

DOI: 10.13205/j.hjgc.202507006

李萌萌, 陈亮, 陈慧华, 等. 底泥环保疏浚技术及应用进展[J]. 环境工程, 2025, 43(7): 48–63.

LI M M, CHEN L, CHEN H H, et al. Progress of environmental dredging techniques for sediment and their applications[J]. Environmental Engineering, 2025, 43(7): 48–63.

底泥环保疏浚技术及应用进展

李萌萌^{1,2} 陈 亮^{1,2*} 陈慧华³ 郭祺忠⁴ 练继建^{1,2}

(1. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072; 2. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072; 3. 金华
华创环保工程有限公司, 浙江 金华 321017; 4. Department of Civil and Environmental Engineering, Rutgers University–
New Brunswick, Piscataway, NJ 08854, USA)

摘 要: 随着我国水污染治理的持续见效, 控制以城市和农业面源污染为主的外源污染和以污染底泥为主的内源污染问题, 已然成为未来水污染治理的关键。特别是对于内源污染的治理, 基于传统疏浚理论, 已经逐渐形成了以污染底泥治理为主要目标的环保疏浚技术体系。为进一步梳理我国环保疏浚技术现状, 通过文献调研分析其技术特点、研究现状、现行标准、工程成本以及对水生态和水环境的影响。结果表明, 近10年来, 我国在环保疏浚设备研制上发展迅速, 国产设备的市场占有率也在稳步提升。但在进行环保疏浚工程设计时, 未能充分考虑疏浚作业对水生生物的潜在影响, 作业区域的水质变化也缺少具体控制标准。未来可考虑利用相关模型实验, 确定环保疏浚作业时水环境变化的代表性指标, 并从污染物释放和水生生物潜在影响评估的角度设定其阈值, 从而建立环保疏浚作业期间的环境控制标准, 尽可能避免疏浚作业对水生环境的影响。

关键词: 环保疏浚; 设计标准; 疏浚设备; 疏浚成本; 生态影响

Progress of environmental dredging techniques for sediment and their applications

LI Mengmeng^{1,2}, CHEN Liang^{1,2*}, CHEN Huihua³, GUO Qizhong⁴, LIAN Jijian^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. Jinhua Huachuang Environmental Protection
Engineering Co., Ltd., Jinhua 321017, China; 4. Department of Civil and Environmental Engineering, Rutgers University–
New Brunswick, Piscataway, NJ 08854, USA)

Abstract: With the intensification of environmental awareness, more pollution remediation projects on surface water have been carried out. However, improving water quality not only needs to reduce the external pollutants derived from urban and agricultural non-point sources, but also needs to remove the internal pollutants that exist in the sediment. Dredging techniques, especially the environmental dredging techniques, have been widely used in remediation projects to remove the pollutants in sediment due to re-suspension and lower disturbance than other traditional dredging techniques. To understand the status of environmental dredging in China, technical characteristics, equipment development and application status, design standards, relevant engineering costs, and its impacts on aquatic systems have been summarized and presented through literature research. Over the past 10 years, China has witnessed rapid advancement in developing professional environmental dredging equipment. Nowadays, this dredging equipment is becoming eco-friendly, intelligent, efficient, and

收稿日期: 2024-05-08; 修改日期: 2024-06-21; 接收日期: 2024-07-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(42277046)

第一作者: 李萌萌(1995—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为水污染治理。lmm8672@tju.edu.cn

* 通信作者: 陈亮(1985—), 男, 副教授, 主要研究方向为水污染治理。liangchen@tju.edu.cn

convenient. However, the market share of domestic manufacturing dredging facilities remains relatively small, though it is growing steadily. Additionally, the potential influence of dredging operation on aquatic organisms has not been fully considered in the design of environmental dredging projects. Specific operational standards for such projects in highly bio-sensitive areas need to be established to ensure water quality safety and hydrobionts in the dredging area. Thus, different simulations and experiments could be considered to determine the representative indicators of water environment changes during dredging operations in the future. Subsequently, environmental control indicators and their thresholds for dredging projects can be determined from the perspective of contaminant release and its impact on aquatic life activities, thereby, ensuring that the environmental impact of dredging operations on aquatic systems is minimized or even negligible.

Keywords: environmental dredging; design criteria; dredging equipment; dredging cost; ecological impact

0 引言

我国河湖众多、水系发达,有2800多个面积超过1 km²的湖泊,50000多条流域面积100 km²以上的河流^[1],然而城市扩张、植被覆盖面积缩减等原因导致国内面临严峻的水土流失问题。据统计,2018年长江流域水土流失面积约为34.67万 km²,治理后2020年该面积仍达到33.7万 km^{2[2,3]}。事实上,地表流失导致的土壤颗粒大部分会随地表径流进入附近水体,使得水中泥沙含量持续增加,进而引发河湖淤积问题。比如:1919—1959年黄河每年因水土流失而增加的泥沙量高达16亿 t,导致下游河床普遍抬高2~4 m^[4];滇池在1950—1995年因水土流失造成的淤积量为5610万 m³,导致湖盆抬高0.47 m^[5];鄱阳湖平均每年入湖泥沙量2524.3万 t,其容积由20世纪50年代的370亿 m³缩减至20世纪80年代的298亿 m^{3[6,7]}。除河湖外,水库及城市小微水体的泥沙淤积问题也值得关注。2001年上海市河道淤积量累计1.45亿 m³,其中区(县)级以下河道淤积量占总淤积量的83.41%^[8]。邓安军等^[9]汇总国内6702座水库的泥沙淤积情况发现,截至2018年全国水库淤损率为11.28%,年均淤损率为0.41%~0.49%。其中,太湖流域的大、中、小型水库的年平均蓄水损失率分别为0.25%、0.50%和3.00%^[10],海河流域官厅、庙宫水库年淤积率分别为0.64%和1.31%^[11]。因此,为缓解日益严重的地表水体泥沙淤积问题,疏浚作为增加水体库容的主要措施得到了广泛应用。目前,我国年工程疏浚量达6亿 m³(居世界第6位),已成为世界上大规模开展底泥疏浚工程的国家之一^[12]。

除水体库容缩减外,受人类活动的影响,越来越多的湖泊、城市水体面临水量减少、水质恶化、生物多样性降低等问题^[13]。其中,以污染底泥为主的内源污染是导致此类水生生态系统问题的关键,因此基于传

统疏浚理论所形成以污染底泥治理为主的环保疏浚技术被广泛关注和研究。有研究表明,21世纪初我国80%以上的湖泊都受到污染,其中太湖流域自20世纪80年代开始出现水污染问题,到2000年时流域整体均受到严重污染^[14]。然而,深受污染问题困扰的不止太湖等大型水体,多地城市水体也因其流速低、水体交换能力弱、外源污染物输入量大等特点,导致黑臭水体问题频繁发生^[15]。据统计,我国86%以上的老旧城区河段存在污染物超标、水体黑臭化等问题^[16]。为此,2015年国务院颁布的《水污染防治行动计划》中明确要求到2030年全国七大重点流域水质优良比例总体达到75%以上,城市建成区黑臭水体总体得到消除^[17]。目前,随着水污染防治的深入实施,我国区域水生态、水环境问题已然得到了很大程度的改善,但城市小微水体的黑臭问题仍未彻底解决。如淮安市现有记录的小微黑臭水体共25条,其中,重度黑臭水体10条,季节性黑臭水体6条^[18]。相关研究认为,进行黑臭水体治理时不仅要控制以城市和农业为主的面源污染,还要关注以污染底泥为核心的内源污染问题^[19-20]。污染底泥作为受污染水体中污染物(如氮、磷、重金属和有害微生物)的“汇”,污染物含量通常比上覆水和土壤背景值高出许多,而各种物理、化学和生物因子都有可能促使其携带的污染物再次释放,进而成为造成水质持续恶化的“源”^[21-22]。近年来,频繁发生的“湖泛”问题便与污染底泥有密切关系,底泥中关键致黑、致臭物源的提供是根本原因之一,没有污染底泥的参与,“湖泛”难以形成^[23]。比如,You等^[24]模拟不同风速下太湖梅梁湾底泥中磷的释放,发现微风和中风比强风产生更多的磷通量;范新成等^[25]发现,常处于中等风速(风速5 m/s左右)区域的富磷底泥,应更加关注疏浚的必要性。

疏浚不仅可以清除淤积泥沙、提高水体库容,还

可以通过环保疏浚彻底清除受污染底泥,削减污染底泥对上覆水体的负面影响,使得环保疏浚在污染水体内源治理中也起到了至关重要的作用^[21,26,27]。考虑到国内外疏浚工程日益增多,特别是以污染底泥治理为主的环保疏浚的快速发展,为进一步总结分析当前环保疏浚的技术特点、研发现状、现行标准、工程成本以及对水生生态系统的影响,本文将在总结国内外疏浚定义、分类的基础上,以环保疏浚为重点介绍相关实施标准、设备研发现状、工程应用成本以及对水生生态系统的潜在影响。同时,对于环保疏浚是否有利于水生生态系统这一颇具争议的话题,文中对主流意见及相应工程案例进行介绍,以期后期环保疏浚研究提供新想法,并对环保疏浚工程实施方案设计提供参考。

1 疏浚的发展及分类

疏浚是一种利用人力或机械设备疏挖水体底部沉积物并将其转移至地面的古老技术,该技术从底格里斯河和幼发拉底河上最早的人类定居点就已开始被广泛使用,并逐渐由人力疏浚走向机械疏浚^[28]。我国历史上也有很多关于疏浚的记载,南京玄武湖有案可稽的疏浚工程就有10次,早期以人力开挖为主,直至宋朝发明了当时较为先进的“浚川耙”等。但是,近代我国疏浚业的发展在很长时期远滞后于欧美发达国家,直到1897年天津卫成立的第一家专业疏浚机构海河工程局,才改变了我国此前无专业疏浚队伍的历史,也为推动国内机械化疏浚的发展作出了杰出贡献^[29,30]。进入20世纪后期,水污染问题的频繁发生使得以污染底泥治理为主要目标的疏浚工程日益增多。同时,对于以疏挖河道、扩大库容等目的开展的工程疏浚,也要求尽量降低对水生生态系统的影响。直到20世纪90年代,国内专家在已有工程经验的基础上,从工程目标、施工要求等角度提出针对污染底泥治理的环保疏浚技术,这标志着国内疏浚业也逐渐向高效专业、清洁环保等方向转变。

