

太湖东部不同类型湖区底泥疏浚的生态效应*

毛志刚¹, 谷孝鸿^{1**}, 陆小明², 曾庆飞¹, 谷先坤^{1,3}, 李旭光^{1,3}

(1: 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)

(2: 江苏省水利学会, 南京 210029)

(3: 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为研究底泥生态疏浚对太湖东部不同类型湖区水生生态系统的影响, 2012年8月于东太湖养殖湖区和胥口湾草型湖区采集沉积物和生物样品, 分析疏浚对底泥污染控制、水质改善以及各生物群落结构的影响。结果表明, 底泥疏浚能有效去除表层沉积物中的营养物质, 降低底泥重金属含量及其潜在生态风险, 但底泥疏浚对不同类型湖区水质和生物群落结构的影响存在明显差别。在富营养化较严重的东太湖养殖湖区, 底泥疏浚达到了一定的改善水质的效果, 浮游植物密度、生物量均不同程度降低, 且群落中蓝藻所占比例下降; 水生植物和底栖动物群落也在较短时间内得到恢复; 胥口湾草型湖区的底泥疏浚则破坏了原先良好的水生植物群落, 造成湖区整体水质下降, 各主要生物类群的恢复相对缓慢。

关键词: 生态疏浚; 沉积物; 水质; 水生生物; 太湖

Ecological effects of dredging on aquatic ecosystem in the different regions of eastern Lake Taihu

MAO Zhigang¹, GU Xiaohong¹, LU Xiaoming², ZENG Qingfei¹, GU Xiankun^{1,3} & LI Xuguang^{1,3}

(1: *State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China*)

(2: *Jiangsu Provincial Hydraulic Engineering Society, Nanjing 210029, P. R. China*)

(3: *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P. R. China*)

Abstract: In order to investigate the ecological effects of dredging on aquatic ecosystem in the different regions of the eastern Lake Taihu, the water, sediments and biological samples in eastern Lake Taihu (aquaculture lake region) and Xukou Bay (macrophyte-dominated region) were collected in August, 2012. Contents of nutrients and heavy metals in sediments and water quality parameters were measured, and the phytoplankton, zooplankton and benthos communities (including species composition, density and biomass) also were investigated. The results showed that dredging was a useful approach for lowering nutrients and heavy metals loading in sediments, but its effectiveness had gradually decreased with the end of dredging. The Hakanson potential ecological risk index also indicated that sediment dredging could reduce the extent of potential ecological risk. There were obvious differences between the effects of the dredging to water quality and aquatic organisms in different lake regions. The water quality had been improved in the dredged areas of the eastern Lake Taihu, and both density and biomass of the phytoplankton had been decreased compared with the un-dredged areas. The macrophyte and benthic communities had also been restored quickly in a short period. On the contrary, the sediment dredging in the macrophyte-dominated region of Xukou Bay destroyed the healthy macrophyte community, which caused the water quality deterioration and slow restoration of aquatic organism.

Keywords: Ecological dredging; sediment; water quality; aquatic organisms; Lake Taihu

太湖作为我国第三大淡水湖泊, 在整个流域的洪涝控制、水资源供应、渔业及旅游等方面都发挥着重

* 国家科技支撑计划项目(2012BAD25B06)和江苏省水利科技项目(2011071)联合资助。2013-05-16 收稿; 2013-06-17 收修改稿。毛志刚(1984~), 男, 博士, 助理研究员; E-mail: zgmao@niglas.ac.cn.

** 通信作者; E-mail: xhgu@niglas.ac.cn.

要作用^[1]. 但自 1980s 以来, 由于太湖流域经济快速粗放式发展, 导致工农业及城市生活污水随河道排入湖体, 造成氮、磷和重金属等污染物在底泥中大量蓄积^[2]. 太湖东部湖区是其周边城市最重要的饮用水源地之一, 然而太湖整体水质的迅速恶化以及底泥污染物的大量蓄积对饮用水源地的水质安全构成了严重的威胁^[3].

底泥疏浚是采用水力或机械方法疏挖表层污染的底泥, 并进行输移处理的一种工程措施. 作为水体内源污染治理的重要途径之一, 底泥疏浚广泛应用于河口、水库及湖泊等水体的富营养化治理及底泥污染物去除^[4-5]. 近年来, 为改善饮用水的质量与湖泊生态环境, 太湖东部湖区也开展了一系列的底泥疏浚工程, 包括胥口湾水源地生态清淤和东太湖航道疏浚工程等. 但是, 湖泊底泥疏浚也可能引起一系列生态环境问题, 例如氮、磷营养盐和重金属等有毒物质的释放、沉积物再悬浮以及底栖动物等生物群落结构的破坏等^[6-7].

