

海滨人工湿地水生植物群落 时空反演变驱动因子研究

——以连云港市徐圩新区备用水源工程为例

宋力¹, 汤阳², 刘华军³, 浦源源³, 田晓梅¹

(1. 江苏省水利科学研究院材料结构研究室, 江苏扬州 225002;

2. 连云港市鑫海水利工程质量检测有限公司, 江苏连云港 222000; 3. 灌南县水利局, 江苏连云港 222500)

摘要: 结合典型海滨人工湿地连云港市徐圩新区备用水源工程(徐圩湖)2020—2023年期间水生植物群落时空反演变特征, 揭示长期驱动因子水力调度、风浪影响及短期驱动因子鱼类牧食、低温影响对海滨人工湿地水生植物群落演变规律, 提出提高海滨人工湿地水生植物成活率及覆盖率建议。通过长短期驱动因子的分析研究, 旨在为沿海海滨区域人工湿地生态系统构建及管理提供科学依据。

关键词: 海滨人工湿地; 水生植物; 时空演变; 驱动因子

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 1007-7839(2024)01-0033-0006

Spatiotemporal Inversion and Driving Factor Analysis of Coastal Artificial Wetland Aquatic Plant Communities: A Case Study of the Backup Water Source Project in Xuwei New Area, Lianyungang City

SONG Li¹, TANG Yang², LIU Huajun³, PU Yuanyuan³, TIAN Xiaomie¹

(1. Materials and Structure Research Laboratory, Jiangsu Hydraulic Research Institute, Yangzhou 225002, China;

2. Lianyungang Xinhai Water Conservancy Engineering Quality Testing Co., Ltd., Lianyungang 222000, China;

3. Guannan County Water Conservancy Bureau, Lianyungang 222500, China)

Abstract: Based on the spatiotemporal inversion characteristics of aquatic plant communities in a typical coastal artificial wetland—Xuwei New Area Backup Water Source Project (Xuwei Lake) in Lianyungang City from 2020 to 2023, this study reveals the long-term driving factors of hydraulic scheduling, wind and wave impacts, and short-term driving factors such as fish grazing and low temperature effects on the evolution of coastal artificial wetland

收稿日期: 2023-11-11

基金项目: 江苏省水利科技项目(2018036)

作者简介: 宋力(1977—), 男, 正高级工程师, 硕士, 主要从事人工湿地建设与维护工作。E-mail: songli0008@126.com

aquatic plant communities. The study also proposes recommendations to enhance the survival rate and coverage of aquatic plants in coastal artificial wetlands. Through the analysis of long and short-term driving factors, the aim is to provide scientific basis for the construction and management of artificial wetland ecosystems in coastal areas.

Key words: Ship draft detection; Deep learning; Scheduling security

连云港市徐圩新区应急备用水源工程(以下简称徐圩湖)位于连云港市徐圩新区境内,占地总面积约200 hm²(其中水域面积约142.7 hm²),库区水生生态净化系统采用了“前端预处理、中部湿地功能净化、后置生态调控”复合工艺,为提高原水水质质量,利用人工湿地生态系统综合净化能力,通过各水生生态净化功能模块,来降低NH₃-N、TN及COD_{Mn}等指标^[1-2],全面满足徐圩湖水源地水质、供水及应急三大设计目标(见图1)。工程由如3部分组成^[3]:(1)预处理区:配置人工介质及微泡增氧机;(2)复合湿地净化区:主要包括水生植物种植、运行期维护、水

生动物投放及数量控制;(3)生态蓄水区:包括水生动物投放及控制、水生植物种植及维护、太阳能循环复氧机安装等。生态工艺流程为善后河来水→取水泵闸(管道)→预处理区→复合湿地净化区→生态蓄水区→出水。

1 水生植物群落时空演变特征

徐圩湖设计水生植物种植总面积282 414 m²,具体包括:沉水植物面积106 582 m²,挺水植物面积169 766 m²,浮叶植物种植面积6 066 m²。其中沉水植物按照设计文件超量种植完成,复合湿地区的沉



