

张小刚, 杨天军, 陈伟. 藏东南溜砂坡的发育特征与防治[J]. 灾害学, 2014, 29(1): 47-51. [Zhang Xiaogang, Yang Tianjun and Chen Wei. Development Characteristics and Prevention of the Sand-Sliding Slope in South-East Tibet[J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(1): 47-51.]

藏东南溜砂坡的发育特征与防治^{*}

张小刚^{1,2}, 杨天军³, 陈伟²

(1. 中国科学院地表过程与山地灾害重点实验室, 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; 3. 西藏自治区交通工程质量安全监督局, 西藏 拉萨 850000)

摘 要: 溜砂坡灾害是我国西部山区一种常见的地质灾害, 属于广义滑坡中一种特殊类型。我国西藏东南部的溜砂灾害十分发育, 危害严重。典型的溜砂坡通常经历碎屑和砂粒的产生、溜动以及在坡脚堆积三个过程。在溜砂坡的形成过程中除重力作用外, 发挥主导作用的是物理风化作用。同时, 溜砂坡是特殊的环境条件下的产物, 研究区溜砂坡多发生于 6 000 年 BP 以来, 对应于中国石笋记录的季风区在早全新世以来降雨量的减小, 是对全球气候变化的响应。溜砂坡可按其砂源形成模式、发育地貌部位与溜砂特征分为原生型溜砂坡和再生型溜砂坡两大类。其中原生型溜砂坡适宜采用避让与清除、排砂工程与拦砂工程等措施, 而再生型溜砂坡则应采用砂源区控制工程、固砂工程及拦砂工程等措施。

关键词: 溜砂坡; 物理风化; 原生型; 再生型; 藏东南

中图分类号: P64; X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2014)01-0047-05

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2014.01.009

0 引言

溜砂坡系指高陡的岩(土)质斜坡, 遭受强烈的物理风化作用而形成大量砂粒和岩屑, 在重力作用下, 发生多种方式的运动并在坡脚堆积成锥状斜坡的自然演变过程。溜砂坡的锥状堆积物称为溜砂堆。

溜砂坡属于广义滑坡中一种特殊类型。按照国际上广泛采用的 DJ Varnes 滑坡分类方案, 可归于第六大类: 复合移动类^[1]。1930 年代以来, 地貌学研究中将斜坡上岩块、岩屑顺坡面溜动的地貌过程, 称为“泻溜”、“撒落”。Sharpe 首次将碎屑坡的失稳划分为碎屑溜、碎屑崩和泥石流三类, 并首次提出碎屑溜的概念^[2]。Varnes 在 Sharpe 的基础上, 对碎屑坡的三种失稳方式进行了比较准确的阐述^[3]。碎屑溜与溜砂坡的地貌现象近似, 但强调了斜坡物质运动的形式和堆积过程, 较少涉及其形成机制。陈永宗等在黄河粗泥沙来源研究中提到了砂岩、砂质泥岩强风化泻溜产砂的方式^[4]。罗德富等将川藏公路的溜砂坡视为特殊的公路病害并总结了溜砂坡的危害特征^[5]。2008 年

汶川地震后, 王兆印从地表侵蚀研究的角度出发, 提出了“颗粒侵蚀”的概念, 将颗粒侵蚀定义为: 裸露的岩石表面在阳光暴晒和热胀冷缩直接作用下破碎, 呈颗粒状脱离, 并在风和振动触发下沿坡面滚落, 在坡脚形成碎屑堆积体的现象。这与溜砂坡的概念较为接近^[6]。

21 世纪以来, 王成华、张小刚等对藏东南帕隆藏布流域溜砂坡进行了系统研究, 认为溜砂坡灾害是较为特殊的地质灾害, 提出了前文所述的溜砂坡概念, 并对溜砂坡的发育环境条件、演化规律、结构特征、稳定性判别标志及防治技术等进行了研究^[7-10]。

