

中国生态水文学发展趋势与重点方向

夏军^{1,2}, 张永勇², 穆兴民^{3,5}, 左其亭⁴, 周宇建², 赵广举^{3,5}

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所中国科学院陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101; 3. 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100; 4. 郑州大学水利与环境学院, 郑州 450001; 5. 西北农林科技大学水土保持学院, 杨凌 712100)

摘要: 生态水文学是一门新兴的交叉学科, 发展和完善其理论体系和技术方法等对促进中国山水林田湖草系统保护与修复, 推进生态文明建设和绿色发展具有重要理论和实践意义。本文阐述了生态水文学发展历程和挑战性问题; 结合学科前沿和国家需求, 提出了生态水文学在中国的发展战略, 主要包括: 生态水文综合观测的新技术新方法、生态水文学机理和基础理论、以陆地和水生生态水文过程为核心的多尺度多要素综合模拟与集成、以及生态水文与社会科学的融合等; 在此基础上, 也提出了中国生态水文学具体发展方向, 如多源信息融合与综合观测网络、关键要素的时空格局及其演变特征、综合模型与不确定性、多学科交融研究等; 最后提出了中国生态水文学在山水林田湖草及城市等共同体修复和保护中的应用前景。

关键词: 生态水文学; 理论和方法; 综合观测; 数值模拟; 尺度问题

DOI: 10.11821/dlxb202003001

生态水文学是探讨变化环境下水文过程对生态系统结构与功能影响以及生物过程对水循环要素影响的交叉学科^[1]。尽管生态与水文学科之间的交叉研究如森林水文、湿地水文等已有较长历史, 但生态水文(学)一词直到20世纪90年代才在都柏林(Dublin)召开的国际水与环境大会上被正式提出。作为一门学科, 生态水文学的内涵、外延、研究对象、理论和方法等学科体系的核心内容还亟待进一步完善。随着国际地圈生物圈计划中水文循环的生物圈部分(IGBP/BAHC)、联合国教科文组织主持的国际水文计划(UNESCO/IHP 2.3~2.4)等重大计划的实施, 生态水文学得到了迅速发展, 已成为当今水文学研究热点之一。本文总结了国内外生态水文学发展历程和存在问题, 提出中国生态水文学未来发展趋势、重点发展战略和应用前景。本文将为生态水文学的未来发展提供参考, 也为中国山水林田湖草的生态保护与修复、生态文明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。

1 生态水文学的发展历程与研究进展

1961年, 国际水文科学协会(IAHS)的国际水文十年计划(1965—1974年)提出水

收稿日期: 2019-02-09; 修订日期: 2020-02-12

基金项目: 中国科学院学部学科发展战略研究项目(2017DXA); 国家自然科学基金项目(41671024) [Foundation: The Developmental Strategies of the Discipline of the Academic Divisions of the Chinese Academy of Sciences, No.2017DXA; National Natural Science Foundation of China, No.41671024]

作者简介: 夏军(1954-), 男, 湖北广水人, 教授, 中国科学院院士, 中国地理学会会员(S110001624H), 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: xiajun666@whu.edu.cn

通讯作者: 张永勇(1981-), 男, 湖北京山人, 副研究员, 主要从事流域水循环和生态水文研究。
E-mail: zhangyy003@igsrr.ac.cn

文过程研究需要考虑来自生态等过程的影响,生态和水文过程的交叉研究开始起步。随着研究的逐步深入,生态学或水文学单一学科已无法解释完整的生态水文过程及其相互作用机制,由此衍生出了由生态学和水文学交叉的新兴学科,即“生态水文学”。不少学者分别从生态和水文等不同方向探索了生态系统与水文过程的相互作用,如生态水力学^[1]、土壤水文学^[2]及河流生态学^[3]等。

“生态水文学”(Eco-hydrology)一词首次由Ingram^[4]在1987年作为专业学术词汇使用,随后在上世纪90年代得到广泛使用,如Pedrol^[5]、Bragg等^[6]和Hensel等^[7]应用于以湿地为主的生态水文过程研究。生态水文学科也在1992年联合国水和环境国际会议上正式确立。1993年第一本以生态水文学为主题的著作《Mires: Process, Exploitation and Conservation》出版问世^[8]。生态水文学科由此得到了不断发展,但其研究重点仍然以“过渡带”湿地生态系统为主,如Gieske等^[9]针对植被格局、湿地生态系统等与水文过程的交互作用开展了研究。1996年Wassen等^[10]对生态水文学给出了较为完善的定义,特别关注河流保护和修复中水文因素的功能价值。同年,UNESCO/IHP第五阶段(1996—2001年)正式启动,生态水文学首次成为重要研究内容之一,由此生态水文学也进入快速发展阶段。Zalewski^[11]出版了联合国教科文组织国际水文计划“生态水文学”专集,认为生态水文研究实质是不同时空尺度上的水文过程与生物过程的综合科学,并提出生态水文研究应进一步推广到流域水文过程的调节和综合大尺度、长时间水文过程的研究。1997年Poff等^[12]提出了自然水流范式理论(Nature flow paradigm),利用与河流生态相关的径流情势指标(如流量、幅度、频率、历时、出现时间和变率)对自然径流过程进行全面描述,促进了河流生态水文的发展。1999年Baird等^[13]以植物和水为研究对象,总结20世纪80年代以来植被生态水文研究发展,并阐述旱地、湿地、温带、热带及河流湖泊等各种环境下植物与水之间的响应关系,极大地促进了植被生态水文学的全面发展。生态水文学研究已由“过渡带”湿地生态系统研究逐步发展成为植被、河流湖泊等淡水资源^[14]、森林^[15]等多种系统的综合研究。从2008年起,UNESCO/IHP连续两个五年计划将生态水文学作为一个独立的主题进行研究。Wood等^[16]编著了《Hydroecology and Ecohydrology: Past, Present and Future》,全面总结了生态与水文相关领域的研究进展与方法。此后,Goldsmith、Buchanan等针对不同生态系统的土壤—植物—大气连续体(Soil-Plant-Atmosphere Continuum, SPAC)开展生态水文过程及其效应的深入研究^[17-18]。同时,随着经济社会快速发展对自然环境的影响愈加强烈,人类活动影响下的流域生态水文^[19]、城市生态水文学^[20]等研究也得到了发展。此外,《Ecohydrology》、《Ecohydrology & Hydrobiology》等学术期刊也应运而生。目前陆地及水生综合生态水文学科框架已基本确立,涵盖了森林、草地、湿地、农业、河流湖库及城市等多种生态系统。生态水文学的研究也逐步从小尺度实验观测和数据分析转向多尺度综合性模型探索^[21],学科理论和方法等均取得了长足的进步。

