



## 论文

## 新丰江水库地震孔隙弹性耦合有限元模拟

程惠红<sup>①②</sup>, 张怀<sup>①②</sup>, 朱伯靖<sup>①②</sup>, 孙玉军<sup>①②④</sup>, 郑亮<sup>①②</sup>, 杨少华<sup>①②</sup>, 石耀霖<sup>①②③\*</sup>

① 中国科学院计算地球动力学重点实验室, 北京 100049;

② 中国科学院研究生院地球科学学院, 北京 100049;

③ 地震动力学国家重点实验室, 北京 100029;

④ 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081

\* 联系人, E-mail: shiy1@gucas.ac.cn

收稿日期: 2011-05-04; 接受日期: 2012-02-20

地震动力学国家重点实验室开放基金(编号: LED2010B01)、国土资源部行业基金(编号: SinoProbe-07)、国家重点基础研究发展计划(编号: 2008CB425701)和国家高技术研究发展计划(编号: 2010AA012402)资助

**摘要** 1962年新丰江水库 $M_s6.1$ 级地震是公认的水库诱发地震, 对该水库蓄水造成的库仑应力变化进行量化估算, 有助于对多大量级的库仑应力可以触发水库地震的这一基础性科学问题的了解. 从这一角度出发, 建立了新丰江水库三维孔隙弹性耦合模型, 应用有限单元法计算水库蓄水引起库区应力场、孔隙压力场、断层上库仑应力的动态变化响应和蓄水累积的应变能. 数值模拟结果表明: 新丰江水库蓄水引起库区和其周围断层上库仑应力增大0.7~3.0 kPa, 量值大小依赖于扩散系数; 其中水体荷载部分引起的库仑应力变化小于0.5 kPa, 孔隙压力扩散占主导因素; 新丰江水库蓄水引起地面最大垂直形变量为-17.5 mm, 与实测数据非常接近; 水库蓄水累积应变能为 $7.3 \times 10^{11}$  J, 小于 $M_s6.1$ 地震波释放能量1%, 表明地震释放的主要是构造应变能, 水库蓄水仅起触发作用.

**关键词**新丰江水库  
水库地震  
孔隙弹性耦合  
库仑应力  
有限元模拟

自20世纪40年代Carder<sup>[1]</sup>首先提出Boulder水库库区蓄水与地震存在着一定关系后, 许多学者对水库诱发地震(RIS)进行了深入研究, 并取得了众多成果. 在定性方面, 统计研究表明水库地震与库区地质环境和水库坝高、库容有密切关系<sup>[2-14]</sup>; 在定量方面, 通过分析研究水库荷载(重力、孔隙压力等)对库区应力场影响<sup>[7,15-19]</sup>, 计算水库蓄水/放水对断层和震源处应力场的变化, 研究水库蓄水与地震触发的关系. 基于Biot多孔介质经典理论, Bell和Nur<sup>[15]</sup>计算了二维半无限空间水库孔压和应力, 发现岩石渗透率和水位变化在RIS中起着重要作用; Talwani和Acree<sup>[16,17]</sup>通过对South Carolina水库详细调查认为孔隙压力扩散

是RIS的主要原因; Roeloffs<sup>[18]</sup>和Simpson等<sup>[19]</sup>发现水库地震活动、孔隙压力增加与水位变化频率和幅度紧密相关; 前人研究显示: 最深水库水体荷载产生表面负荷在2 MPa左右<sup>[2]</sup>, 当达到震源深度时, 量级很小, 不足以直接引起RIS, 水体孔隙压力扩散是主要因素<sup>[20]</sup>; 2008年汶川地震以后, 紫坪铺水库(蓄水/放水)是否与大地震发生有关成为众多研究者比较有争论的一个问题. 一些学者从震源深度、震级等分析, 得出紫坪铺水库的条件不符合水库诱发地震的基本特征<sup>[21]</sup>. 而有些学者通过定性计算认为紫坪铺水库具备了触发地震发生的条件. 马文涛等<sup>[22]</sup>据紫坪铺水库地震台资料, 应用双差法方法研究了汶川

地震前震、主震和余震, 得出紫坪铺水库与汶川地震发生有密切关联. 雷兴林等<sup>[23,24]</sup>通过二维解析计算得出紫坪铺水库蓄水对龙门山中央断层和山前断层有明显的的作用, 在震源深度处库仓应力变化有几个千帕, 触发了地震的发生. Ge 等<sup>[25]</sup>建立二维数值模型, 分别计算了紫坪铺水库水体静态荷载和孔隙压力扩散情况下的库仓应力变化, 得出紫坪铺水库使得汶川地震提前 10~100 年到来. 此后, 张贝和石耀霖<sup>[26]</sup>、周斌等<sup>[27]</sup>、Gahalaut 和 Gahalaut<sup>[28]</sup>、Zhu 等<sup>[29,30]</sup>分别从三维解析解、数值模拟等方法求解紫坪铺蓄水/放水情况下的库仓应力变化. 那么, 多大的库仓应力变化可以触发地震是一个值得研究和探索的问题.

新丰江水库于 1959 年 10 月开始蓄水, 之后频繁出现了地震活动, 在蓄水近 2 年半后, 于 1962 年 3 月 19 日发生了  $M_s 6.1$  级地震, 该地震被确定为水库诱发地震, 且是世界上为数不多的 6.0 级以上水库诱发地震之一, 得到国内外学者的普遍认可. 地震发生后, 众多学者对新丰江水库库区的地质环境做了大量的调查和研究. 沈崇刚等<sup>[31]</sup>从库区地质条件、蓄水对构造应力场的影响分析, 得出震源机制与构造应力场具有一定的对应性, 地震活动主要沿着峡谷区水域边缘多裂隙花岗岩体中的“软弱带”分布. 王妙月等<sup>[32]</sup>根据水准测量和地震波资料确定了主震的断层参数、断层面以及发震应力方向, 认为水的渗透作用是诱发  $M_s 6.1$  地震的主要原因. 丁原章<sup>[33]</sup>系统地分析研究了新丰江水库区域地质条件、库区地震活动、库区地壳形变等方面. 此后, 沈立英等<sup>[34]</sup>重点研究了水库蓄水渗流、孔隙流体扩散对新丰江水库地震的影响. 魏柏林<sup>[35]</sup>结合震源应力场与构造应力场探讨了新丰江水库蓄水诱发地震发生的三个作用. 陈益明<sup>[36]</sup>和龚鸿庆<sup>[37]</sup>研究了新丰江水库的小震震源机制和成因. Chen 和 Talwani<sup>[38]</sup>研究分析了中国水库诱发地震的特点, 并应用三维各向同性非耦合解研究分析了新丰江水库地震的特点.

由于受到当时计算机水平限制, 前人建立的模型比较简单, 没有考虑到复杂的地形条件、水库水位随时间的变化、地层非均匀性等情况, 本文基于前人的研究, 应用有限元数值计算方法, 采用 SRTM 90 m 高程数据, 建立新丰江水库三维孔隙弹性耦合模型. 重点分析新丰江水库蓄水前后震源、断层和震源深度上的库仓应力变化, 并从能量的角度来分析新丰江水库蓄水产生的应变能, 以便更好的了解水库蓄水

应力触发地震问题.

## 1 研究方法

19 世纪, 人们发现在潮汐和重荷载等因素影响下, 井水水位会发生波动<sup>[39]</sup>. 20 世纪初, Terzaghi<sup>[7]</sup>分析研究了固体和流体之间的相互影响的关系, 并提出了有效应力的原理. 此后, Biot<sup>[40,41]</sup>推导了在小应变情况下各向同性介质在水压作用下的一般控制方程以及三维各向异性多孔介质固结方程. Rice 和 Cleary<sup>[42]</sup>据 Biot 理论推导出孔隙弹性耦合方程式, 并提出了不同数值模型研究 RIS. Patrick 和 Franklin<sup>[43]</sup>推导了一维流体排水和不排水情况下的瞬变孔隙压力响应方程和三维孔隙弹性介质在固结作用下的变形问题. Herbert<sup>[39]</sup>系统地介绍了线性孔隙弹性介质的参数、控制方程以及在地质力学和水文地质上的应用.

