安化县澄坪村“7·16”泥石流形成机理及其动力学特征

裴来政，谭建民，李 明，闫举生
（中国地质调查局 武汉地质调查中心，湖北 武汉 430205）

摘 要：[目的] 对湖南省益阳市安化县澄坪村“7·16”泥石流灾害成因机理及力学特征进行分析，为类似灾害的防灾减灾研究提供科学参考。[方法] 通过灾后野外调查开展相关分析。[结果] 湖南省安化县马路镇澄坪村梨树坪让家沟流域在地形地貌，地层岩性以及气象水文方面具备良好的孕灾条件；由于 2014 年 7 月 16 日的持续性强降雨作用，沟道上游一侧形成了一个约 5.20×10^4 m^3 的滑坡堰塞湖，随后堰塞湖迅速溃决并形成了强大的溃决型泥石流，冲溃了下游的两道拦砂坝，并形成了高达 190.65 m^3/s 的峰值流量。[结论] 安化县澄坪村“7·16”泥石流灾害是一次典型的滑坡灾害转换成泥石流的灾害链，而下游两道堵塞坝的堵溃过程进一步放大了泥石流的峰值流量及规模，具有典型的堵溃放大效应。

关键词：滑坡；泥石流；灾害链；放大效应
文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2018)04-0034-04 **中图分类号**：P642.23

文献参数：裴来政，谭建民，李明，等. 安化县澄坪村“7·16”泥石流形成机理及其动力学特征[J]. 水土保持通报，2018，38(4)：34-37. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2018.04.006. Pei Laizheng, Tan Jianmin, Li Ming, et al. Formation mechanism and dynamic characteristics of Chengpin debirs flow on July 16, in Anhua County of Hu'nan Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(4): 34-37.

Formation Mechanism and Dynamic Characteristics of Chengpin Debirs Flow on July 16, in Anhua County of Hu'nan Province

PEI Laizheng, TAN Jianmin, LI Ming, YAN Jusheng
(*Wuhan Center of China Geological Survey, Hubei, Wuhan* 430205, *China*)

Abstract: [Objective] By analyzing the formation mechanism and dynamic characteristics of the debris flow disaster, this paper aims to provide a scientific reference for prevention and mitigation research of the future disaster. [Methods] By field investigation and analysis. [Results] The disaster formation conditions of the Rangjia gully, in Anhua County, Yiyang City, Hu'nan Province, including topography, formation lithology and hydrology, are all prone to the formation of large-scale debris flow. Due to the continuous heavy rainfall, a large-scale landslide was formed and blocked the gully channel, but then the landslide-dam failed and formed outburst debris flow with the peak flow up to 190.65 m^3/s. [Conclusion] The most striking feature of this debris flow is the conversion of landslide to debris flow. However, two manmade check dam along the downstream of the channel were all destroyed by outburst flow from the upstream, which magnified the peak flow.

Keywords: **landslide; debris flow; disaster chain; amplification effect**

2014 年 7 月 14 日 8 时，湖南省益阳市安化县各地开始普降暴雨，至 7 月 16 日 9 时，全县 23 个乡镇累计降雨量均在 150 mm 以上，其中马路镇降雨量高达 475 mm。由于受长时间暴雨的影响和激发作用，马路镇澄坪村梨树坪组让家沟左侧滑坡失稳滑入并堵断沟道，并在短时间内形成堰塞湖。7 月 16 日凌晨 7:00 左右，由于长时间的暴雨侵袭，且该沟道沟谷深切，沟床坡降大，由滑坡松散堆积物形成的堰塞湖突然溃决，并形成了强大的泥石流。泥石流沿沟道顺流而下，将原沟道内松散物质及沟道两侧坡积物一起从沟口快速冲出，并毁坏沟口附近的 3 座由块石砌成的拦砂坝，冲出沟口的泥石流物质约 4.00×10^4 m^3。该次泥石流灾害共造成 4 栋房屋被掩埋，3 人失踪，冲毁农作物 0.67 hm^2，损毁公路路基 100 m，直接经济损失数百万元。该泥石流属于典型的沟谷堵溃式泥石流，有关该类泥石流的形成机制与成灾特征，国

