

基于地球自转变化和时变重力场研究全球气候变化

闫昊明

(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)

摘要: 全球气候变化引起大气、海洋、陆地水、冰川等地表流体质量在地球表面的重新分布, 并引起地球自转变化和地球重力场变化。通过空间大地测量技术, 可以高精度获取地球自转变化数据和地球重力场时变数据, 反演地表流体质量在全球和区域的变化情况, 揭示地表流体质量变化与全球气候变化的关系。地球自转变化也和厄尔尼诺、北大西洋涛动等气候涛动密切相关, 并与地表流体质量的长期变化相关。因此, 利用地球自转变化和时变重力场变化观测数据, 可以更好地研究全球气候变化。

关键词: 地球自转变化, 时变重力场, 气候变化

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.03.003

Global Climate Change Detected from Earth's Rotation and Time-Variable Gravity Field

Yan Haoming

(State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077)

Abstract: The geophysical fluids, such as the atmosphere, the ocean, the land-water and the ice-sheet etc. are constantly changing on the Earth's surface, under the condition of global climate change. These geophysical fluid changes cause the variations of the Earth's rotation and the Earth's gravity field. Using the space-geodesy techniques, we can acquire high precision variation data of the Earth's rotation and the Earth's gravity field, and then invert the geophysical fluid changes in the Earth's surface to explore the relationship between either the Earth's rotation or the Earth's gravity fields and the global climate change. Otherwise, the Earth's rotation variations are correlated with the climate oscillation, such as El Niño, North Atlantic Oscillation, and also correlated with the long-term change of geophysical fluid changes on the Earth's surface. Thus, observing variation data from the Earth's rotation and the Earth's gravity fields, will help us have a deeper understanding of the global climate change.

Keywords: Earth's rotation, time-variable gravity field, global climate change

1 引言

近年来, 全球气温升高、极端气候灾害频发、臭氧层破坏、南极和格陵兰岛冰川融化、山岳冰川冻土变化等全球气候变化现象, 引起了科学界和社会界的极大关注。全球气候变化自20世纪80年代作为一个科学问题已然出现, 目前更是成为影响当今世界发展的重大问题。在全球气候变化中, 全球气候变暖是目前最迫切的问题。

引起气候系统变化的原因有多种, 概括起来可分成自然气候变化与人类活动影响两大类。前者包括太

阳辐射的变化、地球轨道变化、火山爆发等; 后者包括人类燃烧化石燃料以及毁林引起的大气中温室气体浓度的增加, 硫化物气溶胶浓度的变化, 陆面覆盖和土地利用变化等。

气候系统所有的能量基本上来自太阳, 所以太阳能量输出的变化被认为是导致气候变化的原因之一, 也可以说太阳辐射的变化是引起气候系统变化的外因。在非常长的时间周期上, 引起太阳辐射变化的主要原因是地球轨道的变化, 也被称为米兰科维奇周期 (Milankovitch cycles), 主要包括椭圆形地球轨道的偏心率 (长轴与短轴之比)、地球自转轴相对于地球轨道的倾角变化以及地球轨道的进动变化。这3种地球轨道变化引起太阳辐射变化, 导致地球气候变化, 并被第四纪冰川时期的岩芯观测数据 (约50万年) 所

收稿日期: 2013年11月20日; 修回日期: 2014年4月3日
第一作者: 闫昊明 (1974—), Email: yhm@whigg.ac.cn
资助信息: 国家重点基础研究发展计划项目(2012CB957802);
国家自然科学基金资助项目(41174065, 41374087)

