

基于 GRACE 数据的西南陆地水储量分析

刘 卫^{1,2†} 缪元兴¹

(1 中国科学院国家天文台 / 云南天文台 昆明 650011)

(2 中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 利用地球重力卫星 GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) 2005 年 1 月 ~ 2010 年 4 月期间 64 个月的数据, 对我国西南地区陆地水储量变化进行了反演. 结果表明, 选取适当的高斯半径 ($R = 600$ km) 和所采用数据的平均引力场作为背景引力场, 则基于 GRACE 数据反演的西南陆地水储量很好地反映了 2010 年初的西南旱情.

关键词 天体测量学, 天体力学, 方法: 数值

中图分类号: P 128; **文献标识码:** A

1 引言

2002 年 3 月 GRACE 重力卫星的成功发射, 为重力场异常研究提供了前所未有的高精度的测量数据. 学者们利用 GRACE 数据对陆地水储量变化、冰川质量变化、地震等进行研究, 并取得丰硕的成果. Wahr 等^[1] 早在 GRACE 发射前已对其用于检测水文、海洋效应进行了分析, 给出了陆地面密度变化公式, 研究表明基于 GRACE 数据反演陆地等效水高变化精度可达 2 mm, 海底压力达 0.1 mbar; Yamamoto 等^[2] 利用 Level-2 数据对印度半岛的 4 条主要河流流域陆地水变化进行分析. 国内也有利用 GRACE 数据的相关研究, 如黄 斌 等^[3] 对 GRACE 卫星的空间分辨率和其用于地表水变化精度进行了分析; 翟宁等^[4] 反演长江流域水储量变化; 段虎荣等^[5] 进行汶川地震前后重力场异常研究. 本文利用 GRACE 地球重力卫星 2005 年 1 月 ~ 2010 年 4 月期间 64 个月的数据, 对西南地区陆地水储量进行了反演. 结果表明, 选取适当的高斯半径和所采用数据的平均引力场作为背景引力场, 则基于 GRACE 数据反演的西南陆地水储量很好地反映了云南干湿两季交替的气候和 2010 年初的西南旱情.

2 数据处理方法与模型

2.1 GRACE 科学数据产品

历元时刻的背景引力场可以表示为

$$G^* = \overline{G}^* + G'(t - t_0) + \delta G^{\text{st}}(t) + \delta G^{\text{ot}}(t) + \delta G^{\text{pt}}(t) + \delta G^{\text{a+o}}(t), \quad (1)$$

2010-07-29 收到原稿, 2010-08-31 收到修改稿

† weil@ynao.ac.cn

其中 \bar{G}^* 为静态引力场, $G'(t-t_0)$ 为引力场的长期变化项, $\delta G^{\text{st}}(t)$ 、 $\delta G^{\text{ot}}(t)$ 、 $\delta G^{\text{pt}}(t)$ 、 $\delta G^{\text{a+o}}(t)$ 分别为固体潮、海潮、极潮、大气和海洋的非潮汐变化引起的引力场变化.

在 GRACE 科学数据 Level-2 产品中, 利用观测值与计算值的残差建立条件方程解出静态引力场的修正值 $\delta \hat{G}(T_s)$, 所以 T_s 时段内引力场值 $\tilde{G}(T_s)$ 为

$$\tilde{G}(T_s) = \bar{G}^* + \delta \hat{G}(T_s). \quad (2)$$

也就是说在 Level-2 产品的处理过程中, 通过固体潮、海潮、极潮和大气与海洋的非潮汐模型移除了对引力场的影响. 可见 Level-2 产品中引力场的变化反映的主要是陆地水储量的变化, 当然还包含其他未模型化的地球物理现象. 提供 Level-2 产品的有德克萨斯大学空间研究中心 (UTCSR)、美国喷气推进实验室 (JPL)、德国地学研究中心 (GFZ). 由于 GRACE 两颗星之间的配置 (如: 轨道高度、两星间距) 使得其对 J_2 项不敏感^[6-7]. Cheng 等^[8] 提供了基于 5 颗激光卫星 LAGEOS-1、LAGEOS-2、Starlette、Stella、Ajisai 的 J_2 项月变化序列解, 可用于替换 Level-2 产品中的 C_{20} 项. 图 1 中曲线 CSR-GSM- J_2 和 CSR-SLR- J_2 、JPL-SLR- J_2 、GFZ-SLR- J_2 分别给出替换 C_{20} 前后由 UTCSR、JPL、GFZ 数据得出的等效水高变化. 横坐标起点为 2005 年 1 月. 研究表明, C_{20} 项反映的陆地水储量变化量最高可达 10%^[2]. GRACE 卫星对重力场短波项的测量误差随波长变短而迅速增大, 以至于无法反映引力信号的变化, 故球谐项阶数最好小于 80 阶, 最高不能超过 100 阶^[1].

