

文章编号: 1008-2786-(2013)3-349-07

舟曲 2010 年“8·8”特大泥石流灾害致灾因素

王根龙^{1,2} 张茂省² 于国强² 叶万军³

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心 黄土地质灾害重点实验室 陕西 西安 710054;

2. 中国科学院地质与地球物理研究所 工程地质力学重点实验室 北京 100029; 3. 西安科技大学 陕西 西安 710054)

摘 要: 甘肃省舟曲县城 2010 年“8·8”特大泥石流灾害损失惨重,造成 1 675 人死亡失踪,损毁房屋 200 余栋,世界震惊。通过现场对舟曲三眼峪泥石流调查和研究,认为“8·8”特大泥石流灾害既是天灾(自然条件),又是人祸(人为因素)。换言之,自然条件和人为因素是导致“8·8”特大泥石流的主要致灾因素。自然因素调查结果表明:1. 三眼峪流域在 25 km² 范围内高差达 2 500 m,且大眼峪和小眼峪沟谷纵坡降分别达到 33% 和 36%,地形较为陡峻;2. 三眼峪流域内松散固体物质总量约为 26.4 × 10⁶ m³,被“8·8”特大泥石流冲出的固体物质仅为 1.52 × 10⁶ m³,松散物源丰富;3. 小时降雨量为 77.3 mm,属极端强降雨。人为因素分析表明:1. 城镇建设(建筑物和农田)挤占泥石流排泄通道,导致行洪能力每秒不足 300 m³;2. 按 50 a 一遇的防洪标准进行设计,以往防治工程设计标准显然不足。

关键词: 泥石流; 沟道比降; 强降雨; 防洪标准; 沟道挤占

中图分类号: P642.23

文献标志码: A

2010-08-07T22:00 左右,甘肃省甘南藏族自治州舟曲县突降强降雨,2010-08-07T24:00 许,县城北侧的三眼峪和罗家峪同时暴发特大山洪泥石流,泥石流所经区域被夷为平地,月圆村、椿场村两村被全部淤埋、摧毁,三眼村、北门村、罗家峪村、瓦场村大部被毁,泥石流直穿县城堵塞白龙江,形成堰塞湖,造成白龙江水位上涨 10 m,舟曲县城城区三分之一被淹,大量民房及城区建筑浸泡于水中。县城道路交通、供电、通讯系统陷入瘫痪,县城供水水源地及供水系统被严重破坏,居民和抢险救灾人员的生活用水陷入极端困难。据统计,此次山洪泥石流共造成 1 492 人死亡,273 人失踪,72 人受伤,受灾人数 20 227 人,毁埋农村居民房屋 5 508 间、农田 0.94 km²,毁坏机关事业单位办公楼 21 栋,是我国有历史记载以来造成损失最大的一次泥石流灾害,世界罕见^[1]。

舟曲县自建制以来,曾多次遭受泥石流灾害侵扰,自清朝以来,仅三眼峪就记载发生严重泥石流灾害有 9 次之多^[2]。2003 年开展的“县(市)地质灾害调查与区划”工作和 2008 年开展的“5·12”汶川地震灾区地质灾害应急排查工作,都将三眼峪确定为泥石流灾害隐患点,并编制了防灾预案。早在 1997 年,在三眼峪就实施了泥石流防治工程,“5·12”汶川地震灾区灾后重建工作中再度投资,于 2009—2010 年对三眼峪泥石流沟再次布设了防治工程措施^[3]。正当这次防治工程接近尾声的时候,灾难发生了。如果说地质灾害具有隐蔽性,那么怎么解释两次调查都将三眼峪确定为泥石流灾害隐患点?如果说这次泥石流灾害是意想不到的,那么怎么理解三眼峪泥石流灾害防灾预案?

通过对舟曲“8·8”特大泥石流灾害的现场调查和研究,在前人工作基础上^[4-6],本研究从自然因

收稿日期(Received date): 2012-12-08; 改回日期(Accepted): 2013-01-21。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目(项目批准号:41172262)资助。[Supported by the Nation Natural Science Foundation of China (No. 41172262).]

