地球各圈层相互作用的大地测量研究和检测

[[1]](#footnote-1)

**摘 要** 大地测量资料,包括地球表面运动、地球引力场及地球整体自转运动的观测资料，是研究地球各圈层相互作用的重要地表约束。探讨了大地测量用于这一研究领域中的几个重要科学前沿问题。

**关键词** 地球各圈层 参考基准 大地测量学 地球动力学 检测

1.引言

地球各圈层——大气、海洋、岩石圈、地幔和地核——的运动变化的研究是与人类生存环境联系最密切、影响最直接的重要基础研究领域。地球环境的变化，除了人类活动的影响外，主要是上述地球各圈层的相互作用、地球整体运动以及所在的宇宙环境影响的结果。地表的各种大地测量结果包括地球表面运动、地球引力场及地球整体自转运动的观测结果是地球各圈层相互作用的反映，成为约束地球各圈层相互作用机理及模型的重要依据。因而开展这一研究，不仅有利于人类了解地球各圈层运动的状态、规律和动力学机理，而且还对人类认识和预测地球环境变化，制定人类社会的持续发展规划具有重要的科学意义。

近年来，大地测量学、天文地球动力学及地球物理学在研究地球各圈层运动及相互作用等方面取得了一系列重要的研究成果。空间技术测定地壳运动和地球自转变化达到毫米级；高精度绝对和超导重力仪的出现，可以检测出10-8m•s-2级的重力变化和10-10m•s-2 级的重力变化谱信号；重力卫星CHAMP和GRACE的成功发射，更为连续检测全球重力场的变化提供了有效途径，从而为地球各圈层运动及相互作用研究奠定了基础并展示出广阔的应用前景。国际地球动力学超导重力仪检测计划把地球的核幔耦合动力学、内核核模检测问题作为重要内容，并预期将有重大突破。海洋角动量数值研究、海洋环流实验和卫星测高计划成为国际研究热点，这些研究进一步与地球自转变化、地球重力场变化相结合，将极大地增加我们对地球各圈层变化及相互作用动力学过程的认识。多种技术、多颗卫星的空间观测确定和研究低阶地球重力场和地心变化受到各国科学家的重视。卫星测高、空间大地测量技术、验潮和重力综合研究全球海平面变化及洋流取得前所未有的成就。上述问题都是全球地球物理环境变化重要而又尚未解决的重大科学问题。

地球各圈层相互作用的大地测量研究包括监测和机理研究两大部分，监测工作和资料处理是研究的基础，以期获得不同时间尺度和空间分布的监测地球圈层运动的资料。国际上已建成有VLBI、SLR及GPS的观测网，连续观测地表微小运动和地球自转的变化，并组织IGS、IVS及ILS服务，定期发布全球的协议坐标框架ITRF；组织了全球绝对重力观测网(IAGBN) 及全球超导重力仪观测计划(GGP)，监测全球重力场随时间的变化并解析出不同频率的微弱重力信号；发射了众多海洋测高卫星和气象卫星，为人们提供高精度的海洋环境、海平面变化和大气活动资料；地震层析技术的发展，结合其他地球物理观测资料，已能详细地给出地球内部物理结构和状态。这些资料的综合加上最近重力卫星的成功发射，为研究地球各圈层相互运动的机理和模型提供了重要的外部约束条件。

