

# 强震区泥石流物源演化指标选取及规律分析

熊江, 唐川, 龚凌枫, 史青云, 李宁

(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物源演化规律,选择物源数量、物源面积、物源密度、物源连接度、物源长轴长、物源形状系数作为量化指标。通过对多期高清遥感影像解译和统计获取以上指标数据,经过分析得出以下几点结论:四期影像解译物源面积分别为  $7.86\text{ km}^2$ ,  $6.67\text{ km}^2$ ,  $4.67\text{ km}^2$ ,  $3.25\text{ km}^2$ , 分别减少了 15%, 30%, 30%;物源数量为 1 310 处, 1 582 处, 1 203 处, 1 004 处, 物源数量分别增长了 21%, -24%, -17%;震后物源数量、物源连接度、物源长轴长以先增加后减少形式进行演化,于 2011 年前后演化至最大值,随后逐渐减小,而物源面积呈逐渐减少趋势;结合演化趋势研究结果,将泥石流物源演化阶段划分为幼年期、青年期、壮年期、老年期 4 个阶段;震后坡面物源演化方式将由碎屑流、坡面流形式逐渐转化为沟道侵蚀为主,而沟道物源侵蚀方式将由前期揭底侵蚀和沟道两岸物源坍塌补给为主向后期以水力类下切侵蚀加深为主。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:**泥石流;物源演化;量化指标;规律

中图分类号:P642.23

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)01-0360-06

## Evolution Indexes Selecting and Laws analyzing of Debris Flow Source in Strong Earthquake Area

XIONG Jiang, TANG Chuan, GONG Lingfeng, SHI Qingyun, LI Ning

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

**Abstract:** In order to explore the evolution laws of debris flow source in strong earthquake area, the quantity, area, density, connectivity, length and shape coefficient of source are selected as quantitative indexes. The basic data were obtained through the interpretations and statistics of multi-phase images. The following conclusions are obtained through the analysis. The source area of the four phase images interpretation are  $7.86\text{ km}^2$ ,  $6.67\text{ km}^2$ ,  $4.67\text{ km}^2$ , and  $3.25\text{ km}^2$ , respectively, with the decreases of 15%, 30%, and 30%, respectively. The numbers of sources are 1 310, 1 582, 1 203 and 1 004, with the increases of 21%, -24% and -17%, respectively. After the earthquake, the numbers, connectivity and length of the source evolved in the form of increase firstly, and then decrease, which reached the maximum around 2011, but the area showed a decreasing trend. The evolution stage of source can be divided into four stages: infancy, youth, adulthood and old age by combining the previous research results and the evolution trend of indicators. After the earthquake, the evolution type of source on the slope will gradually change from the form of clastic flow and hill-slop flow to channel erosion, and the source erosion type is transformed from the early-stage revetment erosion and materials collapse supply on both sides of the channel to the deepened erosion by hydraulic downcutting in the later stage. These research results have positive significance for enriching the theory of debris flow source evolution in earthquake area.

**Keywords:** debris flow; source evolution; quantitative index; laws

汶川“5·12”里氏 8.0 特大地震触发了约 50 000 多处崩塌、滑坡,形成松散堆积体约为  $52.5\text{ 亿 m}^3$ <sup>[1-3]</sup>。地震使得震区地质环境异常脆弱,崩塌、滑坡、泥石流等地质

灾害异常活跃,并将持续较长时间。据专家研究发现,震区地质灾害将以 4~5 a 为周期呈出震荡式衰减,持续时间长达 20~25 a<sup>[3]</sup>。震后随着时间推移,崩塌、滑坡等

收稿日期:2019-01-02

修回日期:2019-02-25

资助项目:国家重点研发计划项目(2017YFC1501004);国家自然科学基金(41672299)

