

汶川震区植被恢复与同震滑坡活动性动态演化分析

李明威, 熊江, 陈明, 唐川

Vegetation restoration and dynamic evolution analysis of landslide activity in the Wenchuan Earthquake area

LI Mingwei, XIONG Jiang, CHEN Ming, and TANG Chuan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202209049>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

汶川震区北川县泥石流流域崩滑体时空演变特征

Spatio-temporal evolution characteristics of landslides in debris flow catchment in Beichuan County in the Wenchuan earthquake zone

李明威, 唐川, 陈明, 史青云 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 182-190

西北典型内陆流域地下水与湿地生态系统协同演化机制

Co-evolution mechanism of groundwater and wetland ecosystem in a typical inland watershed in northwest China

胡顺, 凌抗, 王俊友, 乔树锋, 葛孟琰, 孙自永, 马瑞 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 22-31

基于流固耦合的强震大型滑坡水力激发效应研究

A study of the pro-water pressure for initiation of a large landslide triggered by a strong earthquake based on fluid-structure coupling

时幸幸, 崔圣华, 裴向军, 朱凌, 杨晴雯 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 102-114

青藏高原巴塘断裂带地震滑坡危险性预测研究

Predicting seismic landslide hazard in the Batang fault zone of the Qinghai-Tibet Plateau

杨志华, 郭长宝, 吴瑞安, 钟宁, 任三绍 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 91-101

中尼铁路佩枯措至吉隆段第四纪断裂活动性与工程选线设计

Quaternary fault activity and engineering effects along the Peikucuo-Gilong segment of the China-Nepal railway

刘道胜 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 65-78

地下水井水位及化学组分的同震差异响应特征分析

An analysis of the coseismic differential response characteristics of well water levels and chemical components : A case study triggered by the Qinghaijiang earthquake

顾鸿宇, 王东辉, 李胜伟, 郑万模, 刘港, 向元英, 李丹, 陈能德 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 44-53



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202209049

李明威, 熊江, 陈明, 等. 汶川震区植被恢复与同震滑坡活动性动态演化分析[J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(3): 182-192.
LI Mingwei, XIONG Jiang, CHEN Ming, *et al.* Vegetation restoration and dynamic evolution analysis of landslide activity in the Wenchuan Earthquake area[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(3): 182-192.

汶川震区植被恢复与同震滑坡活动性动态演化分析

李明威^{1,2}, 熊江³, 陈明⁴, 唐川⁴

(1. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 河北 廊坊 065000; 2. 国家现代地质勘查工程技术研究中心, 河北 廊坊 065000; 3. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 4. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 四川 成都 610059)

摘要: 强烈的山区地震往往会引发大量同震滑坡, 对当地植被覆盖和生长造成直接破坏。作为表现滑坡活动强度的重要指标, 同震滑坡体表面的植被恢复情况对评估震后地质灾害的活动情况具有重要意义。然而, 受观测资料所限, 当前对于震区植被恢复进程的研究多为小尺度范围, 而对大区域内植被演化机制以及植被与地质灾害活动性的关系认识不足。因此, 采用多时相、长时序(2000—2020年)的高精度遥感影像对汶川地震强震区大范围内的植被恢复过程进行研究, 计算得到不同时期植被恢复率, 以此探究大范围内植被恢复的普适性规律, 同时分析植被恢复与滑坡活动强度变化的关系。研究发现: 截至2020年, 71.34%区域的同震滑坡表面植被已处于恢复程度较好阶段; 高活动强度、中活动强度、低活动强度和基本稳定的滑坡面积比分别为17.6%、12.4%、17.7%和52.3%。同震滑坡地表恢复趋势表明, 汶川震区植被预计在震后约17a恢复至震前平均水平。然而, 植被恢复过程和滑坡活动性的变化往往受多种因素的综合影响。虽然滑坡地表植被恢复在一定程度上反映了地震后滑坡活动性的下降, 但地震对滑坡活动性的影响将比地表植被恢复到震前水平所持续的时间更长。参考前人研究成果, 本研究认为震后滑坡活动将持续25a或更长时间。研究成果可为汶川震区震后地质灾害评估、防治工作提供参考。

关键词: 汶川地震; 同震滑坡; 植被恢复; 滑坡活动性

中图分类号: P642.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)03-0182-11

Vegetation restoration and dynamic evolution analysis of landslide activity in the Wenchuan Earthquake area

LI Mingwei^{1,2}, XIONG Jiang³, CHEN Ming⁴, TANG Chuan⁴

(1. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, CAGS, Langfang, Hebei 065000, China;
2. National Research Center of Geoexploration Technology, Langfang, Hebei 065000, China;
3. Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu, Sichuan 610041, China;
4. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geo-environment Protection
(Chengdu University of Technology), Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: A great mountain seismic often triggers a large number of co-seismic landslides, causing direct damage to local vegetation cover and growth. As an important indicator of landslide activity intensity, the vegetation recovery is of great significance for the activity of post-earthquake geo-hazards. However, due to the limitation of

收稿日期: 2022-09-22; 修订日期: 2022-12-23

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC1501004); 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所基本科研业务费项目(AS2022J02)

第一作者: 李明威(1996-), 女, 硕士, 助理工程师, 主要从事震后地质灾害演化趋势方面的研究工作。E-mail: limingwei@mail.cgs.gov.cn

通讯作者: 唐川(1961-), 男, 博士, 博士生导师, 教授, 主要从事地质灾害、环境地质等方面的教学与研究工作。E-mail: tangc@cdut.edu.cn

observational data, the current research on vegetation restoration process in earthquake areas is mostly on a small scale. In addition, there is insufficient understanding of the vegetation evolution mechanism in a large area and the relationship between vegetation and the activity of geological disasters. Therefore, this paper uses multi-temporal and long-time series (2000–2020) high-precision remote sensing images to study the vegetation restoration process in the Wenchuan earthquake area. By calculating vegetation recovery rates in different periods, we explore the universal law of vegetation restoration in a large range, and analyze the relationship between vegetation restoration and the change of landslide activity intensity. The results show that by 2020, 71.34% of the landslide area in the earthquake area has been better restored. The proportions of highly active, moderately active, low active and basically stable landslides are 17.6%, 12.4%, 17.7% and 52.3%, respectively. The surface recovery trend of co-seismic landslide indicates that the vegetation in the Wenchuan earthquake area is expected to recover to the pre-earthquake average level about 17 years after the earthquake. However, the process of vegetation recovery and changes in landslide activity are often subject to the combined effects of multiple factors. Although the vegetation recovery of landslide surface reflects the decline of landslide activity after the earthquake to some extent, the effects of the earthquake on landslide activity will last longer than the recovery of surface vegetation to the pre-earthquake level. Referring to the results of previous studies, this paper suggests that the post-earthquake landslide activity will last 25 years or more. The conclusion can provide reference for the assessment and prevention of post earthquake geological disasters in Wenchuan earthquake area.

