

生态水文学兴起：学科理论与实践问题的评述^{*}

刘昌明^{1,2)} 刘璇¹⁾ 于静洁^{2,3)} 杨胜天¹⁾ 赵长森¹⁾ 门宝辉⁴⁾ 赵志龙¹⁾ 王红瑞^{1)†}

(1)北京师范大学水科学研究院,城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室,100875,北京;

(2)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,100101,北京;

(3)中国科学院大学,100049,北京; (4)华北电力大学水利与水电工程学院,102206,北京)

摘要 生态水文学是20世纪后半叶发展起来的新兴水科学研究领域的交叉综合学科,基于习近平总书记的“生态优先、绿色发展”理念和实现我国生态文明建设目标,其研究成为我国新时期水科学理论与实践的新目标与新挑战,为“绿色-高质量-可持续”发展提供强大动力.本文简述了生态水文学国内外发展历程和动向,深入评述了生态水文研究的几个基础理论问题,主要包括:人-水-生态系统关系认知与协同变化的和谐内涵、四大平衡的协同内涵及Budyko水-热平衡联系方程、绿水在生态系统中的重要内容和面向全球变化的生态水文宏观尺度研究,并着重阐述了生态系统的需水与用水;针对生态水文的实践应用,阐述了水-碳循环耦合机制研究能够有效服务国家“双碳”计划,分析了南水北调工程和黄河流域生态环境治理中生态水文问题,提出了南水北调西线工程是构建国家水网、缓解黄河流域水资源短缺的重要举措;基于生态水文研究现状和国家发展需求,对生态水文研究提出展望,如生态系统对人类活动和气候变化响应机制研究、水土保持与生态建设综合技术体系、多源信息融合新技术、加强与社会科学的交叉融合研究和生态水文系统研究等.

关键词 生态水文;人-水-生态系统;生态需水;黄河流域;水碳耦合

中图分类号 P641

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2022124

0 引言

生态水文学是研究水与生态系统相互作用的交叉学科,是关注水文过程对生态系统的分布格局、结构和功能的影响,以及生物过程对水循环要素影响的学科^[1].这些相互作用可能发生在河流、湖泊、森林、湿地、草原、沙漠等生态系统,由此产生了生态水文学的不同分支学科.水是生态系统中非生物物质组分,水文循环过程在生态系统演变过程中有重要的控制和纽带作用,水与生态系统的相互作用具有多样性、连锁性.早期生态水文学研究专注于特定领域,注重描述性,缺乏对过程的理解,无法控制和操纵生态过程以提高资源质量^[2].随着全球可持续发展概念认知的深入,当下生态水文学更注重用广泛和跨学科的方法研究水文过程与生物群之间的相互作用.2018年7月,联合国教科文组织国际水文计划的最新文件将生态水文学定义为是“从分子到流域尺度的整体科学”“河流生态系统是由水文过程调控的超有机体”.宏观尺度上,生态水文研究流域乃至全球水

文系统与生态系统的耦合作用;微观尺度上,生态水文基于水的稳定同位素研究不同界面生态水文过程和微生物级别生物个体水质代谢过程^[3].

作为一门新兴科学,生态水文研究的核心问题是探讨人与自然的相互作用关系,认知人与自然和谐的科学意义,服务人水和谐和可持续发展^[4].我国生态水文相关研究始于20世纪80年代,当下已在黑河、塔里木河、黄河、长江及我国西北干旱半干旱地区和西南岩溶地区进行了大量研究.地理信息系统、遥感、同位素、大数据等许多新方法、新技术得到应用,在SPAC(土壤-植物-大气连续体)系统、水碳耦合、水热模拟、LUCC、生态水文预测模拟、生态水文过程和流域水资源综合利用与保护等领域开展了大量工作,取得了一系列丰硕的成果.

生态文明建设和高质量发展的需求与人类活动和气候变化造成的生态退化之间的矛盾加剧.正如习近平总书记指出“保护生态环境就是保护生产力,改善生态环境就是发展生产力”,生态水文学研究有

^{*} 国家重点研发计划资助项目(2019YFC0408902);国家自然科学基金资助项目(51879010)

作者简介:刘昌明(1934—),男,湖南汨罗人,中国科学院院士,研究员.研究方向:水文学与水资源. E-mail: liucm@igsrr.ac.cn

† 通信作者:王红瑞(1963—),男,河南新乡人,教授.研究方向:水文学与水资源. E-mail: henrywang@bnu.edu.cn

收稿日期:2022-04-25

助于缓解人类活动和生态退化之间的矛盾,在新形势下必将为“绿色-高质量-可持续”发展注入新的动力。因此,本文将对生态水文若干学科理论与实践问题进行商榷,为中国山水林田湖草一体化保护修复、生态文明社会建设和绿色发展等重大战略的实施等提供坚实的理论基础和技术支持。

世界是所有国家组成的命运共同体,正面临全球变化的各种负面影响,任何一个国家都不可能独善其身,加之问题的多样性与综合性,需要全球宏观结合的应对研究。地球系统科学联盟计划(ESSP)是基于20世纪全球已设的4大科学计划,即国际地圈生物圈计划(IGBP)、国际人文计划(IHDP)、全球气候变化计划(WCRP)和生物多样性计划(DIVERSITATS)于2000年联合创立并执行。全球水系统计划(GWSP)是地球系统科学联盟计划(ESSP)的4个核心计划之一,也是全球变化和我国陆地水科学水资源研究的重要前沿领域。全球水系统计划(GWSP)始于2003年,2005年在德国正式实施的科学计划。全球水系统计划科学委员会(GWSP-SSC)由全球代表性区域和国家的水领域的科学家组成,GWSP执行办公室(IPO)设在德国。我国最先两届GWSP-SSC委员是刘昌明院士和夏军院士,致力于生态水文的研究。

1 生态水文学发展历程与研究

联合国-国际水文计划(Unesco-IHP)等全球变化研究组织都将生态过程与水文过程的耦合研究作为核心内容。国际水文10年计划第一阶段IHP-1(1965—1974年)提出水文过程研究需要考虑来自生态等过程的影响,该时期学者们开始尝试对水文和生态的交叉过程开展研究,为生态水文学学科的建立奠定了基础。1992年联合国水和环境国际会议正式提出生态水文学概念,此后这个概念逐步为学者们所接受。1996年Wassen等^[5]给出生态水文学的明确定义,指出“生态水文学是一门以应用为导向的交叉学科,旨在更好地了解决定湿地生态系统自然发展的水文因素,从而保护和恢复其自然价值”。21世纪以来,国际生态水文学专家围绕不同生境的生态水文学、生态水文过程、水土保持修复、生态水文模型构建和多源观测与信息融合等方面开展了一系列研究,推进了生态水文理论研究与实践示范。当前的IHP第八阶段^[6](2013—2022年)的主题5为“生态水文学,协调管理创造可持续世界”,其中包含5个重点领域:水文过程的量化、生态过程的量化、生态工程的量化、城市生态水文、海陆连通性恢复。国际学者的学术发表和学