1 溜砂坡的发育特征

1.1 溜砂坡的分布

溜砂坡主要分布在我国干旱、半干旱的中纬度山区, 如我国西部的川西横断山区、西藏东南部、滇西北、青海、甘肃、陕西南部等地区。我国西藏东南部的溜砂灾害十分发育。特别在帕隆藏布上游峡谷段, 溜砂坡连续成群分布, 如沿帕

^{*} 收稿日期: 2013-04-23 修回日期: 2013-06-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(40971015); 国家科技支撑计划专题项目(2012BAK10B02-4); 国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)(2013CB733205)

作者简介: 张小刚(1966-), 男, 四川万源人, 教授级高级工程师, 主要从事山地灾害发育规律与防御技术研究。

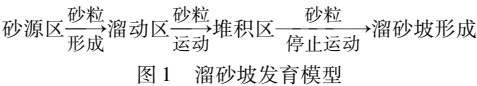
E-mail: zxg@imde.ac.cn

表 1		典型溜砂坡的特征表						
编号	地理位置	规模			坡度/(°)	组成成分	活动性	植被特征
		坡长/m	扇缘长/m	高/m				
1#	96°21'19.70" 29°37'1.63"	276.0	118.0	168.5	35.6	花岗岩强风化砾砂	强活动	植被稀少
2#	96°21'42.67" 29°36'52.43"	149.0	65.6	84.5	34.6	花岗岩强风化粗砂夹 碎石、大块石	中强活动	少许灌丛
3#	96°22'18.57" 29°36'48.63"	159.1	108.3	93.2	35.1	花岗岩强风化砾砂、 坡面有大块石	强活动	零星见草
4#	96°25'53.49" 29°34'37.11"	378.0	291.0	223.0	35.1	花岗岩强风化 砾砂、粉砂	强活动	少许灌丛
5#	96°27'34.36" 29°33'9.88"	312.0	128.0	93.5	35.2	花岗岩风化砾石	强活动	灌丛和草

隆藏布主流川藏公路(国道 G318 线)米堆沟口一中坝段,仅 20 km 左右路段内就分布溜砂坡超过 30 处。溜砂坡的组成物以花岗岩强风化的砂粒状碎屑为主,也见玄武岩和千枚岩强分化的碎石和碎屑(表 1)。近几十年,愈加剧烈的溜砂活动,给当地的交通建设带来了极大的困难,频繁发生岩块和砂粒溜向公路、覆盖路面、埋设工程设施、中断交通的事件,甚至时常发生溜砂中挟带的岩块、巨石砸坏车辆和砸伤行人的事故。

1.2 典型溜砂坡的发育模型

典型溜砂坡通常经历碎屑和砂粒的产生→溜动→在坡脚堆积过程。可概化成图 1 所示的模型。



溜砂坡可划分出砂源区、溜动区和停积区 3 个地貌区域(图 2)。

(1) 砂源区位于溜砂坡上(后)段,又称产砂段。砂源区岩体裸露,一般坡度 50°~70°。这里是强烈进行物理风化的场所,以岩屑崩落为主,其次为岩块崩塌、滚落。

(2) 溜动区是溜砂溜动的区域,坡度多为 34°~39°,甚至 >40°。本区也仍发生着强烈的

物理风化作用,以及坡面径流的侵蚀冲刷作用。溜砂溜动的方式有滚动、跳跃、滑动、群体溜砂流动及其多种复合方式(如跳~滚式、溜~滚式等)。

在溜动区,坡面冲沟统系还是有着较明显的形态特征。溜砂坡多发育在较干旱的地区,坡面流水侵蚀过程相对较弱。岩质坡体表面在强烈的物理风化作用下产生的砂粒,在重力作用下,沿坡面由流水作用形成的沟系汇集顺坡运动。这种砂粒运动具有较强的磨蚀作用。所以溜砂坡的沟系的地貌形态宽浅,沟槽边沿平缓,沟系流线平滑。