记录。因地球轨道偏心率的变化,出现了以10万年为周期的冰期变化,其对整个气候变化的影响可以占到50%;地球自转轴和轨道平面的夹角在 $22.1^{\circ}\sim 24.5^{\circ}$ 间(目前此值为 23.44° ,并在不断减小)来回变化,产生了一个41000年的周期,其对整个气候变化的影响可以占到25%;而地球轨道的进动,产生了周期约为21000年的变化,其对整个气候变化的影响可以占到10%^[1]。另一个影响气候变化的自然因素是火山爆发。火山爆发之后,向高空喷放出大量硫化物气溶胶和尘埃,可以到达平流层高度,它们可以显著反射太阳辐射,从而使其下层的大气冷却,进而影响气候变化。此外,人类活动引起的全球气候变化进程加速,主要体现在二氧化碳的排放上,并引起全球变暖。全球变暖的最直接表现就是南极和格陵兰岛甚至北极的冰川迅速融化,从而引起全球海平面上升。

由于近几十年的全球气候变暖是目前全球气候变化的主要特征,也是我们主要关注的问题,其时间尺度主要从季节尺度到年际和十年际尺度。全球变暖主要影响固体地球上面的大气圈、海洋圈和冰雪圈等,引起地球各圈层之间的相互作用,从而造成全球地表流体质量的重新分布,以及全球地表流体速度场的变化,譬如风速改变、洋流改变等(图1)。近地表流体质量的运移和分布既受全球动力过程的驱动,同时也具备反馈作用,可以用来监测和研究全球变暖,如海平面上升、陆地冰川和极地冰盖冰雪融化、大范围的干旱和洪灾等气候变化。对近地表流体质量的运移和分布的深入了解,在区域尺度有助于饮用水、农业用水和工业用水等水资源的规划,保护沿海经济发达地区的财产安全等,具有重要的社会、经济意义。

从科学角度看,在地球这个系统中,地球各圈层的动力学过程和耦合过程是以角动量交换的模式进行的,大气、海洋、陆地水和冰雪圈的角动量变化将引起固体地球自转的变化,反之亦然。这既是一个典型的守恒系统,也是一个相互激发和反馈的系统。因此,当前的全球气候变化在较短的时间尺度上(亚季节到十年际尺度)也是与地球自转变化密切相关的。同时,由于地球各圈层的质量会在角动量交换的过程中重新分布,而全球质量重新分布将引起地球重力场的变化,因此全球气候变化也与地球重力场变化密切相关(图1)。

对全球气候变化的研究,除了传统的遥感卫星、地面观测等方式,在空间大地测量领域,则有多种空间观测技术,如GPS、卫星激光测距(SLR)、卫星集成的多普勒定轨和无线电定位系统(DORIS)、

甚长基线干涉测量(VLBI)等,其中最引人注目的是2002年发射的“重力恢复和气候实验”(Gravity Recovery and Climate Experiment, GRACE)卫星。GRACE卫星通过观测两颗相距220km的共轨卫星直接的距离变化和加速度变化,反推地球的重力场变化,并进而可以转化为地表流体质量的变化情况,从而实现了对大尺度陆地水质量变化的监测^[2]。从GRACE发射到目前的十多年时间内,借助其全球首次监测地球质量变化的手段,使得我们对全球水循环有了更加深刻的理解,并成功监测到格陵兰岛、南极、北极以及山岳冰川的时变特征,为深入理解全球海平面变化、全球水资源变化,乃至全球气候变化,提供了独特的空间技术手段(图1)。

地球自转变化,时变重力场变化与全球气候变化紧密相关。为此,本文主要介绍了利用空间大地测量手段观测到的地球自转变化及时变重力场变化与全球气候变化之间关系的相关研究成果。

2 地球自转变化与气候变化

地球自转变化在地固坐标系中的变化可用3个分量来描述。前两个是极移分量,主要描述地球自转轴瞬时北极相对平均极轴在地球表面位置的变化, X 轴指向格林威治子午线方向, Y 轴指向西经 90° 子午线方向;另外一个分量是地球自转速率变化,即日长变化。

对地球自转变化的研究从19世纪开始兴起,到目前已有一百多年的历史。地球自转变化的研究从一开始就与气候变化和技术革命紧密相关。首先是20世纪70—80年代,新的观测技术,如SLR、GPS、VLBI等