术组织的一系列有关研究和计划,指示着生态水文学发展趋势以及水文学和生态学研究动向,推动了生态水文学学科的形成和理论发展。

国内生态水文学研究起步于20世纪80年代农业领域,即SPAC(土壤-植物-大气系统)的研究,至20世纪90年代中后期成为一门专门学科^[7]。20世纪末,刘昌明等针对大田耗水过程发展了界面水文学的研究,提出了具有应用价值的界面水分控制新模式。由于在大田水分通量中增加作物蒸散水分通量,在“四水转化”的基础上提出“五水调控(循环)”的概念^[8-10]。21世纪以来,生态水文学的研究不断深入,特别是国家自然科学基金委员会“黑河流域生态-水文过程集成研究”重大计划完成,使我国在生态水文过程、生态水文效应、水文循环过程、生态需水和水管理方面取得迅猛发展,遥感、同位素等新方法为生态水文研究注入新动力。

生态水文学在过去20年中经历了迅速的发展,以应对全球变化环境中流域生态退化,其内涵外延在不断扩展^[11]。进入最近千年的人类史,人类不再仅仅是生态水文系统中的外部驱动力或边界条件,而是与水系统动态密切相关的系统组分。生态水文学已经从最初侧重于湿地生态和水文过程关系研究,扩展到陆地生态系统及淡水流动和生态系统服务之间的关系,以及城市化、气候变化等各种环境变化对人类、水资源和生态系统影响的重要科学领域。人们对流域生态系统变化的认识依然十分有限,生物栖息地的丧失、过度捕捞、生物多样性减少、土壤侵蚀和退化、淡水限制、光合作用能力限制等生态系统变化,已被确定为未来社会面临的生态环境问题。过去10年,生态水文学已经在河流、湖泊、森林、湿地、草原、农田、沙漠等生态系统取得了长足的发展;过去5年,生态水文学在模型构建和参数的敏感性分析及其优化、气候变化下的生态水文效应、土壤水分的生态水文过程及其固碳能力、植被恢复所带来的气候、生态和水文效应、同位素生态水文学和生态水文要素的观测数据库建立等方面取得突出成果。但是大多关注单一生态系统的实验观测、机制探索、数值模拟等方面,对于分子或田间尺度向流域乃至全球尺度的转换机制^[12]、气候变化和人类活动对生态水文过程的影响、反馈和预测、流域生态水文耦合机制研究,生态水文服务的量化以及融入人文因素的城市生态水文研究等方面,仍存在一定的困难和挑战。因此,完善生态水文学观测、基础理论体系和采用高新技术方法,将能帮助我们可持续地管理水、土壤和植

被等自然资源及提供高品质的水、食物、燃料、侵蚀控制和碳封存等生态系统服务,为生物多样性保护、应对气候变化、地质灾害预防、应急管理、生态退耕、污染治理等方面,提供水资源管理、环境管理的新范式,确保国家粮食安全、水安全和生态安全(图 1)。

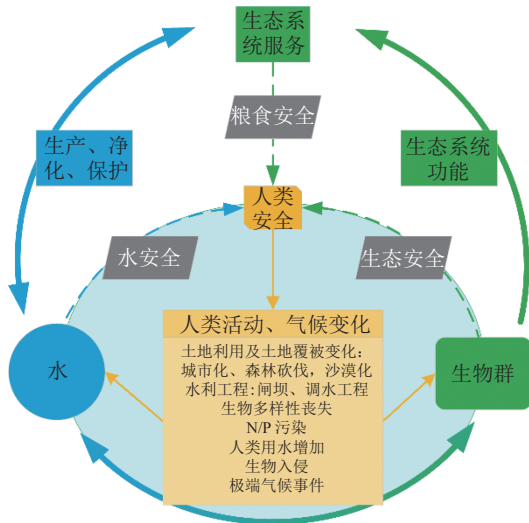


图 1 生态水文学重要研究对象及其关键关联概念框架

随着生态文明建设、长江大保护、黄河流域生态保护和高质量发展、海绵城市建设、“双碳”战略等国家重大需求的实施,生态水文更加关注人对生态系统和水文系统的影响及反馈,社会-生态-水文耦合与流域水管理成为生态水文领域研究的核心。2020年,十九届五中全会提出“十四五”期间生态文明建设实现新进步,生态环境持续改善,生态安全屏障更加牢固。这意味着生态水文已经成为当下我国水文科学发展的主流,也要求对生态水文学加大科研投入,推动前沿科技的发展。

2 生态水文研究基本理论问题探讨

2.1 人-水-生态系统关系认知与协同变化的和谐内涵

盖亚假说(Gaia hypothesis)认为,地球是一个活的有机体,地球上的生命是由生命和非生命成分支持的生物地球化学循环维持。尽管盖亚假说仍存在争议,但其启示将包括整个生态系统在内的地球视为一个整体,重视生物与生物以及生物与非生物之间的依存关系和生物与环境之间的交互影响与协同演化^[13]。生态系统是由生物群落及其生存环境共同组成的动态平衡系统,全球生态系统是生物地球化学作用的结果^[14]。水是生物体生存和繁衍的关键物质和其生存环境的重要组成部分,水文循环变化影响着生态系统的依存与发展,是决定动植物分布、养分运输、生物可

用水的关键因素。国际水文 10 年主题“万物皆流,诸行无常”(Panta Rhei: Change in hydrology and society)以及提出的社会水文学(social hydrology),很好描述了生态系统演变和生物进化是以水循环为主要驱动力的过程。水循环和生物群之间存在着“双重调节”(图 2),植物和动物等有机体可以通过调整自身特征或改变周围环境来适应并最终影响地区水平衡动态。生物群自适应特性为探索动植物的共同进化和自组织与水的可用性之间的关系提供了新的认识^[15]。例如,旱地植被呈现出高度的空间自组织性,植被和非植被土壤斑块按照降水和土壤水分的梯度分布^[16]。

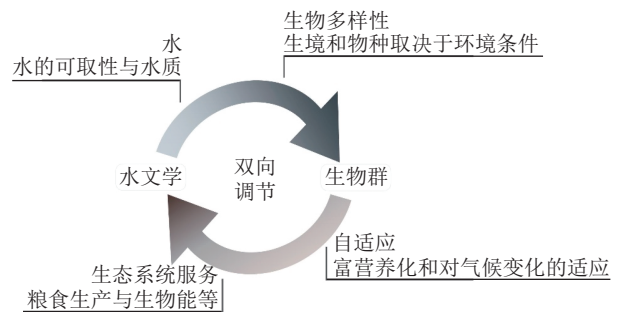


图 2 生态水文学在解决问题中的应用：水文循环与生物群进化双向调节

工业革命以来,人类活动在加速社会发展历史进程的同时,也更加深刻改变了生物地球化学循环,是陆地表层系统和地球气候系统改变的重要因素^[17]。例如,流域内土地和水资源的开发使农业生产增长的同时,流域植被显著改变,生态系统在世界范围内面临严重退化的风险^[18]。农药化肥大规模使用、污染物过度排放、水利工程修建与调控、过度抽取地下水和疏干地下含水层,以及城镇化等人类活动,对整个流域的水质、水量和生态水文过程影响日益加剧。必须认识到,流域水文变化是自然变化和人为活动叠加的结果,理解它们之间的相互作用是破解流域水文系统影响与反馈的重要基础^[19]。因此,将自然因素和人类活动的共同影响及其引起的流域物理过程(径流、泥沙、水温与水动力条件等)、生物与生物地球化学过程紧密耦合为统一系统来分析,揭示人-水-生态循环机制,通过双重调节保障基本生态系统服务及生物多样性,同时平衡人类和环境的可用水量与水质需求,对水资源实行“在保护中开发,在开发中保护”,实现可持续的水资源管理。

