第30卷增刊(Ⅰ)
2010年8月

大地测量与地球动力学
JOURNAL OF GEODESY AND GEODYNAMICS

Vol. 30 Supp. (Ⅰ)
Aug. ,2010

文章编号:1671-5942(2010)Supp.(Ⅰ)-0017-06

库水载荷对水库触发地震的机制研究*

王秋月　朱守彪
(中国地震局地壳应力研究所,北京　100085)

摘　要　利用有限元方法,研究库水载荷产生的应力场及其在断层面上引起的静态库仑破裂应力变化。通过计算发现,库水载荷的加载位置对地震的触发作用有重要的影响:当库水加载于断层正上方或断层上盘时,对正断层型的地震有促进作用,对逆断层型的地震有抑制作用。但是,当库水载荷作用于断层的下盘时,对于倾角较大的正断层与逆断层地震,库水都起抑制作用;而对倾角很小的断层起促进作用,但不会产生很强的水库地震。

关键词　水库地震;有限元;库水载荷;静态库仑应力变化;断层
中图分类号:P315.72⁺8　　**文献标识码**:A

STUDY ON TRIGGERING MECHANISM OF RESERVOIR EARTHQUAKE BY WATER IMPOUNDMENT

Wang Qiuyue and Zhu Shoubiao
(*Institute of Crustal Dynamics*, *CEA*, *Beijing*　100085)

Abstract　Using finite element method. The stresse field and the static Coulomb failure stress changes was calculated. The calculated results show that the location of the water impoundment plays an important role in triggering reservoir earthquake. When the reservoir water is loaded right over the fault and on the hanging wall of the fault, it will promote the earthquakes for normal faults and inhibit the seismicity for thrust faults. However, the earthquakes will all be inhibited both for normal and thrust faults with high dip angles when the load of reservoir water is located on the footwall of the faults. No strong reservoir-induced earthquakes will occur despite the load of water will promote the earthquake for the faults with small dip angles when the load is put on the footwall of the faults.

Key words: reservoir-induced earthquake; finite element model; load of reservoir water; static Coulomb failure stress change; fault

1　引言

水库在造福人类的同时,也改变了周边环境,甚至诱发地震。自从 Carder[1] 在 1945 年指出人工水库蓄水可能诱发地震以来,水库触发地震已经在全球范围内被发现[2]。1962 年中国的新丰江,1963 年赞比亚和津巴布韦边界处的 Kariba,1966 年希腊的 Kremasta,1967 年印度的 Koyna 都发生过由于水库运行诱发的震级超过 6 级的中强地震。其中,Koyna 大坝建成后,从 1962 年开始蓄水,地震就开始不断发生,并且频度大,强度高,1967 年的 Koyna 地震达到 6.3 级,是截至目前为止最强烈也是危害最严重

* **收稿日期**:2010-02-23
基金项目:国家自然科学基金(40974020,40774024);北京市自然科学基金(8082024);地震动力学国家重点实验室基金(LED2008B02)
作者简介:王秋月,女,1982 年生,硕士,主要从事地下流体及地球动力学研究. E-mail: wangqiuyue09@sina.com

的水库诱发地震,致使约 200 人丧生,1 500 人受伤,数以千计的人无家可归[2]。

此后,水库诱发地震得到普遍关注,国内外许多学者对水库诱发地震的特征及机制进行了研究[1-10],通过大量震例分析认为水库诱发地震的主要原因是:库水载荷作用,孔隙压变化,水对岩体及断层的腐蚀、软化、润滑作用等。实际上,水库地震发生的机制非常复杂,不同的水库,由于其库盆的构造应力环境、水文地质条件、岩石及断层性质等的差异,影响地震发生的主要因素不同,并且随着时间不断变化。如在蓄水初期,库水载荷可能起主要作用;但随着水位变化、水在岩石裂隙中的不断渗流,孔隙压的改变对诱发地震可能起着决定性作用。

