

水文学研究进展与展望

杨大文¹, 徐宗学², 李哲³, 袁星⁴, 王磊⁵, 缪驰远⁶, 田富强¹,
田立德⁵, 龙笛¹, 汤秋鸿^{3*}, 刘星才³, 张学君³

(1. 清华大学水利水电工程系, 北京 100084; 2. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101; 4. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029; 5. 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100101; 6. 北京师范大学全球变化与地球系统科学学院, 北京 100875)

摘要:水文学是研究地球上水的起源、存在、分布、循环运动等变化规律,并运用这些规律为人类服务的知识体系。水文学研究经历了由经验到理论、由简单过程到复杂系统、由定性描述到定量模拟的发展历程,其学科体系演进与科学技术进步及社会发展需求紧密联系,并由此衍生出诸如生态水文学、气象水文学、冰冻圈水文学、遥感水文学、同位素水文学、城市水文学、社会水文学等多种交叉研究领域与分支学科。当今水文学研究在水文多尺度观测、陆面—水文—社会耦合模拟及多源观测—模型同化技术等领域取得显著进展,水文学研究的广度和深度不断拓展。未来水文学研究将面向陆地水文循环的变化规律及其效应,重点关注水文循环变化特征和机理、水文循环变化趋势预估及水文循环变化的自然和社会影响等前沿课题;从原有就水论水研究思路转向在自然地理综合分析框架下以水循环为纽带开展的多尺度、多过程集成研究。

关键词:水文学;水文循环;地球系统;人类活动;观测技术;学科交叉

1 引言

水文学是研究地球上水的起源、存在、分布、循环运动等变化规律,并运用这些规律为人类服务的知识体系。水文学以地球表面不同时间和空间尺度的水文循环过程为核心研究内容,旨在揭示包括降水、蒸发、下渗、土壤水运动及径流等过程在内的水循环运动基本规律。一方面,水文循环是连接大气圈、岩石圈和生物圈等多圈层地表过程的纽带,因此水文学研究是自然地理学的重要分支领域,为推动自然地理学科发展发挥重大作用(Anderson et al, 2005);另一方面,水资源又是支撑经济社会发展的基本条件,科学认识水文循环变化规律是对水资源进行合理开发利用的前提,因此水文学发展也具

有面向生产实践的长期现实需求。从工程水文计算到水系统综合模拟,水文学研究的发展历史表明,认识水文循环对人类社会可持续发展至关重要,对水文循环变化规律的掌握程度极大地影响人类文明与社会经济的发展(Delli Priscoli, 2000)。

水文循环决定水资源时空分布及其支撑下的地表环境演变(丁永建, 2013),但由于水文循环与其他自然地理过程之间存在复杂的相互作用,不同自然气候与地理条件等因素导致全球水资源分布具有显著的时空变异特征(Zhang et al, 2011)。与此同时,气候变化导致陆地水文循环发生显著变化,极端水文事件(如洪涝、干旱)呈现增加或加重的变化趋势(Field et al, 2012);社会经济快速发展带来人类活动影响日益加剧,世界许多地区的人类用水需求

收稿日期:2017-12-25;修订日期:2018-01-19。

基金项目:国家自然科学基金项目(L1624026, 41425002, 41790424);中国科学院学部学科发展战略研究项目(2016-DX-C-02)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.L1624026, No.41425002, No.41790424; Research Project on the Development Strategy of Chinese Academy of Sciences, No.2016-DX-C-02]。

作者简介:杨大文(1966-),男,四川成都人,教授,主要从事水文水资源研究, E-mail: yangdw@mail.tsinghua.edu.cn。

通讯作者:汤秋鸿(1981-),男,湖南岳阳人,研究员,主要从事水文学研究, E-mail: tangqh@igsrr.ac.cn。

引用格式:杨大文, 徐宗学, 李哲, 等. 2018. 水文学研究进展与展望[J]. 地理科学进展, 37(1): 36-45. [Yang D W, Xu Z X, Li Z, et al. 2018. Progress and prospect of hydrological sciences[J]. Progress in Geography, 37(1): 36-45.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2018.01.005

仍在大幅增长,进而导致区域性缺水问题严重(Oket al, 2006)。综上所述,全球水文循环受到气候变化与人类活动的显著影响,水文循环变化及其水资源效应是未来水文学研究面临的重大挑战。相关水问题的解决既涉及水的自然属性,也涉及水的社会属性,这就要求开展自然和人文科学的交叉研究。地理学的理论、方法与技术为解决水的可持续性提供了科学基础。为更好地服务于人类社会可持续发展,实现人与自然的和谐发展,迫切需要拓展水文学研究的广度和深度,加强与其他相关学科领域的交叉研究,以自然地理综合分析方法来科学认知全球变化背景下的水文循环变化规律及其效应。本文从自然地理综合分析的视角,在简要回顾水文学研究发展特征与研究现状的基础上,重点阐述与水文循环变化相关的水文学研究前沿问题。

