DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.1987.06.008

龙羊峡水库地震诱发机制及危险性预测

王士天　　魏伦武　　李渝生

（成都地质学院）　（成都水文地质工程地质中心）　（成都地质学院）

提　要

本文首先对龙羊峡水库地震活动期间的水压位移场、水压应力场和固体潮应力张量进行了计算，然后分析了此期间的微震活动与各种因素的关系，从而提出本区水库地震的诱发过程是“库水渗透——提高岩体局部段的现今应力水平——库水荷载效应和固体潮该力张量的联合激发作用——裂纹串通（或扩展）——发震”的观点；最后在此基础上对龙羊峡未来水库地震危险性进行了预测。

一、引　言

黄河龙羊峡水电站位于青藏断块的北部边缘地带。水库坝高178米（拱形重力坝）、正常高水位2600米、库容247亿立方米、库长106公里、淹没范围达383平方公里、装机容量128万瓩。1981年龙羊峡电站的施工围堰建成后，每年汛期当水位抬升15—42米时，库坝区附近即有一系列微震发生。这类地震活动是否为库水所诱发？尤其是当水库建成蓄水之后会不会诱发破坏性强震而对坝体和周围环境造成较大危害？这些问题已成为龙羊峡电站工程建筑中所急待解决的问题。受水电部西北勘测设计院的委托，我们承担了上述研究课题。研究工作从1983年4月开始至1986年7月完成了全部野外现场调查、室内的分析鉴定、模拟研究以及《黄河龙羊峡电站区域构造稳定性及水库诱发地震问题专题研究报告》的编写等工作。本文就是该报告中的一小部分。

二、库区地震活动及其特点

据龙羊峡台站测震记录资料，自1981年7月至1985年7月的4年内记录到的微震活动共计338次，其中$Ms \geqslant 1$级者3次，最大震级Ms1.8级。这些微震活动具有下列明显特点。

1．地震活动绝大多数集中分布于库首变质砂岩（T_1）出露区及附近（图1），震中密集区距大坝3—6公里，并具有如图2所示的迁移规律。

2．地震活动与水位变化有着良好的相关关系。从图3中可以看出，1981年9月18日水位抬升42米（2495米高程）达最高洪峰，随后即有一系列微震开始发生。至11月28日微震频度达最高值36次/日，于11月23日发生1.8级主震，滞后于当年最高水位66天。

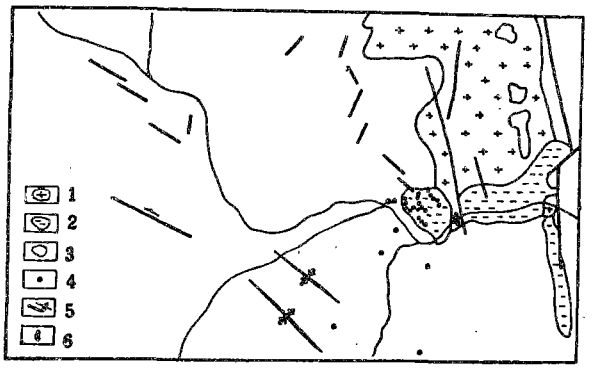

图1　库区构造、岩性与震中分布图

1—花岗岩；2—变质砂岩；3—粘土岩；4—诱发地震震中；5—断裂、向斜；6—龙羊峡电站

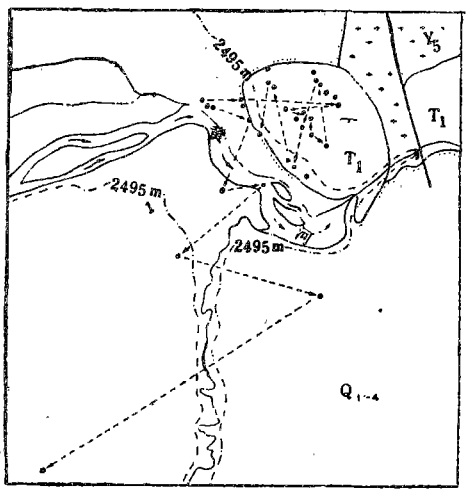

图2　水库地震活动迁移规律

3．反映地震活动序列特征的Ms～N关系式为：

$$\lg N = 2.0612 - 1.1415Ms,\ (r = 98.06\%) \quad (1)$$

可见其中反映强弱地震比例关系的b值较高，达1.1415。而有关统计资料表明[3]，电站库坝区所处的瓦里贡山—岗察寺地震带天然地震活动的b值仅为0.4745。可见，库坝区附近微震活动的b值远较一般

