



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2016.02.028

吴凯, 倪万魁, 袁志辉, 等. 宁夏隆德县泥石流形成条件[J]. 2016, 14(2): 159-164, 193.

WU Kai, NI Wan kui, YUAN Zhi hui, et al. Formation conditions of debris flows in Longde county of Ningxia[J]. 2016, 14(2): 159-164, 193. (in Chinese)

宁夏隆德县泥石流形成条件

吴凯, 倪万魁, 袁志辉, 武鹏

(长安大学 地质工程与测绘学院, 西安 710054)

摘要: 2013年,隆德县遭遇了50年一遇的强降雨,导致境内发生了17处泥石流。在野外详细调查的基础上,结合区域现有资料,从沟坡比降、物源和水源三个主要方面分析了隆德县泥石流的形成条件。结果表明:隆德县泥石流均分布于丘陵地貌区,坡度范围在 $20^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 之间,相对高差在50~100 m之间,为泥石流的发生提供了有利的地形地貌条件;流域内新近系(Ngn)桔红色砂质泥岩残坡积物,具有弱膨胀性,吸水后会有一定程度的崩解软化,导致土体结构联结减弱、强度降低,构成了泥石流的物源;降雨是隆德县泥石流最主要的触发因素。通过实地调查与降雨数据分析,可知隆德县泥石流的形成主要受前期降雨的影响,属于前期降雨控制型泥石流。因此,可通过监测前期降雨,特别是间接前期降雨,对泥石流进行预警预报。

关键词: 泥石流;形成条件;沟坡比降;新近系(Ngn)砂质泥岩;弱膨胀性;降雨;隆德县

中图分类号: P642 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2016)02-0159-06

Formation conditions of debris flows in Longde county of Ningxia

WU Kai, NI Wan kui, YUAN Zhi hui, WU Peng

(School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: Longde county suffered a heavy rain of once every 50 years, resulting in 17 debris flows. Based on the detailed field investigation and geological environmental conditions of this region, the formation conditions of the debris flow were analyzed from 3 aspects of the gradient of gully and slope, material sources and water conditions. The results indicated that the debris flows of Longde county were distributed in the hilly regions, where the slope was $20^{\circ} \sim 50^{\circ}$ and the height difference was 50~100 m. These were favorable geological and geomorphological conditions for debris flow. In the basin the residual soil of orange sandy mudstone of Neogene(Ngn) had the weak dilatibility. A certain degree of degradation and softening would occur after immersed by water, resulting in the connection of structure and strength was weakened. Therefore, it was the material source of debris flow. Rainfall was the most important trigger factor of the debris flow. Depending on field investigation and data analysis, the formation of debris flow in Longde county was mainly affected by antecedent precipitation. They belonged to the antecedent precipitation control pattern. So the debris flows in Longde county could be warned by monitoring the antecedent precipitation, especially the indirect antecedent precipitation.

Key words: debris flow; formation conditions; gradient of gully and slope; sandy mudstone of Neogene(Ngn); weak dilatibility; rainfall; Longde county

泥石流是一种常见的地质灾害现象,它是在成因、组成和成灾特征方面均介于滑坡和山洪之间的

收稿日期: 2015-07-13 修回日期: 2015-08-08 网络出版时间: 2016-04-14

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160414.1438.008.html>

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(12120108914028)

Fund: Geological Survey Projects of China Geological Survey(12120108914028)

作者简介: 吴凯(1987-),男,山西阳泉人,博士研究生,主要从事岩土体稳定性研究。E-mail: 446410724@qq.com.

含泥沙和石块的固液气三相流体,常发生在地形陡峻的地区。与其他地质灾害类型相比,泥石流更能反映气候变化的现状和趋势^[1]。泥石流按照物质组成可分为泥石流、泥流和水石流。泥流所含的固体物质主要是细粒径土,无石块或仅有少量块石,黏度大,颗粒均匀;水石流的固体物质主要由砂、石组成,粒径大,堆积物分选性差;泥石流则介于两者之间。泥石流地域分布广、突发性强、致灾率高,是一种破坏性极强的地质灾害。本文基于 2013 年度开展的宁夏隆德县 1:5 万地质灾害详细调查^[2],对隆德县泥石流的形成条件进行分析,为隆德县泥石流预警预报提供依据。

1 隆德县地质环境背景

隆德县位于宁夏回族自治区最南端,六盘山西麓,海拔最低为 1 750 m,最高为 2 942 m,地势东高西低。地理坐标:东经 105° 48′ - 106° 15′,北纬 35° 21′ - 35° 47′,总面积 992.39 km²。

