法厘定了三种植被绿度演化路径，尤其是重点识别出了持续低绿型滑坡单元，这一结果能有效支撑区域灾后生态效应的重点监测工作.

影响因素分析进一步揭示了震前植被条件对植被绿度损伤和恢复的双重作用. 震前NDVI较高的滑坡具有更大的绝对损失量，但其损伤比值并没有明确增加，说明高绿度滑坡单元主要表现为更大的绝对下降空间，而相对损伤程度并不会更加剧烈. 恢复型滑坡的震前NDVI整体高于波动型和持续低绿型，表明较好的初始植被条件也更常与恢复型轨迹相伴. 事实上，较高植被本

底可能对应更丰富的邻近种源、残留根系和较好的原始生境条件，从而有效促进震后返绿.

滑坡面积同样是影响植被绿度损伤和恢复的重要因素.滑坡面积越大，绝对和相对损伤总体越强，恢复比值越低.这可能是因为大滑坡不仅清除了更大范围的植被，还更可能造成深层土壤流失、母质裸露和地形重塑.较大的裸地斑块也增加了边缘种源向内部扩散的距离.另一方面，Kang *et al.*(2021)还指出大型滑坡因地表物质稳定性较低而恢复较慢.然而，需要注意的是，滑坡面积和恢复路径类型之间的关联并不紧密，这意味着滑坡面积能够解释恢复程度的总体趋势，却不能决定恢复路径归属.滑坡长宽比同样和植被绿度损伤以及恢复程度表现出了一定的相关性，狭长滑坡总体表现为损伤略轻、恢复略好，其机制或和边缘扩散效应有关，较为狭长的滑坡更容易在边缘植被扩散下快速得到恢复.

前人研究曾指出坡度和坡向对滑坡植被恢复具有影响(Gonzalez-Ollauri and Mickovski, 2017; Freund *et al.*, 2021; Zhong *et al.*, 2023)，但本研究在滑坡单元尺度上未发现恢复比值与平均坡度和坡向之间的一致关系.这种差异结果可能是因为本文是基于滑坡单元平均特征进行分析的，而没有考虑滑坡内部的微地形差异，这可能掩盖了坡度和坡向对植被恢复的影响.同时，本研究存在两方面尺度限制.一方面本研究采用10 m空间分辨率的Sentinel-2 NDVI，并以滑坡单元内的平均值表征整体植被绿度.对于面积较小、仅包含少量有效像元的滑坡，边界像元可能同时包含滑坡扰动地表和周边未扰动植被，从而产生混合像元效应，使单元NDVI及其损伤、恢复程度存在较大不确定性.另一方面，滑坡单元平均参数有利于开展区域尺度的滑坡间比较，但会平滑滑坡内部源区、运移区和堆积区之间的地形、物质组成及植被恢复差异.这种尺度效应在面积较大、内部异质性较强的滑坡中可能更加明显，也可能削弱平均坡度和坡向与植被恢复指标之间的统计关系.因此，本文结果主要反映滑坡单元尺度的整体植被绿度变化，不能替代对滑坡内部生态空间异质性的刻画.后续研究可结合更高分辨率遥感影像、无人机调查和滑坡内部功能分区，进一步识别不同部位的植被恢复差异.

在针对贡嘎山东坡滑坡区NDVI变化的研究过程中，本文曾试图构建一种依据灾后初期状态预测滑坡单元恢复路径的模型，但探索的各类统计模型尚未达到较高的预测准确率.通过多阈值组合限定，虽然提高了高风险组别下的判别精度，但整体预测能力仍然不足.此外，需要强调的是，本文所讨论的恢复是植被绿度恢复.野外观察表明，部分滑坡面的快速返绿主要由草本植物驱动，与周边原生乔灌群落仍有明显差异.NDVI回升可以表明植被重新覆盖，却不能充分代表群落结构、土壤发育和生态系统功能的恢复.因此，本研究的主要价值不是给出生态系统完全恢复所需的确定年限，而是建立从损伤量化、路径判别到持续低绿风险筛查的滑坡单元尺度框架，并将需要关注的对象落实到具体滑坡.后续研究仍需结合群落组成、土壤性质、坡面侵蚀和物质活动等地面资料，检验遥感绿度恢复能否转化为稳定的生态功能恢复.

