



文章栏目：河湖库环保清淤工程关键技术和典型案例专题

DOI 10.12030/j.cjee.202310151

中图分类号 X524; X171.4

文献标识码 A

王凯, 万彬, 陈黎明, 等. 湖泊底栖动物群落对清淤工程的响应及其重建过程研究: 以太湖竺山湾和梅梁湾为例[J]. 环境工程学报, 2023, 17(12): 3915-3925. [WANG Kai, WAN Bin, CHEN Liming, et al. The response of macrozoobenthic communities to dredging projects and its reconstruction process: A case study of Zhushan Bay and Meiliang Bay of Taihu Lake[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(12): 3915-3925.]

湖泊底栖动物群落对清淤工程的响应及其重建过程研究: 以太湖竺山湾和梅梁湾为例

王凯¹, 万彬², 陈黎明¹, 陆海明^{1,✉}, 陈海波³, 李红静¹, 谢得宝¹

1. 南京水利科学研究所, 水利部水文水资源工程技术研究中心, 南京 210029; 2. 苏州市吴江区水务局, 苏州 215200; 3. 南京水科院瑞迪科技集团有限公司, 南京 210029

摘要 底栖动物群落组成和结构对清淤工程实施的响应关系是清淤工程论证和实施效果评价关注的焦点问题。以 2013—2014 年在竺山湾和梅梁湾等西太湖重污染区实施的环保清淤工程为例, 通过清淤前后 6 a 现场采样和室内鉴别, 研究了底栖动物群落组成和结构在工程实施前后变化过程及其响应关系。结果表明, 环保清淤工程实施前后 (2013—2018 年) 共采集到底栖动物共计 3 门 7 纲 41 属 (种), 竺山湾和梅梁湾总分类单元数由清淤前的 20 和 12 分别降为 13 和 8, 梅梁湾清淤前 Shannon-Wiener 指数、Pielou 指数和 Simpson 指数分别为 1.83、0.82 和 0.79, 清淤后短期内分别降低至 1.31、0.59 和 0.61, 清淤 6 个月后其底栖动物丰度开始恢复, 并逐步达到稳定; 竺山湾实施清淤后 Margalef 指数和 Pielou 指数均值分别由 0.006 和 0.55 增加至 0.009 和 0.57。环保清淤短期内对底栖动物群落结构的直接影响为丰度和多度的降低, 竺山湾和梅梁湾优势属以水丝蚓属和河蚬为主, 竺山湾清淤后短期内底栖动物密度均值由 1 707 ind·m⁻² 降至 1 107 ind·m⁻², 梅梁湾多毛类和软体动物密度分别由 104 ind·m⁻² 和 181 ind·m⁻² 降至 16 ind·m⁻² 和 96 ind·m⁻²。环保清淤 4 a 后竺山湾和梅梁湾耐污能力评价整体仍处于中污染状态, 底栖动物分类单元数下降至 13 和 8, 竺山湾底栖动物密度清淤后均值下降至 954 ind·m⁻², 梅梁湾底栖动物丰度值下降但总密度清淤后均值增加至 1 402 ind·m⁻², 竺山湾和梅梁湾底栖动物群落结构恢复仍需较长过程。该研究结果可为湖库清淤工程中的底栖动物保护提供参考。

关键词 环保清淤; 底栖动物; 丰度; 多度; 耐污能力

通过环保清淤工程去除受污染表层底泥是国内外开展湖泊水生态修复的常用措施^[1-4]。清淤工程在移除底泥的同时不可避免地会改变清淤区域水体底部生境条件, 形成对原有水生生态系统的干扰。大型底栖无脊椎动物 (以下简称“底栖动物”) 是湖泊生态系统的重要组成部分, 其对外界胁迫的响应比较敏感, 在河湖水体中的丰富度、群落组成结构、耐污类群比例等都从不同角度反应河湖生态健康。底栖动物常用于评价湖泊水生态系统健康及水生态修复效果^[5-7]。由于清淤工程改变了底栖生境, 因此, 底栖动物群落对于清淤工程的响应关系及工程实施后如何恢复重建, 已成为环保清淤工程决策依据或工程成功与否的重要评价内容^[1,4,8-9]。

环保清淤工程已在太湖、巢湖、滇池、洱海、漏湖、固城湖等众多湖泊的富营养化控制及生态修复中发挥积极作用, 亦开展了大量清淤工程实施效果评价研究^[2,10-11]。不同学者从物种丰富度、密度、生物量、多样性指数等多个方面, 评价了环保清淤对底栖动物群落的影响, 但在环保清淤工程实施对底栖动物是正面还是负面影响等方面仍存在不同程度争议^[5,12-14]。环保清淤对底栖动物有短期和长期的影响, 同时不同湖泊环保清淤实施效果各不相同^[15]。在清淤工程实施后, 虽然短期内水体水质改善效果较为显著, 但对底栖动物群落的

收稿日期: 2023-10-30; 录用日期: 2023-11-06

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFC3200304); 江苏省水利科技项目 (2021013)

第一作者: 王凯 (1993—), 男, 硕士, 工程师, kaiwang@nhri.com; ✉通信作者: 陆海明 (1978—), 男, 博士, 正高级工程师, cnlhm@126.com

影响却往往比较复杂。漏湖清淤 1 a 后寡毛类、摇蚊类和软体动物的平均密度和生物量大幅降低^[8]；竺山湖清淤 6 个月后生物多样性降低，但生物量增加^[16]；洱海清淤 1 a 后清淤区域的底栖动物种类明显增加，且种类多于未清淤区域^[5]。底栖动物的种类、群落组成等需要一定的恢复时间，其恢复速度受底泥环境状况、环保清淤方式、清淤深度及季节等因素影响^[9]。JING 等^[13]通过宁波东钱湖环保清淤后持续 5 a 的观测，分析表明环保清淤带来了湖体总氮、总磷、高锰酸盐指数下降及底栖动物生物量增加等短期积极效应，但这些积极影响随着时间推移逐渐消失，水化学指标和底栖生物量逐渐恢复到疏浚前的状态。环保清淤工程对水生生态系统的影响以及底栖动物群落恢复过程可能持续多年^[10,13,16]。张建华等^[10]发现长期来看竺山湾和梅梁湾清淤区底栖生物群落依靠自恢复能力可达到清淤前水平，清淤不会对底栖生物群落结构造成影响。

从 2008 年开始，太湖实施大规模环保清淤，工程区域主要集中在太湖北部重污染湖湾区和西部沿岸区域。本研究以 2013—2014 年实施的太湖北部湖湾区竺山湾和梅梁湾环保清淤工程为例，通过 2013—2018 年期间 10 次底栖动物采样鉴别，分析环保清淤实施前后底栖动物丰度、多度及耐污能力变化，评估底栖动物群落对于环保清淤工程的响应关系及其重建过程，以为河湖环保清淤工程论证和底栖动物群落恢复重建提供借鉴。

