

九旬峡库区地质灾害分布规律及发展趋势

宋丹青¹, 王 丰², 宋宏权^{3,4}

(1. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200030; 2. 河南大学 生命科学学院, 河南 开封 475004;
3. 河南大学 环境与规划学院, 河南 开封 475004; 4. 河南大学 黄河中下游数字地理技术教育部重点实验室, 河南 开封 475004)

摘 要:水库蓄水对库区地质灾害的发育有着重要影响, 蓄水过程中库水位及侵蚀基准面的抬高等变化将会对库区地质灾害的发育起到了重要影响。为保障九旬峡水利枢纽的顺利建设和建成后的正常运营, 以九旬峡库区为例研究库区地质灾害的分布规律及其水库蓄水后的发展趋势。基于对库区的详细的勘察资料的基础上, 对库区地质灾害进行了系统地分析和评价。研究表明: 蓄水后, 库区沿岸产生多处库岸崩塌和小规模的新滑坡等灾害, 塌岸宽度为 50~100 m, 主要分布于洮砚以上的河段; 库区浅层和深层滑坡共 39 处, 蓄水初期库水位抬升诱发和加速了滑坡的变形破坏, 蓄水后, 大部分滑坡位于库水位之下或远高于库水位, 受库水影响较小; 蓄水对库区内滑坡的发育影响较大, 对原有泥石流沟发育影响较小, 泥石流沟的发育主要由降雨引起。

关键词:地质灾害; 分布规律; 九旬峡库区

中图分类号: P694

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)01-0365-04

Distribution and Evolution Trend of Geological Disaster in Jiudian Gorge Reservoir

SONG Danqing¹, WANG Feng², SONG Hongquan^{3,4}

(1. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China; 2. School of Life Science, Henan University, Kaifeng, He'nan 475004, China; 3. College of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng, He'nan 475004, China; 4. Key Laboratory of Geospatial Technology for the Middle and Lower Yellow River Regions, Ministry of Education of China, Henan University, He'nan 475004, China)

Abstract: Reservoir impoundment has the important influence on the geological disasters. The reservoir began to impound in early 2008 because of the change of the water level and base level of erosion increase etc., which plays an important role in the development of geological disasters in the process of water storage. To ensure the smooth operation of the Jiudian Gorge Water Conservancy construction and normal operation after the completion, we investigated the distribution of geological disasters and their development trend after impoundment in Jiudian Gorge Reservoir based on the survey of Jiudian Gorge Reservoir area as an example. Based on the detailed survey data of the reservoir area, the geological disasters were systematically analyzed and evaluated in the reservoir area, and the influence of the reservoir impoundment on the development of geological disasters was examined. The result showed that: (1) after reservoir impoundment, it produced many bank slumps and new small-scale landslide such as collapse along the banks of the reservoir area, and the width of bank collapse was 50~100 m, which mainly distributed in the upper reaches of Taoyan; (2) there were 39 shallow and deep landslides, which induced and promoted the deformation of landslides due to reservoir water level rising in the early impoundment phase, and the reservoir water level has a little effect on landslide stability due to the most of landslides locating below the water or far above the water level; (3) the reservoir impoundment has the impact on the development of landslides at a large degree, and has a little influence on original flow gully development, the flow gully is mainly induced by rainfall.

Keywords: geological disaster; distribution regularities; Jiudian Gorge Reservoir

地质灾害是指由于自然或人为作用,在地球表层破坏人类生存环境的岩土体失稳现象^[1-2]。水库蓄水过程中,由于库区沿岸的水文地质条件改变显著,造成库岸边坡的稳定性发生了变化^[3],同时也对库区内的地质灾害的发育产生较大程度的影响。例如二滩水电站自蓄水以来,随着水位上升相对侵蚀基准面不断升高,先前存在的部分滑坡、泥石流被库水淹没,导致库区环境发生较大变化^[4]。三峡工程试验性蓄水后,在库区局部地段产生较强的灾害体演变现象^[5]。但是,水库蓄水使库区库岸再造的状况如何?发育趋势如何?是否诱发了更多的滑坡和泥石流?已经成为了一项急需解决的问题^[6-7]。

本文通过对九甸峡库区进行详细实地勘察,分析蓄水前后库区地质灾害的分布规律及其发展趋势,研究水库蓄水对库区地质灾害发育的影响,对九甸峡水利枢纽的正常运营有着重要的意义。

