

汶川地震震中地区崩滑体的植被恢复与长期效应

王飞龙¹, 陈明², 王晓迪², 丁军¹, 张皓¹

(1. 中国建筑西南勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610052;

2. 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, 四川 成都 610059)

摘要: [目的] 评估汶川地震震中地区崩滑体自然植被恢复过程, 旨在为该区震后地质环境恢复、灾害防治和重建提供依据。[方法] 以四川省汶川县映秀镇为研究区, 以多期空间分辨率为 30 m×30 m 的 Landsat 遥感影像为数据源, 分析震后崩滑体上的植被动态恢复变化, 结合地形因子分析地震 9 a 后植被恢复的空间分布特征。[结果] 研究区震后至 2011 年, 经历植被恢复程度较差, 差等水平以下占比 68%, 期间暴雨泥石流活动频率高, 至 2013 年后就达到一个较好的恢复水平, 差等水平以下占比 32%, 之后就处于一个缓慢的恢复过程, 至 2017 年植被恢复差等以下的崩滑体仍主要处于 30°~50° 的坡度区间, 1 500~2 100 m 高程区间、东南坡向。[结论] 四川省汶川县映秀镇总体上经过近 9 a 的恢复过程, 植被覆盖度恢复到 0.74, 与震前相比差值为 0.08, 根据拟合模型预计 2022 年植被覆盖度能恢复到震前水平, 但仍主要以草本和灌木为主, 植被种群结构与震前差异较大。

关键词: 汶川地震; 滑坡体; 植被恢复; 长期演变

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2020)03-0175-05

中图分类号: P642.22, TP79

文献参数: 王飞龙, 陈明, 王晓迪, 等. 汶川地震震中地区崩滑体的植被恢复与长期效应[J]. 水土保持通报, 2020, 40(3): 175-179. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2020.03.025; Wang Feilong, Chen Ming, Wang Xiaodi, et al. Vegetation recovery of co-seismic landslide and long-term effect at central area of Wenchuan earthquake [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(3): 175-179.

Vegetation Recovery of Co-seismic Landslide and Long-Term Effect at Central Area of Wenchuan Earthquake

Wang Feilong¹, Chen Ming², Wang Xiaodi², Ding Jun¹, Zhang Hao¹

(1. China Southwest Survey and Design Research Institute of Architecture Co., Ltd.,

Chengdu, Sichuan 610052, China; 2. State Key Laboratory of Geo-hazard Prevention and Geo-environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: [Objective] The vegetation recovery process of the co-seismic landslide at central area of Wenchuan earthquake was assessed in order to provide the basis for the ecological environment restoration, disaster prevention, and reconstruction after the earthquake in the study area. [Methods] Yingxiu Town of Wenchuan County, Sichuan Province was taken as a study area, and the dynamic changes of vegetation at landslide sites after the earthquake were analyzed based on multi-temporal images with a resolution of 30 m. The spatial distribution characteristics of vegetation recovery in the past nine years were analyzed based on the topographic factors. [Results] The vegetation of the landslides did not recover well from 2008 to 2011 in the study area, and 68% of the sites were below the “poor” level. During this period, the frequencies of rainstorms and debris flow activity remained high. After 2013, a better recovery level was reached overall, and the number of landslides below the poor level decreased to 32%. Then, it had been in a slow recovery process. In 2017, the landslides with a poor level of vegetation recovery were mainly located in the slope range of 30°—50°, the elevation range of 1 500—2 100 m, and a southeast slope aspect. [Conclusion] In the 9 years after the earthquake, the vegetation cover index increased to 0.74, and the average vegetation coverage index value

收稿日期: 2019-11-13

修回日期: 2020-01-16

资助项目: 国家重点研发计划项目“强震山区特大地质灾害致灾机理与长期效应研究”(2017YFC1501004)

第一作者: 王飞龙(1991—), 男(汉族), 河南省周口市人, 硕士, 助理工程师, 研究方向为环境地质灾害、遥感应用。Email: 584975674@qq.com。

通讯作者: 陈明(1993—), 男(汉族), 湖北省荆州市人, 博士生, 主要从事工程地质和地质灾害方向研究。Email: chenmingge@163.com。

was 0.08 less than that before the earthquake. Based on the statistical model, the vegetation cover index is expected to return to the pre-earthquake level in 2022. However, the population structure of vegetation with herbs and shrubs is different from that before the earthquake.

