

湿地水文过程与植被响应研究进展与案例分析

徐力刚, 赖锡军, 万荣荣, 王晓龙, 李相虎

(中国科学院南京地理与湖泊研究所, 中国科学院流域地理学重点实验室, 南京 210008)

摘要:生态水文学是20世纪90年代兴起的一门研究生态过程和生态格局水文机制的新学科。湖泊湿地作为中国5大类天然湿地类型之一, 湖泊湿地生态水文学的研究业已成为生态水文学的研究的一个重要对象和分支, 其核心在于研究湖泊湿地生态系统中多时空尺度的水文与生物格局、过程的耦合特征及其相互作用。论文首先概述了湖泊湿地生态水文学的研究进展, 包括其基本理论、内涵、外延及其主要研究内容; 凝练了湖泊湿地生态水文学研究的方法体系、思路及框架; 针对目前湖泊湿地生态水文学研究中存在的问题及薄弱环节, 提出了湖泊湿地生态水文学未来研究的发展趋势和亟需加强研究的重点方向。在此基础上, 以长江中游的典型通江湖泊湿地——鄱阳湖湿地为例, 通过开展的湖泊湿地生态水文过程与模拟研究的典型案例, 阐述了鄱阳湖湖泊湿地生态水文过程的变化及其植被响应研究的最新进展和研究成果。论文对于构建涵盖湖泊湿地水资源、湖泊湿地生态景观格局与流域管理、湖泊湿地生物多样性保育以及湿地资源可持续利用与生态管理等方向在内的战略研究体系, 完善湿地生态水文研究与流域生态与管理的技术支撑体系具有重要的指导意义和实践价值。

关键词:流域地理学; 生态水文; 湿地; 模型系统; 鄱阳湖

1 湖泊湿地生态水文学研究进展

1.1 湖泊湿地生态水文学发展历程

生态水文学是生态学和水文学的交叉学科。生态水文学的概念是在1992年Dublin国际水与环境会议上正式提出的, 是描述生态格局和生态过程的水文学机制的一门边缘学科。国际地圈生物圈计划(IGBP)的核心项目BAHC (Biospheric Aspects of Hydrological Cycle) 计划以及IHP等, 都以认识陆地生态系统与区域水文过程的耦合机制为核心内容, 这些国际科学计划推动了生态水文过程研究的发展。特别是UNESCO-IHP对洪水、洪泛平原、湿地与水资源关系研究非常重视, 在各重大研究计划中均涉及生态水文研究的内容, 所有这些表明生

态水文过程的研究已成为国际相关研究领域的前沿。生态水文过程研究作为生态水文学的一个重要研究方向, 是揭示生态格局和生态过程变化中水文机理的关键。其研究的核心是生物与水分之间的关系, 即水文过程与植物生态过程之间的相互作用(陆健健, 2006)。

全球湖泊湿地占陆地总面积的5%~8%, 约为 $7 \times 10^6 \sim 10 \times 10^6 \text{ km}^2$, 与其他生态系统相比, 湖泊湿地生态系统有独一无二的水文和生物地球化学循环过程, 并且能够提供与众不同的生态系统服务功能, 如水质净化、水资源供给、洪水调蓄、生物多样性维持、休闲娱乐等, 在保障全球水生态安全格局中占有重要地位(Mitsch et al, 2000)。中国的湖泊湿地类型多样, 分布广泛。从寒温带到热带, 从平

收稿日期: 2018-09-11; 修订日期: 2019-07-17。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0407606); 中国科学院STS区域重点项目(KFJ-STS-QYZD-098); 青海省科技计划项目(2019-HZ-818); 江西省重点研发计划项目(20171BBH80015)。[Foundation: National Key Research and Development Program of China, No. 2018YFC0407606; STS Key Projects of the Chinese Academy of Sciences, No. KFJ-STS-QYZD-098; Science and Technology Planning Project of Qinghai Province, No. 2019-HZ-818; Key Project of Research and Development Plan of Jiangxi Province, No. 20171BBH80015.]

第一作者简介: 徐力刚(1976—), 男, 四川仁寿人, 研究员, 博士, 博导, 主要从事湖泊水环境的研究。E-mail: lgxu@niglas.ac.cn

引用格式: 徐力刚, 赖锡军, 万荣荣, 等. 2019. 湿地水文过程与植被响应研究进展与案例分析 [J]. 地理科学进展, 38(8): 1171-1181. [Xu L G, Lai X J, Wan R R, et al. 2019. Review of the development of lake wetlands eco-hydrology and case studies. Progress in Geography, 38(8): 1171-1181.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2019.08.006

原到山地、高原,从沿海到内陆都有湖泊湿地发育(谢永宏等, 2008)。湖泊湿地生态水文学是以湖泊湿地生态系统为载体,旨在揭示湖泊湿地生态的时空格局和生态水文过程及其机制,是研究湖泊湿地水文过程和湖泊湿地植物分布及生长之间耦合作用的生态学和水文学之间的交叉学科(吴燕锋等, 2018)。湖泊湿地处在水、陆交替带,其发育、演替的全过程中都受到水文过程的影响;与此同时,湖泊湿地的水文过程也会湿地植被群落特征以及下垫面特性的影响,因此对于湖泊湿地生态-水文过程的研究已经成为学界关注的重点和热点问题。中国对于湖泊湿地的研究起步较晚,目前尚未建成全覆盖的湖泊湿地监测网络,长期系统的观测资料较为缺乏。20世纪90年代起,湖泊湿地的生态水文过程开始成为生态学家和水文学家关注的焦点问题之一(于文颖等, 2007)。有学者指出,生态学和水文学的原理和方法在湖泊湿地管理过程中具有非常重要的指导意义(王仁卿等, 1997)。在20世纪90年代中后期,国际上对湖泊湿地生态水文模型的研究进入理论探索阶段,并在1998年5月于UNESCO/IHP-V 2.3、2.4取得了标志性成果,详细阐述了模型尺度、水文过程的环境效应以及水文格局的生态效应。而在国内,许多学者致力于量化湖泊湿地的生态水文过程(谭学界等, 2006; 王焱等, 2007),其

主要通过构建湖泊湿地生态水文过程模型来模拟和预测湖泊湿地水体、土壤以及植被系统主要要素的状况及相互之间的响应关系。

1.2 湖泊湿地生态水文学的研究现状

在湖泊湿地生态系统中,湖泊水文与湿地植物是其2个重要的要素。湿地植物与湖泊水文过程的关系是湖泊湿地生态水文学的基础理论,研究湿地植物如何影响湖泊水文过程及水文过程如何影响植物分布和生长是湖泊湿地生态水文学的核心之所在(图1)。针对水文过程与植物关系研究的基础性及必要性,近年来湿地生态学研究主要侧重于3个方面:① 湿地生态过程特别是湿地植物与湖泊水文过程的交互作用研究;② 湿地生态过程与湖泊水文过程的耦合模拟研究;③ 湖泊湿地景观动态演变过程分析与影响因素探讨。

