

空间地球科学视角下的全球水循环研究

施建成¹, 赵天杰², 杨晓峰²

1. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190;

2. 中国科学院空天信息创新研究院 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101

摘要: 空间地球科学是利用空间观测的手段, 研究地球系统、各子系统之间以及各要素和过程之间的相互作用、变化机制及其发展演化的一门综合性、交叉性学科, 为科学家开展地球系统科学研究提供新手段、新思路 and 全新视角。空间地球科学的发展推动航天技术、遥感和测绘科学、地球系统科学包括气象、海洋、水文、生态等一系列学科的发展, 是全球变化背景下促进全球治理和“人类命运共同体”构建的重要基石。本文主要回顾空间地球科学的产生和发展历程, 以全球水循环为例阐述空间观测在地球系统关键循环过程研究中的作用, 并对中国未来空间地球观测进行展望, 以期盼中国空间地球科学事业迈向新篇章。

关键词: 空间地球科学, 地球系统科学, 遥感科学, 全球变化, 全球水循环

引用格式: 施建成, 赵天杰, 杨晓峰. 2021. 空间地球科学视角下的全球水循环研究. 遥感学报, 25(4): 847-855

Shi J C, Zhao T J and Yang X F. 2021. Global water cycle studies from the perspective of space earth science. National Remote Sensing Bulletin, 25(4): 847-855 [DOI: 10.11834/jrs.20219467]

1 引言

地球上大气、海洋、陆地以及冰冻圈层的自然变化影响着地球上生命的演化, 这种自然变化加之人类活动的影响关系到地球系统的可持续发展, 也是当今地球系统科学研究的核心问题。地球系统发生了哪些变化、地球系统变化的主要原因是什么、如何应对和适应地球系统的变化、以及未来如何变化等, 都是科研人员长期攻关的重要领域 (汪品先, 2003; 孙枢, 2005)。理解地球系统的发展和演化需要对地球系统的关键要素进行充分的、高质量的、持续性的观测, 也需要构建地球系统模型以预测未来的可能性变化。在这一过程中, 空间地球科学为科学家提供了全新视角。

空间地球科学是利用空间观测手段, 研究地球系统各子系统间以及各要素间相互作用、变化过程及其发展演化的一门综合交叉学科, 特别是卫星遥感与地球系统科学的交叉与综合。空间地球科学利用其空间观测范围广、要素全、时效长等特点, 以驱动地球系统的关键过程 (如水循环、

能量与辐射平衡、碳循环) 为龙头问题, 来认识其在不同时间和空间尺度上的分布与变化规律, 通过航天技术的不断进步为地球系统科学研究提供新途径 (如合成孔径技术推动了L波段微波辐射的星载观测, 首次实现了全球土壤水分和海表盐度的空间探测, 未来可能实现的P波段和超宽带微波辐射观测也将实现新的要素探测能力) 和新思路 (如微小卫星技术推动的低轨道卫星编队、组网观测可以获得单颗卫星无法比拟的优势, 其带来的时间分辨率提升和全球实时覆盖能力将完成大型卫星无法实现的新应用)。

空间地球科学改变了地球系统科学的研究方式, 使地球科学的研究从局部扩展到全球和整体, 从静态扩大到动态, 从瞬时延续到未来的可持续, 将不断扩展人类的知识领域。特别是面对全球变化这样的基础性和前沿性的重大科学问题, 利用卫星遥感手段进行大范围、长时间、系统性的观测和研究, 开展大规模地球系统数值模拟, 进行地球变化过程的定量化研究, 将最终为弄清楚全球变化这一影响人类生存发展的重大问题做出贡献。此外, 空间地球科学通过不断深化科学目标

收稿日期: 2019-12-10; 预印本: 2021-02-01

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究 (编号: 2019QZKK0206)

第一作者简介: 施建成, 1955年生, 男, 研究员, 研究方向为遥感与地球系统科学。E-mail: shijiancheng@nssc.ac.cn

对工程技术提出新要求, 推动航天技术领域发展, 推动新型空间观测仪器的技术进步; 反过来, 空间地球科学又从上述技术的发展中获益, 提升卫星遥感在资源、环境、大气、海洋、生态、农林业、灾害监测等地球科学领域的应用水平。

国际上诸多国家和机构重视对于地球系统的观测、模拟以及对其变化的解译, 重视空间地球科学的发展。地球观测组织 GEO (Group on Earth Observations) 即是为了促进全球范围内地球观测的任务协调而成立, 为构建一个综合、协调和可持续的综合地球观测系统而努力。中国也在积极推进空间科学技术的发展, 我们在中国科学院空间科学战略性先导科技专项中设置空间地球科学方向领域, 就是为了促进空间地球科学基础理论、前沿技术和遥感应用研究的发展, 推动空间科技在地球系统科学及相关领域的科学应用。

本文主要回顾空间地球科学的发展态势, 以全球水循环为例阐述空间技术在地球系统关键循环过程观测中的作用, 展望中国未来空间地球科学的发展, 以期进一步促进国家和社会的可持续发展, 服务国家重大战略需求。

2 空间地球科学的发展

地球系统科学最早非正式出现于1983年, 来自美国航空航天局 NASA (National Aeronautics and Space Administration) 顾问委员会领导下的地球系统科学委员会 ESSC (Earth System Science Committee) 的一份内部文件中指出要把地球的各个组成部分作为相互作用的一个系统加以评述, 将透视和理解地球系统随时间的演化作为地球系统科学的最终目标。随后, 美国国家大气研究中心的研究人员 (Bretherton, 1985) 撰文提出地球系统概念模型, 明确指出遥感在理解气候系统与地球系统各子系统之间相互作用与反馈中的作用。NASA ESSC 委员会于1986年发布报告“地球系统科学概述: 应对全球变化”, 成为 NASA 后来构建地球观测系统 EOS (Earth Observing System) 的依据, 即通过多颗卫星组成和实行多学科 (大气、海洋、陆面、生物、化学等) 的综合交叉研究, 加深对于地球系统变化的理解, 回答和应对全球变化等问题。随着地球系统科学快速发展, 学科交叉不断深入, 人们已认识到以传统地球各圈层划分的研究方式有非常大的局限性, 需要把地球的大气

