

# 磨西河流域冰碛补给—暴雨型泥石流形成机制研究

铁永波, 李宗亮

(成都地质矿产研究所, 四川 成都 610081)

**摘要:** 冰碛补给—暴雨型泥石流是发育在高海拔冰缘山区的一种特殊灾害地貌过程, 隐蔽性较强, 故对这一灾害的认识尚不够全面和深入。基于此, 本研究在总结目前泥石流形成机理研究进展的基础上, 以发育有大量冰碛补给—暴雨型泥石流的贡嘎山东坡磨西河流域为例, 通过实地调查, 对冰碛补给—暴雨型泥石流的形成条件及形成过程机制进行了探讨, 提出了这类泥石流形成过程的 4 阶段模式: 清水汇流阶段→单颗粒固体物质起动阶段→掏蚀和侧蚀阶段→泥石流形阶段。最后, 对冰碛补给—暴雨型泥石流亟待深入研究的问题进行了分析和总结。

**关键词:** 冰碛补给; 暴雨泥石流; 形成条件; 过程机制

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)04-0195-05

中图分类号: S157.2, P642.33

## Formation Mechanism of Moraine Supplied—Rainstorm Debris Flow in Moxi Basin

TIE Yong-bo, LI Zong-liang

(Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu, Sichuan 610081, China)

**Abstract:** Moraine supplied-rainstorm debris flow is a unique geographical process that often can be seen in high elevation glacial margin area, the potential harm from the debris flow has not be recognized enough because of it's invisibility, and only a few researchers pay attention to it. Based on the debris flow mechanism progress and the field survey, this article took Moxi Basin as an example, where distributed many moraine supplied-rainstorm debris flow, and analyzed the forming factors and process, and presented the 4 steps of this debris flow process: branch water converging step→individual particle material starting up step→under-erosion and lateral erosion step→debris flow initiation step. Finally, this article summarized related problems about the mechanism of moraine supplied—rainstorm debris flow which need to be further studied.

**Keywords:** moraine supply; rainstorm debris flow; forming factor; process mechanism

泥石流是山区常见的地质灾害之一, 具有暴发突然、高流速及破坏力巨大等特点<sup>[1]</sup>。冰碛补给—暴雨型泥石流是发育在高海拔冰川区的一类特殊泥石流过程, 常被看作是冰川运动后的次生地地貌演化过程, 在时间尺度上可滞后于冰川过程数百万年。冰碛补给—暴雨型泥石流的物源主要来自于冰川运动所形成的丰富冰碛, 水动力条件主要来自于暴雨, 伴随着频率高、运动速度快(可达 200 km/h)、运动距离远(可波及下游数百公里)、冲出规模大(冲出量可达  $1.0 \times 10^6 \text{ m}^3$ ) 及危害严重等特点, 常被人们看作是泥石流灾害中的典型<sup>[1]</sup>。由于其水动力条件(暴雨为主, 叠加少量冰雪融水)的差异, 使其与冰川泥石流(冰川融水或冰湖溃决为主要水动力条件)具有不同的成因机制。由于早期人类活动相对较弱, 冰碛补给—暴雨

型泥石流的危害很少受到人们的关注。进入 20 世纪以来, 随着山区人口的剧增和人类活动的加剧, 在山区公路、铁路及水电站等基础设施建设中经常都遇到这类泥石流的危害<sup>[2]</sup>。例如, 1953 年 9 月我国西藏自治区境内的古乡沟暴发了规模罕见的暴雨泥石流, 一次泥石流冲出的冰碛物规模达数百万立方米, 造成帕隆藏布被堵塞成湖, 140 余人死亡的重大灾害<sup>[3-4]</sup>; 2005 年 8 月 11 日, 我国四川省境内磨西河流域内的磨子沟、燕子沟、南门关沟和雅家梗河 4 条沟同时暴发泥石流, 泥石流冲毁房屋、公路、淤埋多座水电站并堵塞大渡河, 致使 1 200 余名游客在海螺沟景区受阻, 造成数千万元的经济损失<sup>[5]</sup>; 1950 年 9 月 15 日, 意大利 Sissone 河一条支沟爆发冰碛补给—暴雨型泥石流, 致使 Sissone 河床被淤高 30 m, 1 处避难所