收稿日期：2018-02-06 **修回日期**：2018-04-10
资助项目：中国地质调查局地质调查项目“三峡地区万州—宜昌段交通走廊 1∶5 万环境地质调查”(DD20160252)
第一作者：裴来政(1979—)，湖北省监利县人，工学博士，工程师，主要从事地质灾害调查与研究。E-mail：124413595@qq.com。

内外学者进行了大量的探索和研究:尤其是汶川地震以后,形成了大量的松散固体堆积物,在山洪冲刷作用下容易起动并形成泥石流;并且汶川地震诱发了大量的崩塌,滑坡等松散物质堵塞沟道,在众多山区沟道中形成了大量串珠状分布的堵塞坝[1-3],这些堵塞体对泥石流的运动具有明显的阻塞作用,且一旦发生溃决,峰值流量便会激增,大大增强泥石流沿程的冲刷和侵蚀能力,放大了泥石流峰值流量规模[4-6]。针对一些典型的泥石流沟道,国内外学者通过多种研究手段相结合,对规模放大现象进行了详细的分析,如都江堰虹口大干沟泥石[7],桃关沟泥石流[8]以及苏保河流域泥石流等[9]。通过对这些典型的泥石流灾害进行分析,初步提出了泥石流沟道侧岸的坡积物堵溃过程对泥石流放大效应,也即"堵塞系数"的明显影响。安化县澄坪村"7·16"泥石流灾害也是一次典型沟谷堵溃式泥石流。灾害发生后,笔者所在的研究小组对该泥石流灾害进行了详细的野外调查,获取了大量的实测资料。本文拟以该泥石流沟为典型案例,对沟谷堵溃型泥石流的孕灾条件,成灾模式以及动力学过程进行详细的分析计算,从而为该类泥石流的防灾减灾提供科学指导。

1　孕灾条件分析

泥石流的形成必须具备 3 个基本条件:①陡峻的地形地貌;②丰富的物源补给;③强降雨的触发,3 个条件缺一不可[10]。而澄坪泥石流沟位于湖南省安化县马路镇澄坪村梨树坪组,小流域的沟口坐标为东经 110°55′51″,北纬 28°16′19″,该沟所在区属构造侵蚀中低山区。下面分别从这 3 个方面,分析澄坪泥石流的孕灾条件。

1.1　地形地貌

整个小流域呈"银杏叶"状展布,流域总面积为 0.49 km^2。流域上部发育了两条支沟,其中右侧支沟长 0.93 km,左侧支沟长 1.01 km。流域塬区最高点海拔为 664 m,沟口最低点海拔为 275 m,沟床平均比降为 0.38,其中右侧支沟沟床平均比降为 0.36,左侧支沟平均沟床比降为 0.43。两支沟的沟道下切侵蚀严重,两侧岸坡的平均坡度在 45°以上,为典型的 V 字形沟道。根据泥石流形成过程中地貌单元的功能划分,可将该泥石流沟道划分成泥石流形成区、流通区和堆积区(图 1)。流域上部的 2 条支沟在形成区的末端汇合,形成区拥有相对较大的汇流面积和坡度,为泥石流的形成和运动提供了良好的水动力条件;流通区沟道的沟床比降为 0.36,沟道平均宽度 7.5 m。堆积区呈一个长 152 m,宽 85 m 的三角区域,平均沟床比降为 0.21。