目前, 国内外学者在底泥疏浚后水质的改善、内源释放的过程和机理以及对浮游生物、底栖动物等生物群落的影响方面均开展了大量研究^[8-10], 但疏浚工程的整体生态效应评价以及水生生态系统对底泥疏浚的响应却缺乏足够的研究. 以往相关研究主要关注疏浚对底泥污染物质的控制效果, 如王栋等^[9]发现疏浚导致的底泥重金属释放在短期内可能会对水体环境造成一定程度的生态压力; 钟继承等^[11]则发现底泥疏浚是削减沉积物内源磷负荷的有效手段; 刘国锋等^[12]也分析了底泥疏浚对竺山湖底栖生物群落结构变化及水质的影响. 上述研究较多地关注底泥疏浚的短期环境效应, 而未涉及疏浚后的长期综合生态效应分析, 且以太湖为对象的研究多集中在污染较为严重的北部湖区. 本文结合太湖东部湖区的生态疏浚工程, 分析不同类型湖湾疏浚后浮游生物、底栖动物等生物群落结构的变化趋势, 研究底泥中营养物质与重金属的分布规律及潜在生态风险, 以此探讨底泥疏浚工程的整体生态环境效应, 旨在为湖泊富营养化治理与水生生态系统修复提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 采样点设置

研究区域如图 1 所示, 其中胥口湾为草型湖区, 水生植被丰富, 水质清澈, 2003 年为建设湿地度假村对湖湾部分区域实施了底泥疏浚; 东太湖是上海、苏州等城市的重要饮用水源地, 但近年来迅速发展的网围养殖带来一系列的水环境问题^[13]. 本次调查选择东太湖 (D_1 、 D_2 、 D_3) 和胥口湾 (X_1 、 X_2) 的底泥疏浚区与未疏浚区 (根据疏浚工程施工图及 GPS 定位确定 5 个采样点位置), 并于 2012 年 8 月采集沉积物与生物样品 (图 1). 与一般工程疏浚相比较, 生态疏浚采用了一系列清洁生产工艺, 准确控制疏浚深度和疏浚方式, 注重疏浚湖区水生生态系统的恢复与重建. 东部湖区各点位疏浚工程的实施时间为 2003、2004 和 2010 年, 采用环

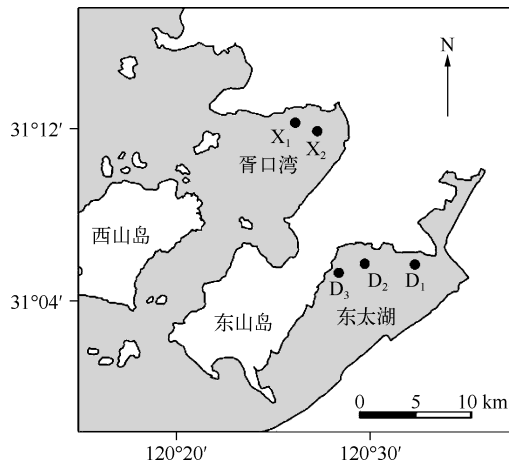


图 1 太湖东部疏浚湖区采样点分布

Fig. 1 Distribution of sampling sites in the eastern dredging region of Lake Taihu

绞吸式挖泥船进行疏浚,工程疏浚深度为 20~30 cm(表 1)。

表 1 太湖东部疏浚湖区点位描述与水生植物分布特征

Tab. 1 Description of sampling sites and distribution characteristics of aquatic macrophytes in the eastern dredging region of Lake Taihu

| 点位 | 疏浚时间 | 疏浚深度/ cm | 水生植物 | | |
|----------------|--------|-------------|--------------------------|------|--------------------------|
| | | | 生物量/(kg/m ²) | 盖度/% | 种类组成 |
| D ₁ | 未疏浚 | — | 1.13 | 55 | 狐尾藻/苦草/荇菜/金鱼藻/野菱 |
| D ₂ | 2010 年 | 20 | 0.83 | 25 | 狐尾藻/荇菜/野菱/金鱼藻 |
| D ₃ | 2004 年 | 30 | 4.44 | 90 | 狐尾藻/荇菜/野菱/茭草/芦苇/苦草/小茨藻 |
| X ₁ | 未疏浚 | — | 9.61 | 95 | 微齿眼子菜/荇菜/野菱/金鱼藻/苦草/马来眼子菜 |
| X ₂ | 2003 年 | 30 | 2.89 | 60 | 微齿眼子菜/茭草/金鱼藻/黑藻/小茨藻 |

1.2 沉积物样品采集与分析

使用柱状采泥器采集表层 0~5 cm 沉积物,将样品自然风干后研磨过筛。沉积物总有机碳(TOC)和总氮(TN)采用元素分析仪(CE440)测定;总磷(TP)和重金属元素铬(Cr)、铜(Cu)、镍(Ni)、铅(Pb)和锌(Zn)采用原子发射光谱仪(ICP-AES)测定;砷(As)和汞(Hg)采用原子荧光光谱仪(HG-AFS)测定;镉(Cd)采用石墨炉原子吸收分光光度法测定。

