

底泥疏浚对竺山湖底栖生物群落结构变化及水质影响

刘国锋¹, 张志勇¹, 刘海琴¹, 钟继承², 严少华^{1*}, 范成新^{2*}

(1. 江苏省农业科学院资源与环境研究所, 南京 210014; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

摘要:结合 2008 年年底在竺山湖进行的底泥清淤工程, 调查了底泥疏浚 6 个月对大型底栖动物的群落结构的影响及水质变化。结果表明, 疏浚区和未疏浚区底栖动物均以霍普水丝蚓、摇蚊和铜锈环棱螺 3 种生物为主; 同未疏浚区相比, 疏浚后生物多样性降低, 但生物量增加。受外源污染影响, 上覆水体中 TN、TP 含量变化幅度分别为 1.64~4.45 mg/L 和 0.133~0.258 mg/L, 较高的水体营养盐含量, 使得疏浚后的新生底泥仍处于营养盐较高的状态, 从而使得底栖动物群落组成以生活于污染较重的物种为主。采用 Shannon-Weaver、Simpson 和 Goodnight 指数对底栖生物进行评价, 结果表明疏浚区处于中度污染, 未疏浚区处于中-重度污染状态。结合底栖动物调查和水质监测结果, 只有在严格控制外源污染对水体的影响后, 底泥疏浚才能起到应有的作用。

关键词:底泥疏浚; 底栖生物; 群落结构; 指示生物

中图分类号: X174; X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)11-2645-07

Effects of Sediment Dredging on Benthos Community Structure and Water Quality in Zhushan Bay

LIU Guo-feng¹, ZHANG Zhi-yong¹, LIU Hai-qin¹, ZHONG Ji-cheng², YAN Shao-hua¹, FAN Cheng-xin²

(1. Institute of Agricultural Resource and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Science, Nanjing 210014, China; 2. State Key Laboratory of Lake & Environment, Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: We surveyed the changes of macro-benthos community composition and nutrients concentration in water in Zhushan Bay after it had been dredged 6 months, which aimed to remove the polluted surface sediments. The results showed that the main benthos in the dredged and un-dredged sediments were *Limnodrilus hoffmeisteri*, *Pelopia* and *Bellamyia aeruginosa*; compared to the un-dredged sediments, the bio-diversity of dredged areas became lower. However, its biomass became higher than that in un-dredged areas. Concentration range changes of TN and TP in overlying water was 1.64-4.45 mg/L and 0.133-0.258 mg/L, respectively. The post-dredged sediments were still in a higher state of nutrients for the higher concentration nutrients in overlying water, macro-benthos were the species that lived in a serious polluted water environment. Using Shannon-Weaver, Simpson, and Goodnight benthic index to evaluate the results show that the dredged area is in the moderately polluted level, but un-dredged area is in the middle-heavily polluted level. According to the benthos fauna surveys and water quality monitoring results, the effective of sediment dredging could play its role only the strict control on the external pollution resources have been made and reduces the effects of polluted water on the sediments.

Key words: sediment dredging; benthos; community structure; indicator organism

目前太湖因水体富营养化导致的大规模蓝藻暴发现象成为诸多水环境问题中的一个突出问题^[1,2]。继 2007 年太湖无锡南泉水厂发生藻源性黑水团后, 2008 年在太湖竺山湖连续发生了大面积的藻源性黑水团现象^[3], 更是对当地居民的生产、生活造成了巨大的影响。针对这种情况, 为切实减轻太湖特别是竺山湖和西岸湖区的内源污染, 有效防控“湖泛”、蓝藻生态危害, 江苏省水利厅会同地方政府于 2008 年年底在竺山湖进行了生态清淤工程。作为一项可供选择的生态治理方法, 底泥疏浚因能够快速去除受污染的底泥, 从而去除了向上覆水体中持续供应营养盐的“源”, 能较快地改善水体的营养

状态, 因而在湖泊治理中较受青睐^[4]。虽然生态清淤工作能够快速去除底泥中污染物, 截断藻源性黑水团发生的生物链, 对当前水质改善具有明显效果, 但是从长期来看, 这种效果及持续性如何^[5], 需要进行相应的监测工作和综合评价, 以便能够做出合理的判断。

