

· 专题:双清论坛“湿地保护和修复的基础理论及关键技术问题” ·

## 长江中游河湖湿地系统演变与生态修复\*

王学雷<sup>1,2†\*\*</sup> 蔡晓斌<sup>1,2†</sup> 杨超<sup>1,2</sup> 吕晓蓉<sup>1,2</sup> 厉恩华<sup>1,2</sup> 王智<sup>1,2</sup>

1. 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院,武汉 430077

2. 环境与灾害监测评估湖北省重点实验室,武汉 430077

**[摘要]** 长江流域拥有我国最为丰富和独特的生态系统及众多的野生动植物物种;而承东启西的长江中游是全流域湖泊最集中、支流最多的地区。受气候变化和人类活动的双重影响,域内江、河、湖等湿地水文过程及江湖格局发生变化,湿地生态脆弱性加剧,生态系统稳定性受到破坏,湿地生态有退化的趋向,进而影响其生物群落、生态系统结构和功能,综合生态功能下降。同时由于围湖垦殖及湿地农业等方式对自然湿地的利用改造,长江中游构成了自然河湖与人工沟渠、农田镶嵌的复合湿地结构和景观,形成了复杂的自然—人工复合湿地生态系统。高强度开发背景下自然—人工湿地的互动演变机制,考虑不同退化特征的湿地恢复目标与修复路径及变化环境影响下的湿地综合保护策略是长江中游湿地相关研究中的关键问题。以此为基础,阐明气候变化和人类活动对长江中游湿地生态系统的影响,解析湿地退化动因、受损过程与差异性退化机制,提出长江中游湿地生态系统修复目标、路径及综合保护策略,对实现长江中游生态保护和长江经济带高质量绿色发展具有重要意义。

**[关键词]** 长江中游;河湖湿地;演变过程;生态修复;保护策略

### 1 研究背景与意义

大河流域是全球资源丰富、经济发达、人口密集的地区,同时又是环境变化复杂、对全球变化响应敏感、生态环境脆弱的地区。长江流域横跨中国东中西部,拥有我国最为丰富和独特的生态系统,众多的野生动植物物种;流域内类型多样的森林、湿地,不仅维护了长江流域的生态平衡和经久不衰的生命力,也是我国水资源配置中重要的战略水源地。因此,维持健康长江对国家经济社会发展、水安全和生态安全都具有十分重要的作用。

长江中游既是长江经济带的腹地,又是其承东启西的关键地区,长江最大的支流—汉江也位于其中。长江出三峡至湖口全长 955 km,流域面积  $66.8 \times 10^5 \text{ km}^2$ <sup>[1]</sup>,其特有的地貌条件孕育了丰富的湿地。根据卫星遥感解译结果,长江中游河流



**王学雷** 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院研究员,国家湿地科学技术委员会委员,全国湿地保护标准化技术委员会委员。主要从事流域生态学、湿地演化与生态修复、湿地过程与环境效应以及环境遥感应用等领域的研究。在 *Journal of Hydrology*, *Science of the Total Environment* 等期刊发表学术论文 120 余篇,编著专著 12 部。



**蔡晓斌** 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院副研究员,主要从事湿地水文遥感与湿地植被遥感研究。在 *Nature Geoscience*, *Remote Sensing of Environment*, *Journal of Hydrology* 等期刊发表学术论文 20 余篇,参编译著《河流遥感:科学与管理》。

湿地面积达  $4\,836.82 \text{ km}^2$ ,湖库湿地面积达  $11\,000.98 \text{ km}^2$ <sup>[1]</sup>。长江中游是全流域湖泊最集中、支流最多的地区。长江及其众多支流泛滥形成了大

