

doi:10.3799/dqkx.2014.085

冰川均衡调整重力与径向位移近似关系的不确定性

贾路路^{1,2}, 汪汉胜^{2*}, 相龙伟^{2,3}

1. 地壳运动监测工程研究中心, 北京 100036

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. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 根据不同地幔粘滞度的冰川均衡调整(glacial isostatic adjustment, GIA)模型, 研究了地球内部各个圈层对GIA粘性重力扰动速率的贡献, 检验了粘性重力扰动速率与径向位移速率的近似关系及其是否独立于地幔粘滞度, 同时利用绝对重力和GPS(global positioning system)径向位移数据从实测角度对Wahr的近似关系进行比较和验证。结果表明: 岩石圈对GIA重力扰动速率和大地水准面异常速率的贡献都超过了86%, 而岩石圈以下5个圈层的总贡献不大于14%; 利用近似关系, 由重力信号转换的径向位移速率与有限元模拟的结果相对差异大约为15%, 且相对差异的大小不依赖于地幔粘滞度的变化; 根据北美绝对重力和GPS径向位移数据得到实测的粘性重力—径向位移比值为 $0.141 \pm 0.014 \mu\text{Gal/mm}$, 与Wahr的理论值($0.154 \mu\text{Gal/mm}$)非常接近, 相对差异仅为9.2%。因此, 定量给出了粘性重力—径向位移近似关系的不确定性为9.2%~15.0%, 为利用此近似关系分离GIA和现今地表质量变化粘弹信号的不确定性估计提供了重要参考。

关键词: 冰川均衡调整; 重力; 径向位移; 近似关系; 不确定性。

中图分类号: P312

文章编号: 1000-2383(2014)07-0905-10

收稿日期: 2013-12-10

Uncertainty of Approximate Relationship between GIA Induced Viscous Gravity and Radial Displacement

Jia Lulu^{1,2}, Wang Hansheng^{2*}, Xiang Longwei^{2,3}

1. National Earthquake Infrastructure Service, Beijing 100036, China

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

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Based on glacial isostatic adjustment (GIA) models of different mantle viscosities, the contribution from different layers in the earth's interior to the GIA viscous gravity perturbation rates is investigated, and the approximate relation between GIA gravity perturbation rate and uplift rate and whether it is independent of the mantle viscosity are validated in this paper. Furthermore, the Wahr's approximate relation with the data from absolute gravimetry and global positioning system (GPS) was checked. It is found that the contribution of the lithosphere to GIA gravity perturbation rate and geoid anomaly rate is more than 86%, the contribution of the five layers under the lithosphere to GIA gravity signal is less than 14% yet. The relative difference between GIA uplift rate calculated by using approximate relation and that by the finite element method is about 15%, and the difference does not depend on changes in the mantle viscosity. The ratio of gravity versus uplift obtained by ground-based measurements in North America is $0.141 \pm 0.014 \mu\text{Gal/mm}$, which is very close to $0.154 \mu\text{Gal/mm}$ of Wahr's theoretical ratio. The relative difference between the two ratio values above is just 9.2%. Therefore, this study gives the uncertainty value of the Wahr's approximate relation between 9.2%~15.0%, which can be used to evaluate the effects on the results of the separated GIA and present-day mass balance signals.

Key words: glacial isostatic adjustment; gravity; radial displacement; approximate relation; uncertainty.

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 41204013, 41274026, 41304057); 国家杰出青年科学基金(No. 40825012); 大地测量与地球动力学国家重点实验室开放基金(No. SKLGED2013-2-4-E)。

作者简介: 贾路路(1984—), 男, 博士, 主要从事卫星重力场解释和冰川均衡调整的研究。E-mail: lljia@neis.gov.cn

* 通讯作者: 汪汉胜, E-mail: whs@asch.whigg.ac.cn

在过去的约 70 万年间, 地球以大约 10 万年为周期经历了数次冰期和间冰期的交替。末次冰期始于大约 100 ka BP, 在约 21 ka BP 达到盛冰期。在末次盛冰期(LGM), 北欧、北美、格陵兰和南极等地区存在规模巨大的冰盖(Peltier, 2002), 储存在这些冰盖中的水量总和相当于 115~135 m 的海平面的变化(Milne *et al.*, 2002)。随着气候变暖, 冰退期持续到 9 ka BP 基本结束(汪汉胜等, 2009), 期间巨大的冰盖逐渐消融(伍婧和刘强, 2012)。

冰川均衡调整(glacial isostatic adjustment, GIA)主要是指粘弹地球对末次冰期以来冰退期地表冰负荷和海水负荷变化的响应(汪汉胜等, 2009)。GIA 是一种重要的地球动力学现象, 主要表现为地幔物质的流动(Ekman and Mäkinen, 1996; Wu *et al.*, 2013)、地壳的运动(Lidberg *et al.*, 2010; Sella *et al.*, 2007)、地球重力场(汪汉胜等, 2010)和相对海平面(Tamisiea, 2011; Wang *et al.*, 2011)的变化等。伴随着冰进和冰退, 地表负荷的强烈变化打破了地球的平衡构形, 不仅引起地球表面的变形和海平面的变化, 而且导致地球内部密度的调整, 进而引起全球重力场的变化。庞大的冰盖负荷在冰进期不断积累, 使得大冰盖覆盖的地区(称为 GIA 近场地区)岩石圈逐渐下沉; 冰退期冰盖快速融化流向海洋, 岩石圈主要表现为强烈的弹性回弹; 由于地幔的流变特性, 即使在冰后期, 岩石圈的粘性回弹仍然很明显。

近 20 年以来, 迅速发展的空间测量技术(GPS(global positioning system)、卫星重力、卫星测高和合成孔径雷达干涉测量等)为研究 GIA 信号提供了宝贵的对地观测数据, 大大提高了我们对 GIA 过程的认识和理解。例如, 利用 GPS 观测到曾经被古冰盖覆盖的北美地区以及北欧地区地壳最大隆升速率分别达 13.8 mm/a(Sella *et al.*, 2007)和 11.3 mm/a(Lidberg *et al.*, 2010); Bevis *et al.*(2009) 和 Thomas *et al.*(2011) 分别利用 GPS 数据扣除现今南极质量变化效应, 得到 GIA 引起的地壳最大径向位移约为 8 mm/a; Kuo *et al.*(2004, 2008)利用卫星测高和验潮站数据在北美和北欧研究了地壳隆升速率, 结果和上述 GPS 的基本一致; 重力卫星 GRACE(gravity recovery and climate experiment)能在全球范围内精确地监测地球重力场的变化, 进而能有效监测地球系统质量变化, 为全球变化研究提供了全新的手段。时变重力场数据广泛应用于陆地水储量变化(胡小工等, 2006; 汪汉胜等, 2007;