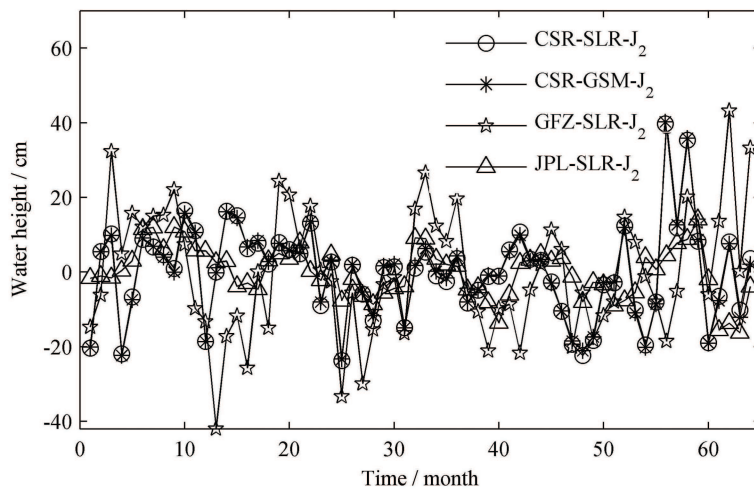


图 1 等效水高度的月平均变化

Fig. 1 Monthly average variation of equivalent water height

2.2 陆地水储量变化模型

假定由质量重新分布引起的密度变化为 $\Delta\rho(r, \theta, \phi)$, 则相应的球谐项系数变化可表示

为^[1]

$$\begin{cases} \Delta C_{lm} \\ \Delta S_{lm} \end{cases} = \frac{3}{4\pi\rho_{\text{ave}}(2l+1)} \int \Delta\rho(r, \theta, \phi) \left(\frac{a}{r}\right)^{l+2} \tilde{P}_{lm}(\cos\theta) \begin{cases} \cos(m\phi) \\ \sin(m\phi) \end{cases} \sin\theta d\theta d\phi dr, \quad (3)$$

其中 r 、 θ 、 ϕ 分别为质量元地心距、余纬、东经; l 、 m 分别为重力场球谐展开项阶、次; \tilde{P}_{lm} 为归一化的缔合勒让德多项式; a 、 ρ_{ave} 分别为地球平均半径、地球平均密度 (取 $a = 6371 \text{ km}$, $\rho_{\text{ave}} = 5517 \text{ kg/m}^3$).

定义地球表面面密度变化

$$\Delta\sigma(\theta, \phi) = \int \Delta\rho(r, \theta, \phi) dr, \quad (4)$$

由 (3) ~ (4) 式经过一系列推导可得出 $\Delta\sigma(\theta, \phi)$ 与 ΔC_{lm} 、 ΔS_{lm} 的关系式为

$$\Delta\sigma(\theta, \phi) = \frac{a\rho_{\text{ave}}}{3} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l \frac{2l+1}{1+k_l} \tilde{P}_{lm}(\cos\theta) [\Delta C_{lm} \cos(m\phi) + \Delta S_{lm} \sin(m\phi)], \quad (5)$$

其中 k_l 为负荷 love 数.

