

# 三峡库首区蓄水前后构造应力场 三维数值模拟研究

陈蜀俊<sup>1,2,3</sup>, 姚运生<sup>1,3</sup>, 曾佐勋<sup>4</sup>, 刘立林<sup>4</sup>, 李细光<sup>5</sup>

(1. 中国地震局 地震研究所, 湖北 武汉 430071; 2. 武汉地震工程研究院, 湖北 武汉 430071;

3. 地壳运动与地球观测实验室, 湖北 武汉 430071; 4. 中国地质大学, 湖北 武汉 430074; 5. 广西地震局, 广西 南宁 530022)

**摘要:** 迄今为止, 长江三峡库首区蓄水对上地壳构造应力场影响的数值模拟研究中存在的最大问题是未考虑地形“峡谷效应”和库水下渗导致“岩石弱化”的影响。利用高精度 DEM 图和 135 m 水位蓄水同期重力异常观测资料, 首次建立包含地形单元、库水下渗因素等复杂条件下的三峡库首区上地壳三维数值模型。在 Marc 软件平台上, 以优选加载方案进行数值模拟, 揭示 135 m 水位、175 m 水位蓄水条件下库首区上地壳构造应力场的动态变化, 发现九湾溪、马鹿池、官渡口、牛口等断裂带挟持区出现最大 3.5~5.0 MPa 的最大主应力降等有利于高角度正断层失稳的应力场变化, 预测 175 m 水位蓄水影响将呈“继承性”发展。首次提出“二次诱发地震”、“水库诱发地震潜在震源”、“叠加潜在震源”的思想, 探讨了蓄水对秭归、巴东 2 个重点区域断裂稳定性、孕震环境及地震危险性的影响。

**关键词:** 岩土力学; 构造应力场; 孕震环境; 三峡库首区; 数值模拟

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2005)增 2-5611-08

## STUDY ON NUMERICAL SIMULATION OF TECTONIC STRESS FIELD BEFORE AND AFTER RESERVOIR IMPOUNDING IN THE HEAD AREA OF THE THREE GORGES

CHEN Shu-jun<sup>1, 2, 3</sup>, YAO Yun-sheng<sup>1, 3</sup>, ZENG Zuo-xun<sup>4</sup>, LIU Li-lin<sup>4</sup>, LI Xi-guang<sup>5</sup>

(1. Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Wuhan 430071, China; 2. Wuhan Institute of Earthquake Engineering, Wuhan 430071, China; 3. Crustal Movement Laboratory, Wuhan 430071, China; 4. China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 5. Earthquake Administration of Guangxi Autonomous Region, Nanning 530022, China)

**Abstract:** The main problem on simulation of tectonic stress field after reservoir impounding in the head area of the Three Gorges is the influence of “canyon effect” and “rock soften”. For the first time, taking the terrain, water load distribution, infiltration range and the fault units into account, the 3D numerical modeling of the upper crust of the Head Area of the Three Gorges is established on the software platform of Marc to reflect the change of tectonic stress field under the load cases—water lever 175 m and 135 m. From the numerical simulation results, it is discovered that under water level 135 m, the maximum principal stress descends(3.5-5.0 MPa) is connected with the activities of high angle normal fault and these changes are more obvious under water level 175 m. The idea of “secondary induced earthquake”, “potential induced seismic source in reservoir” and “superposition seismic source” are presented first. Moreover, the effects on the stability of area fault and the seismogenic environment in

**收稿日期:** 2005-05-01; **修回日期:** 2005-07-20

**基金项目:** 科技部公益项目——三峡工程蓄水后地震环境及灾害预警研究资助项目(2004DIB3J131)

**作者简介:** 陈蜀俊(1965-), 男, 现为正高职高级工程师、博士研究生, 主要从事减灾与防护工程、地震工程、岩石力学等方面的研究工作。  
E-mail: csj65@public.wh.hb.cn.

Zhigui and Badong after impoundment are analyzed.

**Key words:** rock and soil mechanics; tectonic stress field; seismogenic environment; the Head Area of the Three Gorges; numerical simulation

## 1 引言

长江三峡 135 m 水位蓄水以来, 诱发一系列微震群活动, 引起库首区重力场、形变场、渗流场和库床荷载条件的持续变化; 三峡蓄水这一人文活动引起的变化, 是库首区孕震环境与水库诱发地震研究不容忽视的影响因素。

