

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2020.05.003

流域遥感：内涵与挑战

吴炳方^{1,2}, 朱伟伟¹, 曾红伟^{1,2}, 闫娜娜¹, 常胜¹, 赵新峰¹

(1. 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; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 遥感在流域综合管理与流域科学研究中得到广泛应用并发挥着不可替代的作用。重点阐述了流域遥感的内涵、进展与面临的挑战, 系统总结了相关的流域遥感数据产品。流域遥感研究流域下垫面、水循环、水资源、水灾害、流域生态的遥感解析能力并提供相关的遥感数据产品。流域遥感数据产品正逐步成为不断更新的公共产品和服务, 满足了流域管理监测信息及时性、完整性、连续性和高精度的要求。流域遥感与云计算的结合, 可降低流域遥感数据产品生成的技术瓶颈; 与云服务结合, 可降低流域遥感数据产品的应用难度和成本, 将是流域遥感走向实用的主流方向, 从而为流域综合管理提供全方位的信息支撑。

关键词: 流域遥感; 流域综合管理; 流域科学; 遥感数据产品

中图分类号: P426.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2020)05-0654-20

流域是各种人类活动和自然过程共同作用的地理单元, 是地球表面相对独立的自然综合体^[1]。人类长期的生息运作, 尤其对流域内水资源的开发利用, 导致流域内资源结构性短缺与需求的矛盾逐渐加剧。如何有效地解决这些问题, 实现流域的可持续发展, 需要精确把握流域水文循环、物质循环和能量循环的空间和时间过程, 获取能满足实际管理需求的及时性、完整性、连续性和高精度的监测信息^[2]。

现有地面观测手段很难满足及时性、完整性、连续性和高精度的监测要求, 或者成本昂贵难以为继^[2], 除了发达国家及少数国家外, 很多发展中国家的河流都缺乏观测站网^[3]; 或者自然条件的改变使得原有的观测已经不可行^[4]; 而全球大部分流域已被深深地烙上了人类活动的印记, 大坝、灌溉、雨水利用等人工活动改变了流域水循环过程与转化机制, 影响着径流数据的观测。因此, 传统的地面观测满足不了流域水资源管理与实践的需求, 亟需新的技术手段与监测方法^[2,5-6]。卫星遥感对地观测具有空间宏观性、时间周期性以及空间连续性等特点, 可以为流域综合管理活动提供全方位的信息支撑^[7-8]。

国内外以流域为对象, 开展了大量的流域遥感实验。第一次国际卫星陆面气候学项目野外试验(FIFE)^[9]主要是了解流域陆面和大气之间辐射、水汽和CO₂交换的生物物理过程, 发展和测试在遥感尺度上流域水汽通量与碳通量的遥感监测方法, 并获取完整流域数据集, 至今仍产生着重要的影响, 为各类流域试验提供了成功的范例。“北方生态系统-大气研究”(BOREAS)是继FIFE之后另一次更大尺度的以流域陆气相互作用为目标的科学试验^[10], 强调一个嵌套的多尺度观测, 建立流域不同尺度上的观测系统, 发展和验证流域各种能、水、生物化学循环模型。全球能水循环试验(GEWEX)主要是观测、了解、模拟流域内大气-陆地的水分、热量交换及循环, 其目的是借助于适宜的模式, 提出新的预报方法, 包括流域水文系统变化及其与大气、地表的相互作用, 流域水文过程的变化、流域水资源的变化及相关因素对环境的影响^[11]。GEWEX成立了世界各大区的相应子计划: 干旱区实施的撒哈拉沙漠南缘地区萨赫勒水文大气引导试验(HAPEXSahel), 其旨在开展流域水文、地表通量、植被、大气、遥感等方面的密集观测^[12]; 热带雨林地区

收稿日期: 2019-12-18; 网络出版日期: 2020-06-12

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20200611.1602.006.html>

基金项目: 中国科学院前沿科学重点研究计划资助项目(QYZDY-SSW-DQC014); 国家重点研发计划资助项目(2016YFA0600304)

作者简介: 吴炳方(1962—), 男, 江西玉山人, 研究员, 博士, 主要从事水资源遥感、生态遥感与农业遥感方面研究。
E-mail: wubf@aircas.ac.cn

的亚马孙流域大尺度生物-大气圈试验(LBA),旨在开展流域风场和云的探测、痕量气体、气溶胶、温室气体等的监测及地气之间物质和能量交换等^[13]; GEWEX 亚洲季风试验(GAME)也基于同样的科学实验目标分别在青藏高原、淮河流域、西伯利亚和东南亚热带地区开展相关实验^[14]; 美国南部大平原的沃希托流域与美国亚利桑那州的沃尔纳特古勒克(Walnut Gulch)流域分别开展的遥感-地面一体化的观测实验等,旨在通过多源遥感的协同反演获得能够满足流域管理的信息; 黑河流域综合遥感联合试验(“Water”与“HiWater”)^[15],主要是发展流域动态监测方法,实现对地表生态和水文变量的主被动遥感协同反演,提高遥感在流域生态-水文集成研究和水资源管理中的应用能力。这些流域遥感实验主要是关注流域水、能量通量以及地表生态参量的观测或反演方法。

近年来,新型卫星传感器层出不穷,愈发精细与多样,且时间、空间、光谱分辨率显著提升,在流域下垫面要素、水循环过程、生态监测环境与灾害等领域的作用日益显著。随着基于流域遥感试验构建的流域土壤-植被-大气等相关参量遥感反演方法的不断优化,众多有价值的流域遥感数据产品如流域地物类型、植被结构参数、植被生长状况、水环境参数、水循环参量与水资源管理等,以及与之相关的遥感产品生成方法不断涌现^[2],推动了流域的可持续管理,但如何从纷繁复杂的遥感信息产品中,挖掘出有用的流域管理信息,成为流域管理的最后一公里瓶颈。

因此,目前遥感数据及数据产品越来越多,在流域管理中用好、用对遥感数据产品十分重要。本文从流域角度,分析流域遥感的内涵、进展与面临的挑战,并介绍相关的流域遥感数据产品,对于那些成熟的技术和应用不过多阐述。

1 流域遥感的进展

流域作为一个地域单元涉及到很多方面,但主要还是与水有关。流域遥感以流域为对象,以地表地物(植被、水、土壤、能量等)对电磁辐射的相互作用为基础,围绕着水主题,研究流域下垫面结构、能量平衡、水分循环、水灾的遥感解析能力,研究气候变化和人类活动共同作用下的流域生态-水文和环境效应的数据驱动的评估方法,为流域系统科学发展和流域综合管理提供数据和方法支持。遥感推动了流域的综合管理与流域科学的发展,反过来又为遥感的发展与应用提供了新的机遇,促进了流域遥感这门新兴学科的形成与发展。

流域遥感的主要内容是流域内水文、生态、环境信息遥感获取和应用方法,包括流域基础图绘制、流域下垫面要素监测、水循环参数反演、水资源评估、流域生态环境参数获取、自然灾害监测等,以及流域上下游关系分析、治理优先等级划分、水资源开发以及灌溉水管理等方面。流域基础图件制作与流域下垫面要素监测包括流域河流水系分布^[16]、地形地貌^[17]、土壤^[18]、土地利用/土地覆被类型^[19]、植被覆盖度^[20]、不透水面^[21]等。水循环参数反演包括降水^[22]、蒸散发^[23]、水储量^[24]、水面积^[25]、土壤含水量^[26]、洪水淹没面积^[27]等参数的监测,生成时空连续的数据集; 水资源评估方面,主要是水资源量核算^[28]以及水分生产率^[29]、节水潜力与节水效率的评估^[30]等。流域遥感已逐渐由制图、监测、评估向服务于精细管理过渡,如水土流失风险评估^[30]、水土流失优先治理区划定^[31]等,逐渐拓展到对生物、生态要素^[32]和河流沉积物监测^[33],并与众源传感器网络、无线传输、云计算等新型设备和探测手段相结合。

1.1 下垫面遥感

影响区域水循环过程的流域下垫面包括植被、人工建筑物、地质和地貌等四大类^[34]。土地覆被、植被、地形与地貌、河流与水系、土壤、不透水面等是流域下垫面的重要组成部分。流域土地覆被的改变深刻地改变了流域地表的性质,如反射率、粗糙度、植被冠层叶面积指数和影响水文通量的其他物理性质,从而影响流域植被的冠层截留、阻挡、入渗和蒸散发等流域水文过程,引起流域水量空间分布的变化; 不断加剧的人类活动强烈地改变着流域下垫面水文特性,从而影响流域产汇流过程,改变流域水资源的时空分布,基于自

然流域特征假设的资源和环境的监测及管理方法已不再可靠,因此,在水文模型中需要考虑自然和人类社会的耦合^[35]。

土地覆被是遥感的主流数据产品^[37]。流域植被覆盖度与植被叶面积指数是表征流域植被结构最重要的两个参数^[38],是流域水文生态模型研究中的重要参量,在流域循环的模型中经常需要其时间动态与空间分布,来计算能量或水流动^[39],也是影响土壤侵蚀与水土流失的主要因子^[40],多源遥感数据源可提供完整的时间序列、高时空分辨率的流域植被覆盖度与植被叶面积指数数据集^[41]。

地形与地貌对流域水热资源的再分配有重要的影响,地形间接影响着流域土壤、植被以及物质迁移和生态系统的演替与发展;地貌直接影响甚至决定着其他要素的特征,控制着地球表层水分和热量的地域再分配,并间接影响着土壤、植被以及物质迁移和生态系统的演替与发展^[42]。流域与水系的变化是流域河流结构受气候和人类活变化的结果,如黄河河道的历史变迁、口岸线变迁、长江口岸线的时空变化等均可以采用遥感的方法快速获得^[43]。

流域土壤类型图、流域土壤厚度以及土壤颜色是流域生态水文研究的重要基础数据,对流域生态系统的结构稳定和功能发挥具有重要作用^[44],遥感技术为土壤属性和类型数据的获取提供了有效途径和方法^[45],加速了传统的流域土壤调查进度和推动了流域土壤水文生态参量的研究。

不透水面是人类活动对流域直接作用的结果,多源遥感数据的融合能获得更高精度的不透水面,流域不透水面的面积、盖度和空间格局对流域的水、热循环和水环境有着重要的影响^[35]。

遥感可以快速获取流域下垫面的信息及其变化,特别是高分辨率遥感影像数据可以快速有效地监测流域内人类活动导致下垫面特征的变化。为加深人类活动对水循环过程的扰动,对水资源时空分布规律变化的理解提供新的途径。

1.2 水循环遥感

遥感为深入剖析水循环各过程深层次机理、探究水的各相态转变过程,以及水的相态转变导致的热量转换过程提供了有力支撑。流域内的任何活动都在改变着流域内的水循环时空格局^[46],如雨水收集、地下水开采、生态恢复等,改变和阻断了水的转换路径及参数,从而再度影响水循环过程和产流机制^[47],并导致下游河道基流亏缺、径流减少,生态环境恶化。

