

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.04-02

基于面积-高程和面积-坡度积分的泥石流 物质供给能力分析

张 静, 田述军, 侯鹏鹂

(西南科技大学土木工程与建筑学院, 四川 绵阳 621010)

摘要:松散物质是流域侵蚀演化的产物,对于泥石流流域而言,物质供给能力影响着泥石流的易发程度和活动频率。以岷江上游都江堰—汶川部分区域 147 个泥石流小流域为例,运用面积-高程法和面积-坡度积分对流域地貌演化阶段和侵蚀强度定量划分,并结合地貌演化阶段和侵蚀强度开展泥石流物质供给能力研究。研究表明:采用单一的地貌演化阶段或侵蚀强度解释泥石流的易发程度具有一定局限性,泥石流暴发主要集中于壮年期、壮年偏幼年期及侵蚀强度 III ~ V 级;随着物质供给能力的提升,泥石流的暴发率上升,而面积对泥石流的暴发有一定限制作用,初步确定研究区内供给能力处中、强、极强三种水平泥石流流域,其优势发育面积范围分别为:20 ~ 35 km²、10 ~ 50 km²、10 ~ 40 km²;对于物质供给能力水平较高、面积处于优势发育范围内、且长期未有明显泥石流活动迹象的流域,应进一步排查流域松散物质储量和分布特征,确定泥石流活动稳定性,采取合理的防灾减灾措施。

关键词:泥石流;面积-高程积分;侵蚀强度;供给能力

中图分类号: X43; X915.5; P642

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2021)04-0009-08

The material supply ability analysis of debris flows based on area-hypsometric integral and area-gradient integral

ZHANG Jing, TIAN Shujun, HOU Pengli

(School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology,
Mianyang, Sichuan 621010, China)

Abstract: The loose material is produced by erosion and evolution of basins. The material supply ability affects the susceptibility degree and activity frequency of debris flow for debris flow basins. Taking 147 debris flow basins as a case, located in parts of Dujiangyan and Wenchuan, using the area-hypsometric integral and the area-gradient integral, the geomorphologic evolution stage and erosion intensity were quantified. Combined with the geomorphologic evolution stage and erosion intensity, the material supply ability analysis of debris flows was carried out. The results are as follows: it is not enough to explain the susceptibility degree only with the geomorphologic evolution stage or erosion intensity; the outbreaks of debris flow are mainly concentrating on the stage of maturity, maturity partial youth age and the erosion intensity III—V level; with the improvement of the material supply ability, the outbreak rate of debris flow increases, and the basin area plays a significant role in limiting the formation of debris flow; for medium, strong, and extremely strong supply ability levels, debris flow preponderant development area ranges are: 20—35, 10—50, 10—40 km² respectively, in the study area; the investigation of material reserve and distribution should be carried out on the basin, which with a high level of material supply ability and in the

收稿日期: 2020-07-03; **修订日期:** 2020-09-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(41971214, 41877524); 国家重点研发计划项目(2018YFC1505401)

第一作者: 张 静(1994-), 男, 四川兴文人, 硕士研究生, 主要从事地质灾害风险性评价与预测方面的研究工作。

E-mail: 18181635369@163.com

通讯作者: 田述军(1980-), 男, 四川新津人, 博士, 副教授, 主要从事地质灾害风险性评价与预测方面的研究工作。

E-mail: tsj19800702@163.com

optimal range of area and with unapparent debris flow activity for a long time, to confirm the stability of debris flow and formulate disaster control plans reasonably.

Keywords: debris flow; area-hypsometric integral; erosion intensity; material supply ability

0 引言

1899年, DAVIS^[1]提出地貌循环理论, 认为地貌演化是构造、营力和时间综合作用的结果, 刻画了河流地貌演化的经典图式, 将地形的发育划分为: 幼年期、中年期和老年期。STRAHLER^[2]于1952年提出面积-高程法, 以流域侵蚀剩余率为依据, 将流域地貌演化阶段定量划分。随着GIS技术的发展, 使得面积-高程法成为地貌学研究中快捷、高效的定量方法^[3]。近年来, 以面积-高程法为代表的定量地貌演化理论被广泛应用于地貌侵蚀、区域构造响应及地质灾害研究领域^[4-9]。泥石流作为流域内一种特殊的物质运动现象, 本质上是流域内能量重分布过程的产物, 也是流域地貌侵蚀-演化机制的一种表现形式, 其发育程度、活动强度、运动特征一定程度上与地貌演化关系密切^[10]; 同时, 由于地貌演化是流域地表形态变化的宏观过程, 泥石流只是该过程中某时期内的一种物质运移方式, 地貌演化时间尺度远大于泥石流活动时间尺度, 流域的演化阶段并不能完全代表泥石流的活动强度与发育进程。地形条件是泥石流发生的内因, 是泥石流形成的动力因素, 制约着泥石流的发育, 影响着泥石流的规模和特性^[11-13]。坡度作为重要地形条件之一, 是流域在高度和长度上的统一体, 同时也是地貌演化的微观形态体现, 其值的大小决定了流域的主要侵蚀方式和物质搬运形式, 直接影响了流域内松散物质的侵蚀堆积, 从而影响泥石流的形成^[14-15]。地貌演化阶段是对流域侵蚀状况的宏观描述, 坡度是流域侵蚀能力的体现, 代表着流域形成松散物质的能力, 两者共同控制着泥石流流域内的物质供给, 影响着泥石流的易发程度和活动频率。