2.2 四大生态水文平衡：生态水文系统维护的主要内涵

维持生态系统平衡一般包括维持水热(能)平衡、水沙平衡、水盐平衡以及综合平衡等方面的内容^[20]，“四大平衡”研究对应问题和内涵见表 1。

表1 “四大平衡”研究对应问题和内涵

四大平衡	研究问题	内涵
水分与热(能)量平衡	涉及水资源的变化自然规律问题	据生态学中的物理原理,即能量与水分平衡,使地表能量与水分的收支保持平衡关系. 水热系统是自然地理系统中的子系统,是一个多层次多界面的复杂系统
水盐平衡	涉及水污染与土地盐渍化问题	内陆盐渍化是水盐不平衡所造成的
水沙平衡	涉及防治淤积河道与水土流失问题	河流上游的山丘区来水挟带着大量的泥沙,进入下游平坦地区以后,由于坡度骤然变缓,水量减少而使水流速度减低,河流泥沙沉淀,淤塞河道,而河道的淤塞又引起泄洪的困难等灾害
综合平衡	维持水资源可再生与可持续与供需时空平衡	分为2方面:一是区域水量平衡,二是水量供需平衡. 前者属水资源条件,后者可以分为农业与城市工业的水资源供需平衡. 水量平衡与水资源供需平衡从河段到流域、地区、区域、全国至全球不同尺度,包括分子到流域整体的不同尺度

地球生态系统中,水和其他生源物质流转的媒介,水分在转化过程中,维持四大平衡并非是单独进行的,四大平衡是水分在不同尺度上的表现,这也是联合国将生态水文学称为“从分子到流域尺度的整体科学”的原因之一. 如在黄河流域生态治理中,存在源流区脆弱的生态及其退化风险、上游灌区节水与水盐平衡的矛盾、中游严重的水土流失和下游不断抬升的河床等水盐、水沙、水量不平衡等生态水文问题;又如水热平衡研究中,水在能量驱动下,不断流转在生物与生物、生物与环境、环境与环境之间,维持着生态系统存立、演替和发展.

除四大平衡外,从农业资源的角度来看,还包括水土平衡,这一平衡的确定涉及一定种植制度下农业需水量与水资源(降水、地表与地下水)可提供使用的水. 人类各种活动造成的损失超过自然界提供给人类的福利,便会出现生态赤字,反之则生态盈余^[2]. 需要强调的是,自然界的一切生态平衡不一定是好的,黄秉维院士从区域生态系统的角度说明,河流凹岸侵蚀与凸岸的堆积一坏一好.

2.3 Budyko 水热平衡联系方程: 水文生态系统中四大平衡举例 水热耦合关系体现在植被冠层的能量吸收、反射、遮阴等生态水文过程的各个环节,影响水热传输过程. 水热平衡是当下生态水文研究的热点之一,基于 Budyko(布迪科)理论的一系列水热耦合模型,在蒸散发模拟和归因识别方面取得了一系列成果. 根据能量守恒原理,地表能量的收支保持平衡关系. 在能量与水分平衡中,最大项是水汽的汽化潜热(L ,单位为 $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$).

按年平均热量方程:

$$R_n - H - G - L_E - P_o = 0, \quad (1)$$

式中: R_n 为辐射平衡($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$); H 为显热通量($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$); L_E 为潜热通量($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$); G 为土壤热通量($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$); P_o 为化学热通量($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$,可忽略).

按年平均水量的平衡方程:

$$E = P - R, \quad (2)$$

式中: E 为蒸发量(mm); P 为降水量(mm); R 为径流深(mm). 水分与热量之间存在着密切关联,水分与热量联系方程,即水、能(热)平衡方程,按能(热)量单位($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)计算时的换算为

$$L(P - R) = R_n - H - G. \quad (3)$$

上述热量平衡与水量平衡的联系方程是通过蒸发潜热(L)建立的. 联系水、热平衡二者的指标是 Budyko 辐射干燥指数 A :

$$A = \frac{R_n}{L \times P}. \quad (4)$$

显然,可以得到计算水热平衡要素之间的关系与联系为

$$\frac{R_n}{L \times P} = \frac{1 - \frac{R}{P}}{1 - \frac{H}{R_n} - \frac{G}{R_n}} = \frac{\frac{E}{P}}{1 - \frac{H}{R_n} - \frac{G}{R_n}} = \frac{E}{P \left(1 - \frac{H}{R_n} - \frac{G}{R_n}\right)}. \quad (5)$$

众所周知,全国多年平均的年降水量为 62000 亿 km^3 、年径流量为 27000 亿 km^3 ,按式(5)可以估算,全国的平均水热平衡状况潜热通量大于显热通量,蒸发耗热占主要比例:全球的潜热通量约为 60%,中国为 57%. 因此蒸散发的研究是关键,并由其揭示了由蒸散发形成气态“绿水”流的认知.

2.4 绿水是生态水文学研究不可或缺的内容 众所周知,地球大气圈中的水汽来自大陆海洋不同生态系统的蒸散发. 因此,水汽的研究在生态水文学中的理念是十分必要的. 绿水与蓝水的定义尚无统一的说法. 笔者简化的定性描述仅供参考:1)绿水:气态/分子

态/土壤与大气中的水,受分子力约束,并由热力作用驱动转化;2)蓝水:液/固态水,重力赋存,受重力及其水平分力驱动的水;3)水的相态变化过程遵循物理基本定律,即质量守恒与克拉伯龙定律(Clapeyron theorem).

绿水是进入大气的不可见水汽,生产性的绿水被定义为植物(生物量)的蒸腾量.非生产性的绿水为土壤蒸发(包括截留、积水坑和来自土壤水的蒸发).绿水相当于常用的术语——蒸散发.蓝水是在地表和地下运动的可见液态水流,即地表径流和地下径流.蓝水可以是小溪、溪谷和河流的地表径流,包括地下储水补给河流的地下径流.绿水量(W_G , mm)和蓝水量(W_B , mm)的计算为

$$P - R_s - R_g - \Delta S = E_T = W_G, \quad (6)$$

$$R_s + R_g - \Delta S = W_B, \quad (7)$$

式中: R_s 为地表径流量(mm); R_g 为地下径流量(mm); ΔS 为流域蓄水量变化(mm); E_T 为蒸散发(mm).

中国的年平均绿水与蓝水有明显的空间分异规律(图3),蓝绿水量由南向北、自东向西递减,空间上大致是以淮河—秦岭为界,全国年蓝水量随年降水量变化明显,绿水量年变化则相对平稳;时间上北方年绿水量大于年蓝水量,而南方刚好相反,其中在西北诸河区蓝绿水量差异最为明显.这一初步认识表明了秦岭—淮河一线的中国北方生态耗水/绿水研究的重要性,在水资源的配置中必须重视生态用水量与耗水量的调控,在南方特别是西南蓝水的水利开发利用颇有潜力.