水循环的重要参量降水的遥感反演取得了显著进展。迄今,全球共有30余套降水格网数据集,其中大多数是光学、主被动遥感反演降水数据集,这些数据集为区域乃至全球降水时空特征的探索、缺资料区域径流量的估算提供了丰富的数据支撑,或降低数据收集费用。在众多遥感降水数据产品中,1998年发射升空的热带降水测量(TRMM)卫星具有里程碑的意义,为南北纬50°之间的广大区域提供空间分辨率0.25°、间隔3h的降水产品^[48],有效解决了水循环过程降水驱动数据的获取瓶颈。TRMM的后继星全球降水测量(GPM)卫星具有比TRMM更敏锐的降水探测能力,通过与其他9个卫星的降水数据融合,GPM能提供全球南北纬60°之间、30min频次、空间分辨率0.1°的降水栅格数据,在一定程度克服了TRMM高估弱降水、低估强降水的缺陷。预计未来发射的全球水循环观测卫星(WCOM)提出了三频全极化干涉微波辐射计、全极化微波成像仪和双频极化微波散射计3个先进的有效载荷设计,频率覆盖1.4~90GHz;通过主被动联合观测,能够对流域降水要素进行敏感因素和环境要素进行时空同步的系统观测,前所未有地提高了降水的观测能力^[49]。

蒸散发(ET)是土壤-植被-大气系统中能量水分传输及转换的主要途径,也是水循环中最重要的分量之一。传统蒸散发观测手段的局限性与蒸散发较强的异质性特点,导致了流域蒸散发观测与计算的困难与不确定性,使得无法全面认知流域水循环的整个过程和基本规律,也难以将生态恢复及人类活动引起的蒸散耗水格局变化纳入水循环研究。蒸散发遥感模型的发展使得流域蒸散耗水的定量测量成为可能^[6],较高精度的时间尺度为日、旬、月与年,空间分辨率为1km、250m与30m的精细ET数据不断涌现,能精确地解析植被、农田等蒸散发^[6],也可为流域水文模型蒸腾蒸散发过程的模拟提供充足的参数标定数据源。现有的蒸

散发模型主要从能量平衡角度反映水热通量,对于植株—群体—群落的生态过程、田间—坡面—流域的水文过程与能量通量的相互作用缺乏系统性的考虑,使得模型在复杂下垫面和复杂地形的应用中存在分辨率不足和精度缺陷^[23];因此,需要从生态过程、水文过程与能量平衡的耦合角度,高分辨率、高精度地刻画流域蒸散发过程^[50]。同时在时间尺度上,由于遥感获取的是瞬时值,为获得长时间尺度(日、旬、月、季、年等)的信息,需要进行时间尺度扩展,但阴雨天及风速变化大时效果并不理想。如何将瞬时值或晴天值进行很好的时空尺度扩展,也将是遥感蒸散发研究的重点方向之一。

地表土壤水分是另一个重要的水循环参量。微波可以穿透大气、云层实现全天时全天候观测,同时对土壤水分信息非常敏感。采用微波遥感技术估算土壤表层水分的技术日臻成熟,可利用的主被动微波遥感数据源层出不穷^[51]。SMAP卫星^[52]同时搭载L波段的主动和被动微波遥感器,可以获取更高时空分辨率和精度的土壤水分信息,很可惜该雷达传感器于2015年7月停止工作,随后SMAP卫星团队利用Sentinel-1数据替代SMAP的雷达数据进行更高分辨率的土壤水分产品生产和发布。现有的土壤水分产品空间分辨率较低(约10~40 km),如何充分利用主动微波遥感的高空间分辨率以及光学、热红外波段各自优势,发展主被动微波以及主被动微波与其他遥感波段的协同反演,获取中高尺度土壤水分产品是当前和未来模型、算法发展的主要方向。

对于地下水,重力恢复与气候实验卫星(GRACE)^[53]为地下水储量变化的探测提供了新的方法,其通过分析重返周期内地表重力的改变,估算地表与地下水储量的变化。该卫星为全球地下水超采区、超采范围、超采强度的探测提供了有力支撑,如美国加州和大平原地区^[54],中国华北平原^[55]、印巴交界处的印度河平原^[56]、中东地区^[57]地下水储量变化与地下水水位下降程度的估算提供了有力支撑。但该卫星的空间分辨率低(百公里尺度),只能反映大区域尺度的地下水超采现象,且自2013年之后,该卫星的数据获取能力大幅下降,2017年失效。2018年,GRACE的后继星座GRACE-FO卫星顺利升空入轨,将为地下水的遥感监测提供新的解决方案。

快速、全覆盖地获取流域水循环要素是遥感的最大优势。一直以来,遥感数据产品是陆表水文模型参数的重要来源或直接输入,如降水、温度、叶面积指数、地形、土壤、植被覆盖度等信息。同时,遥感参量也是流域水文模型输出结果的检验标准,检验流域水文模拟的准确度,如在开展黑河流域上游生态水文过程耦合机理及模型研究时,采用ETWatch模型监测的黑河流域长时间序列蒸散发数据进行对比,结果表明两个数据集在空间与时间上具有较好的一致性^[58]。在开展黑河流域中下游生态水文过程的系统行为与调控以及华北地区地表水与地下水模型研究时,采用ETWatch模型估算的长时间序列蒸散发数据与参数率定后的MIKE SHE模型模拟的蒸散发结果在空间与时间上具有较好的一致性^[59]。随着更高时空分辨率遥感数据的不断涌现,遥感数据产品作为分布式水文模型的输入数据的可利用性与作为水文过程模拟结果验证产品的可信度将大为提升。因此,目前基于遥感的流域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^[60]。不同学者在小流域区域与大尺度上,基于降水、蒸散、土壤水分与地下水储量变化等数据,采用水量平衡公式开展了流域水循环过程、水平衡、径流变化的评估^[61],受遥感数据的时空尺度不一致与在能量平衡下水文格网中的土壤蒸发、植被蒸腾、侧向水通量等遥感流域水循环要素变化对水文一致性综合的影响,构建基于水量平衡与能量平衡结合的水文模型是当前以及未来流域水循环遥感的热点,但是大量的遥感数据产品很少用于水文模式的改进^[62]。

水循环遥感反演的数据产品对水循环研究提出了新的挑战。长期以来,由于蒸散发数据的缺乏,对水循环要素中的(陆面)蒸散发都是以降水与产流的余项进行替代,缺乏验证与校核,在水平衡方程中的不确定性甚至测量误差,都简单归结到蒸散发项。这些简单“归结”后的结果常常打破人们水文常识、统计常识和经验常识^[63]。虽然,可以用水文还原的方法进行弥补,但面对高度人工化的流域,“还原失真”、“还原失效”已屡见不鲜^[46,63]。随着陆表蒸散发数据的不断丰富与完善,特别是高精度蒸散发遥感监测技术的不断发展,水文模型的发展将面临严峻挑战和新的机遇。

与地面观测相比,水循环遥感反演能更全面地理解流域水循环的时空格局以及由人类活动和气候变化所

引起的变化及生态与环境效应, 具有重要的水文水资源理论意义和现实的生态保护意义。

1.3 水资源遥感

水资源评价经过 100 多年的发展, 评价内容从早期的天然河川径流量统计, 到水文特征值计算以及水资源供需分析、优化配置及水资源综合管理^[64], 正朝着“自然-社会”复合的水资源动态评价、水量水质联合评价、径流性水资源和非饱和土壤水综合评价、分布式水资源时空评价等方向发展^[64]。但是随着全球气候变化和强人类活动的加剧, 已很少有天然流域存在, 流域水循环物理过程与转化机制也相应地发生了深刻改变, 原有的基于自然状态的水资源评价方法也不能提供精确的水资源信息, 满足不了全面掌握水资源开发利用总体状况、强化水资源科学管控的迫切需要。

水资源核算是对流域水流量、水通量、库存量、消耗量和服务的独立估算^[65]; 它是对流域的供水、需水、水资源分配、水资源可及性和耗水状况以及变化趋势的系统性定量评估^[66], 包括核算流域水资源的来源, 流域水的可用性和相关用途信息。目前许多国家开展了水资源核算理论与方法的研究^[67], 并探索和试验实施方案。联合国制定的《水资源核算手册》提出了基于全球公共数据集的水资源核算框架, 目标是基于目前水资源传统的数据与多源遥感数据产品数据, 开展公平和透明的水资源管理, 并实现流域水资源的可持续利用^[28]。

水深是流域重要的地形要素与流域水资源量估算中的重要输入参量, 对于流域河道航运、流域河岸的开发与管理具有重要的意义。水深遥感监测可分为被动光学遥感、主动光学遥感、水深遥感融合三大类^[68]。目前常用水深遥感融合探测方法, 它可以充分地利用已有遥感影像资源, 有效地挖掘多源、多时相信息, 有助于提高水深遥感反演精度, 但是多源遥感影像融合时会存在空间尺度问题, 多时相反演融合中也会有底质及水下地形变化等因素对水深反演精度的影响^[68]。美国国家航空航天局(NASA) 将于 2021 年发射 SWOT 卫星将会返回精确的流域地表水位数据, 且可覆盖了全球 90% 以上的地区, 可为流域水位的监测提供有效的前景手段^[69]。

水面也是流域水资源量估算中的重要参量, 特别是干旱区流域水资源过度消耗和短缺的重要指示。遥感是获取陆表水面时空动态变化的有效手段, 由于陆表水体在绿光波段、近红外与中红外波段反射率的显著差异, 归一化水体指数(NDWI)^[70], 改进的归一化水体指数(MNDWI)^[71]等指数常被用于陆表面面的提取。随着云计算与大数据技术的不断发展, 显著提供了全球陆表面面的精细化获取的能力, 如 1984—2015 年以来的 30 m 分辨率的全球季节性水面、常年水面的遥感制图^[72]; 2014 年, 空间分辨率更高的哨兵系列卫星陆续发射升空, 特别是哨兵 1 号合成孔径雷达卫星、哨兵 2 号多光谱卫星的发射, 显著提升了陆表面面的探测能力, 特别是小水库、坑塘的监测能力, 将为流域陆表面面信息的快速获取提供强有力的支撑。

流域作物水分生产率的估算依靠引入遥感和 GIS 技术可以解决部分问题, 解决空间的变异问题; 最简单的是流域作物分布图、DEM 数据的引入, 遥感监测的叶面积指数(LAI)、干物质量、蒸散以及表层土壤含水量均可用于模型参数的标定, 有助于模拟作物水分生产率的分布。基于 GIS 的 EPIC 模型(GEPIC 模型)可以模拟全球尺度的作物水生产力及世界各国家或地区的作物水生产率的差异^[73]。

节水潜力主要是针对流域作物种植区, 在区域节水潜力估算时, 早期大多依靠地面观测数据, 因此在区域外推时使用的是作物播种面积的统计信息。随着遥感蒸散模型以及单产模型的发展, 为节水潜力估算提供了新的途径。利用遥感蒸散数据, 基于节水措施典型区实施前后的蒸散的差异比较, 结合区域实施规划, 可以评估单项措施实施可能的节水潜力; 发展最快的是基于水分生产率的节水潜力估算方法; 通常利用遥感估算的水分生产率结果, 按照区域农田或作物水分生产率水平达到一定标准计算得到节水潜力^[74]。

“径流(地表+地下)=降雨-蒸散发”是流域水循环的基本原理^[35 64]。过去由于蒸散发观测手段有限, 水资源评价方法高度依赖地面观测的径流数据, 利用观测得到的径流数据评估天然河川径流量。然而地表和地下径流量只占降水量 20%~30% (湿润地区占 60%) 左右, 且径流又受到强人类活动的干预和影响, 加上人类活动用水量统计数据失真, 径流性水资源评价口径狭窄、缺少“自然-社会”复合的水资源动态评价等,

