

朱传东, 陆洋, 史红岭等. 2015. 高亚洲冰川质量变化趋势的卫星重力探测. 地球物理学报, 58(3): 793-801, doi:10.6038/cjg20150309.

Zhu C D, Lu Y, Shi H L, et al. 2015. Trends of glacial mass changes in High Asia from satellite gravity observations. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58(3): 793-801, doi:10.6038/cjg20150309.

高亚洲冰川质量变化趋势的卫星重力探测

朱传东^{1,2}, 陆洋¹, 史红岭^{1,3,4}, 张子占^{1,5}, 杜宗亮^{1,2}, 高春春^{1,2}

1 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, 武汉 430077

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 极地测绘科学国家测绘地理信息局重点实验室, 武汉 430079

4 地理空间信息工程国家测绘地理信息局重点实验室, 北京 100830

5 美国德克萨斯大学空间研究中心, 奥斯汀 78759

摘要 利用高亚洲地区 32 个 Mascon, 基于 GRACE RL05 时变重力场模型频域和空域上的两种计算方法有效分离并提取出高亚洲冰川及其毗邻地区的等效水质量变化, 得到 2002—2013 年期间高亚洲地区更为可靠的 Mascon 质量变化. 高亚洲冰川质量变化的空间特征是: 青藏高原内陆地区以正增长为主, 边缘地区以负增长为主, 在藏东南的最边缘地区冰川质量损失最为严重. 天山地区、帕米尔和昆仑山地区、喜马拉雅山和喀喇昆仑山地区、青藏高原内陆地区冰川质量的平均变化趋势分别为 -2.8 ± 0.9 Gt/a、 -3.3 ± 1.5 Gt/a、 -9.9 ± 2.1 Gt/a 和 5.0 ± 0.8 Gt/a, 高亚洲冰川质量整体的平均变化趋势为 -11.0 ± 2.9 Gt/a. 印度等北部平原地区地下水平均变化趋势为 -35.0 ± 4.2 Gt/a, 该地区地下水信号泄漏是影响 GRACE 研究高亚洲冰川质量变化的关键因素, 频域法和空域法能有效改正该地区地下水信号泄漏的影响.

关键词 GRACE; 高亚洲; 冰川质量变化; 频域; 空域; Mascon; 信号泄漏

doi:10.6038/cjg20150309

中图分类号 P312

收稿日期 2014-03-18, 2014-06-27 收修定稿

Trends of glacial mass changes in High Asia from satellite gravity observations

ZHU Chuan-Dong^{1,2}, LU Yang¹, SHI Hong-Ling^{1,3,4}, ZHANG Zi-Zhan^{1,5},
DU Zong-Liang^{1,2}, GAO Chun-Chun^{1,2}

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

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

3 Key Laboratory of Polar Surveying and Mapping, SBSM, Wuhan 430079, China

4 Key Laboratory of Geo-Informatics of National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation, Beijing 100830, China

5 Center for Space Research, University of Texas at Austin, Austin 78759, USA

Abstract The High Asia is the largest glacierized region over low-and mid-latitudes. During the last decade, the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) satellite mission has provided valuable data for monitoring glacial mass changes in High Asia. The new released GRACE RL05 data is used to estimate the glacial mass changes in High Asia from April 2002 to July 2013.

基金项目 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2013CB733301)、国家自然科学基金(41274025, 41174064)、地理空间信息工程国家测绘地理信息局重点实验室资助项目(201307)、极地测绘科学国家测绘地理信息局重点实验室开放基金(201204)、国家海洋局极地科学重点实验室开放研究基金(KP201202)、大地测量与地球动力学国家重点实验室自主项目(SKLGED2013-2-2-Z)和中国科学院测量与地球物理研究所重要方向项目(Y309451048)联合资助。

作者简介 朱传东, 男, 1986 年生, 博士研究生, 主要从事空间大地测量数据处理及其应用的研究. E-mail: zhuchuangdong@asch.whigg.ac.cn

After removing glacial isostatic adjustment (GIA) and hydrological contributions from GRACE RL05 data, the least square fitting in the spectral domain and iteration in the spatial domain are used to separate the equivalent water mass changes in 17 mascons over High Asia and 15 mascons over the plains of northern India, and quantify more reliable mass changes in High Asia during the period 2002 to 2013. The impacts of groundwater signal leakage from the plains of northern India on GRACE estimates are discussed in detail based on 17 mascons over High Asia.

The equivalent water mass changes in mascons are obtained in the spectral and spatial domain. The equivalent water height changes estimated from spectral and spatial domain show a good agreement in the spatial distribution. The largest equivalent water height change trends of Tianshan, Pamirs and Kunlun shan, Himalaya and Karakorum, Inner Tibet Plateau estimated from spectral and spatial domain are $-1.7 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ and $-2.1 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$, $-1.5 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ and $-2.0 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$, $-10.9 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ and $-16.3 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$, $2.2 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ and $2.6 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$, respectively. The average glacial mass change trends of Tian Shan, Pamirs and Kunlun Shan, Himalaya and Karakorum, Inner Tibetan Plateau are $-2.8 \pm 0.9 \text{ Gt/a}$, $-3.3 \pm 1.5 \text{ Gt/a}$, $-9.9 \pm 2.1 \text{ Gt/a}$, $5.0 \pm 0.8 \text{ Gt/a}$, respectively. The average glacial mass change trend of High Asia is $-11.0 \pm 2.9 \text{ Gt/a}$. The groundwater in the plains of northern India shows obviously mass loss at rate of $-35.0 \pm 4.2 \text{ Gt/a}$. Without considering the leakage effects from the plains of northern India, the average glacial mass change trends of four sub regions in High Asia are $-2.7 \pm 1.0 \text{ Gt/a}$, $-1.5 \pm 1.5 \text{ Gt/a}$, $-15.7 \pm 1.8 \text{ Gt/a}$, $5.0 \pm 0.8 \text{ Gt/a}$, respectively, and average glacial mass change trend of High Asia is $-14.9 \pm 2.7 \text{ Gt/a}$.

