

遥感水文模型研究综述

杨胜天¹, 鱼京善¹, 娄和震¹, 孙文超¹, 赵长森¹,
王雪蕾², 宋文龙³, 蔡明勇², 代韵萌¹

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 生态环境部卫星环境应用中心, 北京 100094;

3. 中国水利水电科学研究院, 北京 100048)

摘要: 遥感水文模型是水文学与遥感学的交叉领域, 既包括水循环要素遥感反演模型, 也包括以水文过程模拟分析为对象的遥感水文模型。本文汇总分析20世纪70年代以来遥感在水文方面应用成果, 综述遥感水文模型研究历史、现状及发展趋势。研究表明, 20世纪70年代以来遥感水文模型就一直是遥感水文的热点; 中国在遥感水文研究兴起之时就与国际上同步, 在遥感水文的概念认知、遥感与水文相结合的科学认识, 以及遥感水文模型的研发应用等诸多方面做出了探索性的成果。随着信息技术发展, 结合多重信息采集手段, 围绕遥感径流监测、多传感器智能物联网、缺资料区水文分析和流域水量—水质—水生态精细化模拟等重大实际问题是遥感水文模型发展的趋势。

关键词: 遥感水文; 遥感水文模型; 遥感学; 水文学; 多元信息

DOI: 10.11821/dlxb202307010

1 引言

水是社会生产活动的重要基础, 也是生态系统中最重要要素^[1]。自从20世纪60年代以来, 遥感技术迅速发展, 形成了完整的科学与技术体系, 同时也不断探索在水文学中的应用潜力。遥感技术被广泛应用于水文变量获取, 主要包括气温^[2]、降水量^[3]、积雪^[4]、蒸散发^[5]、土壤水^[6]等, 以及地表覆被状况、地形地貌、河网水系等水文下垫面因子, 在分析流域产汇流特性和确定水文模型参数等方面发挥出巨大作用。

目前在遥感技术与水文学之间已经形成了一个交叉研究领域——遥感水文, 遥感水文既包括水循环要素的遥感反演, 也有遥感信息驱动的水文模型^[7-8]。从20世纪70年代开始, 中国就与国际上同步开展遥感水文方面的研究。本文追溯早期文献, 汇总分析40多年来遥感在水文方面应用成果, 依据遥感水文模型的研发历程, 从遥感水文概念认知和关键问题分析出发, 综述以水文过程为对象的遥感水文模型研究现状及发展趋势。

2 遥感水文概念的认知

遥感水文在英文中对应的词是“remote sensing in hydrology”。1973年Adelman发表

收稿日期: 2023-02-27; 修订日期: 2023-07-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1812401); 第三次新疆综合科学考察项目(SQ2021xjkk02400); 中国工程科技发展战略湖北研究院武汉分院咨询研究项目(HB2022B25) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.U1812401; The Third Xinjiang Scientific Expedition, No.SQ2021xjkk02400; Consulting Research Project of Wuhan Branch of Hubei Research Institute of China Engineering Science and Technology Development Strategy, No.HB2022B25]

作者简介: 杨胜天(1965-), 男, 贵州贵阳人, 教授, 博士生导师, 主要从事遥感水文、生态水文研究。

E-mail: yangshengtian@bnu.edu.cn

文章等阐述了遥感在水文中的应用^[9],但直到1988年,Schultz才用“remote sensing in hydrology”作标题综述遥感与水文相结合所取得的成果,并将“遥感”与“水文”两个单词联系起来^[10]。随后“remote sensing in hydrology”或“remote sensing application in hydrology”两个专业名词才广泛普及开来。

中文有“遥感水文”和“水文遥感”两个专业名词。早在1984年胡四一用“遥感技术在水文和水资源的应用”作标题介绍德国在遥感与水文相结合方面的研究成果^[11]。1989年王燕生阐述如何将遥感技术应用到水文模型时用了“遥感水文模型”,将“遥感”与“水文”两个词联系在一起^[12];1991年杨积成发表文章,以“水文遥感”作为专业名词介绍遥感与水文相结合的发展趋势^[13];1997年在水利科学技术名词中公布了“水文遥感”,并将水文遥感解释为应用传感器在遥远处探测不直接接触的水体的性质和水文要素。2001年傅国斌等用“遥感水文”专业名词^[14],分析遥感水文的尺度问题,揭示了“遥感”与“水文”相结合的科学内涵。随后“遥感水文”和“水文遥感”两个词在中文文献中也被普遍使用。因此从早期的文献看,国内外对遥感水文概念的认知基本同步。

