

# 川西高原的岩土体的冻融破坏类型及其灾害效应

铁永波, 白永健, 宋志

(成都地质矿产研究所/中国地质调查局成都地质调查中心, 四川成都 610081)

**摘要:** [目的] 探明川西高原冻融过程对岩土体的破坏类型、成因机制及其产生的灾害效应。[方法] 通过对川西高原道孚县全县境内的地质灾害详细调查, 对冻融破坏类型进行了室内统计分析, 并在此基础上总结了冻融过程所产生的灾害效应。[结果] 提出了冻融过程产生“剥皮效应”、滑坡的“浅表层效应”及泥石流物源的“碎化效应”; 发现川西高原上的泥石流流体携带块石含量较少且粒径多小于 1 m, 其成灾模式多以埋破坏为主; 县境内约 70% 的滑体厚度小于 20 m 滑坡, 多以浅层小规模为主, 危害相对较小。[结论] 道孚县境内发育的泥石流具有相对较弱的冲击力, 防治时应以疏导工程为主; 道孚县境内发育的滑坡具有规模相对小的特点, 且易在冰雪融水或降雨作用下产生滑动, 地表排水对其稳定性的维持极为重要。

**关键词:** 冻融过程; 碎化作用; 灾害效应; 川西高原

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)02-0241-05

中图分类号: S157.1, P694

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.02.046

## Damage Types and Hazards Effects from Freezing—Thawing Process in Plateau of Western Sichuan Province

TIE Yongbo, BAI Yongjian, SONG Zhi

(Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources/Chengdu

Center of China Geological Survey, Chengdu, Sichuan 610081, China)

**Abstract:** [Objective] To Study the damage types and hazard effects from freezing—thawing process and the mechanism of geo-hazards/soil erosion in plateau of Western Sichuan Province. [Methods] On the basis of the specific survey of geological hazards in Daofu County of the plateau of Western Sichuan Province, the hazard effects of freezing and thawing were analyzed and summarized, and different damage types were counted. [Results] We put forward several damage effects as the “peeling effect” of freezing—thawing, the “surface effect” of landslide and the “fragmentation effect” of debris flow source. The carried stones of debris flow were less than 1 m in diameter. Therefore, burying was the main damage type of debris flow. More than 70% of landslides had the depth less than 20 m, the volume of these landslides were relative smaller, and the potential hazards from landslide is lower. [Conclusion] The damage power from debris flow in the plateau of Western Sichuan Province is weak, the prevention engineering should be consider as drainage oriented types. The landslide in the plateau of Western Sichuan Province had small volume, and this type landslide can slide easily under the lubrication of snow melt water or rainfall, and keep the slope flow away from landslide is important to the stability of this type of landslide.

**Keywords:** freezing—thawing process; fragmentation effect; hazards effects; the plateau of Western Sichuan Province

冻融是指岩土体由于温度降到零度以下和升至零度以上而产生冻结—融化的物理地质作用和现象。在寒冷气候条件下, 土壤或岩层中冰在白天融化, 晚上冻结, 或者夏季融化, 冬季冻结。这种融化—冻结

过程称为冻融作用<sup>[1]</sup>。它主要见于冰川作用区、高山区和冻土区。冻融区温度周期性地发生正负变化, 岩石裂隙或土层中的水体和冰不断发生相变和位移, 使岩土体发生冻胀、融沉、流变等一系列应力变形, 使其

收稿日期: 2014-01-15

修回日期: 2014-04-10

资助项目: 国家自然科学基金项目“冻融条件下冰碛补给型泥石流物源汇集机制研究”(41101086); 中国地质调查局公益性调查项目(12120113010200)

第一作者: 铁永波(1979—), 男(汉族), 云南省大关县人, 博士, 副研究员, 主要从事环境地质和灾害地貌学研究。E-mail: tyongbo@cgs.cn。

成为松散土体,稳定性下降<sup>[2]</sup>。冻融作用使松散沉积物受到扰动与再分选,导致岩土体沿坡面产生整体运动,并在沟道内形成大量的松散固体物源,为滑坡、崩塌及泥石流等地质灾害的发生提供了必要条件。