基于径流形成的水资源评价理论与方法已难以科学、客观、准确地量化水资源量及演变特征,也不能满足新时期水问题系统治理的实践需求^[75],结合环境需水和生态耗水,发展基于ET和降雨的水资源评价模型将是未来水资源评价的发展方向。

基于遥感的蒸散数据产品可以与点尺度降雨量估计的精度相媲美,在流域尺度具有良好的不确定性水平(25%)^[76],从而促使人们对水资源量的估算有了新的认识,提出了流域人类活动可消耗的水资源量即是流域降水总量扣除流域自然ET与外流径流量后剩余的水资源量^[77]。可消耗水资源量是流域内所有人类干预措施后的流域人类可耗水量的上限,对自然景观的任何新的人为干预都可能改变这种平衡。

纵观流域水循环的整个过程,只有蒸散发(ET)是流域水资源的真正消耗量,当ET超越流域水资源的承载上限将诱发河湖萎缩、地下水超采、生态环境恶化等系列问题。在流域水资源日渐匮乏的情势下,控制并减少流域ET、设定合理的流域目标ET^[78]、开展“ET管理”已成为流域水资源管理的重要内容^[78-79]。ET不仅受气候、地形、植被等自然特征影响,也受耕地开垦、灌溉等人类活动影响^[23],具有“自然-人工”二元属性。ET可分解为自然ET与人类活动ET,其中自然ET是地表自然过程消耗的降水量,而人类活动ET^[77 80]则是由耕作、灌溉、水库水面蒸发等人类活动新增的耗水量。自然ET属于不可控ET,其大小取决于气候、土壤、地形等自然特征^[80]。人类活动ET属于可控ET,其因人类活动而起,又因人类活动强弱而改变。“ET管理”就是要控制或削减人类活动产生的ET,将其控制在合理的范围内,从而实现流域水资源可持续消耗的目标。

1.4 灾害遥感

洪水和干旱是流域尺度上的主要涉水灾害,遥感为复杂环境下获取致灾环境、致灾因子提供丰富、全面的信息^[81]。快速、准确地监测洪水淹没面积、洪水水深以及洪水持续时间等主要特征是洪水遥感的主要内容^[82]。洪水遥感监测是遥感应用得较早的内容,在20世纪80年代末就已经得到大范围的应用^[82],特别是1998年的大洪水检验了遥感监测洪水的有效性、及时性和准确性,尽管如此,时至今日,遥感在洪水监测中仍然没有纳入到日常的体系,通常只应用于应急响应。

随着全球气候变化和社会经济发展,流域水资源短缺问题突出,流域干旱灾害发生频率呈现增加趋势^[83]。传统的干旱监测方法更多地依赖于地面观测点的降水量、气温、农气站点的土壤墒情等观测资料,站点的数量和布局无论是在数据代表性还是时效性上均存在不足,而且站点测量方法的不一致性以及测量位置的选择给数据和产品的使用带来了一定困难。遥感是旱灾监测最有效的手段,借助光学、热红外、微波遥感波段反演各种指数,监测植被生长状态^[84]、环境状态(如降水量、温度、土壤含水量)^[85-86]等各个参量变化,直接或间接表征植被遭受水份胁迫条件的状态和变化来监测干旱。

干旱是一个综合复杂的过程,无法单纯依靠某一个指标得到精确结果,近年来越来越多的干旱遥感监测研究倾向于多源遥感信息的综合方法研究。开始考虑综合降雨指标、植被形态和生理指标以及作物物候、灌溉等信息,相继发展了不同的综合监测模型。综合利用气象干旱指数(SPI、PDSI)、植被指数以及灌溉、地形等信息,通过分类回归树的方式,建立植被旱情响应指数(VegDRI)^[87]和适用于中国区域的综合旱情监测模型及作物不同生育期的旱情监测模型^[88]。针对不同农气分区不同物候期,建立了表征季节性变化和区域差异的修正的植被健康指数以及分区多指数干旱综合监测模型^[89]。多变量干旱指数(MDI)综合考虑降水、径流、蒸发、土壤水分等要素,能够同时用于气象、农业和水文干旱监测^[90]。为了有效地监测中国粮食主产区旱情,基于降水、土壤水分状态和植被指数构建了累积旱情指数(PADI)^[91]。但由于干旱影响因素众多、演变机制复杂,因地域差异、环境影响以及不同植被本身的抗旱特性差异,使得有些光谱特性并不一定正确反映受旱程度,仍需要完善干旱机理研究,协同多种遥感传感器,耦合相关的地学、气象学、生态学以及农学模型和参数,多源数据驱动的干旱监测模式将有一个广阔的前景。

气象干旱指数(如SPI、SPEI和PDSI等)只能反映自然条件下旱灾的范围、发生频率等,而用遥感监测农业干旱反映的是实际作物或植被受水份胁迫的状态,通过比较气象干旱和遥感农业干旱特点的变化,可以

评估抗旱措施在减缓旱灾影响的效果^[93]。

1.5 生态环境遥感

遥感可以迅捷地获取流域尺度生态环境要素或功能的长时间序列空间分布状况,如植被生长状况、生物多样性、水质等。这些要素或功能为评价或定量估算部分生态过程提供了基础参数,如伴随着降雨水文过程发生的水土流失、面源污染等生态过程,针对生态退化而兴建的生态工程建设过程与工程扰动变化信息,河道与湖泊侵占以及生态红线区域面积与功能的变化监管等;此外,遥感监测手段也为流域尺度出发的跨区域生态补偿和生态服务功能评价提供了重要的依据^[92]。

水土流失是发生在流域陆地表面自然与人文交互耦合的复杂地理过程,长期以来人们一直利用遥感结合建立的数学方程来定性评价与定量估算流域尺度水土流失强度等级分布或侵蚀模数^[94],如针对面蚀过程的遥感快速定性评价方法,需要通过遥感监测方式获得流域尺度植被覆盖度、耕地分布,结合地形坡度分布即可获得流域水土流失强度等级分布,而经典的水土流失定量模型 RUSLE(The Revised Universal Soil Loss Equation)中,水土保持、植被覆盖因子也需通过遥感监测手段获得,结合降雨侵蚀力和地形因子,估算流域水土流失侵蚀模数^[95]。

面源污染是指溶解性固体污染物在降水和径流冲刷作用下汇入受纳水体而引起的水体污染^[96],由于涉及到包括气象、水文过程、水力过程、物质迁移、化学物质形态相互转换等多个过程,面源污染负荷定量估算涉及因子众多。但在流域尺度,通过多年的地面观测基础数据,可以建立基于遥感监测和地面统计数据相结合快速估算模型-输出系数法^[97],其中最重要的土地利用单元参数可通过遥感监测的方式获取。

水质指标主要为叶绿素、悬浮物、黄色物质(溶解性有机物 CDOM)以及与其相关的藻蓝素、透明度等。通过遥感指数与叶绿素、悬浮物、黄色物质具有一定的相关性,通过实测水质数据与光谱数据之间的经验公式,构建经验与半经验以及综合分析模式而获得^[98]。目前利用遥感技术能较好地进行实际监测的参数有:叶绿素 a、湖(库)水体的富营养化、悬移质泥沙含量、浑浊度、透明度和水体热污染,对湖库水华爆发、海洋赤潮和污染的动态监测也非常有效^[99]。水华是水体富营养化的常见表象,是水体中藻类爆发性生长,聚集水体表面的表现形式,也是流域面源污染的水质响应形式之一。与传统布点采样的监测方式相比,遥感监测方式不仅快速、成本低,也能全面掌握蓝藻水华的分布范围与变化过程,如应用于太湖、巢湖、滇池等重要饮用水源地^[99-100]。

为解决以流域水土流失、土地沙漠化、沙尘暴等自然灾害为代表的流域生态退化问题,中国先后开展了一系列生态建设工程^[101],但是这些工程的生态效益如何,会产生哪些需要科学的解答,遥感为流域生态治理工程的监测提供了强有力的手段。特别是小流域生态工程的监测,通过流域生态工程前期、中期和后期三期生态水文效益的监测对比,可有效评估生态工程实施的质量以及实施后的效果等^[101-102]。

针对流域河道健康与生态保护红线区域监管需求,遥感技术可为流域河道与湖泊侵占以及生态红线区域面积与功能的变化监管提供有效的监测手段。多时相流域水面面积的变化、水质的变化可精确地提供河道与湖泊基本水面面积的变化、空间分布的变化、水质信息的变化等信息,为河道与湖泊侵占以及水环境的监管提供有效的手段^[103]。同时针对流域重点生态功能区、生态环境敏感区和脆弱区,遥感能够快速提供生态系统构成及变化、生态景观平均斑块面积变化和反映生态环境状况的植被参量指标的变化,可为生态保护红线的有效的管控和严守生态保护红线底线提供直观、客观、宏观、准确的技术支撑^[104]。

遥感是流域尺度生态服务功能评价的重要手段。“全球生态系统服务价值和自然资本”^[105]将生态系统服务价值分为水调节、水供给、控制侵蚀和保持沉积物、养分循环、休闲、文化、水源涵养^[106]等类型,其评价的主要依据来源于下垫面土地覆被组成。针对单因子或类型,也可以通过以遥感为主的监测手段进行评估,如水文调节方面,在湿润地区,可以通过多时相遥感影像与地形相结合,计算现有库容与最大可调节库容之差,获取特定时间点流域的水文调节功能^[107]。此外,针对水源涵养评估,利用遥感反演的波段反射率、植被指数、郁闭度以及 DEM 信息,根据样地实测数据建立基于 13 个因子的森林水源涵养遥感估测模

型,模型的预测精度达到 79.24%,已应用到吉林省柳河县森林水源涵养量的评估中^[108]。

2 流域遥感数据产品

免费的大尺度、长序列、高分辨率的遥感时空大数据的不断涌现及其处理技术的进步,能够及时捕捉流域下垫面已经发生或正在发生的显著的时空变化过程,有利于加深人类活动对流域水循环过程、流域水资源时空分布变化的理解,提供系统的解决方案,为加深人类活动对水循环过程的扰动、对水资源时空分布规律变化的理解提供新的途径。

随着流域下垫面、水循环、水资源、生态环境、灾害以及水利工程等遥感的深入研究,所涉及的一些传统的共性遥感指标与参数算法得到迅速的发展,国内外不同机构发布了大量的共性或特性的遥感数据产品,主要包括流域下垫面关键要素遥感数据产品,如土地覆被、植被结构参数、地形与地貌、河流水系、土壤、不透水面等遥感数据产品;流域水循环关键要素遥感数据产品,如降水、蒸散发、土壤水、水面等遥感数据产品;流域灾害遥感数据产品,如洪水与旱情遥感数据产品等。

这些遥感数据产品将成为公共产品或者随时可以购得的服务,不同的机构与用户以及流域管理者均可免费下载或购买这些数据产品,开展流域管理与评估工作,且这些数据产品在不断更新。每个流域、每个机构只需要尽可能地使用好这些数据产品信息,即可获得流域内水文、生态、环境信息,满足流域相关数据传输、管理、集成和综合模拟平台建设的需求。但是大量的公共数据产品难免鱼目混珠,需要加强对遥感公共数据产品的质量控制与验证^[109]。