1 材料与方法

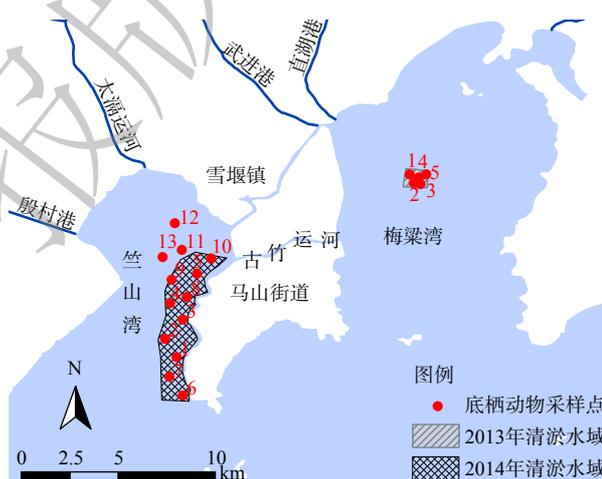
1.1 研究区域概况

在 2007 年无锡饮用水危机事件后，加快推进实施竺山湾和梅梁湾等西太湖重污染区环保清淤工程。2008 年 10 月 21 日，江苏省人民政府办公厅转发省水利厅《关于加快实施太湖生态清淤工程的意见》，明确江苏省太湖环保清淤面积 97.51 km²，工程量为 3 451×10⁴ m³，总投资约 30×10⁸ 元，计划从 2008 年开始，用约 5 a 完成，基本完成太湖湖体清淤任务，每年清淤任务约 600~700×10⁴ m³。竺山湖及西沿岸区宜兴市及武进区环保清淤工程分别于 2009—2010 年实施，环保清淤深度为 20~60 cm，清淤面积 24.48 km²，清淤土方 678×10⁴ m³。梅梁湖清淤工程具体实施地点在三山岛南、环山河口、月亮湾等湖区，清淤面积 48.41 km²，清淤土方 1 365.3×10⁴ m³。根据太湖清淤工程进度总体安排（相关区域和采样点见图 1），2013 年 5—6 月在梅梁湾湖区中心实施面积为 1.5 km² 的环保清淤工程，2014 年 4—6 月竺山湾无锡马山一侧区域实施环保清淤工程，面积约为 9.22 km²。清淤前底泥平均深度超过 1 m，采用环保绞吸船施工方法，底泥清淤深度 30~40 cm。

1.2 采样与分析

在竺山湾和梅梁湾分别设置 13 个和 5 个采样点，采集底栖动物样品，鉴别底栖动物种类及其数量。2013—2018 年在相同日期对太湖竺山湾和梅梁湾共采集 10 次底栖动物样品，其中竺山湾环保清淤前采样 4 次，分别为 2013 年 4 月 25 日、9 月 2 日、11 月 14 日和 2014 年 3 月 14 日，清淤后采样时间分别为 2014 年 6 月 15 日、11 月 20 日，2015 年 7 月 8 日，2016 年 1 月 6 日、8 月 15 日，2018 年 5 月 25 日；梅梁湾环保清淤前 2013 年 4 月 25 日采样 1 次。

底栖动物采集利用彼得逊采泥器，泥样经 60 目尼龙筛洗净后，置于白瓷盘中目视观察、用镊子将底栖动物标本挑出，标本用 10% 福尔马林溶液保存。在实验室中将标本鉴定到尽可能低的分类单元^[17-19]，然后计算和称重，结果最终折算成单位面积的密度。



注：河湖及行政区划底图来源于中国科学院资源环境科学与数据中心，底栖动物采样点为本研究现场采样 GPS 标记点位。

图 1 太湖竺山湾和梅梁湾环保清淤工程分布区域、清淤时间及采样点分布

Fig. 1 Distribution area, dredging time and sampling point distribution of ecological dredging projects in Zhushan Bay and Meiliang Bay

1.3 评价方法

生物多样性指数用于定量表述环境的生物多样性程度，本研究运用香农-威纳尔 (Shannon-Wiener) 多样性指数和 Margalef 物种丰富度指数、Pielou 均匀度指数和辛普森 (Simpson) 多样性指数等 4 个指数计算各个采样点底栖动物多样性^[20-21]，Shannon-Wiener 指数、Margalef 指数、Pielou 指数和 Simpson 指数计算分别见公式 (1)~(4)。

$$\text{Shannon - Wiener} = - \sum (P_i)(\ln P_i) \tag{1}$$

$$\text{Margalef} = (S - 1) / \ln N \tag{2}$$

$$\text{Pielou} = \left(- \sum P_i \ln P_i \right) / \ln S \tag{3}$$

$$\text{Simpson} = 1 - \sum P_i^2 \tag{4}$$

式中： S 为群落中总物种数， N 为总个体数， P_i 为物种 i 的个体数占总个体数的比例， $i = 1, 2, \dots, S$ 。以相对密度 $\geq 10\%$ 的物种定义为底栖动物优势种。

采用 BI 和 BPI 指数表征底栖动物群落耐污能力和水质生物学评价^[14]，BI 和 BPI 指数分别见公式 (5) 和 (6)。

$$\text{BI} = \sum N_i t_i / N \tag{5}$$

式中： N_i 是物种 i 的个体数， t_i 是物种 i 的耐污值， N 是总个体数。

$$\text{BPI} = \lg(N_1 + 2) / (\lg(N_2 + 2) + \lg(N_3 + 2)) \tag{6}$$

式中： N_1 为寡毛类、蛭类和摇蚊幼虫个体数， N_2 为多毛类、甲壳类、除摇蚊幼虫以外其他水生昆虫个体数， N_3 为软体动物个体数。

采用 BMWP 指数作为生物耐污/敏感性指标 (详见表 1)，生态状况较好时 BMWP 指数较高，无量纲^[14,20]，其计算公式见 (7)。

$$\text{BMWP} = \sum t_i \tag{7}$$

式中： t_i 是第 i 科的 BMWP 指数。

表 1 底栖动物单因子评价指数及其划分标准

Table 1 Benthos single factor evaluation index and classification criteria

BI评价标准	划分范围	BPI评价标准	划分范围	BMWP评价标准	划分范围
健康	0-5.40	清洁	<0.1	极清洁	>43
良好	5.40-6.43	轻污染	0.1-0.5	清洁	32~43
一般	6.44-7.47	β -中污染	0.5-1.5	轻污染	22~32
较差	7.48-8.51	α -中污染	1.5-5.0	中污染	11~22
极差	>8.51	重污染	>5.0	重污染	<11