Feng *et al.*, 2013)、极地冰盖质量变化(鄂栋臣等, 2009; King *et al.*, 2012; Luo *et al.*, 2012)、海平面变化(Chambers, 2006)及其他地球动力学(Zhou *et al.*, 2012)等方面的研究。然而, GRACE 时变重力对 GIA 重力信号非常敏感, 在近场地区强大的 GIA 粘性信号对现今地表质量变化的弹性信号研究产生严重影响。例如, 在南极地区, GRACE 观测的重力变化信号中, GIA 粘性信号甚至超过了广受关注的南极冰盖质量变化信号(Velicogna and Wahr, 2006)。一般地, 需要在 GRACE 观测中利用模型扣除 GIA 信号, 从而得到现今地表质量变化信息。这种做法使得到的现今地表质量变化依赖于 GIA 模型, 而由于模型的不确定性, 不同的 GIA 模型差异很大(Tamisiea, 2011), 进而给 GIA 近场地区的现今地表质量变化监测带来很大的不确定性。

Wahr *et al.*(1995)提出同时测量地表重力和径向位移可以消除粘性的 GIA 的影响, 从而提取 GIA 近场现今地表质量的变化信息。根据 Wahr *et al.*(1995)的研究, 如果将 GIA 粘性信号近似为只由岩石圈变形引起, 则粘性重力扰动和粘性径向位移存在线性关系, 在空间域其比例系数为固定常数, 这样通过构造地表重力扰动和径向位移观测量的线性组合就可以消除粘性信号的影响; Fang and Hager(2001)也得到了与 Wahr *et al.*(1995)类似的线性关系; Purcell *et al.*(2011)利用数值计算的方法, 得到了粘性重力勒夫数和粘性径向位移勒夫数的经验性关系, 与 Wahr *et al.*(1995)结果有少许差异; Wahr *et al.*(1995)研究受限于当时的测量技术和数据, 只是给出了模拟数据的结果。近来, Wu *et al.*(2010)利用了 GRACE、GPS 和洋底压力(ocean bottom pressure, OBP)数据分别估计了 GIA 和现今地表质量变化引起的地心运动; Sun *et al.*(2010)利用阿拉斯加的地面重力和 GPS 并址观测数据, 讨论了 GIA 引起的重力扰动和径向位移的线性关系, 但其结果受阿拉斯加冰川融化弹性信号影响; Guo *et al.*(2012)利用 Wahr *et al.*(1995)的理论比较了现今主要的几种 GIA 模型的适用性; Wang *et al.*(2013)提出利用 GRACE 和 GPS 数据分离水文和 GIA 信号的途径, 揭示了 GIA 近场的北美和北欧地区陆地水储量近 10 年来的变化, 特别是发现加拿大草原三省大干旱后的水量恢复过程, 这被验潮站和水井数据所证实。应该注意到, 该近似关系的不确定性可能对联合利用重力及 GPS 数据分离 GIA 和现今地表质量变化信号的结果有重要影响。然而, 以上

研究仅利用了 Wahr *et al.*(1995)的近似线性关系,并未对其不确定性进行深入研究。

本文首先考虑地幔横向非均匀的 GIA 模型检验粘性信号是否主要集中于岩石圈,然后利用不同地幔粘滞度的 GIA 模型来探讨粘性重力扰动和径向位移的近似线性关系是否依赖于地幔粘滞度。此外,根据在北美的绝对重力和 GPS 实测数据来研究粘性重力—径向位移近似关系的观测值与理论值的差异。

1 GIA 模型和相关计算公式

1.1 GIA 模型

GIA 过程本质上是粘弹负荷问题,所以控制 GIA 粘性信号的主要因素是:(1)地球的流变结构(即地球模型),决定了地球对地表负荷变化的响应情况。GIA 研究中的地球模型通常为球形径向分层、非自转黏弹性、各向同性地球,岩石圈是完全弹性的。径向分层一般分为岩石圈(Lith)、上地幔(UM)、转换带(TZ)、下地幔浅部(LM1)、下地幔深部(LM2)和地核(Core)。各圈层密度和弹性参数由 PREM 模型(Dziewonski and Anderson, 1981)给定,地幔流变参数由粘滞度模型给出。为了研究 GIA 粘性重力—径向位移的线性关系是否独立于粘滞度,本文使用了两种具有显著差异仅径向分层的粘滞度模型进行 GIA 模拟:一是由地幔对流和 GIA 联合反演得到的 RF2 模型(Mitrovica and Forte, 1997),其次是由 Peltier(2002)VM2 模型简化而来的 RF3 模型(Wang *et al.*, 2008)。两种粘滞度模型最主要的差异为:RF2 的下地幔粘滞度要比上地幔的大一个数量级,而 RF3 下地幔浅部粘滞度比上地幔的仅大 4 倍,两种模型的具体物理参数和各圈层界面半径可参见文献(贾路路等,2011);同时为了探讨地幔粘滞度横向非均匀对 GIA 粘性重力—径向位移的线性关系的影响,使用了较新的大地测量观测和相对海平面联合约束的粘滞度横向非均匀的 RF3L20($\beta=0.4$)模型(Wang *et al.*, 2008; 汪汉胜等,2009)进行 GIA 模拟,考虑粘滞度横向非均匀能使 GIA 模拟更加接近于真实。(2)末次冰盖的历史演化(即冰负荷模型),决定了施加在地表的负荷变化,本文使用目前广泛应用的 ICE-4G 模型(Peltier, 1998)。

根据上述不同地球模型和冰负荷模型的组合,本文给出了 3 个 GIA 模型,即 ICE-4G+RF3L20

($\beta=0.4$)模型、ICE-4G+RF3 模型和 ICE-4G+RF2 模型及它们的相关预测值。3 种 GIA 模型的差异实际上反映了各自地幔粘滞度模型的不同。

1.2 GIA 径向位移场

GIA 模拟的输入量是上述不同的末次冰期冰负荷模型以及地球模型,通过有限元方法求解耦合拉普拉斯方程,直接输出的是地球内部各个圈层界面上的位移,可计算径向位移速率,具体算法和公式参见相关文献(Wu, 2004; Wang and Wu, 2006)。