疏浚从施工方式上可分为干式疏浚和水下疏浚。干式疏浚是将水排空后再进行疏挖,包括干挖和水力冲挖两种方法,具有直观、质量易于保证、疏浚彻底等优点,是上海市内中小河道疏浚的主流方式。但该方式对施工季节要求较高、需要临时围堰且对水生生物影响较大^[31]。水下疏浚是将疏浚船固定在船体某一位置对水下淤泥进行清除,利用管道把清理的淤泥输送到指定排放位置^[32],是当前疏浚工程的主要施工方

式,通常需要借助疏浚设备进行,如抓斗式挖泥船、绞吸式挖泥船、泵吸式挖泥船等^[12]。

疏浚从技术上分为工程疏浚和环保/生态疏浚两大类。工程疏浚是以疏通航道、增加库容等目的进行的疏浚,出现时间早,技术成熟度和采用率均高于环保/生态疏浚。该技术疏挖深度较大,一般几米至几十米不等,对生态环境影响较大。比如用于采砂的集料疏浚,会导致生物多样性平均减少30%~70%,底栖生物和水中生物种群数量减少40%~90%^[8,33,34]。环保/生态疏浚是在工程疏浚基础上发展起来,以清除水体中受污染底泥、改善水体生态环境为目的的新兴疏浚技术,属于海洋、水运、环境和疏浚等工程的交叉学科和施工技术^[35,36]。实际工程中,环保疏浚、生态疏浚是不完全相同的技术,二者在施工方式、施工要求等方面大致相同,区别在于环保疏浚侧重于清除水体污染物聚集库、抑制藻类繁殖并提升水质,而生态疏浚则更侧重疏浚后水体的水生态修复^[37]。国内常将生态疏浚和环保疏浚统称为环保疏浚,自20世纪90年代末引入我国后,已在太湖等100多个湖库的富营养化控制、黑臭治理及生态修复中开展并发挥了积极作用^[25]。如2008年开始的太湖环保疏浚工作,分别在竺山湖、梅梁湖、太湖西沿岸、东太湖和贡湖清除了1031.3万,1397.3万,486.5万,884.1万,407.1万 m^3 表层污染底泥^[38]。天津生态城投资开发有限公司等在2009—2015年对天津市中新生态城298 hm^2 的工业污水库进行环保疏浚和生态治理,共清除库内385万 m^3 的污染底泥^[39]。

关于环保疏浚定义的具体阐述,国内外多位学者提出了自己的见解,如刘鸿亮等^[33]认为环保疏浚旨在清除水体中的污染底泥,并为湖泊水生生态系统恢复创造条件,但同时还需要与湖泊综合整治方案相协调;Brides等^[40]将环保疏浚定义为专门为清除污染沉积物而进行的疏浚;倪守高等^[41]对环保疏浚的定义是为改善水质和水生态而进行的清淤;Palermo等^[42]认为环保疏浚是从水体中去除受污染沉积物的工程,包括清除表层污染底泥、控制沉积物再悬浮和扩散逃逸以及降低疏浚残留物。随着相关工程经验的积累,国内关于环保疏浚概念的理解与阐述也发生了变化,图1对巴特等^[32,35,43-48]多位专家关于环保疏浚概念阐述侧重点的变化进行了梳理。可见,环保疏浚正在由早期的重效果、轻方式和过程逐渐转向疏浚效果、方式、过程三者兼顾,对环保疏

浚的要求也由最初的污染底泥清除转变成生态环境、工程效果、资源利用等多方面统筹兼顾的系统化、协调化的综合疏浚工程。综上,本文认为环保疏浚主要指在自然地理条件、水生生态系统现状基础

上,以改善水生生态系统为目的,在工程全生命周期均考量到环保要求并采取相应措施的疏浚工程,是系统化、协调化、全面化的综合疏浚工程。



图1 我国环保疏浚概念的变化

Figure 1 Evolution of environmental dredging concepts in China

2 环保疏浚工程技术及设备

2.1 环保疏浚技术及设计标准

环保疏浚技术作为污染底泥异位修复技术的代表,在我国已得到充分的应用与推广,且已形成一套完整的技术流程,参考国内相关标准及文献,将环保疏浚的关键技术总结绘制成图2。

目前,环保疏浚的关键技术大致分为4个部分,即勘测调研、疏浚施工、脱水及无害化处理和底泥资源化利用^[49]。

1) 勘测调研:主要为施工方案设计服务,也是保证良好疏浚效果的前提和基础。除收集场地周边资料外,还需采样检测确定污染底泥分布及受污染类型,通过潜在风险指数等方法确定疏浚范围及深度。

2) 疏浚施工:通常包括底泥的疏挖和输送,疏浚设备选型应符合“可达性、适应性、定位精确性、环保性能高”的原则^[50]。在疏浚作业时,不仅要关注底泥扰动所造成二次污染的问题,对于黑臭问题严重、距离生活区较近的水域,还需考虑防臭、防噪声污染的问题。此外,为保证环保疏浚效果,疏浚作业既要考虑温度对底泥污染物释放的影响,高氮磷、有机污染底泥疏浚作业的适宜水温为5~15℃。还应尽力避开水生生物的繁殖期,选择风险低、环境影响小的时间作业,通常秋冬季节比较符合要求,且疏浚后水体有较长时间的低温期^[51]。疏挖出的污染底泥通常有管道、汽车、船舶3种输送方式,传输过程中污染底泥泄漏是底泥输送常面临的难题。为解决这一问题并提

高疏浚效率,集疏挖、脱水、输送于一体的综合性环保疏浚船已得到研制应用。

3) 脱水及无害化处理:此阶段处理对象为疏挖出的污染底泥,合适的堆场设计是实施脱水处理的重要前提,并且应满足“避免污染堆场周边和地下水”的原则。预压法、加药机械脱水法、堆场主动排水等都是脱水干化的技术手段^[52],脱水处理产生的余水需收集处理后再排放,排放时余水水质标准根据接纳水体水质状况决定。脱水后的底泥须通过植物修复、磁分离、活性剂表面洗脱、固化等方式进行无害化处理后再决定底泥处置方式。

4) 底泥资源化利用:早期底泥常采用填埋的方式处理,考虑到环境影响和底泥特性,无害化处理后的底泥现在常作为土壤调节剂、建材原料等,使其再次利用或将其催化热解进行能源化利用^[53]。

在环保疏浚工程中,施工方案制定需要依据相关标准进行,国外对环保疏浚设计标准的研究相对较早,除了前期调研对污染底泥的筛选标准外,对于疏浚作业时需要监测的指标及控制标准研究也日趋成熟^[54]。1994年Raaymakers从水生系统水质和饮用水水质2个角度确定了水质标准指南(Water Guideline Values, WGV),用于监测受疏浚作业影响水体的化学参数变化^[55]。随着环境监测技术的发展, Sipelgas等^[56]认为应充分了解疏浚作业时悬浮物的分布情况,特别是具有密集流体动力学状态的海域和靠近生物敏感区的疏浚作业,更应进行高时间和空间分辨率的

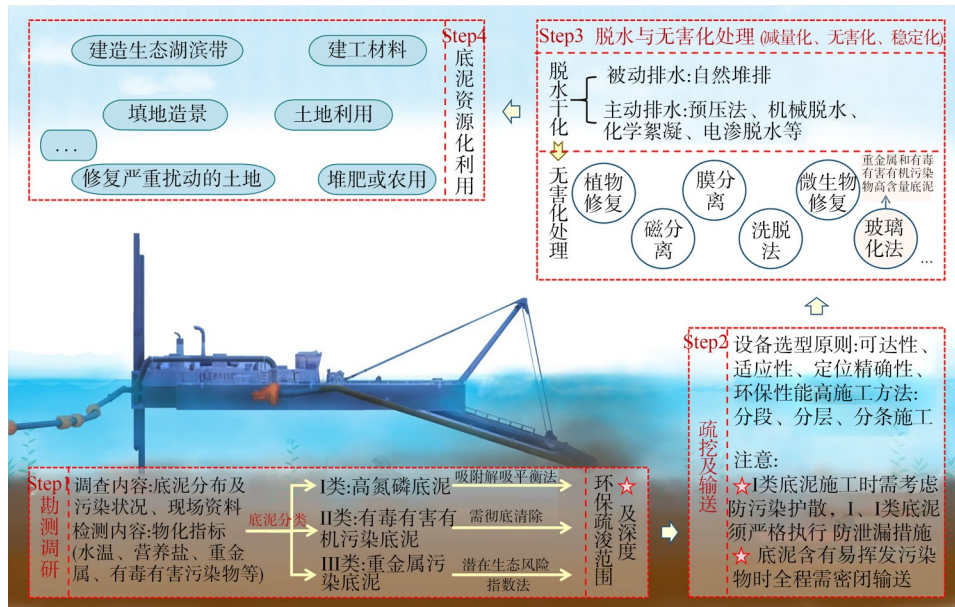


图 2 环保疏浚关键技术流程

Figure 2 Key technological processes for environmental dredging operations

悬浮物分布监测。Bridges 等^[40]提出疏浚作业时可通过浊度或总固体悬浮物来表征水体中沉积物或其他颗粒含量,由于未考虑污染物向水体再释放的问题,因此环保疏浚作业时这些指标的变化及其对水生生态系统的影响是未来研究的关注重点。

我国环保疏浚工程起步较晚,虽然在国内已有许多工程案例,但相关标准在 2010 年后才逐渐发布实施。2014 年,环保部污染防治司和规划财务司共同发布了《湖泊河流环保疏浚工程技术指南(试行)》,涵盖环保疏浚工程从前期调研、方案设计、疏浚作业到后处理全过程的技术要求及控制标准^[57]。2017 年江苏省质量技术监督局也发布 DB 32/T 3258—2017《河湖生态疏浚工程施工技术规范》,提出环保疏浚前期调研、施工过程中及施工后的质量检验标准^[47]。2020 年安徽省市场监督管理局发布了适用于省内河湖整治、水库清淤、吹填、环保疏浚等工程施工的 DB 34/T 3678—2020《内河航道疏浚工程施工技术规程》^[58]。2021 年山东省市场监督管理局发布针对水体底泥重金属污染状况调查的监测点位布设标准 DB 37/T 4327—2021《底泥污染状况调查点位布设技术规范》,为河湖疏浚、水生态修复治理等项目的勘测调研提供参考^[59]。除政府部门发布的环保疏浚相关标准外,刘华丽等^[60]、朱伟等^[61]也根据工程经验提出环保疏浚工程的设计原则、作业时关键控制技术及标准。杨永森^[62]指出当底泥中污染物浓度高出本底值 2~3 倍时需要考