The spatial pattern of the glacial mass changes in High Asia is dominated by increases in the inland of the Tibetan Plateau, and by decreases at the margin, respectively. And the largest mass loss occurs at the margin of the southeastern Tibetan Plateau. The glacial mass change trends of Tian Shan, Pamirs and Kunlun Shan, Himalaya and Karakorum, Inner Tibetan Plateau are $-2.8 \pm 0.9 \text{ Gt/a}$, $-3.3 \pm 1.5 \text{ Gt/a}$, $-9.9 \pm 2.1 \text{ Gt/a}$, $5.0 \pm 0.8 \text{ Gt/a}$, respectively. The average glacial mass change trend of High Asia is $-11.0 \pm 2.9 \text{ Gt/a}$. The groundwater signal leakage from the plains of northern India is the key factor to study the estimations of the glacial mass changes in High Asia with GRACE data, and have significant impact on estimates in Pamirs and Kunlun Shan, Himalaya and Karakorum. The impact of such leakage can be effectively corrected by the spectral and spatial domain methods. Because GRACE senses the total mass change, the estimations of the glacial mass changes can be affected by various model errors. It is necessary to have a long and continuous measurement of satellite gravity, and combine the satellite gravity data with other space geodesy techniques to understand the mass change mechanism in High Asia.

Keywords GRACE; High Asia; Glacial mass changes; Spectral domain; Spatial domain; Mascon; Signal leakage

1 引言

全球山地冰川及冰盖的质量变化是近些年来备受人们关注的焦点, 尽管山地冰川存储的冰量远不及极地冰盖, 但山地冰川的质量亏损却不容忽视 (Chen et al., 2006; 鄂栋臣等, 2009; 史红岭等, 2011; 罗志才等, 2012; Jacob et al., 2012; Gardner et

al., 2013; Wouters et al., 2013). 高亚洲地区以青藏高原为中心, 涵盖亚洲中央众多地势高峻的高山高原, 特殊的地形条件和高原气候的结合, 使得该地区形成全球中低纬度地区最大的现代冰川区. 独特的地域单元使得高亚洲地区对外界因素的影响具有高度的敏感性和重要的反馈作用, 该地区冰川大规模的扩展和收缩不仅会影响气候变化, 作为周边地区众多大江河的源头, 冰川宝贵的淡水资源对区域

内生态、社会经济发展也至关重要,监测该地区冰川质量变化具有重要意义(姚檀栋等, 2004).

高亚洲冰川地处偏僻且环境条件恶劣,目前从物质平衡花杆、雪坑和冰芯获得的资料对于监测该地区冰川质量平衡仍显不足.自 2002 年起,美国宇航局(NASA, National Aeronautics and Space Administration)和德国宇航中心(DLR, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt)联合发射的重力恢复与气候实验卫星(GRACE, Gravity Recovery and Climate Explorer)为监测地球系统质量重新分布提供了有效技术手段(Tapley et al., 2004; Chen et al., 2006; Velicogna and Wahr, 2006; 汪汉胜等, 2007; Wouters et al., 2008; Lutheke et al., 2008; 钟敏等, 2009; 杨元德等, 2009; 詹金刚等, 2011; Jacob et al., 2012). GRACE 能够提供全球月时变重力场模型,球谐系数截断到 60 阶.鉴于 GRACE 时变重力场模型包含部分高频误差,研究人员提出以高斯滤波为代表的滤波技术来削弱其球谐系数中高频误差的影响(Wahr et al., 1998; Zhang et al., 2009);高斯滤波的滤波半径越大,滤波结果的信噪比也越高,但同时也会引起信号衰减和不同区域间的信号泄漏(Chen et al., 2013).近些年来来的监测结果表明:高亚洲冰川状态存在明显的区域性差异,其中喜马拉雅山地区冰川的长度和面积萎缩最为剧烈(Yao et al., 2012);在喜马拉雅山毗邻的印度北部平原地区,地下水抽取等人为因素导致该地区地下水损失严重(Rodell et al., 2009; Tiwari et al., 2009).由于 GRACE 时变重力场模型估计高亚洲冰川质量变化时存在信号泄漏的影响,采用何种方法分离并提取高亚洲冰川及其毗邻地区的等效水质量变化显得十分关键.

本文利用高亚洲冰川覆盖区域及其毗邻地区的 32 个 Mascon(质量变化聚集区域),通过 GRACE RL05 时变重力场模型频域和空域上的两种计算结果做比较验证分析,进而有效分离并提取出 2002—2013 年期间高亚洲冰川的质量变化.

2 数据处理及计算方法

2.1 数据处理

采用德克萨斯大学空间研究中心(CSR, Center for Space Research, University of Texas at Austin)提供的 2002 年 4 月—2013 年 7 月期间 128 个月的 GRACE RL05 数据.数据中潮汐、大气和海水质量

变化的影响均已采用模型扣除,因此除重力场模型的计算误差以及模型扣除造成的误差外,在季节性或更短的时间尺度上,对于陆地区域反映的主要是陆地水储量变化信息.对每月的 GRACE 时变重力场模型采取如下处理:由于模型中球谐系数 C_{20} 项解算精度较低,采用卫星激光测距(SLR)测得的更为准确的 C_{20} 项对其做替换(Cheng and Tapley, 2004);从模型中,扣除时间段内球谐系数的平均值;由于模型中高阶球谐系数存在显著的相关系统误差,对球谐系数做了去相关处理,次数小于等于 10 的球谐系数保持不变,次数大于 10 的奇偶项球谐系数分别采用滑动窗口为 7 的 3 次多项式拟合,并把拟合结果作为误差从球谐系数中做扣除(Swenson and Wahr, 2006);为削弱模型中高阶球谐系数噪声的影响,采用 150 km 高斯滤波对球谐系数做平滑处理(Wahr et al., 1998);考虑到 GRACE 观测结果无法分离出冰川均衡调整(GIA, Glacial Isostatic Adjustment)和陆地水文引起的质量变化量,对 Paulson 等(2007)GIA 模型和 Rodell 等(2004)的全球陆地数据同化系统(GLDAS, Global Land Data Assimilation System)网格数值结果转换为与 GRACE 时变重力场模型同阶次的球谐系数,并采用与 GRACE 数据相同的去相关和平滑处理,然后从 GRACE 时变重力场模型中做扣除.将最后处理得到的月时变重力场模型记为 $(\delta C_{lm}(t), \delta S_{lm}(t))$.