中国生态水文学研究起步于20世纪80年代,最初主要涉足于农田的SPAC系统中水分运移和能量平衡问题。基于SPAC理论,中国学者发展了一系列理论概念及计算模型,如邵明安等^[22]确定SPAC系统中水流各项阻力计算公式;康绍忠^[23]探究了SPAC水分传输的力能关系,构建了作物根系吸水模式及农田蒸腾与蒸发分摊计算模式;刘昌明^[24]探究了从SPAC系统界面上控制水分消耗的方法,并提出了农田SPAC系统的“五水转化”概念。随着生态水文学研究的不断深入,中国陆地及水生系统的生态水文过程研究均取得了迅猛发展。目前,已在植被及其变化等对径流、泥沙、土壤水分变化与耗散、水文循环等过程的影响研究方面取得了突出成果^[25-27]。在水生系统生态水文研究方面,基

于河流连续体、洪水脉冲、自然水流范式等理论,中国学者已在河流湖泊的径流情势和水质过程对水生生物群落的影响机制、生态水文过程模拟等方面取得了显著成果,并在太湖蓝藻水华控制、径流情势变化下鱼类栖息地模拟、三峡水库生态调度等方面得到了实际应用^[28-30]。

2 生态水文学存在问题与挑战

虽然生态水文学已在湿地、河流湖库、森林、草地、农田等生态系统研究中取得了迅猛发展,但大都还关注于单一生态系统的实验观测、机理探索、数值模拟等方面。随着地球系统各圈层物质和能量交换频繁、气候变化和人类活动扰动的加剧等,全球许多流域,特别是中国重点流域(如黄河、长江、海河、淮河、辽河)均面临着生态系统退化、洪涝、干旱、水土流失、水污染等诸多问题。对于单一系统小尺度生态水文过程而言,在探究以上问题的成因、辨识其关键影响因素并制定对策建议等方面仍存在诸多问题与挑战,如生态水文多要素同步观测与融合、点或田间尺度生态水文规律向流域或全球尺度的转换机制、气候变化和高强度人类活动等对生态水文过程多重影响的检测与归因、流域尺度生态与水文过程要素双向耦合和系统模拟等。另外,随着全球社会经济和城市化进程的加快,传统生态水文研究在关注物理过程的同时,亟需融入社会经济、人类发展等人文过程的影响,特别是在城市生态水文研究领域。

因此,随着地球系统科学相关领域理论的不断完善发展以及观测、信息传输和计算能力等技术革新,未来亟待增强生态水文学科各生态系统之间、生态水文各过程间的紧密联系和作用关系探索,在水土气生多要素综合观测、生态水文多过程作用以及环境变化和人类活动的影响机制、综合模拟与系统集成、多学科交融等方面加强探索,最终完善生态水文学的基础研究框架、理论体系和技术方法等。

3 中国生态水文学发展趋势

中国政府一直高度重视生态保护和生态文明建设,特别是习近平总书记多次强调生态的重要性,如“绿水青山就是金山银山”“山水林田湖是一个生命共同体”等。纵观生态水文发展历程和挑战,结合生态水文学建设和绿色发展等国家重大需求,总结主要发展趋势如下。

3.1 探索生态水文监测的新技术新方法,完善生态水文系统综合观测网络

野外观测是生态水文过程研究的基础^[31]。生态水文要素包括气象要素(如降雨、气温、风速、辐射、蒸散发)、水文要素(如水位、流量、流速)以及不同类型生态系统中的环境要素(如水、碳、氮、磷)、生态要素(如植被、植被净初级生产力、浮游生物、底栖生物和鱼类物种及多样性)等。各要素不同尺度的观测技术和方法多样,但目前重点仍在点或者田块尺度碳通量、土壤水分运移、蒸散发以及与土壤水相关参数的观测。遥感手段是实现由点到面尺度扩展的有效方法^[32]。同位素作为土壤、植被、大气和海洋间不同形式水分运动的良好示踪剂,已成为大气、水文和生态等多种学科的重要研究工具。因此,未来应重点关注通量与同位素连续测量、野外监测与遥感、雷达多源信息多尺度综合性监测技术与方法的发展。

随着对生态要素与水文要素之间相互作用机理认识的深入,在全国范围内建立并完善综合性生态水文观测网络是十分必要的。全球已经兴起了多个长期生态监测计划,如

全球通量网 (FluxNet)、美国生态监测网计划 (NEON) 和长期生态学研究网络 (LTER)、欧洲通量计划 (EUROFLUX) 等。目前, 中国重点关注单一气象、水文、水质和生态要素的监测网络建设, 如气象局的 地面气象观测网和高空气象观测网、水利部的全国水文站网、环保系统的地表水水质监测网络、野外站点监测网络、中国生态系统网络 (CERN) 和中国陆地生态系统通量观测研究网络 (ChinaFLUX) 等。以上观测和网络建设极大地促进了中国生态学和 水文学等学科的发展, 但大多局限于气象、水利、生态环境等单一部门, 大尺度长期监测网络的完善和数据共享集成有待进一步发展。同时, 中国生态水文观测仍需综合考虑自然地理、生态和水文水资源等分区, 拓展水文、生态、气候和土壤等多个领域指标, 优化和完善已有监测网络系统, 实现各学科各部门生态水文相关数据的共享, 发展中国多尺度下生态水文过程监测体系, 为中国综合性生态水文学的发展提供坚实的数据基础。

3.2 加强生态水文学机理和完善基础理论

解析陆地及水生生态水文过程中各要素的相互作用机制, 探索水文过程与生态过程的耦合机制及其对全球变化的响应, 既是生态水文综合理论中的关键与核心主题, 也是认识水循环演变规律的基础。陆地生态水文过程研究重点关注农田、森林植被等生态水文要素间的响应机制, 大多基于 SPAC 理论、Budyko 水热平衡理论等分析土壤、植被、大气界面之间能量和水分的交换机制^[33], 对田间尺度生态水文转换机理的探索及其在流域或全球尺度的拓展等研究仍有待进一步加强。以河流、湖库为研究对象的水生生态系统是自然生态系统的重要组成部分, 也是陆地和水生生态系统间的物质循环、能量转换和信息交流的主要途径。目前, 针对河湖生态水文过程的研究大多处于野外实验观测和半定量研究阶段^[34]。结合野外监测、室内控制实验、数值模拟等, 全面揭示河湖生态水文过程连续性特征与区域差异是未来水生生态水文机理研究的重要内容之一。

随着生态水文学机理和基础理论范式的不断完善, 未来仍亟待加强陆地与水生生态水文过程耦合机制与理论范式的探索; 明确碳氮等生源要素、生物因素、环境因素及气候因素等在土壤、植被、大气以及水体等界面的迁移转化规律及其演变特征。同时, 随着气候变化与人类活动对关键带生态水文过程扰动的不断增强, 探索生态水文要素对气候变化、人类活动的响应机制也已成为研究热点之一。在探索变化环境下陆地—水生生态水文过程的机理基础上, 发展多尺度多要素陆地—水生综合生态水文过程研究的理论体系。