圈、水圈 (含冰冻圈)、生物圈、岩石圈、地幔和地核以及近地空间视作密切联系的整体, 并关注人类活动的影响, 理解它们相互作用的过程和机理 (施建成等, 2016)。研究和发 展地球系统科学已经成为 21 世纪引领地球科学发展的主要前沿方向, 并呈现出一些新的发展态势, 即催生了空间地球科学的发展。

(1) 更加关注地球系统中的关键循环过程。随着人类社会的不断发展, 传统的天气、气候、水文、生态等的预测和预报能力的改进和增强面临着巨大的压力。人们已认识到地球中的物理、生物化学等自然过程以及人类活动的相互影响和复杂性, 以传统圈层划分的研究方式有非常大的局限性。如, 气象学家往往更关注全球和区域气候或天气模式中对大气的物理和化学过程的描述, 而对地—气交互作用 (陆面过程模型) 的描述又往往过度简单, 是导致目前气候和天气预报不确定性的一个重要因素。又如, 水文学家更关注地表水文过程模型中的产流、汇流、蒸散发等过程的描述, 而对驱动地表水文过程模型中的降雨数据的时空分布和误差了解不足, 这也是导致目前地表水文过程模型预报不确定性的一个重要因素。以地球系统科学的视野, 进一步打破传统学科的研究方式, 不断以新的空间观测技术为手段, 聚焦驱动地球系统的关键循环过程 (如水循环、碳循环等) 是当前地球科学研究中一个全新的发展思路, 即空间地球科学。区别于地球系统科学中传统 6 大圈层 (大气圈、岩石圈、生物圈、水圈、冰冻圈、人类圈) 的划分, 空间地球科学更加关注地球系统中的关键循环过程, 是进一步综合和联系大气、水文、生态等各种传统学科的桥梁, 有望实现正确地球系统模拟、改进地球系统各组分模型 (如天气、气候、水文、生态等) 的预测和预报能力, 促进地球系统科学和全球变化研究取得突破性进展的关键。

(2) 卫星遥感观测与地球系统模型的结合。观测是对物理、化学和生物环境状态的一种测量, 包括卫星遥感观测和本位观测。卫星遥感观测虽然只能探测其能力限制范围之内的物体, 但其可持续的全球覆盖能力是研究地球系统科学的必然需求, 有助于提高人们对于地球系统科学的认识。如, 卫星对海水表面温度的长期观测, 帮助人们认识和理解海洋在全球气候变化中的作用。当前,

卫星观测的发展和地球系统科学的研究已成为一个有机的整体、相互促进、不断深入，逐步形成空间地球科学。空间地球科学（图1）以遥感科学与技术为基础，观测当前地球系统正在发生的过程，理解地球系统的运行机制，结合地球系统数值模拟和遥感大数据预测地球系统未来变化的趋势。全球变化和地球系统科学研究不但需要高精度、多尺度、立体、全覆盖、连续过程的遥感监测信息，而且对遥感监测信息提出了更高的要求，即，卫星观测的要素在精度、系统性、时空分辨率上必须满足地球系统模型的需求。这些需求促进了全球范围内各种卫星计划、新型传感器、和反演方法的发展。遥感观测与地球系统各模型的有机结合，即空间地球科学领域的研究已成为目前地球科学发展的热点。

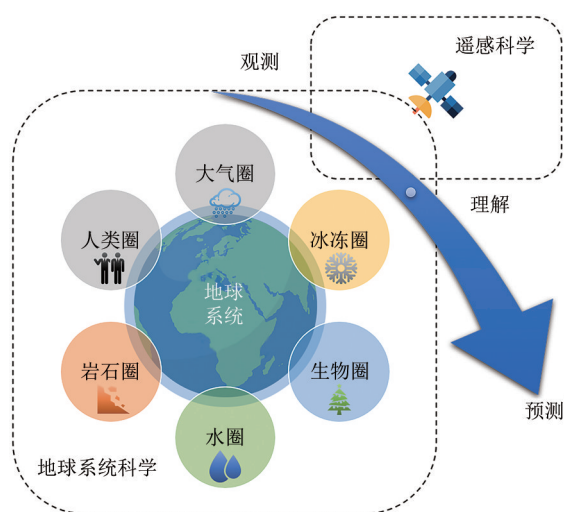


图1 空间地球科学的内涵

Fig. 1 The connotation of space Earth science

中国学者在2018-11-14召开第一届空间地球科学学术研讨会，探求空间地球科学新技术、新方法和空间探测技术的发展，围绕水循环观测与模拟、生物地球化学循环观测与模拟、月基地球观测机理与方法、三极时空观测与模拟等话题展开探讨，可见以遥感为基础的空间探测技术的综合发展可为地球科学各分支学科的研究提供不可缺失的、全球尺度的基础信息，也将支持许多新发现。

