

DOI: 10.13512/j.hndz.2014.01.001

RIS 时空分布特征及其与库区地质构造环境的关系

周斌¹, 李蕾¹, 孙峰², 史水平¹

(1. 广西壮族自治区地震局, 广西 南宁 530022; 2. 中国石油大学(华东), 山东 青岛 266580)

摘要: 在广泛收集了国内外水库诱发地震震例资料的基础上, 利用统计学的方法, 进行了水库诱发地震空间分布与时间响应特征及其与库区地质构造环境关系的研究, 结果表明: ① 在空间分布上, 诱发地震主要集中在水库周缘 10 km 范围之内, 并局限于特定的库段丛集分布, 当库区具备一定的地质构造与水文地质条件时, 诱发地震活动会随着水库蓄、放水过程中的水位变化而发生迁移; ② 对于不同地区或不同水库, 诱发地震活动的时间响应存在着差异, 总体上: 在水库蓄水后 1 年以内, 初次响应占据一定的优势, 而绝大部分诱发主震活动发生在水库初始蓄水 1 年以后。对长时间的水库蓄水历程而言, “混合响应”是水库诱发地震活动表现形式的主体, 而“快速响应”和“滞后响应”仅是在一定的时间段内反应的阶段性现象; ③ 诱发地震响应与水库水位变化的关系十分复杂多样, 既存在正相关关系, 又有负相关性, 同时在某种程度上表现出了较高震级的水库诱发地震对水位变化速率的依赖; ④ 水库诱发地震时空分布受发震库区地形地貌与局部地质构造条件、岩性条件、水文地质条件等方面的先存内因的控制, 事实上, 它们对水库诱发地震时空分布的控制作用并不是截然分开的, 其间存在着相互依存、辩证统一的关系。

关键词: 水库诱发地震; 空间分布; 时间响应; 库区地质环境

中图分类号: P314.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8662 (2014) 01-0001-10

Spatial Distribution and Time Response Characteristics of the Reservoir-induced Seismicity and Its Relationships with Geological Structure Environment in the Reservoir Region

ZHOU Bin¹, LI Lei¹, SUN Feng², SHI Shuiping¹

(1. *Earthquake Administration of the Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning 530022, China*; 2. *China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China*)

Abstract: On the basis of the previous work and collections of the latest information on reservoir-induced seismicity, the spatial distribution and time response characteristics of RIS and its relationships with geological structure environment in the reservoir region had been studied by using the method of statistics, the results show that: ① in the spatial distribution, RIS mainly concentrated in the range of 10 km away from the reservoir

收稿日期: 2013-11-12

基金项目: 中地震科技星火计划(XH12035)、广西科技攻关计划(1298005-2、12426001)项目资助

作者简介: 周斌, 1972年生, 男, 高级工程师, 主要从事地震预测预报、地震地质和构造流体动力学方面的研究。

E-mail: dztzb@163.com.

margin and confined to a particular segment of the reservoir. When a certain condition of geological structure and hydrogeological conditions are met in the reservoir region, the activities of RIS will migrate with the changes of water level during water storage and drainage. ② the time responses of RIS are different from region to region and from reservoir to reservoir. In general, RIS's initial response is dominant when the reservoir is filled less than 1 year, while most of the main earthquakes of RIS occur in more than 1 year after the reservoir initial storage. The "mixture response" is the main form of RIS activities for the long process of reservoir storage, while the "rapid response" and "delayed response" are only a periodic phenomenon. ③ RIS response has very complex and diverse relationships with the reservoir water level changes, which can be positive correlation or negative correlation, and higher magnitude of RIS shows certain dependence on the rate of water level changes. ④ RIS spatial and temporal distribution is controlled by the existing internal causes including local terrain features, geological structure, lithologic and hydrogeological conditions in the reservoir area. In fact, all these causes that influence the spatial and temporal distribution of RIS are interdependent and dialectical united and can not be completely separated.

Keywords: Reservoir-induced seismicity (RIS); Spatial distribution; Time response; Geological structure environment in the reservoir region

0 引言

水库诱发地震 (Reservoir-induced seismicity, 简称 RIS) 是由于水库蓄水或排水过程引发的在一定时间内库区及其周边不大区域范围内所发生的地震活动^[1]。迄今为止, 全球已报道的 RIS 确切震例约有 130 例, 其中, 大于 6.0 级的有 4 例, 5.0~5.9 级的有 15 例, 其余占 85% 以上的均小于 5.0 级。虽然大部分 RIS 的震级不高, 但由于其震中位置一般邻近重要的水利设施, 且震源浅、震中烈度高, 往往具有很大的破坏性, 可造成大坝及附近建筑物的破坏和人员伤亡, 甚至会引起滑坡、坍塌等严重的次生灾害危及下游安全。从全球已发生的 RIS 震例来看, 虽然发震水库占大中型水库总数的比例较少, 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、弱震地区都有发生。为了进一步研究库水加卸载及渗透过程中, RIS 的动态响应的力学机制, 对已观测到的确切震例的时空活动特征进行多方面的了解和认识是十分必要的。此外, RIS 在许多方面具有与天然构造地震不同的特征, 了解 RIS 的空间分布规律、诱发地震活动与水库蓄、排水过程中水位变化之间的响应关系, 特别是 RIS 时空分布与库区地质构造环境关系, 是 RIS 机理与预测研究最基本也是最重要的条件。本文广泛收集了国内外已确定的 RIS 震例资料, 利用统计学的方法, 开展了此方面的研究。

