

长江三峡水库蓄水荷载地壳形变-GPS 观测研究^{*}

杜瑞林^{1,2} 乔学军^{1,2,**} 王琪^{1,2} 邢灿飞^{1,2} 游新光^{1,3}

1. 中国地震局地震研究所, 武汉 430071; 2. 中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085;

3. 中国地震局分析预报中心, 北京 100036

摘要 1998~2003 年的 GPS 观测给出了长江三峡地区地壳运动的基本图像: 其站间相对运动在 0~3 mm/a, 属于现今地壳活动背景十分微弱的地区; 2003 年三峡水库首次蓄水引起了相当幅度的地壳变形, 其中 GPS 观测到的近岸垂直沉降幅度约为 10~40 mm, 水平相对形变不超过 5~10 mm, 蓄水导致的垂直沉降最大区域主要集中在三峡的茅坪-香溪段, 幅度随距库中心距离增加而迅速减小. GPS 观测到的沉降范围和幅度与采用 Farrell 方法的数值模拟计算结果基本一致, 短期内沉降变形主要可归之于上地壳因水体负载的弹性响应.

关键词 三峡水库 GPS 观测 水体荷载 地壳形变

长江三峡工程是目前世界上在建的最大水利工程, 建成后, 水库蓄水达 $3.93 \times 10^{10} \text{ m}^3$, 属世界上为数不多的特大型水库之一. 国内外的工程实践证明, 大型高坝水库容易诱发地震活动^[1~4], 对库区人民财产和大坝安全构成威胁. 作为防范措施之一, 与三峡工程同步, 地震部门与工程建设单位联合加强了对库区及周边的地壳变形监测, 采用 GPS, 并辅之以精密水准测量、重力测量、激光测距、峒体应变测量、库盆谷宽与沉降测量等手段, 建立了高时空分辨率的、完备的地壳形变监测网络^[5].

2003 年 6 月 1 日, 长江三峡水库二期工程开始正式蓄水, 短短十几天里, 水位迅速抬升到 135 m, 水体荷载净增约 $10.0 \times 10^9 \text{ m}^3$, 短期内是否诱发地震成为迫切需要回答的问题. 固然孔隙压力扩散以及库水渗流导致岩石摩擦强度降低, 引起断层失稳是诱发水库地震的主要原因^[4,6~9], 但巨大的水体荷载造成库盆和库岸的差异运动, 直接改变了断层的应力环境, 也是诱发水库地震不可排除的重要因

素^[10], 此外它还可能诱导边坡失稳, 引起库区山体崩塌和滑坡, 因此水库蓄水后的实际变形对了解以上问题至关重要. 以往由于监测手段和资料的缺乏, 对于人为因素产生的大规模负荷变形状况还知之甚少, 研究主要基于理论模拟^[7~9,11~13], 本文利用三峡地区 GPS 实测资料, 给出其现今地壳运动背景, 尤其是给出可控负荷条件引起的大面积沉降变形的基本运动学图像, 对水库地震机理以及构造稳定地区地球负荷变形问题的研究, 提供依据.

1 GPS 观测与数据处理

长江三峡 GPS 监测网 1998 年建成, 是长江三峡工程诱发地震监测系统的组成部分, 由巴东、兴山等 GPS 固定观测站和 21 个 GPS 流动观测站组成. 蓄水前(2003 年 5 月)又建立 5 个临时 GPS 固定站, 并增加 4 个流动观测站, 使得全网测站总数达到 32 个, 主要集中在宜昌-巴东的三峡水库库段, 站间平均间距约 15 km, 分布基本均匀, 并控制了三峡工程的主要敏感区域及区内各主要断层(图 1).

2004-01-15 收稿, 2004-03-29 收修改稿

* 国家自然科学基金(批准号: 40274007, 40304002)、中国地震局地壳应力研究所联合基金(批准号: 103030, 602015)、科技部公益研究专项及长江三峡工程开发总公司专项资助项目

** 通讯作者, E-mail: whgps1@public.wh.hb.cn

所有测站全部建在基岩上, 并采用强制归心, 目前已进行了 7 期 GPS 流动观测(1998, 1999, 2000, 2001, 2003-05, 2003-06, 2003-09), 观测采用 Ashtech Z-12 和 AOA Benchmark 两种双频接收机, 并全部采用 Choke-ring 天线. 1~4 期流动观测每测

站观测时间不少于 96 h, 第 5~7 期观测分别在 2003 年三峡二期工程蓄水前后进行, 每测站观测时间累计不少于 60 h. 所有观测采样间隔均为 30s, 卫星截止高度角 10° .

