doi:10.3799/dqkx.2014.154

中国大型水库蓄水对近海相对海 平面空间变化的影响

王林松^{1,2,3},陈 超^{1,3},杜劲松¹,王秋革¹,孙石达¹

1. 中国地质大学地球物理与空间信息学院,湖北武汉 430074

2. 中国科学院测量与地球物理研究所大地测量与地球动力学国家重点实验室,湖北武汉 430077

3. 中国地质大学教育部长江三峡库区地质灾害研究中心,湖北武汉 430074

摘要:通过对我国大型水库蓄水的时空特征进行深入分析,统计得到近 60 年来大型水库蓄水累积的库容量已达到 697 km³, 占全国所有水库库容量的 83.3%及全球库容量的 6.5%;而 2000 年以来的大型水库数量及蓄水量的变化有明显的加速,库容 量的变化率为 16.7 km³/a,远高于 1950 年到 2000 年的 4.9 km³/a 的增长率;同时借助卫星重力(Gravity Recovery and Climate Experiment, GRACE)观测手段,对 2000 年以后主要分布在长江流域以南地区的水库进行水储量估算,结果显示 GRACE 仅能估算得到 63%的水库变化量,两者之间的差异可能反映了该地区地下水的长期变化.结合大型水库的分布位置 与库容量,基于海平面变化方程计算得到了中国近海相对海平面的空间变化.水库蓄水导致的渤海与东南沿海海域的相对海 平面上升明显,最大上升高度约为 8 mm;而 2000 年以后的水库对海平面的影响主要集中在东南沿海,其中南海海域较为突 出,上升高度约为 2~3 mm,在此期间蓄水造成的近海不同验潮站位置的海平面增长速度在 0.02~0.11 mm/a 之间变化. 关键词:大型水库蓄水;库容量时空分布;近海相对海平面;验潮仪;地球物理.

中图分类号: P312 **文章编号:** 1000-2383(2014)11-1607-10 **收稿日期:** 2014-04-10

Impact of Water Impoundment of Large Reservoirs on Spatial Variation of Coastal Relative Sea Level in China

Wang Linsong^{1,2,3}, Chen Chao^{1,3}, Du Jinsong¹, Wang Qiuge¹, Sun Shida¹

1. Institute of Geophysics & Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

 State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China

3. Three Gorges Research Center for Geo-Hazard, Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: The spatial-temporal characteristics of water impoundment of large reservoirs in China are analyzed in this study. The results show that 697 km³ of water has been impounded in the large reservoirs since 1950, which amounts to 83. 3% and 6.5% of the total reservoir storage capacity in China and the whole world, respectively. The numbers of large reservoirs and water storage capacity have been accelerating since 2000, and rate of the capacity change is 16. 7 km³/a, much higher than the increase from 1950 to 2000 at 4.9 km³/a. Meanwhile, terrestrial water storage in the south of the Yangtze River basin is estimated by using satellite gravity data by the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) after 2000, showing that the estimate by GRACE is only 63% of total reservoir volume changes, and the difference between GRACE and real reservoir storage variations suggests a long-term trend of groundwater in this area. Based on location and capacity of the large reservoirs and sea level equation, the dam-induced spatial distributions of coastal relative sea level (RSL) are calculated. The results depict that the RSL caused the water impounded behind dams rise most quickly in the Bohai Sea and southeast coastal areas, and the maximum of the RSL is approximately about 8 mm. Besides, impact of the water impoundment on the RSL mainly concentrates

基金项目:大地测量与地球动力学国家重点实验室开放基金项目(No. SKLGED2013-2-5-E);博士后科学基金第七批特别资助项目 (No. 2014T70753);湖北省自然科学基金(No. 2014CFB170);中国地质大学(武汉)地球内部多尺度成像湖北省重点实验室开放基金 (No. SMIL-2014-09).

作者简介:王林松(1983一),男,讲师,博士,主要从事绝对重力、时变重力及大地测量方面的研究. E-mail: wanglinsong. cug@gmail. com

in the southeast coast, where the rise of the RSL is approximately about 2 to 3 mm since 2000. And the rising rate of the RSL in the China coastal tide gauge locations is 0.02-0.11 mm/a.

Key words: water impoundment of large reservoir; capacity spatial and temporal distribution; coastal relative sea level; tide gauge; geophysics.

全球海平面变化特征及其相关影响因素一直是 各国学者研究所关注的焦点.海平面能够被作为全 球气候变化的主要证据之一,因此其通常被用以研 究海洋温度变化(海水热膨胀)以及大气、陆地与海 洋之间的质量交换(冰川与冰盖的融化)等热点问 题. 过去一个世纪的验潮站观测结果表明全球平均 海平面存在约 1.5~2.0 mm/a 的上升趋势(Douglas,1991;Church and White,2006),并且在最近几 十年内正在加速上升(Douglas, 1992; Nerem et al., 2006). 卫星测高(TOPEX/Poseidon, T/P)与卫星 重力(Gravity Recovery and Climate Experiment, GRACE)观测技术的发展,丰富了研究全球海平面 时空变化的观测手段,获得的高精度及高分辨率海 平面变化信息也证实了全球平均海平面上升速度的 提高(Cazenave and Nerem, 2004; Church et al., 2004; Holgate and Woodworth, 2004) 以及海平面 上升呈现出明显的空间变化特征(非统一性).而这 种海平面的时空变化,一方面归因于气候变化导致 的海水热膨胀(不同地区具有不同的温度)及冰川融 化所致的淡盐水平衡过程,另一方面也与由地表负 荷变化引起的地球动力学响应息息相关,例如全球 水质量的重新分配(Tamisiea et al., 2001; Fiedler and Conrad, 2010; Tamisiea et al., 2010). 研究海 平面空间时变特征能够帮助我们更直接、更有效地 认识冰川与冰盖的融化造成的淡水资源的流失问 题,也能充分重视海平面上升对沿海地区带来的严 重影响(海岸侵蚀、海水入侵及土壤盐渍化等).