2 结果与讨论

2.1 环保清淤对底栖动物丰度的影响

物种丰度用来描述一个生态系统中不同物种的数量和丰富程度，其高低可以反映出生态系统的健康状况和多样性。本研究选取分类单元数和物种丰度指数来表征研究区域底栖动物丰度。

1) 底栖动物分类单元数。2013—2018 年期间研究区域共采集到底栖动物共计 3 门 (软体动物门、环节动

物门和节肢动物门) 7 纲(腹足纲、双壳纲、寡毛纲、多毛纲、蛭纲、昆虫纲、甲壳纲) 41 属(种), 其中竺山湾采集到 3 门 7 纲 39 属(种), 梅梁湾采集到 3 门 7 纲 24 属(种), 梅梁湾生态清淤前后底栖动物种类组成见表 2。不同属(种) 组成上, 竺山湾主要为昆虫纲、腹足纲和双壳纲, 分别占比为 26%、18% 和 18%; 梅梁湾主要为昆虫纲和多毛纲, 分别占比 25% 和 21%。研究区软体动物主要为双壳纲的河蚬和腹足纲的螺类, 环节动物主要为寡毛纲的颤蚓和多毛纲的沙蚕等, 节肢动物主要为昆虫纲的摇蚊和甲壳纲的虾类。在环保清淤前, 竺山湾(2014 年) 和梅梁湾(2013 年) 底栖动物总分类单元数分别为 20 和 12, 清淤后总体呈现下降趋势, 清淤后第 2 年竺山湾(2015 年) 底栖动物总分类单元数为 18, 梅梁湾(2014 年) 采样 3 次的底栖动物总分类单元数分别为 11、9 和 9, 2018 年竺山湾和梅梁湾底栖动物总分类单元数分别降为 13 和 8。梅梁湾清淤后 6 个月, 昆虫纲由 1 种增加至 3 种, 主要为摇蚊科的隐摇蚊属、小摇蚊属和长足摇蚊属, 均为耐污

表 2 梅梁湾环保清淤前后底栖动物种类组成

Table 2 Species composition before and after dredging in Meiliang Bay

门	纲	属(种)	拉丁名	2013-04-25	2013-09-02	2013-11-14	2014-03-14	2014-06-15	2014-11-20	2015-07-08	2016-01-06	2016-08-15	2018-05-25	
软体动物门	腹足纲	长角涵螺	<i>Alocinma longicornis</i>							+				
		腹足纲光滑狭口螺	<i>Stenothyra glabra</i>				+			+	+			
		铜锈环棱螺	<i>Bellamyia aeruginosa</i>									+		
双壳纲	河蚬	<i>Corbicula fluminea</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
		苏氏尾鳃蚓	<i>Branchiura sowerbyi</i>	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+
环节动物门	寡毛纲	水丝蚓属	<i>Limnodrilus</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
		管水蚓属	<i>Aulodrilus</i>		+									+
		齿吻沙蚕	<i>Nephtys</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	多毛纲	疣吻沙蚕	<i>Tylorrhynchus heterochaeta</i>	+		+		+	+					
		未知种 1	sp1	+	+	+	+							
		未知种 2	sp2	+		+	+		+					
		未知种 3	sp3	+	+	+					+			
蛭纲	泽蛭属	<i>Helobdella</i>					+							
	蛙蛭属	<i>Batracobdella</i>	+											
昆虫纲	摇蚊科	摇蚊属	<i>Chironomus</i>	+								+		
		隐摇蚊属	<i>Cryptochironomus</i>			+								
		小摇蚊属	<i>Microchironomus</i>			+						+	+	+
	雕翅摇蚊属	<i>Glyptotendipes</i>				+								
	长足摇蚊属	环足摇蚊属	<i>Cricotopus</i>		+		+							
长足摇蚊属		<i>Tanypus</i>			+						+	+		
甲壳纲	太湖大螯蜚	<i>Grandidierella taihusis</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		
		杯尾水虱	<i>Cythura</i>	+		+	+	+	+	+	+	+	+	
		长臂虾属	<i>Palaemonidae</i>					+	+					
		米虾属	<i>Neocaridina</i>											+

注：“+”表示相应底栖动物在此次采样调查中出现。

种，可能是因为清淤后受底质及外源输入影响，底泥沉积物中的总氮、总磷和有机质仍处于较高水平，另一方面是夏末深秋季节有利于长足摇蚊等底栖动物的生长^[22]；2015 年软体动物增加，包括长角涵螺、光滑狭口螺、铜锈环棱螺等 3 种，而环保清淤前仅采集到河蚬 1 种，这说明大个体种类有恢复趋势，底栖生境得到一定改善；2018 年节肢动物米虾属出现，敏感种的出现表明梅梁湾底栖生态系统正逐步恢复健康。

2) 底栖动物丰度指标。本研究分别选取 Shannon-Wiener 指数、Margalef 指数、Pielou 指数和 Simpson 指数来表征研究区底栖动物丰度。

——Shannon-Wiener 指数。图 2 表明，竺山湾采样点在环保清淤工程实施后短期内底栖动物丰度略有降低，Shannon-Wiener 指数范围为 0.17~1.94，其均值由清淤前的 1.09 降至 0.91，在清淤后 1 a Shannon-

