

DOI:10.13203/j.whugis.20180174



文章编号:1671-8860(2018)12-1872-13

# 遥感陆地水循环的进展与展望

汤秋鸿<sup>1,2</sup> 张学君<sup>1,2</sup> 戚友存<sup>1</sup> 陈少辉<sup>1</sup> 贾国强<sup>1,2</sup> 穆梦斐<sup>1,2</sup> 杨杰<sup>1,3,4</sup>  
杨其全<sup>1,3,4</sup> 黄昕<sup>3,4</sup> 运晓博<sup>1,2</sup> 刘星才<sup>1</sup> 黄忠伟<sup>1,2</sup> 唐寅<sup>1</sup>

1 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室,北京,100101

2 中国科学院大学,北京,100049

3 武汉大学遥感信息工程学院,湖北 武汉,430079

4 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,湖北 武汉,430079

**摘要:**随着遥感技术的不断进步,许多陆地水循环的变量已经能够通过遥感定量估算。遥感方法能够提供大范围、长周期的水循环变量数据,这极大地推进了人们对陆地水循环过程的认识和理解。阐述了遥感观测陆地水循环重要变量的基本原理,回顾了陆地水循环遥感主要技术方法的重要进展和最新成果,指出下一步可能的发展方向。尽管目前遥感技术具备获取大范围水循环关键变量的能力,但是遥感估算的水循环分量还难以满足基本的水量平衡,表明当前遥感数据的水文一致性还待加强。未来遥感陆地水循环研究的发展一方面需要新型传感器和平台来提供更高精度且时空一致的观测数据,另一方面需要开展大型地面水循环同步全过程观测试验来对遥感产品进行深入评估,以促进遥感技术在陆地水循环研究中的应用。

**关键词:**遥感;陆地水循环;卫星;雷达;水平衡

**中图分类号:**P237

**文献标志码:**A

遥感技术是 20 世纪 60 年代迅速发展起来的一门综合性的探测技术,它的出现使开展大范围陆面水循环时空连续观测成为可能<sup>[1]</sup>。根据遥感原理,遥感传感器大体分为被动和主动两类,前者是直接接收物体向外发射或反射的电磁信号,而后者则需传感器主动发射电磁信号并接收物体的背向发射(或散射)。根据物体对电磁波谱具有不同反射率和不同发射率的特性,传感器可识别不同的陆地水循环变量,并对其定量估算。除电磁传感器之外,水文学家还引入微重力传感器对陆地水储量的时空变化进行大尺度观测<sup>[2]</sup>。

伴随遥感技术的不断进步,当前许多陆地水循环变量已经能够借助遥感来进行定量估算,一系列大范围、长周期的遥感水文数据产品应运而生,极大地推进了人们对陆地水循环过程的认识和理解<sup>[1]</sup>。尽管卫星遥感在大尺度陆地水循环观测中具有不错的应用前景,但遥感反演仍需大量地面观测以进行评估、验证。为此,国内外开展了一系列遥感、地面水循环同步观测实验,如国际卫星陆地表面气候学项目(first international satellite land surface climatology project, ISLSCP)<sup>[3]</sup>,

国内的黑河综合遥感联合试验<sup>[4]</sup>。此外,遥感变量的水量平衡仍是当前水文气象领域普遍关注的关键科学问题。对此,学者们在不同尺度上开展了一系列分析工作,以评估遥感产品在描述陆地水循环过程及其时空变化特征方面的一致性。

本文阐述了遥感观测降水、蒸散发、土壤水、冰雪、水体面积以及陆地水储量等重要水循环变量的基本原理,回顾了陆地水循环遥感主要技术方法的重要进展及最新的产品、成果,深入探讨遥感变量产品的水量平衡问题,指明遥感在未来陆地水循环研究中可能的发展方向。

## 1 陆地水循环变量的遥感观测

### 1.1 降水

#### 1.1.1 卫星降水

卫星降水观测是当前获取地区乃至全球范围降雨时空分布特征与变化信息最为有效的方式,其具有全时空、全天候的特点,卫星降水及融合降水产品已广泛应用于水文、气象等领域,为陆地水循环过程模拟提供了重要的数据支持<sup>[5-7]</sup>。

收稿日期:2018-09-05

项目资助:国家自然科学基金(41730645,41790424);国家杰出青年科学基金(41425002)。

第一作者:汤秋鸿,研究员,主要从事水文学及遥感水文研究。tangqh@igsr.ac.cn

卫星降水信息的获取主要来自于星载传感器对于大气中云层辐射特性的获取。在一定假设条件下,云层的辐射特性与云层的状态参量直接相关,而降雨的形成正是云层中水汽凝结沉降的过程,与云层的状态参量之间存在着内在联系,因此基于云层的辐射特性可以对降水进行反演,实现对降水的观测<sup>[8]</sup>。传感器获得的亮温数据表征了云层厚度、云顶温度、云层高度以及云膨胀率等云层状态参量,学界通常假定认为顶部温度越低、高度越高和厚度越大的云层,降雨可能性越大,同时降雨量也越多<sup>[9]</sup>。目前可见光/红外线(visible/infrared radiation, VIS/IR)信息对降水的反演已形成了云指数法和云生命史法两大主流方法,微波(microwave, MW)观测也建立了基于统计与云辐射模型的主要降水计算法<sup>[10]</sup>。

自 1960 年全球第一颗气象卫星发射成功以来,以 VIS/IR 传感器和 MW 传感器两类观测方式为基础,现已发展出多种卫星降水产品,包括搭载单一传感器的降水产品、多传感器的降雨产品及融合地面测站数据的多源降水产品<sup>[11]</sup>。1987

年,Arkin 和 Meisner 提出了基于 IR 观测反演降水的算法 GOES 降水指数(GOES precipitation index, GPI),并被应用于全球降水气候计划全球降水气候计划(global precipitation climate plan, GPCP)中<sup>[12]</sup>;2003 年,Scotfield 和 Kuligowski 建立了 Hydro-Estimator 用于 IR 降雨产品的计算<sup>[13]</sup>;1994 年,Levizzani 等人系统性地总结了微波降雨产品的估算方法<sup>[10]</sup>;1997 年,美国国家航空航天局和日本航空航天探索局合作设计并发射了用于监测和研究热带地区降水的热带降水测量卫星(tropical rainfall measuring mission, TRMM);2014 年,新一代全球降水观测计划(global precipitation measurement, GPM)开展实施。TRMM 和 GPM 的成功大大拓展了卫星降水观测在时空分辨率、时空范围和降水精度的监测能力,也推动着多源降水融合、校正等算法的发展<sup>[6]</sup>。综合卫星降水观测的发展,未来多源卫星降水数据融合、传感器性能的提升以及算法的改进都将作为进一步发展的方向。表 1 给出了当前主要的卫星降水产品及其基本信息<sup>[6,11]</sup>。