1.2.1 湖泊湿地生态过程与湖泊水文过程的交互作用研究

湖泊水文过程对湿地生态系统结构和功能具有重要影响,主导了湖泊湿地的基本生态学格局和生态过程,是湖泊湿地生态系统演替的主要驱动力(Baird, 1999)。研究表明,湖泊水文条件能形成独特的湿地植被结构,从而限制或增加物种的丰富度;流水环境和水文周期的节律等可显著提高湿地初级生产力和湿地生态系统的其他功能(Mcnam-

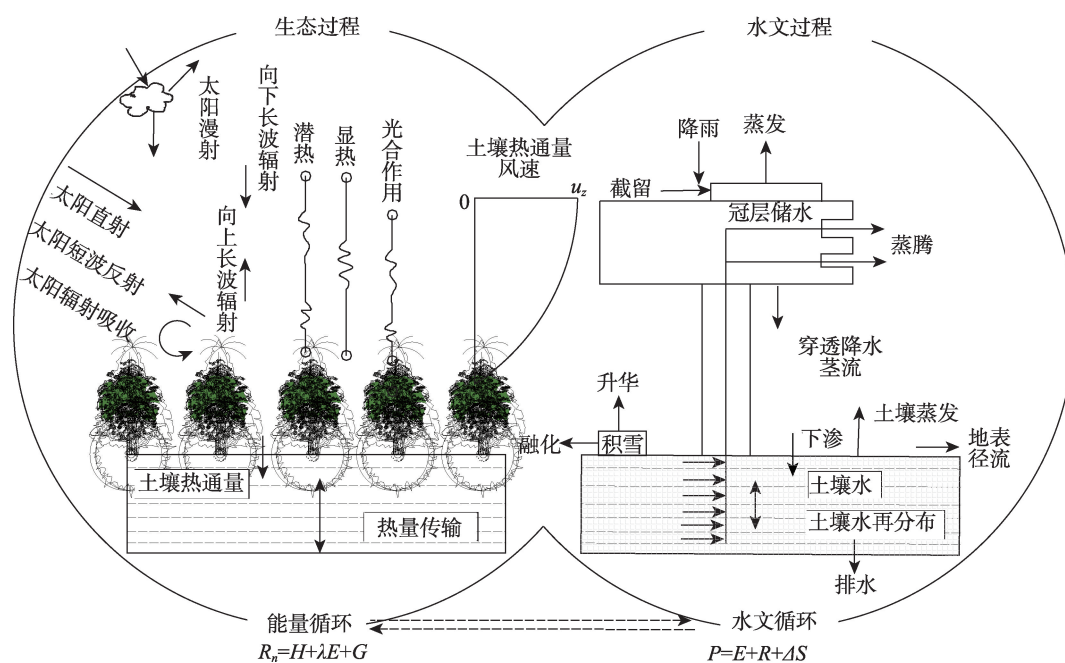


图1 湖泊湿地生态过程与水文过程的交互作用关系图

Fig.1 Interactions between the ecological and hydrological processes in lake wetlands

ra et al, 1992)。此外,湖泊水文条件通过影响湿地的初级生产力、有机质分解与输出来控制湿地的有机物积累,对湿地养分循环也有显著影响(吴春笃等, 2005)。在湖泊湿地中,水位通常是决定植物分布的主导因素(Silvertown et al, 1999; 游海林等, 2016)。但也有一些湖泊湿地中,土壤养分与热量对植被的分布驱动作用更为明显(Weltzin et al, 2000)。湖泊湿地植被群落分布格局范围与优势物种的生态位宽度密切相关,而优势种生态位宽度取决于对主要环境胁迫因子的耐受限度(Casanova et al, 2000)。湖泊水位、土壤盐分、营养盐分布和腌渍程度等环境因子变化会影响湿地植被群落生态演替的方向与速度(De Wilde et al, 2017)。特别是湖泊的“干-湿”交替过程的变化对湿地植被群落影响显著,如丰水年沼泽湿地中芦苇种群数量与分布面积增加,相对优势度上升,羊草等种群数量下降,相对优势度减小;枯水年植被演变趋势正好相反(田迅等, 2004);土壤化学梯度也能较好反映和预测湿地植物群落组成的变化,如土壤磷含量强烈地影响沼泽地香蒲属植物的多度;此外物种竞争是湿地植被演替的重要驱动力,种间竞争控制着群落分布与演替(Tilman et al, 1982; Keddy et al, 1989)。

在湖泊水文过程影响湿地生态系统的同时,湿地生态过程对湖泊水文过程具有重要的反馈作用,主要表现为湿地在涵养水源、调蓄洪水、防止水土流失、改变气候等方面的强大功能(Jiang et al, 2005)。不同功能群湖泊湿地植被通常沿水位梯度呈带状分布,该格局的形成是物种的竞争能力和对环境胁迫的耐受力的权衡(Osterkamp et al, 2010)。此外,地表有机质的不断积累常使得沼生植物比挺水植物在光照与养分获取上更具有竞争力,从而促使许多湖泊湿地向沼泽湿地演变(Post et al, 2007)。

综上所述,湖泊湿地生态过程与水文过程是湿地生态系统的关键过程,它们相互作用、互为影响,目前已有研究多侧重于其中的一个方面,而如何实现湿地生态过程与湖泊水文过程的综合与整合、如何将生态和水文信息耦合到同一时空尺度上加以研究已成为湖泊湿地生态水文研究的热点与难点。

1.2.2 湖泊湿地生态水文的耦合过程与模拟

生态水文模拟是揭示湖泊湿地生态-水文过程耦合的重要途径。近年来,生态与水文相互作用过程的数学模拟和专门模型研制日益成为重要的发展领域。由于水文条件本身的复杂性以及影响水

文行为的要素时空分布的不均匀性,增加了生态水文交互作用过程研究的复杂性,导致生态水文变化在直接量化上存在较大的难度(邓伟等, 2003; Xu et al, 2014; Hesse et al, 2017)。生态水文模型可以分为2大类:一类是基于专家知识的模型或基于经验数据的多元回归统计模型;另一类是基于生态水文学的机理模型,它基于水文和生态过程建模,考虑了系统内部的过程作用机理(王育礼等, 2008)。基于物理机制的过程模型在近年发展迅速。Van Der Peiji等(2000)将地貌单元的概念(hydro-geomorphic unit, HGMU)整合在模型中,模拟了河流湿地氮碳磷循环,研究显示营养输入的增加会带来更高的生物量,同时湿度的增加降低了分解速率,从而会导致土壤有机质积累的增加;Zhang等(2002)用湿地-DNDC模型模拟了北美3个湿地的碳和甲烷释放的动态。在区域尺度上,德国的波斯坦气候影响研究所开发的SWIM(Soil and Water Integrated Model)模型(Mansell et al, 2000)用于模拟和预测全球气候变化和土地利用方式改变下流域的水循环、植被生长、营养与污染物质迁移、泥沙运动等生态水文过程。中国刘昌明研究团队从土壤-植被-大气连续体(SPAC)水分运行过程入手,综合考虑生态系统中植被生长与土壤水分、营养元素的相互影响,研制了区域尺度的分布式生态水文模拟系统EcoHAT,并在黄河流域典型地区以及南方酸沉降区进行了实例研究与验证(刘昌明等, 2009)。湖泊湿地系统的各部分之间存在不同种类的物质、能量传输交换和相互作用(徐力刚等, 2013),涉及物理过程(水文、水动力、泥沙运移)、化学过程(污染物迁移转化)和生态过程(Skaggs, 1982)。一些流域水文模型如DHI开发的以物理过程为基础的MIKE-SHE综合水文数值模型具有很强的适用性,可用于湖泊湿地生态水文过程模拟,但是需要大量细致而完备的基础数据。