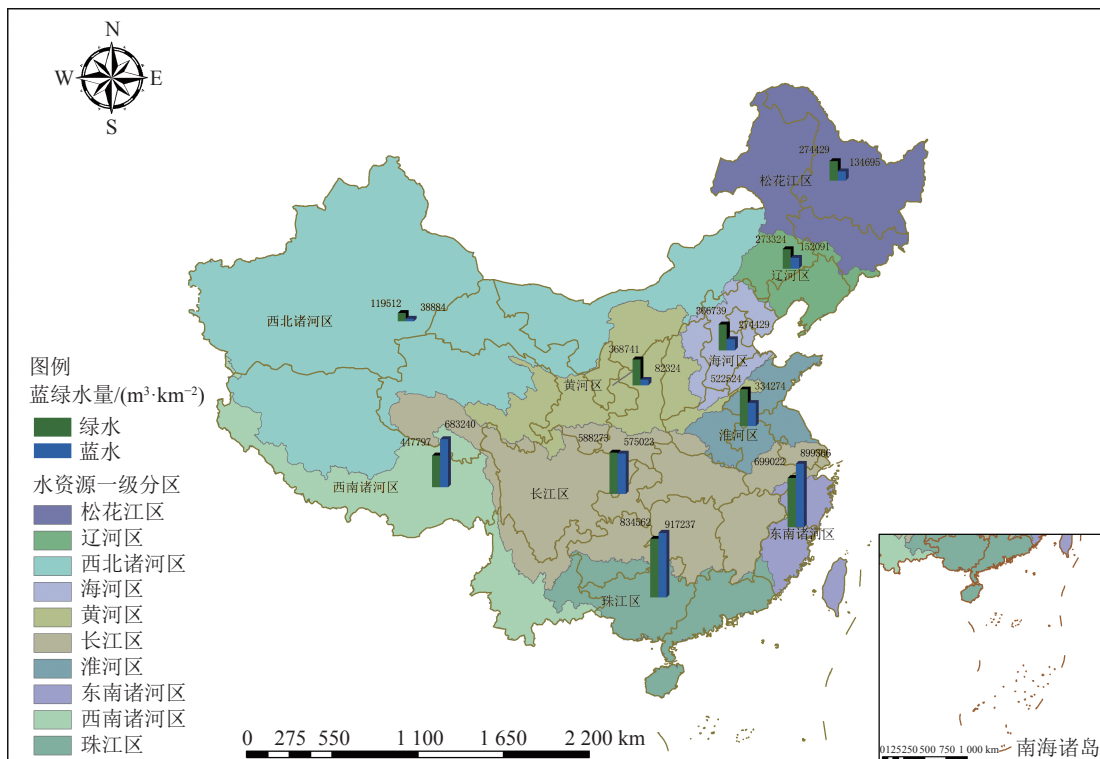


图3 中国各水资源分区蓝绿水量分布

2.5 生态系统需水与用水

2.5.1 生态需水评估 生态需水是生态水文学研究的核心方向之一,是在特定的生态目标下维持特定时空范围内的生态系统水分平衡所需要的总水量^[22],主要取决于生态系统本身的特点及其所处的环境特征,主要考虑天然生态系统森林、草地、灌丛、荒漠、河流、湖泊、沼泽、海滩、浅海、水生植物、水生动物(鱼类)等天然水源的利用.区域生态需水的计算分为河道内和河道外生态需水量2部分.生态需水量在实际中常按目标进行分类计算,如:1)维持河

流廊道内生态系统平衡需水;2)保持水体缓冲能力、调节气候、水体景观和水质净化功能所需消耗的水量;3)维持河流系统水沙平衡的需水;4)维持河流系统水盐平衡的需水;5)维持湖泊、沼泽等湿地水量平衡的需水;6)维持河口地区咸淡水界面稳定的生态需水;7)维持合理生态地下水位的生态需水;8)河流上游水源涵养林和水土保持措施及沿岸绿洲的需水量.其中,1)~6)为河道内需水,7)和8)为河道外需水.

基于生态流速和水力半径,考虑河道内生态需水

与水力因素关系的生态水力半径法是生态需水量计算的重要方法.生态流速是生态系统动态变化与水流驱动力因素之间的关键指标,贯穿在生态水文学分子到流域尺度的研究中,是“由水文过程调控的超有机体”的核心要素.相对于传统生态需水量计算方法,生态流速更强调生态水文动力因素,能充分利用水生生物信息(鱼类产卵洄游流速)与河道信息(水位、流速、糙率等)估算河道内生态需水^[23-24].目前该方法在河流基本生态需水、考虑污染物降解耦合水量水质的生态需水、考虑鱼类等生物对流速要求的生态需水、考虑河道冲淤平衡的输沙需水等方面进行了初步应用,取得了较好的效果^[25].在传统的生态需水量计算中,生态需水量往往是一个确定的量值,这是不合适的.生态需水量和生态流速应当针对明确的保护目标方能确定,不是一个确切的量值,应该

是一个阈值范围^[26-27].

2.5.2 生态用水讨论 生态用水有明显的社会属性,即生态用水的大小往往取决于人类社会对生态环境保护的认知和重视程度,可以说社会经济系统的生态意识直接影响着生态用水的分配.

人类生产生活用水会直接影响自然生态系统的用水,从而引起生态系统服务功能的改变.如:人类用水对河流生态系统的影响主要体现在富营养化和河道形态改变 2 个方面(图 4),表现为:生态系统可能的主要变化;对生物有机体直接的非生物控制;对生物和物质流的影响等多个层次.在生态系统需水阈值内,结合区域社会经济发展的实际情况,兼顾生态需水和社会经济需水,合理地确定生态用水量,实现“三生”共享,有利于社会经济发展和生态系统保护的双赢.

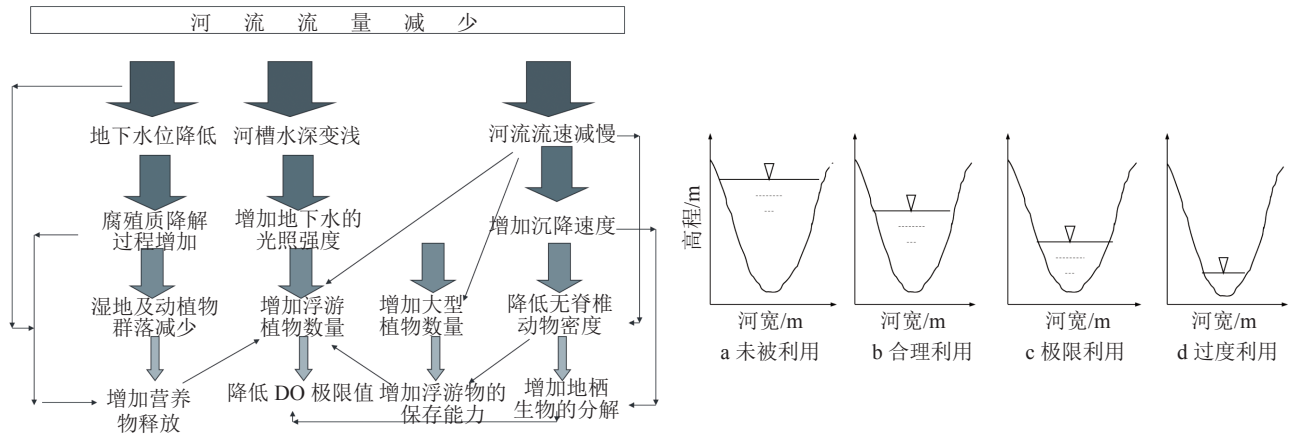


图 4 河道流量减少对生态系统的影响^[28]