表 1 当前主要卫星降雨产品

Tab. 1 Summary of the Existing Satellite Precipitation Products

产品或算法名称	输入数据	开发机构/国家	时空分辨率	时空范围
GPI(IR 产品)	GEO-, LEO-IR	NOAA/美国	1°/d	40°N~40°S/1996—
Hydro-Estimator(IR 产品)	GEO-IR	NOAA/美国	4 km/h	60°N~60°S/2007—
GPROF2010(MW 产品)	AMSRE-E	NSDIC/美国	0.25°/d	70°N~70°S/2002—
GPROF2010(MW 产品)	TMI	NASA/美国	0.5°/3 h	40°N~40°S/1997—2015
NESDIS(MW 产品)	SSM/I	NOAA/美国	1°/月	全球/1987—2009
TRMM PR(MW 产品)	PR	NASA-GSFC/美国	0.5°/h	37°N~37°S/1997—2015
CMORPH(IR-MW 产品)	TMI, SSM/I, AMSR-E, AMSU, IR	NASA/美国	8 km/30 min	全球/2002—
PERSIANN-CCS	GridSat-B1 IR, NCEP hourly, GPCP monthly	UCI/美国	4 km/30 min	60°N~60°S/1983—
GSMaP NRT(IR-MW 产品)	TMI, SSM/I, AMSR-E, SSMIS, AMSU, IR	JAXA/日本	0.1°/1	60°N~60°S/2007—
NRL-Blend(IR-MW 产品)	SSM/I-cal PMM (IR)	NRL/美国	0.25°/3 h	60°N~60°S/2000—
TRMM3B42RT(IR-MW 产品)	HQ, MW-VAR	NASA/美国	0.25°/3 h	50°N~50°S/2005—
CMAP(IR-MW-G 产品)	OPI, SSM/I, SSMIS, GPI, MSU, gauge	NOAA/美国	2.5°/月	全球/1979—
GPCP (IR-MW-G 产品)	SSM/I-TMPI(IR), GPCP monthly	NASA/美国	1°/d	50°N~50°S/1979—
TRMM 3B42(IR-MW-G 产品)	TCI, SSM/I, AMSR-E, MW-VAR, gauge	NASA/美国	0.25°/3 h	全球/1998—
GPM Final(IR-MW-G 产品)	DPR, GMI, TMI, AMSR-E, AMSR2, SSMI, SSMIS, AMSU-B, GEO-IR, gauge, et al.	NOAA/美国	0.1°/30 min	Global/2014—

### 1.1.2 雷达降水

地面雷达提供的高时空降水观测信息有助于监测降水分布及降水强度,对水文及气象部门制定方案、采取相关措施、减轻洪涝灾害具有重要参考价值,同时能为防汛抗旱与水资源开发利用提

供强有力的气象保障。国内外众多科学家对雷达定量观测降水进行了系统性研究,并建立了雷达定量降水估计系统<sup>[14-17]</sup>。为提高雷达定量降水的估计精度,学界研究针对雷达质量控制、降水类型分类、垂直反射率扩线订正、雷达拼图 4 方面内容

展开。

1) 雷达质量控制。超折射地物是影响雷达定量探测降水和其他产品的重要因素,刘黎平等提出了基于模糊逻辑的分步式地物回波识别方法,通过调整已被严格标准识别为地物和非地物的邻近区域回波点的判据,来减小地物的漏判和降水回波的误判<sup>[18]</sup>;Tang等基于双偏振雷达观测(反射率、相关系数)及模式分析场资料(温度场),提出了非降水回波识别的质量控制算法,目前应用于美国大气海洋局天气服务中心<sup>[19]</sup>。

2) 降水类型分类。由于雷达观测降水所得到的反射率强度与降水粒子直径的6次方成正比,这表明反射率强度相同的降水并不能推导出其降雨强度也相同的结论<sup>[20-22]</sup>。若要通过雷达观测的反射率值准确地估算出地面降水,需研究不同区域不同类型降水的微物理过程及降水粒子的滴谱分布,通过降水粒子的特征研究,对降水进行分类,这可以从降水类型方面提高雷达定量降水估计的准确度。Xu等通过计算以雷达为中心20~80 km范围内的垂直反射率廓线(vertical profile reflectivity, VPR),并结合模式零度高度来识别热带暖云降水<sup>[23]</sup>;Zhang和Qi通过计算垂直水汽含量(vertically integrated liquid water, VIL),将降水类型分为层状云降水( $VIL < 6.5$ )和对流云降水( $VIL \geq 6.5$ )<sup>[24]</sup>;Qi等通过计算出垂直水汽含量,并结合组合反射率场、 $-10^{\circ}\text{C}$ 高度反射率场及 $0^{\circ}\text{C}$ 高度场识别出对流云降水核区。基于对流云降水核区,通过区域增长法识别出整个对流云降水区域和层状云降水<sup>[25]</sup>。

3) 垂直反射率扩线订正。从垂直方向上考虑降水粒子变化,地面雷达观测大致可将降水粒子在垂直方向上分为3个区,即冰区、亮带区及雨区。为去除亮带区与冰区给雷达定量降水估计带来的误差,学界提出了很多用于减少误差的算法<sup>[24, 26-27]</sup>。肖艳娇等提出了一个计算复杂的逆方案,其借助两个仰角的数据在一个雷达扫描平面内反演出一个平均态VPR,以用来滤去雷达采样的影响(雷达波束的宽度是径向距离的函数)<sup>[26]</sup>;黄旋旋等利用雷达垂直反射率因子廓线改进复杂地形下台风降雨,该方法通过全局与区域最优拟合的VPR获取近地面的最优反射率<sup>[27]</sup>;Zhang和Qi提出了一种仰角VPR订正方法,该方法是一种结合平均柱VPR和理想参数化VPR的订正方案,该方案可以自动考虑雷达电磁波束的影响,并且可以一定程度上准确地把握降水垂直结构的时空变化,同时又具有很高的

计算效率,易于在实时业务中进行运用推广<sup>[24]</sup>。

4) 雷达拼图。肖艳娇和刘黎平借助多雷达反射率网格资料推导出三维空间拼图,其中距离指数权重平均法能提供空间连续的三维反射率拼图数据。拼图法也减轻了由雷达波束几何学引起的各种问题<sup>[28]</sup>。Zhang等测试了近邻法、最大值法和权重平均法等3种三维拼图技术<sup>[29]</sup>。近邻法取最近雷达观测,但这会导致两个雷达之间存在不连续;最大值法在同一个点多雷达观测取最大反射率强度,但这会导致高估偏差;权重平均法通过垂直和水平方向距离反比作为权重将同一个点多雷达观测融合到一起,取加权平均得到的反射率值作为该格点的拼图值。上述方法使邻近雷达测得的数据间拼合平滑,但由于某些邻近雷达观测的标定问题,导致雷达拼图值产生高估或低估的偏差<sup>[29]</sup>。Langston等提出了四维雷达拼图方案,该方案在Zhang等的三维拼图方案基础上加入时间维度,给予最新的雷达观测数据较高的权重,这将会减小快速移动风暴的位置偏差<sup>[30]</sup>;Tabary等提出了一种线性加权拼图方法,该线性权重是基于地物识别、反射率降水转换、雷达电磁波束遮挡订正和VPR订正等计算得到的质量指数<sup>[31]</sup>;Qi和Zhang提出了一种基于雷达电磁波遮挡的拼图方法,该方法成功去除了云毡的影响,并在一定程度上减少了雨区、亮带区及冰区的相互干扰<sup>[32]</sup>。但现有研究未能引入双偏振雷达观测信息,也难以完全消除雨区、亮带区及冰区的相互干扰。

## 1.2 蒸散发

蒸散是地表水和生态水吸热相变向大气扩散的水通量,包括植被蒸腾、土壤蒸发和冠层截流蒸发,是连接水循环与能量循环的纽带,也是影响气候变化的重要因素<sup>[33]</sup>。当前,遥感传感器尚不能直接观测地表蒸散,但借助测量诸如地表温度、比辐射率、地表类型、地表反照率、植被指数、植被覆盖率等与蒸散密切相关的地表参量,将这些参量输入到遥感蒸散模型,并结合地面气象观测,能够估算出地表蒸散<sup>[34-35]</sup>。

遥感蒸散模型大致可以分为4类:

1) 经验模型,依据地面观测数据和遥感数据之间的经验关系估算蒸散。

2) 基于彭曼-蒙特斯(Penman-Monteith, PM)公式和普里斯特利-泰勒(Priestley-Taylor, PT)公式的遥感化模型,通过将PM水汽阻抗和PT系数用叶面积指数遥感化,结合地面台站实测的温湿度资料,实现地表蒸散估算。

3) 基于地表能量平衡的模型,如陆表能量平衡算法(surface energy balance algorithm for land, SEBAL)、表面能平衡系统(surface energy balance system, SEBS)、双源能量平衡(two-source energy balance, TSEB)、像素量排序对比算法(pixel component arranging and comparing algorithm, PCACA)、TACOM 热像模型(TACOM thermal image model, TTIM)等,先计算地表净辐射、土壤热通量和显热通量,再将地表蒸散作为能量平衡方程的余项而得到。