总体上看,国内外在流域生态水文过程的机理模型研究中开展了不少研究工作,但针对湖泊湿地生态系统的生态水文过程耦合模拟研究方面还不够丰富和完善。受湖泊湿地复杂环境条件的限制,诸多生态水文模型都因研究对象和区域环境的差异而大相径庭,考虑湖泊湿地地下水和地表水作用也大有区别(邓伟等, 2003)。建立生态水文机理模型,充分考虑湖泊湿地生态过程与水文过程的耦合关系,实现对湖泊湿地生态水文过程的动态模拟,

是湖泊湿地生态水文过程研究的迫切需要。

1.2.3 湖泊湿地景观动态演变过程及其影响因素

湖泊湿地资源监测及景观特征分析一直是湿地研究的基础和热点,传统的湿地资源监测方法是人工样点、样线和样区调查法,费时费力且成本高,且很多湿地区域人很难到达,给湿地景观类型调查和面积准确测量造成了困难。而遥感数据具有快速、客观、大面积、可连续等特征,随着多种卫星传感器的涌现,遥感技术日趋成为快速提取湿地景观类型及准确获取各景观类型面积的重要途径。国内外学者基于不同的湿地区域和应用目标,构建了不同的湿地分类系统,并发展了不同的湿地类型遥感提取方法,大致可分为以下3种:① 目视解译方法。如 Chopra 等(2001)基于 IRS (Indian Remote Sensing) 影像,目视解译获取了多期 Harike 湿地数据,监测了印度 Harike 湿地变化;② 传统的基于像元的监督分类和非监督分类方法。如江辉等(2008)通过分析湿地植被的光谱特征和季节变化特征,利用监督分类法,对不同的湿地类型采用了不同的解译方法,建立了一套鄱阳湖湿地遥感综合分类方法;Chen 等(2014)基于 250 m MODIS 合成的 NDVI 数据产品,利用 NDVI 时间序列物候特征和迭代聚类分析方法,提出了一种基于 NDVI 序列特征的湿地非监督分类方法;余建杰(2005)利用 Landsat TM 遥感影像,结合监督和非监督分类方法,发展了鄱阳湖湿地的计算机自动分类算法;Han 等(2015)基于 QuickBird 影像,发展了一种基于像元的支持向量机分类方法,并将鄱阳湖的湿地分为沙地、植被、泥潭和水体4大类。③ 综合地物的光谱、纹理和形状等特征的面向对象的湿地分类方法。如朱长明等(2014)基于高分辨率遥感数据,利用面向对象的分类方法对玛纳斯国家湿地公园进行了遥感监测,并取得了较高的精度。

此外,在湿地资源遥感提取的基础上,利用多时相遥感数据和变化检测方法,研究湖泊湿地景观变化检测也是湿地研究的重要内容,为湖泊湿地资源的有效管控和湖泊湿地生态保护提供理论基础。Munyati(2000)在对赞比亚 Kafu 湖泊湿地景观监测过程中,利用 Landsat TM 影像数据,利用监督分类对各年份的湖泊湿地进行提取,得到了湖泊湿地景观的动态变化特征;谭衢霖(2002)基于湿地分类后遥感动态变化检测方法,利用 1994 年和 2002 年的 Landsat 影像对比了 1998 年大洪水前后鄱阳湖

保护区的湿地变化情况;Zhao(2011)基于 Landsat TM 和 HJ 卫星遥感数据,利用一个混合的高斯随机集模型对 2004—2009 年鄱阳湖自然保护区开展了动态变化监测。

综上所述,目视解译法的精度最高,但是其人力成本较高,无法适用于当前大数据背景下遥感数据的解译及处理;相较而言,传统的基于像元的非监督分类方法简单快速,但是,其精度无法保证。而监督分类借助于先验知识的样本,在精度上有所提高,但是无法解决“同物异谱”或者“异物同谱”对分类精度造成的影响。面向对象的多尺度分类方法充分考虑了目标地物的光谱信息,形状特征、内部纹理、类间继承关系等因素,既避免结果的“椒盐效应”,又可获得较高的分类精度,尤其对于高分辨率数据的分类过程具有明显优势。近年来,随着计算机技术的进一步发展,大量的新技术涌现出来,如深度学习以及云计算等,都为处理海量遥感数据提供了新的思路和方法。基于深度学习的遥感解译能够取得较高的分类精度,但是其物理机制有待进一步深入探讨和研究。

1.3 湖泊湿地生态水文学研究的主要方法

湿地生态水文学主要从中、大尺度上对中国湿地资源保护与合理利用决策提供依据,为社会经济可持续发展作贡献。湿地由不同的水、陆生态系统组成,对于水的研究是湿地生态水文研究的落脚点和出发点。因此湿地生态水文学属于宏观生态学和水文学的研究领域,主要借助于宏观生态学和水文学的研究方法。主要方法和手段有水文学、生态系统学、景观生态学、信息生态学、生态学模型、水土保持以及复合生态系统方法等。

水文学是值得参考的基本研究方法或手段,其可以获取湖泊和流域的一些基本资料。随着高频在线监测技术、同位素示踪技术和沉积分析技术手段的应用,关于湖泊湿地界面过程的研究必将更加深入,湖泊湿地生物/生态系统的异质性与其对水分和能量的利用程度与胁迫关系将会呈现出新的活力。

生态系统学也是流域生态学的一个重要研究方法,为湿地生态水文学提供了一种研究思想和操作思路,胡振鹏等(2012)利用生态系统的方法研究了鄱阳湖的枯水调节。景观生态学方法是地理学与生态学结合的方法,是研究流域较大空间尺度生态环境问题的理想工具。充分利用现代信息技术和高性能计算科学,建立经济社会约束条件下的流

域生态模型系统也是重要的研究手段和方法。

湖泊湿地生态水文学模型方法是由定性化向定量化的发展。湿地生态水文模型呈现出“多要素、多尺度、多过程”的特征,并且复杂模型发展更加注重多学科融合和多种技术联合运用,更好地解决变化环境下湖泊湿地生态系统面临的水量和水质问题,为湖泊湿地生态系统的健康和可持续性提供水安全保障。

尺度问题也是湖泊湿地生态水文学的关键问题。适合于某一尺度的生态学理论和观测方法是难以应用于其它时空尺度的,因此,生态系统结构及其尺度转换无疑将成为今后十多年的重点研究领域,探讨在个体、样区、流域尺度上的通用性必将成为主流的研究方法。

