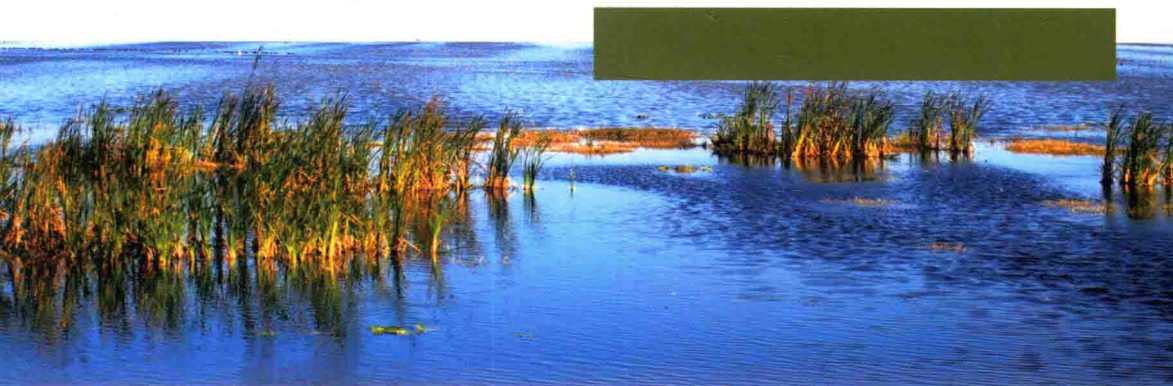


# 湿地生态 修复技术 及案例分析

SHIDI SHENGTAI XIUFU JISHU  
JIANLI FENXI

张学峰 房用等◎主编



中国

# 湿地生态修复技术及案例分析

张学峰 房用 李士江 梁玉 主编

中国环境出版社·北京

## 图书在版编目 (CIP) 数据

湿地生态修复技术及案例分析/张学峰等主编. —北京: 中国环境出版社, 2016.1

ISBN 978-7-5111-0818-0

I. ①湿… II. ①张… III. ①沼泽化地—生态恢复—案例 IV. ①P941.78

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 015947 号

出版人 王新程  
责任编辑 周煜  
责任校对 尹芳  
封面设计 彭杉

---

出版发行 中国环境出版社  
(100062 北京市东城区广渠门内大街 16 号)  
网 址: <http://www.cesp.com.cn>  
电子邮箱: [bjgl@cesp.com.cn](mailto:bjgl@cesp.com.cn)  
联系电话: 010-67112765 (编辑管理部)  
发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)

印 刷 北京中科印刷有限公司  
经 销 各地新华书店  
版 次 2016 年 3 月第 1 版  
印 次 2016 年 3 月第 1 次印刷  
开 本 787×960 1/16  
印 张 13  
字 数 220 千字  
定 价 42.00 元

---

【版权所有。未经许可，请勿翻印、转载，违者必究。】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题，请寄回本社更换

## 本书编委会

主 编

张学峰 房 用 李士江 梁 玉

副 主 编

姜建成 谭玉屏 王富海 赵 燕 曹国玉

编写人员

范小莉 赵 青 廉洪朋 陈长燕 张 利

于晓龙 郭静静 刘希娟 姬园园 杨 洋

王志刚 辛 磊 王 伟 孙淑霞 王志伟

鞠传龙 许传宝 张晓光

# 目 录

第一章 国内外湿地恢复研究进展.....	1
第一节 国外湿地恢复研究进展.....	1
第二节 我国湿地恢复研究进展.....	4
第三节 湿地恢复技术研究进展.....	9
第二章 湿地生态恢复技术.....	14
第一节 湿地生态恢复概况.....	14
第二节 湿地生境恢复技术.....	20
第三节 湿地生物恢复技术.....	29
第四节 湿地生态系统结构和功能恢复技术.....	49
第五节 典型湿地的生态恢复模式.....	50
第三章 湿地动物保护及生态保育.....	53
第一节 湿地动物保护.....	53
第二节 湿地生态保育.....	63
第四章 生态驳岸.....	68
第五章 人工湿地.....	75
第一节 人工湿地概况.....	75
第二节 表面流人工湿地.....	84

