流域科学: 连接水文学与流域可持续管理的枢纽

贺缠生^{1,2*}, L. Allan JAMES³

1. Department of Geography, Western Michigan University, Kalamazoo, MI 49008, USA;

2. 兰州大学资源环境学院, 西部环境教育部重点实验室旱区流域科学与水资源研究中心, 兰州 730000;

3. Department of Geography, University of South Carolina, Columbia, SC 29208, USA

* 通讯作者, E-mail: He@wmich.edu

收稿日期: 2020-07-26; 收修改稿日期: 2021-01-06; 接受日期: 2021-01-20; 网络版发表日期: 2021-04-08

国家自然科学基金项目(批准号: 42030501、41530752和91125010)和西密歇根大学地理系Scherer基金会项目资助

摘要 近几十年来,为了更好地认识和管理不同时空尺度的水循环,许多水科学和管理项目相继问世,如生态水文学、全球水文学、社会水文学、供水管理、需水管理和水资源综合管理(Integrated Water Resources Management, IWRM)等。与此同时,示踪、制图、遥感、机器学习和模拟等先进技术也广泛应用于水文过程和水资源研究中。尽管如此,全球水危机仍日益加剧。究其原因在于水文水资源研究和管理之间未能在不同时空尺度建立有效的链接和交流来实现联合国可持续发展目标。流域是水资源管理的基本单元,流域科学有望搭建水文水资源研究与管理之间的桥梁。本文首先回顾水文研究和水资源管理的进展,进而讨论了全球水资源界面临的问题和挑战。在此基础上,提出了流域科学的四个核心组成部分: (1) 水文分析; (2) 水资源政策; (3) 综合治理; (4) 管理与反馈。该构架综合考虑水资源拥有量和用水量及水质,量化水循环的储存、通量和质量,基于地球环境边界条件理论确定当地水资源阈值;提出水资源管理的具体可行措施。流域科学为应对当前全球水危机和实现联合国可持续发展目标提供了互补性水资源管理途径。

关键词 水资源危机, 水文学, 流域科学, 水资源综合管理(IWRM)

1 引言

在过去几十年里,许多水资源管理途径相继问世,用来解决全球水资源短缺和冲突问题,如供水管理、需水管理和水资源综合管理(Integrated Water Resources Management, IWRM)(He等, 2005, 2014, 2020)。与此同时,传统意义上研究地球表层水的产生、分布、循环和性质的水文学或水文科学(NRC, 1991)已经发展到将水与大气、陆地和海洋联系起来,

以求更全面地了解水在多种尺度和环境中的运移及其与地球上气候和生命的相互作用(NRC, 2012)。此外,水文学还出现了许多分支学科,如生态水文学(Hannah等, 2004)、全球水文学(Bierkens, 2015)、全球变化水文学(Tang, 2020)和社会水文学(Di Baldassarre等, 2019)等,这些分支学科力求在多时空尺度上探讨人类与自然因素的相互作用和耦合关系,以及其对水的产生、分布、性质和运移的影响。尽管在过去几十年里,水资源的理论研究、技术发展和管理手段均取得了巨

中文引用格式: 贺缠生, James L. A. 2021. 流域科学: 连接水文学与流域可持续管理的枢纽. 中国科学: 地球科学, 51(5): 666–679, doi: [10.1360/N072020-0248](https://doi.org/10.1360/N072020-0248)
英文引用格式: He C, James L. A. 2021. Watershed science: Linking hydrological science with sustainable management of river basins. Science China Earth Sciences, 64(5): 677–690, <https://doi.org/10.1007/s11430-020-9723-4>

大的进步,但仍存在水安全、水污染、洪涝灾害等一系列问题.研究表明,全球仍有超过20亿的人口无法获得清洁、安全的饮用水,超过40亿的人口缺乏污水处理及相关卫生设施和服务;水质问题,如新兴污染物、非点源污染、外来物种的入侵和扩散仍在持续;1995~2015年期间,频繁发生的洪涝灾害造成了巨大的经济损失,严重威胁到了人类的生命安全,造成30多亿人受灾,约17.9万人死亡(Gleick, 2016; WWAP, 2019; He等, 2020). 基于此,世界经济论坛宣布,人类正面临着全球供水危机(The World Economic Forum, 2013; He等, 2020). 那么是什么导致了这一难题? 一些学者指出,全球水危机实则是一种治理危机(WWAP, 2006; Castro, 2007; Di Baldassarre等, 2019). 传统的综合水资源规划和管理方法中缺乏水资源管理制度和理论框架,导致无法实现可持续水资源管理(Matondo, 2002). 也有报告指出,水资源规划和管理方法缺失的关键环节是科研工作者和决策者在不同尺度上的有效互动(WWAP, 2006; Hering和Ingold, 2012; Cai等, 2015; Garrick等, 2017; Di Baldassarre等, 2019).

水资源和水资源管理对实现联合国制定的可持续发展目标(UN SDGs)具有关键作用,特别是目标#6: 确保人人享有清洁、安全和持续的饮用水和污水处理及卫生设施服务(UN, 2019; He等, 2020). 在过去几十年里,许多水资源科学和水资源管理学科相继问世和发展,以求解决全世界面临的紧迫的水资源问题,如水资源综合管理、生态水文学和社会水文学. 但鲜有研究阐明在流域尺度上水科学与水管理的一体化机制(Johnson等, 2001; WWAP, 2006; Hering和Ingold, 2012; Cheng等, 2014; Cai等, 2015; Li等, 2015; Garrick等, 2017; Zipper等, 2020). 本文简要回顾了水文水资源科学和水资源管理的发展历程,分析了水文水资源科学与水资源管理特别是在流域尺度上的缺失环节,最后提出了一个有助于实现联合国可持续发展目标的流域科学理论框架.

2 水资源管理的演变

水资源管理(Water Resources Management, WRM)旨在制定和实施水资源管理相关政策、过程、技术、领导和组织机构,以认识、分配和改进水资源的运移与特性,从而采用能够促进社会发展、经济繁荣和环

境保护的管理措施来满足人类社会和生态系统的多重需求(He等, 2005, 2020). 自20世纪以来,水资源管理在全球范围内从供水管理、需水管理逐步演化为水资源综合管理(WWAP, 2006, 2019).

几个世纪以来,水资源供应管理,如依靠大坝、水库、堤防、渠道和调水工程等水利工程,是满足一个地区日益增长的用水需求的主要途径(贺缠生, 2012; He等, 2005, 2020). 诸如美国的胡佛大坝、埃及的阿斯旺大坝、巴西的伊泰普大坝和中国的三峡大坝都是世界具有代表性的大型水利工程(He等, 2005, 2010, 2020). 尽管供水管理工程,特别是大型水利工程,在进行防洪、水力发电、供水、粮食生产和促进城市化及推动经济发展等方面发挥了重要的作用,但同时也造成了诸多环境和社会经济问题,如河岸带生态环境的改变、河流水文变化、水生物种的破坏、人口迁移和以水为载体的疾病的传播等(He等, 2005, 2010; Gleick等, 2012). 因此,仅依靠修建大坝或者增加其他水资源供给工程并不能解决全球水资源问题(Gleick等, 2012; Gleick, 2016; He等, 2005, 2010, 2020).

淡水资源一直是一种宝贵的稀缺资源,有限的淡水资源难以满足社会对其日益增长的多重需求(Gleick等, 2012; He等, 2020),自20世纪70年代以来研究人员和从业者通过水资源政策、制度和节水技术开始实施水资源的需求管理,包括制定水价、建立水权和水市场、节水和提高水资源利用率等软路径(Gleick, 2016; He等, 2020). 与此同时,水资源管理已从强调管理蓝水(地表水和地下水)过渡到有效利用绿水(用于支持植被生长的土壤水),从而全面提高水资源的利用效率和生态系统服务(Hoekstra和Mekonnen, 2012).