采用瑞典学者 Hakanson^[14]于 1980 年提出的潜在生态风险指数法(risk index, RI)对沉积物重金属进行生态风险评估。RI 计算公式为:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_i^i = \sum_{i=1}^n T_i^i C_i^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \frac{C_d^i}{C_r^i} \quad (1)$$

式中,RI 为潜在生态风险指数; E_i^i 为重金属 i 的潜在生态风险系数; T_i^i 为重金属 i 的毒性响应系数; C_i^i 为重金属 i 的污染系数; C_d^i 为沉积物中重金属 i 的实测含量; C_r^i 为相应重金属 i 的参比值。本研究采用江苏省土壤重金属背景值作为参比(表 2),对太湖东部疏浚湖区的底泥重金属潜在生态风险进行评价。As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 这 8 种重金属对应的毒性系数 T_i^i 分别为 10、30、2.5、40、5、5 和 1。

1.3 水样采集与分析

使用 YSI 水质多参数监测仪自动检测水体的温度、pH 值、溶解氧(DO)等指标;水体中悬浮颗粒物(SS)、总氮(TN)、溶解性总氮(TDN)、总磷(TP)、溶解性总磷(TDP)、铵态氮(NH₄⁺-N)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})和叶绿素 a(Chl. a)等指标的分析参照《湖泊富营养化调查规范》^[15]。各点位水体的卡尔森营养状态指数(TSI)按照蔡庆华等提出的湖泊富营养化评价综合模型进行计算^[16]。

1.4 生物样品采集与分析

使用自制水草采集器采集水生植物,样品采集后去泥、分类、称重,同时采样时目测可见植物的盖度;浮游植物样品使用柱状采水器在水深 20 cm 处采集水样 1 L,现场加入鲁哥试剂固定,静置沉淀 48 h 后浓缩镜检;枝角类和桡足类浮游动物样品使用柱状采水器采集水样 5 L,经过 25[#]浮游生物网过滤获取,用福尔马林溶液固定保存;底栖动物调查采用 1/16 m²彼得森采泥器,底泥经筛网筛洗后置于解剖盘中,将底栖动物捞出,用 10% 福尔马林溶液固定,然后进行种类鉴定、计数和称重。

2 结果与分析

2.1 疏浚对底泥营养盐与重金属含量分布的影响

沉积物中 TOC、TN 和 TP 含量分别介于 6.04~33.02、0.34~3.54 和 0.46~1.11 g/kg 之间(表 2),且整体上东太湖养殖湖区的有机碳及氮、磷含量高于胥口湾的草型湖区。东太湖是太湖水产养殖发达地区,该湖区渔网密布,加上河蟹养殖所需的大量沉水植物衰亡后分解,水体及沉积物受面源营养盐污染较为严重^[13]。底泥疏浚能有效去除东部疏浚湖区表层沉积物中的营养盐含量,其中东太湖疏浚点位 D₂、D₃ 的 TOC、TN 和

TP 含量均低于未疏浚点位 D_1 , 胥口湾疏浚点位 X_2 亦低于未疏浚点位 X_1 . 疏浚时间对表层沉积物碳、氮含量亦有显著影响. 其中疏浚结束时间较长的 D_3 点位, 有机质重新积累, 其沉积物中的 TOC 含量达 16.75 g/kg; 而 2010 年新疏浚点位 D_2 的 TOC 含量较低, 仅为 D_3 的 36.1%.

表 2 太湖东部疏浚湖区表层沉积物营养盐、重金属含量和生态风险指数

Tab. 2 Nutrients and heavy metal contents in surface sediments, and risk index of the eastern dredging region of Lake Taihu

| 点位 | 营养盐/(g/kg) | | | 重金属元素/(mg/kg) | | | | | | | | RI |
|-------|------------|------|------|---------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| | TOC | TN | TP | As | Cd | Cr | Cu | Hg | Ni | Pb | Zn | |
| D_1 | 33.02 | 3.54 | 1.11 | 13.2 | 0.53 | 70.4 | 25.7 | 0.15 | 32.6 | 31.6 | 90.1 | 181.3 |
| D_2 | 6.04 | 0.75 | 0.48 | 9.8 | 0.10 | 48.8 | 11.5 | 0.05 | 18.0 | 17.5 | 50.3 | 51.9 |
| D_3 | 16.75 | 1.98 | 0.91 | 10.4 | 0.19 | 50.1 | 14.6 | 0.06 | 21.3 | 18.6 | 73.5 | 77.2 |
| X_1 | 8.37 | 0.34 | 0.61 | 13.0 | 0.61 | 78.1 | 26.1 | 0.13 | 29.7 | 27.9 | 92.3 | 196.4 |
| X_2 | 12.83 | 1.51 | 0.46 | 10.1 | 0.14 | 71.6 | 17.3 | 0.08 | 24.7 | 16.0 | 69.8 | 69.0 |
| 背景值 | — | — | — | 10.0 | 0.13 | 77.8 | 22.3 | 0.29 | 26.7 | 26.2 | 62.6 | — |