与此同时,在以往海平面上升的众多研究中,一 直存在争议的主要原因除了对全球变暖的影响程度 认识不同以外,我们对人为因素引起的陆地水排泄 与存储以及由此导致对海洋的正负贡献知之甚少 (Chao et al., 2008),这主要包括长期以来人类活 动对地下水的抽取(正贡献)及人工大坝建立后的水 库蓄水(负贡献).针对大坝截流蓄水对海平面的影 响,研究结果表明人工建坝控制的巨大水量存储对 海平面有较大的负贡献(Sahaglan et al., 1994; Chao,1995),而近期的研究工作显示自 1900 年以 来全球大型水库蓄水容量可达约 10 800 km³(截止 到 2007 年),进而造成海平面约 30 mm 的下降 (Chao et al., 2008),该研究结果给出了近半个世纪 因水库蓄水引起的海平面下降速率为 0.55 mm/a,如 果将此过程中全球海平面的负贡献部分排放到海洋 中,就能够将 Church and White(2006)估计得到的 20 世纪全球平均海平面上升速率 1.7 mm/a 提高至 2.46 mm/a.然而,库区蓄水在影响海陆水质量重新分 布的同时,这种地表负荷的变化在地球局部范围内能 够激发地球的弹性响应,例如固体地球形变与重力位 扰动,进而提升相对海平面,并且在离负荷区域较近 的近海海域,这种海平面的空间变化更为突出.Fiedler and Conrad(2010)在前人的研究基础上,考虑了 蓄水引起的地球弹性响应问题,其中北半球因水库数 量较多而弹性效应明显,最终计算得到的全球平均海 平面上升速率位于1.70 mm/a到2.46 mm/a之间.

中国水库大坝建设的突飞猛进始于 20 世纪 50 年代,与全球水库建立的历史时期基本同步(Vorosmarty et al., 1997; http://www. icold-cigb. net).由于中国山地分布广,地势落差大,具有建设 大中型水库的天然优势,且人口密集,对水资源、电 力的需求大,因而中国成为世界上建设水库最多的 国家. 但 Chao et al. (2008)的统计结果表明,全球 水库数量自1980年后有明显的下降趋势,而中国在 最近 30 年内相继建立一些大型水库(例如三峡、龙 滩、小湾及溪洛渡等水库),并且水库在数量上有逐 年上涨的趋势,分布地点主要集中在河川与流域地 区.利用GRACE观测资料估算,结果显示部分径流 地区水储量变化与大型水库的建立直接相关,例如 詹金刚和王勇(2011)利用 GRACE 捕捉到的龙滩水 库水储量变化以及 Wang et al. (2011)利用 GRACE 监测到的三峡库区水储量变化.因此,在全 球海平面上升的背景下,随着中国大型水库的相继 建立,长期蓄水所引起的陆海之间的质量交换,必将 对全球海平面有所影响.本文工作主要基于地球弹 性负荷响应理论(Farrell, 1972)以及重力自洽平衡 下的冰后回弹(Glacial Isostatic Adjustment, GIA) 作用引起的海平面变化方程(Farrell and Clark, 1976),根据大型水库的分布位置与库容量大小,同 时结合 GRACE 观测数据,分析中国大型水库蓄水 量的时空变化特征以及建立后对全球海平面的贡献 程度,特别是对中国近海海平面空间变化的影响,这 些问题的深入讨论有助于对验潮站观测资料的进一 步处理与解释.

 1 中国大型水库分布与蓄水量时 变特征

1.1 大型水库分布与库容量统计

自1900年以来,人类以惊人的速度建立了数以 万计的大坝,提供了防洪、水力发电、农业灌溉及工 业用水等社会性效益,但同时也带来了相关的环境 影响,例如水库泥沙淤积、生态环境循环、库水蒸发 与渗透以及水体富营养化和缺氧等(Vorosmarty et al., 1997).针对人工水库蓄水的历史延续性与积 累性,其对海平面的影响是全球范围内的,但也存在 时间与空间分布上的不同,例如1950年后大坝数量 的急速增加以及北半球水库数量远大于南半球等 (Chao et al., 2008; Fiedler and Conrad, 2010). 本 文的水库数据主要来源于 ICOLD,时间截止到 2013 年,定义库容量 V>0.5 km³(相当于蓄水 10 m 的圆 盘水库,半径约为4km;或蓄水10m,宽度为1km 且长度为 50 km 的河道型水库)为大型水库(177 个),采用 Chao et al. (2008)对水库级别大小的定 义方法,规定大型水库的级别为 M=log(V)>8.7, 大型水库总库容量 $V_{all} = 536 \text{ km}^3$,占所有水库 (5191个,共643 km3) 库容量的83.3%, 占全球水 库(Chao et al., 2008)库容量(8300 km³)的 6.5%.

