

国内外遥感驱动的流域水文模拟

遥感技术应用中心 路京选、宋文龙、曲伟

水循环过程及其影响要素的观测和数据获取对流域水文模拟具有重要意义。遥感影像的波谱能量特性，与水文循环和水文过程的能量过程具有相关的物理基础，具有服务于水循环过程关键因素反演与流域水文模拟的巨大应用潜力。尤其是遥感技术以其对地物的高光谱、高时相、高分辨率监测和反演优势，在流域水文模拟中的应用历来受到重视。尽管遥感技术无法直接测量河川径流，但是结合遥感提供的地形、土壤、植被、土地利用、冰雪覆盖、土壤水分和流域水系水体等下垫面状况信息，以及由遥感所反演的降水量和蒸散发等关键水文过程要素，在确定产汇流特性以及水文模型参数时十分有用。通过间接转化还可获得一些传统水文方法观测不到的信息，且遥感具有周期短、同步性好、及时准确、分布式等特点，能较好地满足水文模拟实时、空间分布的需求。与描述时空变异性、多变量或参数化的水文模型进行有效结合，可用于水文过程模拟及水循环规律研究。因此，直接或间接地应用遥感资料，能在多种时空尺度上更准确地服务于流域的水文情势分析、水资源评价、洪水过程监测预报等。

针对遥感技术在水利行业特别是流域水文模拟中的应用现状、前景和难点，报告首先对流域水文模拟的科学和管理意义、水文模型发展、遥感在驱动流域水文模拟定量化发展中的重要意义做了概述；其次，综述了遥感在流域水文模拟中的应用现状，包括直接获取相关要素的时空分布信息，为提高遥感信息精度和空间特性而将不同分辨率和精度数据进行的相互融合，以及结合模型算法实现水循环关键环节的空间尺度反演，用于流域水文模拟、参数率定和模拟精度验证等；最后，对近年来遥感在流域水文模拟应用中的发展新动向和关注点做了重点阐述，对推动我院在该领域的研究提出了具体建议。

1 调研背景概述

1.1 流域水文模型是水资源管理的基础

水文模型是对复杂水循环过程的近似描述，随着社会需求、技术发展和人对水循环规律认识的加深而不断发展。水文模型的发展可追溯到19世纪50年代，在一百多年的发展历程中，水文模型经历了萌芽、概念性模型和分布式模型三个主要发展阶段。20世纪50年代以前，水文模型大多

是针对某一水文过程，主要进展包括合理化公式的提出及完善、单位线概念的提出等，是水文模型发展的萌芽阶段。20世纪50年代至80年代中期，概念性水文模型蓬勃发展，将计算机引入水文模型研究领域，提出了流域模型的概念，产生了Stanford模型、API模型、新安江模型、SCS模型、HEC-1模型、TANK模型等知名水文模型，实现了水文模型质的飞跃，至今在水文预报、水资源规划管理工作中发挥着重要作用，是水文模型发展的第二个阶段。随着计算机技术和空间技术的发展，20世纪80年代以后，分布式水文模型获得快速发展，出现了SHE模型、SWAT模型、VIC模型等代表性水文模型，在大尺度水文模型研究和应用方面开展了系列研究（徐宗学，2010）。

出于用途、结构特点、模拟手段、时空尺度等考虑，可对水文模型进行不同分类，其中集总式概念性水文模型和基于物理机制的分布式水文模型是常见的两种水文模型分类。集总式概念性水文模型的主要特点是用概化的方法表达流域水文过程，具有一定物理基础，结构简单，实用性较强，但不足之处在于：（1）许多水循环环节借助概念性或经验性描述，模型参数缺乏明确物理意义，只能反映某一影响因素对径流的平均作用；（2）模型参数的确定对实测降雨-径流数据的依赖性大，参数获取带有经验统计性和地域性，通用性差；（3）模型输入是点上降水数据，输出是流域出口处流量，因此输入具有分散性而输出具有集中性，并不匹配。相比较而言，分布式水文模型的主要特点是模型参数具有明确的物理意义，通过连续方程和动力学方程求解，可以更准确的描述水文过程，具有更强的适应性，其优势主要包括：（1）考虑流域各处地形、土壤、植被、土地利用和降水等因素的空间差异，将流域离散化，以子流域或像元为模拟单元，模拟水文过程，与自然情况更为接近；（2）采用动量守恒定律和能量守恒定律对数字高程模型的机制进行模拟，采用水动力学方法进行洪水演进模拟；（3）充分利用GIS等空间分析技术，解决了影响因素的空间分布问题，计算结果精度一般较集中式概念模型要高；（4）模型参数可利用遥感资料通过空间分析技术获得，减少了对实测数据的依赖，适用于缺资料地区的流域水文模拟。但分布式水文模型的不足之处在于所需资料过于详细，计算过程较为复杂，而且许多参数还需通过率定才能确定，且对验证数据要求有所提高，其推广利用还需继续研究。

目前，水文模拟技术在水资源开发利用、防洪减灾、面源污染控制、人类活动影响研究等方面得到了广泛应用，为人们提供了一种科学认识与合理利用水资源的重要工具和方法，为水资源管理和决策提供了重要科学依据（刘昌明，2002）。作为人类对水文循环规律认识不断深入的结果和有效途径，水文模型随着计算机技术的发展而不断走向成熟，已成为流域水资源管理中不可或缺的重要基础，也是流域产汇流分析和洪水预报的重要前提。

1.2 流域水文模型输入数据获取是决定模拟结果的前提

水循环是一个非常复杂的大系统。虽然描述流域水文系统的各种数学模型在方法上各有不同,所需要的输入数据在种类和尺度上也存在很大差异,但决定流域水文模拟结果的前提和关键是模型输入数据的可获得性及其可靠性。因此,开展流域水文模拟的第一步就是获取准确的降水等气象要素以及地形地貌等下垫面要素。长期以来,这些数据的获取主要依靠地面气象站与水文站的长期观测以及大规模的地面调查与测绘,但始终存在以点带面和空间分布密度不足等缺陷,使得流域内普遍存在的时空变异性等问题难以有效解决,并进一步影响模拟结果精度。

数学关系、结构和输入是影响流域水文模型模拟合理性的三个主要方面,其中模型输入数据的类型、格式、获取途径及精度是决定流域水文模拟结果输出形式并影响其精度和合理性的重要因素。在对水文机理科学认识逐渐深入的同时,科学、客观、高精度的输入数据获取及与数据形式相配合的模型结构调整是提高模型模拟效果的重要工作。集总式模型的参数获取主要通过地面实测方式获取,通过加密观测点和提高观测频率来提高模型输入数据的精度。但通常受经济和人力投入所限,仅通过加强地面观测手段对数据获取精度提高的贡献有限。分布式水文模型的推广,特别是GIS等空间分析技术的发展和卫星遥感影像数据种类的丰富及其时空分辨率的提高,为获取大尺度、多时空分辨率模型参数及要素提供了可能。特别是通过与地面观测数据的融合,对提高模型输入数据的精度和流域水文模拟的合理性都具有重要意义。