Keywords: Wenchuan earthquake; co-seismic landslide; vegetation restoration; landslide activity

中国是世界上地震滑坡灾害最为严重的国家之一, 中国地震滑坡具有分布广、数量多、规模大、灾害重、致灾模式多样等鲜明特征^[1]。强烈的山区地震发生后, 由于地表沉积物、地裂缝的变化和植被破坏的影响, 地震次生灾害发生频率较震前急剧增高^[2-4]。2008 年“5·12”汶川地震在震区诱发了近 20 万处同震滑坡^[5], 这些松散堆积体在降雨诱发下重新复活形成新的破坏性滑坡、泥石流, 进一步造成大量人员伤亡和财产损失^[6-9]。通常认为, 震后植被自然恢复是地质灾害活动减少的重要原因^[10]。遥感影像中的植被变化是监测和定量评价滑坡活动性的重要指标, 研究植被的恢复情况对探究震后地质灾害活动性的变化具有重要意义。

1999 年台湾集集地震后, 针对震后植被恢复情况, 台湾学者^[11-12]利用 SPOT 卫星影像处理得到归一化植被指数(normalized difference vegetation index, *NDVI*), 预测震区植被完全恢复至震前水平需要 2 a 以上时间。汶川地震后, 通过监测同震滑坡表面植被变化情况并分析其与震中地区滑坡活动性减少的关系, 部分学者认为汶川震中区域植被覆盖程度将在 18~20 a 后恢复至震前水平, 这也意味着滑坡活动性将基本恢复至稳定状态^[10, 13-14]。

目前, 已有学者^[15-18]分析了汶川地震后滑坡活动的衰减情况, 但这些研究多基于有限区域, 难以揭示

整个汶川震区的概况。为弥补这一领域的空白, 本文采用空间分辨率为 30 m 的 Landsat 影像追踪研究了大范围、长时序内(2000—2020 年)汶川地震同震滑坡表面植被恢复情况, 定量评价其恢复速率, 分析汶川震后植被演化规律, 并在此基础上分析植被恢复背景下滑坡活动性长期动态衰减规律。

1 研究区概况

2008 年汶川大地震的主要发震断裂带为龙门山断裂带中的中央断裂带, 即映秀—北川断裂带^[19]。本文选取其沿线的汶川县、理县、茂县、北川县、平武县、青川县全部区域及都江堰市、彭州市部分区域作为研究区, 地理位置为东经 102°34′~105°39′, 北纬 30°45′~33°4′, 面积为 27 990.5 km²(图 1)。区内海拔 491~5 840 m, 包含低山、中山、高山和极高山 4 种地貌类型。区内主要发育 4 条北东—南西向断裂带: 汶川—茂县断裂、映秀—北川断裂、彭州—灌县断裂及青川断裂。研究区内岩性种类多样, 地层出露众多, 受构造带影响地层空间优势走向多为北东—南西向条带状展布, 主要发育碳酸盐岩、岩浆岩、砂岩、千枚岩、页岩、板岩及第四纪沉积物。

汶川地震在研究区内引发了将近 2 万个同震滑坡, 其总面积超过 1 000 km²。汶川地震滑坡的高密度带主要分布于映秀—北川断层的西南和中间部分, 超

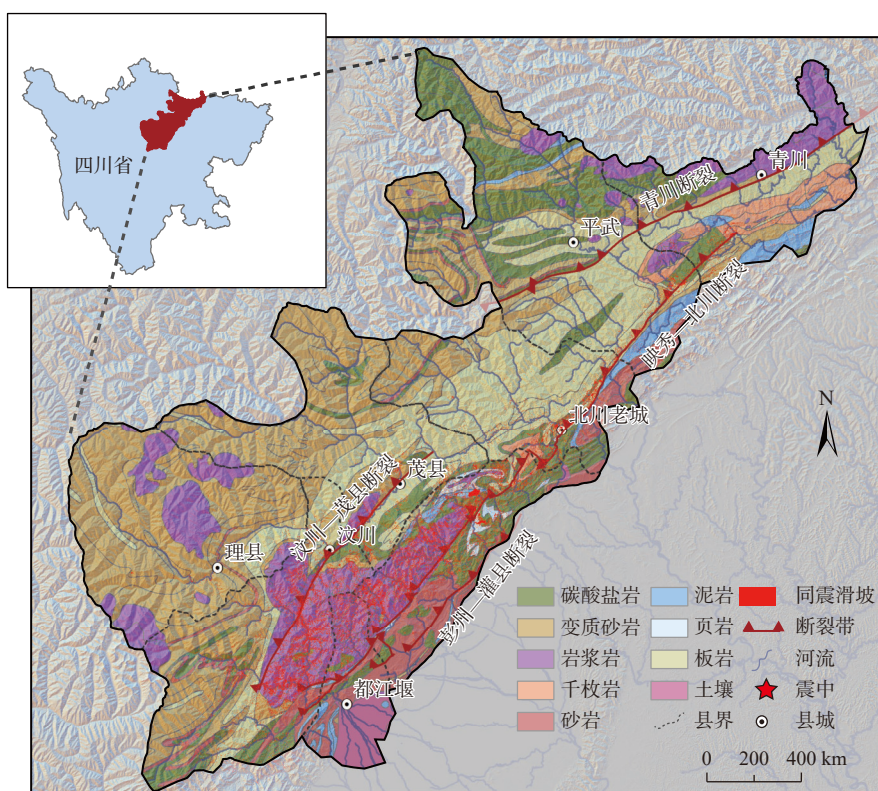


图1 研究区概况图

Fig.1 Overview of the study area

过70%的滑坡分布在映秀镇—北川县城之间,主要集中在断层上盘。野外调查表明,汶川地震滑坡的规模差异十分巨大,滑坡面积小到数平方米,大至数万平方米。

研究区地处第二阶地向第一阶地过渡的多雨地区,降雨集中在6—9月;东北部区域(平武县、北川县、青川县)属亚热带山地湿润季风气候区,多年平均气温15℃,年降水量在866~1355mm之间;西南部区域属半干旱干热河谷气候区,多年平均气温13.9℃,年降水量在486~1419mm之间^[20]。丰富的降水为地震诱发地质灾害的再活动、松散堆积体的侵蚀冲刷及植被生长恢复提供了有利条件。

研究区内具有十分丰富的物种资源,其中国家一级重点保护野生植物有珙桐、广叶珙桐、红豆杉等。由于气候和地形条件的差异性,研究区内植被呈现不同特征。岷江河谷沿岸气候干旱,主要以中性耐旱植物为主;北川、平武县多为亚高山常绿针叶林和常绿阔叶林;青川县植被主要为常绿阔叶林。

2 数据来源及方法

根据研究需要,综合考虑云层覆盖率、影像质量和成像时间选取空间分辨率为30m的2000—2020年

Landsat 影像作为监测植被破坏以及演化过程的数据源,并利用ENVI软件对影像进行辐射定标和大气校正预处理,计算历年5—8月的平均NDVI(2008年选择5月12日后遥感数据)。这是因为:(1)该时间段可以及时反映震后植被情况;(2)5—8月是汶川地区植被生长期,能够最大程度上代表一年内研究区内植被覆盖度的最高水平^[14]。除用于监测植被信息的Landsat影像外,本文还收集了其他辅助分析数据,主要包括研究区地质环境和汶川震区同震滑坡数据集,数据详情见表1。