收稿日期: 2010-12-01

修回日期: 2011-01-19

资助项目: 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学)开放基金“5·12”汶川地震强震区域镇泥石流灾害风险评价体系与方法研究”(GZ2009-09); 中国地质调查局项目(1212010814038)

作者简介: 铁永波(1979-), 男(汉族), 云南省大关县人, 博士, 助理研究员, 主要从事环境地质与灾害地貌学等方面的研究。E-mail: tyongbo@cgs.cn。

被於埋, 导致 7 人失踪及 4 座桥梁被破坏的灾害<sup>[6]</sup>。此外, 这类冰碛物补给型泥石流灾害还在法国<sup>[6]</sup>、巴基斯坦<sup>[7]</sup>、英国<sup>[8]</sup>、瑞士<sup>[9]</sup>、俄罗斯<sup>[10]</sup>、秘鲁<sup>[11]</sup>、尼泊尔<sup>[12]</sup>等国的高山地区及我国的青藏高原、唐古拉山、横断山及天山等地区广泛分布<sup>[13]</sup>。

由冰碛作为补给物源、暴雨作为水动力条件的冰碛补给—暴雨型泥石流在高海拔冰川区极为发育, 且广泛分布, 很难开展全面、有效地治理, 为此, 开展冰碛补给—暴雨型泥石流的形成机制研究可为这类泥石流灾害防治及风险控制提供依据。虽然对这类泥石流灾害的防治已有较多的实例, 但对其形成过程机制的研究尚未深入, 研究这类泥石流的形成过程机制对丰富和完善该学科体系具有一定的理论意义。

## 1 研究区概况

磨西河位于四川省甘孜藏族自治州泸定县西南部, 位于贡嘎山东侧、大渡河右岸, 系大渡河一级支流, 流域面积 904 km<sup>2</sup>。磨西河流域位于川西高原与四川盆地的交接带上, 地处我国第一级阶梯与第二阶梯过渡地带, 经历了多次构造运动, 且新构造作用强烈, 为泥石流的发育及发生提供了有利的地形地貌条件。同时, 贡嘎山东坡的冰川作用在磨西河流域泥石流的发育及形成过程起着重要的作用, 尤其是第四纪冰川运动最为明显。根据研究, 磨西河流域内共有 3 次更新世冰期和全新世新冰期冰碛与小冰期冰碛, 第四纪冰川遗迹在磨西河流域分布比较广泛, 冰川堆积

地形和侵蚀地形配套<sup>[14]</sup>。

受冰川地貌的影响, 磨西河流域内发育有典型的冰碛补给—暴雨型泥石流沟 17 条, 且主要集中分布在雅家埂河的右岸, 沿贡嘎山东坡大致呈南北向分布。在这 17 条泥石流流域中, 流域面积大于 100 km<sup>2</sup> 的大型泥石流沟有 4 条, 分别是雅家埂河、燕子沟、海螺沟及南门关沟, 历史均多次暴发过大规模的泥石流灾害, 对当地社会经济的发展造成严重影响, 是流域内危害最大的 4 条泥石流沟。因此, 无论是从冰碛补给—暴雨型泥石流的典型性还是从这类泥石流的危害程度上看, 选择磨西河流域作为冰碛补给—暴雨型泥石流的研究区均具有较好的代表性。

## 2 冰碛补给—暴雨型泥石流的形成条件

### 2.1 物源补给的多样性与多段性

从物源补给特征上看, 冰碛补给—暴雨型泥石流物源补给具有两个典型的特征, 即物源补给方式的多样性和多段性。通过对冰碛补给—暴雨型泥石流的调查研究发现, 与土力类泥石流物源(位滑坡或崩塌)和水力类泥石流物源(沟床侵蚀)补给形式不同, 冰碛补给—暴雨型泥石流的物源补给同时伴随着土力类泥石流和水力类泥石流的物源补给特征(岸坡崩滑及沟道侵蚀), 既有冰碛物的整体滑坡或崩塌过程, 也有在重力、冻融和风化作用下崩落到沟道内的冰碛物在径流冲刷作用下的冲刷起动过程, 是两者综合作用的结果, 具有典型的补给类型多样性(图 1)。



