

汪汉胜, 王志勇, 袁旭东等. 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, 2007, 50(3): 730 ~ 736
Wang H S, Wang Z Y, Yuan X D, et al. Water storage changes in Three Gorges water systems area inferred from GRACE timevariable gravity data. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2007, 50(3): 730 ~ 736

基于 GRACE 时变重力场的三峡水库 补给水系水储量变化

汪汉胜¹, 王志勇^{1,2}, 袁旭东^{1,2}, Wu Patrick³, Rangelova Elena⁴

1 中国科学院测量与地球物理研究所动力大地测量学重点实验室, 武汉 430077

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

3 Department of Geology & Geophysics, University of Calgary, Calgary T2N 1N4, Canada

4 Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Calgary T2N 1N4, Canada

摘 要 利用 22 个月的 GRACE 时变重力场, 反演了三峡水库补给水系的水储量变化, 并按月给出了数值结果. 与水文学同化模型(CPC)的两组比较说明基于 GRACE 重力的反演结果是合理的. 当高斯平均半径为 1000 km 时, 该区总水储量变化的峰谷差为 14 cm, 其年变化振幅为 5.8 cm, 相位为 -40.8 天, 与 CPC 模型合成重力数据的反演结果进行比较, 其总水储量变化均方差为 1.3 cm, 年变化振幅相差 0.1 cm, 相位相差 1.0 天. 为进一步检验 GRACE 能否监测该区真实水储量变化, 还将其反演结果与 CPC 模型的真实平均结果进行比较, 结果发现总体均方差为 2.1 cm, 年变化振幅相差 1.7 cm, 相位相差 9.3 天. 因此, 第一种比较过高地估计了 GRACE 监测该区水储量变化的能力, 第二种比较则较真实地反映了实际情况, 尽管反演结果与水文学的结果差别较大, 但仍然显示 GRACE 能监测该区每月的水储量变化.

关键词 GRACE 卫星, 时变重力场, 补给水系, 三峡, 水储量

文章编号 0001-5733(2007)03-0730-07

中图分类号 P228

收稿日期 2006-10-11, 2007-01-30 收修定稿

Water storage changes in Three Gorges water systems area inferred from GRACE time-variable gravity data

WANG Han-Sheng¹, WANG Zhi-Yong^{1,2}, YUAN Xu-Dong^{1,2}, Wu Patrick³, Rangelova Elena⁴

1 Key Laboratory of Dynamic Geodesy, Institute of Geodesy & Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Department of Geology & Geophysics, University of Calgary, Calgary T2N 1N4, Canada

4 Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Calgary T2N 1N4, Canada

Abstract Twenty-two monthly water storage changes are predicted for the supply water systems of the Three Gorges Reservoir from GRACE time-variable gravity data. In order to assess the results, the CPC hydrological models are used to establish two benchmarks. It is found that the results are very reasonable in this area. For Gaussian averaging radius of 1000 km, the total water storage changes in the area have a peak-to-peak value of 14 cm, and the annual component has an amplitude of 5.8 cm and a phase of -40.8 days. The RMS difference compared with the inversion results with the same averaging radius using the synthetic gravity data from the CPC models is 1.3 cm for the total water storage changes, and the differences are 0.1 cm and 1.0 day

基金项目 国家自然科学基金(40574010)和中国科学院优秀博士学位论文获得者科研启动专项资金(040113)(Wu Patrick 由加拿大 NSERC 的 Discovery Grant 资助)资助.

作者简介 汪汉胜,男,1964年生,博士,研究员,1984年毕业于武汉地质学院物探系,1999年获中国科学院测量与地球物理研究所博士学位,主要从事负荷变形、地震变形等壳幔动力学过程的研究. E-mail: whs@asch.whigg.ac.cn

for the amplitude and phase of the annual component. However, for checking the ability of GRACE to monitor the true water storage changes within the area, it is also very necessary to compare the inversion results from GRACE gravity models with the true average results of CPC models. For this comparison the RMS difference is 2.1 cm for the total water storage changes, and the differences are 1.7 cm and 9.3 days for the amplitude and phase of the annual component. Comparing the assessment results of the two comparisons, it is found that the first comparison has overestimated the effectiveness of GRACE. Nevertheless, the second comparison shows that the monthly water storage changes can be roughly determined from GRACE data in this area.