东部湖区未疏浚点位 D_1 和 X_1 表层沉积物中重金属的平均含量由高到低依次为: $Zn > Cr > Pb > Ni > Cu > As > Cd > Hg$, 其中 Cr、Hg 平均含量低于太湖沉积物背景值, As 与背景值相近, Cd、Cu、Ni、Pb、Zn 则高于背景值(表 2). 自 1980s 以来, 太湖流域经济快速发展, 一些工农业生产活动包括金属冶炼加工、化石燃料燃烧以及工业废水和城市生活污水排放等, 均可导致 Cu、Ni、Zn 等重金属进入水体环境并在底泥中沉积和富集^[17]. 8 种重金属之间的相关性分析也表明, 各重金属元素间均呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$), 表明该区域沉积物中的重金属元素间关系密切且具有较好的同源性^[18]. 但东太湖与胥口湾等东部湖区与太湖北部、西部湖区相比, 其重金属含量相对较低, 表明东部湖区受人类活动的影响较小, 重金属污染程度较轻^[19].

底泥疏浚能够显著降低表层沉积物中的重金属含量, 对于疏浚过的点位 D_2 、 D_3 和 X_2 , 所测定的各重金属元素含量总体上均低于未疏浚的 D_1 和 X_1 点位(表 2). 以重金属 Cd 为例, 点位 D_2 和 D_3 沉积物中的 Cd 含量仅为点位 D_1 的 21.0% 和 44.3%, 点位 X_2 中的 Cd 含量则为点位 X_1 的 31.7%. 在水生生态系统中, 由于重金属具有环境持久性且能够在水生生物中富集放大, 是水环境中重要的污染物, 而底泥疏浚能够有效削减沉积物中重金属含量, 减少重金属在水土界面的释放通量^[5]. 根据瑞典学者 Hakanson^[14] 提出的潜在生态风险指数法对沉积物重金属进行生态风险评估, 结果显示各点位表层沉积物的重金属潜在危害程度依次为 $X_1 > D_1 > D_3 > X_2 > D_2$, 其中未疏浚点位胥口湾 X_1 的潜在生态风险高于东太湖 D_1 , 且点位 X_1 、 D_1 均属于中等生态风险, 而疏浚点位 D_2 、 D_3 、 X_2 属于轻微生态风险, 底泥疏浚有效降低了沉积物中的重金属潜在生态风险(表 2). 值得关注的是, 东太湖湖区 2004 年进行过底泥疏浚的点位 D_3 , 其沉积物中的重金属含量明显高于 2010 年新疏浚点位 D_2 , 且其重金属生态风险指数 RI 值亦较高. 这表明随着疏浚结束时间的推移, 水体中的重金属污染物可以随悬浮颗粒物一起沉降到湖泊底部, 或被疏浚后的表层沉积物直接吸附, 因此点位 D_3 经过较长时间的积累后, 重金属污染物重新在疏浚湖区的表层底泥中富集, 疏浚工程对重金属去除的长期生态效应逐渐削弱^[5].

2.2 底泥疏浚对水质的影响

除东太湖点位 D_1 的部分水质指标为 IV 类外, 其他各点位的水质指标基本达到地表水 III 类水标准(表 3). 东太湖和胥口湾两种类型湖区的底泥疏浚对水质造成了不同影响. 东太湖疏浚点位 D_2 、 D_3 水体的 TN、TP、COD_{mn} 和 Chl. a 等指标相对于点位 D_1 均有不同程度的改善, 其水体的卡尔森营养状态指数 (TSI) 也明显下降(表 3), 表明底泥疏浚对该湖区水环境质量的提高与营养盐含量的降低具有一定的促进作用, 这与吴芝瑛等^[20] 对西湖的研究结果相一致. 值得注意的是, 东太湖点位 D_1 相对 D_2 、 D_3 更接近大面积分布的养殖网箱, 该点位受到的面源营养盐污染更为严重, 这也是造成 D_1 点位水质较差的原因之一.

