



湿地生态流量 调控模型及效应

■ 杨 薇 杨志峰 孙 涛 赵彦伟 李晓晓 著



科学出版社

湿地生态流量调控模型及效应

杨 薇 杨志峰 孙 涛 赵彦伟 李晓晓 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以湿地生态流量调控理论-模型-效应为主线,阐释了湿地生态流量调控管理目标、主要特征、影响因素和主要模式,系统梳理了湿地生态流量理论;提出了面向水质改善、生态修复和多水源协调的湿地生态流量调控模型,明确了不同管理目标的生态流量调控方案和策略;从水质、沉积物理化性质、植被、底栖生物群落等分要素响应和景观格局、生态系统服务、生态系统健康以及生物多样性等系统层面响应两方面揭示了湿地流量调控的生态效应;系统分析了湿地生态流量调控可能引起的植被、底栖生物群落演替的生态风险。

本书可供环境科学、环境生态学、水文学及水资源学等学科领域科研工作者参考,并为环保、水利及林业等部门的管理者提供决策支持。

图书在版编目(CIP)数据

湿地生态流量调控模型及效应/杨薇等著. —北京:科学出版社,2018. 11
ISBN 978-7-03-059722-9

I. ①湿… II. ①杨… III. ①沼泽化地-生态系-流量-调控模型
IV. ①P941. 78

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 262329 号

责任编辑:张海娜 赵微微 / 责任校对:何艳萍

责任印制:张 伟 / 封面设计:蓝正设计

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司

科学出版社发行 各地新华书店经销

2018 年 11 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2018 年 11 月第一次印刷 印张:16

字数:322 000

定价:108.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



前 言

生态流量(也称生态需水、环境流量等)的概念提出于 20 世纪 40 年代,在 80~90 年代得到生态学、水力学和水文学专家学者的广泛关注,并迅猛发展。作者所在的由杨志峰院士带领的生态需水研究团队自 20 世纪 90 年代起持续专注于生态需水理论、方法及应用实践的相关研究,分别于 2003 年、2006 年和 2012 年陆续出版了《生态环境需水量理论、方法与实践》《流域生态需水规律》和《湿地生态需水机理、模型和配置》系列学术专著,提出了生态需水等级阈值理论和一系列不同类型、不同尺度的生态需水定量核算方法;从流域整体角度系统地阐述生态需水规律,解决了不同类型生态系统之间和不同分区之间生态需水的重复计算问题;特别针对湿地系统揭示了生态耗水机理,提出了湿地生态需水模型及配置方案,构建了生态调度及生态补水模式。上述工作层层递接、有机结合,研究工作不断横向拓展和纵向延伸,极大地推动了生态需水理论与实践的发展,为生态系统管理和水资源科学配置提供了重要技术支持。

近年来,随着生态需水理论的发展和湿地生态保护认识的加强,相关水利管理部门积极实施生态流量调度工程,向河湖湿地(如白洋淀、南四湖、衡水湖等湖泊湿地),扎龙、向海等沼泽湿地,以及黄河三角洲退化湿地等盐沼湿地的生态补水工程进行补水,并通过对退化湿地开展一定的调水实践,力图实现退化湿地生态修复、湿地生态健康维护以及生态系统服务功能提升。值得注意的是,不同类型的湿地生态系统所处区域或流域差异、地理位置不同、管理实践和目标导向不同,其生态流量研究的深度和重点有所差异,在现有生态流量理论基础上,面对水资源短缺冲突和多源补水战略,如何针对不同湿地水质要求、生态保护等管理目标开展湿地生态流量优化调控,确定适宜的调控规则,都值得进一步深入研究;此外,由于生态流量实施受到调水成本高、对照试验空缺、适应性管理缺乏等问题制约,湿地生态流量调控的成功实践案例不是很多,尤其缺乏有效而科学的生态流量调控长期跟踪监测;对于部分依赖生态流量调控维系的河湖湿地,也仍然存在监测指标选择单一、调控效果评估片面化、生态流量调控有效性难以评判等一系列问题。因此,在为数不多的长期实施生态流量调控湿地中,对长期生态补水对湿地系统中沉积物、优势植被、底栖生物群落以及食物链食物网产生的影响和累积效应进行研究。上述研究的开展可以在一定程度上弥补学术界和管理者对生态流量调控效应科学认知不足的缺陷,为科学评估流量调控成效、系统揭示生态累积效应、大力促成生态流量适应性管理提供重要支撑。在此背景下,近年来作者及所在研究团队进一步