在地球各圈层相互作用的机理研究方面,国际上近年来在地壳运动的理论模型、地球参考架的建立理论、大气海洋及岩石圈的相互作用与地球自转和重力场变化、地幔对流与地幔动力学、地球内部较差运动及其动力学效应、地幔粘滞性、耗散和冰后回升、地球内核运动与核模研究等领域都取得了较大进展。我国从上世纪80年代开始涉及这一领域的工作,相继建成了VLBI、SLR、GPS等空间对地观测技术台站,引进并开展了超导重力仪和绝对重力仪的观测工作,收集处理了多颗海洋卫星测高数据和有关大气海洋地下水资料,进行了地震层析研究和重力地震联合反演。例如近年来,开展了用空间技术测定全球及我国区域地壳运动的研究,利用多颗SLR卫星测距研究地球引力场和地心变化,利用GPS和重力观测研究我国青藏区域的地壳形变,同时还开展了用重力、GPS、SLR和卫星测高资料建立和统一中国沿海区域垂直参考系的研究；进行了固体地球潮汐、冰后回升、海平面变化、地球引力场的长期变化、地球核模及近周日自由摆动的检测等多项研究；开展了地幔动力学、地表运动和大地水准面对地幔对流机制的约束、地震层析等研究。此外，我国还主持或参加了“亚太空间地球动力学计划(APSG)”、“全球超导重力仪用于地球动力学研究(GGP)”、“国际岩石圈三维成像研究(ILPII-4)”等国际计划以及国家重大科学工程“中国地壳运动观测网络”、国家攀登计划“现代地壳运动和地球动力学研究”等国家重大科研计划。

本文对大地测量学用于地球各圈层相互作用研究中的几个主要科学前沿问题作一讨论。

2.地球参考架的建立与维持

地球参考架(TRS) 的建立与维持是研究地球各圈层动力学及其相互作用的基础。例如地壳运动,海平面变化监测,地球自转变化与诸多地球动力学及环境变化研究都必须以一个高精度的地球参考系为参照基准。在这一领域,应考虑以下问题:

(1)综合空间技术建立和维持地球参考系(TRS)

目前国际上建立和维持TRS主要依靠VLBI、SLR和GPS,辅以DORIS和PRAHE。但由于各种技术自身的优缺点,它们在建立和维持TRS中都有着不同的作用且互为补充。VLBI实现TRS 与空间惯性系的联结和定向,SLR实现确定参考系原点,而GPS以其经济、快速实现参考系加密。由于GPS所用的高精度观测量多为双差相位,降低了GPS对TRS实现中确定其方向和原点的敏感性。综合利用各种技术,优化建立和维持TRS,尤其是能提取地心变化和垂直运动合理信息是当前的关键性科学问题和目标。

(2) 建立我国的地壳运动模型及区域垂直参考基准

由于GPS网络工程的成功实现,我国已有条件利用空间大地测量结果,结合地质、地球物理的观测资料和理论模型建立我国板内各子块的地壳运动模型,这一模型对我国地球动力学研究提供了最重要的地表约束。

区域垂直参考基准的建立对我国青藏、沿海地区的地壳形变、海平面变化及相关地球动力学研究意义重大。鉴于我国目前高程系统精度差,系统不统一,应以我国的VLBI和SLR长期坐标观测,把我国区域空间大地测量实测的参考系统一在全球TRS框架下,综合利用卫星测高、GPS、绝对重力和水准测量及验潮站资料,实现我国高程系统的统一。其中提高GPS高程测定的精度也是当务之急。

(3)地球参考架建立与维持中的位移改正研究

空间技术和地面技术建立和维持TRS必须有高精度的测站位移改正模型,如固体潮、海潮、大气等。同时,考虑地球内部的滞弹性,核幔耦合,大气和海洋的运动,对毫米级的TRS也是必不可少的。为此,需顾及地幔滞弹性、地球侧向不均匀和核幔耦合地球模型,精化固体潮Love 数及海潮负荷Love数的计算。利用全球和中国近海海潮模型给出各测站位移改正,并研究海平面非扩容变化对沿海站位移的影响。

3.现代观测技术监测地球各圈层变化

(1)VLBI、SLR及GPS空间大地测量技术

这是监测和建立板块的运动状态、局部和区域地壳运动模型的主要手段。地表的位移是研究地球各圈层运动的重要约束条件之一。目前,GPS监测水平运动的技术已日趋成熟,在提高测量垂直运动的精度方面尚待努力。