2.1 流域下垫面遥感数据产品

对流域下垫面所涉及的各类要素而言,当前已经涌现出多种多样的遥感数据产品,以土地覆被为例,如美国 NASA MODIS 土地覆被产品、中国国家基础地理信息中心研发与发布的空间分辨率为 30 m 的土地覆被产品(Global Land30)^[110]、清华大学发布的全球 30 m 土地覆盖数据产品^[111]及全国 10 m 土地覆被数据产品^[112]、中国科学院遥感与数字地球研究所研发与发布的空间分辨率为 30 m 的 1990 年、2000 年、2005 年、2015 年和 2017 年的中国土地覆盖数据集(ChinaCover)^[113],为下垫面土地覆被要素的更新提供了新的数据源;随着云计算与并行技术的不断进步,当前大区域尺度乃至全球尺度的土地覆被及主要要素更新已变得既简单又快速,如美国马里兰大学利用 Google Earth Engine 平台仅用数天的时间就完成 2001—2012 年全球空间分辨率为 30 m 的森林数据制图^[114],并持续更新到 2018 年。这些地表土地覆被遥感数据均可以通过这些机构发布的网址进行免费获取。

以植被结构参数为例,中国科学院遥感与数字地球研究所采用像元二分模型,基于 AVHRR/MODIS 数据,分地物类别构建了 ChinaCover 植被覆盖度数据集,基于 TSF 滤波的模型结合尺度下推方法,构建了 ChinaCover 叶面积指数数据集,这两套数据时间跨度均从 1990 至今,为月度产品,其中 1990 至 1999 年空间分辨率为 1 km,2000 年至今为 250 m^[115]。基于 AVHRR 和 MODIS 数据生产的全球陆表特征参量(GLASS)的 LAI 产品^[116];地球反射偏振测量仪数据(POLDER)^[117]、欧空局的对地观测卫星搭载的中等分辨率成像频谱仪数据(Envisat MERIS)^[118]、宽视域植被探测仪数据(SPOT VEGETATION, VGT)等都提供了植被覆盖度产品^[119],而叶面积指数产品主要包括基于 NOAA/AVHRR NDVI 数据生产的 ECOCLIMAP LAI 产品^[120],基于 SPOT/VEGETATION 数据生产的两种全球 LAI 产品^[119]: CYCLOPES、GLOBCARBON 及 1 个区域 CCRS LAI 产品^[120],基于 MODIS 数据生产的 MODIS Collection 5 级的 LAI 产品^[120],另外还有一些时间限制的 LAI 产品,如 POLDER LAI 产品^[120]和 MERIS LAI 产品^[120],或覆盖空间有限的 MISR LAI 产品^[120]等。同样,这些植被结构参数遥感数据均可以通过这些机构发布的网址进行免费获取或通过定制的方式进行获取,服务于流域植被生态遥感监测与评估。

GTOPO30、SRTM DEM、ASTER GDEM 是当前全球发布的 DEM 数据集;中国科学院地理科学与资源研

究所研制了“1:100 万中国数字地貌图”产品^[121]；世界野生动物基金会(WWF)通过其保护科学计划发展与发布的 HydroSHEDS 数据集发布了河网水系和分水岭数据包括 15"和 30"两套数据，流域盆地则包括 1~12 分级产品^[122]；《中国水图》提供了由水体与水文循环、暴雨洪水与干旱、水资源、水工程、古代水利工程与水系演变等 6 个图组组成，共 91 幅主题图数据^[123]。

基于多源遥感数据，国内外开发与发布了不同土壤数据产品数据集，包括世界土壤数据库(Harmonized World Soil Database version 1.1, HWSD)^[124-127]、美国的全球土壤类型分布图数据集^[125]、中国 1:100 万土壤空间数据产品^[124]、中国 1:100 万空间化的土壤属性数据产品^[124]、中国土壤参比数据产品^[124]以及区域尺度不同类型的土壤数据产品，如黑河流域数字土壤制图产品^[128]等；欧空局发布的不透水面(Global Human Settlement)数据产品^[127]以及长江经济带不透水面数据集^[129]等，均可服务于流域下垫面生态格局、功能与变化的相关研究。

2.2 流域水循环遥感数据产品

对于流域水循环所涉及各类要素，遥感为水循环提供了独特的数据产品。以降水为例，全球目前共有 30 余套降水栅格产品，比较有代表性的包括美国国家海洋与大气管理局(NOAA)研制的全球降水产品(GPCP 与 PERSIANN)^[5,130]、美国国家大气研究中心研制的全球降水产品(CMORPH)^[131]、美国地质调查局研制的全球降水产品(CHIRPS)^[132]、美国国家宇航局与日本太空探测署联合研制的热带降水测量卫星全球降水数据产品(TRMM)^[48]、新一代全球降水测量使用卫星全球降水数据产品(GPM)等^[133]。其中 GPCP 降水产品空间分辨率为 2.5°，时间分辨率为月，覆盖全球所有的范围，时间覆盖范围从 1979 年延续至今^[5]；PERSIANN 降水产品空间分辨率为 0.25°，时间分辨率为 3 h、6 h 与 1 d，覆盖南北纬 60°范围内的地区，产品自 1983 年延续至今^[133]；CMORPH 降水产品从 2002 年延续至今^[133]，时间分辨率为 30 min、3 h 与 1 d，空间分辨率为 0.25°(8 km)的降水数据集，覆盖全球南北纬 60°范围内的地区^[131]；CHIRPS 降水产品从 1981 年延续至今，覆盖全球南北纬 50°范围内的地区，空间分辨率为 0.05°，时间分辨率为天/旬/月^[131]；目前 TRMM 发布了空间分辨率为 25 km、时间分辨率为 3 h 的 TRMM 3B42 降水产品与月降水产品 TRMM 3B43^[48]；目前 GPM 对外发布空间分辨率为 0.1°，时间分辨率为 0.5 h、1 d、7 d 与 1 个月，覆盖全球南北纬 60°之间的降水产品^[133]。

以蒸散发为例，目前不同学者与机构已发布了相关的陆表蒸散发数据产品，包括全球陆表蒸散发数据产品与区域陆表蒸散发数据产品，如 MOD16 全球产品^[134]、NTSG 全球产品^[135]、MPI 全球产品^[136]、SSEBop 全球产品^[137]、GLEAM 全球产品^[138]、PML-2 全球产品^[139]；区域陆表蒸散发数据产品包括非洲-中东陆表蒸散发产品^[140]、黑河流域陆表蒸散发数据产品^[141]与海河流域蒸散发数据产品^[23]以及中国北方地区蒸散发数据产品^[23]等。这些降水与蒸散发遥感数据均可以通过这些机构发布的网址进行免费获取或通过定制的方式进行获取，服务于流域水平衡分析、灌区水资源管理等工作。

随着微波辐射亮温以及辐射传输理论模型的大力发展，陆续发射的 AMSR-E/AQUA、AMSR2/G-COM1、MWRI/FY-3、SMOS 和 SMAP 等卫星，利用其携带的被动微波辐射计监测地表水分状况，发布了全球土壤水分产品^[142]，有日产品、旬产品和月产品，时间跨度从 2000—2011 年，产品数据分辨率为 25 km×25 km，采用统一的 EASE GRID 投影方式。中国的 FY-3 号(FY-3A、FY-3B、FY-3C)系列卫星也搭载了微波辐射计 MWRI，发布对应的土壤水分监测方法，形成日、旬和月的土壤水分产品，发布的产品从 2009 年至今。AMSR2 是 AMSR-E 的后续传感器，AMSR2 搭载于全球观计划 GCOM-W1 卫星，日本宇航局(JAXA)发展了基于 AMSR2 的土壤水分算法，自 2012 年 5 月份起提供逐日产品。SMOS 是一个 L 波段被动微波传感器，该传感器可以提供 0 到 55°的多角度、双极化、全球范围的观测，空间分辨率为 30 km，时间分辨率为 3 d。为满足水循环科学应对自然灾害的应用要求，最新的 SMAP 计划的首批地球观测卫星之一^[143]，每两三天提供高时空分辨率的全球土壤水分数据，SMAP 计划观测数据可以增强模型模拟和数据同化能力，提高深层土壤水分和生物系统碳循环监测能力，提高洪水和干旱灾害的监测能力。SMAP 遥感卫星直接探测浅层土壤水分(0~

5 cm),同时为了满足更多应用需求,利用模型反演1 m内的土壤不同层的水分含量。将SMAP卫星观测到的表层土壤水分数据与土壤水分同化系统结合,SMAP首次估算1 m内深层土壤水分,并生产和发布4级产品,提供空间分辨率为9 km的深层土壤水分数据集^[143]。这些土壤水分产品均可以在官方机构免费获取,为流域水管理提供长时间序列、稳定的数据集。

水面数据有全球1984—2015年30 m空间分辨率地表水数据集(Global Surface Water Dataset)^[144]、全球1995年至今的湖泊水面数据集^[145]、全球1999年至今的每10 d、300 m/1 000 m地表水体数据集,全球每天的水体制图产品^[146]等。这些全球水面遥感数据均可通过这些机构发布的网址进行免费获取或通过定制的方式进行获取,可为流域尺度内人类活动与气候变化的影响研究提供基础数据支撑。

2.3 流域灾害遥感数据产品

目前国内外发布的洪水信息产品主要是区域数据产品,如基于LANDSAT和TerraSAR-X多源遥感数据,综合利用多分类方法生成了马来西亚Terengganu地区的洪水产品^[147],中国水利部建立了全国水雨情信息网,结合气象部门提供的FY-2E气象卫星和日本MTSAT静止卫星的红外云图、水气云图和可见光云图数据,生成洪水实时监测与预测产品(<http://xxfb.hydroinfo.gov.cn/>)。而目前国内外发布的有关旱情产品数据同时包括全球与区域数据产品,如美国国家海洋和大气管理局(NOAA)卫星应用和研究中心(STAR)发布了全球干旱遥感指数产品,基于该产品中相关指数信息生成干旱监测分布图^[148]。联合国粮农组织全球粮食和农业信息及预警系统(GIEWS)联合开发了农业干旱胁迫指数(ASI)数据产品,能够早期识别可能受到旱情或旱灾(极端情况下)影响的农业地区。中国科学院遥感与数字地球研究所于2006年建设了DroughtWatch全国旱情遥感监测系统,基于该系统自2006年以来定期发布全国耕地旱情监测旬产品^[149]。这些流域灾害遥感数据产品,可为流域洪水与旱情的监测与影响评估提供及时且快速有效的数据支撑。

3 流域遥感面临的挑战

人类活动已改变了流域的下垫面结构、流域水循环过程与转化机制,现有的常规观测手段已经不适合、也满足不了流域水资源管理与实践的需求。遥感经过50多年的发展^[150],呈现多光谱、多空间和多时间分辨率的特点,可为流域尺度的数据获取、信息提炼和知识抽象提供综合监测手段和高精度的流域遥感数据产品,为流域管理提供独特的数据源,且费用低廉。然而,流域遥感仍然面临着很多挑战:

(1) 流域遥感数据产品常规应用相对较少,应急使用较多。以地表水面监测为例,遥感数据的使用仅限于汛期洪水动态监测与灾情评估,非汛期的常规监测很少,大量的遥感数据产品很少用于水文模式的改进。

(2) 行业管理部门应用较少。目前的数据产品尽管很多,业务部门仍然心存疑虑,不放心使用,又缺少连续的现场观测数据对遥感方法或模型进行有效的标定和验证;流域机构自己处理遥感数据时,既需要较大的投资,又需要有专业技术人员的配置,处理结果的质量往往不理想,时间上也不能及时提供,从而挫败了流域机构利用遥感的信心。