收稿日期:2022-02-11;修回日期:2022-03-30

\* 本文根据第 289 期“双清论坛”讨论的内容整理。

\*\* 通信作者,Email:xlwang@apm.ac.cn

† 共同第一作者

本文受到国家自然科学基金项目(41571202,42171381,41801100)和中国博士后科学基金项目(2020M682526)的资助。

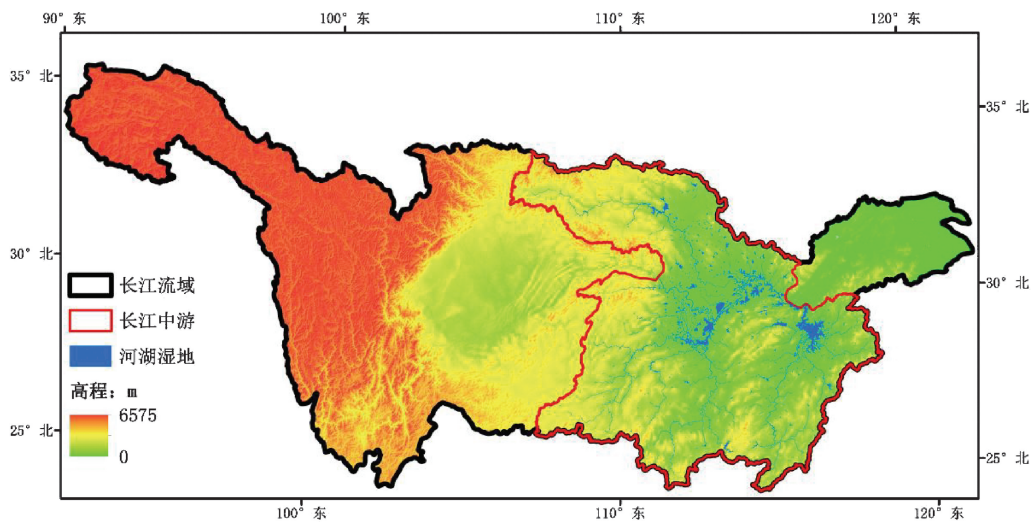


图 1 长江中游河湖湿地分布图

量的河湖湿地,江、湖之间强烈的相互作用和反馈过程造就了其复杂的湿地系统(图 1)。湿地是长江中游水文循环的重要组成部分,在维持流域的水量平衡方面起到了重要的调节作用。同时,长江中游正处于三峡工程及南水北调中线工程两大水利工程共同作用地区,区域生态与湿地环境演变所受影响广泛而深远。三峡工程控制和调节了长江水量在时间上的分配,极大地改变了长江中游河段的水沙情势,并由此影响河道演变。受气候变化和人类活动的双重影响,长江中游江湖格局发生显著改变,江、河、湖等湿地水文过程及区域水资源时空分布发生变化。与此同时,长江中游河湖湿地系统生态脆弱性加剧,生态系统稳定性遭受破坏,湿地生态有明显退化趋向,进而影响了其生物群落、生态系统结构和功能,整体的综合生态功能有显著下降趋势。

近百年来,由于气候变化、围湖垦殖及区域湿地农业结构调整等因素影响,长江中游河湖湿地生态系统与农田湿地生态系统之间相互影响、相互作用更为明显与强烈,形成了复杂的自然—人工复合湿地生态系统。自然河湖与人工沟渠、农田镶嵌的复合湿地结构和景观,已成为维系长江中游生态系统稳定、防洪调蓄、维持生物多样性和发展湿地农业等的重要地理生态单元,具有重要研究价值。因此,揭示长江中游自然与人工复合湿地生态系统演变机制对实现长江中游生态保护和长江经济带高质量绿色发展具有重要意义。

长江中游地处亚热带季风气候区,是我国湿地和淡水水域生物多样性关键地区之一,也是世界自然基金会确立的旨在拯救地球上急剧损失的生物多

样性优先保护区域。因此,以长江中游河湖湿地为研究对象,研究其自然—人工湿地的互动演变机制,阐明气候变化和人类活动对长江中游湿地生态系统的影响和响应,跨尺度解析湿地退化动因、受损过程与差异性退化机制,提出长江中游湿地生态系统修复目标、路径和综合保护策略具有重要意义。与此同时,由于长江中游湿地在全流域水生态安全中的关键地位,相关研究可以为整个长江流域的湿地保护与生态管理提供示范。

## 2 研究现状与进展

### 2.1 长江中游湿地历史演化过程及驱动机制

第四纪以来长江中游湿地生态系统一直处于动态的演化之中,湿地的形成发育过程与江湖关系的动态变化及人类活动息息相关<sup>[2]</sup>。

长江中游湿地的历史演化过程可分为三个阶段,即自生自灭的自然演替阶段(晚更新世末至全新世初)、自然—人工演替阶段(春秋战国至 1950s)、人工演替为主阶段(1950s 以后)。在自然演替阶段,人类活动的强度与广度有限,处于一种顺应自然的状态。随着人类历史的发展,湿地演变逐步转型为自然—人为共同作用阶段,人工湿地、洲滩湿地逐渐增加,自然水体面积不断减少。最初,包括洪湖在内的江汉湖群皆为通江的浅水吞吐湖,湖水随长江水位的涨消而起落,人地关系相对和谐。20 世纪 50 年代后,人类对长江中游湿地的改造达到前所未有的程度,湿地演替以人工演替为主,自然湿地遭到大面积围垦,通江湖泊被人为阻隔,湿地生态退化态势逐渐显现。长江中游的洞庭湖在全盛时期面积可达