(2)重力观测

高精度的重力观测是监测地球及近地重力场环境和各圈层的相互作用和地球物质运动的主要手段。高精度的重力观测将对研究地球的重力场时空变化,固体潮、核幔耦合、地幔与岩石圈的耦合、近周日自由摆动、内核核模检测、大气压和地表水变化及海平面变化具有重大科学意义。当前,需要进一步长期积累高精度重力观测资料以及卫星重力资料,研究与之相应的数值分析和信号模式识别方法,以提取和研究地球各圈层的相互运动与密度场变化。

(3)卫星测高(SAT)

海平面变化是当今全球变化中的研究热点。卫星测高能高精度、快速、经济并直接提供高度变化,是研究全球海平面变化、洋流、海潮乃至厄尔尼诺现象的重要手段。卫星测高还能提供占地球70%的海域的高精度、高分辩率的重力场,并在沿海大陆架及海洋勘察中有广泛应用,就全球大洋而言,国际上已推出1′×1′的平均海洋重力图,但沿海及岛屿附近地区精度较低。近年来正应用Retracking技术以解决这一问题。此外,应进一步结合多种观测资料进行全球和中国地区地球物理环境的研究,如结合重力、GPS、验潮和卫星测高监测海平面变化和利用大气压和卫星测高资料研究反变气压计与海气相互作用等。

(4)水汽幅射观测

水汽幅射观测大气水汽幅射量,对天气及暴雨研究极为重要。水汽幅射改正又是GPS监测地壳垂直运动的关键环节,因此这一技术对解决中国区域地壳垂直运动和大气、暴风研究有重要意义。目前国际上通用的水汽幅射计极为昂贵,我国自行研制的水汽幅射仪已具备高精度观测水汽幅射含量的能力,可用于GPS高程测定的精密改正以及对GPS估算水汽幅射含量作校正,另外运用卫星星载水汽幅射资料可以研究海区的水汽幅射含量。

4.地球内部各圈层相互作用机制的大地测量约束

(1)核幔耦合

地球的核幔耦合及内核运动是地球各圈层相互作用中的难点,原因之一是缺乏高精度的直接观测。核幔耦合动力学理论的检验,诸如电磁耦合、惯性耦合等都依赖地表观测的约束。其中,地表重力、大地水准面起伏、章动、地球自转及其变化都是重要的观测约束。核幔耦合反映在地球的近周日共振或核章动上,而固体内核则有可能激发新的地球核模。核模在章动上有反应,量极小,但它有可能在超导重力观测中检测到。国际上已组织了GGP计划, 把内核模检测作为重要内容之一,同时包括利用空间大地测量获得的章动改正和超导重力观测,检测自由核章动及其耗散,利用全球超导重力观测检测核模。利用章动和潮汐观测确定自由核章动的理论与技术已较成熟,并对液核的动力学扁率和核幔间的粘滞耗散和电磁耦合参数提供了有益的估计。地球内核的Slichter模及其他核模的检测也正用全球的超导重力资料进行试验。此外,大地测量资料还有助于研究地球内部液核与固核的较差转动动力学效应,研究地球自转速率的近10年变化及与核幔耦合的关系以及黄赤交角剩余0″.03/世纪的减小与地球内部较差转动的动力学效应。

(2)岩石圈、地幔相互耦合的动力学机制

作为地核与地表岩石圈之间的物质、能量传输层,地幔介质的动力学行为及与岩石圈的相互耦合作用控制着地表板块的运移和构造过程,对这个问题的探讨无疑有助于我们深入研究板块的驱动机制、地表构造行为和过程等地球动力学基本问题。现代空间大地测量的成果精确刻划了板块的运动状态；各种地球物理观测和模拟实验(实验室高温高压实验)结果已使我们的认识深入到下地幔；计算机技术和数值理论的发展又使得我们可以模拟边界条件更为复杂的运动学、动力学系统特征。尤其是近几年来,随着板块构造理论在解决一些动力学问题上局限性的逐渐暴露,一些新的理论和观点陆续被提出,这些理论和观点也都需要大地测量证据的支持。特别要注意的是,深层地幔物质与岩石圈相互作用在地表的反映之一,即热点的演化和运动可利用空间大地测量的最新成果进行分析,再结合计算机模拟实验,提取地幔、岩石层运动差异性信息,将为研究地幔、岩石圈边界耦合的性质提供有益的帮助。

