全球水遥感技术及其应用研究的综述与展望

唐国强^①, 龙笛^{①②}, 万玮^{①②}, 曾子悦^①, 郭晓林^①, 洪阳^{①②*}

① 清华大学水利水电工程系, 北京 100084;

② 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084

* E-mail: hongyang@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2015-04-14; 接受日期: 2015-07-27

摘要 星基遥感技术在获取时空复杂多变的水信息方面具有独特的优势, 如 TRMM/GPM, SMAP, GRACE, SWOT, GRACE-II, PATH, TERRA, AQUA, 以及国内的风云系列等环境卫星提供了前所未有的全球遥感水文大数据. 为了进一步促进遥感技术在水循环研究和水资源管理中的应用, 促进学科交叉和系统集成研究, 本文系统综述国际前沿的全球水循环遥感卫星技术、遥感参数反演及其在水文中的潜在应用等, 重点介绍降水、土壤湿度、蒸散、地下水、水面高程、冰川、云和大气水等遥感技术, 同时探讨全球水循环观测卫星的研发和功能, 分析数据同化、遥感反演参数不确定性方面的技术瓶颈及未来展望.

关键词

卫星遥感
水循环变量
遥感反演
现状及展望

1 引言

全球和区域尺度上的水循环研究和水资源管理涉及水文气象的所有要素, 包括辐射、温度、风速、降水、蒸散、径流、地表水, 土壤湿度、地下水, 以及流域总储水量变化等(图 1). 星基遥感技术在获取时空上复杂多变的水循环变量方面具有独特优势, 如热带降水测量计划(TRMM)/全球降水观测计划(GPM), 土壤湿度主动-被动探测(soil moisture active and passive, SMAP), 重力恢复与气候实验(gravity recovery and climate experiment, GRACE), 地表水和海洋地形观测计划(surface water ocean topography, SWOT), GRACE-II, PATH, 以及国内的风云系列等环境卫星提供了前所未有的全球遥感水文大数据. 这些卫星

和数据为气象、气候、生态、林业、农业、全球变化等领域的研究和应用提供了关键的水文通量和状态变量等相关信息, 同时也为现代水文学的研究和应用注入了新活力, 并由此衍生出“遥感水文”这一门融合遥感科学与技术与现代水文学的交叉学科.

为进一步促进遥感技术在水循环研究和在水资源管理中的应用, 以及学科交叉和系统集成研究, 该综述将系统介绍国际前沿的全球水循环遥感卫星技术、遥感参数反演及其在水文中的潜在应用与存在的问题. 由于篇幅关系, 本文将选择地重点介绍降水、蒸散、土壤湿度、总储水量变化、水面高程、冰川等遥感技术, 并探讨全球水循环观测卫星的研发和功能, 分析数据同化、遥感反演参数不确定性方面的技术瓶颈及未来展望.

引用格式: 唐国强, 龙笛, 万玮, 等. 全球水遥感技术及其应用研究的综述与展望. 中国科学: 技术科学, 2015, 45: 1013–1023

Tang G Q, Long D, Wan W, et al. An overview and outlook of global water remote sensing technology and applications (in Chinese). Sci Sin Tech, 2015, 45: 1013–1023, doi: 10.1360/N092015-00024

图1 (网络版彩图)全球水循环图

(图片出处: <http://water.usgs.gov/edu/watercyclechinese.html>)

2 全球水遥感卫星/计划

2.1 TRMM/GPM 降水测量计划

降水是水文学及水利工程研究非常重要的输入,对降水的准确估计能够促进人们更好地理解水文循环以及全球能量平衡。传统的地面观测虽然精度较高,观测直接,但是由于降水的数量、类型、频率等特征具有显著的时空变异性,地面观测降水存在诸多局限性,尤其难以观测海上降水,因而从太空进行卫星降水观测是系统了解全球降水情况及其变化的唯一手段^[1]。

TRMM 卫星由美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)和日本宇宙航空研究开发机构(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)合作开发设计。卫星于1997年11月28日在日本发射,它是第一颗专门用于观测热带、亚热带降水的气象卫星,搭载了微波成像仪(TMI),降雨雷达(PR),可见/红外辐射仪(VIRS),雷电探测器(LIS),云与地球辐射能量探测器(CERES)等传感器。TRMM 计划免费提供全球 50°N~50°S 和多时间间隔降水数据,弥补了全球无资料区域降水信息的不足。本文作者的科研团队在卫星遥感降水及水文研究方面取得了丰硕成果,自2004年至今团队共开发了3套卫星降水算法,并对包括 TRMM 在内的诸多卫星降水产品在多时间尺度、地域尺度上进行了验证研究^[2-4],成果均发表于国际一流刊物。TRMM 卫星自发射以