因此, 本文选取岷江上游都江堰—汶川区域147个泥石流小流域为研究对象, 通过GIS软件提取流域地貌演化信息, 探讨泥石流地貌发育状况, 结合自己编写的Fortran程序提取流域分段高程内的坡度, 并分析流域侵蚀强度, 开展泥石流流域物质供给能力研究。

1 研究区概况

研究区地处岷江上游, 涉及汶川和都江堰的部分区域。研究区内高山耸立, 河谷深切, 局部海拔高差大, 地貌形态变化大, 区内高程694~5837m。研究区内地质构造复杂, 新构造活动强烈, 主要发育有汶川—茂县断裂带

和映秀—北川断裂带, 区域岩体破碎, 极有利于滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害的发育。同时, 受季风气候影响, 研究区降雨季节变化明显, 汛期暴雨频发, 降雨集中于夏秋两季, 约占全年降雨总量80%^[16], 地形起伏大, 地质环境脆弱, 致使研究区内泥石流灾害频发, 据统计结果显示, 区内主要沿寿溪、渔子溪及岷江干流共147个小流域曾有过不同规模泥石流活动, 对当地群众生命财产安全及工农业发展造成巨大的威胁。

2013年7月9—13日, 受持续强降雨影响, 研究区内共多个小流域暴发泥石流^[17-20](以下简称“7·10”), 岷江沿岸的都汶高速和国道G213多段被泥石流冲毁、掩埋, 致使汶川—都江堰交通中断; 泥石流造成人员伤亡, 七盘沟、簇头沟、桃关沟等多条泥石流沟沟口居民区房屋及沿沟道农房被毁, 基础设施受损严重, 水电、工业、旅游等支柱产业受到重创, 造成重大经济损失^[21]。2019年8月20日凌晨, 受暴雨影响, 研究区内多个乡镇不同程度地暴发泥石流灾害, 导致12人死亡, 26人失联, 造成多地电力、通讯中断^[22](以下简称“8·20”)。“8·20”泥石流导致研究区内多段道路交通被阻断, 其中都汶高速登溪沟大桥、板子沟大桥及簇头沟大桥被冲毁或掩埋, 国道213、国道317多处被冲毁^[23]。“7·10”、“8·20”共有54个小流域暴发泥石流, 主要沿岷江干流及寿溪河密集分布(图1)。

2 泥石流地貌发育及侵蚀强度特征

2.1 面积-高程积分和面积-坡度积分

1952年, STRAHLER^[2]提出面积-高程曲线(Hypsometric Curve, HC), 运用曲线积分值 H_i 的大小定量化划分地貌演化阶段: 幼年期 $H_i > 0.6$, 中年期 $0.35 \leq H_i \leq 0.6$, 老年期 $H_i < 0.35$ 。面积-高程曲线(HC), 凸型、S型和凹型分别对应地貌演化阶段的幼年期、壮年期及老年期。

设流域总面积为 A , 流域最大高度差为 H , 某条等高线以上的流域面积为 a , 该等高线与流域最低点的高度差为 h , $x=a/A$, $y=h/H$, 通过一系列 (x, y) 可绘制出面积-高程曲线(HC):

$$y = f(x) \quad (1)$$

对面积-高程曲线进行积分, 求得曲线与坐标轴所围成的面积, 则可得 H_i 值:

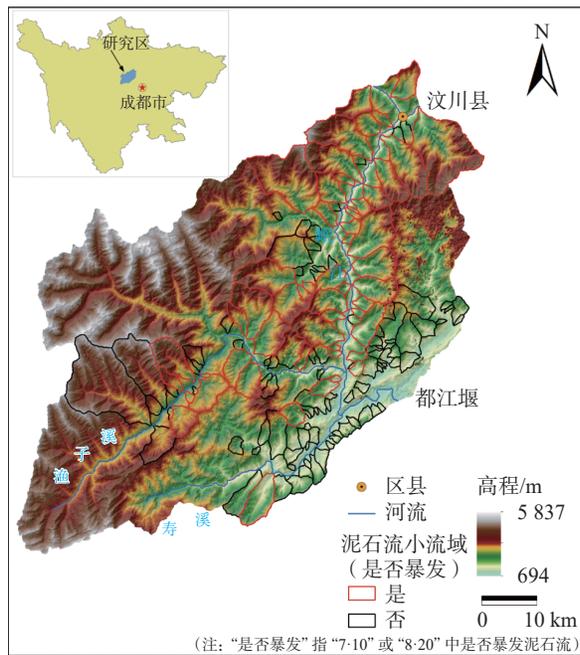


图1 研究区概况及泥石流分布

Fig. 1 Study area and debris flow distribution

$$Hi = \int_0^1 f(x) dx \quad (2)$$

PIKE等^[24]提出用起伏比法作为计算 Hi 值的简易算法:

$$Hi = \frac{H_{\text{mean}} - H_{\text{min}}}{H_{\text{max}} - H_{\text{min}}} \quad (3)$$