Keywords: Wenchuan earthquake; landslide; vegetation recovery; long-term evolution

在全球范围内,地震一直以来被认为是山地地貌形成的重要驱动因子,也是诱发滑坡的主要因子之一,发生在山区的中至强级地震会触发成千上万的崩塌、滑坡。强震不仅引发大量的同震崩塌、滑坡,而且还会在震后很长时间内加剧斜坡的不稳定性。强震所造成的不仅仅是严重的人员伤亡、巨大的经济损失,更重要地是对震区山地环境的长期效应及一系列的二次灾害事件。近年来,在世界范围内,大量的地质灾害链被地震引发,例如 1999 年台湾集集地震、2010 年海地地震、2013 年芦山地震、2017 年九寨沟地震^[1-4]。发生在山地区域的大地震通常会造大量崩塌、滑坡,对区域的植被覆盖和生长造成严重影响。对植被产生的负面影响可能持续多年,植被恢复经历动态变化。汶川地震造成了大面积的山体滑坡,剥离了很多植被。震后期间,崩滑体上植被开始恢复,并对减轻震后山地灾害发挥了重要作用^[5-6]。同时,植被根系对土壤抗剪强度具有明显的增强作用^[7-9]。恢复的植被也会改变坡面地表的水文特性。例如,恢复的植被冠层可以拦截降雨,减少滑坡表面的飞溅侵蚀。然而,在地震灾害研究中,地震后植被恢复对崩滑体活动减少的影响尚未得到充分认识^[10],因此研究震后植被的恢复可以有效的预测滑坡的活动发展趋势。

受地震后降水的干扰,这些松散堆积体和斜坡很容易被侵蚀运移,可能导致多年来泥沙输移量增加^[11-13]。然而,地震后观测数据显示,地震后滑坡高活动期仅持续了 1~4 a^[6]。尽管存在大量可侵蚀的松散物质,但地震后斜坡的侵蚀量远远小于估计量^[14],引发该地区泥石流的降雨最小阈值在地震后开始逐渐增加,这意味着植被因素在地震后减缓地质灾害中发挥作用,崩滑体的植被恢复可能加强其自身稳定性;即使是早期演替植物(如草本植物)也可以减少滑坡发生浅层活动的可能性^[8]。尽管影响滑坡植被恢复的因素很复杂,但恢复植被的存在至少表明松散沉积物和斜坡的瞬时稳定性,这种斜坡稳定性是植被恢复的先决条件。本文主要研究同震崩滑体上的植被覆盖度恢复变化,这里崩滑体指崩塌、滑坡等坡面物质。崩滑体植被恢复状况可以一定程度上反应其活动性,因此,研究崩滑体的植被恢复趋势对于震后滑坡泥石流活动的趋势预测具有关键性的作用。

1 研究区概况

本文主要选取汶川地震极震区同震崩塌、滑坡较多地区作为研究区域,进行特大地震后崩滑体植被覆盖度恢复特征研究。研究区域位于中国四川省汶川县映秀镇附近的汶川地震震中附近。映秀—北川断裂带属于龙门山断裂带,横穿研究区,形成了整个研究区的主要发震断层,地震烈度为Ⅱ级。上层为土壤覆盖层,下层是风化和高度破碎的岩石,大部分是火成岩(花岗岩、闪长岩),但也存在变质岩和沉积岩(砂岩),以及第四纪沉积物。地形主要是含高、中、低山斜坡地貌及岷江河谷地貌,具有较高的起伏度(约 760~3 200 m),地形坡度在 0°~65°范围内,地震力引发了严重的崩塌、滑坡,其面积覆盖了研究区面积的 39.47%。在过去的十年中,该地区经历了持续的山体滑坡、泥石流和山洪暴发。研究区主要包括红椿沟、烧房沟、映秀磨子沟、瓦司沟、豆芽坪沟、麻羊店沟 6 条泥石流流域,流域面积共 17.96 km²,流域面积分布在 0.61~5.52 km² 之间,泥石流主沟长度在 1.76~4.03 km 之间。