“遥感水文”和“水文遥感”两个专业名词的含义差异并不大,《辞海》中对“遥感”“遥感学”“水文”和“水文学”均有明确的定义。遥感是利用传感器,不与被测物体直接接触,在高空或远距离接收物体辐射或反射的电磁波信息,经过处理和分析后,识别目标,揭示其性质、形状、相互关系及其变化规律^[15];遥感学是研究利用遥感平台上的传感器获取地球和其他天体表层的几何和物理信息,以揭示目标性质、形状、相互关系、变化规律,并加以应用的学科^[15]。水文指自然界中水的各种变化和运动的现象^[15];水文学是研究地球系统中水的物理、化学特性、水的运动、分布、水文循环规律,以及水与生态环境相互关系等的学科^[15]。依据以上定义,遥感水文或水文遥感可以定义为利用传感器,不与被测物体直接接触,在高空或远距离接收物体辐射或反射的电磁波信息,经过处理和分析后,识别水的物理、化学特性、水的运动、分布、水文循环规律,以及水与生态环境相互关系等的研究领域。若从遥感学的分支来看,遥感按应用领域分为气象遥感、地质遥感、海洋遥感等;其中气象遥感定义为利用电磁波或声波,感应远处大气现象、大气层结、大气物理性质(如气温、气压)、大气运动(如垂直运动)等的技术^[15],据此水文遥感应更偏重于遥感学领域,遥感水文更偏重水文学领域。

中文中还有“水利遥感”这个专业名词。水利是采取各种人工措施对自然界的水进行控制、调节、治导、利用、管理和保护的活动,以减轻或免除水旱灾害,利用水资源,适应生活生产和改善生态环境需要^[15],因此水利遥感可以理解为对自然界的水进行控制、调节、治导、利用、管理和保护活动的遥感应用。2016年李纪人发表文章阐述了水利遥感应包括防灾减灾的洪涝灾害、旱情和涉水地质灾害监测评估、洪水预报预警,水资源监测保护的卫星遥感降水量预报、土壤含水量与蒸散发量遥感估算、地表水体监测、地下水监测、水环境监测和地表水体保护,以及生态保护的生态环境监测、水土保持和灌溉面积调查、河道与河口变化监测和治理等^[16];从中可以看出水利遥感的范围比遥感水文或水文遥感的内涵更为广泛,既包括了遥感水文的内容,还涵盖了一系列与水有关的管理和保护活动的遥感监测。

3 遥感水文文献分析

以“remote sensing hydrology”“hydrological remote sensing”和“remote sensing hydrological model”为关键词,在“Web of Science”论文数据库中采用并列关键词搜索

而辩证地论证了遥感与水文模型耦合。这些论述从科学认识论方面厘清了遥感水文模型研究, 推进了遥感水文模型理论研究^[14]。

2002年王芳等利用遥感和地理信息系统技术实现生态的空间分区, 以流域水量平衡模型为基础, 量化了生态需水^[19]; 2002年薛安等回顾了地理信息系统、模型库管理系统和空间分析处理系统集成研究的现状, 提出了对象模拟模型和对象分析处理模型的元模型层次体系^[20]; 2005年刘家宏等开展了用遥感图像提取模型分布式参数研究, 并应用在黄河数字流域模型的建设实践中^[21]; 2005年夏军提出“随着水文循环中各个组成要素的深入研究, 以及计算机、地理信息系统和遥感技术的迅速发展, 使构造具有一定物理基础的流域分布式水文模型成为可能, 是目前水文模型的重要发展方向”^[22]。随后, 赵少华等结合生态环境对水资源管理的需要, 从遥感与水文模型耦合的结构对遥感水文模型进行了分类^[23]; 李新等开展了流域综合遥感联合试验, 进一步创新了水文变量遥感反演与实证方法^[24]; 杨大文等综合国内外水文学的新进展, 结合遥感空间数据和大数据, 实现多要素、多过程的综合模拟, 提出构建“陆面—水文—社会耦合模型”^[25]; 刘元波等阐述了流域水量平衡原理与遥感水量收支闭合, 流域水量平衡要素的遥感反演及适用性检验, 以及数据同化等3个方面的科学问题^[26]; 岩腊等从中国最严格水资源管理制度出发, 探索地面观测、卫星遥感和陆面同化系统三位一体的立体监测体系的构建, 明确遥感与水文模型的结合是其检测体系的重要基础^[27]。

