

文章编号: 0253-3782(2006)05-0485-08

三峡水库首次蓄水引起的重力变化 及其机制的初步研究^{*}

孙少安^{1, 2, 3), *} 项爱民^{1, 2, 3)} 朱 平⁴⁾ 申重阳^{1, 2, 3)}

1) 中国武汉 430071 中国地震局地震研究所

2) 中国武汉 430071 地壳运动与地球观测实验室

3) 中国武汉 430071 中国地震局地壳应力研究所武汉创新基地

4) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

摘要 介绍了三峡工程蓄水前后的精密重力测量和坝区库水荷载、地壳变形、地下水位变化以及降雨等各种因素引起的重力效应. 研究表明: ① 库坝地区: 水荷载的重力效应最为显著, 最大重力变化约为 $200 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$; 地壳变形的重力效应存在, 但量级和范围均有限, 其影响范围离库岸约 5 km; 地下水位变化的重力效应则只存在于局部地带, 不具区域性; 降雨对精密重力测量结果的影响不容忽视. ② 库首地区: 最大重力变化区域在香溪附近, 蓄水后的重力场变化需要继续监视和深入研究.

关键词 三峡工程 首次蓄水 重力变化

中图分类号: P312.4 **文献标识码**: A

引言

在建设三峡工程过程中, 在库首区(三斗坪—巴东库段)建立的三峡重力监测网就不间断地进行着每年一次的观测, 为有效地检测库首区及周边地区的构造活动以及该区的地震监测与预报提供了大量的高精度资料. 但是, 每年一次的复测周期和已有的网点分布, 对三峡工程库首区内的几个潜在地震危险区都不能全面有效地进行监控, 更难以监测该区 5 级或 5 级以下的地震, 以及检测在三峡工程蓄水至 135 m 以后库首区库水荷载的增加及地下水渗透的各种效应等. 为此, 在已有的工作基础上, 近年来借助有关部门的大力支持, 完善了监测网络的结构, 增加了重复观测的时空密度, 获取了与三峡工程蓄水过程相关的重力观测资料.

本文介绍的是三峡工程蓄水前后在库首区开展的精密重力测量工作及取得的初步成果, 特别是在蓄水过程中观测到的库坝区域的重力变化.

1 三峡水库坝区监测网概况

三峡地区的地震重力监测网始建于 1982 年, 当时的主要目的是试图通过监测区域重

^{*} 科技部社会公益研究专项(2004DIB3J131)资金资助.
2006-02-13 收到初稿, 2006-08-03 决定采用修改稿.

[†] 通讯作者. E-mail: ssha525@163.com

力场随时间的变化,尤其是仙女山潜在地震危险区的重力变化,研究构造活动的规律及其与地震的关系,为葛洲坝工程的安全运行提供保障.最初建立的地震重力监测网覆盖面积不大,主要由长江南北两侧的几条支线组成,共设观测点约 30 个.其中,大多数采用沿线的一等水准点作为观测点位,南北测线分别在宜昌和香溪靠轮渡连接成环;另有一条支线从宜昌沿北岸伸至太平溪,由于工程干扰较大、测点损毁严重,该测线在三峡工程建设初期被放弃.

为了适应三峡工程诱发地震监测的需要,1998 年对原三峡地震重力监测网进行了一次较大规模的改造.首先是将原测网向西扩展至巴东一带,实现了对兴山—巴东潜在地震危险区的监控;其次是把原测网中观测条件较差、损坏较严重的测点进行了修缮和重新选埋;再者,引入了两个国家高等级重力网的测点和一部分与测区 GPS 观测点重合的重力点,组成测网的各条测线与库首区的垂直形变网线路重合(邢灿飞等,2002).部分点位直接并入垂直形变网,这将有利于监测资料的综合研究.改造后的测网由 3 个环 4 条支线构成.