3.3 研制陆地—水生生态系统多尺度综合模拟与集成

中国“十三五”规划纲要明确提出“以提高环境质量为核心, 以解决生态环境领域突出问题为重点, 加大生态环境保护力度”。自开展生态—水文过程耦合机制研究以来, 以森林、植被和农田等为对象的陆地生态水文过程研究重点关注垂直梯度的水分传输和植被生理生态过程, 同时关注生态系统对水文过程及下垫面的影响。以河流、湖泊为主的水生生态水文过程研究重在生物栖息地、生态系统组成等与径流过程的作用关系。植被、土壤和水是陆域和河湖生态系统中各种生命活动的关键载体, 也是连接生物、物理和化学过程的主要反应场所。传统的经济社会发展与生态环境健康之间的矛盾日益增大, 引起植被、生物群落结构等格局的改变, 导致生态系统发生明显变化, 进而加剧生态环境恶化的风险, 直接约束国家生态文明建设。因此, 全力发展陆地—水生生态水文过程综合性研究具有十分重要的科学价值和现实意义^[35]。随着学科交叉的发展, 生态水文过程研究融入了生态原理、生态模型与时空尺度等, 正向“陆域—水生”综合性研究方向发展。综合考虑社会需求与区域可持续发展, 融合卫星遥感和站点等多源观测数

据,构建站点、斑块和流域等多尺度生态水文过程综合模型,评估并调控生态水文各系统的稳定性,将成为生态水文应用实践、服务社会的必然趋势,同时也将是中国合理调配水资源、保障陆地和水域生态系统结构与物种多样性的重要手段。

3.4 开展生态水文与社会科学融合,推进全球生态水文学综合性研究

农业生产、城市扩张、水利工程建设和调控等社会经济发展的多个方面对生态水文过程造成强烈的扰动,导致生态系统原有的平衡发展被打破。生态水文学综合性研究是解决资源短缺、环境污染和生态系统退化等诸多水问题的关键途径之一,也一直是全球重大研究计划关注的核心内容之一。2004年地球系统科学联盟(ESSP)提出了“全球水系统计划(GWSP)”,重点探讨人类活动对全球水系统过程(水循环物理过程、水质水生态过程和人类经济过程)的作用。2013年IAHS正式启动了今后十年(2013—2022年)的科学计划Panta Rhei,主题是“变化中的水文科学与社会系统”,其中面向可持续世界的生态水文学是六大核心议题之一。2017年在波兰召开的国际生态水文学大会上,也提出要推进面向循环经济的生态水文学研究,倡导融合循环经济理念和遵循自然生态过程的解决方案。开展生态水文和社会科学的集成研究,揭示人类活动对生态水文过程的影响等,对分析生态水文要素演变特征、生态水文系统修复重建方案的制定等具有重要的科学意义和现实价值。

在全球变化和经济一体化的大背景下,站点或流域尺度生态水文学研究亟待向全球尺度生态水文学综合研究扩展。全球对地观测技术、数据共享机制以及计算机技术等的高速发展,也为全球生态水文多过程综合性研究提供了强有力的基础支持。比如,已有大量全球尺度生态水文要素的时空分布产品,包括全球降水产品(NCEP/NCAR、CRU TS、CPC等)、全球径流数据库(GRDC)、全球陆地覆盖数据(GlobCover等)、全球土地利用数据(UMD、GLCC等)、全球蒸散发和土壤数据集(GLDAS等)。因此,在全球尺度上探索能量过程、水文、陆地和河湖生态、经济人文等多过程的耦合机制,实现全球生态水文多要素综合模拟,评估气候变化和大规模人类活动的影响等已成为生态水文学领域的研究热点。

4 中国生态水文学重点发展方向

4.1 生态水文多源信息融合与综合观测网络构建

多源信息监测与综合网络构建是发展多要素、多尺度综合生态水文研究的基石。针对目前监测技术及尺度受限等问题,未来应大力推进研制生态水文要素综合监测方法,进一步改善大型蒸渗仪、涡度相关、稳定同位素及定量遥感等技术对蒸发、土壤水运移、碳水通量、植物蒸腾及土壤蒸发过程的观测精度与尺度。促进多种监测技术相结合的多源信息综合监测,完善通量观测与同位素的综合连续测量技术;点尺度野外观测与遥感测量等多种尺度观测数据的融合;研发生态水文要素自动监测的信息采集—实时传输—远程监控的物联网技术;制定国家生态水文长期监测及系统观测网络的观测技术标准与规范。进一步构建生态水文要素综合监测网络,整合已有气象、水文、水质以及生态系统等观测网络系统,形成陆地—水生系统综合生态水文监测网络(图1)。同时,综合考虑生态、水文水资源、综合自然地理等分区进一步完善监测网络系统,为中国生态水文的研究提供坚实的基础支撑。

