



龙滩水库库区地震活动与水位的互相关分析及孔隙压力扩散系数估算

叶庆东 余大新 王凯明 毛远凤 阎春恒

Analysis of the cross-correlation between seismicity and water level and estimation of the hydraulic diffusivity in the Longtan reservoir area

Ye Qing dong, Yu Daxin, Wang Kaiming, Mao Yuanfeng, Yan Chunheng

引用本文:

叶庆东, 余大新, 王凯明, 毛远凤, 阎春恒. 2023. 龙滩水库库区地震活动与水位的互相关分析及孔隙压力扩散系数估算. 地震学报[J], 45(6): 1068–1078. DOI: 10.11939/jass.20220083

Ye Q D, Yu D X, Wang K M, Mao Y F, Yan C H. 2023. Analysis of the cross-correlation between seismicity and water level and estimation of the hydraulic diffusivity in the Longtan reservoir area. *Acta Seismologica Sinica*[J], 45(6): 1068–1078. DOI: [10.11939/jass.20220083](https://doi.org/10.11939/jass.20220083)

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11939/jass.20220083>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

福建仙游震群的孔隙压扩散特征

The pore pressure diffusion characteristics of Xianyou earthquake swarm in Fujian Province
地震学报. 2018, 40(2): 160–171 <https://doi.org/10.11939/jass.20170136>

广西龙滩水库库区地震尾波衰减特征

Characteristics of seismic coda attenuation in Longtan reservoir of Guangxi region
地震学报. 2020, 42(2): 151–162 <https://doi.org/10.11939/jass.20190111>

广西龙滩水库地壳 Q_S 二维成像

Crustal 2-D Q_S tomography in Longtan reservoir, Guangxi region
地震学报. 2018, 40(6): 689–700 <https://doi.org/10.11939/jass.20170227>

深井水位对地震波、固体潮和气压的水力响应—以范县井为例

Hydraulic response of water level to seismic wave, earth tide and barometric pressure in deep well: A case study of the Fanxian well in Henan Province
地震学报. 2020, 42(6): 719–731 <https://doi.org/10.11939/jass.20200036>

浙江珊溪水库2014年震群活动发震机理研究

Investigation on the seismogenic mechanism of the 2014 earthquake swarm in Shanxi reservoir, Zhejiang Province
地震学报. 2017, 39(5): 648–658 <https://doi.org/10.11939/jass.2017.05.002>

云南普洱糯扎渡水库蓄水前后P波速度结构变化特征

Characteristics of P wave velocity structure changes before and after impoundment in Nuozhadu reservoir, Pu'er, Yunnan
地震学报. 2018, 40(6): 701–718 <https://doi.org/10.11939/jass.20180028>

叶庆东, 余大新, 王凯明, 毛远凤, 阎春恒. 2023. 龙滩水库库区地震活动与水位的互相关分析及孔隙压力扩散系数估算. 地震学报, 45(6): 1068–1078. doi: 10.11939/jass.20220083.

Ye Q D, Yu D X, Wang K M, Mao Y F, Yan C H. 2023. Analysis of the cross-correlation between seismicity and water level and estimation of the hydraulic diffusivity in the Longtan reservoir area. *Acta Seismologica Sinica*, 45(6): 1068–1078. doi: 10.11939/jass.20220083.

龙滩水库库区地震活动与水位的互相关分析及孔隙压力扩散系数估算^{*}

叶庆东^{1),†} 余大新¹⁾ 王凯明¹⁾ 毛远凤¹⁾ 阎春恒²⁾

1) 中国天津 300180 中国地震局第一监测中心

2) 中国南宁 530022 广西壮族自治区地震局

摘要 对广西壮族自治区龙滩水库库区 2013 年 3 月 1 日至 2019 年 10 月 31 日的地震数目与水位进行互相关计算, 得到了地震活动对库区蓄水响应的延迟时间为 37 天, 并通过替代数据检验确认了其可靠性。37 天的延迟时间说明在水位达到峰值后地震活动开始快速增强, 可能暗示着现阶段库水流体作用的影响主要局限在库区内。根据延迟时间和地震深度分布, 以及周期性边界条件下孔隙压力扩散方程的解, 在不考虑孔隙压力扩散与应力耦合时得到孔隙压力扩散系数 $D = (8.66 \pm 4.11) \text{ m}^2/\text{s}$; 在考虑孔隙压力扩散与应力耦合时得到扩散系数 $D = (1.72 \pm 0.82) \text{ m}^2/\text{s}$, 后者在物理上更为合理, 说明现阶段孔隙压力扩散与应力耦合可能是诱发龙滩库区水库地震的主要因素。

关键词 龙滩水库 互相关系数 替代数据 扩散方程 孔隙压力扩散系数

doi: 10.11939/jass.20220083 **中图分类号:** P315.1 **文献标识码:** A

Analysis of the cross-correlation between seismicity and water level and estimation of the hydraulic diffusivity in the Longtan reservoir area

Ye Qing dong^{1),†} Yu Dixin¹⁾ Wang Kaiming¹⁾ Mao Yuanfeng¹⁾ Yan Chunheng²⁾

1) *The First Monitoring and Application Centre, China Earthquake Administration, Tianjin 300180, China*

2) *Earthquake Agency of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning 530022, China*

Abstract: In this study, the 37-day time lag was estimated by cross-correlating the daily number of earthquakes and the daily water level data from 1 March 2013 to 31 October 2019 in the Longtan reservoir, Guangxi Zhuang Autonomous Region. Based on the surrogate data test, we confirmed the 37-day time lag was reliable. The 37-day time lag indicates reservoir-induced enhances seismic activity rapidly after the water level reaches peak value, which may suggest the fluid effect of reservoir water is mainly confined within the reservoir area at present. With

* 基金项目 中国地震局星火计划(XH21050Y)资助。

收稿日期 2022-06-02 收到初稿, 2022-09-27 决定采用修改稿。

作者简介 叶庆东, 博士, 高级工程师, 主要从事地震层析成像、微地震震源参数等方面的研究, e-mail: yeqingdongg@126.com



the time lag, the depth distribution of the earthquakes, and the solutions of pore pressure diffusion equations derived under periodic boundary condition, the vertical hydraulic diffusivity were estimated to be $D=(8.66\pm4.11)\text{ m}^2/\text{s}$ and $D=(1.72\pm0.82)\text{ m}^2/\text{s}$ on the condition that the pore pressure diffusion uncoupled and coupled the stress, respectively. The latter is more reasonable physically, which may indicate the coupling between diffusion of the pore pressure and stress is the main reason for inducing the earthquakes in the Longtan reservoir at present stage.