3 地球系统关键循环过程的观测

美国NASA在20世纪末开始侧重对地球系统的整体观测，即提供一套广泛的观测资料，记录

和理解地球系统的变化（如地球观测系统EOS计划）。NASA于2000年公布了“地球科学事业战略计划”ESE（Earth Science Enterprise），旨在观测、描述、了解和预测地球系统变化，以提高人类对天气、气候、灾害的预测和预报能力。目前NASA对现在和未来十年的卫星发展计划中所有的卫星都具有明确科学目的，即载荷配置是针对优先的科学问题为观测地球系统中某一关键参数而设置的，如Aquarius和SMAP（Soil Moisture Active Passive）是专门为海面盐度和土壤水分空间观测而设计的（Le Vine等，2010；Entekhabi等，2010）。欧空局ESA（European Space Agency）的“生命行星计划”（Living Planet Programme）包括科学目标驱动的地球探索卫星以及业务应用的地球观察卫星，并成立“哥白尼计划”，通过现有和未来发射的卫星数据进行统一管理和集成，实现全球环境与安全的实时动态监测。除此之外，包括日本和中国在内的诸多航天机构针对地球系统的不同物理组成发展了一系列对地观测卫星计划，在此仅举例针对地球系统中的龙头问题之一：全球水循环过程的空间观测进行论述和分析。

全球水循环相关的关键要素和过程变量包括降水、蒸散发、径流、土壤水分、海洋温度和盐度、陆表水体、冰川、积雪、冻土、海冰与冰间湖、极地冰盖冰帽、大气水汽以及地下水等。卫星遥感具备获取水循环关键要素的独特优势，可以提供空间尺度上的水分状态、运移、交换及相变过程信息，这些参量均为全球气候观测系统GCOS（Global Climate Observing System）中涉及的基本气候变量ECV（Essential Climate Variable）（Hollmann等，2013）。认识这些大时空尺度上水的状态量、通量和储量变化是研究全球变化条件下水循环过程最为关键的重要途径。目前，国际上已经发射的气象、海洋和地球科学卫星已经对大气、海洋和陆地的若干水循环要素进行了多年测量，这些空间观测数据大大增强了科学家们对全球水循环过程的认识和理解。

降水是地表水文循环的主要输入（Eltahir和Bras，1996），对于降水总量、频率、强度以及类型的观测是理解和预测气候和天气变化，径流与可用水资源的关键。虽然雨量桶能够实现精确的点测量，但无法刻画全球降水的时空分布特征。支持大气降水反演的星载微波辐射计主要有SSM/I（Special

Sensor Microwave Imager)、AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS) 和 AMSR2, 其中 SSM/I 和 AMSR-E 已经无法工作, 后续的 AMSR2 虽然可以提供相同的观测参数, 但是由于大气参数在时间上变化迅速, 单一的传感器并不能很好的捕捉到它们的连续变化。TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) 卫星搭载的降雨雷达能够实现热带地区的降雨观测, 此后美国 NASA 和日本 JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) 联合发展的新一代 GPM (Global Precipitation Measurement) 卫星计划联合主被动微波探测能够实现更加全面和准确的全球覆盖监测 (Skofronick-jackson 等, 2017), 并且改善了对于小雨和降雪的探测能力。以 GPM 卫星为核心观测, DMSP (Defense Meteorological Satellite Program)、GCOM-W (Global Change Observation Mission-Water)、JPSS-1 (Joint Polar Satellite System)、Megha-Tropiques、TRMM、MetOp 等至少 12 颗卫星相互配合补充构成虚拟卫星网络, 形成了更高重访频次 (高时间分辨率) 且相互一致的高质量全球降水测量, 成为水循环遥感中卫星虚拟星座旗舰式计划。未来中国的风云卫星系列也将发射专门的降水星, 进一步提升降水的空间探测能力。

地气间水热通量包括陆地蒸散发和海洋蒸发, 是指降水到达地面后由液态/固态转化为水汽返回大气的过程, 它是水圈、大气圈和生物圈水分和能量交换的核心过程, 也是水循环中最重要的分量之一 (Schlesinger 和 Jasechko, 2014)。陆地蒸散发是陆面生态过程与水文过程联系的纽带, 特别是对于农业地区, 蒸散发是水分流失的重要组成部分, 可以服务于灌溉管理。虽然卫星传感器无法直接观测陆地蒸散发, 但可以基于能量平衡和水量平衡的相关模型, 借助一系列光学、热红外以及微波卫星观测的输入, 比如地表温度、植被指数、土壤水分、积雪覆盖和雪水当量等与蒸散发过程相关的参量, 并结合地面气象观测进行蒸散发的遥感估算。海气相互作用是最重要的全球水循环驱动过程, 对海气界面水热通量 (蒸发) 的准确估计, 是全球数值天气预报以及次季节到季节预报的前提 (Bentamy 等, 2017)。然而, 当前海气界面水热通量的卫星遥感监测还存在较大挑战: 无法监测中小尺度 (<25 km) 的海气交换过程; 海气通量高梯度区域误差很大; 海面低层

大气温度和湿度缺乏准确遥感手段; 计算海气界面水热通量的各输入参量不能同时获得等。因此, 地气间水热通量的遥感估算对于关键参量的协同观测 (多星组网) 需求较为迫切。

径流同样是水循环过程的重要组成部分, 对于洪水的预报具有直接影响。目前径流的观测更多地依赖于本位测量, 由于缺乏共享机制, 目前全球范围内的径流状况难以刻画。卫星遥感观测可以进行水体高度的测量, 来帮助径流情况的估计。比如 SWOT (Surface Water Ocean Topography) 卫星通过使用雷达高度计对水面和水体高度进行测量 (Biancamaria 等, 2016)。此外, 通过结合陆面/水文模型和土壤水分观测, 也能实现特定区域的径流估计。