2 水文学研究发展特征

2.1 研究发展驱动

水文学研究的发展与人类生产实践息息相关,人类生存和社会需求是推动水文学发展的根本驱动力,而技术进步则为水文学研究的发展奠定基础条件。历史上,人类在生活和生产活动中逐步认识水文现象、水文过程及其变化规律,并将理论化的水文循环规律用于指导生产实践,水文学即在如此循环往复的过程中不断向前发展(徐宗学等, 2010)。概括而言,水文学研究经历了由经验到理论、由简单过程到复杂系统、由定性描述到定量模拟的发展历程。水文学研究由现象观察上升到理论研究的过程也并非孤立发生的,很大程度上是由多个相关学科(如气象科学、生态科学和社会科学等)的技术进步共同推进的(王根绪等, 2001)。多学科技术与交叉促使水文学研究由传统工程水文学对降水—产流—汇流等单一水文过程的观测与模拟,发展为如今包括气候—水文—生态—社会综合系统(Tang et al, 2016)、土壤—植物—大气—连续体 SPAC(刘昌明等, 2009)、水—能源—粮食纽带关系等(Bazilian et al, 2011),强调自然地理综合分析的研究方法体系。同时,传统水文循环研究与多学科领域交叉,进而由此衍生出多个水文分支学科,如生态水文学(Eagleson, 2005)、气象水文学

(Shuttleworth, 2012)、冰冻圈水文学(秦大河, 2017)、城市水文学(Delleur, 2003)以及社会水文学(Sivapalan et al, 2012)等,极大地拓展了水文学研究的广度和深度。

2.2 分析工具演变

为深入认识水文循环的变化规律,模拟预测水文循环的变化过程,定量分析工具演变是水文学研究发展的重要脉络之一。水文统计是早期学者开展定量水文研究的重要工具,在水文情势预测、水资源评价管理和综合系统规划等方面发挥了重要作用(Yule, 1927; Walker, 1931)。例如,引入混沌动力学方法研究水文系统的混沌特性(Hense et al, 1987),采用小波分析法揭示水文序列的非平稳性(Foufoula-Georgiou et al, 1994; Kumar et al, 1997),以及利用模糊数学、信息熵方法开展水文预报及其不确定性研究(Singh, 1997; 陈守煜, 2005)等。20世纪50年代以来,流域水文模型成为认识复杂水文循环规律的重要分析工具,其结构经由早期基于集总式结构的“黑箱”模型、概念性模型,逐渐发展到具有分布式结构的物理性模型(徐宗学, 2010)。相比于集总式模型,分布式水文模型不仅能充分考虑下垫面空间异质性对水文循环过程的影响,还加强了对蒸散发、土壤水分运动等关键过程的刻画描述,在揭示水文循环的时空变化特征和规律方面更具优势。近年来,气候模式中陆面过程模型发展也为水文模型提供了更好的陆—气交互过程参数化方案,其发展大致经历了水桶(Bucket)模型、土壤—植被—大气系统的水热传输(Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer, SVAT)模型,以及考虑多过程耦合的陆面过程模型,如简单生物圈(Simple Biosphere Model, SiB)模型(Sellers et al, 1996)、CLM(Community Land Model)模型(Dai et al, 2003)等。

2.3 现代技术支撑

水文学研究的发展具有鲜明的支撑技术烙印,科学技术进步极大地丰富了水文学研究手段和资料。18-19世纪期间,水文观测技术在工业革命影响之下得到迅速发展,一系列观测仪器的发明为水文要素观测与定量分析研究奠定了基础,进而推动了水文学理论得到飞跃性的发展(比斯瓦斯, 2007)。20世纪以来,计算机和遥感技术的发展显著地提高了水文计算模拟能力,逐渐积累的卫星遥感数据也为获取大范围的水文参数提供了基础,因

此在此期间水文模型得到迅速发展(Döll et al, 2016)。20世纪末期至21世纪以来,气候/天气预报技术的发展在一定程度上推动了水文预报技术的再次发展,使得大范围中长期水文预报成为可能(Mitchell et al, 2004)。总的来看,现代水文学研究发展的技术支撑主要包括计算机和遥感技术(Freeze et al, 1969)、同位素追踪技术(Kendall et al, 1998)、气候模式(Field et al, 2012)以及地球大数据(McCabe et al, 2017)等。在上述新兴科学技术发展推动下,水文学研究发展呈现出多过程、多尺度和复杂系统研究的特征(吴绍洪等, 2015)。同时通过技术创新也催生了若干新的水文分支学科,如遥感水文学、同位素水文学等。在不断创新的观测与模拟技术支持下,水文研究的尺度和范围更加广泛,从室内实验尺度、流域尺度逐渐扩展到大陆尺度甚至全球尺度(傅国斌等, 2001; Bierkens, 2015),与自然地理系统的相互作用研究也越来越深入。

3 水文学研究现状

目前全球气候变化及人类活动影响日益加剧,其双重驱动下的陆地水文循环正发生深刻变化,水文学研究逐渐聚焦于变化环境下的水文循环变化规律与机理研究。通过回顾水文学研究的发展过程可以看出,水文模型与观测技术是支撑水文学研究的关键。因此,主要围绕观测与模拟,对当前水文学研究现状及进展总结如下:

3.1 水文观测手段革新与资料汇编

水文观测是认识水文循环变化规律、发展水文模型的重要基础。依赖于水文和气象部门建立的传统地面站点网络,通过长期观测记录积累与整理,已形成包括全球径流数据中心、美国国家环境预报中心、欧盟水与全球变化项目及美国普林斯顿大学等多种来源的全球和区域气象水文观测或再分析数据资料(Kalnay et al, 1996; Sheffield et al, 2006; Weedon et al, 2011)。此外,国内外还陆续开展了诸如全球能量与水文循环实验 GEWEX (Chahine, 1992)、陆地水分—能量—碳通量大型观测网络 FLUXNET (Baldocchi et al, 2001)、AmeriFlux (Boden et al, 2013)、ChinaFLUX (Yu et al, 2006)等多种大型观测计划。这些水分、能量、碳通量观测资料为认识陆地水文循环变化规律与机理提供了最

