张金山，谢洪，王小丹，等. 西藏尖姆普曲泥石流[J]. 灾害学，2015，30(3)：099－103.［Zhang Jinshan，Xie Hong，Wang Xiaodan，et al. Debris-flow of Jianmupuqu Ravine in Tibet[J]. Journal of Catastrophology，2015，30(3)：099－103.］

西藏尖姆普曲泥石流*

张金山[1,2]，谢　洪[1,2]，王小丹[2]，范继辉[2]

（1. 中国科学院 山地灾害与地表过程重点实验室，四川 成都 610041；
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：尖姆普曲为雅鲁藏布江支流帕隆藏布江左岸的一级支沟，是一条大型冰川泥石流沟，2007 年曾暴发特大规模的泥石流，堵断帕隆藏布江，导致对岸的川藏公路断道，并造成人员伤亡。目前几乎每年都会暴发中小规模的泥石流。尖姆普曲高差巨大、岸坡陡峻，给泥石流暴发提供了优越的能量条件，流域所在区域隆升强烈，地质构造复杂，岩石破碎，加上地震频发，风化强烈，给泥石流发育提供了大量的固体物质条件；流域所在区位于西南季风影响区，又为水汽通道，降水丰富且多暴雨，冰川活动也十分强烈，为泥石流暴发提供了大量的水源条件。根据调查访问，尖姆普曲内泥石流的主要激发水源为暴雨，若叠加增温和雨水潜热导致冰雪融水，则可产生大规模泥石流。根据实测资料进行了泥石流流速、流量等参数的计算，结果表明暴雨和冰雪融水组合条件较好时，激发的大规模泥石流可再次堵断帕隆藏布江。

关键词：泥石流；尖姆普曲；西藏；帕隆藏布江；松绕村
中图分类号：P642.23；X43　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000－811X(2015)03－0099－05
doi：10.3969/j.issn.1000－811X.2015.03.019

尖姆普曲位于西藏波密县松绕村境内，为雅鲁藏布江支流帕隆藏布江左岸的一级支沟，沟口与东偏南方向的波密县城直线距离约 45 km，距西偏南方向的林芝地区政府所在的八一镇约 100 km（图 1）。

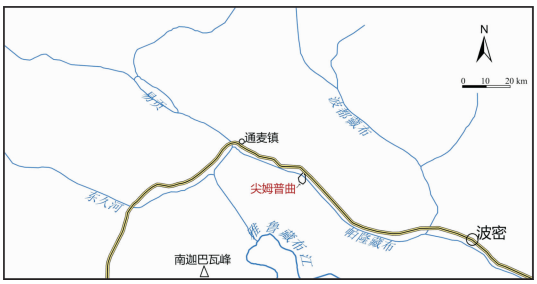


图 1　尖姆普曲地理位置示意图

从 2006 年的遥感影像看，尖姆普曲沟口已存在较大的堆积扇（图 2），并存在泥石流堆积台地（图 3），因此认为该沟是一条老的泥石流沟。

2007 年 9 月 4 日，尖姆普曲发生泥石流，泥石流越过帕隆藏布江冲毁沟对岸的川藏公路约 150 m（图 4），导致沟口村庄及过往路人 1 人死亡、7 人失踪、9 人受伤，2 户民房被毁、6 户民房受损，冲毁农田 2 hm^2，冲走牲畜 40 余头，沟口下游两岸大片森林被毁，泥石流短暂堵断帕隆藏布江（约



图 2　遥感影像显示的尖姆普曲沟口堆积
（googleearth 影像 2006 年 4 月 30 日）



图 3　尖母普曲沟口

* 收稿日期：2014－11－25　　修回日期：2015－01－13
基金项目：水利部公益性行业科研专项经费项目(201301037)；中国科学院 STS 计划项目(KFJ-EKFJ-EW-STS-094)
作者简介：张金山(1972－)，男，甘肃古浪人，副研究员，理学博士，主要研究方向为泥石流减灾理论与方法.
E-mail：zjszj@163.com