研究区属亚热带湿润气候,根据 1998—2010 年记录数据,年平均气温 13 ℃,年平均降水量为 1 134 mm,6—9 月的降雨约占全年的 70%,其中 8 月份降水量最大,月平均最大降水量为 289.9 mm;研究区水系发育,岷江是长江上游的一条支流,由北向南穿过映秀,河谷深切,水流湍急,年平均流量 452 m³/s。

2 数据来源及方法

基于 Landsat 影像质量情况,在备选遥感影像集合中,本文基于研究区选择 200704,200806,201103,201305,201503,201704 共 6 期 Landsat 影像数据作为计算植被覆盖度及评价分析数据源。本文的研究对象主要是同震崩滑体,由于计算植被恢复率需以“5·12”汶川地震时间接近的影像为基准,该期影像主要被用于识别同震崩滑体区域植被覆盖指数,由于滑坡体区域基本处于裸露状态,故该期的时间节点不会对数据分析造成影响。考虑到山地植物生长季候明显,因此其余影像年份均选于相近季节月份。基于以上数据利用 Erdas 软件结合 DEM 数据和河流水系图对确定的遥感影像进行几何精校正和配准,对所用 Landsat 影像数据进行辐射定标、FLAASH 大气

校正、研究区边界裁切等预处理,提取研究区多期 NDVI 植被数据,并结合震后解译的同震崩滑体,利用公式(1)计算崩滑体的植被恢复率。

$$VRR = \frac{NDVI_T - NDVI_{Post}}{NDVI_{Pre} - NDVI_{Post}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: VRR 表示植被恢复率(vegetation recovery rate, VRR), $NDVI_T$ 表示地震年后某一年的植被指数, $NDVI_{Post}$ 表示地震后(2008 年)植被指数, $NDVI_{Pre}$ 表示地震前(2007 年)植被指数。

基于解译的汶川震后同震滑坡(见图 1),由于典型研究区的 2007 年的影像数据的局限性,提取的 NDVI 左上角出现异常,因此将这部分同震崩滑体剔除,以流域内的其余强震崩滑体为对象研究坡体上的植被恢复情况。根据许积层等^[15]对震后植被恢复率的相关研究,根据研究区植被的实际恢复情况,将植被恢复率(VRR)划分为 4 级:极差($VRR < 0$),差($0 < VRR < 50\%$),中等($50\% < VRR < 100\%$)以及良好($VRR > 100\%$)。

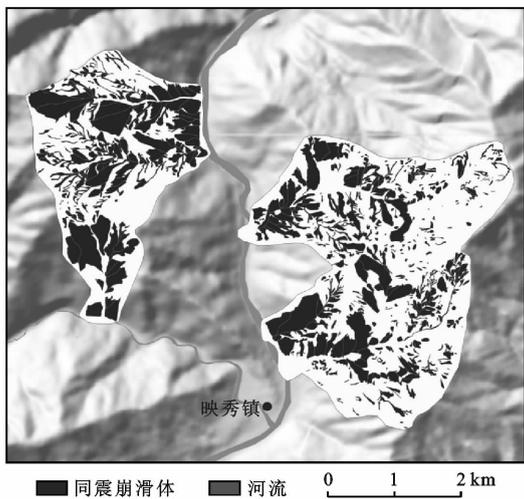


图 1 四川省汶川县映秀镇同震崩滑体解译结果

3 崩滑体植被恢复趋势与特征

3.1 时间尺度上植被恢复变化趋势

研究区典型泥石流流域崩滑体植被恢复率分布如图 2 所示,由图 2 可见震后 3 a,崩滑体的活动性仍较高,植被恢复较差,2011 年植被恢复水平在差以下的面积为 438.93 hm^2 ,占整体的比值为 68%,2013 年后大部分处于中等恢复以上,恢复较差的比例虽随时间有减少趋势,但仍然占比 20%~30%之间。从图 3 中各个等级植被恢复率所占面积比例变化可知,在研究区范围内,2011 年植被恢复中等程度上仅 32%,其中良好仅有 7%,表明 2008—2011 期间,滑