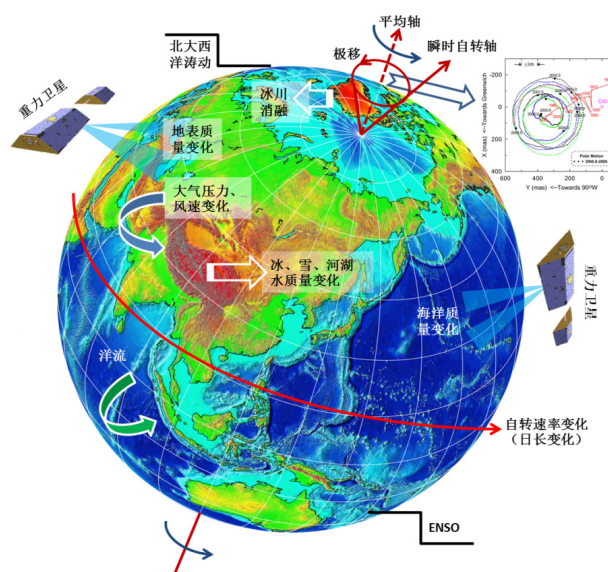


图1 全球地表质量变化与地球自转、时变重力场和气候波动示意图

能够以cm级的精度测定地球自转和局部运动（目前已经达到了mm级精度），使得地球自转参数的观测精度达到了空前高度。这也促使我们思考，到底是什么引起了地球自转变化？在不考虑潮汐影响的前提下，最初的答案认为地球自转变化主要是全球大气变化的结果，其他诸如海洋、陆地水、地震、火山爆发等激发源也被列入，但限于当时的科技和观测水平，只有大气变化对地球自转变化的影响得到了很好的研究和认同^[3]。随着科技的进步，尤其是气候模式的不断进步和空间大地测量观测技术的不断创新，目前已经知道，在亚季节到年际尺度上，大气、海洋、陆地水和冰川消融等气候变化是引起地球自转变化的主要因素。高精度的地球自转参数变化可以很好地反映出全球的大气、海洋、冰川、陆地水等运动结果，因而可以对这些气候环流模式给出整体约束，并促进大气科学、海洋科学、水文学、冰川学以及全球气候变化的研究^[4]。

2.1 极移变化与气候变化

地表流体质量的变化（质量在地球表面重新分布）和风速、洋流变化等，都可以导致极移变化。引起极移变化的主要因素是地表流体质量的重新分布。地球上不同区域的流体质量变化，引起极移不同分量的变化。例如，经度 0° 和 180° 区域的质量重新分布（主要对应于海洋区域的质量重新分布）主要引起极移 X 分量的变化；而经度为 90° 和 270° 处的质量重新分布（主要对应于陆地区域的质量重新分布）主要引起极移 Y 分量的变化^[4]。一个例子是，随着近年来格陵兰岛和南极冰川融化的加速（接近 0° 或 180° 区域），2005年开始，极移的长期漂移从 $70^{\circ}W$ 方向（接近于 $-Y$ 方向）明显转向了 X 方向^[5]。通过应用GRACE数据进行详尽分析显示，极移的这种变化与冰川消融直接联系，因此，极移观测可以为今后更准确地解释早期气候变化（此期间，缺乏全球气候变化的实际观测数据）提供可能。

极移变化主要包括周年项和（Chandler）项（约14个月周期），此外还包括长期极移、年际极移、十年尺度的极移和亚季节快速极移等。周年极移主要是由于大气、海洋、陆地水和冰川的运动和质量再分布的季节性变化所激发的受迫运动；Chandler极移是地球的一种自由摆动，受到地球内外阻尼与激发因子交织在一起的复杂相互作用，它的激发源目前还不清楚^[6-7]；极移的长期变化可能来自第四纪冰川期后的冰后回弹^[8]，也与气候快速变化相关^[5]；对于极移中是否存在十年尺度的波动，目前还存在争议，如果存在的