Key words: Longtan reservoir; cross-correlation coefficient; surrogate data; diffusion equation; hydraulic diffusivity

引言

由于水库蓄水或排水而引发的库区附近地震活动性(地震的频次和地震的震级)的明显增强, 称为水库诱发地震, 或简称水库地震(陈颙, 2009). 自二十世纪六十年代全球接连发生 M_6 以上水库诱发强震后, 水库诱发地震在全世界范围内引起了广泛关注. 广西龙滩水库横跨广西天峨县和贵州罗甸县, 地处云贵高原南缘向桂西山区与丘陵过渡的斜坡地带, 坝高 220 m, 正常蓄水位为 400 m, 总库容为 273 亿 m^3 , 是典型的高山峡谷高坝大库容水电站(周斌等, 2014; 阎春恒等, 2015). 该水库自 2006 年 9 月蓄水以来, 库区地震活动明显增多, 截止到 2019 年底, 已经记录到近 5 000 余次地震(图 1), 其中 $M_L > 4.0$ 地震 3 次, 对库区周边人们的生产生活造成较大影响. 库区断裂发育(图 1), 九条主要断层中除罗甸—望谟断裂(F_1)、达恒—达良断裂(F_5)、望谟—逻西断裂(F_7)外, 其余均在早一中更新世有过不同程度的活动(周斌等, 2014; 阎春恒等, 2015). 在库区的出露地层中(图 1), 泥盆系一二叠系地层绝大部分为碳酸盐岩建造, 岩溶、裂隙发育程度较高, 渗透性较强(阎春恒等, 2015; 叶庆东等, 2018). 作为国内最重要的水利枢纽工程之一, 龙滩水库在带来巨大经济价值的同时, 也持续吸引着学者们对库区地震地质构造条件(潘建雄, 1989)、危险性评估(郭培兰等, 2006)、活动性与孕震环境(陈翰林等, 2009a, b; 詹艳等, 2012; 阎春恒等, 2015, 2020; 叶庆东等, 2018)、诱发的物理机制(刘耀炜等, 2011; 周斌等, 2014)等方面的关注并开展相关研究, 取得了许多重要的认识.

水库地震主要受库水载荷与流体作用两方面的影响(蒋海昆等, 2014). 水库蓄水或排水受降水量及生产需要的影响一般呈年度和季节性变化, 载荷与流体作用响应也呈现相同的变化规律, 进而导致地震活动性也呈现相同的变化趋势(Nur, Booker, 1972). 基于此, 近年来一些学者(Saar, Manga, 2003; Christiansen *et al.*, 2005; Telesca, 2010; Telesca *et al.*, 2015, 2020)直接对地震活动与水位进行相关分析, 获取水库地震活动相对于水位的延迟时间, 并通过延迟时间估算库区的孔隙压力扩散系数. 该系数是一个非常重要的物理参数, 其数值大小直接关系到地震活动的机理, 并影响库区地震活动的时空尺度, 一直是地震和水文地质工作者关注的重点. 然而, 这方面的研究在国内并不多见, 鉴于此, 本文拟对龙滩水库 2013 年 3 月 1 日至 2019 年 10 月 31 日的地震活动与水位变化进行相关分析, 计算地震活动对库区蓄水响应的延迟时间, 进而根据延迟时间估算龙滩水库库区的孔隙压力扩散系数.

1 数据

龙滩水库从 2006 年 9 月开始蓄水, 水位在 3 个月左右上升 100 余 m, 几乎与此同时就触

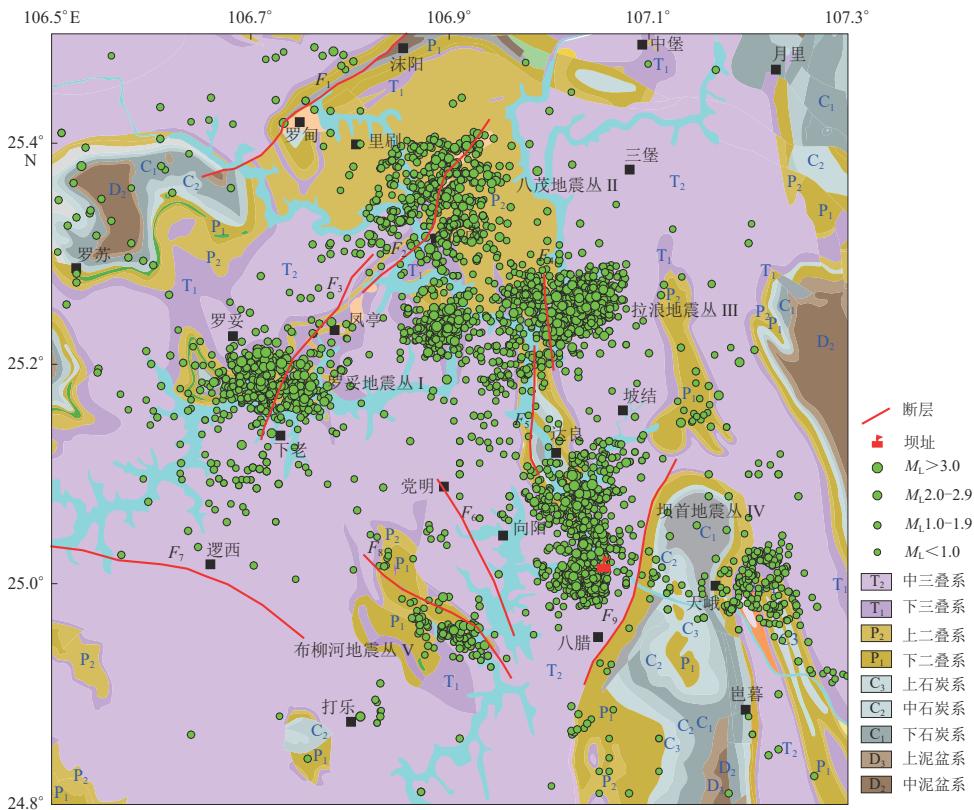


图 1 龙滩水库地质构造及 2006 年 9 月至 2019 年 10 月的地震事件分布

F_1 : 罗甸—望谟断裂; F_2 : 高坪—八茂断裂; F_3 : 凤亭—下老断裂; F_4 : 马耳—拉浪断裂; F_5 : 达恒—达良断裂;