图1 徐圩湖水生态系统构建示意

水植物种植面积符合设计要求^[4],但生态蓄水区沉水植物在运行维护工程中,受风浪、鱼类等多方面驱动因素影响,原设计区域沉水植物覆盖度锐减,仅在生态石笼内侧挺水植物生长区域,沉水植物仍然保持较高覆盖率(面积约为挺水植物种植面积的1/3,占地面积约为56 588 m²)。

虽然备用水源地生态工程建设在水质净化效果保障等重点考核指标上达到了预期的功能目标,水生植物成活率受项目建设区域范围内风浪、土壤盐度、水位调度、入库候鸟及鱼类摄食等影响,生态蓄水区的初始种植沉水植物种植存活一段时间后呈明显的反演替过程,群落逐步减少现象,主要特征为:

(1)水生植物品种发生演替

原设计种植区域沉水植物有一定的死亡,生态蓄水区沉水植物覆盖率较设计低,在湖区不能保证生态蓄水区透明度的条件状况下,耐盐性沉水植物品种穗花狐尾藻逐步向周边扩展,水生态系统结构和功能正在逐步完善;另外挺水植物品种由于种植区域表层土壤被风浪侵蚀,耐盐性较高的芦苇、香蒲逐步向外扩散,成为主要优势种。

(2)生态蓄水区沉水植物覆盖率不达标

综合考虑生态蓄水区水利调度、风浪、鱼类牧食等对沉水植物生境条件的影响,生态蓄水区沉水植物覆盖率难以达到设计要求。

2 水生植物群落演替驱动因子分析

2.1 长期因子

2.1.1 水力调度

兴建徐圩湖应急备用水源工程的目的是为了服务于保障连云港石化产业基地生产及生活用水,提高用水保证率,兼顾石油化工基地产业用水安全及可靠性。徐圩湖设计有效库容量约为430万m³,45万m³日应急供水量,要求能够满足徐圩新区连云港石化产业基地连续10 d不间断应急供水,以保障徐圩新区用水安全。徐圩湖库区引调水主要依据徐圩新区用水需求,导致建设期引调水时间、周期、水量、水位等均不可控,从而导致库区生态水位无法满足沉水植物生长要求,造成水生植物退化消亡。

水深直接影响沉水植物的生长、繁殖及分布,在我国河湖水库的生态修复工程中,经常通过降低水深来提升水体光照条件,进而为沉水植被的恢复创造条件^[5-7]。徐圩湖北侧为徐圩水厂,为保障水厂

用水,蓄水区的水位较高,水位变动幅度较大,导致沉水植物养护时无法有效控来水维持沉水植物生长所需的长生条件。首先,由于水位高、水较深,引起光强减弱,降低沉水植物光合作用发生。其次,植物面对这样的环境胁迫,会通过增加叶片的长度、面积来获取更多的光源。因徐圩湖区域风力较大,水位越高导致风浪的起伏面积较大,植物与风浪接触面积更大,根茎更易被折断,植物的存活率偏低。水位的过度降低对沉水植物而言也是一种胁迫因子。水位过低,植物叶片裸露面积较大,光照强度升高,会影响沉水植物的光合系统,进而影响植物的生长状态。最后,透明度和水深的比值 T_s ^[8]也是沉水植物能否成功恢复的关键生态指标之一,沉水植物能恢复生长的 T_s 值理论研究结果建议大于0.38,实践应用时,为确保沉水植物顺利恢复,建议 T_s 不小于0.5为宜。生态蓄水区 T_s 值无法满足沉水植物正常生长要求时,可通过降低水位或者提高透明度的方法得以满足。但鉴于徐圩湖作为应急水源的主要功能,不同时期要通过降抬水位满足水厂需求和应急需求,短时间内无法通过有效的控制水位来维持沉水植物正常生长需要的透深比。

2.1.2 风浪影响

一般沉水植物的快速生长时间在6—9月份,亦是连云港地区台风、雷雨天气频发的季节,过大的风浪对水生植物恢复带来较大的影响,主要表现在以下5个方面:

(1)影响植物定植。过大风浪对岸边土壤和底泥冲刷力度增大,流动性大及土质稳定性差的底泥不利于新栽种的水生植物生长,且会导致成活率降低。

(2)影响水体透明度。通过现场测定及查阅资料,在风速 > 3.7 m/s,将引起2 m以内浅水区底泥的悬浮,水体透明度不能得到有效保障,沉水植物光合作用受到较大抑制,影响其生长,植物存活率偏低,短时间内无法通过沉水植物的正常生长繁殖来恢复原有的植物分布密度。