(3) 堆积区位于高陡斜坡的坡脚,是溜砂堆积的场所,称为溜砂锥。坡度较缓,坡度一般 <40°。在宏观上,溜砂锥组成物质的颗粒较为均一,溜砂锥坡度无明显变化。

溜砂锥与一般坡积的岩屑锥有较大的区别。一般的岩屑锥,由于不同颗粒粒径堆积物的自然休止角不同,造成岩屑锥上、下的坡度会呈现出较大变化。在岩屑坡发育区,岩块与岩屑构成了“崩落群体”。“崩落群体”的冲击力使空气产生冲击波。

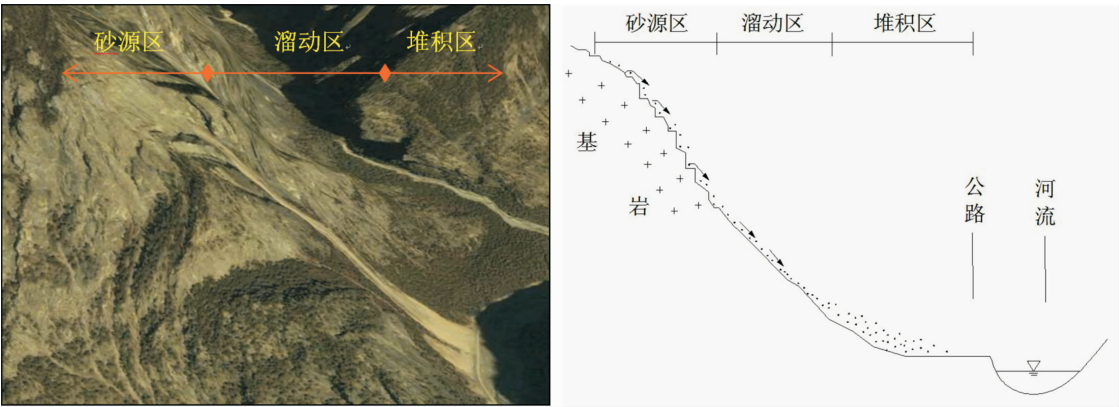


图 2 典型溜砂坡的形成过程

冲击波可将细小颗粒挟带更远处。表现在沿岩屑锥纵向上, 从岩屑堆的堆顶至边缘略具由粗到细的分选性。而溜砂颗粒个体因物理风化作用(尤其是热力风化作用)从岩体表面产生的位置具随机性。而且, 溜砂颗粒个体产生的时间也不同步, 同样具有随机性。因此, 溜砂的产生和溜动都表现为个体行为, 颇具独立性。溜砂的溜动距离、停积位置与溜砂粒径相关。较大的颗粒因具有的势能较大, 运动较远, 多停积在溜砂锥下部及边缘。溜砂锥上(后)部(段)和中部(段)停积的颗粒较细。表现在从溜砂锥的锥顶至边缘略具由细到粗的分选性。

另一个明显的地貌形态特征是溜砂坡顶点总是位于冲沟内, 而且, 从溜砂锥顶点向坡上常有明显细长的锥尾^[11]。

实际工作中, 溜砂坡的砂源区、溜动区和堆积区 3 个地貌区域的界限难以清晰划分。若砂源区岩质陡坡被强风化而产生的岩块、岩屑在重力作用下即产生溜动, 此时砂源区和溜动区就难于划分开来。

此外, 溜砂坡的砂源区、溜动区和堆积区 3 个区具有相互转化的动态变化特征。如先前已经稳定的溜砂锥前缘坡角因修筑公路或河流冲刷而失稳, 就在实质上转化为砂源区和溜动区。又如, 砂粒溜动到稍缓的坡面(<30°)开始停积时, 当堆积的溜砂锥坡度大于其天然休止角, 溜砂则又会溜动, 先前的堆积区又转化成了砂源区和溜动区。

1.3 溜砂坡的形成机制

在溜砂坡发育中, 发挥主导作用的是物理风化作用。物理风化作用又称机械风化作用、崩解作用。导致物理风化的原因主要有温度、压力及生物等三个因素, 致使岩体发生的物理疏松、结构崩解的机械破坏过程, 表现为开裂、胀缩和挤压, 一般不引起化学成分的变化。