土壤水分、海洋温度和盐度是地气间交互作用的重要边界条件, 共同作用和反映地球系统变化和气候变化。其中, 土壤水分控制着将入射辐射转化为显热通量和潜热通量, 影响着降雨和渗透, 径流和蒸发。在气候时间尺度上, 土壤水分作为边界条件控制着进入大气的通量, 在水文学和陆面模式中必须精确的表达 (赵天杰, 2018)。土壤水分干湿变化对于陆地蒸散发、降雨、汇流、产流过程的空间分布与强度都有重要影响。实际上, 地球观测组织 GEO (Group on Earth Observations) 将土壤水分列为地球观测重要变量中的第二排序位置 (仅次于降水)。主被动微波均是探测土壤水分的重要手段, 美日联合研制的 Aqua 卫星和日本 GCOM-W 卫星都主要利用 C、X 波段的微波扫描成像仪进行土壤水分观测。但这些频段对植被等的穿透能力弱、受地表参数影响大, 其测量精度并不理想。综合考虑探测灵敏度和空间分辨率等因素, 土壤水分卫星遥感发展的趋势是利用对土壤水分敏感度高、受地表状态影响小的低频波段进行探测。欧空局研制的土壤水分和海面盐度卫星 SMOS (Soil Moisture Ocean Salinity) 利用 L 波段综合孔径微波辐射计对土壤水分进行测量 (Kerr 等, 2010), 美国的土壤水分主被动探测卫星 SMAP (Entekhabi 等, 2010) 利用 L 波段辐射计和散射计对土壤水分进行更高分辨率的制图。但是由于这些卫星只有 L 波段微波辐射测量, 缺乏对植被等地表状态的有效校正手段, 也缺少同步的地表温度观测, 现有研究表明很难实现大幅度提升土壤水分产品精度和空间分辨率的目标。此外, ESA 支持发展了气候变化倡议 CCI (ESA

Climate Change Initiative), 利用历史上的主被动探测器生成了长时序的土壤水分数据集 (Dorigo 等, 2017)。中国在空间基础设施中规划的陆地水资源卫星也将土壤水分作为首要探测目标 (Zhao 等, 2020)。

海面温度是海洋热力、动力过程和海气相互作用的结果, 大范围海面温度的异常往往会带来全球气候的异常变化, 如拉尼娜、厄尔尼诺现象等。海面温度的遥感观测有着相对较长的历史和成熟度, 主要包括红外传感器和被动微波传感器两种。其中, 星载红外传感器如 AATSR (Advanced Along-Track Scanning Radiometer)、AVHRR (Advanced Very-High-Resolution Radiometer)、MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 等容易受到云、水汽和气溶胶等大气条件的影响, 而星载被动微波探测如 AMSR-E、AMSR2 等主要受限于空间分辨率的不足, 红外和被动微波传感器的联合探测是未来重要的发展方向。

海洋盐度是水循环系统过程包括海洋蒸发、河流入海径流、极地海冰冻融等的重要指示因子, 其通过调整密度从而对全球大洋环流以及与之相关的水团形成起着重要的调节作用。L波段被动微波遥感是当前最有效的海表盐度遥感监测手段 (Lagerloef 等, 1995)。SMOS 卫星、Aquarius/SAC-D 卫星 (Lagerloef 等, 2008) 和 SMAP 卫星 (Tang 等, 2017) 分别通过综合孔径、实孔径和主被动联合的方式, 实现了全球海表盐度的卫星遥感监测。然而由于 L波段被动微波信号易受射频干扰、太阳辐射、降水因素等干扰, 卫星遥感海洋盐度产品在空间分辨率、时间分辨率和反演精度等指标方面尚无法满足目前动力过程研究向中小尺度过程发展的研究需求, 同时海表盐度对水循环和气候变化的指示作用需要长期持续的观测。未来随着中国海洋盐度卫星、美国超带宽微波辐射计 UWBRAD (Ultrawideband Software-Defined Microwave Radiometer) 等相关遥感卫星的发展, 有望提供质量更佳的卫星遥感资料 (Jezek 等, 2019)。海表的温度和盐度作为描述海水性质的基本参数, 是地球系统科学和全球气候变化研究中的关键参量, 其对全球水循环的指示作用以及其在大洋环流、海气物质和能量交换、地球系统多圈层相互作用和气候变化中的重要意义需要可持续的、更高时空分辨率的空间探测。

冰川、积雪、冻土、海冰以及极地冰盖冰帽等冰冻圈要素也是重要的水资源, 由于冰雪具有较高的反照率, 其面积变化直接影响到全球气候, 同时对于全球气候变化也异常敏感。其中, 雪水当量是水循环模型中的辐射能量平衡和物质平衡的关键状态变量。积雪的存在阻碍了水分的地气间交换, 影响着蒸散发过程的强度。研究雪水当量变化对于融雪径流、春季洪水、以及区域水资源的影响, 进而分析积雪面积及雪量变化对全球和区域的能量、物质平衡的影响都需要准确的观测信息。目前星载微波辐射计仍然是获取大面积雪水当量和雪深的主要探测手段 (Shi 等, 2016), 主要利用 19 GHz 和 37 GHz 之间的亮温差异, 但存在的主要问题是星载微波辐射计分辨率低导致存在较小尺度变化时的反演精度低。相对而言, 微波散射特性则主要依赖于微观结构和界面特征 (Shi 等, 2015), 具有取得更好反演性能的可能, 欧空局 CoReH2O 的科学目标是获取全球范围高空间分辨率的冰雪特性等水文要素信息, 在 15 d 的重访周期内有近 90% 的全球覆盖, 但其未被纳入 ESA 的发展计划当中。冻土特别是活动层或表层土壤的冻融变化直接影响土壤的水热特性, 可引起一系列复杂的地表过程轨迹模式突变, 对寒区水文过程特别是径流产生重要影响。因此, 在当前全球变化背景下研究地表冻融过程的监测方法及其动态变化对于理解陆面水文过程及全球水循环具有重要科学意义。当前的地表冻融过程探测主要依赖微波遥感技术, 其中以大尺度的微波辐射计和散射计为主。然而, 冻融状态的变化及分布不仅受到纬度、海拔高度、地形的影响, 还与土壤质地、土壤湿度、地热、雪盖、气温等条件紧密相关, 地表由此呈现的强烈空间异质性和复杂性也为冻融状态的监测带来诸多困难和不确定性, 更高空间—时间分辨率 (Zhao 等, 2017) 的探测对寒区的水循环研究具有重要的科学价值。