1.3 遥感信息驱动水文模型是遥感定量化发展的必然趋势

进入21世纪,不断出现的水资源水环境问题使得耦合遥感数据和空间分析技术的大尺度分布式流域水文模型成为水文模型发展的重要方向。宏观水资源管理和区域水资源开发利用规划要求人们能够了解较大范围的水资源及其空间特征,而这又是传统地面观测资料无法满足的。近年来,土地利用变化和气候变化所产生的水文效应成为人们关心的热点问题,面源污染也成为水环境模拟和治理的重要问题等。基于GIS和遥感数据的分布式水文模型在研究人类活动和自然环境变化对流域水循环过程影响方面具有独特的优势,近年来迎来了发展的重要历史机遇,成为研究人类对水循环过程宏观影响及其时空特征的重要技术手段之一。

自前苏联1957年10月发射Sputnik-1对地观测卫星开始,全球多个国家陆续发射了一系列对地观测卫星和航天器。特别是20世纪90年代以来,随着计算机、火箭、传感器和卫星航片存贮和处理等技术的发展,卫星遥感迎来了蓬勃发展的时代,遥感数据也呈现出多传感器、多平台、多角度、高时间分辨率、高空间分辨率、高光谱分辨率的趋向,获取的卫星数据量正在以几何级数递

增，对地表信息的获取也更加全面。近年来的定量遥感技术发展迅速，时空分布的各种陆表参数的遥感定量反演产品相继出现，正在将遥感应用从最初的简单看图说话推向全面定量化的分析应用新阶段。遥感的水利应用也在从洪涝等快速监测逐步向遥感数据与专业水力模型相耦合的综合定量应用拓展，遥感数据支持的流域水文模拟就是其中开始最早的一个努力。

遥感信息驱动水文模型是遥感定量化发展的必然趋势。从最初为水文模拟提供土地覆盖和DEM等输入数据开始，遥感现在可提供的数据产品种类越来越多、时空精度越来越高，种类可包括降水、蒸散发、土壤湿度、雪盖、太阳辐射参数、地面温度以及季节性陆表结构参数如植被结构和水文粗糙度等，空间精度可达米级，时间分辨率可达每日或更高。为推动遥感驱动水文模型的技术发展，在不少学者继续研究如何进一步提高受时空变化影响的遥感产品精度的同时，有些学者则开始研究如何将传感器波谱设计、遥感影像处理与水文模型相结合的问题。从目前的遥感数据条件和水循环要素遥感反演技术看，遥感数据已基本可涵盖大多数水文模型对输入数据的需求，结合必要地面水文观测资料支持来实现遥感数据驱动的流域水文模拟技术上已变为可能。

2 遥感驱动的流域水文模拟研究进展综述

遥感技术已成为流域水资源模拟中获取气象要素和下垫面信息的一种有效手段。国际上一些对地观测计划如SWRMS（空间水资源观测系统，荷兰，Berendrecht，2009）、GLDAS（全球数据同化系统，美国，Rodell，2004）、EFAS(欧洲洪水报警系统，欧洲，Van Dijk，2010)、AWAP（澳大利亚可利用水工程，澳大利亚）等都利用多源数据产生多空间分辨率的气象、水文、下垫面等遥感产品，服务于水资源管理和水旱灾害监测（van Dijk and Renzullo，2011）。以下详细介绍遥感在气象要素、下垫面信息、水循环参数反演、水文模型参数校正和模拟结果验证中的主要应用途径。

2.1 气象要素的遥感获取

降水是水循环过程的重要驱动力，传统的点上降水观测数据及其插值成果难以满足现代分布式流域水资源模拟的需求，获取精度可靠的面上降水信息成为水文模拟和预测陆面土壤湿度、通量及水循环过程的重要基础和前提（Huffman et al，1997）。地面雷达可获得一定范围内的降水信息，但由于投入较大、目标均质性等原因，限制了其推广应用（Tanelli et al，2004）。卫星遥感技术在降水数据获取中具有很大潜力，可见光和近红外波段首先被用于降水观测（Petty，1995）。但由于云层的存在这种技术并不能直接获取降水信息，而是通过云层顶部的温度间接获取，且在

深对流降水类型区应用效果较好，层状降水区应用效果较差（Thies et al, 2008）。另一方面，微波以其不受云层影响及与水滴的特殊作用等优势，在降水反演中具有独特优势。卫星微波测雨又分为被动微波和主动微波两种，在美国DMSP气象卫星计划、欧洲艾卡卫星、国际全球降水观测GPM等项目中得到广泛应用，产生了TRMM、AMSR-E等精度合理、应用较为广泛的全球遥感降水产品（Stephens and Kummerow, 2007）。随着风云系列气象卫星的发射，我国气象卫星遥感技术得到快速发展，自主卫星产品日益丰富。但目前降水遥感产品的空间分辨率普遍较低，应用优化的微波、近红外等多平台、多传感器遥感产品及同化技术反演空间降水数据成为改善降水精度和时空特征的主要方向（Huffman et al, 2001, 2007）。对科学研究中应用较为广泛的TRMM和FY数据及其应用情况介绍如下：

（1）TRMM卫星降水数据

热带降雨观测计划TRMM（Tropical Rainfall Measuring Mission）是由日本国家空间发展署（NASDA）和美国国家航空航天局（NASA）地球科学办公室联合发起的一项国际联合计划。卫星于1997年11月28日发射，轨道为圆形，倾角 35° ，初始高度350km，星上搭载五种传感器，分别是测雨雷达PR（Precipitation Radar）、微波成像仪TMI（TRMM Microwave Image）、可见光和红外扫描仪VIRS（Visible and Infrared Scanner）、云和地球辐射能量系统CERES（Cloud Earth's Radiant Energy System）和闪电成像传感器LIS（Lighting Imaging Sensor）。其中，与降水密切相关的传感器包括VIRS、PR和TMI，三种仪器不仅可以各自进行降雨探测，而且可以相互补充、共同测量。其测雨雷达TRMM-PR是第一颗星载测雨雷达，TRMM科学组从1998年开始提供TRMM PR数据等系列产品，产品分为四级，从原始的回波资料（0级）到降雨资料的时空平均值产品（3级），包括众多未知海洋和大陆区域的降雨和潜热通量时空四维分布的详细数据集。最初数据的覆盖区域为全球 $35^{\circ}\text{S}\sim 35^{\circ}\text{N}$ ，目前已扩展到全球 $50^{\circ}\text{S}\sim 50^{\circ}\text{N}$ 之间，包括我国东北地区 50°N 以南的所有面积。