经过统计得到的自 1950 年以来中国大型水库 分布如图 1 所示,其中 1980 年以前建设的大坝多数









a. 全部水库累积蓄水的增加趋势; b. 单个水库蓄水量与时间分布

分布在长江流域以北,主要以黄河流域及东北地区 为主. 而自 1990 年开始, 特别是 2000 年以后, 大型 水库的建立呈现出明显的加速趋势,并且在库容量 的规模上也有一定的提升(图 2),库容量年变化率 由 2000 年以前的 4.9 km³/a 跃升至近十几年的 16.7 km³/a(图 2a),而与之对应的水库数量及单个 水库库容量的提升也同样值得关注(图 2b). 从地理 位置分布来看,2000年后的大坝主要建立在长江流 域及其南部地区,特别是三峡库区 2008 年接近 175 m蓄水的完成(V=39.3 km3),使得全国整体大 型水库库容量增长速度有了显著的提高.与此同时, 如此巨大人类工程的建设和建成后的运行将会对环 境造成何种程度的扰动,引起了社会各界的普遍关 注,三峡库区巨大的水体负荷,加之库区水位约 30 m的年波动量所引起的库区地壳负荷变化,无疑 将会导致重力场的改变.近年来的研究与监测表明 (Wang, 2000; Boy and Chao, 2002; Wang et al., 2002),库区蓄水所导致的重力场变化与库区蓄水关 系密切,并且能够利用卫星重力观测手段(GRACE) 监测蓄水引起的周年及长期变化(汪汉胜等,2007; Wang et al., 2011).

1.2 利用 GRACE 验证水库蓄水变化

利用 GRACE 地球重力场月模型数据,其空间 水平分辨率为几百公里(当 GRACE 模型阶次为 60 阶时,水平空间分辨率约为 300 km),并且经过滤波 半径为 500 km 的高斯滤波, GRACE 能够探测至少 17 mm 的水储量变化(Swenson and Wahr, 2006). 结合 2000 年后大型水库的分布特点,不仅能够验证 大型水库蓄水引起的中国内陆地区的水储量变化, 而且 GRACE 估算得到的长期趋势变化与实际蓄水 量的对比综合反映了陆地水的排泄(地下水抽取). 本文采用 CSR 提供的 GRACE RL05 模型数据,时 间跨度从 2003 年 1 月到 2012 年 12 月,该系数最高 阶次为60阶,并且扣除了潮汐影响和非潮汐的大气 和海洋影响.由于 C20项误差较大,本文将此项替换 为利用 SLR 的观测结果 (Cheng and Tapley, 2004),而模型中的一阶项则采用 Swenson et al. (2008)提供的一阶项系数.由于模型受卫星的轨道 误差和球谐系数的截断误差等影响,此处采用多项 式去条带滤波(Swenson and Wahr, 2006)和 Fan 平 滑滤波(Zhang et al., 2009)相结合的方法对模型 系数进行滤波,其中 Fan 滤波的经向与纬向高斯滤 波半径分别取为 300 km. 采用 Wahr et al. (1998)提 出的利用大地水准面球谐系数将全球重力场变化换 算为陆地等效水高为:

$$\Delta h = \mathrm{d}r(\theta, \psi) = \frac{R\rho_{\mathrm{ave}}}{3\rho_{\mathrm{wat}}} \sum_{l=1}^{N_{\mathrm{max}}} \sum_{m=0}^{l} \tilde{P}_{l,m}(\cos\theta) (C_{lm}\cos(m\psi) + S_{lm}\sin(m\psi)) \frac{2l+1}{1+k_l}, \qquad (1)$$

式中 R 为地球平均半径, $\theta 与 \phi$ 分别为余纬与东经, N_{max}为月平均重力场的最大阶数,取值为 60, ρ_{ave}和 ρ_{wat} 分别为地球的平均密度和水的密度, k_l 是 l 阶负 荷勒夫数,它依赖于球对称的地球弹性和密度结构, 本文采用已有研究(Jentzsch, 1997)中利用 PREM 模型(Dziewonski and Anderson, 1981)给出的负荷 勒夫数, $\tilde{P}_{l,m}$ 为完全规格化的缔合勒让德多项式, Clm 与 Slm 为利用每月重力场模型的球谐函数系数拟 合得到长期变化趋势项系数.另外,笔者采用水文模 型 GLDAS/Noah (Rodell et al., 2004)得到的地表 各层的土壤湿度之和,用于消除其他陆地水储量长 期变化的影响;该 GLDAS/Noah 模型是通过陆地 地表建模和数据同化技术,输出陆地表面各项含水 参数,本文采用 Noah 模式提供的 4 层(0~0.1 m、 0.1~0.4m、0.4~1.0m和1.0~2.0m)土壤湿度 数据,其中不包含人工水库及地下水的影响.因此, 最终 GRACE 得到的陆地水水储量为 GRACE 拟合 得到的趋势项系数去除了 GLDAS/Noah 模型拟合 得到的趋势项球谐系数的结果.



图 3 GRACE 估算大型水库蓄水变化率

Fig. 3 The rate of water storage changes from large reservoirs, in mm/a water equivalent thickness, determined by monthly GRACE gravity field solutions
黑色虚线方框内为 2000 年后大型水库主要分布的地区;a. GRACE 估算 得到的中国地区陆地水储量的等效水柱高年变化率;
b. GRACE估算大型水库主要分布地区(黑色虚线方框内)的敏感度内核分布

由于 2000 年以后兴建的水库主要位于长江以 南地区,GRACE 能够检测到中国陆地地区水储量 的长期变化趋势,因此,可利用水库所在主要区域 (图 3 黑色虚线方框,98°~120°E,23°~37°N)与 GRACE 对比.对于某一区域内的质量变化,利用 GRACE 模型对该区域内质量的空间平均通常以区 域的敏感度内核(sensitivity kernels)函数来控制整 个估算区域,即可被定义为:当利用 GRACE 模型的 球谐系数来估算图 3a 中黑色虚线方框内的水储量 变化时,可利用 Jacob *et al*. (2012)给出的相关公式 (公式(A6)~(A10)),计算得到区域平均敏感度内 核分布(图 3b),进而估算该区域内水储量的趋势变 化.由前文可知,2000 年以后的全国大型水库变化 量为 16.7 km³/a,水库在该区域引起的变化量水柱 高约为 5.42 mm/a;而该区域 GRACE 平均年变化