1.4 湖泊湿地生态水文学发展难点及展望

1.4.1 难点

湖泊湿地生态水文过程不仅包括其系统内部的水动力过程,还包括湖泊湿地系统中物质的运移转化过程。湖泊湿地生态水文学研究方面主要存在如下几方面的问题和难点:

(1) 总体来看,湖泊湿地生态水文学是一门新兴学科,很多问题还有待于进一步探讨,国内相关研究起步较晚,目前研究多集中于湖泊的水文过程,对湖泊生态过程的研究相对较少,特别是针对湿地生态水文过程的研究尤其少,多关注于单方面影响,如水文过程对湿地格局的影响、湿地变化对水文过程的影响,缺乏二者之间相互影响的研究。

(2) 湖泊湿地生态水文模型缺乏通用性,同时湖泊生态水文耦合模型存在缺陷。在湖泊湿地模型应用研究中,综合考虑人类活动及湖泊湿地特性的综合模拟和预测研究更加缺乏。

(3) 湖泊空间异质性对湿地生态系统动力过程的影响,特别是多过程、复合时空尺度的耦合问题是国际上湖泊湿地生态水文学亟待解决的重点和难点问题。

1.4.2 展望

为了进一步推动湖泊湿地生态水文学的发展,本文结合已有研究,针对目前存在问题,提出以下几方面的建议与展望(图2):

(1) 加强湖泊湿地生态水文过程观测和机制研究。目前,国内已经开始建立了湖泊湿地野外实验站和生态监测站(如中国科学院生态系统研究网络中的鄱阳湖站、洞庭湖站、东湖站、抚仙湖站等),为湖泊湿地生态水文过程的研究提供了坚实的基础。应继续加强湖泊湿地生态水文过程的观测研究,以寻求不同时空尺度上影响湿地生态水文过程的主导因素,湖泊水文变化与湿地生态动态的相互作用是理解湖泊湿地生态水文过程的关键。因此,应重点加强湖泊湿地生态要素和水文要素之间的相互机理研究,揭示湖泊湿地生态水文过程的机理及其驱动机制。

(2) 重点关注湖泊湿地水-土-气-生界面的耦合与模拟研究。湖泊水文过程与湿地生态过程在大气-植物-土壤各个界面的耦合机制仍是亟待解

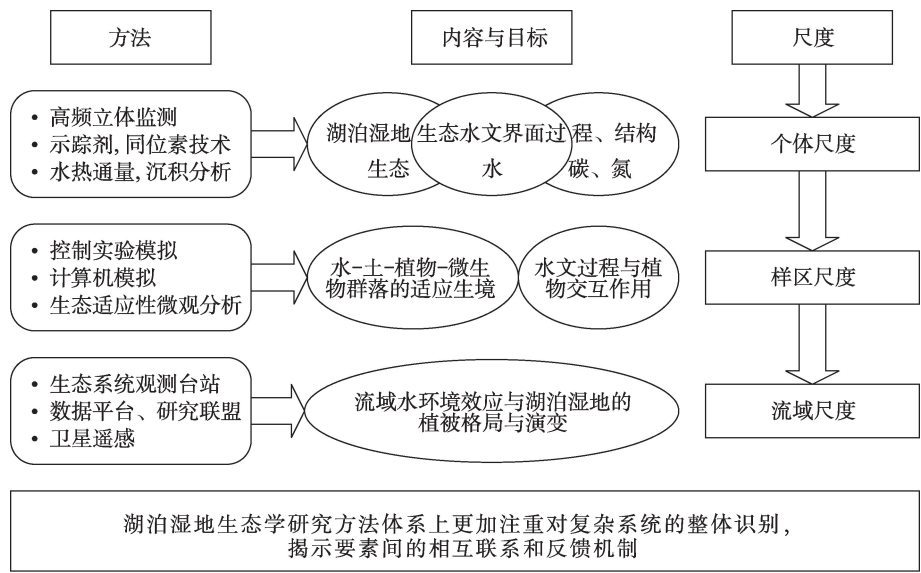


图2 湖泊湿地生态水文学研究的主要技术方法体系与框架
Fig.2 Framework of lake wetlands eco-hydrology study

决的重大科学问题。例如,湿地植物蒸腾气孔导度对光合作用的影响机理、气孔-冠层阻力的尺度转换等问题。在透彻理解湖泊湿地水文规律及其与周围环境的水文联系的基础上,研发典型湖泊湿地模块,构建功能更完备的流域湿地生态水文模型,提高水文模拟精度,并为流域湿地恢复与保护和湿地景观格局优化提供咨询和决策依据。

(3) 不同时空尺度湖泊湿地生态水文过程的耦合与应用研究。由于湖泊湿地生态系统一个复杂的非线性系统,湿地系统内部大气过程、水文过程以及生态过程复杂的相互作用及时空异质性导致不同时空尺度的湿地生态水文过程存在差异。因此,如何突破现存水文及生态模型参数的尺度局限性,将局地尺度的模型进一步推广到区域乃至全球尺度是生态水文过程模型模拟中亟需解决的又一重大问题;此外,需拓展湖泊湿地生态水文综合管理的理念和方法,构建湖泊湿地生态系统“生态-水文-社会经济”协调发展的耦合模型,以指导湖泊湿地水资源管理与生态恢复保护,更好地服务于湿地保护与国家的生态文明建设。

2 湖泊湿地生态水文典型案例——鄱阳湖湿地水文过程与植被响应

2.1 总体研究思路

鄱阳湖作为中国第一大淡水湖,是一个季节性涨水湖泊,也是与长江自然相通的最大湖泊。鄱阳湖水位年际、年际内变幅巨大,形成洪水期“茫茫一片水连天”,枯水期“沉沉一线滩无边”的独特湿地生态景观。鄱阳湖独特的水情动态和环境条件,繁衍了极其丰富的生物多样性,蕴藏着珍贵的物种基因,是中国陆地淡水生态系统中的重要物种基因库。同时,鄱阳湖作为中国重要的淡水湖泊湿地,不但具有相对完整的湿地景观系统和生态系统结构,而且在世界所有湖泊生态系统中,具有典型性和独特性,是一个具有全球意义的生态瑰宝。此外,鄱阳湖湿地也是国际6大重要湿地之一,鄱阳湖湿地变化一直是国内外湿地研究者关注的热点。

典型研究案例主要针对高水位变幅的季节性湖泊湿地-鄱阳湖水文过程及其对湿地植被影响机制研究的不足,以“地表关键要素监测-生态响应机制-生态水文过程耦合”为研究主线,首次在鄱阳湖搭建了典型湿地水文与生态要素长期监测系统,阐

明了典型湿地水-土-气-生各界面水分的交换过程和作用机制;明确了湿地植被群落分布与演替对湿地水文过程的响应特征;构建了基于过程和机理的湿地生态水文耦合模型;结合高分辨率遥感数据,阐明鄱阳湖典型湿地植被空间格局与演化过程,科学回答了“水文情势变化条件下鄱阳湖湿地植被如何演变”这一科学问题。