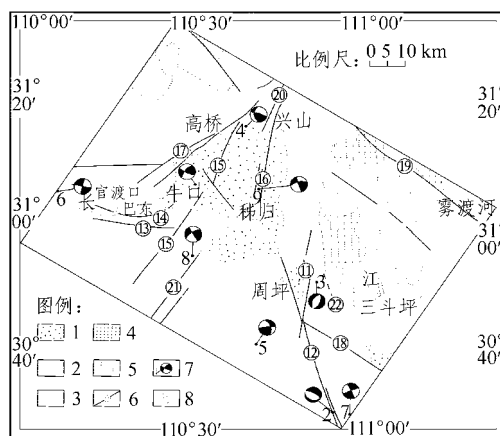
2003 年 5 月 19 日~9 月, 三峡库首区共记录到微震活动 2 216 次, 地震活动明显增强, 震中明显向库心迁移; GPS 在近库岸观测到  $-10 \sim -46$  mm 的垂直形变, 主要形变区域出现在坝址至香溪及巴东库段; 同期重力监测观测到最大近 200 微伽( $10^{-8} \text{ m/s}^2$ )的重力变化异常, 这些数据成为库水下渗的直接证据<sup>[1, 2]</sup>。针对 135 m 水位蓄水引起的这些变化的分析普遍认为蓄水可能引起库首区上地壳构造应力场调整, 进而影响或扰动库首区局部的孕震环境; 当蓄水位至 175 m 后, 所引起的变化则更加引人注目。虽然通常认为, 库水荷载引起的较小量级附加应力不至于成为断层失稳的主要力源, 但在库水下渗、孔隙水作用导致断层滑动抗力下降的背景下, 较低量级应力变化对本已接近失稳或处于极限平衡状态的区域产生促滑、诱震作用, 是完全可能的。因此, 研究三峡库首区蓄水前后构造应力场的变化及其对孕震环境的影响具有重要意义。

## 2 模型的建立

库首区范围及主要活动断裂如图 1 所示<sup>[3]</sup>。

前人已注意到应用构造应力场数值模拟的方法研究三峡蓄水诱发地震<sup>[4]</sup>存在的最大问题是未考虑地形和库水下渗的影响。三峡水库为峡谷形水库, 库首区地势陡峭, 高差起伏达到近百米至数百米, 构造应力场的“峡谷效应”十分明显, 忽略地形影响而研究蓄水引起的应力场变化, 显然是不全面的。同时, 由于可用于物性参数调整的蓄水同期重力异常观测数据是新近的资料, 因此前人的模型也是未考虑库水下渗区物性参数的调整。

首次利用库首区 1:250 000 DEM 数字地图, 生成地形单元(见图 2), 在文[3]基础上, 加密库床、断



1—白垩~上三叠统上部盖层构造亚层; 2—震旦系~中三叠统下部盖层构造亚层; 3—中元古界上部基底构造亚层; 4—下元古界下基底构造亚层; 5—亚宁期中酸性侵入岩; 6—活动断层及编号; 7—震源机制解及编号(黑区示压缩区, 白区示拉张区); 8—三峡大坝位置活动断裂及编号; ⑪—九湾溪断裂; ⑫—仙女山断裂; ⑬—马鹿池断裂; ⑭—官渡口断裂; ⑮—周家山—牛口断裂; ⑯—水田坝断裂; ⑰—高桥断裂; ⑱—天阳坪断裂; ⑲—雾渡河断裂; ⑳—新华断裂; ㉑—磨坪断裂; ㉒—狮子口线性影像带

图 1 库首区范围及地震地质图

Fig.1 Geological map of the researched area

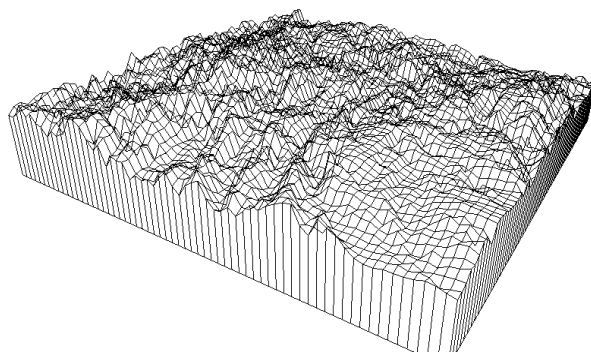


图 2 库首区 1:250 000 DEM 地图及地形单元

Fig.2 DEM map with scale 1:250 000 and the meshing of the modeling of the researched area

裂单元, 建立考虑地形单元、断裂单元(图 3)、构造层划分的初始三维数值模拟模型(图 4); 并首次利用重力监测反映的库水下渗范围及强度调整蓄水工况下的物性参数, 建立蓄水条件下的模型。

坐标系以  $110^{\circ}00'00''\text{N}$ ,  $31^{\circ}56'35''\text{E}$  为原点, Y 轴方向为  $\text{NE}33^{\circ}$ , Z 轴垂直向上为正,  $Z=0$  处相当于海拔高程 50 m; 长 110 000 m, 宽 85 000 m, 厚度取自蓄水前水位往下至地壳深度 12 km 处。模型按物性又分为 2 个大层, 分别为: 第 1 层厚约 7 000 m,