第三节	潜流人工湿地.....	87
第四节	人工湿地的设计.....	92
<b>第六章</b>	<b>自然保护区.....</b>	<b>97</b>
第一节	自然保护区概况.....	97
第二节	自然保护区管理技术.....	100
第三节	自然保护区管理有效性评价.....	108
<b>第七章</b>	<b>湿地公园.....</b>	<b>118</b>
第一节	湿地公园概况.....	118
第二节	湿地公园的规划与设计.....	121
第三节	湿地公园管理技术与评价体系.....	139
<b>第八章</b>	<b>典型湿地生态恢复案例.....</b>	<b>146</b>
第一节	国外湿地生态恢复典型案例.....	146
第二节	中国湿地生态恢复典型案例.....	150
<b>第九章</b>	<b>湿地生态恢复研究新方向.....</b>	<b>168</b>
<b>附录</b>	<b>湿地植物.....</b>	<b>181</b>
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>193</b>

# 第一章

## 国内外湿地恢复研究进展

随着全球环境的不断恶化，自然灾害频发，气候逐渐变暖，湿地的重要性逐渐彰显，保护湿地刻不容缓。随之，有关湿地生态恢复的研究成为国际上湿地学乃至生态学的研究热点，湿地保护也逐渐受到了各国的重视。

### 第一节 国外湿地恢复研究进展

20 世纪初期，世界经济进入了高速发展的时期，为了发展工业、扩建城市，越来越多的湿地被开发利用，全球很多具有重要价值的湿地被破坏，并逐渐消失，由此也引发了一系列的环境问题。到 20 世纪中期，国际上才开始逐渐认识到湿地对人类的重要性。20 世纪 60 年代，人们开始真正关注如何阻止不断退化的生态系统，如何修复和重建受损的生态系统等问题。但在早期阶段，科研人员多进行的是有关滨海湿地与红树林湿地的研究，对于淡水湿地则主要研究的是北美北部的泥炭湿地。到了七八十年代，Teal 等开始将现代生态系统理论结合到湿地研究之中，并建立了许多湿地研究中心。进入 90 年代之后，对受损湿地的植被恢复研究如雨后春笋般出现，大批科学家开始投身其中，同时国际上逐渐开始形成两大湿地恢复研究中心：一个在欧洲，同时也包括加拿大的北部，主要研究贫营养沼泽湿地（bog）；另一个在北美，还包括加拿大的南部，主要研究富营养沼泽湿地（fen）。

## 一、美国湿地恢复研究进展

1975—1985年,美国联邦政府资助了环境保护局(EPA)清洁湖泊项目(CLP)的313个湿地恢复研究,这其中既包括了对于污水排放的控制研究、对湖泊分类的研究,又包括了湿地恢复计划可行性的研究、恢复实施的效果评价研究等。1988年,水科学和技术部(WSTB)探讨和评价了由国家研究委员会(NRC)所主导的湿地恢复研究项目及其技术报告。1989年,水科学和技术部中的水域生态系统恢复委员会(CRAM)对湿地恢复评价进行了详细的研究与规定,规定的内容包括了技术、规章制度、政策等多个方面。1990—1991年,国家研究委员会、环境保护局、水域生态系统恢复委员会和农业部共同提出了一个涉及范围极广的湿地恢复计划。此项目计划在2010年前恢复受损河流64万 $\text{km}^2$ 、湖泊67万 $\text{hm}^2$ 、湿地400万 $\text{hm}^2$ 。最终使这些区域的生态系统得到恢复,结构完整,功能完善,各生态环节都可以有序进行。1995年,美国投资6.85亿美元开始进行一项针对佛罗里达州大沼泽地的修复与重建项目,此项目也计划于2010年完成。而后政府继续出资2亿美元用于密西西比河上游的生态恢复,在这个项目中,湿地的修复与重建是重中之重。通过这些项目,美国的湿地得到了有效的恢复与保护,比如在明尼苏达州的北部地区,利用筑坝的方式修复与重建湿地,最终使湿地面积从1940年的2183 $\text{hm}^2$ 增加到了1988年的3687 $\text{hm}^2$ 。