来提供了大量具有科研及应用价值的的数据,目前由于燃料耗尽,TRMM 卫星所有设备均已停止工作,卫星轨道下降,于2015年6月15日进入大气层。

GPM 是 TRMM 的后续卫星降水计划,能够提供新一代全球 3 h 以内的雨雪观测数据,范围延伸至南北极圈。GPM 扩展了 TRMM 传感器包,与重点观测热带、亚热带中大型降水的 TRMM 不同,GPM 能够更加精确地捕捉微量降水($<0.5 \text{ mm h}^{-1}$)和固态降水,这两种降水类型是中高纬度地区降水的重要组成部分,GPM 观测成果对此地区的研究具有重要意义。GPM 核心观测平台(GPM core observatory)由 NASA 和 JAXA 于2014年2月28日发射。GPM 卫星群包含了 NASA 和 JAXA 已有卫星及与两者有双边协议合作单位的卫星(图2),实现了全球覆盖,中国的 FY-3 辐射计^[1]和俄罗斯 MTVZA 辐射计^[5]将来也可能为 GPM 提供微波数据。GPM 将能够提供四种级别的数据,一级数据包含 DPR 雷达功率、GMI 亮度温度等;二级数据包含地理定位物探数据(如降水)、瞬时视场(IFOV)DPR 反射率;三级数据包含网格化时空分布物探数据(如潜热);四级数据包含遥感和模型融合数据。目前 GPM 数据一到三级产品均已发布(<http://pmm.nasa.gov/GPM>)。

GPM 新一代降水产品具有以下特征:1) 对瞬时降水估计更加准确,尤其是微量降水及冷季固态降水;2)对卫星辐射计获取的亮温在统一框架内交互校准;3) 使用 GPM 核心传感器观测得到而非模型产生

图 2 (网络版彩图)GPM 卫星群构成
(图片出处: <http://pmm.nasa.gov/GPM>)

的全球水文气象数据库,在此基础上统一各类微波探测仪的降水反演算法. GPM 能够提供全球范围基于微波的 3 h 以内以及基于微波红外 GPM 多卫星集成算法(integrated multi-satellite retrievals for GPM, IMERG)算法的半小时雨雪数据产品,该算法可以校准并融合 GPM 星座群所有微波、红外、地面观测,以及其他可能的传感器数据,对于水文、气象、农业、灾害等学科研究具有重要意义. 新一代 GPM 降水产品可以加深研究者对全球水圈及其对气候变化影响的理解,增强对洪水、干旱、泥石流等自然灾害的预报能力,提升对淡水资源的监测管控能力,增强农作物产量预报能力等. 相信随着 GPM 数据的发布以及相关研究的增多,研究者们能够对 GPM 有更加深刻的认识.

2.2 蒸散发遥感反演

蒸散发(ET),包括植被蒸腾、土壤蒸发和冠层截流蒸发,是水循环中最重要通量变量之一,在全球尺度大约占降水的 2/3. 目前利用卫星遥感多光谱和热红外数据模拟地表蒸散量的算法可大致分为两类:第一类基于遥感植被指数,如叶面积指数(LAI)或标准化植被指数(NDVI);第二类算法基于遥感地表辐射温度. 第一类算法在 Penman-Monteith 公式基础上,建立 LAI 或 NDVI 与植被、土壤、近地面大气层阻抗的关键参数的关系. 土壤水分对蒸散的影响主要

通过气象强迫数据(如气温和湿度)间接刻画和表征. 基于此类算法的代表性数据产品有: 1) 基于中分辨率成像光谱仪(MODIS)LAI 的全球蒸散产品(MOD16),其空间分辨率为 1 km,时间分辨率为 8 d,数据时间跨度为 2000 年至当前. 根据全球约 50 个站点的地表通量观测站检验,其在月时间尺度上的相对误差为~25%^[6]. 根据 Vinukollu 等人^[7]的研究,该蒸散产品存在较为显著的低估,潜热通量与涡度相关实测值的偏差约为 -18 W/m^2 ; 2) 基于美国国家海洋和大气管理局(NOAA)改进型甚高分辨率辐射仪(AVHRR)NDVI 的全球蒸散产品,空间分辨率为 8 km,时间分辨率为月,数据时间跨度从 1983~2006 年(2006 年之后并经过算法改进后的数据即将发布). 根据全球约 50 个通量观测点的检验,其相对误差约为 28%^[8]. 基于植被指数的蒸散模型充分地利用了多光谱遥感信息及其在较短的时间尺度(如 8 d)上植被信息变化不显著的特点,可以从较大空间尺度获取植被信息,进而模拟蒸散发. 但这类模型及产品的局限在于所依赖的气象场输入,如全球气象场或气候再分析数据的空间分辨率较低,如 MOD16 蒸散产品中所采用的 NASA 全球模拟和同化组(NASA global modeling assimilation office, GMAO)气温和辐射数据,空间分辨率约为 1° (~111 km),与遥感植被指数空间分辨率(~1 km)不匹配,会造成蒸散模拟的误差^[9]. 另外,基于植被指数的蒸散产品由于地表净辐射模拟