目前,在植被破坏与演化规律的研究中应用最为广泛的指标是NDVI。NDVI的计算方法如下:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1)$$

式中: NIR——近红外波段反射;

RED——可见光红色波段反射。

NDVI的值在-1~1之间,当其为负值或0时,表示地面覆盖为云、水、雪、岩石或裸土等;当其为正值时,代表有植被覆盖,且覆盖度越大,NDVI值越大。由于2012年影像数据云层覆盖率高达90%左右,无法准确反映植被覆盖情况,因而后续分析中未使用2012年数据。

表 1 基础数据来源统计
Table 1 Statistic of the basic data source

类型	数据来源	收集时间	分辨率	用途
遥感影像	Landsat5	2000—2010年	30 m	提取NDVI
	Landsat7	2011—2013年		
	Landsat8	2014—2020年		
同震滑坡数据集	Tang等 ^[21]	2009年3月	—	研究对象
地形数据	https://earthdata.nasa.gov/	—	30 m	因子分析
降雨	https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/	2008—2019年	0.25°	
岩性	成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室	—	—	

滑坡体植被恢复情况可以用植被恢复率(VRR)来表示^[22],其计算公式如下:

$$VRR = \frac{NDVI_1 - NDVI_2}{NDVI_1 - NDVI_0} \times 100 \quad (2)$$

式中: $NDVI_0$ ——震前研究区 $NDVI$, 本文采用 2000—2007 年研究区内平均 $NDVI$ (每年 5—8 月), 以尽量减少单期影像中云层覆盖造成的误差;

$NDVI_1$ ——震后 $NDVI$ 值, 2008 年 5—8 月平均 $NDVI$;

$NDVI_2$ ——研究区指定年份 5—8 月的平均 $NDVI$ 。

根据前人研究结果^[22], 将 VRR 划分为 6 种类型: Type I ($VRR < 0$), Type II ($0 \leq VRR < 25$), Type III ($25 \leq VRR < 50$), Type IV ($50 \leq VRR < 75$), Type V ($75 \leq VRR < 100$), Type VI ($VRR \geq 100$)。

3 植被演化规律

3.1 $NDVI$ 的动态变化

地震前后滑坡体表面 $NDVI$ 平均值及标准差的变化趋势如图 2 所示。滑坡影响区震前 $NDVI$ 平均值为 0.67, 最大值为 0.72。2008 年汶川地震诱发的同震滑坡在运动过程中导致大量的地表植被破坏, $NDVI$ 值

骤降至 0.40。震后短时间内, $NDVI$ 仅有少量回升, 随后几年内 (至 2014 年), 植被恢复速率处于较快水平, 恢复速率(β_1)为 0.033/a。在震后后期 (2014—2020 年) 植被恢复速率放缓, 恢复速率(β_2)为 0.016/a。长期来看, 研究区内植被在震后初期迅速恢复, 并在未来较长的一段时间内进入恢复阶段。

$NDVI$ 的平均值能够反映区域植被恢复趋势, 而 $NDVI$ 的标准差则反映了区域生态系统的稳定性, 标准差越大, 区域生态系统越不稳定。根据图 2 可以发现, 汶川地震发生后, 标准差陡然增大。震后几年内, 随着坡体表面植被的恢复, $NDVI$ 平均值增大的同时, 标准差也随之减小, 这表明研究区生态系统的稳定性有所提高。然而, 当前研究区内 $NDVI$ 标准差仍高于震前水平, 这表明植被仍然没有完全恢复至震前水平, 仍有一些地区没有植被覆盖或植被很少。

为分析研究区植被的动态变化, 本文以 0.05 为间隔将 $NDVI$ 划分为 20 类, 得到 2000—2020 年历年 $NDVI$ 频率分布 (图 3)。2008 年汶川地震发生后, 研究区植被结构遭受严重破坏, 频率分布曲线呈现正偏斜分布, 分布高峰偏左; 2009—2013 年, 研究区植被快速恢复, $NDVI$ 平均值增大, 但频率分布曲线仍为左偏锋, 与震前相比有较大差异, 植被结构较差, 研究区内不稳定斜坡仍处在极易复活的阶段; 2014 年开始, 频率分布曲线转变为右偏锋状态, 植被结构逐渐向震前状态靠拢; 2018—2020 年, $NDVI$ 频率分布曲线的形态和峰值点未发生显著变化, 说明研究区内植被恢复进程已逐渐变缓, 植被结构逐渐接近震前水平, 但仍未完全达到稳定状态, 植被完全恢复至震前水平仍需要较长时间。

3.2 植被恢复率 (VRR)

图 4 表示了研究区同震滑坡体表面植被恢复率 (VRR) 的变化规律。在此定义 Type I—IV 为“恢复程度较差”, Type V—VI 为“恢复程度较好”。根据统计结果, 植被恢复程度较差 (Type I—IV) 的区域由

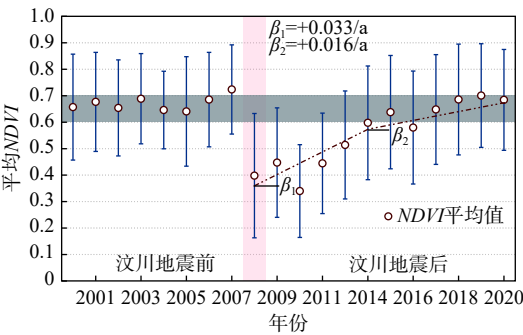


图 2 2000—2020 年间平均 $NDVI$ (误差线代表 $NDVI$ 的标准差)

Fig. 2 Average $NDVI$ from 2000 to 2020 (error bars represent standard deviation of $NDVI$)

