



卫星重力测量及其在地球物理环境变化监测中的应用



许厚泽*, 陆洋, 钟敏, 郑伟, 张子占

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

* E-mail: hsuh@whigg.ac.cn

收稿日期: 2012-01-28; 接受日期: 2012-05-29

国家自然科学基金项目(批准号: 41131067, 41021003, 41004006)和中国科学院知识创新工程重要方向青年人才项目(编号: KZCX2-EW-QN114)资助

摘要 阐述国际卫星重力测量计划的发展进程和研究现状, 对比卫星重力测量工程的三种观测技术: 卫星跟踪卫星高低模式(SST-HL)、卫星跟踪卫星高低/低低模式(SST-HL/LL)和卫星跟踪卫星高低/卫星重力梯度模式(SST-HL/SGG). 重点讨论了重力卫星观测信息在地球物理环境变化监测(海洋、冰川、陆地水、岩石圈等)中的科学应用, 并指出为了进一步提高地球重力场探测分辨率和精度, 有必要发展下一代重力卫星.

关键词

卫星重力
地球重力场
环境变化
卫星跟踪卫星

地球重力场是地球科学研究与分析中的基本物理场, 它反映了地球表层及内部的物质分布变化及其运动状态, 是研究地球内部和外部物质运动状态和动力学机制的重要约束, 研究地球的物理环境及其变化的重要信息, 为人类认识和解决自然资源、环境及灾害等问题提供重要的依据. 近十年来, 卫星重力测量技术的实现, 开创了高精度全球重力场观测全球环境变化试验的新纪元. 不同于传统的重力观测技术, 重力卫星全天候、高精度、大范围的观测优势, 可获取全球均匀覆盖的地球重力场信号, 尤其是卫星重力获得的全球性重力时间变化信息, 可以在大尺度上定量揭示全球环境变化(海平面与环流变化、冰川消融、陆地水量变化、强地震及极端气候等)导致的地表质量分布与迁移, 为定量探测和研究地球物理环境及至全球环境变化提供了独特的、不可替代的手段. 卫星重力测量技术已是现在及至未来一

段时期相关地球科学研究中最具吸引力的研究课题.

1 卫星重力测量发展

卫星重力测量是以卫星为载体, 利用卫星本身为重力传感器或卫星所携带的重力传感器(加速度仪、精密测距系统和重力梯度仪等), 观测由地球重力场引起的卫星轨道摄动或者直接测量地球重力场有关参量, 以这些数据资料来确定地球重力场的方法和技术.

自1957年10月前苏联的第一颗人造地球卫星上天以来, 利用卫星观测结果来解决地球重力场问题就受到了大地测量界重视. 特别是1966年Kaula^[1]首次利用卫星轨道摄动分析理论和地面重力资料建立了8阶的地球重力场模型, 奠定了卫星重力学的理论基础. 进入20世纪70年代, 利用卫星技术和星载重

英文引用格式: Hsu H Z, Lu Y, Zhong M, et al. Satellite gravity and its application to monitoring geophysical environmental change (in Chinese). Sci Sin Terrae, 2012, 42: 843-853

力仪研究地球重力场的概念被提出,到了 80 年代,许多欧美学者开始针对不同的卫星重力观测方案进行数值模拟计算,同时还设计了专用重力卫星观测系统,并进行了许多卫星试验.前后经过了二十多年的反复论证和试验,最终以卫-卫跟踪和卫星重力梯度两种观测模式为国际大地测量界所普遍接受.

从原理上来说,利用人造卫星测定地球重力场的精度和空间分辨率,取决于卫星的飞行高度、观测手段、卫星观测精度和非引力摄动确定的精度等.要利用卫星测量技术获取全球、规则、密集、全频段、高精度和高空间分辨率的地球重力场数据必须满足三个基本准则:第一,连续高精度跟踪卫星的三维空间分量(位置和速度);第二,精密测量作用于卫星的非保守力(大气阻力、太阳光压、地球辐射压、轨道高度及姿态控制力、经验摄动力等)和精确模型化作用于卫星的保守力(太阳和月球引力、地球固体、海洋、大气和极潮汐力、广义相对论效应摄动等);第三,尽可能降低卫星的轨道高度(200~500 km).

为了进一步提升人类对数字地球的认知能力,国际上实施了三期卫星重力测量计划:CHAMP(CHALLENGING Minisatellite Payload),GRACE(Gravity Recovery and Climate Experiment)和GOCE(Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer),并将继续实施新的卫星重力测量计划(有关参数如表 1 所示).

自 1960 年 Baker^[2]首次提出 SST(卫星跟踪卫星)技术模式以来,众多学者在基于卫星重力技术高精度和高空间分辨率探测地球重力场方面取得了实质性进展(如表 2 所示).大地测量学、海洋学、地球物理学等交叉研究领域的学者和科研机构,围绕重力卫星 CHAMP,GRACE 和 GOCE 开展了大量的卫

星重力测量理论研究、数值模拟、卫星系统需求分析、关键载荷研究以及极地冰川、水文、地震等应用研究^[3~11].

2 卫星重力观测模式

传统的地球重力场测量方法主要包括三种:第一,地面重力观测技术;第二,海洋卫星测高技术;第三,卫星轨道摄动技术.由于传统重力测量技术的固有局限性导致地球重力场在 100~5000 km 空间分辨率范围内的测量精度较差,无论是由三种传统重力测量技术单独或联合测量建立的地球重力场模型都难以满足本世纪相关地学学科发展的需求.

卫星重力测量技术的实现是继 GPS 星座成功构建之后在大地测量领域的又一项创新和突破,它之所以被国际大地测量学界公认为是当前地球重力场探测研究中最高效、最经济和最有发展潜力的方法之一,是因为它既不同于传统的车载、船载和机载测量,也不同于卫星测高和轨道摄动分析,而是通过 SST(卫星跟踪卫星)和 SGG(卫星重力梯度)技术反演和测量全球均匀分布、高精度的地球重力场及其时间变化.

2.1 卫星跟踪卫星高低模式(SST-HL)

CHAMP 采用卫星跟踪卫星高低模式(SST-HL),其科学目标:① 探测长波地球重力场及其时变量;② 探测地球磁场及其时变量;③ 探测电离层和中性大气结构及其时变量.