话，其激发源可能与全球陆地水的储量变化有关（由于目前陆地水的全球观测数据只有GRACE观测的大尺度数据，时长较短，只有10年左右，因此还不能很好地确定极移的十年尺度波动）；年际极移是指几年尺度上的地极运动，主要有准两年分量和4~6年的周期分量，在大气角动量中不能准确解释极移中存在的年际变化；20世纪80年代末、90年代初高精度的极移资料中发现的亚季节快速变化，大部分是大气压变化和风激发的结果，部分为海潮的影响^[9-11]。

极移变化还与气候涛动存在联系，其中最可能相关的气候涛动是北大西洋涛动。北大西洋涛动与地极运动激发序列存在着非准周期性的年际波动和十年尺度的起伏，北大西洋涛动可能是地极运动年际和十年尺度上的一种新的激发源^[12-14]。最新研究显示，由GRACE观测的全球地表质量变化在2008年和2010年出现反相，在亚欧大陆上呈现明显的南北振荡，这一振荡无疑受到了北大西洋涛动的影响，也明显对极移产生影响。关于气候涛动与极移变化之间的关系，还需要进一步的深入研究和探讨。

2.2 日长变化与气候变化

日长变化即地球自转速率的变化。日长变化有极宽的频谱，包括从几小时到地质年代时间尺度的变化^[3, 15]。目前，观测日长的精度达到了 $20\mu\text{s}/\text{d}$ （等价于 $3.6\mu\text{s}/\text{月}$ ）。天文观测中通常以相对标准日长 86400s 的日长偏差来表示日长变化。古生物化石生长周期、古天象观测记载（日食、月食、掩星）、近代光学天文观测以及现代空间天文观测（VLBI、SLR、GPS等）资料表明，地球自转速率是不均匀的，存在长期减速变化（日长变长）、规则性变化和不规则性变化等多种周期成分^[3, 16]。主要包括：

（1）海潮、固体潮和大气潮汐都会引起地球角动量的变化，从而引起地球自转速率的变化，最重要的是半日潮和周日潮以及长期潮^[17]。

（2）在地球自转速率变化及大气角动量的频谱中，都存在有近50天的准周期震荡，其振幅变化不定，最大时可以达到几个ms。对地球自转速率的小波分析表明，除了近50天的周期外，在120天、75天周期附近也有频谱变化分量^[18]。气象学研究表明，地面上许多气象现象存在这种周期变化，其动力学原因仍有争论。

（3）地球自转速率的周年和半年变化，主要是由地球中纬度高空急流的变化引起的。这种高空急流的方向由西向东，与地球自转方向一致，冬季12月和1月时风速达到最大，可达 $100\text{m}/\text{s}$ 。夏季7月和

8月风速最小,此外同温层高空风的变化还有准两年震荡现象^[19]。

(4) 地球自转的年际变化主要与各种气候涛动现象,如ENSO、准两年振荡(QBO),存在比较密切的关系^[20-23]。ENSO和QBO的时变过程对日长年际变化激发具有综合效应,二者可以解释绝大部分的日长年际变化。其中,ENSO对日长年际变化的贡献较强一些,ENSO和QBO是地球自转速率年际变化的主要激发源。20世纪以来的ENSO和地极运动的相干谱研究表明,它们在不同频段上的相关性都不够显著。所以,尽管ENSO对地球自转速率的年际变化具有相当强的贡献,但是它对地极运动的影响要弱得多。近年的研究还表明,大气角动量与ENSO存在明显相关性。在厄尔尼诺出现前,往往先在中高纬度出现大气角动量增大,然后逐渐向赤道发展。

(5) 地球自转长期变化的主要原因有潮汐摩擦、冰后回弹、核幔耦合、环境和海面变化以及板块运动等^[3, 16, 19, 24]。地球自转速率不规则变化的最典型表现是其十年尺度波动现象和日长的长期变化。