溜砂坡的发育通常有 4 个基本条件:

(1)物质条件: 溜砂的物质来源即机械风化形成的岩石碎屑物。这些易风化的岩体通常为花岗岩、泥质砂岩、粉砂岩、千枚岩、泥岩以及玄武岩等。

(2)气候因素: 干旱、半干旱气候和高寒气候

具备降低岩体物理力学强度、加速岩体表面节理裂隙的物理风化的动力环境。规模大的溜砂坡较集中分布在干旱、半干旱的山区河谷两岸。

(3)地形条件: 砂粒的溜动与其天然休止角有关, 当斜坡的坡度大于砂粒的休止角(一般 34°~38°)时, 风化产物产生溜动, 在斜坡的坡脚处发育溜砂坡。

(4)堆积条件: 坡脚处存在缓于岩石碎屑、砂粒休止角的平缓而开阔的空间是同样是发育溜砂坡必不可少的堆积条件。

1.4 溜砂坡的沉积环境

分析溜砂坡的形成时代及其与气候等环境变化之间的关系, 对于认识溜砂坡形成机理及对全球变化的响应具有重要意义。我们选择了帕隆藏布江右岸一处新近开挖的剖面(29.62°N, 92.35°E)。分层采样进行 ESR(电子自旋共振)年龄测定与分析。试参数和 4 个样品的 ESR 年龄结果见表 2。

研究表明, 区域环境大体上经历了湿→干→湿→干与暖→冷→暖→冷的变化过程。剖面中堆积物形成于末次间冰期以来, 而研究区溜砂灾害及堆积则是 6 000 年 BP 以来环境变化的产物, 对应于中国石笋记录的季风区的降雨量在早全新世之后的减小。研究区两侧的高山海拔超过 5 000 m, 随着降雨量减少, 且无冰川或植被覆盖时, 在寒冻风化作用下易于发生溜砂灾害^[12]。

2 溜砂坡的类型

溜砂坡按组成物质的粒径、形状可划分为砂粒碎屑溜砂坡、片状碎屑溜砂坡。其中砂粒碎屑溜砂坡母岩岩性多为花岗岩、泥质砂岩、冲洪积, 片状碎屑溜砂坡母岩岩性多为千枚岩、页岩、泥岩。按溜砂坡活动部分的平面形态可划分为面状溜砂坡、槽状溜砂坡、斑状溜砂坡。按溜砂坡的规模(面积)可分为小型溜砂坡(<5 000 m²)、中型溜砂坡(5 000~10 000 m²)、大型溜砂坡(10 000~50 000 m²)、特大型溜砂坡(>50 000 m²)。安溜砂坡的活动性可分为强活动溜砂坡、较强活动溜砂坡、弱活动溜砂坡等。


表 2 藏东南溜砂坡等堆积物的 ESR 测年结果 [*]						
样品编号	取样深度/m	取样位置	岩性	古剂量/GY	年剂量/mGY	年代/ka
Y6	2.0	波密中坝	溜砂坡堆积	116.2±11.6	17.491	6.6±2
Y9	6.5	波密中坝	冲洪积物	168.2±16.8	12.315	14±2
Y5	21.0	波密中坝	冰碛物	784.7±78.5	7.408	106±10
Y8	21.5	波密中坝	冲洪积物	1 129.4±112.9	10.149	111±10