2.6 面向全球变化的生态水文宏观尺度研究 全球变化包括全球大气变化、全球气候变化、土地利用/土地覆被变化、人口增加、荒漠化和生物多样性变化.气候变化和植被破坏等人类活动造成的全球变化及其影响已经成为全世界关注的焦点.水文系统对全球变化的响应十分复杂,水文过程对不同气象因素的响应也各不相同,但水文与气候又彼此相互作用,导致植被生态水文变化的复杂性、异质性和影响的不确定性在未来气候变化背景下进一步加剧^[29].从生态系统角度揭示全球变化影响水文过程的机制,是研究气候变化对水文影响的热点之一.气候变化对生态水文过程的影响与反馈具有 4 个典型特征:非线性响应、响应时空异质、极值变化、复杂互馈机制.气候水文系统是复杂巨系统,其各种气候水文因子较多,并且因子变化本身及因子之间存在强烈的非线性相互作用,气候水文系统反馈与调节的方式复杂多样且不断变化,系统组分与相关过程也表现出高度的时

空异质性.例如,对于土地利用/覆被变化导致对水、沙的影响程度方面,有以下几个表现:来水量小的影响程度强于来水量大的事件,干旱土地强于湿润土地的地区,平坦地区强于山区,小流域强于大流域,松散土壤强于厚实土壤的下垫面,泥沙减少量比例强于径流减少量的比例.此外还有普遍的全球、区域和局部动态的高度非线性变化^[30],如青藏高原降雨径流实验方法得出降雨径流关系的非线性,塔里木河流域局部地区气候水文时间演化过程表现出的复杂非线性特征^[31].在极值增益响应方面,地球系统模型(ESM)表明,人为气候变化(anthropogenic climate change, ACC)可以影响陆地水资源供应,并可能引发更多洪水、干旱等极端气候水文事件,如对东南沿海 5 省(市)79 个站点 1960—2012 年前汛期的降水极值序列和全球范围 7250 个水文站点 1971—2010 年期间的最低、平均、最高流量的时间序列和极端河流流量变化的研究分析中,水文过程的极值有显著增强^[32-33].

气候变化与人类活动对水文的影响具有初阶影响与高阶影响。在初阶方面,主要影响自然生态水、热要素变化响应(降水量 P , 径流 R 、地表径流 R_s 、地下径流 R_g , 生态系统蒸散量 E_T 、潜热通量 L_E , 归一化指数 NDVI、净初级生产力 NPP, 辐射平衡 R_n 或显热通量 H , 蒸发潜热 L , 土壤热通量 G 等), 高阶则主要表现在与生态服务功能有关和社会经济生态系统的连锁响应, 如与国家水安全和风险相关的政策制度、市场、卫生、健康等。目前, 对于气候变化、人类活动及自然-社会的边界层互馈影响机制的了解很薄弱, 如尚不清楚边界层水热要素互馈的正负增益变化的不确定性等。尺度研究是通过适宜的测量来揭示和把握本征尺度中的规律性, 生态水文跨越了从分子到流域尺度, 其研究包括多个方面, 发生在多个时空尺度上, 相互交织, 相互影响。当下更注重大尺度、多尺度与跨尺度、多过程的综合, 突出植被变化的生态水文过程, 通过生态过程与水文过程的耦合, 揭示植被与水之间的相互作用机制。如何通过气候变化的影响界定生态保护的阈值, 仍需要在不同时空尺度上(从过去、现在到未来, 从区域到全球)开展面向全球变化的生态水文宏观尺度研究。

3 生态水文学的实践应用的 3 个举例

3.1 南水北调工程生态效应研究 南水北调工程是一项特大型长距离跨流域调水工程, 是解决我国南北

水资源不平衡的关键措施, 工程的实施将逐步改变原有的水资源、生态环境和社会经济系统, 调水工程在实施前进行的适宜性评价以及实施后对原有生态水文要素及其过程改变研究具有重要的现实意义^[34-35]。生态水文在南水北调工程实践中集中应用于沿线地区生态水文状况调查和生态环境影响评估, 以揭示南水北调沿线流域的自然生态水文系统的相似性和差异性规律以及人类活动对流域生态水文系统干扰的规律。

在一般情况下, 调水量的大小是由水资源供需量计算来确定的。但从环境与生态的角度看, 调入区的调水规模必须适宜, 在缺水区增加水量并非愈多愈好。生态平衡与水量平衡之间有密切关系。因此, 区域调水是否科学合理, 必须要基于“四大平衡”进行考量, 特别是水热平衡。比如利用辐射干燥指数(式(4), 即 $A=R_n/(L \cdot P)$)作为水分适宜性评价指标, 其中 R_n/L 为热(能)量决定的可能最大蒸发或腾发(E_p), 即

$$E_p=R_n/L. \quad (8)$$

当年降水量 $P=E_p$ 时, $A=1.0$, 并定义 C_r 为流域水生态平衡的适宜性指标, 有

$$C_r=R_n/L(P-R_s)=E_p/W_h \approx E_0/W_h. \quad (9)$$

式中: E_0 为潜在蒸发量, C_r 为水分适宜度, W_h 为区域湿润度。根据 C_r , 考虑相应的水利调节, 评估诊断区域社会经济用水与流域水生态平衡适宜性的关系(表 2)。

表 2 C_r 评估诊断区域社会经济用水与流域水生态平衡适宜性的关系

情景	天然状态 C_r 分析	水利措施	考虑社会、经济用水
$C_r=1$	水分适宜, 生态平衡	—	人类取(用)水与生态用水矛盾较小
$C_r<1$	水分显余, 生态稳定	调水、补水, 使得 $C_r=1$	
$C_r>1$	水分不足, 生态脆弱	排水、除涝, 使得 $C_r=1$	人类取(用)水与生态用水相矛盾

考虑生活与生产发展的刚性需求、人类活动、取用水(U)的影响, 在一般受水区有:

$$C_r=(E_0+U)/(P-R_s)=(E_0+U)/W. \quad (10)$$

选取 W (有关水量调蓄量), 可使 C_r 趋近于 1 或等于 1。

南水北调工程的逐步实施对调水区和受水区农业、城市、地下水、生态环境、产业结构及社会发展产生深远影响。南水北调工程实施能够引起调水区水土流失、生物多样性下降, 以及流域水质、土壤地质、社会生产及水生生物等变量变化的问题^[36-37], 同时也会通过补充地区生态需水, 促进受水区的环境治理和改善, 如遏制、改善了华北地区严重的地下水超

采及其引发的环境地质问题^[38-39], 保护区域生态系统生境的动态平衡, 进而促进受水区生态服务价值的提高^[40]。但是, 南水北调工程沿线的生态水文研究仍存在一些挑战, 如在水资源配置上, 受水区对河湖生态补水的迫切需求日益增加, 工程在考虑增加城市生活供水量的基础上, 应逐步满足持续增加的生态环境用水需求, 需要对地区进行生态需水量核算。

南水北调工程是构建“三纵四横”国家水网总体布局的战略骨干, 不仅肩负着国家供水安全保障的重要使命, 更要为国家高质量发展和生态文明建设提供重要支撑。西线是打破西北及黄河中上游地区水资源桎梏, 促进黄河流域生态保护和高质量发展的重要工程, 西线工程建设具有必要性和紧迫性, 应在科学