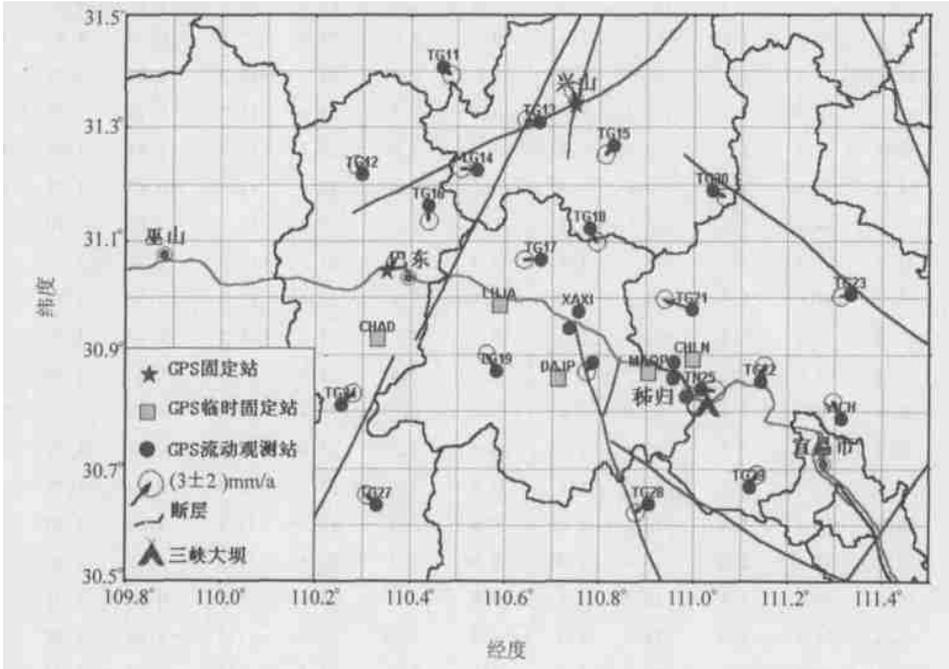


图 1 长江三峡 GPS 测站分布及其在华南参考系下的水平运动

我们将三峡地区的所有 GPS 观测数据与中国境内的 10 多个 IGS 站以及“中国地壳运动观测网络”GPS 基准站数据进行联合处理, 以获得 ITRF00 框架下的测站坐标值和速度值. 计算以 GIPSY-OASIS II 软件为主, 处理算法与文献[14, 15]一致. 数据处理结果基线各分量的测定精度, 东西向、南北向优于 $3\sim 5$ mm, 垂直向优于 $9\sim 12$ mm, 与“中国地壳运动观测网络”GPS 基线定位精度相当^[16]. 速率的测定精度东西向、南北向优于 2.0 mm/a, 垂直向优于 3.2 mm/a(表 1), 满足监测三峡库区地壳形变的需要. 为了保证处理结果的可靠性, 对同样的数据, 我们还采用 Bemese GPS Software 4.2 软件进行了比对解算, 结果显示基线各分量的测定精度, 水平向优于 $1\sim 3$ mm, 垂直向优于 $3\sim 6$ mm, 与 GIPSY-OASIS II 的结果一致甚至

稍优, 有关情况将另文介绍.