的误差和对土壤水分限制的简化处理,使得蒸散量的季节性和多年变化对降水和土壤水分的响应较弱,往往造成水量平衡的闭合度较低^[10]。

基于地表温度的算法主要利用遥感瞬时辐射温度作为地表感热通量的输入项,通过能量平衡各分量,如辐射、土壤热通量、感热通量的参数化,来获取潜热通量和蒸散发。土壤水分对蒸散发的影响主要通过遥感辐射温度来反映。此类模型的遥感信息源包括具有热红外波段的几乎所有传感器,如 Landsat TM/ETM⁺,先进星载热辐射与反射辐射计 (ASTER), MODIS 等,模拟结果较多应用于作物耗水估算、流域(区域)尺度的水文模型同化和检验、流域水资源管理等,主要代表模型包括 SEBAL^[11], SEBS^[12], TSEB^[13]等。还有一类模型基于植被指数和地表温度构成的特征空间,直接建立蒸发比与特征空间“干、湿”边界的关系,包括三角形模型^[14-16]和梯形模型^[17-19]等。基于能量平衡原理的模型具有更为坚实的物理机制和较高的空间分辨率(如~100 m)。其局限在于地表辐射温度反演受到云覆盖影响,尤其对于季风区在夏季的蒸散模拟影响较大^[20],且由于多采用较高空间分辨率遥感信息源,其时间分辨率和覆盖范围均有限。此外,部分模型(如 SEBAL, METRIC 等)还需要研究区的土壤水分存在显著对比,并需人为选取研究区的“冷、热”像元以确定蒸散发的“干、湿”边界,蒸散模拟结果是所选择的“冷、热”像元的函数,受主观影响较大^[21-23]。

蒸散发模拟精度除受算法本身影响外,还决定于输入变量,尤其是地表净辐射的精度^[24]。提高区域蒸散发的模拟精度除了对算法进行改进外,亦需要提高遥感地表温度、反照率、植被指数,尤其是地表瞬时和日平均净辐射的反演精度,才能够获得精度更高的蒸散发模拟结果。

2.3 SMAP/全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)土壤水分观测

土壤水分,是控制地表-大气相互作用的关键因子,获取高精度土壤水分数据对建立更加精准的陆面、大气模式具有至关重要的作用。同时,土壤水分也是控制陆表能量交换、调整地表径流和土壤排水、调节植被冠层蒸发和碳吸收、调控土壤冻融的重要参量^[25]。

通过卫星数据反演、模型模拟等方法已经产生和

正在发展大量不同时空尺度的土壤水分产品。目前已有的卫星遥感土壤水分产品如 L 波段微波产品 SMOS (~43 km), Aquarius(~100 km), C 波段产品 ASCAT(~25 km), 多波段组合产品地球观测系统先进微波扫描辐射计(AMSR-E)(~60 km)等^[26-29]。具有代表性的模型模拟产品包括美国的北美/全球陆面数据同化系统 NLDAS(0.125°)/GLDAS(0.25°和 1°)产品,中国西部地区陆面数据同化数据集产品^[30,31]。中国气象局也开始发展了 CLDAS V1.0 土壤水分产品^[32]。广为关注的 NASA SMAP 计划,即将于 2014 年 11 月发射, SMAP 同时搭载 L 波段的主动微波雷达和被动微波辐射计,实现主被动微波相结合的土壤水分观测和制图。微波辐射计能够探测植被含水量在 5 kg m⁻² 以内的区域土壤水分。SMAP 的发射将为全球提供更高时空分辨率的土壤水分产品,包括 3 km 的逐日主动雷达产品, 36 km 的逐日被动微波辐射计产品,以及 9 km 的逐日主被动合成产品。各级产品届时将由 NASA 地球科学数据中心 NSIDC 提供^[33]。

随着多学科交叉创新研究的深入,利用 GNSS L 波段微波地表反射信号,即 GNSS 定位应用中的“多路径误差”,进行土壤水分估算成为一个新兴的研究方向^[34]。全球四大导航卫星系统,包括美国的 GPS,中国的北斗,俄罗斯的 GIONASS 和欧盟的 GALILEO,均可提供源源不断的 L 波段(1~2 GHz)微波信号,且信号源全球覆盖。同传统的微波遥感相比较,这种探测方式在成本和时间分辨率等方面均具有独特优势。GNSS 卫星信号具有同遥感卫星探测土壤水分最佳微波波段 L 波段相同的频段,单 GNSS 站点持续观测能够生成~1000 m² 的长时间序列土壤水分产品,可作为卫星遥感产品在时间分辨率、精度验证方面的一个有力补充。美国基于板块边界观测计划(plate boundary observatory, PBO)的 GPS 观测站网,率先发展了西部多个站点的长时间序列土壤/植被水分产品^[35-37]。目前国内在 GNSS 土壤水分产品研发方面开展的工作还不够深入,本文通讯作者的科研团队已投入经费购置 GNSS 接收设备,并已在清华大学校园建成 GPS/北斗卫星信号兼容接收站(图 3),以期能够结合我国自主导航卫星系统——北斗系统观测数据进行土壤水分产品研发,如利用 GPS/北斗导航卫星数据估算青藏高原土壤水分,突破我国北斗系统数据用于土壤水分估算的关键技术,研发生成青藏高原长时间序列土壤水分产品,为该技术在青藏高原已布设 GNSS 站点的推广应

图3 (网络版彩图)清华大学 GPS/北斗卫星
信号兼容接收站

用提供支持.

2.4 重力卫星 GRACE 总储水量和地下水反演

GRACE 卫星是人类历史上首颗可以观测陆地总储水量变化的卫星, 自 2002 年 3 月由 NASA 和德国航空航天中心(german aerospace center)联合发射以来, 日益广泛地应用于旱涝灾害监测和预警^[38,39]、定量评估干旱对水资源的影响^[40]、农业灌溉导致的地下水亏损速率定量评估^[41~43]、大型水库(如三峡水库)水位变化监测^[44]、大陆和区域尺度总储水量变化特征^[45]、高山积雪和冰川融化速率评估^[46]等领域, 成为水文水资源领域近年来研究的热点, 也为传统水文学的研究注入了新的活力.