### 1.1 动力学模型

本文矢量的正负全部遵循弹性力学中的定义, 即张应力为正, 压应力为负; 孔隙压力增加为正. 水库库区岩体为多孔连续介质, 应用 Biot<sup>[40]</sup>理论, 孔隙弹性耦合模型可采用以下方程:

连续方程:

$$\nabla \cdot u = 0; \quad (1)$$

几何方程:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}); \quad (2)$$

平衡方程:

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + f_i = 0; \quad (3)$$

本构方程:

$$\sigma_{ij} = 2G\varepsilon_{ij} + \frac{\nu}{1+\nu}\sigma_{kk}\delta_{ij} - \frac{3(\nu_u - \nu)}{B(1+\nu)(1+\nu_u)}p\delta_{ij}; \quad (4)$$

其中,

$$B = \frac{1/K - 1/K_s}{\nu_0(1/K_f - 1/K) + (1/K - 1/K_s)}, \quad (5)$$

$$\nu_u = \frac{3\nu + B(1-2\nu)(1-K/K_s)}{3-B(1-2\nu)(1-K/K_s)}, \quad (6)$$

$$\sigma_{kk} = 3K\varepsilon_{kk}. \quad (7)$$

$\sigma_{ij}$ ,  $\varepsilon_{ij}$ ,  $u_{ij}$ ,  $p$ ,  $K$ ,  $G$ ,  $\delta_{ij}$ ,  $\nu_0$ ,  $K_f$ ,  $K_s$  分别代表应力张量、应变张量、位移、孔隙压力、饱和岩体排水体积模量、

剪切模量、Kröneckner 符号、流体容积率、流体体积模量和固体颗粒体积模量. 耦合方程描述了水库蓄/放水荷载造成孔隙弹性介质中总应力、固体骨架有效应力和流体孔隙压力随时间的变化.

渗流扩散方程:

$$\nabla \cdot \left( \frac{k}{\eta} \nabla p \right) - \frac{9(v_u - v)(1 - v_u)}{2GB^2(1 - v)(1 + v_u)^2} \frac{\partial p}{\partial t} = 0, \quad (8)$$

其中,  $k, \eta, v, v_u, B$  分别代表岩体渗透率, 流体粘滞系数, 泊松比, 非排水泊松比及 Skempton 系数. 若  $k$  和  $\eta$  不变, 扩散方程则可表达为

$$\frac{\partial p}{\partial t} = c \nabla^2 p, \quad (9)$$

其中,  $c$  为扩散系数(单位  $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ):

$$c = \frac{k}{\eta} \left[ \frac{2G(1 - v)}{(1 - 2v)} \right] \left[ \frac{B^2(1 - 2v)(1 + v_u)^2}{9(v_u - v)(1 - v_u)} \right]. \quad (10)$$

设水库蓄水前构造应力场  $\sigma_{ij}^0$ , 蓄水后应力场变化了  $\Delta\sigma_{ij}$ , 由震源机制解可得到发震断层几何参数(走向、倾角和滑动角), 则可求出断层面法向量( $n_1, n_2, n_3$ )及水库蓄水引起正应力和剪应力变化量:

$$\Delta\sigma_n = \Delta\sigma_{ij} n_j n_i, \quad (11)$$

$$\Delta\tau = \Delta\sigma_{ij} n_j s_i, \quad (12)$$

其中,  $\Delta\sigma_n$  是断层面上正应力变化,  $\Delta\tau$  是断层面上沿滑动方向剪应力变化, 经张量计算可以求出蓄水/放水造成断面上的库仑应力变化  $\Delta CFS$ <sup>[44]</sup>, 其表达式为

$$\Delta CFS = \Delta\tau + \mu(\Delta\sigma_n + \Delta p), \quad (13)$$

其中,  $\Delta p$  是孔隙压力变化,  $\mu$  为断层面内摩擦系数. 库仑应力考虑了正应力、剪应力和孔隙压力变化的力学效应. 由公式(13)可以得出: 如断面上的库仑应力变化为正值, 表明断层滑动危险性增大; 反之, 库仑应力变化为负值, 则表明断层趋于稳定, 更加安全. 之所以引入库仑应力概念, 主要是因为人们对于地下岩石受到的应力场缺乏实测了解, 不能确定哪里应力已经临近破裂. 通过库仑应力计算, 可以了解哪些地方、哪种走向倾角和哪种性质的断层相对变得更危险或更安全. 库仑应力增加最大的地方, 如果原来应力水平较低, 未必就是未来发生地震的地方; 库仑应力增加虽然不太大, 但是原来应力水平已经很高, 则也可能是未来的震源. 但是, 水的化学效应, 例如水可以使断层弱化、强度减低, 由于目前还缺乏摩擦系数变化  $\Delta\mu$  与水的定量关系表达式, 在数值模拟中还不能纳入.

## 1.2 新丰江水库模型

新丰江水库位于加里东褶皱区, 坝址岩石为燕山期侏罗-白垩纪的花岗岩, 周围有泥盆系、石炭系和白垩系出露. 库区及其周围区域的断裂构造比较发育, 如图 1, 主要有三组: 北北东向断裂、北北西断裂和北东东向断裂<sup>[33]</sup>. 北北西向和北东东向断裂是库区最重要的两组断裂. 北北西向断裂主要是石角-新港-白田断裂, 倾角较陡, 中段被库水淹没, 且多处切割北北东向断裂. 北北东向断裂规模较大, 以逆断层为特征, 主要有河源断裂、人字石断裂、大坪-岩前断裂. 北东东向断裂主要在水库峡谷区两侧, 以陡倾角为主, 地表并不明显, 在地壳深部是库区最主要的构造断裂<sup>[45]</sup>.

根据现有资料, 选取研究区范围为:  $114.5^\circ \sim 115.5^\circ \text{E}$ ,  $23.5^\circ \sim 24.5^\circ \text{N}$ , 深度由地表到地下 25 km, 采用 SRTM 90 m 高程数据(<http://dds.cr.usgs.gov/srtm/>), 建立起三维模型, 如图 2(a), 深度方向划分了 27 子层, 整个模型节点总数 514360, 单元总数 979938. 对于模型中断层处理, 如图 2(b), 河源断裂倾向南东东, 倾角  $45^\circ$  左右; 人字石断裂倾向南东, 倾角  $60^\circ$  左右; 大坪-岩前断裂倾向南东, 倾角  $70^\circ$  左右; 石角-新港-白田断裂前向南西西, 倾角  $65^\circ$ ; 深部断裂垂直, 倾角为  $90^\circ$ . 据参考文献[33], 选取浅部断裂深度自地表至地下 10 km; 深部断裂深度为 0.5~15 km. 本文采用三