自20世纪90年代以来,水资源综合管理日趋得到国际社会认可并在全球范围内实施. 它呼吁在制定和实施水资源政策和决策时系统地考虑水资源的供应和需求、自然和人类社会之间以及上下游间的联系,并要求利益相关者参与到水资源管理的过程之中(Global Water Partnership, 2004; 贺缠生, 2012; Hering和Ingold, 2012). 尽管水资源综合管理在全球得到认可,但由于其过于宽泛和模糊的定义(Gourbesville, 2008; Hering和Ingold, 2012),以及未能界定和限制整合的范围而受到批评(Johnson等, 2001; Hering和Ingold, 2012). 一些学者们指出,由于行政管理界线与流域边界之间的尺度不匹配,而且缺乏跨越多个空间尺度的体制框架,

导致未能实现水资源的可持续管理。为此学者们呼吁更好地理解不同尺度人与环境的相互作用过程, 并在水资源综合管理中实施参与性和适应性的管理方法 (Matondo, 2002; Blomquist和Schlager, 2005; Pahl-Wostl, 2007; 贺缠生, 2012; He等, 2005, 2010, 2020; Hering和Ingold, 2012; WWAP, 2006, 2019)。

3 新兴的跨学科水文学

水文学是“水的科学”, 研究地球上水的产生、分布、循环和性质(NRC, 1991, 2012)。传统上的水文学发展主要集中在供水和减灾方面, 即工程水文学, 忽视了对全球水循环的全面认识(NRC, 1991, 2012)。在过去几十年里, 水文学已经发展到将大气、陆地和海洋联系起来, 更全面地了解水在不同尺度和环境下的运移以及其与气候和生物的相互作用(NRC, 2012)。与此同时, 一些新的水文学分支学科相继涌现(NRC, 2012), 例如, 认识到水文和生态机制及其相互作用在控制生态格局和过程方面的重要性, 生态水文学成为21世纪初在多个空间尺度上研究水文学与生物群之间相互作用的前沿科学之一(Zalewski, 2000; Eagleson, 2002; Hannah等, 2004)。

由于水循环是一种全球现象, 新兴的全球水文学开始研究在全球尺度上人类活动对水资源平衡和陆地水文过程等方面的影响(Bierkens, 2015)。相继开发了多种全球水文模型用于在洲际和全球尺度上人类需水和用水、粮食安全、经济、能源和生物多样性的模拟研究(Bierkens, 2015)。为了应对世界范围内前所未有的气候和环境变化, 全球变化水文学作为一个跨学科领域应运而生, 旨在探究陆地水循环与全球变化在不同时空尺度上的相互作用, 了解陆地水循环变化的自然和人为成因及与地球系统的相互影响和反馈(Tang, 2020)。此外, 随着日益增强的人类活动威胁到地球系统的恢复能力, 学者们提出了地球环境边界理论, 用来定义、确定和量化地球系统的“安全运行空间”以及由人类活动引起的相关生物物理过程(Rockström等, 2009; Steffen等, 2015; Falkenmark等, 2019)。这个理论框架包括9个地球环境边界条件: 气候变化、平流层臭氧消耗、海洋酸化、生物圈完整性、生物地球化学流、陆地系统变化、淡水利用、大气颗粒物的污染浓度和新型化学实体。它已被应用于区域和全球范围内

检测、监测和确定水循环变化的安全限度, 以及水资源的管理和治理(Gleeson等, 2020; Zipper等, 2020)。

尽管水文学和相关分支学科取得了重大进展, 我们仍然面临着全球水危机挑战(Johnson等, 2001; The World Economic Forum, 2013)。在世界范围内, 超过20亿人无法获得安全饮用水, 超过40亿人无法获得安全的污水处理及卫生服务, 超过30亿人遭受着频繁发生的洪涝和干旱危害(Gleick, 2016; WWAP, 2019; He等, 2020)。而这其中缺失的环节便是“人类-水资源系统中自然资源、技术手段和社会需求层面之间有效的动态互动”(Di Baldassarre等, 2019)。因此, 学者们提出了一门新的交叉学科——社会水文学, 用于研究世界各地不同环境下人类和水资源系统之间的双向反馈, 以“帮助参与水资源综合管理的机构从更广泛的角度去界定与水有关的问题, 寻找能够适应不同政策情景的新一代管理模式”(Di Baldassarre等, 2019)。

另一些学者呼吁建立一个综合的科学框架, 集成不同的学科、子流域系统、尖端技术、多源数据库和功能健全的模型, 吸引利益相关者、科学家和决策者共同参与认知人类与环境相互作用的多尺度过程, 支持实施综合流域管理(Integrated River Basin Management, IRBM) (Matondo, 2002; Pahl-Wostl, 2007; Cai等, 2015)。然而, 流域在水资源管理项目中常常被忽视(Johnson等, 2001; Hering和Ingold, 2012; Cai等, 2015)。在水文学研究、水资源管理以及政策制度制定中, 流域被公认为是水文研究和水资源管理的基本单位(NRC, 1999; He和Croley II, 2010; Pulido-Velazquez和Ward, 2017)。因此, 本文提出流域科学可以作为连接水文研究与水资源管理之间的桥梁, 在多时空尺度上支持联合国可持续发展目标的实施。

4 流域科学

流域(溪流或湖泊的某一汇水区域)被广泛认为是水文研究和水资源管理的基本单元(Brady, 1996; USEPA, 1995, 1999; NRC, 1999; Croley II等, 2008; He和Croley II, 2010)。作为一个水文系统, 流域边界涵盖多环境、空间和时间尺度, 从面积只有几公顷的小支流到几百万平方千米的大流域(如密西西比河流域), 时间跨度涵盖分钟、小时、天, 直至几个世纪(Paola等, 2006; Croley II等, 2008; He和Croley II, 2010)。近年

来, 流域一直是许多水文学和地球科学项目关注的重点, 如关键带观测(CZO)(Brantley等, 2007; Cheng等, 2014; Bogena等, 2018)、欧盟水框架指令(Rahaman等, 2004)、美国水文科学发展大学联盟(CUAHSI)、德国陆地环境观测(TERENO)(Zacharias等, 2011)、丹麦水文观测站(HOBE)(Jensen和Illangasekare, 2011)和中国黑河流域水-生态-经济集成研究计划(Cheng等, 2014; Li等, 2015, 2018)。

确定适当的地理尺度(如流域、子流域、行政边界或其他边界)对于水资源管理至关重要(Hering和Ingold, 2012)。由于行政边界和流域边界的不匹配导致无法实现水资源的可持续管理(Matondo, 2002; Blomquist和Schlager, 2005; Hering和Ingold, 2012; Kauffman, 2015)。Garrick等(2017)提出了一个理论框架, 用以在多时空尺度上正确识别、测量和协调水资源的各种经济、社会文化和环境价值, 并呼吁发展一个更具包容性、透明度和灵活性的治理框架, 以确保政策和管理决策的实施, 进而实现联合国可持续发展目标。但是, 如何协调多个流域和行政尺度, 并在流域尺度上实现水文科学和行政决策的系统融合, 仍然是一个挑战。在这里, 我们提出流域科学来弥补水文科学和水资源管理之间链接的缺失。

目前一些学者从不同的角度定义了流域科学, 例如, Cheng等(2014)将流域科学定义为对流域整体的综合研究, 他们认为流域是陆地地表系统科学研究的最佳单元, 并提出流域科学的目标是认知和预测流域系统的复杂行为, 并通过对自然资源 and 人类活动的优化配置以支持可持续发展(Cheng和Li, 2015)。犹他州立大学流域科学系定义流域科学为基于流域尺度的水文和生态科学综合研究, 为研究生和本科生提供综合性的教育机会(<https://qcnr.usu.edu/wats>, 访问日期: 2020年7月7日)。科罗拉多州立大学生态系统科学与可持续发展系将其流域科学项目描述为“研究影响淡水资源的自然过程和人类活动”(<https://warnercnr.colostate.edu/ess/about-us/>, 访问日期: 2020年7月7日)。然而, 这些定义并未包括治理(Governance)(WWAP, 2006; Castro, 2007; Grafton等, 2013; Cai等, 2015; Kauffman, 2015; Garrick等, 2017; Di Baldassarre等, 2019)。在此, 我们将流域科学(WS)定义为研究影响流域水循环的人类、社会经济、生态、地貌和水文系统之间相互作用的一门交叉学科(Cheng等, 2014; Li等, 2015, 2018;