1 RIS 活动的空间分布特征

1.1 RIS 区域分布特征及其与地震活动背景的关系

在 RIS 研究早期, 一些学者就试图从诱发地震与天然地震活动性的关系、诱发地震的新构造环境、地壳应变速率等方面阐释 RIS 的成因^[2,3]。Castle 等^[4]对 38 个 RIS 震例进行了统计研究, 在 33 个精确定位的震例中, 发生在无震区的有 10 个, 低震区 11 个, 低-中等震区 2 个, 中等震区 4 个, 中等-强震区 4 个, 强震区 2 个。笔者对全球 99 例 $M_s \geq 3.0$ 级的 RIS 震例进行了统计, 有 80 个震例可以确定其所在区域的天然地震活动水平, 其中, 发生在无震区的有 24 个, 弱震区 23 个, 中等震区 8 个, 强震区 24 个, 距强震活动区 12 km 的 1 个。

从全球 130 例水库诱发地震的震中分布情况可以看出, RIS 的震中位置并不是都分布于地震活动构造带上。印度半岛是世界上水库诱发地震较多的地区之一, 著名的柯依纳 (Koyna) M_s 6.5 级破坏性水库诱发地震就发生在这一地区。在区域地震构造环境上, 印度半岛属前寒武纪地盾, 是世界上最稳定的地质构造区之一。根据印度历史记载和现代地震记录, 印度的强震活动主要分布在北部和西部地区, 而在 1967 年 12 月 10 日柯依纳水库诱发地震以前, 印度半岛极少有地震活动^[5]。

北美的水库诱发地震, 绝大多数是发生于区域地震活动水平低的地区。例如乔卡茜 (Jocassee)、蒙蒂塞洛 (Monticello) 等发震水库集中分布的南卡罗来纳州, 历史地震活动性处于较低的水平。加拿大的发震水库马尼克-3 (Manicouagan-3) 和 LG-

3, 蓄水前库区均无有感地震记录^[6]。

一些著名的水库诱发地震, 如位于赞比亚-津巴布韦边界的卡里巴水库(Kariba)、埃及阿斯旺水库(Aswan)、塔吉克斯坦的努列克水库(Nurek)等, 蓄水后诱发地震的震级和烈度均超过当地历史最高水平。

目前, 我国已经发生的 RIS 震例约有 46 个。在这些震例中, 发生于强震构造区的有 10 个, 包括: 新疆强震构造区的克孜尔水库和恰甫其海水库, 青藏高原强震构造区的紫坪铺水库、漫湾水库、大桥水库、盛家峡水库、二滩水库、茄子山水库和小湾水库, 台湾强震构造区的曾文水库; 发生于中等强度地震构造区的有 7 个, 分别是龙羊峡水库、李家峡水库、新店水库、铜子街水库、佛子岭水库、云鹏水库和参窝水库; 其余的 29 个震例基本上分布在华南弱震区。

以上统计结果似乎表明, 水库诱发地震与区域地震活动性并无密切的相关性, 相对于天然地震活动背景而言, 水库诱发地震的发震比率在缺震区和弱震区反而占有一定的优势。

1.2 RIS 震中分布规律

统计分析表明, 水库诱发地震的震中大多分布于水库周缘 10 km 范围之内, 并局限在特定的库段丛集分布。例如, 我国的新丰江、大化岩滩、三峡、水口、乌溪江以及国外的柯依纳、阿斯旺等水库的震中分布。

构造地震的震中迁移是人们所熟知的一种自然地质现象, 特别是局部地段局部时间内的震中迁移已被广泛研究。RIS 震例统计表明, 当某些水库区具备一定的地质构造与水文地质条件时, 诱发地震活动亦会随着水库蓄、放水过程中的水位变化而发生迁移。概括起来, RIS 迁移的情况大致有 4 种: 一种是在水库蓄水初期, 随着水位的快速上升, 库区外围的地震活动迁移至库坝附近, 在已掌握的 RIS 震例中, 此类情况比较普遍; 另一种发生在喀斯特地貌发育的库区或库段, 如湖北省丹江口水库, 该水库在蓄水初期, 地震主要集中分布在库体覆盖区周围, 在 1971 年 11 月至 1972 年 4 月 3 日, 当水位上升达到 150 m 后, 随着水库淹没区范围的扩大, 震中逐渐向远处的林茂山和宋湾两个灰岩峡谷区迁移, 形成了两个地震密集区^[7], 这种情况诱发地震的震源深度一般较浅, 且多为岩溶坍塌型。第三种情况跟与水库有水力联系的断裂构造有关, 往往表现为水库经历

了长时间的蓄水以后, 诱发地震活动沿断裂的走向向远离库岸的方向迁移(离开库缘达 10 km 甚至更多), 此类诱发地震一般表现为高震级、大范围和有较深的震源深度; 第四种情况的震中迁移一般发生在处于挤压构造应力环境的库区, 且受控于水库水位的动态变化过程, 如塔吉克斯坦的努列克水库, 该水库位于南天山东南部的塔吉克凹陷, 由于受印-亚大陆碰撞的影响, 现今构造应力场以 N-NW 向挤压为主。该水库蓄水后库区地震活动明显增强, 特别是在 1972 年底(水位上升到 105 m)和 1976 年底(水位上升到 215 m)两个重要的蓄水阶段, 随着水库水位的快速抬升, 地震震中由水库的西南侧沿水库轴线向东北侧迁移^[8]。我国四川省紫坪铺水库蓄水后诱发小震活动的迁移现象也属于此类^[9,10]。

RIS 的震中迁移特征与水库加卸载过程中附加水头压力的扩散密切相关, 1985 年, Talwani 等在假定库水压力传导至震源即发生地震的基础上, 通过计算诱震库区介质水力传导率的方法试图解释震中迁移的现象^[11], 不同研究者以这种方法计算了 20 多例诱震库区介质的孔隙压力扩散率。周斌等基于地下应力场与渗流场耦合理论, 以紫坪铺水库为例, 探讨诱发地震活动时空演化与库水加卸载及渗透过程的关系, 阐释 RIS 震中迁移的力学机制^[9]。