收稿日期: 2009-12-15; 修订日期: 2010-04-18

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2009BAC63B01); 国家自然科学基金项目(40901253); 江苏省自然科学基金项目(BK2009333); 中国科学院知识创新工程领域前沿项目(CXNIGLAS200804)

作者简介: 刘国锋(1979~), 男, 博士, 主要研究方向为湖泊水环境污染及生态治理, E-mail: njliugf@yahoo.cn

* 通讯联系人, E-mail: shyan@jaas.ac.cn; cxfan@niglas.ac.cn

针对水体生态环境的变化,常规采用的方法是对水体进行理化因子和指标的分析.但这种方法无法持续、长期地监控并反映水质变化情况.有学者根据水生生物长期在水体生活的情况,提出并采用水生生物对水体的水质进行监控的措施,以便能够把水体质量变化情况通过水生生物的群落组成、种群数量等通过一定的指标表达出来,从而为监控水体质量提供了一种更为科学、有效的方法^[6~11].同理化监测相比,生物监测优越性表现在:① 能对各种污染因子的相互作用(协同、拮抗)做出综合性反映;② 具有连续监测的功能,是对环境质量状况长期的、历史的反映;③ 经济且敏感性高.生物监测一般无需昂贵的仪器,有些指示生物对某种污染物的反映很灵敏^[6].用于生物评价的生物包括细菌、浮游动物、藻类、高等水生植物、鱼类和大型底栖无脊椎动物等^[7];并且有较多的学者做了相关的研究^[8~10].

底栖动物因其生活史的大部或全部时间是生活于水体底部的水生动物,因而水体环境中如营养盐、有毒有害物质、重金属等的各种变化,都能够影响到底栖生物的生长、繁殖和存活,底栖动物能确切地反映水体质量,是水体环境监测的良好指示生物^[11].利用底栖生物作为水体水质的监测生物,国内外已有较多学者做了大量研究^[12~18].因此,本研究针对太湖竺山湖的底泥清淤工程,利用底栖生物作为指示物种来揭示底泥疏浚工程对水体生态环境的影响及水质的改善效果;并据此对疏浚工程的可行性(即疏浚的类型与效率)和环境效应(如生物效应)进行评价.

1 材料与方法

1.1 采样点布设及样品采集

根据竺山湖底泥疏浚情况并结合实际水体及其周围环境的变化,样点选取在竺山湖太湖附近作为调查区域(如图1示).采样点共设1~24个样点,其中疏浚区为10个,未疏浚区为14个样点,于2009年8月、9月上旬按照一定顺序进行连续采集.样品采集用1/40 m²改良的彼得逊采泥器,泥样经60目尼龙筛洗净后,置于白瓷盘中肉眼观察、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^[19~21],然后计算和称重,结果最终折算成单位面积的密度和湿重生物量.

1.2 水样分析

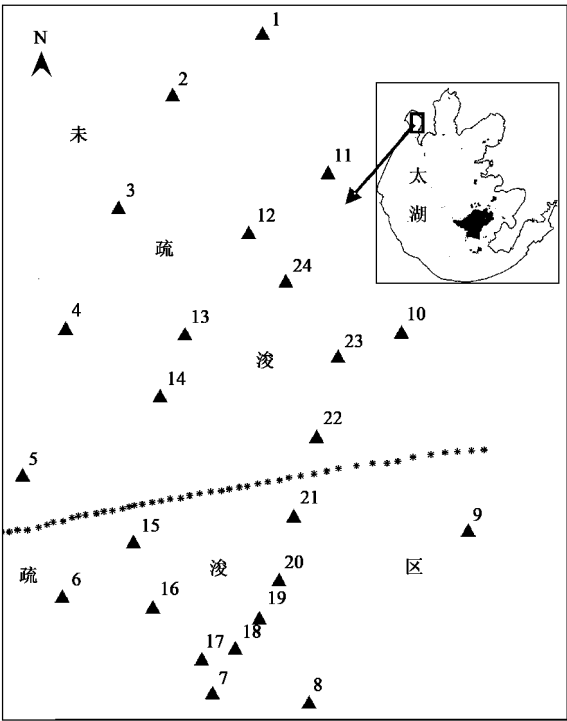


图1 采样点位示意
Fig.1 Sampling sites

采集到的水样立即带入实验室进行相应处理:水样用0.45 μm 的GF/C(Whatman)滤膜过滤,过滤后的叶绿素用热乙醇法测定^[22];水样TN、TP、NH₄⁺-N采用注射式流动分析仪测定,PO₄³⁻-P采用磷钼蓝比色法测定^[23].