2.2 计算方法

2.2.1 信号泄漏

为分析信号泄漏的影响,对 GRACE 时变重力场模型采用 350 km 高斯滤波,根据式(1)反演得到了 2002—2013 年期间高亚洲地区的等效水柱高变化时间序列(Wahr et al., 1998),公式(1)为

$$\Delta h(\theta, \phi) = \frac{a\rho_{ave}}{3\rho_w} \sum_{l=0}^{N_{max}} \sum_{m=0}^l \frac{2l+1}{1+k_l} \bar{P}_{lm}(\cos\theta) (\delta C_{lm} \cos(m\phi) + \delta S_{lm} \sin(m\phi)), \quad (1)$$

其中, a 为地球平均半径, ρ_{ave} 和 ρ_w 分别为地球平均密度(取 $5517 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)和水的密度(取 $1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$), N_{max} 为月时变重力场模型的最大阶数, k_l 为 l 阶负荷勒夫数, $\bar{P}_{lm}(\cos\theta)$ 为规格化的连带勒让德函数, θ 和 ϕ 分别指余纬和经度, δC_{lm} 和 δS_{lm} 是 GRACE 时变重力场模型两个不同时间的变化.

假定等效水柱高变化时间序列包含线性趋势项、周年变化和半年变化的影响,根据式(2)通过最小二乘回归分析即可求解各未知量,公式(2)为

$$\Delta h(\theta, \phi, t) =$$

$$\beta_0(\theta, \phi) + \beta_1(\theta, \phi)t + \beta_2 \cos(\omega_1 t + \alpha_1(\theta, \phi)) + \beta_3 \cos(\omega_2 t + \alpha_2(\theta, \phi)), \quad (2)$$

式中, $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \alpha_1, \alpha_2$ 为求解的参数, $\omega_1 = 2\pi, \omega_2 = 4\pi$.

图 1 给出了 2002—2013 年 GRACE 反演的高亚洲及其毗邻地区等效水柱高变化趋势, 由 Randolph 冰川目录提取出高亚洲冰川四个典型地区的轮廓(Arendt et al., 2012). 由于已扣除 GIA 和地表水变化起的质量变化量, 图 1 中非冰川覆盖区域反映的主要是地下水变化. 结果表明印度、巴基斯坦、孟加拉国北部平原地区地下水损失严重, 由于 350 km 高斯滤波的处理, 某些较大信号的边缘已延伸到与其毗邻的冰川覆盖区域, 在印度北部平原地区这种现象最为严重. 由该 GRACE 计算结果得到的高亚洲冰川质量变化结果势必会包含部分信号泄漏误差的影响, 从而无法有效提取出该地区准确的冰川质量变化.

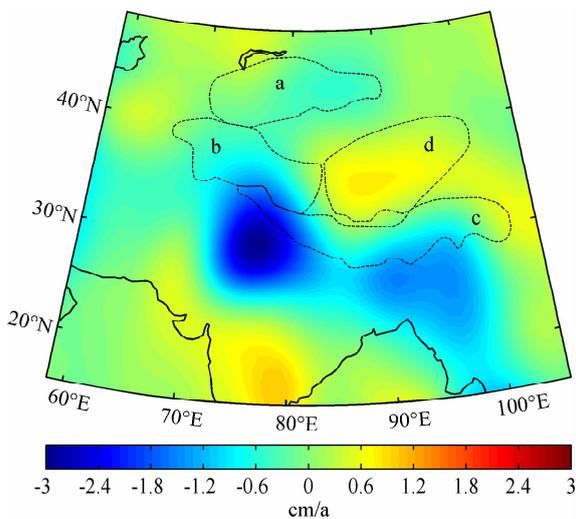


图 1 扣除 GIA 和地表水变化后高亚洲及其毗邻地区等效水柱高变化趋势

(a) 天山; (b) 帕米尔和昆仑山; (c) 喜马拉雅山和喀喇昆仑山; (d) 青藏高原内陆.

Fig. 1 Equivalent water height change trends in High Asia after removing GIA and surface water variations

(a) Tian Shan; (b) Pamirs and Kunlun Shan; (c) Himalaya and Karakorum; (d) Inner Tibetan Plateau.

2.2.2 频域法和空域法

由上述可知, 基于 GRACE 时变重力场模型估计高亚洲冰川质量变化时, 信号泄漏效应对估计结果造成较大影响. 为削弱信号泄漏和信号衰减的影响, 研究人员基于 GRACE L2 时变重力场模型先后提出空域 (Chen et al., 2006; Wouters et al., 2008) 和频域 (Jacob et al., 2012) 上的解算方法计

算地球表层块区域内的质量变化. 本文利用高亚洲地区 32 个 Mascon, 通过 GRACE L2 时变重力场模型频域和空域上的两种方法估计了高亚洲地区 Mascon 内的质量变化.

Jacob 等 (2012) 利用敏感核分析, 对高亚洲地区 Mascon 的大小、形状、位置分布做了有效确定. 因此, 本文采用与 Jacob 等相同的 Mascon 划分方法, 对高亚洲冰川覆盖区域划分为 17 个 Mascon, 为抑制印度等北部平原地区地下水信号泄漏对高亚洲冰川质量变化计算结果的影响, 增加了覆盖印度等北部平原地区 (e) 的 Mascon, 并对其划分为 15 个 Mascon (图 2). 每个 Mascon 由 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的网格组成, 因此某些网格数据可能无法准确匹配冰川覆盖区域, 考虑到 GRACE 是对总的质量变化敏感, 本文确保所有冰川覆盖区域位于划分的网格范围内以保证冰川质量变化计算结果的准确性.

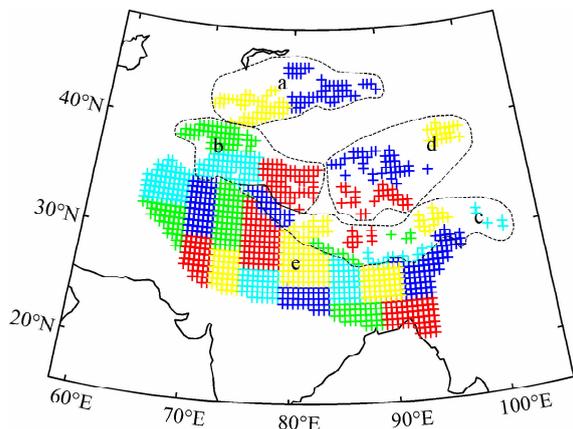


图 2 高亚洲地区 Mascon 分布

Fig. 2 Mascons distribution in High Asia

频域法: 对任意一个 Mascon (i), 假设其均匀分布同一等效水柱高变化, 根据式 (3) 为,

$$\begin{aligned} \left\{ \begin{matrix} C_{lm} \\ S_{lm} \end{matrix} \right\} &= \frac{3\rho_w}{4\pi a \rho_{ave}} \frac{1+k_l}{2l+1} \int \Delta h(\theta, \phi) \bar{P}_{lm}(\cos\theta) \\ &\times \begin{cases} \cos m\phi \\ \sin m\phi \end{cases} \sin\theta d\theta d\phi, \quad (3) \end{aligned}$$

