

# 强震区泥石流流域崩滑体物源时空演变特征

罗玉婷, 唐川, 陈明, 熊江, 甘伟

(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, 成都 610059)

**摘要:**为探究强震区泥石流崩滑体物源的演化特征,选择汶川强震区典型泥石流流域的多期遥感影像进行崩滑体物源解译,建立了研究区震后崩滑体物源的长时间序列数据集,并分析了其演变与高程、坡度、坡向、距沟道距离等关键控制因子的关系。通过多期解译结果的对比分析,得出泥石流流域崩滑体物源的时空演变特征。结果显示:2008—2017 年五期影像解译的物源面积分别为  $15.32\text{ km}^2$ ,  $9.04\text{ km}^2$ ,  $7.66\text{ km}^2$ ,  $4.40\text{ km}^2$ ,  $3.63\text{ km}^2$ , 占研究区面积的比例分别为 38.25%, 22.58%, 19.13%, 10.99%, 9.06%;物源数量分别为 1 797 处, 1 510 处, 1 245 处, 617 处, 602 处, 且研究区的物源面积在震后近十年内以对数函数模式演化。2008—2017 年研究区崩滑体物源集中发育的高程区间逐渐由 1 400~1 600 m 转变为 1 800~2 000 m, 有向高海拔方向发展的演化趋势;多期崩滑体物源发育的优势坡度区间均为  $40^\circ\sim 45^\circ$ , 优势坡向为 S, SE;崩滑体物源的发育与距沟道距离表现为负相关, 区域内暴发大规模泥石流事件后, 距沟道距离对物源发育的控制作用也会发生较大波动。研究成果对于丰富震区泥石流物源演化理论具有积极意义。

**关键词:**强震区; 泥石流; 崩滑体; 时空演化

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2020)03-0336-06

## Temporal and Spatial Evolution Characteristics of Landslides in Debris Flow Basin in Meizoseismal Area

LUO Yuting, TANG Chuan, CHEN Ming, XIONG Jiang, GAN Wei

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection,  
Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** In order to explore the evolution characteristics of debris flow source in meizoseismal area, the multiphase remote sensing images of typical debris flow basin in Wenchuan meizoseismal area were used to interpret the landslide, establish a long time series data set of landslide in the research area, and analyze the relationship between evolution and elevation, slope, slope direction and distance from channel. Through the comparative analysis of the results of multi-phase interpretation, the spatiotemporal evolution characteristics of landslide bodies in the debris flow basin were obtained. The results show that the source areas of the five stage images from 2008 to 2017 are  $15.32\text{ km}^2$ ,  $9.04\text{ km}^2$ ,  $7.66\text{ km}^2$ ,  $4.40\text{ km}^2$ ,  $3.63\text{ km}^2$ , respectively, accounting for 38.25%, 22.58%, 19.13%, 10.99% and 9.06% of the research area, respectively, and the numbers of landslides are 1 797, 1 510, 1 245, 617 and 602, respectively. In addition, the evolutions of landslides in the study area follow the logarithmic function model; from 2008 to 2017, the height range of the concentrated development of material source of landslide bodies in the study area gradually changed from 1 400~1 600 m to 1 800~2 000 m, showing an evolutionary trend towards high altitude; and advantageous slope ranges of multiphase landslide development are  $40^\circ\sim 45^\circ$ , edge slope aspects face towards the S, SE; the development of landslides is negatively correlated with the distance from the channel, and the control of provenance development by the distance from the channel also fluctuates greatly after the occurrence of large-scale debris flow events in the region. The research results have positive significance for enriching the theory of debris flow source evolution in earthquake area.