虑环保疏浚,疏浚时不仅要清除 40~50 cm 厚的表层沉积物,还须清除泥-水界面特有的 2~7 cm 厚悬浮态类胶体状有机物。莫孝翠等^[45,46]指出环保疏浚的疏浚深度一般<1 m,水平疏浚精度要求为 30 cm,垂直疏浚精度要求为 5~10 cm。曹承进等^[48]指出,城市河道底泥生态疏浚深度宜取 0.3~0.5 m,疏浚深度误差应≤0.1 m,疏浚底泥扩散距离≤0.5 m,疏浚后平面平整度好,不漏疏或形成沟坎,能为后续生物技术介入创造必要的生态环境条件。

研究人员已经意识到环保疏浚过程中船体行进、机械搅动等因素对水流的影响会引起污染底泥的再悬浮,不仅存在将底泥携带的污染物再次释放进水体引起二次污染的风险,还可能因悬浮颗粒增多堵塞生物呼吸系统、减弱光线等威胁水生生物种群发展^[63,64]。因此,在疏浚作业期间,应尽量降低对水体的扰动,避免大量底泥颗粒发生悬浮扩散,同时实时监测水体理化指标以保证其理化性质变化过大时能够及时采取补救措施。然而,影响环保疏浚过程中底泥污染物释放的因素复杂且多样,虽有专家提出可将水体浊度变化作为水质变化的代表性指标,但国内现有标准中只要求在疏浚作业时尽量降低水体浊度以减小对水生环境的不良影响,但具体的浊度控制范围尚未明确。未来可进一步研究环保疏浚扰动时污染物释放与浊度等方便实时监测的指标间的相互影响,明确水体污染物含量变化的代表

性指标,实现通过浊度等指标的实时变化预测水体氮、磷等污染物的浓度变化。

2.2 环保疏浚设备发展及应用

为满足环保疏浚需求及发展,相关技术和装备的研制改进也伴随科技发展在稳步推进。为拥有完全自主研发的环保疏浚设备,我国经历了从完全依靠国外引进到实现独立研制的发展历程:1) 2000年前。国内的机械化环保疏浚设备主要从荷兰、美国、日本等国家引进以满足市场需求。如荷兰IHC公司研制的安装有带罩式环保绞刀的海狸600型和海狸1600型绞吸式挖泥船^[65],不仅能够疏浚薄层污染底泥,还能避免污染底泥的扩散。2) 2000—2020年:2000年左右我国在引进国外关键技术基础上,结合实际工程需求自主研制疏浚装置,但专业环保疏浚设备领域仍是空白,高难度环保疏浚常用的绞吸式挖泥船仍以进口为主^[66]。2009年,“天骥号”“天麒号”等更加环保的大型绞吸式疏浚船陆续建成投产^[67],环保型挖泥船正逐渐被研制使用。如今我国已实现完全独立研制专业环保疏浚设备,2024年3月,中交天航局完全自主研发的生态清淤智能化一

体平台船“太湖之星”在太湖梅梁湾生态清淤工程中正式投入使用,实现了环保疏浚智能化。

由于专业环保疏浚设备使用成本较高,环保疏浚工程中也会采用较为环保的工程疏浚装置。为了解国内外疏浚设备未来发展趋势,本文以“dredging”为关键词,专利分类号“E02F”为筛选条件在专利搜索库 Patent Scope (<https://www.WIPO.int/portal/en/index.html>)检索到专利8011项,国内外疏浚专利的年公开数量变化见图3。其中,图3a为全球每年疏浚相关专利数量随时间的变化,可以看出,2018年起专利数量迅速上升,较2014年增长超4倍,2021年公开专利数量达到峰值1299项,随后有轻微下降。图3b为总公开专利数量排名靠前的国家和组织在近十年的公开专利数量变化。2014—2021年我国年公开专利数量呈指数型增长,由43项/年增长至1241项/年,2022年起该数量略有下降但仍稳居世界首位。究其原因,除了我国科技的快速发展外,随着我国知识产权法案的推广普及,在政府对知识产权保护的重视和政策推动下,公民专利保护意识显著增强是我国专利数量显著增长的另一大原因。

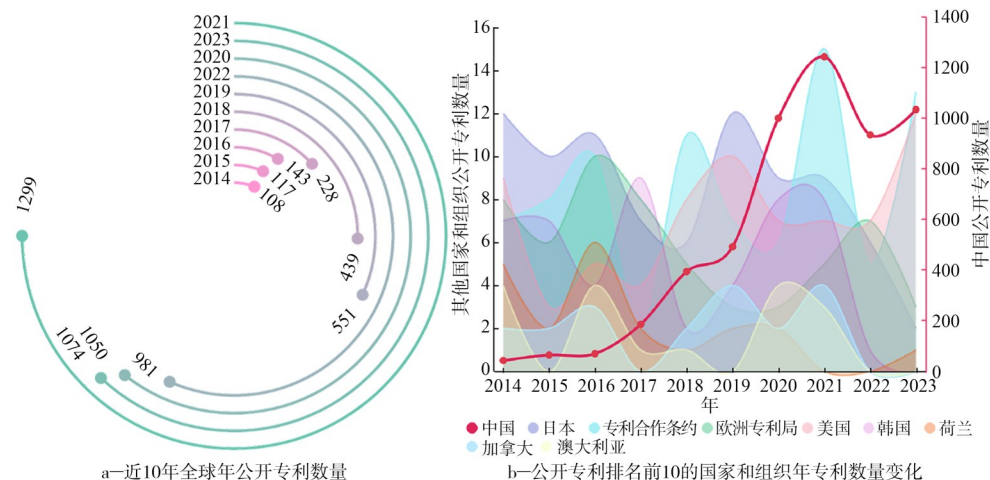


图3 近10年国内外疏浚相关专利数量变化(数据来源:<https://www.WIPO.int/portal/en/index.html>)

Figure 3 Changes in dredging-related patent published over the past decade (Data source: <https://www.WIPO.int/portal/en/index.html>)

制造技术和信息技术的快速发展使疏浚设备逐渐向更加高效、智能、便捷和环保的方向发展。本文对2023年Patent Scope中“dredging”相关性排序前500条专利题目进行词频分析,结果见图4。可知:1) 生态友好、环保型疏浚技术及设备是当前研究热点之一,无论是新型施工方法还是专业环保疏浚设备的设计制造,都是未来较长时间内疏浚技术发展的一大趋势,如Chen等提出解决黑臭水体疏浚时二次

污染的疏浚方法,Bai等针对疏浚对底栖生物造成的毁灭性打击问题设计了专用疏浚设备等^[68]。2) 智能化疏浚设备正在被广泛设计制造,如用于清除河流、管道淤泥的智能机器人、可实时调整疏浚深度的智能监测控制系统等^[69]。3) 如何使疏浚船更加高效、便捷也是研究热点之一。特别对于城市沟渠、湖泊等易受污染威胁需要频繁作业的小型水域,两栖疏浚车等更为便捷的小型疏浚设备正在被研制

使用^[70]。



注:专利题目为英文翻译后分析。

图4 2023年疏浚专利名称的词频分析结果

Figure 4 Word frequency analysis results of dredging patents' topics in 2023

目前,我国环保疏浚设备的研发得到了极大的发展,已经能够完全自主研制专业环保疏浚设备,但在相应设备的制造与推广上仍处于发展阶段。截至2010年,我国研制的疏浚设备在国际市场的占有率不足5%,国内市场所用专业环保疏浚设备也多以国外引进为主,且质量参差不齐、数量也较少^[35,71]。如何降低建造成本、提升疏浚效率,提高国产环保疏浚设备国内、国际市场份额是当前面临的主要任务。

3 环保疏浚工程案例研究

3.1 环保疏浚工程成本汇总

环保疏浚虽然具有水体扰动较小等优点,但它对整个疏浚作业过程有诸多限制,需要控制作业过程中沉积物再悬浮、污染物向水体、空气中的释放以及作业后疏浚残留物处置和余水处理等。因此环保疏浚对工艺及设备要求较高,工程费用通常比工程疏浚高出很多,其单价通常是工程疏浚的几倍甚至几十倍^[42,45]。例如:任实等根据200 m×200 m范围的深水疏浚实验所投入的人力、设备等成本,计算出三峡水库工程疏浚单价为31.28元/m³^[72];美国Nutting湖清淤项目在清除约275000 m³的底泥后将其以1.00美元/m³的价格售出,使工程疏浚单价降低至0.45美元/m³^[73]。而针对污染底泥的环保疏浚工程,所耗费的资金明显高于工程疏浚:1990—1994年Masan湾的环保疏浚工程,疏浚单价约17.05美元/m³^[74]。美国陆军工程兵团提供的疏浚工程数据显示,2010

年当地工程疏浚的平均单价为19.97美元/m³,用于非污染沉积物的料斗疏浚工程单价为14.40美元/m³,受污染沉积物由于使用非料斗环保疏浚技术,其单价为22.39美元/m³^[75]。

环保疏浚并非只包括清除污染底泥,还涉及污染底泥的无害化处置。底泥所携带污染物不同,其疏挖、无害化处理及处置方式也随之变化,疏浚成本也大不相同。1980—2000年,美国污染底泥环保疏浚工程单价均值为424.01美元/m³,根据底泥所携带污染物的不同,锌污染底泥疏浚单价最低(38.17美元/m³),多氯联苯等有毒有害有机污染底泥疏浚单价最高(1639.34美元/m³)。加拿大的Hamilton湾底泥生态疏浚费用约为70美元/m³,而有机污染底泥的原位生物处理费用高达350美元/m³,若采用焚烧方案处理,费用甚至会超过500美元/m³^[44]。进入21世纪后,环保疏浚工程通常与环境修复等其他水体整治工程结合形成流域综合治理工程。除环保疏浚成本外,污水系统整治等工程成本也被涵盖在内,因此2000年后的污染底泥治理工程成本普遍较高。表1为国内外污染底泥环保疏浚及修复工程成本汇总,数据主要源自美国环保部提供的污染底泥治理报告、国内环保疏浚工程成本资料主要源自相关新闻和已发表文献,目前官方网站尚未公开此类工程所涉及项目及造价。