1.3 GIA 重力场

由 GIA 有限元模拟输出的地球各界面的径向位移速率,可以得到 GIA 重力场变化速率。GIA 重力场主要是由地球内部不同深度密度界面的径向位移导致的密度异常引起的,考虑核幔(Core-LM2)、下地幔下部与上部(LM2-LM1)、下地幔上部与过渡带(LM1-TZ)、过渡带与上地幔(TZ-UM)、上地幔与岩石圈(UM-Lith)以及岩石圈与空气(Lith-Air)共 6 个密度不连续界面,分别用序号 1~6 表示。为了研究各个圈层对 GIA 重力的贡献,首先给出第 i ($i=1 \sim 6$) 个密度界面变形引起的地表重力扰动速率为(贾路路等,2011)(只与质量变化有关,不包含自由空气贡献):

$$\delta \dot{g}_i(\theta, \varphi) = 4\pi G \Delta \rho_i \sum_{l=2}^{l_{\max}} \frac{l+1}{2l+1} \left(\frac{r_i}{a} \right)^{l+2} \sum_{m=0}^l (\delta \dot{c}_{l,m}^i \cos m\varphi + \delta \dot{s}_{l,m}^i \sin m\varphi) \bar{P}_{l,m}(\cos \theta), \quad (1)$$

GIA 总的重力扰动速率即为各个界面贡献的总和。公式(1)中, θ, φ 表示余纬和经度; G 为引力常数; $\Delta \rho_i$ 表示第 i 个界面下上密度差; r_i 表示第 i 个界面的地心半径, a 表示地球平均半径; l, m 表示球谐系数阶次; l_{\max} 为最大截止阶数, 本文使用的 GIA 模型给出的最大阶数为 90, 故取 $l_{\max}=90$; $\delta \dot{c}_{l,m}^i, \delta \dot{s}_{l,m}^i$ 为第 i 个界面径向位移的球谐系数; $\bar{P}_{l,m}(\cos \theta)$ 为正则化连带勒让德函数。

在研究 GIA 对卫星重力 GRACE 时变重力场的影响时,需要将 GIA 重力场写成卫星重力场的形式。根据文献(贾路路等,2011)给出 GIA 大地水准面异常速率:

$$N(\theta, \varphi) = a \sum_{l=2}^{l_{\max}} \sum_{m=0}^l (\dot{c}_{l,m} \cos m\varphi + \dot{s}_{l,m} \sin m\varphi) \bar{P}_{l,m}(\cos \theta), \quad (2)$$

其中:

$$\begin{cases} \dot{c}_{l,m} = \sum_{i=1}^6 \frac{4\pi G}{g_0} \Delta\rho_i \frac{1}{2l+1} \left(\frac{r_i}{a}\right)^{l+2} \delta\dot{c}_{l,m}^i \\ \dot{s}_{l,m} = \sum_{i=1}^6 \frac{4\pi G}{g_0} \Delta\rho_i \frac{1}{2l+1} \left(\frac{r_i}{a}\right)^{l+2} \delta\dot{s}_{l,m}^i \end{cases}, \quad (3)$$

g_0 为地表重力加速度.

1.4 粘性重力和径向位移近似关系

GIA 地表径向位移速率可表示为球谐系数累加的形式:

$$\dot{U}(\theta, \varphi) = a \sum_{l=2}^{l_{\max}} \sum_{m=0}^l (\dot{c}_{l,m}^u \cos m\varphi + \dot{s}_{l,m}^u \sin m\varphi) \bar{P}_{l,m}(\cos\theta), \quad (4)$$

其中, $\dot{c}_{l,m}^u$ 和 $\dot{s}_{l,m}^u$ 是 GIA 地表径向位移速率的球谐展开系数.

根据 Wahr *et al.* (1995, 2000) 的研究, 如果将 GIA 信号近似视为只由岩石圈变形引起, 那么粘性径向位移勒夫数 h_l^v 和粘性重力勒夫数 k_l^v 有以下近似关系:

$$\frac{h_l^v}{k_l^v} \approx \frac{2l+1}{2}, \quad (5)$$

进而可以得到 GIA 地表径向位移速率与大地水准面速率在球谐域有如下的近似关系:

$$\begin{cases} \dot{c}_{l,m}^u \approx \frac{2l+1}{2} c_{l,m} \\ \dot{s}_{l,m}^u \approx \frac{2l+1}{2} s_{l,m} \end{cases}, \quad (6)$$

故 GIA 地表径向位移速率可由式(2)GIA 卫星重力场模型的系数近似表示为:

$$\dot{U}_{\text{geoid}}(\theta, \varphi) \approx a \sum_{l=2}^{l_{\max}} \sum_{m=0}^l \frac{2l+1}{2} (\dot{c}_{l,m} \cos m\varphi + \dot{s}_{l,m} \sin m\varphi) \bar{P}_{l,m}(\cos\theta), \quad (7)$$

也可以得到 GIA 地表径向位移速率与重力扰动速率在空间域的近似线性关系:

$$\dot{U}_{\text{gdot}}(\theta, \varphi) \approx \frac{1}{A} \delta g(\theta, \varphi), \quad (8)$$

其中, $A = 0.154 \mu\text{Gal/mm}$.

2 结果与分析

为了检验公式(5)给出的近似关系, 首先利用 GIA 模型模拟直接给出各个界面形变, 探讨各圈层对 GIA 总信号的贡献情况; 然后根据公式(7)和(8)近似关系得到的 GIA 地表径向位移速率与有限元方法直接给出的 GIA 地表径向位移速率进行比较, 研究近似关系的不确定性以及此关系是否依赖于地

幔粘滞度; 最后, 收集了北美地区实测的绝对重力数据和 GPS 径向位移数据, 从观测的角度对粘性重力扰动速率和径向位移速率理论关系进行比较和分析.

2.1 各圈层对 GIA 信号的贡献

根据有限元方法给出的 ICE-4G+RF3L20 ($\beta=0.4$) GIA 模型的 6 个圈层界面的径向位移速率, 由公式(1)和(2)计算出每个圈层及总的 GIA 地表重力扰动速率和 GIA 大地水准面异常速率. 图 1 给出了各圈层以及总的 GIA 重力扰动速率和大地水准面异常速率. 限于篇幅, 本文只显示了岩石圈以下 5 个圈层总贡献、岩石圈贡献以及总的 GIA 重力信号.

根据图 1, 我们可以清楚的看到无论是各圈层还是总的 GIA 重力信号, 较大的信号都出现在处于 GIA 近场的北美、北欧、南极和格陵兰岛等地区; 而处在 GIA 远场的亚洲大陆、南美大陆和非洲大陆等地区, GIA 信号则较小. 从各个圈层对 GIA 信号的贡献情况来看, 岩石圈以下 5 层对总信号的贡献确实很小(图 1a 和图 1b), 而岩石圈一层的贡献(图 1c 和图 1d)基本接近于 GIA 总信号(图 1e 和图 1f). 分析公式(1)和(3)可知, 由于式中尺度因子 $(\frac{r_i}{a})^{l+2}$ 的存在, 岩石圈以下各层在地表的信号被极大的削弱, 岩石圈以下的信号在地表主要表现为长波信号.