技术特征:① GPS 星座精密定轨的精度为 0.1 m;② STAR 加速度计测量非保守力的精度为 $3 \times 10^{-9} \text{ m s}^{-2}$;③ 恒星敏感器精密控制姿态的指向精度

表 1 地球重力卫星参数对比

参数	重力卫星			
	CHAMP	GRACE-A/B	GOCE	GRACE Follow-on
研制机构	德国 GFZ	美 NASA、德 DLR	欧洲 ESA	美 NASA
发射时间	2000-07-15	2002-03-17	2009-03-17	2016
卫星寿命(a)	10	10~15	> 2	>5?
轨道高度(km)	454~300	500~300	~ 250	~ 250
轨道倾角(°)	87	89	96.5	89
轨道离心率	< 0.004	< 0.004	0.001	< 0.001
星间距离(km)	—	220±50	—	50
跟踪模式	SST-HL	SST-HL/LL	SST-HL/SGG	SST-HL/LL
	卫星跟踪卫星高低模式	卫星跟踪卫星高低/低低模式	卫星跟踪卫星高低/卫星重力梯度模式	卫星跟踪卫星高低/低低模式
空间分辨率(km)	285	166	80	66

表 2 卫星重力测量研究进程

年份	发展史
1960	Baker 首次提出 SST-HL 测量模式
1969	Wolf 首次提出 SST-LL 测量模式
1970	Kaula 完善了 SST-HL 模式的基本理论
1975	美国基于 ATS-6 高轨卫星开展 SST-HL 实验
1978	ESA 提出 SLALOM 飞行计划
1980	地球重力场探测计划(GRM)
1982	重力卫星飞行计划(GRAVSAT)
1983	卫星重力探测基本原理
1985	大地测量未来发展计划
1986	欧洲固体地球科学和应用卫星计划(SESAME)
1987	NASA 和 ESA 联合提出固体地球卫星计划
1988	地球系统科学计划——空间大地测量与各学科相互关系
1992	未来空载测高计划——海洋和气候变化
1994	国际地球观测咨询委员会提出地球探测卫星计划
1996	CHAMP 卫星 B 阶段研究进展
1997	卫星重力和岩石圈计划
1998	GRACE 和 GOCE 卫星研究进展
1999	IUGG XXII 推动 GRACE 和 GOCE 卫星加速研制
2000	德国 CHAMP 单星成功发射
2002	美德合作 GRACE 双星成功发射
2009	欧洲 GOCE 重力梯度单星成功发射

为 4"; ④ 磁力计测量标量和矢量磁场的分辨率为 10 PT.

测量原理: 首先, 通过高轨 GPS 卫星实时跟踪低轨重力卫星(如 CHAMP), 从而得到卫星轨道位置 r (基于微分原理可得到轨道速度和加速度); 其次, 基于星载加速度计测量卫星受到的非保守力 f (如大气阻力、太阳光压、地球辐射压、轨道高度和姿态控制力等); 再次, 建立保守力模型 F (如日月引力, 地球固体、海洋和大气潮汐力, 极潮汐力等); 最后, 基于 $g = \ddot{r} - f - F$ 确定地球重力场. 在 SST-HL 跟踪模式中, 轨道位置 r 和非保守力 f 是卫星的原始观测量. SST-HL 测量模式仅仅是利用卫星精密测量地球重力场的概念性证明和技术性试验, 提供的重力场长波信息以及其精度空间分布的均匀性对现有地球重力场认识有一定程度的提高. 尽管 CHAMP 具有较低的轨道高度, 但在轨道高度处重力场信号的衰减是它的主要弱点, 这个弱点在后来设计 GRACE 时得到了较好的解决. 在某种意义上来说, CHAMP 卫星充当了卫星重力测量的实验先行者^[12-20].

2.2 卫星跟踪卫星高低/低低模式(SST-HL/LL)

GRACE 是卫星跟踪卫星高低/低低模式(SST-HL/LL)的典型代表, 其科学目标: ① 确定高精

度的静态地球重力场中长波分量, 使得大于 5000 km 空间分辨率的大地水准面精度达到 0.01 mm, 500~5000 km 空间分辨率大地水准面精度为 0.01~0.1 mm; ② 确定周期为 2~4 星期的地球重力场变化, 大地水准面的年变化精度达到 0.001~0.01 mm; ③ 探测电离层和中性大气结构及其时变量.

技术特征: ① K/Ka 微波系统的星间测速精度为 $1 \mu\text{m s}^{-1}$; ② GPS 卫星精密定轨的精度为 5 cm; ③ SuperSTAR 加速度计测量非保守力的精度为 $3 \times 10^{-10} \text{ m s}^{-2}$; ④ 冷气微推进器精密控制轨道的推进力灵敏度为 0.1 μN ; ⑤ 恒星敏感器精密控制姿态的指向精度为 0.1°; ⑥ 质心调节装置校正星体和加速度计质心重合的精度为 10~50 μm .

此模式采用了两颗低轨卫星(如 GRACE), 利用高轨 GPS 卫星对低轨双星精密跟踪定位. 同时, 基于高精度静电悬浮加速度计测量作用于卫星的非保守力, 并通过姿态和轨道控制系统测量卫星和载荷的空间三维姿态. 两颗低轨卫星在同一轨道平面内前后相互跟踪编队飞行, 结合星间测距仪高精度测量星间距离(共轨双星轨道摄动之差), 反演获得较高精度和空间分辨率的地球重力场. SST-HL/LL 跟踪模式包含两组 SST-HL, 同时以差分原理测定两个低轨卫星之间的相互运动, 得到的静态和动态重力场的精度比 SST-HL 模式至少高一个数量级. 特别是, GRACE 能够提供前所未有的覆盖全球的重力场时间变化信息, 因而, 成为地学科学家热切关注的对象, 得到了最广泛的应用^[21-38].

2.3 卫星跟踪卫星高低/卫星重力梯度模式(SST-HL/SGG)

GOCE 为卫星跟踪卫星高低/卫星重力梯度模式(SST-HL/SGG), 其科学目标: ① 确定高精度和高空间解析度地球重力场, 100 km 空间分辨率对应大地水准面精度优于 1.0 cm; ② 联合海洋卫星测高数据确定海洋环流、海洋热运输、海洋波动、海平面变化以及海洋动力模型; ③ 利用高精度非保守力测量数据建立精细大气密度模型.

技术特征: ① GPS/GLONASS 卫星精密定轨的精度为 1 cm; ② 重力梯度仪测量引力位二阶梯度的精度为 $3 \times 10^{-12} \text{ s}^{-2}$; ③ 冷气微推进器精密控制轨道的推进力灵敏度为 0.6 μN ; ④ 恒星敏感器精密控制姿态的指向精度为 10^{-6} rad ; ⑤ 离子微推进器补偿

非保守力的灵敏度为 $50 \mu\text{N}$ 。

与前面两种模式不同, 此模式搭载了重力梯度仪可直接测定卫星轨道高度处引力位的二阶导数, 进而有效抑制地球重力场中高频信号的衰减效应。SGG 基于高轨 GPS 卫星对低轨重力卫星(如 GOCE)实时定轨, 通过星载重力梯度仪直接测定卫星轨道处重力梯度, 利用非保守力补偿系统(Drag-free)屏蔽重力卫星受到的非保守力, 联合上述卫星观测值基于卫星重力梯度原理感测地球重力场。SGG 是国际大地测量学界实施的又一项探测地球重力场特性特征、精细结构和演变过程的新技术和新领域, 目前已逐渐发展成为专门研究空间重力梯度测量的理论、方法、载荷和应用的新兴科学^[39~48]。GOCE 是目前三种卫星重力测量模式中唯一能够直接测定地球重力场参量的空间技术, 但目前并未能完全发挥其独特的优势。