式中: H_{mean} ——流域平均高程;

H_{max} ——最大高程;

H_{min} ——最小高程。

式(2)和式(3)物理含义一致,都是在描述流域三维体的侵蚀残余率,在GIS平台下,后者运算更为便捷准确^[25]。

由于面积-高程积分实质是流域侵蚀残余率,其计算过程包含了流域面积和高差的归一化步骤,因此不同高差、不同形态、局部发育程度不同的流域的 Hi 和 HC 曲线形态却可能一致, Hi 和 HC 并不能直接反映流域内部的侵蚀强度。对于泥石流流域而言,山坡坡度是泥石流形成重要地形条件之一,随着坡度的增加流域侵蚀方式由面蚀、沟蚀向滑坡、崩塌方向发展^[26],流域内松散物质的形成能力逐渐增强^[27],流域侵蚀强度逐渐增加,可将坡度作为评价流域侵蚀能力的重要指标。将流域两条相邻等高线间的平均坡度 ϕ 作归一化处理求得 $2\phi/\pi$,令 $x=a/A$ (a 为位置较低等高线以上的面积, A 为流域总面积), $y=2\phi/\pi$,可得到流域的坡度分布曲线(Gradient Curve, GC):

$$y = g(x) \quad (4)$$

同一 HC (同一 Hi 值)所对应的流域,其 GC 形态和分布水平存在较大差异(如图2所示,同一 HC 对应的 $GC1$ 、 $GC2$), GC 分布水平较高的流域,流域内坡度大,流域侵蚀较强烈,流域内容易形成松散物质,对泥石流的暴发提供了较好的物质条件;对于某一流域而言, GC 水平越高的区段,侵蚀越剧烈,越容易为流域的泥石流活动提供松散物质。通过对 GC 曲线进行积分,求得面积-坡度积分 Gi , Gi 值代表流域整体的侵蚀强度:

$$Gi = \int_0^1 g(x) dx \quad (5)$$

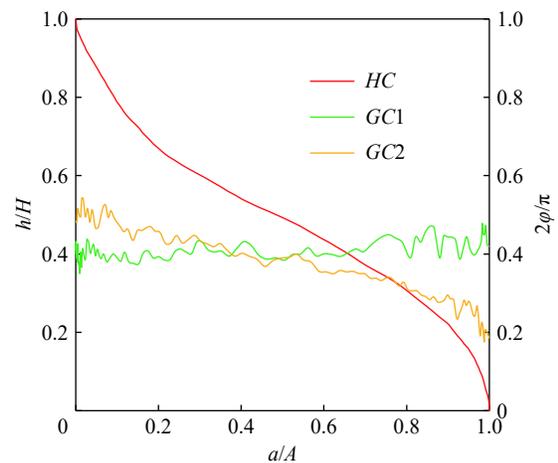


图2 面积-高程曲线(HC)及面积-坡度曲线(GC)

Fig. 2 Hypsometric Curve (HC) and Gradient Curve (GC)

2.2 地貌发育和侵蚀强度特征分级

通过GIS软件提取流域高程信息,根据式(3)计算得到各流域的 Hi 值,并利用Fortran程序将流域划分为100个等高区段,根据式(4)、式(5)统计各区段内平均坡度归一值,得到 GC 曲线,并求得面积-坡度积分 Gi 。借鉴吕学军等^[28]研究,制定岷江上游地貌演化划分等级如下:老年期 $Hi < 0.35$,壮年偏老年期 $0.35 \leq Hi < 0.4$,壮年期 $0.4 \leq Hi < 0.55$,壮年偏幼年期 $0.55 \leq Hi < 0.6$,幼年期为 $Hi \geq 0.6$ 。

各泥石流流域地貌发育情况如图3(a)所示。由图3(a)及表1可得:老年期14个,壮年偏老年期的泥石流流域共13个,壮年期流域97个,占总数的65%,壮年偏幼年期19个,处于幼年期的泥石流流域共4个。从分布位置来看,壮年偏老年期和老年期主要分布在靠近岷江上游出口位置,壮年期~幼年期相对于壮年偏老年期和老年期,则分布在河流的上游区域,这种分布方式与河流发育模式^[29]相对应,即:地貌发育由下游向上游