受到自然条件的影响,川西高原面昼夜温差大,冻融作用强烈。而且,成土环境极不稳定,昼夜的冻融和干湿交替以及季节间的冻融和干湿交替,都极易破坏表层土体的完整性。川西高原面多数草甸区分布在海拔 3 000 m 以上,尤其是海拔超过 3 500 m 以上,冻融作用较为强烈。在道孚县境内,从气温的年度特征上看,年均温差极大,一年中最高温度为 31 ℃,最低温度可达 -21.9 ℃,年均温差为 52.9 ℃。从季节性温差特征上看,春、夏、秋三季的昼夜温差大,其中月最高温度出现在 7 月份,为 15.8 ℃。最低温度出现在 1 月份,为 -20 ℃,季节性温差可达 35.8 ℃。较大的温差导致一些低海拔地区(3 500~3 800 m 之间)产生季节性的冻融,而高海拔地区(如海拔大于 3 800 m 以上)则昼夜和季节性冻融均有出现。近年来,因冻融过程直接或间接诱发的各种地质灾害对当地生产建设和人民生活造成显著危害。为此,探索川西高原冻融过程对岩土体的破坏类型、成因机制及其产生的灾害效应,对这类发育在特殊高寒地区的地质灾害形成机理研究及防灾减灾具有重要的理论和实践意义。

## 1 冻融破坏类型

自然环境条件是决定冻融过程是否发生和冻融强度及深度的重要先决条件,而冻融过程则是影响川西高原面地质灾害发育类型、数量及规模的一个重要因素。环境条件对冻融过程的影响包括海拔高度、坡向(阳坡和阴坡日照的差异)、地表植被覆盖类型与覆盖率、土壤湿度及温度等。在川西高原面上,由于地表植被多以草丛和灌木为主,覆盖类型和覆盖率基本一致,故地表植被对冻融的影响差异不大。海拔高度对冻融土体的厚度及冻融强度影响较为明显,在海拔 3 800 m 的地区,调查时测量的冻融剖面厚度多介于 5~15 cm 之间,而随着海拔高度的增加,在 4 000 m 海拔的区域,冻融土体的厚度平均增加到 35 cm。由于对川西高原土体产生冻融时的温度缺少观测数据,故本研究对产生冻融过程中土体温度的变化过程未进行阐述。

### 1.1 表层土体冻融剥离

在川西高原面上,大部分地区都被表层土体覆盖。这些表层土体具有 35 cm 左右的腐殖层,为草被的发育提供了有利条件。川西高原面上的表层草地

土多由残坡积土组成,表层土体中有机质和土壤颗粒等物质含量及特性与下层土体具有较大的差异,在冻融过程中表层土体和下层土体的胀缩性就会存在一定的差异,从而引起表层草被土体与下层土之间形成一个冻融垫层。在冻胀和融沉的过程中沿垂直方向上反复发生胀—沉交替,最终使得表层土体与下层土体分裂,并成为松散固体物质堆积在坡面上。在径流的作用下启动而成为泥石流的物源。川西高原表层草被土体被“剥皮”,并呈现出鱼鳞状的斑块特征,是冻融作用后的典型表现形式(图 1a)。

### 1.2 基岩的冻胀碎裂

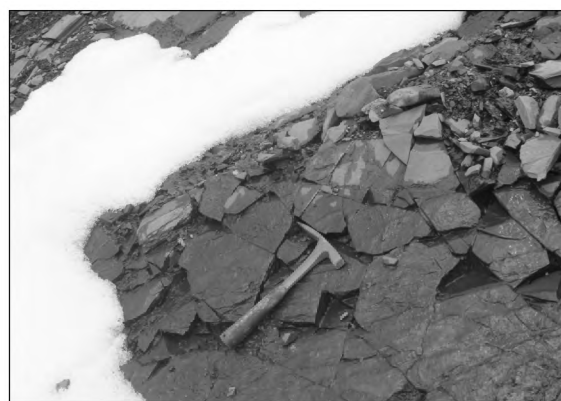
岩石风化作用有物理风化、化学风化和生物风化。就川西高原而言,岩石风化主要是物理风化中的冻融风化作用。基岩因其节理中水分在冻结时体积膨胀而使岩石破裂,是造成川西高原上岩石破坏的最主要外营力。如道孚县七美乡及鲜水镇白日山等地的山顶上堆积着大量松散的砂板岩块,就是因冻融作用破坏后形成的(图 1b)。冻融风化作用是由于岩体中的水分冻胀而使岩体的完整性遭到破坏。此外,冻融作用通过岩石矿物成份的冻胀系数差异而引起岩石破坏。在川西高原面上,基岩裂缝因冻融循环作用而扩张,还会形成寒冻石流类特殊地貌。其特征为:在斜坡上,冻融作用形成的地表裸露块石呈现似流体状的分布特征,并堆积成一定宽度和长度,看上去就像由块石流动而形成的石流(“寒冻石流”)(图 1c)。寒冻石流多发生在严冬季节。川西高原的高山阴坡发生较为普遍<sup>[3]</sup>。寒冻石流的破坏机理跟基岩的冻胀碎裂极为相似。不同的是寒冻石流位于相对较弱的冻融作用区,地貌部位分布相对较低,形成的石块粒径多介于 0.5~1.5 m。而冻胀碎裂则主要发育在相对较强的冻融作用区,其地貌部位分布较高,海拔高度多 >4 000 m,形成的岩块石粒径多介于 5~50 cm,冻融土体的厚度多大于 35 cm。