5 遥感水文模型类型与开发案例

5.1 遥感水文模型的类型

将遥感技术与水文模型相结合构成了多种类型的遥感水文模型^[28], 可以概括为遥感信息和地面同步实测资料的回归模型, 应用遥感资料的水量平衡模型, 以及遥感信息作为参数的参数化模型3类。前两类模型结构简单清晰, 但缺少物理机制和产汇流过程描述, 代表性模型较少; 第三类代表模型包括SHE模型、SCS模型、SiB2模型和SWAT模型等^[23]。

遥感信息和地面同步实测资料的回归模型的结构基本上没有物理机制, 如Welby利用美国Landsat卫星数据确定出水体、森林和河边植被等流域物理特征, 改善了传统的回归方程^[29]; Zhang等在长江的汉口段流域上, 通过与河流宽度—水位及遥测水位—流量关系曲线耦合来测量河流水面宽度变化, 从而准确评估其流量^[30]。

应用遥感资料的水量平衡模型的结构简单而清晰, 但计算存在误差累计问题。如刘昌明等举例提出, 在降水量为500 mm的半湿润半干旱地区, 实际蒸散发量为420 mm; 由于区域蒸散发量估算的困难和精度, 如误差为 $\pm 10\%$, 即估算区域蒸散发量为378 mm或462 mm, 尚在满意程度范围内, 但径流量的误差则高达 $\pm 50\%$ 以上, 令人无法接受^[31]。

遥感信息作为参数的参数化模型中, Cermak等通过Landsat卫星数据获得土地利用数据确定水文模型参数, 以SCS模型为例, 最早尝试应用遥感信息确定模型参数^[32]; 许有鹏等采用萨克门托水文模型, 探讨了利用LandsatTM直接或辅助确定水文模型参数的途径和方法, 进行日、月和年径流的动态模拟^[33]; 沈晓东等将遥感资料应用到新安江的产流参数提取中^[34]。

5.2 遥感水文模型平台开发案例

由于遥感水文模型的诸多不确定性, 单一模型难以分析不同情形的水文过程, 为此针对暴雨过程、流域过程和区域水循环过程, 刘昌明等研发了EcoHAT (Ecological

Hydrology Assessment Tools) 遥感水文模型平台系统^[35]。EcoHAT 立足于遥感数据的空间特征,开展分布式水文过程和生态水文模拟,通过区域空间网格参数的输入,实现基于像元的模型运算。EcoHAT 系统主要由9个遥感水文模型组成(图3),首先以河川径流监测为基础,用河川径流遥感监测模型 EcoHAT RSHS 解决水资源监测问题;其次构建不同尺度的水文过程模型,包括暴雨径流模型 EcoHAT LCM、流域水文过程模型 EcoHAT RS-DTVGM 和区域水循环模型 EcoHAT SVAT,以及城市雨洪模型 EcoHAT Eco-rudim,从而解决水文模拟计算问题;最后构建物质迁移转化模型,包括土壤侵蚀模型 EcoHAT LCM-MUSLE、非点源污染模型 EcoHAT Macro-NPS、氮循环 EcoHAT NT 和磷素迁移转换模型 EcoHAT PT。



图3 EcoHAT 遥感水文模型结构
Fig. 3 Construction of the EcoHAT model

EcoHAT 系统提出于2003年,最初成型于2007年(图4),2012年后不断开发完善,逐步加入区域水循环模型和分布式水文模型^[36-37],使得EcoHAT应用领域更加宽泛。2018年加入无人机数字河道监测方法^[38],建立了相应的遥感流量监测断面,用于在恶劣条件下缺少水文站地区监测水资源状况。目前,EcoHAT 系统在中国主要地区和流域都有应用(图5)。