3 重力卫星信息在地球物理环境变化监测中的应用

作为全球变化综合观测系统的重要组成部分, 利用当前和未来的重力卫星观测, 综合空间大地测量非成像遥感(卫星重力、卫星测高)和成像遥感(InSAR)技术, 定量探测全球变化中的重要物理及几何特征参量, 正在和将会在研究全球变化中的一些关键科学问题做出重要贡献:

3.1 全球海平面长期变化的定量监测及其变化机制

海平面变化是全球气候变化精密定量化的基础数据和重要特征参量, 海水质量变化对全球海平面长期变化的贡献大小是一个尚未解决的问题^[49,50]。如何准确获取海平面变化的长期趋势, 并确定各影响因子(质量、比容等)的定量贡献一直是国际上(如 IPCC 评估报告)最为关注和研究的热点、难点问题。

全球海平面长期变化主要包含两种过程: ① 比容变化(海水温度和盐度变化引起的海水体积膨胀或收缩); ② 质量变化(包括由潮汐和大洋环流引起的海水质量重新分布、海洋与陆地和大气的水循环、南北极冰盖/冰架变化等冰川融化引起的海水净质量变化)^[49,50]。

海平面变化是海水温度和海水质量变化共同作

用的结果, 海水平面受到海水温度变化的影响, 海洋变暖发生热膨胀, 海水平面随之升高。海水总质量变化主要是由海洋和陆地的水交换引起的, 其表面质量异常正比于洋底压力变化, 可通过重力场的时变信息反演得到^[51~62]。

海洋测高卫星(如 Topex/Poseidon, Jason-1, Jason-2, Envisat, Cryosat-2 等)以毫米级精度监测海平面变化^[63], 结合重力卫星 GRACE 观测既可以把测高海平面变化中的质量变化部分与温盐变化部分分离开来, 也可以对海水的盐含量变化进行估计, 从而给出海平面变化各影响因子的定量贡献^[64~70]。这些信息不仅为气候数值模式发展、海洋资料同化提供更为有效的基础资料, 而且是揭示和评估现今、未来全球变化影响的重要依据。

近年来多位学者研究了南极冰盖和格陵兰冰川在不同时间区间内的 GRACE 监测结果及对全球平均海平面变化的贡献^[71~75]。基于卫星重力精确探测极地冰质量变化和海平面质量变化及其关系, 依赖于如下几方面关键因素: 高精度、高分辨率的时变卫星重力场模型恢复; 卫星时变重力观测资料中有效时变信息的提取^[30]; GIA 模型的准确性和对卫星重力推估质量变化的精密改正^[76~78]。

3.2 绝对海洋环流的确定与海水质量变化对海洋环流的影响

由重力卫星获取的大地水准面和卫星高度计获得的高精度的海面高度观测结合起来可以得到海面动力高度的绝对值, 使得我们有机会直接获得海洋表层环流的绝对量, 可更好的了解海水的传输过程^[79~84]。

目前人们对海洋环流变化的认识主要考虑的是风生环流和热盐环流, 风生环流部分考虑了海水迁移而导致的海水质量变化的影响(仅就区域而言), 而其他能够引起海水质量变化的原因如降水、蒸发和径流等却是通过改变盐度而不是增加或减少海水质量来考虑的。目前的海洋观测除去极其少量的海底压力观测之外, 其他如温度、盐度和海面高度的观测等都无法观测出海水质量的变化, 从而使目前海洋环流模式和海平面变化趋势估计中都只能忽略了海水质量的变化这一因素, 这对于研究海洋环流有其局限性。由重力卫星可以获取海洋区域重力位场的变化量, 通过分析这种包含有海水质量变化信息的重

力位场变化, 有助于研究海水质量变化对海洋环流的影响。

因此, 把大地测量学中的卫星测高和卫星重力技术与传统海洋观测及数值模式进行同化, 可以更加精确地确定海洋环流, 以及解决动力海面地形时间变化及温度、质量影响的分离^[85-97]。

3.3 全球冰质量平衡估计

全球冰质量平衡估计是重力卫星应用研究中最为核心的问题, 极区冰盖和山岳冰雪是陆地水储量最主要的组成部分, 占陆地淡水资源的 90% 以上。迄今为止, 我们还不清楚冰川的质量是在不断增加还是减少。全球冰雪消融是海平面变化中最不确定的影响因素, 而山岳冰雪增融则直接(间接)决定着陆地水资源(河流、湖泊、地下水等)的总量变化。

目前的研究表明, GRACE 重力卫星能够明显地提高我们对冰质量平衡及海平面变化的认识。重力卫星与冰面测高卫星的结合在很大程度上提高冰质量平衡估计的确定性。由于 GRACE 卫星确定的时变重力场可为质量重新分布提供附加约束, 冰质量平衡和海平面变化的研究可以揭示地球系统中冰-海洋-固体地球之间复杂的相互作用。

利用已有的 GRACE 卫星重力资料研究南极冰盖质量变化取得了很大的进展, 首次获得了南极、格陵兰冰盖冰质量总量变化趋势^[74,98,99], 这个变化总量包含了冰盖/冰架表层、底部、冰流运动以及冰后均衡调整等引起的冰质量消融和迁移。由于 GRACE 重力卫星目前观测的空间分辨率较低(约 600 km)、海陆信号混淆以及冰后均衡调整 GIA 的不确定性等问题, 南极冰盖质量变化趋势的研究仍然未取得一致的结果。Velicogna^[73]利用 2002 年 4 月至 2009 年 2 月的 GRACE 时变重力场数据得到南极大陆冰盖消融趋势约为 -246 Gt a^{-1} , 比 2002~2006 年增加了 142 Gt a^{-1} ; Chen 等^[72]利用同时期的 GRACE 数据采用不同的 GIA 模型得到南极冰盖质量变化的速率为 $(-190 \pm 77) \text{ Gt a}^{-1}$; Gunter 等^[75]利用 CSR L04 标准 GRACE 重力场数据计算得到南极冰盖质量变化的结果为 $-64 \sim -102 \text{ Gt a}^{-1}$ 之间; 其他学者利用 GRACE 卫星资料研究的得到的南极大陆冰盖质量变化结果在 $-80 \sim -152 \text{ Gt a}^{-1}$ 之间^[98-101]。由于南极地区是受 GIA 影响较大的区域, 必须从由 GRACE 得到的大地水准面的变化中扣除 GIA 的影响, 但 GRACE 本身并不能