5 结论

本研究基于2019—2026年Sentinel-2遥感影像，以滑坡单元为对象分析了2022年泸定地震后贡嘎山东坡的植被绿度损伤、恢复路径及相关因素，主要得出以下结论：

(1)泸定地震诱发滑坡造成了强烈且高度异质的植被绿度损伤，随后呈现快速但非线性的恢复.滑坡区NDVI均值由2022年的0.785降至2023年的0.488，损伤比值均值为0.377；滑坡区2024年82.7%的单元NDVI增加，但2025年恢复度明显减弱，2026年94.7%的单元再次增绿.截至2026年，滑坡区NDVI均值为0.656，恢复比值均值为0.832. 48.5%的滑坡单元达到震前NDVI的90%以上，但仍有9.8%的单元不足震前水平的50%.这表明研究区整体返绿较快，但恢复尚不充分，且不同滑坡间差异显著.

(2)综合震前基准、震后异常、恢复连续性和终点状态，可将滑坡植被绿度演化划分为恢复型、波动型和持续低绿型，分别占79.76%、3.77%和16.46%.恢复型是主要路径，其呈现出较好的恢复趋势.持续低绿型2026年NDVI均值仅为0.396、恢复比值R中位数为0.582，构成当前需要重点监测的持续低绿群体.

(3)震前NDVI、滑坡面积和长宽比与植被绿度损伤及恢复表现出不同程度的关联.震前NDVI较高的滑坡绝对损失量更大，但相对损伤整体维持在40%左右，常表现为恢复型.滑坡面积与损伤增强和恢复减弱的关系较稳定，长宽比也具

有一定关联,但它们与滑坡NDVI路径类型的关系并不清晰.基于震前NDVI、损伤比值和长宽比的多因素组合判断能够帮助缩小持续低绿型滑坡单元监测范围,为灾后生态监测部署提供依据.

(4)尽管本研究揭示了震后滑坡区植被绿度恢复的特征及规律,但仍存在一定的局限性.由于生态系统的复杂性,使用单一NDVI指标虽可表征植被绿度变化,但不足以全面评估生态系统结构与功能恢复,仍需引入更多维的生态参数(如叶面积指数、生物量等),为系统揭示恢复过程的关键阈值与生态机制、识别修复优先区、实施生态适应性管理提供技术支撑和科学依据.

References

Chen, M., Tang, C., Wang, X. D., et al., 2021. Temporal and Spatial Differentiation in the Surface Recovery of Post‐Seismic Landslides in Wenchuan Earthquake‐Affected Areas. *Ecological Informatics*, 64: 101356. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101356

Chen, S. B., Hua, J. G., Liu, W. T., et al., 2025. Evaluating the Impact of Near-Natural Restoration Strategies on the Ecological Restoration of Landslide-Affected Areas across Different Time Periods. *Plants*, 14(15): 2331. https://doi.org/10.3390/plants14152331

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

Endo, R., Iwahashi, J., 2024. Analysis of the Spatial Distribution of the Landslides Triggered by the 1923 Great Kanto Earthquake, Japan. *Proceedings of the Japan Academy, Series B*, 100(2): 123－139. https://doi.org/10.2183/pjab.100.009

Freund, C. A., Clark, K. E., Curran, J. F., et al., 2021. Landslide Age, Elevation and Residual Vegetation Determine Tropical Montane Forest Canopy Recovery and Biomass Accumulation after Landslide Disturbances in the Peruvian Andes. *Journal of Ecology*, 109(10): 3555－3571. https://doi.org/10.1111/1365-2745.13737