(3)底泥盐度升高。土壤的流失同时衍生出底泥盐度问题,导致植物盐胁迫增加,由于原设计的水生植物品种的耐盐程度不同,出现植物品种演替和消亡现象,多种挺水植物如菖蒲、再力花、千屈菜逐渐演替为芦苇、香蒲。研究表明,在风场影响下强迫作用下,会引起底层层流剪切及水面波动,对浅水湖泊水生植物生态系统造成影响,导致水-土

界面底泥再悬浮和水体污染的内源释放,进而影响水生植物尤其是沉水植物的生长和分布。徐圩湖生态蓄水水面面积约 118.53 hm²,水面面积较大,易对水体造成搅动,湖区底泥的悬起临界风速值为 3.7 m/s,即风力速度超过 3.7 m/s 就将引起 2 m 以内浅水区底泥的悬浮,造成水体透明度下降,未能达到 1 m 的水体透明度。而连云港近岸海域属东亚季风气候,该区域盛行偏东风,常风向为 EN 和 ESE,出现率分别为 12.1%和 11.9%,年平均风速 3.1~3.6 m/s,最大风速为 15.4~28 m/s,其中一年中风速大于 3.7 m/s 的天数约 77 d,主要集中在每年的 3—8 月份,尤其是 6~8 月份夏季期间受到台风、雷雨等恶劣天气的影响较大,台风期间风速高达 12.2~19.2 m/s,约为临界值的 3.3~5.2 倍。

(4)影响沉水植物生长繁殖。徐圩湖水生植物种植于 2020 年 10 月开始施工,采用了常规种植方法,并且为确保植物能较快地适应环境,选择了根系发达、植株健壮的 2 龄苗。但同年 12 月遭遇特大风浪,最高风速达 10.7 m,远超底泥起悬临界风速影响沉水植物种植效果。同年冬季,2021 年 1 月 17 日又遭遇极端寒冷天气,最低气温为零下 14 ℃,水面大面积结冰,严重影响沉水植物种子的萌发率,2022 年春季原种植沉水植物几乎全部死亡。2021 年 3 月安排了第二次全品类补种,主要采用了铁丝固定插种法、竹片固定插种法、皮筋绑扎石子抛种等种植方法,同时配合安装 6 万 m² 的消浪围网来消除风浪过大对沉水植物扎根的影响。围网建立后,减小了部分风浪对沉水植物的冲刷,水生植物覆盖率达到总 85%以上,总体长势良好,并于 2021 年 8 月通过一期验收。但后期围网拆除后,受风浪影响,仅存活了最后一批皮筋绑扎石子抛种的苦草,使用铁丝、竹片固定插种植的沉水植物所剩无几,沉水植物和表层土壤大部分被风浪卷起吹走。2022 年 5~9 月安排第 3 次补植,采用防尘网包裹泥土、防尘网包裹碎石作为配重抛种狐尾藻以及竹竿绑扎固定插种,种植一周后开始扎根,呈现出较高的沉水植物覆盖度。后期随着风浪侵袭,出现部分沉水植物连带表层土壤被风浪卷起冲走,越过石笼在挺水植物种植平台内扎根生长。

过大的风浪对岸边土壤和底泥冲刷力度增大,流动性大、稳定性差的底泥不利于沉水植物的定植,植物成活率较低;风浪过大也会加大对植物的拉拽力度,使植物根茎折断;同时底泥悬浮导致水体透明度下降,水下光照的减弱将使水生植物的生

长发育及繁殖受限^[9]。另外在风浪过大的条件下,水体透明度不能得到有效保障,原先设计的沉水植物的光合作用受到较大限制,植物存活率偏低,短时间内无法通过沉水植物的正常生长繁殖来恢复原有的植物分布密度。