日月潮汐引起的日长增加为2.3ms/cy,而从近三千年的古气象(日食、月食和行星交会等)观测记录分析表明,日长约以1.7ms/cy的速率在增加。潮汐摩擦的结果与古气象等观测结果存在0.6ms/cy的差别,这个差别应该源于非潮汐现象,且最大可能是冰川均衡调整(GIA)的影响^[8]。根据最新SLR得到的地球2阶带谐重力场系数可以预估到冰川均衡调整对日长变化的影响为-0.45ms/cy,这一数值使得长期地球自转速率的变化得以大部分很好的解释^[8]。

应用地球自转变化数据研究气候变化的好处是,其从1846年开始就有观测数据,且1980年以后达到了非常高的观测精度,至今已有近200年的历史记录。此外,关于日月食的古代记录、深海钻探获取的岩芯数据等则更加长久,从而使得我们可以研究古气候以及近代比较长时间内的气候变化。但应用地球自转变化数据研究气候变化也存在明显不足,即地球自转变化表征的是地球总的气候变化对固体地球的影响,不能给出全球各个区域气候变化的结果。这一情况在21世纪出现转机,全球高精度高时空分辨率时变重力场的出现,在一定程度上弥补了这一不足。

3 时变重力场变化与气候变化

重力卫星可以检测到全球和区域的重力场时变特征,而这些时变特征是由于地球表面和地球内部的质量变化直接引起的。所以,通过卫星时变重力场反演,就可以获取地球表面和地球内部物质的迁移,直

接获取地球区域和整体质量变化信息,从而定量研究地表流体质量变化等对气候变化的影响。这是有别于传统成像遥感的非成像手段,具有不可替代性。

国际上第一个时变重力卫星GRACE在2002年的成功运行,为定量获取全球高精度时变重力场提供了有效技术手段。目前,国际上3大卫星重力数据处理核心机构(GFZ、JPL和CSR)利用GRACE观测数据发布了完全阶次为120或60、时间分辨率约1个月(或10天)的时变重力场模型序列。GRACE时变重力场已被广泛应用于全球及局部水文循环、冰川质量变化及全球海平面变化等科学问题的研究。目前利用GRACE时变重力场模型反演质量迁移,已经成功地应用在了大尺度丰水流域的陆地水处理变化研究和比对上,如密西西比河区域地下水储量变化结果与该区域58口地下水测井观测数据十分吻合^[25];中国长江流域的水储量变化,与目前全球水文模型GLDAS和CPC计算结果均吻合^[26];在中国典型区域,华北京津冀地区、青藏高原区域、三峡库区、青川甘交界区域以及新疆阿尔金山自然保护区,重力卫星观测的中长空间尺度陆地水储量变化趋势与GLDAS水文模式结果相一致^[27-28]。卫星重力观测,还更多的被应用于南北两极及格陵兰岛冰盖变化的研究,如Chen等^[29]利用7年GRACE数据研究南极地区冰盖消融速率,发现南极部分冰盖存在明显加速消融,与InSAR研究结果一致;杨元德等^[30]利用GRGS提供的10天间隔数据采用位系数法估算了2002年4月—2009年4月南极地区冰盖质量变化,结果表明南极地区的质量变化主要由西南极质量变化引起,并发现南极冰盖可能存在加速消融趋势等。

值得注意的是,直接由卫星重力观测数据,譬如说GRACE的LEVEL 1B数据来解算时变重力场的时候,必须考虑地球潮汐等对卫星轨道的影响。也就是说,要想解算出准确的陆地水变化,必须把时变重力场中的地球潮汐信号首先去除。时变重力场中的潮汐信号,是由于日月等天体的引潮力引起地球内部质量分布发生变化,导致地球引力位的改变,进而对围绕地球运转的卫星轨道产生摄动,最终影响时变重力场。地球的潮汐信号主要为固体潮、海潮和大气潮。研究表明,海潮对时变重力场的影响比固体潮要小5~10倍,而大气潮影响比海潮还要小100倍^[31]。因此,在GRACE卫星数据的处理中,只采用了固体潮和海潮改正,忽略了大气潮汐的影响。对于固体潮改正,一般采用IERS给出的弹性地球的标准固体潮模型^[32-35];对于海洋潮汐,一般也是采用固定的海洋潮汐模型来扣除其影响^[32-35]。地球潮汐信号主要集中在