TRMM 3B42算法是由TRMM科学小组开发的一种综合降水评估算法，是TRMM卫星与其他卫星联合反演的降水产品，它结合了2B31、2A12、微波成像专用传感器SSM/I、高级微波扫描辐射计AMSR、高级微波探测器AMSU等多种高质量的降水评估算法，并对地球同步红外观测系统获得的红外辐射资料进行了校准。在计算流程上，首先订正TRMM/TMI资料，并联合SSM/I、AMSR-E、AMSU-B资料估算降水，其次利用全球降水气候计划（GPCP）的红外降水估值订正微波降水，再进行微波和红外资料联合估值。此外，3B42还融合了地面的雨量计资料，所以该产品最大限度地利用了已有的探测资料，提供了3小时间隔（UTC时间00时，03时，06时……21

时)每个网格降水的最佳估值,产品的空间网格分辨率为 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ 。目前,TRMM数据网站也提供可免费下载的日尺度降水估计产品。

Dominqu (2008)研究了TRMM数据在亚马逊河流域的精度,认为TRMM降水数据在该流域总量及各月的降水量效果较好,将该数据用于流域水文模拟能够取得较好的效果。毛红梅(2008)收集了TRMM降雨资料,利用大尺度水文模型对汉江白河以上流域进行流量模拟与预测,研究了TRMM降雨资料应用于大尺度水文模型(LSHM)进行流量预测的可行性。杨传国等(2009年)利用TRMM卫星的3B42降雨产品驱动分布式陆面水文模型,研究流域尺度陆面水文过程,结果表明TRMM数据能够很好地描述降雨的时空分布,利用TRMM降雨模拟的结果与利用观测降雨模拟的结果精度相当,结果较好,证明卫星雷达降雨数据在陆面水文过程研究中具有广泛的应用前景。Su et al. (2008)对TRMM数据在南美La Plata流域的精度验证表明,TRMM的日降水量与实测降水量之间存在较好的相关关系,均方根误差在1mm左右,而在月尺度上的估计效果非常好,相关性均在0.95以上,均方根误差约为0.1~0.2mm/天,用于水文模拟也取得了较好的效果。实际应用表明,TRMM在热带具有很好的探测效果,在中低纬陆地也较好,但是高纬度地区相关的应用研究还比较少。

(2) FY-2卫星降水数据

风云二号(FY-2)是我国第一代地球静止气象卫星,于20世纪80年代开始研制。按照目前确定的我国地球静止气象卫星的发展计划,中国第一代地球静止气象卫星将分为3个批次:01批卫星包括两颗星FY-2A和FY-2B,属于试验型地球静止气象卫星;02批有三颗卫星FY-2C、FY-2D和FY-2E,为业务型地球静止气象卫星;03批预计有两颗星FY-2F和FY-2G,卫星性能将在02批卫星的基础上有适当改进。到目前为止,我国已成功发射5颗地球静止气象卫星。其中,01批FY-2A和FY-2B已停止工作,02批FY-2C于2004年10月19日发射,于2008年6月15日被FY-2E所取代。目前在轨运行并提供应用服务的是02批FY-2D和FY-2E,其中FY-2D于2006年12月8日发射,FY-2E于2008年6月15日发射。FY-2C,2D,2E卫星主要有效载荷均为红外和可见光自旋扫描辐射器VISSR(Visible and Infrared Spin Scan-Radiometer),形成双星观测模式,汛期能够提供中国大陆区域15min间隔的云图动画,大大提高了气象卫星云图的时效。FY-2C,FY-2D和FY-2E均提供降水估计产品,产品时间分辨率包括1h、3h、6h和24h四种,产品的空间分辨率星下点约为5km。FY-2C数据起止日期为2004年10月26日~2009年2月24日,FY-2D提供自2006年12月14日至今,FY-2E自2009年12月20日开始提供数据。

对于FY降水数据的有效性,国内一些学者进行了研究。王玉娟选择2006~2009年渭河流域甘

肃环县站点、宁夏西吉站点、陕西洛川和泾河站点实测降水量数据，分别从日、月和年尺度上对FY-2降水估计产品进行分析，评价遥感降水量产品的有效性，结果表明FY-2数据可用，但存在异常值，需进行处理。处理方法为：将异常值点进行插值，赋以周围非异常值单元平均值。代华光等在西藏缺资料地区分析了FY2C降水数据精度，结果表明FY2C降水估计检验反映出对少雨气候区域的晴天预报效果较好，对于多雨气候区域的小雨和中雨预报效果较好，对于沿江一线的预报准确率稍差；大雨、中雨和小雨的预报准确率逐渐递增；白天准确率高于夜间；此检验结果对风云2C的进一步应用以及短期预报、临近预报有一定的指示意义和参考价值。但风雨数据存在一定问题，其数据优化和应用有待加强。

卫星遥感技术在气温、风速风向、太阳有效辐射等气象要素反演中也得到了广泛应用。大气温度通过影响融雪和蒸散发过程影响流域水文过程，是水文模型的一个重要输入变量，但目前仅有较高大气层的气温能通过红外和微波遥感的方式获取，而近地表的大气温度尚无法直接由遥感获取。由于遥感反演地表温度LST（Land Surface Temperature）的技术相对比较成熟（如劈窗算法等），并能从不同的卫星数据源反演（Tang, 2008; Mao, 2008），因此不少研究者通过遥感反演的LST间接估算大气温度。

2.2 下垫面信息的遥感获取

土地利用/覆盖及变化（LUCC）是地表最重要的基础信息，也是分布式水文模型重要的输入数据。土地覆盖一般指地球表面所具有的自然和人文影响所形成的覆盖物，包括地表植被、土壤、冰川、湖泊、沼泽、湿地及建筑物和道路等，具有特定的时间和空间属性，其形态和状态可在多种时空尺度上变化，而且导致变化的原因也复杂多样。一个地区的土地覆盖状况受该地区气候条件、土壤条件、植被状况、地理地质环境和景观格局的影响，同时也受人类对土地利用方式和强度的影响。由于土地覆盖和土地利用与人类的生产生活密切相关，所以长期以来成为自然科学研究领域的一个重要分支。应用遥感技术监测土地覆盖及其变化，其实质就是根据不同时相的遥感影像快速准确地提取各时段的土地覆盖状况及其变化信息。20世纪70年代初，美国发射的第一颗人造陆地卫星（Landsat）开创了利用卫星遥感技术进行大范围土地覆盖和土地利用调查的新纪元。20世纪80年代后，洲际范围内利用气象卫星数据进行土地覆被的研究取得了有效的成果。而20世纪90年代全球和大区域尺度的土地覆被研究与应用才取得了突破性进展，例如欧洲共同体于1992年以来开展了利用遥感技术监测欧共体国家耕地、农作物变化的大型计划(MARS)。目前利用 NOAA-NVHRR/MODIS开发完成的全球尺度上遥感数据集包括：全球250m-1km空间分辨率

的土地覆被数据库、全球地表生物物理量数据库、全球土地覆被类型图等。这些数据库的建立为LUCC 研究提供了大量数据资料支持。我国也进行了数次土地利用普查，得到了全国土地利用矢量图，为相关科学研究提供了重要参考。