1.2　地层岩性

该流域位于苏木溪逆断层的上盘,该泥石流沟沟口附近为该断层通过处,断层破碎带内岩体节理发育密集,揉皱发育,产状紊乱,岩体破碎。其中震旦系南沱组(Zn)灰色含砾泥板岩及含砾粉砂质板岩中主要发育两组节理裂隙:340∠60°;②40∠50°。该沟所在区域出露的地层主要有震旦系南沱组(Zn)灰色含砾泥岩、泥质板岩及含砾粉砂质板岩、震旦系观音田和鹤岭组(Z_{g+h})灰绿色石英砂岩及黑色炭质板岩、青白口系五强溪组(Ptw)灰色石英砂岩、砂质板岩和青白口系马底驿组(Ptm)灰绿色条带状板岩、粉砂质板岩。岩体表层强风化厚度 3～5 m,强度低。岩体内节理裂隙发育密集,岩体被节理裂隙和层面相互切割成块状,易沿优势节理裂隙面发生滑塌。引发此次溃决性泥石流灾害的滑坡发生于震旦系南沱组(Zn)地层中,该地层为区域上的易滑坡地层,2014 年 7 月 16 日安化县马路镇唐家溪滑坡就发育于此地层中。

1.3　气象水文

该泥石流沟道所在的澄坪村位于中纬度地带,气候温和湿润,四季分明,属湖南省暴雨中心和低温中心区之一,且年内和年际降雨均呈现出极大的不均匀性。根据距离流域最近的气象站降雨资料统计显示,该地区年均降水量为 1 672.9 mm,其中年最小降水量 1 224.2 mm,年最大降水量 2 440 mm,日最大降水量 260 mm,时最大降水量 61.9 mm,10 min 最大降水量 30.5 mm,多年年均降水日 172 d。2014 年 7 月 14 日 8:00 开始,安化县各地普降暴雨,截止 16 日 9:00,全县 23 个乡镇降雨量均在 150 mm 以上,其中仙溪镇、长塘镇、大福镇、滔溪镇、江南镇、田庄乡、东坪镇、马路镇、奎溪镇、渠江镇、南金乡、古楼乡等 12 乡镇降雨达 300 mm 以上,马路镇降雨高达 475 mm。山区极易形成极端的小气候区域,局部常发生百年一遇的大暴雨。总体看来,流域的年降雨量丰富且年内和年际分布非常不均,极有可能遭遇极端降雨条件,这为泥石流的发生提供了良好的水动力条件。

2　泥石流成因机理分析

该沟是一条老泥石流沟,曾多次发生泥石流灾害,但当规模较小,未造成大的经济损失和人员伤亡。据当地村民介绍,2012 年 6 月该沟就曾发生过一次泥石流,但未造成人员伤亡。考虑了沟口居民的安全,2013 年当地政府在该沟下游用块石修砌了 3 座

拦砂坝，拦砂坝的具体位置如图 1 所示。2014 年 7 月 14 日 8 时开始，安化县各地普降暴雨，而其中澄坪村在 7 月 14 日至 7 月 16 日期间的降雨高达 419.6 mm。受长时间的暴雨影响和激发作用，2014 年 7 月 16 日凌晨 7:00 左右，滑坡发生后几分钟后随即溃决形成泥石流。在该沟沟内左侧斜坡体上 Zn 地层中灰色含砾泥质板岩发生沿节理裂隙的滑坡。如图 1 所示，整个滑坡体大致呈四面体形态，已滑滑坡物源宽约 70 m，斜长约 150 m，平均厚约 5 m，方量约52 000 m^3。初步计算该滑坡体的总方量约 5.2×10^4 m^3，滑坡物质滑入沟道后迅速堵断沟道，并形成了一个小型堰塞坝。由于降雨强度较大，且沟床坡将大，上游汇流区短时间内便形成了大流量、高流速的山洪，上游来流强烈深切坝体，由滑坡松散堆积物形成堰塞坝迅速溃决，形成强大的溃决泥石流后直接冲击下游的三道拦砂坝。