**Keywords:** meizoseismal area; debris flow; landslide; spatiotemporal evolution

地形复杂的山区,强震往往会引发大量的滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害,对人类生命和生态环境都构成严重威胁。汶川地震是中国近代以来最具破坏性的地震,诱发了约 50 000 处崩塌、滑坡,形成的固体松散物总体积达 52.5 亿 m<sup>3</sup>,覆盖了约 35 000 km<sup>2</sup> 的山地区域范围<sup>[1-2]</sup>。震后,大量松散物质堆积在沟道或两岸陡峭岸坡上,为泥石流暴发提供了充足物源,同时降低了泥石流暴发雨量临界阈值,导致震后泥石流表现出高频率、大规模、危害强的特征<sup>[3]</sup>。近年来,随着世界范围内的地震频发,如 1999 年台湾集集地震、2008 年汶川地震、2010 年海地地震、2017 年九寨沟地震,人们开始关注震后灾害效应及其持续时间的问题,其中崩滑体物源及泥石流随时间的演化规律广泛被学者所关注。

汶川地震后,有学者研究指出震区地质灾害将以 4~5 a 为周期呈现出震荡式衰减,持续时间长达 20~25 a,其中泥石流活跃期将至少持续 10 a,之后地质条件将逐渐趋于稳定<sup>[4-5]</sup>。而崩滑体作为震后泥石流活动的主要物源,其演化过程及特征对泥石流暴发规模及频率起着控制性的作用,因此众多学者已经关注到震区泥石流流域内崩滑体物源的变化情况,如有学者采用遥感影像解译分析和探讨了物源分布和变化特征,同时也有学者通过 3 期影像详细解译,由此探讨泥石流物源量演化规律<sup>[6-7]</sup>。另外也有学者通过统计泥石流堆积扇相关特征参数,构建泥石流堆积方量计算模型,并总结归纳了泥石流堆积体演化规律<sup>[8]</sup>。还有学者搜集震前、震后及暴雨后影像数据,分析指出暴雨后物源变化是由同震滑坡堆积体前缘扩张所致,同时对泥石流流域内新增崩滑体体积及流域内滑坡体进行调查和分析,由此探讨物源变化规律<sup>[9]</sup>。以上研究成果对于揭示震后短期内泥石流物源演化特征及其与泥石流暴发频率和规模的关系等方面发挥了重要作用。但是其研究时间年限相对较短,难以对长期演化规律进行分析和预测。另外大部分学者仅通过统计物源数量和面积进行演化规律探讨,只能揭示物源随时间演化特征,无法对崩滑体物源空间变化特征进行分析。因此本文搜集震后近十年时间尺度的多期影像进行详细解译,并从多个关键控制因子入手探讨震后物源长期时空演变特征。

为探究震后强震区泥石流流域内崩滑体物源长期时空演化特征,本文搜集了 2008 年、2011 年、2013 年、2015 年、2017 年多期影像数据,并结合前人建立解译标志对泥石流流域内崩滑体物源进行详细解译。同时选择坡度、坡向、高程、距沟道距离 4 个地形因子,通过统计各因子分级范围内物源面积,由此探讨震后十

年崩滑体物源时空演化特征。通过研究,本文重点关注以下 3 个方面:(1)崩滑体物源多年的时空变化规律;(2)崩滑体物源发育的优势地形条件;(3)崩滑体物源的时空分布与关键地形因子的关系。通过以上研究,对于进一步揭示震区泥石流流域崩滑体物源时空演化规律,丰富物源演化理论具有重要意义。

# 1 研究区概况

研究区位于四川省阿坝州汶川县映秀镇北部,覆盖岷江流域和龙溪河流域的部分区域,地理坐标范围约为北纬 31°02′23.28″—31°07′51.08″,东经 103°25′7.12″—103°33′57.89″(图 1),海拔 700~3 500 m。地形地貌上,研究区位于龙门山推覆体中段,四川盆地中部,系青藏高原第一级阶梯向四川盆地第二级阶梯的过渡带,受强烈褶皱断裂带控制。该区域构造侵蚀及河流切割作用强烈,流域形态基本呈现为“V”形谷,在这种临空条件发育的情况下,崩塌,滑坡频频发生,崩滑物源也随之增多,加剧了泥石流等地质灾害暴发的可能性。研究区位于亚热带湿润的季风气候区,属于川西多雨区域,年平均降雨量为 1 253 mm,年最大降雨量可达 1 688 mm。另外,映秀镇为汶川地震的震中,震中区域由于山地环境受破坏程度大、物源丰富、启动条件低,滑坡、泥石流等灾害活动呈现出高频性、高危险性的特征,为震后典型的研究对象,具有较强的代表性。因此本文选取映秀镇北部典型的 14 条沟(表 1)作为研究区域进行特大地震后泥石流物源分布特征及演化规律研究,这对于防灾减灾及震区恢复建设都具有重要的作用。