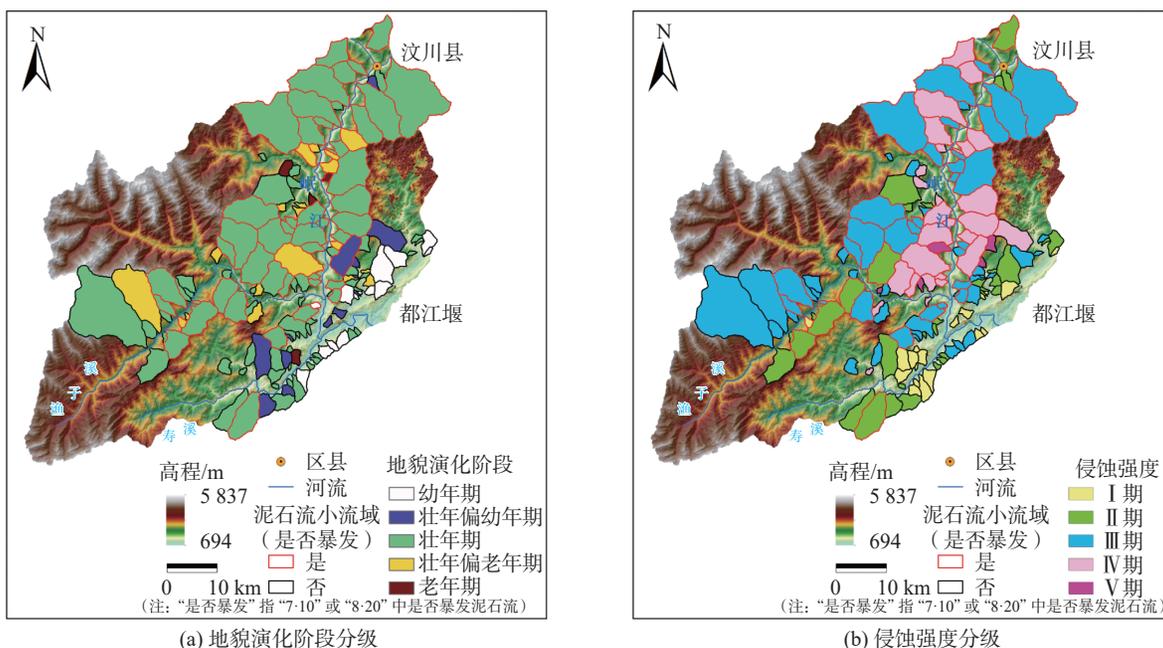


图 3 地貌演化阶段与侵蚀强度等级划分

Fig. 3 The geomorphologic evolution stages and erosion intensity

表 1 各地貌阶段分级与泥石流暴发情况

地貌阶段分级	流域数量	暴发数量	暴发率/%
幼年期	4	1	25.00
壮年偏幼年期	19	7	36.84
壮年期	97	44	45.36
壮年偏老年期	13	1	7.69
老年期	14	1	7.14

表 2 侵蚀强度分级与泥石流暴发情况

侵蚀强度分级	流域数量	暴发数量	暴发率/%
I 级	19	1	5.26
II 级	34	6	17.65
III 级	61	28	45.90
IV 级	28	18	64.29
V 级	5	1	20.00

传递,由于流向支流传递,所以位于河流下游区域的泥石流流域 H_i 值偏小,地貌发育趋于“老年化”。

岷江上游泥石流流域 G_i 值基于 0.180 6~0.495 2,结合 G_i 值分布情况和地形坡度分类,确定 $0^\circ \sim 25^\circ$ 、 $25^\circ \sim 30^\circ$ 、 $30^\circ \sim 35^\circ$ 、 $35^\circ \sim 40^\circ$ 、 $40^\circ \sim 45^\circ$ 五个坡度等级区间,并根据坡度区间将流域研究区内泥石流流域侵蚀强度划分为 5 个等级,I 级侵蚀强度最低,V 级侵蚀强度最高。由图 3(b)和表 2 可得,侵蚀强度为 I、II 级的流域共 53 个,基本位于研究区南部,主要为寿溪、渔子溪沿岸以及靠近都江堰地区的部分流域;侵蚀强度为 III 级的流域共 61 个;侵蚀强度为 IV 级的流域 28 个,主要分布于岷江干流沿岸;侵蚀强度为 V 级的流域共 5 个。研究区自北向南侵蚀强度大体呈下降趋势。通过对比地貌发育与侵蚀强度可得,处于同一地貌发育阶段的流域,其侵蚀强度差异较大,甚至有许多地貌演化正值“壮年”而侵蚀强度却低于“老年”阶段的流域,这恰好说明,流域的地貌演化阶段并不能和侵蚀强度一致。

2.3 地貌发育及侵蚀强度分级与泥石流暴发的关系

泥石流流域的地貌发育及侵蚀强度与“7·10”、“8·20”两次群发泥石流事件中的暴发情况如表 1、表 2 所示。

由表 1 中可得,由幼年期至壮年期,泥石流暴发率逐步上升,由 25% 上升至 45.36%,泥石流易发程度逐步增加;由壮年期至壮年偏老年期,泥石流暴发率迅速降低,壮年偏老年期暴发率仅为 7.69%,泥石流易发程度较低;而由壮年偏老年期至老年期,泥石流的暴发率则呈缓慢下降的趋势,差别较小。壮年期和壮年偏幼年期流域相对较易暴发泥石流,而壮年偏老年期及老年期处于地貌发育的“末期”,较难发生泥石流活动。地貌阶段由幼年期—壮年期—老年期,泥石流的活动情况大致呈显“孕育—发展—旺盛—衰退—消亡”,表明泥石流活动在一定程度上符合地貌演化规律,这与赵岩等^[30]学者的研究结果相一致。

由表 2 可得,在两次群发泥石流事件中,侵蚀强度

从 I~IV 级,暴发泥石流的流域占同级流域数量的比例分别为 5.26%、17.65%、45.9%、64.29%,泥石流的程度易发程度与侵蚀强度有良好的对应关系,随着侵蚀强度的提升,泥石流暴发率逐步上升;而侵蚀强度处于 V 级的流域,暴发率下降至 20%。通过对侵蚀强度处于 V 级的流域进行面积统计发现,侵蚀强度处于 V 级的流域面积普遍较小(最大仅为 7.33 km²),理论上面积较小的流域,其汇流量小,流域水力条件较差,而水源条件制约着泥石流的形成,因此处于 V 级的流域会出现暴发率降低的反常现象。