第一作者:熊江(1991—),男,四川泸州人,硕士研究生,主要从事地质灾害评价与预测方面研究。E-mail:2029476606@qq.com

通信作者:唐川(1961—),男,安徽合肥人,博士,教授,主要从事地质灾害、环境地质等方面研究。E-mail:tangc@cdut.edu.cn

地质过程将逐渐趋向于稳定,而泥石流由于其暴发的物源条件、地形条件、水源条件充足而进入活跃期,且活跃期将至少持续 10 a<sup>[4]</sup>。震后,泥石流暴发临界雨量和累积雨量相对震前大大降低,由此导致在降雨作用下,震区易暴发群发性泥石流<sup>[5]</sup>。如北川及苏保河流域及其支沟暴发了“9·24”泥石流,冲出固体物质淤埋深度约 6~10 m,将北川老县城几乎全部淹没<sup>[3,6]</sup>。清平绵远河及其支流于 2010 年暴发了“8·13”群发性泥石流,其中文家沟冲出物质 400 万 m<sup>3</sup>,形成长 3 500 m,宽 350~400 m 的堆积扇,摧毁道路桥梁无数<sup>[6]</sup>。映秀镇红椿沟暴发“8·14”特大泥石流,冲出物质约 75 万 m<sup>3</sup>,并形成堰塞湖以及洪水等次生灾害,对映秀镇形成重大威胁<sup>[3]</sup>。

地震导致大量松散物源堆积在沟道和坡面上,随着坡面物源稳定性提高、泥石流携带和地表径流侵蚀,泥石流物源将逐渐减少。而物源变化将对泥石流规模、频率、流体性质产生重要影响。震后已有部分学者探讨了泥石流物源和堆积体动态演化规律<sup>[7-9]</sup>,另外还有学者基于野外调查基础数据,探讨了泥石流性质及其物理作用演化规律<sup>[10]</sup>。本文在借鉴上述研究成果基础上,通过选取泥石流物源演化指标,并结合“空—天—地”一体调查数据,分析物源演化规律。通过以上研究,对于进一步揭示和认识震区泥石流物源演化规律提供科学依据。

# 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,地理坐标范围约为 31°03′20.28″—31°06′39.50″N, 103°26′51.15″—103°31′33.06″E(图 1)。研究区内泥石流流域分布在岷江和渔子溪两岸,流域面积大小、沟道长度、平均纵比降相差各异(表 1)。其中最小流域面积为 0.13 km<sup>2</sup>,最大为 5.5 km<sup>2</sup>,沟道长度变化范围为 0.91~4.03 km。地形地貌上,研究区属于高山峡谷区,海拔高度多在 1 500 m 以上,流域内流水下切侵蚀作用强烈,沟谷呈 V 型,坡度多大于 35°,为泥石流暴发提供充足动力条件。地质构造上,研究区地处秦岭地质构造带、龙门山地质构造带、马尔康地质构造带结合部位,流域地质构造复杂,褶皱和断裂发育<sup>[11]</sup>,在地震作用下形成大量松散碎屑物质为泥石流暴发提供充足物源条件。气候上,研究区平均多年降雨约 750 mm,降雨多集中在 5—10 月,约占全年降雨量 80%~90%,为泥石流暴发提供充足降雨条件。震后,研究区内泥石流暴发条件充足,暴发频率较高,据前人研究可知,关山沟于 2008 年 5—8 月共发生 6 场泥石流,在沟口形成长约 80 m,宽约 150 m,面积约为 6 200 m<sup>2</sup>的堆积体,将岷江河道束窄成仅剩 5 m 河道,严重影响到人

民生命财产和交通设施安全<sup>[11]</sup>。另外还有红椿沟等大型溃决性泥石流沟,其暴发泥石流频率、规模等较大,对震区居民生命财产,基础设施造成巨大威胁。因此开展震后泥石流物源演化规律及其演化特征分析,对于防灾减灾及震区恢复建设具有重要作用。

表 1 研究区泥石流流域信息统计

编号	名称	面积/km <sup>2</sup>	长度/km	纵比降/%
DF01	—	0.13	0.97	—
DF02	—	0.18	0.91	—
DF03	—	0.5	1.27	—
DF04	1 <sup>#</sup> 磨子沟	5.5	4.03	403.47
DF05	—	0.41	1.04	—
DF06	—	0.45	1.25	—
DF07	烧房沟	0.65	1.76	878.34
DF08	红椿沟	5.41	3.88	320.55
DF09	瓦司沟	1.37	2.38	601.93
DF10	—	0.56	1.17	—
DF11	2 <sup>#</sup> 磨子沟	2.75	3.13	544.44
DF12	关山沟	2.09	3.07	592.32