图 1 还给出了三峡 GPS 监测网各测站在华南参考系下的水平运动速率, 华南参考系是以“中国地壳运动观测网络”基准站(WUHN, SHAO, GUAN, LUZH, XIAM, QION, YONG), 以及巴东、兴山 GPS 站的残余速率的平方和最小来实现, 表征华南参考系刚性运动的 Euler 矢量的三分量分别取 $\omega_x = -0.0501^\circ/\text{Ma}$, $\omega_y = -0.2046^\circ/\text{Ma}$ 和 $\omega_z = 0.2551^\circ/\text{Ma}$ ^[14, 17]. 相对于华南参考系, 各测站水平向运动速率在 $0\sim (3\pm 2)$ mm/a. 很显然三峡 GPS 测站相对于华南块体的相对位移不明显, 与地质资料所揭示的华南块体新构造运动结果基本相同^[18, 19]. 表 1 给出了 GPS 测站的实测速度(ITRF00)和华南参考系下的运动速度, 并给出了它们在地质模型 NNR-NUVEL1A 中的估算速度.

表 1 GPS 测站在不同参考系的运动速度

(单位: mm/a)

GPS 测站 ^{a)}	经度 (°)	纬度 (°)	GPS 实测(ITRF00)				NNR-NUVELIA		GPS 实测(相对于华南块体)					
			E	RMS	N	RMS	U	RMS	E	N	E	RMS	N	RMS
GUFU	110.7	31.3	34.1	1.4	-12.4	1.4	2.0	2.2	23.4	-11.3	-0.20	1.61	0.91	1.64
BADN	110.3	31.0	35.0	1.4	-12.5	1.4	-1.1	2.2	23.4	-11.2	0.64	1.61	0.64	1.64
YICH	111.3	30.7	33.4	1.4	-11.7	1.4	2.0	2.4	23.3	-11.4	-0.83	1.70	1.73	1.67
TG11	110.4	31.4	34.7	1.5	-13.5	1.4	0.2	2.6	23.4	-11.2	0.39	1.73	-0.37	1.69
TG12	110.2	31.2	34.1	1.5	-12.7	1.5	1.0	2.6	23.4	-11.2	-0.26	1.78	0.43	1.72
TG13	110.6	31.3	33.3	1.5	-13.1	1.4	-0.1	2.5	23.4	-11.3	-0.93	1.72	0.18	1.69
TG14	110.5	31.2	32.9	1.4	-13.0	1.4	0.7	2.4	23.4	-11.2	-1.44	1.69	0.17	1.67
TG15	110.8	31.2	33.8	1.5	-13.8	1.4	0.4	2.5	23.4	-11.3	-0.47	1.73	-0.47	1.69
TG16	110.4	31.1	34.4	1.4	-14.5	1.4	-1.1	2.4	23.4	-11.2	0.06	1.70	-1.32	1.68
TG17	110.6	31.0	32.8	1.5	-13.3	1.4	-3.5	2.5	23.4	-11.3	-1.47	1.72	0.00	1.69
TG18	110.7	31.1	34.8	1.5	-14.3	1.4	-3.7	2.5	23.4	-11.3	0.59	1.73	-1.02	1.69
TG19	110.5	30.8	33.2	1.5	-11.6	1.4	0.5	2.5	23.4	-11.2	-1.03	1.72	1.57	1.69
TG20	110.7	30.8	34.0	1.5	-13.7	1.4	2.1	2.6	23.4	-11.3	-0.25	1.74	-0.42	1.69
TG21	110.9	30.9	30.5	1.5	-12.0	1.4	5.8	2.5	23.4	-11.3	-3.69	1.72	1.34	1.68
TG22	111.1	30.8	34.6	1.5	-12.1	1.4	0.6	2.5	23.4	-11.4	0.35	1.72	1.27	1.68
TG23	111.3	31.0	33.9	1.5	-13.5	1.4	0.3	2.6	23.3	-11.4	-0.24	1.74	-0.06	1.69
TG24	110.2	30.8	35.4	1.4	-12.1	1.4	0.8	2.5	23.5	-11.2	1.06	1.70	1.04	1.68
TG26	111.0	30.8	34.8	2.0	-13.4	1.9	-0.6	3.2	23.4	-11.3	0.61	2.36	-0.06	2.24
TG27	110.3	30.6	33.6	1.5	-12.4	1.4	-0.8	2.5	23.4	-11.2	-0.67	1.71	0.72	1.69
TG28	110.9	30.6	33.1	1.4	-14.0	1.4	-1.2	2.4	23.4	-11.3	-1.09	1.69	-0.64	1.67
TG29	111.1	30.6	34.8	1.5	-12.4	1.4	1.5	2.5	23.4	-11.3	0.60	1.72	0.95	1.68
TG30	111.0	31.1	35.1	1.5	-13.8	1.4	1.6	2.5	23.4	-11.3	0.89	1.73	-0.42	1.69