研究区属温带大陆性季风气候,半湿润半干旱过渡地带,冬季干燥,夏季多雨。根据宁夏气象台提供的气象资料,1960 年-2013 年间,隆德县年平均气温 5.46℃,年平均降雨量 509.99 mm,自西北向东南递增。7 月-9 月为降雨集中月,降雨量占全年的 60% 左右。全县年蒸发量在 784~1 268 mm 之间,年平均相对湿度约 64.3%。降雨是隆德县地质灾害最主要的诱因之一,滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害的发生都与降雨有着密切的联系。

区域构造资料显示,隆德县经历了燕山期和喜马拉雅期构造运动。燕山运动使之剧烈下沉,沉积了一套早白垩系六盘山群的内陆湖相碎屑岩建造,而喜马拉雅运动使该区再次上升,沉积了古近系、新近系和第四系陆相红色碎屑和砾石、砂、黄土。区内丘陵地貌分布面积最广,占总面积的 61.65%,中低山地貌占 27.09%,河谷平原仅占 11.26%。丘陵地貌分布于县域中西部,沟谷纵横密布,绝对高程 2 000~2 400 m,相对高差 100~400 m,继承了“古地貌”形态。由于河流强烈的侵蚀切割作用,切穿基底,使得基底的古近系-新近系红色泥岩出露,黄土层呈“帽状”覆于其上,厚度不一。区内沟壁岩土体破碎,受侵蚀严重,易诱发斜坡类地质灾害。中低山地貌主要指六盘山区。六盘山是宁夏的主要山脉,山势雄伟,巍峨挺拔,主要由白垩系坚硬的砂岩、泥岩、泥灰岩组成,绝对高程 2 200~2 942 m,相对高差 500~742 m,悬崖峭壁峙立,沟大谷深。县内渝河等较大河流均发源于六盘山区。河谷地貌分布于

隆德县不同的河谷地带,由不同阶地、河漫滩及现代河床构成,是第四纪不同时期不同规模的流水作用的产物。岩性为第四系亚砂土、亚黏土层及砂砾石层,水平层理发育。该区地势平坦,是县内主要的农林经济区。总体来说,隆德县自然环境脆弱,沟谷、水系发育,高、陡斜坡众多,为地质灾害的发生提供了有利的条件(图 1)。

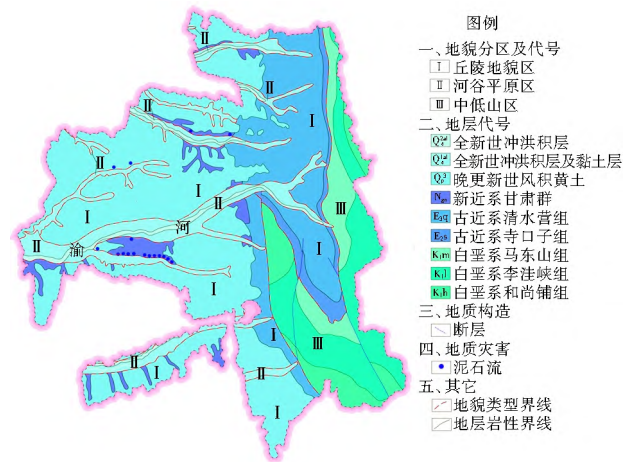


图 1 隆德县区域地质图与泥石流分布

Fig. 1 The regional geological map of Longde county and the distribution of debris flows

2 泥石流发育特征

2013 年,隆德县年降雨量达到了 768.4 mm,仅次于 1961 年的 821.3 mm(图 2),由此全县新增地质灾害 44 处,其中包括 17 处泥石流。这些泥石流以小型居多,有 16 处,仅有 1 处为中型,相对高差在 50~100 m,主要威胁村路和农田,泥石流严重等级量化评价见表 1。

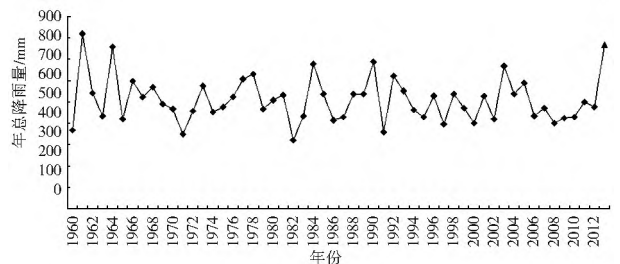


图 2 隆德县(1960 年-2013 年)年降雨量变化曲线

Fig. 2 Curve of annual rainfall variation of Longde county(1960-2013)