F_6 : 党明—桂花断裂; F_7 : 望谟—逻西断裂; F_8 : 长里—八南断裂; F_9 : 龙凤—八腊断裂

Fig. 1 Structural outlines and the distribution of seismic events from September of 2006 to October of 2019 in the Longtan reservoir

F_1 : Luodian-Wangmo fault; F_2 : Gaoyu-Bamao fault; F_3 : Fengting-Xialao fault; F_4 : Maer-Lalang fault; F_5 : Daheng-Liang fault; F_6 : Dangming-Guihua fault; F_7 : Wangmo-Luoxi fault; F_8 : Changli-Ba'nan fault; F_9 : Longfeng-Bala fault

发了大量的地震。这些地震属于对库区蓄水作用的即时响应，受到库区自身的应力状态、蓄水量短时间内大量增加所致的加载和孔隙压力扩散等因素的影响。一般认为，库水加载对诱发地震的作用非常有限甚至是抑制地震发生的(Roeloffs, 1988; 蒋海昆等, 2014)；蓄水量短时间内大量增加引起孔隙压力增加的影响时段通过分析误差余补函数的变化来获得，通常为几个月到几年(Talwani, Acree, 1984; Roeloffs, 1988; Turcotte, Schubert, 2002; 蒋海昆等, 2014)。本文仅考虑蓄水完成后水位波动与地震活动的关系。为了削弱即时响应的影响，我们收集了龙滩水库完成蓄水 6 年以后，2013 年 3 月 1 日至 2019 年 10 月 31 日共六年半的地震目录。该目录共包含 516 个地震事件，其 $N-t$ 和 $M-t$ 分布见图 2，这些地震均已由广西地震台网进行了精确定位。采用最大曲率法(Wiemer, Wyss, 2000)计算得到这个时段内的最小完整性震级为 0.5，为此我们仅保留震级不小于 0.5 的事件信息。图 2b 还给出了水位的日均值变化，可以看出水位基本呈周年变化，并且对地震活动具有一定的调控作用，在高水位时期地震活动强度较大，反之在低水位时期地震活动相对较弱。

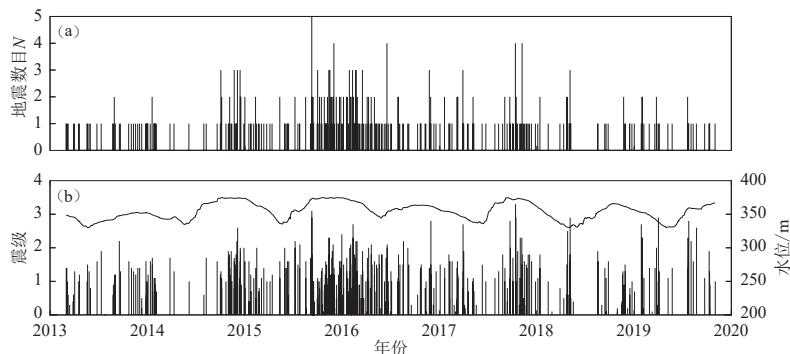


图 2 龙滩水库 2013 年 3 月 1 日至 2019 年 10 月 31 日地震活动和水位变化

(a) 地震活动 N - t 图; (b) M - t 图和水位变化

Fig. 2 The seismicity and the variation of water level from March 1, 2013 to October 31, 2019 in the Longtan reservoir

(a) The N - t map of seismicity; (b) The M - t map of seismicity and the change of water level

2 地震活动与水位变化的互相关分析

Nur 和 Booker (1972) 在研究流体孔隙压力触发余震活动时提出, 余震活动水平与孔隙压力变化成正比。对水库诱发地震而言, 孔隙压力的变化表现为水库水位的变化, 地震活动水平表现为一定时段内的地震数目或这些地震释放的地震矩(Saar, Manga, 2003; Christiansen et al, 2005), 本文选择前者作为地震活动水平的表征。我们先将筛选出的地震目录整理成以天为单位的地震次数时间序列 N , 然后对每天的地震次数 N 与水位 W 进行标准化处理, 即减去均值后再除以标准差, 分别得到新的时间序列 n 和 w (Telesca et al, 2012)。类似于 Saar 和 Manga (2003)、Telesca (2010)、Telesca 等(2015)的做法, 对序列 n 与 w 作互相关后, 再采用替代数据来检验。假设地震发生与水位不存在关系, 则 n 与 w 的互相关系数没有明显的极大值, 或者极大值仅仅是因为原始数据包含噪声而产生的假象。为了检验这种假设, 通过替代数据生成方法产生一系列与 w 具有相同功率谱但相位谱随机的时间序列 w_R 来“重新洗牌”, 尽可能破坏掉原序列的原始动力结构(Little et al, 2006)。如果地震活动与水位不相关, 则 n 与 w 和 n 与 w_R 的互相关系数统计上处于同一水平, 在 n 与 w 最大互相关系数对应的延迟时间附近, 其数值相对于 n 与 w_R 的互相关系数没有明显优势。反之, 如果地震活动与水位相关, 则在 n 与 w 最大互相关系数对应的延迟时间附近, 其值显著地大于 n 与 w_R 的互相关系数。