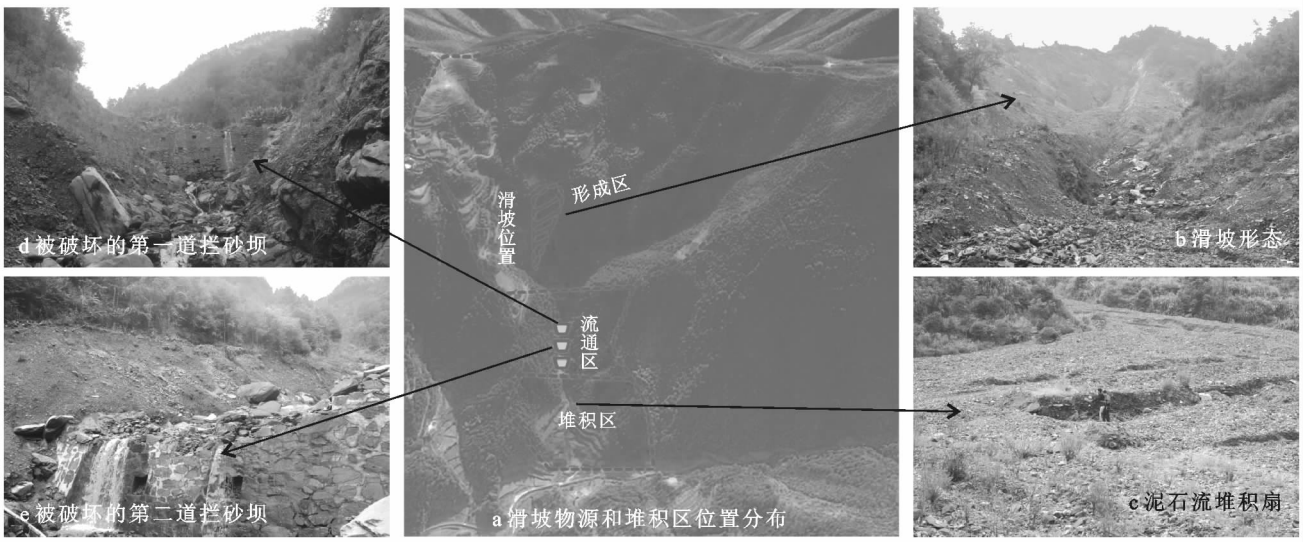


图 1 澄坪村泥石流的滑坡物源及堆积区

据灾后调查发现，本次泥石流灾害使 1 和 2 号拦挡坝基本破坏，坝基已明显出露，且坝体已出现破损(图 1)，3 号拦挡坝完全於满，已失去拦挡能力。泥石流越过三道拦砂坝，沿程进一步冲刷沟床及沟道两侧的松散物源，冲出沟口并形成了约 4.00×10^4 m^3 的堆积区(图 1)。

结合本次野外调查以及相关资料的整理查阅，初步判定澄坪泥石流的成因机理主要包括以下 3 个方面：①流域地质条件为泥石流的形成奠定了物质基础。据调查，沟道两侧斜坡的岩体主要是由易风化和遇水易崩解的含砾泥岩、泥质板岩组成；另外受区域构造作用的影响，岩体内节理裂隙发育非常密集，岩体十分破碎，在重力和水力双重侵蚀作用下，极易发生滑移破坏，形成滑坡堆积物，如本次形成区的滑坡以及沟道流通区段丰富的固体物源，这为泥石流的发生奠定了物质基础。②流域地貌条件为泥石流的发生提供了良好的动力条件。该泥石流沟的平均沟床比降高达 0.38，且流域上部有充裕的汇水面积，使得在极端降雨条件下，流域汇水区能够在短时间内形成大流量，高流速的山洪，是泥石流形成的良好驱动力。③流域年降雨量丰富且常发生极端降雨情况，为泥石流的爆发提供了良好的激发条件。极端降雨条件下，一方面能够形成高强度的洪水，为泥石流的发生提供动力条件；另一方面，使得沟道两侧极易诱发规模不等的崩滑体，更加丰富泥石流的物源，从而激发大规模的泥石流灾害。