继承和发展原有的湿地生态需水相关成果,进一步聚焦于湿地生态流量调控的理论探索、模型发展和效应评估,力求为有效解决多水源、多目标的供需冲突问题提供可行的途径,支撑可持续的长效生态补水模式,增强学术界和管理者对流量调控生态效应的科学认识,并推进生态流量调控适应性管理。

本书内容的具体分工如下:第一章由杨薇撰写;第二章由杨薇、赵彦伟撰写;第三章由杨薇、杨志峰撰写;第四章由杨薇、李晓晓撰写;第五章由杨薇、孙涛、李晓晓撰写;第六章由杨薇、裴俊、赵彦伟、孙涛撰写;第七章由杨薇、杨志峰、李晓晓撰写。

杨薇和杨志峰共同提出了专著研究工作的总体思路,负责全书的总体框架设计、撰稿、统稿和定稿,参加书稿研究和整理工作的还有秦燕、李铭、靳宇弯、郑冲、张子玥等同学。

限于作者水平,本书难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

作 者

2018年8月

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 湿地生态流量调控的背景及意义	1
一、湿地生态流量调控的背景	1
二、湿地生态流量调控的意义	3
第二节 湿地生态流量调控理论基础	4
一、生态水文学理论	4
二、水资源优化配置理论	8
三、恢复生态学理论	9
四、水库生态调度理论	11
第三节 湿地生态流量调控研究进展	13
一、湿地生态流量核算方法研究进展	13
二、湿地生态流量调控模型研究进展	18
三、湿地生态流量调控效应研究进展	21
第四节 湿地生态流量调控的几个关键问题	24
一、湿地生态需水核算方法对调控实践的支撑作用有待提升	24
二、湿地生态系统的经济效益与生态效益权衡问题亟须突破	24
三、湿地生态流量调控的生态补偿问题有待完善	25
四、湿地生态流量调控的适应性管理问题有待实施	26
参考文献	27
第二章 湿地生态流量调控理论	33
第一节 湿地生态流量调控管理目标	33
一、最低生态水位/最小生态水面面积	33
二、特定生物物种保护	34
三、湿地生境或栖息地保护	35
四、多目标决策流量调控	35
第二节 湿地生态流量调控的模式	36
一、季节性湿地的雨洪补给模式	36
二、补给水源主动弃(放)水模式	37
三、湿地应急生态补水模式	37

四、污水再生水补给模式	38
第三节 湿地生态流量调控的主要特征	38
一、时间尺度特征	38
二、空间地域特征	39
三、补水效益外部性	39
第四节 湿地生态流量调控的影响因素	40
一、补水水源水量水质	40
二、引水工程及补水路线	40
三、生态流量调控保障机制	41
参考文献	41
第三章 湿地生态流量调控模型	44
第一节 面向水质改善的湿地生态流量调控模型	44
一、考虑水质因素的湿地生态流量计算模型	44
二、考虑水质因素的白洋淀湿地生态流量模型构建	51
三、考虑水质改善的白洋淀湿地生态流量阈值确定	54
第二节 面向生态修复的湿地生态流量调控模型	60
一、湿地生态流量关键要素解析	60
二、面向生态修复的湿地生态流量调控模型	65
三、面向生态修复的白洋淀湖泊湿地生态流量调控方案	67
第三节 多水源协调的湿地生态流量调控模型	70
一、多水源协调的湿地生态流量调控模型构建	70
二、主要模型参数和水文情景方案设置	74
三、多水源协调的白洋淀湿地生态流量调控方案	76
参考文献	80
第四章 湿地生态流量调控模式	82
第一节 湿地生态流量调控类型	82
一、按照调控目的划分	82
二、按照调控水源划分	83
三、按照调控补偿机制划分	83
第二节 湿地生态流量应急调控模式	84
一、湿地应急生态补水的内涵	84
二、湿地应急生态补水的目标与原则	85
三、白洋淀应急补水案例分析	87
四、南四湖应急补水案例分析	95
第三节 湿地生态流量长效补给模式	98

