

白龙江流域泥石流特征分析

黄江成¹, 杨顺², 潘华利², 欧国强², 柳金峰²

(1. 云南大学 亚洲国际河流中心, 云南 昆明 650091;

2. 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)

摘要: 泥石流孕灾环境和流域形态是泥石流发育及其活动的基础, 把握孕灾环境和流域形态特征对开展泥石流防灾减灾工作具有重要的现实意义。在分析白龙江泥石流空间分布格局的基础上, 从区域构造环境、地形地貌、地层岩性和降水等方面研究了流域泥石流的孕灾环境特征, 探讨了各因子与泥石流分布的耦合关系。针对白龙江干流 250 条泥石流沟, 运用数理统计方法, 对其流域面积、主沟长和相对高差等重要参数进行了统计分析, 明确了干流泥石流的流域形态特征。

关键词: 白龙江; 泥石流; 孕灾环境; 流域形态; 统计分析

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)01-0311-05

中图分类号: P642.23

Debris Flow Characteristics in Bailong River Basin

HUANG Jiang-cheng¹, YANG Shun², PAN Hua-li², OU Guo-qiang², LIU Jin-feng²

(1. *Asian International Rivers Center, Yunnan University, Kunming, Yunnan*

650091, China; 2. *Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese*

Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: Disaster-pregnant environment and watershed morphology are the base of the development and activity of debris flows and therefore, clearly recognizing the disaster-pregnant environment and watershed morphology characteristics has an important realistic meaning to disaster prevention and mitigation. Based on the analysis of the spatial distribution patterns of debris flows in the Bailong River basin, a further study of the characteristics of the disaster-pregnant environment is made from the aspects of regional tectonic environment, topography and geomorphology, formation lithology, precipitation and so on. The coupling relationships between these factors and debris flow distribution are explored. Meanwhile, as to 250 debris flow gullies along the mainstream of the Bailong River, the basin area, length of the main gully, relative relief of debris flow gully and other important parameters are analyzed using mathematical statistics, and the characteristics of basin form in relation to debris flows along the mainstream are identified.

Keywords: Bailong River; debris flow; disaster-pregnant environment; basin form; statistical analysis

白龙江流域是中国著名的泥石流流域, 流域内分布有众多的泥石流沟, 其分布密度之高、爆发之频繁、危害之严重在中国极为突出^[1]。白龙江属长江二级支流, 嘉陵江一级支流, 全长 535 km, 流域面积 $3.28 \times 10^4 \text{ km}^2$, 发源于甘南藏族自治州碌曲县南缘, 海拔 4 072 m, 流经四川、甘肃两省, 经碌曲、若尔盖、迭部、舟曲、宕昌、武都、文县、青川及广元 9 个县, 于广元县昭化汇入嘉陵江, 汇口高程 465 m。本文主要研究范围为白龙江干流区域, 面积 $1.28 \times 10^4 \text{ km}^2$, 未考虑较大支流。

1 泥石流分布概况

通过实地考察、现场灾害填图、GPS 定点、Alos 卫星影像解译, 结合相关图件、历史文献, 初步查明白龙江流域泥石流主要分布于干流中上游地区, 白水江、岷江和拱坝河河谷两岸, 其中以干流中上游地区最为发育, 灾害最为严重。干流泥石流集中分布于文县碧口—迭部旺藏河谷两岸。碧口以下由于大部分河段受水库蓄水影响, 库水位以上区域未发现一定规模泥石流沟, 迭部旺藏以上鲜有一定规模泥石流沟。

收稿日期: 2013-03-15

修回日期: 2013-05-02

资助项目: 国家自然科学基金项目“怒江流域高山峡谷区泥石流活动性定量研究”(41301595); 水利部公益性行业科研专项项目“汶川震区山洪灾害风险评估及防灾减灾范式”(201301058)