基础的数据支撑。与此同时,日益成熟的遥感技术已广泛应用于陆地水文循环研究,包括陆地表面的地形地貌、植被分布类型、土地利用等基础地理信息,以及诸如降水量、蒸散发、土壤水分、水储量变化等水文循环变量的动态监测信息(Wood et al, 2011; Lettenmaier et al, 2015)。

3.2 陆面—水文—社会耦合模型研究

水文模型是揭示陆地水循环变化机理、模拟和预估变化效应的主要工具。水文循环变化机制涉及多种自然和人为过程,包括生态过程与水文过程双向耦合机制(Rodríguez-Iturbe et al, 2004)、陆—气水热交互过程与机制(Dickinson, 1995)、冰冻圈水文过程和高原湖泊变化机制(Strum, 2015)、城市化对地表产汇流机制的影响(Smith et al, 2013)、人—水协同演化机制(Sivapalan et al, 2015)等。随着人们对水文循环变化机理认识的深入,水文模型也逐渐趋于复杂,实现多要素、多过程的综合模拟成为现阶段水文模型发展的目标。例如,传统水文模型对植被生理、生态作用描述较为简略,但实际上气候变化对植被生理过程及水分利用效率均有影响,因此发展生态—水文模型是当前陆地水文循环模拟研究的热点之一(杨大文等, 2010)。同时,由于传统水文模型还对地表水分能量交换、碳氮物质循环以及其他生物化学过程考虑不足,通过耦合陆面模型中相关过程描述进而发展陆面水文模型,可提升变化环境下对水文循环变化模拟和预测能力(Wagner et al, 2010; Sheng et al, 2017),这也是当前陆地水文循环研究的重要发展方向(Tang et al, 2016)。受益于前期水文模型发展和观测资料的长期积累,在水文模型中耦合人类用水参数化方案(如水库、灌溉)成为可能,从而可以定量评估人类活动对水文过程的影响(Döll et al, 2003)。此类模型有“自然—社会”二元水循环模型(王浩等, 2013)、耦合灌溉参数化方案的 DBH 模型(Tang et al, 2006)、集成农作物需水、人类用水、河道汇流及水库调度模块的 H08 模型(Hanasaki et al, 2008)和 LHF 模型(Pokhrel et al, 2013, 2014)等。模型参数是影响模型模拟和预测能力的重要因素(Duan et al, 1992),然而日益复杂的模型结构常包含过于冗余的模型参数,在观测数据信息有限的条件下,导致模型模拟存在显著的不确定性。为此,近年来发展出广义似然不确定性估计(Beven et al, 1992)、贝叶斯概率模型估计和蒙

特卡罗模拟(Vrugt et al, 2003)等方法,用于模型参数不确定性分析(Madsen, 2000)。

3.3 多源观测—模型同化技术研究

多源观测和模型数据同化是提高陆地水文循环模拟以及预测精度的重要途径。日益丰富的多源观测数据是水文学向大数据时代发展的必然趋势,采用不同来源、不同时空尺度的观测数据可对陆地水文循环进行多尺度解析与集成(Gupta et al, 2014)。水文模型因存在参数、输入以及结构误差而不可避免地表现出不确定性(Moradkhani et al, 2008),而数据同化技术则可利用多源观测信息来约束、修正和优化模拟状态变量,进而提高水文循环模拟和预报精度。近年来,包括集合卡尔曼滤波EnKF、集合调整卡尔曼滤波EAKF(Anderson, 2001)、集合平方根滤波EnSRF(Whitaker et al, 2002)等在内的多种数据同化算法在水文循环模拟中得到广泛应用,通过同化土壤含水量、径流量、蒸散发等观测信息预期可改善模拟和预报精度(Liu et al, 2012)。但事实上由于模型结构和同化算法存在差异,实际改进效果也不尽相同,因此结合流域水文特征和多源观测数据实际情况,选择合理的模型结构及有效的同化算法成为研究重点(Liu et al, 2012; Pathiraja et al, 2016; Rasmussen et al, 2016)。未来伴随大数据、人工智能、机器学习等领域的新理论和新技术,综合水文循环多源观测和多过程模拟的数据同化技术将成为未来水文学发展的重要方向(National Research Council, 2012)。

4 水文学研究的前沿问题

长期以来,水文学研究多集中于认识不同时空尺度的水量平衡及水文循环要素特征,但伴随全球变化影响日益加剧,水文循环变化及其导致的水资源时空分布格局演变将与社会经济发展密切相关,因此未来水文学研究前沿将逐渐转向关注陆地水文循环的变化规律及其水资源效应,其关键科学问题可归纳为以下3个方面:

4.1 水文循环变化特征和机理

检测与归因研究是认识水文循环变化规律的重要手段。过去几十年,全球气候系统发生了显著的变化(IPCC, 2013),陆面水文循环过程受到不同程度的影响,但降水、蒸发及径流等水文循环要素

的具体变化规律仍不甚清楚,其背后的机制也有待揭示。研究发现,伴随全球气温上升,过去几十年全球降雨却没有发生显著变化,但趋势分析结果在某种程度上也取决于所用的数据集(Gu et al, 2007; Ren et al, 2013)。理论上,气温上升会导致蒸发能力和实际蒸发量增强,但全球不同地区蒸发皿长期观测资料显示蒸发量却呈现下降趋势(Roderick et al, 2004; Roderick et al, 2007),即所谓“蒸发悖论”(Roderick et al, 2002)。径流量通常受到气象驱动、人类活动和陆表覆被变化等多种因素的影响,其变化趋势因数据来源而异,不确定性较大而难以准确评估(Labat et al, 2004; Dai, 2011)。受限于观测数据的覆盖度和数据质量,当前全面评估水文循环变化特征还存在较大的不确定性。在全球降雨、径流、干旱面积等关键水文参量的整体变化趋势方面,采用不同的数据和分析可能会得到不同的结论。进一步加强水文气象观测能力建设,建立长期水文一致的水热通量数据集,有效整合已有的观测数据,是揭示水文循环变化特征和机理的基础。