(3)地幔对流与地幔动力学

利用板块运动速度、地球重力位模型、冰后回升、长波地形、地震、实验室高温高压实验成果等资料研究地幔内粘滞系数分布结构和地幔对流极性场和环性场的生成机理以及两种场各自在地幔中的传播过程和地表反映,是当前地幔动力学研究的热点。其中,冰后回升导致的相对海平面变化和重力场演化是估计上下地幔粘滞度参数的重要约束,大地水准面起伏则是与地幔对流相关连的内部负荷形变理论的重要检核。此外,地幔热柱演化过程与地表板块运动的关系,地幔柱动力学过程与亚洲演化历史的关系都是值得探讨的问题。

5.地表各圈层相互作用和地球自转及重力场变化

大气、海洋、冰雪层、地表水及固体地球组成了一个极为复杂的动力学系统,这一系统中的物质迁移和运动将导致地球自转运动变化和地球重力场变化。由于地表水、海洋的蒸发和交换,与大气运动所组成的质量能量系统密切相关,显然不能用孤立的方法分别计算各圈层内的地球动力学参数(角动量)来描述这一复杂的系统。采用怎样的大气、地表水和海洋模式研究各圈层内部及各圈层层间相互作用是摆在我们面前的一个迫切任务：地球的动力学环境变化研究。地球自转的研究及其高精度的测定为上述问题的研究提供了现代大地测量观测约束,地球动力学系统中各圈层运动及相互作用产生的角动量应与地球自转实测相一致。同时,由于地球自转是地球动力学系统的相互角动量(物质过去速度)和物质位移(质量再分布)之和,而地球自转和低阶重力场能有效对物质迁移和物质运动速度场解耦，因此现代空间大地测量和地面高精度的重力测量又提供了另一个地球动力学系统的重要约束。地球自转和地球重力场变化究其地球物理机制,涉及到大气、地表水及海洋(水气圈)各圈内及各圈之间的变化与相互作用,大气水圈与固体地球的相互作用,地壳运动,地幔对流及其与岩石圈的耦合和驱动机制,地幔滞弹性及冰后回升的影响,核幔及内核之间的耦合等。

(1)海气与地球自转的相互作用

应用小波和Hilbert变换对地球自转及相关海、气参数的时频和振幅的精细分析描述,已揭示出海、气与地球自转在某些频率存在互相关性,特别是厄尔尼诺现象。因此,地球自转是研究海洋和大气相互作用的一种天文学途径。大气角动量对地球自转的激发是十分显著的,在顾及海气相互作用时通常采用反变气压计假设。卫星测高和全球气压观测提供了对这一假设进一步深入研究的条件。初步研究表明海-气响应在不同的响应频率和不同区域对反变气压计偏离是不同的,因而在地球自转上的反应也不同。反之地球自转为反变气压计理论提供了实测约束。

(2)大气海洋及地表水的物质运动对地球自转和重力变化的影响

地表重力和地球自转变化直接受到大气压、地下水、海洋和固体地球内部的物质运动影响,是研究地表各圈物质运动及相互作用最为有效的方法之一。地球自转变化和地球重力场变化使地球动力学系统的角动量解耦为地球物质迁移及其速度两部分,并可利用大气压和风场观测、地表水观测、海平面变化和海流观测、地壳运动观测、地面重力观测资料,研究大气、水圈的相互作用及其与固体地球之间相互作用。例如沿海高精度重力观测提供了海平面非扩容重力变化约束,对全球海洋环流数值模拟和区域洋流实验有重要意义,并可用GRACE等卫星进行验证和校准。采用耦合的大气和分层海洋模型以及地表水的数值模型,可计算地球自转变化,地球低阶重力场变化和地心变化,同时,可用卫星测高获得的海面变化及洋流、大气角动量和地表水实测结果进行比对。