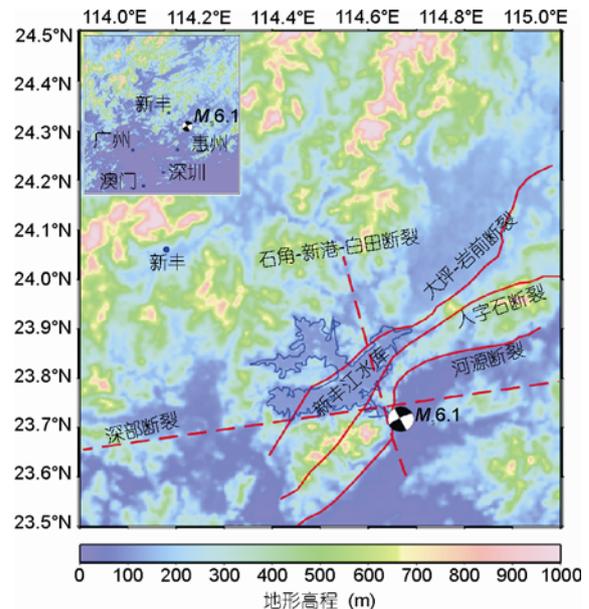


图 1 新丰江水库及其周围断层分布情况

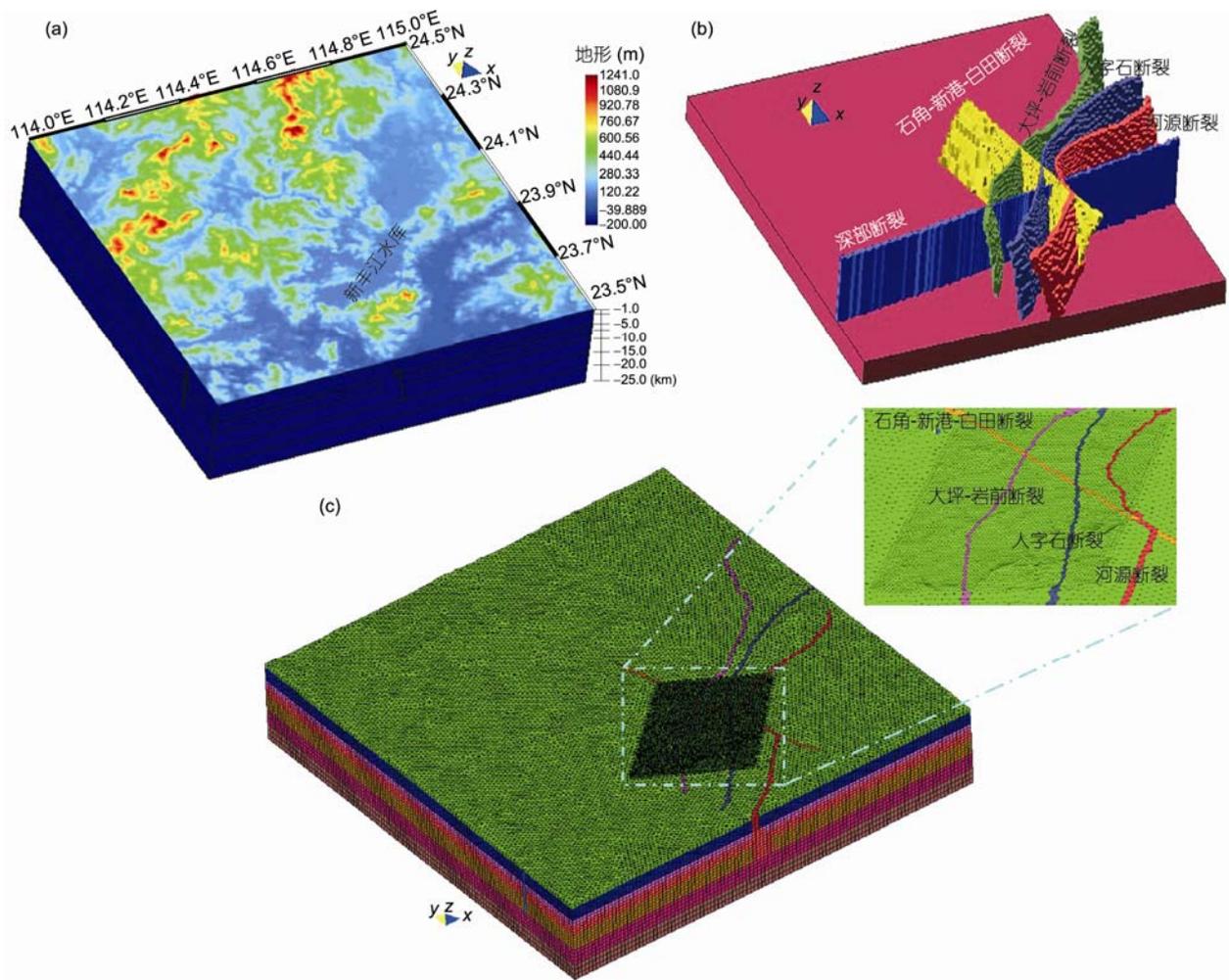


图2 新丰江水库三维有限元计算模型

(a) 新丰江水库三维模型和地形; (b) 新丰江库区断层模型; (c) 三维模型有限元模型网格

棱柱单元划分网格, 并对新丰江水库库区进行了网格加密, 约为周围网格的 1/5, 如图 2(c).

### 1.3 模型参数选择

在孔隙弹性问题中非均匀介质水力参数与孔隙压力扩散密切相关, 其中扩散系数(渗透率)是最重要的一个参数. 对于水库地震扩散系数(渗透率)的选取众多学者有不同的建议. 龚钢延和谢原定<sup>[46,47]</sup>通过实验研究得出完整花岗岩渗透率  $1.8 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ , 破裂花岗岩的渗透率  $1.8 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ . Talwani<sup>[17]</sup>认为 RIS 的渗透率范围在  $10^{-16} \sim 10^{-14} \text{ m}^2$ . 谢原定<sup>[48]</sup>室内实测新丰江水库区完整花岗岩的渗透率为  $10^{-6}$  达西( $10^{-18} \text{ m}^2$ ), 含破裂面的花岗岩的渗透率为  $10^{-3}$  达西( $10^{-15}$

$\text{m}^2$ ). 沈立英等<sup>[34]</sup>研究新丰江水库地震中花岗岩的渗透率采用  $10^{-14} \text{ m}^2$ . Talwani<sup>[17]</sup>据水库蓄水后地震活动面积与地震活动滞后时间关系得出了“地震”扩散系数概念, 其大小在  $1 \sim 10 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  之间. 龚钢延和谢原定<sup>[47]</sup>利用新丰江水库蓄水后  $M_s \geq 2.0$  的地震资料得出在主震前主震区“地震”扩散系数为  $6.2 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ . 参考已有的研究结果, 本次计算中选取不同的扩散系数, 建立五个模型对比. 前三个模型选取基底岩层的渗透系数  $10^{-15} \text{ m}^2$ , 断层的渗透系数分别选取  $10^{-14}$  和  $2 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ , 水库库基岩层分别选取渗透系数  $5 \times 10^{-15}$  和  $10^{-15} \text{ m}^2$ , 由公式(10)求得扩散系数; 后两个模型选取文献中“地震”扩散系数. 其他物理参数参照文献[34], 见表 1 和 2.

表1 计算模型所采用的参数值<sup>[34]</sup>

岩层	厚度(km)	$E$ (Pa)	$\nu$	$\nu_u$	$B$
沉积层和白垩纪岩层	0.5	$4.5 \times 10^{10}$	0.22	0.24	0.8
库基(花岗岩)	6.5	$5.0 \times 10^{10}$	0.22	0.24	0.8
基底	18.0	$7.0 \times 10^{10}$	0.25	0.30	0.9
断层(NNW, NE)	地表至地下 10 km	$4.0 \times 10^{10}$	0.22	0.24	0.8
深部断层	地下 0.5 至地下 15 km	$4.0 \times 10^{10}$	0.22	0.24	0.8

表2 不同模型采用的扩散系数(单位:  $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ )

岩层	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4	模型 5
沉积层和白垩纪岩层	0.2	0.2	0.98	6.2	0.62
库基(花岗岩)	0.176	0.176	0.88	6.2	0.62
基底	0.16	0.16	0.16	6.2	0.62
断层(NNW, NE)	1.4	2.8	1.4	6.2	6.2
深部断层	1.4	2.83	1.4	6.2	6.2

### 1.4 边界条件设置

对孔隙弹性耦合方程组, 需要采取合理的边界条件求解才能准确地描述水库地震的机制. 弹性问题位移场边界条件的设定为: 模型底边界、侧边界法向位移为 0, 切向剪应力为 0, 即可自由滑动; 上表面为自由表面, 在水库蓄水时, 各蓄水单元正应力为每一时间步长水体重力产生的压应力. 孔隙压力场初始条件假定处于水饱和且静水压力平衡状态, 侧边界和底边界渗流梯度均为 0; 模型上边界孔隙压给定 0, 水库蓄水单元按水体重力载荷给定. 图 3 为某一时刻的孔隙压力.