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

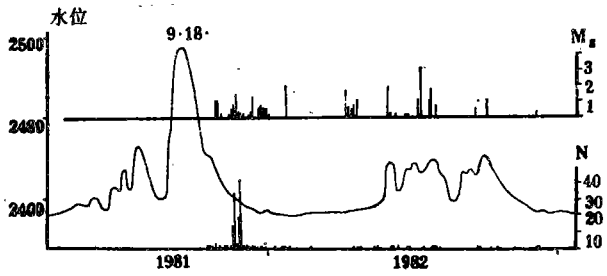

图 3　龙羊峡库区地震活动与水位变化关系图

N—地震频度；*Ms*—震级

天然构造地震大。

4．从地震序列特征看，属于较为典型的前震—主震—余震型，其前震和余震均较发育。在地震活动总数中，$Ms \geqslant 1$ 级的地震仅占 0.01%。最大余震和主震震级之比为0.53。

上述诸方面的特点，反映出库坝区附近的微震活动与蓄水密切相关。这表明1981年以来的地震活动确为库水所诱发。

三、诱发机制讨论

为阐明此类地震活动的诱发机制，我们对1981年汛期库区的水压位移场、水压应力场和固体潮应力张量进行了计算，分析了微震活动与各种因素间的关系，从而对其诱发成因机制获得了明确概念。

1．从库盆岩性结构来看，库区出露的主要岩性为Q_4湖相粘土、亚粘土层以及三叠系变质砂岩（T_1）和印支期花岗岩（γ_5）。粘土和亚粘土等松软地层，受力后易产生塑性变形而难以蓄积较高的弹性应变能，并且透水性很差，不利于库水的渗透，因而这类地层覆盖的库区大部分范围内基本上没有水库地震发生；变质砂岩强度较高，能够储存较高的弹性应变能，而且岩体中层理和节理极为发育，据统计主要发育有NWW、NNW和NE向三组节理（图4），有利于库水向岩体深部的渗透，故而上述地震活动绝大多数发生在这类地层出露的库首区。

2．这类微震活动的震中迁移规律表明，由于1981年最高洪水位（2495米高程）淹没了库首区部分变质砂岩（T_1的产状为E—W/s<28°）和少量花岗岩（γ_5），使得库水能沿变质砂岩的层理及节理向南、向东和向岩体深部渗透，因而地震活动也相应地呈现出与此渗透方向相一致的迁移规律（见图2）。考虑到水的渗透需要一定的时间，地震活动的滞后性也就不难理解

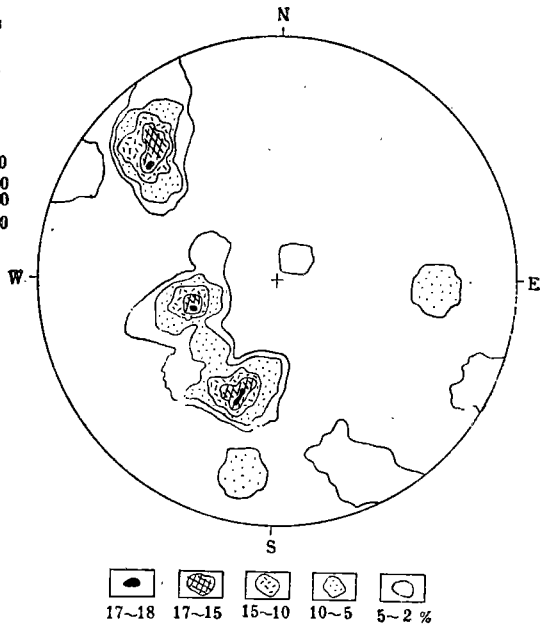

图 4　库区裂隙等密图

了。而1982年以后，每年汛期高水位均未达到库首区变质砂岩出露高程。由于粘土、亚粘土层的隔水作用，库水难以向岩体深部渗透，致使库坝区附近地震活动频度大为降低（图3）。可见，龙羊峡水库地震活动与库水向变质砂岩中的渗透密切相关。