周日和半日周期上,目前很多模型也考虑了半年和周年潮汐的影响。

在GRACE数据处理中,还需要考虑极移变化引起的极潮。极潮是由于地球瞬时旋转轴相对于平均轴有微小变化,从而引起地球的离心力位产生变化,进而引起固体地球和海洋等对其响应,称为极潮^[36]。极潮对应于球谐二阶展开系数,因此,只对二阶球谐系数有显著影响;对其他球谐系数的影响,可以忽略不计^[33]。对于固体地球极潮来讲,其引起的固体地球最大的垂直形变为25mm,水平形变为7mm;对于海洋极潮来讲,其引起的海洋垂直形变最大为1.8mm,水平形变为0.5mm,只有固体地球极潮的1/10;但这一影响已经可以被现代空间大地测量技术检测到,因此必须考虑^[33, 37]。例如,在GRACE数据初期处理时,只考虑了固体地球极潮,而没有考虑到海洋极潮的影响,从而引起了2阶球谐系数存在误差,与地球自转观测数据存在差别^[38]。极潮的频段主要是Chandler周期(433天)和周年信号。

通过上述论述可以看到,时变重力场中,不仅仅包含陆地水变化信号,还包括地球潮汐,极潮,大气、海洋乃至地球深内部质量变化的影响。地球深内部质量变化的影响一般为长周期变化,在季节和年际尺度上可以忽略。而大气和海洋的信号与陆地水的信号周期是类似的,目前采用观测和模拟的大气和海洋数据来扣除。只有去除这些已知信号,才能获得准确的陆地水变化信号,进而进行气候变化的相关研究。

对于我国而言,气候变化引起的水资源变化情况,必须非常重视。我国水资源的科学、合理规划与利用,对民生和社会经济发展,也是一个非常紧迫的问题。我国的长江、黄河、澜沧江、怒江和雅鲁藏布江等河流均发源于被称为亚洲水塔的青藏高原地区。该地区的水资源,滋润着东亚和南亚30亿(约占世界43%)人口。近几十年来,在全球气候变化背景下,青藏高原山岳冰川不断退缩,变化与迁移明显。这一变化除了对全球气候变化的影响外,还对该区域的区域气候、水资源、生态环境产生了重大影响,进而制约我国的经济和社会发展。此外,对于青藏高原区域的多个国家而言,水资源利用更是重中之重。为此,必须对该区域的水资源情况进行详细的观测,并掌握其变迁规律。但该区域自然条件十分恶劣,人工观测等不具备实施条件(或非常难以实施)。因此,这一区域的水资源情况,大部分只能通过空间卫星来观测。遥感卫星很难获取水体质量变化信息,但可以通过先进的空间大地测量观测技术手段,如GRACE时变

重力卫星,高精度动态监测该区域地表流体质量分布和变化,并研究其质量变化和迁移规律,从而建立其与全球变化的响应关系,为我国制定气候变化和水资源利用的长期战略,确保国家的水资源安全、社会和经济可持续发展,提供科学依据。

在科学的意义上,国内外学者普遍认为,青藏区域的能量和水循环过程是全球能量和水循环的主要部分之一,是全球气候变化的重要响应区域,该区域冰水等物质的质量迁移与区域陆地水变化及地壳运动和变形、地震活动、气候变化等密切相关。因此,定量揭示该区域冰水等物质质量迁移的时空变化特征与地球物理过程,不仅对水资源合理利用、生态环境保护及防灾减灾等具有重要的科学意义和应用价值,而且有助于认识全球气候变化,并有效推动我国全球变化、水资源利用领域乃至地球系统科学的发展。