2003 年是三峡工程实现蓄水、通航、发电等二期目标的一年,也是我们研究库水荷载作用与地壳动力学过程的最佳时期.经模拟计算,三峡水库蓄水至 135 m 以后,库水荷载增加引起的重力变化将达到 $200 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 左右(Wang *et al.*, 2002; 杜瑞林等, 2004b),尤其是坝前的库盆地区更为显著.但是,这种效应随距离衰减很快,大约在离开库盆中心 10 km 左右消失.为了监测这种效应,蓄水前以坝前库盆区为中心建立了两条短剖面测线:一条测线横跨库盆,测线全长约 20 km,设点 10 个,靠近库盆部分点距较小,然后逐渐加大;另一条测线以大坝为中心沿库盆南岸布设,测线长约 10 km,设点 5 个,其中有 3 个点与跨库盆测线点重合.短剖面测线的部分点位选用了库盆沉降、库盆谷宽以及三峡井网(车用太等, 2002)的测点.

图 1 是三峡库首区全部重力监测网线的点位分布及构造示意图.由图可见,该网基本控制了三峡库首区内的几个潜在地震危险区.

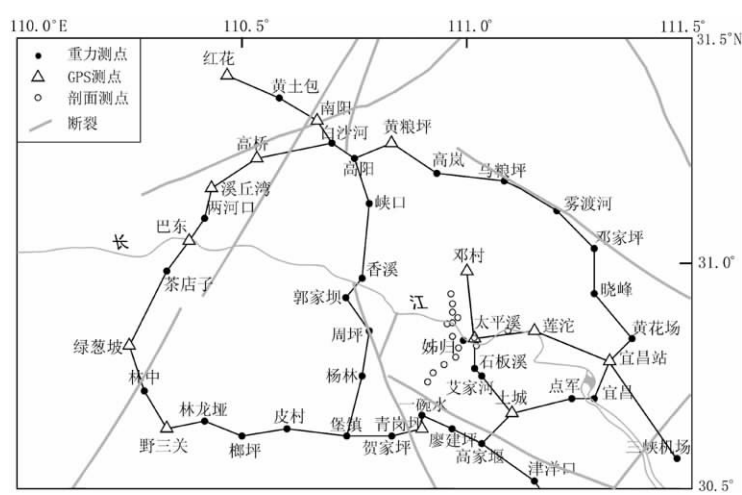


图 1 三峡库首区重力监测网(线)点位分布及构造示意图

2 精密重力测量及资料处理

由于三峡工程蓄水的原因, 2003 年对三峡库区重力网的全部测点共进行了 3 次复测, 时间分别为 2003 年 4 月下旬、7 月上旬和 10 月下旬。为了获得三峡工程蓄水前库首区的背景重力场资料, 为今后研究和判断各种异常提供重要依据, 我们将第一次观测时间安排在 4 月下旬, 蓄水到位以后的观测时间为 7 月上旬。主要是考虑到三峡工程蓄水至 135 m 的时间是 6 月中旬, 这时由库水荷载增加产生的直接重力效应已经到位, 但因地下水渗透以及地形变等因素产生的间接重力效应可能有些滞后。10 月下旬的最后一次观测, 则试图检测蓄水以后的构造活动信息。

库坝区域两条短剖面测线的观测时间, 是根据三峡工程的蓄水进程来决定的。首次观测的时间为 2003 年 5 月 25 日。此时, 库区水位已达 80 m 左右, 以后每上涨 20 m 左右观测一次, 最后一次的观测时间为 2003 年 7 月 11 日。总共进行了 7 次观测(2003 年 5 月 25 日, 水位 81.5 m; 5 月 31 日, 水位 104.8 m; 6 月 5 日, 水位 117.8 m; 6 月 11 日, 水位 135.0 m; 6 月 16 日, 水位 135.0 m; 7 月 2 日, 水位 135.0 m; 7 月 11 日, 水位 135.0 m), 其中, 水库水位到达 135 m 以前, 共观测了 3 次。