### 1.3 沟壁的冻融垮塌

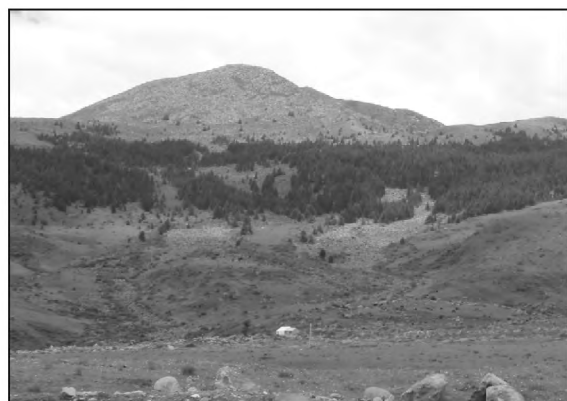
沟壁上部土体融化时呈片状或块状崩塌的现象,多发生在沟头跌水或沟壁陡峭处。沟壁冻结从上方和侧面两个方向进行。土体上部的冻胀量大于下部,冻裂也比下部宽,致使土体向沟道一侧倾斜。当春季融化时,上部融化的速度远远快于下部。土体因抗剪强度迅速降低而产生崩塌<sup>[3]</sup>。此类冻融侵蚀过程多持续整个冻融期,冻融土体的厚度多介于 5~10 cm 之间。高峰期在春、秋两季。通常是产生松散层后迅速融泻,而后又产生新的松散层,如此反复进行(图 1d)。



a 冻融引起的表层土体破坏剥离



b 基岩在冻融下的破坏形态特征



c 冻融作用形成的寒冻石流



d 冻融引起的沟壁沿临空面垮塌

图 1 川西高原面冻融过程引起的岩土体破坏特征

#### 1.4 冻融泥流

山坡上冻土消融后,活跃层的稳定受到破坏,不断向下蠕动,这一过程称为冻融泥流。冻融泥流多发生在陡坡上<sup>[4]</sup>。冻土融化过程中,外界水分向土壤中入渗,土体重量增大,而土体融化时间和空间上的差异,致使解冻层和冻土层之间形成一个滑动面。随着土体重量加大,沿滑动面方向的滑动力也随之增大。当滑动力超过滑动面上的阻滑力时,土体就沿着滑动面向下蠕动。冻融产生的泥流运动距离主要取决于所在的地形条件,尤其是坡度条件对其影响较为显著。若坡度较缓,泥流的运动距离会相对较短,从数厘米到数米;若坡度较陡,则泥流运动距离则会较远。冻融泥流蠕动后,产生垂直剪切和沿滑动面移动两个过程,结果使山坡形成一级级的台阶状和波浪起伏状的特殊坡面形态。

## 2 冻融过程产生的灾害效应

### 2.1 表层土体的“剥皮效应”

在垂直方向和水平方向的冻融作用破坏作用下,坡体的表层土壤因结构疏松而在重力作用下沿坡面滑动,形成斑块状的裸露面,似高原面的表层土皮被

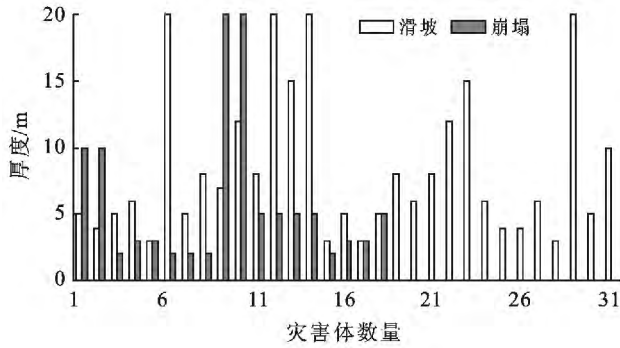
剥落一样。当表层土体产生滑动后,便会提供新的裸露空间,其原覆盖层以下的土体得以出露。这些裸露的土体在反复的冻融作用下又继续发生循环破坏,使得土体不断滑落,并在坡脚堆积大量的松散土体,为泥石流的发育提供物源件。川西高原面冻融面积较大,表层土体产生剥皮后的松散固体物质的分布零散。川西高原面的泥石流物源分布的非集中性和广泛性在一定程度上增加了对这类泥石流的预测评价难度。