(5)冲刷表层土壤。徐圩湖水库地理位置地处连云港徐圩新区中西部,距黄海海岸线约 6.5 km,历史上曾为海洋,湖区所处区域地下水长期受外海海水渗透补给,且通过蒸发和向河、沟渗流排泄,导致地下水、地表土壤含盐量较高,并不适宜沉水植物的生长。因此徐圩湖前期通过土壤脱盐工艺,将种植区域表层 20 cm 土壤盐度降至 4‰~6‰,以确保沉水植物的正常生长;同时根据水生植物的耐盐特性,综合考虑湖区土壤含盐量,对苦草种植区域土壤利用盐渍土壤改良剂对原土壤进行了二次改性处理,以降低种植区域的土壤盐分状况,使其能在原有盐度的基础上,降低 1‰左右。对水生植物而言,当土壤含盐量达到一定的值时,水生植物由于受到的盐胁迫超出植物体内相关机理调节的最大值,植物会呈现萎蔫、死亡的现象,使得存活率大大降低^[10]。徐圩湖种植选取的沉水植物品种主要为篦齿眼子菜、菹草、狐尾藻、刺苦草、小茨藻,在经过脱盐工艺处理的土壤中可以正常生长。

由于徐圩湖所在区域风浪过大,长时间冲刷导致表层 20 cm 经过脱盐处理的部分土壤被风浪卷起,现存的表层土壤盐度较高,原设计的沉水植物品种难以存活。在本项目施工后,备用水源地处于一直运行的状况,为满足徐圩水厂的每日取水需求,无法通过控制水位来进行后续表层土壤的脱盐工艺,影响生态蓄水沉水植物的恢复与生长,导致苦草的存活率较低。为寻求适宜项目现场的沉水植物,通过开始小试、中试试验,研究发现狐尾藻对该地区的土壤有一定耐受性,后期项目现场将沉水植物种植品种苦草变更为狐尾藻之后,呈现出较好的生态效果^[11],挺水植物品种由于种植区域表层土壤被风浪侵蚀,耐盐性较高的芦苇、香蒲逐步向外扩散,成为主要优势种。徐圩湖风浪影响及应对措施见图 2。