6 000 km<sup>2</sup>,到 20 世纪末面积缩减至 2 691 km<sup>2</sup>。在 20 世纪 50 年代江汉湖群面积有 4 009 km<sup>2</sup>,到 90 年代只有 1 502.7 km<sup>2</sup>,近半个世纪内减少幅度在 2/3 以上<sup>[3]</sup>。

长江中游湿地的历史演化是多种环境因素综合作用的结果,在不同发展演化阶段,主导因素亦有所不同。自然演替阶段,长江中游湿地演变是顺应自然条件而变,自然因素决定着湿地演变格局。地质构造条件和长江的洪泛特征奠定了长江中游河湖湿地的形成基础,古气候环境变化带来的洪涝灾害推动了湿地的范围变化与沼泽化进程<sup>[4]</sup>。进入 20 世纪以来,人类围湖垦殖及堤、闸、坝等水利工程设施的修建,使江湖关系发生剧烈改变,长江中游泛滥区域被约束在有限的范围之内,自然湿地逐渐萎缩、消亡<sup>[5]</sup>。

长江中游河湖湿地的演变及其生态环境效应错综复杂、利弊交织,自然演变过程与人类活动相互交错、互为因果,由此引起的洪涝渍旱灾害频繁、河湖湿地锐减以及水环境恶化等一系列生态环境问题亟需引起关注。

## 2.2 长江中游河湖湿地水文过程变化机制及生态效应

地表水文过程是湿地生态系统演替的主要驱动力,主导了湿地植物的基本生态过程和生态格局<sup>[6,7]</sup>。水文过程的变化会显著改变湿地的物质流、能量流和信息流,进而对水质和动植物的群系结构产生影响。

随着三峡工程和南水北调中线工程的实施,全球变化的不确定性以及江湖连通格局的改变,导致长江中游水资源时空分布的差异性增大,直接影响了河湖湿地生态系统的结构和功能。三峡工程运行后长江中游干流水文情势发生变化,水文节律的改变使得生态水文指标和环境流指标随之变化,进而影响到工程下游湿地的生境条件,中华鲟、江豚等珍稀物种的栖息环境堪忧。同时,部分支流(如汉江)水利工程建设也在一定程度上加剧了湿地生境的退化,有研究表明南水北调中线工程和梯级水利枢纽工程建设显著改变了汉江中下游流域的水文情势,鱼类资源量急剧下降,水华灾害发生频率增加<sup>[8]</sup>。

在众多水利工程的综合影响下,长江中游江湖关系发生改变。水文连通性的降低,影响着河流行洪和湖泊调蓄功能的发挥,还削弱了江湖之间的物

质和能量交换,降低了生物多样性,一定程度上降低了入湖水沙量,湖泊的冲淤规律也随之发生改变<sup>[9]</sup>。此外,气候变化对长江流域水资源的影响也不容忽视,长江中游水资源总量与降水量、气温及蒸散发等气候因子存在显著的相关性,降水格局的变化改变了湿地水文状况,加剧了湿地生态的不稳定性<sup>[10]</sup>。在人类活动和气候变化的双重作用下,自然河湖湿地面积萎缩、生物多样性降低,并且存在生物入侵影响加剧、水环境进一步恶化的风险。

## 2.3 水环境演变过程及其对中游河湖湿地生态系统的影响

水是湿地生态系统物质和能量输送的载体,水环境的恶化不仅影响湿地动植物的生长繁殖,也会加剧区域水资源短缺,最终影响湿地的功能和价值。

长江中游沿岸人口数量大、工农业发达、排污量大,流经城市区的江岸段形成典型的污染带,局部水体污染严重<sup>[11,12]</sup>。同时,湖区农业面源污染进一步加重了长江中游河湖湿地系统的污染负荷。研究表明长江流域水环境问题突出,湖泊富营养化问题严重,湖泊湿地生态功能遭受不同程度地破坏<sup>[13]</sup>。近 20 年来,长江中游干流区域高锰酸盐指数、重金属和石油类污染均明显减轻<sup>[14]</sup>。整体来看中游干流水质优于湖泊水质。总磷(TP)、氨氮(NH<sub>3</sub>-N)和化学需氧量(COD)是长江中游的主要超标指标,TP 和 COD 污染主要来自面源,NH<sub>3</sub>-N 主要来自点源<sup>[15,16]</sup>。

