

文章编号: 1108 - 2786 - (2016) 1 - 84 - 08

DOI: 10. 16089/j. cnki. 1008 - 2786. 000104

九旬峡库区地质灾害发育分布及影响因素

宋丹青¹ 梁收运² 王志强^{2,3} 徐永福^{1*} 冯兴波¹

(1. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院,上海 200030; 2. 兰州大学 土木工程与力学学院,甘肃 兰州 730000;

3. 水利部 水利水电规划设计总院,北京 100081)

摘 要: 九旬峡水库蓄水后库区地质环境发生较大幅度上的改变,地质灾害发育。通过对库区的多次实地调查,分析了地质灾害的发育、分布特性及其影响因素,系统地分析了库区地质灾害的主要类型。结果表明:河流对库区地质灾害的分布具有重要影响,地质灾害点的分布基本位于距离库岸 3 km 范围内,约有 50% 位于 1 km 范围内,随着与库岸的距离增加,表现为递减趋势;地质灾害的分布与地貌有密切的关系,大多数地质灾害发生在高程 2 200 ~ 2 500 m,尤其是坡度 30° ~ 50° 的范围内;地质灾害在流域内分布范围广、灾害点多、具有带状分布特征,主要沿库区沿岸发生,多呈线性分布;不同的岸坡结构控制着地质灾害的发育、分布,地质灾害的类型、发育分布也与坡体结构、岩土体性质密切相关;库区滑坡和泥石流主要类型分为 3 类,分析了灾害形成机制,为库区地质灾害的防治提供可靠依据。

关键词: 地质灾害; 分布; 发育; 影响因素; 库区

中图分类号: P642. 2, P694

文献标志码: A

黄河上游地区地貌类型复杂,新构造活动强烈,地质灾害严重,是我国地质灾害特别发育的地区之一^[1]。洮河是黄河上游的重要支流,区内地质灾害分布广泛,在库区范围地带尤其发育,这些地质灾害严重威胁重大水利工程的安全,严重破坏生态环境和国土资源^[2]。九旬峡水利枢纽顺利建成后出现较多的地质灾害,不利于水库的正常运营。

随着九旬峡水利枢纽的建成,库水位出现大幅度的抬升,加剧了库区内滑坡、泥石流等灾害的发育及产生。滑坡主要由于库水位升降引起的^[3],泥石流主要由降雨、地震及人类工程活动等因素诱发^[4]。但是,九旬峡库区地质灾害的分布及发育与哪些因素有关?其影响机理值得深入探讨。研究该区的地质灾害形成条件和发育分布规律,可为九旬峡库区地质灾害防治提供了有力支撑。

1 工程地质条件

1.1 区域地貌

库区位于甘肃省卓尼县洮河中游的九旬峡区段,为典型的河谷型水库(图 1),总体地势西高东低、沟壑纵横。地貌为山地和河谷地貌,洮砚 - 马莲滩段阶地、漫滩及心滩发育,河流纵降比约 2.5‰。洮砚 - 柳林段为峡谷地形,坡度在 38° ~ 60° 之间。山地地貌由三个亚区构成:低中山亚区位于马连滩 - 洮砚,高程 2 000 ~ 3 000 m,相对高度大于 500 m;中高山亚区位于燕子坪下游段,高程大于 3 000 m,相对高度大于 1 000 m;高中山亚区位于燕子坪 - 洮砚区域,高程大于 3 500 m,相对高度大于 500 m。根据地形坡度特征,将区内坡度分为 4 部分: >

收稿日期(Received date): 2015 - 08 - 31; 改回日期(Accepted): 2015 - 09 - 09。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目(41272318, 41472251); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2014CB744701)。[The National Natural Science Foundation of China (41272318, 41472251); The national key basic research and development program (2014CB744701).]

作者简介(Biography): 宋丹青(1989 -),男,博士研究生,主要从事岩土工程方面的研究工作。[Song Danqing(1989 -), male, Ph D, born in Zhengzhou City, Henan Province. Mainly engaged in the research of geotechnical engineering.]