2.2 典型湿地地表关键要素监测研究

根据鄱阳湖湿地年内水位变化显著的特征,在鄱阳湖赣江主支口三角洲洲滩湿地和梅西湖碟形洼地湿地各布设了湿地生态水文要素观测断面,构建了鄱阳湖典型湿地生态水文过程监测系统(图3)。由此获取了鄱阳湖2个典型湿地断面(洲滩湿地和碟形洼地)的气象综合要素、土壤要素、地表地下水要素及植被要素中的关键数据,为研究典型湿地水-土-气-生各界面中水分的交换过程和作用机制提供科学依据,并阐明了湿地水分在地下水-土壤-植被-大气界面中的迁移、转化过程;实现了土壤蒸发和植物蒸腾过程的精细拆分和定量模拟。并基于洲滩湿地野外现场监测与控制性模拟实验,揭示了鄱阳湖地下水位变化对典型洲滩湿地植物生长和生理特征的影响过程与机制,科学量化了自然条件下的鄱阳湖湿地植被地下水位耐受参数。

2.3 鄱阳湖典型湿地植被对水文过程的响应

通过对鄱阳湖典型湿地(洲滩湿地和碟形洼地)的长期定位观测与控制试验研究,深入分析了鄱阳湖洲滩湿地景观格局变化特征以及代表性湿地植物群落特征及其与环境要素相互作用关系,探明了水情要素变化对洲滩湿地格局以及代表性植物群落生长特征的影响,揭示了湖区植物群落空间分布格局的水情变化驱动机制。

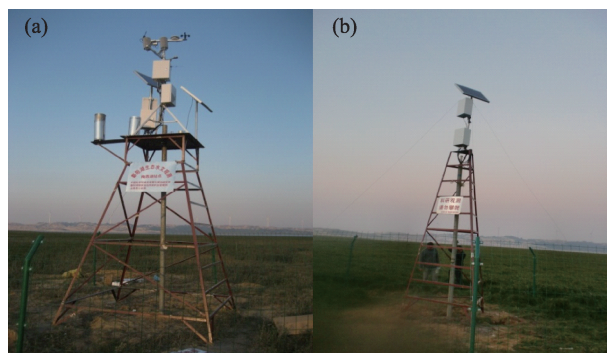


图3 鄱阳湖湿地生态水文观测系统的构建

Fig.3 The eco-hydrology observatory system in the Poyang Lake wetlands

图4为鄱阳湖典型洲滩湿地植物群落地表生物量变化特征,从近6a的监测数据表明,就群落生物多样性而言,各群落间显示了较大的差异。泥滩带和芦苇-南荻群落带呈现了明显较高的Shannon-Wiener指数,近7a分别为1.542~2.267和1.258~1.779之间;灰化藁草群落与藨草群落生物多样性相近,但显著低于其他群落带,年际变幅分别为0.186~0.233和0.188~0.279。就年际变化而言,芦苇-南荻群落带和泥滩带的生物多样性指数值于2011年均达到了显著最高,藨草群落带也呈现了相似的趋势,2011年Shannon-Wiener指数达到1.237,显著高于其他年份;灰化藁草和藨草群落带虽2011年Shannon-Wiener指数值略有上升,但和其他年份差异不明显。这表明极端的水情变化,如特枯年份会导致洲滩湿地植物群落生物多样性急剧上升,极端的水情变化会增加其他植物物种的侵入机会,导致原有洲滩生态系统结构稳定性下降。这一趋势尤其在洲滩上部和下部,即两端的植物群落带尤为明显。同时也表明这几类植物群落多样性可指示水情变化生态响应。灰化藁草和藨草带群落结构较为稳定,对水情变化响应不是很明显,这表明2种植物群落能更好的适应极端水情的变化,而如果这2种植物群落带生物多样性发生明显变化,则意味着整个洲滩湿地生态系统受到了极大的干扰,可作为水情变化产生较大生态影响的指标。

以长期定位观测数据为基础,以典型植物物种在各样方中的频度和多度作为资源占用率,利用Levins指数测定了典型植物物种生态位宽度(表1),灰化藁草株高、地表生物量和多样性指数的数据变

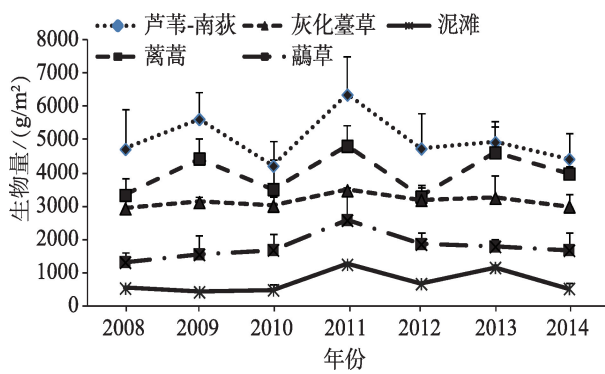


图4 2008—2014年鄱阳湖典型洲滩湿地植物群落地表生物量变化特征

Fig.4 Variation of above-ground biomass of vegetation communities in the typical wetlands of the Poyang Lake, 2008–2014

异度较小,离散程度小,表明灰化藁草群落结构较为稳定,其种群演变可作为衡量鄱阳湖典型洲滩生态系统变化的重要的指标之一。藨草群落分布于灰化藁草群落下沿,受水情变化影响更为明显。这一群落也同样显示了较小的数据离散度以及较高的优势种重要值和较低的生物多样性指数,同样也可作为评估水情变化对鄱阳湖生态系统影响的重要指示性物种(Wang, Xu, Wan, 2016; Wang, Xu, Wan, et al, 2016)。

2.4 湿地生态水文耦合模型

鄱阳湖湿地生态水文耦合以鄱阳湖水动力模型为核心框架,在典型湿地生态水文过程机理研究基础上,针对季节性湖泊湿地水位显著变化的特点,建立包括湖泊水动力模块、洲滩(出露)湿地水分循环(含地下水)模块和湿地植被响应模块的湿地生态水文耦合模型;结合野外长期定点观测获取的关键过程参数,开展湿地植被对水文过程响应的定量化研究,实现季节性湖泊湿地生态水文过程的动态模拟。在流域边界水情的驱动力作用下,自动追踪模拟水陆动边界,确定水循环模块的自主加载,实现水动力与水循环模块的自动衔接耦合模拟,获取鄱阳湖湖区水域和洲滩的水情基本要素。基于模拟获取的完整水情序列,进行植被空间分布的响应分析。模型耦合框架如图5所示(Lai et al, 2013)。该模型在数值方法层面上,突破了分布式模型栅格化的传统,采用守恒性能优越的非结构化网格有限体积法,构建基于任意三角形和四边形单元网格的计算模型,使其更适合模拟具有高空间异质性湿地的水循环和水动力过程。在多过程模拟层面,实现了水动力过程与水循环过程的动态耦合;水情特征变量与植被分布格局的耦合关联。