本文进一步统计了岩石圈以下圈层和岩石圈的 GIA 重力扰动速率和大地水准面异常速率的均方根(δg_{RMS} 和 \dot{N}_{RMS})及其对 GIA 总信号的贡献率, 如表 1 所示. 由表 1 可以知道, 岩石圈以下 5 层的重力扰动速率和大地水准面异常速率均方根分别占到相应 GIA 总信号的 13.9% 和 12.8%; 而岩石圈一层对 GIA 总信号的相应贡献率分别达到 86.1% 和 87.2%. 这和 Wahr *et al.* (1995) 关于 GIA 信号主要集中于岩石圈(85%~90%)的结论非常一致.

2.2 近似关系检验

为了检验 GIA 粘性重力和径向位移信号的近似关系及其是否依赖于地幔粘滞度, 本文利用考虑地幔粘滞度横向非均匀的 ICE-4G+RF3L20 ($\beta=0.4$) 以及仅径向分层的 ICE-4G+RF3 和 ICE-4G+RF2 三个地幔粘滞度不同的 GIA 模型来进行分析和讨论.

上述 3 个 GIA 模型有限元模拟可直接给出精确的地表径向位移速率 \dot{U} , 而根据 Wahr *et al.*

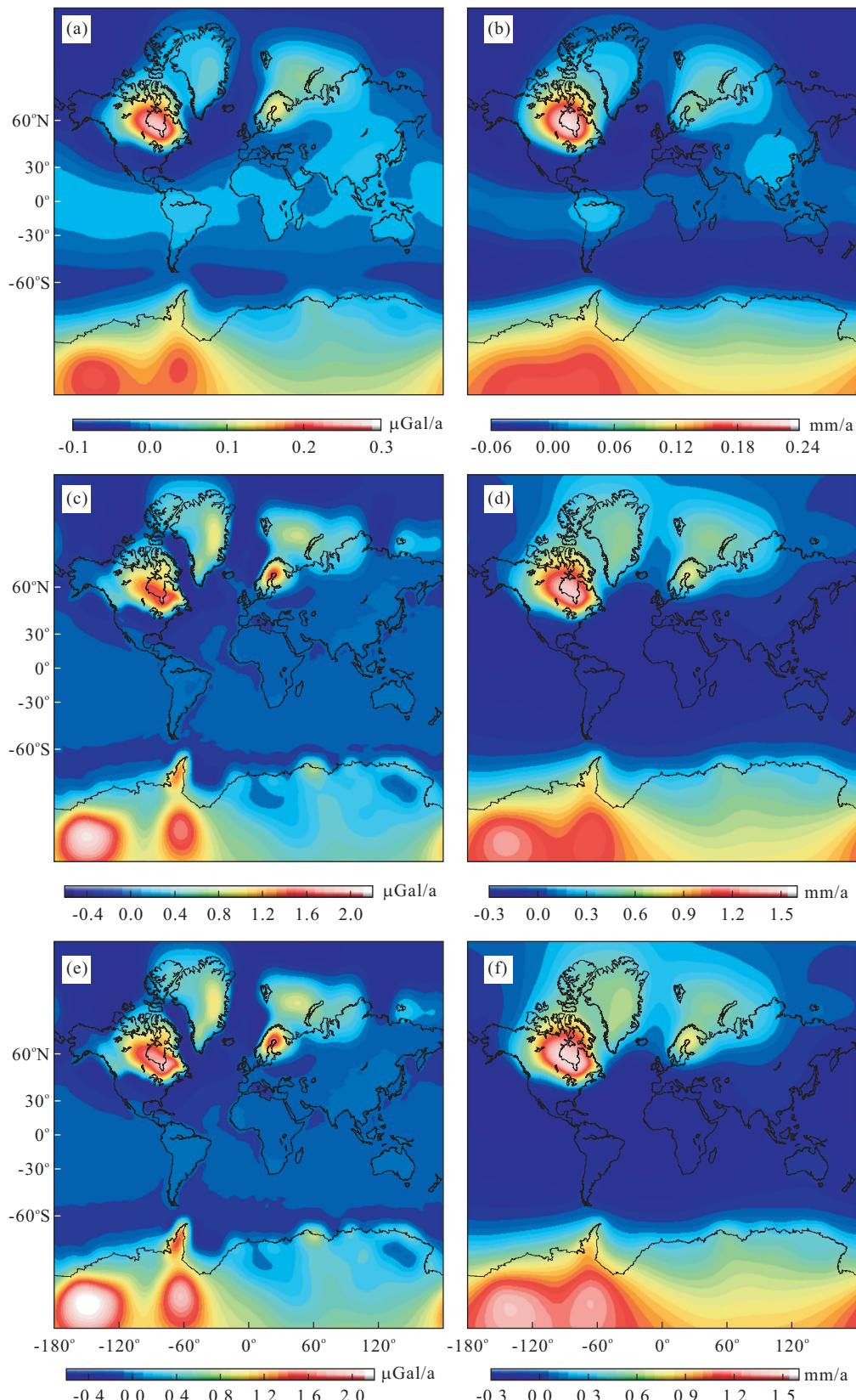


图 1 不同密度界面形变对 GIA 重力扰动速率(左)和大地水准面异常速率(右)的贡献

Fig.1 Contribution to GIA gravity perturbation (left) and geoid (right) from different boundaries
 (a), (b) 岩石圈以下贡献; (c), (d) 岩石圈贡献; (e), (f) 总的 GIA 信号

表 1 各圈层对 GIA 信号贡献率的统计

Table 1 Statistics of contribution to GIA from different boundaries

圈层	δg_{RMS}	N_{RMS}	贡献率(δg)	贡献率(N)
岩石圈以下	0.050	0.049	13.9%	12.8%
岩石圈	0.308	0.334	86.1%	87.2%
总信号	0.358	0.383	100%	100%

(1995) 的理论, 根据公式(7)和(8), 可以由 GIA 模型预测的重力扰动速率和大地水准面异常速率分别得到近似的地表径向位移速率 \dot{U}_{gdot} 和 \dot{U}_{geoid} 。这样就可以根据 $\Delta U_{\text{gdot}} = \dot{U} - \dot{U}_{\text{gdot}}$ 和 $\Delta U_{\text{geoid}} = \dot{U} - \dot{U}_{\text{geoid}}$