c.,

率为 3.43±4.43 mm/a,仅占水库变化量的 63%, 由此证实除近年来的水库蓄水造成我国南方地区陆 地水储量增高外,地下水长期以来的抽取也是一个 不容忽视的问题,但由于缺少全国性的地下水变化 实际资料,因此这种地下水抽取并向海洋排泄导致 的海平面变化在本文未被考虑.此外,由 Swenson and Wahr(2002)研究结果可知, GRACE 的误差来 源除卫星观测误差与模型球谐系数截断误差(阶次 截至 60 阶)以外,也存在研究区域周边范围对研究 区的泄漏误差,但泄漏幅值相对其他2个误差项要 小很多(Swenson et al., 2003);对于 GRACE 泄漏 误差的评估,理想情况下区域内的敏感度内核为1, 区域外的敏感度内核为 0. 但是,因 GRACE 模型球 谐系数阶次的限制以及滤波方法的使用(滤波半径 为 300 km),往往会造成区域的敏感度内核很难达 到真正意义上的1或0,因而区域平均敏感度内核 会提取到研究区域附近周边的水储量变化(图 3b), 此部分的泄漏误差项约占研究区域估算结果的 28%(方框外的敏感度内核分布除以整体的敏感度 内核分布).

2 蓄水引起的海平面空间变化

2.1 计算方法

全球海平面的时空变化特征反映了气候变化驱 动下的冰雪与水质量的重新分配,而这种地球表面 负荷改变不仅表现在地球的弹性结构响应(Farrell and Clark, 1976; James and Ivins, 1995), 而且可能 激发地幔的粘弹性响应,进而形成因冰后回弹导致 的1~10 ka的时间尺度下相对海平面变化(Nakada and Lambeck, 1989; Tushingham and Peltier, 1991). 但是,对于较短的时间尺度(1~100 a),大坝 拦截蓄水不仅导致海洋与陆地之间水质量的重新分 布,而且主要能够引起地球的弹性负荷响应.计算由 蓄水造成的固体地球与海平面的变化,主要根据大 地水准面与固体地球表面的弹性负荷形变之间的差 异.在计算过程中,采用因冰后回弹作用引起海平面 变化的理论框架(Farrell and Clark, 1976), 基于同 样的重力场自洽平衡(Milne et al., 1999)或重力场 负荷自吸效应计算方法(Tamisiea et al., 2010),首 先,对某一时刻的海平面方程(Farrell and Clark, 1976)进行定义:

 $SL(\theta, \psi, t) = C(\theta, \psi) [G(\theta, \psi, t) - R(\theta, \psi, t)], (2)$ 其中, \theta 与 \u03c6 分别为余纬与东经, SL(\u03c6, \u03c6, t)为某一 时间 t 的海平面的变化; $C(\theta, \phi)$ 为海洋函数(Munk and MacDonald, 1960), 在陆地和海洋分别定义为 0 和 1; $G(\theta, \phi, t) 与 R(\theta, \phi, t)$ 分别代表由负荷引起的 大地水准面和地表垂直位移的扰动.同时,本文将水 库蓄水离散为圆盘型负荷(由于水库圆盘负荷离海 洋很远,因此本文将之作为质点处理), 计算中考虑 了地球自转反馈的影响, 而忽略海平面形状的变化 (海岸线淹没)以及地球内部粘弹性的影响, 结合负 荷弹性理论(Farrell, 1972), 利用重力场与固体地球 形变的格林函数, 公式(2)中的 $G(\theta, \phi, t) 与 R(\theta, \phi, t)$ 可具体表示为:

$$G(\theta, \psi, t) = \frac{1}{g} \int_{-\infty}^{t} a^{2} L(\theta, \psi, t') \Phi^{L}(\gamma, t - t') dt' +$$

$$\frac{1}{g} \int_{-\infty}^{t} \Lambda(\theta, \psi, t') \Phi^{T}(t - t') dt' + G(t) , \qquad (3)$$

$$R(\theta, \psi, t) = \int_{-\infty}^{t} a^{2} L(\theta, \psi, t') \Gamma^{L}(\gamma, t - t') dt' +$$

$$\int_{-\infty}^{t} \Lambda(\theta, \psi, t') \Gamma^{T}(t - t') dt' , \qquad (4)$$

公式(3)中的 G(t)表示大地水准面的统一高度变 化,格林函数 $\Phi^L(\gamma,t) = \Phi^T(t)$ 分别代表负荷响应与 一般引潮力引起的重力场扰动,而 $\Gamma^L(\gamma,t) = \Gamma^T(t)$ 分别代表负荷响应与一般引潮力引起的径向位移变 化,Milne *et al*. (1999)对以上 4 个格林函数进行了 详细描述(文献中的公式(4)~(7)), γ 为观测点(θ , ϕ)与负荷点(θ', ϕ)之间的角距离, *a* 为地球平均半 径, *g* 为地表重力加速度, $\Lambda(\theta, \phi, t)$ 为某一时刻 *t* 的 自转位场扰动, $L(\theta, \phi, t)$ 为截止到某一时刻 *t* 的整 体积累负荷, 按空间分为陆地 $I(\theta, \phi, t)$ 和海洋 SL (θ, ϕ, t)的变化, 即表示为:

 $L(\theta, \psi, t) = \rho_w [I(\theta, \psi, t) + SL(\theta, \psi, t)],$ (5) ρ_w 为水的密度 1 000 kg/m³. 因此,将公式(3)~(5) 代人公式(2)可计算由海平面方程得到的水库蓄水 的海平面响应,而该问题利用拟谱算法(Mitrovica and Peltier,1991)在球谐域能够有效的解决,此过 程中的关键步骤是由于形变导致的负荷重新分布, 进而建立新的负荷形式,因此计算中需要进行迭代 求解,而最终的迭代次数与预先给出收敛条件直 接相关.