4.2 水文循环变化趋势预估

模型是预估水文循环变化趋势的重要工具。评估全球变化对水文循环的影响,对人类科学认识气候变化对陆面水文过程的影响、制定适应性应对措施具有重大战略意义(Vörösmarty et al, 2000),因此受到国内外学者的高度重视,如跨部门影响模型比较计划(ISIMIP)(Warszawski et al, 2014)。此类评估工作的基本框架为:将大气环流模型(GCMs)提供的未来不同情景下的气候输出降尺度处理到与陆面水文模型相匹配的时空精度,然后驱动陆面水文模型估算未来不同情景下的水文循环变化(Haddeland et al, 2014; Schewe et al, 2014)。在此过程中,降尺度方法选择、水文模型选择以及预估结果不确定分析等受到关注(徐宗学等, 2016),但目前预估结果仍存在较大不确定性。基于多个气候模式预估结果显示,未来全球极端降水将随升温而增加,但不同模式之间结果差异显著,表现出降水预估结果可靠性较差(Westra et al, 2014)。同样,多模式评估结果显示全球径流随升温大体呈线性变化,但变化趋势存在区域差异(Milly et al, 2005; Zhang et al, 2014)。IPCC AR5 影响评估模型比较项目(ISIMIP)结果显示,全球水文模型导致的不确定性甚至超过了全球气候模式的不确定性(Schewe et

al, 2014)。近几十年来,伴随社会经济迅速发展和人口数量剧增,人类活动也成为驱动水文循环变化的关键因子,如何区分变化环境下自然与人类活动的影响是研究热点。传统方法通常是将两者看作相对独立的组分,通过设计敏感性对比实验,简单分离两者的相对贡献(Tang et al, 2008)。然而,地球系统是个复杂的巨系统,陆地水文循环与陆地表层其他系统间存在复杂的交互过程(Vitousek et al, 1997)。例如,由于人类砍伐树木,而导致流域下垫面发生改变;下垫面变化不仅直接影响地表产汇流过程,还能通过反馈作用影响当地气候系统,进而改变降雨—径流过程(DeFries et al, 2004; Brown et al, 2005; Davidson et al, 2012)。为此,发展集成自然—社会—生态等多过程的陆面水文模型,有助于准确评估环境变化条件下陆地水文循环的变化趋势。

4.3 水文循环变化的自然与社会影响

全球环境变化将导致陆地水文循环发生改变,进而引起水资源及洪水、干旱等水灾害时空分布变化,导致全球和各国水安全面临诸多挑战(Wheat-er, 2015)。研究表明,气候变化导致极端降水事件增加可引发洪涝灾害风险升高(IPCC, 2013);由于温度升高,冰川退缩及冰雪融化可能导致径流情势发生改变(Barnett et al, 2008),而农业灌溉用水增加将导致水资源短缺(Yin et al, 2017);海平面上升则可能带来土地淹没、盐渍化、海水入侵等一系列风险(丁一汇, 2008);此外,环境变化还可能引起或加剧东南亚、南亚、中亚、北非等地区的水冲突(Kremer, 2012)。同时,未来水资源管理将从单一部门水安全评价转变为跨部门水安全与水资源管理,水资源安全不单单是水资源系统自身的安全,还涉及粮食、生态、能源等方面安全,影响人类正常生产、生活以及社会安定(Cosgrove et al, 2015; McLaughlin et al, 2015),需要深入研究水系统安全与粮食、能源、生态环境安全协同变化机制,注重揭示水资源—能源—粮食、气候—水资源—能源—生态等的纽带关系。

5 水文学研究展望

展望未来,伴随科学技术进步与社会需求增长,水文学研究将发挥越来越重要的作用;但同时气候变化、人类活动影响日益加剧,也使得水文学

研究面临一系列重大挑战。水文学研究的核心仍是水文循环变化规律,但全球变化背景下亟需提升对水文循环变化与环境变化之间相互作用的科学认识,并加强以水循环为纽带的自然地理多过程综合研究,以准确预估其变化效应。

(1) 水文循环变化与气候变化的相互作用将是重要研究内容。陆地水文循环过程受到大气环流水汽输送及其变化的直接影响,未来伴随水体同位素技术不断发展,可进一步明晰大气环流过程中水汽输送途径,大尺度水汽来源解析与变化,以及陆—气耦合关系等关键科学问题。冰冻圈是水文循环变化与气候变化相互作用的敏感区域,未来冰冻圈水文过程研究将进一步向机理分析、数值模拟方向发展,野外观测与数值模拟将更有效结合;利用遥感技术手段加强对冰冻圈水文循环变化的监测,进而开展冰冻圈—水圈—大气圈—生物圈相互作用的模拟研究。陆地水文循环变化与人类社会的发展密切相关,未来陆—气耦合模型还需加强陆面过程模型中对水文循环时空演变的描述,陆地水文循环模拟精度尚待提高,同时需要进一步区分自然变率或外界强迫引起的气候变化以准确预估未来水文循环变化。