本文中采用傅里叶变换法(Saar, Manga, 2003; 刘鑫, 鲍长春, 2014)来生成替代数据, 总共产生了 1 000 组替代时间序列, 每一组 w 的替代数据 w_R 都与 n 作互相关, 得到 1 000 组互相关系数。由于互相关系数的每一个时间点对应一个延迟时间, 1 000 组数据意味着每一个延迟时间处都有 1 000 个互相关系数值与之对应, 在这些值中取出不小于序列中 99% 值的最小值(1 000 个数据的序列, 从小到大排列取第 990 个点)作为该点的置信水平。对每一个延迟时间对应的 1 000 个互相关系数作同样处理, 得到 99% 置信水平的曲线。图 3a 中灰色曲线给出了 n 与 w 的互相关系数及基于替代数据得到的 99% 的置信水平, 可以看出最大互相关系数出现在延迟时间 37 天处, 最大值为 0.186, 尽管相关性不高, 但却高于 99% 的置信水平。

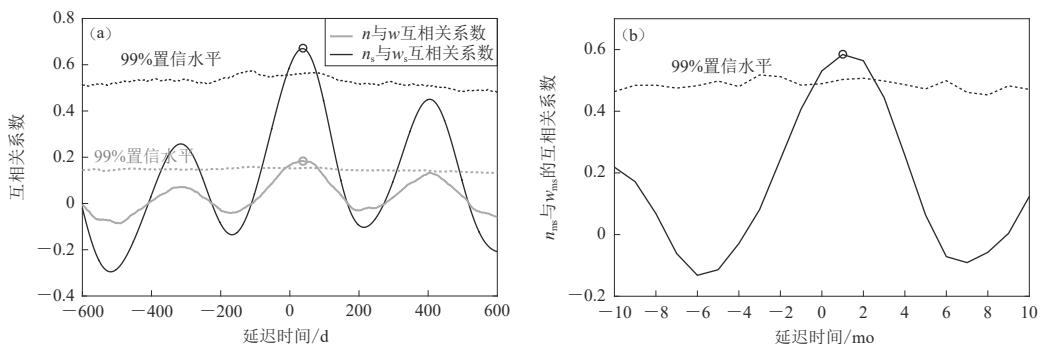


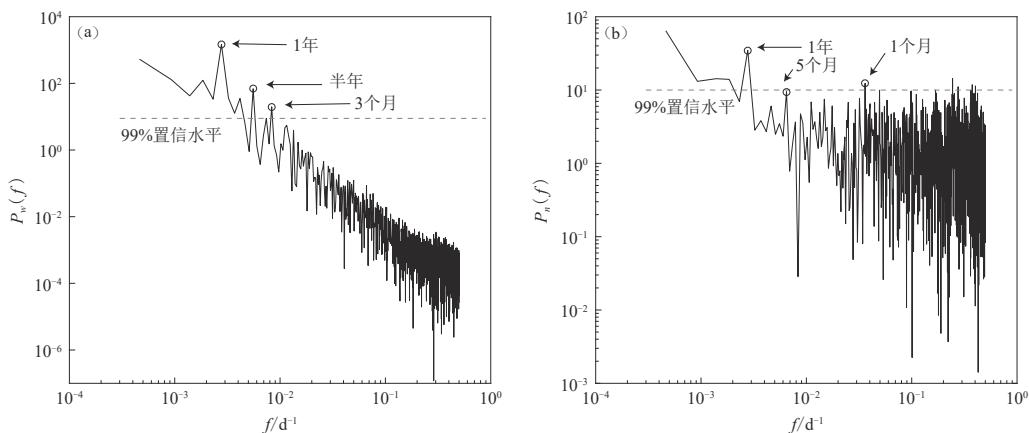
图 3 标准化地震数目与水位的互相关

(a) 以天为单位的标准化后的地震数目与水位的互相关, 其中灰色代表滤波之前的结果,
黑色为滤波后的结果; (b) 以月为单位的标准化后的地震数目与水位的互相关

Fig. 3 Cross-correlation between the standardized number of earthquakes and water level

(a) Cross-correlation between standardized number of earthquakes and water level in day, where the gray line represents the results before filtering, and the black line represents the results after filtering; (b) Cross-correlation between standardized number of earthquakes and water level in month

与水位相比, 地震活动显然随机性更大, 频谱成分的差异可能是导致 n 与 w 互相关系数小的直接原因。为此, 我们对时间序列 n 和 w 进行了功率谱分析, 其结果见图 4。可以看出: w 含有比较明显的年度、半年度和季节性变化; 而 n 除了年度变化比较明显之外, 半年度及季节性变化不明显, 高频成分较多。考虑到库区地震活动可能主要受水位长周期变化的影响, 我们对序列 w 和 n 进行低通滤波, 对于 w 保留周期大于一个季度的成分, 而对于 n 仅保留周期大于 150 天的成分。 w 和 n 滤波后的时间序列 w_s 和 n_s 见图 5a, 在箭头 1—3 处, 可以看出 w_s 与 n_s 相关性明显, 地震活动的变化 n_s 相对于水位 w_s 略为滞后。此外, 我们以月为单位统计地震数目(n_m)和水位数据(w_m), 其中水位数据取每个月的平均值, 其结果见图 5b。相对于以日为单位的统计, 以月为单位的统计也有低通滤波的作用。由于时间间隔的拉大和序列长度的缩短, 在图 5b 中地震数目相对于水位变化的滞后更加明显, 其中在箭头 1, 2,

图 4 标准化后的水位 w (a) 和地震数目 n (b) 的功率谱Fig. 4 The power spectra of standardized water level w (a) and number n of earthquakes (b)

4和5处的地震活动相对于水位滞后1个月，在箭头6处滞后3个月。

同处理 n 和 w 一样，我们对 n_s 与 w_s 和 n_m 与 w_m 也进行互相关计算，并用替代数据进行检验。图3a中黑色曲线为 n_s 与 w_s 的互相关系数及其99%置信水平曲线，对比滤波前的灰色曲线，可见互相关系数形态基本相同，但是滤波后的最大相关系数达到了0.67，是滤波前的3.6倍，表明水位的变化对地震活动产生的调控确实主要来自于其长周期波动。滤波前后两者的延迟时间均为37天，说明高频变化仅改变了相关系数的数值大小，掩盖不了水位长周期变化是引起库区地震活动的主要因素这一实质。图3b为 n_m 与 w_m 的互相关系数及其99%置信水平曲线，最大相关系数为0.58，对应的最大延迟时间为1个月，与 n_s 和 w_s 互相关系数的结果一致，进一步确认了延迟时间为37天是可靠的。