坡泥石流活动频率较高,缺少植被恢复的稳定条件,2013 年相较于 2011 年植被有了较大程度上的恢复,中等程度上占 68%,其中良好就占了 29%,约 1/3 的崩滑体恢复较差,表明 2011—2013 年期间滑坡泥石流的活动性有所降低。2015 年恢复较差占 29%,2017 年恢复较差占 21%,可以看出 2013 年以后植被恢复率的变化不显著,表明至 2013 年植被大部分崩滑体就已达较好的恢复水平了,2013 年后处于一个缓慢的恢复水平,植被恢复率无较大变异性,滑坡泥石流活动减弱趋于平稳。汶川震后研究区植被覆盖度恢复总体较好,表现为极差、差的植被恢复比例减少,中等、良好植被恢复面积增加。

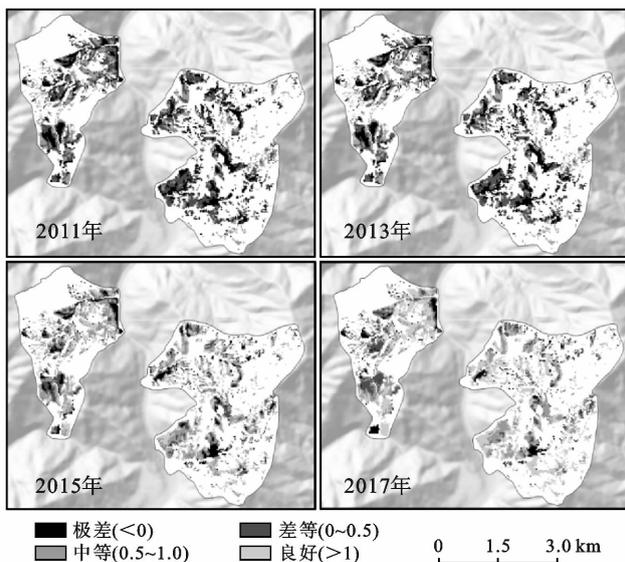


图 2 映秀镇多时相崩滑体坡体植被恢复率等级变化

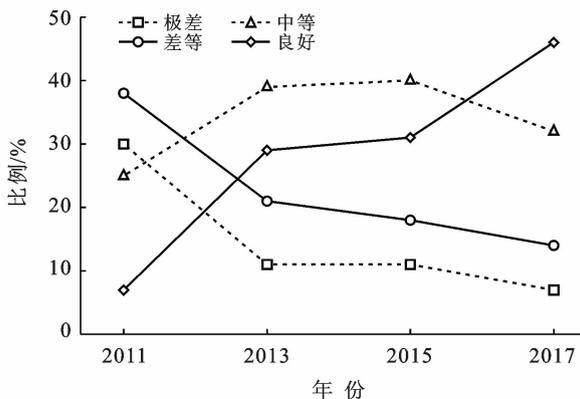


图 3 映秀镇多时相崩滑体植被恢复率等级变化

由图 4 可知,研究区汶川地震后前期植被恢复速率较快,至 2013 后恢复速率减慢。从 2013—2017 年,NDVI 的年平均恢复速率为 0.02/a,根据拟合模型预计 2022 年 NDVI 可以恢复到 0.817,接近于震

前水平,表明研究区震后受损植被的恢复期约为 15 a,杨文涛等^[16-17]根据地震后 8 a 的植被恢复情况,估计地震后崩滑体活动将在 20 a 内恢复到地震前的状态,这与本文得到的结论存在差异,可能是由于数据和提取方法上存在差异造成的。由于本文主要是以 NDVI 为标准,只能反映植被覆盖度的变化,因此研究区震后植被恢复从种群结构上来看需要更长的时间才能恢复到震前水平。