(3) 知识结构的取向。流域行政管理部门中多以传统水资源研究方向的技术人员为主,而能应用遥感的专业技术人员较少^[2],知识结构的限制难以在流域行政管理部门有效开展流域遥感监测与分析,亟需改善流域行政管理部门相关人员的知识结构。这也是遥感分析在流域土地利用分类中能得到广泛应用,而在其他流域管理中难于推广应用的主要原因之一。

众多资源、气象、重力与测距等遥感卫星发射以及各类航空与无人机遥感的发展,为流域遥感提供了多样且极为丰富的遥感信息,随着遥感监测方法的快速发展,为服务于流域综合管理活动全方位的信息的要求,流域遥感需结合这些不同类型传感器遥感信息自身的优势,从问题出发,发展出一些易于处理且能够反映流域特征的数据指标,充分挖掘遥感观测数据隐含的深层指示性特征,构建具有指示性意义的新型流域遥感指数数据产品,开展流域水文水资源遥感应用研究。例如对地表水下渗、自然地表蒸散发、城市热岛效

应、城市内涝等具有重要影响的流域不透水面要素^[1]，能够利用流域不透水面指数实现快速提取，识别方法相对简单^[21]。

精度往往是拒绝使用遥感数据产品最简单、最粗暴的理由。事实上，所有数据都有精度问题，常规数据的精度可能更低，只是人们已习惯而不予计较。一方面，流域遥感数据产品应以形成高质量的数据产品为目标，如前面提到的 CYCLOPES LAI 数据产品^[120]、多传感器联合反演降水数据产品^[152]、基于遥感的流域区域蒸散发监测方法(ETWatch)及其产出的多尺度-多源数据协同的陆表蒸散发数据产品^[141]，充分利用所有可用的遥感观测数据，发挥不同遥感观测数据的优势，已经成为反演高精度、高分辨率流域遥感数据产品的主流途径^[153]。随着各类亚米级、甚至厘米级高分辨率和高精度遥感信息不断涌现，未来应利用多源协同遥感观测与分析处理方法，充分结合多种遥感观测数据的优势，充分利用各种更高精度、更高分辨率遥感海量数据，考虑融合与同化不同类型遥感信息，形成合力，提高流域遥感数据产品的精度，开展流域精细尺度水资源管理研究。另一方面，流域管理中也需要管理人员摆脱原有学科的束缚，大胆地应用流域遥感数据产品。

流域遥感要与云计算结合，降低流域遥感数据产品生成的技术瓶颈，让遥感开始真正“飞入寻常百姓家”，如 Google 针对地球观测大数据开发了全球尺度 PB(10¹⁵ bit) 级数据处理能力的 GEE 云平台，极大提升了地球观测大数据的处理与信息挖掘能力。GEE 内置预处理后的长时间序列 Landsat、MODIS、Sentinel 等系列数据，能够快速实现长时间、大范围的动态变化监测^[153]。近年来，深度学习方法逐渐被引入到图像分割、目标识别和分类中^[154]，利用机器学习的过程对图像所包含的特征信息进行挖掘，开展了高精度的水体地物类型的目标识别。

流域遥感与云服务的结合，降低流域遥感数据产品的应用难度和成本，将是流域遥感走向实用的主流方向。流域遥感云服务以下垫面、水循环、水灾害等数据产品为主体，结合地面观测及众源数据的汇聚，任何人都可以通过几行简易的命令查看、处理、分析遥感数据，并可轻松实现流域、子流域的分析应用^[37]，开发应用工作(app)，提供水资源评估等流域管理决策支持。依托云服务，流域管理将实现跨越式发展，无需投入大量资金与人力进行硬件设备的采购和维护，大幅节约发展中国家开展流域管理的投入。通过在云端搭建流域管理的全流程解决方案，云服务的个性化定制、移植与维护的成本也显著降低。云服务可使任何人在任何地方，通过简单的交互式命令，就能快速查询、处理和分析众源与大尺度对地观测数据，满足特定流域的监测与评估^[109]。

4 结 语

流域的综合管理需要及时、完整、连续和高精度的监测信息支撑。流域遥感对流域下垫面、水循环、水资源、生物及地球化学循环、自然灾害和人类社会活动信息的提炼和知识抽象，可为流域系统科学发展和流域综合管理提供综合监测方法和高精度的流域遥感数据产品，包括高分辨率、多时相以及近实时的流域下垫面、水循环、水资源、水灾害以及生态环境关键要素监测信息。流域遥感需与云计算结合，降低流域遥感数据产品生成的技术瓶颈，且需与云服务结合，降低流域遥感数据产品的应用难度和成本。流域遥感数据产品将成为公共产品或者随时可以购得的服务，不同的机构与用户以及流域管理者均可免费下载或购买这些公共数据产品信息，且在对遥感数据产品验证的基础上，可大胆地选用经过验证的流域遥感数据产品开展流域水资源、水环境及生态的管理与评估工作。每个流域、每个机构只需要尽最大能力使用好这些公共流域遥感数据产品信息，即可获得流域内水文、生态、环境全方位信息，满足流域相关数据传输、管理、集成和综合模拟平台建设的需求。

参考文献:

- [1] 张建云, 王国庆, 金君良, 等. 1956—2018 年中国江河径流演变及其变化特征[J]. 水科学进展, 2020, 31(2): 153-161.
(ZHANG J Y, WANG G Q, JIN J L, et al. Evolution and variation characteristics of the recorded runoff for the major rivers in

- China during 1956—2018 [J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(2): 153–161. (in Chinese)
- [2] 吴炳方,张森. 从遥观测数据到数据产品[J]. *地理学报*, 2017, 72(11): 2093–2111. (WU B F, ZHANG M. Remote sensing: observations to data products [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(11): 2093–2111. (in Chinese))
- [3] ALSDORF D E, MELACK J M, DUNNE T, et al. Interferometric radar measurements of water level changes on the Amazon flood plain [J]. *Nature*, 2000, 404: 174–177.
- [4] 李哲. 多源降雨观测与融合及其在长江流域的水文应用[D]. 北京: 清华大学, 2015. (LI Z. Multi-source precipitation observations and fusion for hydrological applications in the Yangtze River basin [D]. Beijing: Tsinghua University, 2015. (in Chinese))
- [5] HUFFMAN G J, ADLER R F, ARKIN P, et al. The Global Precipitation Climatology Project (GPCP) combined precipitation dataset [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1997, 78: 5–20.
- [6] 吴炳方,熊隽,闫娜娜,等. 基于遥感的区域蒸散量监测方法: ETWatch [J]. *水科学进展*, 2008, 19(5): 671–678. (WU B F, XIONG J, YAN N N, et al. ETWatch for monitoring regional evapotranspiration with remote sensing [J]. *Advances in Water Science*, 2008, 19(5): 671–678. (in Chinese))
- [7] 吴炳方,邢强. 遥感的科学推动作用与重点应用领域 [J]. *地球科学进展*, 2015, 30(7): 751–762. (WU B F, XING Q. Remote sensing roles on driving science and major applications [J]. *Advances in Earth Science*, 2015, 30(7): 751–762. (in Chinese))
- [8] LI X, CHENG G D, GE Y C, et al. Hydrological cycle in the Heihe River basin and its implication for water resource management in endorheic basins [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123(2): 890–914.
- [9] SELLERS P J, HALL F G, ASRAR G, et al. The First ISLSCP Field Experiment (FIFE) [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1988, 69(1): 22–27.
- [10] SELLERS P, HALL F, MARGOLIS H, et al. The Boreal Ecosystem Atmosphere Study (BOREAS): an overview and early results from the 1994 field year [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1995, 76(9): 1549–1577.
- [11] 王延禄. 全球能量和水循环试验 [J]. *气象科技*, 1989, 17(4): 40–42. (WANG Y L. Global energy and water cycle experiment [J]. *Meteorological Technology*, 1989, 17(4): 40–42. (in Chinese))
- [12] GOUTORBE J P, LEBEL T, TINGA A, et al. HAPEX-SAHEL: a large scale study of land atmosphere interactions in the semi-arid tropics [J]. *Annales Geophysicae*, 1994, 2(1): 53–64.
- [13] AVISSAR R, NOBRE C A. Preface to special issue on the large scale biosphere atmosphere experiment in Amazonia (LBA) [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2002, 107(D20): 8034.
- [14] GAME, TAKESHI O, KENICHIRO U, et al. Preface GEWEX Asian monsoon experiment: hydrological aspects [J]. *Hydrological Processes*, 2007, 21(15): 1981.
- [15] LI X, CHENG G D, LIU S M, et al. Heihe Watershed Allied Telemetry Experimental Research (HiWATER): scientific objectives and experimental design [J]. *Bulletin of American Meteorological Society*, 2013, 94(8): 1145–1160.
- [16] 邓晓军,许有鹏,韩龙飞,等. 城市化背景下嘉兴市河流水系的时空变化 [J]. *地理学报*, 2016, 71(1): 75–85. (DENG X J, XU Y P, HAN L F, et al. Spatia-temporal changes of river systems in Jiaying under the background of urbanization [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(1): 75–85. (in Chinese))
- [17] 左伟,曹学章,李硕. 基于数字地形分析的小流域分割技术 [J]. *测绘通报*, 2003(5): 52–54. (ZUO W, CAO X Z, LI S. Separated mini-watersheds based on digital terrain analysis technology [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2003(5): 52–54. (in Chinese))
- [18] 谢军,秦承志,肖桂荣,等. 模糊聚类方法在南方红壤小流域土壤属性制图中的应用: 以长汀朱溪河小流域为例 [J]. *中国水土保持科学*, 2015, 13(5): 132–139. (XIE J, QIN C Z, XIAO G R, et al. Soil property mapping using fuzzy clustering method in small watershed of the red soil region in southern China: a case study of Zhuxi watershed [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2015, 13(5): 132–139. (in Chinese))
- [19] PU R L, GONG P, MICHISHITA R, et al. Spectral mixture analysis for mapping abundance of urban surface components from the Terra/ASTER data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(3): 939–954.
- [20] TIAN Y, WOODCOCK C E, WANG Y, et al. Multiscale analysis and validation of the MODIS LAI product: II: sampling strategy [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(3): 431–441.