a) TG25 站被破坏

2 数值模拟

数值模拟分两步进行. 首先通过该地区的数字高程模型(DEM)^[20]及国家测绘局 1:25 万 DEM 和

蓄水前沿江各个水文站的水深资料, 模拟了三峡水库内各点水位的增加值及水库新增的库容量, 为了提高模拟精度, 采用了分段、分块模拟的方法, 根据长江的走向和地形, 从大坝至重庆将长江分为 21

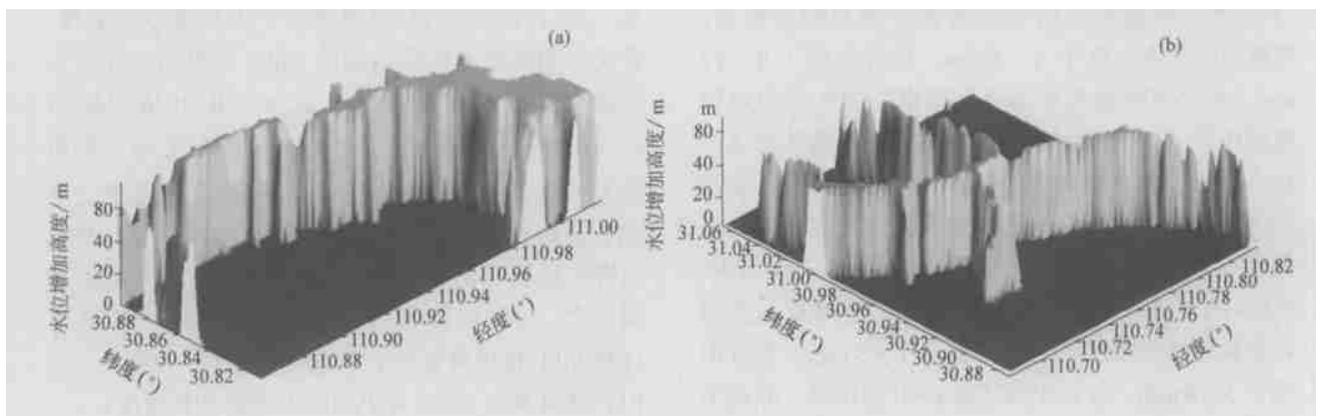


图 2 三峡水库首次蓄水后新增水体模拟

(a) 坝区; (b) 香溪段

段, 模拟的水库新增库容量为 $104 \times 10^8 \text{ m}^3$, 图 2 为部分水体的模拟结果. 模拟中忽略了由于地下水变化可能增加的负荷.

由于蓄水的时间很短, 假定三峡库区的岩体为均匀、各向同性的弹性体, 水库负荷对库区的弹性变形过程, 可由负荷和相应 Green 函数的卷积获得^[21, 22, 13], 即

$$u = \int_A G(|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|) \rho(\mathbf{r}') H(\mathbf{r}') dA, \quad (1)$$

式中 \mathbf{r} 为地表计算点位置, \mathbf{r}' 为新增水体载荷范围 A 内的点位置, $\rho(\mathbf{r}')$ 为水密度, $H(\mathbf{r}')$ 为 \mathbf{r}' 所在位置的水位增加值, G 为载荷 Green 函数, 垂直位移的 Green 函数可表示为

$$GH(\theta) = \frac{a}{m_e} \sum_{n=0}^{\infty} h_n P_n(\cos \theta), \quad (2)$$

其中 a 为地球半径, m_e 为地球质量, h_n 为径向的载荷 Love 数, 表示地球的弹性性质, 并以 n 阶球谐函数的系数给出, $P_n(\cos \theta)$ 是 n 度的 Legendre 多项式, θ 为 \mathbf{r} 与 \mathbf{r}' 之间的角距.