由等效水柱高变化与球谐系数之间的关系, 可求得单位等效水柱高分布的 Mascon (i) 对应的球谐系数 (C_{lm}^i, S_{lm}^i) (Wahr et al., 1998); 然后对 (C_{lm}^i, S_{lm}^i) 采用与 GRACE 月时变重力场模型 ($\delta C_{lm}(t), \delta S_{lm}(t)$) 相同的去相关和 150 km 高斯滤波处理, 考虑上地球表面荷载对 (C_{lm}^i, S_{lm}^i) 和 ($\delta C_{lm}(t), \delta S_{lm}(t)$) 间接变化的影响后, 将 (C_{lm}^i, S_{lm}^i) 和 ($\delta C_{lm}(t), \delta S_{lm}(t)$) 最后处理得到的球谐系数分别记为 (C_{lm}^{*i}, S_{lm}^{*i}) 和 ($\delta C_{lm}^*(t), \delta S_{lm}^*(t)$); 假设 Mascon (i) 内任意一个月的未知等效

水柱高变化为 $H_i(t)$, 令

$$E = \sum_{l,m} \left[\left(\delta C_{lm}^*(t) - \sum_i C_{lm}^{*,i} H_i(t) \right)^2 + \left(\delta S_{lm}^*(t) - \sum_i S_{lm}^{*,i} H_i(t) \right)^2 \right], \quad (4)$$

对 E 取得最小时可解得 $H_i(t)$ 为 (Jacob et al., 2012)

$$H_i(t) = \sum_j B_{ij}^{-1} Y_j(t), \quad (5)$$

式中, $Y_j(t) = \sum_{lm} (\delta C_{lm}^*(t) C_{lm}^{*,j} + \delta S_{lm}^*(t) S_{lm}^{*,j})$,

$$B_{ji} = \sum_{lm} (C_{lm}^{*,j} C_{lm}^{*,i} + S_{lm}^{*,j} S_{lm}^{*,i}).$$

空域法:对任意一个 Mascon(i), 同样假设其均匀分布同一等效水柱高变化; 首先, 对任意一个月的 GRACE 时变重力场模型 ($\delta C_{lm}(t)$, $\delta S_{lm}(t)$), 根据式(1)可反演得到高亚洲地区(图 1 绘图的范围)的等效水柱高变化; 然后, 给 32 个 Mascon 分别模拟一个等效水柱高初值, 根据式(3)可求得模拟的等效水柱高变化对应的球谐系数并截断到 60 阶, 并采用与 GRACE 月时变重力场模型 ($\delta C_{lm}(t)$, $\delta S_{lm}(t)$) 相同的 150 km 高斯滤波处理, 基于该球谐系数根据式(1)即可求得高亚洲地区的等效水柱高变化; 重新调整各个 Mascon 内的等效水柱高分布值, 然后重复前面两个步骤, 迭代计算至模拟得到的等效水柱高与 ($\delta C_{lm}(t)$, $\delta S_{lm}(t)$) 得到的等效水柱高之差的标准差达到最小。

3 计算结果与讨论

在高亚洲地区, 采用频域法和空域法分别获得每个 Mascon 内的等效水柱高变化时间序列, 假定等效水柱高变化时间序列包含线性趋势项、周年变化和半年变化的影响, 根据式(2)通过最小二乘回归分析即可求得高亚洲地区每个 Mascon 内的等效水柱高变化趋势。

图 3 为频域法和空域法得到的 2002—2013 年高亚洲及其毗邻地区 32 个 Mascon 内的等效水柱高变化趋势。尽管采用的方法不同, 两种结果在空间分布上却显示出较好一致性。高亚洲冰川质量变化在不同区域的表现是不同的: 青藏高原内陆地区冰川质量主要呈现出正增长, 该地区中部的 Mascon 频域法和空域法得到的最大积累速率分别达到 $2.2 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $2.6 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$; 藏东南海洋性冰川为主的地区冰川质量变化较为复杂, 在最边缘地区冰川质量损失最为剧烈, 念青唐古拉山东段的 Mascon 频域法和空域法得到的最大损失速率分别达到

$10.9 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $16.3 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$; 在藏东南的内侧地区, 两种结果表现出一定差异性, 但该地区的 Mascon 整体上以质量积累为主; 天山地区冰川质量损失相对较小, 天山东段的 Mascon 频域法和空域法得到的最大损失速率分别达到 $1.7 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $2.1 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$; 帕米尔和昆仑山地区冰川消融区域主要位于中部, 频域法和空域法得到的最大损失速率分别达到 $1.5 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $2.0 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。与高亚洲冰川质量变化的空间特征不同, 印度等北部平原地区地下水整体呈现出减少趋势, 尤其是在印度北部平原地区, 频域法和空域法得到的最大损失速率分别达到 $5.5 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $6.9 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

