

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2018.05.014

# 湿地生态水文学研究综述

章光新<sup>1</sup>, 武 瑶<sup>1</sup>, 吴燕锋<sup>1,2</sup>, 刘雪梅<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130102; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 基于湿地生态水文研究文献计量分析, 透视国内外有关湿地水文、生态水文和水资源等领域的重大研究计划和重要学术会议, 系统总结了湿地生态水文学发展历程, 可分为萌芽起步阶段(20 世纪 50 年代至 80 年代)、研究探索阶段(20 世纪 90 年代)和快速发展阶段(21 世纪以后)3 个阶段, 列举了重要代表性研究成果, 并重点阐述了湿地生态水文学研究进展; 基于对国际湿地生态水文学发展历程、研究进展及热点的综合分析, 未来湿地生态水文学研究主要向基于“多要素、多过程、多尺度”的湿地生态水文相互作用机理及耦合机制、气候变化对湿地生态水文的影响机理及适应性调控、湿地“水文-生态-社会”耦合系统互作机理及互馈机制和基于湿地生态需水与水文服务的流域水资源综合管理等方向发展。最后, 以国家重大需求为导向, 提出了未来中国湿地生态水文学优先发展方向及建议。

**关键词:** 湿地生态水文过程; 湿地生态水文模型; 湿地生态水文调控; 气候变化; 水资源综合管理

**中图分类号:** TV11; G353.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2018)05-0737-13

湿地与森林、海洋并称为全球三大生态系统, 是自然生态空间的重要组成部分, 在涵养水源、净化水质、蓄洪抗旱、调节气候和维护生物多样性等方面发挥着重要功能, 支撑着人类的经济社会和生存环境的可持续发展。湿地水文过程在湿地的形成、发育、演替直至消亡的全过程中都起着直接而重要的作用。在全球气候变化与人类活动影响的共同作用下, 湿地-流域水循环及其伴生的物理、化学及生物过程发生了深刻变化, 导致湿地水文情势改变、水资源短缺、水质恶化、面积萎缩和功能退化<sup>[1-3]</sup>。据生物多样性和生态系统服务政府间科学-政策平台(IPBES)报告, 过去 300 年来全球有 87% 的湿地损失, 自 1900 年以来全球有 54% 的湿地损失<sup>[4]</sup>, 已成为全球遭受破坏最为严重的生态系统之一。据第二次全国湿地资源调查(2009—2013 年)结果显示, 全国湿地面积 5 360.25 万  $\text{hm}^2$ , 湿地率为 5.58%, 远低于世界 8.6% 的平均水平。其中自然湿地总面积 4 667.47 万  $\text{hm}^2$ , 占全国湿地总面积的 87.08%, 与 2003 年第一次调查同口径比较, 自然湿地面积减少了 337.62 万  $\text{hm}^2$ , 减少率为 9.33%。当前, 也是中国湿地水安全和生态安全面临的重大问题, 影响并制约着中国经济社会可持续发展, 成为中国水资源可持续利用和水生态文明建设亟需解决的重要课题。

在上述背景下, 为了解决湿地生态系统水与生态退化等日益严峻问题, 寻求一种面向湿地生态保护与恢复的水文调控与水资源可持续管理范式, 进而维持湿地生态系统健康、恢复与提升湿地生态系统服务功能, 从而产生了湿地生态水文学这一新兴应用学科, 并在湿地生态系统保护与利用的实践需求驱动下, 极大地促进和推动了湿地生态水文学学科发展。湿地生态水文学以湿地生态系统为研究对象, 揭示不同时空尺度湿地生态格局和生态过程的水文学机制, 是研究湿地水文过程如何影响以湿地植物为主要组分的生物过程及其反馈机制的生态学和水文学的交叉学科, 对湿地生态保护与修复、水资源综合管理和应对气候变化等具有极其重要的意义, 是生态学家和水文学家关注的焦点。

国内一些学者曾对湿地水文、湿地生态水文过程、湿地生态水文模型和湿地水资源管理进行了介绍和分

收稿日期: 2018-01-02; 网络出版时间: 2018-09-12

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20180910.1516.004.html>

基金项目: 中国科学院学部学科发展战略研究项目(2017DXA); 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0406003)

作者简介: 章光新(1971—), 男, 安徽池州人, 研究员, 博士研究生导师, 主要从事水文水资源与湿地生态水文等方面研究。E-mail: zhgx@iga.ac.cn

析<sup>[1,5-10]</sup>,对推动中国湿地生态水文学学科发展起到了积极作用。目前,国内外缺乏对湿地生态水文学系统的论述。本文系统总结湿地生态水文学发展历程和代表性成果,重点阐述和剖析湿地生态水文学研究进展及热点,提出湿地生态水文学研究的关键科学问题及发展趋势,以国家重大需求为导向,提出未来中国湿地生态水文学优先发展方向及建议。

## 1 发展历程及研究进展

20世纪50年代起,湿地生态学和水文学不断发展,逐渐交叉融合产生了湿地生态水文学这一新兴学科。随着相关学科理论方法和实验观测技术的进步,湿地生态水文学研究蓬勃发展。在湿地生态水文研究文献计量分析的基础上,透视国内外有关湿地水文、生态水文和水资源等领域的重大研究计划和重要学术会议,同时结合人类社会探寻解决淡水资源危机、水环境恶化和生态退化等问题最佳途径的认识历程,湿地生态水文学研究的发展可分为萌芽起步(20世纪50年代至80年代)、研究探索(20世纪90年代)和快速发展(21世纪以后)3个阶段,并取得了一些代表性成果(表1)。

表1 湿地生态水文学发展历程及代表成果

Table 1 Development progress of research on wetland ecohydrology and representative research achievements

时间	阶段名称	重要经历(代表成果)
20世纪50年代至80年代	萌芽起步阶段	出版了涉及湿地生态水文研究的《Wetlands》和《Wetland Modelling》等著作;湿地生态系统水文特征研究有了长足进步,开展了湿地水文过程与植被相互关系的初步研究;基于湿地生态-水文过程研究,1987年首次提出了生态水文学(Ecohydrology)概念;中国湿地生态水文研究刚刚起步。
20世纪90年代	研究探索阶段	1992年国际水与环境大会上正式将生态水文学确定为一门独立的学科,湿地生态水文学研究引起国际社会和学者的关注和重视;首次提出了“基本生态需水量”概念,湿地生态需水量研究兴起。“3S”技术开始应用到湿地生态水文研究中,出现了基于生态-水文模型耦合的湿地生态水文模型;中国科学院东北地理与农业生态研究所三江平原开展了沼泽湿地蒸散发、水量平衡和水动力模拟等研究,促进了中国湿地生态水文研究的发展。
21世纪以后	快速发展阶段	21世纪被喻为湿地保护与恢复的世纪,国内外开启了一系列涉及“湿地水文、生态水文与水资源”主题的重大研究计划;研究的重点主要集中在湿地生态水文过程与模型、生态需水、生态水文调控与水资源管理、气候变化对湿地生态水文的影响等方面;湿地生态水文模型向基于“多要素、多过程”的复杂耦合模型发展;开始关注和重视湿地生态水文系统与社会经济系统协同耦合机制研究;中国湿地生态水文学研究逐渐与国际接轨,出版了《湿地生态需水机理、模型和配置》和《湿地生态水文与水资源管理》等著作。

### 1.1 萌芽起步阶段(20世纪50年代至80年代)

这一时期的特点是湿地研究逐渐走向系统化和国际化,水文学研究开始关注与水相关的环境和生态问题,出现了湿地生态学与水文学两个学科的交叉融合,源于湿地生态系统管理与恢复的研究,提出了生态水文学概念,促进了湿地生态水文学的发展。