a 冰碛以滑坡的形式成为泥石流的物源补给



b 沟道内堆积的冰碛被泥石流冲刷后的深槽

图 1 冰碛补给—暴雨型泥石流物源补给的多样性

冰碛补给—暴雨型泥石流的物源补给还有多段性的特征, 主要表现在这类泥石流的物源补给不像其它泥石流物源补给那样具有相对集中性, 而是在整个流域范围内持续补给。根据目前的泥石流流域分区, 主要有两种分类法, 即“三分法”(形成区、流通区和堆积区)和“四分法”(清水区、物源区、流通区和堆积

区), 按照这两种分类, 泥石流的物源要么来自一处或几处滑坡或崩塌产生的固体物源(土力类泥石流), 或来自某一特定长度沟道内的松散固体物质(水力类泥石流)。但冰碛补给—暴雨型泥石流的物源补则会表现出补给段长且多的特点, 即从物源区到流通区均可有物源加入, 呈多段补给或连续补给, 补给段长度可达

数公里。例如,磨西河流域典型的冰碛补给—暴雨型泥石流沟的南门关沟冰碛补给段范围从上游一直到沟口,长度约 25 km;燕子沟冰碛补给段长度约 30 km。

## 2.2 水源补给快速性与叠加性

自然界的多数泥石流发生的水动力条件均依靠降雨,当降雨汇流形成沟道径流的时候,它可以通过水流的动压力用而使固体物质产生运动,并会形成“铲蚀效应”<sup>[15-16]</sup>和“消防水管效应”<sup>[17-18]</sup>。冰碛补给—暴雨型泥石流的水动力条件主要来自暴雨形成的沟道径流,同时还叠加有冰雪融水,具有汇流快速和流量叠加的特点。

受到冰川地貌的影响,磨西河流域内地形陡峭,

冰蚀地貌发育,冰峰林立,角峰、鳍脊和槽谷随处可见。由于受到冰川运动过程中的强烈侧蚀和刨蚀,使得泥石流的汇流区基岩裸露,且多呈漏斗状,极有利于地表径流的汇流并快速成为沟道径流(图 2a),成为泥石流形成的水动力条件。同时,由于受区域地质构造的影响,贡嘎山的隆升导致流域内几条大的冰碛补给—暴雨型泥石流流域上游均有冰川覆盖,在暴雨发生的同时,流域内的冰川融水也成为泥石流水动力补给的一个不容忽视的因素(图 2b)。

因此,其它地区的暴雨型泥石流汇流条件相比,冰碛补给—暴雨型泥石流具有汇流更集中,更迅速,汇流量更大的特点。



a 裸露的漏斗状汇流区有利于地表径流的迅速汇集



b 上游冰雪融水可加大流域的汇流量

图 2 冰碛补给—暴雨型泥石流水源补给特征

## 2.3 流域地貌发育的非线性特征

地质构造对地貌的发育有着明显的控制作用,如山脉、河流的展布皆受构造的控制,作为特殊的灾害地貌现象,泥石流沟谷的发育及演化受构造运动的影响也较为明显。通常情况下,在构造稳定、构造活动梯度小的地区,沟道下切的速度较为缓慢,泥石流的发育过程也就相对缓慢,反之则较快<sup>[19]</sup>。从区域构造上看,我国西部三大断裂带之一的鲜水河断裂带南延部分(磨西断裂)从流域内穿过,使得区内构造运动强烈,尤其是新第三纪以后青藏高原的强烈隆升使得地表上升速率较快,仅在 1982—1987 年地表隆升的年速率值达到 2~4 mm/a,最为直接的证据就是贡嘎山的耸立<sup>[20]</sup>。地质构造作用使得磨西河流域内冰碛补给—暴雨型泥石流流域具备了较大的高差,主沟纵比降大,为这类泥石流的发生提供了有利的地形地貌条件。