表 1 研究区泥石流流域地形特征

编号	泥石 流沟名	流域面积/ km <sup>2</sup>	主沟 长度/km	平均纵 坡降/‰	高程差/ km
DF01	董家坪沟	1.60	2.52	439	1.10
DF02	干沟	1.42	2.07	504	1.04
DF03	大水沟	2.23	1.84	858	1.57
DF04	落石沟	1.30	2.48	616	1.53
DF05	蟹子沟	2.32	3.02	715	2.16
DF06	肖家沟	7.86	4.84	491	2.37
DF07	关山沟	2.09	3.07	592	1.82
DF08	磨子沟	2.76	3.13	544	1.70
DF09	瓦司沟	1.54	2.38	602	1.43
DF10	映秀磨子沟	5.52	4.03	403	1.63
DF11	烧房沟	0.62	1.76	878	1.55
DF12	红椿沟	5.49	3.88	320	1.25
DF13	张家坪沟	1.62	2.01	770	1.55
DF14	黄家村沟	2.15	2.80	366	1.03

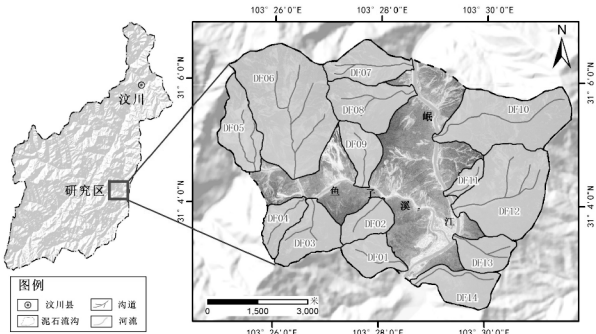


图 1 研究区地理位置

2 数据来源及处理

为获取研究区多年崩滑体物源变化信息,本文选择了震后 2008 年、2011 年、2013 年、2015 年及 2017 年 5 个时段的遥感影像,见表 2。所获取的 5 期影像质量较好、云层遮盖少、分辨率与可用性都较高。对搜集的 5 期遥感影像进行图像增强、几何纠正等工作后,再对影像进行精确的配准,其中 2008 年由于收集的数据不完整,采取 2 组影像(2008 年 6 月无人机航拍影像、2008 年 7 月 Spot5 影像)相拼接。另外还收集到了等高距为 10 m 的等高线基础地形数据,将其绘制成高精度 DEM 与影像叠加,使得目视解译结果更为准确。

表 2 遥感影像相关信息

编号	拍摄日期	数据来源	分辨率
1	2008 年 6 月	无人机航拍	1.0 m
	2008 年 7 月	Spot5	2.5 m
2	2011 年 4 月	WorldView	1.0 m
3	2013 年 11 月	Pleiades	0.5 m
4	2015 年 4 月	Spot6	1.5 m
5	2017 年 2 月	WorldView	1.0 m

3 结果与分析

3.1 崩滑体物源变化规律

研究区流域总面积为 39.09 km<sup>2</sup>,在 2008 年的遥感影像中,共解译出 1 797 处崩滑体物源,总面积为 15.32 km<sup>2</sup>,占整个研究区流域面积的 38.25%(表 3)。从 2008—2011 年,物源数量减少了 287 处,面积从 15.32 km<sup>2</sup>下降到 9.04 km<sup>2</sup>,植被恢复的面积占整个研究区面积的 15.68%。2013 年 7 月 10 日,汶川震区持续强降雨,研究区再次暴发大规模泥石流事件,使得许多植被严重损毁,也直接导致 2011—2013 年的植被恢复率骤然降低为 3.44%,物源的面积减少了 1.38 km<sup>2</sup>。从 2013—2017 年,物源的数量和面积都有所减少,恢复的速率逐渐变缓,物源的数量从 1 245 处减少到 617 处再减少至 602 处,因此物源的数量变化波动较大,而物源的面积仍在持续减少,从 7.66 km<sup>2</sup>下降到