由于水库诱发地震的机制十分复杂,为突出主要问题,本文只讨论库水载荷的触发作用。

不少学者利用有限元方法,计算了库水载荷所产生的应力场分布及其对地震的触发[11-14],他们的研究成果对认识水库触发地震的机理起到一定的积极作用。但由于库区及周边地区初始应力状态不为所知,利用计算的应力来分析断层的运动状态,进而推测地震风险往往遇到很多困难。

数十年来,利用断层面上的库仑破裂应力变化(ΔCFS)来分析地震危险性已成为国际地震学研究的热点[15-19],并成功地运用于许多地震活动性的研究之中。本文将尝试利用有限单元分析方法,计算库水的应力场及其在断层面上产生的库仑破裂应力变化,由此来探索库水载荷触发地震的规律。

2 库水产生的应力场及位移场

2.1 有限元模型及边界条件

考虑一个狭长型水库,假定水库水面宽为 20 km,断层走向与库体方向一致,现取库体中的一横截面来进行研究。为尽量减小边界效应对计算结果的影响,文中建立的有限元模型比实际的尺寸要大得多。图 1 为有限元模型的几何形状、网格剖分及边界条件分布图。图中模型的长取 200 km,深为 100 km,水载荷范围为 20 km(图中上方黑色箭头所示),水头取 50 m;模型中共有三角形单元 2 808 个,节点 1 476 个;介质的杨氏模量取 4.0×10^{10} Pa,泊松比为 0.25。

模型的边界条件选取如下:水载荷作用在上表面 20 km 的范围内(载荷大小为 50 m 水深产生的压力),上表面其他地方自由;底面的垂向位移为零,水平方向自由;两侧边界的水平方向位移为零,垂向自由。计算中采用平面应变的力学模型。

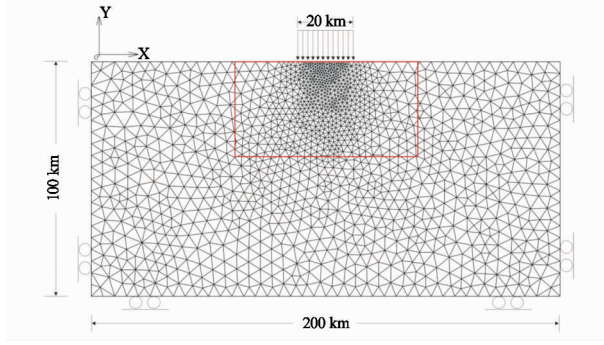


图 1 有限元模型及网格划分

Fig. 1 Finite element model and its grid separating

2.2 载荷应力场及位移场

图 2 是库水载荷产生的应力场分量的等值线分布图。图 2(a)是水平向应力(σ_x)的等值线分布,由图 2(a)可见,水平向应力主要集中在库水作用的范围,且其深度影响范围很小(主要在深度小于15