通过对磨西河流域内分布的 51 条泥石流沟的流域面积、主沟长度及主沟纵比降的统计特征分析显示(包含 17 条冰碛补给—暴雨型泥石流),流域内 51 条泥石流沟数量与主沟纵比降、流域面积及主沟长度之间均存在这自相似性。其中,泥石流沟数量与主沟纵

比降的分维数为 2.56,与流域面积的分维数为 0.45,与主沟长度的分维数为 0.63。从分析结果可以看出,分维数最大的是主沟纵比降,这表明流域内泥石流沟谷正处于强侵蚀演化阶段,泥石流暴发的规模和频率大,危险性较高。这也可以从近年来磨西河流域冰碛补给—暴雨型泥石流的频发生事件予以佐证。例如,海螺沟三号营地后山黄崩溜小沟分别于 1976, 1989, 1990 年, 1996(2 次), 2003, 2005 和 2010 年(2 次)发生过泥石流,频率极高<sup>[21-22]</sup>;小南门关沟几乎每年都会发生中到大规模的泥石流,其中 2005 2009 和 2010 年均发生大规模泥石流,对当地的旅游设施造成严重破坏<sup>[5, 21]</sup>。

## 3 冰碛补给—暴雨型泥石流形成过程分析

通过对冰碛补给—暴雨型泥石流的形成的 3 个主要特征进行分析可以看出,冰碛补给—暴雨型泥石流在孕育环境、物源补给类型与方式、水动力条件及地形地貌演化方面都与其它地区、不同物源补给类型(方式)、不同水动力条件的泥石流有显著的差异。结

合目前较为特殊的汶川震区泥石流特征, 可将冰碛补给—暴雨型泥石流形成的基本特征与其它地区的泥

石流进行对比分析, 通过它们的相似性和差异性能更好地了解该类泥石流的形成特征(表 1)。

表 1 冰碛补给—暴雨型泥石流与其它泥石流的形成特征的对比

泥石流类型	泥石流发育区	主要物源补给类型	物源补特征	水动力条件	地貌类型
冰碛补给—暴雨型	高海拔冰缘区	冰碛	可识别性(已存在的冰碛)、有一定胶结性、相对稳定	暴雨+冰川融水	冰蚀地貌+构造地貌
其它类型	其它地区	滑坡或崩塌积物	突发性(滑坡)或可识别性(沟道)、相对稳定	暴雨	构造或侵蚀地貌
汶川震区泥石流	汶川震区	滑坡或崩塌积物	可识别性(已存在的松散体)、松散、极不稳定	暴雨	构造地貌

虽然影响冰碛补给—暴雨型泥石流的主要条件与其它类型泥石流的形成条件(物源、水动力及地形条件)基本一致, 但这些主要条件的补给类型及方式仍存在着显著的差异, 这也决定了这类泥石流必然与其它类型泥石流的形成过程机制不同。通过对冰碛补给—暴雨型泥石流暴发后的调查可以将其形成过程概括为: 清水汇流 $\rightarrow$ 单颗粒固体物质起动 $\rightarrow$ 掏蚀和侧蚀 $\rightarrow$ 泥石流形成共 4 个阶段。(1) 清水汇流阶段。清水汇流往往伴随着多数暴雨泥石流形成的前期阶段, 是泥石流起动必须的水动力储蓄过程。和其它类型泥石流相同, 冰碛补给—暴雨型泥石流的清水汇流阶段也需要前期暴雨的补给, 不同的是, 由于受上游冰蚀地貌的影响, 裸露的地表会使得雨水迅速汇集, 相比之下, 其汇流所需的时间相对较短(图 2a)。此外, 冰川融水的汇入过程使得这类泥石流的水动力条件具有混合补给的特点(图 2b)。(2) 单颗粒固体物质起动(夹砂水流)阶段。单颗粒固体物质的起动阶段是在沟道径流冲刷作用下, 沟道内的单个松散冰碛物发生运动, 主要是覆盖在沟道冰碛物表层的固体颗粒, 在水力类泥石流研究中这层固体物质也被叫做“粗化层”。单颗粒固体物质的起动使得堆积在沟道内冰碛物失去保护层, 有利于后一阶段的沟道侵蚀, 为沟道内固体物源的补给提供条件。这种现象在调查中可以明显看到, 在沟道常态水流的冲刷作用下, 沟道内的固体物质表层存在明显的粗化层(图 1a)。(3) 掏蚀和侧蚀阶段。掏蚀和侧蚀阶段是泥石流形成过程中的重要环节, 它表现为沟道径流量和补给物源量显著增大。对于冰碛补给—暴雨型泥石流而言, 这是泥石流形成前期物源起动和后期物源补给的重要过程, 贯穿着泥石流发生及运动的全过程。掏蚀过程主要是径流对沟道底部进行垂向侵蚀, 使沟道内堆积的固体物质起动, 成为固体物源; 侧蚀过程是径流对沟道两岸冰碛进行横向的掏蚀作用, 使得岸坡冰碛