4) 基于特征空间的模型,依据植被指数/植被覆盖度/增强型植被指数等和地表温度/地气温差组成的梯形空间能够表征土壤水分差异的特点,通过计算蒸发比或波文比,切割地表可利用能量估算地表蒸散<sup>[36]</sup>。

基于这些遥感模型已开发的代表性蒸散产品包括:

1) 基于中分辨率成像光谱仪(moderate-resolution imaging spectroradiometer, MODIS)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/月/年,数据时间跨度为 2000 年至当前<sup>[37]</sup>;

2) 基于美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)的改进型高分辨率辐射仪(advanced very high resolution radiometer, AVHRR)的全球蒸散产品,空间分辨率为 8 km,时间分辨率为月,时间跨度为 1983—2006 年<sup>[38]</sup>;

3) 基于遥感信息和再分析气象数据,利用 SEBS、PM-Mu 和 PT-Fi 模型,生产了 1986—1993 年全球 1°分辨率的月值蒸散产品和 2003—2006 年全球 5 km 空间分辨率的日蒸散产品<sup>[39]</sup>;

4) 基于微波土壤水分和植被光学厚度构建的全球土地蒸发模型(global land evaporation amsterdam model, GLEAM),现有 1980—2016 年全球尺度 0.25°空间分辨率的陆表蒸散产品<sup>[40]</sup>。

遥感蒸散未来的发展方向包括以下几个方面:

1) 蒸散估算中水汽源的盲处理。当前,遥感蒸散模型普遍忽略了平流存在的影响。如何简单地量化局地蒸散成分以提高能量平衡的闭合率,气象要素与蒸散间的耦合机制等问题尚需深入思考与进一步的研究。

2) 遥感蒸散时间尺度扩展。遥感的瞬时性以及云干扰是遥感估算时空连续蒸散的主要障碍,同化多源遥感信息已成为连接遥感蒸散理论与实

际应用的重要桥梁<sup>[41]</sup>。

3) 真实性检验。遥感蒸散的验证涉及到像元尺度蒸散的地面测量,而现有技术水平难以实现,而常用的涡度相关及大孔径闪烁仪观测存在能量不闭合问题。如何有效验证异质下垫面的遥感蒸散结果是遥感蒸散方法面临的难题。

4) 地面气象要素的遥感估算。遥感蒸散模型尚依赖地面气象数据,无资料地区气象数据的可获得性已成为限制遥感蒸散的重要因素,发展新的遥感方法以估算相关气象要素是提高遥感蒸散模型实用性的重要途径。

### 1.3 土壤水

土壤水分的遥感估算是通过土壤表面发射或反射的电磁能量或反演量,研究遥感信息与土壤湿度间的关系,对不同波段的像元亮度值与土壤水分之间的线性/非线性关系进行拟合,建立土壤湿度与遥感数据间的信息模型,从而估算土壤水分<sup>[42-43]</sup>。土壤水分时空分布与土壤及其土表植被的光谱反射特性或发射特性间的物理联系是遥感估算土壤水分的基础,这为区域和全球尺度土壤水分的获取提供了有效途径<sup>[44]</sup>。

按遥感测量手段的不同可分为光学遥感、主动微波、被动微波及多传感器联合 4 类。

1) 光学遥感法。利用土壤表面光谱反射特性或发射率或表面温度来估算土壤水分,主要分为基于指数和土壤热惯量的方法。

2) 主动微波法。通过发射的微波信号与地表相互作用后的回波信号获取地表后向散射系数,以地表介电常数为媒介与土壤水分发生联系,可分为经验模型、物理模型和半经验模型。

3) 被动微波。利用微波辐射计对地表本身发射的微波辐射进行测量来监测土壤水分,包括数理统计法、正向模型法和神经网络法。

4) 多传感器联合,即协同光学法、被动微波和主动微波法弥补单一传感器算法存在的不足<sup>[45-46]</sup>。

目前已有的土壤水分遥感产品包括 L 波段微波卫星产品土壤水分和海洋盐度卫星(soil moisture and marine salinity satellite, SMOS)(43 km)、Aquarius(100 km)、C 波段微波卫星产品(advanced scatterometer, ASCAT)(25 km)、多波段组合卫星产品改进型地球观测微波扫描系统(advanced microwave scanning radiometer-earth observing system, AMSR-E)(60 km)、基于全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)的土壤水分观测<sup>[33, 47]</sup>、土壤湿度主/

被动探测卫星(soil moisture active and passive, SMAP)<sup>[48]</sup>等。

土壤水分遥感监测虽已取得了巨大进步,但由于遥感数据与土壤水分关系的复杂性,还有以下几方面研究有待加强。

1)土壤表层水分与深层水分的关系。目前,各种方法只能监测土壤表层的湿度状况,但深层土壤水分更具实际意义,需要通过遥感建立表层土壤水分与深层土壤水分的模型<sup>[47]</sup>。

2)监测方法的适用性有待提高。目前适用于任意植被覆盖的方法还很少,且遥感信息与土壤水分的关系受到辐射传输等多种因素的影响,地表高度异质性影响了监测的精度和时效性<sup>[49]</sup>。

3)地表物理量反演精度问题。遥感监测土壤水分通常建立反演参量与水分的关系式,因此,基于混合像元的定量遥感推算地表参数的精度直接关系到监测的效果。

4)模型优化与融合。各种监测方法均有优缺点,多种方法联合可整合各种算法的优势,提高土壤水分估算的时空精度<sup>[50]</sup>,有助于实现全球土壤水分动态的遥感业务化监测。

#### 1.4 冰与积雪

冰雪广泛分布于全球高纬度、高海拔地区,在气候变化、地表辐射平衡与能量交换、水资源利用等方面中发挥着重要作用<sup>[51]</sup>。经过几十年的发展,利用遥感技术反演积雪参数(积雪范围、雪深、雪水当量等)已形成了相对成熟的思路与完整的体系。按照遥感方式,积雪遥感可分为光学遥感和微波遥感两大类,其中微波遥感又分被动和主动两类。

光学遥感是利用积雪在可见光波段反射率高、在短波近红外波段吸收率高,易与其他地物相区别的光谱特性,提取积雪范围等关键参数<sup>[52]</sup>。早期的光学卫星常存在过境时间长、空间分辨率较低等问题,难以用于雪情大范围快速监测<sup>[53]</sup>。搭载在 Terra 和 Aqua 卫星上的 MODIS 提供了多种波段,能有效缓解光学遥感时空分辨率低的问题<sup>[54]</sup>。目前,美国国家冰雪数据中心发布了 MODIS 全球逐日积雪产品 MOD10A1 与 MOD10A2,其空间分辨率为 500 m<sup>[55]</sup>。由于积雪和云在可见光波段具有相似的反射特性,如何区别积雪和云仍是光学遥感技术面临的一个难题<sup>[56]</sup>。将光学积雪遥感产品进行多日合成,可有效去除云的干扰,但产品的时间分辨率随之也将降低<sup>[57]</sup>;另有部分研究尝试利用多光谱分析对云像素进行重现分类以消除云污染<sup>[56]</sup>。

被动微波遥感的基本原理是基于传感器不同通道接收辐射亮温值辨识地表积雪的有无并估算相应的雪深<sup>[58]</sup>。被动微波传感器可穿透云层,进行全天时全天候积雪观测,克服了光学遥感区分积雪和云的难题<sup>[59]</sup>。目前,美国国家冰雪数据中心发布了基于 AMSR-E 反演的全球逐日雪水当量产品<sup>[60]</sup>,但此类产品的空间分辨率普遍偏低(25 km)。地表微波亮温易受雪的粒径、密度、降水、植被、冻土等因素的影响,这导致被动微波在林区(植被覆盖度高)或山区(地形复杂)的反演结果存在较大不确定性。此外,被动微波遥感仍无法解决湿雪反演的问题,即当积雪表面存在液态水时,微波传感器难以准确地估算水面之下的雪深<sup>[56]</sup>。相对而言,主动微波传感器能够提供更高空间分辨率(25 m)的积雪信息,但当前适用于积雪探测的主动微波传感器数目仍较少<sup>[53]</sup>;与此同时,受制于入射角度,主动微波技术仍难以有效区分湿雪和无雪地面间的差异。