所有重力观测, 都采用 LCR-G 型重力仪完成, 观测精度约为 $10 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。观测资料的处理方法较之以往的方法(孙少安等, 2002)更加细化。库坝区重力点值的起算基准, 选择距大坝较远的一个不受蓄水影响的基岩点, 该点也是库首区重力网点; 库首区则选择相对稳定的黄陵背斜区内的一个基岩点作为重力点值的起算基准。在以 1999 年以前各期资料的联合平差结果作为重力变化基准时, 剔除了其中重力场变化较大的几期资料和偶然误差较大的测点资料, 使得所建立的基准更加合理、更加具有代表性。区域重力场变化图的制作则采用 Kriging 法对不规则分布在测区范围内的测点重力变化值进行网格化, 然后用 7×7 阶的距离加权矩阵滤波。其中, 将矩阵中心点的权设为 1, 每离开中心点一个网格单位, 权减小 0.25, 图形边界则因其多属局部外推结果, 不予考虑。经过滤波, 较好地消除了偶然误差、地壳浅表和局部异常源的干扰, 突出了地壳深部和区域异常源的贡献。此外, 对重力变化在时空域上不具连续性和趋势性的测点资料, 在资料处理过程中予以剔除, 使得区域重力场的变化图更真实地展示研究区重力场的变化特征。

3 库坝区重力变化

图 2 为三峡工程蓄水前后坝区附近的局部重力场变化, 主要由与蓄水过程同步进行的短剖面观测资料得到。该图展示的重力变化均以首次观测的资料为参考基准。图中实线区为重力增加的区域, 虚线区为重力下降的区域。由图 2 可见, 蓄水过程中, 即 2003 年 6 月 11 日以前, 重力增加的区域集中在库区附近, 向南北两侧扩展不大, 这表明库水荷载的直接重力效应比较明显, 最大重力变化约 $200 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$, 地下水渗透和地形变引起的间接重力效应存在, 但相对要弱一些; 而 2003 年 6 月 10 日蓄水到位以后, 重力增加的区域明显向两侧延伸, 显示出间接重力效应的加强, 其影响范围离库岸 5 km 左右。

对坝区新增库水荷载产生的重力效应的精密数值模拟结果与图 2 所示的总体形态基本一致。尽管在影响量级和范围上有些差异, 但它仍能从理论上证明我们实际观测结果的真实性和库水荷载对蓄水后坝区重力场变化的重大贡献(杨光亮等, 2005)。同时, 也证明了

我们剖面测线布设方法和路线选择的合理性.