目前美国对于湿地的研究项目较多,涉及范围宽泛,研究着眼点较多,如生境特征、湿地植被、湿地受损原因、湿地生物多样性、湿地的开发利用与资源保护、湿地管理等。但大部分的研究都在滨海湿地进行。

## 二、欧洲湿地恢复研究进展

欧洲的很多国家,像瑞典、丹麦、荷兰等,对于湿地恢复的研究开始较早、发展较快,因此取得了不小的进展。德国的莱茵河畔曾是欧洲人口最多的区域,但是由于工业污染,生态环境遭到了严重破坏。为了恢复莱茵河下游河漫滩(湿地)的生态系统,政府将夏季防洪的堤坝拆除,使洪水能够在河内更顺畅地流动,



以此改善水质，促进植物的生长。在瑞典，30%的地表为湿地、湖泊和河流。但由于芦苇的大量入侵，芦苇的覆盖面积一度达到了 20 万  $\text{hm}^2$ ，使众多湿地与湖泊原本的生态系统受到破坏。基于对受损湖泊与湿地的恢复目的，Larsson 等提出了提高水位、深挖湖底的意见，同时辅以芦苇砍伐，确保其根系也被清除干净。荷兰在 90 年代出台了《自然政策计划》，旨在将之前围湖造田的土地重新修复与重建为湿地，保护生物多样性，协调人与自然的和谐发展。经过近 30 年的努力，实现了 24 万  $\text{hm}^2$  农田退耕还湿，保护了当地的动植物，使过去的自然景观重新复原。同时还建立了以湿地为中心，面积约为 250  $\text{km}^2$  的生态廊道。2000 年西班牙对 52  $\text{hm}^2$  的 Algaida 沼泽实施了生态修复与重建工程，主要通过清淤、改造地形、恢复生境多样化等措施在短时间内打通河口渠道、恢复湿地原始的生物群落，使其接近天然湿地，并通过人为构建的一系列不同的生境、不同的网络将该区域与周边的 Donana 国家公园联系起来，并在 Donana 国家公园适量设置水泵，来为沼泽补充水量。

### 三、其他国家湿地恢复研究进展

加拿大、澳大利亚、印度、越南等国家也在有关湿地恢复研究方面取得了一定的进展与成效。加拿大的湿地面积多达 12 700 万  $\text{hm}^2$ ，占世界总湿地资源的 24%，位居世界第一。如何有效保护如此丰富的湿地资源，就成了加拿大联邦政府的一大难题。1992 年，联邦政府出台了联邦湿地保护政策，有效地对境内的湿地进行了保护与管理。澳大利亚 Capel 附近有一个沉积稀有金属矿砂的湖泊群，研究人员通过在其周围栽种水生植物，使其生态环境逐渐恢复，现在已完全变成了一个处于健康状态的湿地。印度的 Rihand 河由于之前河流附近所进行的伐木、筑坝、工业生产等行为，再加上严重的污染，使其河岸湿地逐渐退化。而后政府出台相关规定，严禁放牧、砍伐、污染河流，并提出了相关的保护措施，最终使河流周围植被恢复，河流生态系统得到改善。越南 Mekong 三角洲由于在战时被大量排水，使其 75 万  $\text{hm}^2$  的潮汐淡水湿地严重退化受损。为了恢复这一重要的湿地资源，越南于 1988 年利用筑坝围水的形式对其中一片面积为 7 000  $\text{hm}^2$  的区域实行了试验性恢复，并取得了成功。哥斯达黎加政府，在 1980 年决定对一片面积