1.3 RIS 震源深度分布与迁移

与天然构造地震相比, 水库诱发地震具有震源深度浅的特征。笔者对掌握震源深度数据的 43 个水库震例资料做统计分析, 其中, 震源深度在 0~4.9 km 的占震例总数的 46.5%, 震源深度在 5.0~9.9 km 的占震例总数的 34.9%(图 1)。由此可见, 水库诱发地震主要发生在地下 10 km 以上的

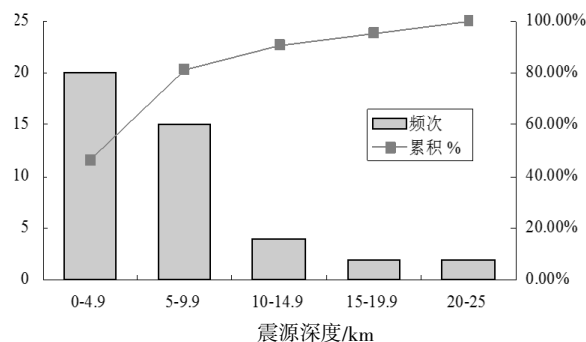


图1 水库诱发地震震源深度统计直方与累计百分比图
Fig.1 Focal depth statistical histogram and cumulative percentage figure of reservoir-induced seismicity

脆性上地壳中。

但对于不同的水库,其诱发地震活动的深度范围亦存在着较大的差异。如,我国湖北省三峡、贵州省乌江渡、巴西的帕莱布纳等水库诱发的溶岩或塌陷型小震群活动,其震源深度基本上在 2 km 以内,最浅的仅有几百米深。我国广东省新丰江、广西壮族自治区龙滩、岩滩、四川省紫坪铺以及印度柯依纳、希腊克里马斯塔、赞比亚卡里巴、泰国斯林那加林、美国奥洛维尔等绝大多数水库诱发地震活动的深度优势分布在 5~10 km 之间。到目前为止,全球记录到最深诱发地震的实例为埃及的阿斯旺水库,该水库诱发地震的震源深度定位结果表明^[12],有深源地震(优势分布在 15~25 km)和浅源地震(优势分布在 5~10 km)两类,与世界上其它地区水库诱发地震的震源深度相比,具有其独特的方面。

水库诱发地震的另一个重要的特征是,震源深度随水库蓄水的时间历程有向深部迁移的现象。如广东省新丰江水库,在 1961 年 7 月 20 日至 1962 年 3 月 19 日期间,共记录到 56 次 $M_s \geq 3.0$ 级地震,其震源深度优势分布在 5.5 km 左右,且 3 km 左右的极浅源地震占有比较大的比例;主震发生以后,在 1963 年 3 月 19 日至 1987 年 10 月 3 日期间,共记录到 201 次 $M_s \geq 3.0$ 级地震,此时震源深度优势分布在 6.5 km 左右,3 km 左右的极浅源地震减少,而震源深度在 8~10 km 左右的地震明显增多,显示了诱发地震活动向深部的迁移^[13]。

再如湖南省东江水库,在蓄水初期,诱发地震的震源深度一般为 2~2.5 km,而后期发生的地震一般都在 5 km 以上,少数地震已接近 10 km。这充分说明库水逐渐沿着库区的断裂构造带和溶洞向库底深部渗透,使地下岩石发生物理和化学变化,从而诱发地震活动^[14]。应该说,震源迁移的物理力学机制及判定方法研究对于水库地震趋势预测具有重要的意义,如果通过震源的迁移特征可以判断诱发地震的震源分布丛集于一定深度,并且随水位波动不再向深部迁移,那么就有理由认为后续发生中强以上诱发地震的概率减小,这方面蒙蒂塞洛水库就是一个很好的例子。

水库诱发地震震源分布的第三个特征是其空间分布受与水库具有水力联系的断裂控制,此方面易立新^[13]已有详尽的论述,在此不赘述。

2 水库蓄水过程与诱发地震响应的关系

2.1 RIS 时间响应的基本特征与类型

RIS 的直接起因与水库蓄水过程有关。全球已报道的水库诱发地震活动观测震例表明,诱发地震活动在不同地区或不同水库的时间响应是有差别的。例如,有的诱发地震活动发生在水库蓄水后的数年才响应,有的诱发地震活动可能在蓄水过程中数天或数周内就会立即发生,有的水库诱发地震活动与水位的周期性变化相关,兼有前两者的特点,使得库区的诱发地震处于长期持续不断的活动过程中。

在全球 99 个 $M_s \geq 3.0$ 级的 RIS 震例中,有 85 例可以确定水库初始蓄水时间与初次发生响应性地震活动的间隔时间。通过对这 85 个震例进行统计分析表明:在初次蓄水 1 个月以内就发生响应性地震活动的有 22 例,2~6 个月发生的有 19 例,7~12 个月发生的有 11 例,13~36 个月发生的有 16 例,其余 17 例的发生时间间隔都在 3 年以上。初次发震时间间隔在 1 年以内的占震例总数的 61.18%,这说明在水库蓄水后 1 年以内,RIS 活动的初次响应具有优势分布的特征(图 2)。有 90 个震例可以确定 RIS 主震与水库初始蓄水的间隔时间,其中,间隔时间为 1 个月的有 4 例,2~6 个月的有 7 例,7~12 个月的有 10 例,13~36 个月的有 26 例,3 年以上的有 43 例(图 3)。由发震频次累计百分比图可以看出,在水库初始蓄水后 1 年以内发生主震活动的仅占震例总数的 23.33%,而绝大部分诱发主震活动都发生在水库初始蓄水 1 年以后。