Keywords GRACE satellite, Time-variable gravity, Supply water systems, Three Gorges Reservoir, Water storage

1 引 言

2002 年 3 月,美国宇航局(NASA)和德国宇航中心(DLR)联合发射了 GRACE 卫星,恢复地球重力场和开展气候的实验,开创了以高时空分辨率观测全球重力场的新纪元^[1,2]。用 GRACE 所观测的重力场变化能反演估计全球和区域的水储量变化^[3~10],特别是对水储量具有显著年变化的大盆地,已经被证明是可行的。以区域陆地水储量变化为例,Wahr et

al.^[4]使用了 11 个月 GRACE 重力数据系列(2002 年 4 月~2003 年 10 月)在 3 个大水系盆地内反演了水储量的变化(密西西比、亚马逊和 1 个汇入孟买湾的水系),所估计的水储量年变化的精度达 1.0~1.5 cm。利用 GRACE 重力数据研究陆地水来源可估计密西西比盆地的蒸发量^[11]。Boy and Chao^[12]研究认为三峡蓄水能被 GRACE 时变重力数据观测出来。但是,由于重力数据并没有达到预计的精度和空间分辨率,因此,实际当中是难以实现的。

本文关注三峡水库补给水系(图 1)^[13],我们推

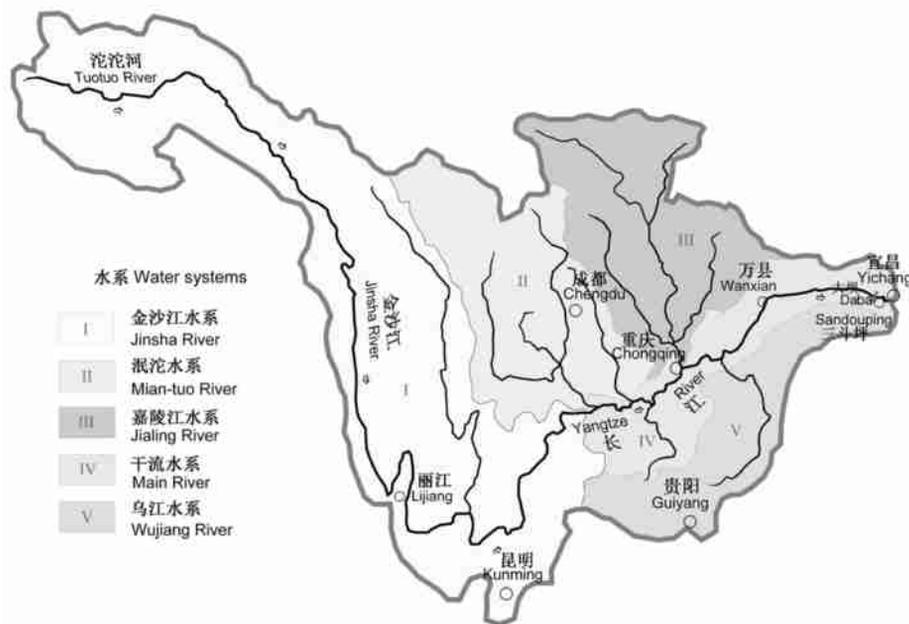


图 1 三峡水库及其补给水系分布

图中三峡水库位于重庆和三斗坪之间、沿长江分布,其五大补给水系构成了水库的源头(东经 90°~112°,北纬 24°~36°),总面积达 1000000 km²。

Fig. 1 Three Gorges Reservoir and the five supply water systems

Three Gorges Reservoir is between Chongqing and Sandouping along the Yangtze River.

The five supply water systems constitute the water sources of the reservoir (90°E~112°E, 24°N~36°N).

The total area amounts to 1000000 km².

估了该区从 2002 年 5 月至 2004 年 7 月共 22 个月的水储量变化,其结果对三峡工程具有非常重要的意义.三峡工程是当今世界上最大的水电工程^[14].如图 1 所示,在宜昌以西三斗坪 185 m 高坝拦截长江,在上游至重庆间形成长约 600 km,平均宽约 1.1 km 的狭长型水库^[12,15,16];在 2003,2006,2009 三次蓄水事件后,坝前水位从 78m 分别上升至 135 m,156 m,175 m,最后的实际蓄水量达 $393 \times 10^8 \text{ m}^3$.该工程的主要功能是发电、控制洪水和改善航运条件,设计年总发电量 $847 \times 10^8 \text{ kWh}$.实践证明三峡工程逐渐带来巨大的经济效益.然而要达到这些目标,必须监测三峡水库 5 大补给水系总的水储量可能的变化.但是,该区水文观测站在有些地域较稀疏,分布又不均匀,数据仅反映直至 10 km 范围的水文情况,而先前使用的遥感技术仅能反映几十厘米深的水量变化.要克服过去这些技术和手段的不足,本文在该区尝试利用 GRACE 时变重力模型监测水储量变化的新途径.