3 扩散系数估算

孔隙压力的增加降低了岩石的有效正应力和岩石摩擦系数，从而使介质的抗剪强度降低。当岩石处于破裂的临界状态时，孔隙压力微小的增加都可能触发地震，因此孔隙压力扩散被认为是触发水库地震的一个主要机制(Nur, Booker, 1972; Talwani, Acree, 1984; Roeloffs, 1996)。孔隙压力扩散由扩散方程描述，在扩散方程中，扩散系数是衡量扩散快慢的物理参数，与介质的渗透系数、流体的动力学黏度及孔隙弹性模量等参数的大小相关。地表附近的孔隙压力扩散系数可以通过相关试验获取，深部的孔隙压力扩散系数获取非常困难。水库库区的水位变化与地震活动的关系提供了一个探测库区孔隙压力扩散系数的“窗口”，是孔隙压力扩散系数原位测试的试验场(Talwani, Acree, 1984; 龚钢延, 谢原定, 1991)。

3.1 基于自由扩散模式的扩散系数估算

在基于扩散方程估算孔隙压力扩散系数的已有研究中，大多忽略孔隙压力扩散与应力的耦合(Talwani, Acree, 1984; Saar, Manga, 2003; Telesca, 2010; Telesca *et al.*, 2015)，仅考虑孔隙压力的自由扩散。在此情形下仅考虑垂向扩散，一维孔隙压力扩散满足的方程为：

$$D \frac{\partial^2 P}{\partial h^2} = \frac{\partial P}{\partial t}, \quad (1)$$

式中， P 为孔隙压力， D 为孔隙压力扩散系数， h 为深度， t 为时间。在水库坝基处孔隙压力主要受库水周年性变化调控，则边界条件为 $P(t, h=0) = P_0 \exp(i\omega t)$ ，其中 P_0 为坝基处($h=0$)由水位变化引起的压力周年性变化的振幅， $\omega = 2\pi/T$ ， T 为周期， $T=1$ a， i 为虚数单位。式(1)的解为(Turcotte, Schubert, 2002)：

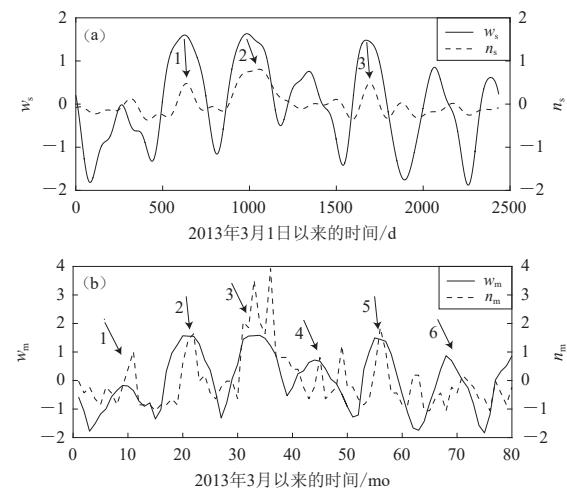


图5 (a) 滤波后的标准化地震数目 n_s 和水位 w_s ；

(b) 以月为单位的标准化地震数目 n_m 和水位 w_m

Fig. 5 (a) Standardized number of earthquakes n_s and water level w_s after filtering; (b) Standardized number

of earthquakes n_m and water level w_m in month

与 n_s 和 w_s 互相关系数的结果一致，进一步确认了延迟时间为37天是可靠的。

$$\frac{P}{P_0} = \exp\left(-h \sqrt{\frac{\omega}{2D}}\right) \exp\left[i\omega\left(t - \frac{h}{\sqrt{2\omega D}}\right)\right]. \quad (2)$$

式(2)表明扩散方程在周期性的边界条件下, 其解可表示为一个振幅衰减的平面波, 衰减系数为 $\sqrt{\omega/2D}$, 波速为 $\sqrt{2\omega D}$. 指数项 $\exp(-h \sqrt{\omega/2D})$ 描述了孔隙压力振幅随深度 h 的衰减, 而谐波项 $\exp[i\omega(t-h/\sqrt{2\omega D})]$ 描述了孔隙压力作为时间 t 与深度 h 的函数周期性变化的规律, 两者均与扩散系数 D 相关. 在某一深度岩石已处于破裂的临界应力状态, 孔隙压力扰动前锋传播至此触发地震, 则应满足 $t-h/\sqrt{2\omega D}=0$, 整理得

$$D = \frac{h^2}{2\omega t^2}, \quad (3)$$

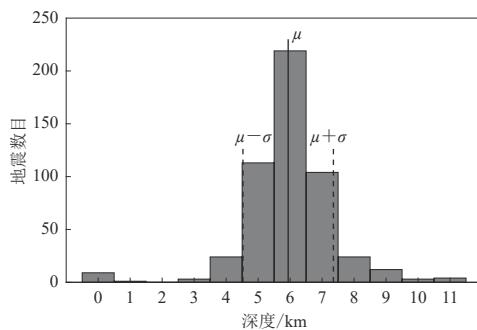


图 6 地震的深度-频次分布

Fig. 6 Depth-frequency distribution of the earthquakes

式中, $t=37$ d 为延迟时间, h 取趋肤深度 (Saar, Manga, 2003) 或者地震分布的优势深度 (Telesca, 2010; Telesca *et al.*, 2015), 本文取后者. 图 6 给出了库区地震的深度分布图, 可见深度主要集中在 5—7 km, 均值 μ 为 5.94 km, 标准偏差 σ 为 1.44 km. 将 ω , t 和 h 的值代入式(3), 可得 $D=(8.66\pm 4.11)$ m²/s, 其中, 不确定度由地震深度分布的一倍标准偏差确定.