Ge, R. Z., Chen, J., Ma, S., et al., 2024. Inventory and Spatial Distribution of Landslides on the Eastern Slope of Gongga Mountain, Southwest China. *Remote Sensing*, 16(18): 3360. https://doi.org/10.3390/rs16183360

Geertsema, M., Pojar, J. J., 2007. Influence of Landslides on Biophysical Diversity—A Perspective from British Columbia. *Geomorphology*, 89(1－2): 55－69. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.07.019

Gonzalez‐Ollauri, A., Mickovski, S. B., 2017. Shallow Landslides as Drivers for Slope Ecosystem Evolution and Biophysical Diversity. *Landslides*, 14(5): 1699－1714. https://doi.org/10.1007/s10346-017-0822-y

Kang, D., Yin, C. J., Zhu, D. H., et al., 2021. Altitude and Landslide Scale Regulated the Assembly of Grassland Communities on Landslides during the Recovery Process after the Magnitude 8.0 Wenchuan Earthquake, China. *Ecological Engineering*, 172: 106413. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106413

Lin, C. Y., Lo, H. M., Chou, W. C., et al., 2004. Vegetation Recovery Assessment at the Jou‐Jou Mountain Landslide Area Caused by the 921 Earthquake in Central Taiwan. *Ecological Modelling*, 176(1－2): 75－81. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2003.12.037

Liu, Q., Zhang, Y., 2017. Studies on the Dynamics of Monsoonal Temperate Glaciers in Mt. Gongga: A Review. *Mountain Research*, 35(5): 717－726 (in Chinese with English abstract).

Ouyang, Z. Y., Xu, W. H., Wang, X. Z., et al., 2008. Impact Assessment of Wenchuan Earthquake on Ecosystems. *Acta Ecologica Sinica*, 28(12): 5801－5809 (in Chinese with English abstract).

Pang, C. C., Ma, X. K., Lo, J. P., et al., 2018. Vegetation Succession on Landslides in Hong Kong: Plant Regeneration, Survivorship and Constraints to Restoration. *Global Ecology and Conservation*, 15: e00428. https://doi.org/10.1016/j.gecco.2018.e00428

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).

Shao, X. Y., Xu, C., Ma, S. Y., et al., 2021. Calculation of Landslide Occurrence Probability in Taiwan Region under Different Ground Motion Conditions. *Journal of Mountain Science*, 18(4): 1003－1012. https://doi.org/10.1007/s11629-020-6540-2

Shen, Y. J., Chen, X., Peng, J. B., et al., 2024. Background Characteristics of Ecological Geological Environment System in Qinling Mountains and Assumption of Its Theoretical System. *Earth Science*, 49(6): 2103－2119 (in Chinese with English abstract).

Swarada, B., Pasha, S. V., Manohara, T. N., et al., 2024. Assessing Landslide-Driven Deforestation and Its Ecological Impact in the Western Ghats: A Multi-Source Data Approach. *Journal of the Indian Society of Remote*

Sensing, 52(7): 1517－1531. https://doi. org/10.1007/s12524-024-01896-0

Thapa, P. S., Daimaru, H., Yanai, S., 2024. Analyzing Vegetation Recovery and Erosion Status after a Large Landslide at Mt. Hakusan, Central Japan. *Ecological Engineering*, 198: 107144. https://doi. org/10.1016/j.ecoleng.2023.107144

Tie, Y. B., Zhang, X. Z., Lu, J. Y., et al., 2022. Characteristics of Geological Hazards and It's Mitigations of the *Ms*6.8 Earthquake in Luding County, Sichuan Province. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 49(6): 1－12 (in Chinese with English abstract).