一、湿地生态流量长效补给的内涵与特征	98
二、湿地生态流量长效补给的目标与机制	99
三、黄河三角洲淡水恢复湿地生态补水案例分析	101
四、衡水湖生态补水案例分析	108
第四节 湿地生态流量调控发展趋势	110
一、尚存在的问题	110
二、相关的解决途径	111
参考文献	112
第五章 湿地生态流量调控效应研究(I)	114
第一节 湿地生态补水对水质的影响	114
一、水质年际变化情况	114
二、监测断面水质评价	117
第二节 湿地生态补水对沉积物的影响	120
一、对沉积物盐度的影响	122
二、对沉积物含水率的影响	122
三、对沉积物中值粒径的影响	123
四、对沉积物 TOC 的影响	124
第三节 湿地生态补水对植被的影响	124
一、水分胁迫水平对典型植物的生物量的影响	126
二、水分胁迫水平对生物多样性的影响	127
三、水分胁迫水平对植物营养元素吸收的影响	128
四、小结	132
第四节 湿地生态补水对大型底栖生物群落的影响	132
一、对大型底栖动物群落结构的影响	132
二、对大型底栖动物功能群的影响	139
第五节 湿地生态补水对鱼类的影响	142
一、对鱼类组成的影响	142
二、对鱼类捕获量的影响	143
参考文献	144
第六章 湿地生态流量调控效应研究(II)	146
第一节 湿地生态补水对景观格局的影响	146
一、湿地土地利用/土地覆被数据解译	146
二、生态补水工程驱动下的湿地土地利用/土地覆被变化	147
第二节 湿地生态补水对生态系统服务的影响	151
一、湿地生态系统服务评估方法	151

二、浅水湖泊湿地生态补水后生态系统服务响应	152
三、滨海湿地生态补水后生态系统服务响应	175
第三节 湿地生态补水对生态系统健康的影响	189
一、湿地生态系统健康评价方法概述	189
二、湿地生态系统健康评价的典型实例	190
三、生态补水对浅水湖泊湿地生态系统健康评价的影响研究	193
第四节 湿地生态补水对生物多样性的影响	201
一、生态补水对生物多样性的影响浅析	201
二、湿地生态补水对生物多样性影响研究方法	202
三、湿地生态补水对生物多样性的影响	204
参考文献	211
第七章 湿地生态流量调控可能的生态风险分析	215
第一节 大型底栖动物痕量金属元素污染风险	215
一、湿地沉积物中痕量金属元素分级形态	215
二、大型底栖动物体内痕量金属元素	221
三、沉积物与大型底栖动物痕量金属元素风险的关系	224
第二节 大型底栖动物群落结构演替的生态风险	225
一、大型底栖动物丰度、生物量与沉积物盐度的关系	226
二、基于大型底栖动物 ABC 曲线的生态风险评估	228
第三节 植被群落的生态风险	231
一、基于 EVR 的黄河三角洲湿地生态风险评价模型	231
二、水分胁迫下黄河三角洲湿地多水平生态风险评价	233
第四节 湿地生态流量调控的生态风险防范	245
一、控制生态补水水位的风险	245
二、控制生态补水输水频率的风险	245
三、控制生态补水水质污染的风险	246
四、控制生态补水应急模式的风险	246
参考文献	246

第一章 绪 论

湿地生态流量调控是生态需水理论的具体运用,是退化湿地生态修复的重要措施,对于提升湿地生态系统服务、保障生态系统健康具有重要意义。本章基于湿地生态流量调控理论基础,从湿地生态流量核算方法、调控模型、调控效应等方面梳理湿地生态流量调控的发展脉络,归纳总结国内外湿地生态流量调控的研究进展。在当前的变化环境下,湿地生态流量调控研究应更加关注湿地生态需水理论对生态流量调控的支撑作用,湿地生态系统与社会经济的协调性、湿地生态流量调控在实践中适应性管理和不确定性的研究。