综上所述,研究区内泥石流的活动情况与流域的地貌演化、侵蚀强度各呈一定规律。地貌演化代表可供侵蚀的最大值,侵蚀强度代表侵蚀能力。因此仅用单一指标解释泥石流的易发程度尚具有一定的局限性,需要综合考虑二者对于泥石流形成的控制作用。

3 泥石流流域供给能力研究分析

3.1 供给能力模型

地貌演化代表流域可供侵蚀的最大值,侵蚀强度是流域的侵蚀速率的综合体现,二者共同控制着泥石流流域的物质供给能力。流域提供固体物质的能力影响着泥石流的形成,在一定时间尺度内,供给能力影响着泥石流的易发程度和活动频率。因此为了消除单一指标为研究带来的局限性,进一步讨论影响泥石流易发程度的关键因素,本文结合面积-高程积分值 H_i 与面积-坡度积分 G_i 建立物质供给能力 (S) 模型:

$$S = G_i \times H_i \quad (6)$$

3.2 供给能力定量划分

利用 GIS 平台,按照式(6)对研究区 147 个泥石流流域进行物质供给能力计算,并对计算结果进行归一化处理,将供给能力从 0~1 以 0.2 为间距从低到高依次划分为:极弱、弱、中、强和极强五个等级,供给能力划分结果如图 4 所示。

如图 4 所示,供给能力属极弱与弱的泥石流流域主要分布在靠近于岷江上游的出口区域(都江堰地区),供给能力为中的流域主要分布在研究区南部,供给能力为强和极强的主要分布于渔子溪及岷江沿岸(偏北部)。总体而言,研究区自北向南,泥石流流域的物质供给能力大体呈下降趋势。流域供给能力分级与泥石流暴发情况见表 3。

由表 3 可得,供给能力处于弱和极弱水平的流域共 18 个,在两次泥石流事件中都没有暴发泥石流。物质供给能力处于中—极强水平的流域,随着供给能力的

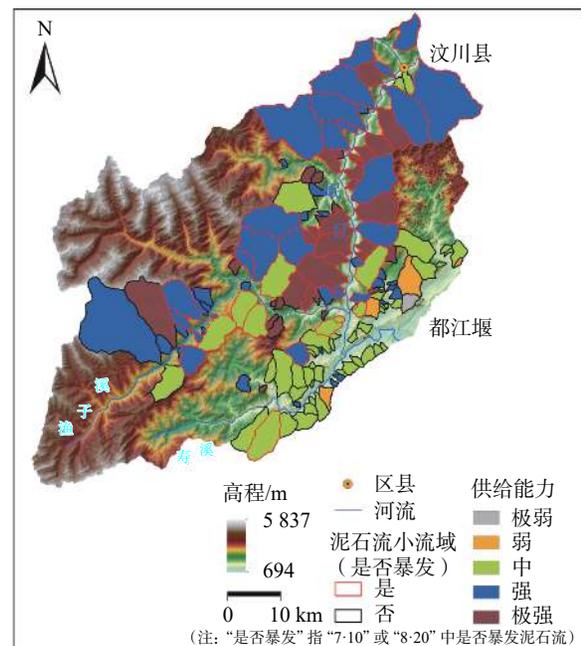


图 4 供给能力

Fig. 4 Material supply ability

表 3 流域供给能力分级与泥石流暴发情况

Table 3 Material supply ability and debris flow outbreaks

供给能力分级	流域数量	暴发数量	暴发率/%
极弱	5	0	0
弱	13	0	0
中	40	9	22.50
强	52	25	48.08
极强	37	20	54.05

提升,泥石流的总暴发率逐步提升。

3.3 不同供给能力下的面积对泥石流活动的影响

流域面积会影响泥石流的形成,因此将面积划分为 0~5 km²、5~10 km²、10~20 km²、20~25 km²、25~30 km²、30~35 km²、35~40 km²、40~45 km²、45~50 km² 及 >50 km² 10 个区间,对处于不同供给能力水平下各面积区间泥石流暴发情况进行统计,并绘制面积-供给能力散点图及不同供给能力的面积-暴发率曲线,如图 5 所示(统计与绘制不同供给能力等级各面积区间的暴发率于面积区间中点处,得到不同供给能力的面积-暴发率曲线)。