1.3 数据分析与评价指标

实验数据分析采用Excel 2003 进行分析;利用SPSS17.0 进行方差分析.生物多样性指数选取Shannon-Weaver (H)^[24]、Simpson 指数^[25]和Goodnight 指数^[26]作为水质情况的评价指数(表1).文中所列数据为各采样点2次采样计算结果的平均值.

表1 生物多样性评价指数及评价标准
Table 1 Index and standard of biodiversity assessment

指数	评价标准
Shannon-Weaver (H)	H > 3.0 表示略有污染至清洁水质, 2.0 < H < 3.0 轻度污染, 1.0 < H < 2.0 中等污染, H < 1.0 严重污染
Simpson	指数0 为严重污染, 1~2 为重污染; 2~3 为中污染, 3~6 为轻度, >6 为清洁水
Goodnight	指数值在 80%~100% 为重污染, 60%~80% 为中污染, 60% 以下为轻度污染至良好水质

2 结果与分析

2.1 种类组成

在调查采样期间采集得到 24 份样品中,共采集到 8 种生物,隶属于 5 科 8 种,其中毛足纲颤蚓科有霍普水丝蚓 (*Limodrilus hoffmeisteri*) 和苏氏尾腮蚓 (*Branchiura sowerby*);双翅目摇蚊科有粗腹摇蚊幼虫 (*Pelopia*) 和前突摇蚊幼虫 (*Procladius*);腹足纲田螺科主要是铜锈环棱螺 (*Bellamya aeruginosa*);瓣鳃纲珠蚌科有圆顶珠蚌 (*Unio douglaniae*) 和椭圆背角无齿蚌 (*Anodonta elliptica*). 其中疏浚区采集到的生物仅有霍普水丝蚓、摇蚊幼虫和铜锈环棱螺 3 种,所采集到得这些种类均是太湖中常见的种类.

2.2 出现率及生物量

调查结果表明,所设样点中软体动物的出现率在 95% 以上,表明在各个样点基本都能采集到软体动物;样点区内软体动物的平均密度为 497 ind/m²,平均生物量为 49.87 g/m² (未计入蚌类). 表 2 所示为所设采样区内疏浚和未疏浚处大型底栖动物的出现率、平均密度和现存量,可以发现软体动物(主要是铜锈环棱螺)、寡毛类(主要是霍普水丝蚓)和双翅目(主要是摇蚊类)为主要的物种,它们构成了所采集到的大型底栖动物的优势种. 在疏浚区内摇蚊类的平均密度高达 1 760 ind/m²,生物量为 3.224 g/m²;而在未疏浚区内其平均密度和生物量分别为

1 540 ind/m² 和 1.923 g/m²,表现为疏浚区要高于未疏浚区内. 而霍普水丝蚓在疏浚区内的平均密度和生物量分别为 628 ind/m² 和 0.763 g/m² (未疏浚区内分别为 2 554 ind/m² 和 3.554 g/m²),出现疏浚区内的密度和生物量都远远低于未疏浚区内的含量;铜锈环棱螺在疏浚区内平均密度达 392 ind/m²,平均生物量为 44.106 g/m² (未疏浚区内分别为 571.43 ind/m² 和 40.503 g/m²),也是疏浚区内平均密度低于未疏浚区,但生物量要高于未疏浚区,具有类似的变化情况. 至于计算时河蚌未计入的原因,因河蚌个体较大、分布稀疏,因而采样时利用 1/40 m² 的彼得逊采泥器,在各个样点所采集到河蚌数目差异较大,如果计入总数时,可能出现较大的偏差^[27]. 对疏浚区和未疏浚区底栖动物数量进行方差分析,方差分析的齐性检验结果表明,水丝蚓、摇蚊幼虫和软体动物的 Levene 统计量分别为 9.808、1.214、2.015(*p* 值分别为 0.005、0.283、0.170),因此可以认为样本所在各总体的方差齐性. 对 3 种底栖生物进行单因素方差分析,结果表明在进行底泥疏浚和未疏浚区水丝蚓、摇蚊幼虫和软体动物的 *F* 值为 6.513、0.094、0.764(*p* 值 > 0.005),可以认为疏浚前后 3 种底栖生物的数量变化不存在显著差异.