作者简介: 黄江成(1981—), 男(汉族), 云南省鹤庆县人, 博士, 助理研究员, 研究方向为山地灾害。E-mail: explor99@163.com。

通信作者: 潘华利(1982—), 女(汉族), 重庆市合川县人, 博士, 副研究员, 研究方向为山地灾害。E-mail: hlpn@imde.ac.cn。

白龙江干流共分布一定规模泥石流沟 250 条, 泥石流流域面积共 $2\,776.38\text{ km}^2$ ^[2]。中上游地区是白龙江流域泥石流分布密度最高、暴发最为频率的地区, 主要沿白龙江深大断裂带两侧发育。另外, 中上游地区河谷两岸还发育有大量的坡面泥石流。泥石流左岸较右岸发育, 左岸分布泥石流沟 143 条, 右岸为 107 条, 许多著名的泥石流沟均位于左岸, 例如三眼峪沟、罗家峪沟、火烧沟、泥湾沟、柳湾沟、石门沟、甘家沟和北峪河等, 根据资料记载, 多条泥石流沟曾多次发生堵断白龙江的灾害性泥石流。

2 孕灾环境特征分析

2.1 构造环境特征

白龙江流域位于青藏高原东缘的南北构造带北段, 该区构造运动强烈, 地表破碎、岩性复杂。流域内分布有多条活动断裂, 对中上游地区影响较为直接的有光盖山—迭山断裂、迭部—白龙江断裂、康县—略阳断裂和鸡石坝—临江断裂; 下游地区则主要受青川断裂和映秀—北川断裂的影响。其中, 对白龙江干流泥石流活动影响最为强烈的断裂是迭部—白龙江断裂, 它是甘肃省陇南地区一条规模较大的区域性活动断裂, 在河谷两侧呈不对称分布, 存在明显位错^[3-4]。

新构造运动是白龙江流域泥石流活动兴衰的主控因素^[5], 该区域属于地质上的隆起上升区^[6], 流域新构造运动主要表现为区域内频繁而强烈的地震活动。流域主要受兰州—天水地震带和武都—边马地震带的影响。根据地震分布图, 流域内及其附近区域发生的地震多为浅源地震^[3], 共发生 6 级以上的地震 36 次 (白龙江流域 300 km 范围内), 平均周期为 78 a。对当前白龙江干流泥石流活动影响较为强烈的地震为 1879 年的文县 8.0 级地震和 1976 年松潘发生的两次 7.2 级的地震。

据汶川地震后修改的《中国地震动参数区划图》(GB18306—2001), 白龙江中游区域地震动峰值加速度在 $0.20\sim 0.30\text{ g}$, 其中以武都县附近较高为 0.30 g ; 根据汶川 8.0 级地震烈度分布图, 白龙江干流的地震烈度在 VI—VIII 度, 其中白龙江中游地区的地震烈度为 VIII 度。结合前人地震诱发土砂灾害的相关研究, 以及汶川地震后的调查资料, 汶川地震对白龙江中游的泥石流活动有一定影响; 下游地区属地震烈度 VIII 度区域, 但泥石流沟分布较少, 汶川地震对该区土砂灾害的影响主要表现为崩塌和滑坡增加, 对泥石流发育的影响还有待进一步研究。

白龙江流域地层复杂, 从志留系到第四系均有出露。分布最为广泛的地层为志留系、泥盆系和三叠

系, 其中又以志留系地层分布最为广泛, 属软弱岩层, 主要岩性为千枚岩、变质砂岩、灰岩, 上层覆盖马兰黄土。根据相关研究^[6-7], 白龙江流域从第四系早更新世便存在泥石流活动。流域内地层最为破碎、岩性最为复杂的区域为碧口以上的白龙江中游干流区域, 这一区域也是泥石流发育最为集中的地区。

2.2 地形地貌特征

流域地处我国第一阶梯和第二阶梯的过渡地带, 地势呈现出由西北向东南逐渐降低的特征, 大部分地区坡度在 $15^\circ\sim 40^\circ$, 干流河道平均坡降约为 3.4% , 上游舟曲以上属山原地区, 中游舟曲至碧口以中山为主, 下游则属川西北高原向四川盆地丘陵过渡地带。

本文利用 Aster 30 m 分辨率 DEM 数据, 参考中国山地基本地貌形态划分标准^[8], 利用 Arcmap 空间分析软件, 以邻域统计单元面积以 21 km^2 为计算范围^[9-10], 对白龙江流域的地貌类型进行分类。