(1) 不同供给能力下的面积与泥石流活动的关系

如图 5 所示,供给能力处于弱和极弱的流域,各面积区段内都未暴发泥石流,物质供给能力是其主要限制因素,面积影响作用小。

供给能力为中等的泥石流流域,面积小于 20 km²

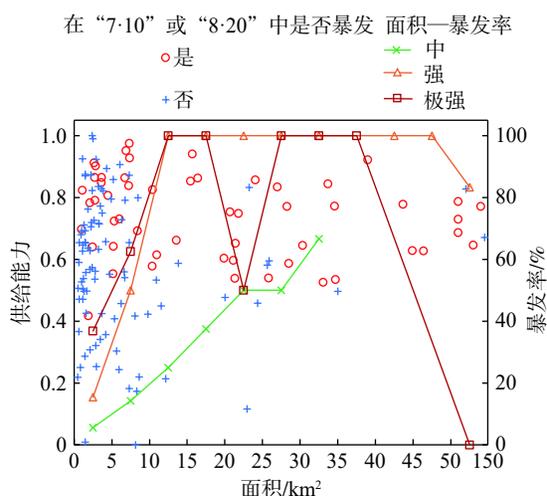


图 5 各供给能力下流域面积与泥石流暴发率关系

Fig. 5 The relationship between outbreaks and basin area under different material supply ability

暴发率较低,随着面积的增大,泥石流的暴发率逐步上升;面积 20~35 km²,暴发率在 50% 以上,并且在区间 30~35 km² 达到最大。因此,研究区中等供给能力的泥石流流域,其优势发育面积为 20~35 km²。

供给能力为强的流域,随着面积的增大,泥石流的暴发率呈先上升后下降的趋势。在 10~50 km² 的各区间暴发率均达到 100%;面积大于 50 km² 时,暴发率开始下降。因此,研究区供给能力为强的泥石流流域,优势发育面积为 10~50 km²。

供给能力为极强的流域,随着面积的增大,泥石流的暴发率大致呈先上升后下降的趋势。面积处 10~20 km² 及 25~40 km²,泥石流的暴发率到达 100%;面积处于 20~25 km²,暴发率为 50%。考虑面积区间的连续性,可认定在 10~40 km² 内,泥石流总体上处高易发程度。由于在 40~50 km² 内未分布供给能力为极强的泥石流流域,且在 >50 km² 区间,仅有一未暴发泥石流的流域分布,暴发率为 0,面积-暴发率曲线在 >40 km² 区段呈直线下降,该段曲线参考意义不大。因此,对于极强供给能力的泥石流流域,泥石流的优势发育面积为 10~40 km²。

(2) 面积对泥石流活动的影响分析

研究区面积对泥石流暴发的限制主要体现在以下几个方面:

当泥石流流域面积小于各供给能力优势发育面积时,一方面,由于沟道较短,泥石流的运动距离短,沿途能量消耗少,泥石流将参与运动物质搬运出流域较容易,一旦发生泥石流,流域内松散物质量迅速减少,流域短期内难以为再次发生泥石流提供充足物质;另一方

面,由于面积小,流域汇流量少,水力条件不足,从而限制泥石流的发生。随着供给能力的提升(对于同一面积区段),流域内崩、滑形式灾害增多且频繁,在降雨条件下容易直接转化为泥石流,泥石流暴发率大幅提升。

当泥石流流域面积处在各供给能力优势发育面积范围内,沟道较长,泥石流的运动距离也较长,泥石流将固体物质运移出流域的难度较大,随着能量的耗散,多数堆积于中下游沟道,为下一次泥石流活动提供有利条件,短期内再次发生泥石流的可能性增大。

当泥石流流域面积大于各供给能力优势发育面积,流域内水力条件过于充足,泥石流在运动过程中,由于水流的汇入转化为洪水,使得灾害的形式发生变化。

综上所述,供给能力处于弱和极弱的流域未暴发泥石流,这表明这两种能力下的流域不易暴发泥石流,随着供给能力的提升,泥石流的易发程度逐渐提高,暴发频率提升;同时,当面积小于优势发育面积时,随着面积的增大或供给能力的提升,这种限制作用逐渐减弱,中、强、极强三种供给能力的泥石流优势发育面积分别为:20~35 km²、10~50 km²、10~40 km²。

参与泥石流运动的固体物质,是供给能力和时间的函数,处于供给能力弱和极弱水平的流域在“7·10”、“8·20”两次群发泥石流事件中均未暴发泥石流,但经过一定时间的物质积累,仍有可能产生泥石流活动。泥石流的激发受诸多因素的影响,物质供给能力高并不意味着该流域在某一时期内一定会发生泥石流,但长时间的物质积累必然会使得流域物质储量增加,一旦物质被启动将加大泥石流的运动规模,使得其致灾能力提升。因此,对于供给能力处于强和极强,面积处各自优势发育段内,且长期未暴发泥石流或仅有小规模泥石流暴发的流域,应进一步排查流域松散物质储量和分布特征,确定泥石流活动稳定性,采取合理的防灾减灾措施。

4 结论及建议

运用面积-高程积分(H_i)及面积-坡度积分(G_i)对研究区 147 个泥石流流域地貌发育阶段和侵蚀强度等级进行了划分,探讨二者对泥石流活动的意义,建立了供给能力模型,对泥石流物质供给能力进行定量评价,并结合“7·10”、“8·20”两次群发泥石流事件中各流域的暴发情况进行分析,主要结论及建议如下:

(1) 采用单一的地貌演化阶段或侵蚀强度解释泥石流的易发程度具有一定局限性,泥石流暴发主要集中于壮年期、壮年偏幼年期及侵蚀强度 III~V 级。

(2) 随着物质供给能力的提升,泥石流的暴发率上

升,而流域面积对泥石流的暴发有一定限制作用,初步确定研究区内供给能力处中、强、极强三种水平泥石流流域的优势发育面积范围分别为:20~35 km²、10~50 km²、10~40 km²。