冰雪覆盖面积及其时空分布信息对于气候变化的水文效应研究及流域水文模拟等具有重要意义，但大部分冰雪覆盖区域难以实地到达并开展测量工作，遥感技术成为冰雪覆盖监测与制图的重要和有效途径 (Rees, 2006)。由于冰雪相比于其他覆被类型对可见光波段、近红外波段的高反射性，因此可以利用上述波段进行冰雪覆盖监测和制图 (Simpson et al, 1998)。受限于卫星过境频率 (陆地卫星16天) 和空间分辨率 (大于1km)，70年代以前广泛应用的冰雪覆盖图数据通常是由NESDIS发布的25km产品 (Robinson and Frei, 2004)。随着MODIS中分辨卫星产品的推出，全球冰雪覆盖数据产品在时空分辨率上得到很大改观，其Terra和Aqua产品的空间分辨率达到500m。但由于云层的反射特性和冰雪类似，限制了可见光近红外波段在冰雪覆盖制图上的应用。相比之下，被动微波技术可克服气象条件限制，在白天和黑夜都能实现对冰雪覆盖的探测，通过微波在冰雪中的传输特性来反演冰雪覆盖面积和体积量 (Cordisco et al, 2006)。但被动微波有其固有的局限性，地表类型复杂情况下的反演效果较差，数据产品的空间尺度也较大 (典型的是25km)。而主动微波技术 (雷达) 在冰雪覆盖制图和监测中的优势较为明显，空间分辨率可达到25m。合成孔径雷达 (SAR) 等微波产品可用于冰雪变化监测，但由于巨大的数据量以及可利用的传感器较少，主动微波技术的应用也受到限制。将来的发展趋势还是取决于可见光、微波等多平台数据的融合，其中NOAA卫星产品在这方面具有应用潜力 (Helfrich et al, 2007)。

地表粗糙度是指由于地形地貌、植被、侵蚀等自然状况和建设用地、耕作、森林砍伐等人类活动影响所造成的地表不平，影响着大气-土壤-植被系统的物质能量传输以及水分入渗和运动等过程。景观破碎度、植被和城市分布、高程差异等复杂性和空间尺度都将影响地表粗糙度，且难于在野外进行大尺度实地测量。在较大尺度上用于测量地表粗糙度的遥感手段主要包括合成孔径雷达技术 (SAR)、数字高程模型和摄影测量技术 (Thomas et al, 2002)。

可见光、近红外、微波等遥感手段在地形地貌、灌溉面积提取、地表温度、反照率等方面也得到了广泛应用 (Thenkabail, 2008)。

2.3 蒸散发遥感反演

蒸散发 (ET) 是水循环的重要过程之一。蒸散发不仅是热量平衡的重要分量，也是水量平衡的重要组成部分。它包括土壤或水面等的蒸发和植被蒸腾，是涉及土壤、植被和大气等圈层的

复杂过程，是土壤-植被-大气系统中一项非常重要的物质能量转换和输送过程。蒸散发易受土地利用和气候变化的影响，准确测定和估算蒸散量对全球气候变化、水资源评价以及农业灌溉、干旱监测和提高农业水资源利用率等都具有重要意义。随着农业、林业、水资源问题研究的深入和水资源管理定量化的迫切要求，尤其是随着全球变化问题的日益突出，人们也愈来愈重视对蒸散发的研究。因此，蒸散发研究多年来一直是国内外水文、农业、气象等领域所关注的焦点问题之一。

蒸散发的野外直接监测主要通过蒸发皿和蒸发池、蒸渗仪、波文比-能量平衡观测系统、涡动相关仪（EC）、大孔径闪烁仪（LAS）等。但由于观测成本很高、陆表普遍存在异质性及野外能量传输过程复杂等原因，很难得到大范围推广（Brotzge and Crawford, 2003）。由于区域下垫面情况复杂且非均一，土地类型和气候环境差异大，传统地表蒸散单点监测和计算方法局限性日益突出，而遥感技术的出现为这个问题的解决带来了新的希望，其中可见光、近红外和热红外等波段能够提供与水分和能量平衡过程密切相关的一些参数。

遥感无法实现对蒸散发信息的直接观测，但基于陆表能量通量、地表温度和植被特征等遥感产品，通过经验和机理模型可以实现对地表蒸散发的大尺度估算（Glenn et al, 2007; Ma et al, 2009; Li et al, 2007）。潜热通量可通过植被系数、地表温度、地表反照率地表覆盖等遥感参数利用公式估算，进而估算地表蒸散发（Wan et al, 2004）。另一种途径是通过Penman-Monteith公式，利用遥感数据作为模型输入进行蒸散发估算（Cleugh et al, 2007）。已经发布并得到较多应用的蒸散发产品主要是MODIS/SRBET产品。利用遥感反演蒸散发的局限性主要体现在陆表遥感产品和通量的反演精度、地表异质性及尺度效应。

间接测定和估算蒸散发量的方法主要包括水量平衡法、Penman-Montieth公式、Priestley-Taylor公式、互补相关方法、作物缺水指数法等。目前利用遥感反演地表蒸散发量的方法概括起来可分为：经验统计方法、与传统计算方法相结合的模型、基于能量平衡方程的模型、数值模拟以及数据同化方法等。

（1）经验统计法。它是通过回归分析直接建立蒸散发量与下垫面参数之间的统计关系，进而计算区域地表通量。近年来以Ts-VI空间为基础的地表蒸散发算法由于对气象要素依赖少，逐渐受到人们的关注。植被覆盖、地表干湿状况与地表温度具有很强的相关性，而地表的干湿状况在很大程度上决定着地表蒸散，下垫面湿润地区蒸发量较大，干旱地区则蒸发量较小。Ts-VI空间法实际上是对这一关系的高度简化，以简单的线性关系来描述地表温度、植被覆盖以及土壤湿度三者之间的相互关系，进而计算地表通量(孙亮等, 2011)。