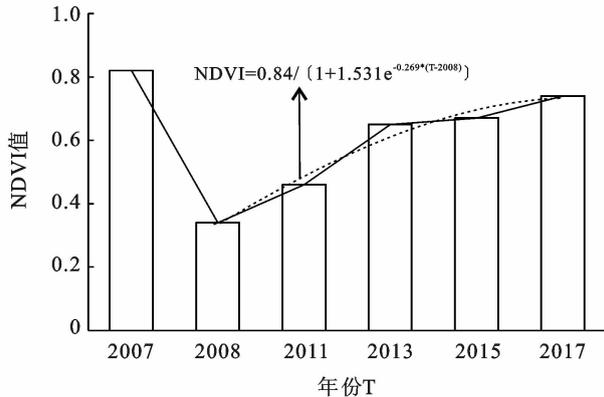


图 4 四川省汶川县映秀镇崩滑体植被恢复趋势

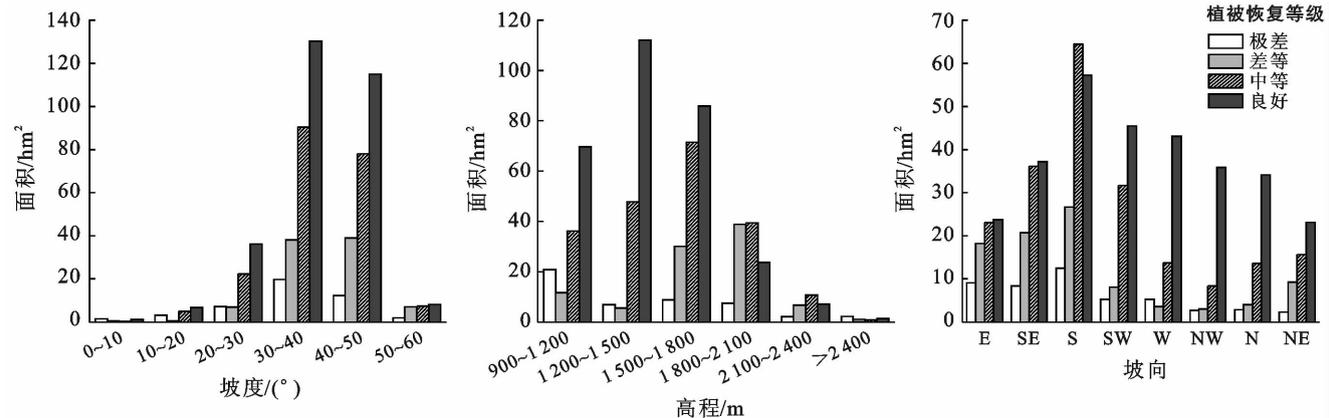


图 5 四川省汶川县映秀镇植被恢复等级与地形因子评估

4 结论

汶川震后同震滑坡体上植被恢复的长期变化过程,以及针对造成这类变化的控制因子的研究成果相对缺乏,针对上述问题,本文以长时间序列 NDVI 数据为基础,在统计分析震后多时序滑坡体植被恢复特征及变化趋势的基础上获得震后长时期山地环境恢复规律。

(1) 通过 2011, 2013, 2015, 2017 年的植被恢复率变化分析,可知震后 3 a,崩滑体的活动性仍较高,植被恢复较差,差等以下比例 68%,2013 年后大部分

3.2 植被恢复空间分布特征

进一步分析植被恢复率在空间上的分布,统计最近一期 2017 年植被恢复等级在坡度、高程、坡向不同分级区间的各恢复等级的面积(见图 5)。从图 5 可知,就坡度而言,各坡度区间基本都以中等及以上恢复水平为主,表明至 2017 年研究区坡体植被已经达到一个良好的水平,30°~50°的坡度区间内差等以下与中等以上均为最多,这是由于同震滑坡主要分布在该区间的控制影响。从高程而言,植被恢复率为差等的植被主要分布在 1 500~2 100 m 高程区间内,总的来看,随着海拔的增高,差、极差等级的比例逐渐增加,表明高海拔植被恢复较慢,这是由于高海拔区域重力势能较大,崩滑体易失稳活动;在 900~1 200 m 的低海拔区域出现异常,可能是由于公路建设、人工开挖所导致植被受损。就坡向而言,各坡向以中等以上的恢复等级为主,其所占比例均大于 50%,恢复较差的主要在 E, SE, S 坡向。表明 SE 向崩滑体活动敏感性高, NW 向崩滑体活动敏感性低,这与汶川地震波传播方向、断层走向、断层逆冲运动、山脉走向等因素都有内在联系,同时东南坡向为阳坡,降雨集中,崩滑体易失稳,植被恢复环境较差。