第一节 湿地生态流量调控的背景及意义

一、湿地生态流量调控的背景

1. 湿地生态流量调控是湿地生态需水理论发展的必然阶段

生态流量(environmental flows)指维持河道及河口的自然生态系统和维持人类生存发展所依赖的生态系统所需要的水量、时间和水质,也称生态需水(Brisbane Declaration, 2007)。这一概念自 20 世纪 40 年代被提出以来迅速发展,并成为 20 世纪以来全球关注的重大热点问题之一。湿地作为全球最重要的自然生态系统之一,也成为生态需水理论的热门研究对象,湿地生态需水量化方法也已经取得了阶段性的成果(杨志峰等, 2003; 2012)。2010 年以来,生态流量研究的关注点从单一生态流量指标转变为综合生态流量过程再转向生态流量调控(刘悦亿等, 2016)。湿地生态流量调控是采用工程措施人为地长期从相邻地区引(调)地表水向湿地补充水量,使湿地水面或水位在一定的时间段内保持相对稳定,进而维护其生态功能的一项水利措施,是以生态流量为依据的湿地生态保护实践,是湿地生态需水理论发展的必然阶段(杨薇等, 2008)。湿地生态流量调控应以湿地生态需水的理论核算结果为基础,考虑实际生态与环境功能需要,并根据实际水资源丰枯情况来确定合理的调控方案,以保证湿地水位或水面在时空尺度上合理变化,从而实现水资源的合理配置。我国《水污染防治行动计划》明确提出,要科学确定生态流量,加强江河湖库水量调度管理,维持河湖基本生态用水需求,重点保障枯水期生态基流。这也是推进水质、水量和水生态统筹保护,积极实践湿地生态流量调控的

重要里程碑。

2. 湿地生态流量调控是我国生态水利建设与规划的具体实践

生态水利是指使环境永续利用的生态体系,研究水利工程建设和运行对流域生态环境的影响以及在这种影响下生态系统的演变趋势,探索在水资源开发利用过程中,采取的既能满足人类社会需求,又能兼顾水生态系统健康和良性发展的各种措施和方法(姜翠玲和王俊,2015)。区别于传统水利,生态水利更注重水利工程生态环境与景观的修复、改善与保护水体的应用。水利工程的优化目标由传统的“技术经济最优”改变为“生态效益、经济效益和社会效益最优”,且要求用生态学的基本观点来指导水利规划、设计、建设和管理,其功能不仅是为了人类单一的需求,还考虑到水自身的需求以及水周围的动物、植物对水的需求,保护生态系统(孙宗凤,2003)。面向湿地生态系统恢复与改善的生态流量调控是湿地生态水利建设规划的具体实践。自2000年起开始实施的黑河、塔里木河、黄河的“三河”调水工作,在给受水地区带来巨大的经济效益和社会效益的同时,显著改善了受水区域湿地的生态环境,这可以看成是我国生态流量调控的具体实践。目前我国仍停留在理论的初步尝试阶段,从实践和研究现状来看,我国湿地生态流量调控是应对自然灾害、水体污染、泥沙淤积、湿地萎缩、生态灾难等的应急性调度。例如,近年来,受传统水利的影响,北方河湖湿地,如白洋淀、衡水湖、南四湖等水体,日趋干涸,水生生态系统受到极大影响。有关水利管理部门逐步实施了生态流量调度工程,向河湖湿地补水,可以满足鱼类、水生植物、浮游生物、鸟类等生物链的最低用水需求。

3. 湿地生态流量调控是退化湿地生态修复的重要措施

受城市化进程、气候变化等因素影响,湿地退化成为全球性现象,其退化特征体现在湿地水文、土壤、植物、动物和环境功能等方面(Powell et al., 2008)。水文条件(水量、水位、洪泛事件、淹没频率、淹没时间等)是湿地退化的特征因子,能直接改变湿地的理化性质(董哲仁和张晶,2009),影响有机物累积、营养循环、物种组成、净生产力,进而影响湿地生态服务功能的发挥。当湿地水量减少到一定程度以后,将会对湿地造成不可逆转的破坏。因此,在湿地保护和生态功能恢复过程中,改善和恢复其水文条件至关重要。湿地生态补水在实施的湿地生态补水措施中起先导性作用,随着对湿地生境保护的日益重视,生态补水成为国内外诸多湿地为防止生态退化而采用的生态恢复方法,旨在补给湿地生态系统的水资源短缺量,维护湿地系统生境的动态平衡。湿地生态补水的具体对象多为因自然环境变化和人类活动造成缺水而导致生态退化的洪泛沼泽湿地、河口湿地和湖泊型湿地等。