3．从地震活动与水压位移场、应力场的关系来看，诱发地震震中主要集中地分布于地面沉降中心的

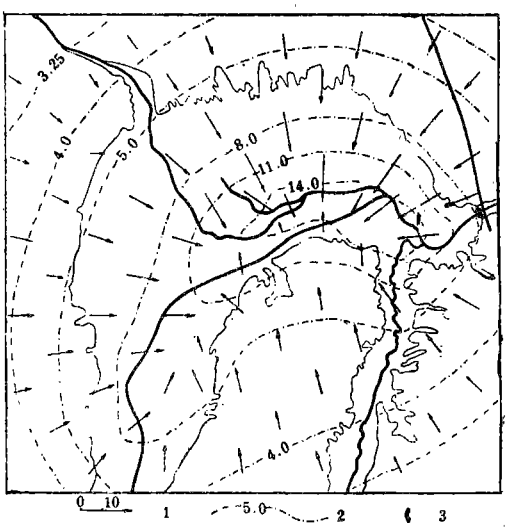

图 5　水压位移场

1—水平位移矢量；2—垂直沉降量等值线；3—龙羊峡电站

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

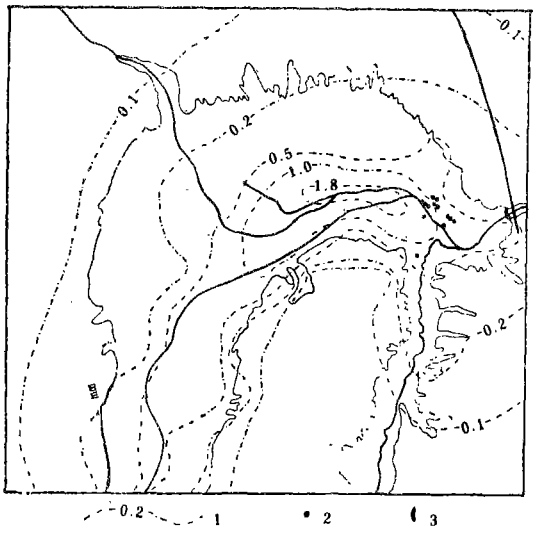

图 6　水压附加最大剪应力等值线图

1—τ_{max}等值线（巴）；2—震中；3—龙羊峡电站

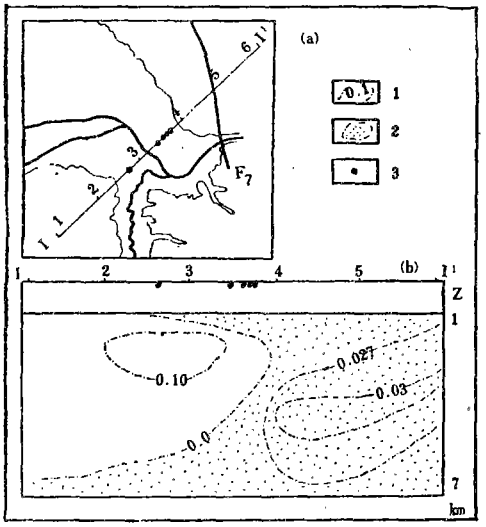

图 7　水压附加最小主应力等值线图

a—平面图；b—剖面图；1—σ_3等值线（巴）；2—张应力区；3—诱发地震震中

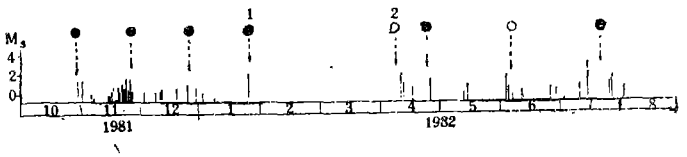

图 8　水库地震与月相之关系

1—月朔；2—月望

边缘区（图5）、水压附加最大剪应力集中区（图 6）和剖面张应力分布区（图7）。由此可见，水压位移场和应力场在本区水库地震诱发过程中起了一定的激发作用。

4．龙羊峡水库地震与月相朔、望有着一定的对应关系（图8）。这极有可能是由于地-月系统于朔、望点绕共同重心旋转，使得地球上引起的引潮力达到高潮，进而打破原来的应力平衡状态，以致触发地震。计算结果表明，1981年水库地震活动期间，月球引力作用于龙羊峡库区产生的固体潮应力张量的最大剪应力值、最大压应力值和最大拉应力值分别未超过0.042巴、0.025巴和0.029巴（图9、表1）。虽然这些应力值与上述水压应力值相比较是非常小的，如果考虑到空（孔）隙水压力和其它因素的共同作用极有可能已使岩体内部局部段的应力系统处于极限平衡状态，那么由于固体潮应力张量的“叠加”而引起的触发作用也得可以理解了。

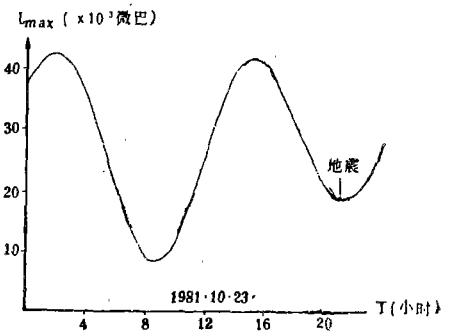

图 9　龙羊峡固体潮最大剪应力张量随时间变化关系曲线

上述研究表明，在现今构造应力场作用下，由于库水沿变质砂岩层理、节理和花岗岩裂隙向岩体深部渗透，水的空（孔）隙压力作用和润滑作用使构成库区新断裂网络主体的NWW和NNW向断裂[1]端部产生应力集中，从而提高了岩体局部段的现今应力积累程度，使之达到或接近极限平衡状态；加上水压应力场、水压位移场和固体潮应力张量的联合激发作用，打破了岩体的应力平衡状态，致使某些裂纹通过如图10所示的裂纹串通（或扩展）方式进行能量释放而发震，看来这就是龙羊峡水库地震诱发机制的基本特点。