长江中游湖泊富营养化成因复杂,外源输入与内源释放是其主要原因,湖泊形态与水文条件也有一定影响作用<sup>[17]</sup>。位于长江中游的大型通江湖泊—鄱阳湖与洞庭湖,受长江来水量与来沙量影响较大;1996—2002 年其富营养化指数总体呈缓升趋势,2003 年后总体上有明显升势。2003 年三峡工程建成运行后,湖泊来沙量和来水量明显减少,导致湖水透明度降低、换水周期变长、湖泊水体交换不畅、湖体自身净化能力降低,这有利于营养物积累与藻类生长且会导致湖泊富营养化指数升高<sup>[18]</sup>。同时,蓝藻水华频发是富营养化湖泊所面临的重要水环境问题。从 1990—2016 年间长江中游 15 个大型湖泊蓝藻水华覆盖面积和频度的年际变化趋势来看,60% 以上的湖泊在气候变化和人为干扰的影响下,蓝藻水华的覆盖面积和发生频率都有增加趋势<sup>[19]</sup>。

在长江中游,围湖造田和围垦养殖等人类活动对湖泊的改造利用方式,对湖泊湿地生态系统影响深刻。如洪湖,其总体水质从 20 世纪 90 年代的 II—III 类逐步恶化至当前的 IV—V 类水质。洪湖湿地生态系统发生了明显的演替,如浮游植物优势种由 20 世纪 60 年代的硅藻与鼓藻为主演变为 90 年代的隐球藻为主,至 2020 年的半丰鞘丝藻和伪鱼腥藻为主,水体向富营养化演化;底栖动物物种数、生物量与多样性指数也发生了大幅度的降低;而围网养殖对湖泊局部水污染严重,总氮含量会随围网养殖面积扩大急速增加<sup>[20]</sup>。

#### 2.4 长江中游湿地生态系统退化机制及生态修复

湿地生态系统表现为脆弱性和不稳定性的特征,极易受到外界因素的干扰,引起生态系统结构与功能退化。长江中游湿地生态系统退化的主要原因是人类活动干扰,其内在实质是系统结构的紊乱和功能的减弱与破坏,而其外在表现上则是土壤潜沼化加重、生物多样性下降、洪涝渍害频发、水体富营养化等生态系统服务功能与价值的丧失。以江汉平原为例,历史上大规模的围湖造田造成湖泊调蓄洪涝能力的下降,在低洼的地貌条件叠加下,极易引起外洪内涝。许多自然河湖湿地成为了承接流域工业废水、生活污水以及养殖尾水的主要受纳地。同时,长期围网养殖使湖泊沉积物中积累的大量污染物在风浪及人为拖螺、打草的扰动下得以释放,极易引起湿地水体富营养化<sup>[8]</sup>。此外,江湖阻隔导致各生态类群的鱼类物种多样性下降、天然鱼苗资源枯竭<sup>[21]</sup>。

在长江中游独特的自然河湖湿地与人工稻田、养殖塘镶嵌共生的复合湿地景观下,如何开展退化湿地的生态修复与重建问题已引起研究者的关注。经过多年的研究实践,形成了较为系统的湿地修复技术模式,包括水文和水环境恢复技术、湿地生物恢复技术及湿地生境恢复技术等<sup>[22, 23]</sup>。其中,水环境恢复技术通过生态拦截、湿地植物净化、水生动物净化、人工浮岛技术、人工湿地净化等方式改善水质和提高水体透明度<sup>[24, 25]</sup>。水文恢复主要通过维持水文连通性、满足生态需水量、改变水流形态和调控水位等方法来实现。湿地生物恢复根据人为干扰程度的不同,既可通过封育措施实现自然恢复,也可通过人工选择先锋物种,进行湿地植物群落配置、优化和构建等。此外,可通过建设生态廊道、生境岛、隐蔽地等实现湿地生境的恢复。

针对长江中游河湖湿地,通过采用适当的生物、生态及工程技术,逐步修复退化湿地生态系统的结构和功能,最终达到湿地生态系统的自我持续状态,是退化湿地生态修复的最终目标。

### 3 关键科学问题

长江中游湿地一直以来受自然变化和人为活动影响剧烈。伴随着国家生态文明建设和长江大保护战略的推进和实施,长江中游开展了一系列的湿地生态修复工程,并取得了一定成效。在气候变化等不确定性因素的作用日益凸显,变化环境影响下长江中游湿地综合保护依然是我们难以回避的问题(图 2)。总体而言,长江中游湿地生态系统的演变、修复与保护主要涉及以下三个关键科学问题:

#### 3.1 高强度开发背景下长江中游自然—人工湿地的互动演变机制

由于围湖造田、围网养殖等人类对自然湿地的直接改造利用,长江中游自然湿地向人工湿地甚至非湿地景观转变的问题十分突出。伴随着地貌景观的改变,筑堤建闸、江湖阻隔,自然湿地之间的水文联系日渐减弱。目前除鄱阳湖湿地、洞庭湖湿地外,长江中游洪泛平原湿地江湖同步的水文波动节律已不复存在,自然的滨岸带湿地消失殆尽。此外,近年来高速的城市开发进程则对城市周边大量的小微湿地造成了难以忽视的影响。

与此同时,在持续高强度开发过程中,在原有自然湿地的基础上形成了大量的水稻田、精养鱼池、虾塘、蟹塘等人工湿地。随着大型水库,尤其是南水北调中线工程水源地丹江口水库大坝加高工程建设,长江中游也催生了大面积的消落带人工湿地。人工湿地的水文过程主要受农作物种植、水产养殖、水电

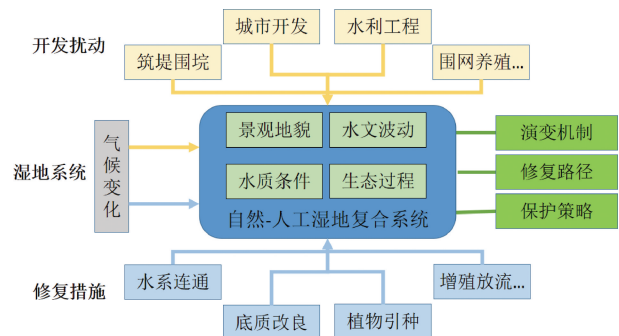


图 2 长江中游自然—人工湿地复合系统变化的环境背景及关键科学问题

开发及跨区域调水需求的调控。自然湿地向人工湿地转变过程中,除水文节律发生剧烈改变外,因养殖、种植产生的面源污染还成为了众多自然湿地最主要的污染源。由于水质污染加剧,长江中游河湖湿地的富营养化问题及伴生的水华事件时有发生。水文波动过程的减弱,水质恶化造成的水体透明度降低,改变了湿地原生植被的生境条件,湿地植被的覆盖面积及群落组成结构发生了系统性的改变。在此基础上,依附于长江中游自然湿地生境的豚类、鱼类、鸟类、两栖爬行类等濒危物种生存环境堪忧,整个长江中游湿地生态系统的生物多样性、生态系统稳定性降低。

因而,厘清高强度开发背景下自然湿地、人工湿地的景观地貌、水文波动、水质条件及生态过程的同步变化规律,揭示不同生境要素之间的互动演变机制,是长江中游湿地生态系统相关研究的关键。

### 3.2 考虑不同退化特征的长江中游湿地恢复目标与修复路径

长江中游湿地生态系统有着其自身的退化历程。追溯其变化轨迹,以自然状态下原有湿地的景观结构、水文过程、水质状况及生态系统组成为参考,分析不同湿地结构、功能及过程的可恢复潜力,从而确定湿地的恢复目标是长江中游湿地修复的基础。相较于20世纪50年代,如今长江中游的自然湿地大量消失,转变为人工湿地和其他用地类型,完全恢复到原有状态已无可能。事实上,作为典型的洪泛平原湿地,面积广袤的长江中游湿地即便在人为活动影响有限的历史时期,受河湖水系自然演变过程影响也曾经经历过剧烈的变迁。史书中广泛记载的“古云梦泽”“古彭蠡泽”在经历长时间的沉积淤浅早已逐渐消亡。

因此,需要统筹长江中游湿地生态系统应承担的生态服务功能,综合考虑不同类型退化湿地的开发历史及修复难度,设置相应的湿地面积、结构、功能恢复目标。同时,长江中游已开展了大量的湿地修复工程实践与规划,既有以改善湿地水文和水环境为主的水系连通工程、底质疏浚与改良工程,也有以湿地植物引种为主的植被修复工程,还有恢复濒危物种生境的微地貌改造工程,以及增加动物种群数量为主的增殖放流措施等。然而,自然湿地作为受多环境要素影响的生态系统综合体,单一目标的修复方案容易忽略其他环境要素的互动影响作用,陷入“头痛医头”的局部最优解,难以实现湿地生态