50°、40° ~ 50°、31° ~ 40° 和 < 30° 地段。根据勘察资料统计表明^[5]: 30° ~ 50° 地段发育分布的地质灾害占总数的 50% 以上。



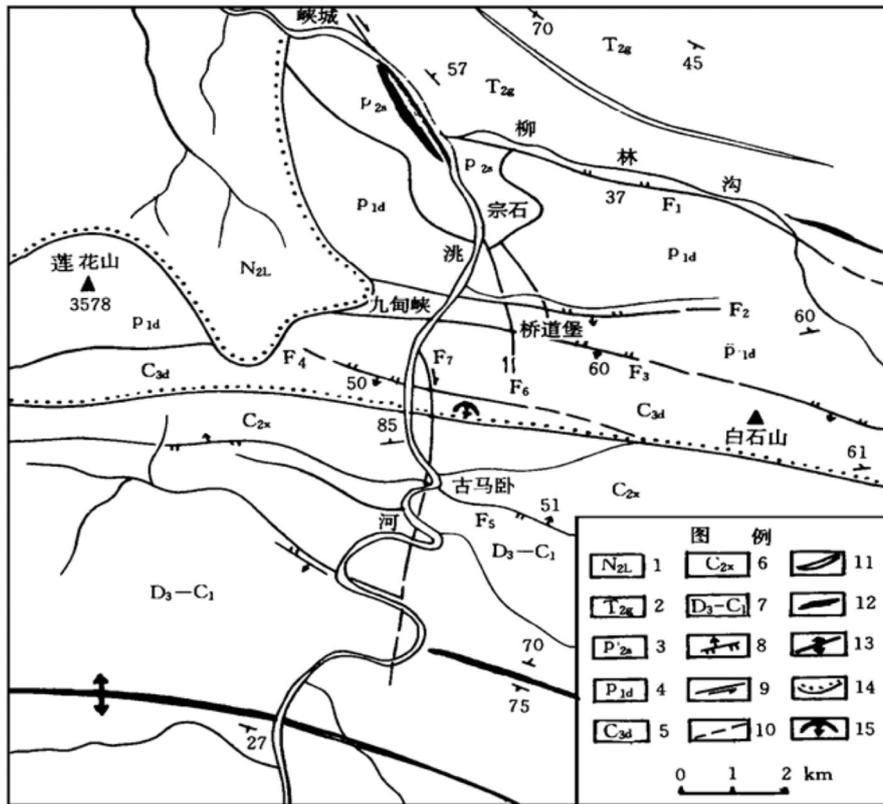
图 1 九旬峡库区河谷形地貌

Fig. 1 Valley shape features in Jiudian Gorge Reservoir

1.2 区域地层岩性

库区内出露前第四纪地层主要有石炭系 (C)、

二叠系 (P)、三叠系 (T) 和古近、新近系 (E、N) 第四系在区内广泛分布。石炭系 (C): 下统 (C₁) 集中分布在洮砚 - 燕子坪段 岩性为石英砂岩夹页岩、砂质板岩; 中、上统 (C₂ - C₃) 分布在九旬峡主坝的上游地段 岩性为中厚层 - 巨厚层块状灰岩、页岩等。二叠系 (P): 下统 (P₁) 分布在九旬峡中下游峡谷段和洮砚以上地段 岩性为灰岩、板岩、页岩及砾岩等; 上统 (P₂) 零星出露于柳林沟沟口处洮河两岸 岩性为砾岩、砂岩。三叠系 (T): 主要分布于九旬峡峡谷下游右岸 岩性为石英砂岩、粉砂岩、泥岩。根据《岩土工程勘察规范》(GB50021 - 2001), 可将区内地层岩性分为 3 类: 坚硬、较硬厚层状碎屑岩、碳酸盐岩岩类, 为石炭系 (C) 厚 - 巨厚层状灰岩和角砾状灰岩、结晶灰岩及石英砂岩夹砂质板岩、页岩; 软硬相间薄 - 中厚层状碳酸盐岩、碎屑岩岩类, 为二叠系 (P) 及三叠系 (T) 的灰岩、砂砾岩、砂岩、板岩、砂质页岩、碳质页岩; 软弱层状碎屑岩岩类, 为古近、新近系 (E、N) 的砾岩、砂岩、泥岩。



1 上新统临夏组; 2 中三叠统古浪堤组; 3 上二叠统石关群; 4 下二叠统关山群; 5 上石炭统东扎口群; 6 中石炭统下加岭群; 7 上泥盆 - 下石炭统; 8 逆断层; 9 平移断层; 10 推测断层; 11 向斜轴迹; 12 背斜轴迹; 13 复背斜轴迹; 14 角度不整合; 15 滑坡