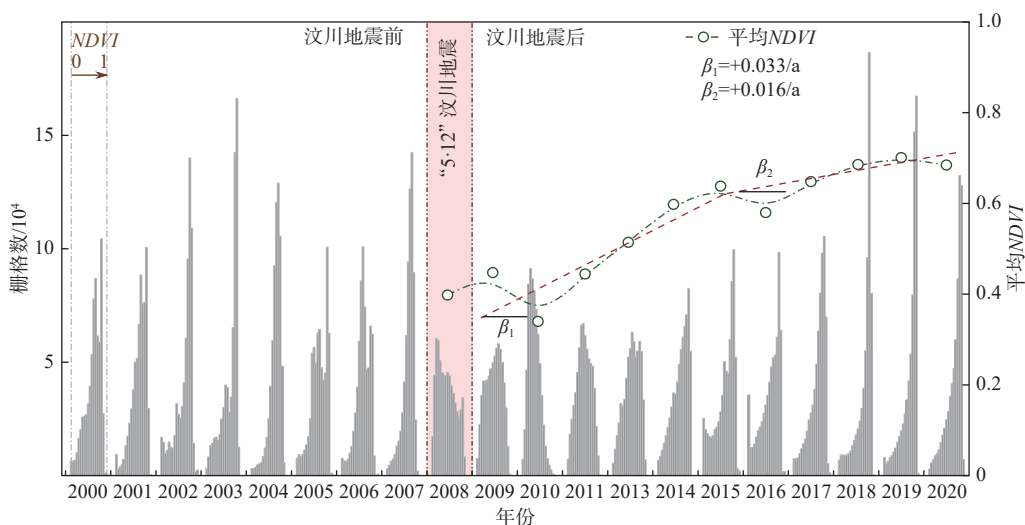


图 3 不同年份 NDVI 频率分布图

Fig. 3 Frequency distribution map of NDVI in different years

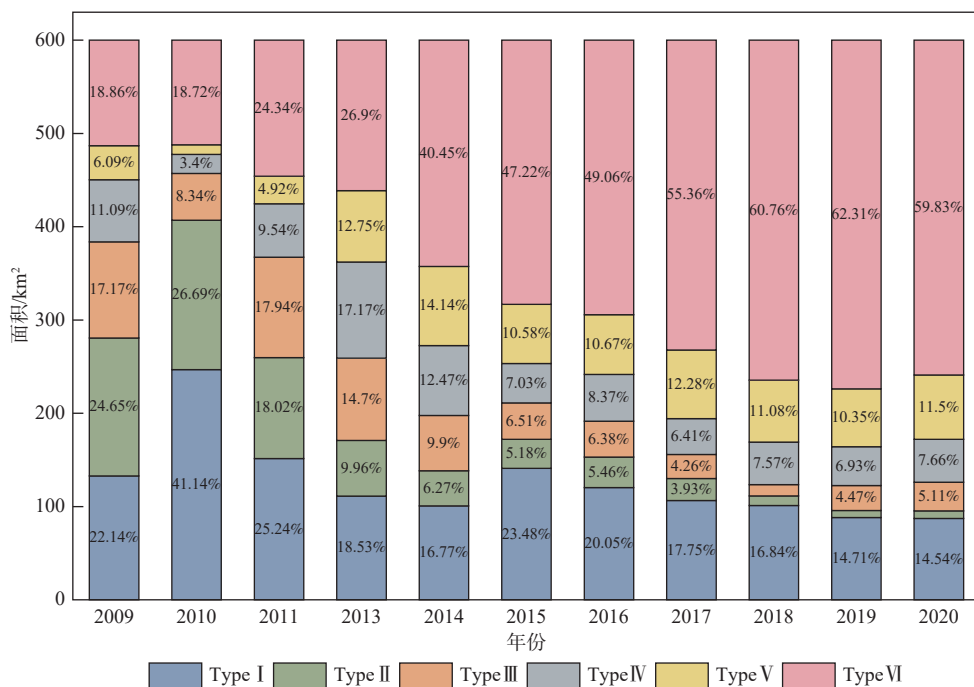


图 4 2009—2020 年间不同 VRR 类型面积及所占百分比

Fig. 4 Area and percentage of different VRR types from 2009 to 2020

2009 年的 75.05% 降低至 2020 年的 28.67%。图 5—7 展示了汶川、清平、北川地区典型区域植被恢复情况的分布特征。可以发现, 至 2020 年, 恢复程度较差的地区主要集中在高海拔地区以及部分巨型、大型滑坡体表面, 这是因为高海拔地区多为粒径粗大的岩质崩塌, 裸露岩体较多, 植被立地条件差, 同时随着海拔的升高, 气温逐渐降低, 植被生长的水热条件更差; 而低海拔地区物质稳定, 降雨丰沛, 气候温和, 更有利于植被生长恢复。

通过不同区域对比分析, 至 2020 年, 汶川地区植被恢复程度较好 (Type V—VI) 区域占比为 58%, 北川地区为 97%, 清平地区为 85%。可以发现, 植被恢复情况北川地区较好, 清平地区次之, 震中映秀地区恢复最差。造成这种现象的主要原因有 4 个: (1) 受软硬岩 (碳酸岩、板岩、砂岩、千枚岩) 交互组合的影响, 与汶川地区相比, 北川地区同震滑坡数量相对较少, 同时整体海拔较低, 同震滑坡主要集中在 700~900 m 的低海拔区域, 更有利于滑坡体表面植被恢复;

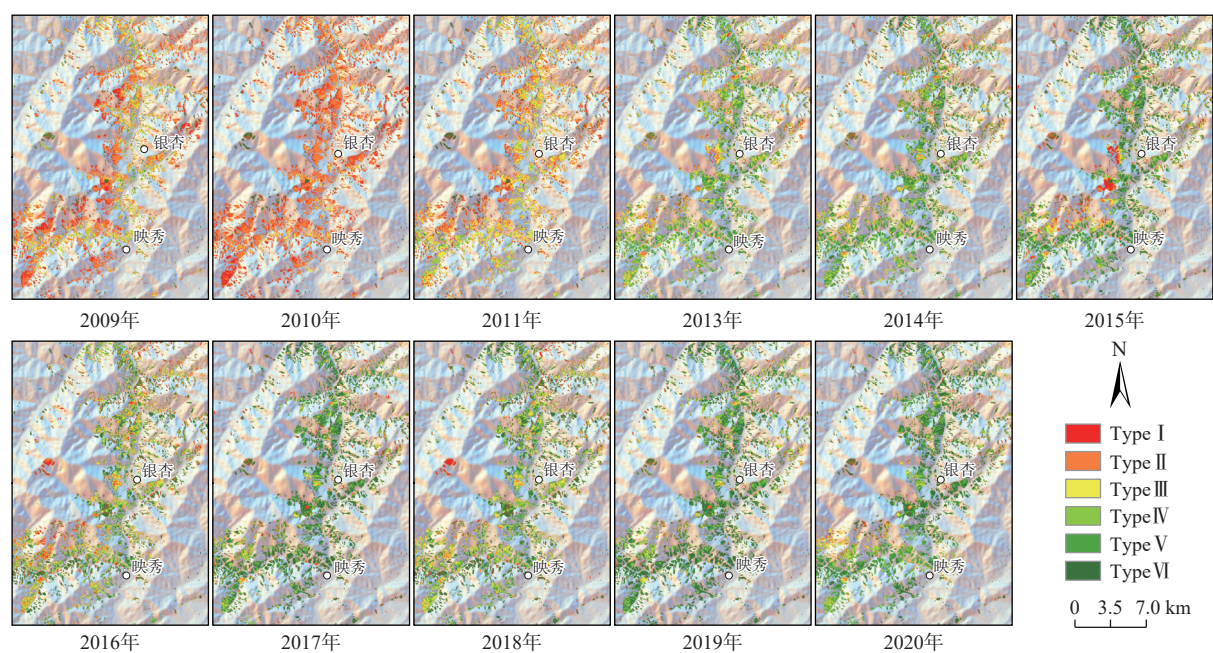


图 5 汶川地区典型区域植被恢复情况空间分布情况示意图

Fig. 5 Representative example of the spatial distribution of vegetation restoration in the Wenchuan area