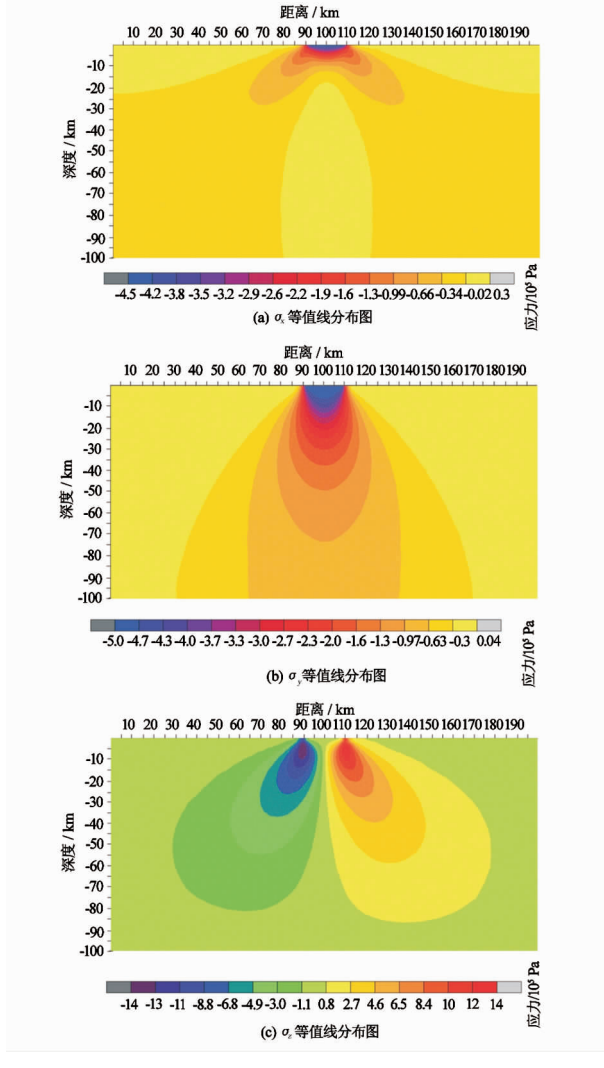


图 2 库水载荷产生的应力场等值线分布图

Fig. 2 Contours of stress field caused by the load of reservoir water

km 的范围内)。图 2(b)为垂直方向应力(σ_y)等值线分布图,图 2(b)显示,垂向应力影响的深度比水平向大得多。图 2(c)为剪应力(τ_{xy})等值线分布图,由图 2(c)可见,剪应力基本呈对称分布。

图 3 为库水载荷产生的位移场等值线分布图。图 3 显示,库水产生的位移场为对称分布,在库水作用中心最大,最大值约 0.5 m。但在水平向及垂向迅速衰减,当超过库水作用距离约 60 km 后,无论水平向还是垂向其位移都趋向于零。

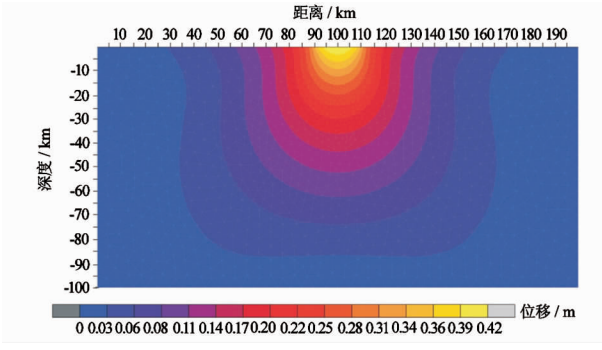


图 3　库水载荷产生的位移场等值线分布图

Fig. 3　Contours of displacements caused by the load of reservoir water

3　断层面上库仑破裂应力变化

3.1　库仑破裂应力变化

通过有限元数值计算得到库水载荷产生的应力场后,地下任意一点的应力状态变化也就唯一确定。由此就可以计算具有任一倾角断层面上的正应力与剪应力变化,进而计算此断层面上的库仑破裂应力变化。设断层面的倾角为 θ,则其上变化的正应力与剪应力分别为[20]:

$$\begin{cases}\Delta\sigma = \sin^2\theta\sigma_x + 2\sin\theta\cos\theta\tau_{xy} + \cos^2\theta\sigma_y \\ \Delta\tau = \sin\theta\cos\theta(\sigma_x - \sigma_y) + (\sin^2\theta - \cos^2\theta)\tau_{xy}\end{cases} \quad (1)$$

