第 22 卷 第 1 期 天 文 学 进 展 Vol.22, No.1
2004 年 3 月 PROGRESS IN ASTRONOMY Mar., 2004

文章编号: 1000-8349(2004)01-0035-10

GRACE 重力计划在揭示地球系统质量重新分布中的应用

黄 珹, 胡小工

(中国科学院 上海天文台, 上海 200030)

摘要: 2002 年 3 月成功发射的美德合作卫星重力计划 GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment), 即将提供空间分辨率约为 200 km 而时间分辨率为 1 个月的时变地球重力场模型序列。 GRACE 计划的星座由两颗相距约 220 km, 高度保持为 300~500 km、倾角保持约 90° 的近极轨卫星组成。由于采用星载 GPS 和非保守力加速度计等高精度定轨技术, 以及高精度的星 – 星跟踪数据反演地球重力场, 在几百公里和更大空间尺度上, GRACE 重力场的精度大大超过此前的卫星重力计划。根据 GRACE 时变重力场反演的地球系统质量重新分布, 将对固体地球物理、海洋物理、气候学以及大地测量等应用有重要的意义。虽然其设计寿命只有 5 yr, 但研究表明 GRACE 的结果可用于研究北极冰长期时间尺度的变化, 并进而研究极冰融化对全球气候变化, 特别是对海平面长期变化的影响。在季节性时间尺度上, 利用 GRACE 重力场反演的质量重新分布足以揭示平均小于 1 cm 的地表水变化, 或小于 1 mbar 的海底压强变化。除了巨大的社会效益和经济效益外, 这些变化对了解地球系统的物质循环 (主要是水循环) 和能量循环有非常重要的意义。介绍 GRACE 重力场揭示的地球系统质量重新分布, 为理解其地球物理应用提供必需的准备; 同时针对我国大陆和沿海地区的地球物理应用提出初步的设想。

关 键 词: 天体力学; 质量重新分布; 综述; GRACE; 重力场; 地球物理流体; 水循环

中图分类号: P139; P312.1 **文献标识码**: A

1 引 言

地球系统的大尺度质量重新分布 (即质量分布随时间的变化), 反映了固体地球 (岩石圈和地幔) 与地球物理流体 (大气、海洋和液体外核) 的相互作用, 是地球物理学的重要研究对象。固体地球与液体外核的相互作用主要表现在 10 yr 或更长时间尺度上; 而固体地球与大

收稿日期: 2003-05-19; **修回日期**: 2003-09-08

基金项目: 中国科学院知识创新重要方向资助项目 (KJCX2-SW-T1); 国家自然科学基金资助项目 (40374002)

气、海洋的相互作用主要表现在季节性和年际时间尺度上。本文介绍的主要对象是后者，即季节性和年际时间尺度的地球系统质量重新分布。在此尺度上的质量重新分布主要来自水循环，如降雨－河流输运－水蒸发和冰川、北极冰盖融化等。水循环决定了全球的气候变化，因此受到科学界和各国政府的密切关注。

全球空间尺度和季节性时间尺度上的质量重新分布研究，得益于长期的众多气象实测数据 (气压、温度和风速以及它们随高度变化等) 的累积，目前对地球物理流体中的大气运动了解相对比较清楚，对海洋环流运动、陆地水变化 (包括表层水和深层地下水)，以及冰川、冰盖融化则需进一步深入研究，特别是在获取充足的相关实测资料方面。为此，美国及其合作国家发展了一系列的空间对地观测计划。与水循环密切相关并已经正常运行的就有精密测定海面地形的 TOPEX/Poseidon (ocean TOPography EXperiment，以下简称 T/P) 及其后续计划，测定土壤水分的 AQUA 计划 (Aqua 在拉丁文中是水的意思)，以及测定极地冰的 ICESat (Ice, Cloud and land Elevation Satellite) 计划等。大陆区域表层水 (包括土壤水以及表面积雪) 的变化来自降雨、土壤蒸发蒸腾、河流输运以及向深层地下渗透等过程。除了降雨可能引起表层水增加外，其余 3 个过程均使其减少。而对海洋区域，除了降雨和蒸发外，海洋环流、极冰融化和其它海洋波动也会导致海水质量的重新分布。精确的水质量变化测量可约束现有的大气和海洋环流模型，加深对陆－海－气相互耦合的认识，提高气象和气候数值预报的精度。