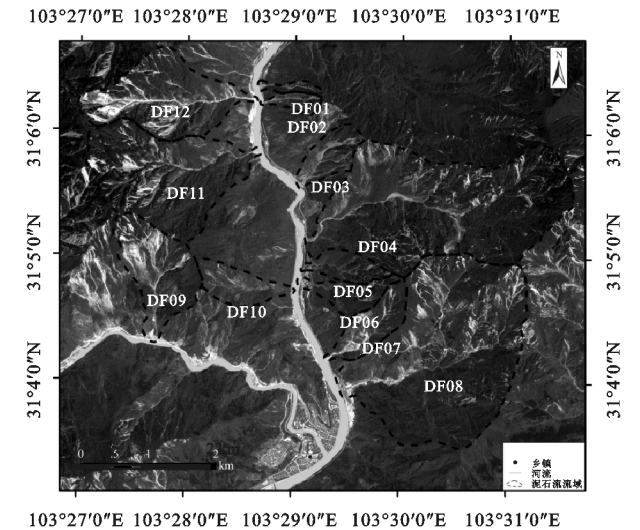


图 1 研究区地理位置

# 2 数据和方法

## 2.1 数据来源与处理

文章用于分析震后泥石流物源演化规律的数据包括等高距为 5 m 的地形图,通过地形图绘制高精度数字高程模型(DEM),通过将影像与 DEM 进行叠加,使得解译结果更加准确。另外从 Spot,Goole Earth 上获取了 2008 年、2011 年、2013 年、2017 年 4 期多源高分辨率光学遥感影像(表 2),所获取影像云层活动较少,数据质量较高,能满足物源解译目的。

在遥感影像中,土体、植被、水体在红、绿、蓝 3 个波段上有相应反射值,其中土体反射值最大,因此全色影像中,土体颜色较明亮<sup>[12]</sup>。因此对于地震造成

松散堆积体的形状,运动轨迹、变化范围等信息都可以根据影像色调、纹理等提取<sup>[13]</sup>。由于不同来源影像,其传感器特征不一致,导致影像数据特征,坐标系等不一致,因此在解译前需要对多源影像进行地理配准。同时由于其他物体遮盖、背景反差等原因导致有些物源难以识别,因此需要对图像做增色处理、图像锐化、波段变换等工作<sup>[12]</sup>。如图 2 所示,图 2A 为未处理影像,物源单体形状、物源流动轨迹、以及基岩坡等信息不明确,经过图像处理以后结果如图 2B 所示,物源单体形状、物源流动轨迹、基岩坡等信息较为清晰。在此基础上,通过人机交互方式开展泥石流物源解译。本文主要想探讨震后泥石流物源演化规律和侵蚀方式变化,因此将物源分为沟道物源和坡面物源进行解译,并通过 ArcGIS 软件强大的空间统计分析功能,对物源数量、面积、物源单体长度等进行计算。

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	Spot	5.00 m
2	2011 年	Google Earth	2.04 m
3	2013 年	Google Earth	2.04 m
4	2017 年	Google Earth	2.04 m