模拟计算采用国际通用的地球模型之一 Gutenberg-Bullen 模型^[21, 23], 负荷 Love 数为 Farrell 根据 Gutenberg-Bullen 模型推算的结果^[21], (2) 式中取地球半径 $a = 6371000 \text{ m}$, 地球质量 $m_e = 5.9736 \times 10^{24} \text{ kg}$, 水体载荷单元为 $46.7 \text{ m} \times 46.7 \text{ m} \times$ 水位增加高度 (m), 该单元尺寸大小完全可以满足模拟计算的精度要求^[11, 12], 对三峡库区 $106^\circ 24' \text{ E} \sim 111^\circ 52' \text{ E}$ (坝址—重庆) 及 $28^\circ 46' \text{ N} \sim 31^\circ 56' \text{ N}$ 进行了垂直形变场模拟. 由于地表质量负荷的响应与角距有关, 在顾及计算速度的前提下, 取水库外围的负荷点密度为 $2' \times 2'$, 水库内负荷点由 $5'' \times 5''$ 的网格及一些离散的特征点组成, 同时对 GPS 点位的负荷形变也进行了模拟, 结果见图版 I A 和 I B-(c). 模拟的效果与 wang 针对库首区所作的模拟结果基本相同^[11, 12].

3 负荷形变

图版 I B-(a), (b) 分别给出了蓄水后 1 个月和 3 个月三峡库区各 GPS 测站高程变化的三维图

像, 这一结果反映了蓄水造成的地壳垂直位移的基本状况: 垂向主要变形区域出现在坝址至香溪库段, 近岸点的变形值约在 $-20 \sim -40 \text{ mm}$, 至巴东库段近岸点垂直形变减小为约 -10 mm . 垂直形变表现为随距库心的距离增大而减小, 与高士均^[7] 和曾心传^[8] 的 180 m 水位模拟结果趋势类似; 垂直形变实测值表现为随距库中心距离增加迅速减小的趋势, 在距岸 $3 \sim 5 \text{ km}$ 后即难以分辨, 我们认为在 135 m 的蓄水高程时水体载荷的净增量尚不是足够大, 作用范围比较有限.

实测结果与 Wang^[11, 12] 在 138 m 水位载荷时给出的结果以及我们自己的数值模拟结果比较: 模拟结果和实测结果出现峰值的范围基本能够对应, 且均以坝址至香溪段为主要变形区, 巴东库段为垂直形变的第三大峰值区域; 坝址附近 (TPXN, YINX 等 GPS 站), Wang 的计算得到的垂直位移约为 -28 mm , 我们的模拟结果为 -27.8 mm , 蓄水后两期的 GPS 观测结果反应同一地区垂直位移南北两岸分别约为 $-31.1, -32.4 \text{ mm}$ 和 $-27.1, -46.2 \text{ mm}$; 在香溪库段 (XAXI, GUOJ 等 GPS 站), 模拟结果最大值 -23.8 mm , 蓄水后两期的 GPS 观测结果南北两岸分别为 $-20.5, -35.2 \text{ mm}$ 和 $-46.4 \text{ mm}, -42.1 \text{ mm}$.

上述实测结果中 GPS 测量的误差应在 $\pm 10 \text{ mm}$ 左右.

我们对蓄水前后 GPS 结果水平向的统计表明, 绝大多数测站间水平相对运动在 $0 \sim (5 \pm 3) \text{ mm}$, 水平形变未发现数值较大的明显突变, 蓄水造成的水平形变应不至超过 $5 \sim 10 \text{ mm}$.

总体而言, 数值模拟与 GPS 观测对应点的对比表明水体荷载所造成的库区地壳形变的量级基本一致, GPS 观测到的沉降短期内应归之于弹性地壳的变形响应.

4 讨论

(1) GPS 的垂向测量误差一般是水平向的 $2 \sim 3$ 倍, 误差来源除随机误差外, 还有系统性偏差, 特别是季节性变化, 我们对蓄水效应的变形观测, 蓄水前 (5 月下旬) 和蓄水后的首次观测 (6 月) 集中在同一季节, 季节性变化不会对垂直向定位产生主要影响, 蓄水后的二次观测 (9 月) 则未考虑季节性差

异问题; 我们采用相对定位, 得到的是各站间的相对高程变化, 一定程度抑制了系统性误差, 如全场的变形测定结果与模拟结果的基本一致性说明观测的误差控制在不影响总结论的范围内, 表明 GPS 结果可以反映足够大(5 mm 以上)的地壳垂直形变。