4 结论

本文从空间大地测量学的角度,主要介绍了地球自转变化和时变重力场变化与全球气候变化之间的联系。指出地球自转变化不但可以表征近期从亚季节到年际尺度的全球气候变化特征,对于近200年乃至上万年尺度的气候变化,也有其独特作用。2002年开始的GRACE时变重力卫星监测,第一次以非成像遥感的手段,监测地表流体的质量变化与迁移,尤其是可以监测到地表大尺度的陆地水、冰川消融等近年区域气候变化的重要特征,为研究全球气候变化提供了新的技术手段。

全球气候变化是目前科学界和大众都十分关心的问题,与人类的发展息息相关。只有综合多种科技手段,展开广泛的多学科合作,才可能对这一问题进行更加深入的研究和理解,也才能提出更合理的应对方法。

参考文献

- [1] Hays J D, Imbrie J, Shackleton N J. Variations in the Earth's orbit: pacemaker of the Ice Ages. *Science*, 1976, 194: 1121-1132.
- [2] Tapley B D, Bettadpur S, Watkins M, et al. The Gravity Recovery and Climate Experiment: Mission overview and early results. *Geophys Res Lett*, 2004, doi: 10.1029/2004GL019920.
- [3] Lambeck K. The Earth's variable rotation: geophysical caused and consequences. New York: Cambridge Univ Press, 1980.
- [4] 闫昊明. 海洋在地球自转和重力场变化中的作用. 武汉: 中国科学院测地所博士学位论文, 2006.
- [5] Chen J L, Wilson C R, Ries J C, et al. Rapid ice melting drives Earth's pole to the east. *Geophys Res Lett*, 2013, doi: 10.1002/grl.50552.
- [6] Smith M L, Dahlen F A. The period and Q of the Chandler wobble. *Geophys J R astr Soc*, 1981, 64: 223-281.
- [7] Furuya M, Chao B F. Estimation of period and Q of the Chandler wobble. *Geophys J Int*, 1996, 127: 693-702.
- [8] Stephenson F R. Historical eclipses and Earth's rotation. *Astronomy and Geophysics*, 2003, 44: 2.22-2.27.
- [9] Dickman S R. Dynamic ocean-tide effects on Earth's rotation. *Geophys J Int*, 1993, 112: 448-470.