胥口湾草型湖区的水质情况则表现出相反趋势, 疏浚点位 X_2 的多项水质指标劣于未疏浚点位 X_1 , 这主要与胥口湾的水生植物分布特征有关. 未疏浚点位 X_1 的水生植被丰富, 其水草生物量和盖度在各点位中均

最高(表1);点位X₂经过底泥疏浚后,水生植被遭破坏且恢复较慢,其生物量仅为点位X₁的30.1%,而水生植物是维持湖泊水体环境质量的重要组成部分,点位X₂较低的水草生物量削弱了水生植物对其水体的净化功能^[21].综上所述,不同类型湖区的底泥疏浚对水质的影响存在差异,在富营养化较严重的养殖湖区,底泥疏浚通过清除富含营养物质的表层浮泥,减少了底泥中氮磷向水体的释放量;而草型湖区的底泥疏浚则破坏了原有的水生植物群落,造成该湖区水质整体下降.

表3 太湖东部疏浚湖区主要水质参数

Tab. 3 Water quality parameters of the eastern dredging region of Lake Taihu

| 点位 | pH | DO/ (mg/L) | SS/ (mg/L) | TN/ (mg/L) | TDN/ (mg/L) | NH ₄ ⁺ -N/ (mg/L) | TP/ (mg/L) | TDP/ (mg/L) | COD _{Mn} / (mg/L) | Chl. a/ (μg/L) | TSI |
|----------------|------|---------------|---------------|---------------|----------------|--|---------------|----------------|-------------------------------|-------------------|------|
| D ₁ | 8.42 | 5.36 | 15.15 | 1.20 | 0.81 | 0.073 | 0.099 | 0.064 | 6.24 | 11.96 | 64.1 |
| D ₂ | 8.74 | 5.43 | 7.89 | 0.84 | 0.61 | 0.062 | 0.051 | 0.038 | 5.20 | 3.98 | 54.1 |
| D ₃ | 8.76 | 5.93 | 7.06 | 0.95 | 0.69 | 0.089 | 0.077 | 0.033 | 5.84 | 1.86 | 50.0 |
| X ₁ | 8.88 | 7.60 | 1.16 | 0.65 | 0.47 | 0.091 | 0.064 | 0.051 | 4.56 | 1.49 | 48.4 |
| X ₂ | 8.48 | 5.75 | 11.04 | 0.91 | 0.49 | 0.081 | 0.064 | 0.032 | 4.48 | 2.53 | 53.1 |

2.3 底泥疏浚对水生生物群落结构的影响

2.3.1 水生植物群落变化 本次调查在太湖东部疏浚湖区共鉴定出水生植物11种,其中沉水植物7种,浮叶植物2种,挺水植物2种.各点位中植物群丛组成最丰富的为点位D₃和X₁,狐尾藻(*Myriophyllum verticillatum*)、荇菜(*Nymphoides peltata*)和野菱(*Trapa incisa* var. *sieb.*)等水生植物种类在疏浚后的湖区最先出现.除点位D₃的水生植物生物量高于点位D₁外,其他疏浚点位的水草生物量均低于未疏浚点位,其中点位D₂的生物量为D₁的73.1%,点位X₂的生物量为点位X₁的30.1%.水生植物盖度的分布趋势基本与生物量一致,且水草生物量和盖度与其恢复时间表现出明显的正相关关系.

大量研究证明,水生植物的存在能有效控制底泥营养盐的释放,改善水质并遏制水华的发生,但底泥疏浚工程会造成疏浚湖区的水生植物消亡,这可能导致原先以水生植物为主的草型生态系统转化为以浮游植物为主的藻型生态系统^[22].因此,底泥疏浚必须以水生植被的恢复为首要目标,但湖泊沉积物特性、水体营养盐含量等因素则影响着沉水植物的恢复状态.例如,高营养盐负荷易导致水生植物上的附着生物增加,并遏制高等水生植物的生长^[22].对东太湖这类富营养化较严重的湖区进行环保疏浚,改善了水生植物生长的水体环境并减轻了附着生物的影响,因此点位D₃的水生植物群落经过一段时间后不仅完全恢复且生物量高于D₁.但草型湖区胥口湾的底泥疏浚工程不仅破坏了原有的水生植被群落,且引起水质下降(表3),因此该疏浚湖区的水草恢复速度相对较慢.

2.3.2 浮游植物群落变化 本次调查共鉴定出浮游植物66种,隶属7门37属.其中蓝藻门(24种)种类最多,占浮游植物总数的36.4%;其次是绿藻门(16种)和硅藻门(14种),分别占总数的24.2%和21.2%;裸藻门、隐藻门、甲藻门和黄藻门的种类数较少.与未疏浚点位相比,疏浚点位中各类群的种类数有所减少,例如东太湖点位D₁共发现浮游植物34种,而点位D₂和D₃的浮游植物种类数仅为22种和14种.但一些常见种类如蓝藻门的铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)、伪鱼腥藻(*Pseudanabaena limnetica*),绿藻门的河生集星藻(*Actinastrum hantzschii*)以及硅藻门的一种针杆藻(*Synedra* sp.)在疏浚前后均有发现.