4.2 生态水文系统关键要素的时空格局及其演变特征

生态水文关键要素的时空格局及其演变特征是生态水文机理研究的核心内容,对揭

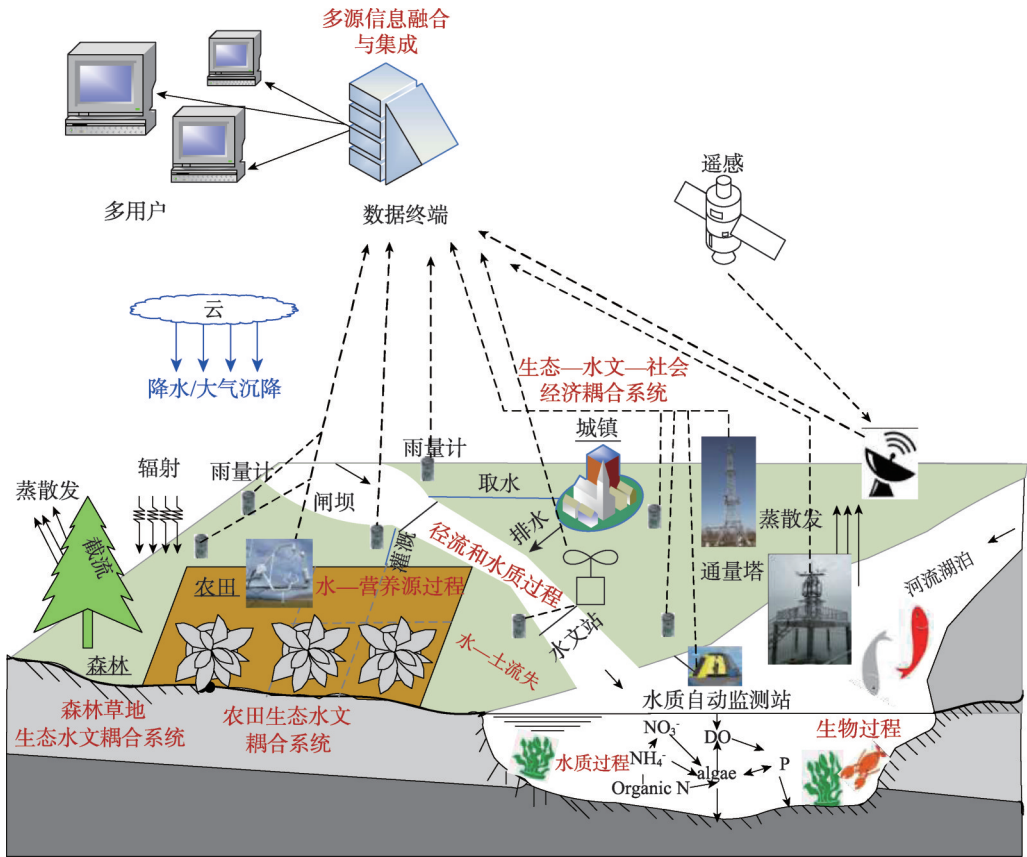


图1 流域生态水文耦合系统和综合监测网络

Fig. 1 Ecohydrological system and observation networks at watershed scale

示生态水文关键过程演变机制和基础理论的发展有十分重要的意义。水文要素时空演变的生态水文特征表现为：自然径流变异被认为是河道景观发生变化的驱动力；径流情势（流量、幅度、频率、历时、出现时间和变率等）时空变化及其与地下水的相互作用将引起河流生态系统结构与功能的改变，径流情势指标分析已成为水体生态水文系统景观格局等研究的重要方法^[36]；蒸散发是生态水文过程的重要环节，蒸散发特征的变化如蒸散发加强会导致生态水文格局紊乱、湿地景观退化等。水质作为水环境的重要指标，其类型和浓度是对生态水文系统的响应。生态要素时空演变的生态水文特征表现为：植被类型及其结构变化直接影响水循环各个环节（如截流、产流、蒸散发），关乎流域或地区“生态—水文—社会经济耦合系统”健康运行^[37]；植被净初级生产力作为重要的生态指标，直接影响蒸散发和水分利用效率等时空格局，可用于调节生态系统过程的影响和能量存储等；浮游生物作为水生生态系统的重要组成，其物种的时空分布特征可以反映生态水文系统的健康状况；鱼类或大型无脊椎生物是监测生态水文系统健康的重要指标，通过运用栖息地、物种类型及其分布等指标评估河流生态健康状况，揭示河流生态系统的主要问题及成因。在了解流域内上述各要素时空格局的基础上，综合分析生态水文演变特征与驱动机制是开展各项生态水文学研究的基础。

4.3 陆地—水生多尺度多要素生态水文综合模型与不确定性量化分析

陆地生态水文模型是在传统降雨—径流关系模型基础上耦合植被生长模型、土壤生物地球化学过程模型等，定量描述植被、营养物质与水文过程的相互作用，以及水文过

程和生态过程间的动力学机制。目前常见模型有针对林冠截流、林地土壤水入渗的Rutter模型、Massman模型和Philip模型等;适合不同生态类型的大尺度生态水文过程SVAT模型;考虑植被动态过程的流域水文模型,如DHSVM、VIC、SWAT、HEQM模型;针对地下水与植被群落关系开发的MXW和IRM模型等。未来应重点结合气候变化和人类活动的影响,深入探索植被过程、水—营养物质循环过程的作用机制,加强陆地生态水文模型物理机制。河流生态水文模型以水文、水力或水质模型为基础,综合考虑水生生物生长状况,定量分析径流情势及水质要素与水生生物群落间的响应机制,其空间维度可从一维到三维,如Mike、EFDC、HSPF模型等。在中国,许多学者结合河流生态水文过程机制及各类模型的优势,提出相应的河流生态水文概念模型,如径流情势与鱼类需求关系的概念模型、河流生态系统结构功能整体性概念模型、水文—生态响应概念模型^[30, 38-39]。未来水生生态水文模型应重点探究如何利用高精度地形数据、营养物浓度、水生生物生长周期、人类活动(如闸坝调控、取用水和排污)等多种信息,构建详尽描述人类活动影响下河流水文—水质过程以及生态系统变化的综合性数学模型。另外,随着单一生态水文过程模拟功能的逐渐成熟,陆地—水生多尺度多要素生态水文过程综合模型和集成系统也逐渐涌现,已成为未来生态水文模型发展的重要方向。如RHESSys模型在流域尺度上耦合分布式水文模型TOPMODEL和森林碳循环模型Forest-BGC,实现了生态水文过程双向耦合^[40];中国学者开发的VIP模型^[41]、China AgroSys模型^[42]等,实现了流域/区域尺度作物产量、蒸散发、产汇流等关键生态水文过程的综合模拟。另外,夏军等以流域或城市为基本单元,探究了以水循环为纽带的水文、生态和人文三大过程之间的联系及其反馈机制,构建了水系统模拟平台,如长江模拟器、城市水系统等^[43-44]。

不同生态水文过程的时间和空间尺度不匹配一直是生态水文过程综合模拟和集成面临的难点问题之一。如何将小尺度观测分析所得到的规律与结论推广到流域尺度,也是困扰生态水文模拟的技术难点(图2)^[45]。理论上来说,尺度越小,模拟过程越精细,其结果也越接近真实的自然环境。但由于小尺度的空间差异性,导致已获得的规律很难推广到更大的尺度。水文模型一般以日、甚至小时尺度在子流域或者网格上对水文过程进行模拟;生态模型的基础数据观测一般为站点或田间尺度,同时对植被生化过程以小时尺度进行模拟。目前针对此问题,学者们普遍采用多尺度嵌套方法等。但如遇小尺度过程需要大尺度的输出结果时,通常会将大尺度内的环境变量视为常数,会影响最终模拟结果空间分辨率。通过降尺度或升尺度等途径实现模块之间的尺度转化和交换变量的动态计算,是未来生态水文模型发展的一个重要方向。

此外,复杂模型各过程的不确定性和累积影响也是生态水文模型研究的热点问题之一^[46]。模型不确定性来源大致可以分为输入资料、模型结构、参数以及率定资料等不确定性^[47]。目前,模型不确定性的研究局限于单一来源不确定性的估计及其对参数和模拟结果的影响;但对复杂系统模型不确定性来源研究还处于起步阶段,Zhang等^[46, 48]采用Bootstrap和多目标优化算法等对复杂系统模型的不确定性及其影响进行了量化,提出了多过程多要素均衡率定方法,解决了不确定性传递的影响(图3)。发展模型不确定性量化理论体系和方法,建立科学可靠的不确定性评价平台或集成工具等均有待进一步研究与探讨。