### 2.2 块体灾害的“浅表层效应”

受到川西高原面海拔高度及温度差异强度的影响,冻融过程的垂直深度受到一定的限制。故川西高原面上发育的滑坡及不稳定斜坡多以浅表层为主,最大厚度一般约为 20 m(图 2)。通过对道孚县境内 31 处滑坡和 42 处不稳定斜坡的平均厚度统计结果显示(表 1),滑坡中,最厚的滑坡体厚度为 20 m,滑坡体厚度 > 20 m 的只有 9 处,占总数的 29%(其中厚度为 20 m 的有 4 处,厚度介于 10~20 m 之间的滑坡有 5 处);其余 22 处厚度 < 10 m,约占总数的 71%。在 42 个不稳定斜坡中,厚度 > 10 m 的有 14 处,占总数的 33%;厚度 < 10 m 的有 28 处,占总数的 67%。

表 1 道孚县滑坡与不稳定斜坡平均厚度统计

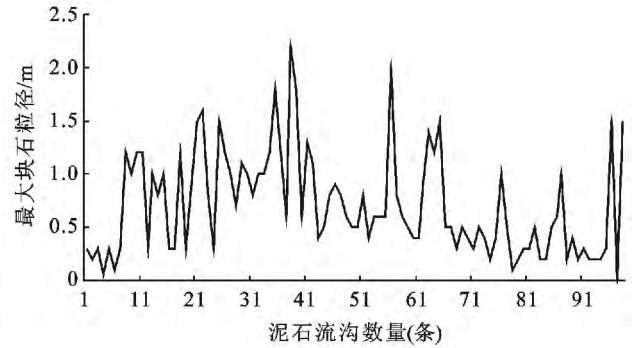
灾害类型	平均厚度/m	数量/处	所占比例/%
滑 坡	>10	9	29
	<10	22	71
不稳定斜坡	>10	14	33
	<10	28	67



a 滑坡及崩塌数量与厚度关系

### 2.3 泥石流物质结构的“碎化效应”

冻融风化侵蚀过程在川西高原面产生的直接结果就是使得原本坚硬的基岩解体破碎,基岩表层脱离,在坡面上形成碎石状的块体堆积。岩土体碎化过程产生的直接结果就是为地质灾害的形成提供小粒径的松散固体物质。



b 泥石流数量与沟口最大块石粒径统计

图 2 道孚县不同类型地质灾害特征统计

冻融作用使得岩土体碎化的特征主要产生以下几种灾害效应。

(1) 低临界启动效应。泥石流体中的固体物质占有重要地位。固体物质发生启动并产生持续的运动,就标志着泥石流的形成。固体物质往往需要一定的临界条件才能满足其启动条件,如沟道径流量、流速、径流深度等等。通常情况下,固体物质的粒径越大,其启动时所需的临界流速、流量及径流深度等参数值的需求也就越大,反之则小。在川西高原面上,由于冻融作用导致的岩土体产生碎化过程,使得固体物质的粒径相对较小。故这类泥石流在形成时对降雨临界值条件的要求也就较低。

(2) 堆积体小粒径效应。通过对道孚县境内道

孚县 98 条泥石流沟沟口堆积物最大粒径统计结果显示,沟口粒径最大为 2.2 m,约 80%泥石流冲出的块石最大粒径均<1 m,约 49%的块石最大粒径<0.5 m(图 2)。

这类泥石流体中的块石粒径较小的特征与内地高山峡谷区块径可达数十米的泥石流冲出堆积物形成了鲜明的对比。从川西高原面泥石流冲出物的特征可以分析,这些地区泥石流灾害的破坏主要以淤埋为主,而其冲击破坏力要远比其它地质环境条件下发育的泥石流破坏力小许多(图 3)。此外,由于这类泥石流的小粒径固体物质含量较多,在运动过程中流体的黏稠度相对较大,这在一定程度上导致泥石流冲出距离相对较短。