东太湖疏浚点位D₂、D₃的浮游植物密度和生物量发生明显变化,其密度相对于点位D₁分别下降了73.2%和74.1%;而胥口湾X₁、X₂的浮游植物密度和生物量差别不明显(图2a).从浮游植物群落结构上看,东太湖点位D₁以蓝藻为主,蓝藻密度占群落总密度的80%以上;疏浚后D₂、D₃的蓝藻比重下降,绿藻比重增加.胥口湾X₁、X₂的浮游植物组成则以绿藻、硅藻和隐藻为主,蓝藻比重较低,表明该湖区的水质相对较好.由于氮、磷营养元素通常是藻类生长的限制因子,浮游植物密度与水体中营养盐浓度变化关系密切,而浮游植物生物量与营养状态指数TSI的相关性分析结果也显示二者呈极显著正相关($P < 0.01$).可见,底泥疏浚通过改善水体富营养化程度,降低了蓝藻生物量及其所占比重,一定程度上缓解了东部疏浚湖区发生蓝藻水华的风险.

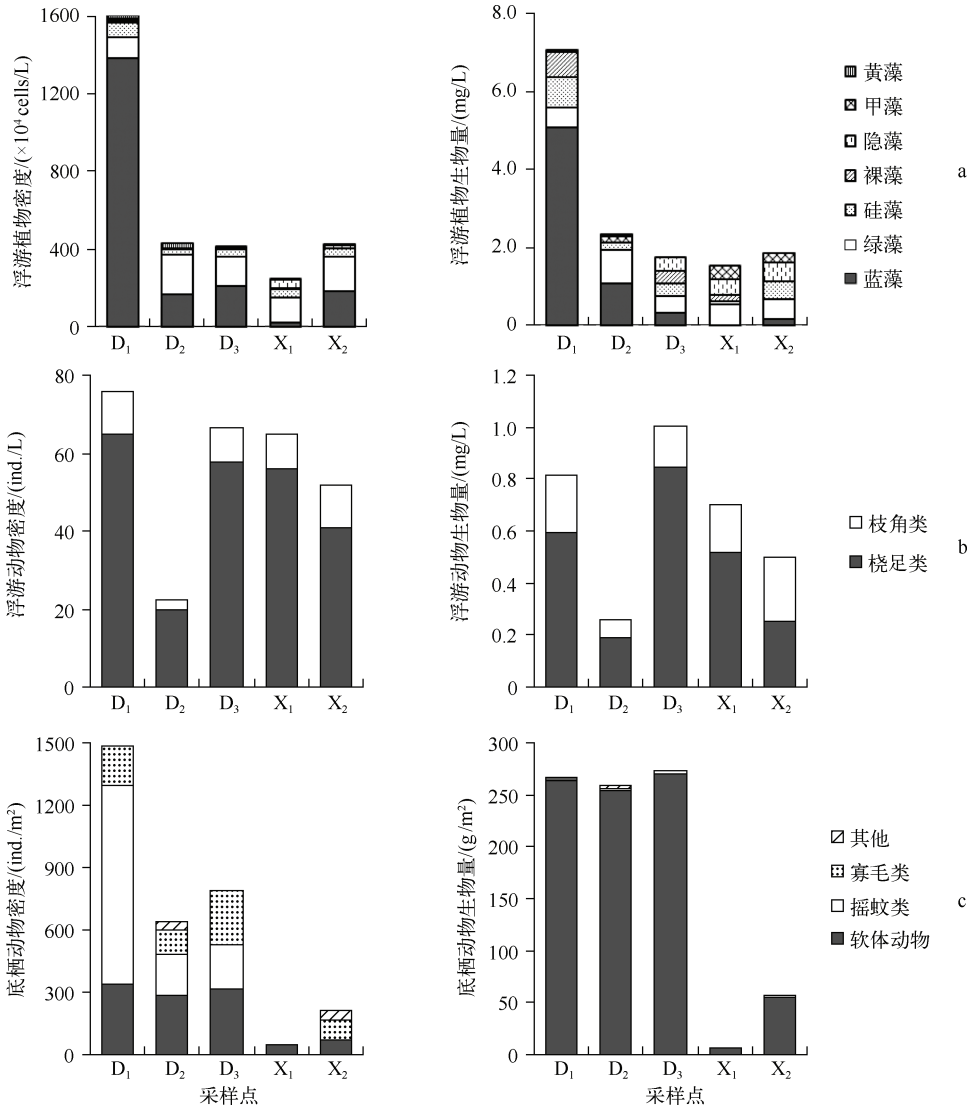


图2 太湖东部疏浚湖区浮游植物(a)、枝角类与桡足类(b)和大型底栖动物(c)密度及生物量

Fig. 2 Density and biomass of phytoplankton(a), Cladocera and Copepoda (b), macrobenthos(c) in the eastern dredging region of Lake Taihu