Di Baldassarre等, 2019)。它与现有的水资源管理项目(如水资源综合管理)互相重叠, 但又提供了一些新的补充途径和方法。虽然IWRM和流域科学都是以流域为基础的, 但流域科学与IWRM有以下几个方面的不同: (1) 它明确重视水循环的储存、通量和质量; (2) 通过纳入地球环境边界条件来确定适宜的当地水资源阈值; (3) 通过协调水文和行政边界来解决尺度不匹配问题; (4) 提出流域水资源管理的具体可行措施。

5 流域科学框架

近年来, 一个将水文、生态和地貌学及政府机构、水资源管理、可持续性和全球变化的概念等相结合的流域科学的框架已经逐渐形成, 为流域科学提供理论指导和方法支持。流域科学的框架包括四个核心组成部分(图1): (1) 水文分析; (2) 水资源政策; (3) 综合治理; (4) 管理和反馈。该框架试图实现联合国可持续发展目标#6: 确保人人享有清洁、安全的饮用水和污水处理及卫生设施和服务(UN, 2019)。流域科学的总体目标是采取跨学科方法, 寻找基于科学过程的解决方案, 以认知、分配和改善水资源的运移和特性, 从而满足人类社会和生态系统的多种需求, 实现流域的可持续发展目标(He等, 2005, 2020)。流域科学需要解决的具体问题包括: 河流、湖泊、冰川、土壤、含水层、湿地、生物量和河岸带系统中储存了多少水(Executive Office of the President of the United States, 2004; NRC, 2005, 2012; Grafton等, 2013)? 这些组成成分和大气之间的转换通量和路径是什么? 气候变化和人类活动正如何以及将如何改变这些水资源在时空尺度上的变化和质量? 水资源应该如何分配使用, 包括用于什么用途、给哪些用户、以什么价格及分配使用的时间尺度? 如何界定“人类安全空间”, 以便实现跨流域和跨地区的水资源可持续管理? 应开发何种节水技术以提高水资源利用效率? 以及需要制定哪些政策和社会激励措施, 以促进节水技术和节水实践的推广应用(Executive Office of the President of the United States, 2004)? 此外, 应建立什么样的决策过程形式和机制, 以促进利益相关者和公众的参与和协作, 并支持中央、州/省、地方政府机构、非政府组织和私营实体之间的协作和决策(NRC, 2004; USACE, 2012; Kauffman, 2015)? 虽然对这些问题没有普适性答案,

图1 (网络版彩图)流域科学框架

在贺缠生(2012)、Garrick等(2017)、Zipper等(2020)基础上修改

但这些问题应该在中央、省和地方各级的多个利益相关方之间通过适当的组织(如,流域委员会、水资源区、用水协会和流域联盟)在参与性决策过程中进行理性的讨论、辩论和协商。随后,应根据不断变化的自然过程和管理条件来实施、监测、评价和修改完善水资源管理政策(He等, 2000, 2005, 2010, 2020; Hering和Ingold, 2012; Garrick等, 2017; Zipper等, 2020)。至此,开始一个新的水资源分配和管理周期。

5.1 水文分析

深入认知所研究流域水圈和水循环的数量和质量是水资源管理的基础(He和Croley II, 2007, 2010; Cai等, 2015; Bierkens, 2015; Garrick等, 2017)。水圈是对一定时间内储存在各种蓄水体中的水的静态计算量,而水循环则是指蓄水体之间的水和物质随时间的动态流动。

建立观测系统和信息基础设施是提供长期、高分辨率、连续和准确的数据和信息,以量化多时空尺度上的水圈和水文循环变化的基础。如关键带观测(Brantley等, 2007)、黑河综合观测网(Li等, 2013, 2018; Cheng等, 2014)和陆地环境观测网(TERENO)(Zacharias等, 2011; Bogen等, 2018)。这些观测系统的

共同特点包括: (1) 多变量和多尺度观测; (2) 采用传感器网络技术; (3) 利用机载遥感(如无人机)获取高分辨率数据集; (4) 具有控制实验; (5) 集成数据库、模拟系统和信息系统(Cheng和Li, 2015)。信息基础设施是指能够接收、处理、存储和集成多源、多分辨率、多内容数据库,并对这些综合数据库进行模拟和分析,进而生成可视化分析结果,将其实时传输给相关用户(如水资源研究人员、规划师、管理人员、从业人员和其他利益相关者)的流域信息系统(Cheng和Li, 2015; Li等, 2018)。

通过测量、监测和建模,分析大气、冰川、积雪、地表径流、河流和湖泊存储,土壤水分和地下水以及外部供水(如调水和海水淡化处理的水)的分布和变异,进一步量化分析流域内水的体积、通量和质量。根据流域中的水资源问题,分析可能侧重的运移路径,如湖泊、河流和地下水之间,或流域上游和下游区域之间的运移路径。此外,遥感、示踪、制图、水文模拟、代理人基模拟、机器学习、计算机技术和分析测试等先进技术和方法应广泛应用于水文过程和水资源研究,量化植被、冰川、湿地、湖泊和土壤水之间的水通量以及土地格局变化对流域水文过程和通量的影响(He和Croley II, 2007, 2010; Famiglietti, 2014;

AghaKouchak等, 2015; Bierkens, 2015; Cai等, 2015; Jin等, 2015; Lettenmaier等, 2015; Paniconi和Putti, 2015; Tian等, 2017, 2019; Garrick等, 2017; Kollet等, 2017; Zhang等, 2019; Zipper等, 2020).

5.2 水资源政策

水文分析只是研究流域水文过程和水资源时空分布的第一步. 人类活动在多大程度上可能继续维持流域的水循环? 或需要改变哪些人类活动来维持流域的水循环? 地球水边界框架, 即可接受的水资源使用水平(如农业灌溉用水), 可用于指导可持续的水资源管理和治理, 并确定流域边界与行政界线的水资源运营政策(Gleeson等, 2020; Zipper等, 2020). Zipper等(2020)提出了一种跨尺度的方法, 该方法首先计算本地水循环的变化, 然后将其与在全球水安全运行空间背景下的当地水资源量(即维持当地水资源系统稳定状态所需的本地安全使用边界(阈值))进行比较. 该方法可确保水循环调整保持在当地和全球水边界范围内(Zipper等, 2020). 由于该方法通过协调水文边界和行政边界来解决尺度不匹配问题, 因此可将水文气候、生态、经济和社会变量纳入研究流域, 以确定水资源运行阈值. 地球水边界条件能够在不同尺度上强化可持续性和缓解全球变化. 将水系统的当前状态与确定的阈值进行比较, 通过水资源规划和管理以制定调整控制变量的措施(如灌溉用水量, 或通过农田面源污染管理来改善水质), 将水文状况控制在安全阈值范围内(Zipper等, 2020).

除了水文标准外, 气候变化、生态、经济和社会变量均需用于综合评估水文系统的状态. 气候变化直接影响水资源的变化, 需要纳入水资源管理流程(Gao等, 2019; Immerzeel等, 2020). 因此, 在所有分析尺度上都需要对气候变暖和需水量的相对重要性有深入的认知. 在全球尺度, 结合使用气候变化和水资源平衡模型, Vörösmarty等(2000)研究指出, 到2025年全球需水量的增加可能比全球变暖引起的水资源短缺更为严重. 在国家尺度, 气候模拟指出由于潜在的水资源短缺, 中国未来的农业安全存在很大的不确定性(Piao等, 2010). 鉴于这些潜在的气候变化对水资源的影响, 水资源规划者不应理所当然地认为未来的水资源可利用量会持续存在. 对于未来水资源的假设必须使用最新知识来量化气候对水资源供应和需求的影响.

生态系统服务用水是水资源管理的重要组成部分(Hering和Ingold, 2012; Garrick等, 2017; Palmer和Ruhi, 2019; He等, 2020). 生态系统服务分析应量化每年通过分配和输送更多水资源以增加生态系统服务所产生的生态效益, 特别是无法量化的生态系统服务, 如土壤保持、荒漠化治理、沙尘暴控制、洪水管理、流域保护、栖息地保护、水和空气质量改善等(Kinzig等, 2011; Garrick等, 2017). 该分析应包括为生态环境分配的水资源所带来的效益, 如维持生物多样性, 而这些生态效益在常规评估中常被忽略.