根据现场调查可知,该区泥石流均分布在河谷平原与丘陵地貌区的衔接区域,堆积区位于河谷平原,而形成区和流通区则位于丘陵地貌区,所含的固体物质岩性主要是新近系(Ngn)桔红色砂质泥岩。丘陵地貌区上覆“带帽黄土”整体坡度较小,植被覆盖良好;而下伏新近系地层多出露于边坡中下部,坡

度较陡,且是天然隔水层,植被覆盖率较低,坡面侵蚀作用强烈。另外,该区域人口稠密,尤其是渝河流域及其周边,挖坡建房修路等人类工程活动强烈,一定程度上破坏了地质环境,这对于泥石流的形成有一定的促进作用,正如图 1 所示,泥石流在该区域分布集中。

表 1 泥石流严重等级量化评价^[3,4]

Tab. 1 Quantitative assessment of severity of debris flows

序号	泥石流冲出总量/m ³	规模	量化评分	严重等级
1	500	小型	63	轻微
2	520	小型	63	轻微
3	20 000	中型	85	轻微
4	800	小型	82	轻微
5	600	小型	81	轻微
6	1 740	小型	74	轻微
7	576	小型	83	轻微
8	504	小型	81	轻微
9	774	小型	81	轻微
10	487	小型	79	轻微
11	600	小型	82	轻微
12	1 620	小型	86	轻微
13	480	小型	86	轻微
14	460	小型	82	轻微
15	1 260	小型	93	中等
16	650	小型	41	一般
17	660	小型	45	轻微

隆德县泥石流流体黏度大,夹有少量块石,按照物质成分来看,为泥流(图 3)。泥石流基本属于暴雨型水动力类型,流通区普遍较短,一般为 20~200 m,最长的 500 m,堆积区呈扇形,扇长、扇宽较短,扩散角大于 90°。从物质提供方式来看,为坡面侵蚀型泥石流,固体物质主要是由裸露斜坡遭受暴雨侵蚀提供。从发育阶段来看,均属发育期泥石流,坡面岩土体较破碎,风化作用日益加强,在暴雨或连续降雨的条件下,泥石流存在进一步扩大的趋势。

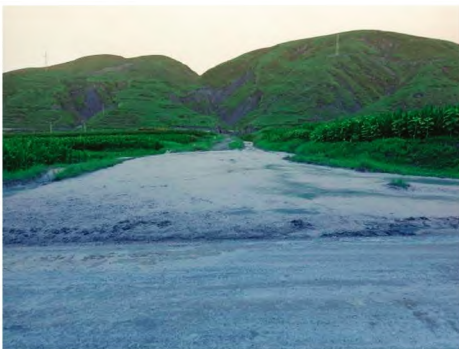


图 3 杨河乡串河村泥石流(泥流)

Fig. 3 The debris flow in Chuanhe of Yanghe village(mudflow)

3 泥石流形成条件分析

隆德县地处黄土高原西部,具备特殊的地质环境背景,主要表现为地形起伏大、沟谷水系发育、高陡斜坡林立、坡面岩土体破碎等特点^[5]。区内以渝河、甘渭河、庄浪河、什字河等为主流,支流密布,侵蚀切割作用强烈,有利于地质灾害的发生。影响泥石流形成的因素很多,比如:地形地貌、水文、气象、植被、土壤、人类活动等。综合来看,泥石流形成的三大主要条件即:沟坡比降、物源和水源。

3.1 沟坡比降

沟坡比降是提供泥石流产生的能量条件。我国西部众多泥石流启动的有利坡度一般在 25°~45°范围内^[6,7]。隆德县泥石流均发育于丘陵地貌区,坡度范围大约在 20°~50°之间。0°~20°斜坡主要分布在河谷平原区,地势平坦,地形开阔,该区地质灾害弱发育。50°~90°斜坡则主要分布在东部及东南部的六盘山区,该区出露的岩性主要为白垩系砂岩、泥岩、泥灰岩。由于隆德县政府早先就采取了封山育林政策,现在该区已成为受保护林区,植被茂盛,生态环境优良,仅在通往保护区的道路两侧零星发育有小型崩塌。

隆德县泥石流发生的坡度范围与前人研究成果相一致。在一个流域内,若物源条件和水源条件都已具备,但没有一定的能量使二者以一定的速度共同冲出沟道,那么泥石流也不会发生。沟坡比降就是主要的能量提供者,它是通过影响泥石流沟的水土势能而影响泥石流的形成^[1],沟坡比降大有利于泥石流的形成,沟坡比降小则不利于泥石流的形成。