2.3.3 浮游动物群落变化 整个调查期间,共鉴定出大型浮游动物枝角类7种,桡足类5种.桡足类的优势种除无节幼体与桡足幼体外,主要还有跨立小剑水蚤 (*Microcyclops varicans*)、中华窄腹剑水蚤 (*Limnoidithona sinensis*) 和汤匙华哲水蚤 (*Sinocalanus dorrii*);枝角类的优势种主要有长额象鼻溞 (*Bosmina longirostris*)、短尾秀体溞 (*Diaphanosoma brachyurum*) 和角突网纹溞 (*Ceriodaphnia cornuta*)。

疏浚后枝角类和桡足类的种类数与疏浚前差别不大,但从浮游动物密度和生物量分析来看(图2b),疏浚后东太湖点位D₂的大型浮游动物密度和生物量相对D₁均迅速下降,但D₃的枝角类和桡足类密度与D₁接近.鲁敏等^[23]在东湖开展的研究认为,水体的营养状况及滤食性鱼类的捕食压力是导致浮游甲壳动物群落产生空间差异的主要因素.未疏浚点位D₁的水体营养水平和藻类生物量相对D₂较高(图2a,表3),浮游动物的食物更为充足,而各点位间枝角类和桡足类生物量的总和也与水体中的TP、NH₄⁺-N含量具有较高的相

关性($r=0.752$ 和 $r=0.821$, $n=5$).水生植物的分布特征也是影响浮游动物群落组成的生物因子,作为浮游动物躲避鱼类捕食的避难所,大面积分布的水生植物可以降低枝角类和桡足类这些大型浮游动物被鱼类捕食的机率^[24],这可能也是点位 D_3 的浮游动物密度和生物量高于点位 D_2 的重要原因.

2.3.4 底栖动物群落变化 调查期间共鉴定到底栖动物12种,隶属7科10属,其中软体动物6种,摇蚊类3种,寡毛类2种.与未疏浚点位相比,疏浚点位中各类群的种类数有所减少,但一些常见种类如铜锈环棱螺(*Bellamyia aeruginosa*)、长角涵螺(*Alocinma longicornis*)、霍甫水丝蚓(*Limnodrilus hoffmeisteri*)和羽摇蚊(*Chironomus plumosus*)均在疏浚湖区出现.Kenny等^[25]也发现疏浚后丧失的生物种群为疏浚前具有较低丰度或稀有的生物种群,而那些主导性或代表性的生物种群则会在底泥疏浚后最先出现.

疏浚湖区的底栖动物群落在较短时间内得到恢复,其中东太湖疏浚点位 D_2 、 D_3 的底栖动物生物量均接近或达到点位 D_1 ;但密度仅为点位 D_1 的42.7%和53.2%.各底栖生物类群在群落中所占的比例亦有所变化,摇蚊类密度的比重从点位 D_1 的64.5%下降到 D_2 、 D_3 的30.2%、27.3%,而软体动物和寡毛类的比重增加;从生物量来看,软体动物因其形体较大而表现为生物量比重远高于摇蚊类和寡毛类(图2c).胥口湾疏浚点位 X_2 的底栖动物生物量则远高于 X_1 ,这可能是由于腹足纲螺类常刮食水草上的附着藻类,而点位 X_1 丰富的沉水植物改变了螺类在湖底的栖息空间^[26].底泥疏浚工程往往会彻底改变底栖生境,其对大型底栖动物群落的短期影响一般表现为种类、丰度及生物量的减小;但从太湖东部湖区底栖动物群落的恢复情况来看,疏浚后的底质环境更有利于底栖动物群落的生存和稳定.底栖动物群落的恢复往往需要较长的时间,但其恢复速度也会因底泥环境状况、疏浚方式及疏浚深度等发生较大变化^[5].太湖东部湖区的生态疏浚工程严格控制疏浚深度和疏浚方式,这也是该湖区底栖生态系统在较短时间内得以恢复与重建的关键.

3 结论

1) 太湖东部不同类型湖区各疏浚点位的营养盐和重金属含量均低于未疏浚点位,表明底泥生态疏浚工程能显著去除湖底的表层浮泥及营养物质,并有效削减沉积物中的重金属含量;潜在生态风险指数法的评价结果也表明底泥疏浚降低了沉积物中的重金属潜在生态风险,但底泥疏浚对营养盐及重金属的去除效果随疏浚结束时间的推移逐渐减弱.

2) 不同类型湖区间的底泥疏浚对水质和生物群落的影响存在差别.东太湖养殖湖区的底泥疏浚达到了一定的改善水质的效果,浮游植物密度、生物量均出现不同程度的降低,且群落中蓝藻所占比例下降;水生植物和底栖动物群落也在较短时间内得到恢复.胥口湾草型湖区的底泥疏浚则破坏了原先良好的水生植物群落,造成湖区整体水质下降,主要生物群落的恢复相对缓慢.