海冰的覆盖面积以及密集度是极区生态系统的重要决定性参数, 同样地, 过去和当前诸多的多频率微波辐射计能够用于海冰密集度的探测。海冰厚度的探测可以通过高度进行估算, 比如美国的冰卫星 ICESAT (Ice, Clouds, and Land Elevation Satellite) 和欧洲的冰卫星 Cryosat 分别利用激光雷达和微波雷达高度计对冰厚进行测量 (Schutz 等, 2005)。由于低频波段的穿透性, SMOS/SMAP 提供

的L波段观测对薄冰 (<0.5 m) 厚度变化较为敏感, 因此L、Ku、Ka波段的相互配合可以获取更为丰富的海冰分布、密集度和厚度信息。欧空局哥白尼对地观测卫星计划中的CIMR (Copernicus Imaging Microwave Radiometer) 卫星, 计划搭载L、C、X、Ku、Ka多波段微波辐射计, 将极大提升海面温度、海冰以及海表盐度的综合探测能力 (Kilic等, 2018), 但由于其采取固定入射角度观测, 部分参数的遥感解析能力仍然有所欠缺。另一项CRISTAL (Copernicus polaR Ice and Snow Topography ALtimeter) 卫星计划 (Kern等, 2020) 则将携带一台多频雷达高度计和一台微波辐射计, 用于海冰厚度及其冰上积雪的观测, 同时也关注极地冰盖的高程变化。极地冰盖主要包括南极和格陵兰, 其变化直接影响海平面的上升。当前冰盖物质平衡的主要遥感观测手段包括微波雷达、激光雷达和重力卫星等, 其中主要的不确定性在于冰盖密度剖面的不确定性。近期美国学者提出的超宽带微波辐射计可以利用0.5—2 GHz对于冰雪的强穿透性, 以及不同频率间衰减特性的差异, 有望通过求解辐射传输方程获取冰盖的温度剖面 and 密度剖面。

大气中超过99%的水分以水汽形式存在, 其在较短的时间尺度内影响天气变化, 而在较长的时间尺度上影响气候变化。水汽作为地球系统中主要的温室气体, 比二氧化碳能够吸收更多热量, 其运动决定了区域的可降水量。大气水汽的遥感探测主要包括近红外 (水汽吸收通道)、被动微波和导航信号等。由于大气中水汽运动迅速, 当前遥感面临的主要挑战在于如何综合利用多源遥感信息获取时间分辨率更高的水汽观测, 以满足区域和全球水循环过程研究的需要。

地下水在很多地区是一种重要的水资源, 与径流一样, 很多国家都进行地下水位的观测但很少进行数据共享。较低空间分辨率的重力卫星如GRACE (Tapley等, 2004) 等能够通过重力的变化来推算地下水储量的变化。

中国面向业务运行和应用的民用遥感卫星系列也正在逐渐完善全球水循环的观测, 如: 气象卫星系列能够进行降水、大气水汽、大气温湿度廓线的观测, 也能提供较粗分辨率的土壤水分和积雪覆盖和学当量观测 (Dong等, 2009), 未来还包括风云四号微波卫星和风云三号降水测量卫星,

进一步提升大气中水要素的探测能力; 海洋卫星系列 (Jiang等, 2012) 包括中法海洋卫星可以获取海面温度、海风和海浪等动力信息, 未来规划中的海洋盐度卫星将实现中国海表盐度探测的突破; 资源和高分系列卫星基本满足了地表水体变化的监测需求。然而, 中国现有遥感卫星对于全球水循环空间观测的闭环还有诸多空白亟待填补。

以上论述表明, 目前水循环的空间观测虽然取得了诸多进步, 但也存在着许许多多的问题并且远不能满足地球系统科学研究的需要。目前主要存在3方面的问题: 一是不同参数探测能力不平衡、数据的系统性和时空一致性不足, 缺乏水循环系统总体平衡条件下的观测能力, 限制了观测数据在模型中的应用; 二是关键参数探测反演精度不足, 特别是现有观测手段一般只能提供针对水循环关键要素主要敏感参数的探测能力, 而不具备对反演所需要的其中支持信息的获取能力, 从而需要大量依赖假设模型, 造成反演不确定度大; 再次, 水循环过程是高度可变的, 包括在空间和时间尺度上, 受卫星的重访能力限制以及后续可持续性的风险, 卫星获取的数据无论是在时间和空间连续性上限制了空间观测数据在全球水循环研究中的深度应用。

4 中国未来空间地球观测展望

空间地球观测是空间地球科学发展的源动力, 如何面向地球系统科学中的前沿与挑战, 不断发展和完善新的空间地球观测体系是首要关键。经过50年的发展, 中国空间技术、空间地球科学研究取得了长足进展, 风云、海洋、资源、环境与减灾等民用遥感卫星体系基本建成, 成为名副其实的航天大国。《国家民用空间基础设施中长期发展规划 (2015年—2025年)》中明确要持续推进民用遥感卫星的发展, 促进数据的业务化应用和数据共享服务水平的提升。中国科学院空间科学战略性先导科技专项中, 新的空间地球观测计划不断开展背景型号论证。然而, 与国际先进水平相比, 中国仍有很大的差距, 在空间的探测和认知方面能力还比较弱, 原始创新性的重大科学发现相对较少。