3.2 物源条件

物源是泥石流形成的基础。境内 17 处泥石流的物源岩性均为新近系(Ngn)桔红色砂质泥岩。新近系地层主要分布于河谷两侧的丘陵地带,表层为桔红色泥岩、砂质泥岩夹钙质结核,局部地段有粉砂岩夹层;深部为淡红色含砾泥岩及石膏夹层和泥砾透镜体。由于沟壁表层遭受风化的新近系(Ngn)桔红色砂质泥岩残坡积物在降雨作用下发生滑动,堆积物汇集在沟床内,构成了泥石流的主要物源(图 4)。物源对隆德县泥石流形成的影响主要是通过其性质来实现的。

斜坡表层泥岩遭受了长时间的风化作用。野外观查发现,水对这种泥岩残坡积物的作用较强烈,由于水的作用,土体的完整性下降,强度降低,泥化现象较明显,即在水的作用下,这种泥岩残坡积物变成了可塑性较强的似泥状或泥状物质^[8],据此推

断该岩性具有膨胀性,吸水后会发生一定程度的膨胀、软化和崩解。



图 4 新近系砂质泥岩残坡积物下滑构成泥石流的物源

Fig. 4 The gliding sandy mudstone residual soil of Neogene constitutes the source of debris flow

表 2 新近系(Ngn)泥岩残坡积物基本物理指标与颗粒组成

Tab. 2 Basic physical indexes and grain size composition of mudstone residual soil of Neogene (Ngn)

干密度 $\rho_d / (g \cdot cm^{-3})$	天然含水率 $\omega (\%)$	液限 $\omega_L (\%)$	塑限 $\omega_P (\%)$	颗粒含量 (%)				
				< 0.002 mm	0.002~ 0.005 mm	0.005~ 0.05 mm	0.05~ 0.075 mm	0.075~ 2 mm
1.50	17.11	28.03	16.87	25.4	9.1	60.8	4.3	0.4

表 3 自由膨胀率 δ_f 试验结果

Tab. 3 The test results of free swelling ratio

岩性	自由膨胀率 δ_{ef} (%)				$\overline{\delta_{ef}}$
	第一次	第二次	第三次	第四次	
新近系(Ngn)泥岩残坡积物	34.2	27.3	30.5	35.6	31.9

表 4 膨胀量 δ_p 试验结果

Tab. 4 The test results of swelling capacity

岩性	膨胀量 δ_{ep} (%) ($\rho_d = 1.5 g/cm^3$, 无荷、有侧限, 试件高 2 cm)				$\overline{\delta_{ep}}$
	第一次	第二次	第三次	第四次	
新近系(Ngn)泥岩残坡积物	22	23.8	21.3	22.5	22.4

表 5 膨胀势判别结果

Tab. 5 The recognition results of expansive potential

判别指标	判别标准 ^[11]	本试验值 (%)	膨胀性
自由膨胀率 δ_f	自由膨胀率 $\geq 40\%$	31.9	非
膨胀量 δ_p	膨胀量(无荷、有侧限, 试件高 2 cm) $> 20\%$	22.4	弱
小于 2 μm 及小于 5 μm 的颗粒含量	< 2 μm 的黏粒含量占 25%, < 5 μm 的占 30%	25.4 34.5	弱

$$Z = 0.113A_{粉} + 0.195A_{黏} - 1.157I_P + 1.075W_L \quad (1)$$

式中: $A_{粉}$ 为土中 0.005~ 0.05 mm 间粉粒的百分含量; $A_{黏}$ 为小于 0.005 mm 黏粒的百分含量; I_P 为塑

为了验证此推断,作者进行了相关试验。试验样品取自隆德县凤岭乡李士村李士沟沟壁,样品的基本物理指标与颗粒组成见表 2。

关于岩土膨胀势的判别,前人已经进行了大量的研究^[9-10],但是由于目前还没有一个统一的标准,不同的判别分类指标会产生不同的结果。根据室内试验,作者选取自由膨胀率、膨胀量和小于 2 μm 及小于 5 μm 的颗粒含量 3 种常用的特性指标对样品的膨胀势进行分析,结果见表 3、表 4 和表 5。

从表 5 可以看出,以单一指标为标准的评价结果具有一定的离散性,不能充分描述岩土膨胀性。对此,余镇麟、廖世文^[12]以及长江科学院^[13]提出了多变量的判别函数式:

性指数; W_L 为液限。当 $Z > 28.89$ 时判为膨胀土,否则为非膨胀土。

$$Z = 0.273d_s + 0.57d_c + 0.133\delta_f - 0.217W_L \quad (2)$$

式中: d_s 、 d_c 同式(1)中的 $A_{粉}$ 、 $A_{黏}$; δ_f 为自由膨胀率; W_L 为液限。当 $Z \geq 33$ 时判为膨胀土,否则为非膨胀土。计算结果见表 6。

表 6 膨胀势判别结果

Tab. 6 The recognition results of expansive potential

判别式	$A_{粉}$	$A_{黏}$	I_P	W_L	Z	膨胀性
式(1)	60.8	34.5	11.16	28.03	30.82	弱
判别式	d_s	d_c	δ_{ef}	WL	Z	膨胀性
式(2)	60.8	34.5	31.9	28.03	34.42	弱

根据计算结果,可以判定该地区新近系(Ngn)泥岩残坡积物具有弱膨胀性。正是由于具有弱膨胀性,使得沟道两侧斜坡表层的新近系(Ngn)桔红色砂质泥岩残坡积物在降雨作用下形成泥状物质,导致黏聚力 c 和内摩擦角 φ 明显减小,抗剪强度大幅降低,当抗剪强度小于其受到的剪切力时,土体就会下滑至沟道,进而构成泥石流物源。

3.3 水源条件

水既是泥石流的重要组成部分,又是泥石流的重要诱发因子和动力条件^[14]。隆德县泥石流最主要的水源为降雨,所以其常发生在连续降雨或暴雨密集期。2013年,隆德县遭遇了 50 年一遇的强降

雨(图 2),其中 6 月-9 月份降雨量占到了全年的 76.9%,远高于平均水平。根据降雨资料,2013 年 6 月 22 日至 7 月 16 日境内降雨量达到了 212.5 mm(图 5),全部 17 处泥石流均是由此次降雨引发。本文结合前人关于降雨与泥石流形成关系的研究成果,以凤岭乡李士村泥石流为例,分析隆德县泥石流形成与降雨的关系。

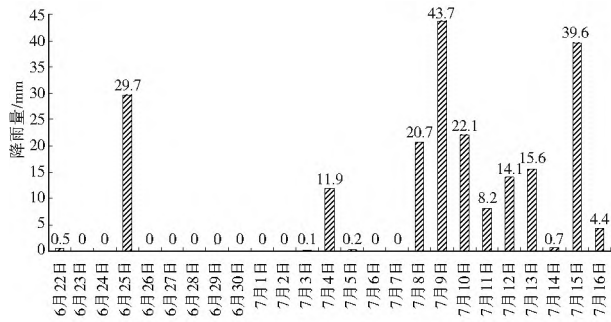


图 5 2013 年 6 月 22 日-7 月 16 日隆德县日降雨量

Fig. 5 Daily rainfall of Longde county from June 22nd to July 16th in 2013

该泥石流位于隆德县凤岭乡李士村李士沟,沟道走向近南北向,沟口为河流阶地,地形平坦,多改造为农田。泥石流堆积物岩性主要为新近系(Ngn)桔红色砂质泥岩。由于多日连续降雨,使得沟壁表层土体下滑堆积在沟道中,继续降雨,沟道中形成了具有搬运能力的水流,在水流的动力作用下于 2013 年 7 月 15 日凌晨 5 时形成泥石流。隆德县气象站监测到泥石流发生前后时降雨量见图 6。

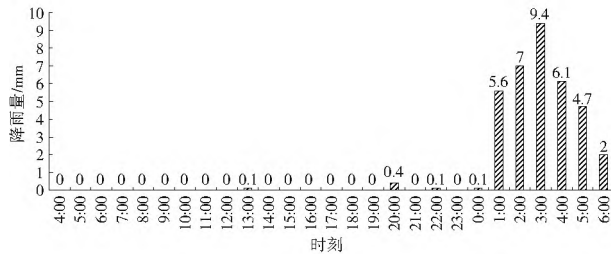


图 6 2013 年 7 月 14 日 4:00-7 月 15 日 6:00 隆德县时降雨量

Fig. 6 Hourly rainfall of Longde county from July 14th 4:00 to July 15th 6:00 in 2013