GRACE 包括 2 颗在同一极地轨道运行, 距地面约 450 km, 相隔约 200 km 的卫星(图 4). 与其他大多数卫星传感器测量在地球表层和大气间反射、发射和传输电磁辐射不同, GRACE 通过搭载的微波测距系统(microwave ranging system)和 GPS 等仪器, 精确测量(精度在 10 μm 以内)2 颗卫星之间的距离变化, 从而反演地球重力场由于质量重分布所引起的变化^[47]. 在去除大气和潮汐等质量变化的影响后, 剩下的信号即是陆地总储水量的变化, 综合反映了气候波动、全球变化和人类活动对水资源储量的影响. 地下水储量变化可以结合观测的地表水储量变化和模拟的土壤水储量变化从 GRACE 总储水量变化中分离出来. 值得指出的是, 由于不同陆面/水文模型土壤水模拟结果, 尤其是在干旱条件下会存在较大的差异. 不同陆面/水文模型的选择对地下水储量变化的模拟至关重要^[38].

图4 (网络版彩图)GRACE 双卫星
(图片出处: <http://grace.jpl.nasa.gov/images/Grace/Astrium-grace%207%20copy.jpg>)

GRACE 的主要局限是: 1) 空间分辨率较低. 由于卫星轨道高度所限, GRACE 总储水量变化空间分辨率一般在 $20 \times 10^4 \text{ km}^2$ 以上. 现有 $1^\circ \times 1^\circ$ GRACE 三级格点产品(Level 3)^[48]使没有地球物理背景的研究者可根据任意研究区的范围获取总储水量变化数据, 但研究区域亦需要在 $20 \times 10^4 \text{ km}^2$ 及以上; 2) 时间跨度较短. GRACE 数据只有从 2002 年至现在 10 余年的数据. 其设计寿命只有 5 年, 现已超龄服役, 由于电池电量不足, 自 2013 年下半年开始 GRACE 不得不采用非连续工作模式, 缺值月较多. 上述这 2 个问题是 GRACE 水文研究面临的巨大挑战. 目前本研究团队已有 GRACE 空间降尺度和历史回推的初步研究^[43,49]. 2017 年将要发射的 GRACE Follow-On 将通过轨道参数的重新设置, 有望在一定程度上提高 GRACE 的时空分辨率并缩短数据发布时间^[50].

2.5 地表水和海洋表面高程观测

目前, 对于内陆水域水位变化的监测通常采用地面定点、连续观测的方法, 花费人力、物力、财力的成本较高. 卫星测高学作为一门新兴的边缘学科, 提供了观测水位的新方法. 卫星上搭载微波雷达测高仪、辐射计和合成孔径雷达等设备, 可测量卫星到水面的距离、后向散射系数和有效波高等参数, 经过处理和分析后实现对水位的实时监测^[51].

近年来, 卫星雷达测高技术由最初对海平面变化的观测, 逐步向测量冰盖厚度及内陆水域水位的变化监测方面发展, 特别是一些少/无地面水文观测资料的地区. SWOT 计划是 NOAA 和法国航天局

(CNES)联合组织的一项观测任务,首次调查全球的地表水水位并对海洋表面高程进行制图(<http://decadal.gsfc.nasa.gov/swot.html>). 此项任务 2009 年启动, 计划 2016 年初步完成卫星的设计, 并于 2020 年发射(图 5). 星载测高仪的雷达装置发射脉冲信号, 接收天线接收其经地球表面(如海、陆、冰盖)反射后的回波, 再通过卫星脉冲信号的往返时间确定出卫星质点与星下点的距离, 最后计算得到星下点的水平面高度^[52]. SWOT 的宽幅测高技术运用重复测量高程的方法, 监测海洋、湖泊以及河流等水体水位的动态变化, 实现完全覆盖, 可提供高分辨率的全球地表水体储量和变化信息.

SWOT 计划的核心设备有以下三种: 1) Ka 或 Ku 波段的雷达; 2) Ku 波段的测高仪; 3) 微波辐射计. 通常采用 Ka 波段雷达干涉仪(KaRIN)和地面幅宽为 120 km 的合成孔径雷达干涉仪. 其中, KaRIN 可通过 Jason 卫星的近地测高仪、校正湿对流层的微波辐射计以及精密定轨的有效载荷来协助运行(<http://decadal.gsfc.nasa.gov/swot.html>).

总体上, SWOT 计划有两个主要目的: 1) 观测海洋的中、小尺度过程, 以及陆地的水循环; 2) 更加严格地控制误差. SWOT 的误差范围要求低于信号幅度至少一个量级, 即误差范围必须低于信号频谱十个倍频. 也就是说, 海洋的水文观测中, 1 km 范围内的误差应小于 2 cm, 高度精确到 10 cm, 坡度精确到 1 cm/km. SWOT 在观测误差上, 其数据准确度约为 Jason 卫星的脉冲限制测高仪观测数据的 5 倍^[53]. 高

分辨的观测使得研究者能够计算出海洋环流的速度和能量, 便于更好地了解中小尺度洋流和漩涡对沿海地区航海等的影响.