3 泥石流力学特征分析

通过详细的野外灾害调查，对本次泥石流灾害的动力学参数进行了初步的分析与计算，可为该泥石流沟道后续的防灾减灾规划和风险评价提供科学参考。

3.1 泥石流颗粒级配与容重

笔者在该泥石流沟道下游的堆积区取到了两个未被后续山洪灾害冲刷的泥石流样，并得到了如下的堆积区泥石流样品的级配曲线(图 2)。有关泥石流容重的确定，本文采用了泥石流容重现场测试方法[11]。笔者在本次野外调查过程中，取 3 份泥石流原状堆积物加水并充分搅拌成泥石流样品，然后由当地目击者鉴别，经见证者确认其浓度后，称取重量，测量体积，获得配置泥石流样品的容重，并 3 次求取平均值。经现场测试，澄坪泥石流的容重均为 1.85 g/cm^3，属于过渡性泥石流。

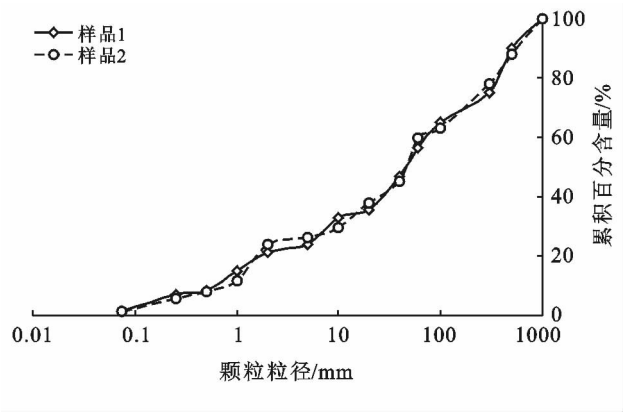


图 2　澄坪村泥石流的滑坡物源及堆积区

3.2　泥石流峰值流速和流量

有关泥石流峰值流速和流量的计算常用的方法有形态调查法和雨洪法两种[5]。形态调查法根据野外现场实测的泥痕断面,首先计算泥石流的峰值流速,计算公式为[12]:

$$V_C=\frac{1}{n_c}\times(R_C^{2/3}\cdot J^{0.5}) \tag{1}$$

式中:V_C——泥石流断面平均流速(m/s);n_c——泥石流沟床糙率系数;R_C——计算断面的水力半径(m);J——沟床比降。计算流量后,可进一步计算该次泥石流的峰值流量,计算公式为:

$$Q_C=A\cdot V_C \tag{2}$$

式中:A——泥石流过流断面面积(m^3)。

由于该次泥石流灾害过程中,上游存在着滑坡形成堰塞湖的堵溃效应,1 号和 2 号拦砂坝基本破坏也可能在一定程度上放大泥石流峰值流量的规模,另外 3 号拦砂坝在填库的过程中可能会对峰值流量存在削峰的作用。因此,笔者在 1 号拦砂坝的上游,2 号拦砂坝和 3 号拦砂坝之间以及 3 号拦砂坝的下游分别实测了泥痕高度、断面形态及尺寸,然后根据公式(1)—(2) 分别计算 3 个不同位置断面时的泥石流峰值流速和流量,从而反映出泥石流峰值流量的沿程变化,计算结果详见表 1。通过上述对峰值流量的计算可以看出,在上游滑坡形成的堰塞湖溃决后,形成了一个较大的溃决流量,其峰值达到了 54.52 m^3/s;随后泥石流迅速冲溃了下游的 1 和 2 号拦砂坝,在拦砂坝的堵溃过程中,泥石流的流量被进一步放大,其峰值更是高达 190.65 m^3/s;再接着泥石流进入 3 号拦砂坝,3 号坝体发挥了"填库削峰"的作用,泥石流的峰值流量急剧降低,越过 3 号拦砂坝之后的泥石流峰值流量达到了 75.96 m^3/s。

表 1　断面形态特征及泥石流峰值流速和流量

断面号	面积/m^2	湿周/m	水力半径/m	坡降	流速/($m\cdot s^{-1}$)	流量/($m^3\cdot s^{-1}$)
1	10.47	9.84	1.06	0.36	5.21	54.52
2	32.13	17.76	1.81	0.23	5.93	190.65
3	16.25	12.00	1.35	0.21	4.67	75.96