- [21] 徐涵秋, 王美雅. 地表不透水面信息遥感的主要方法分析[J]. 遥感学报, 2016, 20(5): 1270-1289. (XU H Q, WANG M Y. Remote sensing-based retrieval of ground impervious surfaces[J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(5): 1270-1289. (in Chinese))
- [22] 张文建, 许健民, 方宗义, 等. 暴雨系统的卫星遥感理论和方法[M]. 北京: 气象出版社, 2004. (ZHANG W J, XU J M, FANG Z Y, et al. Remote sensing theory and method of rainstorm system[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2004. (in Chinese))
- [23] WU B F, YAN N N, XIONG J, et al. Validation of ETWatch using field measurements at diverse landscapes: a case study in Hai basin of China[J]. Journal of Hydrology, 2012, 436/437: 67-80.
- [24] 胡小工, 陈剑利, 周永宏, 等. 利用 GRACE 空间重力测量监测长江流域水储量的季节性变化[J]. 中国科学: 地球科学, 2006, 36(3): 225-232. (HU X G, CHEN J L, ZHOU Y H, et al. Using GRACE spatial gravity measurements to monitor seasonal changes in water reserves in the Yangtze River[J]. SCIENTIA SINICA Terrae, 2006, 36(3): 225-232. (in Chinese))
- [25] 孔凡哲, 李莉莉. 利用 DEM 提取河网时集水面积阈值的确定[J]. 水电能源科学, 2005, 23(4): 65-67. (KONG F Z, LI L L. Determination of catchment area threshold when extracting river network using DEM[J]. Water Resources and Power, 2005, 23(4): 65-67. (in Chinese))
- [26] PRICE J C. On the analysis of thermal infrared imagery: the limited utility of apparent thermal inertia[J]. Remote Sensing of Environment, 1985, 18(1): 59-73.
- [27] 刘小生, 黄玉生. 基于 ArcInfo 的洪水淹没面积的计算方法[J]. 测绘通报, 2003(6): 46-48. (LIU X S, HUANG Y S. The calculation of the drown area based on Arc/info[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2003(6): 46-48. (in Chinese))
- [28] HUNINK J, SIMONS G, SUÁREZ-ALMIÑANA S, et al. A simplified water accounting procedure to assess climate change impact on water resources for agriculture across different European River basins[J]. Water, 2019, 11(10): 1976.
- [29] 郑捷, 李光永, 韩振中. 中美主要农作物灌溉水分生产率分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(11): 46-50. (ZHENG J, LI G Y, HAN Z Z. Sino-US irrigation water use efficiencies of main crops[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(11): 46-50. (in Chinese))
- [30] SERVENAY A, PRAT C. Erosion extension of indurated volcanic soils of Mexico by aerial photographs and remote sensing analysis[J]. Geoderma, 2003, 117: 367-375.
- [31] 李子轩, 邹海天, 赵辉, 等. 县域尺度水土流失重点治理区域划定方法[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(6): 56-63. (LI Z X, ZOU H T, ZHAO H, et al. An approach of dividing key control area for soil and water loss at the county scale[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018, 16(6): 56-63. (in Chinese))
- [32] 王建国. 生态要素与城市整体空间特色的形成和塑造[J]. 建筑学报, 1999(9): 20-23. (WANG J G. The formation and shaping of ecological elements and urban spatial features[J]. Architectural Journal, 1999(9): 20-23. (in Chinese))
- [33] 王博, 夏敦胜, 余晔, 等. 环境磁学在监测城市河流沉积物污染中的应用[J]. 环境科学学报, 2011, 31(9): 1979-1991. (WANG B, XIA D S, YU Y, et al. Use of environmental magnetism to monitor pollution in the river sediment of an urban area[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(9): 1979-1991. (in Chinese))
- [34] 高诞源, 叶寿征, 张君友, 等. 水文下垫面分析与分类初探[J]. 水文, 1999(4): 13-18. (GAO D Y, YE S Z, ZHANG J Y, et al. Analysis and classification of the hydrological underlying surface[J]. Journal of China Hydrology, 1999(4): 13-18. (in Chinese))
- [35] 王浩, 贾仰文, 杨贵羽, 等. 海河流域二元水循环及其伴生过程综合模拟[J]. 科学通报, 2013, 58(12): 1064-1077. (WANG H, JIA Y W, YANG G Y, et al. Integrated simulation of the dualistic water cycle and its associated processes in the Haihe River basin[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(12): 1064-1077. (in Chinese))
- [36] GONG P, LI X C, ZHANG W. 40-Year (1978—2017) human settlement changes in China reflected by impervious surfaces from satellite remote sensing[J]. Science Bulletin, 2019, 64(11): 756-763.
- [37] 吴炳方, 张鑫, 曾红伟, 等. 资源环境数据生成的大数据方法[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(8): 804-811. (WU B F, ZHANG X, ZENG H W, et al. Big data methods for environmental data[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2018, 33(8): 804-811. (in Chinese))
- [38] GAN C Y, WANG X Z, BAO S L, et al. Changes of vegetation coverage during recent 18 years in Lianjiang River watershed[J]. Scientia Geographica Sinica, 2011, 31(8): 1019-1024.

- [39] QI J, MARSETT R C, MORAN M S, et al. Spatial and temporal dynamics of vegetation in the San Pedro River basin area[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 105: 55-68.
- [40] 潘晓玲. 干旱区绿洲生态系统动态稳定性的初步研究[J]. *第四纪研究*, 2001, 21(4): 345-351. (PAN X L. Preliminary study on dynamic stability of oasis ecosystem in arid area[J]. *Quaternary Sciences*, 2001, 21(4): 345-351. (in Chinese))
- [41] 梁顺林, 袁文平, 肖青, 等. 全球陆表特征参量产品生成与应用研究[J]. *中国科学院院刊*, 2013, 28(增刊1): 122-131. (LIANG S L, YUAN W P, XIAO Q, et al. Generation and application of global land surface characteristic parameters[J]. *China Science and Technology Achievements*, 2013, 28(suppl 1): 122-131. (in Chinese))
- [42] 周成虎, 杜云艳, 骆剑承. 基于知识的 AVHRR 影像的水体自动识别方法与模型[J]. *自然灾害学报*, 1996, 5(3): 100-108. (ZHOU C H, DU Y Y, LUO J C. A description model based on knowledge for automatically recognizing water from NOAA/AVHRR[J]. *Journal of Natural Disasters*, 1996, 5(3): 100-108. (in Chinese))
- [43] 季荣耀, 陆永军, 詹小磊, 等. 伶仃洋茅洲河口动力地貌演变过程[J]. *水科学进展*, 2019, 30(6): 781-788. (JI R Y, LU Y J, ZHAN X L, et al. Study on the morphodynamic evolution processes in the Maozhou Estuary of the Lingding Bay[J]. *Advances in Water Science*, 2019, 30(6): 781-788. (in Chinese))
- [44] 刘娟, 蔡演军, 王瑾. 青海湖流域土壤遥感分类[J]. *国土资源遥感*, 2014, 26(1): 57-62. (LIU J, CAI Y J, WANG J. Soil classification of Qinghai Lake basin based on remote sensing[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2014, 26(1): 57-62. (in Chinese))
- [45] 王强. 三峡库首土壤厚度空间变异研究: 以秭归县为例[D]. 北京: 中国科学院大学, 2011. (WANG Q. Spatial variability of soil thickness in Three Gorges Reservoir area: a case study of Zigui County[D]. Beijing: University of the Chinese Academy of Sciences, 2011. (in Chinese))
- [46] 王忠静, 杨芬, 赵建世, 等. 基于分布式水文模型的水资源评价新方法[J]. *水利学报*, 2008, 39(12): 1279-1285. (WANG Z J, YANG F, ZHAO J S, et al. New approach for water resources assessment based on distributed hydrological model[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 39(12): 1279-1285. (in Chinese))
- [47] 刘昌明, 王中根, 杨胜天, 等. 地表物质能量交换过程中的水循环综合模拟系统(HIMS)研究进展[J]. *地理学报*, 2014, 69(5): 579-587. (LIU C M, WANG Z G, YANG S T, et al. Hydro-Informatic Modeling System: aiming at water cycle in land surface material and energy exchange processes[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(5): 579-587. (in Chinese))
- [48] 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]. *Journal of Hydrometeorology*, 2007, 8(1): 38-55.
- [49] SHI J C, DONG X L, ZHAO T J. The water cycle observation mission (WCOM): overview[C]//Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) Conference publication. Beijing: IEEE, 2016: 3430-3433.
- [50] ZHUANG Q F, WU B F, YAN N N, et al. A method for sensible heat flux model parameterization based on radiometric surface temperature and environmental factors without involving the parameter KB^{-1} [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2016, 47: 50-59.
- [51] 刘荣华, 张珂, 晁丽君, 等. 基于多源卫星观测的中国土壤湿度时空特征分析[J]. *水科学进展*, 2017, 28(4): 479-487. (LIU R H, ZHANG K, CHAO L J, et al. Analysis of spatiotemporal characteristics of surface soil moisture across China based on multi-satellite observations[J]. *Advances in Water Science*, 2017, 28(4): 479-487. (in Chinese))
- [52] ENTEKHABI D, NJOKU E G, O'NEILL P E, et al. The Soil Moisture Active Passive (SMAP) mission[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2010, 98(5): 704-716.
- [53] YEH P J F, SWENSON S C, FAMIGLIETTI J S, et al. Remote sensing of groundwater storage changes in Illinois using the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) [J]. *Water Resources Research*, 2006, 42(12): W12203.
- [54] STRASSBERG G, SCANLON B R, CHAMBERS D. Evaluation of groundwater storage monitoring with the GRACE satellite: case study of the high plains aquifer, central United States[J]. *Water Resources Research*, 2009, 45(5): W05410.
- [55] 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 [J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(4): 2110-2118.
- [56] RODELL M, VELICOGNA I, FAMIGLIETTI J S. Satellite-based estimates of groundwater depletion in India[J]. *Nature*, 2009, 460(7258): 999-1002.

- [57] JOODAKI G , WAHR J , SWENSON S. Estimating the human contribution to groundwater depletion in the Middle East , from GRACE data , land surface models , and well observations [J]. *Water Resources Research* , 2014 , 50(3) : 2679–2692.
- [58] GAO B , QIN Y , WANG Y H , et al. Modeling ecohydrological processes and spatial patterns in the upper Heihe River basin in China [J]. *Forests* , 2016 , 7(1) : 10.
- [59] QIN H H , CAO G L , KRISTENSEN , et al. Integrated hydrological modeling of the North China Plain and implications for sustainable water management [J]. *Hydrology and Earth System Sciences* , 2013 , 17(10) : 3759–3778.
- [60] 汤秋鸿, 张学君, 戚友存, 等. 遥感陆地水循环的进展与展望 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)* , 2018 , 43(12) : 1872–1884. (TANG Q H , ZHANG X J , QI Y C , et al. Remote sensing of the terrestrial water cycle: progress and perspectives [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University* , 2018 , 43(12) : 1872–1884. (in Chinese))
- [61] 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(2) : 249–268.
- [62] XU X Y , LI J , TOLSON B A. Progress in integrating remote sensing data and hydrologic modeling [J]. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* , 2014 , 38(4) : 464–498.
- [63] 王忠静, 李宏益, 杨大文. 现代水资源规划若干问题及解决途径与技术方法(一): 还原“失真”与“失效” [J]. *海河水利* , 2003(1) : 13–16. (WANG Z J , LI H Y , YANG D W. Some problems in modern water resources planning and their solutions and technical methods (1) [J]. *Haihe Water Resources* , 2003(1) : 13–16. (in Chinese))
- [64] 王浩, 仇亚琴, 贾仰文. 水资源评价的发展历程和趋势 [J]. *北京师范大学学报(自然科学版)* , 2010 , 46(3) : 274–277. (WANG H , QIU Y Q , JIA Y W. Development course and tendency of water resources assessment [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)* , 2010 , 46(3) : 274–277. (in Chinese))
- [65] MCA. Water accounting framework for the minerals industry [R]. Brisbane St Lucia: Minerals Council of Australia with the Sustainable Minerals Institute of the University of Queensland , 2012.
- [66] FAO. Water accounting and auditing: a sourcebook [R]. Rome: Food and Agriculture Organization , 2016.
- [67] SCHMIDT G , BASSI N , BENITEZ S C. Blueprint for national water accounting framework in India [R]. Vienna: Fresh Thoughts Consulting GmbH , 2017.
- [68] 马毅, 张杰, 张靖宇, 等. 浅海水深光学遥感研究进展 [J]. *海洋科学进展* , 2018 , 36(3) : 331–351. (MA Y , ZHANG J , ZHANG J Y , et al. Progress in Shallow water depth mapping from optical remote sensing [J]. *Advances in Marine Science* , 2018 , 36(3) : 331–351. (in Chinese))
- [69] MCCABE M F , RODELL M , ALSDORF D , et al. The future of earth observation in hydrology [J]. *Hydrology and Earth System Sciences* , 2017 , 21(7) : 3879–3914.
- [70] 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) : 1425–1432.
- [71] 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. (XU H Q. A study on information extraction of water body with the Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI) [J]. *Journal of Remote Sensing* , 2005 , 9(5) : 589–595. (in Chinese))
- [72] PEKEL J F , COTTAM A , GORELICK N , et al. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes [J]. *Nature* , 2016 , 540(7633) : 418–422.
- [73] LIU J , ZEHNDER A J B , YANG H. Drops for crops: modeling crop water productivity on a global scale [J]. *Global Nest Journal* , 2008 , 10(3) : 295–300.
- [74] 彭致功, 刘钰, 许迪, 等. 基于 RS 数据和 GIS 方法估算区域作物节水潜力 [J]. *农业工程学报* , 2009 , 25(7) : 8–12. (PENG Z G , LIU Y , XU D , et al. Application of RS and GIS technique for water-saving potential estimation of regional crops [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* , 2009 , 25(7) : 8–12. (in Chinese))
- [75] 王浩, 贾仰文. 变化中的流域“自然-社会”二元水循环理论与研究方法 [J]. *水利学报* , 2016 , 47(10) : 1219–1226. (WANG H , JIA Y W. Theory and study methodology of dualistic water cycle in river basins under changing conditions [J]. *Journal of Hydraulic Engineering* , 2016 , 47(10) : 1219–1226. (in Chinese))
- [76] VELPURI N M , SENAY G B , SINGH R K , et al. Comprehensive evaluation of two MODIS evapotranspiration products over the conterminous United States: using point and gridded FLUXNET and water balance ET [J]. *Remote Sensing of Environment* ,