表 2 疏浚区与未疏浚区大型底栖动物的平均密度及现存量
Table 2 Average density and biomass of macrobenthos in dredged and un-dredged areas

底栖动物(主要种类)	疏浚区			未疏浚区		
	出现率/%	平均密度 /ind·m ⁻²	平均生物量 /g·m ⁻²	出现率 /%	平均密度 /ind·m ⁻²	平均生物量 /g·m ⁻²
软体动物(铜锈环棱螺)	100	392	44.106	93	571.43	40.503
寡毛类(水丝蚓)	80	628	0.763	100	2 554	3.544
摇蚊幼虫	90	1760	3.22	64	1 540	1.923
其它	0	0	0	10	2.86	0.422 9

2.3 优势种及生物量的比较

疏浚区和未疏浚区内所采集到的大型底栖动物的优势种主要是霍普水丝蚓、摇蚊幼虫和铜锈环棱螺 3 种,这几种基本上在各个样点都能够采集到,具有较高的出现率(表 2). 相对这 3 种生物,其他种类的底栖生物的出现率就大大降低. 从生物量的变化来看,软体动物因其形体较大而表现为生物量远高于水丝蚓和摇蚊幼虫,虽然水丝蚓和摇蚊幼虫的密度远大于软体动物,疏浚区内软体动物生物量为 44.106 g/m²,未疏浚区内软体动物量为 40.503 g/m²,表现为疏浚区稍微高于未疏浚区. 而根据孙顺才等^[26]在 20 世纪 90 年代对太湖竺山湖底栖动物的调查结果表明,竺山湖的软体动物的密度和生物量为 562 ind/m² 和 165.21 g/m²,密度同本调查结

果类似,而生物量却远高于本次调查结果. 这表明经过 20 a 的发展,软体动物的总重下降. 而蔡永久等^[27]通过对全太湖的软体动物的调查分析表明,20 年来竺山湖的铜锈环棱螺的个体重量下降幅度达 1.56 g/ind,这就解释了为何在具有类似密度情况下,软体动物的生物量大幅下降的原因. 疏浚区内软体动物密度比未疏浚区内软体动物的密度下降了 31%;但生物量却要比未疏浚区的高.

2.4 多样性指数与水质评价

所设采样点的上覆水体 TN、TP 和 PO₄³⁻-P 及 NH₄⁺-N 浓度监测分析结果如图 2 所示. 上覆水体中 TN、TP 含量变化幅度较大,TN 浓度变化为 1.64 ~ 4.45 mg/L,TP 的变化为 0.133 ~ 0.258 mg/L,而且在疏浚区和未疏浚区内变化幅度都较大,没有一定

的规律,且其含量较高;上覆水中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量也有类似的表现.这可能是由于上覆水体的流动性较强,而所设的采样点处于航道和太漏村附近,

受生活污水及船舶经过的影响,水体的流动性和混合性大大增强,使得上覆水体的营养盐含量较高而且差异性较小.