结果显示, 流域地貌类型以中起伏度中山和高起伏度中山为主, 面积分别占 25.16% 和 48.97% 。地貌分类结果结合白龙江干流泥石流分布特征的分析显示, 白龙江泥石流主要集中分布在高起伏度中山的地貌区, 起伏的地势为泥石流的发育提供了必要的势能条件。

2.3 降水特征

白龙江位于多种气候类型的交汇带, 下游地区属亚热带季风气候, 中游地区为温带季风气候, 上游地区则属于高寒气候类型。流域夏季降水主要受东南季风的控制, 降水主要集中在雨季, 占全年的 80% 以上, 泥石流发生与夏季东南季风活动时间大致相当, 但更为集中, 其中 7、8 月发生泥石流的次数占全年的 76% , 而同期的降雨占雨季降雨的 42.8% (武都县 1978—1996 年)。

流域多年平均降水量 514.5 mm , 空间分异较大, 降水范围在 $400\sim 1\,100\text{ mm}$, 总体上由南至北递减, 至舟曲附近达到最低, 再北向至迭部呈现出增加的趋势, 迭部以北降水逐渐减少。24 h 最大暴雨均值 $40\sim 150\text{ mm}$, 由东南向西北递减。干流泥石流发育地区的多年平均降雨量在 $400\sim 700\text{ mm}$, 24 h 最大暴雨均值在 $40\sim 60\text{ mm}$ 。

分析白龙江中游武都站 1944—2010 年降水资料 (图 1), 多年平均降水量为 470.5 mm , 其中最大值出现在 1984 年 (689.3 mm), 最小为 1997 年 (270.5 mm), 最大值为最小值的 2.5 倍, 年降雨变差较大。武都站的雨季降雨和全年降雨之间同步关系较好, 相关系数达到 0.97。根据年降雨量的 5 a 滑动平均降水量可以看出, 白龙江地区的降水存在周期性的波动,

1944—1967 年为丰水期,1968—1974 年为少水期,1975—1993 年是有观测资料以来降水最丰富的时期,根据相关资料^[1],这一时期也是白龙江流域泥石流活动最为频繁的时期;20 世纪 90 年代中期以来,白龙江流域降水量年际变化呈下降趋势,且一直处在较低水平。

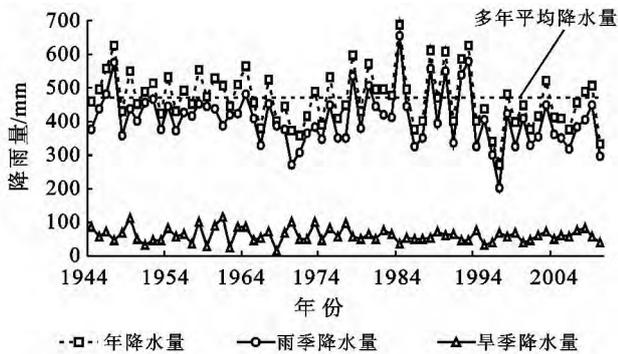


图 1 武都气象站降雨量年际变化(1944—2010 年)

白龙江中上游地区大雨日数较少,武都气象站多年平均(1961—2010 年)的大雨和暴雨次数仅为 2.1 和 1.1 d/a,但降雨较为集中,历时较短,强度较大的雨量主要集中在几个小时或十几个小时内。据甘肃水文水资源局统计^[11],该区 24 h 雨量占 3 日雨量的 80% 以上,12 h 雨量占 24 h 雨量的 80% 以上,6 h 雨量占 24 h 雨量的 65% 以上,3 h 雨量占 24 h 雨量的 56%。

选取白龙江中上游地区武都、舟曲、安化和外纳等 11 个气象站长时间序列(1968—1987 年不等)的雨量资料分析发现,年降雨随着海拔的增加明显,并呈现出一定的幂函数关系(图 2)。