了 3.63 km<sup>2</sup>,仅占整个研究区流域面积的 9.06%,达到了一个较低的水平。

表 3 崩滑体物源变化特征

年份	物源数量	物源面积/km <sup>2</sup>	占比/%	植被恢复速率/%
2008	1797	15.32	38.25	—
2011	1510	9.04	22.58	15.68
2013	1245	7.66	19.13	3.44
2015	617	4.40	10.99	8.14
2017	602	3.63	9.06	1.92

大部分物源的可视形态随着时间的推移都在不断变化,比如一个面积较大的物源通常会被恢复的植被分隔为若干个面积较小的物源,因此物源的数量波动较大且并不能真实反映物源的演化趋势,所以选取物源面积为指标探究物源的演化模式。将横坐标定义为震后的年数,则已统计的 2008 年、2011 年、2013 年、2015 年及 2017 年的横坐标分别为 0、3、5、7、9,结果发现物源面积以对数函数模式演化(图 2),预测于 2030 年前后物源面积降低到 0.01 km<sup>2</sup> 以下,表明经过物源逐渐趋向稳定、输出,流域内泥石流物源面积较震初已明显减少,基本恢复至震前水平,但在强降雨或地震等作用下仍具有暴发泥石流自然灾害事件的可能。黄润秋学者在相关研究中也提出,震后汶川地震灾区的地质灾害将持续 20~25 a,并最终恢复到震前的水平,与本文得出的结论基本一致<sup>[4]</sup>。

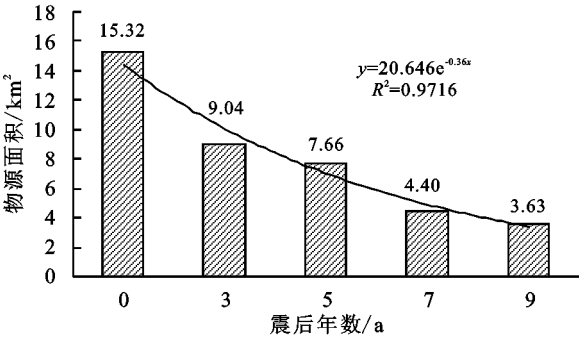


图 2 研究区崩滑体物源演化模式

3.2 崩滑体物源时空分布变化与高程的关系分析

本文以 200 m 为间隔对研究区高程进行分级,整个研究区高程划分为 11 级,然后统计每一级中的物源面积,结果见图 3。图 3 显示崩滑体物源面积随高程的增加,表现出先增加后降低趋势,即崩滑体物源集中分布在某段高程优势区间内。图 3 显示 1 400~2 000 m 为崩滑体的优势分布高程范围,即研究区物源主要集中分布于靠近河谷的低、中高程处。分析认为这主要是由于该高程范围多为靠近沟道区域,受河谷地形切割作用,更有利于临空面发育,从而使得崩



滑体较为发育,且往往形成规模大的崩滑体,而靠近山脊处多发育大量小型崩滑体。这样的物源分布形式直接影响到泥石流松散物质的数量和补给方式,从而间接影响泥石流的暴发规模,且有利于泥石流的形成。由图3可知2008年、2011年、2013年、2015年以及2017年研究区物源面积的峰值分别位于1400~1600 m,1600~1800 m,1800~2000 m,1800~2000 m和1800~2000 m,该结果可以看出2008—2017年研究区崩滑体物源集中发育的高程区间逐渐由1400~1600 m转变为1800~2000 m。这表明,震后随着时间推移,物源发育的优势高程区间有向高海拔方向发展的演化趋势,且从纵向变化可以看出,相对于高海拔地区,低海拔地区物源的植被恢复速率更快。另外由图3看出,每年物源面积的曲线在高程增长到2200 m后都呈现出急速下降的趋势,这是由于研究区2200 m以上的分级区域覆盖面积过小造成的。