- 2013, 139: 35-49.
- [77] WU B F, ZENG H W, YAN N N, et al. Approach for estimating available consumable water for human activities in a river basin [J]. *Water Resources Management*, 2018, 32(7): 2353-2368.
- [78] 刘家宏, 秦大庸, 王明娜, 等. 区域目标 ET 的理论与计算方法: 应用实例 [J]. *中国科学: 技术科学*, 2009, 39(2): 318-323. (LIU J H, QIN D Y, WANG M N, et al. Theory and calculation method of regional target ET: applications [J]. *SCIENTIA SINICA Technologica*, 2009, 39(2): 318-323. (in Chinese))
- [79] 王浩, 杨贵羽, 贾仰文, 等. 以黄河流域土壤水资源为例说明以“ET 管理”为核心的现代水资源管理的必要性和可行性 [J]. *中国科学: 技术科学*, 2009, 39(10): 1691-1701. (WANG H, YANG G Y, JIA Y W, et al. Taking the water resources of the Yellow River basin as an example to illustrate the necessity and feasibility of modern water resources management with “ET management” [J]. *SCIENTIA SINICA Technologica*, 2009, 39(10): 1691-1701. (in Chinese))
- [80] WU B F, JIANG L P, YAN N N, et al. Basin-wide evapotranspiration management: concept and practical application in Hai Basin, China [J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 145: 145-153.
- [81] 周成虎. 洪涝灾害遥感监测研究 [J]. *地理研究*, 1993, 12(2): 63-68. (ZHOU C H. Flood disaster surveillance and evaluation by remote sensing [J]. *Geographical Research*, 1993, 12(2): 63-68. (in Chinese))
- [82] 曾子悦, 许继军, 王永强. 基于遥感空间信息的洪水风险识别与动态模拟研究进展 [J]. *水科学进展*, 2020, 31(3): 463-472. (ZENG Z Y, XU J J, WANG Y Q. Advances in flood risk identification and dynamic modelling based on remote sensing spatial information [J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(3): 463-472. (in Chinese))
- [83] 屈艳萍, 吕娟, 张伟兵, 等. 中国历史极端干旱研究进展 [J]. *水科学进展*, 2018, 29(2): 283-292. (QU Y P, LYU J, ZHANG W B, et al. Progress in research on historical extreme drought in China [J]. *Advances in Water Science*, 2018, 29(2): 283-292. (in Chinese))
- [84] KRISHNAMURTHY R P K, FISHER J B, SCHIMEL D S, et al. Applying tipping point theory to remote sensing science to improve early warning drought signals for food security [J]. *Earth's Future*, 2020, 8(3): e2019EF001456.
- [85] HARRY W, NEVIL Q, MICHAEL H. Remote sensing for drought monitoring & impact assessment: progress, past challenges and future opportunities [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 232: 111291.
- [86] LIU Q, ZHANG S, ZHANG H R, et al. Monitoring drought using composite drought indices based on remote sensing [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 711: 134585.
- [87] BROWN J F, WARDLOW B D, TADESSE T, et al. The Vegetation Drought Response Index (VegDRI): a new integrated approach for monitoring drought stress in vegetation [J]. *GIScience & Remote Sensing*, 2008, 46(1): 16-46.
- [88] WU J J, ZHOU L, LIU M, et al. Establishing and assessing the Integrated Surface Drought Index (ISDI) for agricultural drought monitoring in mid-eastern China [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013, 23(8): 397-410.
- [89] CHANG S, WU B F, YAN N N, et al. Suitability assessment of satellite-derived drought indices for Mongolian Grassland [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(7): 650.
- [90] RAJSEKHAR D, SINGH V P, MISHRA A. K. Multivariate drought index: an information theory based approach for integrated drought assessment [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 526(11/12): 164-182.
- [91] ZHANG X, CHEN N C, LI J Z, et al. Multi-sensor integrated framework and index for agricultural drought monitoring [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 188: 141-163.
- [92] 康文慧, 宋晓谕, 李洁, 等. 基于 GIS 技术的流域生态补偿方案设计 [J]. *遥感技术与应用*, 2018, 33(4): 766-774. (KANG W H, SONG X Y, LI J, et al. Design of ecological compensation scheme for river basin based on remote sensing data [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2018, 33(4): 766-774. (in Chinese))
- [93] WU B F, MA Z H, YAN N N. Agricultural drought mitigating indices derived from the changes in drought characteristics [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 244: 111813.
- [94] 浦思琴. 水土流失数学建模及科学治理研究 [J]. *中国科技纵横*, 2015(23): 225. (PU S Q. Study on mathematical modeling and scientific control of soil and water loss [J]. *China Science & Technology Panorama Magazine*, 2015(23): 225. (in Chinese))
- [95] 杨才敏. 水土流失强度及分级 [J]. *山西水土保持科技*, 2012(2): 36-37. (YANG C M. Soil erosion intensity and classifica-

- tion[J]. *Soil and Water Conservation Science and Technology in Shanxi*, 2012(2): 36–37. (in Chinese)
- [96] ANGIMA S D, STOTT D E, ONEILL M K, et al. Soil erosion prediction using RUSLE for central Kenyan highland conditions [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2003, 97: 295–308.
- [97] OLNESS A. Water quality: prevention, identification and management of diffuse pollution [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1995, 162(1): 383.
- [98] 张兵, 李俊生, 申茜, 等. 地表水环境遥感监测关键技术与系统 [J]. *中国环境监测*, 2019, 35(4): 1–9. (ZHANG B, LI J S, SHEN Q, et al. Key technologies and systems of surface water environment monitoring by remote sensing [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2019, 35(4): 1–9.
- [99] 佘兆骏, 段洪涛, 朱利, 等. 基于环境卫星 CCD 数据的太湖蓝藻水华监测算法研究 [J]. *湖泊科学*, 2016, 28(3): 624–634. (NAI Z J, DUAN H T, ZHU L, et al. A novel algorithm to monitor cyanobacterial blooms in Lake Taihu from HJ-CCD imagery [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2016, 28(3): 624–634. (in Chinese))
- [100] 唐晓先, 沈明, 段洪涛. 巢湖蓝藻水华时空分布(2000—2015年) [J]. *湖泊科学*, 2017, 29(2): 276–284. (TANG X X, SHEN M, DUAN H T. Temporal and spatial distribution of algal blooms in Lake Chaohu, 2000—2015 [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2017, 29(2): 276–284. (in Chinese))
- [101] 吴炳方, 李苗苗, 颜长珍, 等. 生态环境典型治理区 5 年期遥感动态监测 [J]. *遥感学报*, 2005, 9(1): 32–38. (WU B F, LI M M, YAN C Z, et al. Environment monitoring over 1997—2002 with remote sensing in 5 national environmental project sites [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2005, 9(1): 32–38. (in Chinese))
- [102] 孙涛, 范福新, 梁籍, 等. 水土保持生产建设项目扰动遥感分析 [J]. *中国水利*, 2017(20): 38–40. (SUN T, FAN F X, LIANG J, et al. Studies on remote sensing disturbance analysis for soil and water conservation projects [J]. *China Water Resources*, 2017(20): 38–40. (in Chinese))
- [103] 孙中平, 史园莉, 曹飞, 等. 遥感大数据环境下对生态红线监管方式创新的思考 [J]. *环境与可持续发展*, 2016, 41(1): 65–68. (SUN Z P, SHI Y L, CAO F, et al. The application potential of remote sensing big data in supervision innovation of eco-protection bottom line [J]. *Environment and Sustainable Development*, 2016, 41(1): 65–68. (in Chinese))
- [104] 牛志春, 侍昊, 李旭文, 等. 基于遥感技术的生态保护红线区域监测与评价: 以盐城沿海地区为例 [J]. *环境监控与预警*, 2017, 9(2): 6–9. (NIU Z C, SHI H, LI X W, et al. Monitoring and evaluation of ecological protection red line based on remote sensing technology [J]. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2017, 9(2): 6–9. (in Chinese))
- [105] CONSTANZA R, D'ARGE R, de GROOT R, et al. The value of world's ecosystem services and natural capital [J]. *Nature*, 1997, 387: 253–260.
- [106] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进 [J]. *自然资源学报*, 2015, 30(8): 1243–1254. (XIE G D, ZHANG C X, ZHANG L M, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area [J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(8): 1243–1254. (in Chinese))
- [107] 吴炳方, 黄进良, 沈良标. 湿地的防洪功能分析评价: 以东洞庭湖为例 [J]. *地理研究*, 2000, 19(2): 189–193. (WU B F, HUANG J L, SHEN L B. Analysis and evaluation of flood-control functions of wetland taking Dongting Lake as an example [J]. *Geographical Research*, 2000, 19(2): 189–193. (in Chinese))
- [108] 张堡宸, 胡建荣, 李新军, 等. 基于遥感数据的森林水源涵养估测研究 [J]. *中国农学通报*, 2014, 30(1): 98–102. (ZHANG B C, HU J R, LI X J, et al. Estimation and research of forest water conservation based on remote sensing [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(1): 98–102. (in Chinese))
- [109] WU B F, TIAN F Y, ZHANG M, et al. Cloud services with big data provide a solution for monitoring and tracking sustainable development goals [J]. *Geography and Sustainability*, 2020(1): 25–32.
- [110] CHEN J, CHEN J, LIAO A P, et al. Global land cover mapping at 30 m resolution: a POK-based operational approach [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, 103: 7–27.
- [111] GONG P, CHEN B, LI X C, et al. Mapping Essential Urban Land Use Categories in China (EULUC-China): preliminary results for 2018 [J]. *Science Bulletin*, 2020, 65(3): 182–187.
- [112] GONG P, LIU H, ZHANG M N, et al. Stable classification with limited sample: transferring a 30-m resolution sample set collected in 2015 to mapping 10-m resolution global land cover in 2017 [J]. *Science Bulletin*, 2019, 64(6): 370–373.
- [113] 吴炳方. 中国土地覆被 [M]. 北京: 科学出版社, 2017. (WU B F. *China land cover* [M]. Beijing: Science Press, 2017.