湿地研究最早起源于16世纪欧洲的泥炭利用,此时的研究工作仅为一些零散、不系统的基础研究。20世纪50年代,湿地研究逐渐走向系统化和国际化。20世纪70年代起,不少国家成立了湿地研究的专门组织,如美国湿地科学家协会和加拿大国家湿地工作组等。1971年,《关于特别是作为水禽栖息地的国际重要湿地公约》(简称《湿地公约》或《拉姆萨尔公约》)签署,旨在通过全球各国政府间的共同合作,以保护湿地及其生物多样性。1982年,第一届国际湿地大会在印度召开,标志着湿地科学进入蓬勃发展期,大量科学著作和论文问世。其中,国际湿地学会主席 Mitsch 撰写的《Wetlands》<sup>[11]</sup>是当时湿地研究介绍最全面、最系统的一部著作,代表了当时国际湿地理论综合研究的最高水平,对湿地水文过程及其对湿地生态的重要性进行了阐述。

水文学研究开始关注与水相关的环境和生态问题。联合国教科文组织“国际水文十年计划(IHD)”(1965—1974年)的末期,过去单纯的水文物理学过程研究中逐渐有了环境和生态方面的内容,水文学研究与其他学科产生了交叉和融合。Hynes<sup>[12]</sup>试图结合生态过程和水文过程,初步分析了影响底栖无脊椎动物以及鱼类生长及数量的水文因素。20世纪80年代,学者们对河流生态学研究的相关理论进行了探索,Vannote等<sup>[13]</sup>提出了“河流连续体”概念,即在天然河流系统中,生物种群形成一个从河源到河口的逐渐变化时空连续体。但人类活动会显著干扰连续体,Ward和Stanford<sup>[14]</sup>提出了基于人类活动干扰作用的“序列不连续

体”概念。随后, Junk 等<sup>[15]</sup>提出了“洪水脉动”概念, 着重强调了河道与冲积平原之间的物质和能量交换, 认为是维持河流、河滨湿地及冲积平原生态系统的主要驱动力, 被河流生态专家广泛接受和使用。

综上, 湿地生态水文学研究在发展的过程中逐渐产生了交叉融合, 相关理论发展和技术进步为湿地生态水文学研究的发展奠定了基础。20 世纪 70 年代起, 学者们对湿地水分循环与水量平衡进行了初步研究, 提出了模拟湿地植被对降水截留损失的 Rutter 模型<sup>[16]</sup>和 Gash 模型<sup>[17]</sup>, 并对湿地水生植被的蒸散量进行了估算<sup>[18]</sup>。同时, 一系列针对湿地植物与水分关系的研究相继展开, 如湿地植物对积水环境的适应机制<sup>[19-20]</sup>、湿地植被与地下水位的相互关系<sup>[21-22]</sup>和植被对水分动态的影响等<sup>[23]</sup>, 但此类研究大多只是进行了简单相关分析<sup>[24-25]</sup>。Ingram<sup>[26-27]</sup>在对苏格兰泥炭湿地结构、水文过程、植被分布及其相互关系进行了大量研究的基础上, 首次提出了生态水文学这一概念。1989 年在美国华盛顿召开的第 28 届国际地质大会上, 设有专门的湿地水文地质学专题研讨会, 议题涉及湿地-地下水相互作用、湿地-河流相互作用、湿地水文地貌-植被相互作用等多个方面, 10 篇具有代表性的文章发表在《Journal of Hydrology》特刊上, 大大促进了对湿地生态水文学研究内涵的理解。同时, 国内学者也开展了三江平原沼泽湿地蒸散发以及沼泽湿地对河川径流的影响研究<sup>[28]</sup>。

20 世纪 80 年代起, 出于湿地生态系统管理的需要, 湿地生态系统功能的定量化研究逐步得到重视。1981 年、1983 年国际科联环境问题科学委员会和联合国环境规划署举办的两届“淡水湿地和浅海水域生态系统动力学”国际研讨会, 数学模型和概念模型在湿地生态研究与管理中的应用均被作为重要研讨内容, 学者们逐渐意识到湿地生态水文模型在湿地生态系统管理中的重要性<sup>[29]</sup>。1984 年, 在捷克斯洛伐克召开的第二届国际湿地大会, 设有湿地模拟专题, 大大推动了湿地模拟研究的进程。1988 年 Mitsch 等<sup>[30]</sup>总结了当时国际学者的研究成果, 出版了《Wetland Modelling》著作, 对不同类型湿地模型进行了系统介绍, 大多是单独针对湿地水文过程或湿地生态功能变化展开研究, 较少将二者相结合。

## 1.2 研究探索阶段(20 世纪 90 年代)

生态水文学被正式确定为一门独立的学科, 湿地生态水文学研究逐渐引起国际社会和学者的关注和重视, 其研究内容进一步丰富和拓展, 从单一的湿地水文指标与生态系统状态指标简单相关性研究发展为湿地生态过程与水文过程的相互作用机制研究, 首次提出了“基本生态需水量”概念, 湿地生态需水研究兴起。随着“3S”技术的引入, 湿地生态水文模型得到进一步发展, 出现了基于生态-水文模型耦合的湿地生态水文模型。

1992 年在都柏林召开的国际水与环境大会上, 正式将 Ingram 提出的“生态水文学”确定为一门独立的学科, 随后各国学者展开了广泛的研究。湿地水循环研究更加深入, 学者们对不同类型湿地植被的截流作用<sup>[31-32]</sup>及其与降雨时长<sup>[33]</sup>的关系等进行研究。Gilver 和 Meinnes<sup>[34]</sup>根据不同水循环要素的存在形式及参与程度, 对湿地水循环模式进行了分类, 将其分为雨养湿地、地表水湿地、地下水湿地和多水源湿地等 12 类。学者们更加重视对湿地生态水文系统的定量化以及湿地生态过程与水文过程的相互作用机制研究。Wassen 等<sup>[35]</sup>对波兰 Biebrza 河流域 58 块湿地的植被种类及分布、地下水以及洪水的化学组成进行研究, 探讨了湿地植被梯度、地下水流以及洪水之间的关系。Jamesk 等<sup>[36]</sup>研究了平坦湿地生态水文过程, 并采用模型方法模拟湿地生态过程和水文过程, 探索两者的时空耦合机制。“3S”技术的引入, 使得构建基于生态-水文模型耦合的湿地生态水文模型成为现实。Poiani 和 Johnson<sup>[37]</sup>构建了一个描述湿地植被动态变化的空间分布模拟模型, 包括用于降水、径流和潜在蒸散发模拟预测水文子模块和基于 GIS 计算水面和植被的分布及组成的生态子模块。在国内, 崔丽娟<sup>[38]</sup>利用集总式模型对三江平原别拉洪河流域沼泽生态系统的水量平衡进行了研究; 倪晋仁等<sup>[39]</sup>提出了湿地水动力学模拟方法, 并在深圳湾进行了实践探索。

由于经济发展和人口快速增长, 导致过度开发利用水资源, 使得湿地面临严重的缺水形势, 湿地数量和质量急剧下降。Gleick<sup>[40]</sup>提出了基本生态需水量的概念, 即提供一定质量和数量的水给天然生境, 以求最大程度改变天然生态系统的过程, 并保护物种多样性和生态整合性。随后, 学者们提出了一系列河流生态需水评估方法, 其中代表性的方法有 Richter 等<sup>[41]</sup>提出的变化范围法和 Bovee 等<sup>[42]</sup>完善的河道内流增量法, 对湿地生态需水评估具有重要的参考价值。