这两个残差量来探讨 GIA 粘性重力和径向位移的关系的近似程度, 以下分别称这两残差为重力—径向位移残差和水准面—径向位移残差。

图 2 显示了 3 个粘滞度不同的 GIA 模型有限元模拟给出的地表径向位移速率 \dot{U} 及与其近似值的残差 ΔU_{gdot} 和 ΔU_{geoid} 。其中, 图 2a、图 2d 和图 2g 分别显示的是 ICE-4G+RF3L20($\beta=0.4$)、ICE-4G+RF3、ICE-4G+RF2 三个 GIA 模型有限元模拟给出的地表径向位移速率, 图 2b、图 2e 和图 2h 分别给出了 3 个 GIA 模型的重力—径向位移残差, 图 2c、图 2f 和图 2i 分别给出了相应的水准面—径

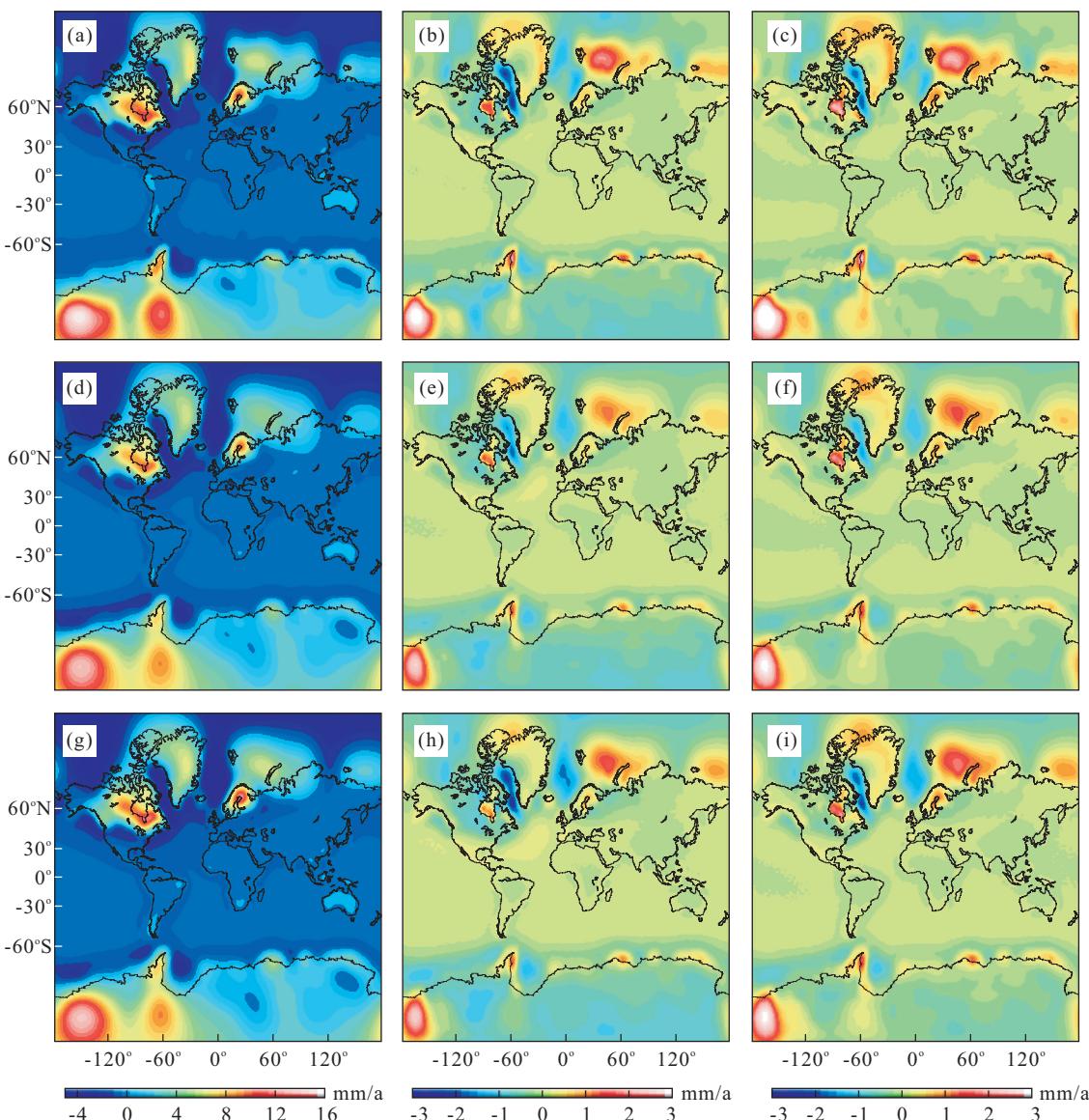


图 2 不同粘滞度 GIA 径向位移速率及与其近似值的残差

Fig.2 GIA uplift rates derived from different viscosity and their approximation residual

(a),(d),(g) GIA 径向位移速率; (b),(e),(h) 残差 ΔU_{gdot} ; (c),(f),(i) 残差 ΔU_{geoid}

表 2 GIA 径向位移速率残差统计

Table 2 Statistics for residual of GIA uplift rate

粘滞度模型	\dot{U}_{RMS}	$\Delta\dot{U}_{\text{gdot}}^{\text{RMS}}$	$\Delta\dot{U}_{\text{geoid}}^{\text{RMS}}$	$\Delta\dot{U}_{\text{gdot}}^{\text{RMS}}/\dot{U}_{\text{RMS}}$	$\Delta\dot{U}_{\text{geoid}}^{\text{RMS}}/\dot{U}_{\text{RMS}}$
RF3L20($\beta=0.4$)	2.14	0.33	0.30/0.28*	15.4	14.0%/13.1%*
RF3	2.08	0.34	0.29/0.25*	16.3%	13.9%/12.0%*
RF2	2.16	0.40	0.34/0.26*	18.5%	15.7%/12.0%*

* 根据 Purcell *et al.*(2011) 的研究所得结果。

向位移残差。由图 2 可知,无论是重力—径向位移残差 $\Delta\dot{U}_{\text{gdot}}$ 还是水准面—径向位移残差 $\Delta\dot{U}_{\text{geoid}}$,其差异与 GIA 径向位移信号相关,较大的差异出现在北美、北欧、南极等 GIA 近场地区;考虑地幔粘滞度横向非均匀所得的两种残差(RF3L20($\beta=0.4$)模型的结果;图 2b,2c 所示)与仅径向分层所得的两种残差(RF3 模型的结果;图 2e,2f 所示)相对差异很小,仅为约 0.9%,说明考虑地幔粘滞度的横向非均匀与否对残差结果的影响很小;图 2e 和 2f 与图 2h 和 2i 的差异反映了重力—径向位移残差和水准面—径向位移残差随地幔粘滞度径向分层的不同(RF2 与 RF3 模型)而产生的变化,由图 2 可知,两种残差变化都很小(两种粘滞度所得残差的相对差异不足 2%),这说明粘性重力和径向位移的近似关系是不依赖于粘滞度的径向变化的。