1 库区工程地质条件

1.1 地形地貌

库区位于洮河中游的九甸峡峡口处,库区面积约916 km²,为典型的河谷型水库(图1),总体地势西高东低、沟壑纵横。地貌可分为山地和河谷地貌,其中山地地貌由3个亚区构成。低中山亚区位于马莲滩—洮砚,中高山亚区位于燕子坪下游段,高中山亚区位于燕子坪—洮砚广大区域。洮砚—马莲滩段阶地、漫滩及心滩发育,河流纵降比2.5‰左右。洮砚—柳林段为峡谷地形,坡度多为38°~60°,谷底宽30~200 m,部分呈直立陡壁,河流纵降比4‰~10‰。



图1 九甸峡库区河谷形地貌

1.2 地层岩性条件

库区内出露前第四纪地层,主要类型有4种。二迭系:下统分布在九甸峡的中下游峡谷段和洮砚以上地段;上统零星出露于柳林沟沟口处洮河两岸。石炭系:下统集中分布在洮砚—燕子坪段;中、上统分布在九甸峡主坝的上游地段。三叠系:分布于九甸峡峡谷

下游右岸。第四系:成因有重力侵蚀堆积、风积、洪积和冲积等类型。

1.3 地质构造条件

库区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°~300°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袖式背向斜。库区东南角和东北角展布北西—北西西向断陷盆地,中新界底层展布轴向NW300°~320°的背向斜构造,但其断裂不发育。区内主要发育有桥道堡、羊沙—业力大山等的压性断裂构造带,断裂长均有数十千米,破碎带一般宽20~30 m,其走向倾角60°~85°,倾向北,一般为北西270°~285°。

1.4 气候特征

洮河上下游高差较大,下游干旱温和,中、上游寒冷潮湿。区内年均气温约7℃,极端最低气温和极端最高气温分别为-17.2℃和32.5℃,年均降水量588.2 mm,多集中在7—9月份,日最大降水量61.25 mm,年蒸发量1 192.2 mm。洮河径流量年际变化较大,年内径流量极不均匀,汛期流量占年总流量的56.7%,但是枯水期流量仅占年总流量的17.8%。区内地下水可分为两种类型:分布在洮砚上下游的松散岩类裂隙水和分布在洮砚上游的基岩裂隙水。

2 滑坡(包括库岸坍塌)分布

2.1 滑坡形成条件分析

滑坡的形成和发展与其所处的地质背景密切相关^[4]。库区内发育的滑坡(包括库岸坍塌)共计96处,其中库岸坍塌为57处,滑坡为39处,滑坡体积大于10 000 m³的滑坡共计17处,大于10⁶ m³的滑坡共计22处。

2.1.1 地层岩性 地层岩性是制约滑坡发育和分布的重要因素^[4],库区内大面积出露薄层灰岩、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,软弱岩层遇水易软化,使坡体力学强度降低,同时区内广泛分布冲洪积、坡积碎石土,其结构比较松散,为上游段滑坡发育提供了良好的岩性条件。例如规模较大的蔡家崖、徐家寨等滑坡。白崖脑深层基岩滑坡也发育于这套软硬相间的岩体中,燕子坪滑坡则发生在洪积、坡积碎石土中。

2.1.2 地形地貌条件 根据河段岩性、斜坡结构的差异,将库区微地貌分为宽缓河谷段和深切峡谷段。由于区内构造运动抬升强烈,地表水不断下切和沟壑纵横等条件,高陡的斜坡为大规模滑坡的形成提供了有利条件,经调查可知规模较大的滑坡均发育在洮河

凹岸高陡谷坡处。但是,滑坡在数量上主要分布在宽缓河谷段,例如洮砚—马连滩河谷开阔,发育有多级阶地,为其发育提供了良好的发育条件。据统计显示^[8]:深切峡谷段滑坡数量较少,但是大规模滑坡多,以崩塌和河岸坍塌为主,约占30%;宽缓河谷段滑坡数量较大,约占70%。

2.1.3 滑坡主要诱发因素 水库蓄水后,库区内滑坡的主要诱发因素有库水位升降、地震、降雨和人类活动。

地震可引发多种地质灾害,如地裂缝可衍生成崩塌滑坡等,许多滑坡的发生与地震触发密切相关^[9]。地震直接松动坡体,加剧斜坡累进性变形破坏,甚至直接诱发坡体滑动。据勘察资料显示^[8]:徐家寨(5 384.7 万 m³)、蔡家崖(5 810.4 万 m³)等巨型滑坡都由地震直接作用形成。

降雨也与滑坡的发育密切相关^[9-10],其诱发滑坡主要表现在以下方面:增大了坡体的重量,降低坡体的强度,引起坡体内孔隙水压力剧烈变化和降低坡体内有效应力,导致地表洪水冲刷侧蚀坡脚。库区内降雨量充沛且集中,又多暴雨,如1990年7月燕子坪滑坡的复活就是由于连降暴雨所诱发。