2.5 鄱阳湖湿地植被空间格局与演化过程

针对鄱阳湖湿地在剧烈水文波动环境下演变迅速的特征,借助遥感、GIS空间分析等技术,结合实地光谱测量,建立了长时间序列的湿地植被空间

表1 典型植物物种生态位宽度

Tab.1 Ecological niche of typical wetland vegetation in the Poyang Lake

群落	生态位宽度
灰化藁草	0.347
藨草	0.452
藨草	0.127
芦苇	0.146
水蓼	0.149

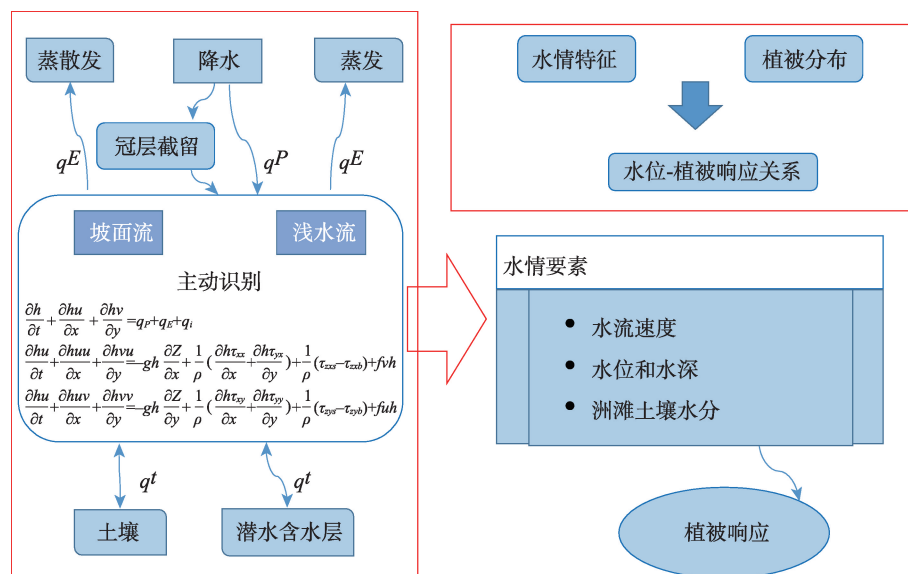


图5 鄱阳湖生态水文模型耦合框架示意

Fig.5 Framework of eco-hydrological model coupling of the Poyang Lake

分布数据;在此基础上,结合突变性检验和时间序列分析,系统揭示了近20 a鄱阳湖湿地典型植被群落分布面积的演变趋势;结合DEM数据以及空间统计分析方法,系统分析了近20 a鄱阳湖局部湖区湿地植被分布高程的空间格局演变与季节动态(李冰等, 2016)(图6)。从图中可以发现,1989—2010年苔草-藨草群落分布高程为12.3 m,南荻-芦苇群落分布高程为13.5 m。2003年后,2种典型植被群落高程分布下限均向下迁移,且呈现类似的空间差异。研究案例还率先实现了对鄱阳湖湿地植被空间分布格局及演化过程的全面、科学、定量认识。在此基础上,以湿地植被空间分布数据与湖泊多周期水文波动过程进行耦合,识别湿地植被格局演变的驱动因素,并估计维持湿地植被空间格局稳定的湖泊水文波动条件(Xue et al, 2015)。图7为鄱阳湖2种典型湿地植被景观在退水季节典型水情年的高

程分布特征,就分布高程而言,退水季节水情是决定苔草-藨草群落分布高程和南荻-芦苇群落分布高程最为重要的水位波动变量。苔草-藨草群落分布高程随退水季节水情的由丰转枯而升高,1999年,苔草-藨草景观带分布高程约12.8 m;2001年,苔草-藨草景观带分布高程约12.1 m;2006年,苔草-藨草景观带分布高程随退水季节平均水位的急剧降低而下降至约12.0 m。南荻-芦苇景观带分布高程随退水季节水情的由丰转枯而下降,由1999年的13.75 m下降至2001年13.0 m。

3 结语

本案例选择长江中下游典型通江湖泊,也是中国最大的淡水湖泊鄱阳湖为研究对象,紧密围绕鄱阳湖湿地水位变化显著、对自然和人类活动扰动非

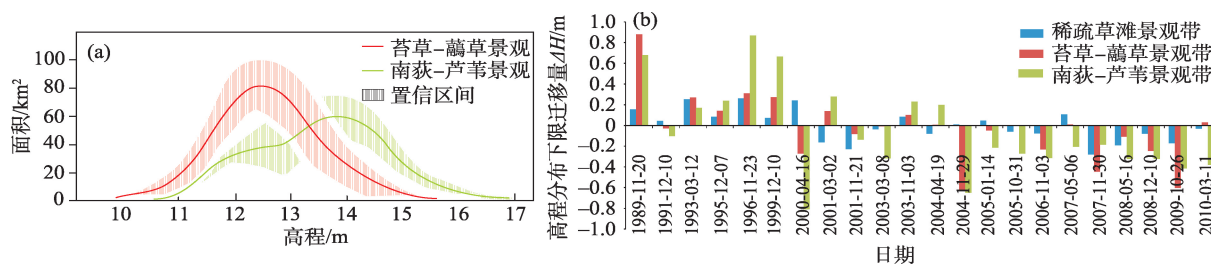


图6 1989—2010年多年平均的湿地典型植被群落分布高程(a)及其分布高程下限变化(b)

Fig.6 Distribution elevation of the vegetation communities in the typical wetlands of Poyang Lake (a) and the lower range of the distribution elevation (b), 1989—2010

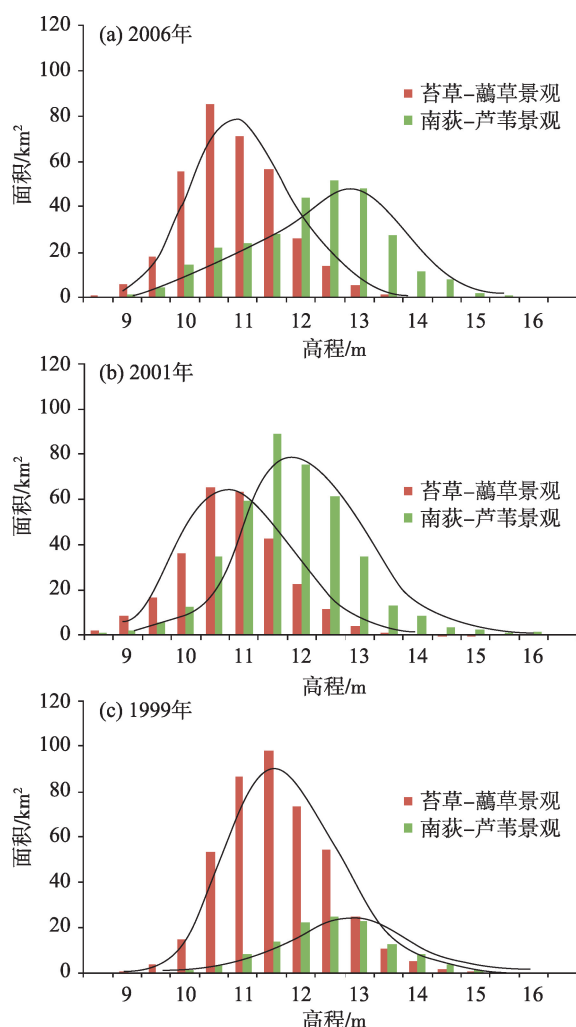


图7 鄱阳湖两种典型湿地植被景观在退水季节
典型水情年的高程分布特征

Fig.7 Distribution elevation of two typical vegetation
communities in the recession period