白龙江流域年降雨量均随区域海拔的增加而递增,存在以下的关系:

$$H = 0.006\bar{I}^{1.988} \quad (1)$$

式中: H ——海拔(m); \bar{I} ——年平均降雨量(mm)。根据相关性分析,区域年平均降雨量与海拔相关性较好,相关系数为 0.830。

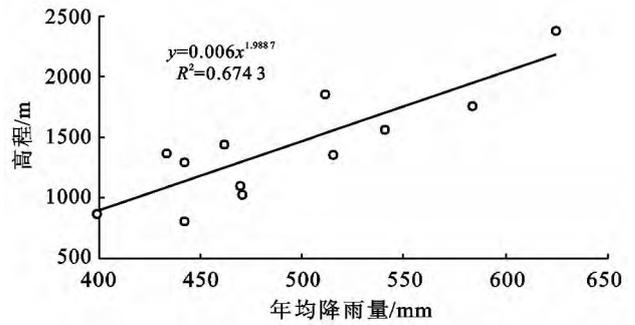


图 2 白龙江干流河谷雨量随高程的变化

据白龙江中游泥石流监测资料,许多沟经常会出出现沟口监测点无降雨而沟道却发生一定规模泥石流的现象。如 1995 年 7 月 19 日,甘家沟监测点全天无降雨,阳光灿烂,而沟道却发生泥水位达 2 m,流速达 4.5 m/s 的黏性泥石流,可见该区局地降雨特征明显。

3 泥石流流域形态特征

3.1 流域面积与主沟长

流域面积反映流域的产砂和汇流状况。通常,流域面积与流域产砂量成正相关,产砂量的多少影响到流域内松散固体物质的储量,而松散固体物质储量又影响到一次泥石流(可能)最大冲出量,与泥石流活动关系密切。

表 1 为白龙江干流泥石流流域面积分布统计结果,其中,流域面积最小的百草坝上 1[#] 沟,流域面积仅 0.34 km²,大于 100 km² 的泥石流沟有 3 条,分别是沟坝河(227.3 km²)、角弓沟(300.3 km²)和北裕河(429.8 km²)。流域面积集中分布在 0.5~20 km² 内,共 214 条,占总数的 85.6%,其中又以 0.5~5 km² 的泥石流沟分布最广,共 162 条,占总数的 64.8%。

主沟长度决定着泥石流的流程和沿途接纳松散固体物质的多少,泥石流流程越远,表明其能量和破坏力越大,因此,主沟比降的大小可以表征泥石流的能量及活动强弱。

表 1 白龙江干流泥石流流域面积统计

| 流域面积/km ² | <0.5 | 0.5~5 | 5~10 | 10~20 | 20~50 | >50 | 合计 |
|----------------------|------|-------|------|-------|-------|-----|-----|
| 泥石流沟数量/条 | 9 | 162 | 30 | 22 | 18 | 9 | 250 |
| 占总沟数比例/% | 3.6 | 64.8 | 12.0 | 8.8 | 7.2 | 3.6 | 100 |

表 2 为干流泥石流沟主沟长度统计表,在所有统计的沟道中,主沟长度最小的为百草坝上 1[#] 沟,主沟长 1 km,最长的为武都县城附近的北裕河,主沟长

36.9 km,白龙江中上游泥石流沟主沟长度主要集中在 1~5 km,占总数的 73.2%,主沟长度在 10~15 km 的泥石流沟有 13 条,占总数的 5.2%,主要包

括磨沟、甘家沟、佛堂沟、透坊沟和曹家坝沟等。
分析泥石流主沟长与流域面积的关系,发现白龙

江干流主沟长随流域面积的增大而增大,二者呈指数关系,且相关性较高(表 2,图 3)。

表 2 白龙江干流泥石流主沟长统计

| 主沟长度/km | 1~3 | 3~5 | 5~10 | 10~15 | >15 | 合计 |
|----------|------|------|------|-------|-----|-----|
| 泥石流沟数量/条 | 117 | 66 | 50 | 13 | 4 | 250 |
| 占总沟数比例/% | 46.8 | 26.4 | 20.0 | 5.2 | 1.6 | 100 |

表 3 白龙江干流泥石流主沟比降统计

| 主沟比降/% | <100 | 100~200 | 200~300 | 300~400 | 400~500 | >500 | 合计 |
|----------|------|---------|---------|---------|---------|------|-----|
| 泥石流沟数量/条 | 5 | 32 | 59 | 73 | 60 | 21 | 250 |
| 占总沟数比例/% | 2.0 | 12.8 | 23.6 | 29.2 | 24.0 | 8.4 | 100 |