人类工程活动指在修路工程中形成了许多高陡边坡(图2),加剧了滑坡等地质灾害的发生。如库区内下达勿滑坡是沿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。



图2 人工开挖边坡

库水位升降对库岸边坡稳定性影响较大^[11],其诱发滑坡的作用机理表现为在斜坡内部产生软化作用、浮托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。

2.2 滑坡(包括崩塌等)分布规律

2.2.1 滑坡分布规律 库区内共发育大小滑坡39处,有岩质滑坡、碎石土滑坡和土质滑坡,以岩质滑坡为主,约占79.5%;碎石土滑坡占15.4%;土质滑坡约占5.10%。库区内以大型滑坡为主,约占41.3%;中型滑坡约占34.2%;小型滑坡约占10.3%。

区内滑坡的发育具有明显的分带性,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%),为滑坡发育密集区和易发区段,也是稳定性差的滑坡集中区段。根据野外调查可知该区段大部分滑坡危险性较小,但石旗崖滑坡和白脑崖滑坡稳定性较差,危险性中等;洮砚—燕子坪段共10个,约占25.6%。

2.2.2 崩塌及危岩松动体分布规律 区内崩塌集中于洮砚—宗石村约30 km的洮河峡谷段及该段支沟两侧,数量多、规模小,多沿河岸形成松散的倒锥状堆积体。根据野外调查统计^[8],区内崩塌多达57处,总方量约为43万 m³。危岩松动体主要分布于洮河沿岸峡谷段,集中于主坝上游纳尔—寺下川峡谷右岸和九旬峡峡谷两岸。

经野外调查可知,崩塌和危岩松动体的主要形成条件为自然条件和人类工程活动。自然条件:区内断裂发育,新构造运动抬升强烈,河谷下切,岸坡陡峻,坡高达200~400 m,岩体裂隙特别发育,为其发育提供了有利条件;人类工程活动:引洮工程施工所造成的平台上下的高陡岩坡松动,也是导致崩塌不断发生的重要原因之一。

2.3 滑坡(包括库岸坍塌)发展趋势分析

九旬峡水库建成后,将形成面积约22 km²的淹没区,库水浸润库岸及所产生的静水压力和动水压力作用,将改变库区临水边坡的力学平衡条件,其诱发的灾害主要有两个方面:造成已有滑坡的复活滑动和造成部分临水边坡滑塌和滑坡。

2.3.1 蓄水引起古滑坡复活 蓄水前,受地层岩性、地形地貌、断裂构造及人类工程活动等因素影响,库区内大部分滑坡位于洮砚以上洮河两岸及两侧支沟内。大部分滑坡在水库蓄水后位于库水位之下或远高于库水位,受库水影响而产生滑动的可能性较小。但是,蓄水后陈旗口南、燕子坪滑坡等15处滑坡,滑坡前缘位于库水位以下,在库水位作用下将会发生复活。

蓄水后,除燕子坪滑坡外,其他滑坡的稳定性均

在0.3~0.85,复活总方量约为 $2.7 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。但是,滑坡复活方量较少,其危险性及危害性较小。库水位上升至2 202 m时,由于燕子坪滑坡有2/3处于库水位以下,滑体较为稳定;但是,在动水压力及高水位作用下,有可能产生局部滑塌。

2.3.2 蓄水引起库岸再造和新滑坡 蓄水初期,由于库水位的陡涨陡落引起斜坡内地下水渗流压力增加,对滑坡发生起到了诱发和促使其加速变形的作用。水库蓄水后库区内大部分滑坡基本处于缓慢变形或局部复活状态,并且产生多处滑塌、坍塌甚至引起小规模的新滑坡等灾害发生,主要分布于洮砚以上的河段(如洮砚、维新等地)。

洮砚以上的河段多由洮河三、四级阶地构成,其阶面坡度平缓,前缘为陡坎,结构比较松散,库岸边坡稳定性较差,在库水位作用下容易形成库岸塌岸现象;并且该河段岩质斜坡含有砂质页岩、板岩等软岩及软硬相间岩层,其风化强烈,裂隙发育,力学强度低,这既是已有滑坡发育的基础,也是水库蓄水后容易产生新滑坡的区域。