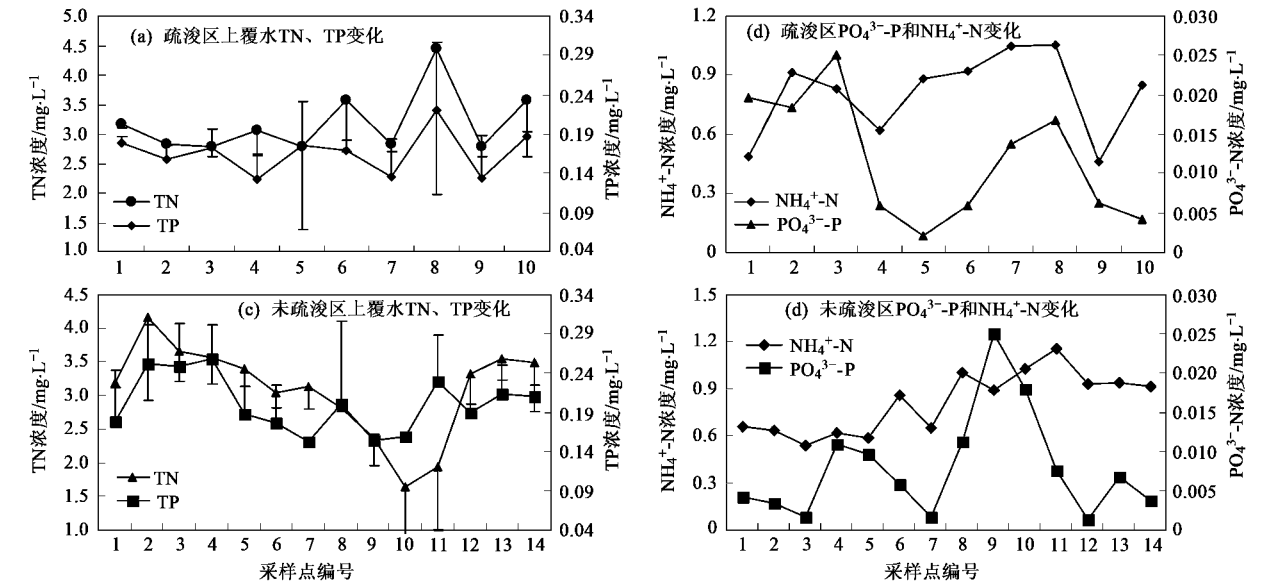


图 2 上覆水中 TN、TP 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量变化

Fig. 2 Concentration changes of TN, TP, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ in overlying water

仅仅通过水质理化因子不能很好说明水体水质变化,为了更好和更有效地评价水质变化情况,本研究选取 3 个生物多样性指数(Shannon-Weaver 指数、Simpson 指数、Goodnight 指数)进行综合评价,以便能够更客观地对疏浚区、未疏浚区的水质情况进行评价.通过对所采集样点的底栖动物进行多样性指

数分析,其评价结果见表 3 所示.疏浚区内的水质评价结果表明,用 Shannon-Weaver 和 Simpson 指数评价结果为中等污染状态,而用 Goodnight(%)指数评价水质则处于轻度污染状态.未疏浚区内的水质情况,利用 Shannon-Weaver 指数评价则是处于严重污染状态,利用 Simpson 和 Goodnight 指数评价水质则

表 3 疏浚区与未疏浚区生物多样性指数

Table 3 Biodiversity index in dredged and un-dredged areas

样点	疏浚区			综合评价	样点	未疏浚区			综合评价
	Shannon-Weaver 指数	Simpson 指数	Goodnight (%) 指数			Shannon-Weaver 指数	Simpson 指数	Goodnight (%) 指数	
1	1.192 2	1.711 1	12.766 0	中等	11	0.764 2	2.407 7	22.222 2	中等
2	1.437 8	2.537 3	37.142 9	中等	12	0.455 4	1.222 9	90.425 5	严重
3	1.552 0	3.663 8	42.857 1	中等	13	0.640 3	1.424 3	83.750 0	严重
4	0.000 0	1.000 0	0.000 0	中等	14	0.738 3	1.348 1	86.092 7	严重
5	0.533 6	1.184 6	0.000 0	中等	15	1.043 7	2.920 8	55.172 4	中等
6	1.337 6	2.298 7	56.756 8	中等	16	1.313 7	1.902 6	71.052 6	中等
7	1.494 6	2.612 6	23.478 3	中等	17	1.193 1	2.072 8	35.625 0	中等
8	1.301 1	2.056 7	17.187 5	中等	18	1.250 2	2.174 9	47.479 0	中等
9	1.658 8	2.925 0	51.282 1	中等	19	1.109 6	2.447 4	17.647 1	中等
10	0.537 1	1.207 9	2.919 7	中等	20	1.260 7	2.169 9	43.537 4	中等
平均	1.104 5	2.119 8	24.439 0	中等	21	0.123 1	1.034 5	98.319 3	严重
评价	中等污染	中等	轻度		22	1.169 9	1.710 5	10.416 7	中等
					23	1.116 7	2.066 9	45.000 0	中等
					24	1.819 0	3.211 7	22.500 0	中等
					平均	0.999 9	2.008 2	52.088 6	中-重
						严重	中等	中等	

是处于中等污染.综合评价则是疏浚区处于中等污染,未疏浚区则是处于中度-严重之间.从生物多样性的角度评价 2 个区域的水质情况,表现为疏浚区内要稍微好于未疏浚区,表明底泥疏浚可以减轻水体污染、特别是底泥污染程度.