对于负荷 love 数文献 [1] 中给出了弹性地球模型在某些阶的值, 对于其它 $l < 200$ 阶的 k_l 值可以通过线性插值给出, 由此引起的误差小于 0.05%. 考虑到地球的滞弹性对 k_l 的影响在 1% 左右^[1]. 由于 GRACE 卫星对球谐系数敏感程度随阶数的升高而降低, 高阶球谐项系数误差较大. 为减小高阶项引入的误差, 采用高斯权函数 w_l 对高阶球谐系数进行降权处理, w_l 随阶数 l 的增大而递减. w_l 函数表达式中的高斯半径 R 表征空间分辨率, R 减小时, 空间分辨率得到提高. 图 2 给出了 w_l 在不同高斯半径 R 下随阶数变化的曲线. 由图可以看出在减小 R 的情况下, w_l 随 l 的增大下降减缓, 加大了高阶球谐项系数的权重. 在高阶球谐项系数误差较小的情况下, 可以通过减小 R 提高空间分辨率. 由于 GRACE 为近极轨卫星, 故其星下点轨迹随纬度增高变密集, 进而高纬度地区具有更高的空间分辨率^[9]. 通过反复的对比计算发现, 西南地区纬度范围选取高斯半径 $R = 600 \text{ km}$ 时, 空间分辨率较好. w_l 可通过如下的递推公式给出:

$$w_{l+1} = -\frac{2l+1}{b} w_l + w_{l-1} \quad (l \geq 1), \quad w_0 = \frac{1}{2\pi}, \quad w_1 = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{1+e^{-2b}}{1-e^{-2b}} - \frac{1}{b} \right],$$

其中 $b = \frac{\ln 2}{1 - \cos(R/a)}$.

高斯加权后的地球表面面密度变化 $\Delta\sigma(\theta, \phi)$ 表示为

$$\Delta\sigma(\theta, \phi) = \frac{2a\rho_{\text{ave}}\pi}{3} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l \frac{2l+1}{1+k_l} w_l \tilde{P}_{lm}(\cos\theta) [\Delta C_{lm} \cos(m\phi) + \Delta S_{lm} \sin(m\phi)], \quad (6)$$

将高斯加权后的地球表面面密度变化等效成水高度变化 $\Delta H_{\text{water}}(\theta, \phi)$ 为

$$\Delta H_{\text{water}}(\theta, \phi) = \Delta\sigma(\theta, \phi) / \rho_w = \frac{2a\rho_{\text{ave}}\pi}{3\rho_w} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l \frac{2l+1}{1+k_l} w_l \tilde{P}_{lm}(\cos\theta) [\Delta C_{lm} \cos(m\phi) + \Delta S_{lm} \sin(m\phi)], \quad (7)$$

ρ_w 为水密度 (取 $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$). 由量纲分析可知各物理量均采用国际单位制的情况下, $\Delta H_{\text{water}}(\theta, \phi)$ 单位为 m.

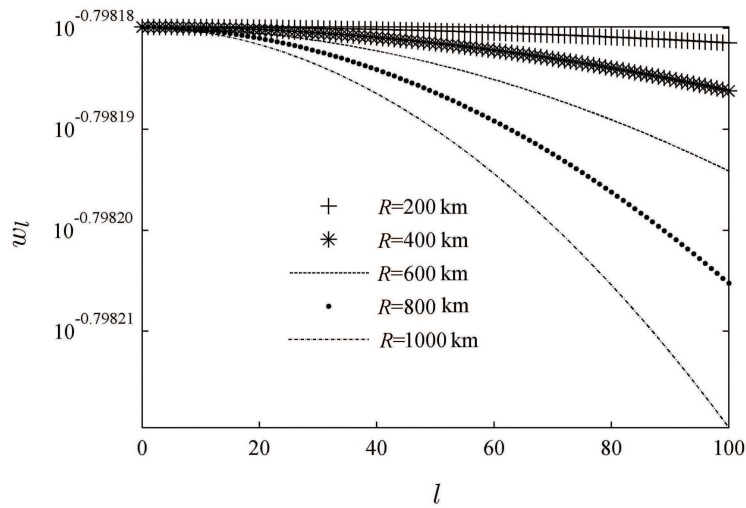


图 2 权系数 w_l 的变化

Fig. 2 The variation of weight w_l

2.3 背景引力场的选取

背景引力场作为月重力场相对变化的基准, 由月重力场与背景引力场相减得到球谐系数的变化量 ΔC_{lm} 、 ΔS_{lm} . GGM03C 是 UTCSR 的 Tapley 等人利用 2003 年 1 月 ~ 2006 年 12 月 (2004 年 1 月除外, 历元中点为 2005.0) 4 yr 的 GRACE 数据求得的平均重力场 G_{03C}^* ^[10].