3.2 环保疏浚对水生生态系统影响评价

虽然环保疏浚能够有效清除水体底部受污染底泥,是污染底泥修复的常用方法之一,但此方法并非一劳永逸的治理手段,疏浚后对水生生态系统的影响是否有利也存在不同说法。随着环保疏浚工程增多,越来越多学者针对这一问题展开研究工作,但评价角度不同,所得到的结论也大不相同,甚至可能完全相悖。为了解环保疏浚工程实施后水生生态系统所受影响,表2为国内外部分环保疏浚实施案例对水生生态系统影响的评价结果。

无论是工程疏浚还是环保疏浚,疏浚作业对底泥表层的破坏,机械扰动造成水体悬浮物增加都是不可避免的,这将直接威胁水生生物的生命活动。实验发现,悬浮物浓度升高对双壳类软体生物的分布有潜在影响,当悬浮物浓度升高至9000 mg/L时对水生生物群会造成毁灭性打击^[103,104]。相比工程疏浚,环保疏浚工程全过程都明确要求控制作业行为对生物的影响,因此对水生生物更加友好。近年来,

表 1 污染底泥环保疏浚及修复工程成本汇总

Table 1 A cost summary for environmental dredging and remediation of contaminated sediments

疏浚地点	开始年份	目标污染物	疏浚土方量/ (10 ⁴ m ³)	治理成本/ (10 ⁶)	治理项目	
					疏浚	环境修复
Olcott 港	1985	—	0.41	\$0.06	√	
Rouge 河下游	1986	Zn	2.62	\$1.00	√	
Wolf 河某支流	1986	Hg	0.99	\$1.00	√	
Waukegan 港	1989	多氯联苯	2.43	\$21.00	√	
Gill Creek-DuPont Plant Site	1989	多氯联苯、三氯甲烷、二氯甲烷、三氯乙烯	0.61	\$10.00	√	
Black and Bergholtz Creeks-Love Canal	1990	2,3,7,8 TCDD	1.31	\$14.00	√	
Black 河	1990	多环芳烃	3.80	\$1.50	√	
Masan 湾	1994	—	211.10	\$36.00	√	
Manistique 河及港口	1996	多氯联苯	9.12	\$14.81	√	
Raisin 河	1996	多氯联苯	2.05	\$6.00	√	
Olcott 港	1997	—	0.75	\$0.08	√	
Rouge 河上游	1997	多氯联苯	0.53	\$0.55	√	
Monguagon 河	1997	多环芳烃、胺类、酚类、铅、锌、多氯联苯	1.91	\$3.00	√	
Menominee 河	1997	As	0.76	\$1.50	√	
Newburgh 湖	1998	多氯联苯	30.40	\$11.80	√	√
滇池疏浚一期工程	1998	N、P、重金属	424.00	¥ 180.00	√	√
巢湖疏浚一期工程	1999	N、P	480.00	¥ 190.00	√	√
西五里湖环保疏浚示范工程	2004	N、P	12.00	¥ 3.00	√	
Great Lakes	2005	重金属、多氯联苯	6.87	\$10.00	√	√
滇池疏浚二期工程	2006	N、P、重金属	396.00	¥ 247.50	√	√
Fox 河	2009	—	535.19	\$1000.00	√	√
Little Lake Butte des Morts	2009	—	305.82	\$800.00	√	√
Kalamazoo 河	2009	多氯联苯	9.94	\$0.30	√	
Milwaukee's Kinnickinnic 河	2009	多环芳烃、多氯联苯	13.00	\$22.00	√	
Hudson 河上游	2009	多氯联苯	210.25	\$1700.00	√	
St.Marys 河	2010	—	0.50	\$1.50	√	√
Ottowa 河	2010	多氯联苯、多环芳烃、重金属	18.50	\$47.00	√	√
霞湾港综合治理工程(一、二期)	2015	重金属	5.01	¥ 146.72	√	√
Grand Calumet 河	2015	—	3.53	\$12.00	√	√
Manistique 河	2016	—	0.72	\$3.80	√	√
Rouge 河	2017	—	8.26	\$49.00	√	√
琵琶湖	2017	N、P、重金属	14.95	¥ 350.00	√	√
扬州广陵区农村河道疏浚整治工程	2018	—	135.26	¥ 6.54	√	
Grasse 河	2019	多氯联苯	7.65	\$243.00	√	√
外秦淮河清淤工程	2020	N、P、有机质	109.00	¥ 399.22	√	√
Detroit 河	2020	重金属、多环芳烃	0.99	\$2.90	√	√
St. Louis 河	2021	Hg 在内的重金属、多环芳烃、二噁英、多氯联苯	3.44	\$16.00	√	
厦门杏林湾	2023	N、P、重金属	313.30	¥ 690.00	√	√

注:数据来自文献[40]、[74]、[76-86],个别源自网站 <https://hxf.bjx.com.cn/lyzl/>。

关于工程疏浚过程中底栖生物瞬间死亡和物种数量减少的报道一直存在,如公开数据中过去 50 年因工程疏浚及相关活动而损失的海草面积不低于 21023 hm²^[105],国内某河流航道整治工程中因疏浚损失生物量约 35.47 t^[106]。波罗的海疏浚填海工程长达十余年的生态影响监测结果显示,工程疏浚会造成沿海地区水生群落重建和植物数量降低等不良影响^[107]。而在环保疏浚工程中水生生物大面积死亡的

报道较少,风险警告多为潜在毒性风险。例如我国五里湖、美国 Masan 湾虽然存在增加生物毒性的潜在风险,但未见明确的生物毒性事件报道^[75,108]。

此外,环保疏浚的清除对象通常是受污染底泥,评价其对水生生态系统的影响时,不仅要考虑对水生生物的影响,还需从水质变化角度进行分析。公开数据中环保疏浚工程的水质影响评价大部分是正面的,韩国首尔清溪川^[109]、英国伦敦泰晤士河^[110]、法

表 2 环保疏浚工程对水生生态系统的影响评价汇总

Table 2 A summary of environmental dredging impacts on aquatic systems

疏浚地点	国家	疏浚年份	疏浚对水生系统的生物化学影响	文献
Rosie河东南部到Mule河	澳大利亚	1994	疏浚机械设备会在清除底部沉积物的同时清除海草;疏浚两年后,未发现疏浚对海草等底栖生物有重大影响	[87]
Bayou Texar	墨西哥	1995	底栖大型无脊椎动物群落减少	[88]
月湖	中国	1999	疏浚后水中TN、TP浓度分别由3.1~3.7 mg/L、0.08~0.15 mg/L升高至3.2~4.2 mg/L和0.3~0.375 mg/L	[89]
Ponggol河口	新加坡	1999—2000	疏浚后沉积物中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、TC、TOC含量均值均升高	[90]
Debordieu河	美国	2001	疏浚对水化学的影响是局部且短暂的,疏浚时和疏浚停止15 min后水中OP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和NN含量会持续升高	[91]
Pialassa Baiona	意大利	2004—2005	疏浚河道的南部和中部物种丰富度增加,但中部和北部的物种多样性下降	[92]
Mucuripe湾	巴西	2007	疏浚后水中Cd、Cr、Cu、Zn的浓度降低	[93]
Peçem港	巴西	2011	疏浚后沉积物中铅、锌和多环芳烃的浓度增加;疏浚后收集的沉积物对黏蝇和多毛纲蠕虫表现出急性毒性	[94]
太湖	中国	2009—2010	疏浚完成6年后,疏浚区域的水质、底泥质量未得到明显改善	[95]
Geumho河	韩国	2010—2012	疏浚后水中TP含量显著降低,COD、TN等指标略微降低	[96]
Passaic河下游	美国	2012	疏浚完成3个月后,水中各重金属浓度始终明显高于疏浚前;疏浚完成10个月后,表层底泥中重金属含量明显下降(Zn除外)	[97]
Toulon湾	法国	2014—2016	疏浚期间水中铅浓度显著升高;疏浚对超微型浮游生物的丰度和结构没有影响,但对异养原核生物的丰度有影响	[98]
Muskegon湖	美国	2016	夏、秋季疏浚后水中TP和SRP浓度均显著下降,DO浓度明显高于疏浚前;夏季和秋季疏浚对水中Al、Ca、Fe和Mg的浓度无显著影响;孔隙水中SRP的浓度由疏浚前2000~5000 $\mu\text{g/L}$ 降至<200 $\mu\text{g/L}$;疏浚对沉积物中Al、Ca、Fe、Mg平均浓度无显著影响	[99]
大通湖	中国	2016—2017	疏浚使Ca-P含量和LOI值均低于SWI;新生成的表层沉积物中Fe-P和OP含量较疏浚前分别增长136%和48%	[100]
南湖	中国	2017	水中浊度、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、IP、OP、NAIP、AP、TP、TC和TN等指标在疏浚后显著下降;疏浚后沉积物中微生物的生物量明显下降	[101]
Wylerbergmeer湖	荷兰	2019	疏浚减少了扩散型 CH_4 排放,对沸腾型 CH_4 排放有显著的减少趋势	[102]

国巴黎塞纳河^[111]、德国鲁尔埃姆舍河^[112]、奥地利维也纳多瑙河^[113]、美国纽库普湖^[114]以及我国的天津海河^[115]、上海苏州河^[116]、泰东河^[117]、滇池草海^[118]等地环保疏浚项目完成后受污染水体的水质均得到明显改善。其中,滇池草海环保疏浚1年后水中COD、BOD₅和TN、TP、叶绿素a浓度分别降低了36.4%、64.7%、37.8%、40.5%和62.5%^[118];泰东河疏浚作业后全年水质达标率由疏浚前的75.0%提高至91.7%^[117]。但是,并非所有环保疏浚工程都能有效改善水体水质,也有一些工程实施后水质改善效果不明显,甚至出现负面影响。如1998年南京玄武湖实施环保疏浚工程后,沉积物中TN、重金属(Zn除外)均呈现上升趋势,TP在清淤后第2年有所下降,随后又呈现上升趋势^[119];太湖西五里湖疏浚1年后叶绿素a浓度上升5.91 $\mu\text{g/L}$ ^[120]。

通常认为,不恰当的疏浚作业是环保疏浚对水质产生不良影响的主要原因,其中包括:

1) 未能有效控制因作业扰动引起的底泥颗粒扩散逃逸。相比工程疏浚,环保疏浚主要面向受污染底泥,扰动引起的底泥颗粒悬浮不仅会导致水体SS含量

上升,还会使附着在悬浮固体表面的污染物发生解吸行为,恶化疏浚区水质,甚至可能随水扩散威胁下游水质安全^[106,121]。1999—2000年美国福克斯河的环保疏浚工程中,约有2%的多氯联苯因疏浚扰动从底泥中析出,甚至随悬浮颗粒流入项目区域下游^[47]。

2) 不适宜的疏浚深度。环保疏浚深度过浅无法有效清除底部受污染的沉积物,过深不仅会对底栖生物造成毁灭性打击,还可能因底部地形变化过大,导致水动力条件改变进而影响水质。Yu等^[122]模拟太湖环保疏浚后发现,进行薄层疏浚虽然使沉积物中重金属含量大幅下降,但不稳定金属的浓度和扩散通量显著增加。Puck湾环保疏浚项目长期监测结果显示,疏浚深度过大会导致疏浚坑内水动力活动降低,间接促进富营养化现象发生,威胁水生环境的安全^[123]。若要避免环保疏浚对水质产生不良影响,充分的勘测调研和合理的疏浚方案设计都是不可或缺的。九江市琵琶湖实施的环保疏浚工程中,项目组经过详细的勘测调研确定清淤深度40~120 cm,清淤面积 $24\times 10^4\text{ m}^2$,根据底泥特性及周边条件选择水陆两栖挖机和环保绞吸船作业,疏浚后水体氨氮含

量由疏浚前的 29.2 mg/L 降至 5.4 mg/L,溶解氧由 5.9 mg/L 升至 7.6 mg/L^[83]。

无论从水质变化还是生物影响的角度,控制疏浚作业所引起的底泥颗粒再悬浮都是保证环保疏浚效果的关键因素之一。据统计,不同疏浚作业方式所造成的残留物再悬浮量占疏浚总量 2%~20%^[124]。因此,在荷兰申请环保疏浚项目时必须出具一份包括泥浆处理在内的潜在风险评估及应对解决措施^[125];在美国进行环保疏浚作业时,因疏浚导致下游 300 英尺(91.4 m)处浊度超出背景值 100 NTU 以上,需要立即上报项目工程师处理^[126]。目前,国内针对疏浚对水生环境潜在影响的研究尚未受到足够重视,特别是环保疏浚的主要清除对象通常是细颗粒泥沙和质地轻的有机质等,这些颗粒随疏浚作业的再悬浮不仅对水生生物生命活动造成威胁,它们与营养物之间的关系也最为密切^[127]。目前针对不同水力条件下的颗粒沉降、扩散输移,已有张瑞瑾沉速公式、水流挟沙力计算公式、韩其为公式等计算公式及模型^[128,129]。未来在进行环保疏浚方案设计时,可考虑在已有研究基础上,基于研究区实际水力条件,对疏浚作业中及作业后水体悬浮颗粒浓度及组分变化进行模拟预测,并相应调整工程方案,从而真正实现对水生环境影响较小的环保疏浚。

4 总结与展望

本文不仅介绍了国内环保疏浚的发展历程、理念变化、施工作业标准制定和疏浚设备的研制现状,还整理了国内外已有疏浚案例的工程成本以及疏浚作业后水生环境的变化。环保疏浚技术在我国提出时间相对较晚,相关标准及设备仍处于探索发展阶段,目前存在施工作业环境控制标准不明确、自主研制设备市场份额占比较小等问题有待解决,具体总结如下:

1) 现有环保疏浚标准中对允许疏浚作业影响水环境、水生态的控制标准尚不明确。国内关于环保疏浚的标准主要集中于方法流程介绍、方案设计要求等方面,疏浚作业过程中的环境控制指标及参数尚未明确。考虑到浊度简单易测,且与水体污染物含量可能存在一定相关性,应考虑能否使用浊度作为作业时环境控制指标,通过实时监测水体浊度变化预测水中污染物含量变化,以便产生污染风险时能够及时采取措施降低疏浚作业对水质的不良影响。未来可考虑针对底泥在不同扰动强度、扰动时

间下,水中污染物及悬浮物含量变化展开研究,从水质变化的角度提出疏浚作业时悬浮物浓度的增量阈值,进而明确环保疏浚作业时环境参数控制标准。

2) 环保疏浚发明专利的产业化率仍需提高,以提高我国自主研发设备的国内、国际市场份额和影响力。我国有数以万计的疏浚相关专利,但大部分尚未得到转化生产,随着我国制造、智能技术的快速发展,提高疏浚发明专利的产业化率是未来的发展机遇与挑战。

3) 环保疏浚方案设计时需要综合考虑疏浚对水生和底栖生物的影响。从疏浚对水生生物影响的角度看,底泥颗粒的再悬浮将对其生命活动造成威胁,目前进行环保疏浚方案设计时未能充分考虑水生生物生命活动的需求,也缺少相关标准进行强制要求。未来可通过研究不同扰动下再悬浮底泥的粒径分布随时间变化,以及不同水生生物对悬浮物粒径、浓度的生物反应,在疏浚前根据施工水域的生物种群预测对水生生物可能造成的影响,并相应调整疏浚方案,避免对生物造成大面积不可逆的伤害。

参考文献

- [1] 范成新,刘敏,王圣瑞,等.近20年来我国沉积物环境与污染控制研究进展与展望[J].地球科学进展,2021,36(4):346-374.
FAN C X, LIU M, WANG S R, et al. Research progress and prospect of sediment environment and pollution control in China in recent 20 years[J]. Advances in Earth Science, 2021, 36(4): 346-374.
- [2] 水利部长江水利委员会.长江流域水土保持公告(2018年)[R/OL]. 2019. <http://www.cjw.gov.cn/zwzc/zjgb/stbc/202311/P020231130553454592220.pdf>
Changjiang Water Resources Commission of the Ministry of Water Resources. Announcement on soil and water conservation in the yangtze river basin (2018)[R/OL]. 2019.
- [3] 水利部长江水利委员会.长江流域水土保持公告(2020年)[R/OL]. 2021. <http://www.cjw.gov.cn/zwzc/zjgb/stbc/202311/P020231128567114691997.pdf>
Changjiang Water Resources Commission of the Ministry of Water Resources. Announcement on soil and water conservation in the yangtze river basin (2020)[R/OL]. 2021.
- [4] 胡春宏,张晓明,赵阳,等.水土流失系统治理对河湖生态环境提升的作用与举措[J].中国水利,2022(7):16-20.
HU C H, ZHANG X M, ZHAO Y, et al. Functions of soil and water conservation for restoration of rivers and lakes eco-environment and measure study[J]. China Water Resources, 2022(7): 16-20.
- [5] 白龙飞.当代滇池流域生态环境变迁与昆明城市发展研究(1949-2009)[D].昆明:云南大学,2012.
BAI L F. Study on the changes of ecological environment in