为 500 hm<sup>2</sup> 的湿地进行恢复,主要的恢复方式是对其中大量疯长的香蒲进行清除。通过 10 年的努力,最终香蒲被全部移除,湿地环境得到了有效恢复。日本在 20 世纪 80 年代也开始了生态保护和恢复工作,尤其是在整治水环境方面,提出尊重自然所具有的多样性,创建良好的水循环系统。并使水体和绿带形成相关联的生态系统,避免它们孤立地存在。同时还建立了北海道雾多布湿地中心、琵琶湖水禽湿地中心等,进行了有关湿地保护与恢复的多项研究。

#### 四、有关湿地恢复的国际会议

1982 年,第一届国际湿地研讨会在印度召开,至此湿地研究进入了一个崭新的阶段。

1993 年,在英国谢菲尔德大学,有近 200 位湿地学家、生态学家汇聚一堂,探讨了有关湿地恢复的诸多议题。其中最受关注的问题还是如何恢复已经受损的湿地,以及受损湿地恢复后的评价问题。众多学者都积极地发表了自己的见解。1995 年,总结了各位学者意见与建议的会议论文集《温带湿地的恢复》出版,此论文集包含了对湿地恢复的基本理论和实践经验,内容翔实,受到了广泛关注。这次会议总体来说使湿地恢复进入了一个全新的阶段。

1996 年 9 月,第五届国际湿地研讨会在澳大利亚西海岸的佩斯召开。此次大会的主题为“湿地的未来”,与会人员主要探讨了如何增强湿地效益、如何减缓与阻止湿地的消亡、如何提高湿地的生物多样性、如何修复和重建湿地等问题。从这些议题不难看出,湿地的修复和重建已经成为了世界各国研究人员普遍关注的研究热点。此次会议还将湿地保护、修复与重建提升到了一个国际化层面。

2009 年 8 月,第 19 届国际恢复生态大会在佩斯召开,“全球变化背景下的湿地生态恢复”是大会的议题之一。大会主席 Dixon 教授提出“恢复生态学或是改变世界的唯一未来”。

### 第二节 我国湿地恢复研究进展

中国对湿地的修复与重建研究起步较晚,始于 20 世纪 60 年代前后,首先是

从研究沼泽湿地开始的，并由此形成了很多具有代表性的权威研究机构，如东北师范大学的沼泽教研室和中国科学院长春地理研究所沼泽室等，它们先后对我国的三江平原，长白山，大、小兴安岭，若尔盖草原等著名沼泽进行了研究。后来研究的目光开始逐渐转向湖泊湿地生态系统。70年代，中国科学院水生生物研究所开创性地使用水域生态系统藻菌共生氧化塘生态工程技术对湖北鸭儿湖地区的湿地生态环境进行了改善，从而促进了我国湿地恢复研究重心的转移。1992年7月31日，我国正式加入《国际湿地公约》组织，自此我国湿地保护与恢复工作就进入了一个新的阶段。1994年，我国出台的《中国21世纪议程》，明确将控制水污染与湿地生态系统的保护与修复作为我国未来需要长期奋斗的目标之一。进入21世纪之后，国家相关部门结构已拨付6750万元来资助湿地保护与恢复示范工程的实施，到目前为止已完成或批复的11个湿地恢复示范项目，涉及富营养化湖泊的治理、河口型湿地的修复与重建、已退化湿地的恢复等，包括崇明东滩湿地生态恢复、内蒙古乌梁素海湖泊富营养化治理、安邦河退耕还湿等。2003年10月，由国家林业局发起，联合9大部门，一起出台了《全国湿地保护工程规划》。2004年11月，在北京召开了主题为“中国湿地退化、保护与恢复”的香山科学会议第241次学术讨论会。会议讨论了到目前为止我国湿地的受损情况与湿地保护和恢复的措施与手段等。