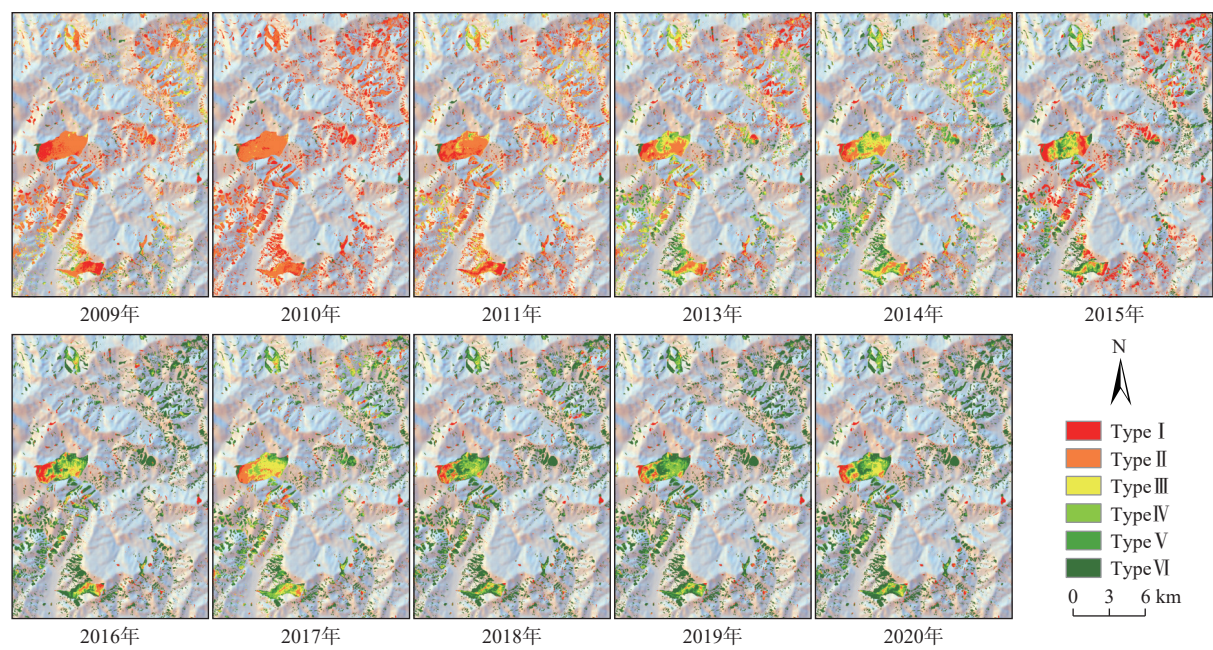


图 6 清平地区典型区域植被恢复情况空间分布情况示意图

Fig. 6 Representative example of the spatial distribution of vegetation restoration in the Qingping area

(2)受高地表峰值加速度的影响,北川地区受地震影响岩体破碎程度更高,其产生的碎屑物质颗粒粒径较小,更有利于保水及植被根系的生长发育;(3)北川地区地处亚热带山地湿润气候区,温和的气候和充沛的降雨作用进一步为植被恢复进程提供了积极作用;(4)北川地区植被恢复进程中除震后短期内(2009 年)外,未受到较大暴雨事件所引发的群发性泥石流灾

害,而汶川、清平地区分别在震后 10 a 间遭受群发性泥石流灾害,这些灾害事件造成了汶川、清平地区植被恢复的滞后性。

4 震后滑坡活动性演化趋势

根据滑坡体表面平均植被恢复率(图 8),将研究区内滑坡活动强度划分为 4 级,即: Type I—Ⅲ 为高

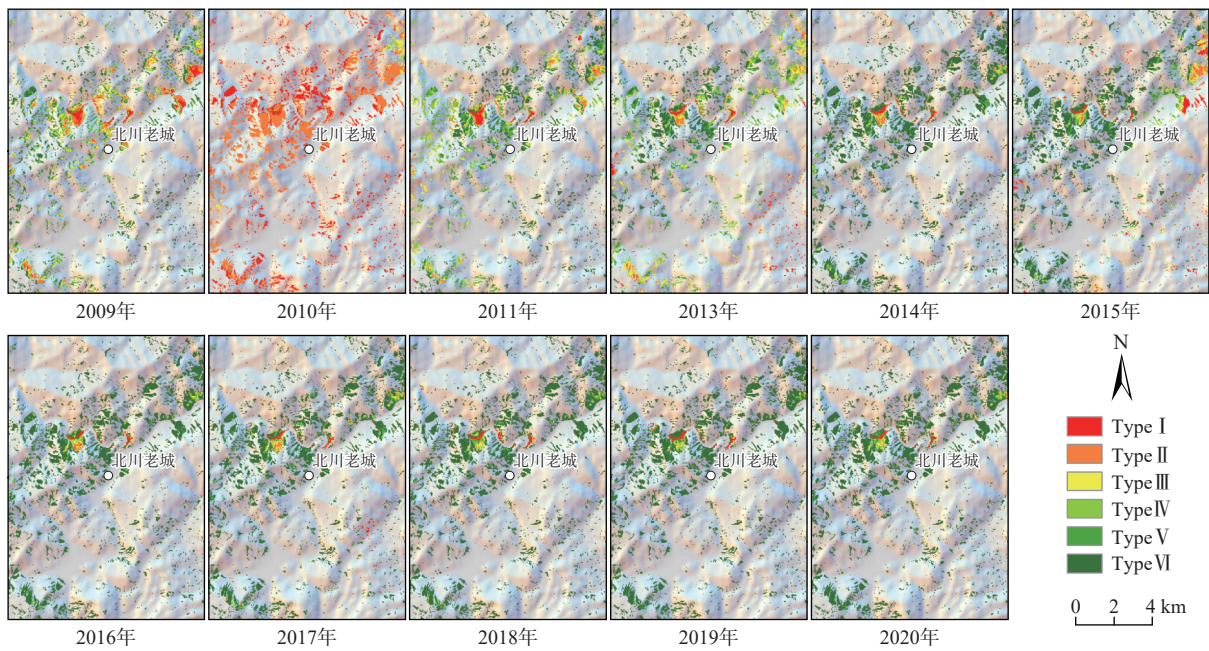


图 7 北川地区典型区域植被恢复情况空间分布情况示意图

Fig. 7 Representative example of the spatial distribution of vegetation restoration in the Beichuan area