经济分析旨在解决上游和下游用户以及整个流域水资源管理决策的收益和成本. 例如, 如果上游用户减少取水量以便为下游用户提供更多的水, 或者采取保护措施以减少水土流失和下游磷和氮等养分负荷, 上游用户将承担多少成本(经济损失)以及下游用户将获得多少利益? 水资源调控带来的收益是否大于整个流域调控的成本(He等, 2000; Kinzig等, 2011)? 使用什么评估标准来权衡不同用水方式之间的效益分配, 如农业灌溉用水和保障河流或湖泊水量以维持渔业或水生环境之间的用水效益如何权衡? 由于水资源的价值在世界范围内常被低估(Johnson等, 2001), 经济分析应考虑供水和输送水资源的全部成本及流域综合管理的成本(Gleick, 2016; Garrick等, 2017; He等, 2020).

社会分析应确定水管理决策中的受益者和损失者, 并为遭受经济损失的用户提供公平的补偿. 例如, 如果要补偿上游用水者以向下游输送更多水资源, 从而恢复下游生态系统, 那么上游用水者应如何获得补偿, 是下游用户或政府实体付费(Johnson等, 2001; Pahl-Wostl, 2007; Hering和Ingold, 2012; Hoekstra和Mekonnen, 2012; Garrick等, 2017)? 应该预算多少资金以确保流域中所有居民都能获得安全、清洁的饮用水和污水处理及卫生服务? 除此之外, 社会分析还应该考虑包括伦理道德、政治和法律等方面的问题, 如财产所有权、管辖权和水分配权.

5.3 综合治理

全球水危机就是治理危机(WWAP, 2006; Castro, 2007; Grafton等, 2013; Kauffman, 2015; Garrick等, 2017; Di Baldassarre等, 2019). 水资源管理决策的实施涉及建立流域组织、数据共享、利益相关者和公众的参与.

(i) 流域组织的建立

由于流域往往跨越多个行政辖区, 因此可以建立适当形式的组织机构来处理重要的流域事宜, 如上游和下游用户之间的用水分配。这种组织包括用水者协会(如中国的灌溉用水协会)、水资源管理区(如美国佛罗里达州的水资源管理区)或流域委员会(如中国的黄河水利委员会(YRCC)和美国的特拉华河流域委员会)和区域机构(美国田纳西流域管理局(TVA))(Christian-Smith等, 2012; USACE, 2012; Garrick等, 2017; He等, 2000, 2020)。

(ii) 数据共享

气候、水文、含水层、土地利用、社会经济、人口、用水和生态系统服务的数据集是水文科学和水资源管理的“命脉”(Bierkens, 2015)。这些数据应在流域的所有利益相关者之间共享, 以促进参与和支持流域内明智的决策。过去几十年中, 在全球范围内收集了多种自然和社会经济数据集, 但这些数据集的可获得性和可用性参差不齐, 尤其在许多发展中国家更是如此。在流域和区域尺度上, 目前没有长期、一致和高分辨率的用水和水工程数据, 如流域或子流域尺度上的农业和生态系统用水、调水、水库运行、地下水开采量和水质以及水生生境数据(Bierkens, 2015)。为系统收集、汇编、处理、分析、可视化和多尺度传播这些数据集而建立发展信息基础设施, 将促进基于科学的参与式流域管理(Garrick等, 2017)。

(iii) 公众参与

水资源管理计划的实施需要建立和加强公众及利益相关者之间的密切互动和强有力的伙伴关系, 如中央、省和地方政府、行业、居民、业主、社区团体和研究团体等(WWAP, 2006; Garrick等, 2017; He等, 2000, 2020)。水资源管理的计划应该由公众及利益相关者参与决策过程并进行讨论、辩论、修订和商定, 以确保在流域范围内成功实施。美国西南部的科罗拉多河对话倡议是公众及利益相关者参与水资源决策过程的一个很好的案例。

科罗拉多河覆盖了美国西南7个州的部分地区(怀俄明州、犹他州、科罗拉多州、内华达州、新墨西哥州、加利福尼亚州和亚利桑那州)及墨西哥的部分辖区, 以及34个印第安人保留地, 流域面积约647000km², 滋养了美国西南部4000多万人(He等, 2020)。在过去几十年里, 气候变暖、日益加剧的竞争性用水需求、大

坝和水库的巨大蓄水能力, 及调水工程导致河流下游近入海口处干涸, 鲜有水量流入加利福尼亚湾, 对美国和墨西哥的双边关系以及三角洲区的环境条件产生了负面影响(He等, 2020)。为了到2026年完成对包括《科罗拉多河流域下游缺水临时管理指南》以及《鲍威尔湖和米德湖的协调运行方案》的现行准则的重新修订, 2017~2019年期间, 亚利桑那大学气候适应科学与解决方案中心(CCASS)主办了三次跨学科会议和一个三阶段的情景规划, 在更广泛的科罗拉多河对话(CRC)倡议下, 讨论与河流管理相关的一系列科学和政策主题(Jacobs等, 2020)。这些活动的参与者包括科罗拉多河流域美国境内7个州、墨西哥的2个州、多个美洲土著部落的代表、学者、科学家、水资源管理者、农业生产者、环境保护者等。他们指出了目前水文科学认知的不足, 包括地下水相互作用、生态系统结构和功能、沉积物管理、水电生产利弊权衡等, 并探讨了极端事件(“噩梦”)情景。通过公开互动的辩论和讨论, 他们提出了非同寻常、极具创造性的解决方案, 用以应对相互交织的水资源、生态系统服务、经济增长和区域发展问题。这种灵活的情景规划途径也可应用于其他地区和文化背景的决策过程(Jacobs等, 2020)。

5.4 管理与反馈

水资源管理机制可以通过建立流域管理机构(如黄河水利委员会), 在农业、工业、市政和生态系统用户中运行、监测、评估和完善水资源管理计划(He等, 2000; Hering和Ingold, 2012; Garrick等, 2017)。通过科学地设计和实施流域的监测计划, 系统地收集水文、土地利用、生态系统和社会经济等多源数据集。随后, 将这些数据用于计算和比较水文、生态和社会经济变量, 用以评估上游和下游用户以及整个流域水管理计划的绩效。如果对计划实施前后的水文、生态和社会经济指标进行比较, 结果显示情况有所改善, 并符合地球水边界框架规定的安全运行空间(水资源运行政策), 那么管理计划能够满足上下游用户对水资源的多种需求, 并保持在流域科学框架第二步水资源运营政策的安全运行阈值范围内。如果管理方案不能给整个流域带来预期的综合效益, 或水资源矛盾得不到缓解(如上下游用户之间的冲突), 则需要新的或额外的管理策略来解决这些矛盾。

节水技术在水资源管理中至关重要, 干旱地区更是如此. 在全球范围内, 至少有一半的灌溉用水白白浪费. 如果这些浪费的水被作物充分利用, 在不增加取水的情况下, 可以实现目前全球粮食产量翻番(He等, 2014). 在西北干旱区黑河流域, 实施最优灌溉制度可在5年降水周期内节约1/2以上的灌溉用水量(Jiang等, 2016).

当需要对水资源管理计划进行重大修改时, 则需要重新开始新一轮的水资源管理计划(He等, 2000; NRC, 2004; Engle等, 2011; USACE, 2012; WWAP, 2006, 2017, 2019; Zipper等, 2020). Munia等(2020)的研究表明上游水资源利用率的变化会影响下游的水资源利用量. 当上游用户用水需求增加, 导致下游用户的可用水量减少时, 可通过上下游用户之间的协商来解决. 然而, 由于气候变化(如干旱和洪水)导致的上游可利用水资源的变化, 则需要制定超出当地水资源管理边界的区域适应策略(Munia等, 2020).