$$G_{03C}^* = G(t_0) + \sigma_{03C}, \quad (8)$$

$$G_{\text{month}}^* = G(t) + \sigma_{\text{month}}, \quad (9)$$

$$\overline{G}_{\text{month}}^* = \overline{G}(t) + \overline{\sigma}_{\text{month}}. \quad (10)$$

其中 G_{03C}^* 、 G_{month}^* 、 $\overline{G}_{\text{month}}^*$ 分别为 GGM03C、月重力场、平均月重力场. σ_{03C} 、 σ_{month} 、 $\overline{\sigma}_{\text{month}}$ 及 $G(t_0)$ 、 $G(t)$ 、 $\overline{G}(t)$ 分别为对应的随机误差及真值.

首先我们把 GGM03C 作为背景引力场, 可能是由于月重力场可利用的测量数据较少, 不能充分利用统计信息将一些模型和测量随机误差移除, 故 σ_{month} 远大于 σ_{03C} , 月重力场精度低于 GGM03C. 由于两重力场信息的不对称, 导致球谐项系数变化量 ((9) 式与 (8) 式的差) 中含有较大的随机误差. 这些随机误差通过复杂的非线性关系传递到 (7) 式中, 以至于我们得出的结果不理想. 所以我们采用 (10) 式, 即与月重力场同精度的 64 个月重力场的平均值, 作为背景引力场. σ_{month} 、 $\overline{\sigma}_{\text{month}}$ 具有相同量级, (9) 式与 (10) 式相减后可以有效地移除随机误差. 另外由两种背景重力场解算方法可知, GGM03C 中不含有季节性变化信息, 而 64 个月重力场的平均值中含有季节性变化信息的平均值. 所

以选用后者为背景重力场相减后更能凸显季节性异常变化, 而这些信息正是我们所需要的.

3 数据分析

由第 2 节给出的模型与方法, 对 2005 年 1 月 ~ 2010 年 4 月期间, 北纬 $21.33^{\circ} \sim 32.78^{\circ}$ 、东经 $100.65^{\circ} \sim 108.88^{\circ}$ 区域的地球表面等效水高度月变化序列采用 UTCSR、JPL 的 60×60 阶和 GFZ 的 120×120 阶截取 60 阶后的 GSM 产品进行了计算, 如图 1 所示. 从图中可以看出 2009 年底起水储量波动幅度较之前有所减小, 反映出西南地区的旱情. 由于对 GFZ 的数据产品进行降阶处理, 从图中可以看出 GFZ 与 UTCSR 和 JPL 曲线差异较大. 2009 年 8 月与 10 月 UTCSR 数据出现两个波峰, 综合 2005 年以来的水储量波动振幅变化来看, 此波峰不是由水储量变化引起; 与 JPL 和 GFZ 数据对比后, 可以认定该波峰是由于 UTCSR 数据异常引起的, 反映的并不是真实的地球物理现象.

图 3 分别给出了 2009 年 4 月和 2010 年 4 月我国西南地区等效水高. 从图中比较可以看出 2010 年 4 月相比 2009 年 4 月西南地区陆地水储量明显偏少, 昆明、成都、贵阳、南宁 2010 年 4 月陆地水储量等效水高分别为 -5 cm 、 -1 cm 、 3 cm 、 6 cm , 而 2009 年同期分别为 12 cm 、 8 cm 、 18 cm 、 17 cm 左右. 反映出了 2010 年初我国西南地区大面积的干旱.

4 总结与展望

由前两节的分析可以看出, 选取适当的高斯半径 ($R = 600 \text{ km}$) 和所采用数据的平均月重力场作为背景引力场, 基于 GRACE 数据反演的西南陆地水储量很好地反映了云南干湿两季交替的气候和 2010 年初的西南旱情. 但同时我们也看到基于 Level-2 数据的分析, 空间、时间分辨率的不足. 高的时空分辨率要求我们利用 GRACE 或将来我们国家自己发射的测地卫星数据, 自己解算高阶次、高精度的引力场球谐项系数, 这对于国民经济发展与基础科学研究具有重要意义.