二、湿地生态流量调控的意义

1. 维护湿地生态系统健康

湿地生态系统健康要求既能为人类所利用,满足人类生存和生活所需,也能维持湿地生态系统自身发展所需,而湿地生态系统本身的自我发展又能更好地为人类服务。水是维护湿地生态健康、结构稳定性的重要因素,进行湿地生态补水是保证已经干枯和正在承受缺水威胁的湿地得以恢复的重要手段,湿地长效生态流量调控方案是维护湿地生态系统健康的重要途径。一些研究表明,湿地生态流量调控是退化湿地(特别在干旱-半干旱区)生态系统健康改善的重要驱动(Grand-Clement et al., 2013),它依赖于上游或其他水源对待修复湿地进行水量补给,加大湿地水面或水位,增强栖息地连接度,以期促进湿地生态系统及其生物多样性改善(Newton et al., 2012)。有研究进一步表明,湿地生态系统的健康状态(湿地生产力、组织结构、弹性和功能等)与湿地水位变化之间存在显著的相关性,并存在湿地生态系统最佳健康状态的水位阈值(徐菲等, 2013; 杨波等, 2014)。因此,积极开展湿地生态流量调控对于维护湿地生态系统健康具有重要意义。

2. 提升湿地生态系统服务功能

湿地生态流量调控通过生态调水进行水文调节,影响土地覆被、生态格局,已逐渐认为湿地生态流量调控是改善生态系统服务、促进其正向演变最具潜力的生态修复措施之一。现有研究者通过对生态调水实验后湿地生态系统变化和响应进行监测,在提升湿地生态系统服务和维持湿地生态系统多样性等方面,获得了许多积极充分的证据(Yang et al., 2016),生态补水后湿地的某一种或几种生态系统服务功能发生变化,相关研究主要集中在水质净化、栖息地理化条件、营养循环、生物组成与多样性、鱼类捕获量变化等方面。生态流量调控对湿地生态系统结构功能有积极影响。有研究发现,生态流量调控对于湿地栖息地连通性、生物多样性显著优于非修复方案生态系统状态(Newton et al., 2012)。Yang W 和 Yang Z F (2014)系统评估了生态流量调控对湖泊湿地总生态系统服务的影响,结果表明湖泊生态水位与生态系统服务之间具有较高的相关性。自 2001 年扎龙湿地开始生态补水以来,芦苇沼泽面积增加,丹顶鹤种群含繁殖种群在数量、分布上有响应,数量出现历年来的峰值,大面积湿地补水对湿地恢复及丹顶鹤种群的保护起到了一定程度的积极作用(冯晓东, 2013)。

3. 保障生态环境与社会经济的协调发展

随着人类社会经济发展对水资源需求的日趋增长和对水环境的加剧破坏,水

资源供需矛盾日益尖锐,生态环境维持和发展所需的水资源被占用,湿地生态不断恶化,出现了植被退化、河湖湿地萎缩等一系列生态环境问题。在这种情况下,人类开始认识到研究生态需水的迫切性和保证生态流量的必要性。特别是在我国干旱-半干旱区,生产生活用水和生态用水之间矛盾十分突出的情况下,协调湿地生态用水与社会经济用水的关系显得尤为重要(董文君,2011)。湿地生态流量调控是湿地生态环境保护的重要方面,也是流域生态与环境保护的切入点。湿地生态结构复杂,成因多样化,特别是洪泛形成的湿地大多为多水源补给类型,在采用生态补水的同时,也需要协调流域或区域内各项用水需求(冯晓东,2013)。因此,对湿地生态需水进行全面分析,并合理开展水量调控,对于恢复湿地生态功能,保障生态环境与社会经济的协调发展具有重要意义。

第二节 湿地生态流量调控理论基础

一、生态水文学理论

生态流量研究本质上是生态系统对不同水文情势响应规律的研究,研究主要在水文情势指标和生态指标的科学选择以及彼此之间关系的定性或定量描述。研究通常包括三个部分:水文情势指标的选择和构建、生态指标的选择和构建,以及对水文指标和生态指标之间关系的调查、梳理和分析(杨志峰等,2012)。

1. 生态-水文响应关系

生态环境因素的多样化,相互作用联系的复杂性使得生态-水文响应关系研究成为一项长期而艰难的工作。在水文指标构建方面,早期研究简单地将生态需水理解为生态系统与特定流量指标(如流量、流速)的关系。直到20世纪90年代中期,才对水文情势的内涵有了较为全面的认识,主要包括流量大小、发生时间、发生频率、持续时间和变化速率五个方面,每个方面又需要相应的指标来表征(Poff et al., 1997)。在水文情势众多指标的支撑下,建立多要素的指标体系或从系统层面构建复合指标(如水文连通度、生态赤字等),能更真实地反映水文情势的变化情况。另外,由于生态系统本身的复杂性,其在组成上包括物理环境、微生物、植物和动物等,在尺度上包括个体、种群、群落、生态系统和区域景观等,并且不同时空条件下的生态系统各自具有独特的结构和功能,因此,生态指标的选择和构建需要更加科学和谨慎。湿地生态水文过程的复杂性及生态需水目标的差异,使得湿地生态-水文响应关系的研究仍有许多工作要做。以下分别从生境、生物和生态系统整体角度分析生态-水文响应关系。