4.4 多学科交融的生态水文学研究

IGBP、UNESCO/IHP、IAHS十年科学计划(2013—2022年)(Panta Rhei)、未来地球科学计划(Future Earth)等都将陆地植被生态过程、河流生态系统、社会系统和水文

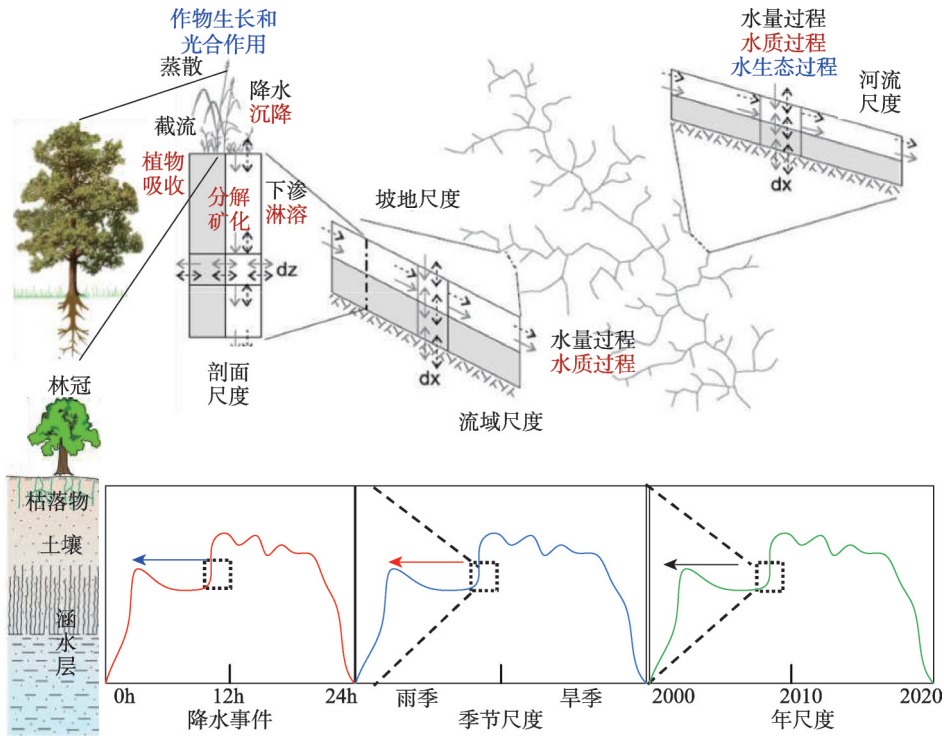


图2 流域内多时空尺度的生态水文过程(部分改自文献[45])

Fig. 2 Watershed ecohydrological processes at multiple spatial and temporal scales

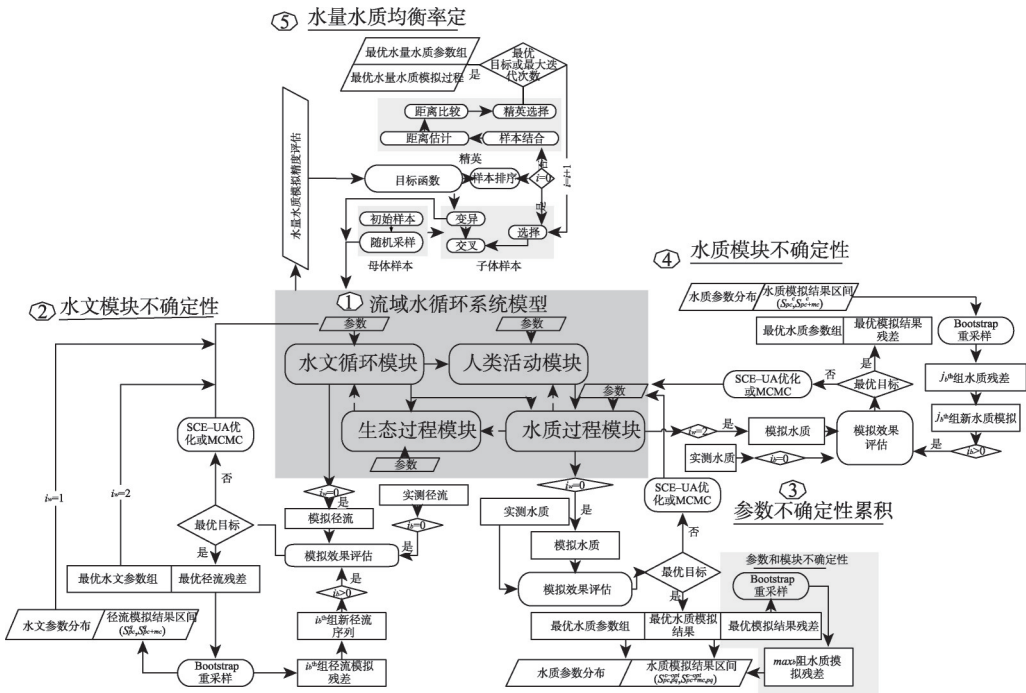


图3 复杂系统模型不确定性及其传递量化框架和多过程均衡率定框架^[45, 47]

Fig. 3 Framework of uncertainty estimation and balance calibration of multi-processes in the integrated water system model

过程的相互作用机制和耦合研究作为核心内容。结合全球重大科学计划前沿,进一步促进环境科学、大气科学等自然科学与社会经济、人类活动等社会科学的交融将成为未来生态水文学的重点发展方向之一。比如,气候变化在改变水文循环和地表生态系统物质循环、植被生理生态等方面发挥着重要作用^[49],探索气候变化对生态水文相关过程的作用机制与反馈也是未来生态水文学的前沿问题之一。

另外,伴随着经济的飞速发展,水利工程的修建和调控、农药化肥的大量施用、污染物过度排放、植被破坏和森林砍伐、城镇化等诸多人类活动对流域生态水文系统的影响日益加剧^[50]。以上诸多问题的解决也亟待生态水文学多学科的交融。涉及生态水文相关的关键科学问题如:水利工程调控对河流生态水文系统影响机制和珍稀物种保护、SPAC系统中营养物质循环及其污染特征、点源和面源的环境效应及其对生态系统的影响、人类活动引起的下垫面变化对生态—水文变化格局的影响、城市生态水文演变机制与海绵措施的调控特征等。中国政府提出了美丽中国、长江大保护、黄河流域生态保护和高质量发展、海绵城市、海岸带生态建设等重大战略,许多重大科技专项也应运而生,如国家重点研发计划项目“典型脆弱生态修复与保护研究”和“水资源高效开发利用”、中国科学院A类战略性先导科技专项“美丽中国生态文明建设科技工程”等。国家自然科学基金委也长期重视生态水文学的发展,特别是在用水矛盾突出、生态环境恶劣的干旱半干旱区,专门设立“黑河流域生态—水文过程集成研究”重大研究计划、“干旱区生态水文学”等创新研究群体项目等^[51],其中黑河流域生态水文研究不仅建立了先进的流域观测系统和生态水文过程集成模型,而且实现了可持续发展应用的决策支持^[52];针对流域生态环境保护,设立国家自然科学基金重大项目“长江经济带水循环变化与中下游典型城市群绿色发展互馈影响机理及对策研究”等。另外,在中国“十三五”规划中也明确提出发展“生态—水文—经济”的集成研究等。以上重大国家需求和学科前沿将进一步推动中国自然、社会等多学科交融的生态水文学研究,以及生态水文过程中经济发展与人类活动的影响和反馈等研究。此外,作为中国生态文明建设的关键内容之一,生态系统水流动调节及其价值估算是生态系统和自然资本可持续管理的重要手段,也是生态学、水文学、生态经济学、环境经济学等交叉领域的研究热点。