前人的大量研究表明:降雨是通过前期降雨和短历时激发降雨共同影响泥石流的形成^[1, 15-18]。前期降雨又分为间接前期降雨和直接前期降雨,间接前期降雨一般取泥石流发生前 20 d 的降雨量,日衰减系数取 0.8;直接前期降雨为泥石流发生前的当次降雨中短历时激发降雨前的降雨^[18]。短历时激发降雨为促使泥石流启动的降雨,常取泥石流发生前 1 h 雨量或 10 min 雨量^[19]。据此计算该泥石流发生的间接前期降雨量为 56.94 mm,直接前期降雨量为 28.1 mm,因此,总前期降雨量为 85.04

mm;短历时激发降雨量为 4.7 mm。前期降雨使整个流域面积内的松散土体含水量升高甚至饱和,强度大大降低;后期短历时激发降雨使土体孔隙水压力快速增加,导致土体液化,在超渗产流的裹挟作用下,沟道及斜坡上的松散物质连同水体以一定的速度流出,最终形成泥石流。据谭炳炎、段爱英^[20]对山区铁路沿线暴雨泥石流预报进行的研究,宁夏山区可能发生泥石流的界限雨量见表 7。

表 7 宁夏山区可能发生泥石流的降雨量界限值

Tab. 7 The threshold value of rainfall inducing debris flows

in mountain areas of Ningxia				
年平均降雨/mm	H_{24}	H_1	$H_{1/6}$	H_0
800~500	30	15	6	20

其中 H_{24} 为该地区可能发生泥石流的 24 h 界限雨量; H_1 为该地区可能发生泥石流的 1 h 界限雨量; $H_{1/6}$ 为该地区可能发生泥石流的 10 min 界限雨量; H_0 为泥石流发生前当次连续降雨量。

为了直观反映泥石流发生与降雨量的关系,以泥石流发生时刻算起, H_{24} 、 H_1 分别表示泥石流发生前 24 h 降雨量和 1 h 降雨量, H_0 意义如前。需要说明的是由于隆德县发展水平相对落后,要做到降雨数据的短时间观测是很困难的,所以 10 min 的降雨量无法采集到。根据图 6, H_{24} 、 H_1 和 H_0 的值分别为 33.5 mm、4.7 mm、32.9 mm。可知, H_{24} 、 H_0 均大于表 2 中的界限值,而 H_1 却小于界限值,这是因为前期降雨量较大,导致土体的含水量接近饱和,这就使得泥石流暴发所要求的短历时激发雨量减小^[19-21]。

另外,根据现场实地调查,隆德县泥石流暴发时间均滞后于峰值降雨时段,而且又是在较小的短历时激发降雨条件下形成的,这从凤岭乡李士村泥石流也可以看出,可见前期降雨对于泥石流的形成起了很重要的作用。前期降雨使土体的含水量升高直至饱和,使土体强度已经降低到一定程度甚至破坏,在较小的短历时激发降雨作用下就可形成泥石流,可以认为隆德县泥石流属于前期降雨控制型泥石流。针对此,建议有关部门加强前期降雨的监测,特别是间接前期降雨的监测,在不考虑衰减的情况下,本文间接前期降雨量为 167 mm,可以为隆德县泥石流预警预报提供借鉴。

4 结论

通过分析隆德县泥石流发生的三大条件:沟坡比降、物源和水源,得出如下结论。

(1) 境内 17 处泥石流以小型居多, 中型的仅有 1 处。由于该区泥石流所含的固体物质黏度大, 夹有少量块石, 按照物质成分来看, 属于泥流。另外, 从物质提供方式来看, 属于坡面侵蚀型泥石流; 从发育阶段来看, 属于发育期泥石流, 存在进一步扩大的趋势。

(2) 沟坡比降是提供泥石流产生的能量条件。隆德县泥石流均分布于丘陵地貌区, 坡度范围在 $20^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 之间, 相对高差在 50~ 100 m 之间, 构成了有利于泥石流发生的地形地貌条件。

(3) 物源是泥石流形成的基础。境内泥石流物源主要为新近系(Ngn) 桔红色砂质泥岩残坡积物。该岩性具有弱膨胀性, 遇水后会形成泥状, 强度降低, 以致下滑堆积, 构成泥石流物源。

(4) 降雨是隆德县泥石流最主要的水源。降雨通过前期降雨和短历时激发降雨共同影响泥石流的形成。以凤岭乡李士村泥石流为例, 结合前人研究成果, 分析降雨数据, 可知泥石流暴发时间明显滞后于峰值降雨时段, 前期降雨较大, 而短历时激发降雨较小。隆德县泥石流的形成主要受前期降雨的影响, 属于前期降雨控制型泥石流。针对此, 可通过监测前期降雨, 特别是间接前期降雨, 对泥石流形成进行预警预报。

参考文献(References):