作者简介(Biography): 王根龙(1975-),男,汉族,陕西华阴人,副教授,博士,研究兴趣主要集中在崩塌、滑坡和泥石流地质灾害评价和计算研究等领域。[Wang Genlong, male, born in Huayin city of shannxi province, Ph D and associate professor, main researching field in assessment and calculation of geological disasters including rock falls, landslides and debris flows.] E-mail: wang2006@mail.iggcas.ac.cn

素(沟道特征、物源特征和降雨特征) 和人为因素(设计标准和城市布设) 等方面对舟曲“8·8”特大泥石流灾害的致灾因素进行了总结与反思。

1 自然因素

1.1 沟道特征

三眼峪流域山高沟深, 地势陡峻, 沟壑密集, 沟床纵比降大^[7](图1)。三眼峪沟位于白龙江左岸舟曲县城北侧, 流域面积达24.1 km², 流域内共发育大小沟谷50条, 主沟、支沟及次级支沟间呈树枝状交汇。流域平面形态呈“勺”状, 上、中游段狭窄、陡深, 谷底宽10~20 m, 呈“V”型; 下游段谷坡陡立, 谷底宽20~60 m, 谷型呈窄深“U”型; 沟口呈扇状, 扇形地中前部宽437 m, 长1 875 m, 面积0.87 km²。

三眼峪在舟曲县城汇入白龙江一带, 高程为1 340 m, 但在三眼峪后缘山顶最高点海拔为3 828 m, 从发源处至沟口仅6 km, 高差达2 488 m, 虽然在沟口出山后相对宽缓, 坡降仅为9%, 但沟谷坡降平均为24%, 特别是在大眼峪和小眼峪后缘, 沟谷坡

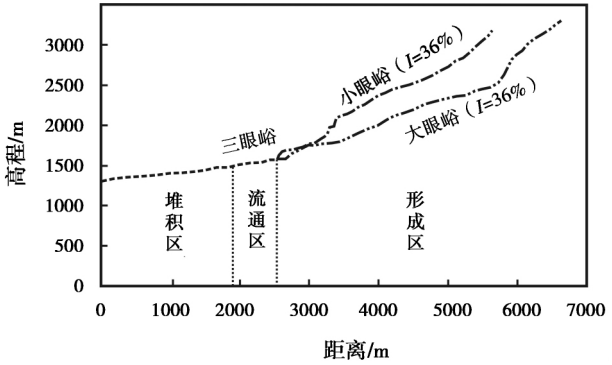


图2 三眼峪流域泥石流沟床纵坡图

Fig. 2 The channel gradient of Sanyanyu valley

降分别达到了33%和36%(图2)。这种高山峡谷的地形地貌, 极利于降水在短期内汇集, 使坡面水流和支沟汇流迅速获得能量, 在主沟道集中, 导致泥石流速度加快, 具有短径流、大洪峰的特点, 容易形成特大型泥石流。