分辨出 GIA 信号和冰水质量变化对大地水准面的影响, 所以只能通过模型来扣除。目前国际上比较权威的冰后回弹模型有 ICE-4G, ICE-5G, IJ05, RF3L20 等^[76,77,102,103]。由于不同的 GIA 模型中使用了不同负荷模型以及对地幔的黏性结构缺乏客观的认识, 导致多个冰后回弹模型相互之间的差别非常明显。因此, 需要进行新的方法设计, 以减小现有方法对南极冰盖区域的不良影响。随着卫星观测技术的进步、观测资料的积累以及数据处理方法的改进, 我们将可以掌握更加精确的全球冰川增融信息。

3.4 大尺度陆地水质量变化

陆地水储量变化、地表水径流和蒸发是陆地水循环的主要要素, 也是全球环境变化研究中所关注的热点之一。目前, 陆地水储量变化的大尺度时空变化实际观测资料十分缺乏, 只依靠少数观测结果结合物理规律进行定性或粗略定量估计, 遥感卫星只能观测地表几个厘米厚度的土壤湿度。由 GRACE 卫星提供的时变重力场将首次实现对陆地水储量变化的检测, 其分辨率在月变化时间尺度上达到 1 cm 等效水高。这朝着确定不同时间尺度的陆地水循环迈进了一大步。GRACE 重力卫星在极大程度上弥补了遥感卫星只能观测地表几个厘米厚度的土壤湿度、地面陆地水观测台站只能观测个别地点水储量的变化、以及地表观测台站稀少等不足, 为定量研究陆地水的储量变化提供了前所未有的机遇^[104-111]。

同时, 利用重力卫星的观测量可应用于以下这些相关问题的研究: 全球水质量平衡以及大气、陆地、海洋、冰盖之间的水循环; 特定条件下陆地水储量的大尺度变化(如我国西北、华北等地区大尺度陆地水储量的分布变化); 气候变化、土地退化和沙漠化相关性; 土壤水分蒸发蒸腾损失总量的大尺度变化; 大尺度水文模型的发展与评价, 改善现有的水文模型; 难以到达的区域的水储量平衡估计; 环境变化引起的陆地水储量变化的长期趋势(如三峡蓄水等对长江流域等地区大尺度陆地水储量的分布变化); 水缺乏地区的水资源管理以及水资源的合理利用研究。

3.5 岩石圈和地幔中的质量分布和迁移

地球科学家从地震、重力、地磁、大地测量和地球自转等地球物理观测资料的分析和研究中初步揭示出了地球内部不同尺度横向不均匀的图像。认识

到不仅上地幔存在横向不均匀, 而且下地幔与地核都存在不同程度、不同尺度的横向不均匀性. 而这些横向不均匀和我们理解的地球内部的许多动力学过程又紧密地联系起来. 例如用地震层析技术揭示的上地幔和全地幔横向不均匀可能直接与板块构造相联系. 地震层析的结果表明, 相应板块构造学说所表述的在大洋中脊的下部存在上升的热地幔物质, 在海沟存在冷却下降的地幔物质, 它构成了上地幔动力学过程的基本图像. 同时地震层析还显示出了-些超级热柱从核-幔边界上涌穿过地幔而上升到地球表层的可能性. 但人类对地球内部的这些认识尚还存在着争议, 需要地球科学家在这些领域作更深入的研究.

重力卫星为研究地球内部的质量分布和迁移提供了崭新的手段和研究空间^[112-116]. GOCE 卫星提供的地球静态重力场的分辨率可达到 100 km, 重力梯度在中长波范围的精度都将比以往提高一个数量级; GRACE 卫星首次提供了重力场的时间变化, 其分辨率达到了 300 km^[30]. 因此, 质量分布和迁移已作为直接观测量用于地球内部关键科学问题的研究, 这些问题包括: 冰后均衡调整与地幔粘滞度的侧向变化; 全球地幔中的质量迁移和基于地震层析和 3D 地幔粘滞度的动力学地形; 岩石圈下的地幔对流和 410~600 km 深度地震间断面的偏差; 基于高分辨率重力数据的主动及被动大陆边缘模型以及主动消减带的衰减过程; 活动俯冲带处的解耦过程、板块边缘的一段时间的质量重新分布; 全球及区域地壳、岩石圈模型的改进; 重力变化与地震形成和发展的关系.

4 重力卫星技术发展前景及我国对策

CHAMP, GRACE 和 GOCE 卫星各有所长, 它们的相继发射不是相互竞争而是互补. CHAMP 是卫星重力测量计划成功实施的先行者, GRACE 的优越性体现于可高精度探测地球重力场的中长波信号及其时变性, 而 GOCE 擅长于感测中短波静态地球重力场. 联合上述三期卫星重力测量计划虽然可以精确测量大尺度重力场, 从而获得地球总体形状随时间变化、地球各圈层物质的分布和变化、全球海洋质量的分布和变化、极地冰川的消融以及地下蓄水总量信息的基本特性, 但其分辨率还太低仍无法满足本世纪相关学科对全频段地球重力场精度进一步提高的

迫切需求. 因此, 当前国际众多科研机构(美国 NASA、德国 DLR、欧洲 ESA 等)正寻求新型、高精度和高空间分辨率的下一代卫星重力测量计划, 需要更多地关注于利用时变重力测量解决关于高频质量变化的问题. 为此, 由美国 NASA 牵头执行专用于中短波地球重力场精密探测的 GRACE Follow-On 重力卫星计划(有关指标参阅表 1), 预计 2017 年初发射, 主要目标是改善目前时变地球重力场信息的空间和时间分辨率. 该计划将采用与 GRACE 相同的总体技术, 不同的是将降低卫星轨道(轨道高度 250 km); 希望缩短星间距离至 50 km; 采用激光干涉测量系统代替 k 波段微波测距系统. 利用高轨 GPS 卫星对低轨双星精密跟踪定位, 利用高精度加速度计测量作用于双星的非保守力, 利用无拖曳系统(Drag free)高精度补偿双星受到的非保守力. GRACE Follow-On 采用卫星跟踪卫星高低/低低飞行模式(SST HL/LL), 即包含两组 SST HL, 同时以差分原理测定低轨双星间的相互运动, 星间速度测量精度将从 $0.2 \mu \text{ s}^{-1}$ 提高至 0.6 nm s^{-1} . 因此, 它所得到的静态和动态重力场的精度比 GRACE 至少高一个数量级, 重力场的空间分辨率将达到 66 km^[117-120].

目前以美国宇航局(NASA)和德国地学中心(GFZ)为主以及欧空局 ESA(主要是德国、法国、荷兰)、澳大利亚、日本等相关研究机构, 已经着手开展 GRACE Follow-On 卫星重力测量计划实质性研究, 许多研究集中于任务设计(即提高重力的估计方法), 更加关注实际应用的需要, 特别注重于低低卫星跟踪的激光干涉测量系统研究. 据悉, 美国宇航局将负责激光器、腔组件包括处理器研制, 测量光学反射镜组件以及仪器集成和测试将纳入德国的太空计划(http://esto.nasa.gov/news/news_GraceFollowOn.html; <http://www.space.gov.au/AustralianSpaceResearchProgram/ProjectFactsheetspage/Pages/TheGRACEFollow-onMission.aspx>).