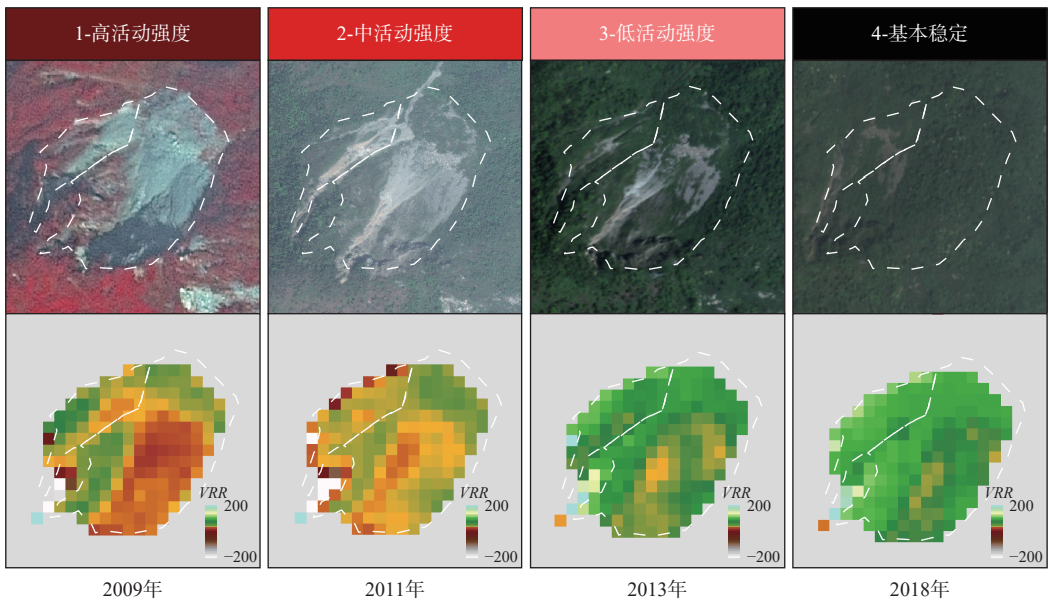


图 8 滑坡活动强度分级标准

Fig. 8 Classification standard of landslide activity intensity

活动强度; Type IV 为中活动强度; Type V 为低活动强度; Type VI 为滑坡体基本稳定。

研究区内滑坡活动性变化如图 9 所示。根据遥感影像解译结果,震初研究区内同震滑坡总面积为 600.14 km²,均为高活动强度。根据统计,2009 年高活动强度滑坡面积为 397.69 km²,占总量的 66.3%; 13.4% 的滑坡恢复至中活动强度, 8.6% 的滑坡恢复至低活动强度, 11.7% 恢复至基本稳定状态。到 2013 年,研

究区内高活动强度滑坡总面积为 247.13 km²,与 2008 年相比减少了 58.8%,同时有 18.91% 的滑坡恢复至基本稳定状态。到 2020 年,高活动强度滑坡面积为 105.68 km²,与 2008 年相比减少了 82.4%,同时有 52.3% 的滑坡恢复至基本稳定状态,仍有大量(近 50%)的滑坡处于活动状态,未能恢复至稳定水平。

根据《滑坡防治工程勘查规范》(GBT 32864—2016),将滑坡按照体积(V)大小分为 4 类:巨型滑坡($V \geq 1\,000 \times$

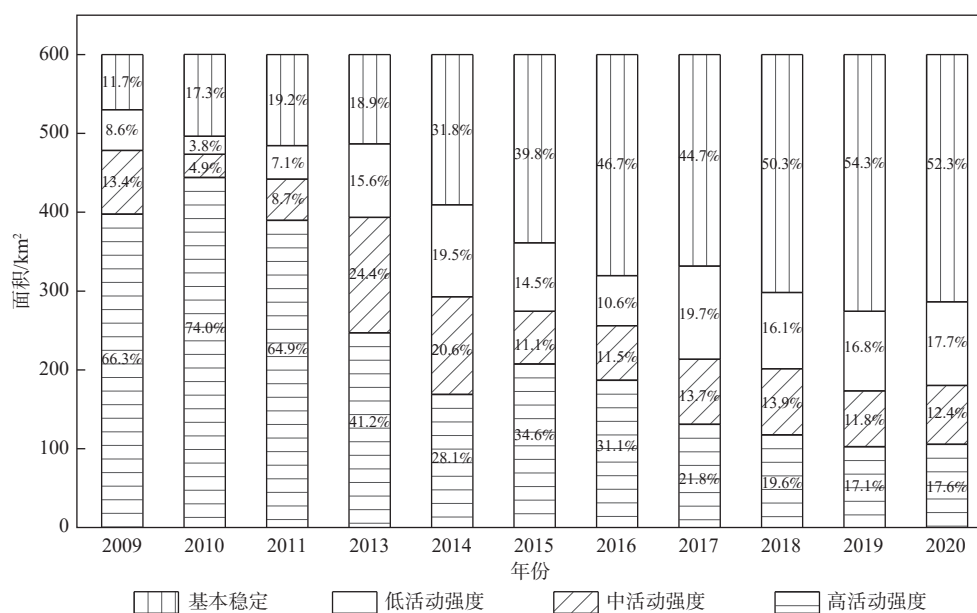


图9 历年滑坡活动强度统计

Fig. 9 Statistics on the intensity of landslide activities over the years

10^4 m^3); 大型滑坡 ($100 \times 10^4 \text{ m}^3 \leq V < 1000 \times 10^4 \text{ m}^3$); 中型滑坡 ($10 \times 10^4 \text{ m}^3 \leq V < 100 \times 10^4 \text{ m}^3$); 小型滑坡 ($V < 10 \times 10^4 \text{ m}^3$)。滑坡体积计算公式参考前人研究结果^[23], 即:

$$V = 1.3147 \times A^{1.2085} \quad (3)$$

式中: A ——滑坡面积/ m^2 。

为进一步研究不同规模滑坡活动强度演化趋势, 本文将高、中、低3种活动强度的滑坡合计为活动滑坡, 分别统计不同规模下历年3种强度活动滑坡与基本稳定滑坡的面积占相应规模滑坡总面积的百分比。统计结果如图10所示, 小型滑坡、中型滑坡、大型滑坡和巨型滑坡恢复速率依次为 $\beta_1=0.059/\text{a}$ 、 $\beta_2=0.048/\text{a}$ 、

$\beta_3=0.044/\text{a}$ 、 $\beta_4=0.019/\text{a}$, 小型滑坡恢复稳定的速率最快, 中型、大型滑坡次之, 巨型滑坡最慢。野外调查表明, 一些巨大的滑坡仍在不断向沟道中输送松散固体物质, 其活动性仍处于较高水平^[24](图11)。造成这一现象的主要原因是体积越大的滑坡体其细粒物质越多, 在降雨作用下水土耦合能力更强, 启动条件低, 进而更容易滑动, 导致植被恢复缓慢, 根系发育程度差, 对物源的稳固作用较弱, 这使得其活动性持续处于较高水平, 恢复稳定过程相对缓慢。

根据本文研究结果及前人研究, 研究区内同震滑坡坡体上植被恢复趋势预测及滑坡活动性总体演化过程^[25]如图12所示。

研究发现, 研究区内震前 $NDVI$ 仅在小范围内波动, 变化速率为 $0.005/\text{a}$, 几乎可忽略不计; 震后 $1 \sim 6 \text{ a}$ 内, $NDVI$ 平均值迅速增加, $NDVI$ 年平均增长速率为 $0.033/\text{a}$, 这个时间段内主要以易于繁育的物种(草本植物和灌木)数量的增加为主, 即“数量恢复期”, 在植被的固土效应及水文调节作用的影响下, 斜坡稳定性有所提高, 但由于植被种类单一, 此时滑坡灾害仍处于较高活动强度; 随后约 10 a 时间, $NDVI$ 平均值增加速度逐渐变缓, $NDVI$ 年平均增长速率为 $0.016/\text{a}$, 繁育缓慢的物种(高大树木)在这一时间段逐渐恢复, 植被结构得到改善, 植被恢复进入“质量优化期”, 松散堆积物和边坡进一步趋于稳定, 这种稳定也是植被定植的前提条件, 滑坡活动性逐渐降低, 滑坡灾害进入低活动强度阶段。根据这一趋势, 研究区内平均 $NDVI$ 预