^{*} 测试在成都理工大学应用核技术研究所年代学实验室进行

表 3 溜砂坡灾害防治对策			
序号	工程位置	工程措施	机理与适用条件
1	避让与清除	绕避、改线或清除	规模较大治理难度大的溜砂坡应尽量绕避，活动性弱的则可直接清除
2	砂源区控制	喷撒泥浆、水泥浆、防冻快速固结剂等	停止产砂或者少产砂。实施难度一般较大，适宜规模小或保护对象特别重要溜砂坡
3	固砂工程	护面墙工程	适宜活动性一般或趋于稳定溜砂坡，再生型溜砂坡多采用此类措施
		SNS 柔性主动防护网	
		植被固砂工程	
		框架锚杆植被固砂技术	
	深部固砂工程	木桩排网植坡固砂技术	
		注浆固砂	
		花管微型树根桩固砂技术	
4	拦砂工程	拦砂墙 SNS 柔性被动防护网	适宜活动性较强的溜砂坡
5	排砂工程	排砂渡槽 排砂棚洞	适宜砂源丰富，活动性强的溜砂坡，原生型溜砂坡多采用此类措施

基于溜砂坡形成机制的研究，可按砂源形成模式、发育地貌部位与溜砂特征划分为原生型溜砂坡和再生型溜砂坡两大类。这种分类法揭示了溜砂坡的成因，更重要的是对选择溜砂灾害的防治方法与措施具有指导意义。

原生型溜砂坡发源于高陡的岩质斜坡，溜砂坡上游多为基岩裸露，且坡度较大（一般 $> 60^{\circ}$ ，有的甚至接近直立）。在强烈的物理风化作用下，其强度和稳定性不断降低，岩体表面形成大量砂粒和岩屑。在重力作用下这些碎屑和砂粒发生溜动，运动到坡脚地形较缓处堆积成溜砂坡（图 3）。一般原生型溜砂坡规模较大。



(a)

(b)

图 3 原生型溜砂坡 (a) 与再生型溜砂坡 (b)

再生型溜砂坡通常为松散坡积体（崩塌堆积体、坡面泥石流堆积体、雪崩堆积体等）在物理风化作用下，较大块石崩解、剥失等破坏后，细颗粒在重力作用下，运动至坡脚堆积而形成的。故根据坡积体类型将再生型溜砂坡分为崩塌型溜砂坡、坡面泥石流型溜砂坡和雪崩型溜砂坡。

与原生型溜砂坡相比，再生型溜砂坡的最大特点是溜砂发育于明显的堆积体或堆积扇。因此，是否存在原始堆积体或堆积扇是野外区分再生型

和原生型的最重要标志。再生型溜砂坡发育受原始堆积体限制，规模相对较小。此外，再生型溜砂坡的结构特征常常受制于原始堆积体的结构特征。

3 防治对策

通过近年来的研究实验与工程实践^[13-15]，针对溜砂坡灾害的防御对策可归纳为避让与清除工程、砂源区控制工程、固砂工程、拦砂工程与排砂工程 5 大类（表 3）。其中，原生型溜砂坡适宜采用避让与清除、排砂工程与拦砂工程等措施；而再生型溜砂坡则应采用砂源区控制工程、固砂工程及拦砂工程等措施。

4 结论

(1) 溜砂坡灾害是较为特殊的地质灾害，主要分布在我国干旱、半干旱的中纬度山区，我国西藏东南部的溜砂灾害尤其发育。

(2) 典型溜砂坡通常经历碎屑和砂粒的产生→溜动→在坡脚堆积三个过程。在溜砂坡发育过程中，除重力作用外，发挥主导作用的是物理风化作用。同时，溜砂坡是特殊环境条件下的产物，通过 ESR（电子自旋共振）年龄测定与分析，研究区溜砂坡多发生于 6 000 年 BP 以来，对应于中国石笋记录的季风区的降雨量在早全新世之后的减小，是对全球气候变化的响应。

(3) 溜砂坡可按其砂源形成模式、发育地貌部

位与溜砂特征分为原生型溜砂坡和再生型溜砂坡两大类。其中原生型溜砂坡适宜采用避让与清除、排砂工程与拦砂工程等措施;而再生型溜砂坡则应采用砂源区控制工程、固砂工程及拦砂工程等措施。

参考文献:

[1] 陈自生. DJ 伐恩斯的斜坡移动(广义滑坡)分类方案 [C]// 滑坡文集, 第九集. 北京: 中国铁道出版社, 1992: 103 - 109.