尽管中国对湿地生态修复与重建的研究起步略晚于国际，但发展迅速。在最近的20年中，先后在江苏太湖、安徽巢湖、洞庭湖、云南滇池、洱海以及抚仙湖、武汉东湖、莲花湖、月湖等地开展了湿地生态修复与重建研究，并取得了不错的成效与丰富的经验。研究对象也逐渐拓宽，不只局限在湖泊、沼泽，还包括了江滩、河口、海岸等其他湿地类型，涉及的区域包括松嫩平原、白洋淀、黄河三角洲、长江口湿地、莱州湾等。总体来说，中国的湿地生态系统的修复和重建研究已经广泛地在全国范围内开展起来，并且还在不断地拓宽，研究深度也在不断地加深。

对于研究内容来说，现在研究的热点内容多集中在湿地的蓄洪能力、水禽栖息地的营造，但对水质的改善，地下水的补充等研究较少。而且由于不同湿地的结构、类型、位置、功能都有所不同，目前还不能确定能否对所有受损湿地都做到完全恢复。

由于不同类型的湿地需要使用不同的恢复技术和方法，以下将分别介绍我国不同类型湿地的恢复研究进展。

## 一、我国湖泊湿地恢复研究进展

在近 20 年的时间里，我国先后在东湖、巢湖、滇池、太湖、洪湖、洞庭湖等几大浅水湖泊进行了有关湿地生态恢复以及水体富营养化控制的实验研究，取得了一定的成果，获得了许多成功经验。洞庭湖湖群具有面积多达 87.7 万  $\text{hm}^2$  的湖泊湿地，是中国面积最大的一块湖泊湿地，在 1992 年还被收入了《世界重要湿地名录》之中。但是随着 20 世纪 50 年代人们对粮食需求的不断增加，洞庭湖湿地的垦殖率超过了 50%。再加上泥沙淤积，湿地生态系统严重退化，调节洪水的能力也在逐渐降低。为了恢复洞庭湖湿地，王克林根据洞庭湖的湿地景观结构，设计了包括浅水水体农业、过水洲滩和渍水低湖田等不同类型的湿地所需要的不同生态工程模式。通过对入湖河流上游的生态建设，降低进入湖水的泥沙含量，同时结合种植水生植物，减少泥沙沉积，使湿地面积能够维持在稳定水平，保证湖泊调节洪水的能力。叶春在云南洱海湖滨带的生态恢复研究中，对湖泊基底结构、生物种群结构、生物群落结构、景观结构等进行了相应设计，利用生物与生境对策，提出了滩地模式、河口模式、陡岸模式、鱼塘模式、农田模式、堤防模式 6 种湖滨带湿地生态恢复工程模式，并在此基础上归纳了湖滨带湿地工程技术、水生植被恢复技术、人工浮岛技术、仿自然型堤坝技术、人工介质岸边生态净化技术、防护林或草林复合系统技术、河流廊道水边生物恢复技术、湖滨带截污及污水处理技术、林基鱼塘系统工程技术等 9 项湖滨带生态恢复技术。在众多的湖泊湿地恢复的实例之中，最成功的莫过于对贵州草海进行的湿地生态恢复研究。同样是为了扩大耕地，1970 年草海曾被排干，湖中的动物几近灭绝，植物也逐渐衰败死亡，地下水位急剧减少，生态系统遭到严重破坏。1980 年政府决定恢复草海的生态系统，实施蓄水工程，计划恢复水面面积达到 20  $\text{km}^2$ 。截至目前，草海的生物物种已基本得到恢复，湿地恢复效果良好。草海的成功恢复甚至被国外专家视为中国湿地生态恢复的成功典范。优越的环境使草海还成为了我国特有物种黑颈鹤的冬季栖息地，草海也因此建立起了国家级的自然保护区。其他例子还有诸