耦合模型的迭代求解格式为: 先求解渗流扩散方程, 再求解固体介质弹性变形方程, 在一个时间步反复迭代至收敛.

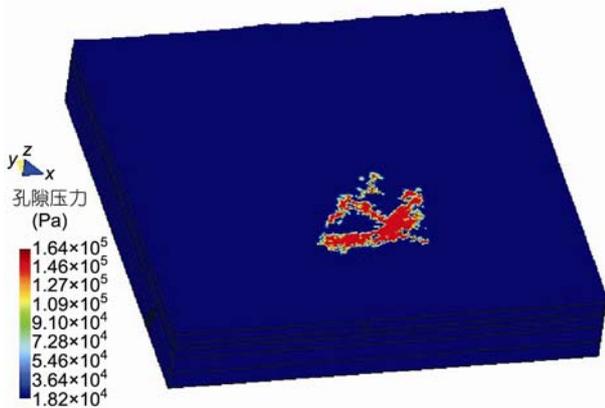


图3 某一时刻的孔隙压力

## 2 计算结果和分析

### 2.1 震源处随时间的变化情况分析

新丰江水库蓄水后, 地震活动开始频繁, 且随着水位上升, 地震活动逐步增强. 表 3 为王妙月等<sup>[32]</sup>给出的新丰江  $M_s 6.1$  级地震震源参数, 断层为北北西节面, 断层错动以走滑为主.

图 4 给出随着水库蓄水位变化震源处孔隙压力、库仑应力变化结果. 可以看出, 随着蓄水位升高, 孔隙压力和库仑应力均呈增大趋势. 图 4(b)显示了新丰江水库蓄水后孔隙压力随时间的变化, 可以看出, 库区孔隙压力扩散过程缓慢, 可能是由于库区下方的高密度低渗透基底阻挡了水体下渗, 导致断层面上孔隙压力增大. 对比 5 个模型结果, 可以得出岩体和断层的扩散系数(渗透率)对孔隙压扩散影响很大. 当选取断层渗透系数  $1.0 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ , 岩层渗透系数  $5.0 \times 10^{-15} \text{ m}^2$  时, 主震前孔隙压力值约为 1.8 kPa; 而当岩体的渗透率降低 5 倍时, 震源处的孔隙压力减小到不足 0.4 kPa. 新丰江库区处在一个 NNW 向为挤压, NNE 向受拉张, 中间应力轴近于直立的构造应力场. 在水库蓄水过程中, 单纯地表水体荷载引起的弹性附加应力场对断层的稳定性影响较小, 由图 4(c)可以看出, 当不考虑孔隙压力值时, 在 5 个模型中由水库水体弹性荷载引起的  $\Delta CFS$  是一样的, 地震发生前约为 0.5 kPa. 图 4(d)为考虑孔隙压力值时, 震源处  $\Delta CFS$  的变化情况. 可以看出, 在  $M_s 6.1$  主震前, 5 个模型震源处的  $\Delta CFS$  变化范围在 0.7~3.0 kPa. 对比图

表 3 新丰江  $M_s 6.1$  级地震震源参数<sup>[32]</sup>

发震时间	震中烈度	震源深度	地震矩( $10^{-5}$ N cm)		震中位置			
					北纬	东经	地点	
1962年3月19 4时18分	VIII	5 km	$1.5 \times 10^{25}$		23°43'	114°40'	大坝东北 1.1 km	
断层走向	倾向	倾角	滑动角	应力降	断层长度	破裂速度	错距	破裂方向
N28°W	SW	88°	10°	$9 \times 10^5$ Pa	19 km	$1.4 \text{ km s}^{-1}$	14.5 cm	SSE-NNW

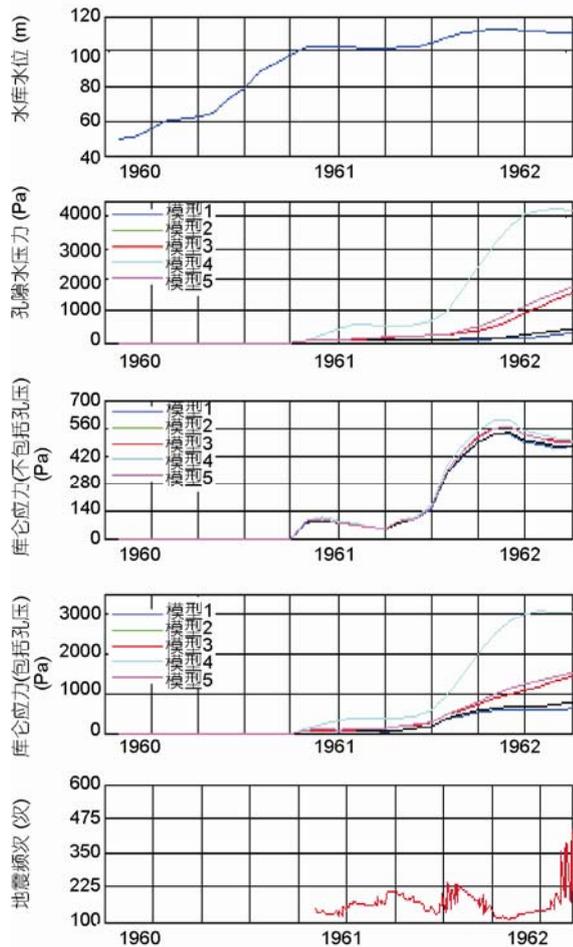


图 4 震源处孔隙压力、库仑应力与新丰江水库水位变化曲线

(a) 新丰江水库水位变化; (b) 震源处孔隙压力变化; (c) 震源处不考虑孔隙压力时库仑应力变化; (d) 震源处考虑孔隙压力时库仑应力变化; (e) 水库库区地震频度(日均值, 据参考文献[33])

4(c)和(d), 当扩散系数较大时, 水库水体荷载对 $\Delta CFS$ 影响相对很小, 孔隙压力扩散是占主导作用的.

## 2.2 震源深度不同蓄水时间段应力变化

新丰江水库 1961 年上半年水位略降低, 地震活动减少, 9 月水位达到最高, 之后地震活动猛增<sup>[37]</sup>,

据此, 本文选取模型 2 在 1961 年 2, 10 月和 1962 年 3 月三个特定时刻, 震源深度处的孔隙压力、库仑应力、正应力和剪切应力随着时间变化情况.

图 5 为新丰江水库库区不同蓄水时刻震源深度处孔隙压力分布, 可以得出, 孔隙压力随着时间不断地变大, 在水库库区周围逐渐形成一个高孔隙压力区. 由于存在着河源断裂、大坪-岩前、人字石断裂和石角-新港-白田断裂带的影响, 在水库的东南部孔隙压力扩散比较快; 在水库的西北部、北部地区的孔隙压力扩散相对较慢. 同时, 可以看出, 1961 年 2 月水库库区地孔隙压力比较低, 即使在水库中心下方的孔隙压力值不超过 2.5 kPa, 而 1962 年 3 月孔隙压力增加到 23.9 kPa. 对比震源处孔隙压力在这两个阶段增大率为 0.94 和 2.79 kPa/月, 1961 年 2 月至 1961 年 10 月份的水位略降期间, 孔隙压力扩散较 1961 年 10 月至 1962 年 3 月期间慢很多.