卫星重力探测地球重力场，能进而反演地球系统质量的分布。地球重力场时变信号的探测可揭示质量分布的变化，即质量重新分布。 2002 年 3 月 17 日成功发射的美德合作计划 GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) 是最新的卫星重力计划之一。它采用了两颗低高度 (300~500 km)、近极轨卫星 (卫星几何尺寸：长 3.123 m，宽 1.942 m，高 0.72 m) 的相互跟踪技术。表 1 是 GRACE 上搭载的科学仪器。 GRACE 是目前时间分辨率最高的卫星重力计划。初步分析表明，仅用 30 d 的 GRACE 数据解算的重力场就可达到前 30 yr 资料累积才能达到的精度！详细的误差分析 (大气是主要的误差源) 表明：在季节性时间尺度和几百公里或更大空间尺度上， GRACE 可探测平均小于 1 cm 的表层水变化，或小于 1 mbar 的

表 1 GRACE 卫星搭载的科学仪器 [11]

仪 器	功 能
K 波段测距系统	测量两颗星之间的距离，好于 10 μm
S 波段天线	从卫星至地面传输数据
SuperSTAR 加速度仪	精密测量非引力加速度， 4×10^{-12}~10^{-10} m/s^2
恒星照相仪	精密测量卫星相对于恒星的姿态
振荡器	提供 K 波段测距系统所需频率
地球、太阳传感器	跟踪地球和太阳，精度较低，用于调节姿态
质心调节仪	精密测量并调整质心的位置
GPS 接收机	用于精密定轨和大气掩星研究，定轨精度好于 5 cm
激光反射镜	测量卫星至地面跟踪站距离
太阳能电池阵	提供能量
3－轴姿态稳定控制系统	稳定卫星姿态
1750-A 微处理器	飞行计算机，用于姿态调整和数据预处理

海底压强变化[11]。与之相比，目前的表层水模型，如美国国家环境预报中心 (NCEP) 和欧洲中尺度气象预报中心 (ECMWF) 等机构的重新分析结果的精度远未达到厘米级；海洋卫星 T/P 的单点测高精度约为 4 cm (1 cm 海平面高约等价于 1 mbar 海底压强)，即使对数据进行空间平滑后，其精度也只能达到 2 cm。

GRACE 计划之前的卫星重力计划只能提供少数时变低阶带谐系数，其原因是这些计划的轨道构型不适合重力场的时变性研究。例如，目前较好的 (稳态) 重力场模型 —— JGM-3 主要来自 T/P 的贡献，但 T/P 轨道高约 1336 km，其倾角只有约 60°。另一颗测地卫星 LAGEOS (LAser GEOdetic Satellite) 提供了时间跨度最长、精度最高的激光测距数据 (1976 年至今)，但因其轨道太高 (6000 km)，只对重力场低阶项系数的长期变化研究有显著贡献。

根据 GRACE 计划的工作原理，重力场的误差主要取决于 K 波段测距系统的精度和非引力加速度的测量精度。K 波段测距系统是首次应用于卫星和卫星之间的跟踪，且 GRACE 上搭载的非引力加速度仪比 CHAMP (CHAllenging Minisatellite Payload) 上的非引力加速度仪精度略高。从 GRACE 成功发射的 2002 年 3 月至今已超过 1 yr，除了一些初步的结果外，正式的时变重力场模型仍未释放，其原因之一就是对这两项主要误差源尚需进一步的深入研究。

GRACE 时变重力场的应用是国际地球物理学界近期的重要研究方向，在最近 3 年的美国地球物理年会 (AGU 2001、AGU2002 和 AGU 2003) 上都有关于 GRACE 的专门分会。由 GRACE 研究计划科学组的首席科学家 John Wahr 领导的小组已利用模拟数据展开了众多的应用研究，其重点是根据反演的质量重新分布并结合其它资料研究地球物理，例如结合极冰厚度的变化等研究固体地球的冰后回弹[5,6,8~12]。国内卫星重力工作也有较好的基础，例如自然科学基金就分别资助了由许厚泽院士和宁津生院士负责的两个重点项目，这些项目详细研究了卫星重力的精度、卫星重力与地面重力资料的同化以及反演算法等。