如邱东茹等对武汉东湖水生植被恢复进行的研究,通过研究她在东湖建立了水生植被恢复示范区,并总结出了以东湖为代表的富营养型浅水湖泊水生植被恢复对策。中科院南京地理与湖泊研究所的范成新等和太湖流域水资源保护局的陈荷生等针对太湖分别从面源污染对策、富营养化治理对策和底泥生态疏浚等手段开展了太湖湖泊湿地恢复研究。同一时期云南省环境科研所等单位针对昆明滇池受污染状况进行了生态恢复措施研究,从以下三个方面着手:生态恢复物种选择、水生植物群落配置设计以及水生植物群落区域分布设计,对滇池进行了湿地恢复。

虽然我国已在湖泊湿地恢复研究中获得了一定成果,但是我国已开展的湖泊湿地恢复研究主要关注的是对水质的净化,没有过多深入探究对湿地生物栖息地的营造。只对单一恢复目标的关注很可能造成最终湿地得到部分恢复,但生物多样性无法保证,使得恢复后的生态系统也难以长久维持。美国国家环境保护局、鱼类与野生动物服务组织等多部门在 2000 年发布了以水质净化以及野生动物栖息地恢复为目的的湿地恢复导则,但目前中国还没有出台相似的湿地恢复导则,也没有相关综述研究。

## 二、我国滨海盐碱湿地恢复研究进展

尽管由于我国海岸线较长,各沿海省份都具有面积不小的滨海湿地,且对滨海湿地的研究一直在持续进行,但是却缺乏系统性的综合研究。20 世纪 80 年代初期,我国科研人员对全国范围内的海岸带及滨海湿地资源作了全面考察,并在此基础上对滨海湿地的开发进行了综合规划。这在当时对沿海经济的快速发展起到了不小的推动作用,同时也奠定了滨海湿地研究的基础。而近些年来,对滨海湿地的研究主要集中在辽河与黄河三角洲滨海湿地以及南方的红树林滨海湿地。

有关红树林湿地的恢复研究,在 20 世纪 90 年代以后,主要涉及的内容包括:传统造林技术、海上育苗与造林技术、引种试验、次生林改造等。这些研究基本都是对红树种植技术的实际应用,并且都取得了良好效果,到 2001 年中国红树林面积已恢复到  $22\,024.9\text{ hm}^2$ 。除了扩大了红树林湿地的面积以外,同时通过研究还提高了红树林湿地抗击风暴潮的能力。到目前为止,在面对所取得的成就时,

我们还应该注意到我国对于滨海红树林湿地的恢复研究还停留在植被恢复的层面，研究内容的多是育苗技术与宜林地的选择，没有将红树林湿地生态系统结构与功能的恢复作为研究重点，因此不能将我国的红树林湿地恢复称为完全的“生态恢复”。Lewis 曾明确提到过佛罗里达州的滨海红树林湿地的恢复目标：红树林湿地恢复包括两部分内容，一方面是要具有稳定的植被覆盖，另一方面是实现生态系统功能的恢复。在以后的滨海红树林湿地恢复研究中，我们应该把研究的侧重点转移到对湿地生态系统功能的恢复之上，以实现红树林湿地完全恢复。

### 三、我国沼泽湿地恢复研究进展

沼泽湿地除了包括沼泽之外，还包括沼泽化草甸，它是地球上最重要的湿地类型之一。早在 1958 年，中国科学院就开始研究沼泽，并成立了我国最早的沼泽研究机构，至今已获得了丰硕的研究成果。其中最著名的是东北师范大学地理系沼泽教研室的柴岫联合相关学者，对若尔盖草原，长白山，大、小兴安岭以及整个东北地区的沼泽湿地进行了研究。1983 年，郎惠清出版了《中国沼泽》。在这本书中，他对我国沼泽的基本特征、类型、分布区域、形成和发展以及利用和开发等情况作了详细介绍，并系统地描述了我国沼泽湿地研究的进展。1988 年，由黄锡畴主编的《中国沼泽研究》出版。这本书被认为是目前中国沼泽研究的经典之作，系统科学地总结和论述了中国沼泽湿地研究进展。沼泽湿地恢复最具代表性的案例是三江平原湿地恢复工程。三江平原是我国平原地区沼泽面积最大的区域，但是由于周边区域的不断发展，湿地面积减少了大约 340 万  $\text{hm}^2$ ，湿地垦殖率高达 64%。20 世纪 50 年代末政府开始关注该区域的湿地恢复，联合多位国内知名学者，对该区域湿地资源的恢复与保护进行了合理规划。利用水土调控技术，搭配以合理的农业开发模式和规模，最终成功地把湿地恢复和生态农业结合起来，协调发展，实现了三江平原湿地的合理开发利用以及可持续发展。