2.2 短期因子

2.2.1 鱼类牧食

水生鱼类的合理投放对移除水体所含营养盐含量及控制浮游藻类具有重视作用,水生鱼类是构成健康水体生态系统的重要组成部份,具有平衡、

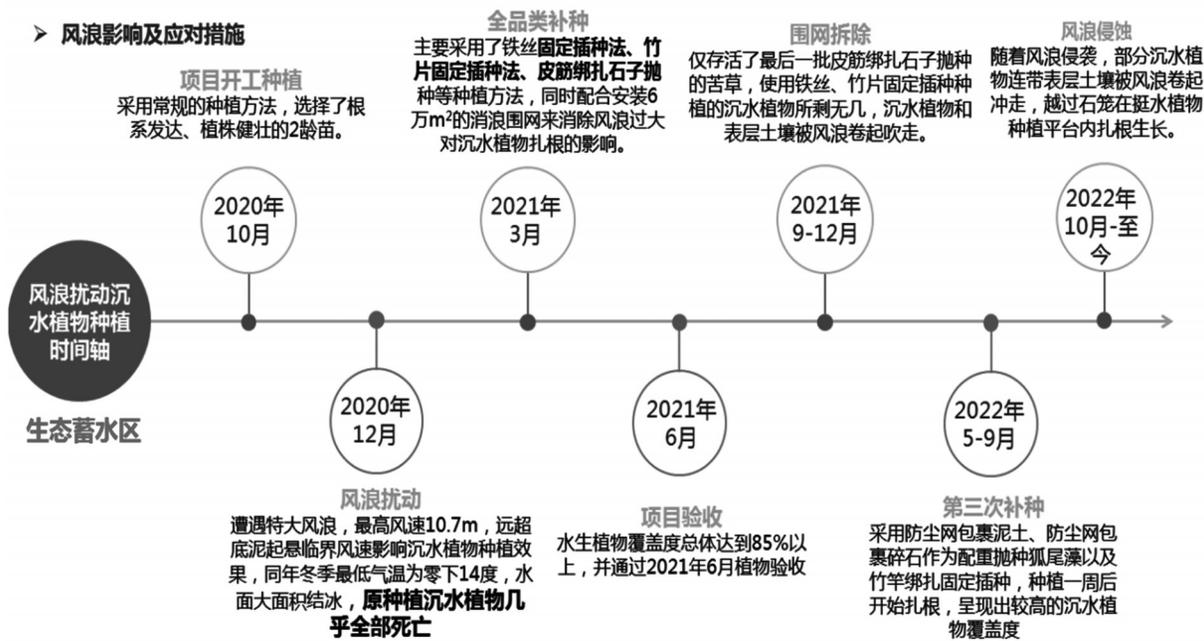


图2 徐圩湖沉水植物受风浪影响及应对措施说明

协调水体生态系统中能量流动、保障水质安全的重要功能。水生态修复中以植物为食的杂食性鱼类对生态恢复的影响不可忽视,如春末夏初的沉水植物的补植常常会遭致已长大成熟的鱼类攻击,特别是对幼苗期的植物嫩芽的啃食,会对沉水植物的存活产生重要影响。鲫、草鱼啃食沉水植物的茎、叶、芽等,也会导致沉水植物的死亡。补植之后,部分狐尾藻再次受到草食性鱼类的攻击,会被草鱼咬断,随风浪吹到浅水区,会对沉水植物的生长、繁殖及恢复产生不利影响,草食性鱼类长期对水生植物群落牧食会造成严重威胁,导致很多湖泊从草型湖泊向藻型湖泊转化,如武汉东湖、保安湖和漏湖等;其次,随着杂食性鱼类在底层活动密度的增大,其相应的觅食活动会造成对底层沉积物的扰动,使得底泥悬浮,透深比及透明度同时降低,影响水生植物的生长与修复。

据统计,徐圩湖主要鱼类为鲢鱼、鲫鱼、草鱼、鲤鱼、翘嘴鲃、鲈鱼和乌鳢,草食性、杂食性鱼类品种多样且数量众多,主要原因是徐圩湖运行前期为满足徐圩水厂每日取水需求,善后河水未通过预处理区直接进入生态蓄水区分区,带入了大量的野杂鱼苗和鱼卵。在运行调试初期,拦截鱼苗等措施由于阻碍备用水源地进水也被禁止使用。随着运行时间推移,鱼类数量较多,投放肉食性鱼类已经不能有效控制草食性、杂食性鱼类的繁衍,且缺少大型的渔业资源调查和捕捞措施,因此对湖区沉水植物的

恢复带来较大困难。

2.2.2 低温影响

低温直接对水生植物的光合作用及呼吸功能产生重要影响。水生植物在其耐受水温下,水温越高,叶绿素含量呈增多趋势,生存能力提高,生长加快,数量增多。不同的水生植物对水温的耐受能力存在差异,如菹草为耐寒类品种,苦草及微齿眼子菜为较耐热品种,总体来说沉水植物的适宜生长温度分布于15~30℃之间^[12],如果水温低于10℃时,多数沉水植物难以生长^[13]。

徐圩湖在进行沉水植物种植之前,先进行了脱盐工艺施工,导致沉水植物种植时间较晚,批量种植时已经进入秋冬季,并不适宜沉水植物的生长。根据现场记录,2021年1月份时有连续10 d左右的零下低温天气,最低温度可达到-14℃,主湖区大面积结冰,对刚种植的植物造成严重的冻伤,导致春季沉水植物无法萌发生长。同时,施工完成后,备用水源地为满足徐圩水厂的运行,采用超越渠进水,且一直保持较高水位,对于刚种植的沉水植物生长也造成负面影响。

3 结论及建议

在徐圩湖项目建设初期无论是水生植物覆盖度、还是水质指标都达到了工程建设目标预期目标,因此项目水生植物设计工艺从实际和理论层面都是可行的,可作为徐圩地区备用水源地技术

实施典范推广。针对影响水生植物群落时空反演变的驱动因子提高生态蓄水区的沉水植物存活率及覆盖率,结合徐圩湖项目经验,可参照以下思路进行:

(1)保证水源地湖区足够深的水位,尽量避免有过大波动,将耐寒性沉水植物苦草变更为狐尾藻,采用新型种植工艺,通过不断补种和养护,逐渐恢复生态蓄水区沉水植物覆盖率。

(2)通过适当地降低水位和提高透明度,保持合适的透深比,为徐圩湖的沉水植物萌发生长提供了良好环境,促进了沉水植物的逐步恢复。

(3)生态蓄水区需要做好防风浪措施,预防底泥搅动影响沉水植物正常生长,如采取设置防风林、护岸绿化、围隔等。

(4)为了消除食草性鱼类对沉水植物的牧食影响,需要进行渔业调查调控鱼类结构,设置围网阻隔引水过程中外来鱼类的带入,减少底层杂食性鱼类对底泥的扰动。

参考文献:

- [1] 姓海涛,宋力,沈静,等.平原地区新开挖水库水质维持管理——以连云港市蔷薇湖水库为例[J].施工技术,2018,47(增刊1):1744-1746.
- [2] 潘荣生,宋力,刘婷,等.连云港市应急水源地工程(蔷薇湖水库)生态工程关键性技术设计与实践[J].江苏水利,2018(3):39-42.
- [3] 上海勘测设计研究院.徐圩新区应急备用水源工程(徐圩湖水库)初步设计报告[R].上海:上海勘测设计研究院,2016.
- [4] 国家环境保护总局科技标准司.地表水环境质量标准:GB3838—2002[S].北京:中国环境科学出版社,2002.
- [5] 张晓姣,朱金格,刘鑫.浅水湖泊沉水植物调控技术研究进展[J].净水技术,2018,37(12):46-51.
- [6] 李威,胡淑芳,陈楠,等.不同密度铜锈环棱螺对沉水植物生长和水质的影响[J].水资源保护,2022,38(3):198-204.
- [7] 张松贺,王佳阳,牟小颖,等.不同水体沉水植物叶面微生物群落特征[J].河海大学学报(自然科学版),2022,50(6):66-74.
- [8] SAEED T, SUN G. A review on nitrogen and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands; Dependency on environmental parameters, operating conditions and supporting media[J]. Journal of Environmental Management, 2012, 112(24):429-448.
- [9] 刘永,郭怀成,周丰,等.湖泊水位变动对水生植被影响机理及调控方法[J].生态学报,2006,26(9):3117-3123.
- [10] YIN H B, YAN X W, CU XH. Evaluation of thermally-modified calcium-rich attapulgite as a low-cost substrate for rapid phosphorus removal in constructed wetlands[J]. Water Research, 2017(115):329-338.
- [11] 翁松干,许静波,樊旭,等.大纵湖高等水生植物与生态环境调查研究[J].江苏水利,2017(12):11-16.
- [12] 卿杰,王超,左倬,等.大型表流人工湿地不同季节不同进水负荷下水质净化效果研究[J].环境工程,2015,33(1):190-193.
- [13] 张彩莹,杜瑞卿,王岩.季节气温变化对潜流人工湿地处理效果的影响[J].环境工程学报,2016,10(4):1706-1712.
- [2] JIANG Y, GUO F, WANG W, et al. Stability study of a double-row steel sheet pile cofferdam structure on soft ground[J]. Water, 2023, 15(14):2643.
- [3] 姜士竹,冯峰,谭秀志.板模围堰在水闸消能工程中的应用[J].江苏水利,2014(11):16-17.
- [4] 周成洋,袁聪,林立.钢板桩围堰技术在沿海淤泥质土中的应用[J].江苏水利,2022(3):19-23.
- [5] 袁淑霞,裴龙瑶,张宇鹏,等.非牛顿流体滩涂钢板桩围堰泄漏量分析[J].水利水电科技进展,2023,43(4):67-72.
- [6] 周清泉,李振羽,江义.基于变形控制的某双排钢板桩围堰结构设计优化[J].水电能源科学,2023,41(11):121-124.
- [7] 许海明,郭生根,卢纪璠,等.PC工法桩在基坑支护中的研究及应用[J].施工技术,2019,48(4):85-89.
- [8] 赵豫鄂,曹杰,彭韬宇,等.PC工法桩在水上深基坑工程中的应用[J].施工技术(中英文),2022,51(4):133-136.
- [9] 张云舒,盛天浩,陆春华,等.鄱阳湖某桥墩深基坑PC工法桩支护结构监测与优化设计[J].建筑技术,2023,54(11):1302-1307.

(上接第23页)