2.2 预测结果

对于水库蓄水的负荷贡献,按照文献(Chao et al.,2008;Fiedler and Conrad,2010)对实际库容量 与标准库容量的比例关系(约为1.3),推出中国大型水库截止到2013年的实际库容量约为697 km³,进而对海平面负荷自吸效应(正贡献)以及海洋与陆



Fig. 4 Spatial variations in relative sea level due to water impoundment behind dams, as well as tide gauge locations a. 1950—2013 年的相对海平面响应; b. 2000—2013 年的相对海平面响应

地水质量迁移(负贡献)的综合贡献的空间分布如图 4a 所示,其中由海水到淡水的质量迁移导致的海平 面下降高度约为 1.93 mm(实际库容量 697 km³ 除 以全球海洋总面积 3.61×108 km²),水库蓄水对近 海地区地表沉降的影响约为2~10mm,进而导致了 近海相对海平面的上升.图 4a 结果显示出人工大坝 建设的历史积累与时空分布特征,水库蓄水导致的 渤海与东南沿海海域的相对海平面上升明显,最大 上升高度约为8mm;但2000年以后的水库对海平 面的影响主要集中在东南沿海,其中南海海域较为 突出,上升高度约为 2~3 mm(图 4b). 然而利用全 球水库蓄水对整个海平面影响的研究结果表明, 1950年以来人工大坝的建设对全球海平面的平均 变化以负贡献为主,减缓了目前全球海平面的上升 趋势(Chao et al., 2008; Fiedler and Conrad, 2010). 但对于区域性的近海海平面而言,除受全球 海水平均质量变化外,同时受到临海陆地地表负荷 效应明显,其影响范围主要体现在单点负荷区域的 20°区间之内(Farrell, 1972), 而在沿海地区的这种 质量负荷响应对海平面的影响将更为突出.因此,若 排除全球海水与陆地水质量转换的静态贡献,中国 大型水库对近海海平面的影响具有明显的时空变化 特征,在全球海平面上升的背景下,人工大坝的建立 是除海水增温膨胀、陆源冰川和极地冰盖融化等因 素之外另一个特别需要值得注意的人为因素.

3 对验潮站观测时间序列的贡献

以上计算结果显示出水库蓄水对中国近海影响 明显,而沿海验潮站数据能够较好的反映中国近海 海平面的变化趋势,所得出的结果与利用卫星测高 得到的全球其他地区的变化趋势相关性较好,但中 国近海海平面上升速度要高于全球平均水平(王海 瑛等,1997;钟鹤翔等,2006;Cheng and Qi,2007), 同时吴涛等(2007)通过对近 10 年来中国近海海平 面变化的研究成果表明,中国海域海平面变化时空 差异明显,且变化范围在-2.1~10.0 mm/a之间. 本文选取不同近海海域的6个验潮站周年数据(数 据来自 Permanent Service for Mean Sea Level),主 要分布在渤海、黄海、东海及南海4个海域,观测时 间跨度不一,仅大连与坎门观测时间截止到 2012 年,其他验潮站观测时间集中于 1970-2000 年之 间.由于各验潮站的波动性与间断性,不能较完整的 反映出水库蓄水对近海的连续性影响.另外,在统计 过程中,不同的验潮站数量与时间选择的差别也会 造成验潮站估值可能存在较大的差异.

笔者对该 6 个验潮站 1950 以来的数据进行拟合,得到线性平均上升速率为 2.25 mm/a,高于 20 世纪全球平均海平面上升结果(Church and White, 2006).大型水库对 6 个验潮站所在海岸的影响整体 趋势一致(平均上升速率为 0.06 mm/a),但也具有





明显的时空变化特征(图 5a),如 1960 年以后广西 与海南地区相继建立的大坝而导致的北海验潮站相 对海平面的突然增高;6个观测站自2000年以来海 平面上升速率较 2000 年之前均有所提高,并且北 海、厦门及坎门的提高速率明显,反映了近年来水库 建立对东南沿海相对海平面的影响程度.而与水库 蓄水负荷区域距离较远的台湾地区基隆验潮站,其 台站位置对人工大坝建立造成的海平面上升速率响 应无较大的变化,海平面基本保持在 0.05 mm/a 的 增长速度,与渤海海域的大连验潮站变化特征一致, 说明水库与海岸线距离的远近直接影响到近海海平 面对水库蓄水的敏感度.同样地,由于临近黄海海域 的陆地地区(10°范围内)无较多数量或库容量较大 的水库,因此连云港验潮站位置受水库蓄水的影响 相比其他近海海平面较小,2000年之后受水库蓄水 影响的海平面上升率仅为 0.02 mm/a. 此外,中国大 型水库蓄水对近海相对海平面上升整体起到一个加 速的作用,经过该影响校正后的验潮站数据(图 5b, 平均上升速率为 2.19 mm/a)相比初始观测值(平均 上升速率为 2.25 mm/a)平均减缓了约 3%. 对于全 球而言,研究结果表明大坝拦截蓄水放缓了地球弹 性响应下的全球平均海平面上升速度的 20% (Fiedler and Conrad, 2010), 与本文的计算结果不同的 主要原因是全球范围下的水库蓄水总量导致的绝对 海平面下降变化明显,约为 30 mm(Chao et al., 2008),远大于中国地区水库蓄水引起的 1.93 mm 的海平面负贡献,并且地球对水库负荷的弹性响应 影响主要集中在一定范围的局部地区,因此,本文结 果是基于不考虑全球水库蓄水导致水质量整体迁移 的前提下,中国大型水库蓄水对近海的影响为正贡 献,此贡献(0.06 mm/a)相当于全球半个世纪因水 库蓄水引起的海平面下降速率(0.55 mm/a)的11%.