6 流域科学的挑战与机遇

流域科学与现有的水资源管理计划(如IWRM)相互重叠且相互补充. 流域科学因其具有的独特特征, 与已有的水资源管理项目不同之处包括以下几个方面: (1) 集测量、监测与模拟于一体, 在多尺度上明晰量化水循环的存储量、通量和质量; (2) 纳入地球水边界框架、水文气候、生态学和社会经济变量, 以确定研究流域的水资源运行阈值; (3) 通过融合水文和行政边界来解决尺度不匹配问题; (4) 确定研究流域内水资源管理的具体可行措施; (5) 呼吁成立流域组织, 在政府、产业、居民、业主、社区团体和研究团体等公众及所有利益相关者之间建立积极互动和牢固的伙伴关系机制, 以确保公众及利益相关者参与水资源管理计划.

虽然干旱区流域(以水量和水质作为优先考虑目标)和湿润区流域(以水污染和洪水管理作为优先考虑目标)的水资源管理重点可能有所不同(He等, 2014), 但流域科学方法即适用于湿润流域也适用于干旱流域. 例如, 控制水土流失和减少对水体的养分负荷, 需要通过识别、跟踪、监测和分析沉积物和养分的来源、通量和路径, 进而确定当地运行阈值, 制定具体的可操作措施, 并通过流域组织(如流域委员会)实施泥

沙和养分减排计划, 并吸引和组织上下游利益相关者合作和参与(He等, 2010, 2014, 2020).

流域科学面临的主要挑战包括: (1) 建立观测系统, 收集支流、子流域和流域尺度上的长期、一致、高分辨率的用水和水质数据; (2) 聚集气候、水文、生态学等多学科的研究人员、从业人员和资源管理人员, 将人口学、经济学、社会学和管理科学结合起来, 共同确定研究流域的当地水资源运营政策; (3) 建立公众和利益相关者参与平台, 以确保政府、行业、居民、社区团体和科研人员之间的积极有效的互动, 以动态管理研究流域的水管理计划, 这在以自上而下集权制定政策为主导的社会更应如此(Engle等, 2011; He等, 2010, 2014, 2020).

尽管存在这些挑战, 但科学理论和遥感、示踪和制图、水文模拟、计算能力和分析技术的快速发展为流域科学的不断完善创造了良好机遇. 许多关于气候、水文、河网、水库和大坝、土地覆盖、土壤水分、地下水、农业、灌溉、碳和能量通量以及高分辨率遥感等许多实地观测数据和数据库正在通过信息系统(如, 互联网和云计算)收集、处理并向用户传播和分享(He和Croley II, 2007; Li等, 2013; Cheng和Li, 2015). 许多地区和组织开始在多时空尺度上收集水资源使用数据, 如农业灌溉和生态系统等数据(Bierkens, 2015; Lettenmaier等, 2015; Dieter等, 2018; He等, 2014, 2020). 通过加强气候科学、水文学、生态学、社会学、经济学、计算机和信息科学以及管理科学领域的学者、研究人员和从业者之间的互动和协同作用, 显著提升了多时空尺度上水循环动态变化的模拟和预测能力, 并成功确定了安全的水运营政策以维持本地和全球水边界条件(Vörösmarty等, 2000; Piao等, 2010; Zipper等, 2020).

基于流域的水资源管理计划已在全世界广泛实施, 流域治理虽然在结构和权力上各不相同, 但范围从地区(如TVA)、跨省流域委员会(如YRCC)到水资源管理区(如美国南佛罗里达水资源区), 并为公众和利益相关者提供了参与和适应性决策的平台. 这种适应性决策过程在全世界的流域管理和恢复方面已经并将继续取得显著成效(USEPA, 1995, 1999; NRC, 1999, 2004; Engle等, 2011; He等, 2020; Jacobs等, 2020). 例如, 在科罗拉多河流域, 多个联邦、部落、州和地方政府共同努力, 实施《濒危物种法》, 恢复河流生态系统

(He等, 2020). 涉及范围更广的科罗拉多河流对话(CRC)倡议吸引了来自科罗拉多河流域的美国的7个州、墨西哥的2个州、多个土著部落的学者、科学家、水资源管理者、农业生产者、环境保护者等的积极参与. 在2017~2019年期间, 通过探讨科学知识方面的缺陷, 探索极端事件情景, 提出了创造性的解决方案, 解决水资源、生态系统服务、经济增长和区域发展问题(Jacobs等, 2020). 在黄河流域, 黄河水利委员会与中央、省、地方政府协调配合, 成功实施了“退耕还林”“三北防护林”等大规模生态恢复工程, 恢复了生态系统服务功能, 将黄河输沙量从20世纪70年代的约16亿吨/年大幅减少到目前的约3亿吨/年(减少81%), 从而增加了土壤碳储量和净初级生产力(He等, 2020).

7 流域科学的应用

流域科学应用的一个范例便是中国国家自然科学基金委员会(NSFC)于2007年启动的一项大尺度、长时间的集成研究项目——“黑河流域生态-水文过程集成研究”(Cheng等, 2014; Song, 2019). 黑河流域(HRB)是中国第二大内陆河, 流域面积约为14.3万平方千米, 由于其多样的景观类型、独特的地表过程、复杂的水文循环以及上下游间日益突出的用水矛盾, 致使该流域成为流域集成研究的理想实验场所(Cheng等, 2014; Li等, 2018). 该集成研究项目旨在: (1) 揭示流域尺度水文和生态过程的相互作用及其内在机制; (2) 研制流域生态水文模型; (3) 开发决策-支持系统, 加强分析和预测水文、生态、经济系统的变化, 以促进黑河流域水资源的可持续利用(Cheng等, 2014; Song, 2019). 该项目具有实验观测, 多尺度(斑块-支流-流域尺度)和学科交叉的特点, 涉及水文、生态、经济和管理学等150个研究机构的互动和参与. 通过黑河流域生态-水文过程集成研究项目的实施, 显著推动了流域尺度观测数据和生态水文模型的集成, 并且创新性地将“自然过程”和“社会学习”结合起来进行流域研究. 到目前为止, 一个3M(即监测、模拟和数据处理)集成平台已经建成, 以支持正在开发的水-生态-经济耦合模型和空间分析决策支持系统(DSS), 促进黑河流域的可持续发展(Cheng等, 2014; Li等, 2018; Song, 2019). 尽管在过去二十年中, 黑河观测、模型和数据平台取得了重大进展, 但包括政府部门、专家和当地居民在内的各

种利益相关者尚未完全融入当前的决策支持系统(Song, 2019). 这种将研究人员和决策者联系起来的过程往往耗时长、效率低, 甚至很繁琐, 超出了传统的研究学科范畴, 而且研究周期长、回报少(Pahl-Wostl, 2007; Engle等, 2011; Cai等, 2015).

流域科学提供了一种促进科学和管理之间相互联系的互动机制, 为水资源管理和可持续发展提供决策支持. 该过程通常包括两个阶段, 即创建阶段和实施阶段(He等, 2000). 在创建过程中, 如流域管理委员会之类的组织, 可以邀请少数研究人员、政府部门、私人实体和当地居民代表组成一个委员会, 协调和指导流域规划和管理的决策制定过程. 具体内容包括: (1) 制定初步远景和目标; (2) 初步评估流域存在的问题和机遇; (3) 确定关键的公众代表和利益相关者, 并邀请其参与流域规划过程(He等, 2000). 随后, 在实施阶段, 确认的更多的关键参与者重点对创建初期初评和发现的问题进行研究, 从而对流域的规划、管理和政策进行有效调整. 该阶段的主要任务是: (1) 在深入调查基础上重新制定和修改流域宏观管理方案和目标; (2) 确定水资源规划和管理中存在的主要问题, 以及对气候变化和极端事件的应对措施; (3) 评估研究流域的资源现状及其挑战和机遇; (4) 构建流域规划和管理的组织或网络, 尤其关注人员、资金和组织结构等事宜; (5) 提出对研究目标、评价指标及管理计划的相关建议; (6) 建立一套流域规划和管理的长期操作和评估程序, 以支持区域可持续发展(He等, 2000, 2020; Jacobs等, 2020).