1) 生境-水文响应关系

生境是生物生长繁殖所需的所有环境因子的总和。生境的时空分布格局在很大程度上决定了生物群落的分布,具体就湿地生态系统而言,水文情势从根本上决定了生境条件,而生境是湿地生物群落的决定因素(Bunn and Arthington, 2002)。Kobayashi 等(2015)基于水文和地形的差别,将澳大利亚干旱-半干旱区的泛滥平原分为三种群落结构和功能不同的湿地类型,即促进水量流通的河道生境、存在水文联通的河道终端浅水区生境和由洪水脉冲联通水文的泻湖生境。这表明,虽然地形不同,水文的纵向联通增加了栖息地生境的相似性。通过现场观测或实验可以获得特定生境指标变化规律,结合水文情势的变化可以分析彼此间的对应关系,将这些生境指标与生物需求联系起来,建立的生境-水文响应关系可以作为生态需水的研究基础。一般,水文情势改变对湖泊生态系统,特别是浅水湖泊的作用,首先影响非生态变量(如泥沙、水质等),如水量减少、洪峰削减使得湖滨带干湿交错区域的土壤类型和质量发生变化,C、N 通量发生改变(Acuña, 2010)。对湿地生态系统而言,水位对水面面积和水量具有显著的影响,因此水位-水面面积关系和水位-水量关系是生境-水文响应关系研究中的重点,基于生态效果确定的关键水位是湿地生态系统生态流量的确定重要参考(袁平等, 2005)。在更大空间尺度上,不同生境类型的划分及其空间分布成为重点,将不同水文情势下的生境空间分布格局与鱼类等的生态需求结合,可以为确定湿地的生态需水提供支持。越来越多的研究对各种生境指标进行着不断的完善和细化,包括水温、电导率、溶解氧、营养盐浓度、重金属含量等(Hancock and Boulton, 2005)。

2) 生物-水文响应关系

植被是湿地生态系统的重要组成要素之一,从根本上决定了湿地生态系统的结构和功能;动物是生态系统中最活跃的组成部分,对许多生态过程来说必不可少。在湿地生态系统的研究中,对生物-水文响应关系的探究是一直以来的重点。多年来,虽然人类基于不同的原因进行了大量河流流量的调控,但在水生生物对流量机制的响应方面还缺乏科学有效的监测手段(Souchon et al., 2008)。

对植物-水文响应关系的研究包括种群和群落两个水平。对种群水平的研究集中在常见的优势物种,侧重考察物种对于干旱和淹水胁迫的响应,发现干旱和淹水的阈值。以湿地常见植物芦苇来说,研究人员对其生长繁殖、生理特征、种群分布、群落结构与水深、土壤水分、土壤盐渍化程度之间的关系和响应机制进行了大量研究。对芦苇生理指标的实验观测发现,不同淹没程度和淹没时间会造成芦苇氨基酸、色素等物质含量和恢复能力的差异(Jackson et al., 2009)。淹水会导致芦苇氧气传输受阻和一定的机械损伤,芦苇不能维持长期的厌氧代谢,幼苗在持续的淹水条件下较易死亡,地势低洼处的渍水和厌氧环境会限制芦苇的扩张。渗透调节是水生植物面对环境胁迫做出的响应,其能力的提高也是植物抗性增强的重要机制。

脱落酸(ABA)、超氧化物歧化酶(SOD)、 Na^+ 、 K^+ 等都可以通过改变渗透势来提高对水分的吸收能力以及阻止盐分的过分摄入。特别是考虑到脯氨酸作为分布最广的一种相容渗透剂,是分析植被对水文等环境要素变化响应关系的重要指示性参数之一(Jiménez-Bremont et al., 2006)。在群落水平,水文情势对生物群落时空分布格局的影响是研究热点。浅水湖泊中,沉水植物群落是重要组成部分,受到湖泊水深、透明度等条件的影响,沉水植物在湖内的分布和数量有随着水深增加而递减的趋势,超过 5m 的水深条件,沉水植物分布将显著减少。而浮叶植物群落分布受到根系土壤条件和叶片漂浮水面的要求,在水深 5m 以上的湖区也很少分布。另外,蒸腾通常占植物需水的 99% 左右,是湿地生态需水研究的核心内容之一,对植物耗水机制的探索和精确模拟成为热点(杨志峰等, 2012)。