Simpson 等根据水库蓄水后诱发地震发生的时间响应,把诱发地震分为快速响应型和滞后发生型^[15]。快速响应型表现为,水库初始蓄水,地震活动立即增加,或水位迅速变化后地震活动急剧变化,这类诱发地震活动具有震级低、震源浅、多以震群发生的特点;而滞后发生型的主要地震活动发生于水库蓄水历程的较晚阶段,具有震级高、

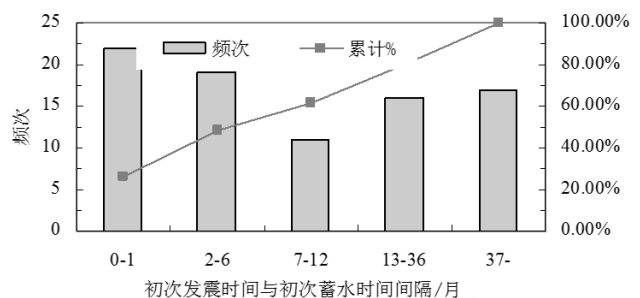


图 2 RIS 初次响应时间统计直方与累计百分比图

Fig.2 Statistical histogram and cumulative percentage figure of initial response time

震源深、多以前震-主震-余震型发生的特点。从水库诱发地震时间活动现象分析,可将诱发地震活动进一步分为快速响应型、滞后响应型和混合响应型 3 大类。图 4 给出了这 3 种类型的典型例

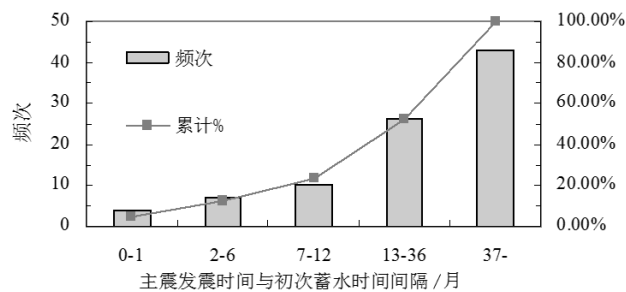


图 3 RIS 主震与水库初始蓄水时间间隔统计直方与累计百分比图

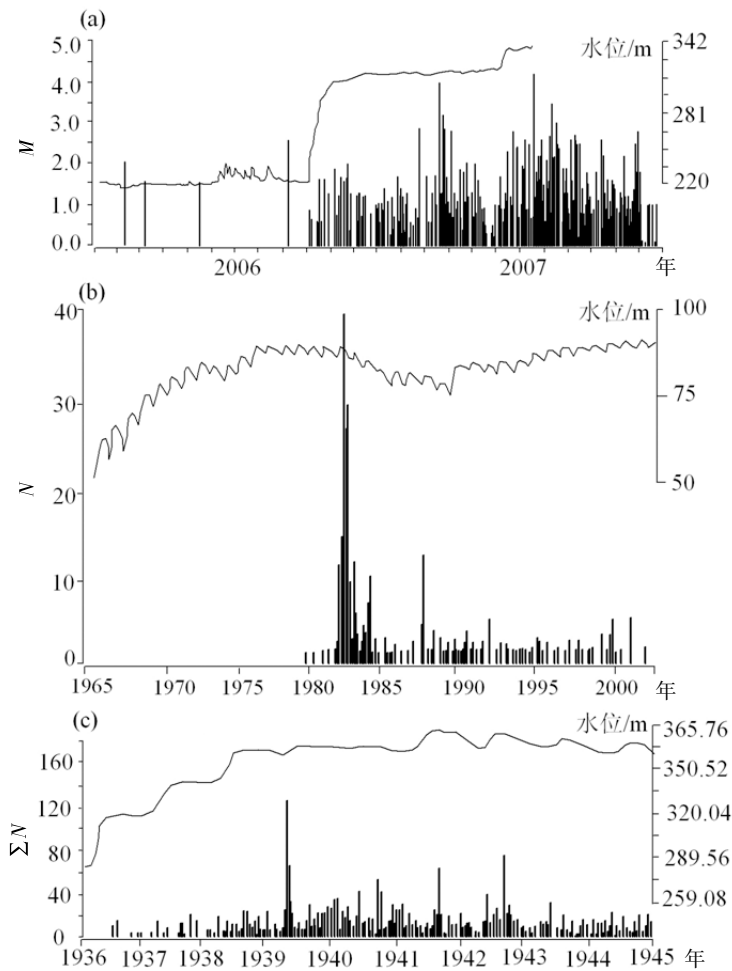
Fig.3 Statistical histogram and cumulative percentage figure of the intervals between the largest reservoir-induced earthquake occurrence and the initial impounding reservoir

子: 广西龙滩水库的水位变化与诱发地震活动表现出与初始蓄水过程强烈的相关性,属快速响应型;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,属滞后响应型^[16];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^[17]。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。

2.2 RIS 响应与水库水位变化之间的相关性

2.2.1 RIS 响应与水库水位变化的正相关性

RIS 对水库水位变化响应的一种形式是库区地震活动与水库水位变化之间存在着正相关关系,



(a) 广西龙滩水库; (b) 埃及阿斯旺水库; (c) 美国米德湖水库

图 4 典型水库诱发地震活动的时间响应特征

Fig.4 The time response characteristics of typical reservoir-induced seismicities