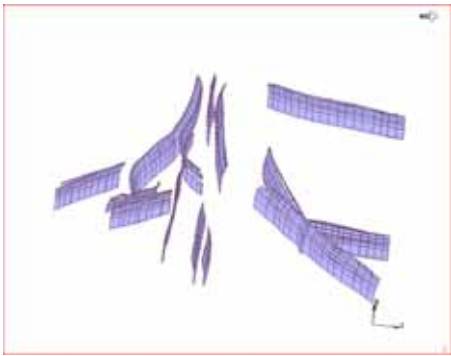
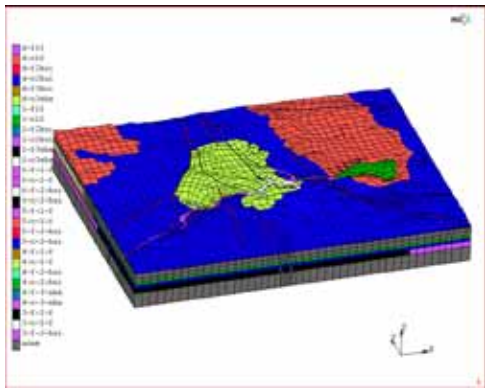


图 3 库首区断裂空间单元(断裂名对应图 1)  
Fig.3 Units of the modeling divided by the faults



注：左侧 30 个色条为单元介质图例；第一个符号表层号，其中 d 表有地形单元的第 1 层、层号顺延后的 1 则表第 2 层，为错开相近色块，其后顺序倒置；第二个符号，f 表断裂、c 表层位；第三个数代表岩石状态类别；第四及其后符号，f 表花岗岩、sha 表砂岩、hui 表灰岩

图 4 三峡库首区上地壳三维数值模拟模型图

Fig.4 3D numerical modeling of the head area of the Three Gorges

由花岗岩、灰岩、砂岩等 3 种岩石组成；第 2 层厚约 5 000 m，主要为花岗岩。

采用三维线性弹性模型，断裂单元物性按弱介质考虑；除约束部位外，每个节点有 3 个自由度；有限元网格划分以满足计算精度要求，使模型能够真实反映水体荷载与近库岸区域的地质结构形态；计算单元数为 19 262 个。

3 物性参数设定

(1) 初始物性参数

根据库首区试验获得的岩石力学参数<sup>[5]</sup>，并参考该区岩性分布与物性参数研究<sup>[6]</sup>，确定库首区不同岩石断层物质不同状况下的物性参数见表 1。

根据前人给出的库首区各构造层速度结构和如下关系式，可确定深部岩体介质的弹性模量  $E$  和泊松比  $\nu$ ：

表 1 库首区主要岩石类型岩石力学参数表<sup>[5]</sup>

Table 1 Mechanics parameters of main rocks in researched area<sup>[5]</sup>

岩性	统计状态	弹性模量 /GPa	泊松比	密度 /(g · cm <sup>-3</sup> )	极限单轴抗压强度 /MPa	饱和抗拉强度 /MPa
砂岩	天然状况	35.46	0.22	2.63	58.2	3.6
	饱水状况	30.00	0.24	2.66	49.5	3.0
砂岩+构造角砾岩	天然状况	10.70	0.24	2.57	33.3	2.2
	饱水状况	9.10	0.27	2.59	28.3	1.8
灰岩	天然状况	30.60	0.20	2.68	112.8	5.0
	饱水状况	26.00	0.23	2.69	95.9	4.2
灰岩+构造角砾岩	天然状况	21.22	0.23	2.66	65.8	4.3
	饱水状况	18.00	0.26	2.67	56	3.6
花岗岩	天然状况	35~45	0.18~0.2	2.69	115~132	5~7
	饱水状况	30~38	0.2~0.23	2.70	95~110	4.3~6.0
花岗岩+构造角砾岩	天然状况	5~10	0.25	2.56	48~72	3.2
	饱水状况	4.3~8.5	0.26	2.57	40~60	2.62

$$E = [3 - \nu_s^2 / (\nu_p^2 - \nu_s^2)] \nu_s^2 \rho \left\{ \right.$$
$$\left. \nu = 1 - [\nu_p^2 / 2(\nu_p^2 - \nu_s^2)] \right\}$$

(1)

式中： $\nu_p$  和  $\nu_s$  分别为构造层介质的纵波和横波速度， $\rho$  为介质密度。

(2) 135，175 m 水位水体荷载与物性参数

根据 135，175 m 水位下库首区的水体分布，合理布置 2 个蓄水工况下的水体荷载；再进行库水下渗区物性参数调整。

关于渗流，目前还没有较好地解决用二维水流模拟斜坡断块中地下水水流的边界问题<sup>[7]</sup>，三维渗流场更趋复杂；而三峡部分水位观测井的观测成果存在误导<sup>[8]</sup>。就现有资料，重力异常既是库水下渗的直接证据，也是确定库水渗透影响范围与物性参数调整的现实依据。根据文[9]，首先确定 135 m 水位库水下渗的影响范围是：以巴东至秭归北(沿长江)为轴线，半径 6 000 m、圆心位于轴线以北 1 km 的半圆柱体内的区域(即北岸取至 5 km、南岸取至 7 km)；根据渗透范围、程度与水头差的关系，近似估计 175 m 水位库水下渗的影响范围是：以巴东至秭归北(沿长江)为轴线，半径 7.2 km、圆心位于轴线以北 1.2 km 的水平半圆柱体内的区域(即北岸取至 6 km、南岸取至 8.4 km)。这 2 个区域再各以 1/2 半径划分为“近库岸区”和“次近库岸区”。参考三峡库区岩石天然状态、饱水状态的实测参数(表 1)