卫星测高计划，如 T/P 等极大地增加了对海洋变化的认识，期望 GRACE 也将大大增加对地球系统质量重新分布的认识。类似于在卫星测高数据基础上的海洋科学研究，对 GRACE 重力场的校验和地球物理解释、结合 GRACE 重力场与其它观测数据 (如卫星测高) 的综合地球科学研究，以及将 GRACE 重力场与全球大气或海洋模型的同化等研究都是目前国际上关注的重要问题。本文并不讨论具体的应用研究，而是着重于介绍进行这些研究所必需的准备知识，且只限于定性描述，定量的详细讨论请阅参考文献 [5,6,8~12]。

2　GRACE 重力场的时空分辨率和精度

重力场模型的时间分辨率取决于卫星星下点轨迹的变化。理论上说，轨道倾角为 90° 的中、低极轨重力卫星计划的时间分辨率可达到 1 d (即地球自转周期)。但由于众多误差源的存在，其实际时间分辨率大大低于 1 d。GRACE 以前的卫星重力计划根本无法获得月际 (GRACE 的时间分辨率) 的重力场变化。虽然地球物理对重力场高频变化非常感兴趣 (如潮汐信号等)，但目前的精度水平更适于低频变化的研究。

重力场模型的空间分辨率与轨道构型和误差水平有关。考虑到缔合勒让德函数 $P_{lm}(\cos\theta)$ 的数学特性，空间分辨率取决于重力场模型的阶数，对应阶数为 l 的重力场空间分辨率大致

为 $2\pi a/l$ (a 为地球赤道半径) 。若 GRACE 的阶数 l 截止到 100 ，则其分辨率约为 200 km 。不同的重力场时空分辨率反映了不同层次的地球物理过程 (见表 2) 。

表 2　地球物理研究对重力场时空分辨率的要求 [11]

研究内容	空间分辨率 /km	时间分辨率
平均大气海洋热交换	< 1000	稳态重力场
表层海洋环流	< 1000	稳态重力场
固体地球重力异常 (如板块俯冲带等)	< 300	稳态重力场
大气海洋热交换变化	< 1000	季节变化
海底压强	< 500	季节变化
深层海洋环流	< 500	季节变化
海平面变化	< 700	长期变化 (5 yr)
土壤蒸发蒸腾	< 300	季节变化
格陵兰岛和南极冰	200～800	季节、长期变化 (5 yr)

以下简要介绍重力场时空分辨率和精度定量评估的方法。大地水准面 (重力势函数) 定义为

$$N(\theta,\varphi,t) = a\sum_{l=0}^{\infty}\sum_{m=0}^{l} P_{lm}(\cos\theta)\left[C_{lm}(t)\cos m\varphi + S_{lm}(t)\sin m\varphi\right] \ , \tag{1}$$

其中 l 、 m 分别为重力场的阶数和次数， a 为地球赤道半径， θ 为纬度 ($0°$～$180°$) ， φ 为东经， $C_{lm}(t)$ 和 $S_{lm}(t)$ 为时变地球重力场系数， $P_{lm}(\cos\theta)$ 是归一化的缔合勒让德函数。由地球系统质量重新分布导致的重力场变化可表示为 [1]

$$\left\{\begin{array}{c}\Delta C_{lm}\\ \Delta S_{lm}\end{array}\right\} = \frac{3}{4\pi a\rho_{\rm E}(2l+1)}\int \Delta\rho(r,\theta,\varphi,t)P_{lm}(\cos\theta)\left(\frac{r}{a}\right)^{l+2}\left\{\begin{array}{c}\cos m\varphi\\ \sin m\varphi\end{array}\right\}\sin\theta{\rm d}\theta{\rm d}\varphi{\rm d}r \ , \tag{2}$$

其中， $\rho_{\rm E}$ 为地球平均密度 (5517 kg/m^3) ， $\Delta\rho$ 表示密度分布随时间的变化， r 为地球平均半径。

已知 $C_{lm}(t)$ 和 $S_{lm}(t)$ ，求解 $\Delta\rho$ 称为重力场反演。简单的数学推导表明它的解一般不是唯一的 [1] 。对地球表面的质量重新分布 (包括大气、海洋、冰和地下水) 而言，其密度变化的空间范围是厚度为 10～15 km 的大气层。考虑到地球平均半径为 6378 km ，在作重力场反演时可采用薄层近似，即假设密度变化发生于地球表面无限薄层内， $r/a \approx 1$ ，这样 (2) 式可简化为

$$\left\{\begin{array}{c}\Delta C_{lm}\\ \Delta S_{lm}\end{array}\right\}_1 = \frac{3}{4\pi a\rho_{\rm E}(2l+1)}\int \Delta\sigma(\theta,\varphi,t)P_{lm}(\cos\theta)\left\{\begin{array}{c}\cos m\varphi\\ \sin m\varphi\end{array}\right\}\sin\theta{\rm d}\theta{\rm d}\varphi \ , \tag{3}$$