- Dianchi Lake Basin and the development of Kunming city (1949–2009)[D]. Kunming: Yunnan University, 2012.
- [6] 左长清. 江西省河湖泥沙的主要来源及防治对策[J]. 中国水土保持科学, 2004, 2(3): 61–63.
- ZUO C Q. Analysis and preventive strategy on main source of sediment in river and lake in Jiangxi Province[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2004, 2(3): 61–63.
- [7] 左长清. 论鄱阳湖泥沙淤积及其对环境的影响[J]. 水土保持学报, 1989(1): 38–42.
- ZUO C Q. Discussion on the sediment deposition in Poyang Lake and its affects to the environment[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1989(1): 38–42.
- [8] 王卫. 河道疏浚技术在郊区河道整治中的应用[J]. 水利技术监督, 2006(1): 20–22, 31.
- WANG W. Application of river dredging technology in suburban river regulation[J]. Technical Supervision in Water Resources, 2006(1): 20–22, 31.
- [9] 邓安军, 陈建国, 胡海华, 等. 我国水库淤损情势分析[J]. 水利学报, 2022, 53(3): 325–332.
- DENG A J, CHEN J G, HU H H, et al. Analysis of reservoir siltation in China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(3): 325–332.
- [10] 杭天飞, 厉凯, 徐解刚, 等. 泥沙淤积对中小型水库影响的评估[J]. 水利科学与寒区工程, 2021, 4(5): 115–117.
- HANG T F, LI K, XU J G, et al. Assessment on the impact of sediment deposition on small and medium sized reservoirs [J]. Hydro Science and Cold Zone Engineering, 2021, 4(5): 115–117.
- [11] 陈吟, 王延贵, 陈康. 水库泥沙的资源化原理及其实现途径[J]. 水力发电学报, 2018, 37(7): 29–38.
- CHEN Y, WANG Y G, YANG K. Principle of utilizing reservoir sediment as natural resource and its engineering approaches[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(7): 29–38.
- [12] 杨会臣, 王培. 湖库疏浚技术及淤积物资源化利用技术进展[J]. 中国水能及电气化, 2021(8): 39–42.
- YANG H C, WANG P. Progress in lake and reservoir dredging technology and utilization technology of sediment resources [J]. China Water Power & Electrification, 2021(8): 39–42.
- [13] 唐彩红, 易雨君, 甄浩北, 等. 浅水湖泊叶绿素 a 浓度模拟[J]. 水力发电学报, 2022, 41(11): 1–10.
- TANG C H, YI Y J, ZHEN H B, et al. Simulations of chlorophyll a concentration in a large shallow lake [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(11): 1–10.
- [14] 徐新宇. 太湖地区水体污染的分析 and 展望[J]. 农业环境与发展, 2010, 27(6): 93–95.
- XU X Y. Analysis and prospects of water pollution in Taihu Lake region [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2010, 27(6): 93–95.
- [15] 张沐, 任增谊, 张曼, 等. 外秦淮河底泥污染及疏浚效果[J]. 环境科学, 2023, 44(7): 3945–3956.
- ZHANG M, RENG Z Y, ZHANG M, et al. Sediment pollution and dredging effect of Waiqinhuai River [J]. Environmental Science, 2023, 44(7): 3945–3956.
- [16] 张擎翰, 孙景昆. 城市化发展中水污染控制与水环境综合整治技术研究[J]. 低碳世界, 2021, 11(2): 24–25.
- ZHANG Q H, SUN J K. Research on water pollution control and comprehensive improvement technology of water environment in urbanization development [J]. Low Carbon World, 2021, 11(2): 24–25.
- [17] 环境保护部办公厅. 国务院印发《水污染防治行动计划》[N/OL]. https://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/qt/201504/t20150416_299173.htm 2015. 04. 16
- General Office, Ministry of Environmental Protection. The State Council of the People's Republic of China published 'Action Plan for Water Pollution Prevention and Control' [N/OL]. [2015. 04. 16] [2022. 09. 16]
- [18] 徐昕, 刘松, 蒋力, 等. 淮安市小微黑臭水体污染现状及水质净化关键技术研究[J]. 江苏水利, 2022(4): 57–61.
- XU X, LIU S, JIANG L. Study on the pollution status of small-micro black and smelly waters and the key technology of water purification in Huai'an city [J]. Jiangsu Water Resources, 2022(4): 57–61.
- [19] 袁欢庆, 张建恒, 曹晓丽, 等. 黑臭水体治理方法的研究进展及对策[J]. 环境工程, 2023, 41(增刊2): 1–5.
- YUAN H Q, ZHANG J H, CAO X L, et al. Research progress and countermeasures of black-odorous waterbodies governance methods [J]. Environmental Engineering, 2023, 41(S2): 1–5.
- [20] 魏清福, 邵晓静, 蔡杰, 等. 无锡锡山区宛山湖底泥污染及生态清淤研究[J]. 环境工程, 2023, 41(1): 173–180.
- WEI Q F, SHAO X J, CAI J, et al. Sediment pollution and ecological dredging in the Wanshan Lake in Xishan district, Wuxi [J]. Environmental Engineering, 2023, 41(1): 173–180.
- [21] 张丹, 张勇, 何岩, 等. 河道底泥环保疏浚研究进展[J]. 净水技术, 2011, 30(1): 1–3, 7.
- ZHANG D, ZHANG Y, HE Y, et al. Research progresses of environmental dredging engineering project for river sediment [J]. Water Purification Technology, 2011, 30(1): 1–3, 7.
- [22] 颜昌宙, 范成新, 杨建华, 等. 湖泊底泥环保疏浚技术研究展望[J]. 环境污染与防治, 2004, 26(3): 189–192.
- YAN C Z, FAN C X, YANG J H, et al. Prospect and progress of the study on environmental dredging technology in lake sediment [J]. Environmental Pollution & Control, 2004, 26(3): 189–192.
- [23] 范成新. 太湖湖泛形成研究进展与展望[J]. 湖泊科学, 2015, 27(4): 553–566.
- FAN C X. Progress and prospect in formation of black bloom in lake Taihu: a review [J]. Journal of Lake Sciences, 2015, 27(4): 553–566.
- [24] YOU B S, ZHONG J C, FAN C X, et al. Effects of hydrodynamics processes on phosphorus fluxes from sediment in large, shallow Taihu Lake [J]. Journal of Environmental Sciences, 2007, 19(9): 1055–1060.
- [25] 范成新, 钟继承, 张路, 等. 湖泊底泥环保疏浚决策研究进展与展望[J]. 湖泊科学, 2020, 32(5): 1254–1277.
- FAN C X, ZHONG J C, ZHANG L, et al. Research progress and prospect of environmental dredging decision-making of lake sediment [J]. Journal of Lake Sciences, 2020, 32(5): 1254–1277.
- [26] 雷晓玲, 丁娟, 雷雨. 疏浚过程中的环境影响分析及其对策研究[J]. 环境工程, 2015, 33(2): 140–142.
- LEI X L, DING J, LEI Y. Environmental influence analysis in the process of dredging and its countermeasure research [J].

- Environmental Engineering, 2015, 33(2): 140-142.
- [27] 王敬富, 陈敬安, 孙清清, 等. 底泥疏浚对阿哈水库内源污染的影响[J]. 环境工程, 2018, 36(3): 69-73.
WANG J F, CHEN J A, SUN Q Q, et al. Effect of dredging on the sediment pollution in Aha reservoir [J]. Environmental Engineering, 2018, 36(3): 69-73.
- [28] BIANCHINI A, CENTO F, GUZZINI A, et al. Sediment management in coastal infrastructures: techno-economic and environmental impact assessment of alternative technologies to dredging[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 248: 109332.
- [29] 李源. 玄武湖历史上的疏浚工程[J]. 南京史志, 1998(2): 27-29.
LI Y. Dredging project in the history of Xuanwu Lake [J]. Nanjing Local History, 1998(2): 27-29.
- [30] 康学增. 疏浚助推经济与城市可持续发展[J]. 水运工程, 2017(8): 1-5.
KANG X Z. Dredging promoting sustainable development of economy and city [J]. Port & Waterway Engineering, 2017(8): 1-5.
- [31] 黄万凌. 上海市内河中小河道疏浚现状与思考[J]. 水利建设与管理, 2019(9): 68-72.
HUANG W L. Current situation and consideration of small and medium river dredging in Shanghai inland river [J]. Water Conservancy Construction and Management, 2019(9): 68-72.
- [32] 刘丽香, 韩永伟, 刘辉, 等. 疏浚技术及其对污染水体治理效果的影响[J]. 环境工程技术学报, 2020, 10(1): 63-71.
LIU L X, HAN Y W, LIU H, et al. Dredging technology and its effect on the treatment of polluted water [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2020, 10(1): 63-71.
- [33] 刘鸿亮, 金相灿, 荆一凤. 湖泊底泥环境疏浚工程技术[J]. 中国工程科学, 1999, 1(1): 81-84.
LIU H L, JIN X C, JING Y F. Environmental dredging technology of lake sediment [J]. Strategic Study of CAE, 1999, 1(1): 81-84.
- [34] ANBLEYTH-EVANS J. Aggregate dredging impacts in South East England: Improving ecological health by integrating fisher ecological knowledge with scientific research [J]. Marine Pollution Bulletin, 2018, 135: 129-138.
- [35] 巴特尔, 张宏喆. 环保疏浚及其工程特点与发展[J]. 中国水运, 2016, 16(5): 268-269.
BA T E, ZHANG H Z. Environmental dredging and its engineering characteristics and development [J]. China Water Transport, 2016, 16(5): 268-269.
- [36] 雷晓玲, 彭小兰, 黄媛媛, 等. 抓斗式疏浚设备对底泥污染物释放规律的研究[J]. 环境工程, 2015, 33(4): 97-99.
LEI X L, PENG X L, HUANG Y Y, et al. Research on the effects of grab dredging equipment on sediment pollutant release regularity [J]. Environmental Engineering, 2015, 33(4): 97-99.
- [37] 李昌宏. 结团絮凝浓缩河道底泥清淤技术研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2013.
LI C H. Research on pellet flocculation concentrate the river sediment dredging technology [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2013.
- [38] 张建华, 殷鹏, 张雷, 等. 底泥疏浚对太湖内源及底栖生物恢复的影响[J]. 环境科学, 2023, 44(2): 828-838.
ZHANG J H, YIN P, ZHANG L, et al. Effects of sediment dredging on the reduction in sediment internal loading of Lake Taihu and the self-recovery ability of benthic organism [J]. Environmental Science, 2023(2): 828-838.
- [39] 刘振江, 赵益华, 陶君, 等. 中新生态城污水库环境治理与生态重建[J]. 中国给水排水, 2016, 32(1): 78-82.
LIU Z J, ZHAO Y H, TAO J, et al. Environmental management and ecological reconstruction of wastewater reservoir in Sino-Singapore Tianjin Eco-city [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(1): 78-82.
- [40] BRIDGES T S, GUSTAVSON K E, SCHROEDER P, et al. Dredging processes and remedy effectiveness: relationship to the 4 Rs of environmental dredging [J]. Integrated Environmental Assessment and Management, 2010, 6(4): 619-630.
- [41] 倪守高, 葛春康, 顾晓慧. 河湖生态清淤及淤泥固化技术研究进展[C]//2014河湖健康与生态文明大会论文集. 长沙: 2014中国(国际)水务高峰论坛河湖健康与生态文明建设大会, 2014.
NI S G, GE C K, GU X H. Research progress of ecological dredging and sludge solidification technology in rivers and lakes [C]// Collection of Proceedings of the 2014 Conference on River and Lake Health and Ecological Civilization. Changsha: The 2014 China (International) Water Summit Forum Conference on River and Lake Health and Ecological Civilization Construction, 2014.
- [42] PALERMO M, HAYS D F. Sediment dredging, treatment and disposal [M]// Processes, Assessment and Remediation of Contaminated Sediments, New York: Springer Science & Business Media, 2014.
- [43] 刘小强, 秦俊. 大型深水水库环保疏浚方案设计及工程应用[J]. 中国港湾建设, 2018, 38(12): 31-36.
LIU X Q, QIN J. Design and engineering application of environmental dredging plan for large deep water reservoir [J]. China Harbour Engineering, 2018, 38(12): 31-36.
- [44] MURPHY T P, LAWSON A, KUMAGAI M. Review of emerging issues in sediment treatment [J]. Aquatic Ecosystem Health and Management, 1999(2): 419-434.
- [45] 莫孝翠, 杨开, 袁德玉. 湖泊内源污染治理中的环保疏浚浅析[J]. 人民长江, 2003, 34(12): 47-49.
MO X C, YANG K, YUAN D Y. Preliminary analysis on environment protection dredging for internal pollution harnessing of lake [J]. Yangtze River, 2003, 34(12): 47-49.
- [46] 仇开涛. 湖泊污染内源治理中的环保疏浚技术研究[J]. 中国资源综合利用, 2020, 38(1): 184-186.
QIU K T. Study on the environmental-friendly dredging technology in the endogenous treatment of lake pollution [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2020, 38(1): 184-186.
- [47] 江苏省质量技术监督局. 河湖生态疏浚工程技术规范(DB32/T 3258-2017)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
Jiangsu Bureau of Quality and Technical Supervision. Technical specification for construction of river and lake ecological dredging engineering (DB32/T 3258-2017) [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [48] 曹承进, 陈振楼, 王军, 等. 城市黑臭河道底泥生态疏浚技术进展[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2011(1): 32-42.