系统结构、功能的整体性修复。

基于长江中游湿地不同类型的退化轨迹,分析不同环境要素之间的互动影响规律,探寻以自然恢复为主、人工措施为辅、逐步推进的修复路径是长江中游湿地恢复的关键所在。

### 3.3 变化环境影响下的长江中游湿地综合保护策略

伴随气候变化和人类社会经济活动模式的改变,长江中游湿地生态系统所面临的环境条件也并非一成不变。全球气候变暖已成为科学界的共识,在未来气温逐年升高,极端气候事件发生频率增加的背景下,作为水陆交界区的湿地生态系统可能面临更大的环境扰动。有必要结合不同气候变化场景分析长江中游不同湿地潜在的弹性、脆弱性和适应性。另一方面,为了减缓全球气候变化的潜在威胁,全球已有20多个国家承诺在特定时间点实现“碳中和”。由于所有领域均实现“零排放”几无可能,为了实现“碳中和”,除了能源消费端的减排,还必须考虑通过自然生态系统实现碳吸收与存储。湿地作为重要的碳库,长期淹水造成的厌氧环境造成了有机碳的大量积累,而一旦厌氧环境遭受破坏,湿地存储的有机碳也极易分解。

由于中国已经明确提出了2060年实现“碳中和”目标,未来长江中游湿地的保护也必然要参照该目标框架。除此之外,由于国家对生态文明建设的重视,近年来密集出台了一系列有关湿地保护的 policy。农业农村部已发布公告,从2020年起开始实施长江干流和重要支流自然水域的十年禁渔计划,禁止对天然渔业资源的生产性捕捞,应会对长江中游的湿地保护有积极的影响。另外,在持续开展的“拆围行动”中,长江中游大量的养殖围网被拆除,为湿地的自然恢复提供了可能的发展空间,政策因素对长江中游湿地的保护不可小觑。

因此,动态评价相关保护政策的成效是未来优化长江中游湿地保护策略的基础。在充分考虑潜在的气候变化风险,持续监测现有湿地保护政策成效的基础上,针对潜在的生态风险与机遇,动态优化湿地的综合保护策略,是长江中游湿地能否得到有效保护的关键。

## 4 研究展望

长江中游受区域内湿地农业、渔业开发及重大水利工程持续性的影响,不同湿地生态系统的退化

机制复杂。与此同时,长江中游相对于国内其他湿地分布区,拥有更为强大的湿地监测网络、巨大的水文调控能力、众多的修复工程案例,因而该区域有望成为国内湿地保护与修复研究的核心实验区。此外,全国碳排放权交易市场的登记和结算中心已落户长江中游的武汉,因而率先启动与碳增汇任务挂钩的湿地生态保护具有重大意义。总体而言,在国家生态文明建设战略框架指引下,针对未来长江中游湿地生态系统演变、保护与修复研究可以重点从以下几个方面展开。

#### 4.1 整合多种监测资源,跨尺度解析湿地的差异性退化机制

长江中游湿地生态系统演变是气候、地貌景观、水文、水质、水生物等多种环境要素综合作用的产物。长时序、全覆盖的监测数据对于湿地生态系统演变与退化机制研究有重要意义。长江中游拥有东湖湖泊生态系统国家野外科学观测研究站、梁子湖湖泊生态系统国家野外科学观测研究站、洞庭湖湿地生态系统国家野外科学观测研究站、鄱阳湖湖泊湿地生态系统国家野外科学观测研究站、中国科学院洪湖湿地生态系统野外科学观测研究站等众多高水平监测平台,是我国湿地研究相关的生态系统监测台站分布最为密集的区域。部分监测站点拥有近 30 年的长期监测数据,结合大尺度、同步的遥感卫星监测数据,可为相关研究提供有效的数据支撑。长期监测的湿地类型覆盖了城市湖泊湿地、通江湖泊湿地、阻隔湖泊湿地等多种类型,有望通过整合多种监测资源,揭示长江中游不同类型湿地的差异性退化机制。

#### 4.2 强调水文过程调控,同步实现水环境治理与湿地生态修复

由于南水北调中线工程核心水源区的丹江口水库位于长江中游,而三峡水库调蓄最直接的影响区域也是长江中游地区。两大水库的总库容超 600 亿立方米,具有巨大的水文调控能力。而且,长江中游还密集建设了一系列配套的水利设施。以汉江为例,在丹江口坝下河段已修建了王甫洲、新集、崔家营、雅口、碾盘山、兴隆等水利枢纽工程,“引江济汉”工程早已完工,“引江补汉”工程即将上马。此外,长江中游平原湖区沟、渠、涵、闸密布,对水量空间调配能力相对充足,易于采取生态水文的调度措施。与此同时,水文条件既是影响湿地生态系统演变的关键,也是水体污染物输移转化过程中最核心的影响

要素。利用长江中游有利的水文调控条件,通过对河渠径流过程、湿地水位波动过程的优化调整,有望构建以水文调控为核心的湿地生态系统综合修复技术体系,同步实现水环境治理与湿地生态恢复。