其中， $\Delta\sigma$ 为表面密度变化： $\Delta\sigma(\theta,\varphi,t) = \int\Delta\rho(r,\theta,\varphi,t){\rm d}r$ 。由于固体地球并非刚体而是滞弹体，表面载荷的变化导致整体地球的响应，因此表面负载的变化还导致重力场的间接变化。这一部分变化由 LOVE 数理论描述 [3] 。直接与间接变化的总和为 $\left\{\begin{array}{c}\Delta C_{lm}\\ \Delta S_{lm}\end{array}\right\} = (1+$

$k_l)\left\{\begin{array}{c}\Delta C_{lm}\\ \Delta S_{lm}\end{array}\right\}_1$，其中 k_l 是 l 阶 LOVE 数。

如果对表面密度变化 $\Delta\sigma$ 也作球谐函数展开，则有

$$\Delta\sigma(\theta,\varphi,t)=a\rho_{\mathrm{W}}\sum_{l=0}^{\infty}\sum_{m=0}^{l}P_{lm}(\cos\theta)\left[\Delta\hat{C}_{lm}(t)\cos m\varphi+\Delta\hat{S}_{lm}(t)\sin m\varphi\right]\ , \tag{4}$$

其中 ρ_{W} 为水的密度。文献 [11] 证明：

$$\left\{\begin{array}{c}\Delta\hat{C}_{lm}\\ \Delta\hat{S}_{lm}\end{array}\right\}=\frac{\rho_{\mathrm{E}}}{3\rho_{\mathrm{W}}}\frac{2l+1}{1+k_l}\left\{\begin{array}{c}\Delta C_{lm}\\ \Delta S_{lm}\end{array}\right\}\ . \tag{5}$$

上式意味着在薄层近似下反演的结果是唯一的，并可很容易地从重力场系数变化直接得到表面密度变化 (也即质量重新分布)。(5) 式是重力场变化在地球物理应用中的最基本方程。正是根据它，本文中的表面质量重新分布完全等价于重力场的变化。

由于重力场模型不可能给出从 0 至无穷所有阶次的系数，必须截止于一定阶次。对 (5) 式而言，这意味着表面密度变化球谐展开的系数也只能计算到截止阶次。由此产生的误差称为截止误差，以区别于重力场模型系数误差。考虑到模型系数误差随阶数 l 增大而迅速增加，并且高阶项对表面密度的贡献不可忽略，因此得到的表面密度变化 $\Delta\sigma(\theta,\varphi,t)$ 的精度对于单点而言是较低的。但是地球物理研究感兴趣的一般并不是某一点的表面密度变化，而是对某区域 (如长江流域) 的积分：

$$\Delta\overline{\sigma}(t)=\frac{\int\Delta\sigma(\theta,\varphi,t)u(\theta,\varphi)\mathrm{d}\Omega}{\Omega}\ , \tag{6}$$

其中区域特征函数 $u(\theta,\varphi)$ 在积分区域内为 1 而在积分区域外为 0，Ω 为区域的面积。

由于 $u(\theta,\varphi)$ 在积分区域的边界不连续，文献 [1,5] 提出采用一个平滑的函数来代替它。其好处是减少球谐展开高阶系数的误差对积分的贡献，但缺点是求得的平均表面密度的物理意义不明。具体做法是将 $u(\theta,\varphi)$ 替换为

$$w(\theta,\varphi)=\int W(\theta,\varphi,\theta_1,\varphi_1)u(\theta,\varphi)\mathrm{d}\Omega_1\ , \tag{7}$$

而平滑核定义为

$$W(\theta,\varphi,\theta_1,\varphi_1)=W(\gamma)=\frac{b}{2\pi}\frac{\exp[-b(1-\cos\gamma)]}{1-\exp(-2b)},\quad b=\frac{\ln 2}{1-\cos(r/a)}\ , \tag{8}$$