(2) 与传统模型相结合的方法。它是将遥感反演的地表参数应用于传统的蒸散发模型来估算蒸散发量, 主要包括水量平衡法、Penman-Monteith公式、作物缺水系数法、能量互补相关理论。水量平衡是先明确均衡前提以及各水均衡要素, 然后测定或估算各计算时段除蒸散发外的其他水均衡要素, 最后求出水均衡余项蒸散发, 也称水均衡法, 其中降水、土壤水等参数可借助遥感数据产品或者遥感反演得到。时间尺度也会随着区域尺度增加而增大, 常常以月、灌溉期(几个月)、年为尺度。1965年建立的Penman-Monteith公式为均一下垫面蒸散发估算提供了重要的估算模型, Allen等(1998)在国际粮农组织文献FAO56中, 利用“参照作物蒸散发”的概念对Penman-Monteith公式参数进行了简化, 在世界范围的农业灌溉需水研究领域得到广泛应用(Allen, Pereira et al, 1998)。Penman-Monteith公式定义了参考作物(A hypothetical reference crop with an assumed crop height of 0.12m, a fixed surface resistance of 70s/m and an albedo of 0.23), 计算参考作物在无环境因素胁迫下的蒸散发, 进而根据作物不同的生长阶段确定作物系数来计算作物无水胁迫条件下的蒸散发, 最后根据土壤水含水量确定土壤水胁迫系数, 相乘计算作物实际蒸散发。它可根据需要将蒸发和蒸腾作为整体考虑得到植被系数KC, 也可将蒸发和蒸腾分别考虑 $Kc=Kcb+Ke$ 。Penman-Monteith公式得到了普遍的认可和应用, 但难点在于植被生长期的划分及相关植被系数的确定。作物缺水指数(CWSI)由实际蒸散和潜在蒸散的比值决定。能量互补相关理论由Bouchet在1963年首次提出, 1983年Morton等人用大量的实验数据证明了局地蒸发潜力与实际蒸发之间的互补相关确实存在, 而且两者成负指数关系, 修正了多年来人们认为局地蒸发潜力与实际蒸散发成正比的错误概念。目前应用比较多的互补相关模型有三种: Brutsaert and Stricker(1979)的平流干旱模型(Advection-Aridity), Morton(1983)的CRAE模型(Complementary Relationship Areal Evapotranspiration)以及Granger等(1989)运用Dolton蒸发定律建立的依旧能量平衡和空气动力学原理的Granger模型。

(3) 基于能量平衡方程的模型。地表单位面积上垂直方向净收入能量分配主要包括用于大气升温的感热通量、用于水相态转换(如蒸发、凝结、升华、融化等)的潜热通量以及用于地表加热的土壤热通量, 地表能量平衡方程可表示为, $R_n = LE + H + G$, 其中 R_n 为净辐射, LE 为潜热通量, H 为感热通量, G 为土壤热通量。土壤热通量 G 通常表达为 R_n 和下垫面特征参数如叶面积指数(LAI)或植被覆盖度的经验关系, 其中部分参数可以通过遥感获得, 如地表反照率、地表温度以及覆盖度等。因此, 确定潜热或者蒸散的关键在于如何准确的确定显热通量 H 。根据基于能量平衡模型对下垫面状况描述的差异, 目前基于能量平衡方程的模型可分为: 单层模型和双层模型两种。

(4) 数值模拟以及数据同化方法。陆面过程模型是用来研究陆地-大气之间水、能量及物质交换过程的模型,已由最初简单的“水桶”模型发展到具有高度物理机制的土壤-植被-大气传输模型(SVATs)。陆面过程模型能提供连续的地表水热过程模拟,但模型对陆面-大气过程的参数化方案非常敏感,对包括大气边界条件输入和初始边界条件在内的驱动数据要求较高,植被和土壤参数难以确定等是陆面过程模型应用的主要障碍。遥感技术在陆面过程研究中的应用受到越来越多的关注,已成为陆面过程研究的热点。模型初始输入状态变量以及描述地表水热过程和植物生理过程等的参数化方案中的不确定性,很大程度上会影响陆面过程模型的模拟精度。

陆面数据同化是在陆面过程模型框架内,融合不同来源和不同分辨率的直接与间接观测,集成陆面过程模型和各种观测算法,通过自动调整模型参数和状态变量来获得更为可靠的地表水分和能量循环过程的信息。目前主要致力于提高土壤水分和地表能量通量预报的精度,同化的数据多为微波辐射亮度温度或者热红外反演的地表面温度。数据同化技术将模型模拟和多源遥感技术以及地表观测数据结合,有望在土壤水分反演上取得一定的突破。

2.4 土壤湿度遥感反演

由于微波对云层具有较强的穿透能力,不受光照条件限制,能够全天候工作,并且长波段微波能够穿透植被并对土壤具有一定的穿透能力,与土壤湿度和介电常数密切相关,使得微波遥感在土壤湿度监测中具有独特优势,应用被动和主动微波(雷达)技术反演土壤湿度成为目前流域水文模拟的热点之一。一个重要体现就是两颗用于土壤水反演卫星的发射,即SMOS(土壤湿度和海洋盐分卫星)和SMAP(土壤湿度主被动数据集),以及基于其他卫星数据集反演的全球土壤湿度产品的出现(Wagner et al, 2007)。第一种基于卫星数据反演发布的近实时土壤湿度数据产品于2008年由EUMETSAT完成,空间分辨率为25km,有ASCAT主动微波数据生成(Bartalis et al, 2007),并得到精度验证(Albergel et al, 2009)。针对裸露地表的土壤湿度反演,已建立的反演模型主要包括物理光学模型(POM)、小扰动模型(SPM)、Q/H模型等,准对有植被覆盖的土壤湿度反演模型主要包括MMICS模型、农作物模型等。较高分辨率的土壤湿度空间分布数据可通过主动微波即雷达技术获得,精度可达到100m,但由于受到地面粗糙度等因素限制,其利用有待进一步研究。被普遍认可的改善土壤湿度时空特征的途径是通过遥感产品与土壤水动力学模型相耦合,开展土壤水连续反演(宋文龙, 2013)。通过遥感途径获得的土壤湿度空间数据在流域水文模拟中的应用较为广泛,可用于结果评估、参数率定、模型验证及数据同化(Liu et al, 2008; Laguardia and Niemeyer, 2008; Parajka et al, 2009; Crow and Ryu, 2009)。卫星反演

的土壤湿度数据和模型模拟结果没有优劣之分，但其误差来源和机理不同，因此两种产品可用来对比验证。

2.5 遥感驱动的流域水文模拟

应用遥感技术与水文模型相结合构建遥感信息驱动的水文模型是流域水文过程模拟的重要研究方向 (Boegh et al, 2003; Schuurmans et al, 2003; Simon et al, 2008)。目前，遥感技术在分布式水文模型中的应用主要分为两类：①直接用于水文变量和水文参数的测定与估算，如研究区面积、降水量等；②基于反演机理，利用遥感获取的地表波谱特征推求水文参数，如陆面蒸散发、河川径流、陆面温度、土壤水分、土地利用/土地覆盖、叶面积指数等 (姜尚堃等, 2013)。遥感技术与分布式水文模型结合，在降水径流模拟、生态水文过程模拟、缺资料地区水文过程模拟等方面做了大量工作，取得了一系列成果。