(2) 人类活动对水文循环变化的影响作用日益凸显,亟需发展能定量描述人类用水活动过程的社会—水文模型。目前仅有部分水文模型能够考虑社会经济取用水、工程调节等人类用水活动,未来开展社会需水—工程调节—生态用水等关键过程综合集成研究仍是水文学发展面临的重大挑战(汤秋鸿等, 2015; 吴绍洪等, 2015)。

(3) 加强水文循环与环境变化相互作用综合集成研究,是准确预估未来水文循环变化效应的基础。以自然地理综合分析视角来看,未来水文学研究将逐渐发展转变为强调多要素、多过程、多尺度、多界面、自然和社会科学的综合交叉集成研究范式,以准确评估水文循环变化及其效应。例如,围绕水循环变化及其伴生生态安全问题,研究多尺度生态过程与水文循环耦合机理及其模拟方法是发展趋势,但其核心是统筹考虑水文循环与气候、自然地理等多圈层、多要素的耦合关系,包括:气候变化和水分胁迫对生态水文过程的影响、气候—土壤—植被系统与水文相互作用机理、气候变化对作物耗水与产量的影响、生态系统对气候变化和人类活动的响应、植被变化对水文过程的影响等方面。极

端水文事件变化及其风险评估是水文循环变化效应评估的另一重要方面,加强综合集成研究也是提升水文气象极端事件可预报性的重要途径。在全球变化背景下,需从海—陆—气相互作用的综合分析角度来综合研究洪水、干旱、台风暴雨等极端事件的发生和演变机理,同时需要综合使用雷达、卫星等多源观测技术提高对气象水文极端事件的监测能力。

总之,水文循环与地球表层各圈层相互联系,涉及要素众多、过程复杂,水文学研究从单纯考虑流域降雨—径流关系逐渐扩展到考虑大气—水—生物等各圈层耦合作用,研究手段也趋于复杂化、多样化。伴随人们对水文循环过程更全面、更深入的认识,以及观测和模拟技术的发展,水文学关注点正在从就水论水,转向在自然地理综合分析框架下以水文循环为纽带开展多尺度、多过程的现代水文综合研究。研究问题呈现明显的多学科交叉趋势,所采用的技术手段更加先进与新颖,这些转变将给今后几十年的水文研究带来全新的面貌,促进水文学在自然地理综合研究中发挥日益重要的作用。

参考文献(References)

- 比斯瓦斯. 2007. 水文学史[M]. 刘国纬, 译. 北京: 科学出版社. [Biswas A K. 2007. History of hydrology[M]. Liu G W, Trans.. Beijing: China: Science Press.]
- 陈守煜. 2005. 水资源与防洪系统可变模糊集理论与方法[M]. 大连: 大连理工大学出版社. [Chen S Y. 2005. Theory and method of variable fuzzy set for water resources and flood control system[M]. Dalian, China: Dalian University of Technology Press.]
- 丁一汇. 2008. 人类活动与全球气候变化及其对水资源的影响[J]. 中国水利, (2): 20-27. [Ding Y H. 2008. Human activity and the global climate change and its impact on water resources[J]. China Water Resources, (2): 20-27.]
- 丁永建, 周成虎, 邵明安, 等. 2013. 地表过程研究进展与趋势[J]. 地球科学进展, 28(4): 407-419. [Ding Y J, Zhou C H, Shao M A, et al. 2013. Studies of earth surface processes: Progress and prospect[J]. Advances in Earth Science, 28(4): 407-419.]
- 傅国斌, 李丽娟, 刘昌明. 2001. 遥感水文应用中的尺度问题[J]. 地球科学进展, 16(6): 755-760. [Fu G B, Li L J, Liu C M. 2001. Scale issues on the applications of remote sensing to hydrology[J]. Advance in Earth Sciences, 16(6): 755-760.]
- 刘昌明, 张喜英, 胡春胜. 2009. SPAC界面水分通量调控理论及其在农业节水中的应用[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 45(5-6): 446-451. [Liu C M, Zhang X Y, Hu C S. 2009. SPAC interface water flux control and its application to water-saving in agriculture[J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 45(5-6): 446-451.]
- 秦大河. 2017. 冰冻圈科学概论[M]. 北京: 科学出版社. [Qin D H. 2017. An introduction to cryosphere science[M]. Beijing, China: Science Press.]
- 汤秋鸿, 黄忠伟, 刘星才, 等. 2015. 人类用水活动对大尺度陆地水循环的影响[J]. 地球科学进展, 30(10): 1091-1099. [Tang Q H, Huang Z W, Liu X C, et al. 2015. Impacts of human water use on the large-scale terrestrial water cycle[J]. Advances in Earth Science, 30(10): 1091-1099.]
- 王根绪, 程国栋, 钱鞠. 2001. 生态水文科学研究的现状与展望[J]. 地球科学进展, 16(3): 314-323. [Wang G X, Cheng G D, Qian J. 2001. Current situation and prospect of the Ecological hydrology[J]. Advance in Earth Sciences, 16(3), 314-323.]
- 王浩, 贾仰文, 杨贵羽, 等. 2013. 海河流域二元水循环及其伴生过程综合模拟[J]. 科学通报, 58(12): 1064-1077. [Wang H, Jia Y W, Yang G Y, et al. 2013. Integrated simulation of the dualistic water cycle and its associated processes in the Haihe River Basin[J]. Chinese Science Bulletin, 58(12): 1064-1077.]
- 吴绍洪, 赵艳, 汤秋鸿, 等. 2015. 面向“未来地球”计划的陆地表层格局研究[J]. 地理科学进展, 34(1): 10-17. [Wu S H, Zhao Y, Tang Q H, et al. 2015. Land surface pattern study under the framework of "Future Earth"[J]. Progress in Geography, 34(1): 10-17.]
- 徐宗学. 2010. 水文模型: 回顾与展望[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 46(3): 278-289. [Xu Z X. 2010. Hydrological models: Past, present and future[J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 46(3): 278-289.]
- 徐宗学, 李景玉. 2010. 水文科学研究进展的回顾与展望[J]. 水科学进展, 21(4): 450-459. [Xu Z X, Li J Y. 2010. Progress in hydrological sciences: Past, present and future[J]. Advances in Water Science, 21(4): 450-459.]
- 徐宗学, 刘晓婉, 刘浏. 2016. 气候变化影响下的流域水循环: 回顾与展望[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 52(6): 722-730. [Xu Z X, Liu X W, Liu L. 2016. Impact of climate change on hydrological cycle in river basins: Past, present and future[J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 52(6): 722-730.]
- 杨大文, 雷慧闽, 丛振涛. 2010. 流域水文过程与植被相互作用