2 方法和数据

2.1 反演方法

为估计区域的水储量变化,当前主要有基于高斯圆滑 (Gaussian smoothing) 和最佳平均核 (optimal average kernel) 两种方法^[17].对于后者,需要已知完整的卫星重力观测误差协方差阵和先验信号协方差阵,下面阐述的第一种方法相对简单易行,因此在本文中得到应用.

这里所使用的时变重力模型,由地球重力位规格化的球谐系数的月平均估计组成 (GRACE 的二级数据产品)^[18].由于水储量变化通常限制在地球表面非常薄的层内,则任意处 (余纬 θ , 经度 ϕ) 相应的等效质量面密度变化可由下式用规格化球谐展开表达^[13]:

$$\begin{aligned} \sigma(\theta, \phi) = & \frac{a_E}{3} \sum_{l=0}^l \sum_{m=0}^l \frac{2l+1}{1+k_l} \tilde{P}_l^m(\cos \theta) \\ & \times (C_{lm} \cos m\phi + S_{lm} \sin m\phi), \quad (1) \end{aligned}$$

其中 C_{lm} 和 S_{lm} 是 GRACE 时变重力模型系数在两个不同时间的变化; $\tilde{P}_l^m(\cos \theta)$ 是规格化的连带勒让德函数; k_l 是 l 阶负荷勒夫数,它依赖于球对称地球的弹性和密度结构^[19,20],阶数 l 对应的重力场的空间分辨率为 $2a/l$; E 是地球平均密度; a 是地球平均半径. 应该注意的是, (1) 式 $(1+k_l)$ 中“1”和“ k_l ”分

别引入直接的牛顿引力效应和地球内部质量重新分布引起的间接效应.

然而,对于地表任一点,利用 (1) 式计算的结果基本上没有实际意义,这是因为时变的球谐系数有较大的观测误差,它们的影响随着乘积因子 $(2l+1)$ 增大而放大,因此该影响对高阶项特别显著;另外,重力场模型球谐系数的最大阶次是非常有限的,将不可避免地导致估计的水储量变化有截断的影响.幸运的是,当利用下列 (2) 式计算一较大区域 (例如本文的三峡水库补给水系) 的平均水质面密度变化时,使用一种平均核可大大改善结果的精度^[17]:

$$\bar{\sigma}(\theta, \phi) = \frac{1}{\text{region}} \int (\sigma(\theta', \phi')) \bar{w}(\theta, \phi) d\Omega, \quad (2)$$

其中 $d\Omega = \sin \theta' d\theta' d\phi'$ 是该区域 region 的立体角元, $\bar{w}(\theta, \phi)$ 为平均核,对于本文使用的高斯圆滑法,平均核可通过区域或盆地函数与高斯滤波器作褶积求得:

$$\bar{w}(\theta, \phi) = \int W(\theta, \phi, \theta', \phi') \vartheta(\theta', \phi') d\Omega'. \quad (3)$$

这里盆地函数在盆地内外 $\vartheta = 1/0$, 高斯滤波函数为^[21]

$$W(\theta, \phi, \theta', \phi') = W(\theta, \theta') = \frac{b \exp[-b(1 - \cos \theta)]}{2(1 - \exp(-2b))}, \quad (4)$$

其中 θ 是 (θ, ϕ) 和 (θ', ϕ') 之间的角距, $b = \ln 2 / [1 - \cos(r_{1/2}/a)]$, $r_{1/2}$ 是高斯滤波半径或平均半径, $r_{1/2}$ 越大对高阶测量误差的压制作用越大.

将 (3) 式中高斯滤波函数作勒让德展开、区域函数作球谐展开, (2) 式重写成:

$$\bar{\sigma}(\theta, \phi) = \frac{2}{3} \frac{a_E}{\text{region}} \sum_{l=0}^{l_{\max}} \sum_{m=0}^l \frac{2l+1}{1+k_l} W_l(\theta) (\vartheta_{lm}^C C_{lm} + \vartheta_{lm}^S S_{lm}), \quad (5)$$

其中 W_l 是高斯滤波函数 (4) 的勒让德展开系数, ϑ_{lm}^C 和 ϑ_{lm}^S 为区域函数的规格化球谐展开系数, l_{\max} 是重力模型和 (5) 式反演所使用的最大阶数,大于 l_{\max} 的项被截断. 与 (2) 式相比, (5) 式更适合于计算. 我们知道, 水厚度变化 (H) 直接反映水储量的变化, 根据 (2) 式或 (5) 式求解的质量面密度变化结果除以水的密度得到 H , 而水的密度非常接近 1 g/cm^3 , 所以用 (5) 式就可直接评估三峡补给水系的总水储量变化.