#### 4.3 动态评价修复工程成效,关注湿地的自然恢复潜力挖掘

长江中游湿地资源丰富,已建成有 10 个以湿地生态系统或湿地濒危物种为保护对象的国家级自然保护区,同时长江中游地区也是国家湿地公园建设最为集中的区域。依托于国家级湿地自然保护区和国家湿地公园建设,在长江大保护战略的支持下,长江中游已开展了一系列的湿地生态修复工程。湿地生态系统存续的前提是其自身应具有基本的生态恢复潜力,辅以少量的人工干预手段促进其自然修复过程。作为具有可持续性的自然生态系统,湿地系统的修复不能过度依赖于工程措施。在部分湿地的修复过程中,单纯追求修复工程项目的完结,对修复后的湿地自然恢复能力认识不足,导致被修复湿地越修复越差、反复修复的问题时有发生。通过长期持续跟踪监测,动态评价湿地修复工程的成效,挖掘湿地自然恢复潜力,有望打造出针对长江中游不同类型退化湿地的最佳修复路径。

#### 4.4 考虑区域碳中和目标,改善湿地生态功能与固碳能力

碳中和就是实现碳排放和碳汇的收支平衡。除了持续减排外,实现碳中和目标的另一个重要方面就在于生态碳汇能力的提升。由于具有较高的初级生产力、较低的有机质降解速率,湿地生态系统被认为是影响未来生态碳汇的关键。河湖湿地系统在碳收支估算中常被忽视,然而其超强的二氧化碳吸收能力与大量的甲烷排放潜力使得其在碳中和过程中可能起到关键的制衡作用<sup>[26]</sup>。2021 年全国碳排放权交易市场开市,作为全球最大的碳市场正式上线交易,将全面加速中国碳达峰碳中和进展,兑现中国承诺。全国碳排放权交易市场的数据中心就位于长江中游的武汉,因此在这一区域内率先启动考虑碳增汇能力的湿地保护与修复方案设计具有重要意义。针对 2060 年实现“碳中和”目标,如何在对长江中游湿地生态系统保护与修复过程中,有效促进有机碳的富集,实现区域内的碳增汇,可能是未来难以回避的问题。