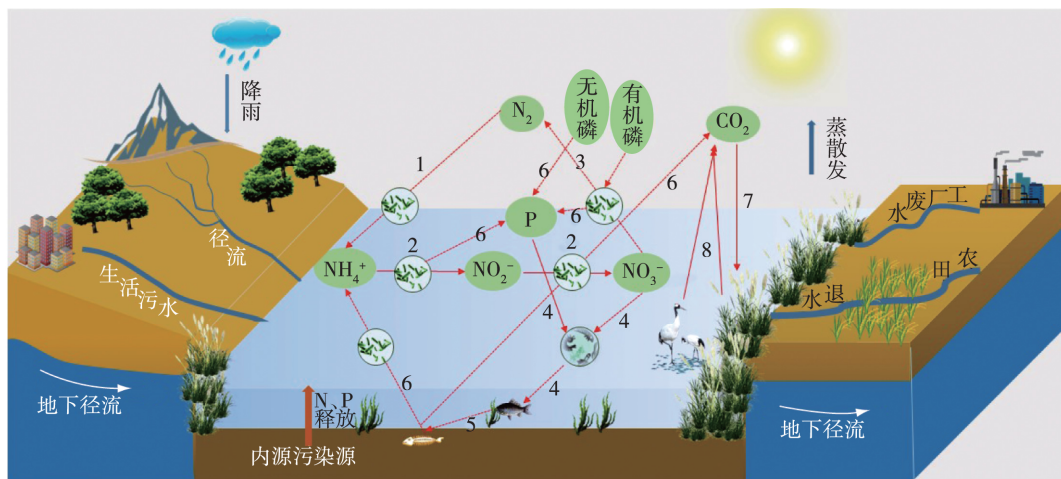
1994 年在曼彻斯特召开的第六届国际生态学会上, Martin Wassen 博士作为召集人组织了以湿地生态水

文研究为主题的研讨会。第5届国际湿地会议于1996年在澳大利亚珀斯(Perth)举行,大会的主题是“湿地的未来”,指出了水文学和生态学原理与方法在湿地生态系统管理中具有重要的指导作用。1998年在波兰Lodz召开的UNESCO/IHP-V2.3、2.4关于生态水文学的专项研究会议,其议题包括了模型尺度探索、水文过程的生态环境效应以及水文格局的生态效应等。这些会议的举办大大推动了湿地生态水文学的发展。

### 1.3 快速发展阶段(21世纪以后)

21世纪被喻为湿地保护与恢复的世纪,国际地圈生物圈计划(IGBP)、国际水文计划(IHP)和中国重大科学研究计划(如国家“973”计划、国家重点研发计划、国家科技支撑和中国科学院知识创新工程等)开启了一系列涉及湿地水文、生态水文与水资源的重大研究课题,为湿地保护与恢复对水文水资源的需求提供了强有力的科技支撑<sup>[4]</sup>。湿地生态水文学研究以湿地生态系统恢复、保护与服务为导向,重点集中在湿地生态水文过程与模型、生态需水、生态水文调控与水资源管理、气候变化对湿地生态水文的影响等方面。同时,开始关注和重视湿地生态水文系统与社会经济系统协同耦合机制研究。在中国,湿地生态水文研究比较系统的代表性著作有《湿地生态需水机理、模型和配置》<sup>[43]</sup>和《湿地生态水文与水资源管理》<sup>[5]</sup>等。

湿地水循环过程及其伴生的物质循环和能量流动,是湿地生态系统形成与演化的关键要素(图1)。湿地生态水文过程包括湿地生态水文物理过程、湿地生态水文化学过程和湿地水文过程的生态效应三部分<sup>[44]</sup>。目前,利用遥感和同位素等新技术对湿地植被对降水截留、湿地水循环以及植被水源来源进行了深入研究<sup>[45-46]</sup>;全球气候变化和人类活动导致的水文情势改变与盐分聚集已造成大面积的湿地退化和盐渍化,并严重威胁全球淡水湿地生态系统的稳定和健康<sup>[47]</sup>,澳大利亚和中国学者开展了大量水盐变化对湿地物种耐盐阈值及机理、生物多样性和群落结构与功能的影响以及湿地植被空间分异规律等方面的研究,为湿地水文条件和植被恢复提供科学依据<sup>[36 48-52]</sup>。湿地生态水文模型是用于描述和模拟湿地生态-水文相互作用关系、过程机理及互馈机制的数学模型。近年来,学者们主要基于现有的水文模型或生态模型,修改或增加相应的湿地模块,应用于湿地生态水文过程模拟与分析,具有代表性的耦合湿地模块的流域水文模型有:MIKE SHE/FLOOD/11/NAM、改进的SWAT模型和PHYSITEL/HYDROTEL模型平台<sup>[53-56]</sup>。随着湿地模块研发、湿地水文-水质耦合模型(WETSAND)和湿地水动力-水质耦合模型的发展以及生态模拟技术进步,湿地生态水文模型向水文-水动力-水质-生态响应综合模型发展<sup>[47 57-60]</sup>。



1. 固氮作用; 2. 硝化作用; 3. 反硝化作用; 4. 消耗; 5. 死亡; 6. 分解作用; 7. 光合作用; 8. 呼吸作用

图1 湿地水循环与物质循环过程示意

Fig. 1 Schematic diagram of the processes of water circulation and material circulation in wetland

生态需水机理本质上就是生态系统对不同水文情势的响应规律,主要集中在对水文情势指标与生态指标之间关系的定性或定量描述。对湿地生态系统而言,存在“水文情势→生境→生物群落”的决定关系。对湖泊湿地来说,水位—水面面积以及水量—水位关系是水文—生境关系研究中考虑的重点,该关系曲线是

定湖泊湿地生态需水的重要参考<sup>[60]</sup>。湿地生态需水量具有阈值性、时空变异性和目标性等特征, 常规计算方法有水文法、生态法和生态水文法。目前, 湿地生态需水的研究比较系统全面, 对水分-生态的耦合作用机理有着科学的认识, 在此基础上计算各类型湿地生态需水量, 强调水资源在整个湿地生态系统中的地位和作用<sup>[61-62]</sup>。随着湿地生态水文要素动态监测的开展, 在全面了解湿地水文-生态指标的耦合关系基础上, 构建湿地水文-水动力-水质-生态响应综合模型, 精细化计算湿地生态需水量是今后发展的趋势。

湿地水文情势自然、合理的波动是维持湿地水文环境及其生物多样性最重要的驱动力之一, 湿地生态水文调控是恢复湿地水文情势的重要途径和手段。湿地生态水文调控不仅要解决“水少”的问题(如何补水), 还要解决“水多”的问题(如何排水), 依据湿地水文、水质与生物的相互作用关系, 以恢复与维持湿地生态系统“合理的水文情势、安全的水质标准和良好的生态功能”为目标, 对湿地生态系统进行水文水资源调控, 实现湿地生态效益、经济效益和社会效益协调统一和最大化。湿地生态水文调控技术包括湿地水文情势恢复的多维调控、洪泛平原洪水管理与湿地水文过程恢复、湿地-河流水系连通、地表水-地下水联合调控、水库生态调度和生态补水等技术。湿地生态水文调控的成功案例较多, 较为典型的是美国从密西西比河引水补给新奥尔良海岸湿地的卡那封郡引水工程, 从而有效控制了湿地面积大幅度萎缩<sup>[63]</sup>, 中国扎龙、向海和白洋淀等国际重要湿地实施的生态补水工程, 取得了良好的生态、经济和社会效益<sup>[60, 64-65]</sup>。目前, 正在实施的吉林省西部河湖水系连通工程是中国最大的面向湿地恢复与保护的生态水利工程, 恢复河流-湖沼湿地水文连通性, 同时解决湿地“水少”、“水多”和“水脏”的问题, 保障湿地水量和水质需求目标<sup>[66]</sup>。