在本文的球谐分析和求和中, 使用了文献 [22] 提出的一种算法.

2.2 检验方法

由于利用卫星时变重力估计水储量变化还处于

初期试验阶段,很有必要对反演结果进行检验.根据国外最近的有关研究^[1,17],利用月平均的 $1^\circ \times 1^\circ$ CPC 水文学同化模型^[23],可产生用作对比的结果.必须指出,CPC 模型本身也有一定误差,因此通过比较很难判断 CPC 模型的结果和 GRACE 重力数据的反演结果的相对优劣,然而,目前尚无其他可靠的比较标准.从 CPC 模型出发,有两种比较的方式:其一,根据现有前人的研究,将反演结果与 CPC 模型按(2)式的加权平均结果相比较,注意 CPC 模型的结果可由下列两个步骤计算:(1)用 CPC 模型正演合成时变重力场,按 GRACE 重力同样的球谐阶次截断和时间系列给出月平均结果;(2)由(5)式利用 CPC 合成重力数据反演.值得注意的是,反演中使用了上述同样的高斯平均,其平均核在盆地内小于 1,这使得盆地内总权小于 1.然而,我们更应该关注与真实的平均水储量变化的比较,其平均核在盆地内为 1,盆地内总权正好为 1,这种比较对于了解一个区域的总水储量变化更加重要,所以,第二种方法即是 GRACE 的反演结果与 CPC 模型的真实平均结果进行比较.为方便起见,我们简单地将上述两种比较分别称为“高斯比较”和“真实比较”.由来自 GRACE 时变重力场、CPC 模型的两组结果的均方差来评估比较结果.

这里就两种比较来讨论一下误差源.可以肯定的是,来自 GRACE 重力模型和 CPC 模型误差都对比较的均方差有贡献,但现在我们仅分析来自重力模型的误差.对高斯比较,来自球谐系数特别是较高阶项系数的测量误差是惟一的误差来源;而对真实比较,除了这种测量误差外渗漏误差也影响比较结果.我们知道,三峡补给水系平均水厚度变化是通过高斯平均法获得,这样渗漏误差由研究区外质量信号的渗漏引起.由基于 CPC 模型的所谓“渗漏检验”可考察渗漏误差,为此,我们采用与 GRACE 数据系列一样的时间采样,基于 CPC 水文同化模型合成计算时变重力模型,再比较基于 CPC 模型合成重力的反演结果和真实平均结果,计算均方差,该均方差应该能反映渗漏误差.均方差越大,渗漏误差就越大,反之亦然.

2.3 数据

本文采用从 2002 年 5 月到 2004 年 7 月的 22 个 GRACE 近月平均重力场模型系列,该模型系列数据已有效地进行了潮汐改正、非潮汐大气和海洋影响

的改正^[18],此外,GRACE 不同月重力模型球谐系数数据大部分反映与地球静态结构相关的成分,我们需要减去 22 个月的平均值(为保持一致性,对后面的合成重力场要作同样的处理),这样所得的时变重力数据能基本反映陆地水储量的变化,因此能用于反演计算.

计算中,球谐系数取 GRACE 和合成时变重力场模型提供的 2~72 阶次的的数据;由于 GRACE 模型的 C20 精度较低,因此都不考虑 C20 项;GRACE 不能观测重力场的 0 阶和 1 阶项.负荷勒夫数将采用我们针对 PREM 地球模型给出的一组高精度的计算结果^[19],该结果得到另一组独立研究的完全验证^[24],与 Han and Wahr^[25]的结果也非常一致.此外,地球平均半径取赤道值 6378.1363 km,地球平均密度 5517 kg/m³,水密度 1000 kg/m³,年周期 365.2422 天.