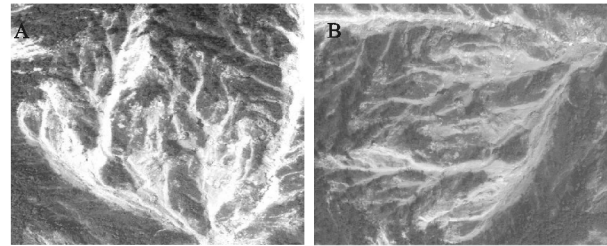


图 2 处理前后影像对比

2.2 指标选取与计算

为探究物源演化规律,文章选取物源数量、物源

面积、物源密度、物源长轴长、物源形状系数几个参数作为物源演化量化指标(表 3)。地震触发滑坡、崩塌等不良地质现象产生大量物源,在影像上每一处崩塌、滑坡形成物源都有一定形状、范围。震后随着地质环境恢复、降雨和重力作用、物源稳定性提高等必将导致物源数量、面积发生变化。坡面或沟道物源在重力和降雨作用下逐渐向地势低洼处转移,因此不同类型物源在转移过程中会逐渐相连接。因此物源长轴长和物源连接度体现了物源的运动特性,其中物源长轴长是沿解译物源单体形状中线量取的长度,可以描述物源运移强度大小;物源连接度可以描述坡面物源转换为沟道物源程度,同时也可以说明物源运移通道连通完善状况<sup>[14]</sup>。物源形状系数是参照流域水系理论定义,是指物源面积与长轴长平方比值,描述物源形状变化的重要参数,其值越大,说明物源形状越接近方形,反之则说明接近长条形<sup>[15]</sup>。通过物源连接度和物源形状系数变化,可以揭示震区泥石流物源演化方式变化规律。通过以上指标选取,将物源分为沟道物源和坡面物源两类,在参考前人建立物源解译标志基础上<sup>[16]</sup>,利用 ArcGIS 软件根据物源单体在影像上纹理、色调等变化进行详细解译。并利用软件空间分析功能和统计功能获取所需基础数据。利用软件属性统计功能时,分别建立物源面积、物源连接、物源长轴长等字段。将不同类型物源相互连接时属性记为“1”,反之记为“2”;物源长轴长是通过量测工具量测并记录;物源面积通过软件自动获取。结合前期他人解译结果、野外考察数据、野外核查、影像特征等将属于基岩沟床,基岩坡面的解译结果进行剔除,由此统计和建立论文所需基础数据。

表 3 物源演化量化指标

类型	公式/符号	描述
物源数量	$N$	物源数量指流域内坡面和沟道物源单体数量
物源面积	$F$	物源面积是指通过对物源单体解译后根据其形状计算出面积
物源密度	$R = F_i / A$	物源面积与流域总面积比值。 $F_i$ 某级物源面积; $A$ 为流域总面积
物源长轴长	$L$	物源长轴长是指物源单体长轴长度
物源连接度	$P = L / V$	不同类型物源间连接数与最大可能连接数比值。 $L$ 为节点连接数; $V$ 为可能最大连接数
物源形状系数	$Ke = F / L^2$	物源形状系数为物源面积与物源长轴长平方比值。 $F$ 为物源面积; $L$ 为物源长轴长

3 结果与分析

3.1 物源时空演化规律

通过对研究区多期遥感影像物源解译,利用 ArcGIS 软件计算功能和统计功能计算出物源面积、物源密度、物源数量、连接度等,整理结果见表 4—6。由解译结可知,震初大量崩塌、滑坡造成松散物源堆积在沟道或悬挂在岸坡上。震后 2008 年,影像共解

译出物源 1 310 处,物源面积 7.86 km<sup>2</sup>,物源密度为 0.4。由图 3 可知,地震导致靠近沟道两侧崩塌、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联结,有利于震区泥石流物源输出,经过统计可知,2008 年,坡面物源连接度为 0.34,沟道物源连接度为 0.45。到 2011 年,坡面物源和沟道物源都有所增加,物源数量增长到 1 582 处,增长了 21%,面积为 6.67 km<sup>2</sup>,物源面积增加了



15%,物源密度为 0.34。这是由于地震导致山体松弛、地表破碎,松散物源充足,在降雨触发条件下,进一步诱发新的崩塌、滑坡等不良地质现象,同时随着时间发展,一些崩塌、滑坡物源逐渐开始恢复稳定,因此表现出物源数量增多,而面积在逐渐减少趋势。另外在降雨冲刷和重力作用下,物源逐渐向下游运移,经沟道径流冲刷或泥石流挟带作用排出沟口。该时期内坡面物源连接度增长到 0.56,沟道物源连接度增长到 0.83。物源演化至 2013 年,部分坡面物源、沟道物源逐渐消失,物源数量减少到 1 203 处,较上期影像解译结果减少了 24%,物源面积减少到 4.67 km<sup>2</sup>,减少了 30%,物源密度由 0.34 减少到 0.24,减少了 29%。这是由于震后,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等所致。到 2017 年,坡面物源和沟道物源持续减少,部分物源逐渐消失。统计结果显示,到 2017 年,物源数量减少到 1 004 处,减少了 17%,物源面积为 3.25 km<sup>2</sup>,减少了 30%,物源