其中,σ_x、σ_y、τ_{xy}分别为 x、y 向及剪应力分量。根据库仑定律,区域内某一断层面上沿滑动方向的库仑破裂应力变化(ΔCFS)可以写成[15,21,22]:

$$\Delta CFS = \Delta\tau + \mu(\Delta\sigma + \Delta p) \quad (2)$$

其中,Δp 是孔隙压变化。通过一些假定与简化处理,式(2)可以进一步简化为[21-24]:

$$\Delta CFS = \Delta\tau + \mu'\Delta\sigma \quad (3)$$

上式中 μ' 为视摩擦系数,本文计算中其值取为 0.4[21-23]。

3.2　断层面上的库仑应力变化

若断层面上的库仑破裂应力变化为正时,库水将促进断层滑动,容易产生地震;库仑破裂应力变化为负值时,库水会抑制地震的发生。为了研究库仑应力变化与加载位置、断层类型、断层位置的关系,文中让断层类型、断层倾角发生变化,分 6 种情况进行研究。这 6 种情况分别是:1)水库位于正断层正上方;2)水库位于逆断层正上方;3)水库位于正断层上盘;4)水库位于逆断层上盘;5)水库位于正断层下盘;6)水库位于逆断层下盘。下面将计算在每种情况下,当断层倾角分别取 53°、45°、37°、25°、14°时,分别研究断层面上的库仑破裂应力变化分布情况(图 4 ~6 中,从左向右,断层倾角的变化均相同,下文同)。

图 4 表示水库位于断层正上方时,断层面上的库仑破裂应力变化分布。图 4 中方框尺度为长度 60 km,深度为 50 km(即图 1 中方框表示的地区);图 4 上方 5 幅图表示的是第 1)种情况,即断层为正断层,其中图 4(a) ~ (e)分别对应断层倾角为 53°、

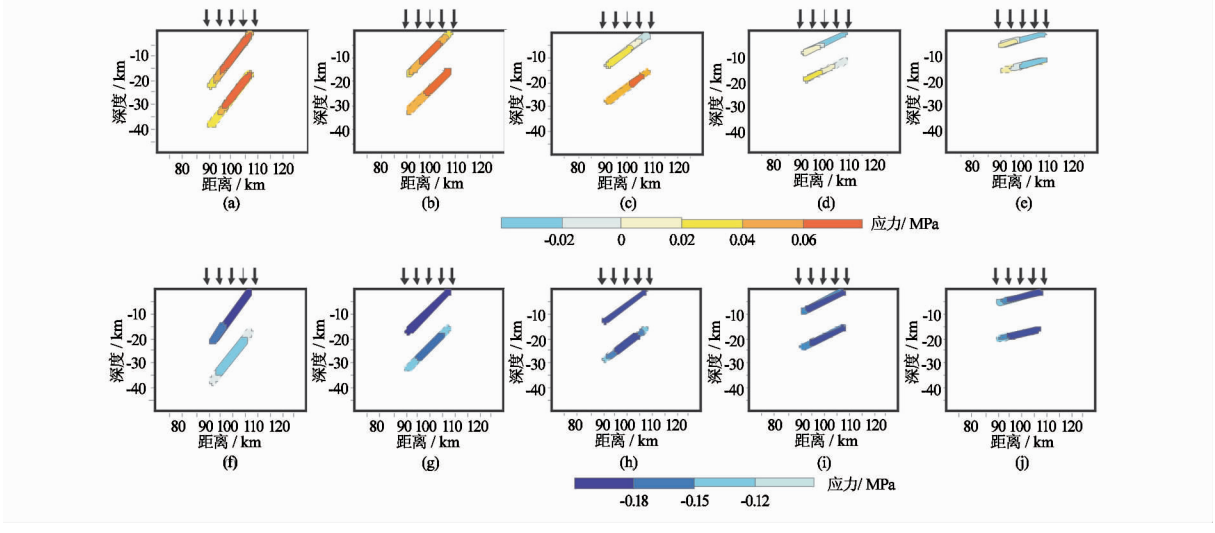


图 4　水库位于断层正上方时,断层面上的库仑破裂应力变化分布

Fig. 4　Static Coulomb stress changes on the specified receiver faults when the reservoir locates right over the faults