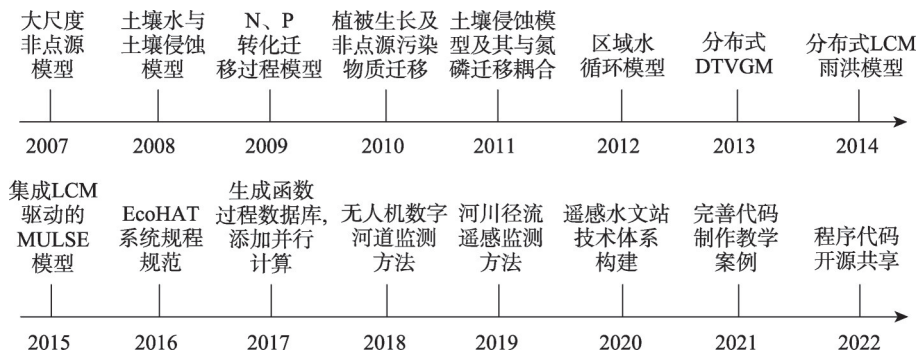


图4 EcoHAT 系统发展历程
Fig. 4 The important development milestones of the EcoHAT model

6 遥感水文模型发展展望

从20世纪70年代遥感水文模型发展的成功历程,可以清楚地认识到“遥感”与“水文模型”耦合发展的辩证关系,即遥感的优势在于不与目标物相接触来探测目标特性,从而拓展了水文模型的空间参数;缺憾也正是仅通过目标物电磁波特性观测,从而产生一系列不确定性;同时还应当认识到实践对遥感水文模型建模认识的重要推动作用,正是因为遥感水文模型发展寓之于实际应用,抓住了方法技术的变革时机,吸纳了更多类型信息数据来解决遥感水文模型面临的各种难题。



注: 基于自然资源部标准地图服务网站GS(2016)1549号的标准地图绘制,底图边界无修改。

图5 EcoHAT应用区域

Fig. 5 Regions in China where the EcoHAT model is applied

水文模型终究是对现实系统的简化, 由于水文系统高度的非线性特性, 遥感水文模型仍然面临时空尺度、模型参数率定和模拟不确定性等难题^[39]。因此, 耦合多重信息采集手段, 立足解决重大实际问题仍然是遥感水文模型发展的趋势。

6.1 遥感径流监测技术将有利于提升遥感水文的数据获取能力

遥感水文模型的根本目的之一就是获取河流径流量。随着遥感技术和无人机技术的发展和推广, 直接监测径流的新方法不断涌现。在这些新技术中, 遥感水文站是一项遥感径流监测的新兴技术, 也是发展的一个重要方向。遥感水文站技术以无人机低空遥感和地面测量为基础, 应用高精度无人机地形数据和实测河道水文水力参数, 构建精确的三维数字河道模型, 利用遥感卫星提供的水面宽度序列数据, 驱动数字河道模型, 计算

出河道流量,时间分辨率最高可达到旬尺度,从而获取长序列河道流量数据和历史流量数据回溯,截至2022年底全国已建设监测站站点500余个^[40]。通过遥感水文站新技术,将大大降低水文数据的获取成本,为水文数据进一步共享提供了技术支持^[41],同时也为更好地解决水文模型不确定性问题提供坚实的观测数据基础。

6.2 地面多传感器平台与智能物联网应用将弥补遥感径流监测时间频次的不足

随着地面和低空水文监测传感器发展以及通信技术不断提升,让以流域为单元的传感器物联网建设成为现实^[42],物联网通过5G网络实时将数据发送至高性能服务器,实现数据的接收、算法集成、数据处理和存储。丰富的数据资源将有效解决遥感水文模型的时空尺度、模型参数率定和模拟不确定性等问题,提高遥感水文模型可靠性。如高塔综合观测平台和流域水文传感器智能物联网能够进一步降低水文监测的成本,形成以流域为单元的水文监测体系,获取多种关键水文要素。又如塔基视频流量技术将应用高塔架设的视频监测传感器^[43-44],获取河道断面监测视频数据,提取每一帧图像并计算监测断面的水面宽度数据,通过高时间分辨率的水面宽度数据,驱动高精度数字河道模型,进而获取高精度的河道流量,将弥补遥感监测径流时间频次不足和突发事件监测能力的不足。

6.3 参数不确定性分析与缺资料区应用仍然是遥感水文模型的重点问题

随着对地观测卫星数量增多,数据挖掘技术不断发展,已经形成了时空分辨率与水文模型建模尺度相匹配、准确度较高的遥感数据产品。水文模型所需降水、气温等驱动要素,以及所模拟的土壤含水量、蒸散发等重要过程变量的遥感栅格数据产品可为缺资料地区水文模型构建提供强大数据支持。随着遥感数据产品逐渐丰富,在完全无地面观测流域,可以用结构较为复杂的SWAT、VIC等分布式水文模型进行水文模拟,提升对流域水文循环过程时空演变的认识。当前遥感降水数据产品精度已经基本符合分布式水文模型建模需求^[45],对于蒸散发与土壤含水量遥感数据产品,其优势是在于能够提供丰富的时空异质性信息,它们与水文模型的结合可有两种方式:①进行参数率定,在使用遥感河道水面宽度或高程数据率定模型后,继续使用遥感蒸散发或土壤含水量数据进一步对参数空间进行约束^[46];②与模型模拟进行同化,分要素分阶段进行时序同化,通过融合遥感数据与模型模拟,提升模型模拟的精准性^[47]。