随着人类活动的加剧，传统的水资源管理方式已经难以解决淡水资源短缺、水质恶化和生物多样性减少等生态问题。综合考虑水文学和生态系统要素的关联，研究生态过程与水文过程相互作用的物理化学机制，寻求有利与生态保护、水资源可持续利用的管理方式是当前亟待解决的重要问题。生态水文是当今许多国际全球研究项目进行合作的热点，如国际地圈生物圈计划—生物圈方面 (IGBP-BAHC)、联合国教科文组织国际水文计划 (UNESCO IHP) 等，都把生态水文学作为一个重要的研究课题。生态水文学发展为水资源可持续利用研究提供了新的开拓 (刘昌明等, 2009)。生态水文过程影响因素众多，而且具有明显的时间和空间变异性。随着遥感、GIS 和计算机技术的发展，计算机模拟成为生态水文时空过程研究的重要手段。以 GIS 为平台，遥感技术为空间信息获取手段，建立区域尺度的分布式生态水文模型，成为当今水文水资源研究的新方向。美国农业部 (USDA) 农业研究局 (ARS) 开发的 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 流域尺度模型，用于模拟预测在大流域复杂多变的土壤类型、土地利用方式和管理措施条件下，土地管理对水文、泥沙和化学物质的长期影响。德国的波斯坦气候影响研究所开发的 SWIM (Soil and Water Integrated Model) 模型用于模拟和预测全球气候变化和土地利用方式改变下流域的水循环、植被生长、营养与污染物质迁移、泥沙运动等生态水文过程。我国的生态水文过程研究主要侧重于干旱区、湿地、森林生态系统局部尺度上土壤-植被-大气传输中水与植被的相互影响，尚缺乏区域尺度的生态和水文过程相互融合的生态水文模拟系统。杨胜天等基于 HIMS 水资源模型和国内外较成熟的水文模型和生物化学模型，构建了遥感驱动的生态水文分析工具即 EcoHAT 系统，以生态水文过程机理研究为基础，从基本的土壤-植被-大气连续体 (SPAC) 水分运行过

程入手,在水分循环过程加入营养元素迁移转化过程,综合考虑生态系统中植被生长与土壤水分、营养元素的相互影响,在黄河流域、三江平原、贵州酸雨地区等区域模拟分析了生态水文过程(杨胜天等, 2010)。

长期以来,水文研究一直主要集中于有资料流域。然而,世界上还存在很多资料匮乏的流域。我国960万 km^2 领土面积上仅有基本气象站740个,一般气象站2641个,国家级水文站点约3400个,且空间上分布不均匀。西部地区站网密度小,且观测资料质量相对较差,高海拔地区水文气象站分布更少。一方面是观测资料相当缺乏,另一方面站点布局的不均衡也直接限制了已有观测资料的可用性。世界气象组织(WMO)的数据显示,全球每个水文站点的控制面积约从 150km^2 到 10000km^2 ,而近20多年来其数量还在迅速萎缩。近十几年来,缺资料流域的水文研究才逐渐受到重视,并成为国际上水资源、水环境研究的热点问题,一系列与之有关的水文研究计划也相继开展,并取得了较为丰富的研究成果。目前,国际上缺资料流域水文研究方法主要包括两种:一是移用相似流域的水文特征,主要有分解法(Disaggregation)和参数平均法;二是区域回归法。我国缺资料流域水文研究常用方法有参数等值线图法、水文比拟法、径流系数法、地区经验公式法、随机模拟法和区域回归法等。上述传统水文研究方法多侧重采用水文观测、实验等手段,运用传统的数学、物理方法来研究水文预报问题。PUB(Prediction in Ungauged Basins)是IAHS于2001年提出、2003年7月正式启动的研究计划,它是针对发展中国家水文观测资料不全甚至无测站流域的水文预测的科学研究计划,以减少水文预报中的不确定性为核心,汇集水文理论、遥感、对地观测以及水量水质等多方面成果,旨在探索水文模拟的新方法,实现水文理论的最大突破。计划的目标不仅仅要提出解决无资料或者水文信息不完全地区的水文分析与预测问题,而且要促进水文科学理论与技术在解决实际问题以及寻求解决水文复杂性和不确定性问题的新途径(Sivapalan et al, 2003)。遥感已经是现代地球科学研究的主要信息来源,再通过GIS矢量化流域的地表不均匀性、建立模型参数与地表特征的转换函数,已被证明能有效用于无资料流域的水文预报。国际上从不同方面探讨遥感技术在水文模拟中的应用已有不少研究成果,遥感信息耦合的水文模型日益受到重视,但是多集中于水文变量和参数的推求,系统地以遥感数据驱动水文模型的研究相对较少。因此,在资料受限条件之下,缺资料流域的水文模拟需从模型本身和数据两方面着手。曾红娟等从耦合遥感技术的角度出发,改进水文模型结构、优化模型参数、提取水文变量,从而构建了遥感驱动的时变增益水文模型,并在特克斯河流域得到了较好的模拟效果(曾红娟, 2008; Ye et al, 2010)。

3 近年来该专题的发展新动向和值得关注点

3.1 遥感驱动的流域水文模拟的尺度效应研究

尺度是水文模拟中一个首先必须明确的概念。根据Bloschl (1995) 的观点, 尺度分为三类: 过程尺度 (process scale)、观测尺度 (observation scale) 和模拟尺度 (modeling scale)。过程尺度是自然现象本身所体现出来的特征, 可以细分为空间范围、持续时间、周期和相关长度。观测尺度是由观测手段和角度所决定的, 也可以分为三个类型, 即观测范围、观测间隔和观测对象的大小。模拟尺度通常和过程尺度相对应, 但同时还受模型应用目的影响, 从空间上分为局地尺度、坡面尺度和区域尺度等, 从时间上分为小时尺度、日尺度、月尺度、年尺度和年代尺度等。理想情况下, 观测尺度应该和过程尺度相一致, 但是这种一致性通常无法实现, 应为一般大尺度的水文过程只能在小尺度 (点) 上进行观测。模拟尺度和观测尺度通常也不一致, 为解决这个问题, 通常需要对观测数据或者模拟结果进行尺度转化。

3.1.1 水文模拟的尺度问题

水文循环过程包含一系列不同的时空尺度, 不同时空尺度水循环研究关注的主要问题也不同。不同时间和空间尺度的水文系统规律通常有很大的差异, 不同尺度的水文循环机理也不同, 水文模型的结构也有所差异。微观尺度上的水文问题和物理学的研究对象几乎一致, 但是随着尺度的扩展, 原来的模型就需要抽象和概化, 当尺度大到一定程度时, 原来的物理模型机理几乎体现不出来了。小流域上的降雨径流系统相对简单, 但是一旦到了大尺度, 降水径流系统会变得高度非线性化, 不能用简单的积分表示, 所以在研究的过程中考虑的问题就会有很大差别。相对于集总式模型而言, 分布式水文模型的一个突出的特点就是考虑了地球表层系统空间上要素组成的异质性, 它根据特定流域空间的异质性和相似性, 把流域整体根据某种模拟需求分解成若干个规则或不规则的子单元, 以子单元为单位进行水文模拟。因此, 如何体现流域水文过程的时空不均匀性和变异性就成为尺度问题研究的关键, 而利用遥感手段获取流域地形、植被覆盖、土壤、降雨、蒸发等要素的时空信息, 进而驱动分布式流域水文模型就是解决流域时空变异性和水文模拟尺度问题的一种有效尝试。虽然采用遥感获取更多时空分布信息驱动分布式流域水文模型已成为水文学发展的一个新方向, 但仍然需要加强对水文模拟尺度问题的进一步研究。