45°、37°、25°、14°的情况;下方 5 幅图表示第 2)种情况,即断层为逆断层。

图 4 清楚地显示,对于正断层,库水载荷产生的库仑破裂应力变化基本上都是正值,即库水对正断层型的地震有触发作用,但当断层深度很浅、倾角很小时,触发作用不明显。对于逆冲型断层,图 4 结果显示,库水对地震的发生全是抑制作用。若某一地区,库区本底地震机制为逆冲型,在水库蓄水后,库水作用会使该地区的地震的活动性降低。

图 5 显示的是水库位于正断层上盘与水库位于逆断层上盘的情况。由图 5(a)~(e)可知,当库水作用于正断层上盘时,位于库岸的正断层面上的库仑应力变化大于零,即库水有促使地震发生的作用,但随着倾角的减小、距离库岸距离的变远,触发能力越来越弱。图 5(f)~(i)是库水作用于逆断层上盘的情况,由图 5(f)~(i)可见,对于深度小于 ~15 km 的逆断层,其断层面的库仑应力变化小于零,即库水对地震有抑制作用,但当断层深度大于 15 km 后,库水对库岸的逆断层型地震有促进作用。同时由图 5(f)~(i)还可以看出,对于库岸的逆断层,不管倾角如何,只要深度较浅,库水对其都有抑制作用。由此可见,当库水作用于断层上盘时,库岸很难发生震源深度较小的逆断层型地震。

图 6 显示的是库水作用于断层下盘的情况。6(a)~(e)表示正断层的情况,6(f)~(i)表示逆断层情况。由图 6(a)~(e)可见,当断层倾角较大时,库水载荷无论对正断层还是逆断层有抑制作用。但随着断层倾角的减小,库水载荷对地震作用的性质会发生变化,由抑制向促进转变;当倾角小到一定程度后,会促进地震的发生,但这时发生的地震,其震

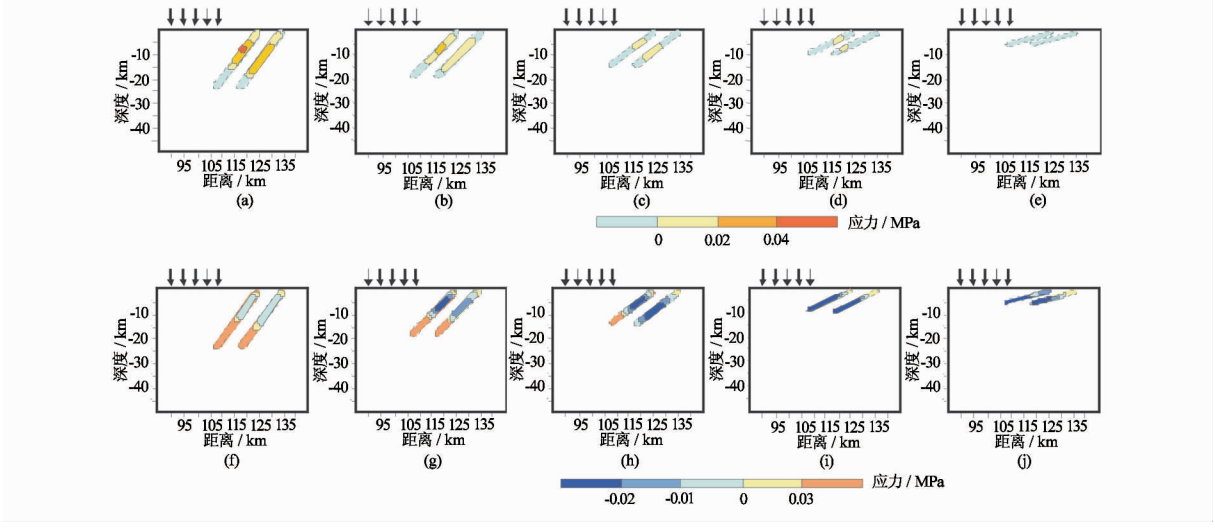


图 5 水库位于断层上盘时,断层面上的库仑破裂应力变化

Fig. 5 Static Coulomb stress changes on faults when the reservoir locates on the hanging wall