3 结果和讨论

3.1 高斯比较

利用 GRACE 时变重力模型和 CPC 合成重力模型分别反演了水储量变化,针对 300 km 到 1000 km 每隔 100 km 的平均半径系列进行反演,图 2 给出了部分结果.对 400 km 半径(图 2a),GRACE 的结果与 CPC 合成重力数据的结果大致相符,尽管两组结果之间存在较大的均方差(3.9 cm).从图 2 可以看出,均方差随着平均半径增加而减小(图 4),对 700 km 半径(图 2c),均方差减小到 2.1 cm.2002 年 5 月对比的结果较差正好说明卫星运转初期存在较大的观测误差.对 1000 km 半径(图 2e),均方差进一步减小到 1.3 cm.图 2(b,d,f)中还给出了上述 3 个不同半径、来自 GRACE 和 CPC 合成重力模型反演的水储量年变化,表 1 给出了其振幅和相位.显然,两组结果振幅差、相位差逐渐减小,对三个半径振幅差分别为 1.8 cm,0.6 cm 和 0.1 cm,相位差分别是 25.5 天,10 天和 1 天.应该指出,我们所预测的水储量变化具有较高的信噪比,特别对 1000 km 半径,所给出结果的峰谷差为 14 cm,年变化振幅为 5.8 cm,它们远大于上述相应的均方差和振幅差,因此,无论对总的水储量变化还是其年变化量,两组反演结果随着半径的增加而变得非常一致,这主要是由于半径不断增加压制了来自 GRACE 重力模型的测量误差.

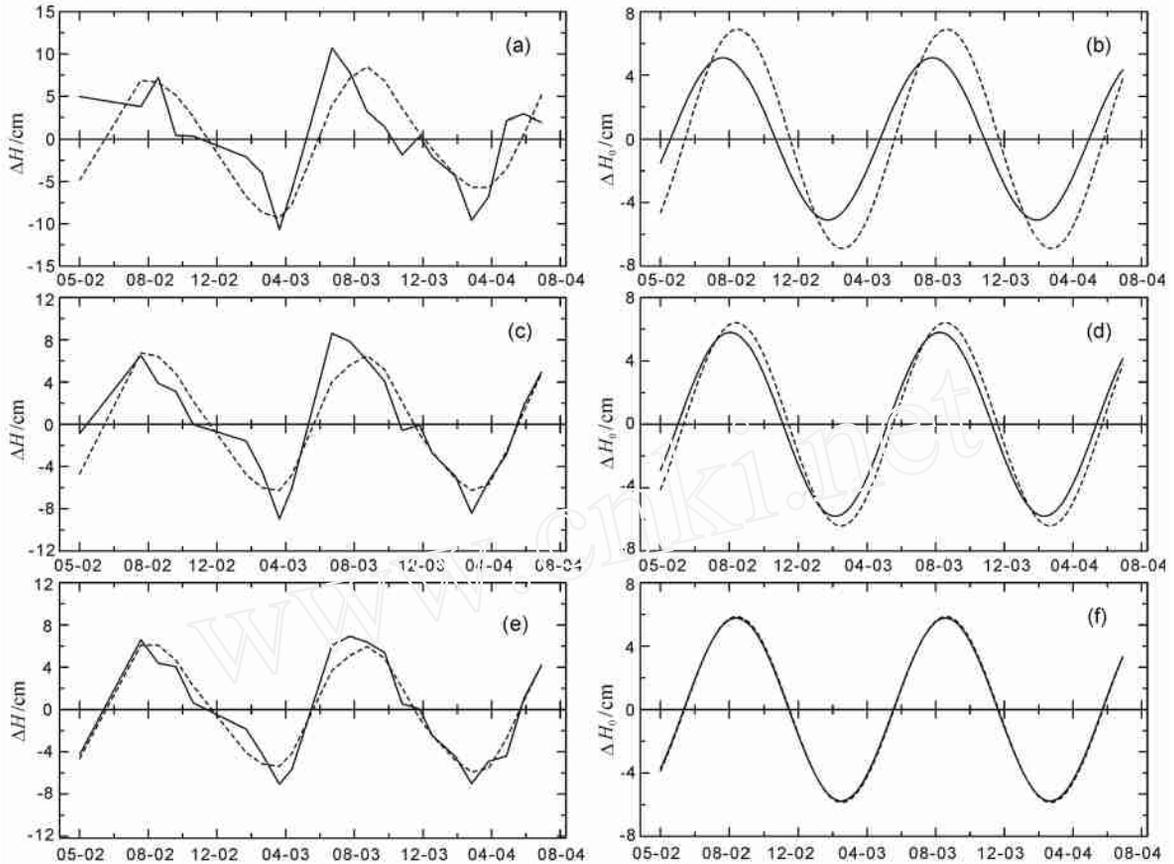


图 2 取不同平均半径时三峡水库补给水系水储量的变化

图中左右分别为总的水储量变化 (H) 和年变化 (H_0) 的结果. 实线是利用 22 个月 GRACE 时变重力模型反演的结果, 虚线是利用 CPC 水文模型合成重力数据反演的结果. 平均半径对 (a) 和 (b) 为 400 km, (c) 和 (d) 700 km, (e) 和 (f) 1000 km. 对 (a), (c) 和 (e) 两种结果比较的均方差为 3.9 cm, 2.1 cm 和 1.3 cm. 对 (b), (d) 和 (f) 年变化的振幅差为 1.8 cm, 0.6 cm 和 0.1 cm, 相应的相位差为 25.5 天, 10.0 天和 1 天.