3.1.2 遥感驱动数据的尺度问题

与水文科学中的时空尺度相比, 遥感技术所涉及到的时空尺度问题具有明显的差异性。遥感

的尺度包括从天空测量地球的空间量度范围和时间量度间隔，更多地是作为观测的维数。空间尺度可直接看作为有效分辨率单元，时间尺度通常指采集数据的时间间隔，也指遥感成像的瞬间或观测的一段时间范围。不同的遥感观测尺度主要反映的是目标及其过程在不同层面上的特征信息（李小文等，2001）。造成遥感数据复杂化的重要原因之一就是地面测量数据、不同遥感测量方式获取的数据和应用需要的数据在尺度上的不一致。如何在不同尺度的数据间相互转换是遥感尺度问题研究的核心之一，主要包含以下几个主要问题：一是如何有效地将遥感数据和信息从一种尺度转换为另一种尺度；二是需要了解原始遥感数据和遥感信息在经过尺度转换后可能出现何种信息的损失或效应，即不同尺度的遥感数据在反映相同地物和现象时的差异如何；三是如何评价尺度转换的效果。

3.1.3 遥感反演与水文模拟的尺度匹配问题

根据不同空间尺度的水文问题，如何采取与之相对应的空间分辨率或地面分辨率的遥感影像，使遥感反演与水文模拟实现尺度匹配，是遥感水文应用中所重点关注的问题。如何结合地面同步的实测观测资料将瞬时的遥感信息进行延拓是目前国内外的研究热点。因为这种延拓所需的条件比较严格，应用过程中有很多问题需要解决，比如如何保证地面观测和遥感成像的同步性，也即如何处理地面与卫星观测之间存在的时间以及天气状况不同问题，如何评估遥感数据的订正误差等。目前水文科学中应用的遥感信息大都是数小时到月的中尺度时间分辨率。在不断提高中尺度时间分辨率遥感信息精度的同时，进一步把遥感获取的瞬时信息在时间尺度上更有效地延伸，是遥感水文应用中的主要时间尺度问题，其有效解决将会使遥感水文应用提升到一个新的台阶。

不同水文模拟尺度对数据源的时空分辨率的要求不同，采用不同分辨率的空间数据将直接影响分布式水文模型的模拟精度。由于水文变量时空分布的不均匀性和水文过程转换的复杂性，水文模拟尺度、遥感驱动数据的尺度效应以及不同尺度水文信息之间的匹配与转换等研究工作非常重要，是进一步提高遥感驱动水文模拟精度的关键之一，但目前国内外对这些研究尺度问题的研究还相对滞后，许多问题还远未得到有效解决。

3.2 遥感数据驱动的缺资料流域水文模拟

如何开展缺资料流域的水文过程模拟，进而发展能够满足变化环境下缺资料流域水文分析理论和方法，已成为最近国际上水资源与水环境研究的难点及热点问题之一。传统的缺资料流域水文研究多根据具有相似条件流域的长期观测资料建立经验关系或模型来预报。这类方法对流域产

汇流机制进行高度概化,对于水循环影响因子的异质性和变异性考虑甚少,难以满足水文循环内在机制研究及变化环境下水文响应分析的要求。近年来的国际研究计划在提高水文过程的预测能力、扩大流域对象的研究尺度、基于物理概念的流域水文模拟和遥测等方面取得了巨大的进步,为解决缺资料流域的水文预测问题提供了理论支持和技术手段,为进一步认识水循环的内在机制起到了推动作用。

遥感已经是现代地球科学研究的主要信息来源,它能够提供多时相、高分辨率的流域空间特征信息,可获得偏远区域的信息以及直接和间接测量很多常规手段无法测量到的水文变量和参数数据,是描述流域水文变异性的最为可行的方法,能够弥补传统监测资料的不足,在无常规资料地区或地面观测资料缺乏的地区可能是唯一的数据源。与遥感信息耦合的水文模型已成为分布式水文模型研究发展的必然趋势,对于缺资料流域遥感水文模型研究的意义更显突出。

3.3 对我院本专题发展的建议,未来发展思路和新兴增长点

遥感技术以其快速、准确、不受地域远近与环境条件好坏限制、可有效描述流域下垫面时空变异性等特点,在流域水文模拟中得到越来越广泛应用。尤其是遥感数据所固有的分布式特点,使得遥感数据驱动的分布式流域水文模拟更成为近年来的一个研究热点。目前,大多数水文模型所需要的几乎全部输入数据均可通过遥感途径直接或间接获取,遥感获取的数据质量以及时空分辨率也已基本能满足水文模型的要求,流域水文参量的遥感获取方式正在日益多元化,遥感数据产品在不断提高精度的同时正在逐步向稳定、长时间序列方向发展。因此,通过水文工作者与遥感工作者的紧密结合,在实现遥感技术与水文模拟技术无缝耦合基础上,建立遥感数据驱动的分布式流域水文模型系统,将是今后水利遥感发展的必然趋势,尤其是在那些地面观测资料缺乏流域。从我院遥感技术应用进一步发展的实际需要来看,走出看图说话的定量遥感应用关键就在遥感与传统水利模型的有机结合,而遥感驱动的流域水文模型就是一个重要切入点,其技术进步与服务生产的实际意义都很突出。为此,建议就遥感驱动的分布式流域水文模拟技术在院内开展跨学科长期研究,建立完整的技术方法,开发通用的软件系统,并逐步围绕最严格水资源管理、流域管理、城市化水文效应分析、气候变化影响研究等开展专题应用研究。建议近期重点开展以下三方面的研究:(1)卫星、雷达、地面等多源降水数据的协同与示范应用;(2)水循环要素遥感反演数据的尺度转化与影响研究;(3)不同水文模型、不同特点流域的遥感数据驱动模式与示范应用研究。