进行 2 个蓄水工况下的模拟时, 在初始模型参数基础上, 将各自“近库岸区”、“次近库岸区”的弹性模量分别调低 1/4 和 1/5; 泊松比按表 1 调整。

近似估计换算为: 模型第 1 层容重在 135 m 水位时增加 2%, 在 175 m 水位时增加 3%, 也作相应调整。

三峡库区不同状况下的岩石力学参数及其换算是复杂的<sup>[10, 11]</sup>; 以上调整虽不尽完善, 但利用了最新的库水下渗范围及强度资料调整蓄水后模型的物性参数, 显然是一个进步。

## 4 约束条件与加载方案

### (1) 约束条件

由于三峡库首区新构造运动的水平运动总体是向华南方向运动的, 因此, 首先对  $X=0$  的侧面作  $X$  向约束。

三峡区域构造应力场存在一定的分区性, 现代地壳运动也呈不均匀特征; 而黄陵背现今地壳形变偏弱、垂直形变零值线从其上通过; 其格局, 似与黄陵背斜的“砥柱”作用有一定关系。因此, 对黄陵背斜核部(范围半径为 15 km, 中心点在雾渡河西侧 30 km, )作  $X$  向和  $Y$  向约束。

此外, 在  $Z=-12\ 000$  m 处(即模型底部), 作  $Z$  向约束; 顶面及模型其他侧面, 则为自由面。

### (2) 加载方案

图 1 展示的震源机制解表明, 三峡地区的现今构造应力场呈现负责性和分区性, 主压应力轴从 NNE 至 NEE 方向变化。文[12]认为构造应力场主压应力方向为 NE 向; 文[4]认为, 应该是 SN 向的压应力和 E, W 两侧剪的联合作用。

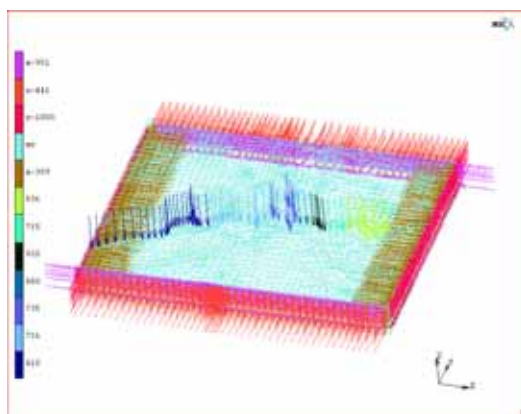
综合现有观点, 可以归纳为 3 种力源作用机制, 即: NE 方向挤压, NWW 向拉张, 以及 NE 方挤压、NWW 向拉张 3 种方案。

根据文[12]关于库首区最大主应力  $\sigma_1$  取 790 MPa, 最小主应力  $\sigma_3$  取 546 MPa 的研究结果, 对 3 种方案进行模拟比对后, 确定 NE57°挤压和 NW327°拉张作为加载方案。研究表明, 该方案模拟结果与地质、形变、地震、原地应力测量等资料具有较好一致性<sup>[13]</sup>。

## 5 蓄水前后最大主应力的模拟结果

### (1) 135 m 水位蓄水模拟模型表达

图 5 给出 135 m 水位蓄水工况下包含复杂荷载条件的模拟模型, 图 5 中清晰表达了边界条件、库水下渗及水体荷载分布。



注: 大图框左侧色条为各种加载、荷载力值图例, 模型中沿长江的垂向箭头为水体荷载, 侧面箭头为加载力值, 单位 MPa; 图框上方为正北,  $Y$  轴方向 NE33°。

图 5 135 m 水位下包含水体荷载、库水下渗的模型图

Fig.5 Modeling under the load case—water level 135 m, taking water load distribution and infiltration range into account

### (2) 135 m 水位相对于蓄水前的变化

考虑到研究重点是上地壳表层应力场的变化, 本文仅介绍第 3 层顶面( $Z=-1\ 500$  m)处最大主应力的模拟结果。

对比蓄水前以及 135 m 水位蓄水后(图 6)最大主应力模拟结果发现: 断裂区同一深度最大主应力值比蓄水前减小, 低值范围扩大; 部分断裂两端出现应力集中, 尤以牛口断裂北端最为明显。在马鹿池与官渡口断裂挟持区、牛口断裂跨长江段东侧、