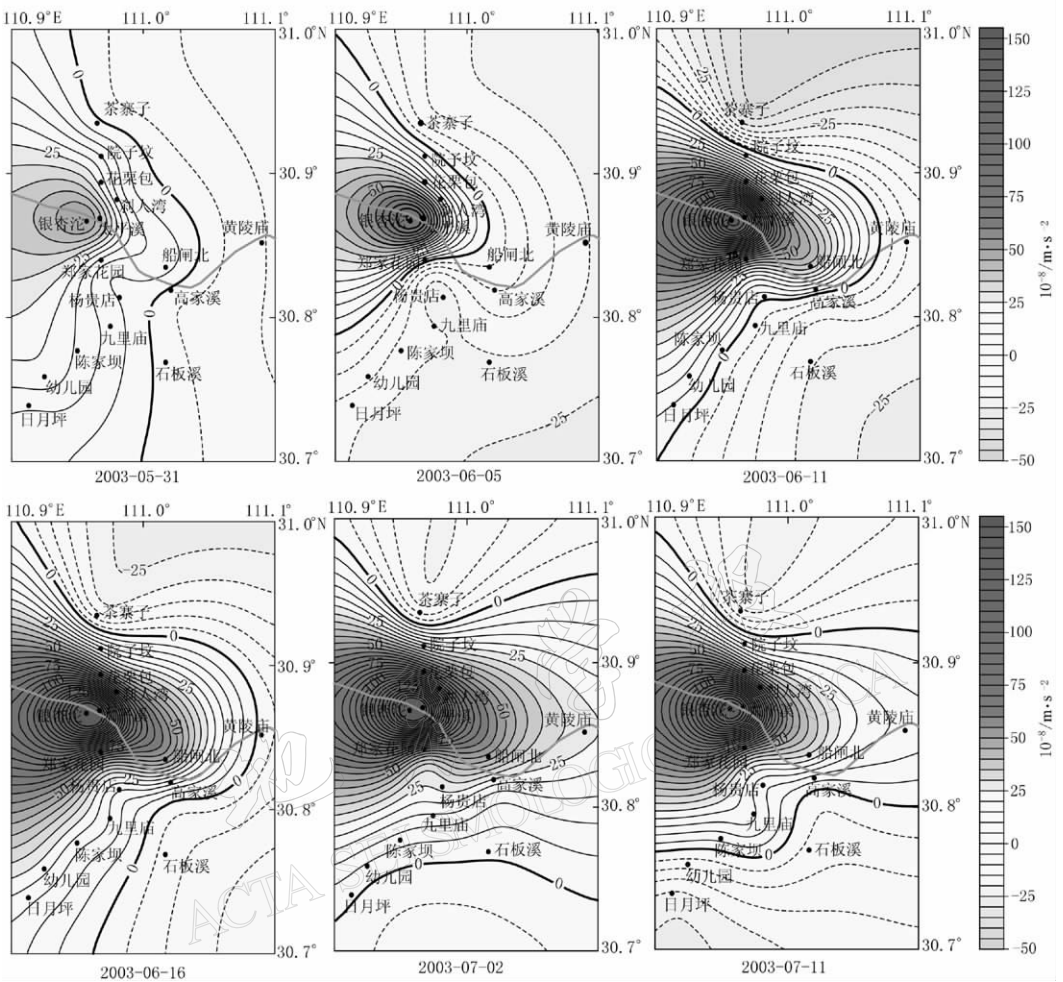


图 2 三峡坝区蓄水前后的局部重力场变化(单位: 10^{-8} m/s^2) (孙少安等, 2004)

根据地球重力场理论, 图 2 展示的坝区重力场的变化除了质量增加(新增库水荷载)的效应以外, 还有高程变化(构造活动、库盆沉降等)和质量迁移引起的密度分布变化(土壤湿度和地下水位变化等)的综合效应.

三峡坝区内外布设了垂直位移监测网, 为测量建筑物的沉降提供参考基准, 并测量近坝区的库盆沉降和地壳变形. 网点主要有双金属标和测温钢管标两种类型. 图 3a 是根据长江水利委员会综合勘测局完成的库盆沉降监测成果绘制的坝区垂直形变图. 坝区的垂直形变量不大, 最大沉降幅度也不足 20 mm. 最大沉降区域基本集中在库盆中心部位, 沉降量随远离库岸距离的增加而衰减, 而且北侧衰减速率较南侧快. 库盆沉降监测成果与大面积水准测量与 GPS 观测反映的坝区垂直位移的变化形态和量级基本一致(杜瑞林等, 2004a).

由于坝区地层岩性多为基性和中基性火成岩, 其孔隙度较小, 在整个蓄水过程中地层密度变化较小. 因此, 在考虑沉降产生的重力效应时, 可以忽略地壳的密度变化, 把坝区

垂直形变与重力变化的关系近似于自由空间梯度看待，即

$$\delta g = -0.3086 \delta H \tag{1}$$

式中， δg 为重力变化， δH 为高程变化， -0.3086 为正常高度改正系数。图 3b 是按上述关系转换后的坝区垂直形变因素引起的重力效应。由图 3b 不难发现，沉降对坝区首次蓄水后综合重力效应的贡献极小，其最大变化值也在重力仪的观测精度范围以内。但图 3 展示出一个有意义的现象：坝区垂直形变的零值线位置和走向与图 3b 中重力变化零值线的位置和走向吻合较好。这种一致性究竟是坝区地质环境(地层岩性等)，还是构造环境(构造部位等)所致，将有待进一步研究。