即水位上升伴随着诱发地震活动的增强,而水位下降则对应于地震活动的减弱。例如:新丰江水库蓄水后不久,库区地震活动便开始频繁发生,且随着水位上升,地震活动逐渐增强。在1962年3月19日水库水位达110.5 m时,发生了 M_s 6.1级主震活动,主震后至1964年期间,地震活动频度随着水库水位的下降而快速降低;岩滩水库蓄水后库区地震活动与水库水位升降的关系也非常密切,较密集的震群活动或较大震级地震的发生均与水位到达峰值同步^[18];丹江口水库蓄水初期水位上升比较缓慢,库区没有震级大于 M_L 1.2级的地震发生,随着水位逐渐上升,地震频度和强度不断升高^[19];南水水库在蓄水初期的第一、二个高水位阶段,地震活动与库水位的对应关系较好,较高的水位或较大的水位变化,伴随着较高水平的地震活动^[20]。在其他国家,如印度的柯依纳水库、希腊克里马斯塔水库、赞比亚-津巴布韦交界的卡里巴水库、加拿大的马尼克-3水库和塔吉克斯坦的努列克水库等,库区地震活动都表现出了与水库水位变化的正相关对应关系。

2.2.2 RIS 响应与水库水位变化的负相关性

一些库区的诱发地震响应与水库水位变化之间存在着负相关性,表现为在高水位下降后的低水位时段反而出现了诱发地震活动增强的现象。

珊溪水库就是一个比较典型的例子,该水库位于浙江省南部温州市飞云江干流的上游河段,在大地构造上处在浙东南褶皱带内的温州-临海拗陷带的南部,为压剪性的局部构造应力环境。库区断层构造大多沿NW、NE两组走向共轭发育,多为陡倾角的逆断层、逆走滑断层,一般长达10 km以上,深达5 km以上,切穿基底变质岩系(图5a)。自从2000年5月水库下闸蓄水以来,库水位共有三个时段超过了132 m高水位,分别是2002年5~9月、2004年9~12月和2005年5~11月。水库诱发地震活动主要发生在高水位过后,由高水位下降到低水位过程中,且地震活动与高水位出现时间有一至数月的滞后时间,只有极少一些地震发生在水位上升时期(图5b)。

呈负相关关系的震例还有青海的盛家峡水库和台湾的曾文水库。盛家峡水库自1980年汛期蓄水以来,当1981年3~4月放水排空时,随即诱发了地震,以后每年秋季蓄水满库时无震,而到翌年春天灌溉放水排空时,随之诱发微震活动,1984年3月7日发生了最大为 M_s 3.6级的诱发地震。而台湾的曾文水库在满库时地震活动减弱,库水位下降后则地震活动相对增强,但总的趋势是蓄水后比蓄水前减弱。在1973年曾文水库蓄水前,库区发生过5~6级的中强地震,蓄水初期还

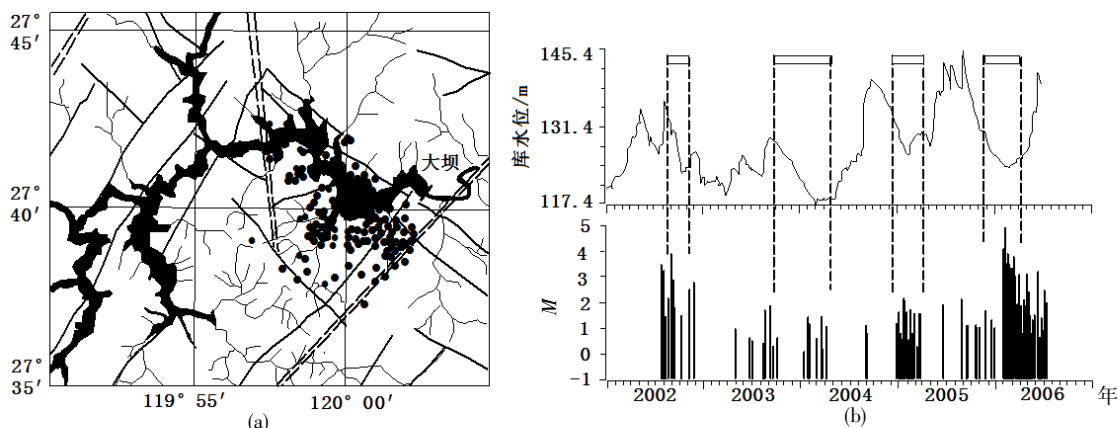


图5 珊溪水库断裂构造、震中分布(a)及地震序列与水位变化的关系(b)

Fig.5 The fracture structure and epicenter distribution of Shanxi reservoir (a) and the relationship between earthquake sequence and the change of water level (b)

频繁发生过的3~4级地震,但当水库达到高水位后,震级频次明显降低。在1974~1976年水库处于高水位期间没有 M_s 3级以上地震活动,微震也极少;当1977~1978年库水位低于40 m后,震级随之增大(M_s 3.7级),微震的频次也随之增高。

2.2.3 较高震级 RIS 响应对水库水位变化速率的依

赖性

RIS 与水库水位变化之间的响应关系还表现在较高震级的诱发地震活动对水位变化速率的依赖性方面。Gupta 在对印度柯依纳水库 $M_s \geq 4.0$ 级地震与水位变化速率之间关系的研究后发现,水位周变化率超过12 m/周是柯依纳库区发生 $M_s \geq 5.0$

级地震的一个必要条件^[21]。Simpson 等也报道了在努列克水库类似的发现^[22]。在我国也不乏此类震例,如福建省的水口水库。该水库的水位变化与库区地震活动之间的对应关系大体分为两种情况:一是在蓄水初期水位尚未达到正常运行水位的时段(1994年3月前),水位急剧升降随后发震,如1993年7月23日3.3级和10月12日3.6级地震,这些地震发震时间滞后水位变化时间较短;二是水位基本上达到60 m以上的正常水位后,在高水位下急剧升降时诱发较大地震,如1995年3月16日3.2级和1996年4月21日4.1级地震,发震时间滞后于水位的变化较前一种情况稍长。彭美凤等对水口水库15次3级以上地震进行统计,发现水位平均变化率达0.75~1.08 m/d,且连续变化幅度在6.5~10.5 m范围内发震。说明该水库水的“冲击波”式诱震作用的“灵敏性”要比柯依纳水库高^[23]。因此,通过适当控制水库水位变化的速率,可能会避免未来局部破坏性诱发地震的发生。