虽然在中国, 水资源的决策仍然以中央政府部门决定为主, 但以上讨论的水资源决策过程已逐渐应用于中国的水资源管理. 近年来, 在水资源规划过程中, 公众和主要利益相关者(如县政府机构和当地居民)的参与往往是通过会议(如公开听证会)、实地调查以及同利益相关方之间的讨论等形式来互动实现的(Engle等, 2011; He等, 2000, 2020). 这种公众参与的形式需要进一步扩大, 从而在流域规划和管理中综合考虑上、中、下游用户的多种需求. 通过这种参与互动式的规划方法, 不仅能够提高我们对流域范围内的人类活动-社会经济-水文-生态过程间相互作用的认知, 也将促进研究机构和管理部门在数据集成和参与式流域决策管理过程间的相互联系(NRC, 2004; Pahl-Wostl, 2007; Engle等, 2011; Cai等, 2015; He等, 2000, 2020). 以黑河

流域为例, 研究人员开展了大量的数据分析. 收集和分析了大量的水文、生态、经济和社会数据, 以量化大气中的水汽、冰川和积雪、地表水、土壤水和地下水的储量和通量. 其次, 集成了监测、模型和数据模拟, 并与多个研究团队合作, 建立了一个集水文-生态-经济模型于一体的空间决策支持系统(DSS), 以识别、模拟和预测土地管理情景, 进而确定水资源管理政策. 在此过程中, 开发了基于个体用户的综合水资源管理模型(Agent-Based Model, ABM)以模拟农户在集体水资源管理政策影响下对地表水和地下水的利用决策(Du等, 2020). 这样的管理情景包括在中游绿洲区改变作物格局, 通过引入市场机制在中游用户间开展水权(量)交换以达到对水资源的有效合理利用, 由国务院批准的黑河分水方案, 约定正常年份下每年向下游缺水地区输送9.5亿立方米水量用于生态系统修复(Cheng等, 2014; Li等, 2018; Song, 2019; He等, 2020). 这些结果为上述讨论的参与性决策过程奠定了坚实的基础, 能够在研究、管理和用水群体之间产生协同作用, 以促进黑河流域的可持续发展. 如上所述, 多方利益相关者, 如灌区农户、区域流域组织(黑河管理局)、研究机构(大学和科研院所)以及私人实体和居民(农业用水用户、工业用水用户、地方居民)应协调配合, 形成一个流域规划和管理组织或网络. 这些组织应持续同地方和国家政府部门协同配合, 梳理并讨论修改上述两步骤(步骤1和2)所制定的研究结果和相关指标. 他们可共同讨论和探索一些关键问题的答案或解决方案, 如, 可用水量有多少, 分配给市政供水、工业、农业和生态的水量分别是多少? 水价标准是多少? 由谁来承担这些费用? 需要哪些政策、最佳节水技术和管理实践来维持跨流域和跨行政区域的水资源阈值(步骤3)? 通过这种互动式规划过程, 水资源分配和管理提案逐渐完善, 为流域水资源规划和管理提供决策依据. 随后, 应基于这个系统分析途径, 评估所制定的流域管理计划和政策(步骤4). 同时需要系统收集水文、土地利用、生态系统和社会经济等多源数据集, 以计算和比较水文、生态、社会经济变量, 进而评价流域上下游用户和整个流域的水资源管理规划. 如果计划实施前后的水文、生态和社会经济指标得到改善, 并且符合水资源运行阈值, 那么该水资源管理计划既能够满足上下游用户的多重用水需求, 又可使流域水资源稳定处于安全运行阈值. 否则, 必须修订水资

源管理计划, 以解决流域面临的水资源问题, 由此进入新一轮的水资源规划.

8 总结

本文回顾了过去几十年水文科学和水资源管理的发展, 指出流域研究中缺失的环节是科学和决策之间的有效互动. 随后, 本文提出发展流域科学, 以补充现有的水资源管理途径. 流域科学的核心组成部分包括: (1) 水文分析, (2) 水资源政策, (3) 综合治理, (4) 管理和反馈. 并以黑河流域生态水文过程集成研究作为流域科学的实施案例.

基于地球系统科学理论, Cheng和Li(2015)描述了一系列流域科学的研究方法, 包括自组织复杂系统方法、升尺度方法、选择与进化原则、强调人地系统协同进化的水文-经济和生态-经济方法和集成解决非结构性问题. 这些和其他新兴的方法, 如人工智能辅助设计 and 学习, 无疑是流域科学的重要组成部分. 本研究聚焦流域科学的核心理论框架, 为流域科学的发展“抛砖引玉”, 以进一步发展和完善流域科学.

流域科学研究影响流域水循环的人类、社会经济、生态、地貌和水文系统之间的相互作用. 它直接涉及供水和水质, 这是联合国可持续发展目标(目标#6: 清洁水和污水处理及卫生设施; 目标#14: 水生物)中的两个具体目标(UN, 2019; He等, 2020). 此外, 它提出了一种基于科学过程和解决方案的系统途径, 认知、分配和改进水资源的运移和特性, 以满足人类社会和生态系统的多种需求, 从而促进流域可持续发展. 这种方法对农业生产和粮食供应(目标#2: 消除饥饿)、清洁能源供给(目标#7)和陆地生命活动(目标#15)至关重要. 流域科学强调有效治理、构建决策机制和伙伴关系(目标#17: 伙伴关系), 促进与和平、正义和决策机构相关的水资源参与式管理决策机制(目标#16), 并支持努力实现负责任的消费和生产(目标#12)(He等, 2020). 这些措施和途径均有助于实现减贫目标(目标#1)和创建可持续的城市和社区(目标#11)(UN, 2019; He等, 2020).