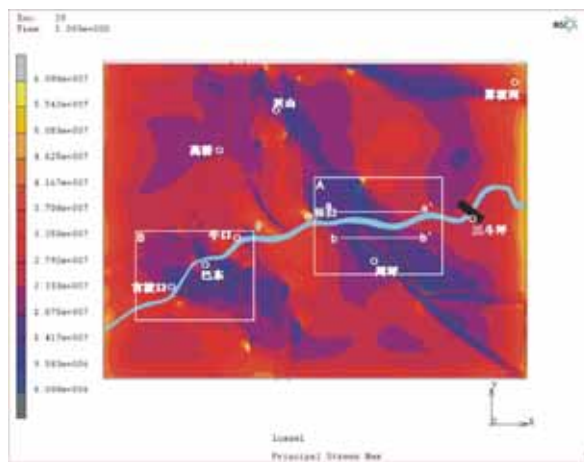


图 6 135m 水位下最大主应力模拟结果图(单位: Pa)

Fig.6 Maximum principal stress under the load case —water level 135 m (unit: Pa)



秭归地理中心、九湾溪雁列区, 共出现 4 个最大主应力降的异常区; 最大主应力降为 3.5 MPa, 出现在牛口, 其他为 0.5~3.0 MPa。上述断裂多为高角度正断层, 模拟结果反映出的构造应力场变化表明, 蓄水对断裂稳定性造成明显影响。

在所建立模型的长江北岸, 对九湾溪断作 Z 向剖面(图 7, 剖面线为图 6 的线段 a-a')。如图 7 所示, 九湾溪断裂带北段内部最大主应力相对低的区域, 有往下和往两侧拓展的趋势, 也即最大主应力往下和往两侧在减小、最小主应力(张应力)往下和往两侧在增加, 影响深度达 8 km。

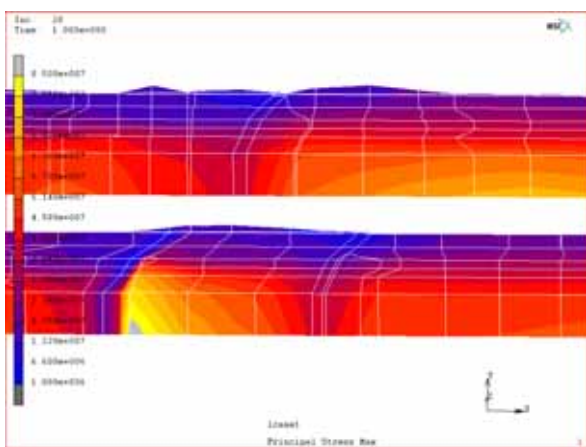


图 7 135 m 水位蓄水后下九湾溪断裂带最大主应力模拟结果剖面图(单位: Pa)

Fig.7 Section of maximum principal stress in Juiwanxi fault zone under the load case—water level 135 m(unit: Pa)

对马鹿池断裂带, 按  $X_1 = 8\ 130\ \text{m}$ ,  $Y_1 = 40\ 700\ \text{m}$ ;  $X_2 = 39\ 150$ ,  $Y_2 = 40\ 700\ \text{m}$ ;  $X_3 = 39\ 150$ ,  $Y_3 = 14\ 400\ \text{m}$ ;  $X_4 = 8\ 130\ \text{m}$ ,  $Y_4 = 14\ 400\ \text{m}$ ,  $Z = 1\ 500\ \text{m}$ , 作局部详图(图 6 中 B 所示), 发现马鹿池断裂两端应力集中区域扩大; 而位于北侧的官渡口断裂东端应力集中区域扩大、西端应力集中区域缩小; 牛口断裂北端应力集中水平则显著提高(图 8, 9)。

### (3) 175 m 水位相对于 135 m 水位的变化

175 m 水位蓄水后相对于 135 m 水位蓄水时, 出现了较前一种情况更为复杂的变化(图 10)。一方面, 牛口断裂跨长江段东侧、秭归地理中心、九湾溪雁列 3 个最大主应力下降区进一步发展、拓宽, 最大应力降增长了 1.6 MPa, 而马鹿池与官渡口断裂挟持区的最大主应力值不但没有进一步降低, 相反出现了轻微回升(0.05); 另一方面, 马鹿池断裂东北端、牛口断裂东北侧、九湾溪断裂北端、仙女山断裂西段, 出现了近似共轭形态的最大主应力增长区,

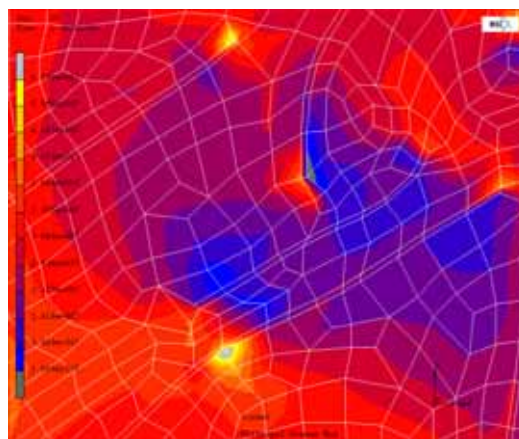


图 8 蓄水前马鹿池断裂带内部(平面)最大主应力模拟结果图(单位: Pa)