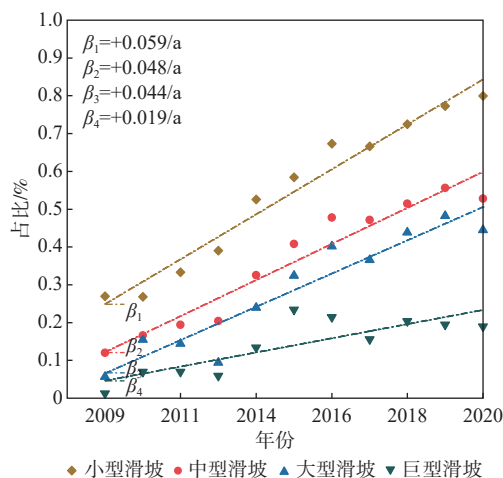


图10 不同规模滑坡活动性演化趋势

Fig. 10 Evolution trend of landslide activity of different scales



Fig. 11 Landslide materials continuing to transfer downstream from giant landslides

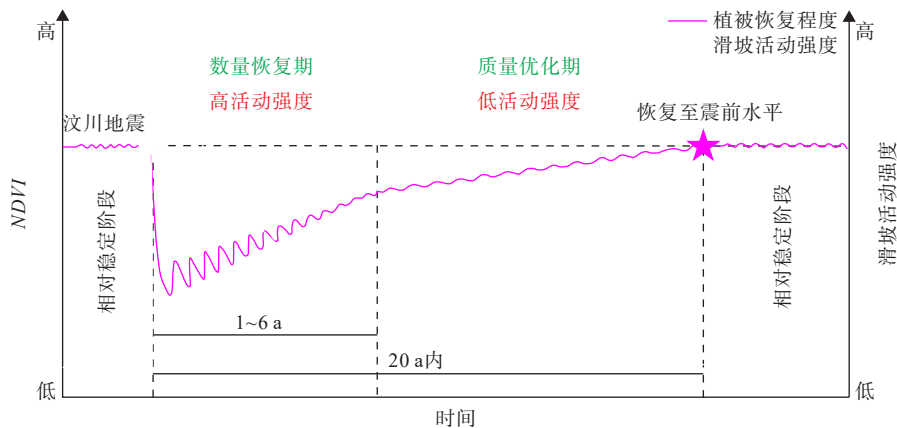


Fig. 12 Post-earthquake vegetation and landslide activity evolution trends

计约在震后 17 a, 即 2025 年恢复至震前平均水平。然而, 虽然滑坡表面植被的恢复在一定程度上反映地震后滑坡活动的衰减, 但地震对滑坡活动的影响将比地表植被恢复到震前水平的持续时间更长。参考前人研究结果, 本文认为震后滑坡活动将持续 25 a 甚至更久^[25-26]。

通过对比分析世界范围内其他地区地震效应, 研究发现汶川地震后滑坡表面植被恢复速率显著慢于 1999 年集集地震和 2005 年克什米尔地震后的观测结果。研究认为集集地震诱发的同震滑坡表面植被将在震后 7~10 a 恢复至震前自然水平^[27-28]。2005 年克什米尔地震后, 同震滑坡体活动性将在震后 3 a 内趋

于稳定^[29]。导致这种差异的原因可能是震后坡体植被恢复进程受地震震级、地形条件、基岩构造和气候条件的影响而不同。此外, 汶川震区基岩上土壤厚度相比于集集地震区和克什米尔地震区更大, 这使得汶川地震诱发的大型滑坡数量和体积远大于这两次地震^[30]。这也导致汶川震区相比其他地区植被恢复周期更长, 因此本研究区的滑坡活动持续时间大于其他地区。

5 结论

(1) 震后 12 a(2020 年)植被恢复程度较好(Type V 和 Type VI)的区域占总面积的 71.34%, 表明这些区

域的滑坡活动性处于较低或基本稳定状态。

(2) 尽管在震后 17 a 后研究区内 *NDVI* 平均值已逐渐接近震前水平, 但 *NDVI* 的频率分布曲线形态与震前相比仍有较大差异, 植被结构完全恢复至震前水平仍需要较长的一段时间。

(3) 根据滑坡体表面 *VRR* 的变化研究了同震滑坡活动性变化的结果表明, 到 2020 年研究区内高活动强度、中活动强度、低活动强度和基本稳定滑坡分别占比 17.6%、12.4%、17.7% 和 52.3%。

(4) 滑坡体体积也在一定程度上影响坡体表面植被恢复历程, 根据统计结果, 小型滑坡表面植被恢复速率最快 (0.059/a), 巨型滑坡恢复速率最慢 (0.019/a)。

参考文献 (References) :