理论的指导下来决策,必须要考虑调水对生态水文要素及其过程的影响,进行分区生态环境评价,要充分吸收东线、中线建设的经验教训。

3.2 黄河流域生态环境治理 黄河流域跨越中国3大自然区,生态水文要素具有显著的空间异质性,研究黄河流域生态系统的时空格局变化和生态水文过程,解析并量化气候变化和人类活动与流域生态系统变化之间的关联,揭示关键生态系统服务供给能力的格局和空间流动,对黄河流域的高质量发展极为重要。从流域整体来看,上游生态退化、中游水沙锐减、下游用水紧张、河口三角洲退缩等成为黄河流域面临的新问题^[41-42]。经济社会发展滞后是当前黄河流域生态文明建设的短板,且随着自然环境变化和人类社会经济发展,黄河流域水资源、水环境、水生态问题和各种矛盾日益突出。

水资源短缺是制约黄河流域生态保护和高质量发展的关键因素。黄河流域的缺水问题受气候变化和人类活动等多个因素共同影响,已有研究表明^[43-44],气候变化和人类活动对黄河生态水文要素变化贡献率在上、中、下游有显著的不同:上游地区,气候变化影响占主导作用,贡献率可达75%以上;中游地区,气候变化的影响降为40%;而下游地区,则主要受人类活动的影响,气候变化的影响仅为1%左右。气候变化背景下,黄河流域的过渡带地理条件使得水循环时空过程对气候变化更为敏感,如与湿润带相比,黄河流域气候更为干旱,植被覆盖更差,且年径流系数下降的幅度更大。1999年起,黄土高原实施的一系列退耕还林还草、植树造林等生态恢复策略,使得黄河中游地区土地利用/覆被发生了显著变化,成为我国植被增加最为显著的区域之一。植被的恢复使得流域水文要素和水循环过程发生显著变化,如侵蚀产沙指数显著减小,水土流失获得明显的保水保沙效果。与此同时,更为直接的是黄河径流量锐减,原因是植被覆盖的增加,使得蒸散发量上升,大量蓝水转化为绿水,导致蓝水显著减少。黄河流域的天然水热条件使得植被不会无限制地增加下去,未来黄河中游蓝水-绿水转化关系将随气候变化而有所波动,但水量因水热条件的制约而不再大幅度地减少^[45-46]。从未来研究工作来看,如何有效管理绿水、控制绿水耗散是黄河流域水量转化研究的重要内容。黄河生态流量是维护河流健康和支撑沿岸经济社会发展的基础,应满足保持黄河不断流,为工农业供水、维持下游泥沙平衡,为鱼类等提供全年性栖息地和保证输送污染物能力等生态系统服务。黄河生态流量常用于黄河基

流讨论、准确估算黄河流域基流的时空变化,对优化黄河流域水资源配置、保障流域水安全与粮食安全有重要作用。

总之,黄河流域的生态保护和高质量发展是一项复杂而庞大的系统工程,需要在保护中发展,在发展中保护。保护黄河需要维护黄河水资源可再生性或可更新性,需要在气候变化和人类活动背景下,研究黄河流域水-沙-盐传输转化规律。高质量发展需要落实“以水四定”,需要研究“水-生产-生活-生态”协同发展理论。同时,南水北调西线工程是缓解黄河流域水资源短缺的重要措施,如何实现水资源优化配置、引水补源科学调水,是当前解决黄河缺水问题需要重点研究的课题。

3.3 探索水-碳循环过程耦合机制,服务国家“双碳”计划 陆地生态系统水循环和碳循环是两大关键生态过程,决定着生态系统结构和功能的稳定与健康^[47],控制着主要的生态系统服务。对其耦合循环过程的认识是准确理解生物圈-大气圈-水圈等多圈层相互作用的有效途径。地球生态系统的碳循环特征变化是引发全球气候变化的根本原因,陆地碳循环和水循环是相互关联的强耦合系统^[48]。随着大气中CO₂质量浓度的增加,气候和水循环耦合机制被改变,相应改变了陆地水循环和植物吸收CO₂所需土壤水分的可用性,反之亦然。人为排放的CO₂是导致气候变暖的主要温室气体,它能改变地球气候和水文循环^[49-50],影响大陆大气干燥程度、土壤水分含量以及植被功能结构^[51]。另一方面,土壤水分是控制碳水通量的一个重要非生物因素。土壤水分含量决定了植物根系吸收水分量并调节气孔导度,进而决定植物水分状态以及总初级生产力(GPP)和蒸腾作用的比率^[52]。植物在水分胁迫下气孔关闭以减少蒸腾作用和CO₂吸收,如长时间的土壤干旱会导致植物死亡。当干旱导致树木大面积死亡时,分解的有机物释放大量碳,将森林从净碳汇转化为净碳源,进而减少生态系统规模的蒸腾作用和碳吸收。

水和碳循环之间的耦合存在多个时空尺度,但了解时空尺度变化对生态系统的影响和响应,仍是一项巨大的挑战。时间上,从短期(叶-气交换)到年度(碳分配、木质结构变化)到年际(物种组成、死亡率、遗传);空间上,从基于生理生态、水碳通量的叶片尺度和冠层尺度,分析植物生产力提高与水分利用权衡关系、应对气候变化的水分胁迫与响应等;到基于遥感数据和天文观测的流域、区域、全球尺度,探索生态工程建设、土地利用与覆盖变化、生态系统生产力变

化等对水循环和流域径流的影响及其机制。同时,随着全球气候变化加剧,干旱、热浪、火灾、极端降水和洪水等极端事件频发,将直接通过限制生态系统光合作用和增加呼吸作用,降低陆地碳吸收的能力^[53]。对于生态水文来说,湿地、森林、草原、沙漠、河流和湖泊生态系统不同尺度的水碳耦合应作为生态水文学研究的主要内容,需要提高模型的精度和进行多源数据同化的多尺度耦合,为预测变化环境下水-碳循环的响应提供新途径。

双碳(碳中和与碳达峰)是当前世界关注的热点,联合国政府间气候变化专门委员会(ICPP)和各国政府出台一系列政策文件以实现《巴黎协定》,加速气候保护行动。如何更好地进行碳储存和低碳经济是当下全球科学界面临的难题之一。我国政府印发了2030年前碳达峰行动方案,其中明确提及“把碳达峰、碳中和纳入经济社会发展全局,加强陆地和海洋生态系统碳汇基础理论、基础方法、前沿颠覆性技术研究”。在生态水文领域,如是否有可能通过水循环管理植被及其生长模式以增加碳封存、地质封存中的水文要素边界条件是否可以提供最佳的碳封存等问题,如何利用生态系统水碳循环耦合机制和碳储存方法降低整体温室气体排放,从而更好服务于完成国家碳中和计划,仍需进一步研究。

4 展望

4.1 深入研究生态系统对人类活动和气候变化响应机制 日益增长的人类活动对种类繁多、规模空前的各种社会经济用水及LUCC的影响不清,如森林/植被的水文效应,其有利还是不利仍需进一步探讨。气候变化与人类活动交织的混合影响使水文水资源的研究变得十分复杂,如何区分它们的影响是一个尚未解决的问题。此外,气候变化和人类活动对生态水与环境水的影响、计算与预测等问题尚未完善,需要探索水文系统和相互关联系统的共同演化(包括社会)过程及其形成机制,并发展适当的定量描述方法及模型,以便准确预测水系统变化及其反馈。

4.2 创新水土保持与生态建设综合技术体系 水土流失仍然是世界范围内的一个重要环境问题,无论是在农业用地上,还是在受森林砍伐、过度放牧或荒漠化影响的景观中都是如此。大多数陆地生命形式直接或间接依赖于土壤,了解土壤侵蚀的主要驱动因素和控制因素以及土壤流失的长期影响至关重要^[54]。一些学者已经开展了土壤水分、盐分和植物群落组成的变化如何影响土壤侵蚀的敏感性研究,下一步仍需