Fig.8 Maximum principal stress inside Maluci fault zone (plane) before impounding (unit: Pa)

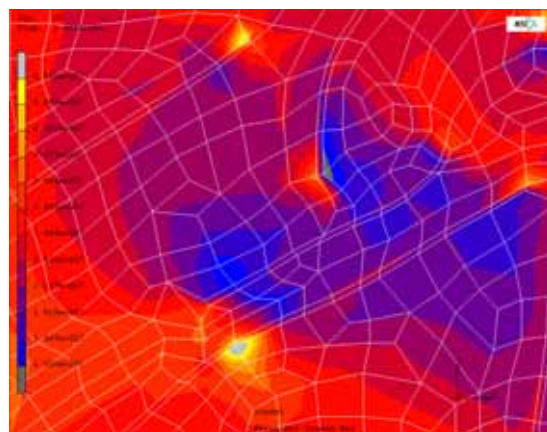


图 9 135 m 水位蓄水后马鹿池断裂带内部(平面)最大主应力模拟结果图(单位: Pa)

Fig.9 Maximum principal stress inside Maluci fault zone (plane) under the load case—water level 135 m (unit: Pa)

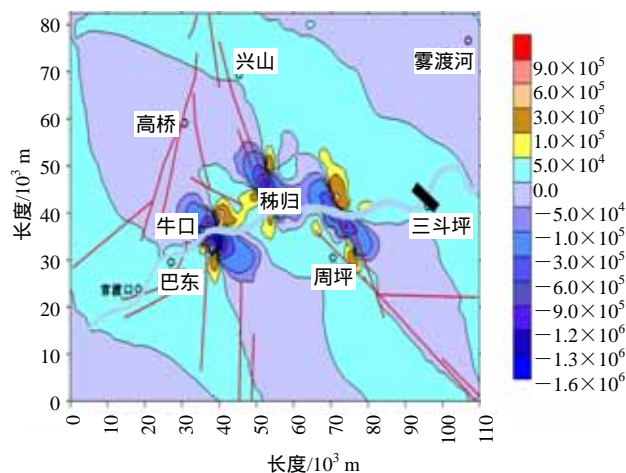


图 10 175 m 水位与 135 m 水位最大主应力差值(单位: Pa)

Fig.10 Difference between the maximum principal stress under water level 135 m and 175 m (unit: Pa)

增长量值为 0.1~0.3 MPa。

总体上模拟结果表明, 175 m 水位蓄水相当于 135m 水位蓄水造成影响(图 6), 呈连续加剧、发展趋势, 而未见新的应力场显著异场区; 似乎表现出一种“继承性”特征。

## 6 蓄水前后构造应力场变化对孕震环境影响的讨论

地震与构造应力存在密切关系。文[14, 15]等关于断层相互作用的一系列物理模拟研究, 对断层及其围限区中应力场、破裂事件的相互关系与机理作了深刻阐述。

对非构造型水库诱发地震而言, 未来库水位变化将造成更大影响, 物理模拟表明: 蓄水位从 175 m 骤降至 145 m 时库岸稳定性最差<sup>[16]</sup>。如切出一个较小区脱离体来研究, 假设其内部原本存在一定的诱发地震条件; 当蓄水位变化时, 除引起脱离体内部条件变化外, 外部应力场的变化将对其形成加载, 造成岩溶孔洞部位的应力集中, 促使或加剧其失稳、塌落, 从而诱发地震。

对于构造型水库诱发地震而言, 修正的莫尔-库仑破坏准则含义清楚, 即

$$\tau = \tau_0 + k(\sigma - p) \quad (2)$$

式中:  $\tau$  为抗剪强度,  $\tau_0$  为粘聚力,  $\sigma$  为断面法向应力,  $p$  为孔隙水压力,  $k$  为断面摩擦系数。

当断面承受的剪应力超过抗剪强度时, 发生失稳。在此基础上, 断裂区的稳定性仍将受到区外应力场变化形成加载作用造成的影响, 即蓄水引起的构造应力场叠加在先存构造应力场上形成加载, 对孕震环境造成扰动、影响, 使原本相对稳定的断裂复活, 或原本就存在的地震危险趋势增加。

已有研究证明<sup>[17]</sup>, 几个兆帕的应力场变化, 虽不足以直接导致地震, 却可以使地震发生的时间提前、发震概率提高。基于前人断层相互作用与同震触发理论, 分析认为, 库首区水库诱发的“一次地震”, 会对相邻或同一震源的地震潜势产生触震或缓震作用; 其可能触发的地震, 作者将其定义为“二次诱发地震”。图 6~10 的现象说明, 相邻断裂及同一断裂不同段落的应力、应变、能量积累和稳定性态, 是一个相互影响的整体, 任何一个区间失稳,