- [10] Chao B F, Ray R D, Gipson J M, et al. Diurnal/semidiurnal polar motion excited by oceanic tidal angular momentum. *J Geophys Res*, 1996, 101: 20,151–20,163.
- [11] Gross R S, Hamdan K H, Boggs D H. Evidence for excitation of polar motion by fortnightly ocean tides. *Geophys Res Lett*, 1996, 23: 1809–1812.
- [12] Zhou Y, Zheng D, Zhao M, et al. Interannual polar motion with relation to the North Atlantic Oscillation. *Global and Planetary Change*, 1998, 18: 79–84.
- [13] Chao B F, Zhou Y H. Meteorological excitation of interannual polar motion by the North Atlantic Oscillation. *J Geodyn*, 1999, 27: 61–73.
- [14] 闫昊明, 钟敏, 朱耀仲, 等. 极移半年振荡的年际变化与北大西洋涛动. *自然科学进展*, 2002, 12: 104–107.
- [15] Hide R, Dickey J O. Earth's variable rotation. *Science*, 1991, 253: 629–637.
- [16] Munck W H, MacDonald G J F. *The rotation of the Earth*. London: Cambridge Univ Press, 1960.
- [17] Dickman S R. Revised predictions of long-period ocean tidal effects on Earth's rotation rate. *J Geophys Res*, 1995, 100: 8233–8243.
- [18] 钟敏, 高布锡. 地球自转极移120天准周期变化的小波分析及其大气激发机制. *天文学报*, 1996, 37: 361–367.
- [19] 高布锡. *天文地球动力学原理*. 北京: 科学出版社, 1997.
- [20] Chao B F. Length-of-day variations caused by El Niño-Southern Oscillation and Quasi-Biennial Oscillation. *Science*, 1989, 243: 923–925.
- [21] 周永宏. 气象涛动对地球自转变化激发的分析与研究. 上海: 中国科学院上海天文台博士学位论文, 1997.
- [22] 闫昊明, 钟敏, 朱耀仲. 日长季节振荡的振幅变化与南方涛动现象. *测绘学报*, 2000, 29: 103–106.
- [23] Gross R S, Fukumori I, Menemenlis D, et al. Atmospheric and oceanic excitation of length-of-day variations during 1980–2000. *J Geophys Res*, 2004, 109: B01460.
- [24] 吴斌. 日长和地球引力场参数J2的长期和长周期变化. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2003, 28: 83–86.
- [25] Rodell M, Chen J L, Kato H, et al. Estimating groundwater storage changes in the Mississippi River basin (USA) using GRACE. *J Hydro*, 2007, 15: 159–166.
- [26] 胡小工, 陈剑利, 周永宏. 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D辑*, 2006, 36: 225–232.
- [27] 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时间尺度的变化趋势. *科学通报*, 2009, 54: 1290–1294.
- [28] Feng W, Zhong M, Lemoine J M, et al. Evaluation of groundwater depletion in North China using the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) data and ground-based measurements. *Water Resour Res*, 2013, 49: 2110–2118.
- [29] Chen J L, Wilson C R, Blankenship D D, et al. Accelerated Antarctic ice loss from satellite gravity measurements. *Nature Geosciences*, 2009, doi:10.1038/NGEO694.
- [30] 杨元德, 鄂株臣, 晁定波. 卫星重力用于南极冰盖物质消融评估. *极地研究*, 2009, 21: 109–115.
- [31] 许厚泽, 等. *固体地球潮汐*. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2010.
- [32] McCarthy D, Petit G. *IERS Conventions 2003*. IERS Technical Note 32.
- [33] *IERS Conventions 2010*. Petit G, Luzum B (eds.). IERS Technical Note 36.
- [34] Bettadpur S. Gravity recovery and climate experiment, UTCSR Level-2 Processing Standards Document For Level-2 Product Release 0004, 2007.
- [35] Christoph D, Flechtner F, Gruber C, et al. GFZ GRACE Level-2 processing standards document for level-2 product release 0005, 2012.
- [36] Wahr J M. Deformation induced by polar motion. *J Geophys Res*, 1985, 90: 9363–9368.
- [37] Desai S D. Observing the pole tide with satellite altimetry. *J Geophys Res*, 2002, 107(C11): 3186.
- [38] Chen J L, Wilson C R, Tapley B D, et al. Low degree gravitational changes from GRACE: Validation and interpretation. *Geophys Res Lett*, 2004, 31: L22607.

新书架

NEW BOOK

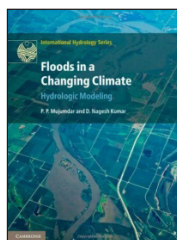
International Hydrology Series
国际水文系列丛书

 感兴趣的读者可以到中国气象局图书馆查阅



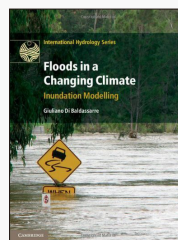
Floods in a Changing Climate:
Extreme Precipitation
《气候变化中的洪水: 极端降水》

编著者: Ramesh S. V. Teagarapu
出版者: Cambridge University Press
出版年: 2012



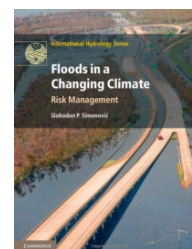
Floods in a Changing Climate:
Hydrologic Modelling
《气候变化中的洪水: 水文模拟》

编著者: P. P. Mujumdar 等
出版者: Cambridge University Press
出版年: 2012



Floods in a Changing Climate:
Inundation Modelling
《气候变化中的洪水: 洪水泛滥模拟》

编著者: Giuliano Di Baldassarre
出版者: Cambridge University Press
出版年: 2012



Floods in a Changing Climate:
Risk Management
《气候变化中的洪水: 风险管理》

编著者: Slobodan P. Simonovic
出版者: Cambridge University Press
出版年: 2012