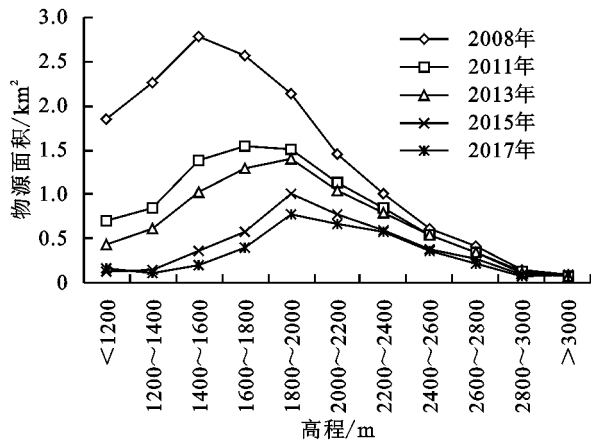


图3 崩滑体物源分布与高程的关系

### 3.3 崩滑体物源时空分布变化与地形坡度的关系分析

通过 ArcGIS 中 3 D—analysis 模块下的 aspect 工具提取研究区的整体坡度,然后将物源规模进行叠加提取,以 $5^{\circ}$ 为间隔对物源发育坡度进行统计分析。从统计结果(图4)的横向变化趋势可以看出,随着坡度增加物源面积逐渐增大,在坡度为 $40^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 时达到了最大值,随后又迅速降低。坡度是影响斜坡失稳重要因素,坡体的应力分布状态随着坡角的变化而改变,一般坡角越大,坡面张力带范围会扩大,坡脚应力集中。同时坡度变大,沿滑面的自重分力也会增大,导致坡体的稳定性变差<sup>[10]</sup>。有学者研究指出,坡度大于 $45^{\circ}$ 地方松散碎屑物质发育较薄,不利于浅层滑坡发生<sup>[11]</sup>,若坡度低于 $20^{\circ}$ ,则由于坡度太小,不利于坡体失稳破坏<sup>[12]</sup>。本文通过解译统计结果可知,多期物源面积的曲线都在 $40^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 的坡度区间达到了峰值,随后则开始迅速减小,该结论与前人结论一致。

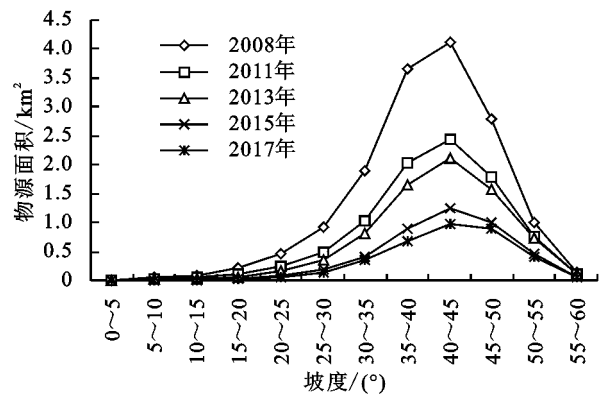


图4 崩滑体物源分布与坡度的关系

从纵向变化趋势来看,2008—2011年这个时间段内各个坡度区间的物源面积减少较多。这是由于地震后山体松弛、地表破碎,松散物源充足,2010年研究区普遍暴发强降雨,在强降雨作用使大量靠近沟道两侧崩塌、滑坡物源直接进入主沟或支沟,支沟物源经过地表径流冲刷或泥石流挟带作用与主沟相连接,将大量崩滑物源输出沟口,使得坡面上崩滑物源逐渐减少。从2011—2013年物源恢复的速度骤然变缓,研究区在强降雨触发条件下,进一步诱发新的崩塌、滑坡等不良地质现象,使大量原本已恢复的植被遭到破坏,暴发了7.10群发性泥石流事件。而从2013—2017年,各个坡度区间的物源面积不断减少且减少速度逐渐放缓,表明随着时间发展,震区地质环境逐渐改善,植被恢复、泥石流物源趋于稳定。