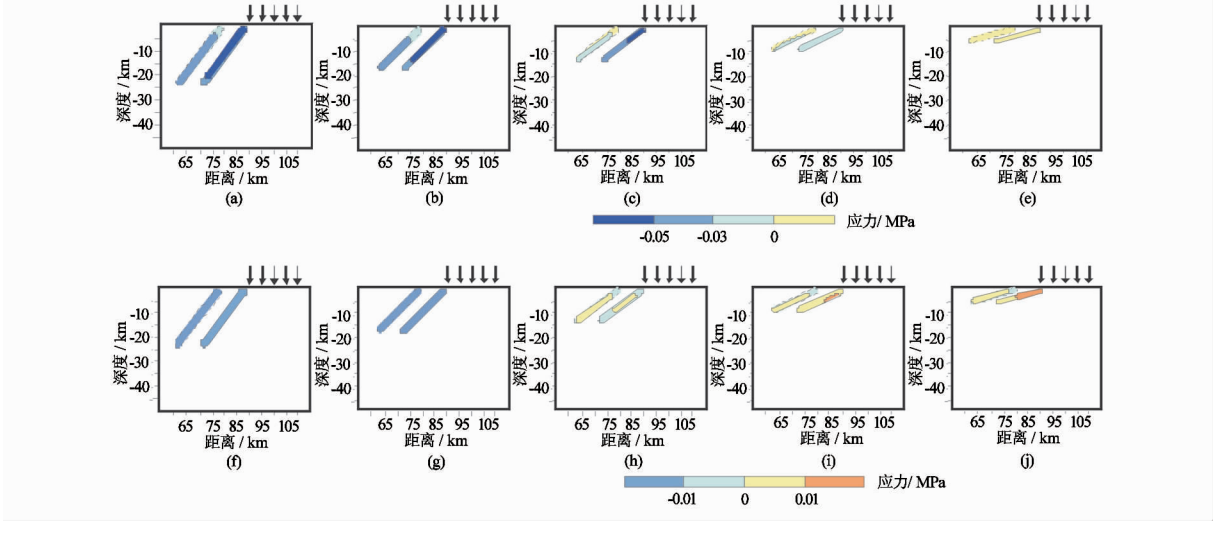


图 6 库水位于断层下盘时,断层面上库仑破裂应力的变化

Fig. 6 Static Coulomb stress changes for specified receiver fault when the reservoir locates on the footwall

源深度会很小,因此地震的震级也会很小。由此可知,当库水作用在断层下盘时,不可能触发震级很高的地震。

4　讨论与结论

利用有限元方法,计算了库水载荷产生的应力场、位移场及其对水库下方及库岸断层中地震的触发作用。从计算的结果看,库水产生的库仑应力变化最大值可达 0.06 MPa,这大大超过了典型静态应力触发的阈值 0.01 MPa[21-24]。由此可知,库水对地震的触发是有效的,这就是我们能够观测到大量的快速响应性水库触发地震的主要原因(如前苏联塔吉克斯坦的 Nurek 水库地震)[25]。文中的水头取为 50m, 实际上在蓄水初期,库水在断层面产生的库仑应力变化有可能超过断层破裂极限,形成地震[2, 26];随着水库蓄水水位的不断升高,库水产生的库仑破裂应力变化不断增大,可能会触发更多、更大的地震。但也有不少水库蓄水水位很高,但没有触发地震的情况,这可能是当地构造应力场还远离断层失稳极限。因此库水能否触发地震一方面与库水产生的库仑应力变化有关,同时还取决于当地的构造应力状态。