6.4 流域水量—水质—水生态过程精细化模拟给遥感水文模型发展提出了更高要求

流域水文循环过程是流域内物质、能量与信息传递的重要途径。随着生态文明建设不断深入,流域生态环境保护呈现水资源、水环境与水生态三水融合管控的态势。水文模型所模拟的降雨径流过程是模拟流域内水文节律、面源与点源污染驱动下水环境与水生态过程的基础,流域水文—水环境模型发展至今,可应对流域水量—水质过程模拟^[48]或地表河湖水文—水环境过程模拟^[49]。但在服务流域陆水一体化管控的三水综合模拟中,现有模型仍存在水量—水质模拟与水生态模拟联动性差,从集水区到全流域跨尺度耦合中的界面条件协调性弱,模型对三水融合过程关键环节的数学表达精度低等瓶颈。利用空—天—地立体化观测技术,将流域内点状离散观测通过空—天观测进行时空拓展^[50],进而捕捉水生态动态连续变化信息,从而克服三水系统中水生态模拟的短板,打通多源数据跨尺度融合链条,为模型三水融合模拟提供更为精准的驱动数据与关键参数信息,实现流域三水综合模拟模型的升级换代。

7 结论

遥感水文是水文学与遥感学的交叉研究领域,遥感水文将遥感技术与水文模型相结

合, 以构建遥感信息驱动的水文模型为主要特征, 从20世纪70年代以来遥感水文模型就一直是遥感水文的热点。遥感水文模型可以概括为遥感信息和地面同步实测资料的回归模型, 应用遥感资料的水量平衡模型, 以及遥感信息作为参数的参数化模型3类。中国从遥感水文兴起之时就与国际上同步开展研究, 并且在遥感水文的概念认知, 遥感与水文相结合的科学认识, 以及遥感水文模型的研发方面做出了诸多探索性的成果。然而由于水文系统高度的非线性特性, 遥感水文模型仍然面临时空尺度、模型参数率定和模拟不确定性等难题。总结20世纪70年代以来遥感水文模型发展的经验, 应当厘清“遥感”与“水文模型”耦合发展的辩证关系, 认识到实践对遥感水文模型建模发展的重要推动作用。随着遥感技术、无人机技术的发展, 以及地面和低空水文监测传感器、通信技术、大数据和云计算的不断推广, 耦合多重信息采集手段, 立足解决遥感径流监测技术、多传感器智能物联网、缺资料区水文分析和流域水量—水质—水生态过程精细化模拟等重大问题是遥感水文模型发展的趋势。

参考文献(References)

- [1] Liu Changming, Chen Zhikai. Evaluation of the Current Situation of China's Water Resources and Analysis of Supply and Demand Development Trends. Beijing: China Water & Power Press, 2001. [刘昌明, 陈志恺. 中国水资源现状评价和供需发展趋势分析. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.]
- [2] Zakšek K, Schroedter-Homscheidt M. Parameterization of air temperature in high temporal and spatial resolution from a combination of the SEVIRI and MODIS instruments. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2009, 64(4): 414-421.
- [3] Michaelides S, Levizzani V, Anagnostou E, et al. Precipitation: Measurement, remote sensing, climatology and modeling. *Atmospheric Research*, 2009, 94: 512-533.
- [4] Hock R. Glacier melt: A review on processes and their modelling. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2005, 29(3): 362-391.
- [5] Casper M C, Vohland M. Validation of a large scale hydrological model with data fields retrieved from reflective and thermal optical remote sensing data: A case study for the Upper Rhine Valley. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2008, 33: 1061-1067.
- [6] McCabe M F, Wood E F, Wójcik R, et al. Hydrological consistency using multi-sensor remote sensing data for water and energy cycle studies. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112: 430-444.
- [7] Schuurmans J M, Troch P A, Veldhuizen A A, et al. Assimilation of remotely sensed latent heat flux in a distributed hydrological model. *Advances in Water Resources*, 2003, 26: 151-159.
- [8] Stisen S, Jensen K H, Sandholt I, et al. A remote sensing driven distributed hydrological model of the Senegal River basin. *Journal of Hydrology*, 2008, 354: 131-148.
- [9] Adelman A, Ambaruch R, Simmons J W. *Developments in Applications of Remote Sensing to Hydrology*. Berlin: Springer Netherlands, 1973.
- [10] Schultz G A. Remote sensing in hydrology. *Journal of Hydrology*, 1988, 100(1-3): 239-265.
- [11] Hu Siyi. Introduction to the application of remote sensing technology in hydrology and water resources in the Federal Republic of Germany. *Jiangsu Water Resources*, 1984(3): 123-128. [胡四一. 德意志联邦共和国遥感技术在水文和水资源中的应用介绍. 江苏水利, 1984(3): 123-128.]
- [12] Wang Yansheng. Remote sensing hydrological models and applications. *Journal of China Hydrology*, 1989, 9(5): 20-24. [王燕生. 遥感水文模型及其应用. 水文, 1989, 9(5): 20-24.]
- [13] Yang Jicheng. Potentiality of remote sensing for hydrology in the new generation. *Remote Sensing of Environment*. 1991(3): 187-190. [杨积成. 新一代水文遥感潜力展望. 环境遥感, 1991(3): 187-190.]
- [14] Fu Guobin, Li Lijuan, Liu Changming. Scale issues on the applications of remote sensing to hydrology. *Advance in Earth Sciences*, 2001, 16(6): 755-760. [傅国斌, 李丽娟, 刘昌明. 遥感水文应用中的尺度问题. 地球科学进展, 2001, 16(6): 755-760.]
- [15] Chen Zhili. *Comprehensive Dictionary*. Shanghai: Shanghai Lexicographic Publishing House, 2022. [陈至立. 辞海. 上海: 上海辞书出版社, 2022.]