图 4 给出了频域法和空域法得到的 2002—2013 年高亚洲四个地区的冰川质量变化时间序列及其长期变化趋势, 两种结果符合很好。取频域法和空域法得到的变化趋势的平均值作为各个地区冰川质量的平均变化趋势, 天山地区、帕米尔和昆仑山地区、喜马拉雅山和喀喇昆仑山地区、青藏高原内陆地区冰川质量的平均变化趋势分别为 $-2.8 \pm 0.9 \text{ Gt/a}$ 、 $-3.3 \pm 1.5 \text{ Gt/a}$ 、 $-9.9 \pm 2.1 \text{ Gt/a}$ 和 $5.0 \pm 0.8 \text{ Gt/a}$ 。由图 4, 由于降水变化、信号泄漏误差、GRACE 数据观测误差等原因, 四个地区的冰川质量变化时间序列存在较为明显的年际变化, 而年际变化在一定程度上会影响到短时间段内冰川质量变化趋势的分析。为与其他学者的研究结果做比较, 本文对 GRACE RL04 时变重力场模型采用 150 km 高斯滤波, 通过频域法对 2003 年 1 月—2010 年 11 月时间段的冰川质量变化时间序列做了分析, 表 1 给出了频域法得到的高亚洲冰川质量变化趋势及其影响因素。在扣除 GIA 和陆地水文影响之前, 天山地区、帕米尔和昆仑山地区、喜马拉雅山和喀喇昆仑山地区、青藏高原内陆地区冰川质量的变化趋势分别为 $-9.7 \pm 3.8 \text{ Gt/a}$ 、 $-2.9 \pm 7.3 \text{ Gt/a}$ 、 $-7.8 \pm 6.4 \text{ Gt/a}$ 和 $5.7 \pm 5.7 \text{ Gt/a}$, 该结果与 Jacob 等(2012)的结果基本一致。对 Paulson 等(2007) GIA 模型球谐系数采用与 GRACE 数据相同的滤波处理, 通过频域法得到以上四个地区的 GIA 改正分别为 $-1.0 \pm 0.2 \text{ Gt/a}$ 、 $-1.0 \pm 0.2 \text{ Gt/a}$ 、 $-1.5 \pm 0.3 \text{ Gt/a}$ 和 $-1.1 \pm 0.2 \text{ Gt/a}$ 。陆地水文改正采用基于 Noah 陆地表面模型的 GLDAS 水文模式, 空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$; 基于 GLDAS 提供的 4 层土壤湿度以及积雪数据, 对 GLDAS 模型球谐系数采用与 GRACE 数据相同的滤波处理, 通过频域法得到四个地区的陆地水文改正分别为 $1.9 \pm 1.2 \text{ Gt/a}$ 、 $-4.2 \pm 1.3 \text{ Gt/a}$ 、 $1.5 \pm$

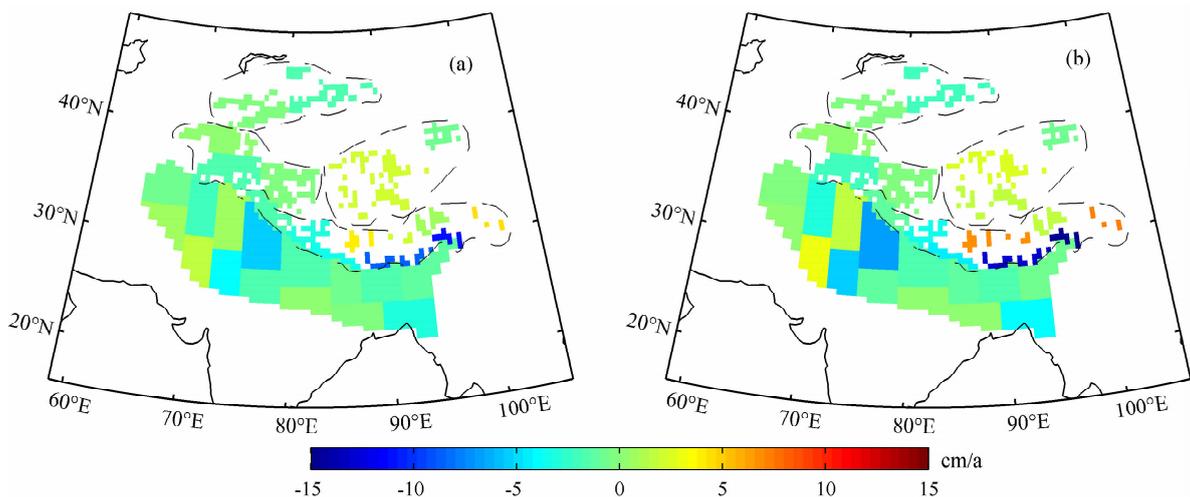


图3 高亚洲及其毗邻地区 Mascon 内的等效水柱高变化趋势

(a) 频域法; (b) 空域法.

Fig. 3 Equivalent water height change trends over the High Asia Mascons

(a) Spectral domain method; (b) Spatial domain method.

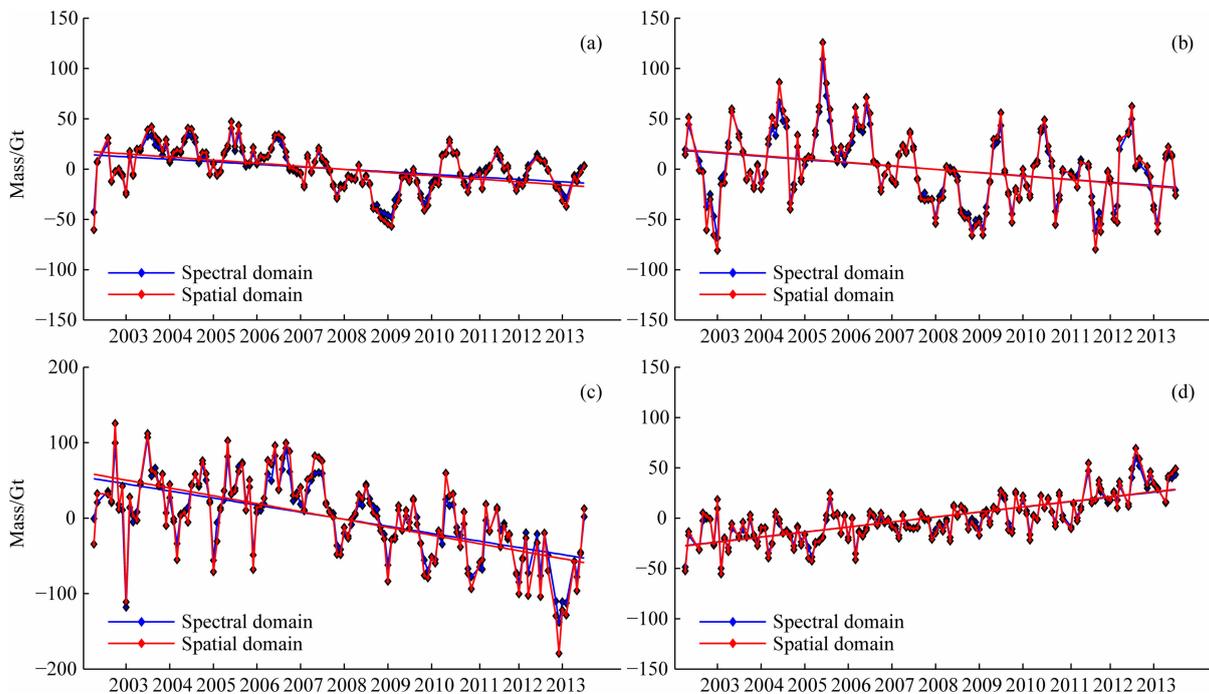


图4 高亚洲四个地区的冰川质量变化时间序列及其长期变化趋势

(a) 天山; (b) 帕米尔和昆仑山; (c) 喜马拉雅山和喀喇昆仑山; (d) 青藏高原内陆.