四、危险性预测

通过上述讨论不难看出，水库蓄水之后，诱发地震的强度将会有所增强。龙羊峡区域构造稳定性的物理及数学模拟研究结果表明[3]，库区现今应力集累程度只有31%—35.9%；库坝区所处的瓦里贡山—岗察寺地震带的现有孕震能力不超过5.0级。在这样的条件下，只可

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

桂林碳酸盐岩人工地下洞室稳定性浅析

涂水源（地质矿产部岩溶地质研究所）

提　要

桂林市由碳酸盐岩组成的峰丛和峰林石山，天然溶洞发育，长期来人们还开挖了大量人工地下洞室，作为各种用途。本文根据调查资料，对桂林碳酸盐岩地下洞室围岩划分了五种类型和三种破坏类型，并从地质构造，岩溶、水文地质三方面对隧洞稳定的影响作了论述。提出了应避免隧洞平行和近于平行通过断裂带；隧洞位置应尽可能提高，远离地下水位附近的岩溶强发育带，避免洞底产生塌陷或溶洞破坏失稳。

桂林市系由碳酸盐岩组成的岩溶峰丛、峰林石山，发育着大量绚丽多姿的岩溶洞穴，近年来人们还开挖了大量人工地下洞室作为厂房、旅社等。由于这些工程缺乏必要的规划和施工前的工程地质勘察，致使不少洞室围岩存在不同程度的破坏。作者根据有关

表 1　龙羊峡库区月亮潮沟主应力的大小和方向随深度变化的部份数据

1981年	深度	σ_1		σ_2		σ_3	
10月23日	(km)	量　值 ($\times10^{-5}$N/cm^2)	方位角/倾伏角	量　值 ($\times10^{-5}$N/cm^2)	方位角/倾伏角	量　值 ($\times10^{-5}$N/cm^2)	方位角/倾伏角
北京时间12时	0	23513.7	159.3°/0°	0.0	直　立	−27913.8	249.3°/0°
	15	23771.0	249.7°/0°	−47.7	159.7°/88.9°	−28102.7	339.7°/1.1°
	30	24028.3	216.3°/0°	−75.0	126.3°/87.8°	−28311.9	306.3°/2.2°
	45	24285.6	236.1°/0°	−82.4	146.1°/86.7°	−28541.2	326.1°/3.3°
	60	24543.0	222.4°/0°	−70.2	132.4°/85.7°	−28789.9	312.4°/4.3°

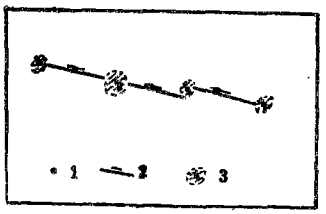

图 10　裂纹串通（或扩展）与地震关系示意图

1—地震；2—应力调整单元；3—应力积累单元

能诱发微破裂而不可能使断层再活动。据此不难推断，未来龙羊峡可能发生水库诱发地震的最大震级不会超过5.0级，其震中烈度也相应地在Ⅶ度以下。若把1981年诱发地震震中密集范围A视为应力调整单元，则由小震串裂作用可使应力积累单元应力集中，并根据经验公式：

$$M_{max}=0.3+2\lg A \qquad (2)$$

即可估算出该区近来可能发生水库地震的最大震级约为3.8级。

主要参考文献

〔1〕 王士天等，1986，黄河龙羊峡电站区域地震～构造稳定性的研究途径与方法，第五届国际工程地质大会论文。

〔2〕 国家地震局地震研究所编，1984，《中国诱发地震》，地震出版社。

〔3〕 魏伦武，1986，龙羊峡电站区域构造稳定性的物理及数学模拟研究，成都地质学院86届硕士论文。

TRIGGER MECHANISM OF RESERVOIR-INDUCED EARTHQUAKES AND THEIR RISK PREDICTION IN THE LONGYANG GORGE RESERVOIR AREA

Wang Shitian　Wei Lunwu　Li Yusheng

Abstract

Based on a Series of Calculations, a Trigger Mechanism of Reservoir-induced Earthquakes in the Longyang Gorge Reservoir Area in the upper Reachs of Yellow River is Suggested.

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net