其中 γ 定义为 $\cos\gamma=\cos\theta\cos\theta_1+\sin\theta\sin\theta_1\cos(\varphi-\varphi_1)$，而平均半径 r 为平滑核的自由参数 [1,5]。

由于重力场模型的空间分辨率只与阶数有关而与次数无关，对应的重力场精度也用阶数精度来描述：$\delta N_l=a\sqrt{\sum_{m=0}^{l}(\delta C_{lm}^2+\delta S_{lm}^2)}$，其中 δC_{lm}、δS_{lm} 分别是 l 阶 m 次系数的精度。除了基于模拟数据的误差协方差分析外，目前对 GRACE 重力场的精度还知之甚少。有的工作 [5] 还进一步假设 GRACE 重力场的精度只与阶数有关而与次数无关，不同阶数的重力场系

数互不相关，并且 $\delta C_{lm} = \delta S_{lm}$ 。在这些假设下，在 GRACE 设计寿命 (5 yr) 内，利用每月的重力场求解重力场的季节性变化 (周年和半年项)，并根据 (5) 式计算的质量重新分布的精度将大大超过目前地球物理流体的模型精度。这正是 GRACE 计划受到地球物理界密切关注的原因。

3 质量重新分布的地球物理解释

地球重力场可分为不随时间变化的稳态部分和时变部分。质量重新分布 (根据 (5) 式) 等价于重力场的时变部分。虽然时变部分的量级还不到稳态部分的 1%，但其变化的时间尺度从几个小时到几千年，包含了众多重要的地球物理信息。由日月引力摄动产生的固体地球潮汐和海洋潮汐即是其信号之一。潮汐既有周日和半周日等高频信号，也有周期长达 18.6 yr 的 10 yr 尺度信号。除了对地面台站运动影响外，潮汐还导致弹性地球和海水的质量重新分布 (潮波)，因而产生地球重力场的时变性 [2,4] 。地球的冰后反弹是滞弹地幔对历史上前一次 (10000 至 4000 yr 前) 冰融化后负载减小的响应，是一个重要的低频重力场时变信号。它只在格陵兰岛和南极等区域显著 [9,10,12] 。虽然，对潮汐和冰后反弹的地球物理研究都还不够完善 (例如浅海区域的潮汐模型精度较低、对前一次冰融化的历史、地幔的滞弹特征等并不完全了解)，但是重力场时变中最不规则、最不为人们所知的却是地球物理流体中水的变化，包括海洋、湖泊、河流以及地下水。水在大气、海洋和陆地之间的循环不仅是物质的运动，而且更是能量的转移。所以时变重力场对水循环，进而对大气物理、海洋物理、全球变化有非常重要的意义。

GRACE 测得的重力场包括全部地球物理因素的贡献，仅依靠它的结果无法分离每个因素的贡献 (稳态部分可以通过平均求出)。例如陆地上大气和土壤水变化都对平均表面密度变化的球谐展开系数 $\left\{ \begin{array}{c} \Delta\hat{C}_{lm} \\ \Delta\hat{S}_{lm} \end{array} \right\}$ 有贡献；根据 (5) 式，它们对时变重力场系数 $\left\{ \begin{array}{c} \Delta C_{lm} \\ \Delta S_{lm} \end{array} \right\}$ 也有贡献。为了从测得的总变化中分离它们，需要已知其中一个。

在大多数情况下，地球大气处于流体静力学平衡状态，其质量变化完全等同于表面气压变化 (相差一个地球表面重力加速度因子)，主要在季节性时间尺度上对时变重力场有贡献。目前大多数数值大气环流模型都提供表面气压值，并且具有较高精度。因此在 GRACE 重力场的大多数应用研究中，都根据大气环流模型首先扣除大气的贡献。常用的可 (有偿) 获取的数值大气环流模型包括 NCEP 和 ECMWF 提供的重新分析结果，这些结果是将大气环流的动力学模型与大量陆地上的实测数据进行同化处理后得到的。

应用大气环流模型时有两个问题需要注意。一是对其精度的定量评估 [6,11] 。由于绝大多数的实测数据已被模型同化，将模型预报的气压值与实测数据进行比较无法客观评价其精度。文献 [8,11] 中采用将 NCEP 与 ECMWF 的模型预报值相减的方法来间接评估精度。假设两模型误差相互独立，则模型误差为 NCEP 与 ECMWF 之差除以 $\sqrt{2}$ 。这种方法很可能低估了模型误差，其原因是两模型都同化了几乎相同的实测大气数据；二是海洋的逆气压 (IB) 响应假设 [6,8,11] 。根据 IB 假设，海洋上大气压变化导致海平面的相应变化使得海平面变化刚好完全抵消大气压变化。即若大气压增加 1 mbar，海平面将降低 1 cm；