从机制上理解及构建植被动态生态水文模型,以预测气候和土地利用的变化是否以及在哪里可能加剧土壤侵蚀,并对已经发生侵蚀的或可能的侵蚀区域进行水土保持工作。

4.3 探索多源信息融合的生态水文监测、观测网络

过去10年里,我们感知和模拟环境的能力获得很大提升,多源信息监测与综合网络构建推动了多要素、多尺度综合生态水文的研究^[55]。研发了大型的水循环综合模拟系统(Hydro-Informatic Modeling System, HIMS)^[56],涵盖了分布式与集总式模拟,具有模型定制功能,在此基础上进一步扩展应用,以基本的生态水文过程为基础,发展了生态水文模拟系统(Ecohydrological Assessment Tool, EcoHAT)^[57-58],集成参数管理、多源遥感和空间数据,实现了区域尺度的分布式生态水文模拟,满足不同时空尺度和适应不同自然与人文环境的模拟,为流域水资源科学评价、合理利用和有效保护提供重要的技术支撑平台。大力推进研制生态水文要素综合监测技术,如推进同位素和环境遥感等技术提高观测土壤水运移、碳水通量、植物蒸腾及土壤蒸发过程的精度与尺度,运用基于过程的建模方法检测和预测环境变化的各种数据产品之间的尺度差异。开发新传感器网络,采用智能方法来管理、存储、过滤和分析相关的大量数据流并发掘实时生态水文监测,发展中国多尺度下生态水文过程监测体系等,为中国综合性生态水文学的发展提供坚实的数据基础。

4.4 加强与社会科学的交叉融合研究 在水文学领域,社会水文学已经出现。由于全球和区域气候变化和土地利用影响,生态系统和社会的水资源供应也在发生变化,未来生态水文学有望帮助我们理解社会-生态系统-水之间复杂的相互作用。环境科学、大气科学、生物学等自然科学与社会经济、人类活动等社会科学的交融,有助于研究自然资源的变异(如由气候驱动因素和土地利用模式引起)与社会动态的耦合,从而促进人类社会发展(粮食安全、生态系统服务和人类健康等)和环境保护。

4.5 加强生态水文的系统性研究 水系统与水循环及水工程是复杂巨系统,涉及经济社会生态环境可持续性,必须认识到环境和相互关联的全球、区域及局部动态的高度非线性变化,通过水循环和全球变化研究,融入地球系统科学的研究,开展宏微观所有时空尺度的综合、区域及其形成过程研究。系统论思想与方法的运用,为水文科学与生态学的交叉研究开拓广阔的创新空间。

生态水文学是一门新兴交叉综合学科,随着科技进步和时代发展,生态水文学的内涵和外延不断扩展,其研究方法不断创新.完善生态水文学理论与实践,有助于应对全球环境变化所带来的水安全、环境安全和粮食安全等诸多挑战,为我国生态文明建设和“山水林田湖草”一体化保护提供理论支持.生态水文学有庞大、复杂的理论体系,包涵从分子尺度到流域尺度的整体.这篇近两万字的综述绝非详尽无遗、尽善尽美,不足之处敬请读者批评指正.

5 参考文献

- [1] NUTTLE W K. Eco-hydrology's past and future in focus [J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2002, 83(19): 205
- [2] ZALEWSKI M. Ecohydrology: the use of ecological and hydrological processes for sustainable management of water resources[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2002, 47(5): 823
- [3] 刘昌明,刘璇,杨亚锋,等.水文地理研究发展若干问题商榷[J]. *地理学报*, 2022, 77(1): 3
- [4] 刘昌明.提高水生态与生态水关系的认知[J]. *中国水利*, 2020(2): 20
- [5] WASSEN M J, GROOTJANS A P. Ecohydrology: an interdisciplinary approach for wetland management and restoration[J]. *Vegetatio*, 1996, 126(1): 1
- [6] 国际水文计划第八阶段战略计划执行概要[R/OL]. IHP/IC-XX/7. [2022-04-24]. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000216345_chi
- [7] 夏军,左其亭,韩春辉.生态水文学学科体系及学科发展战略[J]. *地球科学进展*, 2018, 33(7): 665
- [8] 刘昌明,孙睿.水循环的生态学方面:土壤-植被-大气系统水能量平衡研究进展[J]. *水科学进展*, 1999, 10(3): 251
- [9] 刘昌明.土壤-植物-大气系统水分运行的界面过程研究[J]. *地理学报*, 1997, 52(4): 80
- [10] 王会肖,刘昌明.农田蒸散、土壤蒸发与水分有效利用[J]. *地理学报*, 1997, 52(5): 65
- [11] SUN G, HALLEMA D, ASBJORNSEN H. Ecohydrological processes and ecosystem services in the Anthropocene: a review[J]. *Ecological Processes*, 2017(6): 35
- [12] 夏军,张永勇,穆兴民,等.中国生态水文学发展趋势与重点方向[J]. *地理学报*, 2020, 75(3): 445
- [13] 薛勇民,谢建华.盖亚假说的生态哲学阐释[J]. *科学技术哲学研究*, 2016, 33(4): 101
- [14] ZALEWSKI M. Ecohydrology: the scientific background to use ecosystem properties as management tools toward sustainability of water resources[J]. *Ecological Engineering*, 2000, 16(1): 1
- [15] PORPORATO A, RODRÍGUEZ-ITURBE I. From random variability to ordered structures: a search for general synthesis in ecohydrology[J]. *Ecohydrology*, 2013, 6(3): 333
- [16] RODRÍGUEZ-ITURBE I, PORPORATO A. *Ecohydrology of water-controlled ecosystems: soil moisture and plant dynamics*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007
- [17] ROCKSTRÖM J, STEFFEN W, NOONE K, et al. A safe operating space for humanity[J]. *Nature*, 2009, 461(7263): 472
- [18] BERTASSELLO L, LEVY M C, MÜLLER M F. Sociohydrology, ecohydrology, and the space-time dynamics of human-altered catchments[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2021, 66(9): 1393
- [19] HIWASAKI L, ARICO S. Integrating the social sciences into ecohydrology: facilitating an interdisciplinary approach to solve issues surrounding water, environment and people[J]. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 2007, 7(1): 3
- [20] 刘昌明.中国21世纪水供需分析:生态水利研究[J]. *中国水利*, 1999(10): 18
- [21] SUTTON P C, ANDERSON S J, TUTTLE B T, et al. The real wealth of nations: mapping and monetizing the human ecological footprint[J]. *Ecological Indicators*, 2012(16): 11
- [22] 郑红星,刘昌明,丰华丽.生态需水的理论内涵探讨[J]. *水科学进展*, 2004, 15(5): 626
- [23] 门宝辉,刘昌明.河道内生态需水量计算生态水力半径模型及其应用[M].北京:中国水利水电出版社,2013
- [24] 刘昌明,门宝辉,宋进喜.河道内生态需水量估算的生态水力半径法[J]. *自然科学进展*, 2007(1): 42
- [25] 刘昌明,门宝辉,赵长森.生态水文学:生态需水及其与流速因素的相互作用[J]. *水科学进展*, 2020, 31(5): 765
- [26] 王红瑞,曹玲玲,许新宜,等.基于梯形模糊数的不确定性河道生态需水模型及其应用[J]. *水利学报*, 2011, 42(6): 657
- [27] LIU C M, MEN B H. An ecological hydraulic radius approach to estimate the instream ecological water requirement[J]. *Progress in Natural Science*, 2007, 17(3): 320
- [28] 王西琴,张远,刘昌明.河道生态及环境需水理论探讨[J]. *自然资源学报*, 2003, 18(2): 240
- [29] 刘世荣,孙鹏森.空间生态水文学[M].北京:科学出版社,2020