(2) 由于 GPS 点位主要分布于库岸两侧, 而水体负荷所产生的地壳形变响应应以库中心为最大, 因此 GPS 观测虽然可以监测区域的垂直变化, 但不能全面反映库区尤其是库盆中心的变化, 负荷对地球表面的形变影响会随着地表点位到负荷位置的角距的增加而下降。为了获得三峡库区高精度的垂直形变运动图像, 应该通过实测结果(GPS、水准、重力)的反演计算, 提高负荷形变模型中的地球物理参数的准确度, 将模拟结果与实测结果结合。

(3) 模拟所得到的新增水体为 $10.4 \times 10^9 \text{ m}^3$, 从宏观上可反应水库蓄水后荷载的增量, 但局部范围较大的误差肯定是存在的。此外, 因未考虑地下含水层蓄水的增加, 也可能导致局部地区水体负荷估算的误差(如在香溪一带), 采用精度更高的 DEM(如 USGS 刚刚发布的 3" 分辨率的全球 DEM)和蓄水后的测深数据应能得到符合度更好的结果。

(4) 在数值模拟计算中假定了介质为均匀、各向同性的连续弹性体, 水荷载对库区的影响是弹性变形过程, 但均匀弹性的假定并不能准确反映三峡库区所有库段的实际情况, 通过修正模型的各种特征参数, 并以实测结果作为约束条件, 可以更好地预测 156 和 175 m 水位的蓄水结果。

(5) 岩石圈的结构特性和强度决定了其变形方式, GPS 实测结果与模拟结果的对比, 似可反应不同库段的不同构造特点及岩石强度的差异。坝址以上至九湾溪库段和香溪宽谷都是三峡水库蓄水比较集中的地区, 结合岩性地质构造、地形地貌及岩溶水文地质等条件分析^{6, 19, 24}, 坝址区至庙河 16 km 为前震旦纪结晶花岗岩体, 岩石整体性强, 岩体内断层、裂隙不发育, 且大多胶结良好、透水性微弱, 香溪至巴东官渡口段以古生代、中生代碳酸盐岩类地层为主, 夹红色碎屑岩(秭归盆地)及煤层, 香溪附近断层发育较多, 岩石表面风化严重, 为库水渗透提供了条件。香溪 GPS 测站所在区域即属由泥灰岩和砂岩组成的碎屑岩, 抗压强度和切变模量明显低于坝址地区的花岗岩体, 可能是 GPS 实测结果

反映其变形速度较快和幅度较估算为大的主要原因。

5 结论

我们首次利用 GPS 测量获得三峡水库因蓄水而造成的库区地壳形变的基本运动学图像: 水平形变较小(0~5 mm), 垂直形变明显(-10~-40 mm), 垂直形变的主要区域集中在坝址至香溪近岸(3~5 km)库段, 这一图像与数值模拟结果基本一致, 荷载造成的垂直形变未显著异于模拟值, 表明蓄水后的地壳形变短期内主要来自于上地壳的弹性响应。

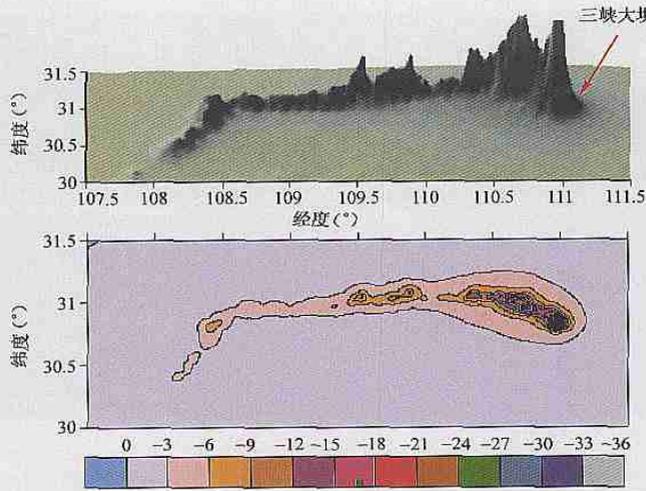
以往成层弹性半空间模型计算结果显示^[9], 丹江口水库蓄水后的最大沉降为 7.0 cm, 新丰江水库 9.0 cm, 卡里巴尔(Koribar)水库达到 23.5 cm, 作为典型的峡谷型水库, 三峡水库与湖泊型水库相比, 水荷载对地壳力学状态的影响要小得多。长江三峡水库采用分期蓄水的方案, 第一期蓄水产生地壳变形的幅度有限, 近期负荷改变而诱发中强地震的可能性较小, 这一点也为蓄水后库区地震事件的统计所证实^[25]。