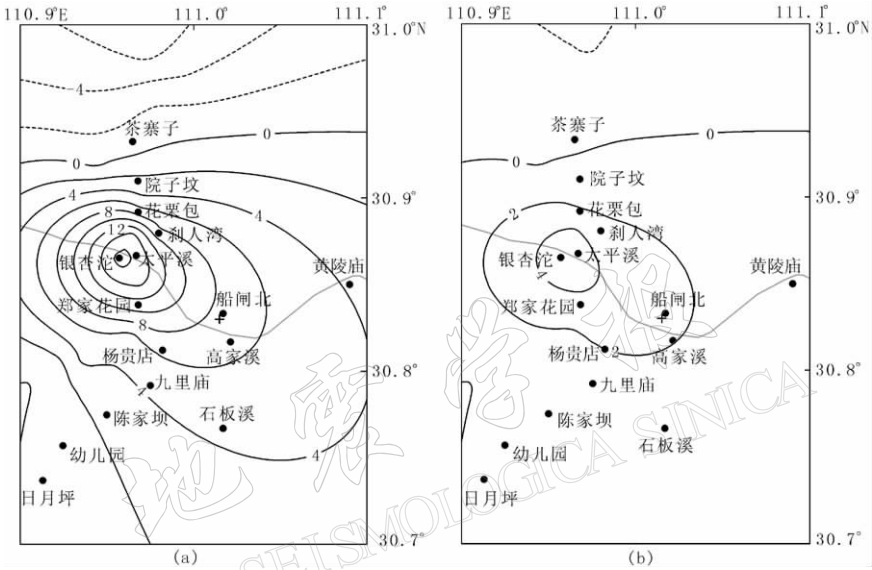


图 3 三峡坝区蓄水后的垂直形变及重力效应(单位： 10^{-8} m/s^2)
(a) 垂直形变；(b) 重力变化

根据车用太等(2004)对蓄水前后三峡井网资料的研究，认为水库蓄水会影响地下水位的变化。在坝区的 4 口井中，北岸的 2 号和 4 号井的水位变化较为明显，其中，2 号井水位的最大升幅大于 3.7 m；南岸的两口井没有异常变化。由坝区水文地质环境(王清云等，2003)可知，该区岩层除表层风化壳具一定透水性外，岩体基本不透水，唯有断裂、裂隙具有一定的透水性。坝区 4 口井的井位资料也证实了该区地下水的类型主要为基岩裂隙承压水。由此可见，在坝区范围内，因蓄水导致地下水位变化的重力效应只存在于局部地带，不具区域性。因此，在对测点附近地层结构、裂隙分布等详细地质条件未知的情况下，定量估计蓄水后地下水位变化对观测点重力值的影响难度较大。

除了蓄水的因素以外，在进行重力观测期间，降雨造成的土壤湿度变化也会产生一定的重力效应，其影响是精密重力测量不能忽视的。我们在坝区进行重力观测的起止时间为 2003 年 5 月 25 日—7 月 11 日，其间秭归县茅坪气象台记录的总降雨量约为 200 mm，主要集中在 6 月下旬和 7 月初，蓄水期间基本无雨。由于观测剖面的多数测点处于同一地形地貌单元，因此气象条件也基本一致，我们假定总降雨量的影响全部作用于图 3b 的观测结果，那么，降雨对观测结果的重力影响可以采用均质无限平面层对地表某点的重力效

应公式进行近似估计，即

$$\delta g = 2\pi G \sigma \delta H \tag{2}$$

式中， σ 为水的密度， δH 为降水量. 带入相关参数后的估算结果约为 $8 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$. 尽管这是一个极端情况下的估算结果，但它仍然表明，降雨这种水文过程对高精度重力监测结果的影响应予以顾及.

从以上水文因素对坝区重力场的干扰量级分析，降雨和地下水位升降等短期变化的重力效应虽然不大，但要予以关注，尤其是那些受水文、气象因素影响较大的观测结果，进行相应的改正是非常必要的.

4 库首区重力变化

图 4 较详细地展现了三峡工程蓄水前后库首区重力场相对变化的空间形态. 其中，图 4a 是 2003 年 4 月相对于 2002 年 10 月的重力变化，基本代表蓄水前的库首区重力场变化特征；图 4b 是 2003 年 7 月初相对于 4 月底的重力变化，可以认为该图主要揭示了库水荷载增加产生的重力效应，而最大重力变化区域则集中在香溪附近，与用 GPS 观测资料解算的最大垂直形变区相吻合；图 4c 则反映的是蓄水至 135 m 以后的重力场变化特征，由于它是 2003 年 10 月相对于 7 月的重力变化，因此认为该图展示的重力变化形态基本上不含库水荷载的效应，但蓄水事件作为该图的背景是不容忽视的. 对比图 4a 与图 4c 就能发现，两图在形态上有较大的差异，尤其是正异常区的位置，由蓄水前的网区中南一带转移到了蓄水后的网区北部地区.

