

水库诱发地震活动特征及其预测方法研究*

秦嘉政, 刘丽芳, 钱晓东

(云南省地震局, 昆明 650224)

摘要: 根据国内外水库诱发地震的观测与研究震例, 分析研究了一些著名水库诱发序列的地震活动特征, 并根据水库诱发地震随水库蓄水时间的变化, 把水库诱发地震活动归纳为迅速响应型、延迟响应型和混合响应型三类, 分析讨论了这三类水库诱发地震活动在时间和空间分布上的不同特点, 并在此基础上综合分析了水库诱发地震预测方法研究的技术途径。

关键词: 水库诱发地震; 响应类型; 诱震因素; 预测方法

中图分类号: P315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0666(2009)02-0105-09

0 引言

水库诱发地震是一类特殊的地震活动, 主要是由于水库蓄水过程或排水过程引发的在一定时间内库区及其周边不大的区域范围内所发生的地震活动。虽然对这一类型地震的成因我们了解得仍然有限, 但从世界范围来看, 许多已确定的水库诱发地震, 尤其是那些产生了严重破坏的5~6级的水库诱发地震, 已引起了各国政府官员、水利工程师及地震学者的重视和关注。了解水库诱发地震的活动时间、空间特征, 特别是分析水库蓄水和排水过程水位的变化与诱发地震活动之间的相互关系, 是研究这一类型地震的活动机理与预测的最基本也是最重要的条件。从全球已发生的水库诱发地震震例来看, 虽然发震水库占大中型总水库数的比例极少, 但在全球分布比较广泛, 构造地震活动比较频繁的地区和相对平静的少震、弱震地区都会发生。为了研究水库诱发地震机理与预测, 对已观测到的确切的水库诱发地震的时空活动特征进行多方面的了解和认识是十分重要的。

本文中笔者综合介绍了全球一些著名的水库诱发地震的时空活动特征, 对深入开展云南地区水库诱发地震研究具有重要的参考价值。云南省是天然构造地震活动十分频繁的地区, 虽然也曾报道过有关水库诱发地震活动的观测结果, 但由

于强度较弱, 破坏不明显, 未引起足够的重视。随着经济建设的发展, 水资源和电力资源开发将是今后云南省加快经济发展的主要支柱产业之一。因此, 重视水库诱发地震的观测、机理和预报研究工作就显得非常重要和紧迫了。

1 典型水库诱发地震活动

据初步统计, 已观测到的全球水库诱发地震确切震例不超过150例, 超过6级的仅为4例, 分别是1962年3月19日中国广东新丰江水库 $M_s6.1$ 地震、1963年9月13日赞比亚—津巴布韦边界的卡里巴湖水库 $M_s6.1$ 地震、1965年2月15日希腊Kremasta水库 $M_s6.2$ 地震和1967年12月10日印度柯依纳水库 $M_s6.5$ 地震。印度柯依纳水库 $M_s6.5$ 地震是目前全球已知的最大的水库诱发地震。排除6级诱发地震引起的5级强余震, 全球5~5.9级之间的水库诱发地震震例不超过15例, 绝大多数诱发地震的震级小于5级。

1.1 印度柯依纳水库诱发地震

柯依纳水库位于印度半岛地盾西海岸孟买东南约200 km处, 柯依纳大坝建在柯依纳河上, 1954年动工修建, 1962年建成开始蓄水以来, 在大坝附近地区就连续不断发生地震活动。根据印度历史和现代地震记录, 印度的强震活动主要分布在北部和西部地区, 印度半岛极少有地震活动

* 收稿日期: 2007-12-10.