湿地生态系统是流域水循环和水资源的重要组成部分, 既是供水户又是用水户, 如何将湿地供水与用水纳入到流域水资源综合规划与管理中, 维持流域水资源可持续利用和湿地健康水循环, 实现流域“人-水-湿地”和谐是新时期流域水资源管理的重要目标之一。2004年第七届国际湿地会议中, 将“流域管理在湿地和水资源保护中的作用”列为主题之一; 2009年世界湿地日的主题是“从上游到下游, 湿地连着你和我”, 呼吁运用流域综合管理的方法来推进湿地生态保护与修复。鉴于流域与湿地之间密切联系, 章光新和郭跃东<sup>[67]</sup>提出了流域湿地的概念, 即把湿地作为重要的水文单元纳入到流域中去研究, 这不仅有利于湿地的保护和管理, 而且也凸显了湿地在维系流域水安全和生态安全中的重要作用。《湿地公约》手册中提出了流域湿地生态配水与水管理框架(图2), 从国家层面上制定湿地保护法律法规、政策制度和决策框架, 宣传和鼓励利益相关者参与湿地保护, 在国家宏观政策指导下, 流域或地方管理机构采取适应性管理、长期规划和科学监测等原则和措施, 分析水文情势变化对湿地的影响, 评估湿地生态系统服务功能, 从而制定湿地生态保护目标并确定其生态需水量, 从流域层面上进行水资源合理调配和综合管理, 确保湿地合理生态用水量<sup>[68-69]</sup>。

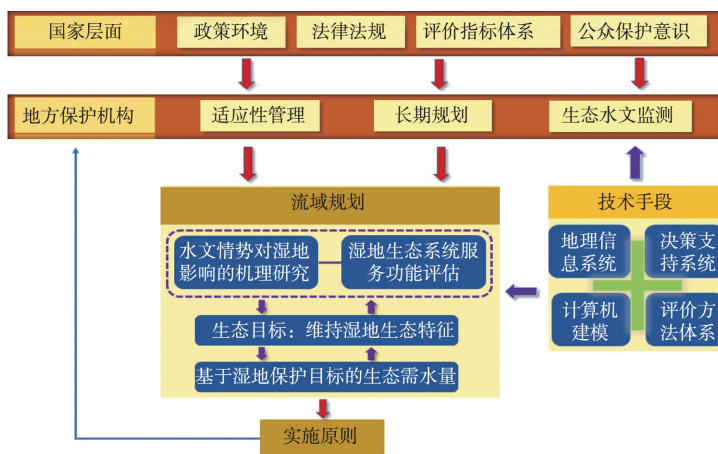


图 2 流域湿地生态配水与水管理框架

Fig. 2 Conceptual framework of ecological water allocation and water resources management for wetlands within a watershed



气候变化通过改变全球水文循环的现状而引起水资源在时空上的重新分布,导致大气降水的形式和数量发生变化;同时,气候变化对气温、辐射、风速、CO<sub>2</sub>浓度以及洪水干旱水文极值事件发生频率和强度等造成直接影响,从而改变湿地水文循环过程和水质情势,进而对湿地生态过程产生深远的影响<sup>[70]</sup>。Acreman 等<sup>[71]</sup>初步构建了气候变化对湿地生态水文的影响评估框架,在确定研究目标、湿地类型以及气候变化情景的基础上,根据湿地植被环境(如水文条件等)选择相应的气候模型和变量,气候变量如降雨、温度、风速等作为湿地生态水文模型的输入,预测湿地相关变量对未来气候变化的响应。气候变化通过影响湿地水文过程、生态过程及生态格局,进而影响湿地水文功能的发挥。Walters 和 Babbar-Sebens<sup>[72]</sup>基于误差修正后的气候驱动的 SWAT 模型,评价了气候变化下湿地对美国印第安纳中部 Eagle Creek 流域水文过程尤其是洪峰流量的影响,认为气候变化在一定程度上影响湿地水文功能。Fossey 等<sup>[55]</sup>基于 PHYSITEL/HYDROTEL 水文模型、野外实测及稳定同位素技术,认为湿地类型不同(如孤立湿地和河滨湿地等),气候变化对湿地水文情势和水文功能的影响不同。众多学者在北美大草原湿地就气候变化-水文动态-湿地植被响应等方面开展了广泛而深入的研究,在可用于气候变化下湿地水文与植被动态模拟的 WETSIM 系列模型改进的基础上发展了 WETLANDSCAPE 模型,集中在气候暖化对湿地水文情势、栖息地功能、水文功能等影响的研究,研究表明 20 世纪气候变化引起北美大草原湿地积雪、径流减少和蒸散发增加,导致湿地水文情势和功能的变化,表现为湿地水位下降、水文周期缩短、干旱化增强、栖息地减少和生物生产力减少,且未来气温增加 1.5~2.0 °C 会导致北美大草原湿地栖息地的丧失和水文功能的消失,为应对气候变化湿地保护和恢复提供生态水文学依据<sup>[73-74]</sup>。

人类社会经济活动对湿地生态水文系统的影响与反馈的双向作用越来越显著,一些学者开始探讨基于湿地研究背景下的社会科学和自然科学的模型、概念、信息的集成,在湿地管理中引入了生态经济学原理,运用水文-生态-经济模型评价湿地管理方案(图 3),阐释湿地生态水文系统与社会经济系统协同耦合关系<sup>[75]</sup>。

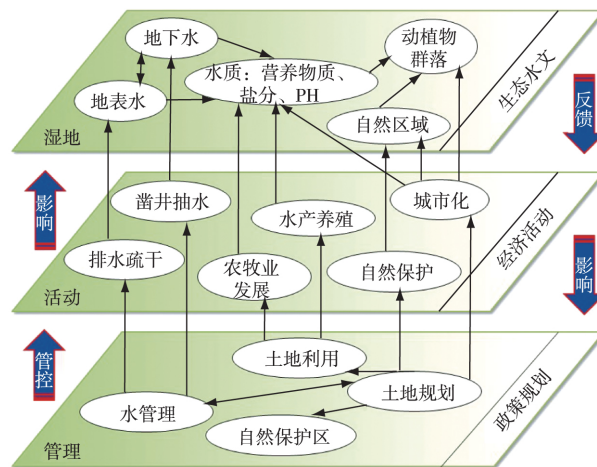


图 3 湿地水文-生态-经济协调发展研究思路

Fig. 3 Research methodology of coordinated development for wetland hydrological-ecological-economical system

## 2 发展趋势及关键科学问题

基于对国际湿地生态水文学发展历程、研究进展及热点的综合分析,从基础理论与应用实践两个层面上提出了未来湿地生态水文学研究发展主要方向及亟须解决的四大关键科学问题。基础理论方面重点解决的关键科学问题:基于“多要素、多过程、多尺度”的湿地生态水文相互作用机理及耦合机制。应用实践方面重点解决的关键科学问题:① 气候变化下湿地生态水文响应机理及适应性调控;② 湿地“水文-生态-社会”耦合系统的互作机理及互馈机制;③ 基于湿地生态需水与水文服务的流域水资源综合管控。四大关键科学问题相互联系见图 4。

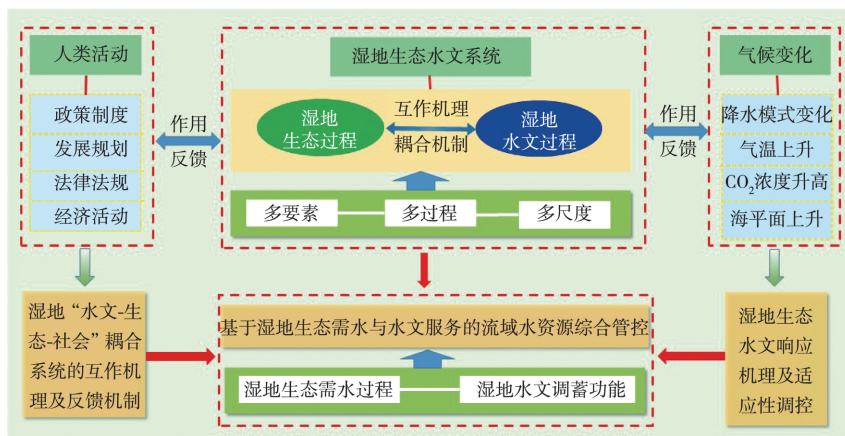


图 4 四大关键科学问题相互联系

Fig. 4 Interrelation of four key scientific issues

### 2.1 基于“多要素、多过程、多尺度”的湿地生态水文相互作用机理及耦合机制

湿地水循环是物质迁移转化的基础,是决定湿地生态系统类型、结构与功能的关键。“多要素”是指湿地水文、水质和生态三大要素,其中水文要素包括水位、流速、流量和水文周期等。“多过程”是指湿地水文过程、水动力过程、生物地球化学过程和生态过程等。“多尺度”是指湿地生态系统的个体、种群、群落、生态系统、景观、流域乃至全球尺度,湿地的水文响应单元、集水区、流域乃至全球尺度。湿地水文过程、水动力过程、水化学过程与生态过程的相互作用机理,湿地生态水文过程多尺度转化与耦合机制以及基于“多要素、多过程、多尺度”的湿地生态水文综合模型研发是未来湿地生态水文学发展的主攻方向。