- 用研究现状评述[J]. 水利学报, 41(10): 1142-1149. [Yang D W, Lei H M, Cong Z T. 2010. Overview of the research status in interaction between hydrological processes and vegetation in catchment[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 41(10): 1142-1149.]
- Anderson J L. 2001. An ensemble adjustment Kalman Filter for data assimilation[J]. Monthly Weather Review, 129(12): 2884-2903.
- Anderson M G, McDonnell J J. 2005. Encyclopedia of hydrological sciences[M]. England: UK: John Wiley & Sons.
- Baldocchi D, Falge E, Gu L, et al. 2001. FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 82(11): 2415-2434.
- Barnett T P, Pierce D W, Hidalgo H G, et al. 2008. Human-induced changes in the hydrology of the Western United States[J]. Science, 319: 1080-1083.
- Bazilian M, Rogner H, Howells M, et al. 2011. Considering the energy, water and food nexus: Towards an integrated modelling approach[J]. Energy Policy, 39(12): 7896-7906.
- Beven K, Binley A. 1992. The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction[J]. Hydrological Processes, 6(3): 279-298.
- Bierkens M F P. 2015. Global hydrology 2015: State, trends, and directions[J]. Water Resources Research, 51(7): 4923-4947.
- Boden T A, Krassovski M, Yang B. 2013. The AmeriFlux data activity and data system: an evolving collection of data management techniques, tools, products and services[J]. Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems, 2(1): 165-176.
- Brown A E, Zhang L, McMahon T A, et al. 2005. A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation[J]. Journal of Hydrology, 310(1-4): 28-61.
- Chahine M T. 1992. GEWEX: The global energy and water cycle experiment[J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 73(2): 9-24.
- Cosgrove W J, Loucks D P. 2015. Water management: Current and future challenges and research directions[J]. Water Resources Research, 51(6): 4823-4839.
- Dai A G. 2011. Drought under global warming: A review[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 2(1): 45-65.
- Dai Y J, Zeng X B, Dickinson R E, et al. 2003. The common land model[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 84(8): 1013-1023.
- Davidson E A, de Araújo A C, Artaxo P, et al. 2012. The Amazon Basin in transition[J]. Nature, 481: 321-328.
- DeFries R, Eshleman K N. 2004. Land-use change and hydrologic processes: A major focus for the future[J]. Hydrological Processes, 18(11): 2183-2186.
- Delleur J W. 2003. The evolution of urban hydrology: Past, present, and future[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 129(8): 563-573.
- Delli Priscoli J. 2000. Water and civilization: Using history to reframe water policy debates and to build a new ecological realism[J]. Water Policy, 1(6): 623-636.
- Dickinson R E. 1995. Land-atmosphere interaction[J]. Reviews of Geophysics, 33(S2): 917-922.
- Döll P, Douville H, Güntner A, et al. 2016. Modelling freshwater resources at the global scale: Challenges and Prospects [J]. Surveys in Geophysics, 37(2): 195-221.
- Döll P, Kaspar F, Lehner B. 2003. A global hydrological model for deriving water availability indicators: Model tuning and validation[J]. Journal of Hydrology, 270(1-2): 105-134.
- Duan Q Y, Sorooshian S, Gupta V. 1992. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models[J]. Water Resources Research, 28(4): 1015-1031.
- Eagleson P S. 2005. Ecohydrology: Darwinian expression of vegetation form and function[M]. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press.
- Field C B, Barros V, Stocker T. 2012. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation: special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press.
- Foufoula-Georgiou E, Kumar P. 1994. Wavelets in Geophysics [M]. Cambridge, MA: Academic Press.
- Freeze RA, Harlan RL. 1969. Blueprint for a physically based, digitally simulated hydrologic response model[J]. Journal of Hydrology, 9(3): 237-258.
- Gu G J, Adler R F, Huffman G J, et al. 2007. Tropical rainfall variability on interannual-to-interdecadal and longer time scales derived from the GPCP monthly product[J]. Journal of Climate, 20(15): 4033-4046.
- Gupta H V, Perrin C, Blöschl G, et al. 2014. Large-sample hydrology: A need to balance depth with breadth[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 18(2): 463-477.
- Haddeland I, Heinke J, Biemans H, et al. 2014. Global water