我国大地测量和地球物理学界的专家学者紧跟国际卫星重力测量研究热点和动态, 积极推动我国下一代的卫星重力测量计划, 开展了多方面的研究工作^[121-136]. 国外卫星重力测量计划的成功实施对我国既存在机遇又不乏挑战, 机遇是指我国应尽快汲取国外长期积累的卫星重力测量的成功经验, 积极推动我国自主卫星重力测量计划的实施, 加快研制重力卫星的步伐, 通过卫星重力测量计划的实现带

动相关科学和国防领域的快速发展;挑战是指我国对星载仪器的研制、观测手段的研究和卫星数据的处理尚处于跟踪阶段,尚有许多艰难问题需要解决。诸如:卫星关键载荷问题、星间精密测距问题、卫星轨道参数设计、卫星重力反演问题等等关键科学和技术问题。建议我国重点开展“基于激光星间测距和非保守力补偿技术的下一代重力卫星系统”的预先研究:(1)鉴于 GRACE 卫星的成功经验,以及目前国际 GRACE Follow-on 研究进展,建议我国下一代卫星重力测量计划采用 SST-HL/LL 观测模式;(2)开展激光干涉测距仪、复合 GNSS 接收机、非保守力补偿系统、卫星体和加速度计质心调节装置等关键载荷的先期研制;(3)重力卫星轨道参数的优化设计(如轨道高度、星间距离等),这是成功实施我国将来

卫星重力测量计划的关键因素和重要保证;(4)将仿真技术应用于下一代重力卫星的方案论证、系统设计、部件研制、产品检验、空中使用、以及故障分析等研制和运行的全过程;(5)基于动力学法、能量守恒法、星间距离/速度插值法等优缺点,研究寻求新型、高精度、高空间分辨率、全频段和快速的卫星重力反演方法。

发展我国下一代自主和新型地球卫星重力测量计划,将使我们卫星重力理论与技术发展有所突破,不仅为寻求资源、保护环境和预测灾害提供高精度高分辨率的重要信息资源,而且对将来高精度和高空间分辨率的月球卫星重力测量计划,以及太阳系火星、金星、水星等行星的卫星重力探测计划的成功实施具有广泛的参考意义和借鉴价值。

参考文献

- 1 Kaula W. Theory of Satellite Geodesy. Massachusetts: Blaisdell Publishing Company Press, 1966
- 2 Baker R M L. Orbit determination from range and range-rate data. The Semi-Annual Meeting of the American Rocket Society, Los Angeles, 1960
- 3 Rummel R. How to climb the gravity wall. Space Sci Rev, 2003, 108: 1–14
- 4 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: 30205–30230
- 5 许厚泽. 卫星重力研究: 21 世纪大地测量研究的新热点. 测绘科学, 2001, 26: 1–3
- 6 陈俊勇. 现代低轨卫星对地球重力场探测的实践和进展. 测绘科学, 2002, 27: 8–10
- 7 段虎荣, 张永志, 刘锋, 等. 利用 GRACE 卫星数据研究汶川地震前后重力场的变化. 地震研究, 2009, 32: 295–298
- 8 Linage C, Rivera L, Hinderer J, et al. Separation of coseismic and postseismic gravity changes for the 2004 Sumatra-Andaman earthquake from 4.6 yr of GRACE observations and modelling of the coseismic change by normal-modes summation. Geophys J Int, 2009, 176: 695–714
- 9 宁津生, 罗志才. 卫星跟踪卫星技术的进展及应用前景. 地球科学进展, 2000, 25: 1–4
- 10 孙文科. 低轨道人造卫星(CHAMP、GRACE、GOCE)与高精度地球重力场——卫星重力大地测量的最新发展及其对地球科学的影响. 大地测量与地球动力学, 2002, 22: 92–100
- 11 邹正波, 罗志才, 李辉, 等. GRACE 探测强地震重力变化. 大地测量与地球动力学, 2010, 30: 6–9
- 12 Reigber C, Lühr H, Schwintzer P. CHAMP Mission status. Adv Space Res, 2002, 30: 129–134
- 13 Reigber C, Balmino G, Schwintzer P, et al. A high quality global gravity field model from CHAMP GPS tracking data and Accelerometry (EIGEN-1S). Geophys Res Lett, 2002, 29: 1692
- 14 Lu Y, Shi H L. Evaluation of gravity data by EIGEN-2 (CHAMP-only) model in China. In: Reigber C, Lühr H, Schwintzer P, et al, eds. Earth Observation with CHAMP Results from Three Years in Orbit. Berlin: Springer-Verlag, 2005. 47–52
- 15 Mayer-Gürr T, Ilk K H, Eicher A. ITG-CHAMP01: A CHAMP gravity field model from short kinematic arcs over a one-year observation period. J Geodesy, 2005, 78: 462–480
- 16 沈云中. 应用 CHAMP 星历精化地球重力场的正则化算法与模拟结果. 测绘学报, 2003, 32: 11–14
- 17 沈云中, 许厚泽. 卫-卫跟踪重力卫星测量模式的模拟与精度分析. 大地测量与地球动力学进展. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2004. 211–218
- 18 章传银, 胡建国, 党亚民, 等. 多种跟踪组合卫星重力场恢复方法初探. 武汉大学学报-信息科学版, 2003, 28: 137–141
- 19 徐天河. 利用 CHAMP 卫星轨道和加速度计数据推求地球重力场模型. 博士学位论文. 郑州: 信息工程大学, 2004
- 20 徐天河, 杨元喜. 利用 CHAMP 卫星星历及加速度计数据推求地球重力场模型. 测绘学报, 2004, 33: 95–99
- 21 沈云中, 许厚泽, 吴斌. 星间加速度解算模式的模拟与分析. 地球物理学报, 2005, 48: 807–811