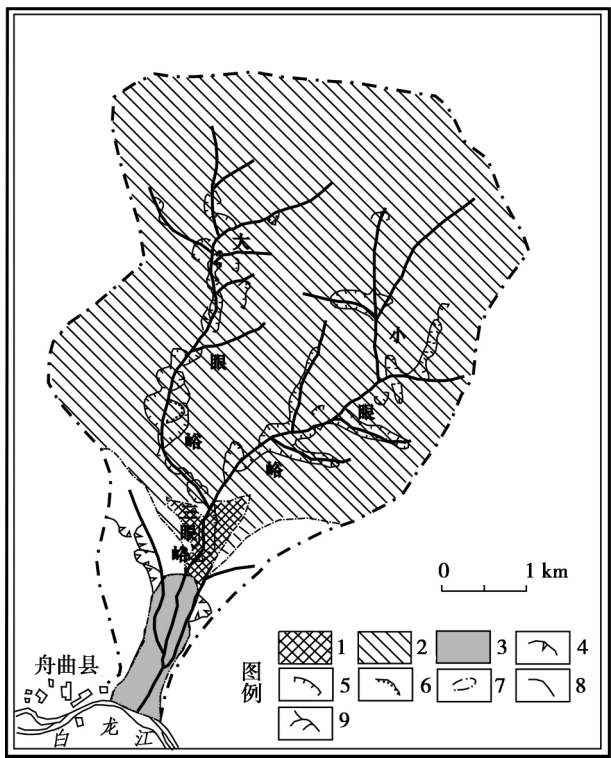
1.2 物源特征

除了沟道坡降比大的原因之外, 沟道内赋存的大量松散固体物源(松散固体物质总量约为3 414.38 × 10⁴ m³, 流域内可转化为泥石流的松散固体物质总量约为2 132.93 × 10⁴ m³, 占总量的62.5%) 也是灾难加重的一个原因。舟曲属地震多发和较强活动区, 据国家地震局烈度区划, 其地震烈度为Ⅶ度。有史以来有文字记载的引起县城房屋倒塌及山崩、滑塌的地震有9次之多(表1)。2008年

表1 舟曲县及邻区主要地震统计表

Table 1 The statistical table of main earthquakes occurred in Zhouqu city and adjacent area

时间	震中位置	震级	灾害记载
公元前186	武都	6~7级	羌道地震, 山崩, 人死亡甚多
1634	文县北	6.0级	阶州、西固地震, 山崩
1677	武都	5.5级	阶州、西固地震月余, 墙垣颓废, 压死人畜甚多
1879-06-29	武都南	5.7级	西固大震, 墙垣倒7.5丈, 民房倒塌压死430人
1879-07-01	武都	8.0级	西固大震, 民房倒塌
1960-02-03	舟曲	5.2级	县城、南山和北山三眼峪石崖等处是崩塌
1976-08-22	松潘	6.7级	舟曲县城部分房屋损毁, 南山、北山等处岩石崩塌
1976-08-23	松潘	7.2级	山等处岩石崩塌
1987-01-08	迭部	5.9级	县城多处房屋倒塌
2008-05-12	汶川	8.0级	舟曲为重灾区, 造成人员伤亡



1. 泥石流形成区 2. 泥石流流通区 3. 泥石流堆积区 4. 滑坡 5. 崩塌 6. 滑塌 7. 流域界线 8. 分区界线 9. 冲沟

图1 三眼峪泥石流分区图

Fig. 1 Zoning map of debris flow of Sanyanyu valley

汶川地震波及舟曲,使舟曲成为重灾区之一,地震导致舟曲县城周边山体松动、岩层破碎、岩石裂隙增加,造成境内多处滑坡、崩塌。地震的强烈活动,直接破坏了岩体结构和坡体稳定性,为泥石流提供了丰富的固体松散物质。

调查还中发现,在大眼峪和小眼峪沟道中有多处天然堆石坝(图3)。这些大型崩塌体形成的天然堆石坝和人工修建的谷坊坝溃坝后,往往造成“多米诺骨牌效应”式的毁坏,对泥石流沟口外的堆积区造成巨大的破坏。

1.3 降雨特征

2010-08-07T23:30左右,舟曲县城北侧三眼峪、罗家峪流域突降暴雨^[8],据东山雨量站观测数据得知在8月7日23时之前观测到的降水量仅为1.5 mm,而在7日24时观测到的降水量即达峰值77.3 mm(图4),至8月8日1时则快速衰减至10.9 mm,2时以后至1~2 mm。表明此次强降水过程突发性强,历时较短。突发强降水因汇流区由灰岩组成的谷坡渗透能力弱,且谷坡地形陡峻,从而能够快速产流,雨洪汇集后洪流暴涨随即携裹沟道内的松散堆积物引发泥石流,泥石流借助平均达24%的沟道纵比降产生极大的势能和运移速度,仅在降水开始后约20 min时间内泥石流即迅速冲出峪口致灾。