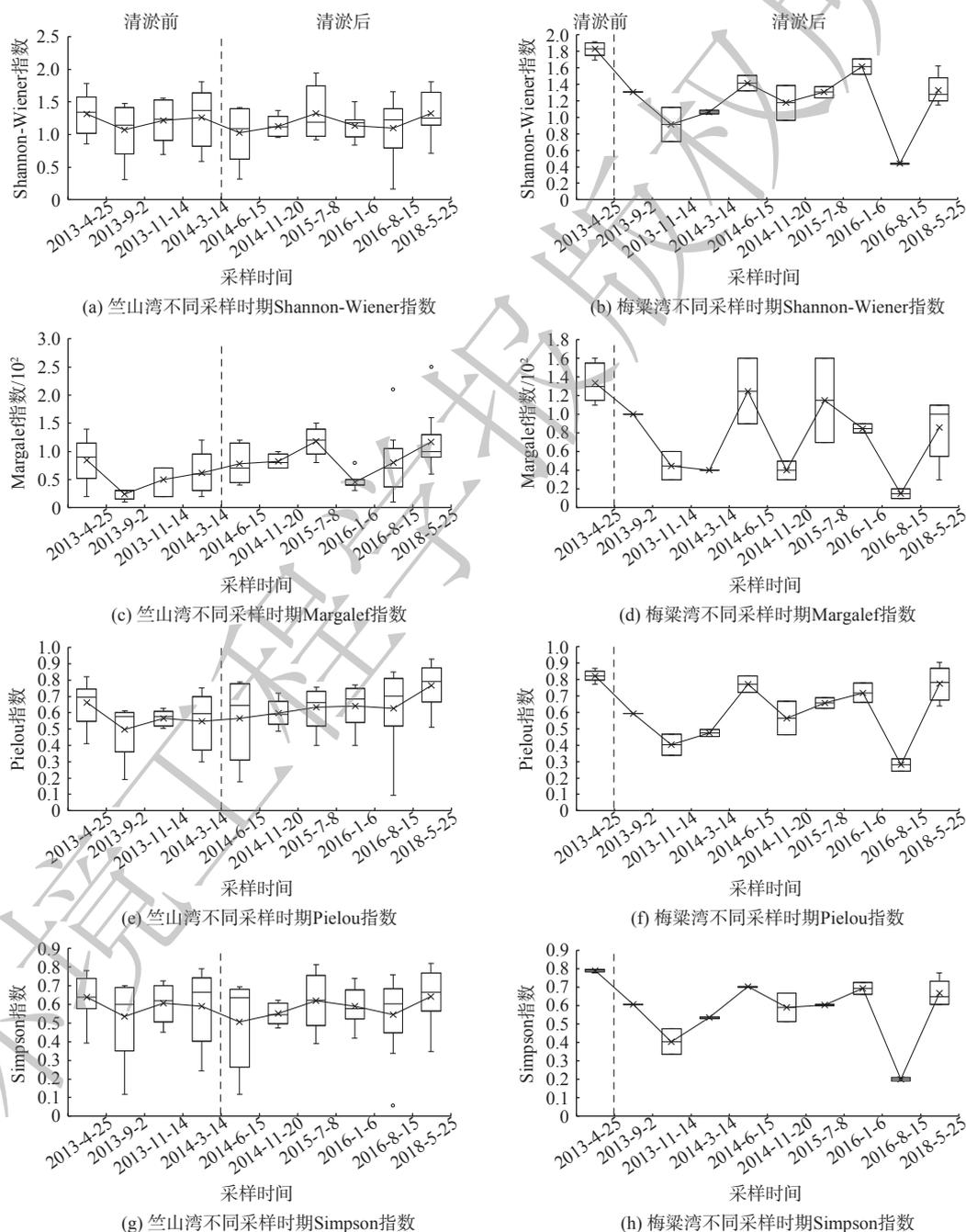


图 2 竺山湾和梅梁湾 2013—2018 年底栖动物丰度指标变化

Fig. 2 Taxa richness of macroinvertebrate between 2013 and 2018 in Zhushan Bay and Meiliang Bay

Wiener 指数均值上升至 1.35, 为轻污染水平^[6]。竺山湾不同采样点底栖动物丰度存在明显差异, 从环保清淤后 6 次采样 Shannon-Wiener 指数均值来看, 3 号采样点 Shannon-Wiener 指数均值达到 1.45, 而 9 号采样点均值仅 0.71, 1、2、4 和 5 号采样点均值约为 1.20, 分别为 1.19、1.20、1.16 和 1.23。在梅梁湾在实施环保清淤后 Shannon-Wiener 指数均值下降明显, 从 1.83 降至 1.31, 在清淤后半年多样性指数最低 0.91, 此后逐渐恢复至 1.2, 清淤后 2 a 梅梁湾采样点 Shannon-Wiener 指数相对稳定, 整体处于轻污染~中污染水平。

——Margalef 指数。在竺山湾, 环保清淤实施前后 Margalef 指数无显著变化, 其均值约为 1.00; 2015 年 7 月, Margalef 指数有所升高。梅梁湾 Margalef 指数在清淤后 6 个月内下降明显, 其均值由 0.067 降至 0.006, 此后逐渐恢复, 呈波动变化趋势, 可能受到不同季节采样时间及采样点空间差异的影响。两个湖区不同采样点 Margalef 指数空间异质性较大, 环保清淤 4 a 后, 2018 年 8 月竺山湾 5 号采样点 Margalef 指数达到 0.025, 而 11 号采样点仅 0.003。

——Pielou 指数和 Simpson 指数。如图 2 所示, Pielou 指数和 Simpson 指数变化趋势较为一致, 在环保清淤后均呈现升高趋势, 表明环保清淤对区域底栖动物丰度有一定改善。在 2016 年 8 月, 梅梁湾 Pielou 指数和 Simpson 指数出现显著降低, 可能与 2016 年太湖流域大洪水影响有关^[23], 洪水冲刷改变湖泊底质, 破坏底栖动物原有栖息地, 同时洪水后梅梁湾水质恶化^[24], 进而影响底栖动物的群落结构和物种多样性。湖泊底栖动物群落丰富度易受到湖水容量变化带来的影响, 太湖水位受人为调控影响较大, 可能造成自然生境趋于单一化, 同时可能使得部分底栖动物无法适应人为扰动引起的环境变化而消失^[25]。

竺山湾和梅梁湾环保清淤深度为 30~40 cm, 是底栖生物以及其他水生生物的主要活动场所。环保清淤不可避免地会将底泥中的底栖生物一并清除, 可能会造成对底栖生物群落结构的暂时性的破坏作用。不同区域环保清淤前后底栖动物丰度变化表现出一定差异, 其中梅梁湾在环保清淤实施后各丰度指标均呈现显著降低, 但在 6 个月后其底栖动物丰度开始恢复, 并逐步达到稳定。竺山湾环保清淤后各丰度指标变化不一, 且 Margalef 指数和 Pielou 指数有一定升高趋势, 可能是竺山湾环保清淤面积较大, 采样点空间异质性较大, 同时未清淤区域底栖动物迁移及清淤区域底栖动物恢复总量较大。清淤区域的底栖生物是具有自恢复能力的, 可随着时间的延长, 逐步恢复甚至超过未清淤时的生物多样性。这可能是由于底泥疏浚清除了表层重污染底泥, 湖底良性生境得到改善(氧还原电位、溶解氧浓度), 利于生物的繁殖和恢复^[10]。竺山湾和梅梁湾实施环保清淤后, 底泥污染及水体富营养化水平仍较高, 与清淤前相比底栖动物结构的丰富性差异较小。

2.2 环保清淤对底栖动物多度的影响

物种多度指的是群落中某一物种的个体数量或种群密度, 用来度量该物种在群落中的优势度或稀有度。物种多度是生态系统健康和稳定性的重要指标之一, 对维持生态平衡和功能至关重要。本研究选取多度值和相对多度来表征研究区底栖动物多度。