## 参 考 文 献

- [1] 杨龔, 林国俊, 王伶俐, 等. 长江中游区湿地现状及保护对策分析. 人民长江, 2019, 50(7): 59—63, 70.
- [2] Yin HF, Liu GR, Pi JG, et al. On the river-lake relationship of the middle Yangtze reaches. *Geomorphology*, 2007, 85(3—4): 197—207.
- [3] Du Y, Xue HP, Wu SJ, et al. Lake area changes in the middle Yangtze region of China over the 20th century. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(4): 1248—1255.
- [4] 蔡述明, 赵艳, 杜耘, 等. 全新世江汉湖群的环境演变与未来发展趋势——古云梦泽问题的再认识. 武汉大学学报(哲学社会科学版), 1998, 51(6): 96—100.
- [5] 常剑波, 曹文宣. 通江湖泊的渔业意义及其资源管理对策. 长江流域资源与环境, 1999(2): 153—157.
- [6] Booth EG, Loheide SP. Comparing surface effective saturation and depth-to-water-level as predictors of plant composition in a restored riparian wetland. *Ecohydrology*, 2012, 5(5): 637—647.
- [7] Valdez JW, Hartig F, Fennel S, et al. The recruitment niche predicts plant community assembly across a hydrological gradient along plowed and undisturbed transects in a former agricultural wetland. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10: 88.
- [8] 班璇, 余成, 魏珂, 等. 围网养殖对洪湖水质的影响分析. 环境科学与技术, 2010, 33(9): 125—129.
- [9] 王学雷, 吴后建, 任宪友. 长江中游湿地系统驱动关系的演变及保护展望. 长江流域资源与环境, 2005, 14(5): 644—648.
- [10] 景元书, 缪启龙, 杨文刚. 气候变化对长江干流区径流量的影响. 长江流域资源与环境, 1998, 7(4): 337—340.
- [11] 王佳宁, 徐顺青, 武娟妮, 等. 长江流域主要污染物总量减排及水质响应的时空特征. 安全与环境学报, 2019, 19(3): 1065—1074.
- [12] 陈善荣, 何立环, 林兰钰, 等. 近40年来长江干流水质变化研究. 环境科学研究, 2020, 33(5): 1119—1128.
- [13] 虞孝感, 姜加虎, 贾绍凤. 长江流域水环境演化规律研究平台及切入点初探. 长江流域资源与环境, 2001, 10(6): 485—490.
- [14] 娄保锋, 卓海华, 周正, 等. 近18年长江干流水质和污染物通量变化趋势分析. 环境科学研究, 2020, 33(5): 1150—1162.
- [15] 安堃达, 张帅, 程继雄, 等. 长江干流湖北段沿江城市水质状况及变化趋势研究. 环境科学与管理, 2020, 45(7): 156—160.
- [16] 陈善荣, 何立环, 张凤英, 等. 2016—2019年长江流域水质时空分布特征. 环境科学研究, 2020, 33(5): 1100—1108.
- [17] 秦大河, 翟盘茂. 中国气候与生态环境演变—2021第一卷—科学基础. 北京: 科学出版社, 2021.
- [18] 李琳琳, 卢少勇, 孟伟, 等. 长江流域重点湖泊的富营养化及防治. 科技导报, 2017, 35(9): 13—22.
- [19] Zong JM, Wang XX, Zhong QY, et al. Increasing outbreak of cyanobacterial blooms in large lakes and reservoirs under pressures from climate change and anthropogenic interferences in the middle-Lower Yangtze River Basin. *Remote Sensing*, 2019, 11(15): 1754.
- [20] Ban X, Wu QZ, Pan BZ, et al. Application of composite water quality identification index on the water quality evaluation in spatial and temporal variations: a case study in Honghu Lake, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, 186(7): 4237—4247.
- [21] 王洪铸, 刘学勤, 王海军. 长江河流—泛滥平原生态系统面临的威胁与整体保护对策. 水生生物学报, 2019, 43(S1): 157—182.
- [22] 崔保山, 刘兴土. 湿地恢复研究综述. 地球科学进展, 1999, 14(4): 358—364.
- [23] 邓正苗, 谢永宏, 陈心胜, 等. 洞庭湖流域湿地生态修复技术与模式. 农业现代化研究, 2018, 39(6): 994—1008.
- [24] Ji ZH, Tang WZ, Pei YS. Constructed wetland substrates: a review on development, function mechanisms, and application in contaminants removal. *Chemosphere*, 2022, 286: 131564.
- [25] Larsdotter K. Wastewater treatment with microalgae—a literature review. *Vatten*, 2006, 62: 31—38.
- [26] 栾军伟, 崔丽娟, 宋洪涛, 等. 国外湿地生态系统碳循环研究进展. 湿地科学, 2012, 10(2): 235—242.

## Evolution and Ecological Restoration of Riverine and Lacustrine Wetland System in the Middle Reaches of the Yangtze River

Wang Xuelei<sup>1, 2†\*</sup>   Cai Xiaobin<sup>1, 2†</sup>   Yang Chao<sup>1, 2</sup>   Lyu Xiaorong<sup>1, 2</sup>   Li Enhua<sup>1, 2</sup>   Wang Zhi<sup>1, 2</sup>

1. *Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077*

2. *Key Laboratory of Monitoring and Estimate for Environment and Disaster of Hubei Province, Wuhan 430077*

**Abstract** The Yangtze River Basin has the most abundant and unique ecosystem and numerous wildlife species in China. And the middle reaches of the Yangtze River, which connects the east and the west parts of the river, accommodate the most concentrated lakes and the most tributaries in the whole basin. Due to the integrated impact of climate change and human activities in it, the hydrological process and distribution pattern of riverine and lacustrine wetlands have significantly changed, the ecological vulnerability of wetlands has increased, the stability of ecosystems has been damaged, and the wetland ecosystem has a tendency of degradation. It would affect the structure and function of biological communities and wetland ecosystems, and make the ecological function decrease. Meanwhile, the natural rivers and lakes, artificial ditches, and farmland constitute a composite wetland landscape structure and form a complex natural-artificial wetland ecosystem due to the lake reclamation and wetland agriculture. With the need for wetland protection and ecological security in the middle reaches of the Yangtze River, it is necessary to explain the interactive evolution mechanism of its natural-artificial wetland system, clarify the impact of climate change and human activities on it, study the motivation, damage process, and differential mechanism of wetland degradation, and set out the objective and pathways of wetland restoration, and the protection strategies of wetlands. It is of great significance to realize the ecological protection of the middle reaches of the Yangtze River Basin and the high-quality green development of the Yangtze River economic belt.

**Keywords** the middle reaches of the Yangtze River; riverine and lacustrine wetlands; evolution process; ecological restoration; protection strategy

(责任编辑 张强)

\* Corresponding Author, Email: xlwang@apm.ac.cn

† Contributed equally as co-first authors.