- 22 周旭华, 吴斌, 许厚泽, 等. 数值模拟估算低低卫-卫跟踪观测技术反演地球重力场的空间分辨率. 地球物理学报, 2005, 48: 282–287
- 23 Zheng W, Lu X L, Xu H Z, et al. Simulation of Earth's gravitational field recovery from GRACE using the energy balance approach. Prog Nat Sci, 2005, 15: 596–601
- 24 宁津生, 钟波, 罗志才, 等. 基于能量守恒的星间距离变率与地球重力场频谱关系的建立与分析. 武汉大学学报-信息科学版, 2008, 33: 221–225
- 25 郑伟, 许厚泽, 钟敏, 等. 基于半解析法有效和快速估计 GRACE 全球重力场的精度. 地球物理学报, 2008, 51: 1704–1710
- 26 郑伟, 许厚泽, 钟敏, 等. GRACE 卫星关键载荷实测数据的有效处理和地球重力场的精确解算. 地球物理学报, 2009, 52: 1966–1975
- 27 Zheng W, Xu H Z, Zhong M, et al. Physical explanation on designing three axes as different resolution indexes from GRACE satellite-borne accelerometer. Chin Phys Lett, 2008, 25: 4482–4485
- 28 Zheng W, Xu H Z, Zhong M, et al. Efficient calibration of the non-conservative force data from the space-borne accelerometers of the twin GRACE satellites. T Jpn Soc Aeronaut S, 2011, 54: 106–110
- 29 郑伟, 许厚泽, 钟敏, 等. 基于星间加速度法精确和快速确定 GRACE 地球重力场. 地球物理学进展, 2011, 26: 416–423
- 30 Zhang Z Z, Chao B F, Lu Y, et al. An effective filtering for GRACE time-variable gravity: Fan filter. Geophys Res Lett, 2009, 36: 17311–17
- 31 Zheng W, Hsu H Z, Zhong M, et al. Efficient accuracy improvement of GRACE global gravitational field recovery using a new inter-satellite range interpolation method. J Geodyn, 2012, 53: 1–7
- 32 Zheng W, Shao C G, Luo J, et al. Improving the accuracy of GRACE Earth's gravitational field using the combination of different inclinations. Prog Nat Sci, 2008, 18: 555–561
- 33 Han S C, Shum C K, Jekeli C. Precise estimation of *in situ* geopotential differences from GRACE low-low satellite-to-satellite tracking and accelerometer data. J Geophys Res-Solid Earth, 2006, 111: 4411
- 34 Horwath M, Lemoine J M, Biancale R, et al. Improved GRACE science results after adjustment of geometric biases in the Level-1B K-band ranging data. J Geodesy, 2011, 85: 23–38
- 35 Kang Z, Tapley B, Bettadpur S, et al. Precise orbit determination for the GRACE mission using only GPS data. J Geod, 2006, 80: 322–331
- 36 Klees R, Revtova E A, Gunter B C, et al. The design of an optimal filter for monthly GRACE gravity models. Geophys J Int, 2008, 175: 417–432
- 37 Kuroishi Y. Improved geoid model determination for Japan from GRACE and a regional gravity field model. Earth Planets Space, 2009, 61: 807–813
- 38 Lemoine J M, Bruinsma S, Loyer S, et al. Temporal gravity field models inferred from GRACE data. Adv Space Res, 2007, 39: 1620–1629
- 39 边少锋, 纪兵. 重力梯度仪的发展及其应用. 地球物理学进展, 2006, 21: 660–664
- 40 罗志才. 利用卫星重力梯度数据确定地球重力场的理论和方法. 博士学位论文. 武汉: 武汉大学, 1996
- 41 郑伟, 许厚泽, 钟敏, 等. 基于时空域混合法利用 Kaula 正则化精确和快速解算 GOCE 地球重力场. 地球物理学报, 2011, 54: 14–21
- 42 Vianna M L, Menezes V V. Mean mesoscale global ocean currents from geodetic pre-GOCE MDTs with a synthesis of the North Pacific circulation. J Geophys Res-Oceans, 2010, 115: 2016
- 43 张传定, 吴晓平. 全张量重力梯度数据的谱表示方法. 测绘学报, 2000, 29: 297–304
- 44 Wahr J M, Jayne S R, Bryan F O. A method of inferring changes in deep ocean currents from satellite measurements of time-variable gravity. J Geophys Res-Oceans, 2002, 107(C12): 3218
- 45 Pail R, Metzler B, Lackner B, et al. GOCE gravity field analysis in the framework of HPF: Operational software system and simulation results. In: Fletcher K, ed. Proceeding of the 3rd International GOCE User Workshop. Frascati: ESA-ESRIN, 2007. 249–256
- 46 Rune F, Michael F, Daniel L, et al. Mission design, Operation and exploitation of the gravity field and steady-state ocean circulation explorer mission. J Geod, 2011, 85: 749–758
- 47 Rummel R, Yi W Y, Stummer C. GOCE gravitational gradiometry. J Geodesy, 2011, 85: 777–790
- 48 Pail R, Bruinsma S, Federica M, et al. First GOCE gravity field models derived by three different approaches. J Geodesy, 2011, 85: 819–843
- 49 Nerem R, Leuliette E, Cazenave A. Present-day sea-level change: A review. CR Geosci, 2006, 338: 1077–1083
- 50 Cazenave A, Nerem R S. Present-day sea level change: Observations and causes. Rev Geophys, 2004, 42: RG3001
- 51 Bingham R J, Hughes C W. Observing seasonal bottom pressure variability in the North Pacific with GRACE. Geophys Res Lett, 2006, 33: 8607
- 52 Boening C, Lee T, Zlotnicki V. A record-high ocean bottom pressure in the South Pacific observed by GRACE. Geophys Res Lett, 2011,