1) 底栖动物多度值。2013—2018 年 10 次调查中, 竺山湾和梅梁湾底栖动物密度分别为 471~3 122 ind·m⁻² 和 440~2 908 ind·m⁻², 其均值分别为 1 233 和 1 325 ind·m⁻²。在竺山湾环保清淤前, 底栖动物密度较高, 均值为 1 941 ind·m⁻², 其中 2013 年 9 月底栖动物密度达到 3 279 ind·m⁻²; 在清淤后, 竺山湾底栖动物密度下降明显, 平均值为 954 ind·m⁻²。梅梁湾环保清淤后底栖动物密度呈增加趋势, 特别是清淤 6 个月后底栖动物密度增加显著, 清淤后底栖动物密度均值达到 1 402 ind·m⁻², 而清淤前仅为 648 ind·m⁻²。底栖动物密度呈现一定的季节变化规律, 春、秋季较高, 夏季较低, 2014 年 6 月、2015 年 7 月及 2018 年 5 月 3 次调查结果底栖动物密度均较低。

不同类型底栖动物中, 竺山湾环保清淤前寡毛类密度最大, 均值为 1 038 ind·m⁻², 占总密度的 52%。在清淤后, 除昆虫纲密度未显著降低外, 其他类型底栖动物密度均下降, 寡毛类和软体动物密度较大, 其均值分别为 360 和 298 ind·m⁻², 占比分别达到 36% 和 32%。梅梁湾清淤前寡毛类、甲壳类、多毛类和软体动物密度分别为 203、144、181 和 104 ind·m⁻², 清淤后其对应密度平均值分别为 837 ind·m⁻², 甲壳类密度平均为 405 ind·m⁻², 多毛类密度为 81 ind·m⁻², 软体动物密度为 42 ind·m⁻²。清淤前后底栖动物的变化主要表现为多毛类和软体动物密度有所降低, 但寡毛类和甲壳类密度明显增加, 使得底栖动物总密度增加显著。环保清淤对个体较大的软体动物干扰较大, 同时密度较低的种类或稀有种在清淤后可能大量减少, 而优势种或者主导性的种类在清淤后恢复得比较快^[8-9]。

寡毛纲底栖动物能在低氧、无光等恶劣条件下生存, 是反映水体污染状况的重要指标。本研究采集到的

寡毛纲主要有苏氏尾鳃蚓、水丝蚓属、管水蚓属，其中水丝蚓属数量占比最高。如图 3 所示，竺山湾环保清淤后寡毛纲密度有明显下降，清淤前 3 号采样点寡毛纲密度最高值达 2 976 ind·m⁻²，清淤后最高值仅为 592 ind·m⁻²。与竺山湾不同，梅梁湾采样点在环保清淤工程实施后寡毛纲底栖动物密度明显增加，其中 1 号采样点寡毛纲密度清淤前仅为 312 ind·m⁻²，清淤后最大值为 2 608 ind·m⁻²。清淤后寡毛纲密度较清淤前有所增加，一方面是湖泊底泥沉积物中的营养盐仍较高，能满足其生长需求，另一方面寡毛纲是受干扰系统恢复过程中的先锋种类，其适应性和再生能力较强^[5]。

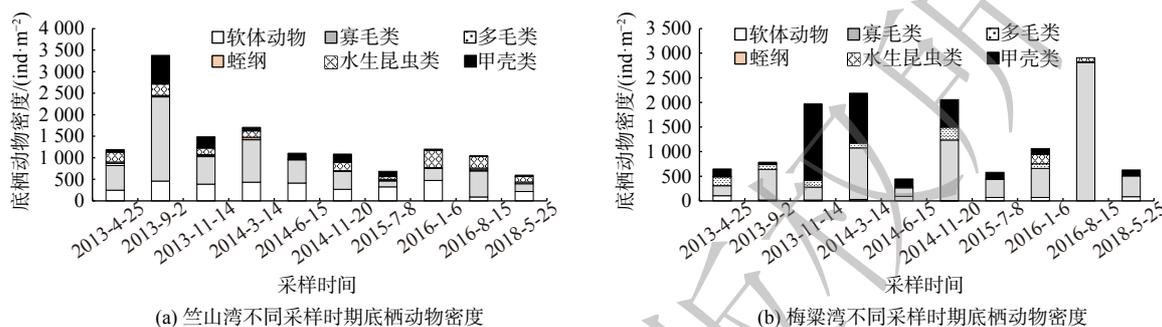


图 3 竺山湾和梅梁湾 2013—2018 年底栖动物密度

Fig. 3 Density of macrobenthos from 2013 to 2018 in Zhushan Bay and Meiliang Bay

2) 底栖动物相对多度。竺山湾和梅梁湾底栖动物优势属及其优势度分别见表 3 和表 4。竺山湾寡毛纲的

表 3 竺山湾底栖动物优势属及其优势度

Table 3 Dominant genus and the abundance of macrobenthos in Zhushan Bay

时间	铜锈环棱螺	河蚬	水丝蚓属	摇蚊属	环足摇蚊属	长足摇蚊属	前突摇蚊属	太湖大螯蚱
2013-04-25	/	0.23	0.52	/	0.12	/	/	/
2013-09-02	/	/	0.58	/	/	0.11	/	0.17
2013-11-14	/	0.15	0.49	/	/	0.11	/	0.18
2014-03-14	/	0.19	0.60	/	/	/	/	/
2014-06-15	/	0.35	0.49	/	/	/	/	0.12
2014-11-20	/	0.16	0.43	/	/	0.17	/	0.19
2015-07-08	/	0.38	0.22	0.15	/	/	0.14	0.18
2016-01-06	/	0.38	0.23	/	/	0.33	/	/
2016-08-15	/	/	0.64	/	/	0.16	/	/
2018-05-25	0.11	0.16	0.35	/	/	0.18	/	/

表 4 梅梁湾底栖动物优势属及其优势度

Table 4 Dominant genus and the abundance of macrobenthos in Meiliang Bay

时间	河蚬	苏氏尾鳃蚓	水丝蚓属	齿吻沙蚕	sp3	小摇蚊属	太湖大螯蚱	杯尾水虱	米虾属
2013-04-25	0.16	/	0.3	0.11	/	/	0.11	0.11	/
2013-09-02	/	0.58	0.2	/	0.1	/	/	/	/
2013-11-14	/	/	0.13	/	/	/	0.76	/	/
2014-03-14	/	/	0.47	/	/	/	0.42	/	/
2014-06-15	0.21	/	0.38	/	/	/	0.21	0.12	/
2014-11-20	/	/	0.59	/	/	/	0.24	/	/
2015-07-08	0.1	/	0.59	/	/	/	0.16	/	/
2016-01-06	/	/	0.52	/	/	0.15	/	/	/
2016-08-15	/	/	0.89	/	/	/	/	/	/
2018-05-25	0.13	0.21	0.44	/	/	/	/	/	0.12