### 3.4 崩滑体物源时空分布变化与坡向的关系分析

坡向对崩滑体物源的分布有着重要影响。不同坡向的斜坡受到的太阳辐射强度不同,影响了斜坡的水蒸发量、植被覆盖、坡面侵蚀等诸多因素,进而改变了斜坡地下水孔隙压力的分布及岩土体物理力学特征,使得斜坡稳定性产生差异<sup>[13]</sup>。因此,不同坡向的崩滑体物源具有不同的变化特征。

在 ArcGIS 通过提取分析工具得到研究区的整体坡向后,将物源规模进行叠加并对物源发育坡向进行了统计分析。由统计结果图5可知,物源在坡向为S,SE时面密度较大,坡向为NW时面密度最低。穿过研究区的映秀—北川发震断裂的走向为SW—NE,崩滑体集中发育的坡向与发震断裂的位移运动方向大致相同。表明了地震引起的滑坡崩塌受到了地壳主应力方向、上盘逆冲方向或地震波的传播方向的影响。研究区处于汶川地震极震区,在极震区由地震形成的崩滑体具有一定的“背坡面效应”,而“背坡面效应”是指与发震断裂带近于垂直或者大角度相交的沟谷斜坡中,在地震波传播的背坡面一侧的地质灾

害点发育密度明显大于迎坡面一侧,因此崩滑体物源的面密度也相对较大。结果还显示出,发育在 S,SE 坡向的物源每年恢复的物源面积也是最大的,这是由于在该坡向崩滑体发育更为突出,物源面积基数大,且为向阳坡,降雨集中,所以崩滑体物源更易被降雨冲刷带到沟道成为沟道物源或冲出沟口。

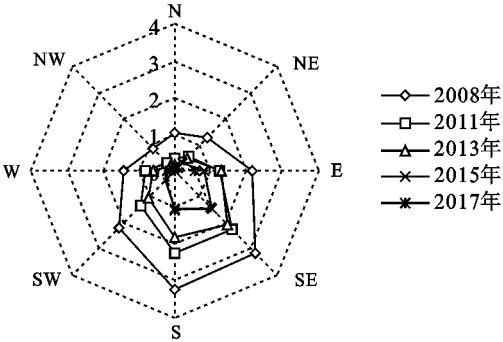


图 5 崩滑体物源分布与坡向的关系

3.5 崩滑体物源时空分布变化与距沟道距离的关系分析

距沟道距离是崩滑体活动的间接影响因子。为了探究距沟道距离对物源时空分布的影响,本文通过 ArcGIS 中的邻域分析工具,以 200 m 为间距创建流域内沟道的多环缓冲区,共分为 6 级,然后统计不同距离范围内物源的面积。如图 6 所示,每期的物源面积发育与距沟道距离表现为负相关,随着距沟道距离的增加,其控制作用逐渐减弱,直到距沟道距离为 1 000~1 200 m 时几乎衰减为零。由于沟道附近的汇水量较大,可以促进斜坡坡脚的失稳,从而导致崩滑体活动,使得沟道附近崩滑体物源的活性较高,且随着距沟道距离的增加活性逐渐减弱。从纵向变化来看,2008—2011 年、2013—2015 年的物源面积曲线相对变化较大,而这个时间节点正是研究区暴发 2010 年“8·13”泥石流与 2013 年“7·10”泥石流事件后所发生的的突变,由此可见,区域内暴发大规模泥石流事件后,距沟道距离对物源发育的控制作用也会发生较大波动。