表 2 统计了重力—径向位移残差 $\Delta\dot{U}_{\text{gdot}}$ 和水准面—径向位移残差 $\Delta\dot{U}_{\text{geoid}}$ 的均方根及其占 GIA 径向位移速率 \dot{U} 的百分比。由表 2 可知,两种残差的均方根占径向位移速率均方根的比重都在 15% 左右。值得研究的是,Purcell *et al.*(2011)通过数值模拟发现,GIA 地表径向位移速率与大地水准面异常速率的球谐系数比值为 1.167 71—0.523 3,与公式(6)中 Wahr *et al.*(1995)的结果略有差异。表 2 也列出了根据 Purcell *et al.*(2011)的研究的相应统计结果,我们发现,Purcell 结果的水准面—径向位移残差比重相对 Wahr 低 2% 左右。

2.3 观测结果

从实际观测数据出发,利用收集到的北美绝对重力和 GPS 径向位移数据,探讨 GIA 粘性重力速率和径向位移速率的比值,并与理论值做比较和分析。

北美地区哈德逊湾附近处于末次冰期古劳伦冰盖的中心地带,现今观测到的长期重力速率和 GPS 径向位移速率很大程度上反映了古冰盖消融后的 GIA 粘性信号。根据相关文献(Mazzotti *et al.*, 2011),笔者收集了北美地区 8 个绝对重力和 GPS

表 3 绝对重力和 GPS 台站位置及速率

Table 3 Absolute gravity and GPS station locations and rates

站点	经度(°)	纬度(°)	重力 (μGal/a)	径向位移 (mm/a)
Churchill	-94.086	58.762	1.45	10.38
Flin Flon	-101.978	54.725	0.38	2.05
Pinawa	-95.865	50.259	-0.12	-0.17
International Falls	-93.162	48.585	-0.14	-0.12
Wausau	-89.680	44.920	-0.17	-0.99
Iowa City	-91.543	41.658	-0.08	-1.90
Saskatoon	-106.399	52.195	-0.30	-1.01
Priddis	-114.293	50.871	-0.30	-0.33

并址台站的数据。两种数据都进行了潮汐、大气、极移效应等改正(Mazzotti *et al.*, 2011),GPS 数据解算结果的参考框架为 ITRF2005(Altamimi *et al.*, 2007)。根据 Mazzotti *et al.*(2011)的研究,该区域的重力和 GPS 径向位移的线性速率主要反映了 GIA 的信号。值得说明的是,本文利用对应的 GPS 径向位移速率,在 Mazzotti *et al.*(2011)的基础上对 8 个台站的绝对重力速率扣除不反映地表质量变化的自由空气重力贡献。具体台站的位置和数据情况可见表 3,其中观测数据的标准差可参见文献(Mazzotti *et al.*, 2011)。表 3 中,除了 Saskatoon 重力站的观测时间为 8 年左右,其他各个台站的观测时段基本都大于 14 年。如此长时间的观测,使得这些台站所得的长期线性速率对周围环境(陆地水等)的季节性变化敏感度较小,观测结果比较稳定可靠(Blewitt and Lavallee, 2002)。

另外,由于 Saskatoon 重力站观测时间相对较短(2002—2010 年),而且根据 Wang *et al.*(2013)发现此站所处的加拿大草原腹地在此期间经历了严重干旱后的陆地水储量恢复过程,因此此站观测的重力线性速率受陆地水变化影响很大(Mazzotti *et al.*, 2011)。根据 Wang *et al.*(2013)得到的 2002 年—2011 年北美陆地水变化线性速率,对 Saskatoon 台的重力数据进行了陆地水效应改正。

由图 3 可知,实测的重力—径向位移比率为 $0.141 \pm 0.014 \mu\text{Gal/mm}$,这与理论值 $A =$

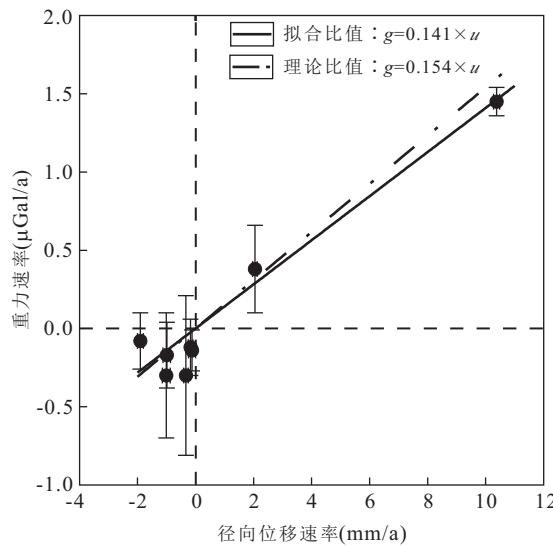


图 3 绝对重力—径向位移比值

Fig.3 Ratio of absolute gravity-uplift rates

黑色实线表示的是实测重力—径向位移比率拟合值;点虚线表示的是 Wahr *et al.*(1995)的理论值(公式(8)中的 A 值)

$0.154 \mu\text{Gal/mm}$ 非常相近,相对差异为 9.2%。造成实测值与理论值之间差异的原因有:(1)理论值估计的近似性;(2)理论值的近似关系是从球谐域的 2 阶开始(有频谱限制),而地面观测数据则包含了全部的频谱信息;(3)地面观测数据本身的误差所致。

3 结论

利用不同粘滞度的 GIA 模型,研究了地球内部各圈层界面变形对 GIA 地表重力的贡献,探讨了粘性重力和径向位移的近似线性关系及其是否依赖于地幔粘滞度,并结合实测的重力和径向位移数据加以验证。具体结论如下:

(1)根据 ICE-4G+RF3L20($\beta=0.4$)模型模拟的 6 个密度界面变形数据,得到岩石圈对 GIA 重力扰动速率和大地水准面异常速率的贡献都超过 86%,而岩石圈以下 5 个圈层的相应贡献总和不大于 14%。这充分支持 Wahr *et al.*(1995)关于 GIA 信号主要集中于岩石圈的理论估计。

(2)根据 3 种不同地幔粘滞度的 GIA 模型可知,重力—径向位移残差以及水准面—径向位移残差随着地幔粘滞度的横向和径向变化都很小,这说明粘性重力与径向位移的近似关系基本不依赖于地幔粘滞度。根据 Wahr *et al.*(1995)的粘性重力与径向位移近似关系,残差均方根比重基本都在 15% 左右,而根据 Purcell *et al.*(2011)近似关系计算的残