2.6 遥感监测冰盖和海冰的变化

冰盖和海冰的变化影响着地球表面的能量平衡, 从而影响着全球的天气和气候. 近年来的观测表明地球两极地区正发生显著变化, 如南极的冰盖加速消融, 冰川和冰流携带着大量物质从冰盖内部流向海洋; 西南冰盖加速融化, 南极半岛边缘的冰架出现崩解等^[54]. 一系列不稳定的复杂变化迫切需要精确观测冰量的变化.

冰、云和陆地高程卫星(ICESat)是 NASA 于 2003 年发射的第一颗专门用于测量极地冰量的卫星(图 6). ICESat 上搭载的地学激光测高系统 GLAS, 用于地面测高及确定地表粗糙度, 同时可以测定冰原的质量平衡及对海平面变化的影响; 卫星上搭载的 GPS 和 SLR 用来确定卫星自身的位置; 搭载的恒星照相机和陀螺可提供卫星的方位和激光器的指向; 安装的激光反射装置用于对地面激光跟踪站进行距离测量, 用于检核和辅助定轨. 首先, ICESat 比星载雷达高度计有更精的观测数据^[56], 其次, 比其他空载和机载激光高度计有更长的观测周期, 所以其在冰盖高程测量, 海冰厚度测量以及生物测量方面有不可替代的作用. ICESat 观测的数据应用如下: 1) 通过测量极地冰面高程的变化, 可以估算冰盖物质平衡和时空变化, 得到冰盖对海平面变化及与气候变化的关系; 同

图 5 (网络版彩图)SWOT Mission 中卫星工作原理图
(图片出处: <https://swot.jpl.nasa.gov/images/>)

图 6 (网络版彩图)ICESat 在极地上空测量^[55]

时, 借助 ICESat 高程数据, 研究地表高程随时间变化, 得到冰下水系统的运动状态; 2) 根据测量到的水厚度, 通过浮冰, 雪和水的密度得到海冰厚度; 3) 通过测量树冠和地表的情况, 估算植被和生态系统结构, 以及森林生物量。

ICESat 在运行了 37 d 后, 第 1 个激光器停止工作; 随后, 第 2 个激光器出现了在轨异常; 5 年半后, 第 3 个激光器停止工作。美国国家研究委员会地球科学十年观测(national research council's earth science decadal survey)项目要求发射 ICESat-2 作为后续卫星, 继续执行测量任务。ICESat-2 将从 2015 年开始为期 5 年的观测, 加上之前 ICESat 的测量数据, 可以得到 15 年以上的持续观测数据, 它的主要科学目标和前者相同, 同时还支撑气象学, 海洋学, 地质学, 大气科学等其他学科的发展^[55]。ICESat-2 继承了 ICESat 优点的同时, 又做了技术上的改进: 1) ICESat-2 的高度计将采用微脉冲多光束光子计数方法。高度计应用了每点多探测像素, 提高了光子捕获能力; 加载了板载视轴对准系统, 保证了卫星精确沿轨运行; 应用激光坐标参考系统提供了每个激光点的绝对指向; 2) ICESat-2 增加了交轨采样的密度, 提高了在坡度大或非常粗糙表面上的测量精度; 3) ICESat-2 在海冰上布设铅板, 其采样数量的增加和仅有 10 m 的光斑提高了出水高度和海面高程的测量精度。

2.7 Terra/Aqua 云和大气水遥感应用

大气水在水循环中具有重要作用, 是海洋向陆地进行水汽输送的媒介, 是陆地地表、地下水资源的主要来源。大气水的准确观测对水资源利用、天气灾害预报、大气研究等, 尤其是对强降水等灾害性天气的监测和预报, 具有重要意义。当大气中水汽过饱和, 水分子就会聚集在空气中的凝结核周围, 由此产生的水滴或冰晶将阳光散射到各个方向, 这就产生了云的外观。各种不同的云覆盖了全球 50% 以上的天空, 一方面可以指示天气的变化, 另一方面由于云和辐射之间的相互作用, 云对天气和气候也有重要的调节作用。传统手段难以进行高质量、高分辨率的云和大气水观测, 卫星遥感对于大气水观测具有独特的优势, 其覆盖范围广、数据更新快, 同时可以进行三维观测, 是云和大气水最重要的观测手段之一。以下主要介绍对地观测系统(earth observing system, EOS)双星 Terra 和 Aqua 在云和大气水遥感中的应用。

EOS 由 NASA 规划, 20 世纪 90 年代初开始实施, 是 NASA 地球科学事业(earth science enterprise, ESE)的核心。EOS 的目标是对地球的陆地、大气、气候、海洋、生物化学及水循环等方面, 进行长期观测, 获取全球变化的直接观测信息, 对地球系统进行深入研究, 加深对自然过程和人类活动相互作用的理解。EOS 计划第一颗极地轨道环境遥感卫星于 Terra 于 1999 年 12 月 18 日成功发射(图 7), 拉丁文中“terra”含义为“陆地”, 该卫星每日过境时间为地方时上午 10:30, 被称为 EOS 计划的第一颗上午星(EOS AM)。基于 TERRA 卫星的成功, EOS 计划的第二颗极地轨道环境卫星 Aqua 于 2002 年 5 月 4 日发射(图 8), 拉丁文中“auqa”含义为“水”, 该卫星每日过境时间为地方时下午 1:30, 被称为 EOS 计划的第一颗下午星(EOS PM)。