- resources affected by human interventions and climate change[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(9): 3251-3256.
- Hanasaki N, Kanae S, Oki T, et al. 2008. An integrated model for the assessment of global water resources -part 1: Model description and input meteorological forcing[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 12(4): 1007-1025.
- Hense A. 1987. On the possible existence of a strange attractor for the Southern Oscillation[J]. *Beitraege zur Physik der Atmosphaere*, 60(1): 34-47.
- IPCC. 2013. Climate change 2013: The physical science basis. Working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(3): 437-472.
- Kendall C, McDonnell J J. 1998. Isotope tracers in catchment hydrology[M]. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.
- Kreamer D K. 2012. Water and international security[J]. *Journal of Contemporary Water Research & Education*, 149(1): 1-3.
- Kumar P, Foufoula-Georgiou E. 1997. Wavelet analysis for geophysical applications[J]. *Reviews of Geophysics*, 35(4): 385-412.
- Labat D, Godd  ris Y, Probst J L, et al. 2004. Evidence for global runoff increase related to climate warming[J]. *Advances in Water Resources*, 27(6): 631-642.
- Lettenmaier D P, Alsdorf D, Dozier J, et al. 2015. Inroads of remote sensing into hydrologic science during the WRR era [J]. *Water Resources Research*, 51(9): 7309-7342.
- Liu Y Y, Dorigo W A, Parinussa R M, et al. 2012. Trend-preserving blending of passive and active microwave soil moisture retrievals[J]. *Remote Sensing of Environment*, 123: 280-297.
- Madsen H. 2000. Automatic calibration of a conceptual rainfall-runoff model using multiple objectives[J]. *Journal of Hydrology*, 235(3-4): 276-288.
- McCabe M F, Rodell M, Alsdorf A E, et al. 2017. The future of Earth observation in hydrology[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(7): 3879-3914.
- McLaughlin D, Kinzelbach W. 2015. Food security and sustainable resource management[J]. *Water Resources Research*, 51(7): 4966-4985.
- Milly P C D, Dunne K A, Vecchia A V. 2005. Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate[J]. *Nature*, 438: 347-350.
- Mitchell K E, Lohmann D, Houser P R, et al. 2004. The multi-institution North American land data assimilation system (NLDAS): Utilizing multiple GCIP products and partners in a continental distributed hydrological modeling system [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D7): D07S90.
- Moradkhani H, Sorooshian S. 2008. General review of rainfall-runoff modeling: model calibration, data assimilation, and uncertainty analysis[M]//Sorooshian S, Hsu K L, Coppola E, et al. *Hydrological modelling and the water cycle*. Berlin, Heidelberg, Germany: Springer: 1-24.
- National Research Council. 2012. Challenges and opportunities in the hydrologic sciences[M]. Washington DC: National Academies Press.
- Oki T, Kanae S. 2006. Global hydrological cycles and world water resources[J]. *Science*, 313: 1068-1072.
- Pathiraja S, Marshall L, Sharma A, et al. 2016. Hydrologic modeling in dynamic catchments: A data assimilation approach[J]. *Water Resources Research*, 52(5): 3350-3372.
- Pokhrel Y N, Fan Y, Miguez-Macho G. 2014. Potential hydrologic changes in the Amazon by the end of the 21st century and the groundwater buffer[J]. *Environmental Research Letters*, 9(8): 084004.
- Pokhrel Y N, Fan Y, Miguez-Macho G, et al. 2013. The role of groundwater in the Amazon water cycle: 3. Influence on terrestrial water storage computations and comparison with GRACE[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(8): 3233-3244.
- Rasmussen J, Madsen H, Jensen K H, et al. 2016. Data assimilation in integrated hydrological modelling in the presence of observation bias[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(5): 2103-2118.
- Ren L, Arkin P, Smith T M, et al. 2013. Global precipitation trends in 1900-2005 from a reconstruction and coupled model simulations[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(4): 1679-1689.
- Roderick M L, Farquhar G D. 2002. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years[J]. *Science*, 298: 1410-1411.
- Roderick M L, Farquhar G D. 2004. Changes in Australian pan evaporation from 1970 to 2002[J]. *International Journal of Climatology*, 24(9): 1077-1090.
- Roderick M L, Rotstayn L D, Farquhar G D, et al. 2007. On the attribution of changing pan evaporation[J]. *Geophysical Research Letters*, 34(17): L17403.