若大气压减少 1 mbar，海平面将升高 1 cm。在此假设下，大气环流模型在海洋上的误差并不影响重力场，其原因是大气质量 (相当于大气压) 变化和海洋响应产生的质量变化的总和为零。考虑到大气模型的误差主要分布在海洋上 (大陆上的实测数据有效地抑制了模型误差)，IB 假设极大地降低了对大气模型精度的要求。虽然在短于几天的时间尺度上，海洋对大气压变化的响应偏离 IB 假设较大，但在几天和更长时间尺度上，海洋对大气压的 IB 响应已经得到理论和实测的证实。GRACE 重力场的时间分辨率为 1 个月，IB 响应假设应该是很好的近似。

表 2 表明海洋科学是 GRACE 时变重力场应用的主要领域之一。除了对表面气压变化的响应外，海洋还在水平风应力的驱动下产生大尺度 (> 500 km) 环流运动和中、小尺度涡流运动。海洋运动比大气环流更加复杂，具体表现在：虽然季节性和年际变化是海洋的主要时变频段，但研究发现海洋运动在高频 (周期短于 1 yr，长于 2 个月) 内的能量比季节性和年际变化的能量还大 [11]。由于海水的比热容大大高于空气，且海洋总质量远远高于大气总质量，海洋充当了地球系统的热库，是全球气候变迁的主要调节者。研究表明，海洋热量的相对微小变化有可能导致全球气候的重大改变。一个典型的例子是年际尺度上发生于赤道太平洋的 ENSO 事件。海洋中有明显的大尺度质量重新分布过程，如沿纬度带由东向西的太平洋环流、沿东日本海岸由西南至东北的黑潮等都伴随着显著的海水流动，并且表现出非常复杂的时变性。相比于大气环流模型，海洋环流模型的误差要大得多。原因之一是在占地球表面面积 70% 的海洋上，除了由海洋测高卫星获得的近全球覆盖的海平面高数据外，还缺乏足够的实测资料。

研究表明：除了高频海洋变化外，在较长时间尺度上，流体静力学平衡仍然是一个合理的假设。类似于大气情形，单位面积上海水质量的变化等于海底压强的变化。假设海水密度保持不变，海底压强变化即等价于测高卫星获得的海平面高变化。海温、海盐的季节性变化以及表层、深层海洋环流都会引起海水密度的变化。由于卫星测高的精度较高，计算海底压强变化的一个较可靠方法是从测得的海平面高变化中扣除仅由密度变化导致的海平面高变化，后者又称为比容海平面高变化。在季节性和年际时间尺度上，比容海平面高变化主要取决于海温，即海洋的热量变化。如果能通过卫星重力计划如 GRACE 精密测定海洋的质量重新分布，结合海洋测高卫星如 T/P 得到的海平面高变化，就有可能得到大尺度上的海洋热量变化，也即大气 – 海洋间的热交换。

由于卫星重力场是通过卫星轨道变化来估计的，其结果只能是观测时段内时变重力场的某种平均。与 T/P 不同，GRACE 的星下点轨迹不会严格自身重复。因此海洋的高频变化，如周日和半周日潮汐及中小尺度的涡流等，将会以一种非常复杂的方式污染低频 (如 1 个月) 重力场变化 [4]。对潮汐而言，现有潮汐模型精度较高，潮汐导致的时变重力场可严格计算，这种污染并不严重。另外，目前采用数值模型来减小海洋中小尺度涡流污染。在中小尺度上，由涡流产生的质量重新分布可能比环流产生的质量重新分布还大，如何尽量减小它对低频重力场变化的污染仍然是需要研究的重要问题。

陆地水的平衡方程可简单地描述为：

降雨量 $-$ 土壤水分蒸发蒸腾 $-$ 表面流失 $-$ 深层渗透 $=$ 土壤水分变化 $+$ 积雪变化.