3) 底泥疏浚工程适合在富营养化较严重的湖区开展,通过去除污泥及改善湖区整体水质,最终能够取得较好的生态效应;但在草型湖区进行底泥疏浚会造成一定的负面生态效应.同时,严格控制底泥疏浚深度也是疏浚湖区水生生态系统快速恢复与重建的关键.

致谢:本工作得到江苏省太湖渔业管理委员会办公室的支持,在此谨致谢忱!

4 参考文献

- [1] 孙顺才,黄漪平.太湖.北京:海洋出版社,1993:1-10.
- [2] Qin BQ, Xu PZ, Wu QL et al. Environmental issues of Lake Taihu, China. *Hydrobiologia*, 2007, **581**: 3-14.
- [3] 刘聚涛,杨永生,姜加虎等.太湖蓝藻水华灾害风险分区评估方法研究.中国环境科学,2011,**31**(3):498-503.
- [4] Søndergaard M, Jeppesen E, Lauridsen TL et al. Lake restoration; successes, failures and long-term effects. *Journal of Applied Ecology*, 2007,**44**:1095-1105.
- [5] 郑金秀,胡春华,彭祺等.底泥生态疏浚研究概况.环境科学与技术,2007,**30**(4):110-114.
- [6] 钟继承,范成新.底泥疏浚效果及环境效应研究进展.湖泊科学,2007,**19**(1):1-10.
- [7] 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.中国环境科学,2006,**26**(5):565-569.
- [8] Reddya KR, Fishera MM, Wanga Y et al. Potential effects of sediment dredging on internal phosphorus loading in a shallow, subtropical lake. *Lake and Reservoir Management*, 2007, **23**: 27-38.
- [9] 王栋,孔繁翔,刘爱菊等.生态疏浚对太湖五里湖湖区生态环境的影响.湖泊科学,2005,**17**(3):263-268.

- [10] 姜霞,王雯雯,王书航等. 竺山湾重金属污染底泥环保疏浚深度的推算. 环境科学, 2012, **33**(4):1189-1197.
- [11] 钟继承,刘国锋,范成新等. 湖泊底泥疏浚环境效应: I. 内源磷释放控制作用. 湖泊科学, 2009, **21**(1):84-93.
- [12] 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. 环境科学, 2010, **31**(11):2645-2651.
- [13] 谷孝鸿,王晓蓉,胡维平. 东太湖渔业发展对水环境影响及其生态对策. 上海环境科学, 2003, **22**(5):702-704.
- [14] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control—A sedimentological approach. *Water Research*, 1980, **14**(8):975-1001.
- [15] 金相灿,屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范:第2版. 北京:中国环境科学出版社,1990.
- [16] 蔡庆华,刘建康,King L. 评价湖泊富营养化的一个综合模型. 应用生态学报, 2002, **13**(12):1674-1678.
- [17] 陈璐璐,周北海,徐冰冰等. 太湖水体典型重金属镉和铬含量及其生态风险. 生态学杂志, 2011, **30**(10):2290-2296.
- [18] 贺志鹏,宋金明,张乃星等. 南黄海表层海水重金属的变化特征及影响因素. 环境科学, 2008, **29**(5):1153-1162.
- [19] Qu WC, Dickman M, Wang S. Multivariate analysis of heavy metal and nutrient concentrations in sediments of Taihu Lake, China. *Hydrobiologia*, 2001, **450**:83-89.
- [20] 吴芝瑛,虞左明,盛海燕等. 杭州西湖底泥疏浚工程的生态效应. 湖泊科学, 2008, **20**(3):277-284.
- [21] 秦伯强,胡维平,刘正文等. 太湖水源地水质净化的生态工程试验研究. 环境科学学报, 2007, **27**(1):5-12.
- [22] 秦伯强. 湖泊生态恢复的基本原理与实现. 生态学报, 2007, **27**(11):4848-4858.
- [23] 鲁敏,谢平. 武汉东湖不同湖区浮游甲壳动物群落结构的比较. 海洋与湖沼, 2002, **33**(2):174-181.
- [24] Kornjów R, Vakkilainen K, Horppila J *et al.* Impacts of a submerged plant (*Elodea canadensis*) on interactions between roach (*Rutilus rutilus*) and its invertebrate prey communities in a lake littoral zone. *Freshwater Biology*, 2005, **50**:262-276.
- [25] Kenny AJ, Rees HL. The effects of marine gravel extraction on the macrobenthos: Results 2 years post-dredging. *Marine Pollution Bulletin*, 1996, **32**:615-622.
- [26] Brönmark C. How do herbivorous freshwater snails affect macrophyte? A comment. *Ecology*, 1990, **71**(3):1212-1215.