(in Chinese)

- [114] HANSEN M C , POTAPOV P V , MOORE R , et al. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change [J]. *Science* , 2013 , 342(6160) : 850-853.
- [115] 吴炳方,苑全治,颜长珍,等. 21世纪前十年的中国土地覆盖变化[J]. *第四纪研究*, 2014, 34(4) : 723-731. (WU B F , YUAN Q Z , YAN C Z , et al. Land cover changes of China from 2000 to 2010 [J]. *Quaternary Sciences* , 2014 , 34(4) : 723-731. (in Chinese)
- [116] 梁顺林,张晓通,肖志强,等. 全球陆表特征参量(GLASS) 产品: 算法、验证与分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2014. (LIANG S L , ZHANG X T , XIAO Z Q , et al. Global Land Surface Characteristic Parameter (GLASS) products: algorithms , verification and analysis [M]. Beijing: Higher Education Press , 2014. (in Chinese)
- [117] GARRIGUES S , LACAZE R , BARET F , et al. Validation and intercomparison of global leaf area index products derived from remote sensing data [J]. *Journal of Geophysical Research* , 2008 , 113: G02028.
- [118] BARET F , WEISS M , LACAZE R , et al. GEOVI: LAI and FAPAR essential climate variables and FCOVER global time series capitalizing over existing products: part1: principles of development and production [J]. *Remote Sensing of Environment* , 2013 , 137: 299-309.
- [119] BARET F , HAGOLLE O , GEIGER B , et al. LAI , fAPAR and fCover CYCLOPES global products derived from VEGETATION: part 1: principles of the algorithm [J]. *Remote Sensing of Environment* , 2007 , 110(3) : 275-286.
- [120] 刘洋,刘荣高,陈镜明,等. 叶面积指数遥感反演研究进展与展望[J]. *地球信息科学学报*. 2013 , 15(5) : 734-743. (LIU Y , LIU R G , CHEN J M , et al. Current status and perspectives of leaf area index retrieval from optical remote sensing data [J]. *Journal of Geo-Information Science* , 2013 , 15(5) : 734-743. (in Chinese)
- [121] 周成虎,程维明,钱金凯,等. 中国陆地 1:100 万数字地貌分类体系研究[J]. *地球信息科学学报*, 2009 , 11(6) : 707-724. (ZHOU C H , CHENG W M , QIAN J K , et al. Research on the classification system of digital land geomorphology of 1: 1 000 000 in China [J]. *Journal of Geo-Information Science* , 2009 , 11(6) : 707-724. (in Chinese)
- [122] LINKE S , LEHNER B , DALLAIRE C O , et al. Global hydro-environmental sub-basin and river reach characteristics at high spatial resolution [J]. *Scientific Data* , 2019(6) : 283.
- [123] 刘金清. 我国正在编制“中国水图” [J]. *水文*, 1986(4) : 66. (LIU J Q. China is preparing “China Water Map” [J]. *Journal of China Hydrology* , 1986(4) : 66. (in Chinese)
- [124] SHI X Z , YU D S , WARNER E D , et al. Soil database of 1:1 , 000 , 000 digital soil survey and reference system of the chinese genetic soil classification system [J]. *Soil Survey Horizons* , 2004 , 45(4) : 129-136.
- [125] FAO. Soil map of the world [R]. Paris: UNESCO , 1980.
- [126] MALCOLM E S. Handbook of soil science [M]. Washington D C: CRC Press Inc , 1999.
- [127] FLORCZYK A J , CORBANE C , EHRLICH D , et al. GHSL data package 2019 [R]. Luxembourg: Publications Office of the European Union , 2019.
- [128] 程国栋,肖洪浪,傅伯杰,等. 黑河流域生态-水文过程集成研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2014 , 29(4) : 431-437. (CHENG G D , XIAO H L , FU B J , et al. Advances in synthetic research on the eco-hydrological process of the Heihe River basin [J]. *Advances in Earth Science* , 2014 , 29(4) : 431-437. (in Chinese)
- [129] COLSTOUN B D , HUANG P , WANG J , et al. Global Man-made Impervious Surface (GMIS) dataset from landsat [R]. Palisades , NY: NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC) , 2010.
- [130] ASHOURI H , HSU K L , SOROOSHIAN S , et al. PERSIANN-CDR: daily precipitation climate data record from multisatellite observations for hydrological and climate studies [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society* , 2015 , 96(1) : 69-83.
- [131] JOYCE R J , JANOWIAK J E , ARKIN P A , et al. CMORPH: a method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution [J]. *Journal of Hydrometeorology* , 2004 , 5(3) : 487-503.
- [132] FUNK C , PETERSON P , LANDSFELD M , et al. The climate hazards infrared precipitation with stations: a new environmental record for monitoring extremes [J]. *Scientific Data* , 2015(2) : 150066.
- [133] HOU A Y , KAKAR R K , NEECK S , et al. The global precipitation measurement mission [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society* , 2014 , 95(5) : 701-722.

- [134] 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) : 1781–1800.
- [135] 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(9) : W09522.
- [136] JUNG M , REICHSTEIN M , MARGOLIS H A , et al. Global patterns of land atmosphere fluxes of carbon dioxide , latent heat , and sensible heat derived from eddy covariance , satellite , and meteorological observations [J]. *Journal of Geophysical Research* , 2011 , 116: G00J07.
- [137] SENAY G B , BUDDÉ M E , VERDIN J P. Enhancing the Simplified Surface Energy Balance (SSEB) approach for estimating landscape ET: validation with the METRIC model [J]. *Agricultural Water Management* , 2011 , 98(4) : 606–618.
- [138] MIRALLES D G , JIMÉNEZ C , JUNG M , et al. The WACMOS-ET project: part 2: evaluation of global terrestrial evaporation data sets [J]. *Hydrology and Earth System Sciences* , 2016 , 20: 823–842.
- [139] ZHANG Y Q , KONG D D , GAN R , et al. Coupled estimation of 500 m and 8-day resolution global evapotranspiration and gross primary production in 2002–2017 [J]. *Remote Sensing of Environment* , 2019 , 222: 165–182.
- [140] FAO. WaPOR database methodology: level I: remote sensing for water productivity technical report: methodology series [R]. Rome: FAO , 2018.
- [141] WU B F , ZHU W W , YAN N N , et al. Regional actual evapotranspiration estimation with land and meteorological variables derived from multi-source satellite data [J]. *Remote Sensing* , 2020 , 12(2) : 332.
- [142] NJOKU E G , CHAN S K. Vegetation and surface roughness effects on AMSR-E land observations [J]. *Remote Sensing of Environment* , 2006 , 100(2) : 190–199.
- [143] ENTEKHABI D , NJOKU E G , O'NEILL P E , et al. The Soil Moisture Active/Passive Mission (SMAP) [C]//Proc of 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Valencia: IEEE , 2008: 10472375.
- [144] PEKEL J F , COTTAM A , GORELICK N , et al. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes [J]. *Nature* , 2016 , 540(7633) : 418–422.
- [145] FLUET-CHOUINARD E , LEHNER B , REBELO L M , et al. Development of a global inundation map at high spatial resolution from topographic downscaling of coarse-scale remote sensing data [J]. *Remote Sensing of Environment* , 2015 , 158: 348–361.
- [146] KLEIN I , GESSNER U , DIETZ A J , et al. Global WaterPack-A 250 m resolution dataset revealing the daily dynamics of global inland water bodies [J]. *Remote Sensing of Environment* , 2017 , 198: 345–362.
- [147] PRADHAN B , TEHRANY M S , JEBUR M N. A new semi-automated detection mapping of flood extent from TerraSAR-X satellite image using rule-based classification and taguchi optimization techniques [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* , 2016 , 54(7) : 4331–4342.
- [148] GHULAM A , QIN Q M , TEYIP T , et al. Modified perpendicular drought index (MPDI) : a real-time drought monitoring method [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* , 2007 , 62(2) : 150–164.
- [149] 黄慧萍. 旱情遥感监测技术研究与系统开发 [D]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2007. (HUANG H P. Development of drought remote sensing monitoring method and system [D]. Beijing: Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research , CAS , 2007. (in Chinese))
- [150] 郭华东, 陈方, 邱玉宝. 全球空间对地观测五十年及中国的发展 [J]. 中国科学院院刊, 2013 , 28: 7–16. (GUO H D , CHEN F , QIU Y B. Fifty years of global space earth observation and China's development [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences* , 2013 , 28: 7–16. (in Chinese))
- [151] MORA B , TSENDBAZAR N E , HEROLD M , et al. Global land cover mapping: current status and future trends [M]//MORA B , TSENDBAZAR N , HEROLD M , et al. Land Use and Land Cover Mapping in Europe: Remote Sensing and Digital Image Processing. Dordrecht: Springer , 2014.
- [152] 郭瑞芳, 刘元波. 多传感器联合反演高分辨率降水方法综述 [J]. 地球科学进展, 2015 , 30(8) : 891–903. (GUO R F , LIU Y B. Multi-satellite retrieval of high resolution precipitation: an overview [J]. *Advances in Earth Science* , 2015 , 30(8) : 891–903. (in Chinese))
- [153] 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.

[154] SCHMIDHUBER J. Deep learning in neural networks: an overview [J]. *Neural Networks*, 2015, 61: 85–117.

Watershed remote sensing: definition and prospective*

WU Bingfang^{1 2}, ZHU Weiwei¹, ZENG Hongwei^{1 2}, YAN Nana¹, CHANG Sheng¹, ZHAO Xinfeng¹

(1. *State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: Remote sensing is widely used and plays an irreplaceable role in integrated watershed management and watershed science. This paper focuses on the definition, progress and prospective of watershed remote sensing, and provides a systematic summary of relevant watershed remote sensing data products. Watershed remote sensing studies the analysis capabilities for underlying structure, water cycle, water resources, water hazards and watershed ecology and provides related remote sensing data products. These products are gradually becoming continuously updated public products and services that can meet the requirements for timeliness, completeness, continuity and high accuracy of monitoring information for integrated watershed management. The combination of Watershed remote sensing and cloud computing could reduce the bottleneck of the generation of watershed remote sensing data products. Combined with and cloud services, the difficulty and cost of watershed remote sensing data products application can be reduced, which will be the mainstream direction of watershed remote sensing towards practicality, thus providing comprehensive information support for integrated watershed management.

Key words: watershed remote; integrated watershed management; watershed science; remote sensing products

* The study is financially supported by the Key Research Program of Frontier Sciences, CAS (No. QYZDY-SSW-DQC014) and the National Key R&D Program of China (No. 2016YFA0600304).