密度为 0.17,减少了 29%。

表 4 物源解译统计

年份	物源数量	长轴长/km	面积/km <sup>2</sup>	物源密度
2008	1310	172.80	7.86	0.40
2011	1582	205.21	6.67	0.34
2013	1203	152.40	4.67	0.24
2017	1004	114.09	3.25	0.17

表 5 坡面物源解译统计

年份	总数	连接	未连接	连接度	未连接度	物源形状系数
2008	1255	429	826	0.34	0.66	0.00033
2011	1496	836	660	0.56	0.44	0.00023
2013	1148	383	765	0.33	0.67	0.00031
2017	1004	276	928	0.27	0.73	0.00029

表 6 沟道物源解译统计

年份	总数	连接	未连接	连接度	未连接度	物源形状系数
2008	55	25	30	0.45	0.55	0.000999
2011	86	71	15	0.83	0.17	0.000466
2013	55	48	7	0.87	0.13	0.000495
2017	49	29	20	0.59	0.41	0.000470

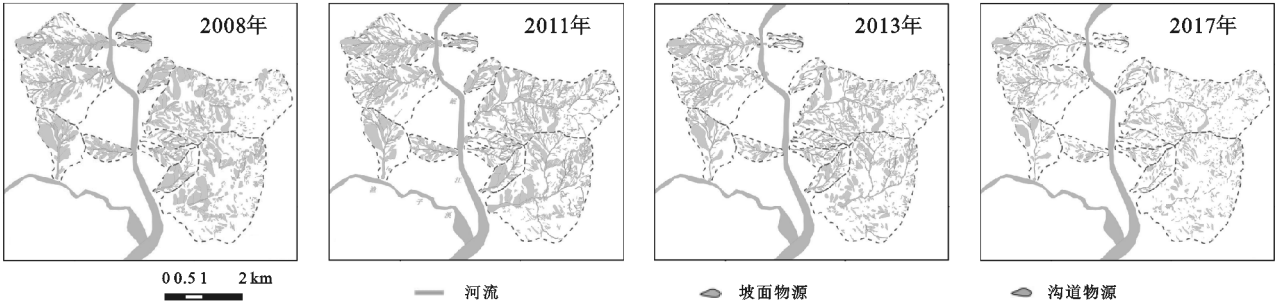


图 3 物源解译结果

3.2 物源演化阶段分析

汶川地震后,对于地震导致崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害后效应问题一直备受广大专家学者关注。由于数据限制,对地质灾害演化趋势预测的问题一直难以解决。震后有专家学者结合台湾集集地震、日本关东地震演化规律指出汶川震后滑坡和泥石流活性保持高强度水平,且将持续 10 a 以上<sup>[4]</sup>,还有学者通过分析地震前后地质灾害数据,指出地震灾害后效应将持续 20~25 a<sup>[3]</sup> 结论。震区泥石流物源不同演化阶段对泥石流暴发频率、规模等影响也不相同,为探究震区泥石流物源演化阶段,本文在前人研究成果基础上(图 4),结合物源连接度、物源密度、物源数量、物源长轴长 4 个指标,将物源演化阶段划分为幼年期、青年期、壮年期、老年期 4 个阶段。

幼年阶段:该阶段约为地震后至 2009 年,该时期特征主要为地震触发大量崩塌、滑坡等不良地质现象,形成大量松散堆积体堆积在沟道和坡面上(图 3)<sup>[3]</sup>,同时由于地震导致山体松弛、破裂,出现较多震裂和松动的山体,在降雨入渗增大孔隙水压和重力作用下,破碎山体逐渐趋向于失稳。

青年阶段:该阶段表现为由于前期降雨入渗增大孔隙水压,使得崩塌、滑坡等不良地质现象异常活跃,快速增加至最大值(图 4,5)。同时在降雨形成地表径流冲刷和重力作用下,物源逐渐向下游运移,部分物源经支沟排入主沟。因此该时期物源连接度、物源数量、物源长轴长不断增长,而随着部分物源逐渐恢复稳定及大量物源输出流域,物源密度在逐渐减少(图 5)。随着物源数量、物源连接度增加,使得该时期泥石流进入高暴发期,泥石流异常活跃。据图 4,图 5 演化特征可知,该时期大致为 2009—2011 年前后。