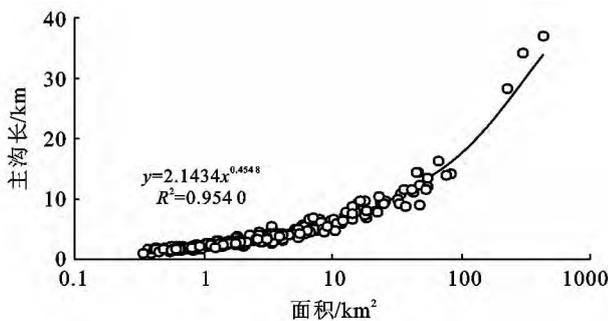


图 3 白龙江干流泥石流沟流域面积和主沟长的关系

加,主沟比降有减小的趋势(表 3,图 4)。

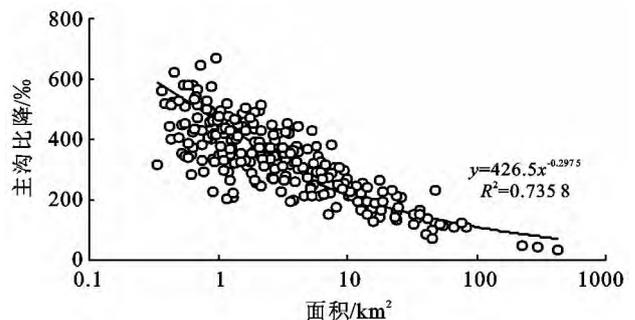


图 4 白龙江泥石流沟流域面积和主沟比降的关系

3.2 沟床比降与相对高差

沟床比降是泥石流起动的底床条件,是影响泥石流的形成和运动的重要因素,一般来说,在一定范围内泥石流沟床比降愈大,愈有利于泥石流的发生。

白龙江干流泥石流沟床比降差异较大,在 31%~667%,其中绝大多数泥石流沟沟床比降在 200%~500%,占总数的 76.8%。结合前人的研究结果,白龙江干流泥石流主沟比降所处的区间对泥石流活动较为有利。

白龙江干流泥石流沟主沟比降与流域面积有关,主沟比降和流域面积呈指数关系,随着流域面积的增加,

相对高差亦是泥石流形成和运动的一个重要因素,沟底与沟顶相对高差越大,则分布于谷坡两侧的松散固体物质的潜在运动性就越大。

表 4 为各泥石流流域的相对高差统计结果,白龙江干流泥石流沟流域的相对高差分布范围为 455~2 809 m,其中相对高差小于 500 m 的泥石流沟有 1 条,主要集中分布在 500~2 000 m,占总泥石流沟数的 90.8%。大多泥石流沟相对高差在 1 000~1 500 m,占总数的 48.2%。

表 4 白龙江干流泥石流流域相对高差

| 相对高差/m | <500 | 500~1 000 | 1 000~1 500 | 1 500~2 000 | 2 000~2 500 | 2 500~3 000 | 合计 |
|----------|------|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----|
| 泥石流沟数量/条 | 1 | 49 | 120 | 58 | 20 | 2 | 250 |
| 占总沟数比例/% | 0.4 | 19.6 | 48.0 | 23.2 | 8.0 | 0.8 | 100 |

3.3 流域完整系数

泥石流流域的平面形态主要有长条形、椭圆形和近圆形等,对泥石流活动和坡面汇流有影响。可用流域完整系数表示泥石流流域形态,可用式(2)表示泥石流流域完整系数^[12]:

$$F_e = F/L^2 \quad (2)$$

式中: F_e ——流域纵横比; F ——流域面积 (km^2); L ——主沟长(km)。

$F_e < 0.3$ (横轴与 $y = 0.3x$ 之间的区域),流域为长条形; $0.3 < F_e < 0.5$ ($y = 0.3x$ 与 $y = 0.5x$ 之间的区域),流域为长圆形; $0.5 < F_e < 0.7$ ($y = 0.5x$ 与 $y = 0.7x$ 之间的区域),流域为椭圆形; $F_e > 0.7$ ($y = 0.7x$ 左边的区域),流域为近圆形(图 5)。