都将对相邻的其他区间产生影响。未来尤其是 175 m 水位蓄水以后发生的水库诱发地震, 一部分可能具有“二次诱发地震”的性质。

模拟研究还显示, 175 m 水位相对于 135 m 水位的变化具有“继承性”特征; 而这种“继承性”将有利于近库岸及过江活动断裂失稳趋势与地震趋势的发展。总之, 蓄水带来的构造应力场变化和对孕震环境的影响是明显的, 总体上反映出地震危险趋势有所增长。

虽然一般认为, 水库诱发地震只具有预测的意义, 但在蓄水后相当长的一段时间内(如 30 a 内), 不能忽略预测震级上限可能达到 4.5~6.0 级且超过起算地震的水库诱发地震对地震危险性分析形成的贡献; 而如果要将其作为潜在震源对待, 与现有潜在震源技术思想是有冲突的。因此, 需要提出新的思想, 即“水库诱发地震潜在源”和“叠加潜在源”思想, 问题才可以探讨下去。“水库诱发地震潜在源”的基本思想是: 在一定条件下赋予其时间概念, 假设水库地震的发生随蓄水时间离逝而下降的影响, 与岩石软化、库水涨落、二次诱发等因素导致随蓄水时间增长而上升的作用抵消后, 在确定的时空内仍符合“泊松过程”, 作为独立的一类潜在震源, 参与既有框架下潜在震源的计算并对地震危险性概率分析结果做出贡献。

## 7 结 语

(1) 根据 1:250 000 DEM 数字地图建立地形单元、断裂单元、构造层划分等因素的初始模型, 根据蓄水同期重力异常所反映库水下渗范围及强度, 分层次调整模型物性参数, 以考虑库水下渗的效应; 由此建立的模型, 认为是迄今最为合理的三峡库首区蓄水条件下构造应力场三维数值模拟模型。

(2) 对比不同水位模拟结果, 发现同一深度下仙女山、九湾溪、马鹿池、官渡口断裂带内部最大主应力值比蓄水前减小, 低值区范围扩; 部分断裂端部出现应力集中, 尤以牛口断裂北端最为显著; 根据 135~175 m 水位模拟结果变化, 预测 175 m 水位蓄水影响将呈“承继性”加剧、发展, 但不会出现突变。

(3) 研究结果表明, 135 m 水位蓄水引起的应力状态调整, 是导致微震群活动的主要原因<sup>[1, 13]</sup>, 因

此对断裂区应力状态调整、变化的地震动力学意义应予高度重视。由于两期蓄水对构造应力场影响的“继承性”，将有利于近库岸及过江活动断裂失稳趋势与地震潜势的发展，总体上反映出秭归、巴东等既有地震危险区的危险趋势有所增长。

(4) 基于断层相互作用与同震触发理论分析认为，蓄水诱发的“一次地震”，可能对相邻断裂或震源构成触震作用而产生“二次诱发地震”；在 175 m 水位蓄水后应力变化水平进一步提高，尤其需要注意此类地震。

(5) 对于预测震级上限可能达到 4.5~6 级且超过本次地震的水库地震潜势区，不能忽略其对地震危险性分析所作的贡献。突破既有潜在震源技术框架，采用“水库诱发地震潜在源”和“叠加潜在源”这一思想，使库区的地震危险性分析包含水库诱发地震的影响，是今后的努力方向。