在自由扩散模式下, 基于扩散方程在周期性边界条件下的解和库区地震平均深度得到的龙滩水库孔隙压力扩散系数 $D=(8.66\pm 4.11)$ m²/s, 处于 0.1—10 m²/s 的合理范围内 (Talwani, Acree, 1984). 然而, 该结果与刘耀炜等 (2011) 基于水压致裂中使用的单点触发模型采用抛物线包络拟合方法所得到的龙滩库区蓄水初期的孔隙压力扩散系数 (0.04—0.65 m²/s) 差异较大. 我们认为差异可能源于以下三方面. 其一, 根据地质资料 (广西壮族自治区地质局, 1972; 潘建雄, 1989), 龙滩库区以泥盆系一二叠系碳酸盐岩建造为主, 岩溶、裂隙发育程度较高, 渗透性较好, 受地震定位精度的影响, 加之抛物线包络拟合具有一定的主观性, 刘耀炜等 (2011) 估算的值可能偏低. 其二, 刘耀炜等 (2011) 是在水位快速上升阶段, 假定孔隙压力边界条件为阶跃函数得到的结果; 而本文结果是在蓄水完成六年以后, 基于水位总体稳定仅有周年扰动变化得到的结果, 不同时段库区的介质状态不一样, 因而扩散系数也不一样. 其三, 自由扩散忽略孔隙压力与应力的耦合, 模式过于简单.

3.2 基于耦合模式的扩散系数估算

虽然自由扩散模式下得到的孔隙压力扩散系数在合理范围内, 但物理上孔隙压力与应力是耦合的, 自由扩散模式仍过于简化. 根据 Biot (1941) 的固结理论, Roeloffs (1988) 得到了周期性边界条件下一维孔隙压力与应力耦合模式扩散方程:

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial^2}{\partial h^2} \frac{P}{P_0} + \frac{i\omega}{D} = \frac{i\omega P}{\alpha DP_0}, \quad (4)$$

式中, $\alpha=B(1+\nu_u)/[3(1-\nu_u)]$, B 为 Skempton 系数, ν_u 为无排水条件下孔隙介质的泊松比. 式(4)的解为

$$\frac{P}{P_0} = (1-\alpha) \exp\left[-(1+i) \sqrt{\frac{\omega}{2D}} h\right] + \alpha. \quad (5)$$

式(5)表明深度 h 处的孔隙压力除了与扩散率 D 和角频率 ω 有关, 还与系数 α 有关, α 为解耦模式与无排水响应模式的加权平均。当 $\alpha=0$ 时, 式(5)与式(2)等价, 对应于孔隙压力与应力解耦的模式; 当 $\alpha=1$ 时, 对应于无排水响应模式。

式(5)中, 对于给定 $\sqrt{\omega/2D}h$, 相位仅与 α 相关, 可以通过相位的变化分析时间的超前与滞后, 相位正代表时间的超前, 相位负对应着时间的滞后, 最小值对应着最大延迟时间。图 7 给出了 $\alpha=0, 0.05, 0.30, 0.70, 1.00$ 时, 孔隙压力及相位与 $\sqrt{\omega/2D}h$ 的关系, 可见在相同的 $\sqrt{\omega/2D}h$ 情况下, α 越大, 孔隙压力越大, 延迟时间越小。已知延迟时间为 37 d, 通过搜索相位的最小值求得对应的 $\alpha=0.219$, 对应的 $\sqrt{\omega/2D}h=1.43$, $\omega=2\pi/T$, 周期 T 取 1 a, h 取地震的平均深度, 可得扩散系数 $D=(1.72 \pm 0.82) \text{ m}^2/\text{s}$ 。可见, 是否考虑孔隙压力扩散与应力耦合, 估算出来的扩散系数差异较大。这种差异可以由延迟时间直观地判断, 当延迟时间较大(接近 180 d)时, 是否考虑孔隙压力扩散与应力的耦合对估算 D 影响不大; 当延迟时间较小(远小于 180 d)时, 是否考虑孔隙压力与应力的耦合则可能对估算 D 有一定影响。由 $\sqrt{\omega/2D}h=1.43$ 得到对应的 $P/P_0=0.307$, 根据图 1, 龙滩水库水位年变化在 330—370 m 之间, 水位变化 $\Delta z=40 \text{ m}$, 则 $P_0=\rho g \Delta z/2$, 其中 ρ 为水的密度, 取 1000 kg/m^3 , g 为重力加速度, 取 9.8 N/kg , 则 $P=60 \text{ kPa}$, 孔隙压力的年变化为 120 kPa 。假定岩石强度的降低完全由孔隙压力的变化引起, 120 kPa 的孔隙压力增加会导致近 100 kPa 的库仑应力变化, 在临界状态下足以触发地震(Hardebeck *et al.*, 1998; Stein, 1999)。

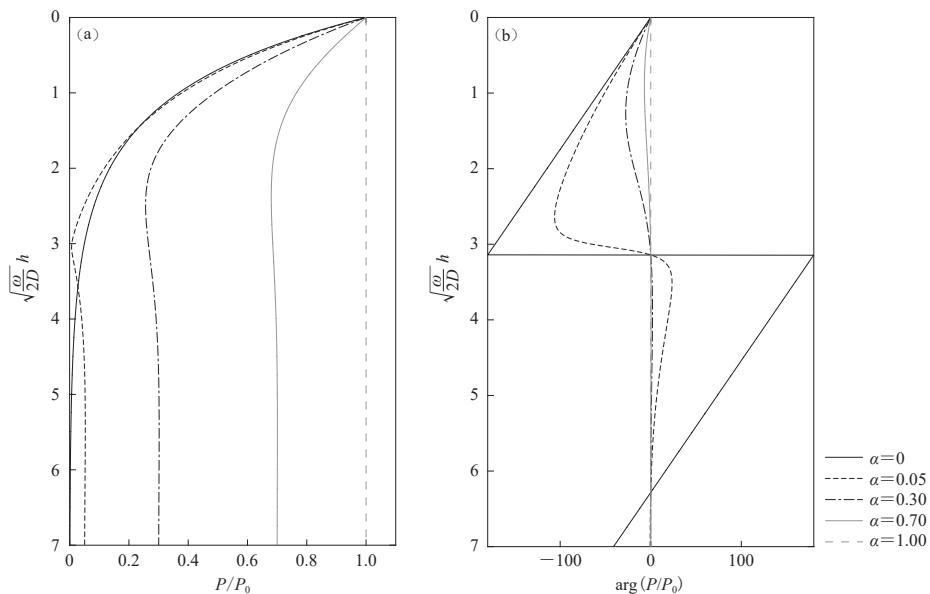


图 7 α 取不同值时孔隙压力幅值(a)及相位(b)随 $\sqrt{\omega/2D}h$ 变化

Fig. 7 Variation of the magnitude (a) and phase (b) of pore pressure as a function of $\sqrt{\omega/2D}h$ for different α