据当地气象台数据显示,8月7日夜强降雨出现在舟曲县城以北地区,而同时段舟曲县城却降雨较小。舟曲县城气象站测得降雨记录是从7日22时57分开始,至0时降雨量为2.4 mm,最大降雨量0时至1时为6.8 mm,而整个持续6 h的降雨过程仅为12.8 mm;而位于县城以北的东山乡区域气象站监测到7日22时至23时1 h降雨量为77.3 mm,整个降雨过程时间为9 h,降雨量为96.3 mm。根据灾后对三眼峪沟流域汇水区进行调查,激发“8·8”特大型泥石流的特大暴雨区域集中于该沟中上游峪支沟——罐子坪以上的区域,面积17.27 km²,占流域面积的71.6%,占汇流区总面积(21.19 km²)的81.5%。暴雨区域内坡面冲蚀及沟道汇流印痕明显,而在峪支沟——罐子坪下游坡面汇流现象不明显,两侧沟坡陡坡地段及凹形汇流负地形未形成明显的地表径流冲刷迹象,对坡下堆积的细粒松散物质也未见冲蚀。可见激发“8·8”三眼峪沟特大型泥石流灾害的暴雨局地性强,降水区域集中,分界比较明显,流域中上游暴雨强度大,而其下游多为小到中

雨。

正是流域下游及舟曲县城降雨较小,使人们对北侧山上的强降雨没有引起足够的重视,因而没有很好的预警,才造成此次泥石流灾害损失如此惨重。

2 人为因素

2.1 泥石流防治工程设计标准

现有的泥石流防治工程大多按50 a一遇的防洪标准进行设计,对泥石流裹挟的块石产生的冲击力考虑相对较弱,因此,当遭遇块石,或者巨石冲击时,防护工程往往达不到预期的效果,甚至形成连锁反应式的毁坏。现场调查发现,舟曲泥石流冲击扇上粒径大于3 m的巨石达60多个,有些重量大于500 t(图5),带来的冲击力超过1 000 t,因此,浆砌块石构筑的谷坊等拦挡工程很难抵御如此巨大的冲击力。1997—1999年以及2008年汶川地震后,当地政府先后在三眼峪泥石流沟修建了9座浆砌块石拦挡坝^[9],但可惜的是全部在2010年的舟曲特大泥石流中遭到了毁坏(图6)。

以主1#坝体为例,通过离散元软件(UDEC)模拟浆砌块石重力拦挡坝受泥石流冲压破坏的状态(图7)。离散元数值计算分两步进行,先模拟泥石流发生前(不施加泥石流冲击力)的浆砌块石拦挡坝稳定性,程序运行12 750次时步后模型停止计算,结果表明在天然状态下拦挡坝处于稳定状态;然后施加水平向泥石流整体冲击力(三眼峪泥石流沟口位置整体冲击力 $P=85$ kPa),浆砌块石拦挡坝逐渐发生变形破坏,其破坏过程如下^[10](图8)。

1. 局部破坏阶段(倾斜变形,局部脱落)。受泥石流整体冲击力作用,坝体向沟谷下游方向发生整体倾斜变形现象,坝顶和面坡局部产生砂浆和块石脱落破坏。

2. 上部破坏阶段(拉裂张开,上部塌落)。沿块石与砂浆黏和部位产生应力集中现象,当拉应力超过砂浆抗拉强度时,块石间产生拉裂张开,并首先导致坝体上部破坏。

3. 整体破坏阶段(裂隙扩展,倒塌解体)。拉裂张开变形破坏向坝体中部和下部扩展,在冲击力作用下,拦挡坝产生倾倒塌落,并最终发生整体破坏。

4. 破坏后阶段(携带搬运,扇面堆积)。坝体解体破坏后,块石与砂浆被泥石流介质携带向下游搬运,最后堆积在沟口外的堆积扇(带),搬运距离可



图3 大眼峪沟道中的天然堆石坝

Fig. 3 A natural rock-fill dam in the Dayanyu gully.