- Rodríguez-Iturbe I, Porporato A. 2004. Ecohydrology of water-controlled ecosystems: Soil moisture and plant dynamics [M]. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press.
- Schewe J, Heinke J, Gerten D, et al. 2014. Multimodel assessment of water scarcity under climate change[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(9): 3245-3250.
- Sellers P. J., Randall D A, Collatz G J, et al. 1996. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GC- Ms. Part I: Model formulation[J]. *Journal of climate*, 9(4): 676-705.
- Sheffield J, Goteti G, Wood E F. 2006. Development of a 50-year high-resolution global dataset of meteorological forcings for land surface modeling[J]. *Journal of Climate*, 19(13): 3088-3111.
- Sheng M Y, Lei H M, Jiao Y, et al. 2017. Evaluation of the run-off and river routing schemes in the Community Land Model of the Yellow River Basin[J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 9(8): 2993-3018.
- Shuttleworth W J. 2012. *Terrestrial Hydrometeorology*[M]. Cambridge, United Kingdom: John Wiley & Sons.
- Singh V P. 1997. The use of entropy in hydrology and water resources[J]. *Hydrological Processes*, 11(6): 587-626.
- Sivapalan M, Blöschl G. 2015. Time scale interactions and the coevolution of humans and water[J]. *Water Resources Research*, 51(9): 6988-7022.
- Sivapalan M, Savenije H H G, Blöschl G. 2012. Socio-hydrology: A new science of people and water[J]. *Hydrological Processes*, 26(8): 1270-1276.
- Smith B K, Smith J A, Baeck M L, et al. 2013. Spectrum of storm event hydrologic response in urban watersheds[J]. *Water Resources Research*, 49(5): 2649-2663.
- Sturm M. 2015. White water: Fifty years of snow research in WRR and the outlook for the future[J]. *Water Resources Research*, 51: 4948-4965.
- Tang Q H, Oki T. 2016. *Terrestrial water cycle and climate change: Natural and human-induced impacts*[M]. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Tang Q H, Oki T, Kanae S. 2006. A distributed biosphere hydrological model (DBHM) for large river basin[J]. *Annual Journal of Hydraulic Engineering*, 50: 37-42.
- Tang Q, Oki T, Kanae S, et al. 2008. Hydrological cycles change in the Yellow River Basin during the last half of the twentieth century[J]. *Journal of Climate*, 21(8): 1790-1806.
- Vitousek P M, Mooney H A, Lubchenco J, et al. 1997. Human domination of earth's ecosystems[J]. *Science*, 277(5325): 494-499.
- Vörösmarty C J, Green P, Salisbury J, et al. 2000. Global water resources: Vulnerability from climate change and population growth[J]. *Science*, 289(5477): 284-288.
- Vrugt J A, Gupta H V, Bouten W, et al. 2003. A shuffled complex evolution metropolis algorithm for optimization and uncertainty assessment of hydrologic model parameters[J]. *Water Resources Research*, 39(8): 1201.
- Wagener T, Sivapalan M, Troch P A, et al. 2010. The future of hydrology: An evolving science for a changing world[J]. *Water Resources Research*, 46(5): W05301.
- Walker G. 1931. On periodicity in series of related terms[J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 131(818): 518-532.
- Warszawski L, Frieler K, Huber V, et al. 2014. The inter-sectoral impact model intercomparison project (ISI - MIP): Project framework[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(9): 3228-3232.
- Weedon G P, Gomes S, Viterbo P, et al. 2011. Creation of the WATCH forcing data and its use to assess global and regional reference crop evaporation over land during the twentieth century[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 12(5): 823-848.
- Westra S, Fowler H J, Evans J P, et al. 2014. Future changes to the intensity and frequency of short-duration extreme rainfall[J]. *Reviews of Geophysics*, 52(3): 522-555.
- Wheater H S. 2015. *Water security-science and management challenges*[C]//*Proceedings of the 11th Kovacs Colloquium on Hydrological Sciences and Water Security: Past, Present and Future*. Paris, France: International Association of Hydrological Sciences (IAHS): 23-30.
- Whitaker J S, Hamill T M. 2002. Ensemble data assimilation without perturbed observations[J]. *Monthly Weather Review*, 130(7): 1913-1924.
- Wood E F, Roundy J K, Troy T J, et al. 2011. Hyperresolution global land surface modeling: Meeting a grand challenge for monitoring Earth's terrestrial water[J]. *Water Resources Research*, 47(5): W05301.
- Yin Y Y, Tang Q H, Liu X C, et al. 2017. Water scarcity under various socio-economic pathways and its potential effects on food production in the Yellow River Basin[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(2): 791-804.
- Yu G R, Wen X F, Sun X M, et al. 2006. Overview of China-FLUX and evaluation of its eddy covariance measurement

- [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 137(3-4): 125-137.
- Yule G U. 1927. On a method of investigating periodicities in disturbed series, with special reference to Wolfer's sun-spot numbers[J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 226: 267-298.
- Zhang X J, Tang Q H, Zhang X Z, et al. 2014. Runoff sensitivity to global mean temperature change in the CMIP5 models [J]. *Geophysical Research Letters*, 41(15): 5492-5498..
- Zhang Z X, Chen X, Xu C Y., et al. 2011. Evaluating the non-stationary relationship between precipitation and streamflow in nine major basins of China during the past 50 years [J]. *Journal of Hydrology*, 409(1-2): 81-93.

Progress and prospect of hydrological sciences

YANG Dawen¹, XU Zongxue², LI Zhe³, YUAN Xing⁴, WANG Lei⁵, MIAO Chiyuan⁶,
TIAN Fuqiang¹, TIAN Lide⁵, LONG Di¹, TANG Qihong^{3*}, LIU Xingcai³, ZHANG Xuejun³
(1. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 4. Key Laboratory of Regional Climate-Environment for Temperate East Asia (RCE-TEA), Institute of Atmospheric Physics, CAS, Beijing 100029, China; 5. Institute of Tibetan Plateau Research, CAS, Beijing 100101, China; 6. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Hydrology is the science that describes the continuous movement of water, the related biogeochemical and geophysical processes, and their interactions with the environment. Hydrology research has evolved from experience-based to theories, from single process to complex systems, and from qualitative interpretations to quantitative models. The progress and evolution of hydrology has been intimately intertwined with the scientific and technological progresses and socioeconomic development, which creates many branches and interdisciplinary areas of hydrology, such as ecohydrology, hydrometeorology, cryosphere hydrology, hydrologic remote sensing, isotope hydrology, urban hydrology, and socio-hydrology. Hydrology research has made notable progress in the fields of multi-scale observations, coupled land surface-hydrology-society modeling, and multi-source data and model assimilation techniques, which further expands the connotation of hydrological study. In the future, hydrology research will focus on the characteristics and mechanism of the changes of water cycle, prediction of the changes of water cycle, and natural and social impact assessment of the changes of water cycle, in order to offer sustainable solutions to water security. In summary, the research paradigm of hydrology would shift from the traditionally self-focused approaches to the emerging integrated approaches that focus on all the water-related processes across multiple scales and sectors in the earth system.

Key words: hydrology; hydrological cycle; earth system; human activity; hydrologic observation; interdisciplinary