5 中国生态水文学应用前景

生态水文学科经过几十年的发展,在森林生态、草地生态、河流湖库生态、湿地生态、农业生态、城市生态等各个分支领域从基础理论、技术方法和应用实践等方面已开展了深入研究并取得了长足的进步,为生态水文学提供广阔的应用前景。特别是在中国生态文明建设的大背景下,生态水文学也将广泛应用于山水林田湖草及城市等共同体的修复和保护等方面。

在森林和草地生态领域,植被生态修复、退耕还林还草及水土流失防治等是中国“十三五”规划、生态文明建设中的重要决策和技术手段^[53]。植被生态修复方面,需开展针对不同区域、植被类型、水分补给情况等条件限制下的植被生理和生态耗水规律研究,探索植被对水文循环的响应关系,估算符合植被生理生态规律的生态需水等,从而提高植被的水分有效利用率。退耕还林还草方面,重点研究植被类型、功能、结构及其空间分布格局,揭示其变化水文效应等,为退耕还林还草提供技术支撑和决策依据。水土流失防治方面,需探索不同水土保持措施对生态水文过程的影响机制,实现小流域侵蚀时空耦合模拟向大中尺度流域的扩展,为中国水土流失防治提供理论基础和技术支持。

在河流湖库和湿地生态领域,以保持河流健康为目标的生态水利工程、河湖生态修复、湿地恢复重建等将在生态水文系统的保护与治理方面有着更为广泛和深入的应用^[54-55]。在生态水利工程设计和建设方面,需探索水利工程建设对关键保护物种栖息地、水力学要素和径流情势、物种群落等的影响特征,促进水利工程从传统防洪兴利调度向生态调度的转变。在河湖生态修复方面,开展生态系统现状调查,制定修复目标和措施;探索生态修复过程中水生生物对河流生境变化的影响机制问题,完善生态修复的效果评价体系等。在湿地生态恢复重建方面,应开展大江大河流域湿地生态需水估算和“水文—生态—社会”系统的综合管控研究;探索面向湿地生态保护和恢复的水系连通理论和关键技术等。

在农业生态领域,将重点探究作物不同尺度需水探测和估算方法、作物需水对变化环境的响应与适应机制^[56];关注从理论和技术上提高农作物水资源利用率、减少田间的无效蒸发,进一步推进农业节水。在城市生态水文领域,将重点关注城市化的生态水文效应及海绵城市建设问题^[57],包括探索林地植被蒸散发、绿色基础设施等对城市热雨岛、径流效应等的缓解机制;通过渠系整治、黑臭水体治理和河湖生态修复等,改善城市河湖的水环境质量、恢复水生态功能等。

本文通过全面回顾生态水文学科发展历程,阐明了学科发展现状与挑战;基于生态水文学研究热点与国家需求,提出了中国生态水文学主要发展趋势,即在重视生态水文要素综合监测和多过程相互作用机理研究的基础上,发展大尺度多过程生态水文模型,推进多学科交融下的生态水文学发展。此外,进一步明确了生态水文学未来发展方向,即构建多源信息融合的综合监测网络、明晰生态水文关键要素的时空格局与演变特征、发展陆地—水生多尺度多要素综合模型、以及“水文—生态—社会”等多学科交叉研究等,为中国生态文明建设顺利实施、“山水林田湖”保护等提供理论支持。

致谢: 本文为中国科学院学部学科发展战略研究项目成果之一,受项目组蔡庆华、常剑波、陈求稳、崔保山、刘敏、卢宏伟、莫兴国、秦伯强、秦华鹏、邱国玉、沈彦俊、宋进喜、王根绪、王彦辉、魏晓华、徐宪立、于澎涛、张明芳、张翔、章光新、赵长森、周国逸、朱广伟等全体成员(以姓氏汉语拼音为序)研究成果的启发,并得到有关专家的指导和宝贵建议,特此感谢。

参考文献(References)

- [1] Nuttle W K. Eco-hydrology's past and future in focus. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 2002, 83(19): 205-212.
- [2] Eagleson P S. Climate, soil and vegetation: 1. Introduction to water balance dynamics. *Water Resources Research*, 1978, 14(5): 705-712.
- [3] Ward J V, Stanford J A. The serial discontinuity concept of lotic ecosystem//Fontaine T D, Bartell S M. *Dynamics of Lotic Ecosystems*. Michigan: Ann Arbor Science, 1983: 29-42.
- [4] Ingram H A P. Ecohydrology of Scottish peatlands. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 1987, 78(4): 287-296.
- [5] Pedroli B. Ecohydrological parameters indicating different types of shallow groundwater. *Journal of Hydrology*, 1990, 120(1-4): 381-404.
- [6] Bragg O M, Brown J M B, Ingram H A P. Modelling the ecohydrological consequences of peat extraction from a Scottish raised mire//Hydrological Basis of Ecologically Sound Management of Soil and Groundwater. Edinburgh: IASH Publication, 1991: 13-22.
- [7] Hensel B R, Miller M V. Effects of wetlands creation on groundwater flow. *Journal of Hydrology*, 1991, 126: 293-314
- [8] Heathwaite A L, Göttlich K. *Mires: Process, Exploitation and Conservation*. Chichester, UK: Wiley, 1993.
- [9] Gieske J M J, Runhaar J, Rolf H L M. A method for quantifying the effects of groundwater shortages on aquatic and wet ecosystems. *Water Science and Technology*, 1995, 31(8): 363-366.