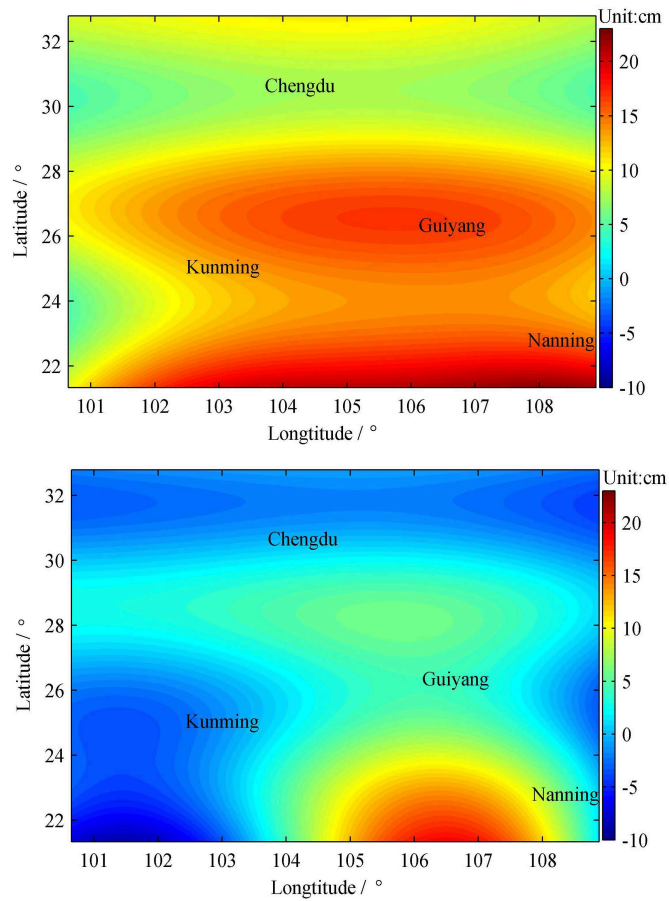


图 3 2009 年 4 月 (上) 和 2010 年 4 月 (下) 西南地区等效水高 (单位: cm)

Fig. 3 Equivalent water height of April 2009 (top) and April 2010 (bottom) in southwest China
(Unit: cm)

致谢 感谢 UTCSR、JPL、GFZ 提供的 GRACE Level-2 数据和审稿人提出的宝贵意见。

参 考 文 献

- [1] Wahr J, Molenaar M, Bryan F. JGR, 1998, 103: 30205
- [2] Yamamoto K, Fukuda Y, Nakaegawa T, et al. EP&S, 2007, 59: 193
- [3] 黄 斌, 胡小工. 天文学进展, 2004, 22: 35
- [4] 翟宁, 王泽民, 伍岳, 等. 武汉大学学报: 信息科学版, 2009, 34: 436
- [5] 段虎荣, 张永志, 刘锋, 等. 地震研究, 2009, 32: 295
- [6] 郑伟, 许厚泽, 钟敏, 等. 天文学报, 2010, 51: 65

- [7] Zheng W, Hsu H T, Zhong M, et al. ChA&A, 2010, 34: 413
[8] Cheng M, Tapley B D. JGR, 2004, 109: 4021
[9] Swenson S C, Milly P C D. WRR, 2006, 42: W03201
[10] Tapley B, Ries J, Bettadpur S, et al. TAGUFM, 2007, G42A: 03

The Analysis of the Southwestern Landwater Storage Based on GRACE Data

LIU Wei^{1,2} MIAO Yuan-xing¹

(1 *National Astronomical Observatories/Yunnan Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011*)

(2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*)

ABSTRACT Based on the 64-month data of GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) from January 2005 to April 2010, the inversion of the landwater storage in the southwest China is carried out in this paper. GRACE is a near polar orbiting satellite, so the subsatellite points become dense with increasing latitude, and thus the region with a higher latitude has a higher spatial resolution. By repeated calculations and comparison, it is found that with appropriate Gaussian radius ($R = 600$ km) in the southwest China and taking the monthly average gravitational field as the background gravitational field, the landwater storage estimated from GRACE data well reflects the climate change and the drought in early 2010.

Key words astrometry, celestial mechanics, methods: numerical