差比重相对 Wahr *et al.*(1995)低 2%左右。

(3)由实测的绝对重力速率和 GPS 径向位移速率,得到 GIA 粘性重力—径向位移比值为 $0.141 \pm 0.014 \mu\text{Gal/mm}$,这与 Wahr *et al.*(1995)的理论值非常接近,相对差异约为 9.2%。这从实测的角度验证了粘性重力—径向位移近似线性关系的合理性。

(4)从 GIA 模型输出和实测给出 Wahr *et al.*(1995)近似关系的不确定度为 9.2%~15.0%,可用于评估根据此近似关系分离 GIA 和现今地表质量变化信号的不确定性。

致谢:感谢匿名审稿人对文章提出的意见和建议;文中部分图片由 GMT(Wessel and Smith, 1991)软件制作,在此表示感谢。

References

- Altamimi, Z., Collilieux, X., Legrand, J., et al., 2007. ITRF2005: A New Release of the International Terrestrial Reference Frame Based on Time Series of Station Positions and Earth Orientation Parameters. *Journal of Geophysical Research*, 112(B9): B09401. doi: 10.1029/2007JB004949
- Bevis, M., Kendrick, E., Jr., Smalley, R., 2009. Geodetic Measurements of Vertical Crustal Velocity in West Antarctica and the Implications for Ice Mass Balance. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 10 (10): Q10005. doi: 10.1029/2009GC002642
- Blewitt, G., Lavallee, D., 2002. Effect of Annual Signals on Geodetic Velocity. *Journal of Geophysical Research*, 107(B7): 2145. doi: 10.1029/2001JB000570
- Chambers, D. P., 2006. Observing Seasonal Steric Sea Level Variations with GRACE and Satellite Altimetry. *Journal of Geophysical Research*, 111(C3): C03010. doi: 10.1029/2005JC002914
- Dziewonski, A. M., Anderson, D. L., 1981. Preliminary Reference Earth Model. *Phys. Earth Planet. Int.*, 25 (4): 297–356. doi: 10.1016/0031-9201(81)90046-7
- 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.*, 52(9): 2222–2228 (in Chinese with English abstract).
- Ekman, M., Mäkinen, J., 1996. Recent Postglacial Rebound, Gravity Change and Mantle Flow in Fennoscandia. *Geophysical Journal International*, 126(1): 229–234. doi: 10.1111/j.1365-246X.1996.tb05281.x
- Fang, M., Hager, B.H., 2001. Vertical Deformation and Absolute Gravity. *Geophysical Journal International*, 146 (2): 539–548. doi: 10.1046/j.0956-540x.2001.01483.x

- Feng, W., Zhong, M., Lemoine, J.M., et al., 2013. Evaluation of Groundwater Depletion in North China Using the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) Data and Ground-Based Measurements. *Water Resources Research*, 49(4): 2110–2118. doi: 10.1002/wrcr.20192
- Guo, J.Y., Huang, Z.W., Shum, C.K., et al., 2012. Comparisons among Contemporary Glacial Isostatic Adjustment Models. *Journal of Geodynamics*, 61: 129–137. doi: 10.1016/j.jog.2012.03.011
- Hu, X.G., Chen, J.L., Zhou, Y.H., et al., 2006. Seasonal Water Storage Change of the Yangtze River Basin Detected by GRACE. *Science China Earth Sciences*, 36(3): 225–232 (in Chinese).
- Jia, L.L., Wang, H.S., Xiang, L.W., et al., 2011. Effects of Glacial Isostatic Adjustment on the Estimate of Ice Mass Balance over Antarctica and the Uncertainties. *Chinese J. Geophys.*, 54(6): 1466–1477 (in Chinese with English abstract).
- King, M.A., Bingham, R.J., Moore, P., et al., 2012. Lower Satellite-Gravimetry Estimates of Antarctic Sea-Level Contribution. *Nature*, 491(7425): 586–589. doi: 10.1038/nature11621
- Kuo, C.Y., Shum, C.K., Braun, A., et al., 2008. Vertical Motion Determined Using Satellite Altimetry and Tide Gauges. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 19(1–2): 21–35. doi: 10.3319/TAO.2008.19.1–2.21 (SA)
- Kuo, C.Y., Shum, C.K., Braun, A., et al., 2004. Vertical Crustal Motion Determined by Satellite Altimetry and Tide Gauge Data in Fennoscandia. *Geophysical Research Letters*, 31(1): L01608. doi: 10.1029/2003GL019106
- Lidberg, M., Johansson, J.M., Scherneck, H.G., et al., 2010. Recent Results Based on Continuous GPS Observations of the GIA Process in Fennoscandia from BIFROST. *Journal of Geodynamics*, 50(1): 8–18. doi: 10.1016/j.jog.2009.11.010
- 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. doi: 10.1007/s11430–011–4275–1
- Mazzotti, S., Lambert, A., Henton, J., et al., 2011. Absolute Gravity Calibration of GPS Velocities and Glacial Isostatic Adjustment in Mid-Continent North America. *Geophysical Research Letters*, 38(24): L24311. doi: 10.1029/2011GL049846.
- Milne, G.A., Mitrovica, J.X., Schrag, D.P., 2002. Estimating Past Continental Ice Volume from Sea-Level Data. *Quaternary Science Reviews*, 21(1–3): 361–376. doi: 10.1016/S0277–3791(01)00108–1
- Mitrovica, J.X., Forte, A.M., 1997. Radial Profile of Mantle Viscosity: Results from the Joint Inversion of Convection and Post-Glacial Rebound Observables. *Journal of Geophysical Research*, 102(B2): 2751–2769. doi: 10.1029/96JB03175
- Peltier, W.R., 1998. Postglacial Variations in the Level of the Sea: Implications for Climate Dynamics and Solid-Earth Geophysics. *Reviews of Geophysics*, 36(4): 603–689. doi: 10.1029/98RG02638
- Peltier, W.R., 2002. Global Glacial Isostatic Adjustment: Palaeogeodetic and Space-Geodetic Tests of the ICE-4G (VM2) Model. *Journal of Quaternary Science*, 17(5–6): 491–510. doi: 10.1002/jqs.713
- Purcell, A., Dehecq, A., Tregoning, P., et al., 2011. Relationship between Glacial Isostatic Adjustment and Gravity Perturbations Observed by GRACE. *Geophysical Research Letters*, 38(18): L18305. doi: 10.1029/2011GL048624
- Sella, G.F., Stein, S., Dixon, T.H., 2007. Observation of Glacial Isostatic Adjustment in “Stable” North America with GPS. *Geophysical Research Letters*, 34(2): L02306. doi: 10.1029/2006GL027081
- Sun, W.K., Miura, S., Sato, T., et al., 2010. Gravity Measurements in Southeastern Alaska Reveal Negative Gravity Rate of Change Caused by Glacial Isostatic Adjustment. *Journal of Geophysical Research*, 115(B12): B12406. doi: 10.1029/2009JB007194
- Tamisiea, M.E., 2011. Ongoing Glacial Isostatic Contributions to Observations of Sea Level Change. *Geophysical Journal International*, 186(3): 1036–1044. doi: 10.1111/j.1365–246X.2011.05116.x
- Thomas, I.D., King, M.A., Bentley, M.J., et al., 2011. Widespread Low Rates of Antarctic Glacial Isostatic Adjustment Revealed by GPS Observations. *Geophysical Research Letters*, 38(22): L22302. doi: 10.1029/2011GL049277
- Velicogna, I., Wahr, J., 2006. Measurements of Time-Variable Gravity Show Mass Loss in Antarctica. *Science*, 311(5768): 1754–1756. doi: 10.1126/science.1123785
- Wahr, J., Han, D., Trupin, A., 1995. Predictions of Vertical Uplift Caused by Changing Polar Ice volumes on a Viscoelastic Earth. *Geophysical Research Letters*, 22(8): 977–980. doi: 10.1029/94GL02840
- Wahr, J., Wingham, D., Bentley, C., 2000. A Method of Combining ICESat and GRACE Satellite Data to Constrain