参考文献

- 1 Albergel, C., Rüdiger, C., Carrer, D., Calvet, J.-C., Fritz, N., Naeimi, V., Bartalis, Z., and Hasenauer, S. An evaluation of ASCAT surface soil moisture products with in-situ observations in Southwestern France [J]. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2009, 13: 115–124.
- 2 Bartalis, Z., Wagner, W., Naeimi, V., Hasenauer, S., Scipal, K., Bonekamp, H., Figa, J., and Anderson, C. Initial soil moisture retrievals from the METOP-A Advanced Scatterometer (ASCAT) [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L20401, 2007.
- 3 Berendrecht, W., Weerts, A. H., Veldhuizen, A. A., and Kroon, T. An operational drought forecasting system using coupled models for groundwater, surface water and unsaturated zone. *Model-CARE 2009*, Wuhan, China, 2009.
- 4 Brotzge, J.A. and Crawford, K.C. Examination of the surface energy budget: a comparison of eddy correlation and Bowen ratio measurement systems [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2003, 4: 160–178.
- 5 Cleugh, H.A., Leuning, R., Mu, Q.Z., and Running, S.W. Regional evaporation estimates from flux tower and MODIS satellite data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 106: 285–304.
- 6 Cordisco, E., Prigent, C. and Aires, F. Snow characterization at a global scale with passive microwave satellite observations [J]. *Journal of Geophysical Research*, 111, 2006.
- 7 Crow, W. T. and Ryu, D. A new data assimilation approach for improving runoff prediction using remotely-sensed soil moisture retrievals [J]. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2009, 13: 1–16.
- 8 Glenn, E.P., Huete, A.R., Nagler P.L., Hirschboeck K.K. and Brown, P. Integrating remote sensing and ground methods to estimate evapotranspiration [J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2007, 26: 139–68.
- 9 Huffman, G.J., Adler, R.F., Arkin, P., Chang, A., Ferraro, R., Gruber, A., Janowiak, J., McNab, A., Rudolf, B. and Schneider, U. The Global Precipitation Climatology Project (GPCP) combined precipitation dataset [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1997, 78: 5–20.
- 10 Huffman, G.J., Adler, R.F., Bolvin, D.T., Gu, G., Nelkin, E.J., Bowman, K.P., Hong, Y., Stocker, E.F. and Wolff, D.B. The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales [J]. *Journal of Hydrometeorology*,

- 2007, 8: 38–55.
- 11 Huffman, G.J., Adler, R.F., Morrissey, M.M., Bolvin, D.T., Curtis, S., Joyce, R., McGavock, B. and Susskind, J. Global precipitation at one degree daily resolution from multisatellite observations[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2001, 2: 36–50.
 - 12 Laguardia, G. and Niemeier, S. On the comparison between the LISFLOOD modelled and the ERS/SCAT derived soil moisture estimates [J]. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2008, 12: 1339–1351.
 - 13 Li, Z., Tang, R., Wan, Z., Bi, Y., Zhou, C., Tang, B., Yan, G., and Zhang, X. A review of current methodologies for regional evapotranspiration estimation from remotely sensed data [J]. *Sensors*, 2009, 9: 3801-3853.
 - 14 Liu, S., Mo, X., Zhao, W., Naeimi, V., Dai, D., Shu, C., and Mao, L. Temporal variation of soil moisture over the Wuding River basin assessed with an eco-hydrological model, in-situ observations and remote sensing[J]. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 2008, 5: 3557–3604.
 - 15 Ma, W., Ma, Y., Li, M., Hu, Z., Zhong, L., Su, Z., Ishikawa, H., and Wang, J. Estimating surface fluxes over the north Tibetan Plateau area with ASTER imagery [J]. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2009, 13: 57–67.
 - 16 Parajka, J., Naeimi, V., Blöschl, G., and Komma, J. Matching ERS scatterometer based soil moisture patterns with simulations of a conceptual dual layer hydrologic model over Austria [J]. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2009, 13: 259–271.
 - 17 Petty, G.W. The status of satellite-based rainfall estimation over land[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 51: 125–37.
 - 18 Rees, W.G. *Remote sensing of snow and ice*[M]. New York, Taylor and Francis, 2006, 285 pp.
 - 19 Rodell, M., Houser, P., Jambor, U., Gottschalck, J., Mitchell, K., Meng, C., Arsenault, K., Cosgrove, B., Radakovich, J., and Bosilovich, M. The global land data assimilation system [J]. *B. Am. Meteorol. Soc.*, 2004, 85: 381–394.
 - 20 Stephens, G.L. and Kummerow, C.D. The remote sensing of clouds and precipitation from space: a review [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2007, 64: 3742–65.
 - 21 Thenkabail, P.S., Biradar, C.M., Noojipady, P., Dheeravath, V., Li, Y.J., Velpuri, M., Reddy, G.P.O., Cai, X. L., Gumma, M., Turrall, H., Vithanage, J., Schull, M., and Dutta, R. A global irrigated area map (GIAM) using remote sensing at the end of the last millennium [R]. *International Water*

- Management Institute, 2008, pp63.
- 22 Thomas, J. Schumge, a., William, P., Kustas, J.C., Ritchie, T.J., and Jackson, A.I.R. Remote sensing in hydrology [J]. *Advances in Water Resources*, 2002, 25:1367–1385.
 - 23 Tanelli, S., Im, E., Durden, S.L., Facheris, L., Giuli, D. and Smith, E.A. Rainfall doppler velocity measurements from spaceborne radar: overcoming nonuniform beam-filling effects [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2004, 21: 27–44.
 - 24 Thies, B., Nauß, T. and Bendix, J. Precipitation process and rainfall intensity differentiation using Meteosat second generation spinning enhanced visible and infrared imager data[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113.
 - 25 Van Dijk, A.I.J.M. AWRA technical report 3: Landscape model (version 0.5) technical description[R]. WIRADA/CSIRO water for a healthy country flagship, Canberra, 2010a.
 - 26 Van Dijk, I. J. M. and Renzullo, L. J. Water resource monitoring systems and the role of satellite observations [J]. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2011, 15:39–55.
 - 27 Wagner, W., Blöschl, G., Pampaloni, P., Calvet, J.-C., Bizzarri, B., Wigneron, J.-P., and Kerr, Y. Operational readiness of microwave remote sensing of soil moisture for hydrologic applications [J]. *Nord. Hydrol.*, 2007, 38: 1–20.
 - 28 代华光, 普布次仁, 罗布坚参. FY2C 卫星降水估计效果检验分析[J]. *西藏科技*, 2009:197(8): 59-61.
 - 29 姜尚堃, 李飞, 陈立峰. 遥感技术在分布式水文模型中的应用研究进展[J]. *资源与水工程学报*, 2013, 24(1): 174-180.
 - 30 刘昌明, 杨胜天, 温志群, 王雪蕾, 王玉娟, 李茜, 盛浩然. 分布式生态水文模型 EcoHAT 系统开发及应用[J]. *中国科学 E 辑: 技术科学*, 2009, 39(6): 1112-1121.
 - 31 曲伟. 基于遥感的流域水文过程模拟及其尺度效应研究[D]. 北京师范大学博士论文, 2011.
 - 32 宋文龙. 黄河中游典型流域植被耗水计算与分析[D]. 北京师范大学博士论文, 2013.
 - 33 王玉娟. 渭河流域厚层土体土壤水分数值模拟及干旱监测[D]. 北京师范大学博士论文, 2011.
 - 34 吴险峰, 刘昌明. 流域水文模型研究的若干进展[J]. *地理科学进展*, 2002, 21(4): 341-348.
 - 35 徐宗学. 水文模型: 回顾与展望[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2010, 46(3): 278-289.
 - 36 杨胜天等. *生态水文模型与应用*[M]. 科学出版社, 北京, 2010.

- 37 曾红娟. 遥感驱动分布式水文模型研究及缺资料流域应用[D]. 北京师范大学博士论文, 2008.