空间地球科学揭开了地球系统多学科交叉的新纪元, 根据国内外发展现状与趋势, 结合中国发展战略需求, 中国空间地球科学的发展应依靠

空间对地观测技术的自主进步, 同时积极寻求国际合作。比如以认识和预测地球系统的水循环为突破口, 对地球系统中发生的主要水循环变化及相互作用过程进行全面的监测, 开展综合的空间对地观测和地球科学研究, 增加对全球水循环及其对自然与人为变化的响应的科学认识, 提升对气候、天气和灾害的预测预报能力, 满足社会可持续发展需求。中国未来空间地球观测(水循环领域)的展望如下。

(1) 发展水循环地表状态变量探测卫星。水循环是地球3大循环系统中最为活跃的物质循环过程, 以认识水循环为龙头, 发展和验证若干先进的空间遥感技术, 包括综合孔径微波辐射计技术、主被动一体化联合探测技术等, 实现利用卫星观测综合获取水循环关键状态变量, 开展全球水循环关键状态变量的多要素、高精度、同时相的综合观测, 特别是土壤水分、地表冻融状态、雪水当量、海表盐度等(Shi等, 2014)。结合已有的对地观测资料、地基站网和航空遥感资料, 在多种时空尺度上对水循环关键状态变量进行定量描述和模拟, 深刻认识全球和区域水循环的特征、演变规律和趋势以及其对全球变化的反馈和响应。

(2) 发展水循环地气通量探测卫星。开展地球系统中全球水循环大气、以及地—气间通量要素(降水和蒸散发)的空间遥感探测。通过增强大气特征敏感波段的数量, 提高区分降雨/降雪和散射体大小的能力; 联合可见光/近红外、热红外和微波测量, 提高对于蒸发相关的状态量的测量精度和时空分辨率, 实现陆地蒸散发和海洋蒸发的同步估计, 提高对于大气中的水分以及地气间的水分交换过程的空间观测能力。初步实现对于地球系统水循环的三维立体式、高时空分辨率的监测能力, 利用较为系统的空间观测数据验证并改进水循环关键过程以及地球系统模式的模拟能力, 深化全球变化对于水循环影响的认识, 提高天气预报、气候环境和全球变化及相关灾害的预报预测水平。

(3) 发展冰冻圈(固态水)的专题卫星。通过发展长波段(如P波段)和宽波段的微波探测技术, 实现极地冰盖的冰密度和温度剖面测量、冰川厚度的测量、冻土活动层厚度的观测等; 结合激光雷达或雷达干涉技术实现冰川冰盖以及水体表面高程的高精度测绘, 为极区物质平衡、冰冻

圈在全球变化下的响应等研究提供空间观测数据, 填补中国乃至国际上对于冰冻圈测量能力的严重不足。最终促进中国形成对于水循环多参数的立体式和系统性协同监测能力, 实现水循环空间探测数据与地球系统模式有机结合, 回答有关地球系统变化的机制、强迫及响应等关键科学问题, 带动整个地球系统学科发展, 进一步拓展地球系统科学在减灾防灾、环境保护、资源合理利用与管理以及社会经济可持续发展等方面的应用。

值得注意的是, 空间地球科学的发展离不开遥感科学与技术的进步, 需要不断推进遥感辐射传输机理研究, 促进全波段遥感模型模拟平台的构建, 需要发展大气、海洋、陆地多参量多源遥感协同反演方法, 同时发展多尺度遥感观测数据与地表过程模型的同化理论和技术体系。

参考文献(References)

- Bentamy A, Piollé J F, Grouazel A, Danielson R, Gulev S, Paul F, Azelmat H, Mathieu P P, von Schuckmann K, Sathyendranath S, Evers-King H, Esau I, Johannessen J A, Clayson C A, Pinker R T, Grodsky S A, Bourassa M, Smith S R, Haines K, Valdivieso M, Merchant C J, Chapron B, Anderson A, Hollmann R and Josey S A. 2017. Review and assessment of latent and sensible heat flux accuracy over the global oceans. *Remote Sensing of Environment*, 201: 196-218. [DOI: 10.1016/j.rse.2017.08.016]
- Biancamaria S, Lettenmaier D P and Pavelsky T M. 2016. The SWOT Mission and Its Capabilities for Land Hydrology. *Surveys in Geophysics*, 37: 307-337. [DOI: 10.1007/s10712-015-9346-y]
- Bretherton F P. 1985. Earth System Science and Remote Sensing. *Proceedings of the IEEE*, 73(6): 1118-1127. [DOI: 10.1109/PROC.1985.13242]
- Dong C, Yang J, Zhang W, Yang Z, Lu N, Shi J, Zhang P, Liu Y and Cai B. 2009. An overview of a new Chinese weather satellite FY-3A. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(10): 1531-1544. [DOI: 10.1175/2009BAMS2798.1]
- Dorigo W, Wagner W, Albergel C, Albrecht F, Balsamo G, Brocca L, Chung D, Ertl M, Forkel M, Gruber A, Haas E, Hamer P D, Hirschmair M, Ikonen J, de Jeu R, Kidd R, Lahoz W, Liu Y Y, Miralles D, Mistelbauer T, Nicolai-Shaw N, Parinussa R, Pratola C, Reimer C, van der Schalie R, Seneviratne S I, Smolander T and Lecomte P. 2017. ESA CCI Soil Moisture for improved Earth system understanding: State-of-the art and future directions. *Remote Sensing of Environment*, 203: 185-215. [DOI: 10.1016/j.rse.2017.07.001]
- Eltahir E A B and Bras R L. 1996. Precipitation recycling. *Reviews of geophysics*, 34(3): 367-378. [DOI: 10.1029/96RG01927]
- Entekhabi D, Njoku E G, O'Neill P E, Kellogg K H, Crow W T, Edelstein W N, Entin J K, Goodman S D, Jackson T J, Johnson J, Kim-