Terra 卫星搭载了五种传感器, 包括 CERES, MODIS, 多角度成像光谱仪(MISR), ASTER 和对流层污染测量仪(MOPITT)。AQUA 卫星搭载了六种传

图 7 (网络版彩图)太阳同步轨道 TERRA 卫星

图 8 (网络版彩图)太阳同步轨道 AQUA 卫星

感器, 包括 TERRA 卫星上的 CERES 和 MODIS, 以及大气红外探测器 (AIRS), 先进微波探测器 (AMSU-A), 巴西湿度探测器 (HSB), AMSR-E^[57]. MOIDS 是 Terra 和 Aqua 卫星搭载的最重要的传感器, 带有 490 个探测器、36 个光谱波段, 覆盖了可见光和近红外波段, 空间分辨率为 250~1000 m.

水汽分子为不对称的螺旋分子, 由于其正负离子重心不重合, 具有较强的电偶极矩. 水汽分子最强与最宽的振转吸收是以 6.30 μm 为中心的吸收带, 其次是 2 个以 2.74 与 2.66 μm 为中心的吸收带, 在近红外区还有很多吸收带. 基于卫星遥感的大气水汽反演方法有多种, 包括劈窗法、方差比反演法、回归斜率法、利用 MODIS 影像数据及近红外波段反演大气水汽等^[58].

MODIS 传感器可以提供数十种数据产品, 包括辐射率和定位产品、大气产品、海洋产品和陆地产品 (<https://ladsweb.nascom.nasa.gov/data>), 其中与云和大气水相关的产品主要有: MOD 05 为气柱水汽含量, 使用红外、近红外算法计算得到, 基于红外波段计算的可降水量是 MOD 07 产品的一部分, 累加得到 MOD 05 产品; MOD 06 为云产品, 使用可见光、近红外、短波红外波段数据, 包含云粒子相态、有效云粒子半径、云光学厚度等; MOD 35 为云掩膜产品, 使用可见光、红外算法计算得到.

3 总结及展望

卫星遥感技术的发展是人类对地观测的重大进步. 现有卫星及相关技术可以观测到具有不同时空分辨率的降水、蒸散、湖泊水库水位、雪盖、土壤表

面水分、陆地总储水量、地下水储量变化、冰盖、海冰等水文通量和状态变量, 已经广泛应用于水文气象预报、洪涝干旱和土壤墒情监测、气候变化和人类活动的水文影响、作物耗水监测和产量预测、流域水资源管理、全球变化等领域, 极大地丰富了现代水文学的内涵.

遥感水循环变量与地面观测互为补充, 为人类认识水循环过程提供了更为广阔而全面的视角. 结合陆面和水文模型, 遥感水循环变量在对水文过程机理的认识中将发挥更大的作用, 其优势将日益显现. 同时, 遥感水循环变量可作为独立的信息源服务于生态、环境、气象、气候、林业、农业等领域的研究和应用, 促进学科交叉融合, 使得人类能够更好的认识和利用地球、环境和资源.

在可遇见的未来, 遥感水文学的研究热点将集中在一系列亟待解决的问题: 包括进一步提高遥感数据时空分辨率及其连续性、提升遥感水文大数据的处理和集成技术、提高观测变量的信噪比、进一步改进遥感反演算法和前向模型物理机制的表达、通过数据同化等技术来提高遥感水循环变量和其他学科的结合度等.

遥感水文学作为一门融合了遥感科学与技术和水文学, 以水循环变量遥感反演算法为基本内容, 以提升流域水文过程机理认识、服务流域、区域乃至全球的水资源管理为目标的新兴交叉学科的雏形已经显现. 同时, 卫星遥感技术综合了航天航空、电子信息、传感器、计算机等现代信息、通讯和测绘技术, 随着相关学科的发展, 势必会进一步促进卫星遥感技术的进一步发展和成熟, 更好地服务水文水资源的研究和应用.

参考文献

- 1 Hou A Y, Kakar R K, Neeck S, et al. The global precipitation measurement mission. *B Am Meteorol Soc*, 2014, 95: 701–722
- 2 Huffman G J, Bolvin D T, Nelkin E J, et al. The TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. *J Hydrometeorol*, 2007, 8: 38–55
- 3 Xue X, Hong Y, Limaye A S, et al. Statistical and hydrological evaluation of TRMM-based Multi-satellite Precipitation Analysis over the Wangchu Basin of Bhutan: Are the latest satellite precipitation products 3B42V7 ready for use in ungauged basins? *J Hydrol*, 2013, 499: 91–99
- 4 Yong B, Chen B, Gourley J J, et al. Intercomparison of the Version-6 and Version-7 TMPA precipitation products over high and low latitudes basins with independent gauge networks: Is the newer version better in both real-time and post-real-time analysis for water resources and hydrologic extremes? *J Hydrol*, 2014, 508: 77–87