动物在湿地生态系统一般处于较高的营养级,能较好地反映生态系统整体的生产力水平和健康状况。目前,关于动物-水文响应关系的研究主要关注对象包括大型底栖无脊椎动物、鱼类和鸟类,研究方法主要以考察水文情势改变前后动物个体和种群特征的变化为主,研究目的较为明确。在对南大港滨海湿地鸟类群落结构及其环境因子的关系的研究中发现,11 月到第二年 3 月,湿地处于最低水位,低水位直接增大了鱼类的暴露率,但却有利于鸟类的捕食(张彦威等, 2003)。大量的研究已经获得了一些物种-水文的响应关系,对早期的保护和利用提供了有利参考,但单据此来确定生态需水是不够的,因为水文情势对单个物种或局部的某一方面的有利改变,对其他物种和整个生态系统不一定有利(Poff and Zimmerman, 2010)。

3) 生态系统-水文响应关系

以往关于生态-水文响应的研究或指标过于单一,忽视了生态系统整体上的响应,或因指标过于复杂而无法应用于实际,而遥感、模型技术等进步,为研究水文情势的改变对生态系统整体的影响进而确定生态需水提供了有效手段。生态系统整体性指标包括归一化植被指数(NDVI)、生物多样性、生态系统服务功能、净生产力、生态健康等。特别是水文情势与生态系统服务的关系研究逐渐引起了学者的关注。有文献表明,湿地生态流量过程与湿地提供生态服务的能力之间存在潜在关联(Karanja et al., 2008),并且以经济价值的方式度量湿地生态系统服务功能,这为评价环境效益提供了有效的量化数据,在经济活动与生态系统服务的权衡、水资源规划调控中具有重要意义。Mortsch 等(2008)研究发现季节性水位波动可有效增加湖滨湿地物种多样性和初级生产力,但在极端干旱或洪涝情景下,湖滨湿地生态系统初级生产力会显著下降。部分学者通过建立湿地生态流量过程与其功能的关系函数,来评价湿地生态系统对水文条件的反应能力及恢复能力(Ojeda et al., 2008; Stewart et al., 2010)。整体上看,单一生态流量要素的改善可显著增强湿地生态服务功能,但湿地生态流量并非局限于某一特定水文因子,多要素

的变化与联动将会对湿地生态系统结构与功能产生更加深刻的影响。

对湖泊生态系统来说,水文情势通过高、低脉冲的交替维持着湖泊生态系统基本生态流量,具有时空动态相匹配的特征;另外,水文情势的变化也改变了湖泊地貌、面积、浅滩分布、基质稳定性等,影响着植被生长的基本自然生境(Sharifikia, 2013),在一定程度上决定湖泊生态系统中物种的组成、群落演替和系统演变。特别是浅水草型湖泊,水位的微小波动将产生显著的面积和格局变化,生态响应敏感,格局与过程交互作用突出,使得水文情势变异影响下浅水草型湖泊生态系统面临的威胁最为敏感;生态需水量短缺导致浅水草型湖泊面积萎缩和洪旱灾害频繁,加剧了生境质量下降和生物多样性锐减。

2. 湿地生态需水阈值理论

广义湿地生态需水是指维持湿地生态系统平衡和保障湿地生态系统水文功能及相关环境功能正常发挥所需的水量,包括湿地植被需水量、满足蒸发需水量、湿地土壤需水量、湿地动物需水量、野生生物栖息地需水量以及景观建设需水量等(杨志峰等,2003)。狭义湿地生态需水量是指在一定时空尺度下,湿地用于生态消耗和环境消耗而需要补充的水量。湿地生态需水量依据湿地自身的生态特征和保护目标不同而不同,可为湿地特定的生态水利工程管理提供参考价值。