Wang, H. F., Lin, Z. Y., Xiao, Y., et al., 2019. Ecological Risk Assessment of Landslide Disasters Based on Potential Loss of Ecosystem Services. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 30(10): 3553－3562 (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

White, H. J., Gaul, W., Sadykova, D., et al., 2020. Quantifying Large‐Scale Ecosystem Stability with Remote Sensing Data. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 6(3): 354－365. https://doi.org/10.1002/rse2.148

Williams, E. F., Dowling, T. P. F., Burns, B. R., et al., 2026. Post‐Landslide Vegetation Recovery: Research Gaps and Future Opportunities. *Landscape Ecology*, Online. https://doi.org/10.1007/s10980-026-02402-2

Wu, K., Yi, X. B., Fu, X. D., et al., 2025. Analysis of the Development and Evolution Characteristics of Geohazards and the Process of Disaster Movement on the Main Highway in the Mountain Area Affected by the Lushan Earthquake. *Earth Science*, Online (in Chinese with English abstract). https://link. cnki. net/urlid/42.1874.P.20250603.1411.008

Xiong, J., Chen, H. Y., Tang, C., et al., 2025. Dynamic Impact of Hillslope Landslide Sediment Transfer to Ecological Environment Recovery in Earthquake Disturbed Area. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 84(2): 112. https://doi.org/10.1007/s10064-025-04125-1

Xu, C., Xu, X. W., Wu, X. Y., et al., 2013. Detailed Catalog of Landslides Triggered by the 2008 Wenchuan Earthquake and Statistical Analyses of Their Spatial Distribution. *Journal of Engineering Geology*, 21(1): 25－44 (in Chinese with English abstract).

Yang, W. T., Qi, W. W., Zhou, J. X., 2018. Decreased Post-Seismic Landslides Linked to Vegetation Recovery after the 2008 Wenchuan Earthquake. *Ecological Indicators*, 89: 438－444. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.12.006

Zhang, J. Q., Yang, Z. J., Meng, Q. K., et al., 2023. Distribution Patterns of Landslides Triggered by the 2022 *Ms* 6.8 Luding Earthquake, Sichuan, China. *Journal of Mountain Science*, 20(3): 607－623. https://doi.org/10.1007/s11629-022-7772-0

Zheng, X. A., Wang, L. M., Jiang, Y., et al., 2023. Application of Remote Sensing Technology in Dynamic Interpretation of Ecological Elements in Gongga Mountain Nature Reserve. *Acta Geologica Sichuan*, 43(S1): 82－89 (in Chinese with English abstract).

Zhong, C. X., Oguchi, T., Lai, R., 2023. Effects of Topography on Vegetation Recovery after Shallow Landslides in the Obara and Shobara Districts, Japan. *Remote Sensing*, 15(16): 3994. https://doi.org/10.3390/rs15163994

中文参考文献

刘巧, 张勇, 2017. 贡嘎山海洋型冰川监测与研究: 历史、现状与展望. 山地学报, 35(5): 717－726.

欧阳志云, 徐卫华, 王学志, 等, 2008. 汶川大地震对生态系统的影响. 生态学报, 28(12): 5801－5809.

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.

申艳军, 陈兴, 彭建兵, 等, 2024. 秦岭生态地质环境系统本底特征及研究体系初步构想. 地球科学, 49(6): 2103－2119.

铁永波, 张宪政, 卢佳燕, 等, 2022. 四川省泸定县Ms6.8级地震地质灾害发育规律与减灾对策. 水文地质工程地质, 49(6): 1－12.

王慧芳, 林子雁, 肖燚, 等, 2019. 基于生态系统服务潜在损失的滑坡灾害生态风险评价. 应用生态学报, 30(10): 3553－3562.

邬凯, 易雪斌, 付晓东, 等, 2025. 芦山地震作用下山区干线公路地质灾害发育演化特征及成灾运动过程. 地球科学, 知网首发. https://link. cnki. net/urlid/42.1874.P.20250603.1411.008

许冲, 徐锡伟, 吴熙彦, 等, 2013. 2008年汶川地震滑坡详细编目及其空间分布规律分析. 工程地质学报, 21(1): 25－44.

郑笑傲, 王腊梅, 蒋勇, 等, 2023. 遥感技术在贡嘎山保护区生态要素动态解译中的应用. 四川地质学报, 43(S1): 82－89.