壮年期:随着前期坡面物源连接度增加,坡面物源大量输出补给沟道物源,以致于泥石流暴发频率高,泥石流松散物源被大量输出流域。另外随着震区地质环境改善、植被恢复、崩塌和滑坡等造成松散固体物质稳定性提高,物源数量、物源密度、物源面积、物源连通度将逐渐降低(图 5),但其所处水平仍高于震前最大暴雨年(图 4)。结合唐川、黄润秋等人研究成果<sup>[3-4]</sup>,该时期大致为 2011—2025 年前后。

老年期:该时期是指随着崩塌、滑坡、泥石流等不良地质现象恢复稳定,地质灾害活跃性、数量等都低

于震前最大暴雨年水平(图 4)。随着崩塌、滑坡等不良地质现象活跃性持续降低,泥石流物源连接度、物源数量、物源密度将不断减少,震区泥石流活跃性将逐渐降低。

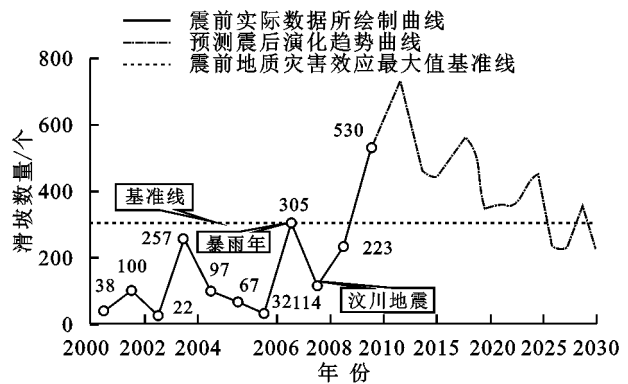
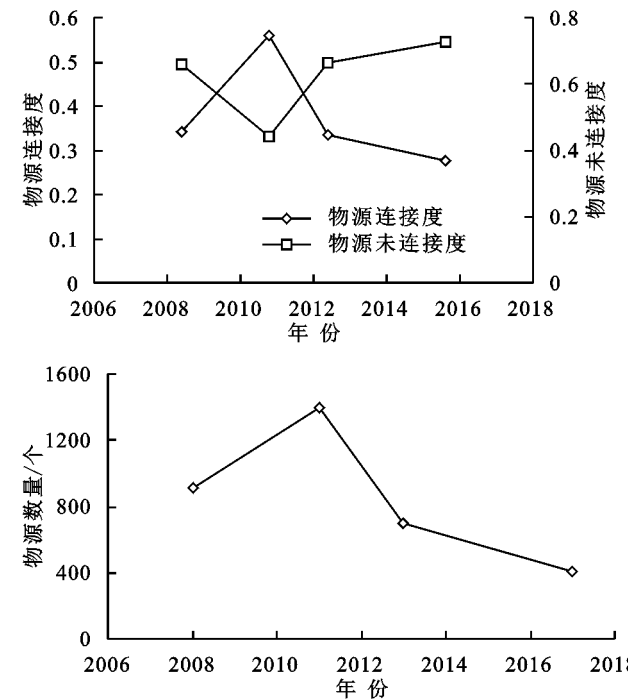


图 4 汶川震区地质灾害演化趋势<sup>[3]</sup>

3.3 物源侵蚀方式演化

地震形成大量松散堆积体,Tang C 等<sup>[5]</sup>将震区泥石流物源总结为悬挂物源和沟道物源两类。在强降雨条件坡面物源或产生新的滑坡物源将向下运移输入沟道成为沟道物源<sup>[17]</sup>,据统计分析,震区泥石流物源约有 50% 以上来源于坡面物源<sup>[18]</sup>。震后一段时间内,坡面物源稳定性较差,且物源量充足,在降雨条