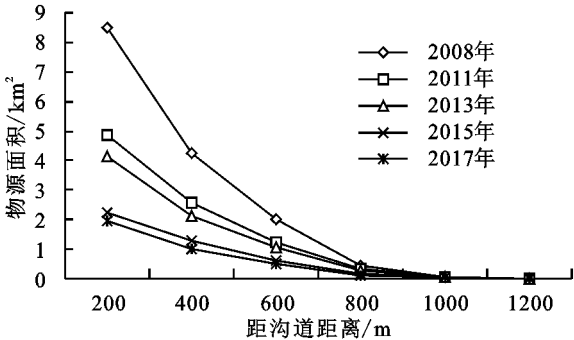


图 6 崩滑体物源分布与距沟道距离的关系

4 讨论

震后关于崩滑体物源的空间分布特征,国内外学者在汶川震区、台湾集集震区等地都开展了大量相关研究。汶川地震属于逆冲断裂活动,这与 1999 年台湾 7.5 级集集地震和 2005 年克什米尔 7.6 级地震类似<sup>[14]</sup>。综合众多研究可以发现,这 3 个震区内的崩滑体物源集中发育的坡向都是发震断层的逆冲方向<sup>[15-17]</sup>,可见这并不是某个震区的偶然现象,而是有迹可循的规律。并且通过研究发现,在台湾集集地震震区,震后崩滑体都集中在坡度为 40°~50°的斜坡<sup>[18]</sup>,而在克什米尔地震震区则主要分布在 25°~35°的斜坡<sup>[15]</sup>,同样,本文研究发现在汶川映秀强震区,五期统计结果在 40°~45°的坡度区间都显示出了最大的崩滑体物源面积,而后随着坡度的增加逐渐下滑,并没有在最陡的斜坡上显示出最大的物源面积值,这与前人对崩滑体失稳的研究结论是相符合的<sup>[11-12]</sup>。在高程上,克什米尔地震震区近一半的崩滑体物源分布在海拔 1 000~1 500 m 的地区<sup>[15]</sup>,而汶川映秀震区崩滑体的优势分布高程范围为 1 400~2 000 m,且随着时间推移优势高程区间有向高海拔方向发展的演化趋势。导致这种差异的原因主要是地质环境、地形地貌等方面的差异,因此其他震区的研究成果并不完全适用于汶川震区,但可作为研究参考。并且这些研究只有单期或者短期的影像数据资料,无法揭示出震区物源随时间演化规律与地形因子的关系。为了更全面和更好的探究震区崩滑体分布特征和演化特征,本文选择了多个因子和近十年时间尺度影像进行解译分析由此探讨崩滑体物源时空演变特征。

但是,由于遥感影像获取的范围有限,本文只针对汶川震中进行了泥石流流域崩滑体物源发育分布规律及其演化趋势分析,也正因如此,所得出的结论更加贴近映秀震区的实际情况。研究结果是否适合北川、清平等其他片区,还需要在后期选择大范围、长时间尺度数据建立完整的汶川长时间序列崩滑体物源数据库,对比总结汶川三大片区的崩滑体物源演化规律、特点及各关键因子对崩滑体发育分布的控制作用的演变规律,进一步探索地质灾害长期演化规律。另外本文旨在探讨震后崩滑体时空变化特征,对崩滑体演化引起的泥石流暴发规模和频率呈现何种变化规律并没有探讨,同时受制于数据缺失,关于崩滑体演化控制因子及其贡献研究也未涉及,这些都将在后期研究中进一步加强。

## 5 结论

(1) 通过对典型泥石流流域的崩滑体物源 2008—2017 年五期遥感图像的解译分析,获得物源面积分别为 15.32 km<sup>2</sup>, 9.04 km<sup>2</sup>, 7.66 km<sup>2</sup>, 4.40 km<sup>2</sup>, 3.63 km<sup>2</sup>, 占研究区面积的比例分别为 38.25%, 22.58%, 19.13%, 10.99%, 9.06%; 物源数量分别为 1 797 处、1 510 处、1 245 处、617 处、602 处,且研究区的物源面积以对数函数模式演化,预计于 2030 年前后物源面积降低到 0.01 km<sup>2</sup> 以下,基本恢复到震前水平。

(2) 2008—2017 年研究区崩滑体物源集中发育的高程区间逐渐由 1 400~1 600 m 转变为 1 800~2 000 m,表明崩滑体物源发育的优势高程区间有向高海拔方向发展的演化趋势,且相对于高海拔地区,低海拔地区崩滑体物源的植被恢复速率更快。