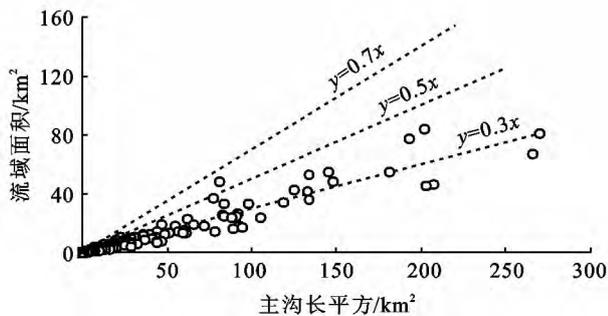


图 5 白龙江干流泥石流流域形态

结果显示,白龙江干流地区灾害性泥石流流域形态以长条形和长圆形为主。

4 结论

(1) 白龙江泥石流发育受控于区内多条活动断裂,其中影响最为剧烈的是迭部—白龙江深大断裂;对当前流域泥石流活动影响最为直接的是 1879 年文县 8.0 级地震以及 1972 年两次 7.2 级地震;汶川地震的影响主要表现为下游地区松散物源的增多,对泥石流发育的影响尚不明确;流域泥石流主要发育于区内地层最为破碎、多软弱岩性发育的区域,该区地貌类型以高起伏度的中山为主,地貌因素是白龙江上游迭部以上以及下游碧口以下泥石流弱发育的主要原因。

(2) 流域夏季降水主要受东南季风影响,雨季降水占全年 80% 以上,泥石流活动较降水更为集中,7、8 月泥石流占全年的 76%;短历时降水特征表现为少大、暴雨,但降雨十分集中;多年年降水存在一定的周期性波动,在一定范围内,年降水随海拔的增加而增长,并呈幂函数关系,相关系数为 0.830,降水的丰欠直接决定了白龙江的泥石流活动。

(3) 白龙江干流泥石流流域面积主要集中在 0.5~20 km²,占总数的 85.6%;主沟长 73.6% 集中在 1~5 km,主沟长于流域面积之间呈指数关

系,相关性较好。

(4) 泥石流主沟比降集中分布在 200‰~500‰,占总数的 76.8%,超过 90% 的泥石流流域相对高差在 500~2 000 m,均较有利于泥石流活动,流域面积与主沟长呈指数关系,相关性较好;干流的灾害性泥石流沟的流域形态绝大多数为长条形或长圆形。

[参 考 文 献]

- [1] 中国科学院兰州冰川冻土研究所,甘肃省交通科学研究所. 甘肃泥石流[M]. 北京:人民交通出版社,1982:44-47.
- [2] 黄江成,欧国强,柳金峰. 白龙江干流泥石流分布特征及危险度评价[J]. 人民黄河,2011,33(6):105-107.
- [3] 任非凡. G212 线陇南段泥石流危险性区划研究[D]. 兰州:兰州大学,2004.
- [4] 袁道阳,雷中生,何文贵,等. 公元前 186 年甘肃武都地震考证与发震构造探讨[J]. 地震学报,2007,29(6):654-663.
- [5] 唐永仪. 新构造运动在陇南滑坡泥石流形成中的作用[J]. 兰州大学学报:自然科学版,1992,28(4):152-160.
- [6] 李永化,张小咏,崔之久,等. 第四纪泥石流活动期与气候期的阶段性耦合过程[J]. 第四纪研究,2002,22(4):340-348.
- [7] 李永化,张小咏,崔之久. 陇南山地泥石流期、气候期与构造期的耦合[J]. 水土保持研究,2003,10(2):96-100.
- [8] 周成虎,程维明,钱金凯,等. 中国陆地 1:100 万数字地貌分类体系研究[J]. 地球信息科学,2009,11(6):707-724.
- [9] 徐汉明,刘振东. 中国地势起伏度最佳统计单元的求证[J]. 湖北大学学报:自然科学版,1990,12(3):266-271.
- [10] 封志明,唐焰,杨艳昭,等. 中国地形起伏度及其与人口分布的相关性[J]. 地理学报,2007,62(10):1073-1082.
- [11] 甘肃省水文资源勘测局. 甘肃省暴雨特征研究[M]. 兰州:兰州大学出版社,2003.
- [12] 沈昌玉,龚国元. 河流地貌学概论[M]. 北京:科学出版社,1986:16-43.