在过去的几年中，湿地恢复研究发展迅速，各研究机构以及大专院校都对我国各重要湿地的现状进行了调查，对其未来发展趋势进行了预测，对受损湿地生态系统提出了恢复方案，但主要的研究对象还集中在湖泊湿地生态系统之上。在今后的研究中，要将重点适当地转移到河流、沼泽、河口、滨海湿地，只有做到

这一点,才能够促进我国湿地恢复研究的全面发展。

### 第三节 湿地恢复技术研究进展

湿地恢复技术分为生境恢复、生物恢复以及生态系统结构和功能恢复技术 3 个方面。其中由于湿地生态系统与结构恢复技术还处在摸索和试验过程之中,没有形成系统的理论体系和技术方法,因此就不详细介绍。

#### 一、湿地生境恢复技术

湿地生境恢复技术又包括基底恢复技术、土壤恢复技术、水文与水质恢复技术等,内容众多,以下主要从基底恢复和水文恢复两方面对我国以及国外湿地生境恢复技术的研究进展进行介绍。

##### (一) 湿地基底恢复技术

较成熟的基底恢复技术包括基底地形改造、客土和清淤技术等。这里面地形改造以及客土技术都属于物理恢复方法,操作简单,能够通过机械的帮助较轻易地完成。但是清淤技术相对复杂很多,一方面此技术要能够清除游离状态的淤泥,另一方面还要在清除的过程中保证湿地生物正常的生活以及生态系统中的各过程不被干扰。刘小梅在对滇池入湖河道清理过程中发现,在确保 10~20 cm 的软基质以供植物生长的前提下,利用精确薄层环保清淤技术能够有效清除表层淤泥,最终实现清理河道的目标。李旭东等认为通过引入外部水源或者使用雨季降水来开堤清淤也能够实现对湖泊湿地的基底恢复。

但要注意的是不同的基质类型必须使用不同的恢复方法。如对有机质含量高的基质,应首先降低其有机质含量,后提高其中的矿质土壤,能够采用的方法包括基质清淤、客土覆盖等;而对于砖砌驳岸、陡坡和其他不适合湿地植物生长的浅滩,则可利用地形改造、客土覆盖等技术,利用矿质土壤作为其基质,还要在原有基质中增添改土剂,改变原有基质组成;对于只含有矿质土的地区,则要在其中添加还原性土壤。

## (二) 湿地水文恢复技术

湿地在实施水文恢复工程时,通常会使用各种工程技术,建设水利设施,如堤坝、沟渠与水道以及其他水流与水位控制设施等。这些设施的建立既要能保证各水文过程进行,又要营造出良好的陆地与水环境,利于水生植物的栽植以及动物的定居。