而结合验潮站观测资料与水库蓄水引起海平面 变化的理论计算结果的进一步对比分析,笔者认为 利用实际观测的验潮站数据来监测特定时期或某一 大型水库显得尤为困难,主要原因一方面在于前文 提及的验潮站的波动性与间断性,而另一方面与全 球其他一些大型水库建设的位置(例如加拿大的 Daniel Johnson 大坝及非洲加纳的 Akosombo 大 坝)相比,中国大型水库一般集中在内陆流域,尤其 是近年来的水库的建设离海岸线距离较远(图1), 因此近海验潮站不能对特定蓄水周期的大坝拦截蓄 水进行较好的时间匹配,并且由于个别验潮站的人 为的零点变动和记录资料的沉降修正,使其验潮站 资料质量较低(郑文振和陈宗镛,1998).此外,由验 潮站观测得到的海平面变化中,既包括了海平面的 绝对变化,又包括陆地升降引起的相对海平面变化, 同时验潮站也受全球及局部地区气候、构造运动等 复杂因素影响,不同验潮站所处位置的海平面升降 速率之间无较大的可比性.尽管如此,水库蓄水对海 平面造成的影响不能忽视,大坝拦截蓄水对全球水 质量迁移过程的改变不仅体现在陆地水水储量的增 加,同样也反映在当前海平面上升的背景下,事实 上,如果我们掌握了影响海平面上升的各类因素,将 有助于提高每一个验潮站观测结果的校正精度,而 充分估算水库蓄水引起的海平面变化能够有效地消 除该因素对验潮站观测数据的影响,进而增加利用 验潮仪对全球变暖造成的冰川与冰盖的融化的估计 精度.但目前由于水库蓄水完成的精确时间以及库 区局部区域渗透量等因素过多,导致蓄水过程的库 容量累积性存在一定的不确定性. 而随着今后观测 手段的丰富,以及对人工水库建立信息、人为贡献 (地下水抽取)等因素理解的深入,利用地球模型及 海平面方程估算相对海平面对区域或全球陆地水储 量长期变化的响应,将提供非常有价值的海平面时 空变化信息.

4 结论与认识

在全球气候变化背景下,我国近海海平面受海 水增温膨胀、陆源冰川和极地冰盖融化等因素呈明 显上升趋势,并且海温、气温和气压等水文气象因素 以及沿海地面沉降也是造成海平面相对上升的重要 因素.相比之下,过去一个世纪人工水库的建立减缓 了全球海平面的上升速度,蓄水对海平面的负贡献 为 0.55 mm/a(Chao et al., 2008). 但考虑到水库 蓄水引起的地球弹性形变及重力自吸效应,全球近 海地区海平面改变因水库分布位置的不同而变化. 对于中国大型水库对近海海平面时空变化的影响, 笔者的计算结果表明,过去60年的中国大型水库蓄 水总量占中国所有水库总量的 83.3%(基于 ICOLD 的统计结果),占全球总蓄水量的 6.5%,由此引起 的近海相对海平面上升最大高度为8mm,其中水库 蓄水因水质量平衡导致全球海平面下降约 1.93 mm. 随着 2000 年以后三峡等特大型水库的建 设完成以及水库数量的逐年递增,使得大型水库对 我国近海沿岸的影响更加明显,在此期间,蓄水造成 的近海不同海域海平面增长速度在 0.02~ 0.11 mm/a之间变化,主要与水库分布的位置直接 相关,其中东南沿海海域受近年来水库蓄水的影响 明显.利用 GRACE 对近 10 年来中国地区的陆地水 储量的监测表明,长江流域以南地区水储量有明显 的上涨趋势,但小于该区域内水库蓄水量的增长速 度,预示着除大坝拦截蓄水外,地下水长期抽取引起 的水储量变化同样明显.

通过对人为贡献导致的海平面升降进行模拟, 利用计算结果对现有的实测验潮站数据进行修正, 我们能够对全球或区域性的海平面变化进行重新评 估.对于全球性而言,水库蓄水在很大程度上减缓了 目前的海平面平均上升速度,但由于不同地区对地 表负荷的响应不同,因此存在明显的空间差异特征, 尤其是临近海岸线的近海海域.近海海平面上升加 剧了风暴潮、海岸侵蚀、海水入侵、土壤盐渍化和咸 潮等海洋灾害的致灾程度,因此我们在关注影响海 平面各种因素的同时,也需要对人类活动造成的海 洋与陆地之间的水质量平衡进行探讨.虽然全球大 型水库数量近 30 年来有明显的下降趋势,但由于其 历史的积累性,目前全球整体蓄水量对海洋的负贡 献还将会保持很长一段时间. 我国人工大坝建立与 全球整体趋势有所不同,当前水库数量与整体库容 量的增长对近海海平面的影响显著,面对我国沿海 地面沉降的现状,这种因为蓄水负荷的持续性影响 将更为突出.而目前对于区域性海平面的研究焦点, 我们一方面需要利用不同观测手段(卫星测高、 GPS、GRACE及验潮站等)对海平面进行监测,验 证得到结果的差异或一致性;同时也要关注于气候 变化带来的海洋温度升高及冰川与冰盖的融化,这 些影响因素将能够直接影响到全球的海平面变化. 但更为重要的是我们需要增加对陆地上各种人类活 动对海平面贡献的认识,这些复杂且不确定的影响 因素的贡献可能是巨大的,比如人工大坝的建立可 能是20世纪以来伴随全球温度升高的另一个值得 我们特别关注的问题.