38: 4602

- 53 Boening C, Timmermann R, Macrander A, et al. A pattern-filtering method for the determination of ocean bottom pressure anomalies from GRACE solutions. *Geophys Res Lett*, 2008, 35: 18611
- 54 Brunnabend S E, Rietbroek R, Timmermann R, et al. Improving mass redistribution estimates by modeling ocean bottom pressure uncertainties. *J Geophys Res-Oceans*, 2011, 116: C08037
- 55 Chambers D P, Willis J K. A global evaluation of ocean bottom pressure from GRACE, OMCT, and steric-corrected altimetry. *J Atmos Ocean Technol*, 2010, 27: 1395–1402
- 56 Condi F, Wunsch C. Measuring gravity field variability, the geoid, ocean bottom pressure fluctuations, and their dynamical implications. *J Geophys Res-Oceans*, 2004, 109: 2013
- 57 Hughes C W, Stepanov V. Feasibility, and contribution to ocean circulation studies, of ocean bottom pressure determination. *Space Sci Rev*, 2003, 108: 217–224
- 58 Kanzow T, Flechtner F, Chave A, et al. Seasonal variation of ocean bottom pressure derived from Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE): Local validation and global patterns. *J Geophys Res-Oceans*, 2005, 110: 9001
- 59 Park J H, Watts D R, Donohue K A, et al. A comparison of *in situ* bottom pressure array measurements with GRACE estimates in the Kuroshio Extension. *Geophys Res Lett*, 2008, 35: 17601
- 60 Ponte R M, Quinn K J, Wunsch C, et al. A comparison of model and GRACE estimates of the large-scale seasonal cycle in ocean bottom pressure. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: 9603
- 61 Rietbroek R, LeGrand P, Wouters B, et al. Comparison of *in situ* bottom pressure data with GRACE gravimetry in the Crozet-Kerguelen region. *Geophys Res Lett*, 2006, 33: 21601
- 62 Wiese D N, Nerem R S, Han S C. Expected improvements in determining continental hydrology, ice mass variations, ocean bottom pressure signals, and earthquakes using two pairs of dedicated satellites for temporal gravity recovery. *J Geophys Res-Solid Earth*, 2011, 116: 11405
- 63 Ablain M, Cazenave A, Valladeau G, et al. A new assessment of the error budget of global mean sea level rate estimated by satellite altimetry over 1993–2008. *Ocean Sci*, 2009, 5: 193–201
- 64 Cazenave A, Dominh K, Guinehut S, et al. Sea level budget over 2003–2008: A reevaluation from Grace space gravimetry, satellite altimetry and Argo. *Glob Planet Change*, 2009, 65: 83–88
- 65 Meier M F, Dyurgerov M B, Rick U K, et al. Glaciers dominate eustatic sea-level rise in the 21st century. *Science*, 2007, 317: 1064–1067
- 66 Lombard A, Garcia D, Ram I G, et al. Estimation of steric sea level variations from combined GRACE and Jason-1 data. *Earth Planet Sci Lett*, 2007, 254: 194–202
- 67 Nicholls R J, Cazenave A. Sea-level rise and its impact on coastal zones. *Science*, 2010, 328: 1517–1520
- 68 Chambers D P. Observing seasonal steric sea level variations with GRACE and satellite altimetry. *J Geophys Res-Oceans*, 2006, 111: 3010
- 69 Chen J L, Wilson C R, Tapley B D, et al. Seasonal global mean sea level change from satellite altimeter, GRACE, and geophysical models. *J Geod*, 2005, 79: 532–539
- 70 Garcia D, Chao B F, Del R, et al. On the steric and mass-induced contributions to the annual sea level variations in the Mediterranean Sea. *J Geophys Res-Oceans*, 2006, 111: 9030
- 71 Luthcke S B, Zwally H J, Abdalati W, et al. Recent greenland ice mass loss by drainage system from satellite gravity observations. *Science*, 2006, 314: 1286–1289
- 72 Chen J L, Wilson C R, Blankenship D, et al. Accelerated Antarctic ice loss from satellite gravity measurements. *Nat Geosci*, 2009, 2: 859–862
- 73 Velicogna I. Increasing rates of ice mass loss from the Greenland and Antarctic ice sheets revealed by GRACE. *Geophys Res Lett*, 2009, 36: 19503
- 74 Velicogna I, Wahr J. Acceleration of Greenland ice mass loss in spring 2004. *Nature*, 2006, 443: 329–331
- 75 Gunter B, Urban T, Riva R, et al. A comparison of coincident GRACE and ICESat data over Antarctica. *J Geodesy*, 2009, 83: 1051–1060
- 76 Wang H, Wu P. Effects of lateral variations in lithospheric thickness and mantle viscosity on glacially induced relative sea levels and long wavelength gravity field in a spherical, self-gravitating Maxwell Earth. *Earth Planet Sci Lett*, 2006, 249: 368–383
- 77 Wang H, Wu P. Effects of lateral variations in lithospheric thickness and mantle viscosity on glacially induced surface motion on a spherical, self-gravitating Maxwell Earth. *Earth Planet Sci Lett*, 2006, 244: 576–589
- 78 贾路路, 汪汉胜, 相龙伟, 等. 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*, 2011, 54: 1466–1477
- 79 Vianna M L, Menezes V V, Chambers D P. A high resolution satellite-only GRACE-based mean dynamic topography of the South Atlantic

- Ocean. Geophys Res Lett, 2007, 34: 24604
- 80 Vianna M L, Menezes V V. Mean mesoscale global ocean currents from geodetic pre-GOCE MDTs with a synthesis of the North Pacific circulation. J Geophys Res-Oceans, 2010, 115:2016
- 81 张子占, 陆洋. GRACE 卫星资料确定的稳态海面地形及其谱特征. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2005, 35: 176–183
- 82 张子占, 陆洋, 许厚泽. 利用卫星测量技术和小波滤波方法探测表层地转流. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37: 753–760
- 83 张子占, 陆洋, 许厚泽, 等. 联合卫星重力和卫星测高确定南极绕极流. 极地研究, 2008, 20: 14–22
- 84 Zlotnicki V, Wahr J, Fukumori I, et al. Antarctic circumpolar current transport variability during 2003–05 from GRACE. J Phys Oceanogr, 2007, 37: 230
- 85 Jayne S R, Wahr J M, Bryan F O. Observing ocean heat content using satellite gravity and altimetry. J Geophys Res-Oceans, 2003, 108: 3031
- 86 Wahr J M, Jayne S R, Bryan F O. A method of inferring changes in deep ocean currents from satellite measurements of time-variable gravity. J Geophys Res-Oceans, 2002, 107: 3218
- 87 Zlotnicki V, Wahr J, Fukumori I, et al. Antarctic circumpolar current transport variability during 2003–05 from GRACE. J Phys Oceanogr, 2007, 37: 230
- 88 Bingham R J, Knudsen P, Andersen O, et al. An initial estimate of the North Atlantic steady-state geostrophic circulation from GOCE. Geophys Res Lett, 2011, 38: 1606
- 89 Hughes C W, Legrand P. Future benefits of time-varying gravity missions to ocean circulation studies. Earth Moon Planets, 2004, 94: 73–81
- 90 Janjić T, Schröter J, Savcenko R, et al. Impact of combining GRACE and GOCE gravity data on ocean circulation estimates. Ocean Sci, 2011, 8: 1535–1573
- 91 Knudsen P, Bingham R, Andersen O, et al. A global mean dynamic topography and ocean circulation estimation using a preliminary GOCE gravity model. J Geodesy, 2011, 85: 861–879
- 92 LeGrand P. Impact of the Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer (GOCE) mission on ocean circulation estimates. Volume fluxes in a climatological inverse model of the Atlantic. J Geophys Res, 2001, 106: 19597–19610
- 93 Schröter J, Losch M, Sloyan B. Impact of the Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer (GOCE) mission on ocean circulation estimates 2. Volume and heat fluxes across hydrographic sections of unequally spaced stations. J Geophys Res, 2002, 107: 3012
- 94 Song Y T, Colberg F. Deep ocean warming assessed from altimeters, Gravity recovery and climate experiment, *in situ* measurements, and a non-Boussinesq ocean general circulation model. J Geophys Res, 2011, 116: 2020
- 95 Stammer D, Köhl A, Wunsch C. Impact of accurate geoid fields on estimates of the ocean circulation. J Atmos Ocean Technol, 2007, 24: 1464
- 96 Tapley B D, Chamber D P, Bettadpur S, et al. Large scale ocean circulation from the GRACE GGM01 Geoid. Geophys Res Lett, 2003, 30: 2163
- 97 Vossepoel F C. Uncertainties in the mean ocean dynamic topography before the launch of the Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer (GOCE). J Geophys Res, 2007, 112: 5010
- 98 Chen J L, Wilson C R, Tapley B D. Satellite gravity measurements confirm accelerated melting of Greenland Ice Sheet. Science, 2006, 313: 1958–1960
- 99 Velicogna I, Wahr J. Measurements of time-variable gravity show mass loss in Antarctica. Science, 2006, 311: 1754–1756
- 100 史红岭. ICESat 在南极冰盖质量变化中的应用研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院研究生院, 2010
- 101 史红岭, 陆洋, 杜宗亮, 等. 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, 2011, 54: 958–965
- 102 Peltier W R. Global glacial isostasy and the surface of the ice-age Earth: The ICE-5G (VM2) model and GRACE. Annu Rev Earth Planet Sci, 2004, 32: 111–49
- 103 Ivins E R, James T S. Antarctic glacial isostatic adjustment: A new assessment. Antarct Sci, 2005, 17: 537–549
- 104 Tiwari V M, Wahr J. Grace estimates of water mass loss from northern Indian region. J Geol Soc India, 2011, 78: 279–280
- 105 钟敏, 段建宾, 许厚泽, 等. 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, 2009, 54: 1290–1294
- 106 Henry C M, Allen D M, Huang J L. Groundwater storage variability and annual recharge using well-hydrograph and GRACE satellite data. Hydrogeol J, 2011, 19: 741–755
- 107 Morrow E, Mitrovica J X, Fotopoulos G. Water storage, net precipitation, and evapotranspiration in the Mackenzie River Basin from october 2002 to september 2009 inferred from GRACE satellite gravity data. J Hydrometeorol, 2011, 12: 467–473
- 108 Rieser D, Kuhn M, Pail R, et al. Relation between GRACE-derived surface mass variations and precipitation over Australia. Aust J Earth Sci, 2010, 57: 887–900