- [1] 王涛, 刘甲美, 栗泽桐, 等. 中国地震滑坡危险性评估及其对国土空间规划的影响研究[J]. *中国地质*, 2021, 48(1): 21 – 39. [WANG Tao, LIU Jiamei, LI Zetong, et al. Seismic landslide hazard assessment of China and its impact on national territory spatial planning[J]. *Geology in China*, 2021, 48(1): 21 – 39. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 铁永波, 张宪政, 卢佳燕, 等. 四川省泸定县 *Ms*6.8 级地震地质灾害发育规律与减灾对策[J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(6): 1 – 12. [TIE Yongbo, ZHANG Xianzheng, LU Jiayan, et al. Characteristics of geological hazards and it's mitigations of the *Ms*6.8 earthquake in Luding County, Sichuan Province[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(6): 1 – 12. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 白永健, 倪化勇, 葛华. 青藏高原东南缘活动断裂地质灾害效应研究现状[J]. *地质力学学报*, 2019, 25(6): 1116 – 1128. [BAI Yongjian, NI Huayong, GE Hua. Advances in research on the geohazard effect of active faults on the southeastern margin of the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Geomechanics*, 2019, 25(6): 1116 – 1128. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 张佳佳, 李海兵, 赵国华, 等. 2013 年四川芦山地震次生山地灾害发育规律[J]. *地质通报*, 2015, 34(5): 898 – 907. [ZHANG Jiajia, LI Haibing, ZHAO Guohua, et al. Features of secondary mountain hazards triggered by the 2013 Lushan Earthquake, Sichuan Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 2015, 34(5): 898 – 907. (in Chinese with English abstract)]
- [5] XU Chong, XU Xiwei, YAO Xin, et al. Three (nearly) complete inventories of landslides triggered by the May 12, 2008 Wenchuan *Mw* 7.9 earthquake of China and their spatial distribution statistical analysis[J]. *Landslides*, 2014, 11(3): 441 – 461.
- [6] 唐川, 李为乐, 丁军, 等. 汶川震区映秀镇“8·14”特大泥石流灾害调查[J]. *地球科学*, 2011, 36(1): 172 – 180. [TANG Chuan, LI Weile, DING Jun, et al. Field investigation and research on giant debris flow on August 14, 2010 in Yingxiu Town, epicenter of Wenchuan earthquake[J]. *Earth Science*, 2011, 36(1): 172 – 180. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 李明威, 唐川, 陈明, 等. 汶川震区北川县泥石流流域崩滑体时空演变特征[J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(3): 182 – 190. [LI Mingwei, TANG Chuan, CHEN Ming, et al. Spatio-temporal evolution characteristics of landslides in debris flow catchment in Beichuan County in the Wenchuan earthquake zone[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(3): 182 – 190. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 杨琴, 范宣梅, 许强, 等. 北川唐家湾滑坡变形历史与形成机制研究[J]. *水文地质工程地质*, 2018, 45(2): 136 – 141. [YANG Qin, FAN Xuanmei, XU Qiang, et al. A study of the deformation history and mechanism of the Tangjiawan landslide[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45(2): 136 – 141. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 王东伟, 游勇, 李道凌, 等. 汶川县绵虬镇板子沟“8·20”大型泥石流堵河特征及危害性预测[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2022, 33(1): 58 – 66. [WANG Dongwei, YOU Yong, LI Daoling, et al. The river blockage characteristics of “8·20” large-scale debris flow and the hazard prediction in Banzi gully in Miansi Town, Wenchuan County[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(1): 58 – 66. (in Chinese with English abstract)]
- [10] SHEN P, ZHANG L M, FAN R L, et al. Declining geohazard activity with vegetation recovery during first ten years after the 2008 Wenchuan earthquake[J]. *Geomorphology*, 2020, 352: 106989.
- [11] LIN Chaoyuan, LO Huangmu, CHOU Wenchieh, et al. Vegetation recovery assessment at the jou-jou mountain landslide area caused by the 921 earthquake in Central Taiwan[J]. *Ecological Modelling*, 2004, 176(1/2): 75 – 81.
- [12] YANG Chiming, CHEN Janchang, PENG Lanlin, et al. Chi-Chi earthquake-caused landslide: Grey prediction model for pioneer vegetation recovery monitored by satellite images[J]. *Botanical Bulletin of Academia Sinica*, 2002, 43(1): 69 – 75.
- [13] YANG Wentao, QI Wenwen, ZHOU Jinxing. Decreased

- post-seismic landslides linked to vegetation recovery after the 2008 Wenchuan earthquake[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 89: 438 – 444.
- [14] YUNUS A P, FAN Xuanmei, TANG Xiaolu, et al. Decadal vegetation succession from modis reveals the spatio-temporal evolution of post-seismic landsliding after the 2008 Wenchuan earthquake[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 236: 111476.
- [15] TANG C, VAN WESTEN C J, TANYAS H, et al. Analysing post-earthquake landslide activity using multi-temporal landslide inventories near the Epicentral area of the 2008 Wenchuan earthquake[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2016, 16(12): 2641 – 2655.
- [16] NI Zhongyun, YANG Zhenyu, LI Weile, et al. Decreasing trend of geohazards induced by the 2008 Wenchuan earthquake inferred from time series *NDVI* data[J]. *Remote Sens*, 2019, 11: 2192.
- [17] 唐川. 汶川地震区暴雨滑坡泥石流活动趋势预测[J]. *山地学报*, 2010, 28(3): 341 – 349. [TANG Chuan. Activity tendency prediction of rainfall induced landslides and debris flows in the Wenchuan earthquake areas[J]. *Journal of Mountain Science*, 2010, 28(3): 341 – 349. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 龙玉洁, 李为乐, 黄润秋, 等. 汶川地震震后 10 a 绵远河流域滑坡遥感自动提取与演化趋势分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(11): 1792 – 1800. [LONG Yujie, LI Weile, HUANG Runqiu, et al. Automatic extraction and evolution trend analysis of landslides in Mianyu River basin in the 10 years after Wenchuan earthquake[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(11): 1792 – 1800. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 孟秋, 高宽, 陈启志, 等. 2008 年汶川大地震孕震、同震及震后变形和应力演化全过程的数值模拟[J]. *地质力学学报*, 2021, 27(4): 614 – 627. [MENG Qiu, GAO Kuan, CHEN Qizhi, et al. Seismogenic, coseismic and postseismic deformation and stress evolution of the 2008 Wenchuan earthquake: Numerical simulation analysis[J]. *Journal of Geomechanics*, 2021, 27(4): 614 – 627. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 李甜甜. 汶川地震极重灾区生态恢复研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2012. [LI Tiantian. The ecological restoration research of the severest disaster area of Wenchuan earthquake[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2012. (in Chinese with English abstract)]
- [21] TANG Chuan, VAN WESTEN C J. Atlas of Wenchuan-earthquake geohazards: Analysis of co-seismic and post-seismic geohazards in the area affected by the 2008 Wenchuan earthquake[M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [22] LIN Wentzu, CHOU Wenchieh, LIN Chaoyuan, et al. Vegetation recovery monitoring and assessment at landslides caused by earthquake in Central Taiwan[J]. *Forest Ecology and Management*, 2005, 210(1/2/3): 55 – 66.
- [23] XU Chong, XU Xiwei, SHEN Lingling, et al. Optimized volume models of earthquake-triggered landslides[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 29797.
- [24] XIONG Jiang, TANG Chuan, GONG Lingfeng, et al. How landslide sediments are transferred out of an alpine basin: Evidence from the epicentre of the Wenchuan earthquake[J]. *CATENA*, 2022, 208: 105781.
- [25] CHEN Ming, TANG Chuan, XIONG Jiang, et al. The long-term evolution of landslide activity near the epicentral area of the 2008 Wenchuan earthquake in China[J]. *Geomorphology*, 2020, 367: 107317.
- [26] HUANG Runqiu, LI Weile. Post-earthquake landsliding and long-term impacts in the Wenchuan earthquake area, China[J]. *Engineering Geology*, 2014, 182: 111 – 120.
- [27] LIN Wentzu, LIN Chaoyuan, CHOU Wenchieh. Assessment of vegetation recovery and soil erosion at landslides caused by a catastrophic earthquake: A case study in Central Taiwan[J]. *Ecological Engineering*, 2006, 28(1): 79 – 89.
- [28] SHOU K J, WU C C, FEI L Y, et al. Dynamic environment in the Ta-Chia river watershed after the 1999 Taiwan Chi-Chi earthquake[J]. *Geomorphology*, 2011, 133(3/4): 190 – 198.
- [29] SABA S B, VAN DER MEIJDE M, VAN DER WERFF H. Spatiotemporal landslide detection for the 2005 Kashmir earthquake region[J]. *Geomorphology*, 2010, 124(1/2): 17 – 25.
- [30] TIAN Yingying, OWEN L A, XU Chong, et al. Landslide development within 3 years after the 2015 *Mw* 7.8 Gorkha earthquake, Nepal[J]. *Landslides*, 2020, 17(5): 1251–1267.

编辑: 汪美华
刘真真