将光学遥感与被动微波遥感相结合,充分发挥两者的优势,发展综合的积雪产品,成为当前积雪遥感研究的发展趋势<sup>[61]</sup>。目前,国际上已开发了一系列融合多源传感器数据的算法及相关积雪产品<sup>[62-63]</sup>。基于交互式多传感器雪冰测量系统(interactive multi-sensor snow and ice mapping system, IMS),NOAA 每天发布全球 4 km × 4 km 不受云雾等天气状况影响的积雪图<sup>[64]</sup>。随着不同传感器系统的相继出现及时空分辨率的逐步提高,未来需进一步加强多源数据(包含不同传感器、地面观测等)的融合研究,取长补短,提高积雪遥感反演的精度。

#### 1.5 地表水

地表水是自然界中活跃的元素之一,其分布和驻留受到环境和人类的影响<sup>[65]</sup>,同时也影响着环境、生物和人类健康。地表水面积是遥感观测得到的最直观的物理量,也是遥感信息提取重要的应用之一。由于水体和其他地物对太阳辐射的反射、吸收和透射特性不同,水体在遥感影像上与其他地物差异较明显<sup>[66-67]</sup>。在光学遥感影像中,水体的光谱特性主要表现为两点:①在近红外波段表现出较低的反射率;②水体比热容较高,温度变化较其他地物小。

结合水体光谱特征,学者们提出了许多水体指数,McFeeters 提出归一化差分水体指数(normalized differential water index, NDWI)参数,利用多光谱影像中绿和近红外波段的归一化比值指数来增强影像中水体的信息<sup>[68]</sup>;徐涵秋通过改变

波段组合提出了改进型归一化差分水体指数(modified normalized differential water index, MNDWI),使得水体和阴影更容易区分<sup>[69]</sup>。通过对指数法提取的水体特征进行阈值分割能较为准确地提取出水体,但是分割时难以确定的阈值使此法不具有普适性。随着遥感影像空间分辨率的提高,空间特征也被引入到水体提取中:纹理、形态学和空间变换等特征结合边缘提取、面向对象分割、决策树、支持向量机、神经网络等图像分割、分类算法,中高分辨率影像的水体信息也得以有效提取<sup>[70-73]</sup>。影像资料的积累和计算机处理能力的提示使得全球尺度的水体面积提取也逐渐实现,Donchyts 等<sup>[74]</sup>利用云计算平台 Google Earth Engine<sup>[75]</sup>,分析了近 30 年地球内陆地表水的变化;Pekel 等同样使用该平台提取了 Landsat 卫星 300 万景影像中的水体,首次揭示了内陆地表水在过去 30 年的分布及变化<sup>[76]</sup>。同时地表水卫星图像的应用领域也在被不断拓宽。Trochim 等<sup>[77]</sup>借助机器学习的随机森林算法,通过输入光谱分类、纹理与地形进行了识别训练以识别出卫星图像中的河道水迹,并取得了较好效果;Hugue 等<sup>[78]</sup>基于卫星影像对河流进行识别,并推算出河流不同流段的水力模型参数,这进一步扩展了地表水监测的适用范围。

目前遥感水体信息提取已取得较好的精度和许多应用性成果,但是遥感水体面积提取的精度与时变信息难以兼顾,如何实时监测水体高精度动态变化是目前待解决的问题。相信随着高分辨率卫星相继发射、多源传感器组合、星座模式缩短重访周期,大范围、快速的水体信息自动提取将逐步实现,云计算和人工智能技术同样也会给遥感水体信息应用注入新的活力。

## 1.6 水储量

全球范围内,大部分的淡水储存在大型湖泊与水库之中<sup>[79]</sup>,因此借助卫星遥感工具对湖泊与水库等地表储水体进行长期统一观测与评估,有助于为全球天气预报、地球系统建模、水资源管理规划等研究提供有效支持。

重力反演与气候实验(gravity recovery and climate experiment, GRACE)卫星是第一组(包括两颗卫星)可以观测陆地水储量变化的卫星,从 2002 年 3 月 17 日发射以来,每 30 d 产生一张全球重力分布图,用于研究地球重力场变化、陆地水储量变化等<sup>[1]</sup>。GRACE 卫星可以提供全球尺度、连续时间的陆地水储量观测资料,为水文水资源相关研究提供了更多机遇。在排除其他因素的

影响后,可以认为地球重力场的变化主要由陆地水储量的变化引起<sup>[80]</sup>,因此还可以根据 GRACE 的重力场变化信号反演得到包含地表水、地下水、土壤含水量在内的陆地水储量的总变化。但由于其空间分辨率较低(400~40 000 km),目前仅局限于全球尺度、区域尺度或大流域尺度(如亚马逊流域)的研究。此外,考虑到 GRACE 卫星历史数据长度仅有 10 余年,且超过 5 年服役期后的数据精度有一定下降,出现较多缺测值<sup>[81]</sup>。2018 年 5 月,GRACE 的第二代卫星(GRACE follow-on, GRACE-FO)成功发射升空,将继续监测涵盖冰川冰盖、地下水储量、湖泊水库水储量、海平面变化等数据在内的全球水资源变化。GRACE-FO 将为陆地水储量的相关研究提供更多宝贵的遥感监测资料。

而将于 2021 年 4 月发射的地表水和海洋地形(surface water and ocean topography, SWOT)卫星<sup>[82]</sup>,其中一个很重要的设计目标是监测地表水储量和通量。SWOT 将是首颗对全球地表水资源进行执行监测的卫星,可以监测水体面积在 0.06 km<sup>2</sup> (250 m×250 m) 以上的水储量变化,误差小于 5%<sup>[83-84]</sup>。SWOT 提供的地表水数据将促进对陆地水循环的理解,提升在全球尺度上估算湖泊、水库、河流等地表水体的储量和通量的能力。通过同化 SWOT 提供的数据和水文模型结果,还可以提高地表水体储量的精确程度。

受限于当前卫星遥感的精度,学界监测水体储量的研究热点主要集中在大型湖泊与水库上<sup>[79]</sup>。Gao 等<sup>[85]</sup>选取了全球 34 个大型水库,并假设水库截面形状为梯形,给出库容计算式为:

$$V = V_c - (A_c + A)(h_c - h)/2 \quad (1)$$

式中, $V$ 、 $A$ 、 $h$  分别是实际库容、水面面积和高程; $V_c$  是水库总库容; $A_c$ 、 $h_c$  分别是总库容对应的最大水面面积和高程。利用 MODIS 提供的标准化差值植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)数据来推算水面面积变化(1990—2010),结合测高卫星提供的同一观测时段的高程变化数据,假设两者是线性关系,即可以得到  $A = f(h)$ ,代入式(1),即可得到库容-面积曲线  $V = g_1(A)$  或库容-高程曲线  $V = g_2(h)$ 。利用此曲线,结合遥感监测的水面面积或高程变化,便可以计算出水库水储量的历史变化。

基于相同的原理,Zhang 等利用 MODIS 提供的水面面积变化、地理激光测高系统(geoscience laser altimeter system, GLAS)提供的地表高程和冰、云与陆地高程卫星(ice, cloud, and land

elevation satellite, ICESat)提供的水面高程变化,反演了2000—2012年东南亚21个水库的历史库容变化<sup>[86]</sup>;Keys等<sup>[87]</sup>采用与Zhang等相同的数据方法,对热带区域的10个大型表层水体进行了扩展。以上3个研究的时间分辨率受限于MODIS为16 d。Zhang等假设水库的库容-高程-面积曲线已知,利用被动微波遥感的优势,反演出高时间分辨率(4 d)、不受天气条件影响的水库面积变化,从而得到库容变化<sup>[88]</sup>。