湿地生态需水研究以水文循环为基础,目的是利用可调控的水资源为湿地或整个流域的环境保护和规划管理服务。国外较早开展生态需水研究,以美国鱼类和野生动物保护协会出于保护水生生态系统生物多样性的目的,从针对鱼类生长繁殖和产量与流量的关系提出河道最小流量的概念开始,逐步形成了以河道生态需水计算为主的理论与方法。与国内相比,欧美国家自然条件较为单一,社会发展较为稳定,环境保护基础较好,人与自然的矛盾较小。而我国自然条件复杂多样且受季风作用明显,水文情势复杂,加之社会经济发展迅速且存在区域不均衡性,以水资源利用为代表的人与自然矛盾突出。湿地生态需水研究需要更多着眼于湿地生态系统的修复和维持、生态流量的核算和优化调度。国家“十五”科技攻关项目“中国分区域生态用水标准研究”从基础理论、应用技术、管理决策三个层面,干旱地区、半干旱半湿润地区、湿润地区三个区域,河流、湿地两个主体,给出一系列相互关联的思想和技术,论述了基于我国现实条件的生态需水理论与计算方法体系,强调要根据流域水循环特点建立具有区域特点的生态需水模型,为区域生态需水计算奠定了理论基础(陈敏建和王浩,2007)。

临界阈值性是湿地生态需水的突出特征(崔保山和杨志峰,2002)。对于某一湿地生态系统,其生态需水量有一个阈值范围,即上限和下限,如果湿地的可利用水量不在该阈值范围内,则会导致湿地生态系统的退化或破坏。这是一种临界状态,当可利用的水量过少时,将不能满足湿地生物基本的存活和生长需求,湿地生

态系统将发生严重的退化,甚至消失;反之,也会影响生态系统健康。由于湿地来水量的差异,湿地在丰水年、平水年和枯水年具有不同的生态特征,湿地边界会发生明显的变化,可以通过对不同平水年的来水量加权的方式得出湿地生态需水量的临界阈值。另外,基于生态学的方法,可以从湿地生态系统的结构和功能的角度来划分湿地生态需水的级别(崔保山和杨志峰,2003)。湿地生态需水量等级的划分与其生态需水量阈值特征的研究具有一致性,最大生态需水量对应临界阈值的上限,最小生态需水量对应临界阈值的下限。

二、水资源优化配置理论

水资源的优化配置关系到社会经济发展和生态环境保护的各个方面,公平、高效和可持续的水资源优化配置模式的构建是全社会关注的热点和追求。水资源优化配置要综合考虑水资源开发利用对社会经济、生产生活和生态环境等方面的影响,运用系统分析的理论和整体的优化技术,在保障人与自然和谐共存的前提下,将有限的水资源高效合理地分配到各个用水单元和区域,获得最佳的综合效益(赵坤,2012)。国外的水资源优化配置的研究和实施主要分为以水量为主和考虑水质因素的两种配置模式。我国水资源配置理论主要分为考虑供需单方面限制作用的优化配置理论、以经济效益最优和效率最高为目标的优化配置理论和综合考虑资源、经济、生态统筹协调发展的协调优化配置理论三个方面(李巍等,2011)。水资源的优化配置最先主要涉及水库的优化调度方面,后来逐渐发展成面向整个流域的水资源优化配置问题。关于水资源优化配置的具体方法和技术已有大量较为成熟的研究,并且随着技术的发展和研究的深入在不断地补充和完善,主要包括线性规划、非线性规划、多目标规划、神经网络、模糊分析、蚁群算法、遗传算法等。

对具体的水域生态系统而言,通过优化配置和调控保证退化生态系统的水文要求是改善水生生态系统和维持健康的重要途径。国际水资源协会认为流域水资源优化配置是将有限的水资源在多种相互竞争的用户中进行复杂分配,各项目标的基本冲突主要表现为经济效益与生态环境效益上的冲突。对于干旱区的河流进行生态流量调控会显著提高河道两岸的地下水水位,促进局部区域河岸植被的生长,考虑水资源配置参数与目标物种物理化学过程的适应性会增加调配效果(Aishan et al., 2013)。常规的基于湖泊水文情势的优化配置方法,强调保证湖泊最小生态水位,但相对固定的生态水位并不能实现湖泊生境的有效调控和湖泊生态系统的充分保护。例如,洪水和枯水等水文事件都具有重要的生态意义,单纯以最小生态需水作为优化配置的约束条件,可能造成河流生境和物种的单一化,引发新的生态风险。因此,湖泊水文情势的修复需要同时考虑水文波动幅度、频率、持续时间、变化率等多种特征(Yang et al., 2011)。水资源的综合配置逐渐从单纯追求流域经济目标发展到以追求流域整体效益最优为目标的合理配置,强调了流域不同时空