- [1] 陈宁生. 泥石流勘查技术[M]. 北京: 科学出版社, 2011. (CHEN Ningsheng. Investigation technology for debris flows[M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese))
- [2] 殷跃平, 张作辰, 张茂省, 等. 滑坡崩塌泥石流灾害详细调查规范(1: 50000)[S]. 中国地质调查局, 2008. (YIN Yaoping, ZHANG Zuocheng, ZHANG Maosheng, et al. Specification of comprehensive survey for landslide, collapse and debris flow(1: 50000)[S]. China Geological Survey, 2008. (in Chinese))
- [3] 姚悦铃, 刘永强, 刘邦贵. 基于中心点三角白化权函数的泥石流易发性评价[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(5): 147-150. (YAO Yue ling, LIU Yong qiang, LIU Bang gui. Prone degree evaluation of debris flow based on triangle whitening weight function of central point[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(5): 147-150. (in Chinese))
- [4] DZ/T 0239 2004 泥石流灾害防治工程设计规范[S]. DZ/T 0239 2004 Design code for debris flow disaster prevention and control engineering[S]. (in Chinese)
- [5] 王博. 延安市地貌与地质灾害相关性研究[D]. 西安: 长安大学, 2013. (WANG Bo. The correlation research on geomorphology and Geological disasters in Yan'an[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013. (in Chinese))
- [6] 覃怡, 郑洪春. 都江堰八一沟 8·13 泥石流的形成条件分析[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(4): 101-104. (QIN Yi, ZHENG Hongchun. Initiation Conditions for the 8·13 Debris Flows in Bayi Gully of Dujiangyan[J]. South to North Water Transfers and

- Water Science & Technology, 2013, 11(4): 101-104. (in Chinese))
- [7] 高波, 任光明, 王军, 等. 四川汶川高家沟泥石流形成条件与启动机理研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2014, 25(4): 1-5. (GAO Bo, REN Guangming, WANG Jun, et al. Study on formation conditions and initiation mechanism of Gaojia Gully's debris flow in Wenchuan County[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2014, 25(4): 1-5. (in Chinese))
- [8] 谭罗荣, 孔令伟. 特殊岩土工程土质学[M]. 北京: 科学出版社, 2006. (TAN Luorong, KONG Lingwei. Special geotechnical engineering geology[M]. Beijing: Science Press, 2006.)
- [9] 孙元春, 尚彦军, 曲永新. 投影寻踪模型在膨胀岩判别与分级中的应用[J]. 岩土力学, 2010, 15(8): 2570-2574. (SUN Yuan chun, SHANG Yan jun, QU Yong xin. Application of projection pursuit model to swelling identification and grading of argillaceous rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 15(8): 2570-2574. (in Chinese))
- [10] 张巍, 尚彦军, 曲永新, 等. 泥质膨胀岩崩解物粒径分布与膨胀性关系试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(1): 66-72. (ZHANG Wei, SHANG Yan jun, QU Yong xin, et al. Grain size distribution of collapsed scraps of argillaceous rock and its relationship with expansibility: An experimental study[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(1): 66-72. (in Chinese))
- [11] 孙小明, 武雄, 何满潮, 等. 强膨胀性软岩的判别与分级标准[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(1): 128-132. (SUN Xiaoming, WU Xiong, HE Man chao, et al. Differentiation and grade criterion of strong swelling soft rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(1): 128-132. (in Chinese))
- [12] 廖世文. 膨胀土与铁路工程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1984. (LIAO Shi wen. Expansive soil and railway engineering[M]. Beijing: China Railway Press, 1984. (in Chinese))
- [13] 刘特洪. 工程建设中的膨胀土问题[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997. (LIU Te hong. Expansive soil problems in engineering[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997.)
- [14] 齐信. 四川松潘水沟墩沟泥石流成因和动力学特征及其对铁路工程的影响评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2014, 25(2): 13-18. (QI Xin. The Shuigoudun debris flow cause of formation and dynamic characteristics for railway engineering hazard assessment[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2014, 25(2): 13-18. (in Chinese))
- [15] 谭万沛, 王成华, 姚令侃, 等. 暴雨泥石流滑坡的区域预测与预报[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1994. (TAN Wan pei, WANG Cheng hua, YAO Lingkan, et al. Prediction and Forecast of Precipitation Debris Flow and Landslide[M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1994. (in Chinese))
- [16] 陈景武. 云南东川蒋家沟泥石流暴发与暴雨关系的初步分析[A]. 中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊(4)[C]. 北京: 科学出版社, 1985. (CHEN Jing wu. Preliminary analysis of the relationship between the outbreak of debris flow and the rainstorm in Dongchuan of Yunnan[A]. The collected papers of Lanzhou Institute of Glaciology and Cryopedology, Chinese Academy of Sciences(4)[C]. Beijing: Science Press, 1985. (in Chinese))