(3)对于物质供给能力较高、面积处于优势发育范围内且长期未有明显泥石流活动迹象的流域,应进一步排查流域松散物质储量和分布特征,确定泥石流活动稳定性,采取合理的防灾减灾措施。

参考文献 (References) :

- [1] DAVIS W M. The geographical cycle [J]. *Geographical Journal*, 1899, 14(5): 481 - 504.
- [2] STRAHLER A N. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1952, 63(11): 1117 - 1142.
- [3] LUO W. Quantifying groundwater-sapping landforms with a hypsometric technique [J]. *Journal of Geophysical Research-Planets*, 2000, 105(E1): 1685 - 1694.
- [4] COHEN S, WILLGOOSE G, HANCOCK G. A methodology for calculating the spatial distribution of the area-slope equation and the hypsometric integral within a catchment [J]. *Journal of Geophysical Research-Earth Surface*, 2008, 113(F3).
- [5] RABII F, ACHOUR H, REBAI N, et al. Hypsometric integral for the identification of neotectonic and lithology differences in low tectonically active area (Utica-Mateur region, north-eastern Tunisia) [J]. *Geocarto International*, 2017, 32(11): 1229 - 1242.
- [6] SHI Z H, HUANG X D, AI L, et al. Quantitative analysis of factors controlling sediment yield in mountainous watersheds [J]. *Geomorphology*, 2014, 226: 193 - 201.
- [7] SORIA-JAUREGUI A, JIMENEZ-CANTIZANO F, ANTON L. Geomorphic and tectonic implications of the endorheic to exorheic transition of the Ebro River system in northeast Iberia [J]. *Quaternary Research*, 2019, 91(2): 472 - 492.
- [8] CHEN C Y, WANG Q. Debris flow-induced topographic changes: effects of recurrent debris flow initiation [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017, 189(9): 449.
- [9] CUI Y, CHENG D, CHAN D. Investigation of Post-Fire debris flows in montecito [J]. *Isprs International Journal of Geo-Information*, 2019, 8(1): 5.
- [10] 黄江成, 欧国强, 潘华利. 白龙江与小江泥石流流域地貌演化比较分析 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2014, 25(1): 6 - 11. [HUANG Jiangcheng, OU Guoqiang, PAN Huali. Geomorphic evolution of comparison on debris flow gullies in Bailongjiang and Xiaojiang basins [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2014, 25(1): 6 - 11. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 国家防汛抗旱总指挥部办公室, 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所. 山洪泥石流滑坡灾害及防治 [M]. 北京: 科学出版社, 1994: 88-92. [The Office of the State Flood Control and Drought Relief Headquarters, Chengdu Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Conservancy. *Landslide debris flow disasters and prevention*[M]. Beijing: Science Press, 1994: 88-92. (in Chinese)]
- [12] 王雷, 吴君平, 赵冰雪, 等. 基于GIS和信息量模型的安徽池州地质灾害易发性评价 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2020, 31(3): 96 - 103. [WANG Lei, WU Junping, ZHAO Bingxue, et al. Susceptibility assessment of geohazards in Chizhou City of Anhui Province based on GIS and informative model [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2020, 31(3): 96 - 103. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 刘云, 康卉君. 江西崩塌滑坡泥石流灾害空间时间分布特征分析 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2020, 31(4): 107 - 112. [LIU Yun, KANG Huijun. Spatial-temporal distribution of landslide, rockfall and debris flow hazards in Jiangxi Province [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2020, 31(4): 107 - 112. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 朱渊, 余斌, 亓星, 等. 地形条件对泥石流发育的影响——以岷江流域上游为例 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2014, 44(1): 268 - 277. [ZHU Yuan, YU Bin, QI Xing, et al. Topographical factors in the formation of gully type debris flows in the upper reaches of Minjiang River [J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2014, 44(1): 268 - 277. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 刘德玉, 贾贵义, 李松, 等. 地形因素对白龙江流域甘肃段泥石流灾害的影响及权重分析 [J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(3): 33 - 39. [LIU Deyu, JIA Guiyi, LI Song, et al. Impacts of topographical factors on debris flows and weight analysis at the Gansu segment of the Bailongjiang River Basin [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(3): 33 - 39. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 黄成, 张友谊, 眭静, 等. 地形因子对沟谷泥石流发育的影响——以都汶高速“7.10”群发泥石流为例 [J]. *人民长江*, 2019, 50(8): 115 - 119. [HUANG Cheng, ZHANG Youyi, SUI Jing, et al. Influence of topographic factors on valley debris flow development: case of “7.10” cluster debris flows in Duwen expressway [J]. *Yangtze River*, 2019, 50(8): 115 - 119. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 曹晨, 余斌, 马二龙, 等. 四川汶川县佛堂坝沟“7.10”泥石流调查研究 [J]. *泥沙研究*, 2019, 44(1): 38 - 43. [CAO Chen, YU Bin, MA Erlong, et al. Study on debris flow in