- 5 Cherny I V, Chernyavsky G M, Nakonechny V P, et al. Spacecraft "Meteor-3M" microwave imager/sounder MTVZA: First results. In: Geoscience and Remote Sensing Symposium, Moscow, 2002. 2660–2662
- 6 Mu Q, Zhao M, Running S W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. *Remote Sens Environ*, 2011, 115: 1781–1800
- 7 Vinukollu R K, Wood E F, Ferguson C R, et al. Global estimates of evapotranspiration for climate studies using multi-sensor remote sensing data: Evaluation of three process-based approaches. *Remote Sens Environ*, 2011, 115: 801–823
- 8 Zhang K, Kimball J S, Nemani R R, et al. A continuous satellite-derived global record of land surface evapotranspiration from 1983 to 2006. *Water Resour Res*, 2010, 46: W09522
- 9 Yang Y T, Long D, Shang S H. Remote estimation of terrestrial evapotranspiration without using meteorological data. *Geophys Res Lett*, 2013, 40: 3026–3030
- 10 Long D, Longuevergne L, Scanlon B R. Uncertainty in evapotranspiration from land surface modeling, remote sensing, and GRACE satellites. *Water Resour Res*, 2014, 50: 1131–1151
- 11 Bastiaanssen W G M, Pelgrum H, Wang J, et al. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) - 2. Validation. *J Hydrol*, 1998, 213: 213–229
- 12 Su Z. The surface energy balance system (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. *Hydrol Earth Syst Sc*, 2002, 6: 85–99
- 13 Norman J M, Anderson M C, Kustas W P, et al. Remote sensing of surface energy fluxes at 10(1)-m pixel resolutions. *Water Resour Res*, 2003, 39: 1221
- 14 Carlson T N, Capehart W J, Gillies R R. A new look at the simplified method for remote-sensing of daily evapotranspiration. *Remote Sens Environ*, 1995, 54: 161–167
- 15 Jiang L, Islam S. Estimation of surface evaporation map over southern Great Plains using remote sensing data. *Water Resour Res*, 2001, 37: 329–340
- 16 Nishida K, Nemani R R, Running S W, et al. An operational remote sensing algorithm of land surface evaporation. *J Geophys Res*, 2003, 108: 4270
- 17 Moran M S, Clarke T R, Inoue Y, et al. Estimating crop water-deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sens Environ*, 1994, 49: 246–263
- 18 Zhang R H, Sun X M, Wang W M, et al. An operational two-layer remote sensing model to estimate surface flux in regional scale: Physical background. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 2005, 48: 225–244
- 19 Long D, Singh V P. A two-source trapezoid model for evapotranspiration (TTME) from satellite imagery. *Remote Sens Environ*, 2012, 121: 370–388
- 20 Long D, Singh V P. Integration of the GG model with SEBAL to produce time series of evapotranspiration of high spatial resolution at watershed scales. *J Geophys Res*, 2010, 115, doi: 10.1029/2010JD014092
- 21 Long D, Singh V P. Assessing the impact of end-member selection on the accuracy of satellite-based spatial variability models for actual evapotranspiration estimation. *Water Resour Res*, 2013, 49: 2601–2618
- 22 Long D, Singh V P, Li Z L. How sensitive is SEBAL to changes in input variables, domain size and satellite sensor? *J Geophys Res*, 2011, 116, doi: 10.1029/2011JD016542
- 23 Long D, Singh V P. A modified surface energy balance algorithm for land (M-SEBAL) based on a trapezoidal framework. *Water Resour Res*, 2012, 48, doi: 10.1029/2011WR010607
- 24 Long D, Gao Y C, Singh V P. Estimation of daily average net radiation from MODIS data and DEM over the Baiyangdian watershed in North China for clear sky days. *J Hydrology*, 2010, 388: 217–233
- 25 Yang K, Qin J, Zhao L, et al. A multiscale soil moisture and freeze-thaw monitoring network on the third pole. *B Am Meteorol Soc*, 2013, 94: 1907–1916
- 26 Kerr Y H, Waldteufel P, Richaume P, et al. The SMOS soil moisture retrieval algorithm. *IEEE Trans Geosci Remot Sen*, 2012, 50: 1384–1403
- 27 Lagerloef G, Colomb F R, Vine D L, et al. The aquarius/SAC-D mission: Designed to meet the salinity remote-sensing challenge. *Oceanography*, 2008, 21: 68–81
- 28 Naeimi V, Bartalis Z, Wagner W. ASCAT soil moisture: An assessment of the data quality and consistency with the ERS scatterometer heritage. *J Hydrometeorol*, 2009, 10: 555–563
- 29 Njoku E G, Jackson T J, Lakshmi V, et al. Soil moisture retrieval from AMSR-E. *IEEE Trans Geosci Remot Sen*, 2003, 41: 215–229