从计算结果看,库水载荷不仅对水库底部的断层有触发作用,对库岸断层也有影响,所以我们看到很多水库地震不仅发生在库底,而且也发生在库岸[4-10]。

从图 4 ~ 6 可知,一般情况下,库水对正断层型的地震有触发作用,因此正断层型的水库地震较多。如:1963 年的卡里巴地震,1966 年的科列马斯塔地震,1975 年的奥洛维尔地震等都为正断层型地震[28];王墩等[29]结合我国长江三峡地区发生水库地震的具体情况,选取长江三峡数字遥测台记录的水库 2000—2006 年蓄水后的波形数据,得到水库重点监视区内库区震源机制解和库岸小震综合节面解。计算结果显示:库区 25 次水库地震震源机制解除两次情况为无解外,断层性质多为正断层,其次为走滑型断层,仅有 3 次为逆断层情况,P 轴仰角较大,P 轴方位、T 轴方位、水平最大主压应力方向均杂乱无章;巴东库段沿江 5 km 范围内 $1 \leqslant M_L \leqslant 2.4$ 小震综合节面解显示库岸地震机制 80% 为正断层,其余为其他情况。这表明文中的计算结果与实际情况较为一致,对实际地震的分析预测有着现实意义。

库水对逆断层型地震起抑制作用。但对库岸逆断层型的地震,当深度达到一定范围时也有触发作用。

当库水在断层下盘加载时,无论对正断层还是逆断层都起到抑制地震发生的作用。但是当断层倾角很小时,库水载荷对地震发生也有促进作用。通常这种情况下产生的水库地震,震级不会太大。因此,我们在建造水库时,若断层无法回避,尽量让库水加载于断层下盘,也有利于避免库水触发地震。这对于大型水库建设有重要的参考价值,希望引起有关方面的重视。

此外,文中没有讨论库水载荷对走滑型断层的影响,从力学分析来看,库水载荷不会对走滑型地震产生影响[30]。因此,我们看到的走滑型水库地震不是库水载荷触发的,而是由于库水的渗流、软化、孔隙压的变化等诱发产生的。作者正在进行这方面的深入研究。

水库水位、断层的性质及其位置与库水载荷触发地震的关系非常复杂。能否根据这一现象,选择合适的地区,建立一座中型水库,作为水库地震研究的实验室。通过人为调节水位(升高或降低及水位变化的速率),人为地控制地震的发生(强度、数量、地点)来深入研究水库触发地震及地震预测问题,为成功实现地震预报寻找突破口。

综合文中的结果,我们得出以下几点初步认识:

1) 库水载荷可以改变水库底部及库岸的应力场,并导致断层面上的库仑破裂应力变化,从而触发地震。

2)一般来说,库水载荷对正断层型地震有触发作用,对逆断层型地震起抑制作用;但对库岸深度较深的逆断层也有触发作用。

3)当库水载荷作用于断层的下盘时,无论是正断层还是逆断层地震,都起抑制作用。

参　考　文　献

1　Carder D S. Seismic investigations in Boulder dam area, 1940 - 1944, and the influence of reservoir loading on earthquake activity[J]. Bull. Seis. Soc. Am., 1945, (35):175 - 192.

2　Gupta and Harsh K. A review of recent studies of triggered earthquakes by artificial water reservoirs with special emphasis on earthquakes in Koyna, India[J]. Earth - Science Reviews, 2002,(58): 279 - 310.

3　Grouph D I and Gouph W I. Load - induced earthquakes at Lake Kariba[J]. Geophys. J., 1970,21:79 - 101.

4　王妙月,等. 新丰江水库地震的震源机制及其成因的初步探讨[J]. 中国科学, 1976, 1: 85 - 97.

5　Roeloffs E A. Fault stability changes induced beneath a reservoir with cyclic variations in water level[J]. J. Geophys. Res., 1988, 93 (B3):2 107 - 2 124.

(下转第 25 页)