图 2 九旬峡区域地质构造图

Fig. 2 The regional geological structure diagram in Jiudian Gorge Reservoir

1.3 区域地质构造

库区位于南北地震带的临潭-岷县和天水-武山地震亚带,区内地震活动频繁,属7度地震烈度区。区内新构造运动以振荡性抬升为主,表现为山地强烈隆升,流水急剧下切,形成典型的高山峡谷地形。受陇西旋卷构造体系、河西系和祁吕贺山字型构造体系的影响,区内褶皱、断裂发育,构造复杂。区内展布新堡-力士山复式背斜,其轴线位于寺下川一带,呈 $NW275^{\circ}\sim 300^{\circ}$ 舒缓波状展布,复背斜两翼形成一系列平行连续排列的平缓短轴式背向斜。区内东南角和东北角展布北西-北西西向断陷盆地,中新界地层展布轴向 $NW300^{\circ}\sim 320^{\circ}$ 的背向斜构造,但其断裂不发育。区内发育有羊沙-业力大山、下拉地-石门口-柏林口、红崖-堡尖山、锅麻滩等的压性断裂构造带,断裂长均有数十公里,破碎带宽局部达50~100 m,走向为北西 $270^{\circ}\sim 285^{\circ}$,多倾向南,倾角 $60^{\circ}\sim 85^{\circ}$,长3~10 km。

2 地质灾害的分布及影响因素

库区内主要地质灾害类型为泥石流、滑坡、崩塌及危岩松动体等。地质灾害点较多(图3),呈区域性集中的特点。分布范围主要是沿河流、断裂带、沟谷、库区公路分布,呈带状、线状分布,高程主要集中在2 200~2 600 m。经现场调查库区地质灾害的空间分布特征主要有以下几点。

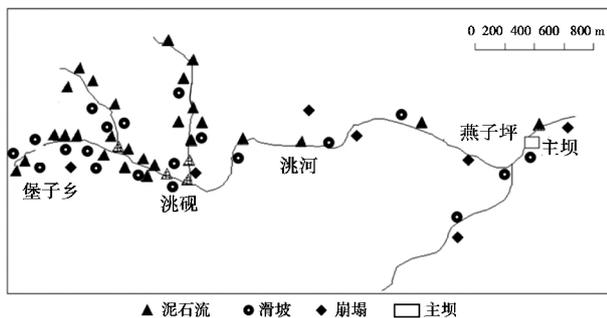


图3 地质灾害分布图

Fig. 3 Distribution of geological disaster

2.1 空间分布特征

2.1.1 范围广、灾害点多

根据甘肃省水电设计院的现场调查分析^[5],区内泥石流、滑坡等数量多、分布广,并且许多正在发育的地质灾害广泛分布于库区内。大型地质灾害较少,小型地质灾害繁多,是区内地质灾害的较为明

显的特点,库区总面积 916 km^2 ,主要地质灾害近150处,其中危岩松动体8处、崩塌57处,滑坡39处、泥石流沟45条。

2.1.2 具有带状分布特征

沿库岸及河谷地质灾害呈“带状”分布。根据现场调查,滑坡多分布于库区沿岸并且滑坡的发育具有明显的地带性,主要分布于洮砚以上区段,洮砚-马连滩段共发育滑坡28个,占71.8%;泥石流也具有明显的地带性规律,主要分布于洮砚以上的河谷两岸及支沟内、线密度达到2~5条/km。



图4 库岸塌岸及人工开挖边坡

Fig. 4 Bank collapse and artificial excavation slope

2.1.3 新地质灾害发育

根据野外调查可知,许多地质灾害是在水库投入使用后产生的,并且许多正在发育之中。由于水库蓄水产生的库岸滑塌现象在库区沿岸非常严重(图4),线密度较大;由于人工开挖公路形成的高陡边坡(图4)在强降雨的条件下容易发生下滑。

2.2 影响因素

2.2.1 地貌

地貌是地质灾害形成的主控因素之一^[6]。库区地貌可分为山地和河谷地貌,其中山地地貌由低中山亚区、中高山区和高中山区3个亚区构成。根据勘测资料统计,地质灾害多发生在2 200~