1 h)，1 座跨江吊桥(松饶吊桥)和 1 辆汽车被毁，川藏公路交通中断 43 h。据调查访问，该沟近年来小规模泥石流几乎每年都会暴发，2009 年还暴发过较大规模的泥石流，但未堵断主河。



图 4 尖母普曲 2007 年 9 月 4 日泥石流冲过帕隆藏布江危害川藏公路及村庄

1 泥石流形成条件

1.1 地貌特征

尖姆普曲发源于念青唐古拉山东段余脉，由南向北注入帕隆藏布江，为帕隆藏布江中游左侧支流，流域面积为 17.65 km^2，主沟长度 7.04 km，沟床平均纵比降 294‰，流域最高峰海拔 5 590 m，沟口帕隆藏布江水面海拔 2 439 m，相对高差 3 151 m，流域内山坡平均坡度达 35°，地形十分陡峻(图 5)。在流域海拔 4 000 m 以上的山坡和沟谷，发育有现代冰川，总面积约 1.45 km^2，属海洋性温冰川，补给与消融均十分强烈(图 6)。

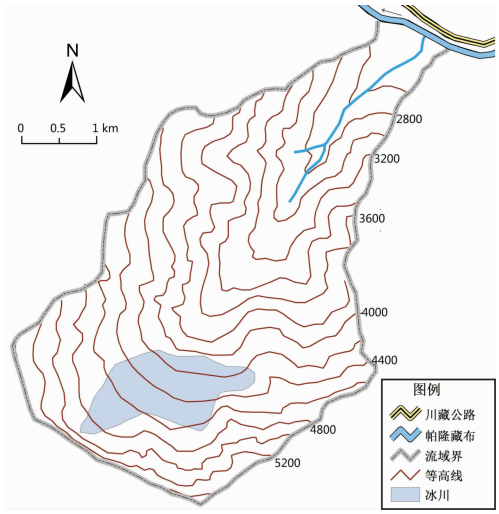


图 5 尖姆普曲流域图



图 6 尖姆普曲上游的冰川

1.2 地质条件

尖姆普曲流域在地质构造上处于印度板块和欧亚板块的缝合带的北侧，发育于察隅—波密—林芝近东西向深大断裂带的中段。流域所在区域经前寒武纪及古生代构造运动，产生一套中度变质岩系，燕山构造运动中形成大量断裂。

流域出露地层以前震旦系为主，岩性主要为片麻岩、片岩、变粒岩及大理岩。由于强烈的变质作用和寒冻风化作用，以及构造的破坏和地震的影响，岩体破碎，崩塌滑坡发育，是泥石流活动的主要固体物质来源。喜山运动以来，本区及邻近地区发生强烈的隆升和向东挤出走滑[1-2]，区内有 NE、EW、NNW、NWW 四个方向的构造体系，它们彼此以斜接或反接形式复合于雅鲁藏布江大拐弯顶端和南迦巴瓦峰附近[3-4]，造成本区断裂切割密度很大，岩层被切割的支离破碎，加之流域上游昼夜温差大，寒冻风化作用强烈，在强烈的雪崩作用下补给冰川，在消融区冰川表面形成深厚的表碛块砾层，在全球变暖的总体趋势下，流域冰川退缩，表碛、侧碛、终碛等冰川堆积物成为泥石流的另一固体物质来源。

尖姆普曲所处位置是西藏两个强地震带之一的藏东南强地震带中部，对区域有影响的特大地震有：1897 年印度阿落姆 8.7 级特大地震及 1950 年 8 月我国西藏察隅 8.5 级特大地震；1976 年以后共发生影响该区(92°～98°E，28°～32°N)的 6 级以上的地震 1 次，5 次以上的地震 4 次，4 级以上的地震 78 次以上[5]。频频发生的中、小地震破坏了山体的稳定性，促使崩塌滑坡形成，加大松散固体物质的储备量，增强松散物质参与泥石流活动的可能性，在加快泥石流活跃周期，以及加大泥石流的规模等方面都起到了积极的作用。