通过有限元方法可以得出每个节点的应力矢量 $\sigma_{ij}$ , 因此, 根据  $M_s 6.1$  主震错动断层的走向、倾角和滑动角, 选取断层面上的摩擦系数为 0.6, 由公式(11), (12)和(13)可以计算出震源深度处该类走向、倾角断层上的正应力、剪应力和库仑应力值. 图 6 为新丰江水库库区不同蓄水时刻震源深度处正应力、剪应力分布图. 结果显示, 新丰江水库蓄水对库区岩体产生一个压应力场, 在水库正下方的压应力值最大. 三个时刻水库中心下方正应力值分别为 -0.93, -9.9 和 -9.2 kPa, 剪应力值分别为 0.15, 0.82 和 0.75 kPa. 在 1961 年 9 月水位达到最高时, 压应力和剪应力较主震前略大. 水库蓄水产生的压力场同孔隙压力场的大小和变化幅度相比较要小很多, 这也说明了水库蓄水水体荷载对水库地震的影响相对小, 孔隙压力扩散是触发新丰江水库地震发生的主要因素.

图 7 为新丰江水库库区不同蓄水时刻震源深度处的库仑应力分布图. 可以看出, 随着水库蓄水水位增加, 水库周围库仑应力有着明显的变化. 整体上, 1961 年 2 月震源深度处的库仑应力在 1.0 kPa 附近; 1961 年 10 月水库库区西南地区的库仑应力是负值,

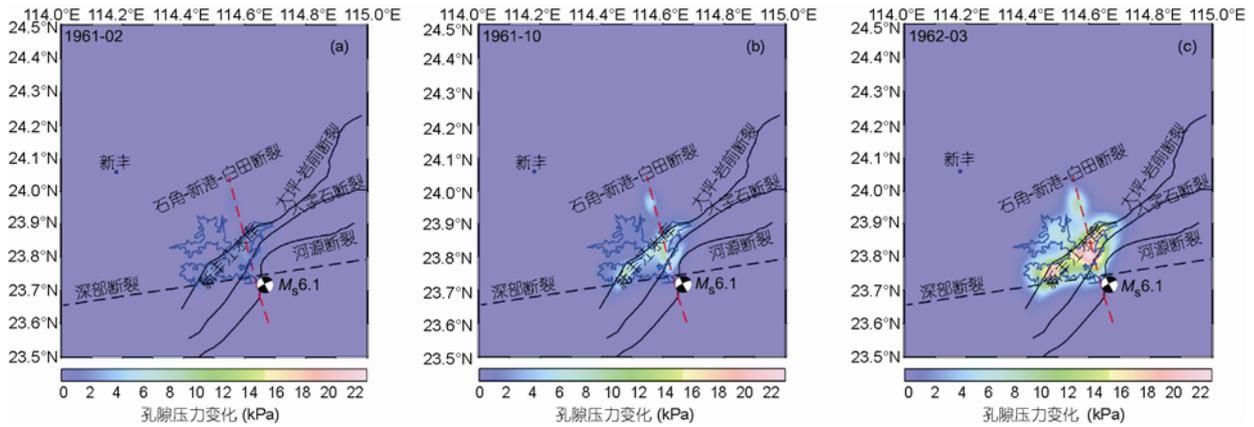


图5 新丰江水库不同蓄水时刻震源深度处孔隙压力分布图

(a) 1961年2月震源深度处孔隙压力分布; (b) 1961年10月震源深度处孔隙压力分布; (c) 1962年3月震源深度处孔隙压力分布

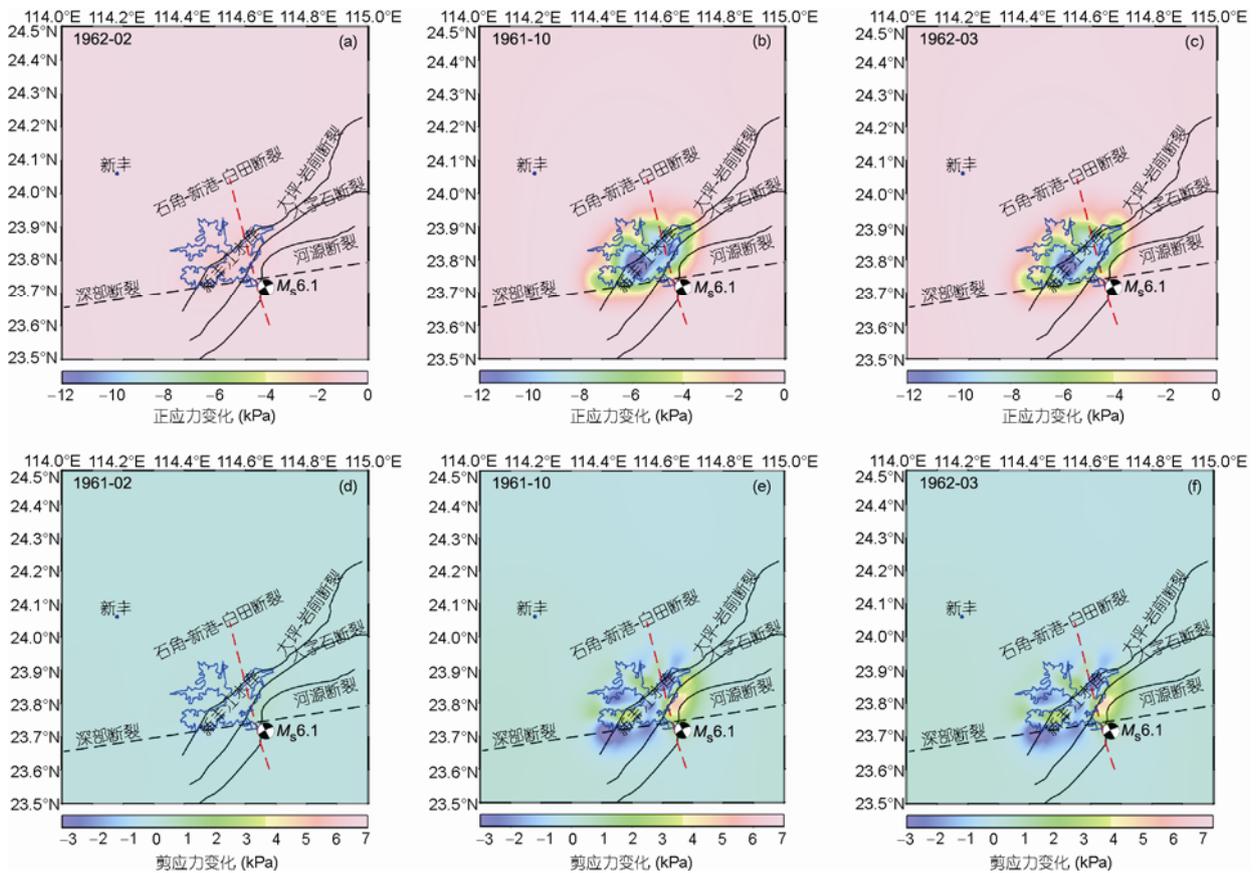


图6 新丰江水库库区不同蓄水时刻震源深度处正应力、剪应力分布

(a) 1961年2月震源深度处正应力分布; (b) 1961年10月震源深度处正应力分布; (c) 1962年3月震源深度处正应力分布; (d) 1961年2月震源深度处剪应力分布; (e) 1961年10月震源深度处剪应力分布; (f) 1962年10月震源深度处剪应力分布

在库区的东北地方库仑应力为正值; 而在主震时刻 (1962年3月)时水库的北部、东部、南部、西北部地

区均为正值, 仅在库区西部的小部分区域为负值, 并库仑应力值大于5.0 kPa以上的地区呈现出北西方向。

水库坝址和其下游附近地区的库仑应力值最大. 据参考文献资料<sup>[20,21]</sup>此区是水库区内地震活动最强的地区, 90%以上的地震活动发生在此区, 水库蓄水与地震活动具有一定相关性.