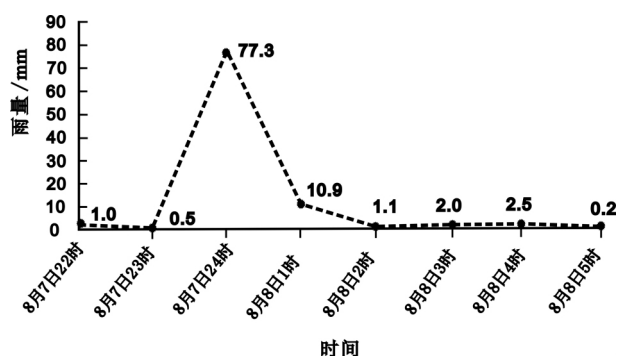
图4 东山雨量站8月7日22时至8月8日5时
降雨历时曲线Fig. 4 Rainfall intensity at Dongshan rainfall station Zhouqu
from PM 22:00 of August 7 to AM 5:00 of August 8

图5 三眼峪泥石流冲积扇上的巨石

Fig. 5 A boulder on the alluvial fan of Sanyanyu debris flow

达1~2 km。

浆砌块石重力式拦挡坝受泥石流整体冲压破坏过程可以总结为:拉裂张开→上部塌落→拉裂张开→上部塌落→裂隙扩展→整体倒塌→携带搬运→扇面堆积。

灾后治理中,从治理工程的安全性、稳定性及保护舟曲县城的安全考虑,采用浆砌块石重力坝难以



图6 破坏后的小眼峪1#坝体

Fig. 6 The dam No. 1 has been destroyed in Xiaoyanyu gully

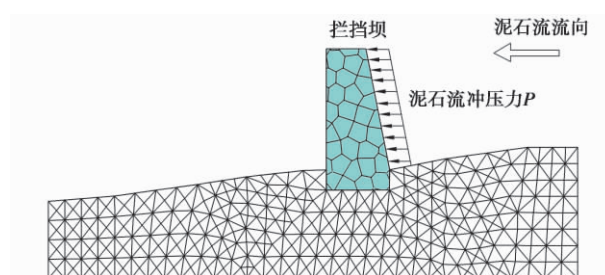


图7 浆砌块石重力坝受泥石流冲压离散元模型

Fig. 7 UDEC model of grouted stone dam under fluid pressure
of the debris flows

抵御泥石流流体和巨大石块的冲击作用。因此,建议采用抗剪切、抗冲击力强的钢筋混凝土类型的拦挡坝,如钢筋混凝土重力坝、钢筋混凝土格栅坝等,以增加其安全可靠程度^[11]。

现有泥石流的防治标准沿用的是防洪标准,而山洪和泥石流完全不一样,泥石流密度很大,夹杂着大量的石块,冲击力强。所以,不能完全套用防洪标准来防范泥石流,防治工程的关键部位标准要提高。从本次防治工程的彻底失败来看,泥石流防治工程设计不仅要考虑其行洪能力,而且要充分考虑其抗冲击的能力;各级拦挡工程能够协同发挥作用,共担风险。

2.2 城区建筑物布设

舟曲县人多地狭,城区人口近5万人,而县城可利用土地面积仅为1.47 km²,人口密度居甘肃省县级市之首,人地矛盾十分突出。由于过去人口较少,城区主要分布在泥石流危害较轻的白龙江两岸。随着人口的增长,县城的范围迅速扩大,三眼峪口至白龙江岸边的老泥石流堆积区已基本被人类开发利用,成为舟曲县城主要的城建区之一,舟曲县城及城关乡的10个自然村分别坐落于三眼沟堆积扇的中、