陆地水变化的空间尺度从几十公里 (如三峡水库库容的变化) 到几千公里 (如长江流域)，而其变化的时间尺度既有季节性变化也有显著的年际变化等。就变化的量级而言，陆地水略大于

海洋。不同学科对上述平衡方程中的不同项感兴趣，但由于缺乏充足的实测数据，尽量提高其中各项的精度就变得很迫切。例如，大气科学更关心其中的土壤水分蒸发蒸腾，因为水分进入大气后会影响大气对太阳辐射的吸收能力，进而改变大气在垂直方向的运动；水文学可能更关心水的深层渗透的变化，因为它与地下深层的物理特征相关。沿海地区水的深层渗透对研究平均海平面的长期变化也有重要意义，因为渗透的深层地下水会导致区域性的海平面变化，这种变化可能与平均海平面变化趋势不一致，但可被当地的验潮站探测到。由 GRACE 重力场导出的质量重新分布无法分别给出上述各项，必须将它们之间的关系进行约束。对少数拥有详细水文资料的较小区域 (几公里至几十公里) ， GRACE 的结果 (几百公里尺度) 还有助于理解此区域小尺度变化与较大尺度变化的关系。

4 在中国开展 GRACE 重力场应用的设想

不同于精确测定平均大地水准面的专门卫星重力计划，如欧空局的 GOCE (Gravity field and static-state Ocean Circulation Experiment) ， GRACE 计划的卫星星座构形决定了其重力场的空间分辨率约为 200 km (半波长) ，对应的球谐展开阶次约为 100 。 GRACE 计划的重点是：测量采样频率为 1 个月的重力场时变。考虑到卫星寿命为 5 yr ， GRACE 计划主要揭示的是季节和年际时间尺度上、几百公里 (或更大) 空间尺度上的质量重新分布。在该时间尺度上，质量重新分布的主要原因是地球表面流体 (包括大气、海洋和地表水) 的运动。设想在国内开展的应用研究可围绕以下 3 个方面进行：

(1) 中国大陆和近海地区的水文及其它测地资料校验 GRACE 重力场

从 GRACE 计划的原始数据 (两颗卫星间的距离变化率) 到最终的重力场模型，需进行系统差、物理模型 (如电离层效应) 和轨道改正。类似 T/P 海洋测高计划， GRACE 计划的重力场首先需要进行校验，以确定可能的未知误差源 (或系统差) 。 GRACE 计划目前的两个校验区域是埃及和阿拉伯半岛。主要考虑到这两个区域的降水较少，水文系统 (河流输运、地下水) 较简单，因此，根据水文资料计算的质量重新分布精度较高，并可与 GRACE 重力场的反演结果比较。选取我国的某区域对 GRACE 进行校验类似于利用我国沿海验潮站资料对 T/P 测高进行较验，其意义远远超过对国外工作的简单重复。因而设想可首先研究位于新疆的塔里木盆地。虽然该地区实测水文资料较少，但是相对简单的水文系统使其成为较好的校验对象。校验工作的关键是获得较完备的地面水文资料，这可以通过美国 NCEP 的气候预报中心 (CPC) 等机构获得部分中国大陆的水文资料。

另外，季节性时间尺度上的质量重新分布导致的地壳弹性形变，可以影响 GPS 站点的垂直运动 [7] 。我们可利用中国 GPS 网探测到的垂直运动，研究其对应的负荷变化与 GRACE 探测到的质量重新分布的关系。利用我国局部资料进行的校验是独立于 GRACE 的其它校验，对探测 GRACE 可能的系统误差有一定的意义。

(2) 用 GRACE 重力场揭示我国大陆地表水质量的重新分布及其气候学意义

重力场反演的大陆地区质量重新分布，在季节性和年际时间尺度上，主要反映大气和地表水 (土壤水 + 积雪) 的贡献。利用大气环流模型扣除其贡献后， GRACE 重力场可反演出在

几百公里空间尺度上平均小于 1 cm 的土壤水变化。因而可考虑：首先利用 GRACE 重力场获取中国大陆的地表水变化，建立其变化模式；然后结合降雨和河流输运等资料分析土壤水分蒸发蒸腾的季节性和年际变化。土壤水分蒸发蒸腾与固体地球和大气之间的能量传输有关，对它的研究有重要的气象学和气候学意义。GRACE 重力场反演的地表水变化还可直接与大气环流数值模型的结果比较，但 GRACE 很可能包含更复杂的小尺度变化，因此它们之间的差别可帮助发现现有大气环流可能存在的误差。另一问题是，GRACE 的时间分辨率高，并且反映的是几百公里尺度的平均变化，其反演得到的地表水变化与小范围水文测量 (空间尺度一般为几十公里或更小) 的比较可望揭示更清晰的地表水变化趋势。