Fig. 2 Water storage changes in the Three Gorges water systems area for different averaging radii

The left and right panels are total (H) and annual (H_0) results, respectively. The solid and dashed lines denote the inverted results from the 22 GRACE time-variable gravity models and the corresponding synthetic gravity data from CPC hydrological model. The radii used are 400 km for (a) and (b), 700 km for (c) and (d), and 1000 km for (e) and (f). The RMS differences are 3.9 cm for (a), 2.1 cm for (c) and 1.3 cm for (e). For the annual component, the compared differences in amplitude are 1.8 cm, 0.6 cm and 0.1 cm for (b), (d) and (f). The related differences in phase are 25.5 days, 10.0 days and 1 day.

表 1 图 2 中 (b), (d) 和 (f) 用 GRACE 和合成重力模型估计的年水储量变化的振幅和相位

Table 1 The amplitudes and phases of the annual water storage changes in Figs. 2 (b), (d) and (f), estimated from GRACE and synthetic gravity models

平均半径 (km)	GRACE 重力模型		CPC 合成重力模型	
	振幅 (cm)	相位 (天)	振幅 (cm)	相位 (天)
400	5.1	-17.4	6.9	-42.9
700	5.8	-30.4	6.4	-40.4
1000	5.8	-40.8	5.9	-41.8

3.2 真实比较

图 3 给出了 1000 km 半径真实比较的结果 (对不同半径的结果见图 4, 后面再讨论), 可以看出, GRACE 重力模型反演的结果与 CPC 水文模型的真实平均结果基本一致, 比较的均方差为 2.1 cm, 该值比峰谷幅度 14 cm 的反演信号相对较小. 对于年变化量, 反演的振幅和相位分别为 5.8 cm 和 -40.8 天, 与真实平均结果相差分别是 1.7 cm 和 9.3 天. 然而, 两组结果的差别显然大于高斯比较的结果, 这是因为真实比较中引入了额外的误差, 即渗漏误差, 渗漏误差将在 3.3 节讨论.

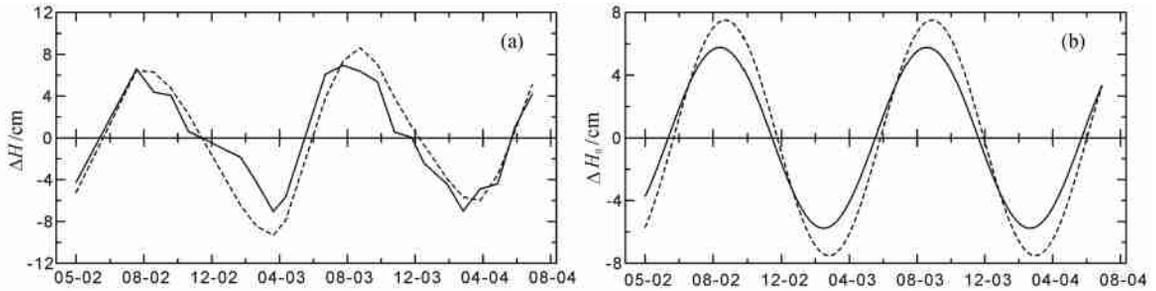


图 3 利用 GRACE 重力模型估计的三峡补给水系水储量变化(实线)与 CPC 模型平均结果(虚线)的比较

(a) (b) 分别为总的水储量变化(H)和年变化(H_0)估计的结果. 平均半径为 1000 km. 对总的水储量变化, 两种结果比较的均方差为 2.1 cm, 年变化振幅差为 1.7 cm, 相位差 9.3 天.

Fig. 3 Comparison of the estimated water storage changes in Three Gorges water systems area from GRACE gravity models (solid lines) for 1000 km radius and the true average results from CPC models (dashed lines)

(a) and (b) are total (H) and annual (H_0) results, respectively.

The RMS difference for total water storage changes is 2.1 cm, the amplitude difference for the annual component is 1.7 cm, and the phase is 9.3 days.