参考文献

贺维生. 2012. 流域科学与水资源管理. 地球科学进展, 27: 705–711

- AghaKouchak A, Feldman D, Hoerling M, Huxman T, Lund J. 2015. Water and climate: Recognize anthropogenic drought. *Nature*, 524: 409–411
- Bierkens M F P. 2015. Global hydrology 2015: State, trends, and directions. *Water Resour Res*, 51: 4923–4947
- Blomquist W, Schlager E. 2005. Political pitfalls of integrated watershed management. *Soc Nat Resour*, 18: 101–117
- Bogena H R, White T, Bour O, Li X, Jensen K H. 2018. Toward better understanding of terrestrial processes through long-term hydrological observatories. *Vadose Zone J*, 17: 180194
- Brady D J. 1996. The watershed protection approach. *Water Sci Tech*, 33: 17–21
- Brantley S L, Goldhaber M B, Ragnarsdottir K V. 2007. Crossing disciplines and scales to understand the critical zone. *Elements*, 3: 307–314
- Cai X M, Marston L, Ge Y C. 2015. Decision support for integrated river basin management—Scientific research challenges. *Sci China Earth Sci*, 58: 16–24
- Castro J E. 2007. Water governance in the twentieth-first century. *Ambient Scocietdad*, 10: 97–118
- Cheng G D, Li X. 2015. Integrated research methods in watershed science. *Sci China Earth Sci*, 58: 1159–1168
- Cheng G D, Li X, Zhao W Z, Xu Z M, Qi F, Xiao S C, Xiao H L. 2014. Integrated study of the water-ecosystem-economy in the Heihe River Basin. *Natl Sci Rev*, 1: 413–428
- Christian-Smith J, Gleick P, Cooley H, Vanderwarker A, Allen L, Berry K A. A Twenty-first Century US Water Policy. New York: Oxford University Press, 2012.
- Croley II T E, Raikow D F, He C S, Atkinson J F. 2008. Hydrological resource sheds. *J Hydrol Eng*, 13: 873–885
- Di Baldassarre G, Sivapalan M, Rusca M, Cudennec C, Garcia M, Kreibich H, Konar M, Mondino E, Mård J, Pande S, Sanderson M R, Tian F Q, Viglione A, Wei J, Wei Y P, Yu D J, Srinivasan V, Blöschl G. 2019. Sociohydrology: Scientific challenges in addressing the sustainable development goals. *Water Resour Res*, 55: 6327–6355
- Dieter C A, Maupin M A, Caldwell R R, Harris M A, Ivahnenko T I, Lovelace J K, Barber N L, Linsey K S. 2018. Estimated use of water in the United States in 2015. US Geological Survey Circular 1441. 65
- Du E, Tian Y, Cai X M, Zheng Y, Li X, Zheng C M. 2020. Exploring spatial heterogeneity and temporal dynamics of human-hydrological interactions in large river basins with intensive agriculture: A tightly coupled, fully integrated modeling approach. *J Hydrol*, 591: 125313
- Eagleson P S. 2002. Ecohydrology: Darwinian Expression of Vegetation Form and Function. Cambridge: Cambridge University Press
- Engle N L, Johns O R, Lemos M C, Nelson D R. 2011. Integrated and adaptive management of water resources: Tensions, legacies, and the next best thing. *Ecol Soc*, 16: art19
- Executive Office of the President of the United States. 2004. Science and Technology to Support Fresh Water Availability in the United States. Technical Report. Washington DC: the National Science and Technology Council (U.S.), Committee on Environment and Natural Resources
- Falkenmark M, Wang-Erlandsson L, Rockström J. 2019. Understanding of water resilience in the Anthropocene. *J Hydrol X*, 2: 100009
- Famiglietti J S. 2014. The global groundwater crisis. *Nat Clim Change*, 4: 945–948
- Gao J, Yao T, Masson-Delmotte V, Steen-Larsen H C, Wang W. 2019. Collapsing glaciers threaten Asia's water supplies. *Nature*, 565: 19–21
- Garrick D E, Hall J W, Dobson A, Damania R, Grafton R Q, Hope R, Hepburn C, Bark R, Boltz F, De Stefano L, O'Donnell E, Matthews N, Money A. 2017. Valuing water for sustainable development. *Science*, 358: 1003–1005
- Gleeson T, Wang-Erlandsson L, Porkka M, Zipper S C, Jaramillo F, Gerten D, Fetzer I, Cornell S E, Piemontese L, Gordon L J, Rockström J, Oki T, Sivapalan M, Wada Y, Brauman K A, Flörke M, Bierkens M F P, Lehner B, Keys P, Kumm M, Wagener T, Dadson S, Troy T J, Steffen W, Falkenmark M, Famiglietti J S. 2020. Illuminating water cycle modifications and Earth system resilience in the Anthropocene. *Water Resour Res*, 56: e24957
- Gleick P H. 2016. Water strategies for the next administration. *Science*, 354: 555–556
- Gleick P H, Allen L, Christian-Smith J, Cohen M J, Cooley H, Heberger M, Morrison J, Palaniappan M, Schulte P. 2012. The World's Water Volume 7. The Biennial Report on Freshwater Resources. Washington DC: Island Press. 440
- Global Water Partnership. 2004. Catalyzing Change: A Handbook for Developing Integrated Water Resources Management (IWRM) and Water Efficiency Strategies. Stockholm, Sweden. <http://hdl.handle.net/10535/5032>
- Gourbesville P. 2008. Challenges for integrated water resources management. *Phys Chem Earth Parts A/B/C*, 33: 284–289
- Grafton R Q, Pittock J, Davis R, Williams J, Fu G, Warburton M, Udall B, McKenzie R, Yu X, Che N, Connell D, Jiang Q, Kompas T, Lynch A, Norris R, Possingham H, Quiggin J. 2013. Global insights into water resources, climate change and governance. *Nat Clim Change*, 3: 315–321
- Hannah D M, Brown L E, Milner A M, Gurnell A M, McGregor G R, Petts G E, Smith B P G, Snook D L. 2007. Integrating climate-

- hydrology-ecology for alpine river systems. *Aquat Conserv: Mar Freshw Ecosyst*, 17: 636–656
- Hannah D M, Wood P J, Sadler J P. 2004. Ecohydrology and hydroecology: A ‘new paradigm’? *Hydrol Process*, 18: 3439–3445
- He C, Cheng S K, Luo Y. 2005. Desiccation of the Yellow River and the south water northward transfer project. *Water Int*, 30: 261–268
- He C, Croley II T E. 2007. Application of a distributed large basin runoff model in the Great Lakes Basin. *Control Eng Practice*, 15: 1001–1011
- He C, Croley II T E. 2010. Hydrological resource sheds and the U.S. Great Lakes applications. *J Resour Ecol*, 1: 25–30
- He C, Harden C P, Liu Y. 2020. Comparison of water resources management between China and the United States. *Geogr Sust*, 1: 98–108
- He C, He X, Fu L. 2010. China’s South-to-North water transfer project: Is it needed? *Geogr Compass*, 4: 1312–1323
- He C, Malcolm S B, Dahlberg K A, Fu B. 2000. A conceptual framework for integrating hydrological and biological indicators into watershed management. *Lands Urban Plann*, 49: 25–34
- He C, Zhang L, Zhang X, Eslamian S. 2014. Chapter 28: Water security: Concept, measurement, and operationalization. In: Eslamian S, ed. *Handbook of Engineering Hydrology*. New York: CRC Press. 544–555
- Hering J G, Ingold K M. 2012. Water resources management: What should be integrated? *Science*, 336: 1234–1235
- Hoekstra A Y, Mekonnen M M. 2012. The water footprint of humanity. *Proc Natl Acad Sci USA*, 109: 3232–3237
- Immerzeel W W, Lutz A F, Andrade M, Bahl A, Biemans H, Bolch T, Hyde S, Brumby S, Davies B J, Elmore A C, Emmer A, Feng M, Fernández A, Haritashya U, Kargel J S, Koppes M, Kraaijenbrink P D A, Kulkarni A V, Mayewski P A, Nepal S, Pacheco P, Painter T H, Pellicciotti F, Rajaram H, Rupper S, Sinisalo A, Shrestha A B, Viviroli D, Wada Y, Xiao C, Yao T, Baillie J E M. 2020. Importance and vulnerability of the world’s water towers. *Nature*, 577: 364–369
- Jacobs K, McCoy A, Martin S, Gerlak A. 2020. Reimagining the Colorado River by exploring extreme events. *Eos*, 101
- Jensen K H, Illangasekare T H. 2011. HOBE: A hydrological observatory. *Vadose Zone J*, 10: 1–7
- Jiang Y, Zhang L, Zhang B, He C, Jin X, Bai X. 2016. Modeling irrigation management for water conservation by DSSAT-maize model in arid northwestern China. *Agric Water Manage*, 177: 37–45
- Jin X, Zhang L, Gu J, Zhao C, Tian J, He C. 2015. Modelling the impacts of spatial heterogeneity in soil hydraulic properties on hydrological process in the upper reach of the Heihe River in the Qilian Mountains, Northwest China. *Hydrol Process*, 29: 3318–3327
- Johnson N, Revenga C, Echeverria J. 2001. Managing water for people and nature. *Science*, 292: 1071–1072
- Kauffman G J. 2015. Governance, policy, and economics of intergovernmental river basin management. *Water Resour Manage*, 29: 5689–5712
- Kinzig A P, Perrings C, Chapin III F S, Polasky S, Smith V K, Tilman D, Turner II B L. 2011. Paying for ecosystem services—Promise and peril. *Science*, 334: 603–604
- Kollet S, Sulis M, Maxwell R M, Paniconi C, Putti M, Bertoldi G, Coon E T, Cordano E, Endrizzi S, Kikinzon E, Mouche E, Mügler C, Park Y J, Refsgaard J C, Stisen S, Sudicky E. 2017. The integrated hydrologic model intercomparison project, IH-MIP2: A second set of benchmark results to diagnose integrated hydrology and feedbacks. *Water Resour Res*, 53: 867–890
- Lettenmaier D P, Alsdorf D, Dozier J, Huffman G J, Pan M, Wood E F. 2015. Inroads of remote sensing into hydrologic science during the WRR era. *Water Resour Res*, 51: 7309–7342
- Li X, Cheng G D, Liu S M, Xiao Q, Ma M G, Jin R, Che T, Liu Q H, Wang W Z, Qi Y, Wen J G, Li H Y, Zhu G F, Guo J W, Ran Y H, Wang S G, Zhu Z L, Zhou J, Hu X L, Xu Z W. 2013. Heihe Watershed allied telemetry experimental research (HiWATER): Scientific objectives and experimental design. *Bull Am Meteorol Soc*, 94: 1145–1160
- Li X, Cheng G D, Ge Y C, Li H Y, Han F, Hu X L, Tian W T, Tian Y, Pan X D, Nian Y Y, Zhang Y L, Ran Y H, Zheng Y, Gao B, Yang D W, Zheng C M, Wang X S, Liu S M, Cai X M. 2018. Hydrological cycle in the Heihe River Basin and its implication for water resource management in endorheic basins. *J Geophys Res Atmos*, 123: 890–914
- Li X, Zhang G L, He C S. 2015. Watershed science: Bridging new advances in hydrological science with good management of river basins. *Sci China Earth Sci*, 58: 1–2
- Matondo J I. 2002. A comparison between conventional and integrated water resources planning and management. *Phys Chem Earth Parts A/B/C*, 27: 831–838
- Munia H A, Guillaume J H A, Wada Y, Veldkamp T, Virkki V, Kummu M. 2020. Future transboundary water stress and its drivers under climate change: A global study. *Earth’s Future*, 8: e01321
- NRC (National Research Council). 1991. Opportunities in the Hydrologic Sciences. Washington DC: The National Academies Press
- NRC (National Research Council). 1999. New Strategies for America’s Watersheds. Washington DC: The National Academy Press
- NRC (National Research Council). 2004. Adaptive Management for Water Resources Project Planning. Washington DC: The National Academies Press