致谢:感谢科罗拉多大学的 John Wahr 教授在 本文撰写过程中给予的建议与帮助. 文中所用水库 数据、GRACE RL05、GLDAS/Noah 模型数据以及 验潮站台站数据分别由 International Commission on Large Dams (ICOLD)、CSR、NASA 研究中心与 Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL)提 供,部分图件由 GMT 软件绘制,在此一并感谢.

References

- Boy, J. P., Chao, B. F., 2002. Time-Variable Gravity Signal during the Water Impoundment of China's Three-Gorges Reservoir. *Geophysical Research Letters*, 29 (24):531-534. doi:10.1029/2002GL016457
- Cazenave, A., Nerem, R. S., 2004. Present-Day Sea Level Change: Observations and Causes. *Reviews of Geo*physics, 42(3): RG3001. doi:10.1029/2003RG000139
- Chao, B. F., 1995. Anthropogenic Impact on Global Geodynamics due to Reservoir Water Impoundment. *Geophysical Research Letters*, 22 (24): 3529 – 3532. doi: 10. 1029/95GL02664
- Chao, B. F., Wu, Y., Li, Y., 2008. Impact of Artificial Reservoir Water Impoundment on Global Sea Level. *Science*, 320(5873):212-214. doi:10.1126/science.1154580
- Cheng, M. K., Tapley, B. D., 2004. Variations in the Earth's Oblateness during the Past 28 Years. Journal of Geophysical Research, 109 (B9): B09402. doi: 10. 1029/ 2004JB003028
- Cheng, X. H., Qi, Y. Q., 2007. Trends of Sea Level Varia-

tions in the South China Sea from Merged Altimetry Data. *Global and Planetary Change*, 57(3): 371-382. doi:10.1016/j.gloplacha.2007.01.005

- Church, J. A., White, N. J., 2006. A 20th Century Acceleration in Global Sea-Level Rise. Geophysical Research Letters, 33:L01602. doi:10.1029/2005GL024826
- Church, J. A., White, N. J., Coleman, R., et al., 2004. Estimates of the Regional Distribution of Sea Level Rise over the 1950 – 2000 Period. *Journal of Climate*, 17 (13):2609–2625. doi:10.1175/1520–0442(2004)017 <2609:EOTRDO>2.0.CO;2
- Douglas, B. C., 1991. Global Sea Level Rise. *Journal of Geophysical Research*, 96 (C4): 6981 6992. doi: 0. 1029/91JC00064
- Douglas, B. C., 1992. Global Sea Level Acceleration. Journal of Geophysical Research, 97(C8): 12699-12706. doi: 10.1029/92JC01133
- Dziewonski, A., Anderson, D. L., 1981. Preliminary Reference Earth Model. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 25(4):297-356.
- Farrell, W. E., 1972. Deformation of the Earth by Surface Loads. *Reviews of Geophysics*, 10(3):761-797. doi: 10.1029/RG010i003p00761
- Farrell, W. E., Clark J. A., 1976. On Postglacial Sea Level. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 46(3): 647-667. doi: 10. 111/j. 1365-246x. 1976. tb01252. x
- Fiedler, J. W., Conrad, C. P., 2010. Spatial Variability of Sea Level Rise due to Water Impoundment behind Dams. *Geophysical Research Letters*, 37(12): L12603. doi:10. 1029/2010GL043462
- Holgate, S. J., Woodworth, P. L., 2004. Evidence for Enhanced Coastal Sea Level Rise during the 1990s. Geophysical Research Letters, 31(7):L07305.
- Jacob, T., Wahr, J., Pfeffer, W. T., et al., 2012. Recent Contributions of Glaciers and Ice Caps to Sea Level Rise. *Nature*, 482:514-518. doi:10.1038/nature10847
- James, T. S., Ivins, E. R., 1995. Present-Day Antarctic Ice Mass Changes and Crustal Motion. *Geophysical Re*search Letters, 22 (8): 973 – 976. doi: 10. 1029/ 94GL02800
- Jentzsch, G., 1997. Earth Tides and Ocean Tidal Loading. Lecture Notes in Earth Sciences (in Tidal Phenomena),66:145-171.
- Milne, G. A., Mitrovica, J. X., Davis, J. L., 1999. Near-Field Hydro-Isostasy: The Implementation of a Revised Sea-Level Equation. *Geophysical Journal International*, 139 (2): 464 - 482. doi: 10. 1046/j. 1365 - 246x. 1999.

00971**.** x

- Mitrovica, J. X., Peltier, W. R., 1991. On Postglacial Geoid Subsidence over the Equatorial Oceans. *Journal of Geophysical Research*, 96 (B12): 20053 – 20071. doi: 10. 1029/91JB01284
- Munk, W. H., MacDonald, G. J. F., 1960. The Rotation of the Earth. Cambridge University Press, Cambridge.
- Nakada, M., Lambeck, K., 1989. Late Pleistocene and Holocene Sea-Level Change in the Australian Region and Mantle Rheology. *Geophysical Journal International*, 96(3): 497 - 517. doi: 10. 1111/j. 1365 - 246x. 1989. tb06010. x
- Nerem, R. S., Leuliette, E., Cazenave, A., 2006. Present-Day Sea-Level Change: A Review. Comptes Rendus Geoscience, 338(14-15): 1077-1083. doi: 10.1016/j. crte. 2006.09.001
- Rodell, M., Houser, P. R., Jambor, U., et al., 2004. The Global Land Data Assimilation System. Buletin of the American Meteorological Society, 85(3):381-394.
- Sahaglan, D. L., Schwartz, F. W., Jacobs, D. K., 1994. Direct Anthropogenic Contributions to Sea Level Rise in the Twentieth Century. *Nature*, 367:54-57.
- Swenson, S., Chambers, D., Wahr, J., 2008. Estimating Geocenter Variations from a Combination of GRACE and Ocean Model Output. *Journal of Geophysical Research*, 113(B8): B08410. doi:10.1029/2007JB005338
- Swenson, S., Wahr, J., 2002. Methods for Inferring Regional Surface-Mass Anomalies from Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) Measurements of Time-Variable Gravity. *Journal of Geophysical Research*, 107 (B9): ETG 3-1 – ETG 3-13. doi: 10. 1029/ 2001JB000576
- Swenson, S., Wahr, J., 2006. Post-Processing Removal of Correlated Errors in GRACE Data. Geophysical Research Letters, 33 (8): L08042. doi: 10. 1029/ 2005GL025285
- Swenson, S., Wahr, J., Milly, P. C. D., 2003. Estimated Accuracies of Regional Water Storage Variations Inferred from the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE). Water Resources Research, 39(8):1223. doi: 10.1029/2002WR001808
- Tamisiea, M. E., Hill, E. M., Ponte, R. M., et al., 2010. Impact of Self-Attraction and Loading on the Annual Cycle in Sea Level. *Journal of Geophysical Research*, 115 (C7):C07004. doi:10.1029/2009JC005687
- Tamisiea, M. E., Mitrovica, J. X., Milne, G. A., et al., 2001. Global Geoid and Sea Level Changes due to Present-Day Ice Mass Fluctuations. *Journal of Geophysical Re-*