3.3 讨论

为了清楚地说明上述两种比较的均方差随着半径的变化,图 4 给出了 300~1000 km 的 8 个平均半径的结果,图中还一并给出了渗漏检验的结果. 容易看出,对两种比较,均方差随半径增加而衰减. 具体地,高斯比较的均方差均比真实比较的结果小,这说明用高斯比较来评估 GRACE 监测三峡补给水系水储量变化的能力不太合理,因为它可能夸大有效性. 现在,我们将真实比较和渗漏检验的均方差一起分析,从图 4,对 300 km 半径,它们分别取最大和最小

值,即分别为 6.0 cm 和 0.7 cm,因为对于如此小的平均半径平均核非常接近于盆地函数,渗漏检验的均方差是最小的,此时 GRACE 观测误差的影响最大. 随着半径增加,一方面 GRACE 观测误差的影响逐渐被压制,另一方面渗漏检验的均方差增大显示渗漏误差在变大. 对于 1000 km 半径,真实比较的均方差减少到它们的最小值 2.1 cm,而渗漏检验的结果增加到 1.9 cm,显然此时在本区反演的水储量变化中渗漏误差是主要的误差源.

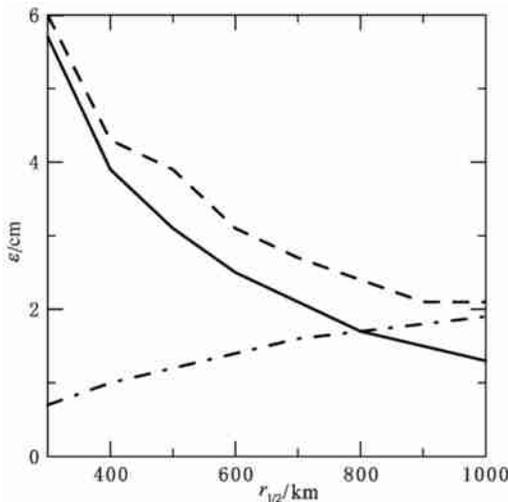


图 4 高斯比较(实线),真实比较(虚线)和渗漏检验(点虚线)均方差随平均半径 $r_{1/2}$ 的变化

Fig. 4 RMS differences (ϵ) for Gaussian comparison (solid line), true comparison (dashed line) and leakage check (dashed dot line) as a function of averaging radius ($r_{1/2}$)

4 结论

本文在高斯平均意义下,对不同的平均半径利用 GRACE 重力数据预测和揭示了三峡水库补给水系水储量的变化. 例如,对 1000 km 半径,总水储量变化的峰谷差为 14 cm,其年变化振幅为 5.8 cm,相位为 -40.8 天,这些结果与 CPC 水文模型合成重力数据的反演结果具有很好的一致性,特别对 1000 km 半径均方差仅为 1.3 cm,其年变化振幅和相位分别相差 0.1 cm 和 1 天. 然而要准确评估 GRACE 监测该区水储量变化的能力,我们建议与 CPC 模型的真实平均结果进行比较. 对总的水储量变化该比较的均方差是 2.1 cm,年变化的振幅和相位相差分别为 1.7 cm 和 9.3 天,这说明 1000 km 半径的反演结果基本上能真实反映该区水储量的变化,其结果对三峡工程具有重要的参考价值. 我们期待,在不久的将来有更加先进的卫星重力计划,能获取更高时空分辨率的重力场,这将使得单独估计该区 5 大水系的

水储量变化成为可能. 此外, 结合陆地水文和气象学数据能进一步研究该区的水气相互作用和不同水系之间的差别. 最后, 应该指出的是, 5 大水系与三峡水库水储量变化的关系对该水库的运转尤其重要, 值得将来深入研究.

参考文献 (References)