- CAO C J, CHEN Z L, WANG J, et al. Review of sediment ecological dredging in urban black-odors river treatment [J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2011 (1): 32-42.
- [49] 何伟, 商景阁, 周麒麟, 等. 淀山湖底泥生态疏浚适宜深度判定分析[J]. 湖泊科学, 2013, 25(4): 471-477.
- HE W, SHANG J G, ZHOU Q L, et al. Determination of appropriate-ecological sediment dredging depth in Lake Dianshan, China[J]. Journal of Lake Sciences, 2013, 25(4): 471-477.
- [50] 刘瑞伟, 刘畅. 东平湖航道湖底疏浚对水生态的影响分析与对策[C]. 2015第七届全国河湖治理与水生生态文明发展论坛论文集. 广州: 第七届全国河湖治理与水生生态文明发展论坛. 2015: 217-220.
- LIU R W, LIU C. Analysis and countermeasures of dredging impact on the aquatic ecosystem in the bottom of Dongping Lake Navigation Channel [C]// Proceedings of the 7th National Forum on River and Lake Management and the Development of Water Ecological Civilization in 2015. Guangzhou: The 7th National Forum on River and Lake Management and the Development of Water Ecological Civilization. 2015: 217-220.
- [51] 霍守亮, 席北斗, 荆一凤, 等. 环保疏浚底泥干化技术研究[J]. 环境工程, 2007, 25(5): 72-75.
- HUO S L, XI B D, JING Y F, et al. Research on environmental dredging sediment drying technology [J]. Environmental Engineering, 2007, 25(5): 72-75.
- [52] 陈洁, 陈林. 水库环保疏浚一体化施工技术[J]. 中国给水排水, 2019, 35(22): 118-122.
- CHEN J, CHEN L. Integrated construction technology of reservoir environmental protection dredging [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(22): 118-122.
- [53] 李钢, 韩明爽, 徐海红. 水体疏浚底泥利用现状与能源化利用[J]. 环境工程, 2021, 39(6): 55-58, 71.
- LI G, HAN M S, XU H H. Utilization of sediments dredged from water bodies and its energy reutilization [J]. Environmental Engineering, 2021, 39(6): 55-58, 71.
- [54] MANAP N, VOULVOULIS N. Environmental management for dredging sediments: the requirement of developing nations [J]. Journal of Environmental Management, 2014: 1-11.
- [55] RAAYMAKERS S. Dredging in sensitive environments down under[J]. Mar. Pollut. Bull, 1994, 28: 275-276.
- [56] SIPELGAS L. Monitoring the concentration, distribution, origin and size of suspended particles in the water column during harbour dredging in Pakri Bay, the Gulf of Finland [J]. Boreal Environment Research, 2011, 16 (A): 42-48.
- [57] 环境保护部污染防治司、规划财务司. 湖泊河流环保疏浚工程技术指南(试行)[S]. 2014.
- Ministry of Environmental Protection, Pollution Prevention Department, Planning and Finance Department. The technical guide for environmental protection dredging engineering of lakes and rivers (Trial). 2014.
- [58] 安徽省市场监督管理局. 内河航道疏浚工程施工技术规程 (DB 34/T 3678-2020)[S]. 2020.
- Anhui bureau of market supervision management. Technical code of practice for construction inland waterway dredging engineering (DB 34/T 3678-2020) [S]. 2020.
- [59] 山东省市场监督管理局. 底泥污染状况调查点位布设技术规范 (DB37/T 4327-2021)[S]. 2021.
- Shandon bureau of market supervision management. Technical regulation for sampling site selection in sediment pollution investigation (DB37/T 4327-2021)[S]. 2021.
- [60] 刘华丽, 曹秀云, 宋春雷, 等. 沉积物疏浚技术在富营养化湖泊修复中的应用[J]. 环境污染与防治, 2012, 34(2): 87-91, 101.
- LIU H L, CAO X Y, SONG C L, et al. Application of sediment dredging technology for restoration of eutrophic lakes [J]. Environmental Pollution and Control, 2012, 34(2): 87-91, 101.
- [61] 朱伟, 冯甘雨, 刘毅璠, 等. 深水型水库环保疏浚对水质的影响及敏感参数研究: 以通济桥水库为例[J]. 湖泊科学, 2019, 31(4): 930-940.
- ZHU W, FENG G Y, LIU Y F, et al. Influence of environmental dredging on the water quality and studies on sensitive parameters of a typical deep reservoir (Tongjiqiao Reservoir) [J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(4): 930-940.
- [62] 杨永森. 湿地公园底泥污染及生态疏浚研究[J]. 环境保护与循环经济, 2015(3): 44-47.
- YANG Y S. A study on sediment pollution and ecological dredging in Wetland Park [J]. Environmental Protection and Circular Economy, 2015(3): 44-47.
- [63] HAYES D F, CROCKETT T R, WARD T J, et al. Sediment resuspension during cutterhead dredging operations [J]. Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, 2000, 126 (3): 153-161.
- [64] ZHANG Q M, HUANG J C, ZHANG J, et al. Characterizing nitrogen dynamics and their response to sediment dredging in a lowland rural river [J]. Journal of Hydrology, 2024, 628: 130479.
- [65] 金相灿, 荆一凤, 刘文生, 等. 湖泊污染底泥疏浚工程技术: 滇池草海底泥疏挖及处置[J]. 环境科学研究, 1999, 12(5): 9-12.
- JIN X C, JING Y F, LIU W S, et al. Engineering techniques for polluted sediment dredging of lakes: Caohai of Lake Dianchi [J]. Research of Environmental Sciences, 1999, 12(5): 9-12.
- [66] 桂雪琴. 挖泥船市场: 由热转温 需求渐变[N]. 中国船舶报, 2011-11-25.
- GUI X Q. The dredger market: from hot to warm, demand gradually changing[N]. China Ship News, 2011-11-25.
- [67] 谢锋, 沈超, 任晶惠. 施工新船扎堆 是机遇还是风险[J]. 中国交通报, 2010-01-12.
- XIE F, CHEN C, RENG J H. The surge of new construction vessels: opportunity or risk? [J]. China Transport News, 2010-01-12.
- [68] CHEN J, LI J F, LIU A Z, et al. Black and odorous water body dredging system and method [P]. China: CN111335383. 2020-06-26.
- [69] SHI Z J, ZHU S Y, CHEN D Z, et al. Spiral suction type dredging robot with self-rescue function and crawler chassis [P]. China: CN109667305. 2019-04-23.
- [70] CHEN Y J, CHEN C Z, DONG L J, et al. Dredging system based on mobile platform and environment-friendly dredging method [P]. China: CN 110644553. 2020-01-03.
- [71] 桂雪琴. 挖泥船需求转向 船企能否合拍?[N]. 中国船舶报,

- 2011.05.18.
- GUI X Q. The shift in dredger demand: can shipbuilding companies keep pace?[N]. China Ship News, 2011-05-18.
- [72] 任实, 胡兴娥, 邢龙, 等. 三峡水库坝前深水清淤疏浚技术研究[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(1): 24-28.
- RENG S, HU X E, XING L, et al. Aerodynamic dredging technology for deep water in front of Three Gorges reservoir[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2023, 40(1): 24-28.
- [73] PETERSON S A. Lake restoration by sediment removal [J]. Water Resources Bulletin, 1982, 18(3): 423-435.
- [74] KWON Y T, LEE C W. Application of multiple ecological risk indices for the evaluation of heavy metal contamination in a coastal dredging area[J]. The Science of the Total Environment, 1998, 214: 203-210.
- [75] WASSERMAN J C, BARROS S R, LIMA G B A. Planning dredging services in contaminated sediments for balanced environmental and investment costs[J]. Journal of Environmental Management, 2013, 121: 48-56.
- [76] Great Lakes National Program Office. A summary of contaminated sediment remediation activities in the Great Lakes Basin [R]. 1998.
- [77] UAEPA. Kinnickinnic River Legacy Act dredging project begins [R/OL]. 2009. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P1004YZM.PDF?Dockey=P1004YZM.PDF>
- [78] NYSDEC, Great Lakes Program. Eighteen mile creek area of concern restrictions on dredging activities Beneficial Use Impairment (BUI) removal report [R/OL]. USEPA, 2020. https://www.epa.gov/sites/default/files/2021-06/documents/dredging_bui_18mile_aoc_bui_removal_package.pdf
- [79] US EPA. Phase 2 Overview Factsheet[R/OL]. https://www.epa.gov/sites/default/files/2018-09/documents/phase2_overview-2015.pdf
- [80] ROMANOWSKI L. Dredging to begin next month at Grasse River Superfund Site in Massena, New York [N/OL]. 2019. <https://www.epa.gov/newsreleases/dredging-begin-next-month-grasse-river-superfund-site-massena-new-york>
- [81] OLSEN K. Organic Geochemical Investigations of urban sediments by pyrolysis-gas chromatography/mass spectroscopy a dissertation[D]. USA, NJ: Montclair State University, 2014
- [82] 胡小贞, 金相灿, 卢少勇, 等. 湖泊底泥污染控制技术及其适用性探讨[J]. 中国工程科学, 2009, 11(9): 28-33.
- HU X Z, JIN X C, LU S Y, et al. Techniques for sediment pollution control and discussion on the applicability in lakes of China[J]. Strategic Study of CAE, 2009, 11(9): 28-33.
- [83] 向莹, 张鸿涛, 高宏洲, 等. 九江市琵琶湖底泥环境特征与生态清淤工程[J]. 中国给水排水, 2021, 37(14): 142-150.
- XIANG Y, ZHANG H T, GAO H Z, et al. Sediment environmental characteristics and ecological dredging project of Pipa Lake in Jiujiang[J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(14): 142-150.
- [84] Michigan Department of Natural Resources and Environment Water Division. Remediation of the ruddiman creek main branch and pond muskegon county, michigan, great lakes legacy program [R/OL]. U. S. Environmental Protection Agency. 2011. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=P100C3CZ.txt>
- [85] The US. EPA. Hudson river PCBs Superfund site fact sheet•second five-year review•certification of completion of the remedial action [R/OL]. 2019. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=P100WJ5T.txt>
- [86] ISOM K. Great lakes AOC Contaminated sediment management plan: january 2018 [R/OL]. U. S. Environmental Protection Agency. 2018. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=P1018M3A.txt>
- [87] KENYON R A, BURRIDGE C Y, POINER I R, et al. Impact of ship-way channel dredging on a seagrass community in the Gulf of Carpentaria, Australia [J]. Ocean and Coastal Management, 2024, 249: 107010
- [88] LEWIS M A, WEBER D E, STANLEY R S, et al. Dredging impact on an urbanized Florida bayou: effects on benthos and algal-periphyton [J]. Environmental Pollution, 2001, 115: 161-171
- [89] 陆子川, 张武. 挖掘湖泊底泥避免水体富营养化的探讨[J]. 甘肃环境研究与监测, 2001, 14(1): 60-61.
- LU Z C, ZHANG W. To dredge lake mud, avoid eutrophication of water body[J]. Environmental Study and Monitoring, 2001, 14(1): 60-61.
- [90] NAYAR S, MILLER D J, HUNT A, et al. Environmental effects of dredging on sediment nutrients, carbon and granulometry in a tropical estuary[J]. Environ Monit Assess, 2007, 127: 1-13.
- [91] LOHRER A M, WETZ J J. Dredging-induced nutrient release from sediments to the water column in a southeastern saltmarsh tidal creek [J], Marine Pollution Bulletin, 2003, 46: 1156-1163.
- [92] PONTI M, PASTERIS A, GUERRA R, et al. Impacts of maintenance channel dredging in a northern Adriatic coastal lagoon. II: Effects on macrobenthic assemblages in channels and ponds [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2009, 85: 143-150.
- [93] MOREIRA L B, CASTRO Í B, FILLMANN G, et al. Dredging impacts on the toxicity and development of sediment quality values in a semi-arid region (Ceará State, NE Brazil) [J]. Environmental Research, 2021, 193: 110525
- [94] MOREIRA L B, SASAKI S T, TANIGUCHI S, et al. Impacts of dredging on biomarkers responses of caged bivalves in a semiarid region (Ceará State, NE Brazil) [J]. Marine Environmental Research, 2019, 151: 104784
- [95] CHEN M S, CUI J Z, LIN J, et al. Successful control of internal phosphorus loading after sediment dredging for 6 years: a field assessment using high-resolution sampling techniques [J]. Science of the Total Environment, 2018, 616/617: 927-936.
- [96] KO E J, KIM D K, JUNG E S, et al. Comparison of zooplankton community patterns in relation to sediment disturbances by dredging in the Guemho River, Korea [J]. Water, 2020, 12: 3434.
- [97] SOETAN O, NIE J, FENG H. Preliminary environmental assessment of metal-contaminated sediment dredging in an Urban River, New Jersey, USA [J]. Marine Pollution Bulletin, 2022, 184: 114212.
- [98] LAYGLON N, MISSON B, DURIEU G, et al. Long-term monitoring emphasizes impacts of the dredging on dissolved Cu and Pb contamination along with ultraplankton distribution and