3 泥石流分布规律及发展趋势

3.1 泥石流分布规律

库区的泥石流沟基本上分布在洮河干流及主要支流两侧,由于洮河干流两岸地形陡峻,支沟具有沟坡陡峭($30^\circ \sim 50^\circ$)、沟壑密度大、沟短高差大(高差300~1 160 m)等特点,并且泥石流沟谷平面形态多呈漏斗形、栎叶形等,沟谷平均纵比降为55‰~490‰,谷底宽度小于120 m。特殊的地形条件有利于降雨在短期内迅速汇集,冲蚀沟谷固体松散物质,有利于泥石流的形成。

库区内泥石流沟分布广泛,数量多,灾害严重,是库区主要的地质灾害类型。经现场调查可知,库区内共有灾害性泥石流45条,泥石流沟分布于洮河沿岸及两侧支沟达32条,区内泥石流分布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,共有泥石流沟39条,占总数量的86.7%,沿洮河两岸泥石流沟线密度达2~5条/km。洮砚以下段发育的泥石流沟较少。库区泥石流具有明显的季节性,每年的7—9月是泥石流暴发的主要季节,其他季节泥石流爆发较少。泥石流一般都发生在连续的降雨过程中,地表松散物被水分充分饱和后,在暴雨的激发下发生泥石流。

3.2 泥石流活动特征

库区泥石流主要为降雨型泥石流,流域内丰富的固体松散物为泥石流提供了物质条件,固体物质补给

方式为滑坡补给、坡底侵蚀、坡面侵蚀、支沟汇集及崩塌补给的固体物质。

根据泥石流的规模、流域特征和泥石流容重,库区泥石流分布类型及特征如下。区内泥石流以粘性泥石流为主(约占73.3%),稀性泥石流(约占26.7%)。有大型泥石流2条(约占4.4%),中型17条(约占37.8%),小型26条(约占57.8%)。泥石流流域特征有两种:山坡型泥石流18条(约占40%),其流域面积大部分小于 1.0 km^2 ,形成区与堆积区直接相连,沟口形成小型堆积扇;沟谷型泥石流27条(约占60%),流域面积一般大于 1.5 km^2 ,形成、流通和堆积区比较明显,沟口形成开阔堆积扇,挤压洮河而使主流弯曲。

3.3 泥石流发展趋势分析

水库蓄水后,由于库水位的抬升使库区的小气候受到一定程度上的影响,但是正常蓄水位只有2 200 m,造成淹没线低于库区大多数泥石流沟的形成区高程。因此,水库蓄水对泥石流沟形成区的自然条件(地貌、固体物资、水源等)的影响不大,并未促进原有泥石流沟的发育。

但是由于库区工程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313.02万 m^3 。堆渣总面积约为56.5万 m^2 ,其中古马窝1号渣场堆渣方量最大为230.23万 m^3 。上述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,对附近村民生命财产及居住环境构成危害,例如古马窝沟工程弃渣在强降雨的作用下诱发泥石流的可能性较大。

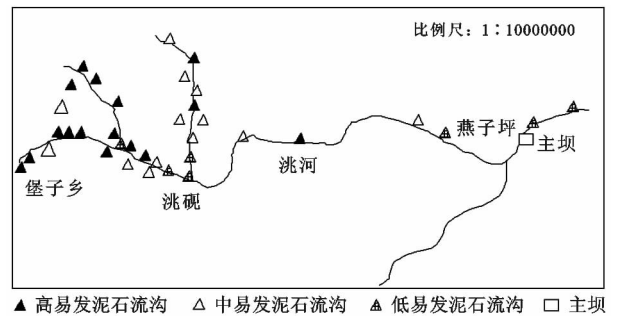


图3 库区泥石流分布

4 结论

(1) 蓄水后,库区沿岸将产生多处库岸滑塌、坍塌甚至引起小规模的新滑坡等灾害发生,一般塌岸宽度为50~100 m,塌岸总方量274.54万 m^3 ,主要分布于洮砚以上的河段,如洮砚、维新等地。

(2) 库区浅层和深层滑坡共39处,水库蓄水初期由于库水位的抬升,引起斜坡内渗流压力增加,对

滑坡发生起到了诱发和促使其加速变形的作用。水库蓄水后,大部分滑坡位于库水位之下或远高于库水位,受库水影响而产生滑动的可能性较小,但是如陈旗口南、燕子坪滑坡等 15 处滑坡,蓄水后在库水位作用下产生复活的可能性较大。

(3) 九甸峡水库蓄水对库区内滑坡的发育影响较大,其影响的表现:古滑坡复活,库岸再造和形成新滑坡,但是水库蓄水对原有泥石流沟发育影响较小。

(4) 水库蓄水对库区内泥石流的发育影响较小,泥石流沟的发育主要由降雨引起。库区内泥石流沟易发程度较高的有 23 条(约为 54%);中等易发程度的有 14 条(约为 33%);低易发程度的有 6 条(约为 13%)。洮河支流泥石流活动微弱,且数量不多,暴发概率较小;但是库区内中等易发程度泥石流暴发规模较大,成灾严重。

致谢:在论文的写作过程中得到兰州大学梁收运教授和王志强教授级高级工程师的指导,同时由于九甸峡公司提供的宝贵监测数据和相关专家的支持才有此文的完成,在此表示衷心的感谢!