- [30] REID W V, CHEN D, GOLDFARB L, et al. Earth system science for global sustainability: grand challenges[J]. *Science*, 2010, 330(6006): 916
- [31] 刘祖涵. 塔里木河流域气候-水文过程的复杂性与非线性研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2014
- [32] GUDMUNDSSON L, BOULANGE J, DO H X, et al. Globally observed trends in mean and extreme river flow attributed to climate change[J]. *Science*, 2021, 371(6534): 1159
- [33] 黄婕, 高路, 陈兴伟, 等. 东南沿海前汛期降水极值变化特征及归因分析[J]. *地理学报*, 2016, 71(1): 153
- [34] 刘昌明. 南水北调工程对生态环境的影响[J]. *海河水利*, 2002(1): 1
- [35] 张一驰, 于静洁, 乔茂云, 等. 黑河流域生态输水对下游植被变化影响研究[J]. *水利学报*, 2011, 42(7): 757
- [36] 夏军, 黄国和, 占车生. 南水北调中线工程对区域经济社会可持续发展影响研究的几个关键问题[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2009, 45(5/6): 484
- [37] 高永年, 高俊峰. 南水北调中线工程对汉江中下游流域生态环境影响的综合评价[J]. *地理科学进展*, 2010, 29(1): 59
- [38] 王浩, 许安强. 南水北调东中线一期受水区地下水水位回升[N]. *人民日报*, 2022-02-09 <002>
- [39] 晏霞, 刘媛媛, 赵振宇. 利用时序InSAR技术监测南水进京后北京平原地区的地面沉降[J]. *地球物理学进展*, 2021, 36(6): 2351
- [40] 贾毅, 张松林. 南水北调中线工程途经区生态服务价值的时空变化[J]. *生态学报*, 2021, 41(18): 7226
- [41] 刘昌明, 田巍, 刘小莽, 等. 黄河近百年径流量变化分析与认识[J]. *人民黄河*, 2019, 41(10): 11
- [42] 周旭, 杨胜天, 刘晓燕, 等. 黄河中游多沙粗沙区流域坡面水保措施变化特征[J]. *地理学报*, 2014, 69(1): 64
- [43] 沈彦俊. 黄河流域生态环境保护与水资源可持续利用[J]. *民主与科学*, 2018(6): 16
- [44] 刘昌明, 魏豪杉, 张永强, 等. 黄河干流径流变化归因分析与有关问题商榷[J]. *人民黄河*, 2021, 43(10): 1
- [45] 刘昌明, 刘小莽, 田巍, 等. 黄河流域生态保护和高质量发展亟待解决缺水问题[J]. *人民黄河*, 2020, 42(9): 6
- [46] 刘昌明, 李艳忠, 刘小莽, 等. 黄河中游植被变化对水量转化的影响分析[J]. *人民黄河*, 2016, 38(10): 7
- [47] 王根绪, 张志强, 李小雁, 等. 生态水文学概论[M]. 北京: 科学出版社, 2020
- [48] GENTINE P, GREEN J K, GUÉRIN M, et al. Coupling between the terrestrial carbon and water cycles: a review[J]. *Environmental Research Letters*, 2019, 14(8): 083003
- [49] GREGORY J M, INGRAM W J, PALMER M A, et al. A new method for diagnosing radiative forcing and climate sensitivity[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(3): L03205
- [50] KNUTTI R, RUGENSTEIN M A A, HEGERL G C. Beyond equilibrium climate sensitivity[J]. *Nature Geoscience*, 2017, 10(10): 727
- [51] ZHU Z C, PIAO S L, MYNENI R B, et al. Greening of the earth and its drivers[J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(8): 791
- [52] GREEN J K, SENEVIRATNE S I, BERG A M, et al. Large influence of soil moisture on long-term terrestrial carbon uptake[J]. *Nature*, 2019, 565(7740): 476
- [53] WILLIAMS A P, GENTINE P, MORITZ M A, et al. Effect of reduced summer cloud shading on evaporative demand and wildfire in coastal southern California[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(11): 5653
- [54] D'ODORICO P, LAIO F, PORPORATO A, et al. Ecohydrology of terrestrial ecosystems[J]. *BioScience*, 2010, 60(11): 898
- [55] GUSWA A J, TETZLAFF D, SELKER J S, et al. Advancing ecohydrology in the 21st century: a convergence of opportunities[J]. *Ecohydrology*, 2020, 13(4): e2208
- [56] 刘昌明, 王中根, 郑红星, 等. HIMS 系统及其定制模型的开发与应用[J]. *中国科学 E辑: 技术科学*, 2008, 38(3): 350
- [57] 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[J]. *中国科学 E辑: 技术科学*, 2009, 39(6): 1112
- [58] 杨胜天, 王志伟, 赵长森, 等. 遥感水文数字实验[M]. 北京: 科学出版社, 2015

Ecohydrology on the upsurge: history and prospect of its theory and application

LIU Changming^{1,2)} LIU Xuan¹⁾ YU Jingjie^{2,3)} YANG Shengtian¹⁾ ZHAO Changsen¹⁾
MEN Baohui⁴⁾ ZHAO Zhilong¹⁾ WANG Hongrui¹⁾

(1)College of Water Sciences, Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China; 2)Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, 100101, Beijing, China; 3)University of Chinese Academy of Sciences, 100049, Beijing, China; 4)School of Water Resources and Hydropower Engineering, North China Electric Power University, 102206, Beijing, China)

Abstract Ecohydrology is a new branch of water science developed in the second half of the 20th century. Ecohydrology now faces both great opportunities and challenges, to follow President Xi's instruction of "prioritizing ecological conservation and pursuing green development". Ecohydrology provides principles and knowledge to alleviate contradictions between human activities and ecosystem degradation, and for "green, high-quality, sustainable" development. In this paper development and research trends of ecohydrology are reviewed. Theoretical thoughts are reviewed, including connotation and evaluation of water demand and water consumption of ecosystem, harmonious relationship and collaborative change among human-water-ecosystem, comprehensive thought of "The Four Equilibria", Budyko water heat balance connection equation, importance of green water in ecosystem, research at both macro and micro scales in climate change. Applications of eco-hydrology (such as coupling mechanism of water-carbon cycle process, environmental impact assessment of the South-to-North Water Transfer Project and eco-hydrology issues in ecosystem and environment governance of the Yellow River basin) are analyzed. The West Route of South-to-North Water Transfer Project is an important project in the construction of national water network and is an important measure to alleviate the shortage of water resources in the Yellow River basin. Needs for eco-hydrology research were put forward. These include response mechanism of ecosystems to human activities and climate change, comprehensive technical approaches on soil and water conservation and ecosystem rehabilitation, advanced techniques of multi-source information fusion, enhancement of systematic research on ecosystem and of integration research with social science.

Keywords ecohydrology; human-water-ecosystem; ecological water demand; the Yellow River basin; water-carbon coupling

【责任编辑:武佳】