基础被掏空, 进而以坍塌的形式进入沟道, 成为泥石流的补给物源。(4) 泥石流形成(整体起动)阶段。泥石流形成阶段同时伴随着沟道径流集中、沟道侵蚀和岸坡坍塌的过程, 该阶段是冰碛补给—暴雨型泥石流发生的标志。泥石流的形成使得沿途的松散固体物质补给量不断增加, 沟道的掏蚀作用和岸坡的坍塌作用过程显著加强, 为维持泥石流的持续运动提供必要条件。根据在磨西河大木干沟冰碛补给—暴雨型泥石流的调查显示, 一次泥石流过程对沟道的掏蚀和侧蚀从上游到沟口皆有发生, 局部沟段下切深度可达 5 m, 单边岸坡坍塌可达 25 m 宽, 可见这类泥石流整体起动时具有很强的侵蚀能力。

## 4 结论

由于冰碛补给—暴雨型泥石流发育环境的隐蔽性, 目前对这一形成过程较为特殊的灾害现象认识尚不够深入, 对其形成机理的研究也较为薄弱。随着山区经济建设与发展进程的加快, 冰碛补给—暴雨型泥石流对人类工程活动的影响也趋于严重, 且潜在风险也在逐渐增大。因此, 需要更加深入认识冰碛补给—暴雨型泥石流灾害的形成机理及成灾规律, 为山区经济建设提供安全保障。

(1) 冰碛补给—暴雨型泥石流物源破坏模式研究。在实际调查中发现, 冰碛补给—暴雨型泥石流的物源(冰碛物)的破坏具有“复合式”的特征, 沟道径流对两岸冰碛物坡脚掏蚀的作用使得岸坡冰碛物坡脚被掏空, 在暴雨或重力作用下发生坍塌, 这是冰碛补给—暴雨型泥石流物源积累最为常见的破坏方式。此外, 冰碛物的破坏还受到冻融作用的影响, 尤其是在冬季, 冰雪的冻融作用使得冰碛物沿沟道临空面产生崩落, 堆积在沟道内, 成为泥石流的物源。为此, 深入开展冰碛物在暴雨、沟道径流及冻融复合影响下的破坏机理及模式研究, 对认识冰碛补给—暴雨型泥石

流形成的过程机制及预测预报具有重要的实际意义。

(2) 冰碛补给—暴雨型泥石流形成机理研究及验证。冰碛补给—暴雨型泥石流的形成过程伴随着土力学和水力学过程,其形成机理较为复杂。虽然各种影响因素对冰碛补给—暴雨型泥石流物源的影响可通过地貌特征进行识别,但其作用的内在机制却很难确定,这就需要通过一系列土力学和水力学实验完成,以深入认识这类泥石流的形成机理。同时,现有的多种泥石流起动机理模式是否能用来解释冰碛补给—暴雨型泥石流的形成机理,如“铲蚀”机理、“消防管效应”、起动流速及颗粒暴露度等,仍需要开展相关实验予以验证,这也是认识这类泥石流形成机理及防治的关键。