Politi等<sup>[89]</sup>基于改进型轨道遥感卫星(advanced along track scanning radiometer, AATSR)与ERS-2轨道遥感卫星(ERS-2 along track scanning radiometer, ATSR2)监测数据提出GloboLakes项目,对近18年世界范围内多个湖泊生态系统进行综合研究与分析,建立起一套监测960个重点湖泊、泻湖和水库水储量与水面积的监测数据库。

基于卫星遥感展开的大型湖泊与水库水储量研究方法已较为全面。受限于遥感数据的分辨率与采样周期,针对小面积水体的储水量监测与全球范围内兼顾高精度与高时间分辨率的研究略显乏力。伴随着新传感器技术的发展与多组监测卫星的发射,制约全球水储量研究的瓶颈将逐渐解开。

## 2 遥感变量的水量平衡

随着各类遥感定量观测产品的出现,遥感陆地水循环变量的水量平衡问题成为学者们普遍关注的重要科学问题。McCabe等评估了遥感降雨、蒸散发和土壤水产品在美国亚利桑那地区的水文一致性<sup>[90]</sup>,发现遥感变量在当地具有较好的水文一致性,能够合理反映流域水循环过程,但该研究的尺度较小且只关注夏季季风期。在此之后,研究的焦点逐渐转向遥感产品在大尺度上的水平衡问题,其基本思路是:将遥感降雨( $P$ )、蒸散发( $ET$ )和陆面水储量变化( $\Delta S$ )产品代入水量平衡公式 $\Delta S = P - ET - Q$ 估算径流量( $Q$ ),通过对比估算径流( $Q$ )与对应的观测径流,评估遥感 $P$ 、 $ET$ 、 $\Delta S$ 能否闭合观测径流。基于以上思路,Sheffield等评估了TRMM和CMORPH(CPC morphing technique)降雨、MODIS  $ET$ 、GRACE陆地水储量变化在密西西比河流域的水量闭合状况,发现基于三者估算的径流明显高于对应的观测径流,这主要是由遥感对降雨的明显高估导致的<sup>[91]</sup>;随后,Gao等以遥感降雨、蒸散发和陆地水

储量产品为研究对象,借助水量平衡法估算美国大河流域的径流,发现遥感测得的降雨普遍存在高估偏差,而遥感蒸散发和陆地水储量的变化则存在低估的偏差,最终导致估算的径流量明显高于实测径流<sup>[92]</sup>。尽管在长时间尺度(年或季节)或一些降雨稀少的地区(如西澳大利亚中部地区),遥感产品具有闭合陆地水循环的潜力<sup>[93]</sup>,但对全球多条大河的评估表明,仅依赖于遥感反演产品难以实现流域内的水量收支平衡<sup>[94-96]</sup>。

总结以往研究,尽管遥感产品在某些特定地区和特定时段具有不错的水文一致性,但反演算法过于简单、不同变量产品时空尺度不一致等因素带来的误差,致使当前卫星遥感产品在大尺度水循环过程中仍难以满足基本的水量平衡。

## 3 结 语

当前,基于不同遥感方法的陆地水循环变量的遥感观测产品已广泛用于陆地水循环研究。这些遥感陆地水循环变量产品包括TRMM和GPM全球降雨产品、基于MODIS反演的全球蒸散发产品(MOD16)和积雪产品、基于AMSR-E反演的全球土壤水和雪水当量产品、基于GRACE重力卫星的全球陆地水储量变化产品等,极大提升了人们对陆地水循环过程的全面认识与理解。然而,当前遥感数据的水文一致性仍存在较大问题。在不同尺度上,遥感降雨、蒸散发、陆地水储量变化与径流仍难以满足基本的水量平衡公式。遥感反演算法过于简单而带来的变量估算误差、传感器类型不同而引起的变量时空尺度不一致等是影响遥感变量水文一致性的重要因素。

一方面,未来遥感陆地水循环研究的发展需要新型传感器和平台、更先进的反演算法来提供更高精度且时空一致的观测数据。例如,在传感器方面,通过发展新型长波传感器及与之相关的天线技术,获取植被覆盖下的深层土壤水信息;通过改进卫星基线,提高GRACE水储量产品的空间精度;通过提高不同传感器间的时空一致性,降低某些水文变量(如蒸散发,需综合多个传感器反演产品计算而得)的估算误差;在反演算法方面,通过加强遥感反演的机理研究,提高反演算法的物理性;此外,通过改进反演算法中的一些基于小区域采样估算的参数(如土壤水反演算法中的植被参数、雪水当量反演算法中的雪粒参数),提高算法在大尺度上的适用性。目前,国际上有一系

列陆地水循环变量观测卫星近期发射升空或计划发射,包括 GRACE-FO、SWOT 以及中国的全球水循环观测卫星<sup>[97]</sup>。这些新的传感器和平台的运行将极大地推进遥感陆地水循环研究。

另一方面,未来遥感陆地水循环研究的发展需要开展大型地面水循环同步全过程观测试验对遥感产品进行深入评估,进一步促进遥感技术在陆地水循环研究中的应用。例如,在中国典型的内陆河流域——黑河流域开展的“黑河综合遥感联合试验”发展了一套多尺度、高质量的综合观测数据集,有力支持了定量遥感模型的发展、改进和验证<sup>[4]</sup>。

### 参 考 文 献

- [1] Tang Q, Durand M, Lettenmaier D P, et al. Satellite-based Observations of Hydrological Processes [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, 31(14): 3 661-3 667
- [2] Tapley B D, Bettadpur S, Ries J C, et al. GRACE Measurements of Mass Variability in the Earth System[J]. *Science*, 2004, 305(5683):503-505
- [3] Sellers P J, Hall F G, Asrar G, et al. An Overview of the First International Satellite Land Surface Climatology Project (ISLSCP) Field Experiment (FIFE) [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1992, 97(D17):18 345-18 371
- [4] Li Xin, Li Xiaowen, LI Zengyuan, et al. Progresses on the Watershed Allied Telemetry Experimental Research (WATER) [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2012, 27(5): 637-649(李新, 李小文, 李增元, 等. 黑河综合遥感联合实验研究进展:概述[J]. *遥感技术与应用*, 2012, 27(5): 637-649)
- [5] Arthur Y H, Ramesh K K, Steven N, et al. The Global Precipitation Measurement Mission [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2014, 95(5): 701-722
- [6] Tang Guoqiang, Wan Wei, Zeng Ziyue, et al. An Overview of the Global Precipitation Measurement (GPM) Mission and Its Latest Development [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2015, 30(4):607-615(唐国强, 万玮, 曾子悦, 等. 全球降雨测量(GPM)计划及其最新进展综述[J]. *遥感技术与应用*, 2015, 30(4):607-615)
- [7] Kenneth J T, Marvin E B. Satellite Precipitation Products and Hydrologic Applications [J]. *Water International*, 2014, 39(3):360-380
- [8] Kidd C, Levizzani V. Status of Satellite Precipitation Retrievals [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15(5):1 109-1 116
- [9] Barrett E C, Beaumont M J. Satellite Rainfall Monitoring: An Overview [J]. *Remote Sensing Reviews*, 1994, 11(1):23-48
- [10] Levizzani V, Amorati R, Meneguzzo F. A Review of Satellite Based Rainfall Estimation Methods [OL]. <http://satmet.isac.cnr.it/papers/MUSIC-Rep-Sat-Precip-6.1.pdf>, 2002
- [11] Francisco J T, Turk F J, Walt P, et al. Global Precipitation Measurement: Methods, Datasets and Applications [J]. *Atmospheric Research*, 2012, 104-105(1):70-97
- [12] Arkin P A, Meisner B N. The Relationship Between Large-Scale Convective Rainfall and Cold Cloud over the Western Hemisphere During 1982—1984 [J]. *Monthly Weather Review*, 1987, 115 (115):51
- [13] Scofield R A, Kuligowski R J. Status and Outlook of Operational Satellite Precipitation Algorithms for Extreme-Precipitation Events [J]. *Monthly Weather Review*, 2003, 18(6):1 037-1 051
- [14] Yang Hongping, Wan Rong, Shi Yan, et al. Three-Radar Combined Inversion Precipitation Analysis of “6. 30” Heavy Rainfall in the Huaihe River Basin [C]. *Meteorological Science and Technology Innovation and Atmospheric Science Development in the New Century: Chinese Meteorological Society, Meeting of the “03. 7 Huaihe Dashui Hydrometeorology” Subcommittee*, Beijing, China, 2003(杨洪平, 万蓉, 石燕, 等. 淮河流域“6. 30”暴雨过程的三部雷达联合反演降水分析 [C]. *新世纪气象科技创新与大气科学发展——中国气象学会 2003 年年会“03. 7 淮河水文气象学问题”分会*, 北京, 2003)
- [15] Liu Xiaoyang, Yang Hongping, Li Jiantong, et al. The Preliminary Evaluation of the Accuracy of the New-generation Weather Radar Quantitative Precipitation System (QPEGS) [C]. *The Meteorological Comprehensive Detection Technology Subcommittee of the 2007 Annual Meeting of the Chinese Meteorological Society*, Guangzhou, China, 2007(刘晓阳, 杨洪平, 李建通, 等. 新一代天气雷达定量估测降水系统(QPEGS)精度初评 [C]. *中国气象学会 2007 年年会气象综合探测技术分会*, 广州, 2007)
- [16] Zhang J, Howard K, Langston C, et al. National Mosaic and Multi-Sensor QPE (NMQ) System: Description, Results, and Future Plans [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2015, 92 (92):1 321-1 338
- [17] Zhang J, Howard K, Langston C, et al. Multi-Radar Multi-Sensor (MRMS) Quantitative Precipita-