- [16] Li Jiren. Advance of hydrographic remote sensing with time. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 47(3): 436-442. [李纪人. 与时俱进的水利遥感. *水利学报*, 2016, 47(3): 436-442.]
- [17] Zhang Renjie. From remote sensing information to hydrological model parameters. *Remote Sensing Information*, 1987, 2(1): 13-16, 28. [张仁杰. 从遥感信息到水文模型参数. *遥感信息*, 1987, 2(1): 13-16, 28.]
- [18] Xiong Jiangbo. Methods of determining parameters of hydrologic model through remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 1987(1): 33-43, 83. [熊江波. 用遥感资料确定水文模型参数的方法. *环境遥感*, 1987(1): 33-43, 83.]
- [19] Wang Fang, Wang Hao, Chen Mingjian, et al. A study of ecological water requirements in Northwest China (Part II): Application of remote sensing and GIS. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17(2): 129-137. [王芳, 王浩, 陈敏建, 等. 中国西北地区生态需水研究(2): 基于遥感和地理信息系统技术的区域生态需水计算及分析. *自然资源学报*, 2002, 17(2): 129-137.]
- [20] Xue An, Ni Jinren, Ma Ainai. Integration theory of model and GIS. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2002, 10(2): 134-142. [薛安, 倪晋仁, 马蔼乃. 模型与GIS集成理论初步研究. *应用基础与工程科学学报*, 2002, 10(2): 134-142.]
- [21] Liu Jiahong, Wang Guangqian, Li Tiejian. Study on key technology of digital river basin model. *Yellow River*, 2005, 27(6): 1-3, 63. [刘家宏, 王光谦, 李铁键. 数字流域模型关键技术研究. *人民黄河*, 2005, 27(6): 1-3, 63.]
- [22] Xia Jun, Zuo Qiting. Advances in international hydrological science research. *Advance in Earth Science*, 2006, 21(3): 256-261. [夏军, 左其亭. 国际水文科学研究的新进展. *地球科学进展*, 2006, 21(3): 256-261.]
- [23] Zhao Shaohua, Qiu Guoyu, Yang Yonghui, et al. Advances in the coupled model of remote sensing and hydrology. *Ecology and Environmental Sciences*, 2006, 15(6): 1391-1396. [赵少华, 邱国玉, 杨永辉, 等. 遥感水文耦合模型的研究进展. *生态环境* 2006, 15(6): 1391-1396.]
- [24] Li Xin, Liu Qiang, Liu Qinhuo, et al. The progresses on the Watershed Allied Telemetry Experimental Research (WATER): Remote sensing of key hydrological and ecological parameters. *Remote Sensing Technology and Application*, 2012, 27(5): 650-662. [李新, 刘强, 柳钦火, 等. 黑河综合遥感联合试验研究进展: 水文与生态参量遥感反演与估算. *遥感技术与应用*, 2012, 27(5): 650-662.]
- [25] Yang Dawen, Xu Zongxue, Li Zhe, et al. Progress and prospect of hydrological sciences. *Progress in Geography*, 2018, 37(1): 36-45. [杨大文, 徐宗学, 李哲, 等. 水文学研究进展与展望. *地理科学进展*, 2018, 37(1): 36-45.]
- [26] Liu Yuanbo, Wu Guiping, Zhao Xiaosong, et al. Remote sensing for watershed hydrology: Issues and challenges. *Advance in Earth Science*, 2020, 35(5): 488-496. [刘元波, 吴桂平, 赵晓松, 等. 流域水文遥感的科学问题与挑战. *地球科学进展*, 2020, 35(5): 488-496.]
- [27] Yan La, Long Di, Bai Liangliang, et al. A review on water resources stereoscopic monitoring systems based on multi source data. *Journal of Remote Sensing*, 2020, 24(7): 787-803. [岩腊, 龙笛, 白亮亮, 等. 基于多源信息的水资源立体监测研究综述. *遥感学报*, 2020, 24(7): 787-803.]
- [28] Li Chongwei, Wang Zhihui, Tang Qihong, et al. Dynamics of surface water area in the Yellow River Basin and its influencing mechanism during 1986-2019 based on Google Earth Engine. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(5): 1153-1168. [李崇巍, 王志慧, 汤秋鸿, 等. 1986—2019年黄河流域地表水体动态变化及其影响因素. *地理学报*, 2022, 77(5): 1153-1168.]
- [29] Welby C W. Use of multispectral photography in water resources planning and management in North Carolina. *Water Resources Research Institute of the University of North Carolina*, 1976.
- [30] Zhang L, Lemeur R. Evaluation of daily evapotranspiration estimates from instantaneous measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1995, 74: 139-154.
- [31] Liu Changming, Liu Xuan, Yang Yafeng, et al. A discussion on some issues of hydro-geographical research. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(1): 3-15. [刘昌明, 刘璇, 杨亚锋, 等. 水文地理研究发展若干问题商榷. *地理学报*, 2022, 77(1): 3-15.]
- [32] Cermak R J, Feldman A D, Webb R P. Hydrologic land use classification using Landsat. *Hydrologic Engineering Center Davis CA*, 1979.
- [33] Xu Youpeng, Chen Qinluan, Zhu Jingyu. Application of remote sensing images to dynamic hydrologic simulation. *Advances in Water Science*, 1995, 6(2): 156-161. [许有鹏, 陈钦峦, 朱静玉. 遥感信息在水文动态模拟中的应用. *水科学进展*, 1995, 6(2): 156-161.]
- [34] Shen Xiaodong, Wang Lachun, Xie Shunping. A dynamic precipitation-runoff model for a watershed based on grid data. *Acta Geographica Sinica*, 1995, 50(3): 264-271. [沈晓东, 王腊春, 谢顺平. 基于栅格数据的流域降雨径流模型. *地理学报*, 1995, 50(3): 264-271.]