(3)地球低阶重力场变化的测定

地球动力学系统内物质的再分布将导致地球重力场变化,这一变化的长波部分可以用高精度的卫星跟踪观测数据,根据卫星动力学轨道原理分析测定,也可由重力卫星精确测定。其中地球重力场的2阶次系数反映了由物质再分布产生的地球扁率变化。1阶次系数反映了地心变化。因此,观测的重力场变化是检验和约束地球各圈层模型的重要观测量。地心和地球重力场J2、J3、J4 长期变化是研究固体地球形状长期演化和地幔滞弹性的重要参数,准周期变化用于研究年际和季节尺度的地球动力学系统角动量及相互变换,其潮汐变化用于研究地球自转速度及地月系动力学演化。

(4)地幔滞弹性、耗散和冰后回升

地幔滞弹性、耗散和冰后回升涉及固体地球内部的物理参数,是研究地球各圈层相互作用和地球自转必不可少的基础参数之一。更新世晚期地球大陆上经历了多次大规模的冰川活动,伴随冰进和冰退,地表质量发生变化,同时也引起地球表面的形变和内部密度的调整,并直接影响到地球自转速率的长期变化、长期极移和海平面变化。反过来,利用这些观测结果,我们能够揭示地幔的流变性质。

用VLBI、S LR、GPS和地表重力观测可以毫米级精度测定地球冰后回升速率、冰后回升产生的J2、J3、J4与地表重力长期变化；用SLR还可测定地球潮汐产生的地球自转长期减慢,结合由验潮站给出的相对海平面变化资料,为地幔粘滞度的反演提供必要的观测证据。反过来, 利用J2、地极的长期漂移、相对海平面变化及空间重力异常之实测信号,可以反演地幔粘滞度。

如果将4种不同类型的观测对地幔粘滞度进行全面约束,而不是限于一种或两种资料的联合,其结果将具有更好的可靠性,当然,关键问题是如何合理地分配各种资料的信息权。

综上所述,大地测量给出的地壳运动、重力场变化和地球自转变化所包含的地球各圈层运动及相互作用的地球物理信息十分丰富且复杂,是研究全球地球物理环境变化的重要内容。从理论研究角度,利用上述丰富的地球各圈层观测资料为约束,建立地球自转动力学在各圈层及边界的相互耦合方程,建立更真实逼近实际地球动力学系统的地球模型,求解这一动力学系统的响应函数,并以实测结果检验理论体系,将有助于增进人类认识地球各圈层相互作用的动力学行为,进而达到研究全球的地球物理环境变化的目的。

References

1 U. S. Academy of Sciences. Satellite gravity and the geosphere [M]. Washington: National Academy Press, 1997.

2 Ye Shuhua and Huang Cheng. Astro-Geodynamics [M]. Shandong Publishing House of Science and Technology,

2001. (in Chinese)

3 Xu Houze, et al. geodetic research on Qinghai-Tibet plateau [M]. Hubei Publishing House o f Science and technology, 2001. (in Chinese)

4 Xu Houze, Lu Zhonglian, et al. Earth gravitational field and geoid of China [M]. Liberation Army Press, 1997. ( in Chinese)

5 Gao Buxi. Principles of astro-geodynamics [M]. Science Press, 1997. ( in Chinese)

1. 本文发表于《大地测量与地球动力学》，2002年，作者为许厚泽。 [↑](#footnote-ref-1)