基金项目: 云南省重点项目“云南强震活动与动力学研究”和“澜沧江流域重大水利枢纽工程诱发地震监视与研究”共同资助。

记录。在印度地震区划图中,几乎整个印度半岛都被划分为 O 地区。柯依纳水库蓄水后 5 年多 1967 年 12 月 11 日(格林威治时 12 月 10 日),在大坝附近发生了 $M_s 6.5$ 水库诱发地震。这次地震造成 200 多人死亡,1 500 多人受伤,震源深度 8 ~ 20 km,有感范围达 600 km,对大坝造成了结构性破坏,在极震区范围内造成了严重的经济损失,这是印度半岛有历史记载的最大地震,也是迄今为止全球已知的最大水库诱发地震。1985 年,距柯依纳水库南部不远的瓦尔纳河上修建了瓦尔纳水库,两个水库相距约 30 km,随即就响应了一系列的水库诱发地震。此后在这一地区连续发生诱发地震,并且这些诱发地震活动相互影响。初步统计表明,从 1963 年至今 40 多年的时间内,在柯依纳—瓦尔纳地区记录到的地震活动超过 10 万次,其中 $M \geq 4$ 地震约 170 次, $M \geq 5$ 地震约 17 次。在印度半岛,除柯依纳水库外,从 1900 年开始还修建了几十座与柯依纳水库坝高、库容相当或者大于或小于其坝高库容的水库,但都没有发生水库诱发地震活动。这些水库都建立在相似的火山玄武岩上,为什么仅有柯依纳—瓦尔纳水库地区的诱发地震活动不断,至今仍有许多问题我们还不清楚。

柯依纳水库诱发地震主震发生后,发生了长时间的大量的余震序列,1973 ~ 1998 年的 20 多年间,发生数次 5 级左右的破坏性地震,4 级地震频繁发生。根据全球水库诱发地震观测报告表明,柯依纳—瓦尔纳水库地区诱发地震持续时间之长、频度之高、强度之大,是绝无仅有的。因此,印度柯依纳—瓦尔纳水库诱发地震活动成了全球研究水库诱发地震活动最为典型的例子。图 1、图 2 给出了印度柯依纳水库、瓦尔纳水库及诱发地震的震中分布和水位变化与地震活动的关系。由图可见,震中分布表现出明显的 NNE 和 SSW 两个走向(Gupta, 2002)。

1.2 埃及阿斯旺水库诱发地震

阿斯旺水库于 1964 年在埃及尼罗河阿斯旺地区截流建成并开始蓄水,坝高 100 m,但由于阿斯旺地区地形平坦,尼罗河流道宽阔,形成了目前世界上第二大人工湖,是埃及最主要的灌溉与发电两者兼用的水利建设工程,在 1978 年 11 月水库达到最高水位 177.48 m(海拔高度)。该水库为浅水库,最大水深 70 m,最大库容 $16 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 。据

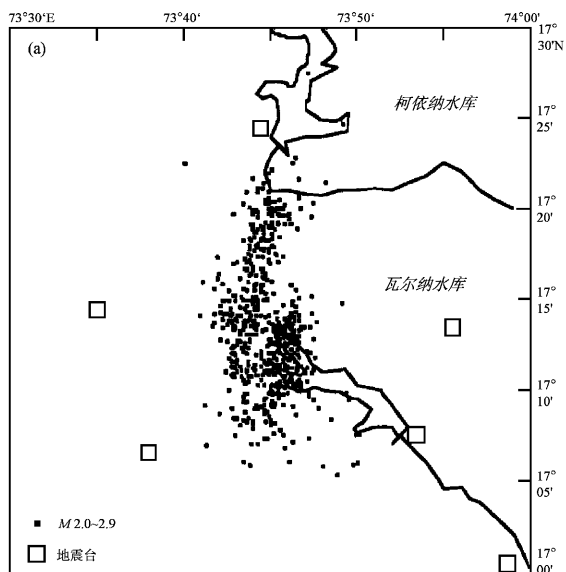


图 1 根据 NGRI 台网测定的印度柯依纳水库和瓦尔纳水库地区水库诱发地震活动震中分布(1993-10 ~ 1994-12)(Gupta, 2002)

Fig. 1 Epicentral distribution of reservoir seismicity recorded by NGRI network at Koyana reservoir and Warna reservoir area (1993-10 ~ 1994-12)(Gupta, 2002)

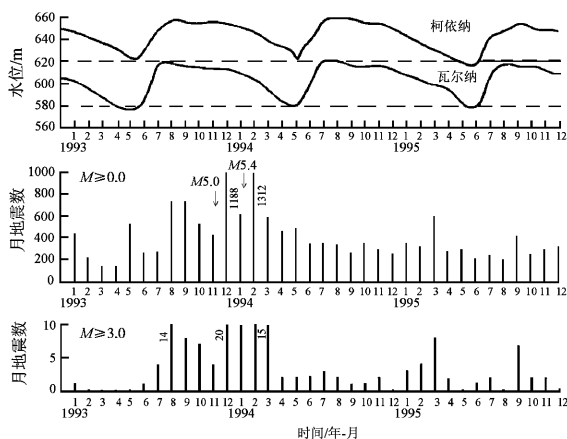


图 2 1993 ~ 1995 年期间印度柯依纳水库和瓦尔纳水库诱发地震活动与水位的相互关系(Gupta, 2002)