2.2.4 RIS 响应与水库水位变化之间关系的复杂性

震例研究表明,无论是正相关还是负相关,仅仅是特定水库在特定的时间段内反应的阶段性现象,对长时间的蓄水历程而言,RIS 响应与水库水位变化的关系是十分复杂多样的。

一些震例在水库蓄水初期为正相关,随着蓄水历程的增长,会逐渐转变为负相关关系。如新丰江水库蓄水初期,水位变化与地震活动之间存在着较好的正相关性,其中, M_s 6.1级主震和两次 M_s 5级以上强余震都发生在水位阶段。而1965年后这一规律已不明显, $M_L \geq 3.0$ 级以上地震多数发生在水位下降的过程中或由下降转为平稳波动的过程中。这反映了蓄水数年后库区积累的能量由于地震活动的不断释放而达到新的平衡,水库卸荷阶段地震活动增强,则可能是由于过剩孔隙压力造成瞬时破裂引起的。

更多的震例表现为水库蓄水初期正相关,随着蓄水历程的增长,地震活动呈逐步衰减的趋势。如广东省南水水库,该水库在蓄水初期(1969~1970年底)的第一、二个高水位阶段,地震活动与库水位的对应关系较好,较高的水位或较大的水位变化,往往伴随较高水平的地震活动。但是,自1976年第三个高水位阶段之后,此对应关系已基本消失。无论是高水位抑或较大的水位变化,均未能改变地震活动逐步衰减的总趋势。

还有一些震例,在水库蓄水初期诱发地震活动与水库水位变化之间具有较好的对应关系,但

随着水库蓄水时间的延长,库区地震活动似乎表现出了受控于区域应力场扰动的趋势。例如水口水库,上文已阐述,在该水库蓄水初期,诱发地震活动与水库水位变化的对应关系比较明显;但在1999年以后,库区地震活动的起伏与周边地震活动的起伏表现出了一定的一致性,似乎说明此时段库区地震活动主要受控于区域应力场的扰动。

3 RIS 时空分布与库区地质环境的关系

3.1 库区地形地貌及地质构造对 RIS 空间分布的控制

统计分析表明,RIS 多发生于深水峡谷区,而在宽谷地带很少有诱发地震分布。这可能是因为峡谷区岸坡是蓄水过程中地下水位变动最剧烈的地带,卸荷裂隙发育,有利于地应力的集中,从而表现出了地形地貌对浅部诱发地震活动的控制作用。

震例统计资料也表明:绝大部分构造型中、强水库地震的发生均与活动断裂或由于蓄水而活化了的断裂活动有关。因此,库区存在与有水库有水力联系的断裂构造,特别是第四纪以来有过活动的断裂,是发生中、强水库诱发地震的重要前提条件。RIS 空间分布受与水库有水力联系断裂构造控制的典型例子是埃及的阿斯旺水库,该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, M_s 5.3级主震就发生在这一地区;另一个区域是瓦迪卡拉沙附近。地质证据表明,阿斯旺水库诱发地震活动的密集分布带完好地沿卡拉沙断层的三个断层段展布,该断层位于卡拉沙湾底,与水库具有密切的水力联系^[12]。

研究还表明,RIS 空间分布受局部褶皱构造的控制。如塔吉克斯坦的努列克水库,该水库区中新世代地层由海相沉积层、大陆地台沉积层和造山陆相磨拉石建造组成,岩盐构造发育,并且无震区和发震区的地层发育情况基本相同。但在局部构造环境上,无震区为向斜构造区,地下水很难向深部渗透;而发震区位于背斜构造区,地下水可以向深部渗透引起孔隙压升高从而诱发了地震活动。

3.2 RIS 空间分布对库区岩性条件的依赖

RIS 与库区的岩性条件关系密切,早在水库诱发地震研究的初期,Rothé 等^[24,25]就提出了预先存

在的裂隙化、非均质、脆性岩体是水库诱发地震先决条件的观点。对全球 105 个诱震最大震级在 1.0 级以上水库库坝区的岩性资料进行了归纳和统计,结果显示:在所有诱震最大震级 $M_L \geq 1.0$ 级的水库中,库坝区岩性为石灰岩、花岗岩和片麻岩的占了 76%之多,加上玄武岩、白云岩,接近占到 90%;而发震库区岩性为砂岩、泥岩、千枚岩和大理岩的仅仅占到 10.5%。其中,变质岩岩性以片麻岩为主,还有少量的千枚岩;沉积岩岩性几乎全是石灰岩和白云岩,只有非常少的砂岩和泥岩;岩浆岩岩性以花岗岩占绝大多数,还有部分玄武岩(图 6)。

之所以会出现这种现象,主要是由岩体力学性质和渗透特性两方面所决定的。首先就岩体力

学性质而言,由石灰岩、花岗岩、片麻岩和玄武岩等组成的脆性岩体,较延性岩体更容易聚集变形能量,原位地应力高于延性岩体,在外力作用下易引起脆性断裂。其次就岩体渗透特性而言,脆性岩体往往构造节理、裂隙发育,渗透性能较好且表现出非均一性和各向异性,特别是碳酸盐体岩溶的发育为水的渗透循环创造了更为有利的条件,这样在水库附加水头压力的扩散作用下,容易引起孔隙压力在特定方向和特定部位的增高,从而诱发地震活动。因此,RIS 对库区岩性条件的依赖也同时决定了诱发地震活动空间分布的规律。纵观水库诱发地震空间分布特征,震中往往集中在库体重力场和地表水体向深部渗流影响范围内的脆性岩体分布带,表现出了 RIS 对库区岩性条