1.3 气象水文条件

尖姆普曲地处西藏高原的东南边缘，深受印度洋西南季风的影响，水汽溯雅鲁藏布江下游河谷逆流而上，翻越帕隆藏布江南岸山岭的垭口后直入本区，带来充沛的降水。由于海洋性季风的影响，雨季长达 6 个月左右(4 月下旬到 9 月中旬)；冬季则受西风环流控制，以固态降水为主。根据波密气象站和古乡沟零星观测资料，年平均气温 8.6℃，降雨 884.5 mm。年内降雨分配极不均匀，雨季降水占年降水量的 70% 以上(图 7)，最大月份与最小月份降雨悬殊达 20 余倍。另外，流域降水量也受海拔高度的影响，降水量随海拔明显增大，据与该沟沟口位置相距不到 20 km 的古乡沟流域的观测资料，流域中夏季降水垂直递减率达 80 mm/100 m[6]。

尖姆普曲上游冰川面积约 1.45 km^2，冰川融水为流域径流重要来源之一，但因缺乏观测资料，故使用“冰川的年平均消融量大致等于雪线处的年消融量”的原理，计算得出年平均冰川消融

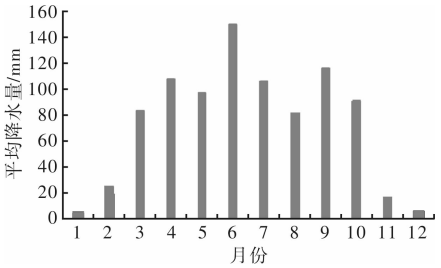


图 7　尖姆普曲所在区域各月降水分配图

径流[7]。

先用式(1)计算雪线处的消融深 A(mm)：

$$A = 1.33(9.66 + t_s)^{2.85}。\quad (1)$$

式中：t_s 为计算年夏季流域雪线处 6 - 8 月的平均气温(℃)，利用波密气象站观测资料及气温垂直递减原理，算得流域雪线处夏季平均气温为 7.5 ℃，代入式(1)得尖姆普曲 2007 年冰川消融深为 4 370 mm。

尖姆普曲流域的冰川属海洋性温冰川，冰的密度宜取 0.9 g/cm^3，计算消融径流深 h(mm)：

$$h = 4\,370 \times 0.9 = 2\,933.1。\quad (2)$$

最后根据冰川面积计算 2007 年冰川的年平均消融径流 Q(m^3/s)：

$$Q = (2\,933.1 \times 1.45 \times 1\,000)/(365 \times 24 \times 3\,600) = 0.18。\quad (3)$$

据 2014 年 7 月考察时实测流量为 6.2 m^3/s，而据附近培龙沟、古乡沟等流域研究资料，7 月流量一般占年总径流量的 26% 左右，即流域年平均径流量约为 1.98 m^3/s，可见冰雪融水仅占年径流量的 9.1%。

尖姆普曲冰川面积占流域总面积的 8.2%，利用面积分割法[6]，根据同纬度同为海洋性冰川的海螺沟冰川末端多年观测径流分割比率，算得尖姆普曲冰雨融水占全年径流量的比率是：

$$(0.483 \times 0.082)/0.38 = 0.104,\quad (4)$$

即在尖姆普曲流域每年径流问题构成中占 10.4%。

由以上分析可见，尖姆普曲流域平时的径流主要以降水和地下水，冰雪融水仅占年平均径流量的 10% 左右。因此，尖姆普曲泥石流的激发条件以暴雨为主，如果暴雨伴随着流域温度增加，加上雨水潜热，则冰川消融量会大大增加，且与冰碛层等碎屑物相互作用，从而形成大规模泥石流。