参考文献:

[1] 郭碧云,傅旭东,张正峰. 龙溪河流域震后次生地质灾害分布与地形及河床演变关系[J]. 应用基础与工程科学

学报,2013,21(6):1005-1017.

- [2] 刘传正. 地质灾害勘察指南[M]. 北京:地质大学出版社,2000.
- [3] Deng J, Wei J, Hong M, et al. Response of an old landslide to reservoir filling: A case history[J]. Science in China, 2005,48(1):27-32.
- [4] 陈秀琼,陈永波,孔纪名,等. 二滩库区地质灾害分布规律及发展趋势分析[J]. 山地学报,2007,25(6):737-740.
- [5] 宋丹青,梁收运,王志强. 库水位对库岸边坡稳定性的影响[J]. 人民黄河,2016(7):95-99.
- [6] 白俊光,吕生弟,韩建设. 李家峡水电站坝前水库滑坡蓄水前后稳定性预测[J]. 岩土力学,2008,29(7):1723-1731.
- [7] 刘凤民,张立海,刘海青,等. 中国地震次生地质灾害危险性评价[J]. 地质力学学报,2006,12(2):127-131.
- [8] 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.
- [9] Zhi M, Shang Y, Zhao Y, et al. Investigation and monitoring on a rainfall-induced deep-seated landslide[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2016,9(3):1-13.
- [10] 常金源,包含,伍法权,等. 降雨条件下浅层滑坡稳定性探讨[J]. 岩土力学,2015,36(4):995-1001
- [11] 吴琼,唐辉明,王亮清,等. 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.

(上接第 364 页)

[8] 温国胜,田海涛,张明如,等. 叶绿素荧光分析技术在林木培育中的应用[J]. 应用生态学报,2006,17(10):1973-1977.

[9] 秦娟,上官周平. 子午岭林区山杨—辽东栎混交林的生理生态效应[J]. 应用生态学报,2006,17(6):972-976.

[10] 郭明玲,李楠,郭劲玲. 兰州市南北两山 4 个造林树种抗旱性的初步研究[J]. 甘肃科技,2005,21(7):175-176.

[11] Genty B, Briantais J M, Baker N R. The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence [J]. Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-General Subjects, 1989,990(1):87-92.

[12] 卢从明,张其德,匡廷云. 水分胁迫对小麦光系统 II 的影响[J]. 植物学报,1994,36(2):93-98.

[13] Xu C, Li D, Zou Q, et al. Effect of drought on chlorophyll fluorescence and xanthophyll cycle components in winter wheat leaves with different ages[J]. Acta Phytobiologica Sinica, 1998,25(1):29-37.

[14] Odaşz-Albrigtsen A M, Tømmervik H, Murphy P. Decreased photosynthetic efficiency in plant species exposed to multiple airborne pollutants along the Russian-Norwegian border[J].

Canadian Journal of Botany, 2000,78(8):1021-1033.

- [15] Öquist G, Wass R. A portable, microprocessor operated instrument for measuring chlorophyll fluorescence kinetics in stress physiology [J]. Physiologia Plantarum, 1988,73(2):211-217.
- [16] Demmig-Adams B, Adams Iii W W. Photoprotection and other responses of plants to high light stress[J]. Annual Review of Plant Biology, 1992,43(1):599-626.
- [17] Roháček K. Chlorophyll fluorescence parameters: the definitions, photosynthetic meaning, and mutual relationships[J]. Photosynthetica, 2002,40(1):13-29.
- [18] 种培芳,李毅,苏世平. 荒漠植物红砂叶绿素荧光参数日变化及其与环境因子的关系[J]. 中国沙漠,2010,30(3):539-545.
- [19] 贾荣亮,周海燕,谭会娟,等. 超旱生植物红砂与珍珠光合生理生态日变化特征初探[J]. 中国沙漠,2006,26(4):631-636.
- [20] 刘玉冰,张腾国,李新荣,等. 红砂(*Reaumuria soongorica*)忍耐极度干旱的保护机制:叶片脱落和茎中蔗糖累积[J]. 中国科学,2006,36(4):328-333.