2 500 m 高程。经过现场踏勘, 地质灾害的发育程度及产生的具体部位和库区的微地貌形态具有密切关系。

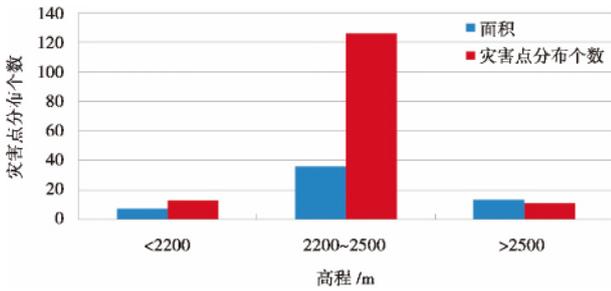


图 6 地质灾害分布与高程的关系直方图

Fig. 6 Relationship histogram of geohazards distribution and elevation

1. 高程

经现场调查可知, 大部分滑坡崩塌产生于高程 2 200 ~ 2 500 m 范围内, 其中又以 2 200 ~ 2 400 m 密度最高, 达 3.6 个/km², 2 400 ~ 2 600 m 次之, 1.79 个/km²。这是因为 2 200 ~ 2 500 m 高程河谷岸坡地形坡度较陡, 岩体卸荷强烈, 受地震动响应也最突出, 因而地质灾害发育最多(图 6、表 1)。

表 1 地质灾害分布于高程的关系

Tab. 1 Relationship of geohazards distribution and elevation

高程/m	面积/km ²	个数	密度/(个/km ²)
<2 200	7.24	13	1.80
2 200 ~ 2 500	35.71	126	3.53
>2 500	13.52	11	0.81

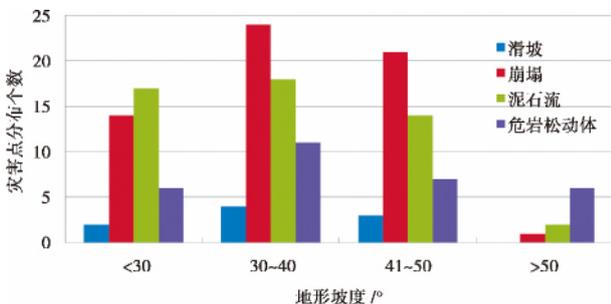


图 7 地质灾害分布与地形坡度的关系直方图

Fig. 7 Relation histogram of geohazards distribution and degree of slope

2. 坡度

地形坡度也是地质灾害分布和发育的主要控制性因素之一^[6]。根据勘测资料显示, 地质灾害点大部分位于 30° ~ 50° 的坡度范围内(图 7、表 2), 经分

析可知主要集中在地形坡度起伏较大及坡度变陡处。这是因为该范围内坡度较陡、结构松散等特点, 为地质灾害的发育及产生提供良好条件, 并且由于区内地震活动频繁, 容易在地震动力等外力作用下发生失稳^[7-8]。

表 2 地质灾害分布与地形坡度的关系

Tab. 2 Relation between distribution of geohazards and degree of slope /处

坡度 /°	<30	30 ~ 40	41 ~ 50	>50
滑坡	2	14	17	6
泥石流	3	21	14	7
崩塌	4	24	18	11
危岩松动体	0	1	2	6

2.2.2 沟谷河流

根据对库区地质灾害分布进行分析可知, 地质灾害主要沿水库两岸分布, 整体上沿洮河两岸呈“线性”分布, 具有以下特点:

1. 沿库岸呈“线性”分布

地质灾害大部分位于库岸附近, 并且沿着洮河干流及支流表现为“线性”分布。经调查, 库区内的 39 处滑坡主要分布于库岸附近, 泥石流主要分布于洮河以上的河谷两岸及支沟内(图 3), 该区段共有 39 处泥石流, 占总数的 86.7%; 崩塌集中分布在洮河 - 宗石村长约 30 km 的洮河峡谷段及该段较大支沟两侧; 危岩松动体主要分布于洮河沿岸峡谷段, 集中分布于主坝上游纳儿 - 寺下川峡谷右岸和九旬峡峡谷内。

2. 与库岸的距离呈线性关系

根据库区的现场调查, 河流对库区地质灾害的分布具有重要影响, 地质灾害的分布与库岸的距离表现出“线性”关系(图 8)。由图 8 可知, 地质灾害点基本分布于距离库岸 3 km 范围内, 约有 50% 位于 1 km 范围内, 例如有 16 个滑坡、15 条泥石流和 26 个崩塌位于距离库岸 0.5 km 内, 占总数比例很大。由图 8(a) 可知, 崩塌、泥石流和滑坡个数随着与库岸的距离增加, 表现为递减趋势。由图 8(b) 可知, 地质灾害总数分布也表现为相似规律, 大型的滑坡、泥石流沟和崩塌主要分布于库岸 0.5 km 范围内。因此, 河流对于地质灾害的发育具有促进作用。