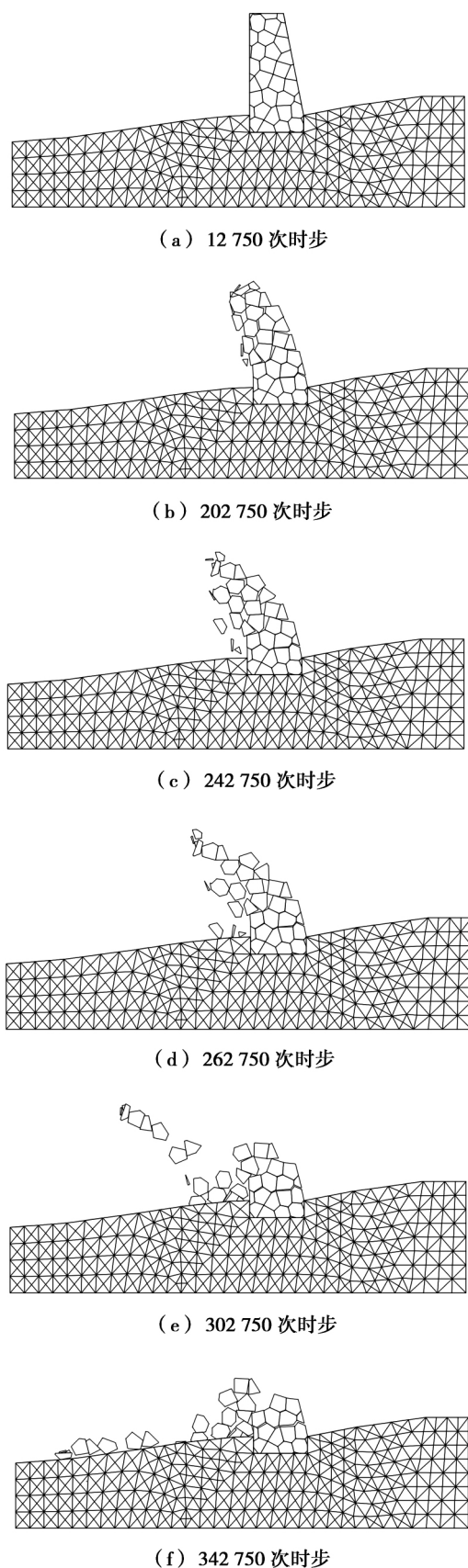


图8 拦挡坝破坏过程的几何状态

Fig. 8 The failure processes of the grouted stone dam by DEM

前部和中后部。

泥石流在山谷中属于沟谷型泥石流,从山中流出后由于堆积区地形宽大,出沟后迅速扩散,形成面状泥石流,并迅速向前推进,形成宽 120 ~ 290 m 的冲蚀、淤埋区。泥石流冲积扇中部以冲击、推移、毁埋为主,而外侧以淤埋为主。泥石流到达舟曲城区后,由于沟道被建筑物严重挤占,行洪能力大大减小,再次变为沟谷型泥石流,形成“盲肠状”通道或“瓶颈”现象(图 9 ~ 10)。据现场测定,泥石流从沟谷中冲出时,流量为 1 500 ~ 2 000 m³/s,而到县城城区的月圆村、北关村,由于大量城区建筑挤占沟道,过流断面狭小,行洪能力每秒不足 300 m³。泥石流受城区建筑阻碍形成短暂的汇流聚集,洪峰高度达 18 m,浪头飞溅高度 4 m,摧毁了挤占行洪通道的全部建筑物。

其后,在强大能量的催动下,泥石流横冲直撞,直奔白龙江,淤塞河道形成长约 3 km,宽 100 m,深 9 m,蓄水量约 150 × 10⁴ m³ 的泥石流堰塞湖,造成



图9 建筑物挤占沟道导致行洪通道出现瓶颈

Fig. 9 Bottleneck phenomenon at the front of the alluvial fan.