2　2007 年“9 · 4”特大泥石流特征分析

2.1　泥石流的形成机理

调研中未了解到尖姆普曲在 2007 年之前暴发泥石流的记录，但调查到流域下游段两岸及沟口保存的高出沟床数十米混杂堆积台地，且明显分为多级，所以分析认为该堆积物台地为历史泥石流堆积形成，在区域地壳持续抬升的背景下，主河帕隆藏布江下切而形成。其暴发频率分析认定为百年一遇(P = 1%)。

据分析，该类泥石流的形成过程为：前期降雨使坡面和沟岸碎屑物质浸润饱和，致使土体平衡条件遭受破坏。当大量的水流在坡面或沟谷运动时，一方面，冲刷一部分碎屑物质，使其与水流一起产生运动，另一方面，一部分冰雪融水渗入到冰碛层中，使其饱和失稳。沟床流动的水体不断掀揭冲刷不稳定的沟床与边坡，引发大量物质坍塌，从而不断扩大自身的规模和含沙量，若堵塞沟道还会造成溃决洪水，形成泥石流[6]。

根据残留的泥石流堆积物中细粒物质少(图 8)，块石含量高，长径 2 m 者在沟内多见，堆积龙头明显，分选性差等特点，认为该沟暴发的泥石流为高容重泥石流，估计其容重可能达 2.2 ~ 2.3 t/m^3。

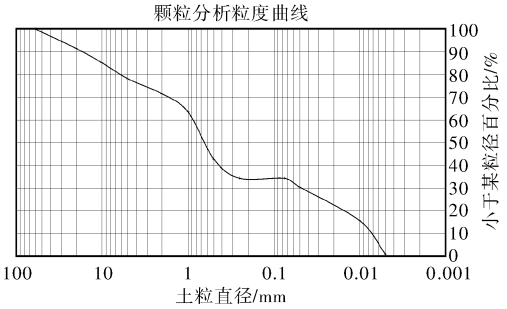


图 8　尖姆普曲内泥石流堆积物颗粒级配图

2.2　泥石流特征参数计算

在沟谷下游，泥石流翻越了堆积台地，对台地上的植被造成破坏，经分析为泥石流超高堆积所致。选择沟道内岸边该次泥石流的堆积物质的高度认定为泥石流所达到的高度，测量了此处的横断面(图 9)及纵比降，可据此计算这次泥石流的最大流速和流量。

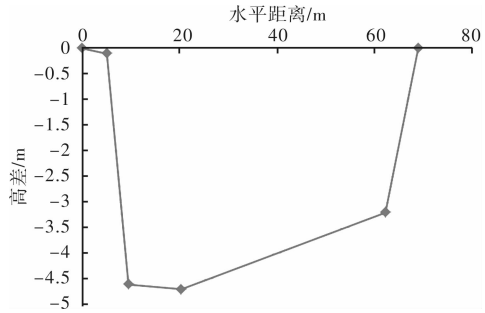


图 9　尖姆普曲下游沟道断面图

尖姆普曲泥石流虽然容重大，但因其块石含量高，粘粒含量少，在运动特征上更接近西北地

区的稀性泥石流，因此流速计算选用铁道部第一勘测设计院推荐公式(5)，该公式是西北地区的经验公式[8]。

$$V_c = \frac{1.53}{a} \cdot R_c^{2/3} \cdot I^{3/8}, \quad (5)$$

式中：V_c 为泥石流断面平均流速(m/s)；R_c 为泥石流流体水力半径(m)，可近似取泥石流泥位深度；I 为泥石流流面纵坡(‰)；a 为阻力系数，可查表获得。

为了确定选用公式与参数的正确性及最后计算结果的可靠性，还选用通用式(6)计算流速，该公式是根据西藏古乡沟、云南蒋家沟和甘肃火烧沟199次泥石流3 000多阵次观测资料得出，资料来源于不同地区多种泥石流，其适应范围宽[8]，可用于本研究区泥石流的参数计算。

$$V_c = \frac{1}{n_c} \cdot H_c^{2/3} \cdot I_c^{1/2}, \quad (6)$$

式中：V_c 为泥石流断面平均流速(m/s)；n_c 为粘性泥石流的沟床糙率，可用内插法查表获得；H_c 为计算断面的平均泥深(m)，I_c 为泥石流流面纵坡(‰)，一般可用沟床纵坡代替。