(下转第 193 页)

- 1970, 96(11): 2185-2200.
- [8] 谢任之. 溃坝坝址流量计算[J]. 水利水运科学研究, 1982(1): 42-46. (XIE Renzhi. Computation for the discharge from the site of dam break[J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 1982(1): 42-46. (in Chinese))
- [9] Martin J C, Moyce W J. An experimental study of the collapse of a liquid column on a rigid horizontal plane[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society, 1952, 244(882): 312-324.
- [10] Sky Miller, Hanif Chaudhry M. Dam Break flows in curved channel[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1989, 115(11): 1465-1478.
- [11] Soares Frazao S, Zech Y. Dam break in channels with 90° bend[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 128(11): 956-968.
- [12] Alexander Korobkin, Oguz Yilmaz. The initial stages of dam break flow[J]. Journal of Engineering Mathematics, 2009, 63(2-4): 293-308.
- [13] Marcela A. Cruchaga, Diego J. Celentano, Tayfun E. Tezdiryar. Collapse of a liquid column: numerical simulation and experimental Validation[J]. Computational Mechanics, 2007, 39(4): 453-476.
- [14] Zhou J G, Causon D M, Mingham C G, et al. Numerical prediction of dam break flows in general geometries with complex bed topography[J]. Journal of Hydraulic Engineering ASCE, 2004, 130(4): 332-340.
- [15] Brufau P, Garcia Navarro P. Two dimensional dam break flow simulation[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2000, 33(1): 35-57.
- [16] Dressler R F. Hydraulic resistance effect upon the dam break functions[J]. Journal of Research of the National Bureau of Standards, 1952, 49(3): 217-225.
- [17] WANG Lihui, PAN Cuihong. An analysis of dam break flow on slope[J]. Journal of Hydrodynamics, 2014, 26(6): 902-911.
- [18] 李云, 李君. 溃坝模型试验研究综述[J]. 水科学进展, 2009, 20(2): 304-310. (LI Yun, LI Jun. Review of experimental study on dam break[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(2): 304-310. (in Chinese))
- [19] 陈生水, 钟启明, 陶建基. 土石坝溃决模拟及水流计算研究进展[J]. 水科学进展, 2008, 19(6): 903-910. (CHEN Shengshui, ZHONG Qiming, TAO Jianji. Development in embankment dam break simulation and water flow simulation[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(6): 903-910. (in Chinese))
- [20] WANG Bo, ZHANG Ting, ZHOU Qin, et al. A case study of the Tangjiashan landslide dam break[J]. Journal of Hydrodynamics, 2015, 27(2): 223-233.

(上接第 164 页)

- [17] Chao Dang, Peng Cui, Zur lan Cheng, The formation and failure of debris flow dams, background, key factors and model tests: case studies from China[J]. Environmental Geology, 2009, 57, (8): 1901-1910.
- [18] 刘菲. 三峡库区坡面泥石流形成机制[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2011. (LIU Fei. The formation mechanism of debris flow on slope in Three Gorges Reservoir area[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2011. (in Chinese))
- [19] 崔鹏, 杨坤, 陈杰. 前期降雨对泥石流形成的贡献—以蒋家沟泥石流形成为例[J]. 中国水土保持科学, 2003, 1(1): 11-15. (CUI Peng, YANG Kun, CHEN Jie. Relationship between occurrence of debris flow and antecedent precipitation: Taking the Jiangjia Gully as an example[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2003, 1(1): 11-15. (in Chinese))
- [20] 谭炳炎, 段爱英. 山区铁路沿线暴雨泥石流预报的研究[J]. 自然灾害学报, 1995, 4(2): 43-52. (TAN Bingyan, DUAN Aiyang. Study on prediction for rainstorm debris flow along mountain district railways[J]. Journal of Natural Disasters, 1995, 4(2): 43-52. (in Chinese))
- [21] 陈景武. 云南东川蒋家沟泥石流暴发与暴雨关系的初步分析[C]. 全国泥石流学术论文集, 1980. (CHEN Jingwu. Preliminary analysis of the relationship between the outbreak of debris flow and the rainstorm in Dongchuan of Yunnan[C]. National academic papers on debris flow, 1980. (in Chinese))