- tion Estimation: Initial Operating Capabilities[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2016
- [18] Liu Liping, Wu Linlin, Yang Yinming. Establishment and Effect Analysis of Step-by-Step Echo Recognition Method Based on Fuzzy Logic for Terrestrial Superrefractors [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2007, 65(2): 42-52, 65(刘黎平, 吴林林, 杨引明. 基于模糊逻辑的分步式超折射地物回波识别方法的建立和效果分析[J]. *气象学报*, 2007, 65(2): 42-52, 65
- [19] Tang L, Zhang J, Langston C, et al. A Physically Based Precipitation-Nonprecipitation Radar Echo Classifier Using Polarimetric and Environmental Data in a Real-Time National System[J]. *Weather & Forecasting*, 2014, 29(5): 1 106-1 119
- [20] Zhang Peichang, Lin Binggan, Wang Dengyan, et al. Optimization of the Z-R Relationship and Its Accuracy in the Determination of Precipitation [J]. *Journal of the Meteorologica Sinica*, 1992, 12(3): 333-338(张培昌, 林炳干, 王登炎, 等. 最优化法求 Z-R 关系及其在测定降水量中的精度[J]. *气象科学*, 1992, 12(3): 333-338)
- [21] Liu Juan, Song Zizhong, Liu Dongfeng, et al. Group Z-R Relationship and Its Application in Radar Rainfall Measurement in the Huaihe River Basin [J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 1999, 19(2): 213-219(刘娟, 宋子忠, 刘东风, 等. 分组 Z-R 关系及其在淮河流域雷达测雨中应用[J]. *气象科学*, 1999, 19(2): 213-219)
- [22] Wang Ying, Feng Yerong, Cai Jinhui, et al. Radial Quantitative Precipitation Z-I Relationship Estimation Method[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2011, 27(4): 601-608(汪瑛, 冯业荣, 蔡锦辉, 等. 雷达定量降水动态分级 Z-I 关系估算方法[J]. *热带气象学报*, 2011, 27(4): 601-608)
- [23] Xu X, Howard K, Zhang J. An Automated Radar Technique for the Identification of Tropical Precipitation[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2008, 9(5): 885-902
- [24] Zhang J, Qi Y C. A Real-Time Algorithm for the Correction of Brightband Effects in Radar-derived QPE[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2010, 11(5): 1 157-1 171
- [25] Qi Y, Zhang J, Zhang P. A Real-Time Automated Convective and Stratiform Precipitation Segregation Algorithm in Native Radar Coordinates[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2013, 139(677): 2 233-2 240
- [26] Xiao Yanjiao, Liu Liping, Li Zhonghua, et al. Automatic Detection and Suppression of Bright Bands in Radar Reflectivity Data[J]. *Plateau Meteorology*, 2010, 29(1): 197-205(肖艳娇, 刘黎平, 李中华, 等. 雷达反射率因子数据中的亮带自动识别和抑制[J]. *高原气象*, 2010, 29(1): 197-205)
- [27] Huang Xuanxuan, Zhu Kefeng, Zhao Kun. Improvement of Typhoon Precipitation Estimation Accuracy Under Complex Terrain Using Radar Reflectivity Factor Vertical Profiles [J]. *Meteorological Monthly*, 2017, 43(10): 1 198-1 212(黄旋旋, 朱科锋, 赵坤. 利用雷达反射率因子垂直廓线改进复杂地形下的台风降水估测精度[J]. *气象*, 2017, 43(10): 1 198-1 212)
- [28] Xiao Yanjiao, Liu Liping. Research on Three-dimensional Lattice Point and Puzzle Method of Weather Radar Network Data of New Generation [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2006, 64(5): 647-656(肖艳娇, 刘黎平. 新一代天气雷达网资料的三维格点化及拼图方法研究[J]. *气象学报*, 2006, 64(5): 647-656)
- [29] Zhang J, Howard K, Gourley J J. Constructing Three-Dimensional Multiple-Radar Reflectivity Mosaics: Examples of Convective Storms and Stratiform Rain Echoes[J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2005, 22(1): 30-42
- [30] Langston C, Zhang J, Howard K. Four-Dimensional Dynamic Radar Mosaic[J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2007, 24(5): 776-790
- [31] Tabary P. The New French Operational Radar Rainfall Product. Part I: Methodology[J]. *Weather & Forecasting*, 2007, 22(3): 393-408
- [32] Qi Y, Zhang J. A Physically Based Two-Dimensional Seamless Reflectivity Mosaic for Radar QPE in the MRMS System[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2017, 18(5): 1 327-1 340
- [33] Tang Guoqiang, Long Di, Wan Wei, et al. An Overview and Outlook of Global Water Remote Sensing Technology and Applications[J]. *Scientia Sinica*, 2015, 45: 1 013-1 023(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[J]. *中国科学: 技术科学*, 2015, 45: 1 013-1 023)
- [34] Luo X, Chen J M, Liu J, et al. Comparison of Bigleaf, Two-Big-Leaf and Two-Leaf Upscaling Schemes for Evapotranspiration Estimation Using Coupled Carbon-water Modelling [J]. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 2018, DOI: 10.1002/2017JG003978
- [35] Wagle P, Bhattarai N, Gowda P H, et al. Performance of Five Surface Energy Balance Models for Estimating Daily Evapotranspiration in High Biomass Sorghum[J]. *Journal of Photogrammetry &*