### 2.3 主震前各个断层 $\Delta CFS$ 的变化

水库库区的断裂、裂隙等构造是库水渗流和孔隙压力扩散的重要通道. 新丰江水库区主要存在着三组断裂, 上述主要针对发震断层参数研究库仑应力变化, 同样也可以计算各个断层(各不同走向、倾角)上的库仑应力变化. 据文献[33]新丰江  $M_s6.1$  震源机制解主压应力轴方位  $N73^\circ W$ , 主张应力方位  $N17^\circ E$ , 可以得出利于各个断层破裂时的滑动方向矢量. 从而, 我们可以由公式(11)~(13)求出各个断层在主震前的  $\Delta CFS$ . 河源断裂中间靠近水库部位走向与其他部位相差较大, 且对震源影响较大, 因此, 将该断裂分为三段进行计算, 其余断裂视其各个部位走向一致. 本文选取模型 2, 计算各个断层在  $M_s6.1$  地震前库仑应力变化. 表 4 给出计算各个断层上  $\Delta CFS$  时的断裂参数, 选取摩擦系数均为 0.6.

图 8 给出了主震前新丰江库区各个断层的  $\Delta CFS$ ,

可以看出: 河源断裂上  $\Delta CFS$  在  $-3.5 \sim 2.7$  kPa, 该断裂在地表接近震源处(II段)的  $\Delta CFS$  为最大, 按照 II 段的走向、倾角和滑动角计算, 在  $M_s6.1$  地震发生前震源深度处的  $\Delta CFS$  约为 0.7 kPa; 人字石断裂上  $\Delta CFS$  变化较大, 整体上  $\Delta CFS$  处在 8.5 kPa, 在水库东南部位  $\Delta CFS$  达到了最大值; 大坪-岩前断裂的东北段上的  $\Delta CFS$  为负值, 但是在穿越水库西岸部分  $\Delta CFS$  出现了 0.6 MPa; 北北东上断裂  $\Delta CFS$  变化不是很大, 在水库周边上断裂  $\Delta CFS$  值较大. 石角-新港-白田断裂上  $\Delta CFS$  值较大, 在  $M_s6.1$  震源处的断裂段上  $\Delta CFS$  为 0.6 MPa. 深部断裂上  $\Delta CFS$  变化相对较小, 只是在水库附近的断裂上  $\Delta CFS$  为正值.

结果显示, 水库蓄水对不同走向倾角的断层、或者走向倾角相同处于水库不同方位和距离的断层上,  $\Delta CFS$  是不同的, 有些会增加、有些会减小, 变化的幅度也不同, 最大可达数百 kPa. 但  $\Delta CFS$  较大的区域, 大多集中于离水库 7 km 范围内. 然而, 新丰江水库  $M_s6.1$  地震震源并不是在  $\Delta CFS$  值最大的地方. 说明了地震的发生与构造应力场和岩体强度密切相关. 在应力集中、岩体强度较低和临近破坏的区域, 即使  $\Delta CFS$  很小, 也可能触发地震的发生; 反之, 在低构

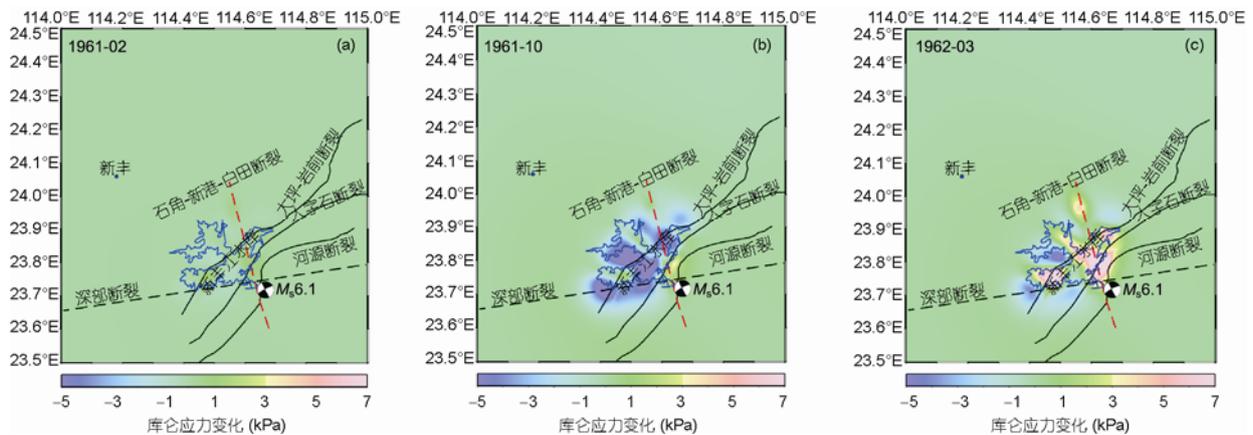


图 7 新丰江水库不同蓄水时刻震源深度处库仑应力分布图

(a) 1961 年 2 月震源深度处  $\Delta CFS$  分布; (b) 1961 年 10 月震源深度处  $\Delta CFS$  分布; (c) 1962 年 3 月震源深度处  $\Delta CFS$  分布

表 4 计算各个断层  $\Delta CFS$  参数

断层	河源断裂			人字石断裂	大坪-岩前断裂	深部断裂	石角-新港-白田断裂
	I 段	II 段	III 段				
走向	$N80^\circ E$	$N5^\circ E$	$N80^\circ E$	$N60^\circ E$	$N45^\circ E$	$N85^\circ E$	$N25^\circ W$
倾角	$45^\circ$	$45^\circ$	$45^\circ$	$60^\circ$	$70^\circ$	$90^\circ$	$70^\circ$
滑动角	$130^\circ$	$355^\circ$	$130^\circ$	$110^\circ$	$100^\circ$	$140^\circ$	$350^\circ$