- 30 Chen Y, Yang K, Qin J, et al. Evaluation of AMSR-E retrievals and GLDAS simulations against observations of a soil moisture network on the central Tibetan Plateau. *J Geophys Res*, 2013, 118: 4466–4475
- 31 李新, 黄春林. 2002 年中国西部地区陆面数据同化数据集. 寒区旱区科学数据中心, 2007
- 32 Shi C, Xie Z, Qian H, et al. China land soil moisture EnKF data assimilation based on satellite remote sensing data. *Sci China Earth Sci*, 2011, 54: 1430–1440
- 33 Entekhabi D, Yueh S H, Neill P O, et al. *SMAP Handbook*. Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California: JPL Publication JPL 400-1567, 2014
- 34 万玮, 陈秀万, 李国平, 等. GNSS-R 遥感国内外研究进展. *遥感信息*, 2012, 3: 117–124
- 35 Larson K M, Braun J J, Small E E, et al. GPS multipath and its relation to near-surface soil moisture content. *IEEE J-STARS*, 2010, 3: 91–99
- 36 Chew C C, Small E E, Larson K M, et al. Effects of near-surface soil moisture on GPS SNR data: Development of a retrieval algorithm for soil moisture. *IEEE Trans Geosci Remot Sen*, 2014, 52: 537–543
- 37 Wan W, Larson K, Small E, et al. Using geodetic GPS receivers to measure vegetation water content. *GPS Solut*, 2014, 19:237–248
- 38 Long D, Scanlon B R, Longuevergne L, et al. GRACE satellite monitoring of large depletion in water storage in response to the 2011 drought in Texas. *Geophys Res Lett*, 2013, 40: 3395–3401
- 39 Reager J T, Famiglietti J S. Global terrestrial water storage capacity and flood potential using GRACE. *Geophys Res Lett*, 2009, 36: 195–215
- 40 Leblanc M J, Tregoning P, Ramillien G, et al. Basin-scale, integrated observations of the early 21st century multiyear drought in southeast Australia. *Water Resour Res*, 2009, 45: 546–550
- 41 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
- 42 Rodell M, Velicogna I, Famiglietti J S. Satellite-based estimates of groundwater depletion in India. *Nature*, 2009, 460: 999–1002
- 43 Scanlon B R, Longuevergne L, Long D. Ground referencing GRACE satellite estimates of groundwater storage changes in the California Central Valley, USA. *Water Resour Res*, 2012, 48, doi: 10.1029/2011WR011312
- 44 Wang X W, De Linage C, Famiglietti J, et al. Gravity recovery and climate experiment (GRACE) detection of water storage changes in the Three Gorges Reservoir of China and comparison with in situ measurements. *Water Resour Res*, 2011, 47, doi: 10.1029/2011WR010534
- 45 Wang H S, Jia L L, Steffen H, et al. Increased water storage in North America and Scandinavia from GRACE gravity data. *Nature Geosci*, 2013, 6: 38–42
- 46 Jacob T, Wahr J, Pfeffer W T, et al. Recent contributions of glaciers and ice caps to sea level rise. *Nature*, 2012, 482: 514–518
- 47 Tapley B D, Bettadpur S, Ries J C, et al. GRACE measurements of mass variability in the Earth system. *Science*, 2004, 305: 503–505
- 48 Landerer F W, Swenson S C. Accuracy of scaled GRACE terrestrial water storage estimates. *Water Resour Res*, 2012, 48, doi: 10.1029/2011WR011453
- 49 Long D, Shen Y J, Sun A Y, et al. Monitoring of droughts and floods over a large karst plateau in Southwest China from extended GRACE data. *Remote Sens Environ*, 2014, 155: 145–160
- 50 Famiglietti J S, Rodell M. Water in the Balance. *Science*, 2013, 340: 1300–1301
- 51 翟国君, 黄谟涛, 欧阳永忠, 等. 卫星测高原理及其应用. *海洋测绘*, 2002, 01: 57–62
- 52 郭华东. 雷达对地观测理论与应用. 北京: 科学出版社, 2000
- 53 Dibarboure G, Ubelmann C. Investigating the performance of four empirical cross-calibration methods for the proposed SWOT mission. *Remote Sens*, 2014, 6: 4831–4869
- 54 杨帆, 温家洪. ICESat 与 ICESat-2 应用进展与展望. *极地研究*, 2011, 23: 138–148
- 55 Abdalati W, Zwally H J, Bindshadler R, et al. The ICESat-2 laser altimetry mission. *Proceed IEEE*, 2010, 98: 735–751
- 56 文汉江, 程鹏飞. ICESAT/GLAS 激光测高原理及其应用. *长江大学学报自然科学版: 医学卷*, 2005, 5: 33–35
- 57 王毅. 国际新一代对地观测系统的发展. *地球科学进展*, 2005, 20: 980–988
- 58 崔丽娜, 谢勇, 谢金涛. MODIS 卫星遥感反演大气水概述. *石河子科技*, 2013, 6: 21–23

An overview and outlook of global water remote sensing technology and applications

TANG GuoQiang¹, LONG Di^{1,2}, WAN Wei^{1,2}, ZENG ZiYue¹, GUO XiaoLin¹ & HONG Yang^{1,2}

¹ Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

² State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Satellite-based remote sensing technology has unique advantages in the acquisition of water information with complex special-temporal characteristics, such as TRMM/GPM, SMAP, GRACE, SWOT, GRACE-II, PATH, TERRA, AQUA, and domestic environmental satellite Fengyun series, all of which offer unprecedented global remote sensing hydrology big data. In order to further promote the application of remote sensing technology in the water cycle study and water resources management, system integration and interdisciplinary research, this review will systematically introduce the international forefront of satellite remote sensing technology in global water cycle, remote sensing parameters retrieval and its potential applications in hydrology etc., focusing on precipitation, soil moisture, evapotranspiration, groundwater, surface elevation, ice, cloud and atmospheric water, and other remote sensing technologies, and will also discuss and outlook the bottleneck of their further development of global water cycle observation satellites, data assimilation, uncertainties in remote sensing retrievals.

satellite remote sensing, water cycle variation, remote sensing retrieval, present situation and prospect

doi: 10.1360/N092015-00024