2.2.3 地质构造

地质构造不仅控制地貌和岩体结构及其组合特征, 而且对地质灾害的分布及发育起综合控制作

用^[6]。库区内主要有下拉地-石门口-柏林口、麻滩等压性断裂构造带,地质灾害在区域上总体是沿发震断裂带呈带状和线状密集分布的,距发震断裂越近地质灾害分布密度越大;此外,非发震断裂密集交汇处也是地质灾害点非常发育的地区,这主要是受断裂构造影响,岩体破碎,卸荷较强,在外力作用下容易产生崩塌滑坡。区内新构造运动抬升强烈,地表水流不断下切,沟壑纵横,坡陡谷深。高陡的斜坡为滑坡的形成提供了地形条件,区内规模较大的滑坡均发育在洮河凹岸高陡谷坡处。各种裂隙发育,特别是卸荷裂隙十分发育,为坚硬、半坚硬岩坡段崩塌的形成提供了有利条件。

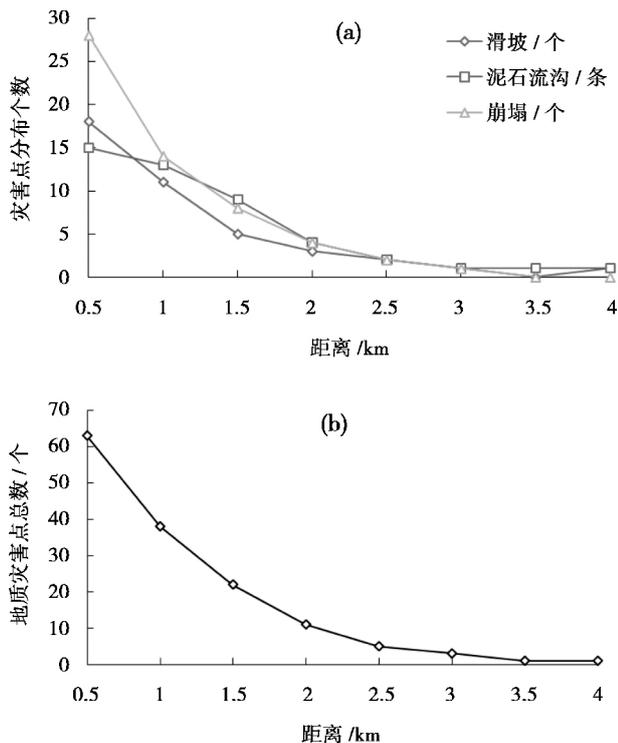


图 8 地质灾害分布与库岸距离的关系

Fig. 8 Relationship between the bank distance and distribution of geological disasters

2.2.4 地层岩性

根据调查研究发现,滑坡和泥石流在软硬相间薄-中厚层状碳酸盐岩、碎屑岩岩类地层的发育程度高于软弱层状碎屑岩岩类地层,大部分的危岩松动体及崩塌发生在坚硬、较坚硬厚层状碎屑岩、碳酸盐岩岩类岩组中,而在软弱层状碎屑岩岩类地层中的地质灾害较少。

地层岩性是制约滑坡发育和分布的重要因素,区内大面积出露灰岩、砂岩、板岩、砂质页岩、碳质页

岩互层岩体,岩层软硬相间,风化强烈,裂隙发育,岩体破碎,软弱岩层遇水易软化,降低坡体力学强度。区内广泛分布冲洪积、坡积碎石土,其结构松散的特点正是上游段滑坡发育的原因之一,如较大规模的徐家寨、蔡家崖、石旗崖深层基岩滑坡都发育于软硬相间岩体中。

2.2.5 岸坡结构及岩土体性质

库区两岸出露地层都很好的表现出了原生层状的特征,原生层状结构面是坡体发生变形破坏的主要控制面^[9],同时河流的走向决定着岸坡的临空条件,中陡倾岸坡比缓倾岸坡更易发生崩塌滑坡。库区内的地质灾害分布、类型、发育密度,还与区内坡体结构及坡体岩土体性质有关,岸坡的物质组成影响着滑坡的发育,例如区内的滑坡主要有岩质、碎石土和土质滑坡 3 种类型,分别约占滑坡总数的 80%、15% 和 5%。

区内不同类型的坡体结构和岩体结构,在一定程度上控制着滑坡崩塌的类型。顺层边坡坡体中如果发育有陡倾坡内的结构面,主要受顺层层面和陡倾坡内的结构面控制,容易形成滑坡;反倾边坡中如发育有陡倾坡外的结构面则容易形成崩塌,这说明崩塌滑坡的分布展开与坡体结构和岩体结构及其组合特征关系密切。