It's the reason of buildings' occupancy



图10 舟曲县泥石流排导沟断面过小现象

Fig. 10 The adequate cross section area of drainage channel for debris flow in Zhouqu county

县城大部分沿江企事业单位建筑、居民房屋被水淹没,形成次生灾害,其淹没区面积约 0.3 km^2 ,造成了重大损失。

综合分析,城市的布设是这次泥石流灾难加重的一个主要原因,而保持足够的排导沟过流断面和顺畅的排导条件,减少对排导沟的挤占应该引起高度的重视。然而,灾害发生后,笔者对舟曲的其他几条沟进行了调查,发现挤占问题依然存在(图 10)。

3 结论及建议

舟曲“8·8”特大泥石流灾害是我国建国以来造成人员伤亡和经济损失最大的一次泥石流灾害,具有突发降雨、深夜暴发、致灾迅速和链生效应等特点。经过现场调查和分析,对泥石流的致灾因素有以下几点结论及建议:

1. 从自然条件上看,流域内陡峻的地形和丰富的松散固体物质是三眼峪沟本身即具备形成泥石流的良好条件,而极端强降雨则直接激发了本次特大型泥石流。

2. 从人为因素上看,城镇建设挤占泥石流排泄通道,泥石流防治工程设计标准过低等不合理人类活动是导致损失惨重的主要原因。

为了有效防治白龙江流域泥石流灾害,避免或减少此类事件的再次发生,应在今后采取以下几个方面的措施:

1. 开展流域内受泥石流威胁的集镇区域地质环境适宜性评价和地质灾害危险性评估,科学划定泥石流危险区域,为泥石流的下泄预留足够通道。

2. 采用主沟拦挡和堆积区疏排相结合的泥石流防治措施,减少泥沙输出量,减轻县城防洪压力;根据泥石流发育特征、成灾特征及其危害程度,提高泥石流灾害防洪标准和防治等级。

3. 加强地质、地震、气象、洪涝灾害等专业监测系统建设,加强预测预警装备配备,提高地质灾害监测预报预警能力。

4. 充分发挥地质灾害群测群防的作用,形成群专结合的山洪、泥石流等地质灾害预防体系;提升社会公众对防灾减灾的参与程度,增强全民自防自救和互救能力。

参考文献(References)