- NRC (National Research Council). 2005. The Science of Instream Flows: A Review of the Texas Instream Flow Program. Washington DC: The National Academies Press
- NRC (National Research Council). 2012. Challenges and Opportunities in the Hydrologic Sciences. Washington DC: The National Academies Press
- Pahl-Wostl C. 2007. The implications of complexity for integrated resources management. *Environ Model Software*, 22: 561–569
- Palmer M, Ruhi A. 2019. Linkages between flow regime, biota, and ecosystem processes: Implications for river restoration. *Science*, 365: eaaw2087
- Paniconi C, Putti M. 2015. Physically based modeling in catchment hydrology at 50: Survey and outlook. *Water Resour Res*, 51: 7090–7129
- Paola C, Fofoula-Georgiou E, Dietrich W E, Hondzo M, Mohrig D, Parker G, Power M E, Rodriguez-Iturbe I, Voller V, Wilcock P. 2006. Toward a unified science of the Earth's surface: Opportunities for synthesis among hydrology, geomorphology, geochemistry, and ecology. *Water Resour Res*, 42: W03S10
- Piao S L, Ciais P, Huang Y, Shen Z H, Peng S S, Li J S, Zhou L P, Liu H Y, Ma Y C, Ding Y H, Friedlingstein P, Liu C Z, Tan K, Yu Y Q, Zhang T Y, Fang J Y. 2010. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China. *Nature*, 467: 43–51
- Pulido-Velazquez M, Ward F A. 2017. Comparison of water management institutions and approaches in the United States and Europe—What can we learn from each other? In: Competition for Water Resources: Experiences and Management Approaches in the US and Europe. Amsterdam: Elsevier Inc. 423–441
- Rahaman M M, Varis O, Kajander T. 2004. EU water framework directive vs. integrated water resources management: The seven mismatches. *Int J Water Resources Dev*, 20: 565–575
- Rockström J, Steffen W, Noone K, Persson Å, Chapin III F S, Lambin E F, Lenton T M, Scheffer M, Folke C, Schellnhuber H J, Nykvist B, de Wit C A, Hughes T, van der Leeuw S, Rodhe H, Sörlin S, Snyder P K, Costanza R, Svedin U, Falkenmark M, Karlberg L, Corell R W, Fabry V J, Hansen J, Walker B, Liverman D, Richardson K, Crutzen P, Foley J A. 2009. A safe operating space for humanity. *Nature*, 461: 472–475
- Song C. 2019. Preface to the special issue on the ecological-hydrological processes in the Heihe River Basin: Integrated research on observation, modeling and data analysis. *J Geogr Sci*, 29: 1437–1440
- Steffen W, Richardson K, Rockström J, Cornell S E, Fetzer I, Bennett E M, Biggs R, Carpenter S R, de Vries W, de Wit C A, Folke C, Gerten D, Heinke J, Mace G M, Persson L M, Ramanathan V, Rayers B, Sörlin S. 2015. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347: 1259855
- Tang Q. 2020. Global change hydrology: Terrestrial water cycle and global change. *Sci China Earth Sci*, 63: 459–462
- The World Economic Forum. 2013. The Global Risks 2013, Eighth Edition. Geneva, Switzerland. <https://reports.weforum.org/global-risks-2013/> (Accessed 11 January 2020)
- Tian J, Zhang B, He C, Han Z, Bogena H R, Huisman J A. 2019. Dynamic response patterns of profile soil moisture wetting events under different land covers in the mountainous area of the Heihe River Watershed, Northwest China. *Agric For Meteorol*, 271: 225–239
- Tian J, Zhang B, He C, Yang L. 2017. Variability in soil hydraulic conductivity and soil hydrological response under different land covers in the mountainous area of the Heihe River Watershed, Northwest China. *Land Degrad Develop*, 28: 1437–1449
- United Nations (UN). 2019. The Sustainable Development Goals Report. Technical Report. New York. <http://www.un.org/sustainabledevelopment>. Accessed 11 January 2020
- USACE (US Army Corps of Engineers). 2012. Water in the U.S. American West: 150 Years of Adaptive Strategies. Technical Report. Washington DC: Civil Works Directorate
- USEPA (US Environmental Protection Agency). 1995. Watershed Protection: A Statewide Approach. Technical Report. Washington DC: Office of Water. Report No EPA 841-R-95-004
- USEPA (US Environmental Protection Agency). 1999. Protocol for Developing Nutrient TMDLs. Technical Report. Washington DC: Office of Water. Report No EPA 841-B-99-007
- Vörösmarty C J, Green P, Salisbury J, Lammers R B. 2000. Global water resources: Vulnerability from climate change and population growth. *Science*, 289: 284–288
- WWAP (United Nations World Water Assessment Programme). 2006. The United Nations World Water Development Report 2. Water: A Shared Responsibility. Paris: UNESCO
- WWAP (United Nations World Water Assessment Programme). 2017. The United Nations World Water Development Report 2017. Wastewater: The Untapped Resource. Paris: UNESCO
- WWAP (United Nations World Water Assessment Programme). 2019. The United Nations World Water Development Report 2019: Leaving No One Behind. Paris: UNESCO
- Zacharias S, Bogena H, Samaniego L, Mauder M, Fuß R, Pütz T, Frenzel M, Schwank M, Baessler C, Butterbach-Bahl K, Bens O, Borg E, Brauer A, Dietrich P, Hajnsek I, Helle G, Kiese R, Kunstmann H, Klotz S, Munch J C, Papen H, Priesack E, Schmid H P, Steinbrecher R, Rosenbaum U, Teutsch G, Vereecken H. 2011. A network of terrestrial environmental observatories in Germany. *Vadose Zone J*, 10: 955–973

- Zalewski M. 2000. Ecohydrology—The scientific background to use ecosystem properties as management tools toward sustainability of water resources. *Ecol Eng*, 16: 1–8
- Zhang L, He C, Zhang M, Zhu Y. 2019. Evaluation of the SMOS and SMAP soil moisture products under different vegetation types against two sparse in situ networks over arid mountainous watersheds, Northwest China. *Sci China Earth Sci*, 62: 703–718
- Zipper S C, Jaramillo F, Wang-Erlandsson L, Cornell S E, Gleeson T, Porkka M, Häyhä T, Crépin A S, Fetzer I, Gerten D, Hoff H, Matthews N, Ricaurte-Villota C, Kummu M, Wada Y, Gordon L. 2020. Integrating the water planetary boundary with water management from local to global scales. *Earth's Future*, 8: e01377

(责任编辑: 汤秋鸿)