处于中等恢复以上,恢复较差的比例虽随时间有减少趋势,但仍然在 20%~30%之间,至 2017 年,研究区坡体植被恢复已经达到较好的恢复水平。

(2) 汶川地震后前期植被恢复速率较快,2008—2013 年间平均恢复速率为 0.06/a,至 2013 后恢复速率减慢。从 2013—2017 年 NDVI 的年平均恢复速率为 0.02/a 根据拟合模型预计 2022 年可以恢复到震前水平,表明研究区震后受损植被的恢复期约为 15 a。

(3) 至 2017 年,研究区坡体植被已经达到一个良好的水平,植被恢复差等以下的仍主要处于 30°~50°的坡度区间,1 500~2 100 m 高程区间, E, SE, E 坡向。

植被恢复虽然从一定程度上反映崩滑体活动强度趋势,但只是山地环境恢复的表观现象,并不能完全代表坡体内部自身稳定程度,这是仅通过空中遥感监测手段的不足,在之后的研究中应该更多地结合地面物理试验手段去研究滑坡体岩土强度的恢复变化,以达到对震后灾害活动发育预测的准确性。

[参 考 文 献]

- [1] Chigira M, Wang W N, Furuya T, et al. Geological causes and geomorphological precursors of the Tsaoling landslide triggered by the 1999 Chi-Chi earthquake, Taiwan [J]. *Engineering Geology*, 2003, 68(3/4):259-273.
- [2] Gorum T, van Westen C J, Korup O, et al. Complex rupture mechanism and topography control symmetry of mass-wasting pattern, 2010 Haiti earthquake [J]. *Geomorphology*, 2013, 184:127-138.
- [3] Chang Ming, Tang Chuan, Xia Chenhao, et al. Spatial distribution analysis of landslides triggered by the 2013-04-20 Lushan earthquake, China [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2016, 15(1):163-171.
- [4] Fan Xuanmei, Scaringi G, Xu Qiang, et al. 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 [J]. *Landslides*, 2018, 15(5):967-983.
- [5] Huang Runqiu, Fan Xuanmei. The landslide story [J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6(5):325-326.
- [6] Marc O, Hovius N, Meunier P, et al. Transient changes of landslide rates after earthquakes [J]. *Geology*, 2015, 43(10):883-886.
- [7] Sidle R C, Ochiai H. *Landslides: processes, prediction, and landuse* [M]. Washington DC: American Geophysical Union, 2006.
- [8] Stokes A, Atger C, Bengough A G, et al. Desirable plant root traits for protecting natural and engineered slopes against landslides [J]. *Plant and Soil*, 2009, 324(1/2):1-30.
- [9] Shen Ping, Zhang Limin, Chen H X, et al. Role of vegetation restoration in mitigating hillslope erosion and debris flows [J]. *Engineering Geology*, 2017, 216:122-133.
- [10] Shiels A B, Walker L R. Landslides cause spatial and temporal gradients at multiple scales in the Luquillo Mountains of Puerto Rico [J]. *Ecological Bulletin*, 2013, 54:211-221.
- [11] Keefer D K. The importance of earthquake-induced landslides to long-term slope erosion and slope-failure hazards in seismically active regions [J]. *Geomorphology*, 1994, 10(1/2/3/4):265-284.
- [12] Holden J. An introduction to physical geography and the environment [J]. *Jewish Quarterly Review*, 1902, 15(3):56-59.
- [13] Kirkby M J. A consistent framework for modelling geomorphic processes and landform evolution [J]. *Geophysical Monograph Series*, 2003, 135:95-102.
- [14] Wang J, Jin Z D, Hilton R G, et al. Controls on fluvial evacuation of sediment from earthquake-triggered landslides [J]. *Geology*, 2015, 43(2):115-118.
- [15] 许积层, 卢涛, 石福孙, 等. 基于 NDVI 监测 5·12 震后岷江河谷映秀汶川段滑坡体植被恢复 [J]. *植物研究*, 2012, 32(6):750-755.
- [16] Yang Wentao, Qi Wenwen, Wang Ming, et al. Spatial and temporal analyses of post-seismic landslide changes near the epicentre of the Wenchuan earthquake [J]. *Geomorphology*, 2017, 276:8-15.
- [17] 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.