2.2.6 人类活动

引洮工程弃渣场选择在洮河右岸的古马窝沟及主坝下游的瓦力沟、桥道堡沟、柳林沟等中、下游段及宗石村附近,堆渣量约 $313.02 \times 10^4 \text{ m}^3$,堆渣总面积约为 $56.5 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。堆渣场位于沟谷内或岸坡坡脚处,易遭受沟谷或坡面汇水冲蚀形成泥石流,尤其是遇到强降雨的时间段。

人类工程活动主要指开山修路,在修路工程中形成了许多高陡边坡,加剧了滑坡等地质灾害的发生。例如库区内下达勿滑坡是沿长 1 500 m 和高 40 m 的引洮黄土边坡发生错落滑动,喇嘛崖滑坡则是砂岩、板岩等基岩边坡的浅层顺层滑坡。

崩塌的形成与人为工程活动密切相关,经调查发现沿洮河右岸的崩塌主要为“引洮工程”诱发形成,部分为开挖公路造成。工程施工造成平台上下的高陡岩坡松动,坚硬、半坚硬岩层段岩体不断崩塌、坠石,软弱岩层段的强风化岩体及坡面残坡积松散物在降雨冲蚀及自重作用下不断发生溜滑。引洮平台造成岩体松动,使岩体失去侧向或下部支撑,改变了坡体力学平衡条件,这是区内危岩松动体的主

要诱发因素。

3 地质灾害成因类型

3.1 崩塌滑坡灾害成因类型

基于主导因素优先的原则^[10],库区崩塌滑坡灾害成因类型划分为降雨引发型、地震激发型、水库浸润型和自然演化型4种。

3.1.1 降雨引发型

降雨引发型滑坡崩塌主要由于持续降雨或前期降雨累积作用下的短时间暴雨诱发。由于长期的地质作用,滑体上分布大量裂缝,降雨通过裂隙入渗到滑体内,使土体迅速达到饱和,造成抗滑力矩增加,又由于抗滑力矩增量小于滑动力矩的增量,降低滑坡的稳定性^[11]。例如燕子坪滑坡、白崖脑等滑坡在暴雨的条件下均会诱发滑坡的发生。

3.1.2 地震激发型

地震是地震滑坡产生的直接外动力触发因素,还可能受到地形、地层、人类活动等因素的控制^[12]。许多大型滑坡的发生与地震的触发密切相关,地震激发型崩塌滑坡的作用机理是地震直接松动坡体,加剧斜坡累进性变形破坏。破坏模式有层间脆性剪断、脱离和脆性拉断等。库区内的徐家崖、蔡家崖等巨型滑坡都由地震直接作用形成。

3.1.3 水库浸润型

水库浸润型崩塌滑坡主要是由库水位升降诱发的反复浸润作用引起的^[13]。作用机理是在斜坡内部产生浮托作用、软化作用和向外的动水压力作用,产生动水压力会改变斜坡体内的地下水渗流场和应力场。库水位上升使水向坡体内渗透,坡体内外形成负落差,反压坡体,有利于滑坡体的稳定。水位下降使地下水向外排水,由于坡体渗透性较差,渗透力指向坡体外侧,不利于滑坡的稳定。九旬峡水库蓄水后,在库水位的升降作用下大量的库岸边坡产生滑塌现象,例如燕子坪滑坡更为明显。

3.1.4 自然演化型

自然演化型崩塌滑坡是由于长期的生物风化、化学和物理作用及区域断裂构造活动与地震长期影响引发的斜坡岩土体变形破坏^[10]。运动特征为崩塌、碎石流、落石和滑坡等。作用机理是渐进式开裂、蠕动、松动和滑移。据库区野外调查资料显示,自然演化型滑坡主要分布于距离库岸距离较远处。

3.2 泥石流成因类型

库区泥石流分为沟谷演化型、坡地液化型和工

程弃渣溃决型3种类型。

3.2.1 沟谷演化型

沟谷演化型泥石流为自然沟谷受到地质环境演化过程的控制,按一定的时空规律出现的堆积体饱和、侵蚀、运移、冲刷及堆积现象,由泥石流流通区、物源区和堆积区三部分组成。固体物源主要源于流通区两侧的崩滑堆积和沟谷源头汇水区的松散堆积物。基本特征为运动路径长,汇水面积大,破坏能力强,具有周期性,通常伴随着崩塌滑坡产生。