3 讨论

3.1 底泥疏浚后对底栖动物群落的影响

底泥疏浚因可以削减内污染源而被认为是治理湖泊富营养化的一种重要措施,通过挖掘底泥,可以增大湖泊环境容量,总体上减少湖泊内氮、磷等营养盐的总负荷.底泥疏浚之后,去除了污染严重的底泥,也就去除了向上覆水体中持续供应营养盐的基础,为底栖动物创造了一个污染程度较轻的环境,从长远来看,有助于底栖生物的自我恢复和群落多样性的发展.因此即使对底泥疏浚的效果存在较大争议^[5],但快速、有效地去除湖泊内源污染仍然是湖泊污染治理的重要措施,国内外较多的湖泊都施行了这种治理方法^[5,28-30].底泥疏浚效果在不同的湖泊其实践的效果各不相同,部分湖泊底泥经过疏浚作用后,对水质改善效果非常明显,特别是经过疏浚后底泥的营养盐含量、底泥的内源释放量及水体的水质更是有较大的改观;而底栖动物的种类、群落组成等需要较长时间的恢复,但仍会表现为种类、丰度、群落状况及生物量等向优化方向发展^[28,30];但也有部分湖泊底泥经过疏浚后会出现水质恶化、底泥营养盐释放量增加、浮游动物丰度及生物量增加及重金属释放风险增大等不利影响^[31-33].由于受底泥清淤作用的影响,底栖动物群落结构及总数会产生较大的变化,这种变化通常是使得其种类、丰度及生物量大大降低,即使底栖动物能够自我恢复,也需要较长时间.但不同的底栖动物的种类、丰度、生物量等会因底泥环境状况、疏浚深度、疏浚季节等变化较大^[34],如同陆地生态环境中的群落演替一样,而在疏浚区首先出现的也是机会种或先锋种,这些物种会因较适应这种底泥环境而开始形成稳定的群落,但这种群落也只是部分恢复^[34].

本调查时间距 2008 年冬季底泥疏浚的时间超过 6 个月,从理论上讲,底栖动物群落应该形成一个稳定的状态.但根据调查结果分析,在疏浚区和未疏浚区内,底栖动物群落差异不大,基本上都是以软体动物、寡毛类和摇蚊幼虫为优势种(如图 3),它们占了所采集样本的 95% 以上,疏浚区采集到软体动物和摇蚊类各有 2 种,寡毛类 1 种;而未疏浚区内

采集到软体动物 3 种,寡毛类和摇蚊类各有 2 种.这表明经过半年之后,底栖动物种类和群落组成在疏浚区内基本达到一个初步的群落组成阶段,但底栖动物群落组成、物种丰富度和生物量的变化情况仍需要进行进一步调查才能确定.因此底泥疏浚后对底泥环境状况影响需要进行长期监测并进行综合评价后才能给予判定.

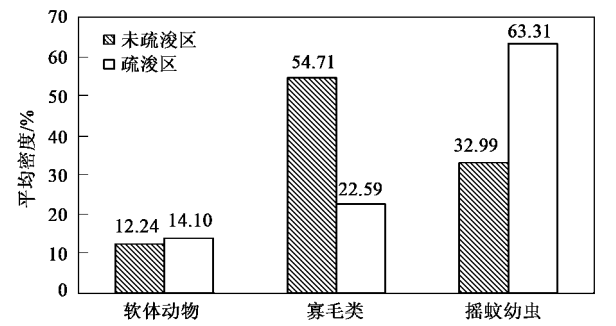


图 3 疏浚区和未疏浚区底栖动物平均密度分布
Fig. 3 Average density of macro-fauna in dredged and un-dredged areas

3.2 底栖生物组成与水质评价

在水体富营养严重时常可发现大量的霍普水丝蚓以及摇蚊幼虫等,这主要归因于它们能耐受由于有机物大量被分解而造成的低氧甚至缺氧环境,而其他底栖动物在这种环境下往往受到抑制甚至死亡.在本调查中发现,占优势的种类以霍普水丝蚓、摇蚊幼虫和铜锈环棱螺为主,即使在经过底泥疏浚的区域内也是类似的分布类型,甚至在疏浚区内摇蚊幼虫所占的比例高.霍普水丝蚓是一种世界性的分布,通常为最严重污染区的优势种;摇蚊幼虫的分布也相当广泛,它们也常常出现在水体污染较重、有机质含量较高的水域,常利用它们指示栖息水体类型及污染程度^[19];铜锈环棱螺以底栖着生藻类为食,间食水底的一些细菌以及淤泥中的有机碎屑,其适应性较强,生态位宽.铜锈环棱螺的出现表明该区域底泥有机质含量丰富,适宜于螺类的生长和繁殖,因此大量出现的铜锈环棱螺无法指示水体污染状况;而根据孙顺才、蔡永久等^[26,27]的调查,竺山湖历来就是铜锈环棱螺的大量繁殖的地点之一.