- Remote Sensing*, 2017, 128:192-203
- [36] Yang Yongmin, Li Lu, Pang Zhiguo, et al. A Remote Sensing Evapotranspiration Model for Land Based on the Theoretical Trapezoid Space[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2016, 31(2):324-331(杨永民, 李璐, 庞治国, 等. 基于理论参数空间的遥感蒸散模型构建及验证[J]. 遥感技术与应用, 2016, 31(2): 324-331)
- [37] Mu Q Z, Zhao M S, Running S W. Improvements to a MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration Algorithm [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(8):1 781-1 800
- [38] Zhang K, Kimball J S, Nemani R R, et al. A Continuous Satellite-derived Global Record of Land Surface Evapotranspiration from 1983 to 2006[J]. *Water Resources Research*, 2010, 46: W09522
- [39] Vinukollu R K, Meynadier R, Sheffield J, et al. Multi-model, Multi-sensor Estimates of Global Evapotranspiration: Climatology, Uncertainties and Trends [J]. *Hydrological Processes*, 2011, 25 (26):3 993-4 010
- [40] Miralles D G, Jiménez C, Jung M, et al. The WACMOS-ET Project - Part 2: Evaluation of Global Terrestrial Evaporation Data Sets[J]. *Hydrology & Earth System Sciences Discussions*, 2016, 12 (1):10 651-10 700
- [41] Chen Shaohui. A Trous Wavelet Based Four-Dimensional Evapotranspiration Assimilation [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, 9 (1):467-474
- [42] Xu Pei, Zhang Chao. Progress of Research on Retrieval of Soil Moisture Based on Remote Sensing [J]. *Forest Resources Management*, 2015(4):151-160(徐沛, 张超. 土壤水分遥感反演研究进展[J]. 林业资源管理, 2015(4):151-160)
- [43] Yu Fan, Li Haitao, Zhang Chengming, et al. A New Approach for Surface Soil Moisture Retrieving Using Two-polarized Microwave Remote Sensing Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39 (2): 225-228(余凡, 李海涛, 张承明, 等. 利用双极化微波遥感数据反演土壤水分的新方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014, 39(2):225-228)
- [44] Peng J, Loew A, Merlin O, et al. A Review of Spatial Downscaling of Satellite Remotely Sensed Soil Moisture[J]. *Reviews of Geophysics*, 2017, 55 (2): 341-366
- [45] Wu Li, Zhang Youzhi, Xie Wenhuan, et al. Summary of Remote Sensing Methods for Monitoring Soil Moisture[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2014, 26(2):19-26(吴黎, 张有智, 解文欢, 等. 土壤水分的遥感监测方法概述[J]. 国土资源遥感, 2014, 26(2):19-26)
- [46] Chen Shulin, Liu Yuanbo, Wen Zuomin. Satellite Retrieval of Soil Moisture: An Overview[J]. *Advances in Earth Science*, 2012, 27(11):1 192-1 203(陈书林, 刘元波, 温作民. 卫星遥感反演土壤水分研究综述[J]. 地球科学进展, 2012, 27(11):1 192-1 203)
- [47] Kerr Y H, Waldteufel P, Richaume P, et al. The SMOS Soil Moisture Retrieval Algorithm[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50:1 384-1 403
- [48] Kolassa J, Reichle R H, Liu Q, et al. Estimating Surface Soil Moisture from SMAP Observations Using a Neural Network Technique [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 204:43-59
- [49] Hu Meng, Feng Qi, Xi Haiyang. Progress of Monitoring Soil Moisture by Remote Sensing in Arid Areas[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44(5):1 270-1 275(胡猛, 冯起, 席海洋. 遥感技术监测干旱区土壤水分研究进展[J]. 土壤通报, 2013, 44(5):1 270-1 275)
- [50] Yang Hongjuan, Cong Zhentao, Lei Zhidong. Coupling of the Harmonic Analysis Method and Two-source Energy Model to Estimate Soil Heat Flux and Evapotranspiration[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34 (6): 706-710(杨红娟, 丛振涛, 雷志栋. 谐波法与双源模型耦合估算土壤热通量和地表蒸散发[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, 34(6):706-710)
- [51] Dietz A J, Kuenzer C, Gessner U, et al. Remote Sensing of Snow—A Review of Available Methods [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2012, 33(13): 4 094-4 134
- [52] Yang J, Jiang L, Shi J, et al. Monitoring Snow Cover Using Chinese Meteorological Satellite Data over China[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 143: 192-203
- [53] Tang Q H, Gao H L, Lu H, et al. Remote Sensing: Hydrology[J]. *Progress in Physical Geography*, 2009, 33(4): 490-509
- [54] Hall D K, Riggs G A, Salomonson V V, et al. MODIS Snow-cover Products[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(1): 181-194
- [55] Hall D K, Riggs G A. MODIS/Terra Snow Cover 8-Day L3 Global 500 m Grid, Version 6[C]. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center, Boulder, Colorado, USA, 2016
- [56] Frei A, Tedesco M, Lee S, et al. A Review of

- Global Satellite-derived Snow Products [J]. *Advances in Space Research*, 2012, 50: 1 007-1 029
- [57] Parajka J, Pepe M, Rampini A, et al. A Regional Snowline Method for Estimating Snow Cover from MODIS During Cloud Cover [J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 381: 203-212
- [58] Wang Zilong, Hu Shitao, Fu Qiang, et al. Research Progress on Remote Sensing Inversion of Snow Parameters [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2016, 47(9): 100-106 (王子龙, 胡石涛, 付强, 等. 积雪参数遥感反演研究进展 [J]. *东北农业大学学报*, 2016, 47(9): 100-106)
- [59] Foster J L, Hall D K, Chang A T C. Remote Sensing of Snow [J]. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 2013, 68(32): 682-684
- [60] Tedesco M, Kelly R, Foster J L, et al. AMSR-E/Aqua Daily L3 Global Snow Water Equivalent EASE-Grids, Version 2 [C]. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center, Boulder, Colorado, USA, 2004
- [61] Yu Lingxue, Zhang Shuwen, Bu Kun, et al. A Review of Snow Dataset Research [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, 33(7): 878-883 (于灵雪, 张树文, 卜坤, 等. 雪数据集研究综述 [J]. *地理科学*, 2013, 33(7): 878-883)
- [62] Gao Y, Xie H, Lu N, et al. Toward Advanced Daily Cloud-free Snow Cover and Snow Water Equivalent Products from Terra-Aqua MODIS and Aqua AMSR-E Measurements [J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 385(1-4): 23-35
- [63] Foster J, Hall L D K, Eylander J B, et al. A Blended Global Snow Product Using Visible, Passive Microwave and Scatterometer Satellite Data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, 32(5): 1 371-1 395
- [64] Helfrich S R, Menamara D, Ramsay B H, et al. Enhancements to, and Forthcoming Developments in the Interactive Multisensor Snow and Ice Mapping System (IMS) [J]. *Hydrological Processes*, 2010, 21(12): 1 576-1 586
- [65] Vörösmarty C J, Green P, Salisbury J, et al. Global Water Resources: Vulnerability from Climate Change and Population Growth [J]. *Science*, 2000, 289(5 477): 284-288
- [66] Luo Jiancheng, Sheng Yongwei, Shen Zhanfeng, et al. Highly Accurate Automatic Extraction of Multi-spectral Remote Sensing Water Information with Step Iteration [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2009, 13(4): 610-615 (骆剑承, 盛永伟, 沈占锋, 等. 分步迭代的多光谱遥感水体信息高精度自动提取 [J]. *遥感学报*, 2009, 13(4): 610-615)
- [67] Li Jian, Zhou Qu, Chen Xiaoling, et al. Spatial Scale Study on Quantitative Remote Sensing of Highly Dynamic Coastal/Inland Waters [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(6): 937-942 (李建, 周屈, 陈晓玲, 等. 近岸/内陆典型水环境要素定量遥感空间尺度问题研究 [J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2018, 43(6): 937-942)
- [68] McFeeters S K. The Use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the Delineation of Open Water Features [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, 17(7): 1 425-1 432
- [69] Xu Hanqiu. Study on Extracting Water Information Using Improved Normalized Differential Water Index (MNDWI) [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2005, 9(5): 589-595 (徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究 [J]. *遥感学报*, 2005, 9(5): 589-595)
- [70] Yin Yaqui, Li Jiaguo, Yu Tao, et al. Object-oriented Water Body Extraction Method Based on High Resolution Remote Sensing Images [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2015(1): 81-85 (殷亚秋, 李家国, 余涛, 等. 基于高分辨率遥感影像的面向对象水体提取方法研究 [J]. *测绘通报*, 2015(1): 81-85)
- [71] Pekel J F, Vancutsem C, Bastin L, et al. A Near Real-Time Water Surface Detection Method Based on HSV Transformation of MODIS Multi-spectral Time Series Data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 140: 704-716
- [72] Liao Anping, Chen Lijun, Chen Jun, et al. High Resolution Remote Sensing Mapping of Global Land Surface Waters [J]. *Science China: Earth Science*, 2014, 44(8): 1 634-1 645 (廖安平, 陈利军, 陈军, 等. 全球陆表水体高分辨率遥感制图 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2014, 44(8): 1 634-1 645)
- [73] Sun Na, Gao Zhiqiang, Wang Xiaojing, et al. Highly Accurate Extraction of Water Body in the Loess Plateau Based on High Resolution Remote Sensing Images [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2017, 29(4): 173-178 (孙娜, 高志强, 王晓晶, 等. 基于高分遥感影像的黄土高原地区水体高精度提取 [J]. *国土资源遥感*, 2017, 29(4): 173-178)
- [74] Donchyts G, Baart F, Winsemius H, et al. Earth's Surface Water Change over the Past 30 Years [J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(9): 810
- [75] Gorelick N, Hancher M, Dixon M, et al. Google Earth Engine: Planetary-Scale Geospatial Analysis for Everyone [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 202: 18-27
- [76] Pekel J F, Cottam A, Gorelick N, et al. High-Reso-