Fig. 2 The relationship between reservoir induced seismicity and water level at Koyana reservoir and Warna reservoir from 1993 to 1995(Gupta, 2002)

历史记载,1920 年至 1981 年 10 月,阿斯旺地区没有中强地震报告。阿斯旺水库建成蓄水后,1975 年在水库建立了 2 个地震台进行观测,虽然台站运

行不正常，但仍可识别出约 20 次 $M \geq 2.5$ 地震活动，其中有 13 次发生在 1982 年 8 月至 1981 年 8 月，这些小震活动发生在阿斯旺水库大坝附近。蓄水 17 年后，1981 年 11 月 14 日水库发生最大诱发地震，震级 $M_s 5.3$ ，震源深度 18 km，发生在大坝上游距大坝 60 km 的库区内。主震发生后，接连发生了一系列的余震，余震震源深度在 15 ~ 30 km 范围。图 3、图 4 给出了阿斯旺水库诱发地震活动的空间分布及震源深度剖面图，水库轮廓按约

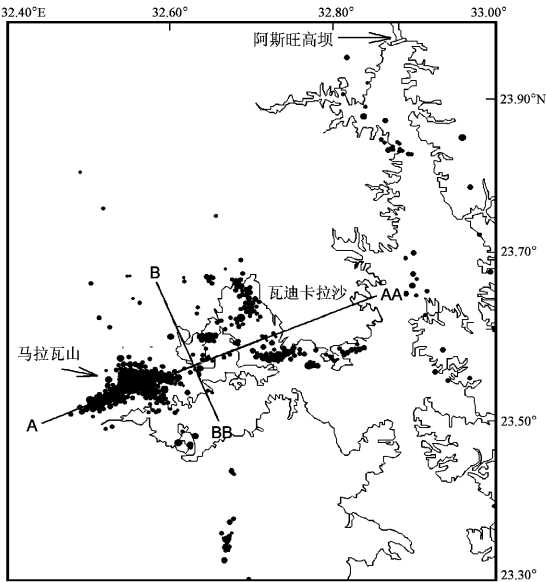


图 3 阿斯旺水库北部和遥测台网记录的地震活动震中分布 (Simpson *et al*, 1990)

Fig. 3 The North of Aswan reservoir and epicentral distribution recorded by seismic telemetry network (Simpson *et al*, 1990)

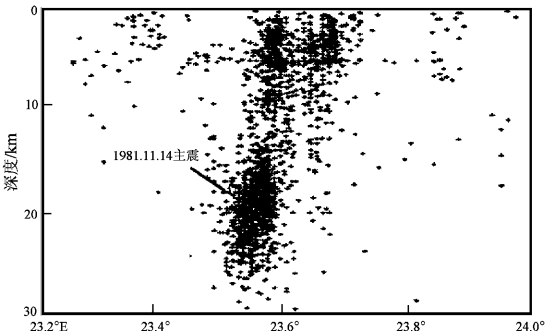


图 4 阿斯旺地区 $M > 2.2$ 地震震源深度随纬度的垂直分布 (Mekkawi *et al*, 2004)

Fig. 4 The profile of depth distribution of $M > 2.2$ earthquakes along the latitude at Aswan area (Mekkawi *et al*, 2004)

174 m 的湖海拔绘制 (Simpson *et al*, 1990)。

由图 3 可以看出，水库诱发地震活动主要集中在两个较小的区域内，一个是马拉瓦山附近，这一区域是水库诱发地震最活跃、最集中的地区，最大主震 $M_s 5.3$ 发生在这一区域；另一个区域是瓦迪卡拉沙附近，这一地区的诱发地震相对集中。阿斯旺水库诱发地震的震源深度定位结果表明，有深源地震 ($h = 15 \sim 30$ km) 和浅源地震 ($h < 15$ km) 两类，与世界上其它地区水库诱发地震的震源深度 (绝大多数 $h < 15$ km) 相比，具有其独特的方面。由图 4 可看出，在马拉瓦山附近诱发地震最集中、最活跃的区域，绝大多数为深源地震，其它地区则绝大多数为浅源地震。