水丝蚓属和双壳纲的河蚬为常年优势属,其环保清淤前后优势度均值分别为0.55和0.17、0.39和0.25,水丝蚓属优势度有所降低,而河蚬优势度增加。环保清淤前竺山湾昆虫纲的环足摇蚊属、长足摇蚊属和太湖大螯蜚其优势度也超过0.1,其中环足摇蚊属仅2013年4月调查时出现。在清淤后,长足摇蚊属优势度有所增加,其优势度均值达到0.21,同时铜锈环棱螺、摇蚊属和前突摇蚊属为环保清淤后才出现。

梅梁湾优势属主要为双壳纲的河蚬,寡毛类的水丝蚓属、苏氏尾鳃蚓属,多毛类的齿吻沙蚕、*sp3*,昆虫纲的小摇蚊属,以及甲壳动物的太湖大螯蜚、杯尾水虱及米虾属,其中水丝蚓属为常年最优势属,其优势度均值为0.45。在清淤后,第一次调查显示*sp3*优势度显著增加,但之后几次调查*sp3*均未达到优势属的状态,摇蚊属和前突摇蚊属仅在2015年7月调查中达到优势属状态,其优势度分别为0.15和0.14,铜锈环棱螺仅在最后一次调查中达到了优势属的状态。太湖大螯蜚在环保清淤后成为优势属,其优势度均值达到0.17。

不同区域不同调查时间的底栖动物优势属及其优势度存在显著差异,竺山湾常年优势属为水丝蚓属和河蚬,而梅梁湾主要为水丝蚓属,环保清淤后梅梁湾其主要优势属为水丝蚓属和太湖大螯蜚。以2015年7月调查为例,竺山湾优势属为水丝蚓属、河蚬、太湖大螯蜚及昆虫纲的摇蚊属和前突摇蚊属,其中昆虫纲优势度达到0.29,而梅梁湾优势属为水丝蚓属、河蚬、太湖大螯蜚,无昆虫纲。营养水平、底质类型及水生植被的分布是决定太湖大型底栖动物群落结构及多样性的关键因子^[26]。水丝蚓属在竺山湾和梅梁湾清淤前后均是主要优势属,且梅梁湾在清淤后水丝蚓属优势度不断增加,主要原因是环保清淤虽然短期内显著削减了底泥沉积物中的氮磷营养盐和有机质质量浓度,但受外源污染输入及底质污染物赋存影响,清淤后底泥污染物仍处于较高水平,水丝蚓属因耐受不了有机物被分解而造成的低氧甚至缺氧环境,其优势度呈增加趋势^[27]。竺山湾河蚬优势度均值达到0.25,其空间分布格局取决于生境类型和底质性质,蔡永久等^[28]在太湖研究中发现,河蚬在淤泥底质、富营养化严重的区域密度相对较低。

2.3 环保清淤对底栖动物耐污能力的影响

本研究选取BI指数、BPI指数和BMWP指数来表征底栖动物的耐污能力,竺山湾和梅梁湾2013—2018年底栖动物耐污能力指数见图4。

——BI指数。竺山湾底栖动物BI指数为4.87~9.38,均值为7.05;在环保清淤前,竺山湾底栖动物BI指数均值为7.61,而清淤后降至6.71。根据表1的BI评价标准,竺山湖底栖动物耐污能力由“较差”转变为“一般”。梅梁湾底栖动物BI指数在环保清淤后有一定增加趋势,其均值从6.54增至7.88,由“一般”变为“较差”。

——BPI指数。竺山湾环保清淤后各采样点BPI指数出现下降,其均值从0.67降至0.48,由“β-中等污染”转为“轻污染”;在清淤后,不同点位变化情况有所差异,其中4号采样点在“β-中等污染”和“轻污染”中波动,而1、2、3和5号等采样点虽然BPI值有所波动,但整体处于“β-中等污染”状态。梅梁湾环保清淤前后BPI指数均值分别为0.49和0.68,环保清淤后整体均处于“β-中等污染”状态,其中2016年8月BPI指数达到1.11。

——BMWP指数。在环保清淤前,竺山湾BMWP指数均值为28.2,实施清淤后降为26.2。清淤前后均处于“轻污染”状态,清淤1a后BMWP指数下降显著,而2016年均值仅为13.75,达到“中污染”状态。梅梁湾环保清淤前后整体均处于“中污染”状态,其BMWP指数均值为19.22。其中2016年8月BMWP指数仅为6,达到“重污染”状态。

不同生物指数对同一区域的耐污能力评价结果会存在不一致的情况^[20]。竺山湾环保清淤实施后BI指数、BPI指数和BMWP指数均呈下降趋势,但其对应污染状况评价分别是改善、改善和恶化。不同区域环保清淤前后底栖动物耐污能力也表现出一定差异,实施清淤后竺山湾各耐污能力指数均下降。而梅梁湾BI指数和BPI指数却呈现增加趋势,一方面可能是梅梁湾仅环保清淤前采集了5个采样点数据,而实施清淤后仅采集了1号和2号采样点,底栖动物分别可能存在空间差异;另一方面梅梁湾环保清淤面积约1.5 km²,受相邻未清淤区域耐污能力较强的底栖动物迁入影响较大,清淤后其底栖动物优势属为耐污值高的水丝蚓属,2016年8月其优势度达到0.89。在底泥污染较重及水体富营养化较高的区域,底栖动物类群趋向单一,且优势种从大个体的种类(如腹足纲、双壳纲)转变为小个体的耐污种类(如摇蚊幼虫、寡毛类),底栖动