- Antarctica Mass Balance. *Journal of Geophysical Research*, 105 (B7): 16279 — 16294. doi: 10.1029/2000JB900113
- Wang, H.S., Wu, P., Wouter, V.D.W., et al., 2009. Glacial Isostatic Adjustment Model Constrained by Geodetic Measurements and Relative Sea Level. *Chinese J. Geophys.*, 52(10): 2450—2460(in Chinese with English abstract).
- Wang, H.S., Wu, P., Xu, H.Z., 2009. A Review of Research in Glacial Isostatic Adjustment. *Progress in Geophys.*, 24 (6): 1958—1967(in Chinese with English abstract).
- Wang, H.S., Jia, L.L., Wu, P., et al., 2010. Effects of Global Glacial Isostatic Adjustment on the Secular Changes of Gravity and Sea Level in East Asia. *Chinese J. Geophys.*, 53(11): 2590—2602(in Chinese with English abstract).
- Wang, H.S., Jia, L.L., Steffen, H., et al., 2013. Increased Water Storage in North America and Scandinavia from GRACE Gravity Data. *Nature Geoscience*, 6(1): 38—42. doi: 10.1038/Ngeo1652
- Wang, H.S., Wu, P., Jia, L.L., et al., 2011. The Role of Glacial Isostatic Adjustment in the Present-Day Crustal Motion and Sea Levels of East Asia. *Earth Planets Space*, 63(8): 915—928. doi: 10.5047/eps.2011.05.002
- Wang, H.S., Wu, P., 2006. Effects of Lateral Variations in Lithospheric Thickness and Mantle Viscosity on Glacially Induced Surface Motion on a Spherical, Self-Gravitating Maxwell Earth. *Earth and Planetary Science Letters*, 244(3—4): 576—589. doi: 10.1016/j.epsl.2006.02.026
- Wang, H.S., Wu, P., Wal, W.V.D., 2008. Using Postglacial Sea Level, Crustal Velocities and Gravity-Rate-of-Change to Constrain the Influence of Thermal Effects on Mantle Lateral Heterogeneities. *Journal of Geodynamics*, 46(3—5): 104—117. doi: 10.1016/j.jog.2008.03.003
- 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.*, 50(3): 730—736(in Chinese with English abstract).
- Wessel, P., Smith, W.H., 1991. Free Software Helps Map and Display Data. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 72(41): 441—446. doi: 10.1029/90EO00319
- Wu, J., Liu, Q., 2012. Pollen-Recorded Vegetation and Climate Changes from Moon Lake since Late Glacial. *Earth Science—Journal of China University of Geoscience*, 37(5): 947—954 (in Chinese with English abstract).
- Wu, P., 2004. Using Commercial Finite Element Packages for the Study of Earth Deformations, Sea Levels and the State of Stress. *Geophysical Journal International*, 158 (2): 401—408. doi: 10.1111/j.1365—246X.2004.02338.x
- Wu, P., Wang, H.S., Steffen, H., 2013. The Role of Thermal Effect on Mantle Seismic Anomalies under Laurentia and Fennoscandia from Observations of Glacial Isostatic Adjustment. *Geophysical Journal International*, 192 (1): 7—17. doi: 10.1093/gji/ggs009
- Wu, X.P., Heflin, M.B., Schotman, H., et al., 2010. Simultaneous Estimation of Global Present-Day Water Transport and Glacial Isostatic Adjustment. *Nature Geoscience*, 3(9): 642—646. doi: 10.1038/ngeo938
- Zhou, X., Sun, W.K., Zhao, B., et al., 2012. Geodetic Observations Detecting Coseismic Displacements and Gravity Changes Caused by the $M_w = 9.0$ Tohoku-Oki Earthquake. *Journal of Geophysical Research*, 117 (B5): B05408. doi: 10.1029/2011JB008849H
- ### 附中文参考文献
- 鄂栋臣, 杨元德, 晁定波, 2009. 基于 GRACE 资料研究南极冰盖消减对海平面的影响. 地球物理学报, 52(9): 2222—2228.
- 胡小工, 陈剑利, 周永宏, 等, 2006. 利用 GRACE 空间重力测量监测长江流域水储量的季节性变化. 中国科学, 36 (3): 225—232.
- 贾路路, 汪汉胜, 相龙伟, 等, 2011. 冰川均衡调整对南极冰质量平衡监测的影响及其不确定性. 地球物理学报, 54 (6): 1466—1477.
- 汪汉胜, Wu, P., Wouter, V.D.W., 等, 2009. 大地测量观测和相对海平面联合约束的冰川均衡调整模型. 地球物理学报, 52(10): 2450—2460.
- 汪汉胜, Wu, P., 许厚泽, 2009. 冰川均衡调整(GIA)的研究. 地球物理学进展, 24(6): 1958—1967.
- 汪汉胜, 贾路路, Wu, P., 等, 2010. 冰川均衡调整对东亚重力和海平面变化的影响. 地球物理学报, 53(11): 2590—2602.
- 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.
- 伍婧, 刘强, 2012. 晚冰期以来月亮湖孢粉记录反映的古植被与古气候演化. 地球科学——中国地质大学学报, 37 (5): 947—954