Fig. 4 Time series and long-term trends of the glacial mass changes in High Asia for four regions

(a) Tian Shan; (b) Pamirs and Kunlun Shan; (c) Himalaya and Karakorum; (d) Inner Tibetan Plateau.

表1 频域法得到的2003—2010年高亚洲冰川质量变化趋势及其影响因素

Table 1 Trends of glacial mass changes in High Asia from 2003 to 2010 using the spectral domain method and influence factors

	天山(Gt/a)	帕米尔和昆仑山(Gt/a)	喜马拉雅山和喀喇昆仑山(Gt/a)	青藏高原内陆(Gt/a)	高亚洲冰川(Gt/a)
改正前	-9.7 ± 3.8	-2.9 ± 7.3	-7.8 ± 6.4	5.7 ± 5.7	-14.7 ± 11.9
GIA 改正	-1.0 ± 0.2	-1.0 ± 0.2	-1.5 ± 0.3	-1.1 ± 0.2	-4.6 ± 0.5
GLDAS 改正	1.9 ± 1.2	-4.2 ± 1.3	1.5 ± 2.2	-2.7 ± 0.5	-3.5 ± 2.9
改正后	-8.8 ± 4.0	-8.1 ± 7.4	-7.8 ± 6.8	1.9 ± 5.7	-22.8 ± 12.3

2.2 Gt/a 和 -2.7 ± 0.5 Gt/a. 由于采用的陆地水文模型不同, 本文的陆地水文改正同 Jacob 等(2012) 的改正结果存在一定区别, 导致 GIA 和陆地水文改正后的冰川质量变化趋势也存在一定差异.

图 5 给出了采用频域法和空域法得到的 2002—2013 年高亚洲冰川和印度等北部平原地区等效水质量变化时间序列及其长期变化趋势. 取频域法和空域法得到的变化趋势的平均值作为等效水质量的平均变化趋势, 高亚洲冰川和印度等北部平原地区等效水质量整体的平均变化趋势分别为 -11.0 ± 2.9 Gt/a 和 -35.0 ± 4.2 Gt/a, 表明高亚洲冰川质量存在相对微弱的负增长, 而印度等北部平原地区地下水损失较为剧烈. Matsuo and Heki (2010) 基于 GRACE RL04 数据得出 2003 年 5 月—2009 年 4 月期间高亚洲冰川的质量变化趋势为 -47 Gt/a, 这与本文得到的结果相差较大, 除采用的数据模型、数据时间跨度以及数据处理方法不同的原因外, Matsuo 等在考虑高亚洲冰川毗邻地区地下水信号泄漏影响的过程中仅顾及了印度北部平原地区的影响, 该地区的范围要远小于本文图 2e 的范围; 其并且假设印度北部平原地区地下水的变化趋势仅为 -10 Gt/a, 该量级仅约为本文计算结果 ($-35.0 \pm$

4.2 Gt/a) 的 30%. 这意味着 Matsuo 等的结果可能混淆了更多印度等北部平原地区地下水信号泄漏的影响.

为估算印度等北部平原地区地下水信号泄漏的影响, 本文只用高亚洲冰川覆盖区域 17 个 Mascon 计算了冰川质量变化. 图 6 给出了采用频域法和空域法得到的 2002—2013 年高亚洲 4 个地区的冰川质量变化时间序列及其长期变化趋势, 尽管没采用印度等北部平原地区的 15 个 Mascon, 两种方法得到的结果符合很好且与图 4 给出的结果存在一定差异. 表 2 分别给出了信号泄漏改正前后高亚洲冰川质量的平均变化趋势, 这里取两种方法得到的变化趋势的平均值作为各个地区冰川质量的平均变化趋势. 如果不考虑印度等北部平原地区地下水信号泄漏的影响, 高亚洲 4 个地区冰川质量的平均变化趋势分别为 -2.7 ± 1.0 Gt/a、 -1.5 ± 1.5 Gt/a、 -15.7 ± 1.8 Gt/a 和 5.0 ± 0.8 Gt/a, 高亚洲冰川质量整体的平均变化趋势为 -14.9 ± 2.7 Gt/a. 可以看出, 信号泄漏对天山地区、青藏高原内陆地区影响较小, 而对临近印度等北部平原地区的帕米尔和昆仑山地区、喜马拉雅山和喀喇昆仑山地区影响较大.

表 2 2002—2013 年信号泄漏改正前后高亚洲冰川质量的平均变化趋势

Table 2 Average trends of glacial mass changes in High Asia from 2002 to 2013 before and after correction of signal leakage

	天山(Gt/a)	帕米尔和昆仑山(Gt/a)	喜马拉雅山和喀喇昆仑山(Gt/a)	青藏高原内陆(Gt/a)	高亚洲冰川(Gt/a)
图 6(改正前)	-2.7 ± 1.0	-1.5 ± 1.5	-15.7 ± 1.8	5.0 ± 0.8	-14.9 ± 2.7
图 4(改正后)	-2.8 ± 0.9	-3.3 ± 1.5	-9.9 ± 2.1	5.0 ± 0.8	-11.0 ± 2.9

4 结论

本文利用高亚洲地区 32 个 Mascon, 通过 GRACE RL05 时变重力场模型频域和空域上的两种计算方法提取出 2002 年 4 月至 2013 年 7 月期间高亚洲地区 Mascon 内的冰川质量变化. 高亚洲冰川质量变化呈现出典型的椭圆形区域分布特征, 在青藏高原内陆地区以积累为主, 而在边缘地区以消融为主, 在藏东南的最边缘地区冰川质量损失最为剧烈. 天山地区、帕米尔和昆仑山地区、喜马拉雅山和喀喇昆仑山地区、青藏高原内陆地区冰川质量的平均变化趋势分别为 -2.8 ± 0.9 Gt/a、 -3.3 ± 1.5 Gt/a、 -9.9 ± 2.1 Gt/a 和 5.0 ± 0.8 Gt/a, 高亚洲冰川质量整体的平均变化趋势为 $-11.0 \pm$