4 讨论与结论

通过对龙滩水库的水位与地震数目的互相关分析, 得到了地震活动相对于水位的延迟时间为 37 天。与一些蓄水多年的水库(Talwani, Acree, 1984; Ferreira *et al.*, 1995; Telesca, 2010)相比, 37 天的延迟时间是一个较小的值, 由于孔隙压力扩散范围正比于延迟时间

(Talwani, Acree, 1984; 龚钢延, 谢原定, 1991), 这暗示库水的影响主要局限于库区较小的范围内, 这与库区地震精定位的结果(阎春恒等, 2015, 2020)一致。由于水库地震震源深度较浅, 通常 $M3$ 以上地震均会有震感, 引发社会舆论, 对人们的生活生产造成影响, 地震活动强度相对于水位峰值 37 天的延迟时间为相关部门制定震情跟踪、舆情应对等预案提供了时间节点信息。

在不考虑孔隙压力扩散与应力耦合的情况下, 基于周期性边界条件下孔隙压力扩散方程的解和库区地震的深度分布, 利用 37 天的延迟时间得到扩散系数 $D=(8.66\pm4.11)\text{ m}^2/\text{s}$; 在考虑孔隙压力扩散与应力耦合的情况下, 得到扩散系数 $D=(1.72\pm0.82)\text{ m}^2/\text{s}$, 两者均处于合理的范围内。数值上, 基于孔隙压力与应力耦合模式得到的扩散系数与刘耀炜等(2011)的结果比较接近, 也与近年来部分学者(Saar, Manga, 2003; Telesca, 2010; Telesca et al, 2015)利用地震活动与水位变化的互相关分析得到的其它库区的扩散系数接近, 但由于这些研究大多采用了自由扩散的假定, 因此无法说明 $D=(1.72\pm0.82)\text{ m}^2/\text{s}$ 比 $D=(8.66\pm4.11)\text{ m}^2/\text{s}$ 更为合理。从物理上以及近年来对断裂带的孔隙压力扩散系数原位测量的结果(Doan et al, 2006; Xue et al, 2016)来看支持孔隙压力扩散系数取较小的值, 这可能说明对龙滩水库而言, 孔隙压力扩散与应力耦合是现阶段诱发地震的主要因素。

参 考 文 献

- 陈翰林, 赵翠萍, 修济刚, 陈章立. 2009a. 龙滩水库地震精定位及活动特征研究 [J]. 地球物理学报, 52(8): 2035–2043.
- Chen H L, Zhao C P, Xiu J G, Chen Z L. 2009a. Study on precise location of Longtan reservoir earthquake and its seismic activity[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 52(8): 2035–2043 (in Chinese).
- 陈翰林, 赵翠萍, 修济刚, 陈章立. 2009b. 龙滩库区水库地震震源机制及应力场特征 [J]. 地震地质, 31(4): 686–698.
- Chen H L, Zhao C P, Xiu J G, Chen Z L. 2009b. Study on the characteristics of focal mechanisms of reservoir induced earthquakes and stress field in the Longtan reservoir area[J]. *Seismology and Geology*, 31(4): 686–698 (in Chinese).
- 陈颙. 2009. 汶川地震是由水库蓄水引起的吗? [J]. 中国科学: 地球科学, 39(3): 257–259.
- Chen Y. 2009. Did the reservoir impoundment trigger the Wenchuan earthquake? [J]. *Science in China: Series D*, 52(4): 431–433.
- 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.
- Gong G Y, Xie Y D. 1991. Research on the diffusion of pore fluid and in-situ hydraulic diffusivity in the epicentral region of Xin-fengjiang reservoir earthquakes[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 13(3): 364–371 (in Chinese).
- 广西壮族自治区地质局. 1972. 乐业幅地质图 [CM]. 北京: 地质出版社: 1.
- Geology Bureau of Guangxi Zhuang Autonomous Region. 1972. *Leye Geological Map*[CM]. Beijing: Geological Publishing House: 1 (in Chinese).
- 郭培兰, 姚宏, 袁媛. 2006. 龙滩水库地震危险性分析 [J]. *高原地震*, 18(4): 17–23.
- Guo P L, Yao H, Yuan Y. 2006. Analysis on potential seismic risk in Longtan reservoir[J]. *Earthquake Research in Plateau*, 18(4): 17–23 (in Chinese).
- 蒋海昆, 张晓东, 单新建. 2014. 中国大陆水库地震统计特征及预测方法研究 [M]. 北京: 地震出版社: 3–5.
- Jiang H K, Zhang X D, Shan X J. 2014. *Study on the Statistical Characteristics of Reservoir-Induced Earthquakes and Prediction Methods in China Mainland*[M]. Beijing: Seismological Press: 3–5 (in Chinese).
- 刘鑫, 鲍长春. 2014. 基于替代数据检测的音频信号非线性分析 [J]. *数据采集与处理*, 29(2): 243–247.
- Liu X, Bao C C. 2014. Nonlinear analysis of audio signals using surrogate data test[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 29(2): 243–247 (in Chinese).
- 刘耀炜, 许丽卿, 杨多兴. 2011. 龙滩水库诱发地震的孔隙压力扩散特征 [J]. 地球物理学报, 54(4): 1028–1037.
- Liu Y W, Xu L Q, Yang D X. 2011. Pore pressure diffusion characteristics of Longtan reservoir-induced-earthquake[J]. *Chinese*