蓄水后水荷载产生的附加应力场、孔隙压力扩散和渗流效应会随时间的推进在地壳变形中有不同的反应; 地壳深部物质与地表物质在变形效应和机制上的不同, 会随荷载作用的传递影响到地表物质的运动方式, 通过蓄水后的多期 GPS、水准以及重力观测, 不仅可以进一步确定发生地表形变的范围和数值, 还有可能观测到岩石圈的弹-塑-粘的流变行为。三峡水库的蓄水过程, 可以作为地球动力学“控制试验”的特殊例子, 为我们提供运用大地测量和正反演方法研究可控负荷下岩石圈运动学和动力学的最好机会, 后续更深入的工作正在进行之中。

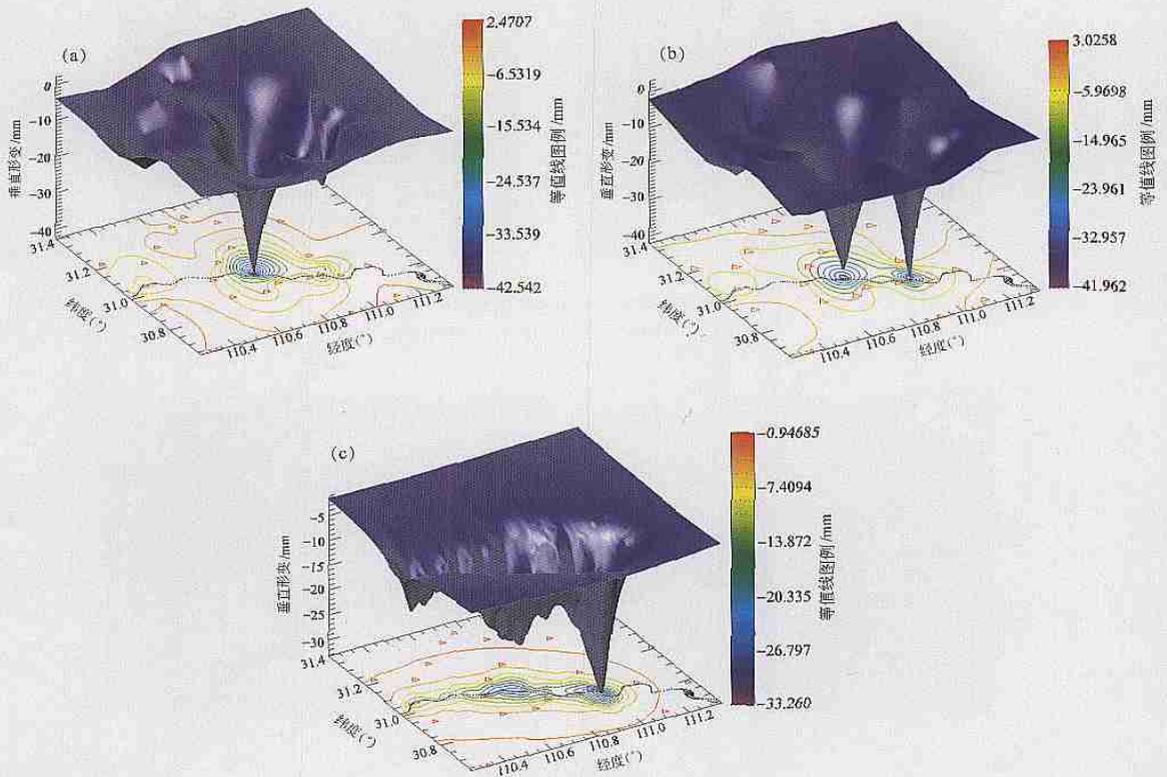
参 考 文 献

- 1 Gupta H K. Artificial water reservoirs and earthquakes: A world wide status. *Gerlands Beitrage Zur Geophysik*, 1990, 99: 221
- 2 Simpson D W. Seismicity changes associated with reservoir loading. *Engineering Geology*, 1976, 10: 123
- 3 Gough D I, et al. Load-induced earthquakes at lake Kariba. *Geophys J R Astr Soc*, 1970, 21: 79
- 4 沈崇刚, 等. 新丰江水库地震及其对大坝的影响. *中国科学*, 1974, 2: 184.

- 5 邢灿飞, 等. 长江三峡工程地壳形变监测网络. 大地测量与地球动力学, 2003, 23(1): 114
- 6 李安然, 等. 三峡水库诱发地震的总体环境组合条件. 见: 长江三峡工程对生态和环境影响及其对策研究论文集. 北京: 科学出版社, 1987. 553~563
- 7 高士均, 等. 长江三峡地区地壳应力场与地震. 北京: 地震出版社, 1992. 79~114
- 8 曾心传, 等. 三峡水库水压应力场、形变场和孔压场的研究. 见: 长江三峡工程对生态和环境影响及其对策研究论文集. 北京: 科学出版社, 1987. 585~595
- 9 中国科学院测量与地球物理研究所一室三峡组. 三峡地区重力场和应力场研究. 见: 长江三峡工程对生态和环境影响及其对策研究论文集. 北京: 科学出版社, 1987. 596~612
- 10 虞廷林. 地壳形变与水库诱发地震. 地壳形变与地震, 1991, 11(2): 8
- 11 Wang H. Surface vertical displacements and level plane changes in the front reservoir area caused by filling the three gorges reservoir. *J Geophys Res*, 2000, 105(13): 211