2.9 Gt/a. 印度等北部平原地区地下水的平均变化趋势为 -35.0 ± 4.2 Gt/a, 该地区地下水信号泄漏对高亚洲冰川质量变化计算结果影响较大, 通过频域法和空域法的比较验证分析, 两种方法能有效改正该地区地下水信号泄漏的影响.

高亚洲冰川质量变化存在显著的年际变化, 基于较短时间跨度的 GRACE 数据时间序列还不能较好地认识高亚洲冰川质量长期的变化趋势. 由于 GRACE 观测结果反映的是区域内总质量变化, 势必会受到各种模型扣除误差的影响. 为充分理解高亚洲冰川质量变化机制, 有必要获得持续而长期的时变重力卫星观测数据, 同时结合 GPS、卫星测高、InSAR 等空间大地测量技术, 对于我们准确地估计高亚洲冰川质量长期的变化趋势以及更好地认识和理解全球气候变化对该地区冰川质量变化的影响都

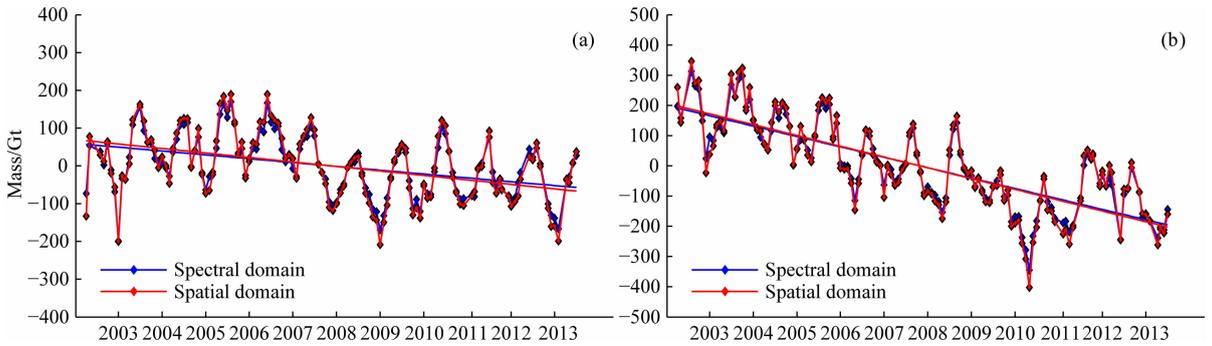


图 5 等效水质量变化时间序列及其长期变化趋势

(a) 高亚洲冰川; (b) 印度等北部平原地区.

Fig. 5 Time series and long-term trends of the equivalent water mass

(a) Glaciers in High Asia; (b) Plains of northern India.

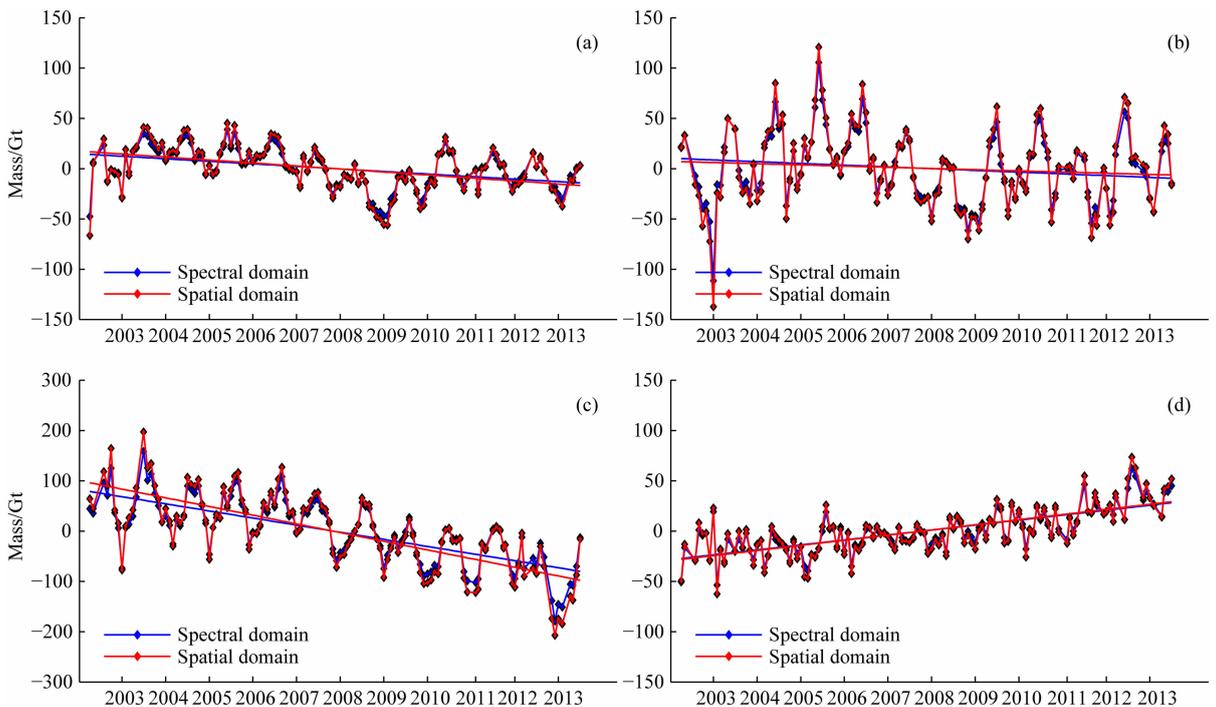


图 6 高亚洲四个地区的冰川质量变化时间序列及其长期变化趋势(未改正信号泄漏)

(a) 天山; (b) 帕米尔和昆仑山; (c) 喜马拉雅山和喀喇昆仑山; (d) 青藏高原内陆.

Fig. 6 Time series and long-term trends of the glacial mass changes in High Asia for four regions

(the signal leakage is not corrected)

(a) Tian Shan; (b) Pamirs and Kunlun Shan; (c) Himalaya and Karakorum; (d) Inner Tibetan Plateau.

具有十分重要的意义.

致谢 感谢审稿人在本文修改过程中给予的宝贵建议,感谢美国德克萨斯大学空间研究中心(CSR)提供的 GRACE RL04 及 RL05 时变重力场模型.