(3) 研究区多期崩滑体物源发育的优势坡度区间均为 40°~45°,优势坡向为 S, SE。优势坡向主要是受“背坡面效应”的控制,“背坡面效应”是指与发震断裂带近于垂直或者大角度相交的沟谷斜坡中,在地震波传播的背坡面一侧的地质灾害点发育密度明显大于迎坡面一侧,因此崩滑体物源的面密度也相对较大。且 S, SE 为向阳坡,降雨集中,崩滑体物源更易被降雨冲刷带到沟道成为沟道物源或冲出沟口,所以崩滑体物源的面积下降较快。

(4) 随着距沟道距离的增加,其对崩滑体物源的控制作用逐渐减弱,直到距沟道距离为 1 000~1 200 m 时几乎衰减为零,且区域内暴发大规模泥石流事件后,距沟道距离对物源发育的控制作用也会发生较大波动。

### 参考文献:

- [1] 黄润秋,李为乐.汶川地震触发崩塌滑坡数量及其密度特征分析[J].地质灾害与环境保护,2009,20(3):1-7.
- [2] 许冲,戴福初,姚鑫.汶川地震诱发滑坡灾害的数量与面积[J].科技导报,2009,27(11):79-81.
- [3] Tang C, Zhu J, Li W L, et al. Rainfall-triggered debris flows following the Wenchuan earthquake [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2009, 68 (2):187-194.
- [4] 黄润秋.汶川地震地质灾害后效应分析[J].工程地质学报,2011,19(2):145-151.
- [5] 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.
- [6] 蒋志林,朱静,常鸣,等.汶川地震区红椿沟泥石流形成物源量动态演化特征[J].山地学报,2014,32(1):81-88.
- [7] 姚维益,常鸣,李为乐.都江堰龙溪河流域典型泥石流物源演化特征遥感监测[J].水土保持研究,2018,25(3):205-209.
- [8] 常鸣,唐川,夏添,等.强震区泥石流堆积物的演化特征与方量估算模型[J].水利学报,2012,43(S2):117-121.
- [9] 常鸣,唐川,蒋志林,等.强震区都江堰市龙池镇泥石流物源的遥感动态演变[J].山地学报,2014,32(1):89-97.
- [10] 张雄.泥石流物源侵蚀运移特征及危险性评价研究[D].成都:成都理工大学,2015.
- [11] Montgomery D R, Dietrich W E. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding[J]. Water Resources Research, 1994, 30(4):1153-1171.
- [12] Godt J W, Baum R L, Savage W Z, et al. Transient deterministic shallow landslide modeling: requirements for susceptibility and hazard assessments in a GIS framework[J]. Engineering Geology, 2008, 102(3/4): 214-226.
- [13] 孟祥瑞,裴向军,刘清华,等. GIS 支持下基于因子分析法的都汶路沿线地质灾害易发性评价[J].中国地质灾害与防治学报,2016(3):106-115.
- [14] 刘静,张智慧,文力,等.汶川 8 级大地震同震破裂的特殊性及构造意义:多条平行断裂同时活动的反序型逆冲地震事件[J].地质学报,2008,82(12):1707-1722.
- [15] Kamp U, Growley B J, Khattak G A, et al. GIS-based landslide susceptibility mapping for the 2005 Kashmir earthquake region [J]. Geomorphology, 2008, 101(4): 631-642.
- [16] Khazai B, Sitar N. Evaluation of factors controlling earthquake-induced landslides caused by Chi-Chi earthquake and comparison with the Northridge and Loma Prieta events[J]. Engineering Geology, 2004, 71 (1/2):79-95.
- [17] Sato H P, Hasegawa H, Fujiwara S, et al. Interpretation of landslide distribution triggered by the 2005 Northern Pakistan earthquake using SPOT5 imagery [J]. Landslides, 2007, 4(2):113-122.
- [18] Lin C W, Shieh C L, Yuan B D, et al. Impact of Chi-Chi earthquake on the occurrence of landslides and debris flows: example from the Chenyulan River watershed, Nantou, Taiwan [J]. Engineering Geology, 2004, 71(1/2):49-61.