4　结 论

(1) 该流域的地形地貌,地层岩性以及气象水文条件为泥石流的发生提供了绝佳的孕灾条件。流域地质条件为泥石流的形成奠定了物质基础;地貌条件为泥石流的发生提供了良好的动力条件;降雨量丰富且常发生极端降雨情况,为泥石流的爆发提供了良好的激发条件。

(2) 在泥石流的形成及运动过程中,在沟道内斜坡体上发生滑坡,堵断沟道形成短时的堰塞坝,然后洪水造成堰塞坝溃决,形成溃决型泥石流;沟口修建的 3 座拦砂坝中前两道堵塞坝完全破坏,在"堵溃过程"进一步放大了泥石流的危害效应,此次泥石流是一次典型的滑坡灾害转换成泥石流的灾害链。

另外,在本次调查中,初步估算沟道中还存在约 10 000 m^3 的松散固体物质,2015 年 6—8 月期间发生过 3～4 次泥石流,但因规模较小,且沟口村民已搬迁,未造成大的经济损失。今后进一步发生泥石流灾害的可能性非常大。因此,笔者建议对该流域进行进一步的勘查,查清滑坡处固体物质储量,查清沟谷两岸斜坡稳定状态,对沟道内潜在不稳定区域采用工程技术手段,稳固物源;针对物质储量设计沟口排导沟及拦砂坝,逐级减少物质出沟量,对上游坡体进行植被恢复,设置截排水沟减少地表水对坡体及沟壁的冲刷,并加强群测群防工作,减少灾害损失。

[参 考 文 献]

[1] Cui Peng, Chen Xiaoqing, Zhu Yinyan, et al. The Wenchuan Earthquake, Sichuan Province, China, and resulting geohazards [J]. Natural Hazards, 2009,56(1):19-36.

[2] 崔鹏,韦方强,何思明,等."5·12"汶川地震诱发的山地灾害及减灾措施[J].山地学报,2008,26(3):280-282.

[3] 崔鹏,韩永顺,陈晓清.汶川地震堰塞湖分布规律与风险评估[J].四川大学:工程科学版,2009,41(3):35-42.

(下转第 45 页)

[2] 张婵婵,张瑞芳,张建恒,等.高阳县农田土壤速效养分空间变异特征研究[J].中国生态农业学报,2013,21(6):758-764.

[3] 赵明松,李德成,张文凯,等.淮北平原农田土壤养分空间变异特征:以安徽省蒙城县为例[J].土壤通报,2016,47(3):611-617.

[4] 赵明松,李德成,张甘霖,等.江淮丘陵地区土壤养分空间变异特征:以安徽省定远县为例[J].土壤,2016,48(4):762-768.

[5] 楚万林,齐雁冰,常庆瑞,等.秦巴山地县域土壤碱解氮空间变异与合理采样数的确定[J].水土保持通报,2015,35(2):141-146.

[6] 王幼奇,白一茹,展秀丽.在不同尺度下宁夏引黄灌区农田土壤养分空间变异分析[J].干旱区研究,2014,31(2):209-215.

[7] 刘祖香,陈效民,靖彦,等.基于地统计学的农田尺度旱地红壤养分空间变异性研究[J].土壤通报,2013,44(2):392-397.

[8] Mzuku M, Khosla R, Reich R, et al. Spatial variability of measured soil properties across site-specific management zones[J]. Soil Science Society of America Journal, 2005,69(5):1572-1579.

[9] Antwi M, Duker A A, Fosu M, et al. Geospatial approach to study the spatial distribution of major soil nutrients in the Northern region of Ghana[J]. Cogent Geoscience, 2016,2(1):1201906-1201918.

[10] 张兆永,李菊英,祖皮艳木·买买提,等.艾比湖流域小尺度农田土壤养分的空间分布和盐渍化风险评价[J].生态学报,2017,37(3):819-828.