### 2.2 气候变化下湿地生态水文响应机理及适应性调控

湿地是敏感的水文系统,全球气候变化导致降水模式变化、气温上升、CO<sub>2</sub>浓度升高和海平面上升等,均会影响和改变湿地的水循环过程与水文情势,进而影响湿地生态系统的结构、功能和演替。揭示关键气候因子变化与湿地生态水文要素之间的相互作用过程和机理,创建湿地气候-水文-生态过程耦合模型,预测未来气候变化情景下湿地水文情势变化及生态演替趋势,提出湿地水资源管理与生态保护协调的适应性调控策略,是湿地生态水文学研究的前沿科学问题之一。

### 2.3 湿地“水文-生态-社会”耦合系统的互作机理及互馈机制

国际水文科学协会(IAHS)于2013年正式发布并启动了Panta-Rhei十年科学计划(2013—2022年),主题是“处于变化中的水文科学与社会系统”,强调人水系统之间的互馈机制及其变化<sup>[76]</sup>。随着社会系统中的政策制度、发展规划、法律法规和经济活动等要素变化对湿地生态水文过程及其服务功能的影响作用越来越强,从单纯的湿地生态水文系统研究向湿地“水文-生态-社会”耦合系统研究发展,能更好地解决高强度人类活动干扰下的湿地生态水文问题。有机整合生态水文学、生态经济学和社会水文学研究的有关理论和方法,研究湿地生态水文系统与社会经济系统的耦合机理及互馈机制,构建湿地水文-生态-社会协调发展耦合模型,实现水资源在湿地生态系统与社会经济系统中优化配置和高效利用,保障湿地生态用水的需求,促进湿地“水文-生态-社会”系统协调可持续发展,实现“人-水-湿地”和谐。

### 2.4 基于湿地生态需水与水文服务的流域水资源综合管控

流域水资源开发利用要与湿地保护紧密结合,2008年章光新等提出了面向湿地生态需水的流域湿地水资源合理配置研究的思路和框架<sup>[1]</sup>,将湿地作为优先用水户,通过面向生态的水资源配置,确保湿地生态用水量<sup>[77]</sup>。随着中国水资源精细化管理理念的提出和研究落实工作的推进,一方面湿地作为用水户,精细化计算湿地生态需水量,依据湿地生态需水过程,综合考虑湿地“水量-水质-效益”协调统一,对流域水资源进行统筹、精准和高效配置,保障湿地生态用水量;另一方面发挥湿地水资源供给和水文调蓄服务功能,满足生活、工业、农业等社会经济用水的同时,优化水资源天然配置和丰枯调剂,是流域湿地水资源综合管

理亟须解决的关键科学问题。

### 3 优先发展方向及建议

基于国际湿地生态水文学研究热点及科学前沿和中国湿地生态水文现状及存在的问题的综合分析,紧密结合新时期中国湿地保护修复工程、大江大河流域生态安全保障和应对气候变化等国家重大需求,以国家重大任务推动学科纵深发展,两者相互促进、相得益彰。建议优先考虑以下研究方向。

#### 3.1 湿地生态水文学研究理论方法与技术创新

为了加强和推进湿地生态水文学学科建设和发展,当务之急在国家重要湿地(含国际重要湿地)和地方重要湿地构建水文、水质和生态监测网络体系,并结合湿地多源遥感动态监测,强化湿地生态-水文过程互作机理及定量模拟研究。同时,大力推进湿地生态水文学研究理论方法与技术创新,主要包括:①基于“多要素、多过程”的湿地生态水文相互作用机理;②湿地生态水文过程多尺度转化及耦合机制;③湿地水文-水动力-水质-生态响应综合模型研发;④基于多要素/多目标协同的分时分区湿地生态需水精细化计算;⑤面向湿地生态精准补水的流域湿地多水源优化配置理论与调控技术;⑥气候变化对湿地生态水文的影响机理及适应性调控;⑦湿地“水文-生态-社会”系统综合管理研究。

#### 3.2 大江大河流域湿地水文功能演变与水资源综合管理

近几十年来,在全球气候变化与高强度人类活动的双重影响下,中国诸多大江大河流域水文过程的改变直接干扰和破坏了湿地水文情势,导致湿地面积大幅度萎缩和功能急剧下降,同时湿地水文调蓄功能的下降也会影响流域水文过程和水量平衡,两者交互作用、互相影响,已对流域生态安全和水安全构成了威胁。为此,结合新时期中国生态文明建设战略部署和长江经济带发展战略,走生态优先、绿色发展之路,建议优先开展中国长江、黄河、松花江等大江大河流域湿地水文功能演变与水资源综合管理研究,为流域社会经济可持续发展和生态文明建设提供水资源安全保障。应着重关注6个方面研究:①流域湿地景观格局演变及其水文效应;②流域湿地水文连通性演变及量化评价;③流域湿地水文功能时空演变及维持机制;④洪水干旱对湿地生态水文的影响及适应性调控;⑤湿地生态需水规律及精细化计算;⑥基于湿地生态需水与水文服务的流域水资源优化配置与综合管理。

#### 3.3 气候变化对中国湿地生态水文的影响及适应策略

水是维系湿地生态系统稳定和健康的决定性因子,湿地生态水文对气候变化具有高度敏感性和脆弱性而备受关注。应对全球气候变化,保障湿地生态安全。因此,亟需加强气候变化对中国湿地生态水文的影响及适应策略研究,可重点关注5个方面研究:①海平面上升影响下滨海湿地生态水文格局演变及脆弱性评价;②气候变化对高原寒区湿地生态水文过程的影响机理与调控;③内陆湿地生态水文对洪水干旱的响应及适应机制;④未来气候变化情景下中国湿地水资源供需及其演变趋势的预测评估;⑤应对气候变化中国湿地生态水文格局优化与过程调控的适应性策略。

#### 3.4 面向湿地生态保护与恢复的水系连通理论与技术

变化环境下湿地与江河水系之间的纵向、横向水文连通性显著下降,湿地来水量锐减、生态水文格局破坏、水质恶化和生境退化等问题日益突出,中国已从区域、流域或跨流域尺度规划和建设面向湿地生态保护与恢复的河湖水系连通工程,从水文连通全新视角来考虑湿地水文系统健康恢复的现实问题。面向湿地生态保护与恢复的水系连通理论与技术研究仍处于探索起步阶段,是一项亟须研究的重要课题。可从5个方面开展研究:①湿地-江河水系连通性评价及优化网络构建;②湿地水文连通格局、方式及强度变化的生态效应与调控机理;③湿地群连通的生态补水优先次序评价;④湿地多水源生态补水技术与模式;⑤基于河湖水系连通工程的水资源优化配置与调度。