泥石流的总量可用式(7)计算：

$$W_c = 19TQ_c/72 \quad (7)$$

式中，W_c 为一次泥石流的总量(m^3)，T 为泥石流历时(s)，Q_c 为泥石流峰值流量(m^3/s)。据调查访问，2007年9月4日尖姆普曲泥石流持续时间约40 min。

用式(5)和式(6)计算的尖姆普曲泥石流流速与流量，及使用式(7)计算的泥石流总量如表所示(表1)。

表1 尖姆普曲泥石流特征值

		式(5)	式(6)
α		2.23	
$1/n_c$			11
H_c/m		4.7	4.7
I_c/‰		177	177
过流面积/m^3		237.27	237.27
计算结果	V_c/(m/s)	13.41	12.98
	Q_c/(m^3/s)	3 181.2	3 081
	W_c/(10^4 m^3)	201.5	195.1

2.3 泥石流堵河计算

据临近尖姆普曲的原102道班地段附近帕隆藏布江加马其美水文观测断面资料，1953－1996年帕隆藏布江43年平均流量是420.8 m^3/s。其中，7月流量最大，44年里，7月平均流量是1 288.2 m^3/s[6]。因观测数据的欠缺，没能得到2009年9月4日泥石流暴发时的主河流量，但根据一般情况推测，此时主河流量应较平时流量大为增加，再考虑9月份帕隆藏布江的流量处于回落期，因此取7月平均流量来参考泥石流暴发时的主河流量，事后实测尖姆普曲入汇段帕隆藏布江流速约6 m/s。与计算得到的泥石流特征参数相比，泥石流流速、流量均较主河稍大，具有堵断主河的可能性。为具体分析堵河可能性大小及堵河程度，对该次泥石流的堵河特征进行计算。

通过对比分析，张金山得出的岷江上游泥石流堵河可能性的经验公式具有参数获取相对容易的优点，模型表达式体现出了主河与入汇泥石流的对比关系，具有明确的物理意义，故被本研究所采用。该公式通过实例分析及专家问卷调查，结合泥石流对主河的影响度的概念和表达式，并考虑数据取得的难易程度及可靠性而确立，其表达式为：

$$R = \frac{\rho_n Q_n J_n}{K_z Q_z J_z}。 \quad (8)$$

式中：R 为泥石流堵河危险度，数值越大表示堵断主河的可能性越大；ρ_n、Q_n 和 J_n 分别为泥石流容重、流量和泥石流沟床比降；K_z、Q_z 和 J_z 分别为入汇处主河宽度、流量及比降[9]。

经计算，尖姆普曲2007年“9·4”泥石流的堵河危险度为3.84(表2)，也就是说，支沟泥石流的能量、物质量在一定宽度的入汇口处表现出相对于主河的绝对优势，因此堵断主河的可能性非常大，这与实际是相符的。

表2 泥石流堵河危险性计算表

流域名称	流量/(m^3/s)	比降/‰	宽度/m	容重/(g/m^3)	堵河危险度
尖姆普曲	3 181.2	294		2.2	3.84
主河	1 288.2	6.67	62		

3 结论与建议

(1)尖姆普曲高差巨大、岸坡陡峻，给泥石流暴发提供了优越的能量条件，流域所在区域隆升强烈，地质构造复杂，岩石破碎，加上地震频发，风化强烈，给泥石流发育提供了大量的固体物质；流域所在区位于西南季风影响区，又为水汽通道，降水丰富且多暴雨，冰川活动也十分强烈，为泥石流暴发提供了丰沛的水源。

(2)根据调查访问，尖姆普曲内泥石流的主要激发水源为暴雨，若叠加增温和雨水潜热导致冰雪融水，则可产生大规模泥石流。根据实测资料进行了泥石流流速、流量等参数的计算，结果表明暴雨和冰雪融水组合条件较好时，激发的大规模泥石流可堵断帕隆藏布江。