- [1] Tapley B D, Bettadpur S, Ries J C, et al. GRACE measurements of mass variability in the Earth system. *Science*, 2004, **305**:503 ~ 505
- [2] 周旭华, 吴斌, 彭碧波等. 用 GRACE 卫星跟踪数据反演地球重力场. *地球物理学报*, 2006, **49** (3): 718 ~ 723
Zhou X H, Wu B, Peng B B, et al. Earth's gravity field derived from GRACE satellite tracking data. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, **49** (3): 718 ~ 723
- [3] Wahr J, Molenaar M, Bryan F. Time-variability of the Earth's gravity field: hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**:30205
- [4] Wahr J, Swenson S, Zlotnicki V, Velicogna I. Time-variable gravity from GRACE: First results. *Geophys. Res. Lett.*, 2004, **31**:L11501
- [5] Chambers D P, Wahr J, Nerem R S. Preliminary observations of global ocean mass variations with GRACE. *Geophys. Res. Lett.*, 2004, **31**:L13310
- [6] Han S C, Shum C K, Jekeli C, Alsdorf D. Improved estimation of terrestrial water storage changes from GRACE. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, **32**:L07302
- [7] Chao B F. On inversion for mass distribution from global (time-variable) gravity field. *J. Geodynamics*, 2005, **39**: 223 ~ 230
- [8] Chen J L, Wilson C R, Tapley B D, Ries J C. Low degree gravitational changes from GRACE: Validation and interpretation. *Geophys. Res. Lett.*, 2004, **31**:L22607
- [9] Chen J L, Rodell M, Wilson C R, Famiglietti J S. Low degree spherical harmonic influences on GRACE water storage estimates. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, **32**(14): L14317
- [10] 周旭华, 吴斌, 彭碧波等. 全球水储量变化的 GRACE 卫星检测. *地球物理学报*, 2006, **49**(6): 1644 ~ 1650
Zhou X H, Wu B, Peng B B, et al. Detection of global water storage variation using GRACE. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, **49**(6): 1644 ~ 1650
- [11] Rodell M, Famiglietti J S, Chen J, et al. Basin scale estimates of evapotranspiration using GRACE and other observation. *Geophys. Res. Lett.*, 2004, **31**:L20504
- [12] Boy J P, Chao B F. Time-variable gravity signal during the water impoundment of China's Three-Gorges Reservoir. *Geophys. Res. Lett.*, 2002, **29**(24): 2200
- [13] 长江水利委员会编著. 长江流域水旱灾害. 北京: 中国水利水电出版社, 2002. 1 ~ 2
Yangtze River Water Conservancy Committee. Flood Catastrophe and Drought in Yangtze River Drainage Area (in Chinese). Beijing: China Water and Hydropower Press, 2002. 1 ~ 2
- [14] 长江水利委员会编. 三峡工程地质研究. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1997. 3 ~ 7
Yangtze River Water Conservancy Committee. On Engineering Geology for the Three Gorges Project (in Chinese). Wuhan: Hubei Sci. and Technol. Press, 1997. 3 ~ 7
- [15] Wang H. Surface vertical displacements and level plane changes in the front reservoir area by filling the Three Gorges Reservoir. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**(B6): 13211 ~ 13220
- [16] Wang H, Hsu H T, Zhu Y Z. Prediction of surface horizontal displacements, and gravity and tilt changes caused by filling the Three Gorges Reservoir. *J. Geodesy*, 2002, **76**:105 ~ 114
- [17] Swenson S, Wahr J. Method for inferring regional surface-mass anomalies from Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) measurements of time-variable gravity. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107**(B9): 2193
- [18] NASA/DLR. Mean monthly estimates of spherical harmonic coefficients for the Earth gravitational potential, Level - 2 Data Products. <http://isdc.gfz-potsdam.de/grace/>. or <ftp://podaac.jpl.nasa.gov/pub/grace/data/L2/csr/>, 2006
- [19] 汪汉胜, 许厚泽, 李国营. SNREI 弹性地球模型负荷勒夫数数值计算的新进展. *地球物理学报*, 1996, **39**(增刊): 182 ~ 189
Wang H S, Hsu H Z, Li G Y. Improvement of computations of load Love numbers of SNREI earth model. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1996, **39**(Suppl.): 182 ~ 189
- [20] 汪汉胜, Wu Patrick, Schotman Hugo 等. 横向非均匀地球负荷问题的 CLFE 有限元算法的有效性. *地球物理学报*, 2006, **49**(6): 1657 ~ 1664
Wang H S, Wu Patrick, Schotman Hugo, et al. Validation of the Coupled-Laplace-Finite-Element method for the loading problem of a laterally heterogeneous spherical Earth. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, **49**(6): 1657 ~ 1664
- [21] Jekeli C. Alternative methods to smooth the earth's gravity field. Report 327, Department of Geodetic Science and Surveying, Ohio State University, Columbus, 1981
- [22] Wang H, Wu P, Wang Z. An approach for spherical harmonic analysis of non-smooth data. *Computers & Geosciences*, 2006, **32**: 1654 ~ 1668
- [23] NOAA Climate Prediction Center (CPC). $1^\circ \times 1^\circ$ monthly averaged soil water storage changes in equivalent water thickness from January, 1980 to December, 2004. Web link to CPC LDAS Project: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/soilmst/> or <http://www.csr.utexas.edu/research/ggfc/datasources.html>, 2006
- [24] Guo J, Ning J, Zhang F. Chebyshev-collocation method applied to solve ODEs in geophysics singular at the Earth center. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, **28**(15): 3027 ~ 3030
- [25] Han D, Wahr J. The viscoelastic relaxation of a realistically stratified earth, and a further analysis of post-glacial rebound. *Geophys. J. Int.*, 1995, **120**:287 ~ 311

(本文编辑 胡素芳)