1.3 中国新丰江水库诱发地震活动

新丰江水库位于广东河源县，自 1959 年 10 月 20 日大坝建好开始蓄水后 1 个月起，就连续不断地发生地震活动。这一地区是我国地震活动的少震、弱震区，蓄水以前，库区很少有地震发生。新丰江水库大坝建设在花岗岩之上，高 105 m，水库容积约 11.5×10^9 m³。40 多年来，在水库区引发了近 30 多万次地震活动，可定位的 $M \geq 1.0$ 地震约 3.4 万次，蓄水后 2 年多于 1962 年 3 月 19 日发生最大诱发地震 $M_s 6.1$ ，是全球 4 个 6 级以上诱

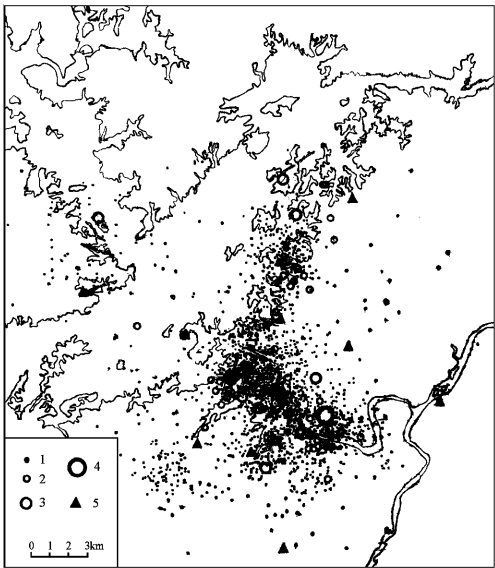


图 5 新丰江水库诱发地震 $M_s 6.1$ 主震后 10 个月内的地震活动分布 (王妙月等, 1976)

Fig. 5 The distribution of seismicity occurred 10 months after the $M_s 6.1$ main-shock which was induced by the Xinfengjiang reservoir (Wang *et al*, 1976)

库区的诱发地震处于长期持续不断的活动过程中。因此，简单地从水库诱发地震时间活动现象分析，可以把诱发地震活动分为迅速响应型、延迟响应型和混合响应型 3 大类。从水库诱发地震机理分析，这三种类型的机制可能是不同的。水库诱发地震活动表现出如此丰富多彩的机理和原因目前我们仍然了解不多。图 8 给出了 3 种类型的水库诱发地震活动的典型例子：马尼克 - 3 和蒙蒂赛洛水库的水位与每日地震数表现出与初始蓄水过程强烈的相关性，属迅速响应型（Simpson *et al*, 1988）（图 8a）；阿斯旺水库 1964 年开始蓄水，直到 1981 年底才诱发了大于 3 级的地震活动，属延迟响应型（Mekkawi *et al*, 2004）（图 8b）；美国米德湖水库从 1935 年开始蓄水，之后一年多就不断发生水库诱发地震，至 1939 年 5 月发生 5 级的最大诱发地震，属混合响应型（Carder, 1945）（图 8c）。这三种类型仅是某些水库诱发地震活动表现出的特点，要严格区分它们的活动规律仍然是困难的，总体来说，混合响应型应是水库诱发地震活动表

现形式的主体，其它两类诱发地震活动仅仅是在一定的时间段内反应的阶段性现象。

3 水库诱发地震预测方法研究

水库诱发地震预测方法研究实质上包括两大研究领域，一是探索研究如何评价待建水库是否产生水库诱发地震危险性的评估方法；二是探索研究水库诱发地震的预测、预警及预报的方法。这两大主要研究工作内容既有重点又相互联系，是不可分割的，但侧重有所不同。前者重点是研究当在一个地区新建大型水库工程时，依据库区所处的水文地质条件、断裂分布、区域地震活动现状等地震地质环境，评估潜在的诱发地震活动危险性与可能的最大强度和危险地点；后者重点是研究如何根据已建水库并发生了水库诱发地震活动的库区的观测资料，预测预报今后的诱发地震活动趋势。简单概括地说，前者是水库诱发地震危险性评估问题，后者是水库诱发地震预测预报问题。

类似于天然地震的成因和预测问题，对水库诱发地震的危险性评估和预测预报问题，目前仍然是世界上的科学难题，其主要原因是目前我们对水库诱发地震产生的机理与活动规律仍有许多问题没有足够的认识 and 了解。但借助对构造地震的观测和研究成果，结合水库诱发地震的观测资料，进行成因、机理和预测方法的研究是非常有效的。当前，国内外对水库诱发地震危险性评价和预测预报的研究主要从以下几个方面开展工作。