3.2.2 坡地液化型

坡地液化型泥石流主要为库区内持续的暴雨在陡峻山地丘陵区诱发,坡体内的岩土体由于快速饱和液化造成突然向下流动倾泻的现象。其特点为:在数千平方千米区域内发生;规模小、成群成带;单点损害小,群发区域危害大;坡体上、下部坚硬基岩接触带处形成渗流滑移带;可能同一处表现为崩塌-滑坡-泥石流快速转化的“链式”反应。

3.2.3 工程弃渣溃决型

工程弃渣溃决型泥石流是在工程建设过程中地表开挖剥离在沟谷内不合理的堆积排放。由于地表径流受到堆积体的阻碍,在强降雨条件下产生暂时性堰塞湖,急剧的渗透变形和水位壅高使堆积体快速沉陷、液化和溃决形成泥石流。库区建设形成的弃渣场为新的泥石流沟的发育提供了良好条件。由于工程弃渣场选择在洮河右岸的古马窝沟及主坝下游的瓦力沟、桥道堡沟、柳林沟等中、下游段及宗石村附近,堆渣约 $313.02 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。堆渣总面积约为 $56.5 \times 10^4 \text{ m}^2$,其中古窝马1号渣场堆渣方量最大,为 $230.23 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。堆渣场位于沟谷内或岸坡脚处,易受沟谷或坡面汇水冲蚀形成泥石流。

4 结论

1. 库区河流对地质灾害的分布具有重要影响,地质灾害点的分布基本位于距离河流3 km范围内,约有50%位于1 km范围内;随着与库岸的距离增加,表现为递减趋势;大型的滑坡、泥石流沟和崩塌主要分布于库岸0.5 km范围内,库水对于地质灾害的发育具有促进作用。

2. 地质灾害的发育、分布在空间上具有范围广、密度大、成群成带等特征。大多数的崩塌滑坡发生在高程2 200~2 500 m,其中又以2 200~2 400 m密度最高,2 400~2 600 m次之,高程2 600 m以

上地质灾害发育较少;大部分地质灾害集中在 30° ~ 50° 的坡度范围,多集中在地形坡度起伏较大处。

3. 区域内地质灾害发育分布并不均衡,地质灾害整体主要沿库呈“线性”分布,并且具有带状分布特点,主要集中于库区上游段。地质灾害的形成和分布主要还受库区内断裂带的控制,沿发震断裂带地质灾害多成“线状”、“片状”密集分布。

4. 库区崩塌滑坡灾害成因类型划分为降雨引发型、地震激发型、自然演化型和水库浸润型 4 种;泥石流灾害分为沟谷演化型、坡地液化型和工程弃渣溃决型 3 种。详述了各类型崩塌滑坡和泥石流的形成机理,为库区的地质灾害防治提供可靠依据。

致谢:论文的写作得到九甸峡公司提供的宝贵数据,在此表示衷心的感谢!

参考文献(References)