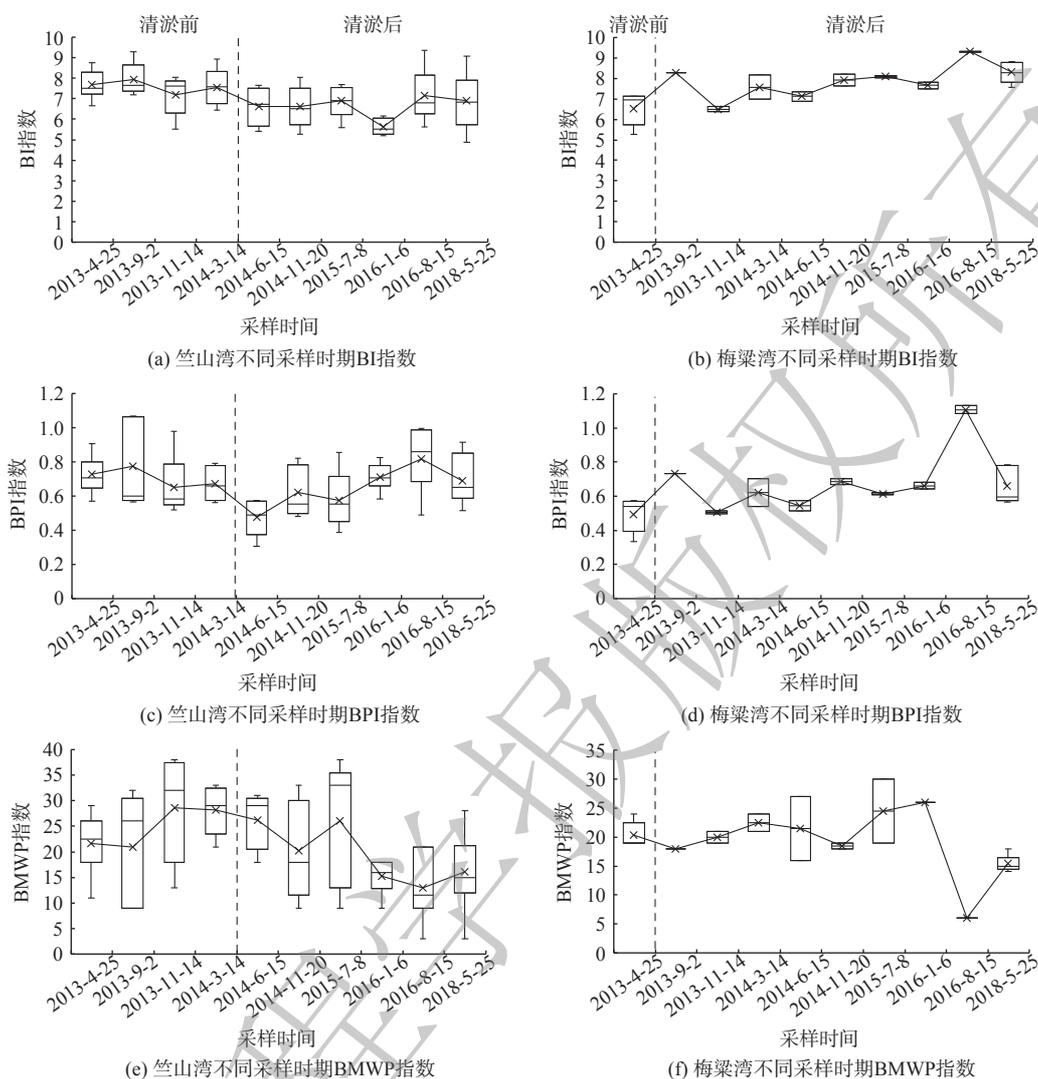


图 4 竺山湾和梅梁湾 2013—2018 年底栖动物耐污能力指数

Fig. 4 Tolerance index of macrobenthos from 2013 to 2018 in Zhushan Bay and Meiliang Bay

物的多样性也显著降低。这主要是因为小个体的种类对环境的适应能力较强，而大部分大个体种类耐污能力弱、生活周期较长，种群恢复易受到环境条件的限制^[29]。富营养区沉积物粒径偏细，粒径范围较窄，使得底质生境的异质性较低，难以支持更多种类的生存，同时有机质丰富、分解作用强烈导致该区域溶解氧较低，限制了敏感种类的生存，而耐污能力较强的颤蚓类则大量繁殖，成为绝对优势种^[26]。

3 结论

1) 2013—2018 年期间研究区域共采集到大型底栖无脊椎动物共计 3 门 7 纲 41 属 (种)，环保清淤后底栖动物总分类单元数总体呈现下降趋势。不同区域环保清淤前后底栖动物丰度变化表现出一定差异，其中梅梁湾在环保清淤实施后 Shannon-Wiener 指数、Margalef 指数、Pielou 指数和 Simpson 指数均呈现显著降低，清淤 6 个月后其底栖动物丰度开始恢复，并逐步达到稳定；而竺山湾环保清淤后各丰度指标变化不一，Margalef 指数和 Pielou 指数有一定升高趋势。

2) 环保清淤前竺山湾底栖动物密度均值为 $1\,941\text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$ ，清淤后降至 $954\text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$ 。梅梁湾环保清淤后底栖动物密度呈增加趋势，均值达到 $1\,402\text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$ 。清淤前后底栖动物的变化主要表现为多毛类和软体动物密度有所降低，但寡毛类和甲壳类密度明显增加。竺山湾寡毛纲的水丝蚓属和双壳纲的河蚬为常年优势属，其环保清淤前后优势度均值分别为 0.55 和 0.17、0.39 和 0.25，环保清淤后梅梁湾其主要优势属为水丝蚓属