- lution Mapping of Global Surface Water and Its Long-term Changes [J]. *Nature*, 2016, 540 (7 633): 418
- [77] Trochim E D, Prakash A, Kane D L, et al. Remote Sensing of Water Tracks[J]. *Earth & Space Science*, 2016(3), DOI: 10.1002/2015EA000112
- [78] Hugue F, Lapointe M, Eaton B C, et al. Satellite-based Remote Sensing of Running Water Habitats at Large Riverscape Scales: Tools to Analyze Habitat Heterogeneity for River Ecosystem Management [J]. *Geomorphology*, 2016, 253:353-369
- [79] Gao H. Satellite Remote Sensing of Large Lakes and Reservoirs: From Elevation and Area to Storage [J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews Water*, 2015, 2(2):147-157
- [80] Tapley B D, Bettadpur S, Watkins M, et al. The Gravity Recovery and Climate Experiment: Mission Overview and Early Results[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31: 9 607-9 610
- [81] Long D, Shen Y, Sun A, et al. Drought and Flood Monitoring for a Large Karst Plateau in Southwest China Using Extended GRACE Data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 155: 145-160
- [82] Biancamaria S, Lettenmaier D P, Pavelsky T M. The SWOT Mission and Its Capabilities for Land Hydrology [J]. *Remote Sensing and Water Resources*, 2016, 55:117-147
- [83] Crétaux J F, Biancamaria S, Arsen A, et al. Global Surveys of Reservoirs and Lakes from Satellites and Regional Application to the Syrdarya River Basin [J]. *Environmental Research Letters*, 2015, 10: 015002
- [84] Lee H, Durand M, Jung H C, et al. Characterization of Surface Water Storage Changes in Arctic Lakes Using Simulated SWOT Measurements[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, 31: 3 931-3 953
- [85] Gao H, Birkett C, Lettenmaier D P. Global Monitoring of Large Reservoir Storage from Satellite Remote Sensing[J]. *Water Resources Research*, 2012, 48: 1-12
- [86] Zhang S, Gao H, Naz B S. Monitoring Reservoir Storage in South Asia from Multisatellite Remote Sensing[J]. *Water Resources Research*, 2014, 50: 8 927-8 943
- [87] Keys T A, Scott D T. Monitoring Volumetric Fluctuations in Tropical Lakes and Reservoirs Using Satellite Remote Sensing [J]. *Lake & Reservoir Management*, 2017, 34(3): 154-166
- [88] Zhang S, Gao H. A Novel Algorithm for Monitoring Reservoirs Under All-weather Conditions at a High Temporal Resolution Through Passive Microwave Remote Sensing[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43: 8 052-8 059
- [89] Politi E, Maccallum S, Cutler M E J, et al. Selection of a Network of Large Lakes and Reservoirs Suitable for Global Environmental Change Analysis Using Earth Observation[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2016, 37(13):3 042-3 060
- [90] McCabe M F, Wood E F, Wojcik R, et al. Hydrological Consistency Using Multi-sensor Remote Sensing Data for Water and Energy Cycle Studies [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112: 430-444
- [91] Sheffield J, Ferguson C R, Troy T J, et al. Closing the Terrestrial Water Budget from Satellite Remote Sensing[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36: L07403
- [92] Gao H, Tang Q, Ferguson C R, et al. Estimating the Water Budget of Major US River Basins Via Remote Sensing[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, 31: 3 955-3 978
- [93] Wang H, Guan H, Gutiérrez-Jurado H A, et al. Examination of Water Budget Using Satellite Products over Australia [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 511: 546-554
- [94] Sahoo A K, Pan M, Troy T J, et al. Reconciling the Global Terrestrial Water Budget Using Satellite Remote Sensing[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115: 1 850-1 865
- [95] Pan M, Sahoo A K, Troy T J, et al. Multisource Estimation of Long-term Terrestrial Water Budget for Major Global River Basins[J]. *Journal of Climate*, 2012, 25: 3 191-3 206
- [96] Zhang Y, Pan M, Wood E F. On Creating Global Gridded Terrestrial Water Budget Estimates from Satellite Remote Sensing[J]. *Surveys in Geophysics*, 2016, 37: 249-268
- [97] Shi J, Dong X, Zhao T, et al. WCOM: The Science Scenario and Objectives of a Global Water Cycle Observation Mission[C]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, Quebec City, Canada, 2014

## Remote Sensing of the Terrestrial Water Cycle: Progress and Perspectives

TANG Qihong<sup>1,2</sup> ZHANG Xuejun<sup>1,2</sup> QI Youcun<sup>1</sup> CHEN Shaohui<sup>1</sup> JIA Guoqiang<sup>1,2</sup>  
MU Mengfei<sup>1,2</sup> YANG Jie<sup>1,3,4</sup> YANG Qiquan<sup>1,3,4</sup> HUANG Xin<sup>3,4</sup> YUN Xiaobo<sup>1,2</sup>  
LIU Xingcai<sup>1</sup> HUANG Zhongwei<sup>1,2</sup> TANG Yin<sup>1</sup>

1 Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China

4 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

**Abstract:** Satellite remote sensing has made great strides in the last few decades, which enables the long-term consistent observations of many variables of the terrestrial water cycle and thus advances the understanding of the terrestrial water cycle. This paper reviews the principles of remote sensing in retrieving key variables of the terrestrial water cycle, illustrates the progress of satellite remote sensing in hydrological applications, and discusses the future direction. Although most of hydrological states and fluxes variables are observable by remote sensing, closing terrestrial water budget with the remote sensing products is still an open question, suggesting more efforts are needed to improve the hydrological consistency of the remote sensing products. In the future, efforts should be made to develop new generation sensors and platforms for the consistent remote sensing products with finer spatiotemporal resolution. At the same time, efforts should be devoted to the evaluation of remote sensing products of the terrestrial water cycle through carrying out integrated field experiments.

**Key words:** remote sensing; terrestrial water cycle; satellite; radar; water balance

**First author:** TANG Qihong, professor, specializes in the hydrology and remote sensing. E-mail: tangqh@igsrr.ac.cn

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41730645, 41790424; the National Science Foundation for Distinguished Young Scholars, No. 41425002.