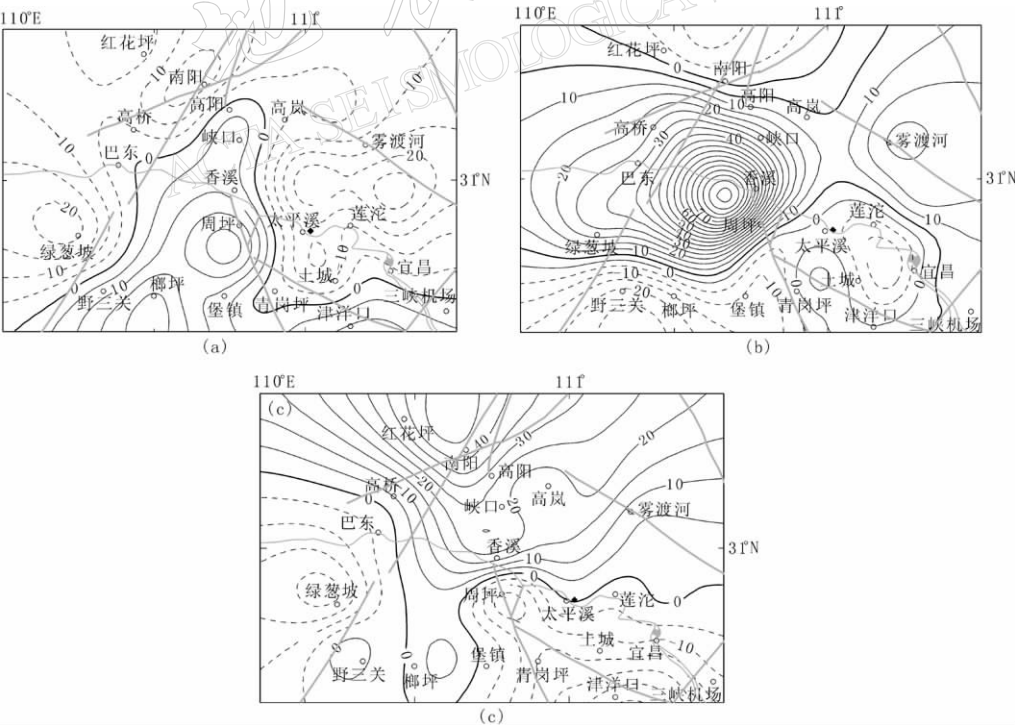


图 4 三峡库首区重力场的相对变化(单位: 10^{-8} m/s^2) (孙少安等, 2004)
(a) 2002 年 10 月—2003 年 4 月; (b) 2003 年 4—7 月; (c) 2003 年 7—10 月

由以往的研究结果(孙少安等, 2002)可知, 三峡库首区重力场的时空变化主要来自地下物质密度分布的变化, 而受地块升降的影响较小. 因此, 区域重力场的正异常应该反映地下物质正处于致密阶段, 也就是说该区地壳目前呈受力状态. 图 4 的变化结果表明, 库首区区域应力场现阶段的作用效果呈现出复杂多变和逐渐加强的态势. 比如, 异常变化上升区的空间位置随时间由南往北的迁移, 面积由小到大的扩张, 以及异常区走向由北东—南西向东西方向的转换等, 都说明了这一点. 值得重视的是, 上述现象的出现究竟是区域应力场的自然调整, 还是蓄水造成的地壳介质受力状态变化所致? 如果与蓄水有关, 二者的关系如何? 渗流条件怎样? 要回答这些问题, 尚需作更加深入细致地研究.

5 结语

本文的工作只是初步的, 利用重力重复观测资料研究库水荷载作用下的地壳动力学响应, 继而研究水库诱发地震的机理与预测是个全新的课题, 国内外可以借鉴的研究成果很少. 因此, 在现有监测能力和工作基础上, 继续深入地研究水库诱发地震的重力学及其相关问题, 具有极重要的科学价值和实际的减灾效果.