#### 3.5 湿地“水文-生态-社会”系统综合管理研究

湿地是非常敏感和有价值的生态系统,为人类社会提供各类产品和服务。由于缺乏认识和理解湿地众多



价值与地下水、地表水和湿地植被之间存在着复杂而隐形的关系,导致农业发展和水资源开发利用等社会经济活动直接或间接影响湿地生态水文过程,致使湿地生态功能退化和社会服务价值下降,难以满足人类社会的需求。国家政府或地方管理机构制定的政策制度和发展规划毋庸置疑将会约束和控制影响湿地生态水文过程的经济活动,制约湿地生态服务功能的发挥。反过来湿地生态水文系统的变化也会反馈作用于社会经济系统,从而相应地调整和修订湿地管理的政策制度和规划方案,提升湿地生态系统服务功能。在理解社会水文学研究内涵的基础上,针对湿地生态水文系统与社会经济系统相互作用的双向机制和反馈机制的特点,推动和加强湿地“水文-生态-社会”系统综合管理研究,可为解决中国众多复杂的湿地生态水文问题提供新的思路和更有效的方法。

## 4 结 语

湿地生态水文学是20世纪90年代兴起的以湿地生态系统为研究对象的一门生态学和水文学的交叉应用学科。随着生态学、水文学、生态水文学、生态经济学和社会水文学等相关学科理论方法和实验观测技术的进步,不断地推进和完善湿地生态水文学学科体系建设,可更好地解决全球湿地面临的生态水文问题与挑战。

(1) 基于湿地生态水文研究文献计量分析,透视国内外有关湿地水文、生态水文和水资源等领域的重大研究计划和重要学术会议,湿地生态水文学发展历程可大致分为萌芽起步(20世纪50年代至80年代)、研究探索(20世纪90年代)和快速发展(21世纪以后)3个阶段。

(2) 基于对国际湿地生态水文学发展历程、研究进展及热点的综合分析,未来湿地生态水文学发展趋势主要向基于“多要素、多过程、多尺度”的湿地生态水文相互作用机理研究及湿地水文-水动力-水质-生态响应综合模型研发、变化环境下湿地生态水文响应机制及适应性调控、基于湿地生态需水与水文服务的流域水资源综合管理等方面发展。

(3) 针对当前中国湿地生态水文现状及存在的问题,以新时期中国湿地保护修复工程、大江大河流域水生态安全保障和应对气候变化等国家重大需求为导向,建议湿地生态水文学优先发展方向有:① 湿地生态水文学研究理论方法与技术创新;② 大江大河流域湿地水文功能演变与水资源综合管理;③ 气候变化对中国湿地生态水文的影响及适应策略;④ 面向湿地生态保护与恢复的水系连通理论与技术;⑤ 湿地“水文-生态-社会”系统综合管理研究等。

### 参考文献:

- [1] 章光新,尹雄锐,冯夏清. 湿地水文研究的若干热点问题[J]. 湿地科学,2008,6(2): 105-115. (ZHANG G X, YIN X R, FENG X Q. Review of the issues related to wetland hydrology research [J]. Wetland Science, 2008, 6(2): 105-115. (in Chinese))
- [2] 章光新. 水文情势与盐分变化对湿地植被的影响研究综述[J]. 生态学报,2012,32(13): 4254-4260. (ZHANG G X. The effects of changes in hydrological regimes and salinity on wetland vegetation: a review [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(13): 4254-4260. (in Chinese))
- [3] 董李勤,章光新. 嫩江流域沼泽湿地景观变化及其水文驱动因素分析[J]. 水科学进展,2013,24(2): 177-183. (DONG L Q, ZHANG G X. The dynamic evolution and hydrological driving factors of marsh in Nenjiang River basin [J]. Advances in Water Science, 2013, 24(2): 177-183. (in Chinese))
- [4] ROBERT S, LUCA M, ANASTASIA B, et al. Summary for policymakers of the thematic assessment report on land degradation and restoration of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services [C]//IPBES-the Sixth Annual Meeting. Medellin: Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, 2018.
- [5] 章光新,张蕾,冯夏清,等. 湿地生态水文与水资源管理[M]. 北京: 科学出版社,2014. (ZHANG G X, ZHANG L, FENG X Q, et al. Wetland ecological hydrology and water resources management [M]. Beijing: Science Press, 2014. (in Chinese))

- [6] 邓伟,潘响亮,栾兆擎. 湿地水文学研究进展[J]. 水科学进展, 2003, 14(4): 521-527. (DENG W, PAN X L, LUAN Z Q. Advances in wetland hydrology[J]. Advances in Water Science, 2003, 14(4): 521-527. (in Chinese))
- [7] 于文颖,周广胜,迟道才,等. 湿地生态水文过程研究进展[J]. 节水灌溉, 2007(1): 19-23. (YU W Y, ZHOU G S, CHI D C, et al. Advances in wetland ecohydrology process research[J]. Water Saving Irrigation, 2007(1): 19-23. (in Chinese))
- [8] 王育礼,王烜,孙涛. 湿地生态水文模型研究进展[J]. 生态学杂志, 2008, 27(10): 1753-1762. (WANG Y L, WANG G, SUN T. Wetland eco-hydrological models: a review[J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(10): 1753-1762. (in Chinese))
- [9] 吴燕锋,章光新. 湿地生态水文模型研究综述[J]. 生态学报, 2018, 38(7): 2588-2598. (WU Y F, ZHANG G X. Review of development, frontiers and prospects of wetlands eco-hydrological models[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(7): 2588-2598. (in Chinese))
- [10] 冯夏清,章光新. 基于水循环模拟的流域湿地水资源合理配置初探[J]. 湿地科学, 2012, 10(4): 459-466. (FENG X Q, ZHANG G X. Preliminary study on reasonable water resources allocation for wetlands in watershed based on water cycle simulation[J]. Wetland Science, 2012, 10(4): 459-466. (in Chinese))
- [11] MITSCH W J, GOSSELINK I G. Wetlands[M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1986.
- [12] HYNES H B N. The ecology of running waters[M]. Liverpool: Liverpool University Press, 1970.
- [13] VANNOTE R L, MINSHALL G W, CUMMINS K W, et al. The river continuum concept[J]. Canadian Journal of Fishery & Aquatic Science, 1980, 37: 130-137.
- [14] WARD J V, STANFORD J A. The serial discontinuity concept of lotic ecosystems[J]. Dynamics of Lotic Ecosystems, 1983, 10: 29-42.
- [15] JUNK W J, BAYLEY P B, SPARKS R E. The flood pulse concept in river-floodplain systems[J]. Canadian Journal Special Publication of Fishery & Aquatic Science, 1989, 106: 110-127.
- [16] RUTTER A J, KERSHAW K A, ROBINS P C, et al. A predictive model of rainfall interception in forests: 1: derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine[J]. Agricultural Meteorology, 1971, 9: 367-384.
- [17] GASH J H C, MORTON A J. An application of the Rutter model to the estimation of the interception loss from Thetford forest[J]. Journal of Hydrology, 1978, 38: 49-58.
- [18] BOYD C E. Evapotranspiration/evaporation (E/E<sub>o</sub>) ratios for aquatic plants[J]. Journal of Aquatic Plant Management, 1987, 25: 1-3.
- [19] SMALL E. Water relations of plants in raised sphagnum peat bogs[J]. Ecology, 1972, 53(4): 726-728.
- [20] WHEELER B D, AL-FARRAJ M M, COOK R E D. Iron toxicity to plants in base-rich wetlands: comparative effects on the distribution and growth of *epilobium hirsutum* L and *juncus subnodulosus* Schrank[J]. New Phytologist, 1985, 100(4): 653-669.
- [21] JEGLUM J K. Plant indicators of pH and water level in peatlands at Candle Lake, Saskatchewan[J]. Canadian Journal of Botany, 1971, 49(9): 1661-1676.
- [22] GROOTJANS A P. Distribution of plant communities along rivulets in relation to hydrology and management[J]. Ephemerie, 1980, 143-170.
- [23] IVANOV K E. Water movement in mirelands[M]. London: Academic Press Inc Ltd, 1981.
- [24] INGRAM H A P. Problems of hydrology and plant distribution in mires[J]. Journal of Ecology, 1967, 55(3): 711-724.
- [25] INGRAM H A P. Size and shape in raised mire ecosystems: a geophysical model[J]. Nature, 1982, 297(5864): 300-303.
- [26] INGRAM H A P. Soil layers in mires: function and terminology[J]. European Journal of Soil Science, 1978, 29(2): 224-227.
- [27] INGRAM H A P. Ecohydrology of Scottish peatlands[J]. Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh, 1987, 78(4): 287-296.
- [28] 陈刚起. 三江平原沼泽径流的实验研究[M]. 北京: 科学出版社, 1988: 120-125. (CHEN G Q. Experimental study on the swamp runoff of sanjiang plain[M]. Beijing: Science Press, 1988: 120-125. (in Chinese))
- [29] MITSCH W J. Ecological models for management of freshwater wetlands[C]. Application of Ecological Modeling in Environmental Management: Part B: Developments in Environmental Modelling B, Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing, 1983, 4: 283-310.
- [30] MITSCH W J, STRASKRABA M, JORGENSEN S E. Wetland modelling[M]. Amsterdam: Elsevier, 1988.
- [31] DUBE S, PLAMONDON A P, ROTHWELL R L. Watering up after clear-cutting on forested wetlands of the St Lawrence lowland[J]. Water Resources Research, 1995, 31(7): 1741-1750.