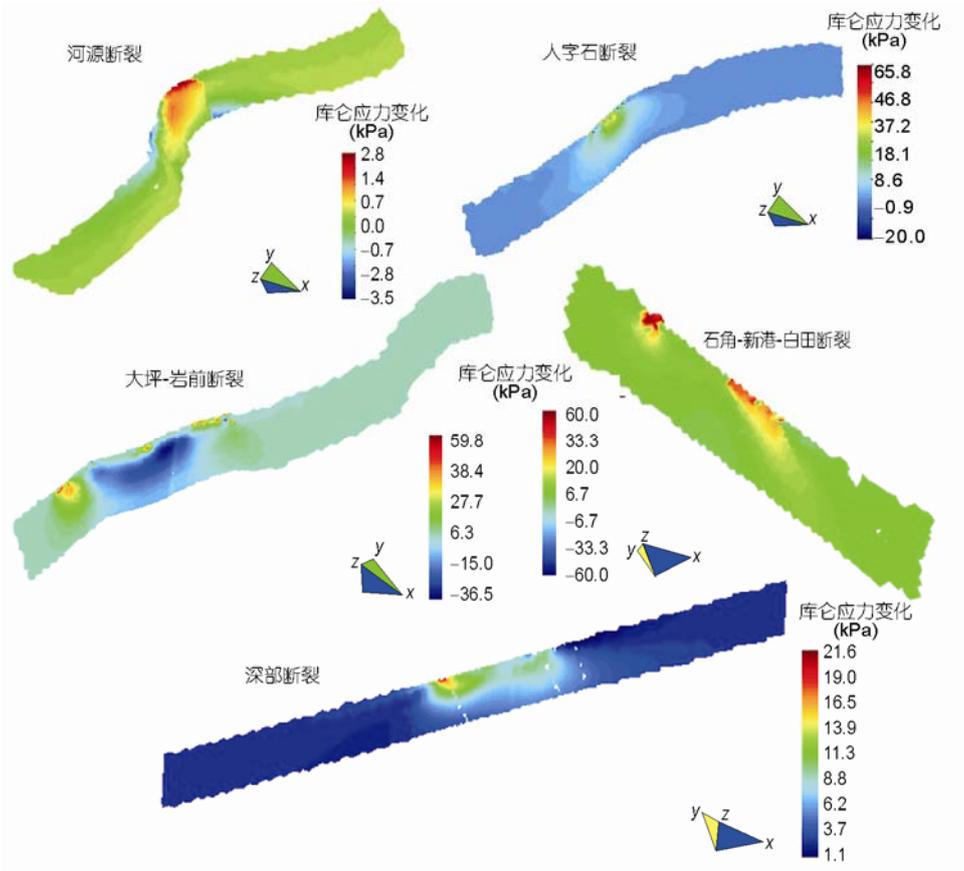


图8 主震前各个断层 $\Delta CFS$

造应力区或岩体强度高的区域,  $\Delta CFS$  很大, 也未必能够触发地震发生, 需要结合岩体性质和构造应力场等分析.

#### 2.4 水库蓄水引起的形变量和形变能

水库蓄水使得库区地壳发生了形变, 通过计算对比, 5个模型水库蓄水引起的形变量变化几乎一样. 图9给出了模型2垂直方向位移变化. 由于库体荷载作用, 库区呈现出沉降趋势, 在库心沉降量最大, 达到 17.5 mm, 且自库心向水库边缘逐渐减小. 在研究范围内最小沉降量不足 0.15 mm, 可以认为在水库以外一定距离处沉降量将为 0. 文献[33]中据大地形变测量, 测得在 1962年新丰江坝址附近的垂直沉降量约为 15 mm, 与本文的数值模拟结果基本一致.

地震是应变能释放过程, 因此, 可以计算水库蓄水产生的应变能, 求出水库蓄水引起应变能对地震的贡献. 一般情况下, 应变能(积累)表示为公式(14)<sup>[49]</sup>:

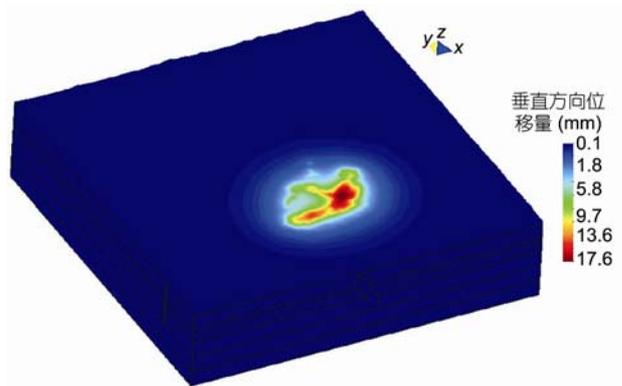


图9 主震前新丰江水库蓄水引起垂直方向上形变量

$$\begin{aligned}
 U &= \iiint w(x, y, z; t) dV dt \\
 &= \iiint \frac{1}{2} (\sigma_x \varepsilon_x + \sigma_y \varepsilon_y + \sigma_z \varepsilon_z + \tau_{xy} \gamma_{xy} \\
 &\quad + \tau_{yz} \gamma_{yz} + \tau_{zx} \gamma_{zx}) dV dt.
 \end{aligned} \tag{14}$$

据此, 得出在主震发生时刻水库蓄水引起的应变能为  $7.3 \times 10^{11}$  J. 地震释放能量由公式(15)可求出, 新丰江  $M_s 6.1$  级地震释放的能量为  $8.9 \times 10^{13}$  J. 新丰江水库蓄水引起形变能对  $M_s 6.1$  地震释放的能量贡献不到 1%. 说明即使是公认的水库地震, 水库蓄水也只是在一定条件下触发了地震的发生, 触发了已经积蓄的构造应变释放.

$$\lg E_s = 1.5M_s + 4.8. \quad (15)$$

### 3 结论

本文建立了新丰江水库三维孔隙弹性耦合模型, 应用有限元数值计算方法, 对 1962 年新丰江  $M_s 6.1$  级地震发生进行了研究, 计算结果表明:

(1) 新丰江水库蓄水引起了震源及其周围孕震断层上库仑应力增大, 主震前库仑应力变化在 0.7~3.0 kPa 范围, 有可能促进了断层成核过程, 最终触发了地震发生.

(2) King 等<sup>[50]</sup>认为在一定条件下 0.01 MPa 量级微小力变化可明显影响地震活动, 本文计算结果在 0.001 MPa 量级, 因此, 更小量级库仑应力变化是否可以触发地震活动仍是一个值得研究的问题.

(3) 水库水体荷载改变了库区岩体的应力场, 产生弹性附加应力场, 使得库区岩体发生弹性位移(形变)和孔隙压力瞬间变化. 新丰江水体荷载对库仑应力变化贡献较小, 在主震发生前震源处只有 0.5 kPa. 蓄水造成随时间扩散的孔隙压力在库仑应力变化中占主导因素.

(4) 扩散系数的不同直接影响到模拟结果. 由于岩体、断裂带等渗透率状况复杂、深部岩体渗透系数不确定, 本文采取 5 种不同扩散系数(渗透率)模型, 模拟结果显示: 采用“地震”扩散系数的模型 4 求出的库仑应力变化值约是采用岩体扩散系数模型 1 求

出的库仑应力变化值的 5 倍. 因此, 对渗透率、构造应力和地下水渗流等的详细分析是水库地震研究中十分重要的工作.

(5) 本次模拟得出新丰江水库开始蓄水到主震前引起的最大形变量为 17.5 mm, 与实际测出数据非常接近, 验证了本次模拟的可靠性. 新丰江水库蓄水形变能不到  $M_s 6.1$  地震波释放能量的 1%, 说明较高震级的水库地震发生的先决条件是构造应变能的积累已经达到了临界状态, 水库蓄水仅触发累积的应变能释放.

(6) 不少学者已经通过建立不同模型对紫坪铺水库蓄水/放水是否会触发汶川大地震做了很多研究, 计算出不同的库仑应力变化值, 但是, 不同模型的计算参数的不确定性势必会影响计算结果, 因此, 对龙门山地区内岩体、断裂的物理参数还需进一步研究.

目前, 似乎已经没有研究者对新丰江水库是否诱发了水库地震产生怀疑. 但是, 目前对多大的库仑应力变化量级可以触发水库地震, 仍没有确切的定论. 因此, 本文通过对新丰江水库蓄水产生的库仑应力变化量的计算分析, 对今后研究水库地震的应力触发条件具有非常重要的借鉴意义. 当然, 对特定水库地震的研究, 还必须对其特定的地质条件、地质构造和地球动力学环境进行深入的综合性评估.

未来工作中, 需要进一步应用孔隙弹性模型对大量典型的水库地震实例进行模拟, 归纳、总结水库蓄水应力触发地震的因素, 以期得到更多共性的结果. 在模拟中对水库库区的地质构造、岩性, 以及岩体和断裂力学性质的深入了解, 是取得力学模拟进展的关键. 另外地下水对断层物质的软化作用、构造应力场与地震活性等基础研究十分重要, 在模拟中应该将这些方面的新成果纳入定量的模拟分析.