(3)本文在调查、计算的基础上对尖姆普曲2007年9月4日的一场泥石流进行了初步的研究，泥石流特征参数的计算结果符合实际，堵河可能

性的计算结果也反映了真实的情况，因此本文所采用的方法可以用于该类泥石流的科学研究和工程实践，但在使用过程中应注意进行检验。

参考文献：

[1] 钟大赉，吴根耀，丁林. 藏东新生代陆内变形特征[M]. 广州：广东科技出版社，1998：335－364.

[2] 潘裕生. 青藏高原的形成与隆升[J]. 地学前缘，1999，6(3)：153－163.

[3] 张进江，季建清，钟大赉，等. 东喜马拉雅南迦巴瓦构造结的构造格局及形成过程探讨[J]. 中国科学：D 辑，2003，33(4)：373－383.

[4] 章振根，刘玉海，王天武，等. 南迦巴瓦峰地区地质[M]. 北京：科学出版社，1992.

[5] 吕儒仁，唐邦兴，朱平一. 西藏泥石流与环境[M]. 成都：成都科技大学出版社，1999.

[6] 中国科学院·水利部成都山地灾害与环境研究所，西藏自治区交通厅科学研究所. 川藏公路典型山地灾害研究[M]. 成都：成都科技大学出版社，1999.

[7] 中国科学院·水利部成都山地灾害与环境研究所，中国科学院兰州冰川冻土研究所，西藏自治区交通厅科学研究所. 川藏公路南线(西藏境内)山地灾害及防治对策[M]. 北京：科学出版社，1995.

[8] 国家防汛抗旱指挥部办公室，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，1994：180－181.

[9] 张金山，谢洪. 岷江上游泥石流堵河可能性的经验公式判别[J]. 长江流域资源与环境，2008，17(4)：651－655.

Debris-flow of Jianmupuqu Ravine in Tibet

Zhang Jinshan[1,2], Xie Hong[1,2], Wang Xiaodan[1] and Fan Jihui[2]

(*Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Processes, Institute of Mountain Hazards and Environmen, CAS, Chengdu* 610041, *China*)

Abstract: Jianmupuqu Ravine, a branch ravine of Parlung Zangbo River, is a large glacier debris-flow ravine. Super debris-flows have broken out in 2007, and have blocked Parlung Zangbo River and blocked off Sichuan Tibet highway which locate at the other side of the Parlung Zangbo River, the more serious is have taken casualties. Now, debris-flows with medium and/or small scales occur almost every year. The steep slope and the huge altitude difference of the Jianmupuqu Ravine provide predominant energy conditions for the debris-flow. The drainage basin is located in the fast uplifted area, where the complicated geologic structure, the cracked rock, and the frequent earthquake make the rocks experience strong weathering, thus plenty of granular materials are available for the formation of debris-flows. The region is located in the southwest monsoon influence area, and water vapor channel, abundant and concentrated rainfall, as well as the strong glacier activity provides water source for debris-flow. According to investigation and analysis, most debris-flows in the ravine are induced by the rainstorm, when the melted water is overlaid, the large scale debris-flows may occur. Parametric calculation such as the flow velocity and the runoff is conducted according to the monitoring data. The result shows that large debris-flows can be aroused when the rainstorm and the melted water are combined well, may be blocking off Parlung Zangbo River again.

Key words: debris-flow; Jianmupuqu Ravine; Tibet; the Parlung Zangbo river; Songrao village

《灾害学》被评为“RCCSE 中国核心学术期刊(A)”

《灾害学》编辑部 2015 年 5 月收到中国科教评价网、武汉大学中国科学评价研究中心、武汉大学图书馆的证书，在第四届《中国学术期刊评价研究报告(武大版)》(2015－2016 年)中，《灾害学》杂志被评为“RCCSE 中国核心学术期刊(A)”。

《灾害学》编辑部