件下多以坡面流、碎屑流等方式补给沟道物源<sup>[19]</sup>,沟道物源常由于消防管效应、坡体液化、以及地表径汇流冲刷等形式启动形成泥石流<sup>[18-19]</sup>。泥石流在运动过程中不断发生揭底侵蚀以及沟道两岸物源不断坍塌补给泥石流,输出流域出口。由坡面物源和沟道物源解译结果表 5,表 6 可知,该时期坡面物源和支沟物源数量和连接度不断在增加。据 Zhang S 等<sup>[20]</sup>研究发现,随着震区泥石流物源内细颗粒物质被冲走,物源抗侵蚀能力提高,使得物源供给能力下降,泥石流类型将由土力类泥石流转换为水力类泥石流。由表 5,表 6 可知,随着时间发展,坡面物源连接度快速降低,而沟道物源连接度则将长期处于较高水平。另外物源形状系数越小,说明物源形状呈长条形,图 6 显示坡面物源和沟道物源形状系数整体上呈下降趋势,说明物源形状上逐渐向长条形演变。这主要是由于随着后期坡面物源植被恢复,物源稳定性提高,坡面物源侵蚀方式转变为细沟、冲沟侵蚀,由此导致物源形状呈现长条形。而沟道物源侵蚀由于坡面物源补给量减少,沟道物源细粒物质被冲走,因此沟道物源多以径流下切侵蚀为主,沟道两岸物源较少出现崩塌或坍塌补给现象。

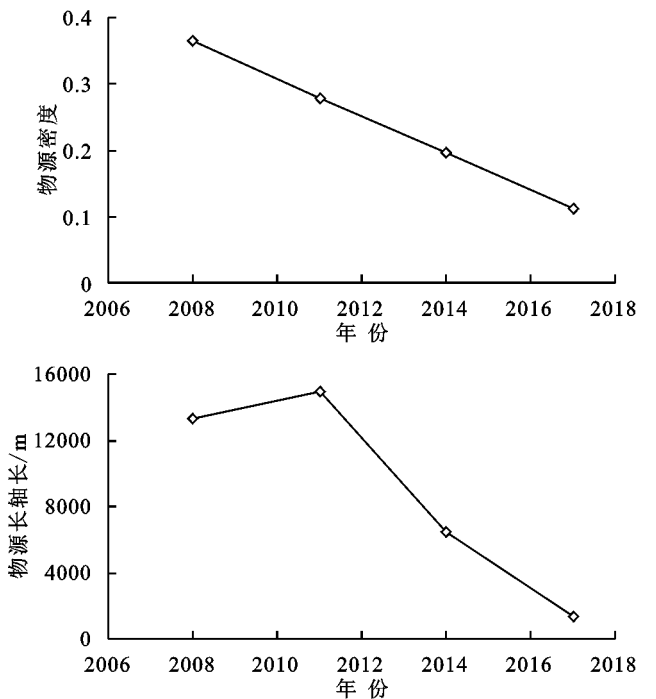


图 5 物源演化趋势

4 结论

(1) 通过高清影像解译,四期影像物源面积解译结果分别为 7.86 km<sup>2</sup>,6.67 km<sup>2</sup>,4.67 km<sup>2</sup>,3.25 km<sup>2</sup>,分别减少了 15%,30%,30%;物源数量为 1 310 处、1 582 处、1 203 处、1 004 处,分别增长了 21%,−24%,−17%。

(2) 地震导致大量同震滑坡、崩塌等地质灾害,造成大量松散堆积体堆积在沟道或悬挂在岸坡上。同时由于地震导致山体破裂、松弛,山体稳定性降低,在降雨增加孔隙水和重力作用下诱发新的崩塌、滑坡将导致震区物源数量、物源连接度、物源长轴长呈先增长后降低趋势,于 2011 年前后增长到最大值,随后