search, 106 (B12): 30849 — 30863. doi: 10. 1029/ 2000JB000011

- Tushingham, A. M., Peltier, W. R., 1991. ICE-3G: A New Global Model of Late Pleistocene Deglaciation Based on Geophysical Predictions of Post-Glacial Relative Sea Level Change. *Journal of Geophysical Research*, 96 (B3):4497-4523. doi:10.1029/90JB01583
- Vorosmarty, C. J., Sharma, K. P., Fekete, B. M., et al., 1997. The Storage and Aging of Continental Runoff in Large Reservoir Systems of the World. AMBIO, 26(4): 210-219.
- Wahr, J., Molenaar, M., Bryan, F., 1998. Time Variability of the Earth's Gravity Field: Hydrological and Oceanic Effects and Their Possible Detection Using GRACE. *Journal of Geophysical Research*, 103(B12): 30205-30229. doi:10.1029/98JB02844
- Wang, H. S. ,2000. Surface Vertical Displacements and Level Plane Changes in the Front Reservoir Area Caused by Filling the Three Gorges Reservoir. *Journal of Geophysical Research*, 105 (B6): 13211 – 13220. doi: 10. 1029/2000JB900072
- Wang, H. S., Hsu, H. T., Zhu, Y. Z., 2002. Prediction of Surface Horizontal Displacements, and Gravity and Tilt Changes Caused by Filling the Three Gorges Reservoir. *Journal of Geodesy*, 76 (2): 105-114. doi: 10.1007/ s00190-001-0228-3
- Wang, H. S., Wang, Z. Y., Yuan, X. D., et al., 2007. Water Storage Changes in Three Gorges Water Systems Area Inferred from GRACE Time-Variable Gravity Data. *Chinese Journal of Geophysics*, 50(3): 730-736 (in Chinese with English abstract).
- Wang, H. Y., Xu, H. Z., Wang, G. Y., 1997. Chinese Offing Geosat Satellite Altimetry Sea Level and Offshore Terrain. *Chinese Science Bulletin*, 42(8):852-855 (in Chinese).
- Wang, X. W., Linage, C., Famiglietti, J., et al., 2011. Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) Detection of Water Storage Changes in the Three Gorges Reservoir of China and Comparison with In-Situ Measurements. Water Resources Research, 47 (12): W12502. doi:10.1029/2011WR010534

- Wu, T., Kang, J. C., Li, W. J., et al., 2007. Advance of Sea Level Change Research in China. Marine Geology & Quaternary Geology, 27(4):123-130 (in Chinese with English abstract).
- Zhan, J. G., Wang, Y., 2011. Detect Water Storage Variation of Longtan Reservoir with GRACE Data. Chinese Journal of Geophysics., 54 (5): 1187 – 1192 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. Z., Chao, B. F., Lu, Y., et al., 2009. An Effective Filtering for GRACE Time-Variable Gravity: Fan Filter. *Geophysical Research Letters*, 36(17):L17311. doi: 10.1029/2009GL039459
- Zheng, W. Z., Chen, Z. Y., 1998. Establishment of Coastal Long-Term Tidal (Sea Level Monitoring) Stations in China and the Suggestions Thereof. Marine Science Bulletin, 17(1): 13-19 (in Chinese with English abstract).
- Zhong, H. X., Xie, Z. R., Cui, S. H., et al., 2006. The Research on Sea Surface Topography in Yellow Sea and East China Sea in 1993–2001. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 35(1):9–14 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 汪汉胜,王志勇,袁旭东,等,2007.基于 GRACE 时变重力场 的三峡水库补给水系水储量变化.地球物理学报,50 (3):730-736.
- 王海瑛,许厚泽,王广运,1997.中国近海海域 Geosat 卫星测高海平面和海面地形研究.科学通报,42(8): 852-855.
- 吴涛,康建成,李卫江,等,2007.中国近海海平面变化研究进 展.海洋地质与第四纪地质,27(4):123-130.
- 詹金刚,王勇,2011.卫星重力捕捉龙滩水库储水量变化.地 球物理学报,54(5):1187-1192.
- 郑文振,陈宗镛,1998.我国沿海长期验潮(海平面监测)站的 建立和建议.海洋通报,17(1):13-19.
- 钟鹤翔,谢志仁,崔树红,等,2006.黄、东海海面地形在 1993—2001年间的变化探讨.测绘学报,35(1): 9-14.