在湿地栽种植物时首先要确保植物对水的需求,如果出现缺水情况,就要对湿地进行漫灌,而湿地水源又是极其珍贵的资源,因此就要确保恢复区内能够达到最大程度、最有效的土地漫灌,常用方法是修建堤坝围建大面积浸水区域。但这个方法无法控制区域内的水位深度,经常会因为水位问题造成湿地植物不易生长繁殖、湿地动物不易觅食栖息。王国平等在分析水利工程对向海湿地的影响时发现,由于霍林河上游实施了筑坝蓄水工程,使得原本河道两边的洪泛湿地逐渐丧失,出现严重破碎化,许多湿地生物因此失去了栖息的环境,生态系统遭到破坏。因此在湿地建设堤坝时一定要慎重决定,特别是堤坝的建设位置,不应破坏原本的土地轮廓,浸水区域也要使水资源和湿地资源利用达到最大化。同时还应该注意堤坝建设使用的材质、堤坝的斜率以及压缩度等问题,这些对堤坝的稳定性都有直接影响。譬如某些材质不适合修建堤坝,这些材质包括:粗砂,易流失,易受侵蚀;有机土壤,易分解,降低堤坝的牢固性。Kelley 等通过研究发现,黏土、淤泥土和壤土具有高压缩度、低缩水膨胀率,因此非常适合用来修筑堤坝。

大部分受损湿地都会出现缺水的问题,这时可以建立沟渠或者铺设管道来为湿地补充水源。美国 DTC 新月公园就通过挖建砾石洼地将开发区的水成功输送到了湿地内部。杨光俊等通过对银川宝湖的研究发现,其水源补充主要来自于唐徕渠及地下水。除了利用外部水源进行补水外,还可以使用雨水进行水源补充。雨水的输入一般可以使用梯田式的阶梯补水、排水管网或泵来实现。但相关研究发现,利用泵输水极有可能造成水中水溶性物质的增加。同时,Holland 等研究发现,雨水中具有较多的氮和磷元素,这些元素极易造成水体富营养化现象。面对这些问题,可以考虑使用对氮、磷等污染元素具有净化能力的材料来建设沟渠。

湿地恢复工程中,可以使用调节水位、排水和区域内单元间的截流或导向水



流等方式来控制水流，常见的水流控制设施包括槽堰、水闸等。其中槽堰设计简单，操作方便，还能测量多组水力学参数，应用广泛。特别是针对由地势差异而形成的湿地时，槽堰既能维持湿地的水位，又能调节水的供给方式，有效解决缺水问题。但是，如果在高污染负荷情况下，高水位会造成系统阻塞，湿地的水力传导能力下降，槽堰的作用也会被大大减弱。除此之外，湿地植物的枯萎凋谢以及洪水拔起的植物，会使水体中存在大量有机碎屑，在建设水流控制设施时要注意对其的去除，防止阻塞的发生。

## 二、湿地生物恢复技术

湿地生物恢复技术主要有湿地植物恢复技术、微生物恢复技术、水生动物恢复技术等。其中研究最多的是植物恢复技术。

### (一) 植物恢复技术

#### 1. 物种的筛选与培植技术

首先明确需要恢复的湿地的类型，这是筛选植物、确定植物物种的前提。由于不同植物本身对湿地中不同污染物的净化能力各异，在其生长过程中，还要受到不同环境条件的影响，因此就决定了不同植物对不同污染物的吸收转化能力差异巨大。这就要求在选择植物时，要深入地地了解各植物的生理生化生态特性，因地制宜选择植物种类，以提高植物对湿地中污染物的去除效率。

另一方面，先锋物种的选择对植物群落是否能够构建以及湿地是否能够恢复成功具有重要影响。同时筛选时要注意植物的生活型，一般多选用那些具有良好适应能力、较强净化能力以及抗干扰能力的本地种。在一些特定情况下也采用一些外来物种。关于此方面的研究各地开展比较多，如马剑敏等在东湖进行的实验发现莲、芦苇、苦草、金鱼藻以及穗状狐尾藻适应力高，能够成为恢复东湖水生植被的先锋物种。在水生植被恢复的开始时期，优先种植穗状狐尾藻、苦草以及大茨藻等 r-选择物种（r-选择物种指处在不稳定的气候中，生物密度低，基本无竞争，种群经常处于增长状态，具有高增值率的物种），经过一系列正反馈机制，再栽植微齿眼子菜等 k-选择物种（k-选择物种指处在稳定的气候中，生物密度高，