- 109 Ramillien G, Biancale R, Gratton S, et al. GRACE-derived surface water mass anomalies by energy integral approach: Application to continental hydrology. *J Geod*, 2011, 85: 313–328
- 110 詹金刚, 王勇. 卫星重力捕捉龙滩水库储水量变化. *地球物理学报*, 2011, 54: 187–1192
- 111 钟敏, 段建宾, 许厚泽, 等. 利用卫星重力观测研究近 5 年中国大陆水量中空间尺度的变化趋势. *科学通报*, 2009, 54: 1290–1294
- 112 Sun W K, Wang Q, Li H, et al. A reinvestigation of crustal thickness in the Tibetan Plateau using absolute gravity, GPS and GRACE data. *Terr Atmos Ocean Sci*, 2011, 22: 109–119
- 113 孙文科, 长谷川崇, 张新林, 等. 高斯滤波在处理 GRACE 数据中的模拟研究: 西藏拉萨的重力变化率. *中国科学: 地球科学*, 2011, 41: 1327–1333
- 114 Han S H, Shum C K, Bevis M, et al. Crustal dilatation observed by GRACE after the 2004 Sumatra-Andaman earthquake. *Science*, 2006, 313: 658–662
- 115 Chao B F, Wu Y H, Zhang Z Z, et al. Gravity variation in Siberia: GRACE observation and possible causes. *Terr Atmos Ocean Sci*, 2011, 22: 149–155
- 116 Ivins E R, Watkins M M, Yuan D N, et al. On-land ice loss and glacial isostatic adjustment at the Drake Passage: 2003–2009. *J Geophys Res*, 2011, 116: 2403
- 117 Sneeuw N, Flury J, Rummel R. Science requirements on future missions and simulated mission scenarios. *Earth Moon Planets*, 2005, 94: 113–142
- 118 Sheard B S, Heinzel G, Danzmann K, et al. Intersatellite laser ranging instrument for the GRACE follow-on mission. *J Geodesy*, 2012, doi: 10.1007/s00190-012-0566-3
- 119 Loomis B D, Nerem R S, Luthcke S B. Simulation study of a follow-on gravity mission to GRACE. *J Geodesy*, 2012, 86: 319–335
- 120 Wiese D N S. Design considerations for a dedicated gravity recovery satellite mission consisting of two pairs of satellites. *J Geodesy*, 2011, 86: 81–98
- 121 姜卫平, 章传银, 李建成. 重力卫星主要有效载荷指标分析与确定. *武汉大学学报-信息科学版*, 2003, 28: 104–109
- 122 肖云, 夏哲仁, 孙中苗, 等. 基线法在卫星重力数据处理中的应用. *武汉大学学报-信息科学版*, 2011, 3: 280–284
- 123 肖云, 夏哲仁, 王兴涛. 高低卫星跟踪模式恢复地球重力场的误差分析. *测绘学报*, 2006, 35: 106–111
- 124 邹贤才. 卫星轨道理论与地球重力场模型的确定. 博士学位论文. 武汉: 武汉大学, 2007
- 125 张兴福. 应用低轨卫星跟踪数据反演地球重力场模型. 博士学位论文. 上海: 同济大学, 2007
- 126 郑伟, 邵成刚, 罗俊, 等. 基于卫-卫跟踪观测技术利用能量守恒法恢复地球重力场的数值模拟研究. *地球物理学报*, 2006, 49: 712–717
- 127 Zheng W, Xu H Z, Zhong M, et al. An analysis on requirements of orbital parameters in satellite-to-satellite tracking mode. *Chin Astron Astr*, 2010, 34: 413–423
- 128 Zheng W, Xu H Z, Zhong M, et al. Precise recovery of the Earth's gravitational field with GRACE: Intersatellite range-rate interpolation approach. *IEEE Geosci Remote*, 2012, 9: 422–426
- 129 Zheng W, Xu H Z, Zhong M, et al. Accurate and rapid error estimation on global gravitational field from current GRACE and future GRACE Follow-On missions. *Chin Phys B*, 2009, 18: 3597–3604
- 130 郑伟, 许厚泽, 钟敏, 等. GRACE 星体和 SuperSTAR 加速度计的质心调整精度对地球重力场精度的影响. *地球物理学报*, 2009, 52: 1465–1473
- 131 郑伟, 许厚泽, 钟敏, 等. 卫星跟踪卫星测量模式中星载加速度计高低灵敏轴分辨率指标优化设计论证. *地球物理学报*, 2009, 52: 2712–2720
- 132 郑伟, 许厚泽, 钟敏, 等. 利用解析法有效快速估计将来 GRACE Follow-On 地球重力场的精度. *地球物理学报*, 2010, 53: 796–806
- 133 郑伟, 许厚泽, 钟敏, 等. 插值公式、相关系数和采样间隔对 GRACE Follow-On 星间加速度精度的影响. *地球物理学报*, 2012, 55: 822–832
- 134 Zheng W, Hsu H Z, Zhong M, et al. Physical explanation of influence of twin and three satellites formation mode on the accuracy of Earth's gravitational field. *Chin Phys Lett*, 2009, 26: 029101-1–029101-4
- 135 周旭华, 吴斌, 许厚泽, 等. 模拟研究卫-卫跟踪星间间隔的选择问题. *天文学报*, 2005, 46: 62–69
- 136 Luo Z C, Li Q, Zhang K, et al. Trend of mass change in the Antarctic ice sheet recovered from the GRACE temporal gravity field. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 2012, 55: 76–82