- ball J, Piepmeier J R, Koster R D, Martin N, McDonald K C, Moghaddam M, Moran S, Reichle R, Shi J C, Spencer M W, Thurman S W, Tsang L and Van Zyl J. 2010. The Soil Moisture Active Passive (SMAP) Mission. *Proceedings of the IEEE*, 98(5): 704-716. [DOI: 10.1109/JPROC.2010.2043918]
- Hollmann R, Merchant C J, Saunders R, Downy C, Buchwitz M, Cazenave A, Chuvieco E, Defourny P, De Leeuw G, Forsberg R, Holzner-Popp T, Paul F, Sandven S, Sathyendranath S, Van Roozendael M and Wagner W. 2013. The ESA climate change initiative: Satellite data records for essential climate variables. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94: 1541-1552. [DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00254.1]
- Jezek K C, Kwok R, Kaleschke L, Belgiovane D J, Chen C C, Bringer A, Johnson J T, Demir O, Andrews M J, Macelloni G, Brogioni M, Leduc-Leballeur M, Tan S and Tsang L. 2019. Remote Sensing of Sea Ice Thickness and Salinity with 0.5-2 GHz Microwave Radiometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57: 8672-8684. [DOI: 10.1109/TGRS.2019.2922163]
- Jiang X, Lin M, Liu J, Zhang Y, Xie X, Peng H and Zhou W. 2012. The HY-2 satellite and its preliminary assessment. *International Journal of Digital Earth*, 5: 266-281. [DOI: 10.1080/17538947.2012.658685]
- Kern M, Cullen R, Berruti B, Bouffard J, Casal T, Drinkwater M R, Gabriele A, Lecuyot A, Ludwig M, Midthassel R, Navas Traver I, Parrinello T, Ressler G, Andersson E, Martin-Puig C, Andersen O, Bartsch A, Farrell S, Fleury S, Gascoin S, Guillot A, Humbert A, Rinne E, Shepherd A, Van Den Broeke M R and Yackel J. 2020. The Copernicus Polar Ice and Snow Topography Altimeter (CRISTAL) high-priority candidate mission. *Cryosphere*, 14: 2235-2251. [DOI: 10.5194/tc-14-2235-2020]
- Kerr Y H, Waldteufel P, Wigneron J-P, Delwart S, Cabot F, Boutin J, Escorihuela M-J, Font J, Reul N, Gruhier C, Juglea S E, Drinkwater M R, Hahne A, Martín-Neira M and Mecklenburg S. 2010. The SMOS Mission: New Tool for Monitoring Key Elements of the Global Water Cycle. *Proceedings of the IEEE*, 98(5): 666-687. [DOI: 10.1109/JPROC.2010.2043032]
- Kilic L, Prigent C, Aires F, Boutin J, Heygster G, Tonboe R T, Roquet H, Jimenez C and Donlon C. 2018. Expected Performances of the Copernicus Imaging Microwave Radiometer (CIMR) for an All-Weather and High Spatial Resolution Estimation of Ocean and Sea Ice Parameters. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123: 7564-7580. [DOI: 10.1029/2018JC014408]
- Lagerloef G S E, Swift C T and Le Vine D M. 1995. Sea surface salinity: The next remote sensing challenge. *Oceanography*, 8(2): 44-50.
- Lagerloef G S E, Colomb F R, Le Vine D M, Wentz F, Yueh S, Ruf C, Lilly J, Gunn J, Chao Y, Decharon A, Feldman G and Swift C. 2008. The Aquarius/SAC-D mission: Designed to meet the salinity remote-sensing challenge. *Oceanography*, 21(SPL. ISS. 1): 68-81. [DOI: 10.5670/oceanog.2008.68]
- Le Vine D M, Lagerloef G S E and Torrusio S E. 2010. Aquarius and Remote Sensing of Sea Surface Salinity from Space. *Proceedings of the IEEE*, 98(5): 688-703. [DOI: 10.1109/JPROC. 2010. 2040550]
- Schlesinger W H and Jasechko S. 2014. Transpiration in the global water cycle. *Agricultural and Forest Meteorology*, 189-190: 115-117. [DOI: 10.1016/j.agrformet.2014.01.011]
- Schutz B E, Zwally H J, Shuman C A, Hancock D and DiMarzio J P. 2005. Overview of the ICESat mission. *Geophysical Research Letters*, 32: 1-4. [DOI: 10.1029/2005GL024009]
- Skofronick-jackson G, Science N S, Collins F, Tech- C and Agency A E. 2017. The Global Precipitation Measurement (GPM) Mission for Science and Society. *Bulletin of the American meteorological society*, 98(8): 1679-1696. [DOI: 10.1175/BAMS-D-15-00306.1]
- Shi J C, Xiong C and Jiang L M. 2016. Review of snow water equivalent microwave remote sensing. *Science China Earth Sciences*, 59: 731-745. [DOI: 10.1007/s11430-015-5225-0]
- Shi J C, Dong X L, Zhao T J, Du J Y, Jiang L M, Du Y, Xiong C. 2014. WCOM: The science scenario and objectives of a global water cycle observation mission. In *2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 3646-3649.
- Shi J C and Lei Y H. 2016. Remote sensing and Earth system science. *Journal of Remote Sensing*, 18(6): 837-851 (施建成, 雷永荟). 2016. 遥感与地球系统科学. *遥感学报*, 20(5): 827-831
- Sun S. 2005. Global change and Earth system science research in China. *Advance in Earth Science*, 20(1): 6-10. (孙枢. 2005. 对我国全球变化与地球系统科学研究的若干思考. *地球科学进展*, 20(1): 6-10)
- Tang W, Fore A, Yueh S, Lee T, Hayashi A, Sanchez-Franks A, Martinez J, King B and Baranowski D. 2017. Validating SMAP SSS with in situ measurements. *Remote Sensing of Environment* 200: 326-340 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.08.021]
- Tapley B D, Bettadpur S, Watkins M and Reigber C. 2004. The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results. *Geophysical Research Letters*. 31: 1-4. [DOI: 10.1029/2004GL019920]
- Wang P X. 2003. Earth system Science in China Quo Vadis. *Advance in Earth Science*, 18(6): 837-851 (汪品先. 2003. 我国的地球系统科学研究向何处去. *地球科学进展*, 18(6): 837-851)
- Zhao T, Shi J, Hu T, Zhao L, Zou D, Wang T, Ji D, Li R and Wang P. 2017. Estimation of high-resolution near-surface freeze/thaw state by the integration of microwave and thermal infrared remote sensing data on the Tibetan Plateau. *Earth and Space Science*, 4: 472-484. [DOI: 10.1002/2017EA000277]
- Zhao T, Shi J, Lv L, Xu H, Chen D, Cui Q, Jackson T J, Yan G, Jia L, Chen L, Zhao K, Zheng X, Zhao L, Zheng C, Ji D, Xiong C, Wang T, Li R, Pan J, Wen J, Yu C, Zheng Y, Jiang L, Chai L, Lu H, Yao P, Ma J, Lv H, Wu J, Zhao W, Yang N, Guo P, Li Y, Hu L, Geng D and Zhang Z. 2020. Soil moisture experiment in the Luan River supporting new satellite mission opportunities. *Remote Sensing of Environment*. 240: 111680 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111680]
- Zhao T. 2018. Recent advances of L-band application in the passive microwave remote sensing of soil moisture and its prospects. *Progress in Geography*, 37(02): 198-213 (赵天杰. 2018. 被动微波反演土壤水分的L波段新发展及未来展望. *地理科学进展*, 37(02): 198-213) [DOI: 10.18306/dlkjx.2018.02.003]