和太湖大螯蜚。

3) 实施清淤后短期内清淤区域底栖动物耐污能力增加, 但受底泥污染状况和外源输入等因素影响, 清淤4a后竺山湾和梅梁湾底泥污染程度仍较重, BI指数、BPI指数和BMWP指数等耐污能力指标整体仍处于中污染状态, 优势属以水丝蚓属为主, 底栖动物分类单元数下降, 竺山湾底栖动物密度减少, 梅梁湾底栖动物丰度值下降但总密度增加。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 陆海明, 刘伟婷, 闵克祥, 等. 清淤工程对固城湖小湖区水生态环境影响研究[J]. 江苏水利, 2022(11): 25-30.
- [3] YANG Y, ZHANG W, LIU W, et al. Irreversible community difference between bacterioplankton generalists and specialists in response to lake dredging[J]. *Water Research*, 2023, 243: 120344.
- [4] MUMTAHINA R, MOHAMMAD N, MD NAHID P et al. Control of eutrophication in aquatic ecosystems by sustainable dredging: Effectiveness, environmental impacts, and implications[J]. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 2023, 7: 100297.
- [5] 杨桐, 尹成杰, 过龙根, 等. 环保疏浚对洱海西沙坪湾底栖动物群落结构的影响[J]. 水生态学杂志, 2022, 43(2): 77-83.
- [6] 王丑明, 张屹, 石慧华, 等. 洞庭湖大型底栖动物群落结构和水质评价[J]. 湖泊科学, 2016, 28(2): 395-404.
- [7] 温舒珂, 彭凯, 龚志军, 等. 近40年来太湖梅梁湾底栖动物群落演变特征及驱动因素[J]. 湖泊科学, 2023, 35(2): 599-609.
- [8] 吴沛冲, 刘劲松, 胡晓东, 等. 漏湖北部底泥疏浚的生态效应研究[J]. 水生态学杂志, 2015, 36(2): 32-38.
- [9] 毛志刚, 谷孝鸿, 陆小明, 等. 太湖东部不同类型湖区底泥疏浚的生态效应[J]. 湖泊科学, 2014, 26(3): 385-392.
- [10] 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.
- [11] 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, 188: 109799.
- [12] LIU Z, BAI G, LIU Y, et al. Long-term study of ecological restoration in a typical shallow urban lake[J]. *Science of The Total Environment*, 2022, 846: 157505.
- [13] JING L, BAI S, LI Y, et al. Dredging project caused short-term positive effects on lake ecosystem health: A five-year follow-up study at the integrated lake ecosystem level[J]. *Science of The Total Environment*, 2019, 686: 753-763.
- [14] 杨广利, 王芹, 杨子毅. "十三五"期间洪泽湖底栖动物多样性调查及趋势分析[J]. *环境监控与预警*, 2022, 14(4): 19-23.
- [15] 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.
- [16] 刘国锋, 张志勇, 刘海琴, 等. 底泥疏浚对竺山湖底栖生物群落结构变化及水质影响[J]. 环境科学, 2010, 31(11): 2645-2651.
- [17] 何志辉, 严生良, 杨和荃, 等. 淡水生物学(上册, 分类学部分)[M]. 北京: 农业出版社, 1982.
- [18] 刘月英, 张文珍, 王跃先, 等. 中国经济动物志淡水软体动物[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [19] MORSE J C, YANG L F, TIAN L. Aquatic insects of China-useful formonitoring water quality [M]. Nanjing: Hohai University Press, 1994.
- [20] 卞少伟, 张达娟, 李泽利, 等. 2017—2022年夏季于桥水库大型底栖动物群落分布与水环境关系分析[J/OL]. 水利水电技术(中英文): 1-16[2023-11-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1746.tv.20230724.2048.002.html>.
- [21] 贺斐斐, 童春富. 太浦河大型底栖动物群落组成及时空分布特征[J]. 生态学报, 2023, 43(11): 4619-4631.
- [22] 姜霞, 张晴波, 王书航, 等. 太湖有毒有害与高氮磷污染底泥环保疏浚规划研究[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [23] 黄振宇, 潘保柱. 洪水过程对水生态系统影响的研究进展[J]. 西安理工大学学报, 2020, 36(3): 300-306.
- [24] 朱伟, 胡思远, 冯甘雨, 等. 特大洪水对浅水湖泊磷的影响: 以2016年太湖为例[J]. 湖泊科学, 2020, 32(2): 325-336.
- [25] 于政达. 河流和湖泊底栖动物分布的影响因素及稀有种去除对多样性指数的影响[D]. 青岛: 山东大学, 2017.
- [26] 许浩, 蔡永久, 汤祥明, 等. 太湖大型底栖动物群落结构与水环境生物评价[J]. 湖泊科学, 2015, 27(5): 840-852.
- [27] 姜莘红, 崔永德, 王海军, 等. 汉阳湖群底栖动物群落及其对环境质量的指示[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(5): 525-533.
- [28] 蔡永久, 龚志军, 秦伯强. 太湖软体动物现存量及空间分布格局(2006-2007年)[J]. 湖泊科学, 2009, 21(5): 713-719.
- [29] 朱苏葛, 刘凌, 罗娟, 等. 里下河地区典型湖泊大型底栖动物与环境因子的相关性分析[J]. 水资源保护, 2016, 32(3): 99-104.

(责任编辑: 靳炜)

The response of macrozoobenthic communities to dredging projects and its reconstruction process: A case study of Zhushan Bay and Meiliang Bay of Taihu Lake

WANG Kai¹, WAN Bin², CHEN Liming¹, LU Haiming^{1*}, CHEN Haibo³, LI Hongjing¹, XIE Debao¹

1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Research center on hydrology and water resources of Ministry of water resources, Nanjing 210029, China; 2. Bureau of water affairs of Wujiang District, Suzhou City, Suzhou 215228, China; 3. Nanjing R & D Tech Group Co., Ltd, Jiangsu 210029, China

*Corresponding author, E-mail: cnlhm@126.com

Abstract Macrozoobenthic are inevitably affected by dredging projects. The response relationship between of the benthic community composition and structure to the implementation of dredging projects is a focus of attention in the demonstration and implementation effect evaluation of dredging projects. This study took the environmental dredging project implemented in heavily polluted areas of West Taihu Lake from 2013 to 2014 as an example. Through 6 years on-site sampling and indoor identification, the change process of the composition and structure of benthic community and its responses before and after the implementation of the environmental dredging project were studied. The results show that during the implementation of the ecological dredging project (2013—2018), a total of 3 phyla, 7 classes, and 41 genera (species) of benthic macroinvertebrates were collected. The total number of taxa in Zhushan Bay and Meiliang Bay decreased from 20 and 12 to 13 and 8 respectively. The average values of Shannon-Wiener index, Pielou index and Simpson index were 1.83, 0.82 and 0.79 respectively before dredging in Meiliang Bay. They decreased to 1.31, 0.59 and 0.61 respectively in the short term after dredging. The benthic animals began to recover and gradually reached stability after 6 months of dredging. After the implementation of dredging in Zhushan Bay, the average Margalef index and Pielou index increased from 0.006 and 0.55 to 0.009 and 0.57 respectively. The direct impact of ecological dredging on the community structure of benthic animals in the short term is the reduction of abundance and abundance. The dominant genera in Zhushan Bay and Meiliang Bay are mainly *Limnodrilus* and *Corbicula fluminea*. In the short term after dredging in Zhushan Bay, the average density of benthic animals dropped from 1 707 ind·m⁻² to 1 107 ind·m⁻², and the density of *Polychaete* and *Mollusc* in Meiliang Bay decreased from 104 ind·m⁻² and 181 ind·m⁻² to 16 ind·m⁻² and 96 ind·m⁻². 4 years after environmental dredging, the overall pollution resistance evaluation of Zhushan Bay and Meiliang Bay indicated that it is still in a medium pollution state. The number of benthos taxa dropped to 13 and 8. The average benthic animal density in Zhushan Bay dropped to 954 ind·m⁻² after dredging, and the abundance value of benthic animals in Meiliang Bay decreased, but the average total density increased to 1 402 ind·m⁻² after dredging. The restoration of benthic animal community structure in Zhushan Bay and Meiliang Bay still needs a long process.

Keywords environmental dredging; macrozoobenthos; abundance; diversity; tolerance index