- [35] Liu Changming, Yang Shengtian, Wen Zhiqun, et al. Development and application of distributed ecological hydrology model: Ecohydrological Assessment Tool (EcoHAT) system. *Scientia Sinica: Technologica*, 2009, 39(6): 1112-1121. [刘昌明, 杨胜天, 温志群, 等. 分布式生态水文模型 EcoHAT 系统开发及应用. *中国科学: 技术科学*, 2009, 39(6): 1112-1121.]
- [36] Cai M Y, Yang S T, Zeng H J, et al. A distributed hydrological model driven by multi-source spatial data and its application in the Ili River Basin of Central Asia. *Water Resources Management*, 2014, 28(10): 2851-2866.
- [37] Zhao H G, Yang S T, Yang B G, et al. Quantifying anthropogenic and climatic impacts on sediment load in the sediment-rich region of the Chinese Loess Plateau by coupling a hydrological model and ANN. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2017, 31(8): 2057-2073.
- [38] Yang S T, Bai J, Zhao C S, et al. The assessment of the changes of biomass and riparian buffer width in the terminal reservoir under the impact of the South-to-North Water Diversion Project in China. *Ecological Indicators*, 2018, 85: 932-943.
- [39] Xu Zongxue. Hydrological models: Past, present and future. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2010, 46(3): 278-289. [徐宗学. 水文模型: 回顾与展望. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2010, 46(3): 278-289.]
- [40] Wang Pengfei, Yang Shengtian, Wang Juan, et al. Discharge estimation with hydraulic geometry using unmanned aerial vehicle and remote sensing. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51(4): 492-504. [王鹏飞, 杨胜天, 王娟, 等. 星—机一体的水力几何形态流量估算方法. *水利学报*, 2020, 51(4): 492-504.]
- [41] Lou H Z, Zhang Y J, Yang S T, et al. A new method for long-term river discharge estimation of small and medium-scale rivers by using multisource remote sensing and RSHS: Application and validation. *Remote Sensing*, 2022, 14(8): 1798. DOI: 10.3390/rs14081798.
- [42] Song Wenlong, Lv Juan, Liu Changjun, et al. Application of remote sensing technology in the construction of digital twin river basins. *China Flood & Drought Management*, 2022, 32(6): 15-20. [宋文龙, 吕娟, 刘昌军, 等. 遥感技术在数字孪生流域建设中的应用. *中国防汛抗旱*, 2022, 32(6): 15-20.]
- [43] Gao Jixi, Cai Mingyong, Zhang Xinsheng, et al. Research on the method and application of large-scale ecological disturbance risk assessment. *China Environmental Science*, 2021, 41(11): 5274-5281. [高吉喜, 蔡明勇, 张新胜, 等. 大尺度生态干扰风险评估技术方法及应用研究. *中国环境科学*, 2021, 41(11): 5274-5281.]
- [44] Wang Xuelei, Wang Xinxin, Zhu Li, et al. Spatial analysis on diffuse pollution and algal bloom characteristic with remote sensing in Chao Lake Basin. *China Environmental Science*, 2015, 35(5): 1511-1519. [王雪蕾, 王新新, 朱利, 等. 巢湖流域氮磷面源污染与水华空间分布遥感解析. *中国环境科学*, 2015, 35(5): 1511-1519.]
- [45] Lv Aifeng, Jia Shaofeng. Simulation of actual runoff using remote sensing driven distributed hydrological model. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2016, 14(3): 7-11. [吕爱锋, 贾绍凤. 遥感驱动的分分布式实际径流模拟研究. *南水北调与水利科技*, 2016, 14(3): 7-11.]
- [46] Meyer Oliveira A, Fleischmann A S, Paiva R C D. On the contribution of remote sensing-based calibration to model hydrological and hydraulic processes in tropical regions. *Journal of Hydrology*, 2021, 597: 126184. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126184.
- [47] Khaki M, Hendricks Franssen H J, Han S C. Multi-mission satellite remote sensing data for improving land hydrological models via data assimilation. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 18791. DOI: 10.1038/s41598-020-75710-5.
- [48] Cui J A, Zhao Y E, Sun W C, et al. Evaluating the influence of hydrological condition on the phosphorus loads in an agricultural river basin using the SWAT model. *Hydrology Research*, 2021, 52(5): 1143-1158.
- [49] Tang C Y, He C, Li Y P, et al. Diverse responses of hydrodynamics, nutrients and algal biomass to water diversion in a eutrophic shallow lake. *Journal of Hydrology*, 2020, 593(11): 125933. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125933.
- [50] Sagan V, Peterson K T, Maimaitijiang M, et al. Monitoring inland water quality using remote sensing: Potential and limitations of spectral indices, bio-optical simulations, machine learning, and cloud computing. *Earth-Science Reviews*, 2020, 205: 103187. DOI: 10.1016/j.earscirev.2020.103187.