- [10] Wassen M J, Grootjans A P. Ecohydrology: An interdisciplinary approach for wetland management and restoration. *Vegetation*, 1996, 126: 1-4.
- [11] Zalewski M, Janauer G A, Jolankai G. Ecohydrology: A new paradigm for the sustainable use of aquatic resources. UNESCO IHP Technical Document in Hydrology No.7. IHP-V Projects 2.3/2.4. UNESCO Paris, 1997, 60(5): 823-832.
- [12] Poff N L, Allan J D, Bain M B. The nature flow regime: A paradigm for river conservation and restoration. *BioScience*, 1997, 47: 769-784.
- [13] Baird A J, Wilby R L. *Eco-hydrology: Plants and Water in Terrestrial and Aquatic Environments*. Hove: Psychology Press, 1999.
- [14] Acreman M C. *Hydro-ecology: Linking Hydrology and Aquatic Ecology*. Wallingford, UK: IAHS Publication, 2001.
- [15] Eagleson P S. *Ecohydrology: Darwinian Expression of Vegetation Form and Function*. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.
- [16] Wood P J, Hannah D M, Sadler J P. *Hydroecology and Ecohydrology: Past, Present and Future*. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2008.
- [17] Goldsmith G R. Changing directions: The atmosphere-plant-soil continuum. *New Phytologist*, 2013, 199(1): 4-6.
- [18] Buchanan M L, Hart J L. Canopy disturbance history of old-growth *Quercus alba*, sites in the eastern United States: Examination of long-term trends and broad-scale patterns. *Forest Ecology & Management*, 2012, 267(3): 28-39.
- [19] Poff N L, Zimmerman J K. Ecological responses to altered flow regimes: A literature review to inform the science and management of environmental flows. *Freshwater Biology*, 2010, 55: 194-205
- [20] County P G. *Low-impact development design strategies: An integrated design approach*. Prince George's County, Maryland: Department of Environmental Resources, Programs and Planning Division, 1999.
- [21] Van D T C, Dolman A J, Waterloo M J, et al. Optimum vegetation characteristics, assimilation, and transpiration during a dry season: 2. Model evaluation. *Water Resources Research*, 2008, 44(3): 258-260.
- [22] Shao Ming'an, Yang Wenzhi, Li Yushan. Hydraulic resistances and their relative importance in soil-plant-atmosphere continuum (SPAC). *Journal of Hydraulic Engineering*, 1986(9): 10-16. [邵明安, 杨文治, 李玉山. 土壤—植物—大气连续体中的水流阻力及相对重要性. *水利学报*, 1986(9): 10-16.]
- [23] Kang Shaozhong. Distribution of hydraulic resistance in soil-plant-atmosphere continuum. *Acta Ecologica Sinica*, 1993, 13(2): 157-163. [康绍忠. 土壤—植物—大气连续体水流阻力分布规律的研究. *生态学报*, 1993, 13(2): 157-163.]
- [24] Liu Changming. Study on interface processes of water cycle in soil-plant-atmosphere continuum. *Acta Geographica Sinica*, 1997, 52(4): 366-373. [刘昌明. 土壤—植物—大气系统水分运行的界面过程研究. *地理学报*, 1997, 52(4): 366-373.]
- [25] Wang S, Fu B J, Piao S L, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes. *Nature Geoscience*, 2015, 9(1): 38-41.
- [26] Zhou G Y, Wei X H, Chen X Z, et al. Global pattern for the effect of climate and land cover on water yield. *Nature Communications*, 2015, 6: 5918.
- [27] Feng X M, Fu B J, Piao S L, et al. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits. *Nature Climate Change*, 2016, 6(11): 1019-1022.
- [28] Zhu Guangwei, Qin Boqiang, Zhang Yunlin, et al. Variation and driving factors of nutrients and chlorophyll-a concentrations in northern region of Lake Taihu, China, 2005-2007. *Journal of Lake Sciences*, 2018, 30(2): 279-295. [朱广伟, 秦伯强, 张运林, 等. 2005—2017年北部太湖水体叶绿素a和营养盐变化及影响因素. *湖泊科学*, 2018, 30(2): 279-295.]
- [29] Chen Q W, Chen D, Li R N, et al. Adapting the operation of two cascaded reservoirs for ecological flow requirement of a de-watered river channel due to diversion-type hydropower stations. *Ecological Modelling*, 2013, 252: 266-272.
- [30] Xu X B, Tan Y, Yang G S. Environmental impact assessments of the Three Gorges Project in China: Issues and interventions. *Earth-Science Reviews*, 2013, 124(9): 115-125.
- [31] Yu Guirui, Zhang Leiming, Sun Xiaomin. Progresses and prospects of Chinese terrestrial ecosystem flux observation and research network (ChinaFLUX). *Progress in Geography*, 2014, 33(7): 903-917. [于贵瑞, 张雷明, 孙晓敏. 中国陆地生态系统通量观测研究网络(China FLUX)的主要进展及发展展望. *地理科学进展*, 2014, 33(7): 903-917.]
- [32] Montaldo N, Corona R, John D A. On the separate effects of soil and land cover on Mediterranean ecohydrology: Two contrasting case studies in Sardinia, Italy. *Water Resources Research*, 2013, 49(2): 1123-1136.
- [33] Yang Dawen, Cong Zhentao, Shang Songhao, et al. Research advances from soil water dynamics to ecohydrology. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 47(3): 390-397. [杨大文, 丛振涛, 尚松浩, 等. 从土壤水动力学到生态水文学的发展与展望. *水利学报*, 2016, 47(3): 390-397.]
- [34] Zolezzi G, Bellin A, Bruno M C, et al. Assessing hydrological alterations at multiple temporal scales: Adige River, Italy.