3.1 水库诱发地震构造与地质背景研究

这方面是研究水库诱发地震最重要的领域之一，通过详细调查库区地质条件、地质环境、断层分布以及活动断层参数、块体构造特征、非均匀岩体、区域地震构造特点、库区地下断层分布及活动断层年代鉴定等，构建出合理的诱发地震的地质模型，通过水库诱发地震活动观测资料，做出诱发地震产生的机理解释，由此试图建立科学的水库诱发地震危险性评价体系和方法。

表 1 是根据一些水库诱发地震的地震地质环境总结出的认识，对这方面的重点研究是希望总结出易产生或不易产生水库诱发地震的环境地质条件。

3.2 水库诱发地震的水文地质环境研究

主要调查库区水文地质条件、地下水分布状

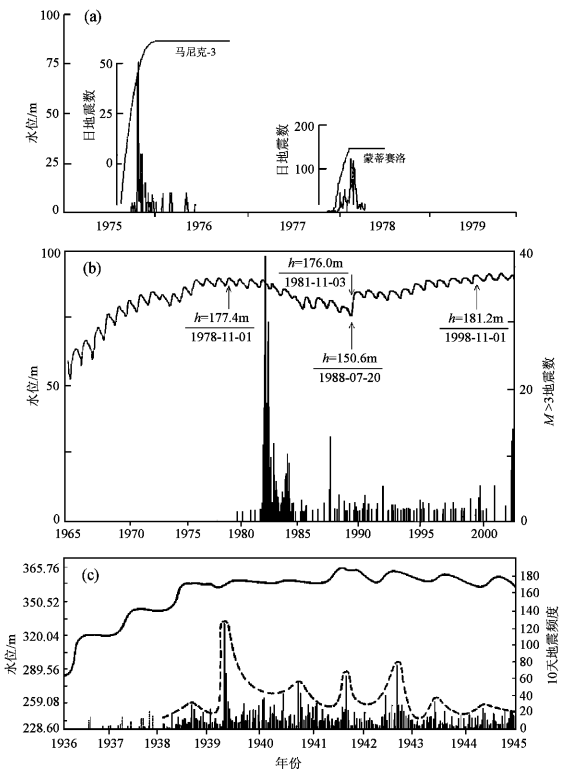


图 8 迅速响应型 (a)、延迟响应型 (b) 和混合响应型 (c) 水库诱发地震典型实例
Fig. 8 The type of prompt response reservoir (a), the type of delay response reservoir (b) and the type of mixed response reservoir (c)

表 1 水库诱发地震地质环境影响因素

Tab. 1 The influence factors of geological environment for the reservoir induced earthquakes		
易产生水库诱发地震	不易产生水库诱发地震	作者
块体构造、非均匀质岩、先存断层裂隙等有利于应力集中的地质体，是易产生水库诱发地震的主要因素和先决条件	均匀岩体、软性土质、结构密实缺乏裂隙的岩体等地质体不利于应力集中，不易产生诱发地震	Rothe (1970) Card (1970)
水库位于新构造活动区域、地壳具有“封存”应变能区域、库水具有裂隙渗透能力、构造作用“临界带”等区域易产生水库诱发地震，最大水库诱发地震不会超过库区周边 60 km 范围内的历史最大构造地震		Nikolaev (1974)
正断层和走滑断层环境、库体位于断层下降盘、区域上有火山活动、存在灰岩等易溶岩类、中等应变能积累区易产生水库诱发地震		Simpson (1976) Gupta (1989)
块体边缘地形梯度大、地应力集中、区域分布有温泉或新生代火山活动遗迹的地区，即地形梯度大及地壳残余热易产生水库诱发地震		Lomnitz (1974)
库区地下走向与库体平行断层在蓄水条件下、垂直走滑断层趋于稳定、低角度(<20°)逆掩断层或高角度(>60°)逆断层除部分外大多数趋于稳定、正断层在深度大于或等于库宽范围趋于失稳，库区高角度正断层比逆断层和走滑断层更易产生水库诱发地震		Roelofs (1988)

态、岩体水力学参数、裂隙发育程度、岩体饱和度、水扩散率、地下水与库水之间的连通性及储水性、库水的季节性波动变化等，这方面的研究主要是采用在库区稳定的构造点打深井，开展地下流体和水文地质的多参数观测，探索水库诱发地震活动与水文地质参数之间的相关性。目前。国内外在这方面的研究成果虽然有一些涉及到机理方面的解释，但更多的是对某些观测资料的现象解释。