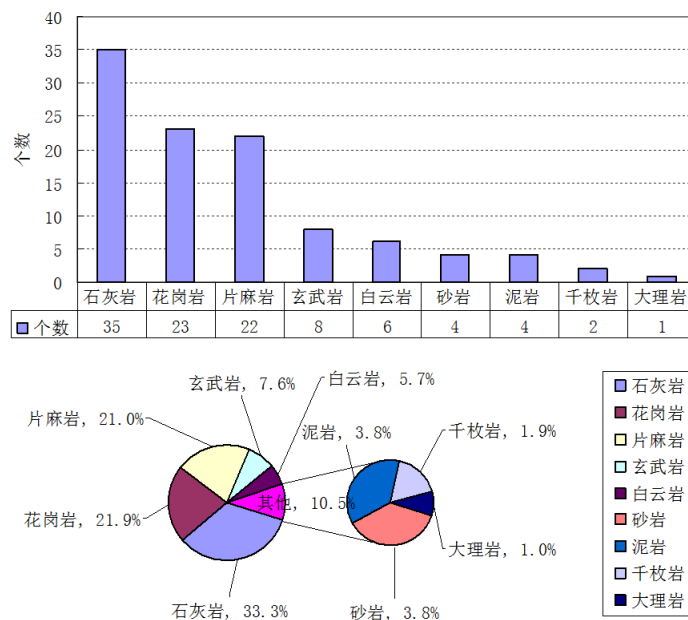


图 6 水库库坝区岩性条件统计图

Fig.6 The lithology statistical chart of reservoir dam area

件强烈的依赖性。

3.3 库区水文地质条件对 RIS 时间响应的控制

水库蓄水后,库体重力荷载作用和水库附加水头压力向深部的扩散作用是诱发库底岩体或断层破裂失稳的两个重要的外在因素,RIS 的时间响应和演化明显受控于这两个作用相互制约与促进的动态耦合过程^[9,10],而地表水体向深部渗透的程度和范围主要取决于库区水文地质条件,从而决定了水文地质条件对 RIS 时间序列的控制作用。通过对已发震水库库区水文地质条件的总结不难

发现:当库区岩体的含水性和导水性差,特别是当库区岩体为裂隙不发育的脆性花岗岩、玄武岩体时,一般在蓄水以后不久就会发生快速响应型诱发地震活动。例如,蒙蒂塞洛水库分布于片岩、片麻岩并侵入有花岗岩、花岗闪长岩的地区。该区地层普遍含水性差,侵入体裂隙不发育,为隔水岩体。水库蓄水后诱发地震活动的快速响应可能反映了库水荷载效应起到了主导作用。此外,马尼克-3、卡里巴、克里马斯塔等水库也属于这一情况。

当库区岩体的含水性和导水性好,特别是发

育有与水库有密切水力联系的导水性断裂构造时,一般会发生混合响应型和滞后响应型的诱发地震活动。如美国的米德湖水库,该水库蓄水后,地震主要发生在水库西南部的 Boulder 盆地。从水文地质条件分析, Boulder 盆地第三纪火成岩系和寒武纪岩浆岩系中发育有沉积岩系,力学性质上是两层脆性岩体夹一层塑性岩体,含水性上是两层隔水层夹一层含水层,并有导水性断层发育。从地震序列分析,该水库诱发的地震活动属于混合型响应类型,蓄水初期的地震可能与库体荷载作用有关,而后期发生的地震可能是库水扩散至沉积岩系与寒武系岩浆岩系接触面上引起的孔隙压力升高造成的,这种解释与该区的震源深度也基本吻合^[3]。再如我国的新丰江水库,几个震中密集区都位于渗透性好的原生节理和构造节理极端发育的花岗岩体内,而在渗透性差的红色碎屑岩建造、复理石建造中,地震极少或没有,诱发地震活动时间序列表现出初期快速响应及后期滞后响应的混合响应的特点。

事实上,库区局部地质构造、岩性条件和水文地质条件对 RIS 时空分布的控制作用并不是截然分开的,它们之间存在着相互依存的、辩证统一的关系。易立新等^[26]将断裂构造、岩性条件和水文地质条件概括为水文地质结构,既包含了断层导水性能的好坏,又涵盖了岩性条件的差异,同时指出了断层与围岩不同组合形式对 RIS 的影响,这一归纳就比较恰当。

4 结论

本文在广泛收集国内外水库震例资料的基础上,利用统计学的方法开展了 RIS 空间分布与时间响应特征及其与库区地质构造环境关系的研究,得到以下几点主要认识:

(1) RIS 在空间分布上主要集中在水库周缘 10 km 范围之内,并局限于特定的库段丛集分布。当库区具备一定的地质构造与水文地质条件时,诱发地震活动会随着水库蓄、放水过程中的水位变化而发生迁移。RIS 迁移现象可概括为 4 种情况:①是在水库蓄水初期,库区外围的地震活动向库坝区迁移;②是随着水库淹没区范围的扩大,地震向远离库坝的灰岩峡谷区迁移;③是地震沿与水库有水力联系的断裂构造向远离库岸的方向迁移;④是在处于挤压构造应力环境的库区,受水库水位动态变化的影响,地震活动发生动态迁

移。此外,与天然构造地震相比,水库诱发地震具有震源深度浅的特征,一般分布在地下 10 km 以上的范围,但对于不同的水库,其诱发地震震源深度亦存在着较大的差异。

(2) 震例统计分析表明,水库蓄水后 1 年以内,RIS 活动的初次响应具有优势分布的特征,而绝大部分诱发主震活动都发生在水库初始蓄水 1 年以后。诱发地震活动在不同地区或不同水库的时间响应存在着差异,从 RIS 时间响应现象分析,可分为快速响应、滞后响应和混合响应 3 种类型。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) RIS 时间响应与水库水位变化之间关系密切,一些库区地震活动与水库水位变化之间存在着正相关关系,而一些库区则存在着负相关性。但无论是正相关还是负相关,仅仅是特定水库在特定的时间段内反应的阶段性现象,对长时间的蓄水历程而言,RIS 响应与水库水位变化的关系是可以发生变化的。震例研究同时表明,较高震级的诱发地震活动依赖于水位变化的速率。