Global water cycle studies from the perspective of space earth science

SHI Jiancheng¹, ZHAO Tianjie², YANG Xiaofeng²

1. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Jointly Sponsored by the Aerospace Information Research Institute of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: The space Earth science is a comprehensive and interdisciplinary discipline that studies the interactions, mechanisms and evolutions of the Earth system and Earth's subsystems through the means of space observation (satellite remote sensing). It brings new means, new ideas and new perspectives to scientists for Earth science studies. The development of space Earth science will promote the development of a series of disciplines including aerospace technology, remote sensing science, Earth system science, meteorology, hydrology, ecology etc. It is an important cornerstone for the cooperation to jointly build a community of common destiny for all mankind. This article mainly reviews the development of space Earth science, and discusses the role of space observation in the study of key subsystems (e.g., water cycle) of the Earth system. It also looks forward to the future development of space Earth science in China.

Space Earth science has emerged as a powerful tool to investigate the Earth as a system, expanding the research of Earth science from local to the global dimensions, from static to dynamic queues, and will continue to expand our knowledge about how the Earth has changed. The current space Earth sciences are showing some new development trends, such as (1) paying more attention to the key cyclic processes in the Earth system, and (2) Combining of satellite remote sensing and Earth system model. Taking the observation of Earth's water cycle from space as an example, the key elements and process variables related to the global water cycle include precipitation, evapotranspiration, runoff, soil moisture, sea temperature and salinity, surface-water bodies, glaciers, snow, frozen soil, sea ice, polar ice caps and ice sheets, atmospheric water vapor, and groundwater etc. Satellite remote sensing has the unique advantage to provide information on the water status, migration, exchange, and phase change processes, which are essential information involved in the global climate change. At present, meteorological, oceanic and Earth observation satellites that have been launched internationally and have been able to measure many water cycle elements in the atmosphere, ocean, and land. These space observation data have greatly enhanced scientists' knowledge and understanding of the global water cycle process.

The outlook for future space Earth observation in the field of water cycle is as follows.

(1) Develop satellites for detecting surface state variables of water cycle, including the synthetic aperture microwave radiometer technology, active and passive integrated detection technology, to enable multi-element, high-accuracy, high-resolution simultaneous observation of key state variables such as soil moisture, soil freeze/thaw, snow properties and sea surface salinity, etc.

(2) Develop satellites for estimating land-atmosphere water fluxes of water cycle (precipitation and evapotranspiration) by enhancing the atmospheric detection abilities to distinguish between rainfall and snowfall, and combining the thermal infrared and microwave measurements to improve the quantities and qualities of variables related to evapotranspiration.

(3) Develop thematic satellites of the cryosphere (water in solid form), including the development of long-wavelength (such as P-band) and wide-band microwave radiometer for the measurement of ice density and temperature profile of ice sheets, the measurement of glacier thickness, and the observation of the thickness of permafrost active layer, etc., and the development of synthetic aperture radar interferometry and lidar for high-precision surveying of ice sheet surface elevation and ice volume.

Key words: space earth science, earth system science, remote sensing, global change, water cycle

Supported by Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program (No. 2019QZKK0206)