- [32] VAN SETERS T. Linking the past to the present: the hydrological impacts of peat harvesting and natural regeneration on an abandoned cut-over bog, Quebec [D]. Waterloo: University of Waterloo, 1999.
- [33] POOK E W, MOORE P H R, HALL T. Rainfall interception by trees of *Pinus radiata*, and *Eucalyptus viminalis*, in a 1300 mm rainfall area of southeastern New South Wales: I: gross losses and their variability [J]. *Hydrological Processes*, 1991, 5(2): 127-141.
- [34] GILVER D J, MCINNES R J. Wetland hydrological vulnerability and the use of classification procedures: a scottish case study [J]. *Journal of Environmental Management*, 1994, 42(4): 403-414.
- [35] WASSEN M J, BARENDRECHT A, PALCZYNSKI A, et al. The relationship between fen vegetation gradients, groundwater flow and flooding in an undrained valley mire at Biebrza, Poland [J]. *The Journal of Ecology*, 1990, 78(4): 1106-1122.
- [36] JAMES R, CANT B, RYAN T. Responses of freshwater biota to rising salinity levels and implications for saline water management: a review [J]. *Australian Journal of Botany*, 2003, 51(6): 703-713.
- [37] POIANI K A, JOHNSON W C. Global warming and prairie wetlands [J]. *BioScience*, 1991, 41(9): 611-618.
- [38] 崔丽娟. 三江平原沼泽生态系统水量平衡: 以别拉洪河流域为例 [J]. *地理科学*, 1994, 14(4): 384-386. ( CUI L J. Water balance of marsh ecosystem in sanjiang plain: for example Bielalong River basin [J]. *Science Geographica Sinica*, 1994, 14(4): 384-386. ( in Chinese ) )
- [39] 倪晋仁, 殷康前, 赵智杰. 湿地综合分类研究: I: 分类 [J]. *自然资源学报*, 1998, 13(3): 214-220. ( NI J R, YIN K Q, ZHAO Z J. Comprehensive classification for wetlands: I: classification [J]. *Journal of Natural Resources*, 1998, 13(3): 214-220. ( in Chinese ) )
- [40] GLEEICK P H. Basic water requirements for human activities: meeting basic needs [J]. *Water International*, 1996, 21(2): 83-92.
- [41] RICHTER B, BAUMGARTNER J, WIGINGTON R, et al. How much water does a river need? [J]. *Freshwater Biology*, 1997, 37(1): 231-249.
- [42] BOVEE K D, LAMB B L, BARTHOLOW J M, et al. Stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology [M]//*The New Radicalism in America, 1889—1963*, Knopf, 1998: 1511-1512.
- [43] 杨志峰, 崔保山, 孙涛. 湿地生态需水机理, 模型和配置 [M]. 北京: 科学出版社, 2012. ( YANG Z F, CUI B S, SUN T. Wetland ecological water requirement mechanism, model and configuration [M]. Beijing: Science Press, 2012. ( in Chinese ) )
- [44] 黄奕龙, 傅伯杰, 陈利顶, 等. 生态水文过程研究进展 [J]. *生态学报*, 2003, 23(3): 580-587. ( HUANG Y L, FU B J, CHEN L D, et al. Advances in ecohydrological process research [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(3): 580-587. ( in Chinese ) )
- [45] HAYASHI M, QUINTON W L, PIETRONIRO A, et al. Hydrologic functions of wetlands in a discontinuous permafrost basin indicated by isotopic and chemical signatures [J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 296(1): 81-97.
- [46] ZHAN L, CHEN J, LI L. Isotopic assessment of fog drip water contribution to vegetation during dry season in Junshan wetland, northern Dongting Lake [J]. *Wetlands Ecology and Management*, 2017, 25(3): 1-13.
- [47] HUCKELBRIDGE K H, STACEY M T, GLENN E P, et al. An integrated model for evaluating hydrology, hydrodynamics, salinity and vegetation cover in a coastal desert wetland [J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(7): 850-861.
- [48] TULIPANI S, GRICE K, KRULL E, et al. Salinity variations in the northern Coorong Lagoon, South Australia: significant changes in the ecosystem following human alteration to the natural water regime [J]. *Organic Geochemistry*, 2014, 75: 74-86.
- [49] YIHDEGO Y, WEBB J A. Use of a conceptual hydrogeological model and a time variant water budget analysis to determine controls on salinity in Lake Burrumbeet in southeast Australia [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(4): 1587-1600.
- [50] 崔保山, 贺强, 赵欣胜. 水盐环境梯度下翅碱蓬 (*Suaeda salsa*) 的生态阈值 [J]. *生态学报*, 2008, 28(4): 1408-1418. ( CUI B S, HE Q, ZHAO X S. Researches on the ecological thresholds of *Suaeda salsa* to the environmental gradients of water table depth and soil salinity [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(4): 1408-1418. ( in Chinese ) )
- [51] 贺强, 崔保山, 赵欣胜, 等. 黄河河口盐沼植被分布、多样性与土壤化学因子的相关关系 [J]. *生态学报*, 2009, 29(2): 676-687. ( HE Q, CUI B S, ZHAO X S, et al. Relationships between saltmarsh vegetation distribution/diversity and soil chemical factors in the Yellow River Estuary, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(2): 676-687. ( in Chinese ) )
- [52] 邓春暖, 章光新, 李红艳, 等. 莫莫格湿地芦苇对水盐变化的生理生态响应 [J]. *生态学报*, 2012, 32(13): 4146-4153. ( DENG C N, ZHANG G X, LI H Y, et al. Eco-physiological responses of *Phragmites australis* to different water-salt conditions in