References

Arendt A, Bolch T, Cogley J G, et al. 2012. Randolph Glacier Inventory: A Dataset of Global Glacier Outlines Version: 2.0. Global Land Ice Measurements from Space, Digital Media,

Boulder, CO, 2012.

Chen J L, Wilson C R, Tapley B D. 2006. Satellite gravity measurements confirm accelerated melting of Greenland Ice Sheet. *Science*, 313(5795): 1958-1960.

Chen J L, Wilson C R, Tapley B D. 2013. Contribution of ice sheet and mountain glacier melt to recent sea level rise. *Nature Geoscience*, 6(7): 549-552.

Cheng M K, Tapley B D. 2004. Variations in the Earth's oblateness during the past 28 years. *J. Geophys. Res.*, 109(B9), doi: 10.1029/2004JB003028.

E D C. Yang Y D. Chao D B. 2009. The sea level change from the Antarctic ice sheet based on GRACE. *Chinese J. Geophys.* (in

- Chinese), 52(9): 2222-2228.
- Gardner A S, Moholdt G, Cogley J G, et al. 2013. A reconciled estimate of glacier contributions to sea level rise: 2003 to 2009. *Science*, 340(6134): 852-857.
- Jacob T, Wahr J, Pfeffer W T, et al. 2012. Recent contributions of glaciers and ice caps to sea level rise. *Nature*, 482(7386): 514-518.
- Luo Z C, Li Q, Zhang K, et al. 2012. Trend of mass change in the Antarctic ice sheet recovered from the GRACE temporal gravity field. *Science China: Earth Sciences*, 55(1): 76-82.
- Luthcke S B, Arendt A A, Rowlands D D, et al. 2008. Recent glacier mass changes in the Gulf of Alaska region from GRACE mascon solutions. *J. Glacio.*, 54(188): 767-777.
- Matsuo K, Heki K. 2010. Time-variable ice loss in Asian high mountains from satellite gravimetry. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 290(1-2): 30-36.
- Paulson A, Zhong S J, Wahr J. 2007. Inference of mantle viscosity from GRACE and relative sea level data. *Geophys. J. Int.*, 171(2): 497-508.
- Rodell M, Houser P R, Jambor U, et al. 2004. The global land data assimilation system. *Bull. Am. Met. Soc.*, 85(3): 381-394.
- Rodell M, Velicogna I, Famiglietti J S. 2009. Satellite-based estimates of groundwater depletion in India. *Nature*, 460(7258): 999-1002.
- Shi H L, Lu Y, Du Z L, et al. 2011. Mass change detection in Antarctic ice sheet using ICESat block analysis techniques from 2003—2008. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 54(4): 958-965.
- Swenson S, Wahr J. 2006. Post-processing removal of correlated errors in GRACE data. *Geophys. Res. Lett.*, 33(8): L08402.
- Tapley B D, Bettadpur S, Ries J C, et al. 2004. GRACE measurements of mass variability in the Earth system. *Science*, 305(5683): 503-505.
- Tiwari V M, Wahr J, Swenson S. 2009. Dwindling groundwater resources in northern India, from satellite gravity observations. *Geophys. Res. Lett.*, 36, L18401.
- Velicogna I, Wahr J. 2006. Acceleration of Greenland ice mass loss in spring 2004. *Nature*, 443(7109): 329-331.
- 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. *J. Geophys. Res.*, 103(B12), 30205-30229.
- 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 J. Geophys.* (in Chinese), 50(3): 730-736.
- Wouters B, Chambers D, Schrama E J O. 2008. GRACE observes small-scale mass loss in Greenland. *Geophysical Research Letters*, 35, L20501.
- Wouters B, Bamber J L, van den Broeke M R, et al. 2013. Limits in detecting acceleration of ice sheet mass loss due to climate variability. *Nature Geoscience*, 6(8): 613-616.
- Yang Y D, E D C, Chao D B, et al. WANG Hai-Hong. 2009. Seasonal and inter-annual change in land water storage from GRACE. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 52(12): 2987-2992.
- Yao T D, Liu S Y, Pu J C, et al. 2004. Recent glacial retreat in high-Asia in China and its impact on water resource in Northwest China. *Science in China: Series D*, 47(12): 1065-1075.
- Yao T D, Thompson L, Yang W, et al. 2012. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings. *Nature Climate Change*, 2(9): 663-667.
- Zhan J G, Wang Y, Hao X G. 2011. Improved method for removal of correlated errors in GRACE data. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica* (in Chinese), 40(4): 442-446.
- Zhan J G, Wang Y. 2011. Detect water storage variation of Longtan Reservoir with GRACE data. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 54(5): 1187-1192.
- Zhang Z Z, Chao B F, Lu Y, et al. 2009. An effective filtering for GRACE time-variable gravity: Fan filter. *Geophys. Res. Lett.*, 36, L17311.
- Zhong M, Duan J B, Hu H Z, et al. 2009. Trend of China land water storage redistribution at medi- and large-spatial scales in recent five years by satellite gravity observations. *Chinese Sci. Bull.* (in Chinese), 54(5): 816-821.

附中文参考文献

- 钟敏, 段建宾, 许厚泽等. 2009. 利用卫星重力观测研究近 5 年中国陆地水量中长空间尺度的变化趋势. *科学通报*, 54(9): 1290-1294.
- 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.
- 姚檀栋, 刘时银, 蒲健辰, 等. 2004. 高亚洲冰川的近期退缩及其对西北水资源的影响. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 34(6): 535-543.
- 杨元德, 鄂栋臣, 晁定波. 2009. GRACE 估算陆地水储量季节和年际变化. *地球物理学报*, 52: 2987-2992.
- 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.
- 史红岭, 陆洋, 杜宗亮等. 2011. 基于 ICESat 块域分析法探测 2003—2008 年南极冰盖质量变化. *地球物理学报*, 54(4): 958-965.
- 罗志才, 李琼, 张坤等. 2012. 利用 GRACE 时变重力场反演南极冰盖的质量变化趋势. *中国科学: 地球科学*, 42(10): 1590-1596.
- 鄂栋臣, 杨元德, 晁定波. 2009. 基于 GRACE 资料研究南极冰盖消融对海平面的影响. *地球物理学报*, 52(9): 2222-2228.

(本文编辑 张正峰)