基于上述初步分析, 可获得如下几点认识:

- 1) 新增水体荷载对坝区重力场的影响显著, 其特点是量级大、范围小、随离开库盆中心的距离衰减很快.
- 2) 垂直形变因素的重力效应是存在的, 但其量级和范围均有限, 不足以影响坝区总体重力效应的空间分布形态, 但它能够证明蓄水后坝区地壳是基本稳定的.
- 3) 地下水位变化的重力效应只存在于局部地带, 不具区域性.
- 4) 降雨的重力效应虽然与蓄水无关, 但其对精密重力测量结果的影响不容忽视.
- 5) 库首区的最大重力变化区域集中在香溪附近, 与用 GPS 观测资料解算的最大垂直形变区相吻合.

除此之外, 蓄水后坝区北侧垂直形变与重力变化零值线空间展布的良好一致性, 以及重力变化、地壳变形和地下水位变化在坝区南北的不对称性等是我们今后需要深入研究的问题.

参 考 文 献

- 车用太, 鱼金子, 刘五洲, 等. 2002. 三峡井网的布设与观测井建设[J]. 地震地质, **24**(3): 423~431
- 车用太, 刘五洲, 颜萍, 等. 2004. 三峡井网地下流体动态在水库蓄水前后的变化[J]. 大地测量与地球动力学, **24**(2): 14~22
- 杜瑞林, 乔学军, 邢灿飞, 等. 2004a. 三峡二期工程蓄水后的垂直形变场[J]. 大地测量与地球动力学, **24**(1): 41~45
- 杜瑞林, 邢灿飞, 伍中华, 等. 2004b. 长江三峡库区地震地形变监测研究[J]. 大地测量与地球动力学, **24**(2): 23~29
- 孙少安, 项爱民, 李辉. 2002. 三峡工程库首区的重力场变化与构造活动[J]. 大地测量与地球动力学, **22**(3): 56~59
- 孙少安, 项爱民, 刘冬至, 等. 2004. 三峡工程蓄水前后的精密重力测量[J]. 大地测量与地球动力学, **24**(2): 30~33
- 王清云, 张秋文, 李峰. 2003. 长江三峡工程库首区诱发地震危险性研究[J]. 大地测量与地球动力学, **23**(2): 101~106
- 邢灿飞, 龚凯虹, 杜瑞林. 2002. 长江三峡工程地壳形变监测网络[J]. 大地测量与地球动力学, **23**(1): 114~118
- 杨光亮, 申重阳, 王晓权, 等. 2005. 三峡水库蓄水重力效应数值模拟[J]. 大地测量与地球动力学, **25**(1): 19~23
- Wang Hansheng, Hsu Hou Tse, Zhu Yaozhong. 2002. Prediction of surface horizontal displacements, and gravity and tilt changes caused by filling the Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Geodesy*, **76**: 105~114

GRAVITY CHANGE AND ITS MECHANISM AFTER THE FIRST WATER IMPOUNDMENT IN THREE GORGES PROJECT

Sun Shaoan^{1, 2, 3)} Xiang Aimin^{1, 2, 3)} Zhu Ping⁴⁾ Shen Chongyang^{1, 2, 3)}

1) *Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Wuhan 430071, China*

2) *Crustal Movement Laboratory, Wuhan 430071, China*

3) *Wuhan Base of the Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Wuhan 430071, China*

4) *Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing, 100081, China*

Abstract: In this paper we have analyzed precise gravity survey and gravity effects resulted from water loading, crustal deformation, ground water level change and precipitation before and after the water impoundment in the Three Gorges Reservoir. We found that: ① In dam area of the reservoir, gravity effect resulted from water loading is the most significant, maximum gravity change is $200 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$, but this effect is limited in terms of amplitude and range. It is about 5 km offshore gravity change can be observed. The gravity change caused by ground water level change is regional; and the impact of rainfall on it should not be neglected. ② At head area of the reservoir, the maximum gravity change is near Xiangxi. Monitoring the variation of gravity field and further study should continue in the future.

Key words: The Three Gorges Project; The first water impoundment; Gravity change