- [1] 张春山,张业成,马寅生,等.黄河上游地区地质灾害分布规律与区划[J].地球学报,2003,24(2):155-160 [Zhang Chunshan, Zhang Yecheng, Ma Yinsheng, et al. Distribution regularity and regionalization of geological hazards in the Upper Yellow River Valley [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2003, 24(2): 155-160]
- [2] 张春山,张业成,胡景江,等.中国地质灾害时空分布特征与形成条件[J].第四纪研究,2000,20(6):559-566 [Zhang Chunshan, Zhang Yecheng, Hu Jingjiang, et al. Spatial and temporal distribution characteristics and forming conditions of Chinese geological disasters [J]. Quaternary Sciences, 2000, 20(6): 559-566]
- [3] Paronuzzi P, Rigo E, Bolla A. Influence of filling - drawdown cycles of the Vajont reservoir on Mt. Toc slope stability [J]. Geomorphology, 2013, 191: 75-93
- [4] 杨为民,吴树仁,张永双,等.降雨诱发坡面型泥石流形成机理[J].地学前缘,2007,14(6):197-204 [Yang Weimin, Wu Shuren, Zhang Yongshuang, et al. Research on formation mechanism of the debris flow on slope induced by rainfall [J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(6): 197-204]
- [5] 甘肃省地质灾害防治工程勘察设计院.洮河九甸峡水利枢纽灾害危险性评估报告[R].兰州:甘肃省地质灾害防治工程勘察设计院,2003. [Gansu Province Geological Disaster Prevention Engineering Investigation and Design Institute. The disaster risk assessment report on Jiudianxia Water conservancy hub [R]. Lanzhou: Gansu Province Geological Disaster Prevention Engineering Investigation and Design Institute, 2003.]
- [6] 曾琳洁,张涛,冯文凯.河南南召县地质灾害形成条件与分布规律[J].中国地质灾害与防治学报,2014,25(1):82-89 [Zeng Linjie, Zhang Tao, Feng Wenkai. Formation conditions and distribution law about geological disasters in Nanzhao county, Henan Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2014, 25(1): 82-89]
- [7] Parsons T, Chen J, Kirby E. Stress changes from the 2008 Wenchuan earthquake and increased hazard in the Sichuan basin [J]. Nature, 2008, 454: 509-510
- [8] Keefer D K. Statistical analysis of an earthquake induced landslide distribution the 1989 Loma Prieta, California event [J]. Engineering Geology, 2000, 58: 231-249
- [9] 巨能攀,侯伟龙,赵建军,等.安县雎水河流域地质灾害发育、分布及影响因素[J].山地学报,2010,28(6):732-740 [Ju Nengpan, Hou Weilong, Zhao Jianjun, et al. Geohazards of Jushui River in the Wenchuan Earthquake Area [J]. Mountain Research, 2010, 28(6): 732-740]
- [10] 刘传正.中国崩塌滑坡泥石流灾害成因类型[J].地质评论,2014,60(4):858-868 [Liu Chuansheng. Genetic types of landslide and debris flow disasters in China [J]. Geological Review, 2014, 60(4): 858-868]
- [11] 卢书强,易庆林,易武,等.三峡库区树坪滑坡变形失稳机制分析[J].岩土力学,2014,35(4):1123-1130 [Lu Shuqiang, Yi Qinglin, Yi Wu, et al. Analysis of deformation and failure mechanism of Shuping landslide in Three Gorges Reservoir Area [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(4): 1123-1130]
- [12] 许冲,徐锡伟,于贵华.玉树地震滑坡分布调查及其特征与形成机制[J].地震地质,2012,34(1):47-62 [Xu Chong, Xu Xiwei, Yu Guihua. Study on The characteristics, mechanism, and spatial distribution of Yushu Earthquake triggered landslides [J]. Seismology and Geology, 2012, 34(1): 47-62]
- [13] 吴琼,唐辉明,王亮清.库水位升降联合降雨作用下库岸边坡中的浸润线研究[J].岩土力学,2009,30(10):3025-3031 [Wu Qiong, Tang Huiming, Wang Liangqing. Analytic solutions for phreatic line in reservoir slope with inclined impervious bed under rainfall and reservoir water level fluctuation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(10): 3025-3031]

Development , Distribution and Influencing Factors of Geohazards in Jiudian Gorge Reservoir

SONG Danqing¹ , LIANG Shouyun² , WANG Zhiqiang^{2,3} , XU Yongfu¹ , FENG Xingbo¹

(1. School of Naval Architecture , Ocean and Civil Engineering , Shanghai Jiaotong University , Shanghai 200030 , China;

2. School of Civil Engineering and Mechanics , Lanzhou University , Lanzhou 730000 , Gansu , China;

3. General Institute of Water Resources and Hydropower Planning and Design , Ministry of Water Resources , Beijing 100081 , China)

Abstract: The geological environment had changed in large extent after the Jiudian Gorge Reservoir in Zhuoni County of Gansu Province , China impoundment with the development of geological disasters. According to the detailed field investigation for many times , this paper has analyzed properties of the development and distribution and influencing factors of geological disasters with the main types of the geological disasters was systematically analyzed at the same time. The results show that the river had influence on the distribution of the geological disasters , the distribution of geological disasters were located within the range of 3 km from river approximately fifty percent being located in the range of 1 km with showing the decreasing trend with the increasing distance of the bank. The distribution of geological disasters has close relation with topography and geomorphology , and most of the geological disaster occurred in 2 200 ~ 2 500 m , especially the slope $30^{\circ} \sim 50^{\circ}$. The geological disasters were widely distribution , large number , and had the characteristics of zonal distribution. The main geological disasters occurred along coast of reservoir and most of them were showed linear distribution. The different geological structure controlled the development and distribution of geological disasters of the type and distribution , and it was also closely related to the slope structure , geotechnical liquid property. The main types of landslides and debris flows in reservoir area are divided into 3 types , and the disaster formation mechanism was analyzed for providing reliable basis for the geological disaster prevention.

Key words: geohazards; factors; development and distribute; reservoir