- Water Resources Research, 2009, 45: W12421.
- [35] Xia Jun, Shi Wei, Luo Xinpeng, et al. Revisions on water resources vulnerability and adaption measures under climate change. *Advances in Water Science*, 2015, 26(2): 279-286. [夏军, 石卫, 雒新萍, 等. 气候变化下水资源脆弱性的适应性管理新认识. *水科学进展*, 2015, 26(2): 279-286.]
- [36] Vigiak O, Lutz S, Mentzafou A, et al. Uncertainty of modelled flow regime for flow-ecological assessment in Southern Europe. *Science of the Total Environment*, 2018, 615: 1028-1047.
- [37] Blanco- Gutierrez I, Varela- Ortega C, Purkey D R. Integrated assessment of policy interventions for promoting sustainable irrigation in semi- arid environments: A hydro- economic modeling approach. *Journal of Environmental Management*, 2013, 128(6): 144-160.
- [38] Dong Zheren, Sun Dongya, Zhao Jinyong, et al. Holistic conceptual model for the structure and function of river ecosystems. *Advances in Water Science*, 2010, 21(4): 550-559. [董哲仁, 孙东亚, 赵进勇, 等. 河流生态系统结构功能整体性概念模型. *水科学进展*, 2010, 21(4): 550-559.]
- [39] Wang Junna, Dong Zheren, Liao Wengen, et al. An environmental flow assessment method based on the relationships between flow and ecological response: A case study of the Three Gorges Reservoir and its downstream reach. *Science China Technological Sciences*, 2013, 43(6): 715-726. [王俊娜, 董哲仁, 廖文根, 等. 基于水文—生态响应关系的环境水流评估方法: 以三峡水库及其坝下河段为例. *中国科学: 技术科学*, 2013, 43(6): 715-726.]
- [40] Mackay D S, Band L E. Forest ecosystem processes at the watershed scale: Dynamic coupling of distributed hydrology and canopy growth. *Hydrological Processes*, 1997, 11: 1197-1217.
- [41] Mo X G, Liu S X. Simulating evapotranspiration and photosynthesis of winter wheat over the growing season. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 109(3): 203-222.
- [42] Yu Q, Xu S, Wang J, et al. Influence of leaf water potential on diurnal changes in CO₂ and water vapour fluxes. *Boundary-Layer Meteorology*, 2007, 124(2): 166-181.
- [43] Xia Jun, Zhang Xiang, Wei Fangliang, et al. Water system theory and its practices in China. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2018, 16(1): 1-7, 13. [夏军, 张翔, 韦芳良, 等. 流域水系统理论及其在我国的应用. *南水北调与水利科技*, 2018, 16(1): 1-7, 13.]
- [44] Xia J, Zhang Y Y, Xiong L H, et al. Opportunities and challenges of the Sponge City construction related to urban water issues in China. *Science China: Earth Sciences*, 2017, 60(4): 652-658
- [45] Gao Yang, Yu Guirui, Biogeochemical cycle and its hydrological coupling processes and associative controlling mechanism in a watershed. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(7): 1381-1393. [高扬, 于贵瑞. 流域生物地球化学循环与水文耦合过程及其调控机制. *地理学报*, 2018, 73(7): 1381-1393.]
- [46] Zhang Y Y, Shao Q X. Uncertainty and its propagation estimation for an integrated water system model: An experiment from water quantity to quality simulations. *Journal of Hydrology*, 2018, 565: 623-635.
- [47] Renard B, Kavetski D, Kuczera G, et al. Understanding predictive uncertainty in hydrologic modeling: The challenge of identifying input and structural errors. *Water Resources Research*, 2010, 46: W05521.
- [48] Zhang Y Y, Shao Q X, Taylor J A. A balanced calibration of water quantity and quality by multi-objective optimization for integrated water system model. *Journal of Hydrology*, 2016, 538: 802-816.
- [49] Ouyang Z Y, Zheng H, Xiao Y, et al. Improvements in ecosystem services from investments in natural capital. *Science*, 2016, 352: 1455-1459.
- [50] Zhai X Y, Xia J, Zhang Y Y. Water quality variation in the highly disturbed Huai River Basin, China from 1994 to 2005 by multi-statistical analyses. *Science of the Total Environment*, 2014, 496: 594-606.
- [51] Cheng Guodong, Xiao Honglang, Fu Bojie, et al. Advances in synthetic research on the eco-hydrological process of the Heihe River Basin. *Advances in Earth Science*, 2014, 29(4): 431-437. [程国栋, 肖洪浪, 傅伯杰, 等. 黑河流域生态—水文过程集成研究进展. *地球科学进展*, 2014, 29(4): 431-437.]
- [52] Li X, Cheng G D, Liu S M, et al. Heihe Watershed Allied Telemetry Experimental Research (HiWATER): Scientific objectives and experimental design. *Bulletin of American Meteorological Society*, 2013, 94(8): 1145-1160.
- [53] Wang Genxu, Qian Ju, Cheng Guodong. Current situation and prospect of the ecological hydrology. *Advances in Earth Science*, 2001, 16(3): 314-323. [王根绪, 钱鞠, 程国栋. 生态水文科学研究的现状与展望. *地球科学进展*, 2001, 16(3): 314-323.]
- [54] Zhang Y Y, Zhai X Y, Shao Q X, et al. Assessing temporal and spatial alterations of flow regimes in the regulated Huai River Basin, China. *Journal of Hydrology*, 2015, 529: 384-397.
- [55] Zhang Guangxin, Zhang Lei, Feng Xiaqing, et al. *Wetland Ecohydrology and Water Resources Management*. Beijing: Science Press, 2014. [章光新, 张蕾, 冯夏清, 等. 湿地生态水文与水资源管理. 北京: 科学出版社, 2014.]

- [56] Kang Shaozhong, Huo Zailin, Li Wanhong. High-efficient water use and eco-environmental impacts in agriculture in arid regions: Advance and future strategies. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2016(3): 208-212. [康绍忠, 霍再林, 李万红. 旱区农业高效用水及生态环境效应研究现状与展望. *中国科学基金*, 2016(3): 208-212.]
- [57] Liu Changming, Zhang Yongyong, Wang Zhonggen, et al. The LID pattern for maintaining virtuous water cycle in urbanized area: A preliminary study of planning and techniques for sponge city. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(5): 719-731. [刘昌明, 张永勇, 王中根, 等. 维护良性水循环的城镇化LID模式: 海绵城市规划方法与技术初步探讨. *自然资源学报*, 2016, 31(5): 719-731.]

Progress of ecohydrological discipline and its future development in China

XIA Jun^{1,2}, ZHANG Yongyong², MU Xingmin^{3,5}, ZUO Qiting⁴,
ZHOU Yujian², ZHAO Guangju^{3,5}

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, CAS and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China; 4. School of Water Conservancy & Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 5. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Agriculture & Forestry University, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: Ecohydrology is a key discipline developed in recent decades, which can give aid in the protection and restoration of complex ecological systems (e.g., mountain, river, forest, farmland, lake), ultimately promoting the ecological civilization construction and the green development of China. In this paper, the progress and existing challenges of ecohydrological discipline are elaborated, and the future development directions are proposed according to the international scientific frontiers and national demands on ecological civilization construction. The main directions are to develop new ecohydrological monitoring methods and improve comprehensive observation network of ecohydrological systems; to perfect the ecohydrological mechanisms and their basic theories; to promote the integrations of multi-scales and multi-elements by considering both terrestrial and aquatic ecosystems; to promote the multidisciplinary integrations between ecohydrology and social sciences. Furthermore, specific future research interests in China are proposed as follows: multi-source information fusion and comprehensive monitoring system construction, spatio-temporal patterns of key ecohydrological elements and their variation characteristics; integrated models of ecological, hydrological and economic processes and their uncertainty estimation; interdisciplinary studies including physical and social sciences. The application prospective in China is further explicated in a variety of ecosystems (e.g., forest, grassland, river and lake, wetland, farmland and urban area). This paper is expected to provide a reference to support the development strategy of the ecohydrological discipline in China, and to give a theoretical foundation and technical support for the implementation of national ecological civilization construction.

Keywords: ecohydrological discipline; theory and method; comprehensive observation; mathematical modelling; scale issue