- [1] Dijkstra T A, Chandler J, Wackrow R, et al. Geomorphic controls and debris flows – the 2010 Zhouqu disaster, China [G]//Proceedings of the 11th International Symposium on Landslides (ISL) and the 2nd North American Symposium on Landslides, June 2 – 8, 2012, Banff, Alberta, Canada
- [2] Tang C, Rengers N, Th W J van Asch, et al. Triggering conditions and depositional characteristics of a disastrous debris flow event in Zhouqu city, Gansu Province northwestern China [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences. 2011, 11(11): 2903 – 2912
- [3] Yu Bin, Yang Yonghong, Su Yongchao, et al. Research on the giant debris flow hazards in Zhouqu County, Gansu Province on August 7, 2010 [J]. Journal of Engineering Geology. 2010, 18(4): 437 – 444 [余斌, 杨永红, 苏永超, 等. 甘肃省舟曲 8.7 特大泥石流调查研究报告[J]. 工程地质学报. 2010, 18(4): 437 – 444]
- [4] Ma Dongtao, Qi Long. Study on comprehensive controlling of debris flow hazard in Sanyanyu Gully [J]. Bulletin of soil and water conservation, 1997, 17(4): 26 – 31 [马东涛, 祁龙. 三眼峪沟泥石流灾害及其综合治理[J]. 水土保持通报, 1997, 17(4): 26 – 31]
- [5] Tie Yongbo. The methodology and framework study of urban debris flow risk assessment [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology. 2009 [铁永波. 强震区城镇泥石流灾害风险评估方法与体系研究[D]. 成都: 成都理工大学. 2009]
- [6] Xu Qiang. The 13 August 2010 catastrophic debris flows in Sichuan Province: characteristics, genetic mechanism and suggestions [J]. Journal of Engineering Geology. 2010, 18(5): 596 – 608 [许强. 四川省 8.13 特大泥石流灾害特点、成因与启示[J]. 工程地质学报. 2010, 18(5): 596 – 608]
- [7] Wang Genlong, Zhang Maosheng, Zhang Xinshe, et al. Key technology research on the “8.8” extra large-scale debris flow stabilization in Zhouqu [J]. Northwestern Geology. 2011, 44(3): 100 – 106 [王根龙, 张茂省, 张新社, 等. 舟曲“8.8”特大泥石流治理中的关键技术研究[J]. 西北地质. 2011, 44(3): 100 – 106]
- [8] Wei Xingong, Wang Zhenguo, Bao Hongxia. Analysis of geology hazard caused by the rainfall in Zhouqu County [J]. Gansu Science and Technology. 2008, 24(21): 84 – 88 [魏新功, 王振国, 包红霞. 降水原因造成的舟曲县地质灾害分析[J]. 甘肃科技. 2008, 24(21): 84 – 88]
- [9] Ma Dongtao. Some suggestions on controlling catastrophic debris flows on Aug. 8 th 2010 in Zhouqu, Gansu [J]. Journal of Mountain Science. 2010, 28(5): 635 – 640 [马东涛. 舟曲“8.8”特大泥石流灾害治理之我见[J]. 山地学报. 2010, 28(5): 635 – 640]
- [10] Wang Genlong, Zhang Maosheng, Zhao Cheng, et al. Post-thinking of the former mitigation measures for the Sanyanyu debris flow [J]. Northwestern geology. 2011, 44(3): 115 – 121 [王根龙, 张茂省, 赵成, 等. 对三眼峪泥石流以往防治措施的反思[J]. 西北地质. 2011, 44(3): 115 – 121]
- [11] DZ/T 0220—2006. Specification of geological investigation for debris flow stabilization [S] [DZ/T 0220—2006. 泥石流灾害防治工程勘查规范[S]]

Factor Analysis for Catastrophic Debris Flows on August 8 2010 in Zhouqu City of Gansu ,China

WANG Genlong^{1 2} ZHANG Maosheng² ,YU Guoqiang² ,YE Wanjun³

(1. Key Laboratory of Geo-hazards in Loess Area ,Xi'an Center of Geological Survey ,China Geological Survey ,Xi'an 710054 ,China;

2. Key Laboratory of Engineering Geo-mechanics ,Institute of Geology and Geophysics ,Chinese Academy of Sciences ,Beijing 100029 ,China;

3. Xi'an University of Science and Technology ,Xi'an 710054 ,China)

Abstract: In August 2010 the large debris flows occurred in Sanyanyu valley and Luojiayu valley in Zhouqu county , Gansu province , northwestern China. It was the most destructive and natural disaster during the last several decades. The rare event destroyed more than 200 buildings and flooded about two-thirds of Zhouqu county , killing 1 675 people. The field investigation and research shows that the extra-large scale debris flow disaster is not only a natural hazard but also a man-induced catastrophe. The natural factors for the debris flows have three conditions including steep geomorphology , abundant loose materials and heavy rainfall. Firstly , the altitude difference of the valley is up to about 2 500 m in a catchment area of 25 km² , and the channel gradients of the Dayanyu gully and Xiaoyanyu gully reach 33% and 36% respectively. Secondly , the volume of the deposited loose materials in Sanyanyu valley is estimated to be 26.4 million m³ among which only 1.52 million m³ have been carried by the Zhouqu 2010 debris flows. Thirdly , the hourly rainfall from 11:00 P. M. of 7 August to 12:00 P. M. was up to 77.3 mm. Investigation results also show that the insufficient design standard of protective measures (e. g. blocking dam and drainage channel) and occupancy problem of buildings and farmland in drainage channel are the main reasons for the heavy losses. The lessons learned from the debris flows will be valuable for the disaster area of Zhouqu County in future disaster mitigation.

Key words: debris flow; channel gradient; heavy rainfall; flood control standard; occupancy of drainage