- Momoge Wetland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32( 13): 4146-4153. ( in Chinese )
- [53] FENG X Q ,ZHANG G X ,XU Y J. Simulation of hydrological processes in the Zhalong wetland within a river basin ,Northeast China[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013 , 17( 7): 2797-2807.
- [54] MARTINEZ E ,NEJADHASHEMI A P ,WOZNICKI S A , et al. Modeling the hydrological significance of wetland restoration scenarios[J]. *Journal of Environmental Management*, 2014 , 133: 121-134.
- [55] FOSSEY M ,ROUSSEAU A N ,BENSALMA F , et al. Integrating isolated and riparian wetland modules in the PHYSITEL/HYDROTEL modelling platform: model performance and diagnosis[J]. *Hydrological Processes*, 2015 , 29( 22): 4683-4702.
- [56] FOSSEY M ,ROUSSEAU A N ,SAVARY S. Assessment of the impact of spatio-temporal attributes of wetlands on stream flows using a hydrological modelling framework: a theoretical case study of a watershed under temperate climatic conditions[J]. *Hydrological Processes*, 2016 , 30( 11): 1768-1781.
- [57] 焦瑾玲,王昊,李永顺,等. 人工湿地在水环境改善方面的应用[J]. *南水北调与水利科技*, 2010, 8( 2): 83-86. ( JIAO C L ,WAGN H ,LI Y S , et al. Application of artificial wetlands in improving water environment [J]. *South to North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2010 , 8( 2): 83-86. ( in Chinese ) )
- [58] 李红艳,章光新,李绪谦,等. 扎龙湿地水质净化机理分析[J]. *地理科学*, 2012b, 32( 1): 87-93. ( LI H Y ,ZHANG G X ,LI X Q , et al. Water purification mechanism of Zhalong Wetland [J]. *Science Geographica Sinica*, 2012b, 32( 1): 87-93. ( in Chinese ) )
- [59] 李红艳,章光新,孙广志. 基于水量-水质耦合模型的扎龙湿地水质净化功能模拟与评估[J]. *中国科学: 技术科学*, 2012a, 42( 10): 1163-1171. ( LI H Y ,ZHANG G X ,SUN G Z. Imulation and evaluation of the water purification function of Zhalong Wetland based on a combined water quantity-quality model [J]. *Science China: Technology Science*, 2012a , 42( 10): 1163-1171. ( in Chinese ) )
- [60] KAZEZYILMAZ-ALHAN C M ,MEDINA M A ,RICHARDSON C J. A wetland hydrology and water quality model incorporating surface water/groundwater interactions [J]. *Water Resources Research*, 2007 , 43( 4): W04434.
- [61] 袁平,杨志峰,崔保山,等. 白洋淀湿地生态环境需水量研究[J]. *环境科学学报*, 2005 , 25( 8): 1119-1126. ( ZHONG P ,YANG Z F ,CUI B S , et al. Studies on water resource requirement for eco-environmental use of the Baiyangdian Wetland [J]. *Acta Science Circumstantiae*, 2005 , 25( 8): 1119-1126. ( in Chinese ) )
- [62] MAYER T D ,THOMASSON R. Fall water requirements for seasonal diked wetlands at Lower Klamath National Wildlife Refuge [J]. *Wetlands*, 2004 , 24( 1): 92-103.
- [63] TURNER R E ,RABALAIS N N. Changes in Mississippi River water quality this century [J]. *BioScience*, 1991 , 41( 3): 140-147.
- [64] 崔丽娟,鲍达明,肖红,等. 扎龙湿地生态需水分析及补水对策[J]. *东北师大学报( 自然科学版)*, 2006 , 38( 3): 128-132. ( CUI L J ,BAO D M ,XIAO H , et al. Analysis on the eco-environmental water requirement and the water supply strategy of Zhalong Wetland [J]. *Journal of Northeast University( Natural Science)*, 2006 , 38( 3): 128-132. ( in Chinese ) )
- [65] 王有利. 向海湿地补水生态补偿机制研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012. ( WANG Y L. Study on the compensation mechanism of Marine wetland replenishes [D]. Changchun: Jilin University , 2012. ( in Chinese ) )
- [66] 章光新,张蕾,侯光雷,等. 吉林省西部河湖水系连通若干关键问题探讨[J]. *湿地科学*, 2017 , 15( 5): 641-650. ( ZHANG G X ,ZHANG L ,HOU G L , et al. Key Issues of interconnected river system network in western Jilin Province , Northeast China [J]. *Wetland Science*, 2017 , 15( 5): 641-650. ( in Chinese ) )
- [67] 章光新,郭跃东. 嫩江中下游湿地生态水文功能及其退化机制与对策研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2008b , 22( 1): 122-128. ( ZHANG G X ,GUO Y D. Study on the wetland ecological and hydrological functions and their degradation mechanisms and counter measures in the middle and lower reaches of Nenjiang River [J]. *Journal of Arid Land Resources and Enironment*, 2008b , 22( 1): 122-128. ( in Chinese ) )
- [68] SECRETARIAT R C. Ramsar handbooks for the wise use of wetlands [J]. *Banko Janakari*, 2004 , 19( 3): 10-17.
- [69] LAW F M. Water policy: allocation and management in practice [M]. Boca Raton: CRC Press , 2003.
- [70] 董李勤,章光新. 全球气候变化对湿地生态水文的影响研究综述[J]. *水科学进展*, 2011 , 22( 3): 429-436. ( DONG L Q ,ZHANG G X. Review of the impacts of climate change on wetland ecohydrology [J]. *Advances in Water Science*, 2011 , 22( 3): 429-436. ( in Chinese ) )
- [71] ACREMAN M C ,BLAKE J R ,BOOKER D J , et al. A simple framework for evaluating regional wetland ecohydrological response



- to climate change with case studies from Great Britain [J]. *Ecohydrology*, 2009, 2(1): 1-17.
- [72] WALTERS K M, BABBAR-SEBENS M. Using climate change scenarios to evaluate future effectiveness of potential wetlands in mitigating high flows in a Midwestern U S watershed [J]. *Ecological Engineering*, 2016, 89: 80-102.
- [73] WERNER B A, JOHNSON W C, GUNTENSPERGEN G R. Evidence for 20th century climate warming and wetland drying in the North American Prairie Pothole Region [J]. *Ecology and Evolution*, 2013, 3(10): 3471-3482.
- [74] JOHNSON W C, POIANI K A. Climate change effects on prairie pothole wetlands: findings from a twenty-five year numerical modeling project [J]. *Wetlands*, 2016, 36(2): 273-285.
- [75] van DEN BERGH J C J M, BARENDREGT A, GILBERT A J. Spatial ecological-economic analysis for wetland management [M]. UK: Cambridge University Press. 2004.
- [76] 陆志翔, YONGPING W, 冯起, 等. 社会水文学研究进展 [J]. *水科学进展*, 2016, 27(5): 772-783. (LU Z X, YONGPING W, FENG Q, et al. Progress on socio-hydrology [J]. *Advances in Water Science*, 2016, 27(5): 772-783. (in Chinese))
- [77] 严登华, 王浩, 杨舒媛, 等. 面向生态的水资源合理配置与湿地优先保护 [J]. *水利学报*, 2008, 39(10): 1241-1247. (YAN D H, WANG H, YANG S Y, et al. Ecology-oriented reasonable deployment of water resources and giving priority to protection of wetland [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 39(10): 1241-1247. (in Chinese))

## A review of research on wetland ecohydrology\*

ZHANG Guangxin<sup>1</sup>, WU Yao<sup>1</sup>, WU Yanfeng<sup>1,2</sup>, LIU Xuemei<sup>1,2</sup>

(1. *Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

**Abstract:** Ecohydrology provides a framework to assess pressing environmental issues related to water and ecological degradation of wetland ecosystem. The ensuing discipline, wetland ecohydrology, can thus be used to promote conservation and rehabilitation programs, integrated water resources management as well as watershed-scale climate change mitigation measures. In this paper, we summarize the historical development of wetland ecohydrology using literature bibliometric analysis. We present a comprehensive survey of major research programs and key academic conferences on wetland hydrology, ecohydrology and water resources. Three developmental eras of wetland ecohydrology are broadly proposed: ① the embryonic era (the 50—80th of the 20th century), ② the development era (the 90th of the 20th century) and ③ the flourishing era (from 2000 up till now). Each area is characterized by representative research achievements; illustrating the progress of wetland ecohydrology. We conclude that future research on wetland ecohydrology will primarily focus on the study of: ① multi-factors, multi-processes and multi-scale interactive mechanisms between ecology and hydrology of wetlands; ② response mechanisms of wetland ecohydrology to climate change and potential adaptive regulations; ③ coupled hydrological-ecological-social interactions and mutual feedback mechanisms of wetland systems; ④ integrated water resources management for efficient allocation of water to wetlands. Finally, given the current situation, we present preferential research areas and suggestions for future development of wetland ecohydrology in China.

**Key words:** wetland ecohydrological processes; wetland ecohydrological models; wetland ecohydrological regulation; climate change; integrated water resources management

\* The study is financially supported by the National Key R&D Program of China (No. 2017YFC0406003).