**致谢** 感谢审稿专家提出的宝贵意见.

### 参考文献

- 1 Carder D S. Seismic investigations in the Boulder Dam area 1940-1944 and the influence of reservoir loading on local earthquake activity. *Bull Seismol Soc Amer*, 1945, 35: 175-192
- 2 于品清, 孔凡健. 水库地震地质构造条件的讨论. *地壳形变与地震*, 1983, 3: 71-81
- 3 夏其发. 《世界水库诱发地震震例基本参数汇总表》暨水库诱发地震评述. *中国地质灾害与防治学报*, 1992, 3: 95-100
- 4 刘远征, 马瑾, 姜彤, 等. 库水渗流与荷载对水库地震形成的影响分析. *地震地质*, 2010, 32: 570-585

- 5 光耀华. 论水库要素与水库地震的关系. 华南地震, 1988, 8: 79–85
- 6 李祖武. 水库地震与地质构造的关系. 地震地质, 1981, 3: 61–69
- 7 Terzaghi K. Die Berechnung der Durchlässigkeitsziffer des Tones aus dem Verlauf Der Hydrodynamischen Spannungserscheinungen. Sber Akad Wiss Wien, 1923, 132: 105–132
- 8 易立新, 王广才, 李榴芬. 水文地质结构与水库诱发地震. 水文地质工程地质, 2004, 2: 29–32
- 9 易立新, 车用太, 王广才. 水库诱发地震研究的历史、现状与发展趋势. 华南地震, 2003, 23: 28–37
- 10 胡毓良, 陈献程. 我国水库地震及相关成因问题的讨论. 地震地质, 1979, 1: 45–57
- 11 杜运连, 王洪涛, 袁丽文. 我国水库诱发地震研究. 地震, 2008, 28: 39–51
- 12 丁原章, 潘建雄, 肖安予, 等. 新丰江水库诱发地震的构造条件. 地震地质, 1983, 5: 63–74
- 13 丁原章. 中国的水库诱发地震. 华南地震, 1989, 9: 64–72
- 14 徐煜坚. 论水库地震. 岩石力学与工程学报, 1984, 3: 66–74
- 15 Bell M L, Nur A. Strength changes due to reservoir-induced pore pressure and stresses and application to Lake Oroville. J Geophys Res, 1978, 83: 4469–4483
- 16 Talwani P, Acree S. Pore press diffusion and the mechanism of reservoir-induced seismicity. Pure Appl Geophys, 1984, 122: 947–965
- 17 Talwani P. On the nature of reservoir-induced seismicity. Pure Appl Geophys, 1997, 150: 473–492
- 18 Roeloffs E A. Fault stability changes induced beneath a reservoir with cyclic variations in water level. J Geophys Res, 1988, 93: 2107–2124
- 19 Simpson D W, Gharib A A, Kebeasy R M. Induced seismicity and changes in water level at Aswan reservoir. Gerlands Beitr Geophys, 1990, 99: 191–201
- 20 Gough D I, Gough W L. Stress and deflection in the lithosphere near Lake Kariba. Geophys. J Roy Astron Soc, 1970, 21: 70–101
- 21 陈颢. 汶川地震是由水库蓄水引起的吗? 中国科学 D 辑: 地球科学, 2009, 39: 257–259
- 22 马文涛, 徐长朋, 张新东, 等. 紫坪铺水库与汶川地震关系的讨论. 地震地质, 2011, 33: 175–190
- 23 雷兴林, 马胜利, 闻学泽, 等. 地表水体对断层应力与地震时空分布影响的综合分析——以紫坪铺水库为例. 地震地质, 2008, 30: 1046–1064
- 24 Lei X L. Possible roles of the Zipingpu Reservoir in triggering the 2008 Wenchuan earthquake. J Asian Earth Sci, 2010, 40: 844–854
- 25 Ge S M, Liu M, Lu N, et al. Did the Zipingpu Reservoir trigger the 2008 Wenchuan earthquake? Geophys Res Lett, 2009, 36: 1–5
- 26 张贝, 石耀霖. 紫坪铺水库对附近断层稳定性影响的探讨. 中国科学院研究生院报, 2010, 27: 755–762
- 27 周斌, 薛世峰, 邓志辉. 水库诱发地震时空演化特征与库水加卸载及渗透过程的关系——以紫坪铺水库为例. 地球物理学报, 2010, 53: 2651–2670
- 28 Gahalaut K, Gahalaut V K. Effect of the Zipingpu reservoir impoundment on the occurrence of the 2008 Wenchuan earthquake and local seismicity. Geophys J Int, 2010, 183: 277–285
- 29 Zhu B J, Cheng H H, Liu C, et al. Porosity and permeability evolution and evaluation in anisotropic porosity multiscale-multiphase-multicomponent structure. Chin Sci Bull, 2011, 56: 320–327
- 30 Zhu B J, Liu C, Shi Y L, et al. Application of flow driven pore-network crack model to Zipingpu reservoir and Longmenshan slip. Sci China Phys Mechan Astronomy, 2011, 54: 1–9
- 31 沈崇刚, 陈厚群, 张楚汉, 等. 新丰江水库地震及其对大坝的影响. 中国科学, 1974, 2: 184–205
- 32 王妙月, 杨懋源, 胡毓良, 等. 新丰江水库地震的震源机制及其成因的初步探讨. 中国科学, 1976, 1: 85–97
- 33 丁原章. 水库诱发地震. 北京: 地震出版社, 1989. 10–60
- 34 沈立英, 常宝琦, 吴名彬. 弹性多孔介质中应力——孔隙压耦联理论在新丰江地震研究中的应用. 中国地震, 1992, 8: 36–43
- 35 魏柏林. 新丰江水库地震震源应力场与构造应力场. 地震地质, 1981, 3: 75–79
- 36 陈益明. 新丰江水库地震及其小震震源机制的研究. 华南地震, 1982, 2: 64–71
- 37 龚鸿庆. 关于新丰江水库地震的成因问题. 华南地震, 1982, 2: 72–78
- 38 Chen L, Talwani P. Reservoir-induced seismicity in China. Pure Appl Geophys, 1998, 153: 133–149
- 39 Herbert F W. Theory of Linear Poroelasticity with Applications to Geomechanics and Hydrogeology. Princeton: Princeton University Press, 2000. 4–10
- 40 Biot M A. General theory of three-dimensional consolidation. J Appl Phys, 1941, 12: 155–164
- 41 Biot M A. General solutions of the equations of elasticity and consolidation for a porous material. J Appl Mech, 1956, 78: 91–96
- 42 Rice J R, Cleary M P. Some basic stress diffusion solutions for fluid-saturated elastic porous media with compressible constituents. Rev Geophys Space Phys, 1976, 14: 227–241
- 43 Patrick A D, Franklin W S. Physical and Chemical Hydrogeology. New York: John Wiley & Sons Inc, 1998. 159–180

- 44 石耀霖, 曹建玲. 库仓应力计算及应用过程中若干问题的讨论——以汶川地震为例. 地球物理学报, 2010, 53: 102–110
- 45 李安然, 张飞飞, 张柯. 从新丰江水库地震的环境条件讨论水诱发地震的研究及其预测. 华南地震, 1992, 12: 88–94
- 46 龚钢延, 谢原定. 岩石渗透率变化的实验研究. 岩石力学与工程学报, 1989, 3: 219–227
- 47 龚钢延, 谢原定. 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. 地震学报, 1991, 13: 364–371
- 48 谢原定. 新丰江水库区水力扩散与诱发地震活动性分析. 高原地震, 1996, 8: 27–35
- 49 李世愚, 和泰名, 尹祥础. 岩石断裂力学导论. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010. 15–25
- 50 King G C P, Stein R S, Lin J P. Static stress changes and the triggering of earthquake. Bull Seismol Soc Amer, 1994, 84: 935–953