图 3 典型冻融区泥石流冲出物粒径的碎化特征

(3) 泥石流流域的“混合分区效应”。通常情况下,泥石流的流域分区有三分法(形成区、流通区及堆积区)和四分法(清水区、物源区、流通区及堆积区)。而在川西高原面上,由于受到冻融作用的影响,泥石流物源具有分散补给的特点,且多以沟道岸坡的冻融坍塌为主,整个流域的沟道两岸均是物源补给区,使得泥石流的流通区被弱化,很难将其与形成区和堆积区进行明显的区分。为此,多数泥石流沟的流域分区只能进行“二分法”,即分为形成流通区—堆积区或形成区—流通堆积区。在泥石流评价及开展工程防治方案的确定过程中,划分出明确的泥石流形成区流通区和堆积区极为重要。因为在泥石流评价时,需确定危险区的大致范围,为泥石流危险区内的工程建设及人类工程活动提出针对性的措施,以降低泥石流可能带来的潜在危害。而川西高原面上泥石流的混合分区特征使得我们很难对泥石流的形成特征及机制进行深入的了解,这在一定程度上降低我们对泥石流潜在危害的评价精度。

### 3 结论

(1) 通过川西高原冻融作用对泥石流发育的影响发现,泥石流形成区的岩土体在冻融作用下形成一

种典型的“碎化效应”。对这一地区岩土体碎化效应的分析对深入认识这类泥石流的物源区、物源类型、破坏模式及形成机理有重要的指导意义。同时,冻融过程产生的碎化效应还使得高原面上泥石流形成时物源启动所需的临界雨量条件相对较低。此外,因携带少量小粒径块石而造成的泥石流冲击破坏作用不显著,使得其破坏主要以淤埋为主,可为川西高原面泥石流的防治工程设计提供理论依据。

(2) “剥皮效应”的提出,可为泥石流物源量估算及危险性评价提供重要参考。根据产生剥皮效应区的面积和厚度,可以估算一次泥石流可能冲出的最大规模;另一方面,剥皮区的确定可为通过控制泥石流物源从而实现抑制泥石流发生的目的提供参考。

#### [ 参 考 文 献 ]

(上接第 240 页)

- [1] 邱国庆,刘经仁,刘鸿绪,等.冻土学辞典[M].甘肃兰州:甘肃科学技术出版社,1994.
- [2] 程国栋.青藏铁路工程与多年冻土相互作用及环境效应[J].中国科学院院刊,2002,17(1):21-25.
- [3] 景国臣.冻融侵蚀的类型及其特征研究[J].中国水土保持,2003(10):17-18.
- [4] 靳德武,孙剑锋,付少兰.青藏高原多年冻土区两类低角度滑坡灾害形成机理探讨[J].岩土力学,2005,26(5):774-778.
- [5] 程先富,余芬.安徽省土壤侵蚀空间分布及其与环境因子的关系[J].地理研究,2010,29(8):1461-1470.
- [6] 蔡江东.深部采动对塌陷盆地周边土体影响的空间效应研究[J].岩土力学,2011,32(2):401-406.
- [7] 王辉,王全九,邵明安,等.前期土壤含水量对黄土坡面氮磷流失的影响及最优含水量的确定[J].环境科学学报,2008,28(8):1571-1578.
- [8] 李德成,张甘霖,龚子同.我国砂姜黑土土种的系统分类归属研究[J].土壤,2011,43(4):623-629.
- [9] 张义丰,王又丰,刘录祥.淮北平原砂姜黑土旱涝(渍)害与水土关系及作用机理[J].地理科学进展,2001,20(2):169-176.
- [10] 孟庆俊.采煤塌陷地氮磷流失规律研究[D].江苏徐州:中国矿业大学,2010.
- [11] 吴希媛,张丽萍,张妙仙,等.不同雨强下坡地氮流失特征[J].生态学报,2007,27(11):4576-4582.
- [12] 李裕元,邵明安,郑纪勇,等.降雨强度对黄绵土坡地磷流失特征影响试验研究[J].农业工程学报,2007,23(4):39-46.
- [13] van der Salm C, Dolfing J, Heinen M. Estimation of nitrogen losses via denitrification from a heavy clay soil under grass[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2007,119(1-2):311-319.
- [14] 陈欢,李玮,张存岭,等.淮北砂姜黑土酶活性对长期不同施肥模式的响应[J].中国农业科学,2007,23(4):39-46.
- [15] 王道中,郭熙盛,何传龙,等.砂姜黑土长期定位施肥对小麦生长及土壤养分含量的影响研究[J].土壤通报,2007,38(1):55-57.