(3) 冰碛补给—暴雨型泥石流预警的水文学模型研究。由于冰碛补给—暴雨型泥石流发育环境的隐蔽性及其分布范围较广,开展全面有效的治理很不现实,为此,开展有效的预警预报就显得十分必要。已有的研究表明,某些沟道径流参数(流速或流量)对固体物质的起动有种关键性的控制作用。因此,若能通过相关实验确定这些关键水文参数的临界值,并查清该类泥石流起动与水文学参数相互作用特征和规律,构建冰碛补给—暴雨型泥石流起动与径流特征参数变化的水文学模型,为该类泥石流的预警预报提供科学依据。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 康志成,李焯芬,马蔼乃,等.中国泥石流研究[M].北京:科学出版社,2004.
- [2] Marta C, Sara I, Giovanni M, et al. Recent debris flow occurrences associated with glaciers in the Alps[J]. *Global and Planetary Change*, 2007, 56: 123-136.
- [3] 杜榕桓,李鸿璉,王立伦.西藏古乡沟冰川泥石流的形成与发展[J].中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊,1985(4): 1-18.
- [4] 朱平一,罗德富,寇玉贞.西藏古乡沟泥石流发展趋势[J].山地研究,1997,15(4): 296-299.
- [5] 陈晓清,崔鹏,陈斌如,等.海螺沟050811特大泥石流灾害及减灾对策[J].水土保持通报,2006,26(3): 123-126.
- [6] Evans S G, Clague J J. Recent climatic change and catastrophic geomorphic processes in mountain environments

[J]. *Geomorphology*, 1994, 10: 107-128.

- [7] 蔡祥兴,李碱,李念杰.帕尔提巴尔沟冰川泥石流的成因及其发展趋势[J].冰川冻土,1984,2(1): 22-25.
- [8] Clague J J, Evans S G. A review of catastrophic drainage of moraine-dammed lakes in British Columbia[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2000, 19: 1763-1783.
- [9] Huggel C, Haeberli W, Kobb A, et al. An assessment procedure for glacial hazards in the Swiss Alps[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2004, 41, 1068-1083.
- [10] 费莱施曼 C M. 泥石流[M]. 姚德基,译.北京:科学出版社,1985: 242-266.
- [11] Ames A. A documentation of glacier tongue variations and lake development in the Cordillera Blanca, Peru. Z. Gletscherkd[J]. *J. Glazialgeol.*, 1998, 34: 1-36.
- [12] Yamada T. Glacier lake and its outburst flood in the Nepal Himalaya, Data Center for Glacier Research[M]. Tokyo Monograph: Japanese Society of Snow and Ice, 1998.
- [13] 李鸿璉,蔡祥兴.中国冰川泥石流的一些特征[J].水土保持通报,1989,9(6): 1-9.
- [14] 苏珍,施雅风,郑本兴.贡嘎山第四纪冰川遗迹及冰期划分[J].地球科学进展,2002,17(5): 640-647.
- [15] Takahashi T. Mechanical characteristics of debris flow[J]. *J. Hyd. Div. Proc.*, 1978, 104(8): 1153-1169.
- [16] 姚德基,商向朝.国外泥石流试验研究的若干基本问题[J].地理译文集:泥石流,1980(4): 26-33.
- [17] Coe J A, Glancy P A, Whitney J W. Volumetric analysis and hydrologic characterization of a modern debris flow near Yucca Mountain Nevada[J]. *Geomorphology*, 1997, 20(1/2): 11-28.
- [18] Griffiths P G, Webb R H, Melis T S. Frequency and initiation of debris flows in Grand Canyon, Arizona[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109: 321-336.
- [19] 威廉斯.第四纪环境[M].刘东生,译.北京:科学出版社,1997.
- [20] 郑本兴,马秋华.贡嘎山区全新世冰川变化、气候变化与河流阶地发育[J].地理学报,1994,46(1): 500-508.
- [21] 吕儒仁.贡嘎山区一次特大泥石流[J].冰川冻土,1992,14(2): 174-177.
- [22] 吕儒仁,高生淮.贡嘎山海螺沟冰川冰舌地段的泥石流[J],冰川冻土,1991,14(1): 73-80.