随着近年来太湖水体污染加重、蓝藻水华大量暴发,竺山湖也是大量蓝藻主要的聚集区之一,在 2008 年因蓝藻大量聚集产生的黑水团就是在竺山湖,这些大量死亡的藻细胞沉降到沉积物表层后,在消耗掉溶氧后,也带来了大量的有机质和氮磷等营养盐,从而使得该湖湾的营养水平上升.因此,调查

结果中大量出现的霍普水丝蚓和摇蚊幼虫(表2和图3)就指示了该处底泥营养盐含量较高、水体污染较重。而水样监测结果(图2)也表明,上覆水体已处于严重污染的程度,如果依据太湖富营养化程度评价标准来划分^[26],所设采样点处的水质已经为重富营养和严重富营养化之间。所设的采样点处于常州太滪村附近,该村有十多家酒店和上千口人,因此在夏季每天的生活污水的排放量相当大,加之行船造成水体流动性和混合能力大大增强,使得上覆水体中N、P含量较高(采样时水面上有大量蓝藻细胞)。虽然底泥经过疏浚,但较高的外源污染和上覆水体中较高的营养盐含量,也使得底泥不断从上覆水体中吸收营养盐,这种环境就使得在污染较重的环境中出现的生物如霍普水丝蚓和摇蚊大量出现;同时其生物量也大大增加。底栖动物主要利用湖泊底部的有机碎屑,营养条件是影响其生物量变化的重要因素之一。对比分析疏浚与未疏浚区底栖动物群落的生物量,发现其生物量发生了明显的变化,群落密度、种群丰度和组成上都是比较单一的,这些指示着疏浚区和未疏浚区水域环境仍处于污染较重的程度。受外源污水和较高的上覆水营养盐含量的影响,疏浚区的底泥环境仍处于较重的污染环境,因而底泥疏浚对水域环境的改善并不明显。

4 结论

(1)通过对经过疏浚6个月之后的样点进行的水质监测和大型底栖动物的调查,发现上覆水体营养盐仍处于较高含量。而底栖动物的种类多样性较低,且以较耐受污染的霍普水丝蚓、铜锈环棱螺和摇蚊幼虫为主,生物量则有增加的趋势,表明在经过底泥疏浚后,受到上覆水体中高浓度营养盐的影响,使得底泥清淤对水体改善的效果并不明显。

(2)针对当前湖泊严重富营养化治理而兴起的湖泊底泥疏浚工程,要根据所要清淤湖泊水域情况,进行慎重考虑和研究,并在能够截断外源对湖泊水体的持续污染的情况下,才有可能使得底泥清淤的效果显现出来,从而达到湖泊底泥疏浚的目的。

参考文献:

- [1] Guo L. Ecology: doing battle with the green monster of Taihu Lake[J]. Science, 2007, **317**:1166.
- [2] Yang M, Yu J, Li Z, *et al.* Taihu Lake not to blame for Wuxi's woes[J]. Science, 2008, **319**:158.
- [3] 太湖流域水资源保护局. 太湖湖区“黑水团”成因及危害分析[EB/OL]. http://www.tba.gov.cn:89/news/news_show.jsp?fileId=196805.