常敏感这一特点,通过对鄱阳湖典型湿地水文、土壤、植被关键要素过程的长期定位观测,获取了地表过程关键参数,明确了湿地植被群落分布与演替对湿地水文过程的响应特征;建立了基于过程和机理的湿地生态水文模型;阐明了水文过程影响下的鄱阳湖湿地植被空间格局与演化过程,初步回答了在水文情势变化条件下鄱阳湖湿地植被如何演变的科学问题,从而为认识和理解季节性通江湖泊湿地演变规律提供科学基础,丰富与发展湖泊湿地生态水文学的理论与方法。

参考文献(References)

邓伟,潘响亮,栾兆擎. 2003. 湿地水文学研究进展 [J]. 水科学进展, 14(4): 521-527. [Deng W, Pan X L, Luan Z Q. 2003. Advances in wetland hydrology. *Advances in Water*

Science, 14(4): 521-527.]

胡振鹏,林玉茹. 2012. 气候变化对鄱阳湖流域干旱灾害影响及其对策 [J]. 长江流域资源与环境, 21(7): 897-904. [Peng H Z, Lin Y R. 2012. Analysis of relationship between climate change and drought disasters in the Poyang Lake basin and study of the drought-relief measures. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 21(7): 897-904.]

江辉,周文斌,刘瑶. 2008. 鄱阳湖湿地遥感分类研究及应用 [J]. 遥感技术与应用, 23(6): 648-652. [Jiang H, Zhou W B, Liu Y. 2008. Research and application of the Poyang Lake wetland classification using remote sensing. *Remote Sensing Technology and Application*, 23(6): 648-652.]

李冰,杨桂山,王晓龙,等. 2016. 鄱阳湖典型洲滩植物物种多样性季节动态特征 [J]. 土壤, 48(2): 298-305. [Li B, Yang G S, Wang X L, et al. 2016. Seasonal dynamic characteristics of species diversity of typical hygrophilous vegetation in Poyang Lake shore wetland. *Soils*, 48(2): 298-305.]

刘昌明,杨胜天,温志群,等. 2009. 分布式生态水文模型 EcoHAT 系统开发及应用 [J]. 中国科学(技术科学), (6): 1112-1121. [Liu C M, Yang S T, Wen Z Q, et al. 2009. Development of ecohydrological assessment tool and its application. *Science in China (Technological Sciences)*, (6): 1112-1121.]

陆健健. 2006. 湿地生态学 [M]. 北京: 高等教育出版社. [Lu J J. 2006. *Wetland Ecology*. Beijing, China: Higher Education Press.]

谭衢霖. 2002. 鄱阳湖湿地生态环境遥感变化监测研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院. [Tan Q L. 2002. Study on remote sensing change detection and its application to Poyang international importance wetland. Beijing, China: University of Chinese Academy of Sciences.]

谭学界,赵欣胜. 2006. 水深梯度下湿地植被空间分布与生态适应 [J]. 生态学杂志, 25(12): 1460-1464. [Tan X J, Zhao X S. 2006. Spatial distribution and ecological adaptability of wetland vegetation in Yellow River Delta along a water table depth gradient. *Chinese Journal of Ecology*, 25 (12): 1460-1464.]

田迅,杨允菲. 2004. 西辽河平原不同生境草芦种群分株生长的可塑性 [J]. 草地学报, 12(1): 17-20. [Tian X, Yang Y F. 2004. Growth plasticity of ramets of phalaris arundinacea population in the different habitats of Xiliao- River Plains. *Acta Agrestia Sinica*, 12(1): 17-20.]

王仁卿,刘纯慧,晁敏. 1997. 从第五届国际湿地会议看湿地保护与研究趋势 [J]. 生态学杂志, 16(5): 72-76. [Wang R Q, Liu C H, Chao M. 1997. Wetland conservation and advances derived from the Fifth International Wetlands Conference. *Chinese Journal of Ecology*, 16(5): 72-76.]