3.3 水库诱发地震的观测与研究

这是国内外水库诱发地震观测与研究开展得最广泛、最深入的研究领域，尤其是采用高精度、宽频带数字地震的观测台网，为水库诱发地震提供了精确的定位结果。通过数字波形分析，可以获得诱发地震的震源参数特征，用以开展不同地震类型的比较研究，从而使人们对水库诱发地震的动力学和运动学特征有了新的了解和认识。尤其是可以借鉴丰富的构造地震序列研究成果，来分析水库诱发地震活动的特征和规律，这为水库诱发地震的预测预报研究奠定了坚实基础。例如，高精度三维水库诱发地震活动图像，可以用来分析研究库区地下断层分布与诱发地震活动的关系；诱发地震序列 *b* 值时空演化，可以用来分析不同类型的地震活动特征；震源力学参数的时空变化及随深度的变化，可以用来研究水库诱发地震的震源破裂过程及触发机理；在库区开展形变、地下水动态、断层位移等多学科观测手段，结合地震

活动性及地震学和前兆预测分析方法，可以对水库诱发地震活动趋势进行预测预报。可以预期，对水库诱发地震开展地震学特征研究，将对水库诱发地震的危险性评估和成功预报起到十分重要的作用。

3.4 水库诱发地震评估方法研究

由于水库诱发地震尤其是破坏性严重的水库诱发地震会造成严重的经济损失和人员伤亡，所以这类地震引起了人们的广泛关注。但全球水库诱发地震活动又表明，产生水库诱发地震活动的水库占全球已建水库总数的极少数。在地质、构造、水文等因素相同的条件下，有的水库蓄水后会产生诱发地震，有的水库则不会；有的大型水库产生破坏性较弱的诱发地震，有的中等甚至小型水库也会产生破坏性较大的诱发地震。因此，如何评价水库诱发地震的危险性以及哪些参数起控制作用，是预测水库诱发地震危险性的关键。

目前，由于产生水库诱发地震的复杂性和不惟一性还有许多科学问题有待探索，因此，不同学科（地震学、地质学等）对同一座水库诱发地震的危险性评估（如是否产生诱发地震，诱发地震可能的最大强度以及可能发生的地点等）的结论也会不尽相同，甚至对同一学科由于不同学者分析方法或观点不同，也会得出不同的结论。这方面的研究目前仍没有建立起统一的评价理论和方法，也没有公认的成熟的方法，处于观测资料积累和经验积累的认识阶段。目前，国内外对水

库潜在的诱发地震危险性评估主要采用的是根据地质环境、水文环境、地震活动、断层构造、岩性、坝高、水位、库容、水库特征参数等对已发生水库诱发地震的水库震例进行类比分析。同时,也通过地质—力学模型的数值计算,综合给出水库诱发地震潜在危险的预测结果。

3.5 水库诱发地震预测模型研究

根据已确认的水库诱发地震多学科观测资料结果,结合库区的地质背景、构造环境、机理、季节性变化等诸多因素,简化给出易发生诱发地震的地质模型、物理模型、破裂力学模型等,这些模型含有理论推测的、数学方程式的以及数值模拟计算的等多种形式。从不同分析角度、不同认识观点建立的预测模型,一方面通过对水库诱发地震观测资料的合理解释,研究诱发地震的产生机理;另一方面通过对诱发地震机理的进一步认识和研究,进而以半经验半理论的模型计算结果,应用于对水库诱发地震的危险性预测。

由于水库诱发地震机理与预测仍然是当今世界上的科学难题,目前国内外有关水库诱发地震机理与预测、危险性评估等方面的研究内容主要集中在两大方面:一是根据某些水库确定的水库诱发地震观测资料,分析不同水库的库容、库深、地理环境、形状、构造、岩性、水文地质、深部环境、应力状态、区域地震活动背景、水库诱发地震序列时空演化及特征等各种参数信息的统计分析,从中获取易于诱震或不易于诱震条件。我们把这种主要的观测现象的经验识别称之为水库诱发地震的诱震条件判断与类比预测法;二是在经验积累的基础上构建简化的水库诱发地震机制的物理—地质—力学破裂过程描述模型,以某些诱发地震破裂准则或应力屈服准则的约束条件,通过数值模拟计算结果,对水库诱发地震危险性做出预测,我们把这种主要以诱发地震成因模型为基础的预测研究称之为水库诱发地震预测的成因模型法。这两方面的研究在国内外取得了明显进展,尤其是第一方面的研究,内容丰富多彩。