- 12 Wang H, et al. Prediction of surface horizontal displacements and gravity and tilt changes caused by filling the three gorges reservoir. *J Geod*, 2002, 76: 105
- 13 Boy J B, et al. Time varizable gravity signal during the water impoundment of China's three-gorges reservoir. *Geophys Res Lett*, 2002, 29(24): 53
- 14 Wang Q, et al. Present-day crustal deformation in China constrained by Global positioning system measurements. *Science*, 2001, 294: 574
- 15 王琪, 等. 中国大陆现今地壳运动与构造变形. 中国科学, D 辑, 2001, 31(7): 529
- 16 牛之俊, 等. 中国地壳运动观测网络. 大地测量与地球动力学, 2002, 22(3): 88
- 17 王敏, 等. 现今中国大陆地壳运动与活动块体模型. 中国科学, D 辑, 2003, 33(增刊): 21
- 18 张培震, 等. 中国大陆的强震活动与活动块体. 中国科学, D 辑, 2003, 33(增刊): 12
- 19 彭光忠. 三峡工程对库岸稳定性的影响和评价. 见: 长江三峡工程对生态和环境影响及其对策研究论文集. 北京: 科学出版社, 1987. 613~634
- 20 乔学军, 等. 利用INSAR技术获取三峡地区的数字高程模型. 大地测量与地球动力学, 2003, 23(2): 122
- 21 Farrell W E. Deformation of the earth by surface loads. *Rev Geophys*, 1972, 10: 761
- 22 毛伟建. 地球表面质量负荷的静态响应. 地球物理学报, 1984, 27(1): 74
- 23 张少泉. 地球物理学概论. 北京: 地震出版社, 1987. 182~183
- 24 袁登维, 等. 长江三峡工程坝区及外围地壳稳定性研究. 武汉: 中国地质大学出版社, 1996
- 25 李胜乐, 等. 长江三峡水库蓄水后的首发微震群活动. 大地测量与地球动力学, 2003, 23(4): 75



A 蓄水荷载引起的三峡库区垂直形变场(单位:mm)



B 三峡水库首次蓄水后的垂直形变(单位:mm)

(a) 蓄水后一个月内垂直形变的 GPS 实测结果;(b) 蓄水后三个月垂直形变的 GPS 实测结果;(c) 蓄水前后垂直形变的数值模拟结果