(4) RIS 时空分布受发震库区三个方面的先存内因的控制:①是地形地貌与局部地质构造条件。在地形地貌上,一般深水峡谷区易发生卸荷型浅层诱发地震活动;在地质构造条件上,绝大部分构造型中、强水库地震的发生均与活动断裂或由于蓄水而活化的断裂活动有关,同时,局部褶皱构造也表现出了对 RIS 空间分布的控制作用。②是库区岩体的岩性组成,统计结果显示,诱发地震往往发生在脆性岩体分布带,表现出了 RIS 对库区岩性条件的依赖性,这可能主要是由岩体力学性质和渗透特性两方面所决定的。③是库区水文地质条件,由于地表水体向深部渗透的程度和范围主要取决于库区水文地质条件,从而决定了水文地质条件对 RIS 时间序列的控制作用。事实上,库区局部地质构造、岩性条件和水文地质条件对 RIS 时空分布的控制作用并不是截然分开的,它们之间存在着相互依存的、辩证统一的关系。

参考文献:

- [1] 秦嘉政,刘丽芳,钱晓东.水库诱发地震活动特征及其预测方法研究[J].地震研究,2009,32(2):105-113.
- [2] Nikolaev N I. Tectonic conditions favourable for causing earthquakes occurring in connection with reservoir filling[J]. Eng. Geol., 1974, 8: 171.

- [3] Gupta H K, Rastogi B K, Narain H. Common features of the reservoir associated seismic activities[J]. Bull. Seismol. Soc. Am., 1972, 62: 481~492.
- [4] Castle R O, Clark MM, Grantz A, et al. Tectonic state, its significance and characterization in the assessment of seismic effects associated with reservoir impounding[J]. Eng. Geol., 1980, 15 (1-2): 53~99.
- [5] Guha S K, Patil D N. Large Water-Reservoir-related Induced Seismicity [J]. Gerland Beitrage zur Geophysik, 1990, 99: 265.
- [6] Pei D Z. Characteristics of small earthquakes and stress field: a study of reservoir induced seismicity in quebec[J]. Soil Dynamics & Earthquake Eng., 1992, 11 (4): 193~202.
- [7] 王清云, 高士钧. 丹江口水库诱发地震研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2003, 23 (1): 103~106
- [8] Simpson D W, Negmatullaev S K. Induced seismicity at Nurek reservoir [J]. Bull. Seismol. Soc. Am., 1981, 71: 1561.
- [9] 周斌, 薛世峰, 邓志辉, 等. 水库诱发地震时空演化与库水加卸载及渗透过程的关系-以紫坪铺水库为例[J]. 地球物理学报, 2010, 53 (11): 2651~2670.
- [10] 周斌. 水库诱发地震时空演化特征及其动态响应机制研究-以紫坪铺水库为例 [J]. 国际地震动态, 2010, 6: 41~44.
- [11] Talwani P, Acree S. Pore pressure diffusion and the mechanism of reservoir-Induced seismicity[J]. Pure and Applied Geophysics., 1985, 122 (6): 947~965.
- [12] Mohamed A, Megume M. Earthquake activity in the Aswan region, Egypt[J]. Pure and Applied Geophysics, 1995, 145 (1): 69~86.
- [13] 易立新. 水库诱发地震理论及三峡水库诱发地震预测研究[D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2001.
- [14] 曹华. 东江水库诱发地震探讨[J]. 大坝与安全, 2006, 1: 21~22.
- [15] Simpson D W, Leith W S, Scholz C H. Two types of reservoir-induced seismicity [J]. Bull. Seismol. of America, 1988, 78 (6): 2025~2040
- [16] Mekki M, Grasso J R, Schnegg P A. A long-lasting relaxation of seismicity at Aswan Reservoir, Egypt, 1982~2001 [J]. Bull. Seismo. Soc. Am., 2004, 94 (2): 479~492.
- [17] Carder D S. Seismic investigations in the Boulder Dam area, 1940~1944, and the influence of reservoir loading on earthquake activity [J]. Bull. Seismol. Soc. Am., 1945, 35: 175~192
- [18] 光耀华. 大化岩滩梯级水库诱发地震特征[J]. 水力发电学报, 1996, 4: 45~53.
- [19] 刘素梅. 丹江口水库续建工程诱发地震研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2005.
- [20] 肖安予. 南水水库地震及其发展趋势[J]. 华南地震, 1990, 10 (2): 68~77.
- [21] Gupta H K. Induced seismicity hazard mitigation through water level manipulation at koyna, India: a suggestion[J]. Bull. Seismol. Soc. Am., 1983, 73 (2) : 679~682.
- [22] Simpson D W, Leith W S. Induced seismicity at Toktogul Reservoir, Soviet entral Asian. U. S[J]. Geo. Surv., 1988, No.14-08-0001-G1188, 32.
- [23] 彭美凤, 林世敏, 林松键. 水口水库地震及其活动特征 [J]. 华南地震, 1997, 17 (2): 83~89.
- [24] Rothé J P. Seismic artificiels (man-made earthquakes) [J]. Tectonophysics, 1970, 9: 215~238.
- [25] Carder D S. Reservoir loading and local earthquakes[J]. Geol. Soc. Am. Bull., 1970, 81 (8) : 51~61
- [26] 易立新, 王广才, 李榴芬. 水文地质结构与水库诱发地震[J]. 水文地质工程地质, 2004, 2: 29~32.