逐渐降低,直至恢复至震前水平,而物源面积以近直线形式逐渐降低。

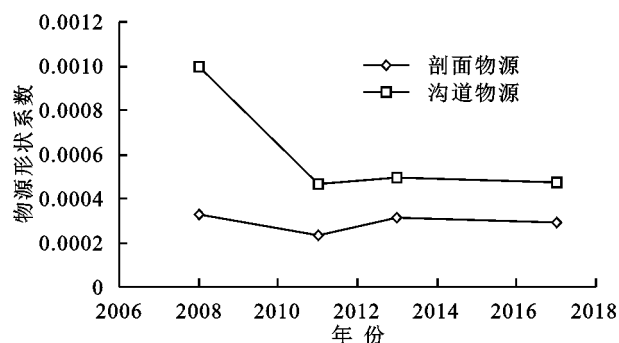


图6 物源形状系数演化趋势

(3) 结合前人研究基础,将物源演化过程划分为幼年阶段、青年阶段、壮年阶段、老年阶段4个阶段。其中青年阶段约为地震发生时到2009年前后。物源多为同震滑坡、崩塌形成松散物质,在降雨入渗作用下,震裂山体逐渐失稳或趋向于失稳过程。青年阶段为前期大量趋向失稳山体发生崩塌、滑坡阶段,该时期物源数量、物源密度、物源长轴长快速增长至最大值。该时期约为2009—2011年前后。壮年期特征为泥石流暴发频率高,泥石流松散物源被大量输出流域,且随着震区地质环境改善、植被恢复、崩塌和滑坡等造成松散固体物质稳定性提高,物源数量、物源密度、物源面积、物源连接度将逐渐降低,但其所处水平仍高于震前最大暴雨年,该时期大致为2011—2025年前后。老年期为泥石流物源最后时期,该时期随着崩塌、滑坡、泥石流等不良地质现象进一步恢复稳定,泥石流物源连接度、物源数量、物源密度将不断减少,泥石流活跃性将低于震前最大暴雨年水平。

(4) 震后大量松散物源堆积在沟道和岸坡上,在降雨和重力作用下岸坡物质多以坡面流、碎屑流方式补给沟道物源,而沟道物源多以消防管效应、坡体液化、径流冲刷等作用形成泥石流,不断揭底侵蚀沟道物源,同时沟道两岸物源以坍塌、崩塌形式继续补给泥石流固相物质。但是随着物源细粒物质被冲走,物源抗侵蚀能力和稳定性逐渐提高,坡面物源侵蚀逐渐以沟道侵蚀为主,而沟道物源由于补给量减少,沟道内泥石流将由土力类转换为水力类泥石流,沟道被不断下切侵蚀加深。

#### 参考文献:

[1] 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.  
[2] 黄润秋,李为乐.汶川大地震触发地质灾害的断层效应分析[J].工程地质学报,2009,17(1):19-28.

[3] 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.  
[4] 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.  
[5] 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.  
[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(中国地质大学学报),2011,36(1):172-180.  
[7] 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.  
[8] 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.  
[9] 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.  
[10] Chen H X, Zhang L M, Zhang S. Evolution of debris flow properties and physical interactions in debris-flow mixtures in the Wenchuan earthquake zone[J]. Engineering Geology, 2014,182:136-147.  
[11] 柳金峰,游勇,范建容,等.汶川地震触发潜在性泥石流研究:以岷江上游关山沟为例[J].四川大学学报:工程科学版,2009,41(S1):70-75.  
[12] 唐川,齐信,丁军,等.汶川地震高烈度区暴雨滑坡活动的遥感动态分析[J].地球科学(中国地质大学学报),2010,35(2):317-323.  
[13] 张国宾,韩如雪,张健秀.高分辨率遥感影像解译方法探讨[J].科技创新导报,2018,15(13):77-78.  
[14] 吕慧华,周峰,李娜,等.苏北里下河典型区河网水系演变特征研究[J].长江流域资源与环境,2018,27(2):380-385.  
[15] 车小力.黄土高原沟壑区董志塬沟头溯源侵蚀分布特征及其演化[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2012.  
[16] 蒋志林.基于RS的震区泥石流物源演化特征分析[D].成都:成都理工大学,2014.  
[17] Tang C, Zhu J, Qi X, et al. Landslides induced by the Wenchuan earthquake and the subsequent strong rainfall event: A case study in the Beichuan area of China[J]. Engineering Geology, 2011,122(1/2):22-33.  
[18] 龚凌枫,唐川,李宁,等.急陡沟道物源起动模式及水土耦合破坏机制分析[J].地球科学进展,2018,33(8):842-851.  
[19] 顾文韬.汶川地震极震区泥石流物源特征及启动机理研究[D].成都:成都理工大学,2015.  
[20] Zhang S, Zhang L M, Chen H X, et al. Changes in runout distances of debris flows over time in the Wenchuan earthquake zone [J]. Journal of Mountain Science, 2013,10(2):281-292.