- [4] Moss B, Balls H, Irvine K, *et al.* Restoration of lowland lakes by isolation of nutrient rich water sources with and without removal of sediment[J]. Journal of Applied Ecology, 1986, **23**:391-414.
- [5] 濮培民, 王国祥, 胡春华, 等. 底泥疏浚能控制湖泊富营养化吗? [J]. 湖泊科学, 2000, **12**(3):269-279.
- [6] 国家环境保护局. 水生生物监测手册[M]. 南京: 东南大学出版社, 1993.
- [7] 王备新, 杨莲芳. 大型底栖无脊椎动物水质快速生物评价的研究进展[J]. 南京农业大学学报, 2001, **24**(4): 107-111.
- [8] 黄小清, 蔡笃程. 水生昆虫在水质生物监测与评价中的应用[J]. 华南热带农业大学学报, 2006, **12**(2): 72-75.
- [9] 禹娜, 陈立侨, 赵泉鸿. 太湖介形虫分布与水环境因子间关系的典范对应分析[J]. 微体古生物学报, 2007, **24**(1):53-60.
- [10] 李强, 杨莲芳, 吴璟, 等. 西苕溪 EPT 昆虫群落分布与环境因子的典范对应分析[J]. 生态学报, 2006, **26**(11): 3817-3825.
- [11] 尤平, 任辉. 底栖动物及其在水质评价和监测上的应用[J]. 淮北煤炭师范学院学报(自然科学版), 2001, **22**(4): 44-48.
- [12] 陈其羽, 梁彦龄, 吴天惠. 武汉东湖底栖动物群落结构和动态的研究[J]. 水生生物学集刊, 1980, **7**(1):41-56
- [13] 谢翠娴. 利用底栖动物监测严家湖农药污染[J]. 水生生物学报, 1985, **9**(1): 40-50.
- [14] 李强, 杨莲芳, 吴璟, 等. 底栖动物完整性指数评价西苕溪溪流健康[J]. 环境科学, 2007, **28**(9): 2141-2147.
- [15] 马陶武, 黄清辉, 王海, 等. 太湖水质评价中底栖动物综合生物指数的筛选及生物基准的确立[J]. 生态学报, 2008, **28**(3): 1192-1200.
- [16] 王银东, 熊邦喜, 杨学芬. 用大型底栖动物对武汉南湖水质的生物学评价[J]. 环境污染与防治, 2006, **28**(4): 312-314.
- [17] Zulini A. Nematodes as indicators of river pollution [J]. Nematologia Mediterranea, 1976, **4**:13-22.
- [18] Kazanci N, Girgin S. Distribution of Oligochaeta species as bioindicators of organic pollution in Ankara Stream and their use in biomonitoring [J]. Turkish Journal of Zoology, 1998, **22**: 83-87.
- [19] 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. 181-334.
- [20] 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.
- [21] Morse J C, Yang L F, Tian L. Aquatic insects of China useful for monitoring water quality[M]. Nanjing: Hohai University Press, 1994.
- [22] 陈宇炜, 陈开宁, 胡耀辉. 浮游植物叶绿素 a 测定的“热乙醇法”及其测定误差的探讨[J]. 湖泊科学, 2006, **18**(5): 550-552.
- [23] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [24] 彭建华, 刘家寿, 熊邦喜, 等. 湖北浮桥水库底栖动物的群落结构及生物多样性[J]. 湖泊科学, 2002, **14**(1): 90-96.
- [25] 龚志军, 谢平, 唐汇涓, 等. 水体富营养化对大型底栖动物群

落结构及多样性的影响[J]. 水生生物学报, 2001, **25**(3): 210-216.

[26] 孙顺才, 黄漪平. 太湖[M]. 北京: 海洋出版社, 1993. 174-178.

[27] 蔡永久, 龚志军, 秦伯强. 太湖软体动物的现存量及空间分布格局[J]. 湖泊科学, 2009, **21**(5): 152-159.

[28] 戚仁海, 徐亚同, 刘赞. 苏州河底泥疏浚对围隔中水生生态系统的影响[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2006, **4**: 127-133.

[29] 王小雨, 冯江, 胡明忠. 长春南湖底泥疏浚前后水因子分析及动态变化[J]. 中国环境监测, 2004, **20**(2): 10-13.

[30] 吴芝瑛, 虞左明, 盛海, 等. 杭州西湖底泥疏浚工程的生态效应[J]. 湖泊科学, 2008, **20**(3): 277-284.

[31] 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.

[32] 康玉辉, 刘正文, 张修峰, 等. 惠州西湖底泥疏浚对后生浮游动物群落的影响[J]. 生态科学, 2009, **28**(3): 247-252.

[33] 刘爱菊, 孔繁翔, 王栋. 太湖底泥疏浚的水环境质量风险性分析[J]. 环境科学, 2006, **27**(10): 1946-1952.

[34] 钟继承, 范成新. 底泥疏浚效果及环境效应研究进展[J]. 湖泊科学, 2007, **19**(1): 1-10.