**致谢** 本文承蒙导师马瑾院士指导、审阅，谨致谢意！

## 参考文献(References)：

- [1] 陈蜀俊, 姚运生, 曾佐勋. 三峡水库蓄水对库首区孕震环境及潜在震源影响研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2005, 25(3): 116 - 120.(Chen Shujun, Yao Yunsheng, Zeng Zuoxun, et al. Effect of impounding on seismogenic environment and potential focus in head region of Three Gorge Reservoir[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2005, 25(3): 116 - 120.(in Chinese))
- [2] 陈蜀俊, 苏爱军, 罗登贵. 长江三峡水库诱发地震的成因类型[J]. 大地测量与地球动力学, 2004, 24(2): 70 - 73.(Chen Shujun, Su Aijun, Luo Denggui, et al. Cause and category of induced earth-quake In Three Gorges[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2004, 24(2): 70 - 73.(in Chinese))
- [3] 李细光. 三峡库首区活动断裂及现今构造应力场研究[博士学位论文][D]. 武汉: 中国地质大学, 2004.(Li Xiguang. Studies on the active faults and the current tectonic stress field in the head area of the Three Gorges Reservoir[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2004.(in Chinese))
- [4] 高士钧. 长江三峡地区地壳应力场与地震[M]. 北京: 地震出版社, 1992.(Gao Shijun. Crustal Stress Field and Seismic Activity in the Three Gorges Area[M]. Beijing: Earthquake Press, 1992.(in Chinese))
- [5] 唐辉明, 马淑芝, 刘佑荣, 等. 三峡工程库区巴东县赵树岭滑坡稳定性与防治对策研究[J]. 地球科学, 2002, 27(5): 621 - 625.(Tang Huiming, Ma Shushi, Liu Yourong, et al. Stability and control measures of Zhaoshuling landslide, Badong County, the Three Gorges Reservoir[J]. Earth Science, 2002, 27(5): 621 - 625.(in Chinese))
- [6] 陈蜀俊, 党晓英, 曾心传, 等. 奉节长江大桥北岸边坡地震荷载作用下的稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(4): 657 - 662.(Chen Shujun, Dang Xiaoying, Zeng Xinchuan, et al. The seismic stability analysis of slope at north bank of Fengjie Changjiang River bridge[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(4): 657 - 662.(in Chinese))
- [7] 胡亚波, 王丽艳. 三峡水库调度对库岸斜坡体内渗透压力与斜坡稳定性影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2 994 - 2 997.(Hu Yabo, Wang Liyan. Research on effects of permeability pressure on slope stability during pecculating water level in Three Gorges Reservoir[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2 994 - 2 997.(in Chinese))
- [8] 闵弘, 谭国焕, 戴福初. 蓄水期库岸古滑坡的水动力学响应监测——以三峡库区泄滩滑坡为例[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3 722 - 3 726.(Min Hong, Tan Guohuan, Dai Fuchu, et al. Hydrodynamic monitoring of preexisting landslide during reservoir filling—a case history of Xietan landslide, the Three Gorges Reservoir[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(21): 3 722 - 3 726.(in Chinese))
- [9] 申重阳, 孙少安, 项爱民, 等. 长江三峡库首区近期重力场动态变化[J]. 大地测量与地球动力学, 2004, 24(1): 6 - 13.(Shen Chongyang, Sun Shaoan, Xiang Aimin, et al. Dynamic variations of gravity field in head region of Three Gorges Reservoir in near future[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2004, 24(1): 6 - 13.(in Chinese))
- [10] 冯夏庭, 张治强, 杨成祥, 等. 位移反分析的神经网络方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(5): 497 - 502.(Feng Xiating, Zhang Zhiqiang, Yang Chengxiang, et al. Study on genetic-neural network method of displacement back analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(5): 497 - 502.(in Chinese))
- [11] 陈蜀俊, 段向东, 罗登贵, 等. 弹性波测井在三峡库岸地层评价中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(17): 2 937 - 2 940.(Chen Shujun, Duan Xiangdong, Luo Denggui, et al. Application of elastic waves well logging in stratum assessment of Three Gorges Reservoir bank[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(17): 2 937 - 2 942.(in Chinese))
- [12] 袁登维, 梅应堂, 秦兴黎, 等. 长江三峡工程坝区及外围地壳稳定性研究[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1996.(Yuan Dengwei, Mei Yingtang, Qin Xingli, et al. Study on the Crust Stability in

- Damsite and Surrounding Area of the Three Gorges Project[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1996.(in Chinese)
- [13] 陈蜀俊. 三峡库首区蓄水前后构造应力场数值模拟及地震危险性研究[博士学位论文][D]. 武汉: 中国地质大学, 2005.(Chen Shujun. Numerical modeling of tectonic stress field in the head area of the three gorges before and after reservoir impounding and studies on the seismic risk[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2005.(in Chinese))
- [14] 马 瑾, 马胜利, 刘力强, 等. 交叉断层交替活动与块体运动的实验研究[J]. 地震地质, 2000, 22(11): 65 - 70.(Ma Jin, Ma Shengli, Liu Liqiang, et al. Experimental study on alternate slip of intersecting faults and block movement[J]. Seismology and Geology, 2000, 22(11): 65 - 70.(in Chinese))
- [15] 马 瑾, 马胜利, 刘力强, 等. 断层相互作用型式的试验研究, 自然科学进展, 2002, 12(5): 503 - 508.(Ma Jin, Ma Shengli, Liu Liqiang, et al. Testing study on category of interaction between faults[J]. Progress in Natural Science, 2002, 12(5): 503 - 508.(in Chinese))
- [16] 胡修文, 唐辉明, 刘佑荣. 三峡库区赵树岭滑坡稳定性物理模拟试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(12): 2 089 - 2 095. (Hu Xiuwen, Tang Huiming, Liu Yourong. Physical model studies on stability of Zhaoshuling landslide in area of Three Gorges Reservoir[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(12): 2 089 - 2 095.(in Chinese))
- [17] 张秋文. 大陆强震复发模型与断裂间相互作用研究及其在地震预报中的应用[博士学位论文][D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2002.(Zhang Qiuwen. Earthquake recurrence model, active fault interaction and their applications to earthquake potential assessment[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2002.(in Chinese))