- structure in Toulon Bay (NW Mediterranean Sea, France) [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, 156: 111196.
- [99] OLDENBORG K A, STEINMAN A D. Impact of sediment dredging on sediment phosphorus flux in a restored riparian wetland [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 650: 1969–1979
- [100] LI Y, WANG L G, YAN Z W, et al. Effectiveness of dredging on internal phosphorus loading in a typical aquacultural lake [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 744: 140883
- [101] WAN W, ZHANG Y, CHENG G, et al. Dredging mitigates cyanobacterial bloom in eutrophic Lake Nanhu: shifts in associations between the bacterioplankton community and sediment biogeochemistry [J]. *Environmental Research*, 2020.
- [102] NIJMAN T P A, LEMMENS M, LURLING M, et al. Phosphorus control and dredging decrease methane emissions from shallow lakes [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 847: 157584.
- [103] ESSINK K. Ecological effects of dumping of dredged sediments; options for management [J]. *Journal of Coastal Conservation*, 1999, 5: 69–80.
- [104] HARVEY B C, LISLE T E. Effects of suction dredging on streams: a review and an evaluation strategy [J]. *Fisheries*, 1998, 23(8): 8–17.
- [105] ERFTEMEIJER P L A, LEWIS III R R R. Environmental impacts of dredging on seagrasses: a review [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2006, 52: 1553–1572.
- [106] 何敬云. 航道整治工程对水域生态环境的影响分析 [J]. *西部交通科技*, 2019 (11): 178–180.
- HE J Y. Analysis of the impact of channel improvement projects on aquatic ecological environment [J]. *Western China Communication Science & Technology*, 2019 (11): 178–180.
- [107] MANAP N, VOULVOULIS N. Data analysis for environmental impact of dredging [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 137: 394–404.
- [108] 刘爱菊, 孔繁翔, 史小丽, 等. 底泥疏浚对湖泊沉积物的生态毒性效应的影响 [J]. *中国环境科学*, 2006, 26(5): 565–569.
- LIU A J, KONG F X, SHI X L, et al. Influence of sediment dredging on the ecotoxic effect of lake sediments [J]. *China Environmental Science*, 2006, 26(5): 565–569.
- [109] JO H J, LEE B H, KIM J S, et al. Prediction of water quality variation caused by dredging urban river-bed [J]. *Journal of Korea Water Resources Association*, 2002, 35(2): 137–148.
- [110] WIESE S B O R, MACLEOD C L, LESTER J N. A recent history of metal accumulation in the sediments of the Thames Estuary, United Kingdom [J]. *Estuaries*, 1997, 20(3): 483.
- [111] CARPENTIER S, MOILLERON R, BELTRAN C, et al. Quality of dredged material in the River Seine basin (France): I. physicochemical properties [J]. *Science of the Total Environment*, 2002, 295(1/2/3): 101–113.
- [112] TEICHGRÄBER B. Decentralisation of the Emscher sewerage system: planning of the bottrop biological sewage treatment plant [J]. *Water Science and Technology*, 1992, 25(4/5): 51–58.
- [113] PUJIN V. Changes in the composition of the Danube River basin biocenosis resulting from anthropogenic influences [J]. *Water Science and Technology*, 1990, 22(5): 13–30.
- [114] VAN DER DOES J, VERSTRAELEN P, BOERS P, et al. Lake restoration with and without dredging of phosphorus-enriched upper sediment layers [J]. *Hydrobiologia*, 1992, 233: 197–210.
- [115] 李如然, 张万楼, 韩猛, 等. 天津市海河清淤施工技术及其质量控制 [J]. *海河水利*, 2006(3): 23–24.
- LI R R, ZHANG W L, HAN M, et al. The technology and quality control in sediment clear up project of Tianjin Haihe River [J]. *Haihe Water Resources*, 2006(3): 23–24.
- [116] 黄民生, 徐亚同, 戚仁海. 苏州河污染支流: 绥宁河生物修复试验研究 [J]. *上海环境科学*, 2003, 22(6): 384–388.
- HUANG M S, XU Y T, QI R H. In situ bioremediation of seriously polluted Sui-ning Creek [J]. *Shanghai Environmental Sciences*, 2003, 22(6): 384–388.
- [117] 张凯奇, 刘光清. 泰东河疏浚工程对通榆河水质的影响 [J]. *环境监测与预警*, 2015, 7(3): 49–51.
- ZHANG K Q, LIU G Q. Influence of the dredging operation of the Taidong River on the water quality of the Tongyu River [J]. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2015, 7(3): 49–51.
- [118] 柳惠青. 湖泊污染内源治理中的环保疏浚 [J]. *水运工程*, 2000(11): 21–27.
- LIU H Q. Environmental-protection dredging in treatment of lake pollution internal cause [J]. *Port & Waterway Engineering*, 2000(11): 21–27.
- [119] 朱敏, 王国祥, 王建, 等. 南京玄武湖清淤前后底泥主要污染指标的变化 [J]. *南京师范大学学报(工程技术版)*, 2004, 4(2): 66–69.
- ZHU M, WANG G X, WANG J, et al. Comparative analysis of changes of pollutants in sediment in Nanjing Xuanwu Lake before and after sediment dredging [J]. *Journal of Nanjing Normal University (Engineering and Technology Edition)*, 2004, 4(2): 66–69.
- [120] 俞海桥, 方涛, 夏世斌. 疏浚及水生植被重建对太湖西五里湖表层沉积物中磷、氮含量及形态分布的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(3): 868–872.
- YU H Q, FANG T, XIA S B. Influence of dredging and aquatic macrophytes reestablishment on the forms of phosphorus, nitrogen in the sediments of the West Wuli Hu, Taihu Lake [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(3): 868–872.
- [121] HAYES D F, CROCKETT T R, WARD T J, et al. Sediment resuspension during cutter head dredging operations [J]. *Ocean Engineering*, 2000, 126: 153–161.
- [122] YU J H, CHEN Q W, ZHANG J Y, et al. In situ simulation of thin-layer dredging effects on sediment metal release across the sediment-water interface [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 658: 501–509.
- [123] GRACA B. The Puck Bay as an example of deep dredging unfavorably affecting the aquatic environment [J]. *International Journal of Oceanography and Hydrobiology*, 2009, 38(2): 109–127.
- [124] CHEN C, KONG M, WANG Y Y, et al. Dredging method effects on sediment resuspension and nutrient release across the sediment-water interface in Lake Taihu, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27: 25861–25869.

- [125] OGIWARA K, MORGI K. The purification of Lake Suwa (dredging) [C]//Proceedings of 6th International Conference on the Conservation & Management of Lakes Kasumigaura. Tsukuba: ILEC, 1995: 438-441.
- [126] Woods Hole Group, Inc. Final water quality monitoring summary report 2012 remedial dredging New Bedford Harbor Superfund Site, OU #1 [R]. United States Army Corps of Engineers, 2013.
- [127] 袁强, 张曼, 周建军. 悬移质挟沙能力水槽实验方法探讨[J]. 水力发电学报, 2021, 40(2): 20-30.
YUAN Q, ZHANG M, ZHOU J J. New approach to flume experiment for transport capacity of fine suspended sediment[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021, 40(2): 20-30.
- [128] 刘尚武, 王治力, 李丹勋. 长江上游水流挟沙力与含沙量比值的变化规律[J]. 水力发电学报, 2022, 41(11): 46-55.
LIU S W, WANG Z L, LI D X. Comparison of sediment carrying capacity to sediment concentration in upper reaches of Yangtze River[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(11): 46-55.
- [129] 贺莉, 陈东, 段光磊, 等. 三峡大坝修建后荆江河段的悬沙浓度分布特性[J]. 水力发电学报, 2020, 39(5): 72-80.
HE L, CHEN D, DUAN G L, et al. Characteristics of vertical profiles of suspended sediment in Jingjiang reach under influence of Three Gorges dam [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(11): 46-55.