- Fongtuba gully after the earthquake at Wenchuan County of Sichuan Province [J] . *Journal of Sediment Research*, 2019, 44(1): 38 - 43. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 孔应德, 郭晓军, 邹强, 等. 汶川县古溪沟“7·10”泥石流形成特征及防治工程的影响 [J] . *山地学报*, 2014, 32(3): 320 - 326. [KONG Yingde, GUO Xiaojun, ZOU Qiang, et al. Giant debris flow hazards in Guxi gully, Wenchuan County of China on July 10, 2013 [J] . *Mountain Research*, 2014, 32(3): 320 - 326. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 严炎, 葛永刚, 张建强, 等. 四川省汶川县簇头沟“7·10”泥石流灾害成因与特征分析 [J] . *灾害学*, 2014, 29(3): 229 - 234. [YAN Yan, GE Yonggang, ZHANG Jianqiang, et al. Research on the debris flow hazards in Cutou Gully, Wenchuan County on July 10, 2013 [J] . *Journal of Catastrophology*, 2014, 29(3): 229 - 234. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 邹强, 郭晓军, 朱兴华, 等. 岷江上游“7·10”泥石流对公路的危害方式及成因 [J] . *山地学报*, 2014, 32(6): 747 - 753. [ZOU Qiang, GUO Xiaojun, ZHU Xinghua, et al. Hazard characteristics and causes of “7·10” debris flow along highways in the upper reaches of Minjiang river [J] . *Mountain Research*, 2014, 32(6): 747 - 753. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 伍排勇, 张进春. 汶川干部群众积极自救互助自建——汶川抗击“7·10”特大山洪泥石流灾害纪实[N/OL]. 四川新闻网, 2013-07-15[2020-05-29]. <http://scnews.newssc.org/system/2013/07/15/013811796.shtml>. [WU Paiyong, ZHANG Jinchun. Wenchuan cadres and the masses to actively self-help and mutual assistance self - Wenchuan fight against “7·10” large debris flow disaster documentary[N/OL]. NEWSSC, 2013-07-15[2020-5-29]. <http://scnews.newssc.org/system/2013/07/15/013811796.shtml>. (in Chinese)]
- [22] 刘名洋. 汶川山洪泥石流灾害已致12人遇难, 26人失联[N/OL]. 新京报, 2019-8-23[2020-5-29]. <http://www.bjnews.com.cn/news/2019/08/23/618811.html>. [LIU Mingyang. Wenchuan torrential debris flows have caused 12 people were killed and 26 people lost contact[N/OL]. The Beijing News, 2019-8-23[2020-5-29]. <http://www.bjnews.com.cn/news/2019/08/23/618811.html>. (in Chinese)]
- [23] 刘名洋. 四川阿坝暴雨引发泥石流, 汶川等地多条道路中断[N/OL]. 新京报, 2019-8-20[2020-5-29]. <http://www.bjnews.com.cn/news/2019/08/20/617164.html>. [LIU Mingyang. The Beijing News. Heavy rains triggered landslides in Sichuan, Sichuan and other places a number of roads are cut off[N/OL]. The Beijing News, 2019-8-20[2020-5-29]. <http://www.bjnews.com.cn/news/2019/08/20/617164.html>. (in Chinese)]
- [24] PIKE R J, WILSON S E. Elevation-relief ratio, hypsometric integral and geomorphic Area-Altitude analysis [J] . *Geological Society of America Bulletin*, 1971, 82(4): 1079 - 1084.
- [25] 常直杨, 王建, 白世彪, 等. 面积高程积分值计算方法的比较 [J] . *干旱区资源与环境*, 2015, 29(3): 171 - 175. [CHANG Zhiyang, WANG Jian, BAI Shibiao, et al. Comparison of hypsometric integral methods [J] . *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015, 29(3): 171 - 175. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 王协康, 方铎. 白龙江流域泥石流沟形态非线性研究 [J] . *人民长江*, 1999(5): 19 - 21. [WANG Xiekang, FANG Duo. Nonlinear debris flow in Bailong river basin furrow [J] . *Yangtze River*, 1999(5): 19 - 21. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 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)]
- [28] 吕学军, 刘希林, 苏鹏程. 四川达曲河流域泥石流沟发育阶段的面积—高程分析 [J] . *山地学报*, 2005, 23(3): 336 - 341. [LYU Xuejun, LIU Xilin, SU Pengcheng. The area-altitude analysis on the evolution stage of debris flow ravines: Taking Daqu river as an example [J] . *Mountain Research*, 2005, 23(3): 336 - 341. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 蒋忠信. 滇西北三江河谷纵剖面的发育图式与演化规律 [J] . *地理学报*, 1987, 142(1): 16 - 27. [JIANG Zhongxin. Model of development and rule of evolution of the longitudinal profiles of the valley of three rivers' in the northwestern part of Yunnan Province [J] . *Acta Geographica Sinica*, 1987, 142(1): 16 - 27. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 赵岩, 孟兴民, 庆丰, 等. 基于地貌参数的泥石流沟发育阶段划分 [J] . *灾害学*, 2018, 33(4): 48 - 52. [ZHAO Yan, MENG Xingmin, QING Feng, et al. Stage division of debris flow torrent based on geomorphologic parameter [J] . *Journal of Catastrophology*, 2018, 33(4): 48 - 52. (in Chinese with English abstract)]