- 王焱, 刘国东, 秦远清, 等. 2007. 基于水分运移的若尔盖湿地 SPAC 模型研究 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 39(5): 16-20. [Wang Y, Liu G D, Qin Y Q, et al. 2007. The research of SPAC system model based on water flow in Zoige Wetland. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 39(5): 16-20.]
- 王育礼, 王烜, 孙涛. 2008. 湿地生态水文模型研究进展 [J]. 生态学杂志, 27(10): 1753-1762. [Wang Y L, Wang X, Sun T. 2008. Wetland eco-hydrological models: A review. Chinese Journal of Ecology, 27(10): 1753-1762.]
- 吴春笃, 孟宪民, 储金宇, 等. 2005. 北固山湿地水文情势与湿地植被的关系 [J]. 江苏大学学报(自然科学版), 26(4): 331-335. [Wu C D, Meng X M, Chu J Y, et al. 2005. Correlation between hydrological situation and vegetation in Mount Beigu Wetland. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 26(4): 331-335.]
- 吴燕锋, 章光新. 2018. 湿地生态水文模型研究综述 [J]. 生态学报, 38(7): 2588-2598. [Wu Y F, Zhang G X. 2018. Review of development, frontiers and prospects of wetlands eco-hydrological models. Acta Ecologica Sinica, 38(7): 2588-2598.]
- 谢永宏, 陈心胜. 2008. 三峡工程对洞庭湖湿地植被演替的影响 [J]. 农业现代化研究, 29(6): 684-687. [Xie Y H, Chen X S. 2008. Effects of Three-Gorge Project on succession of wetland vegetation in Dongting Lake. Research of Agricultural Modernization, 29(6): 684-687.]
- 徐力刚, 许加星, 董磊, 等. 2013. 土壤-植物-大气界面中水分迁移过程及模拟研究进展 [J]. 干旱地区农业研究, 31(1): 242-248. [Xu L G, Xu J X, Dong L, et al. 2013. Research advance in process and modeling of water transfer in soil-plant-atmosphere continuum. Agricultural Research in the Arid Areas, 31(1): 242-248.]
- 游海林, 徐力刚, 刘桂林, 等. 2016. 鄱阳湖湿地景观类型变化趋势及其对水位变动的响应 [J]. 生态学杂志, 35(9): 2487-2493. [You H L, Xu L G, Liu G L, et al. 2016. Change of wetland landscape at Poyang Lake and its response to water level fluctuation. Chinese Journal of Ecology, 35(9): 2487-2493.]
- 于文颖, 周广胜, 迟道才, 等. 2007. 湿地生态水文过程研究进展 [J]. 节水灌溉, (1): 19-23. [Yu W Y, Zhou G S, Chi D C, et al. 2007. Advance in wetland ecohydrological process research. Water Saving Irrigation, (1): 19-23.]
- 余建杰. 2005. 基于 TM 遥感影像的鄱阳湖湿地分类研究 [D]. 南昌: 南昌大学. 2005. [Yu J J. 2005. Study on classification of Poyang Lake Wetland area based on landsat TM image. Nanchang, China: Nanchang University.]
- 朱长明, 李均力, 张新, 等. 2014. 面向对象的高分辨率遥感影像湿地信息分层提取 [J]. 测绘通报, (10): 23-28. [Zhu C M, Li J L, Zhang X, et al. 2014. Wetlands information automatic extraction from high resolution remote sensing imagery based on object-oriented technology. Bulletin of Surveying and Mapping, (10): 23-28.]
- Baird A J. 1999. Eco-hydrology: Plants and water in terrestrial and aquatic environments: Introduction [M]. London, UK: Routledge.
- Casanova M T, Brock M A. 2000. How do depth, duration and frequency of flooding influence the establishment of wetland plant communities? [J]. Plant Ecology, 147(2): 237-250.
- Chen L F, Jin Z Y, Michishita R, et al. 2014. Dynamic monitoring of wetland cover changes using time-series remote sensing imagery [J]. Ecological Informatics, 24: 17-26.
- Chopra R, Verma V K, Sharma P K. 2001. Mapping, monitoring and conservation of Harike wetland ecosystem, Punjab, India, through remote sensing [J]. International Journal of Remote Sensing, 22(1): 89-98.
- De Wilde M, Puijalon S, Bornette G. 2017. Sediment type rules the response of aquatic plant communities to dewatering in wetlands [J]. Journal of Vegetation Science, doi: 10.1111/jvs.12473.
- Han X X, Chen X L, Feng L. 2015. Four decades of winter wetland changes in Poyang Lake based on Landsat observations between 1973 and 2013 [J]. Remote Sensing of Environment, 156: 426-437.
- Hesse C, Krysanova V, Pätzolt J, et al. 2017. Eco-hydrological modelling in a highly regulated lowland catchment to find measures for improving water quality [J]. Ecological Modelling, 218(1): 135-148.
- Jiang C L, Fan X Q, Zhang Y B. 2005. Accumulation of non-point source pollutants in ditch wetland and their uptake and purification by plants [J]. The Journal of Applied Ecology, 16(7): 1351-1354.
- Keddy P A, Shipley B. 1989. Competitive hierarchies in herbaceous plant communities [J]. Oikos, 54(2): 234-241.
- Lai X J, Jiang J H, Liang Q H, et al. 2013. Large-scale hydrodynamic modeling of the middle Yangtze River Basin with complex river-lake interactions [J]. Journal of Hydrology, 492: 228-243.
- Mansell R S, Bloom S A, Sun G. 2000. A model for wetland hydrology: Description and validation [J]. Soil Science, 165(5): 384-397.
- Mcnamara J P, Siegel D I, Glaser P H, et al. 1992. Hydrogeologic controls on peatland development in the Malloryville Wetland, New York (USA) [J]. Journal of Hydrology, 140(1-4): 279-296.
- Mitsch W J, Gosselink J G. 2000. Wetlands. [M]. 3rd edition. New York, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Munyati C. 2000. Wetland change detection on the Kafue Flats, Zambia, by classification of a multitemporal remote

- sensing image dataset [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 21(9): 1787-1806.
- Osterkamp W R, Hupp C R, Hession W C, et al. 2010. Fluvial processes and vegetation - glimpses of the past, the present, and perhaps the future [J]. *Geomorphology*, 116(3): 274-285.
- Post J, Krysanova V, Suckow F, et al. 2007. Integrated eco-hydrological modelling of soil organic matter dynamics for the assessment of environmental change impacts in meso-to macro-scale river basins [J]. *Ecological Modelling*, 206(1-2): 93-109.
- Silvertown J, Dodd M E, Gowing D J G, et al. 1999. Hydrologically defined niches reveal a basis for species richness in plant communities [J]. *Nature*, 400: 61-63.
- Skaggs R W. 1982. Field evaluation of a water management simulation model [J]. *Transactions of the ASAE*, 25(3): 666-674.
- Tilman D, Kilham S S, Kilham P. 1982. Phytoplankton community ecology: The role of limiting nutrients [J]. *Annual Review of Ecology & Systematics*, 13(1): 349-372.
- Van der Peijl M J, Verhoeven J T A. 2000. Carbon, nitrogen and phosphorus cycling in rivermarginal wetlands; a model examination of landscapegeochemical flows [J]. *Biogeochemistry*, 50(1): 45-71.
- Wang X L, Xu L G, Wan R R. 2016. Comparison on soil organic carbon within two typical wetland areas along the vegetation gradient of Poyang Lake, China [J]. *Hydrology Research*, 47(S1): 261-277.
- Wang X L, Xu L G, Wan R R, et al. 2016. Seasonal variations of soil microbial biomass within two typical wetland areas along the vegetation gradient of Poyang Lake, China [J]. *Catena*, 137: 483-493.
- Weltzin J F, Pastor J, Harth C, et al. 2000. Response of bog and fen plant communities to warming and water-table manipulations [J]. *Ecology*, 81(12): 3464-3478.
- Xu L G, Zhu M L, He B, et al. 2014. Analysis of water balance in Poyang Lake Basin and subsequent response to climate change [J]. *Journal of Coastal Research*, 68: 136-143.
- Xue D, Wan R, Yang G. 2015. Non-stationary water-level fluctuation in China's Poyang Lake and its interactions with Yangtze River [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 25(3): 274-288.
- Zhang Y, Li C, Trettin C C, et al. 2002. An integrated model of soil, hydrology, and vegetation for carbon dynamics in wetland ecosystems [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 16(4): 1061, doi:10.1029/2001GB001838.
- Zhao X. 2011. Monitoring the dynamics of wetland inundation by random sets on multi-temporal images [J]. *Remote Sensing of Environment*, 115(9): 2390-2401.

Review of the development of lake wetlands eco-hydrology and case studies

XU Ligang, LAI Xijun, WAN Rongrong, WANG Xiaolong, LI Xianghu

(Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, CAS, Nanjing 210008, China)

Abstract: Eco-hydrology is a new discipline emerged in the 1990s that studies the hydrological mechanism of ecological processes and structures. It focuses on the hydrological mechanism of ecological patterns and the variation of ecological processes. Lake wetlands are one of the five types of natural wetlands in China. The research on eco-hydrology in lake wetlands is an important branch of ecological hydrology research. It concentrates on the research of coupling features and interactions of hydrology and biological patterns and processes in the multi-temporal scale of wetland ecosystem. In this article we summarized the research progress of eco-hydrology on lake wetlands, including its basic theory, connotation, extension, and main research contents. Following that, we concluded the methodology framework of eco-hydrology. We also identified the current and future research topics in eco-hydrology. Finally, based on some case studies, we demonstrated the responses of vegetation to the variation of eco-hydrological processes in the Poyang Lake. This article may have important guiding significance and practical value not only for water resources protection, ecological biodiversity conservation, and wetland ecosystem sustainability, but also for the improvement of technical support systems of wetland eco-hydrology research and watershed ecology and management.

Keywords: watershed geography; eco-hydrology; wetlands; model system; Poyang Lake