4 水库诱发地震预测面临的困难

观测事实表明,水库诱发地震的触发机理比天然地震更为复杂,这是因为全球已建成的数万

座大、中、小型水库,绝大多数并没有发生水库诱发地震,已发生水库诱发地震的水库情况也具有多样性。在水库参数特征、构造条件、水文地质条件以及水库诱发地震序列的时空分布等方面并不都具有相似性。由于诱发地震触发成因的复杂性,导致了预测的困难。为了提高水库诱发地震危险性评价和预测的科学性,应深入开展以下内容的研究:

(1) 对已发生诱发地震的水库应详细调查和分析水库的工程建造特征、地质构造、深部环境、介质特性状态、区域应力场、岩性、地下水状态、区域地震活动背景、诱发地震活动时空特点、响应类型等。同时,也应重点选择个别没有产生诱发地震的相似水库开展相关的调查研究。通过对比分析,寻找哪些因素是易于产生诱发地震的主要条件。

(2) 加强对水库诱发地震高精度宽频带数字地震小孔径台网的观测及多学科的观测,以已发生水库诱发地震的水库观测资料为基础,深入研究诱发地震触发机制。从库体水力载荷作用、孔隙压力扩散、深部断层、地下流体分布、岩体介质、震源机制等方面,建立水库诱发地震的孕震及破裂过程的数理力学模型,探索水库诱发地震机理成因。

(3) 在上述研究成果基础上,综合研究和建立评价水库诱发地震危险性的科学预测方法体系,尤其是要开展库区范围内有关断层力学结构、岩体力学结构、水文地质结构、水渗透与应力扩散作用等与诱发地震孕育过程相关的基础研究,这对重大水利枢纽工程的顺利建设和减少不必要的投资,甚至避免巨大的浪费投资都是十分重要的。

5 讨论

根据国内外已知的水库诱发地震观测结果,水库诱发地震活动特征在时间和空间上都存在多样性和复杂性。在时间方面,可以把水库诱发地震活动分为迅速响应型、延迟响应型和混合响应型3大类,也就是说,水库诱发地震的活动随时间响应是复杂的,有的可以在水库蓄水过程中快速响应,有的可以延迟数年甚至十几年才发生最大诱发地震,混合响应实际上是快速响应和延迟响

应型的综合表现。在空间分布方面,诱发地震可以在库首、库中或库尾以及库区的近邻地区发生,但多数水库诱发地震的震中分布表明,对于一个特定的水库,其诱发地震的震中分布具有优势集中的分布区。在强度方面,目前世界上观测到的最大的水库诱发地震为印度柯依纳 $M_s 6.5$ 地震,大于 5 级的震例不多,绝大多数诱发地震强度小于 5 级。有一种观点认为,在地震活动区范围建的水库,其产生的最大水库诱发地震的强度不会超过库区一定范围历史上已发生的构造地震的最大震级强度。水库诱发地震的震源深度也表现出多样性,浅源地震可分布在地下数百米至 5~6 km 的深度范围,但如印度柯依纳水库、埃及阿斯旺水库触发的地震的震源深度大多数在 15~30 km 的范围。水库诱发地震序列的观测表明,某些水库当发生了最大水库诱发地震后,可以触发成千上万的余震,例如印度柯依纳水库在 1967 年最大诱发地震 $M_s 6.5$ 地震发生前几年就发生了数万次小的水库诱发地震,主震发生后的数十年内,诱发地震连续不断发生,并触发了十几个 5 级以上的中等地震。但也有的水库诱发地震活动间歇性比较明显,余震序列持续时间不长,频度也不高。

由于水库诱发地震活动在时空及地震参数方面表现的多样性,以及人们对诱发地震触发机理认识的局限性,导致了水库诱发地震预测方法研究的复杂性。目前国内外对水库诱发地震的机理与预测研究,仍然以积累观测资料 and 开展水库诱发地震震例研究为主。

参考文献:

- 高士钧,陈永成.1981.汉江丹江口水库地震[J].地震学报,3(1):23-31.
- 龚钢延,谢原定.1991.新丰江水库地震区内孔隙流体扩散与原地水力扩散率的研究[J].地震学报,13(3):364-371.
- 郭贵安,刘特培,秦乃岗,等.2004.新丰江水库 1961-1999 年小震综合机制解结果分析[J].地震学报,26(3):261-268.
- 国家地震局地质研究所.1984.中国诱发地震[M].北京:地震出版社.
- 胡毓良,陈献程.1979.我国的水库地震及有关成因问题[J].地震地质,1(4):43-57.
- 姜朝松,彭万里,王绍晋,等.1990.乌江渡水库地震诱震条件及其成因[J].地震学报,12(1):94-102.
- 李祖武.1981.水库地震与地质构造关系[J].地震地质,3(2):23-29.
- 王妙月,杨懋源,胡繁殖良,等.1976.新丰江水库地震的震源机制及其成因初步探讨[J].地球物理学报,19(1):1-17.
- 魏柏林,陈庞龙,等.1991.新丰江地震震源机制解及构造应力场[J].地震学报,13(4):462-470.
- 杨清泉,陈晓莉,陈献程.2001.水库诱发地震的最大震级及其发震时间的预测研究[J].地震学报,23(5):523-529.
- 易立新,车用太,王广才.2003.水库诱发地震研究的历史、现状与发展趋势[J].华南地震,23(1):28-37.
- 臧绍先.1983.水的渗透作用及新丰江水库地震的特点和机制[J].地震地质,5(2):59-69.
- 曾宪泽,吴红,江秋云.1984.新丰江水库蓄水时库区附加位移及应力场计算结果[J].华南地震,4(3):51-57.
- Garner D S. 1945. Seismic investigations in the Boulder Dam area, 1940-1944, and the influence of reservoir loading on earthquake activity[J]. BSSA, 35(17):175-192.
- Gahalaut V K, Kalpna, Singh S K. 2004. Fault interaction and earthquake triggering in the Koyna-Warna region. India [J]. GEO-PHYSICAL RESEARCH LETTERS, 31: L11614.
- Gough D I, Gough W I. 1970. Load-induced earthquakes at Lake Kariba-II [J]. Geophys J R astr Soc, 21: 79-101.
- Gupta H K. 2002. A review of recent studies of triggered earthquakes by artificial water reservoirs with special emphasis on earthquakes in Koyna. India [J]. Earth-Science Reviews, 58: 279-310.
- Linyue Chen, Pradeep Talwani. 2001. Mechanism of initial seismicity following impoundment of the Monticello reservoir, South Carolina [J]. BSSA, 91(6):1582-1594.
- Mekkawi M, Grasso J R, Schnegg P A. 2004. A long-lasting relaxation of seismicity at Aswan reservoir, Egypt, 1982~2001 [J]. BSSA, 94(2):479-492.
- Mekkawi M, Grasso J R, Schnegg P A. 2004. A long-lasting relaxation of seismicity at Aswan reservoir, Egypt, 1982~2001 [J]. BSSA, 94(2):479-492.
- Pradeep Talwan, Steve Acree. 1984/85. Pore press diffusion and the mechanism of reservoir-induced seismicity [J]. Pure and Applied Geophysics, 122: 947-965.
- Simpson D W, Gharib A A, Kebeasy R M. 1990. Induced seismicity and changes in water level at Aswan reservoir [J]. Gerlands Beitr. Geophysik, 99(3):191-201.
- Simpson D W, Leith W S, Scholz C H. 1988. Two types of reservoir-induced seismicity [J]. BSSA, 78(6):2025-2040.
- Simpson D W, Negmatullaev S K. 1981. Induced seismicity at Nurek reservoir, Tadjikistan, USSR [J]. BSSA, 71(5):1561-1586.

Research on Characteristics and Prediction of Reservoir Induced Seismicity

QIN Jia-zheng, LIU Li-fang, QIAN Xiao-dong

(*Earthquakes Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, Yunnan, China*)

Abstract

Based on observation and reservoir induced earthquake cases at home and abroad, the seismicity characteristics of some famous reservoir induced earthquake sequence are studied in detail. According to the temporal variation of reservoir filling with reservoir induced earthquake, the reservoir induced earthquake cases are summarized as 3 types: prompt response, delay response and fixing response. The differences in time and space of these three types of reservoir induced seismicity are analyzed and discussed. On this basis the technical approaches of researches on method and prediction of reservoir induced earthquake are synthetically analyzed.

Key words: reservoir induced seismicity; response type; factors that induced earthquake; prediction method