Review of the remote sensing hydrological model

YANG Shengtian¹, YU Jingshan¹, LOU Hezhen¹, SUN Wenchao¹, ZHAO Changsen¹,
WANG Xuelei², SONG Wenlong³, CAI Mingyong², DAI Yunmeng¹

(1. College of the Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Ministry of Ecology and Environment Center for Satellite Application on Ecology and Environment, Beijing 100096, China; 3. China Institute of Hydropower and Water Research, Beijing 100048, China)

Abstract: Remote sensing in hydrology is a crossing field of hydrology and remote sensing. It not only includes remote sensing retrieval models for water cycle factors, but also covers remote sensing hydrological models which serve for calculating the process of hydrology. This review focuses on the past, present and future development of remote sensing hydrological model by using the meta-analysis method and collecting related research in the past 40 years. The results show that remote sensing hydrological model has played a key role in remote sensing hydrology since the 1970s in the world. In China, the researchers of remote sensing in hydrology keep pace with global scientists, and prominent achievements include the concept generation about the remote sensing hydrology, promotion of the combination between remote sensing and hydrology and development of remote sensing hydrological models. In the future, by the help of enhanced information technology, the remote sensing hydrological models will pay more attention to the runoff monitoring by using remote sensing, the intelligent web of hydrological sensors, hydrological analysis in the data scarce watersheds, and the precise simulation of the water flow, water quality as well as the water ecology.

Keywords: remote sensing hydrology; remote sensing hydrological model; remote sensing science; hydrology; multi-information