[11] 秦松,樊燕,刘洪斌,等.地形因子与土壤养分空间分布的相关性研究[J].水土保持研究,2008,15(1):275-279.

[12] 宋轩,李立东,寇长林,等.黄水河小流域土壤养分分布及其与地形的关系[J].应用生态学报,2011,22(12):3163-3168.

[13] 陈桂香,高灯州,曾从盛,等.福州市农田土壤养分空间变异特征[J].地球信息科学学报,2017,19(2):216-224.

[14] 邓欧平,周稀,黄萍萍,等.川中紫色丘区土壤养分空间分异与地形因子相关性研究[J].资源科学,2013,35(12):2434-2443.

[15] 朱洪芬,南锋,徐占军,等.黄土高原盆地土壤有机质与影响因子的空间多尺度关系[J].生态学报,2017,37(24):1-14.

[16] 杨玉海,陈亚宁,李卫红,等.伊犁河谷不同植被带下土壤有机碳分布[J].地理学报,2010,65(5):605-612.

[17] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:中国农业出版社,2000.

[18] 张素梅,王宗明,张柏,等.利用地形和遥感数据预测土壤养分空间分布[J].农业工程学报,2010,26(5):188-184.

[19] 王政权.地统计学及其在生态学中的应用[M].北京:科学出版社,1999:162-192.

[20] 徐莉,李艳红,海米提·依米提,等.艾比湖湿地不同植物群落下土壤水盐空间变异性研究[J].水土保持通报,2013,33(6):279-284.

[21] Nielsen D R, Bouma J. Soil Spatial Variability[M]. Pudoc Wageningen: Handbook of Soil Science, 1985.

[22] 杨帆,章光新,尹雄锐,等.松嫩平原西部土壤盐碱化空间变异与微地形关系研究[J].地理科学,2009,29(6):869-873.

[23] 吴昊.秦岭山地松栎混交林土壤养分空间变异及其与地形因子的关系[J].自然资源学报,2015,30(5):858-869.

[24] 德科加,张德罡,王伟,等.不同海拔下高寒草甸土壤养分分异趋势及其与地上植物量间的相关性研究[J].草地学报,2013,21(1):5-29.

[25] 傅涛,倪九派,魏朝富,等.不同雨强和坡度条件下紫色土养分流失规律研究[J].植物营养与肥料学报,2003,9(1):71-74.

[26] 杨生茂,李凤民,索东让,等.长期施肥对绿洲农田土壤生产力及土壤硝态氮积累的影响[J].中国农业科学,2005,38(10):2043-2052.

(上接第 37 页)

[4] 柳金峰,游勇,陈兴长.震后堵溃泥石流的特征及防治对策研究:以四川省平武县唐房沟为例[J].四川大学学报,2010,42(5):68-75.

[5] 游勇,陈兴长,柳金峰.汶川地震后四川安县甘沟堵溃泥石流及其对策[J].山地学报,2011,29(3):320-327.

[6] 刘传正.汶川地震区文家沟泥石流成因模式分析[J].地质评论,2012,58(4):709-716.

[7] 张健楠,马煜,张惠惠,等.四川省都江堰市大干沟地震泥石流[J].山地学报,2010,28(5):623-627.

[8] 胡卸文,韩玫,梁敬轩,等.汶川震区桃关沟 2013-07-10 泥石流成灾机理[J].西南交通大学学报,2015,50(2):286-293.

[9] 游勇,柳金峰,陈兴长."5·12"汶川地震后北川苏保河流域泥石流危害及特征[J].山地学报,2010,28(3),358-366.

[10] 崔鹏.中国泥石流的区域特征[M].北京:商务印书馆,2000:60-63.

[11] 陈宁生.泥石流勘察技术[M].北京:科学出版社,2011:92-93.

[12] 周必凡,李德基,罗德富,等.泥石流防治指南[M].北京:科学出版社,1991:80-81.