[2] Karson M A, Kirkby M J. 坡面形态与形成过程 [M]. 窦葆璋译. 北京: 科学出版社, 1984: 1 - 100.

[3] Blong R J. A numerical classification of selected landslides of debris slide [J]. Engineering Geology, 1973: 341 - 359.

[4] 陈永宗, 景可. 黄河粗泥沙来源及侵蚀产砂机理研究 [C]// 黄河粗泥沙来源及侵蚀产砂机理研究文集. 北京: 气象出版社, 1989: 4 - 15.

[5] 罗德富, 毛济周, 朱平一, 等. 川藏公路南线(西藏境内)山地灾害与防治对策 [M]. 北京: 科学出版社, 1995: 99 - 125.

[6] 王兆印, 刘丹丹, 施文婧. 汶川地震引发的颗粒侵蚀及其治理 [J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(6): 1 - 8.

[7] 梁光模, 张小刚, 吴国雄, 等. 西藏干线公路滑坡研究与防治 [M]. 成都: 四川科技出版社, 2007: 101 - 209.

[8] 王成华, 张小刚, 阙云, 等. 粒状碎屑溜沙坡的形成和基本特征 [J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 29 - 35.

[9] 阙云, 王成华, 张小刚. 川藏公路典型溜砂坡形成机理与整治 [J]. 山地学报, 2003, 10(5): 595 - 598.

[10] 梁光模, 王成华, 张小刚. 川藏公路中坝段溜砂坡形成与防治对策 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2003, 12(4): 33 - 38.

[11] 韦方强, 何易平, 胡凯衡, 等. 溜砂坡遥感解译标志与方法 [J]. 自然灾害学报, 2002, 11(4): 124 - 128.

[12] 张小刚, 刘维明. 帕隆藏布江中坝段河岸沉积 ESR 测年 [J]. 第四纪研究, 2013, 33(3): 610 - 612.

[13] 王成华, 徐骏, 何思明, 等. 粒状碎屑溜砂坡树根桩固砂防护技术 [J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(1): 93 - 96.

[14] 周麟, 王成华, 张小刚, 等. 川藏公路中坝段溜砂坡植被护坡试验示范初报 [J]. 山地学报, 2005, 23 (Supp 1): 140 - 146.

[15] 金仁祥, 尚岳全, 孙红月. 川藏公路西藏境内溜砂坡防治工程研究 [J]. 地球与环境, 2005, 33 (Suppl): 375 - 379.

Development Characteristics and Prevention of the Sand-Sliding Slope in South-East Tibet

Zhang Xiaogang^{1, 2}, Yang Tianjun³ and Chen Wei²

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Process, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Science, Chengdu 610041, China; 3. Traffic Engineering Quality and Safety Supervision Bureau of Tibet Autonomous Region, Lhasa 850000, China)

Abstract: The sand-sliding slope is a common geo-hazard in the mountain areas of western China, it belongs to one special type of the generalized definition of landslide. In South-East Tibet, the sand-sliding slope is characterized by wide distribution and serious damage. Development of the typical sand-sliding slope usually consists of three processes including the generation of debris and sand, sliding and deposit at the foot of slope. During the development of the sand-sliding slope, the dominant factors are composed not only of the gravitational force but also of the physical weathering. The sand-sliding slope is the productions under the specific environmental conditions, in research area, most of the sand-sliding slope occurred from the 6 ka BP, and the time represents the rainfall decreases in the monsoon region since the early Holocene, which is recorded by the Chinese stalagmite, as well as it responds to the global climate change. According to the mode of sand source formation, the development position of geomorphy and the characteristics of sliding sand, the sand-sliding slope could be classified into two types including the primitive type and the self-reorganization type. Some measures such as avoidance, mucking, sand draining, sand retaining etc. should be taken for the primitive type, as for the self-reorganization type, the effective measures are made up of control engineering in sand source area, sand consolidating and sand retaining and so on.

Key words: sand-sliding slope; physical weathering; primitive type; self-reorganization type; South-East Tibet