- Journal of Geophysics*, **54**(4): 1028–1037 (in Chinese).
- 潘建雄. 1989. 红水河龙滩水库诱发地震地质条件的探讨[J]. 地震地质, **11**(4): 91–99.
- Pan J X. 1989. The geological environment for induced earthquake in Longtan reservoir of Hongshui river[J]. *Seismology and Geology*, **11**(4): 91–99 (in Chinese).
- 阎春恒, 周斌, 陆丽娟, 孙学军, 文翔. 2015. 龙滩水库蓄水后库区中小地震的震源机制[J]. *地球物理学报*, **58**(11): 4207–4222.
- Yan C H, Zhou B, Lu L J, Sun X J, Wen X. 2015. Focal mechanisms of moderate and small earthquakes occurred after reservoir recharger in the Longtan reservoir region[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **58**(11): 4207–4222 (in Chinese).
- 阎春恒, 周斌, 李莎, 向巍, 郭培兰. 2020. 利用小震分布和区域应力场确定龙滩库区地震断层面参数[J]. 地震地质, **42**(3): 562–580.
- Yan C H, Zhou B, Li S, Xiang W, Guo P L. 2020. Determination of fault plane parameters in the Longtan reservoir by using precisely located small earthquakes data and regional stress field[J]. *Seismology and Geology*, **42**(3): 562–580 (in Chinese).
- 叶庆东, 阎春恒, 王生文, 毛远凤, 余大新, 闫琳琳. 2018. 广西龙滩水库地壳 Q_s 二维成像[J]. 地震学报, **40**(6): 689–700.
- Ye Q D, Yan C H, Wang S W, Mao Y F, Yu D X, Yan L L. 2018. Crustal 2-D Q_s tomography in Longtan reservoir, Guangxi region[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **40**(6): 689–700 (in Chinese).
- 詹艳, 王立凤, 王继军, 肖骑彬, 莫青云. 2012. 广西龙滩库区深部孕震结构大地电磁探测研究[J]. *地球物理学报*, **55**(4): 1400–1410.
- Zhan Y, Wang L F, Wang J J, Xiao Q B, Mo Q Y. 2012. Electromagnetic survey of the seismogenic structures beneath the Longtan reservoir in Guangxi Province[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **55**(4): 1400–1410 (in Chinese).
- 周斌, 孙峰, 阎春恒, 薛世峰, 史水平. 2014. 龙滩水库诱发地震三维孔隙弹性有限元数值模拟[J]. 地球物理学报, **57**(9): 2846–2868.
- Zhou B, Sun F, Yan C H, Xue S F, Shi S P. 2014. 3D-pore elastics finite element numerical simulation of Longtan reservoir-induced seismicity[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **57**(9): 2846–2868 (in Chinese).
- Biot M A. 1941. General theory of three-dimensional consolidation[J]. *J App Phys*, **12**(2): 155–164.
- Christiansen L B, Hurwitz S, Saar M O, Ingebritsen S E, Hsieh P A. 2005. Seasonal seismicity at western United States volcanic centers[J]. *Earth Planet Sci Lett*, **240**(2): 307–321.
- Doan M L, Brodsky E E, Kano Y, Ma K F. 2006. In situ measurement of the hydraulic diffusivity of the active Chelunpu fault, Taiwan[J]. *Geophys Res Lett*, **33**(16): L16317.
- Ferreira J M, De Oliveira R T, Assumpção M, Moreira J A M, Pearce R G, Takeya M K. 1995. Correlation of seismicity and water level in the Açu reservoir: An example from Northeast Brazil[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **85**(5): 1483–1489.
- Hardebeck J L, Nazareth J J, Hauksson E. 1998. The static stress change triggering model: Constraints from two southern California aftershock sequences[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **103**(B10): 24427–24437.
- Little M A, McSharry P E, Moroz I M, Roberts S J. 2006. Testing the assumptions of linear prediction analysis in normal vowels[J]. *J Acousti Soc Am*, **119**(1): 549–558.
- Nur A, Booker J R. 1972. Aftershocks caused by pore fluid flow? [J]. *Science*, **175**(4024): 885–887.
- Roeloffs E A. 1988. Fault stability change induced beneath a reservoir with cyclic variations in water level[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **93**(B3): 2107–2124.
- Roeloffs E. 1996. Poroelastic techniques in the study of earthquake-related hydrological phenomena[J]. *Adv Geophys*, **37**: 135–195.
- Saar M O, Manga M. 2003. Seismicity induced by seasonal groundwater recharge at Mt. Hood, Oregon[J]. *Earth Planet Sci Lett*, **214**(3/4): 605–618.
- Stein R S. 1999. The role of stress transfer in earthquake occurrence[J]. *Nature*, **402**(6762): 605–609.
- Talwani P, Acree S. 1984. Pore pressure diffusion and the mechanism of reservoir-induced seismicity[J]. *Pure Appl Geophys*, **122**(6): 947–965.

- Telesca L. 2010. Analysis of the cross-correlation between seismicity and water Level in the Koyna area of India[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **100**(5A): 2317–2321.
- Telesca L, ElShafey Fat ElBary R, El-Ela Amin Mohamed A, ElGabry M. 2012. Analysis of the cross-correlation between seismicity and water level in the Aswan area (Egypt) from 1982 to 2010[J]. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, **12**(7): 2203–2207.
- Telesca L, do Nascimento A F, Bezerra F H R, Ferreira J M. 2015. Analysis of the cross-correlation between water level and seismicity at Açu reservoir (Brazil)[J]. *Tectonophysics*, **658**: 151–158.
- Telesca L, Kadirov F, Yetirmishli G, Safarov R, Babayev G, Islamova S, Kazimova S. 2020. Analysis of the relationship between water level temporal changes and seismicity in the Mingechevir reservoir (Azerbaijan)[J]. *J Seismol*, **24**(7): 937–952.
- Turcotte D L, Schubert G. 2002. *Geodynamics*[M]. 2nd edition. Cambridge: Cambridge University Press: 271–282.
- Wiemer S, Wyss M. 2000. Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: Examples from Alaska, the western United States, and Japan[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **90**(4): 859–869.
- Xue L, Brodsky E E, Erskine J, Fulton P M, Carter R. 2016. A permeability and compliance contrast measured hydrogeologically on the San Andreas fault[J]. *Geochem Geophys Geosyst*, **17**(3): 858–871.