(3) GRACE 重力场揭示中国近海地区质量重新分布及其海洋学意义

风应力和大气压驱动的大尺度海洋环流引起海水质量重新分布。中高纬地区在季节性时间尺度上的海平面变化主要是由海水密度变化导致的比容高变化，由海水质量重新分布引起的海平面变化相对要小得多，因而不容易被验潮站和海洋测高卫星探测到。我国近海地区海洋地形复杂，洋流受到黑潮和赤道太平洋环流的影响，其运动非常复杂[13]。GRACE 重力场反演的海底压强变化 (在流体静力学假设下等价于单位面积上的海水总质量变化) 可在一定程度上验证我国近海地区的表层环流模式 (如由国家基础性重大关键项目“气候动力学和气候预测理论的研究”得到的结果)。结合海底压强变化和 T/P 测量的海平面高度还可确定海洋热量的变化。海洋热量变化反映能量转移，通过分析、比较我国近海区域热量变化与更大尺度的热量变化，有助于理解该区域对全球变化的响应。国内利用验潮站和卫星测高技术得到的结论是，我国近海海平面在上升。由于质量增加和海温升高都可能导致海平面升高，对该区域质量重新分布的准确测量可帮助理解这两个因素的作用。结合上述 (2) 中研究的大陆地区质量重新分布，有望了解我国大陆和附近沿海的质量分布和热量平衡情况。

参考文献：

[1] Chao B, Gross R. Geophys. J. R. Astron. Soc., 1987, 91: 569

[2] Fu L, Cazenave A eds. Satellite Altimetry and Earth Sciences, A Handbook of Techniques and Applications, New York: Academic Press, 2001: 121

[3] Han D, Wahr J. Geophys. J. Int., 1995, 120: 287

[4] Knudsen P, Andersen O. GRL, 2002, 29(8): 19

[5] Swenson S, Wahr J. JGR, 2002, 107(B9): ETG3

[6] Swenson S, Wahr J. JGR, 2002, 107(B9): ETG4

[7] vanDam T, Wahr J, Chao Y *et al.* Geophys. J. Int., 1997, 129: 507

[8] Velicogna I, Wahr J, den Dool H. JGR, 2001, 106(B8): 16415

[9] Velicogna I, Wahr J. JGR, 2002, 107(B12): ETG17

[10] Velicogna I, Wahr J. JGR, 2002, 107(B10): ETG20

[11] Wahr J, Molenaar M, Bryan F. JGR, 1998, 103(B12): 30205

[12] Wahr J, Wingham D, Bentley C. JGR, 2000, 105(B7): 16279

[13] 中国科学院大气物理所，国家海洋信息中心编．太平洋及中国近海表层海流图集，北京：海洋出版社，1996: 32

Mass Redistribution to be Revealed by GRACE Project

HUANG Cheng, HU Xiao-gong

(*Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China*)

Abstract: The successful launch of the GRACE twin satellites in March, 2002 for gravity and climate study, which is a US and Germany co-sponsered project, will deliver time-varying gravity models with unprecedented precision. The two identical satellites are about 220 km apart on a nearly polar orbit with an altitude of 300∼500 km. On aboard GPS data and accelorometer mearuments are used to precisely determine the orbits, and range change rate measurements between the twin satellites are used to recover gravity to much higher precision than before at spatial scales of a few hundred km and larger. The mass redistribution data derived from the GRACE time-varying gravity models will have profound impacts on various geophysical research topics. Despite of its designed 5-year lifetime, simulation studies have shown that the GRACE gravity will provide important information on secular change of ice sheets, and global mean sea level change. At seasonal time scales, GRACE gravity is capable to detect land water change less than 1 cm or change in oceanic bottom pressure less than 1 mbar. Besides social and economical importance, knowledge in mass redistribution helps us understand both water mass and energy transfer. The purpose of this paper is to provide necessary background for understanding various prosesses of mass redistribution, and to propose application studies focusing on China and neighboring oceans.

Key words: celestial mechanics; mass redistribution; review; GRACE; gravity; geophysical fluid; water recycling