*J. Lake Sci.*(湖泊科学), 2008, **20**(3): 277-284
http://www.jlakes.org. E-mail: jlakes@niglas.ac.cn
©2008 by *Journal of Lake Sciences*

# 杭州西湖底泥疏浚工程的生态效应*

吴芝瑛[1], 虞左明[2**], 盛海燕[2], 徐　骏[1], 韩轶才[2], 许云台[2], 冯　宁[2], 姚佳玫[2]
(1: 杭州西湖水域管理处, 杭州 310002)
(2: 杭州市环境保护科学研究院, 杭州 310014)

**摘　要**: 杭州西湖一直被富营养化问题所困扰. 迄今为止, 先后采用了多种工程措施进行治理. 通过对杭州市政府 1999–2002 年对西湖实施的底泥疏浚工程前后沉积物中营养物质含量、水质以及水生生物群落各主要类群等方面的研究, 评价了此次工程对减轻西湖的营养盐内负荷、控制湖泊富营养化的效果, 探讨该工程的生态风险及对西湖水生生态系统重建的影响. 研究结果表明: 疏浚工程降低了西湖各层沉积物中的有机物、氮和磷含量, 尤其是沉积物表层 10cm 中的有机质、总氮和有机磷含量均有明显的下降; 疏浚后西湖水体与富营养化相关的主要指标均有不同程度的改善; 水体中浮游植物密度、生物量有不同程度的降低, 群落中蓝藻比例下降; 浮游动物群落的种类有所增加; 疏浚后底栖大型无脊椎动物群落快速恢复; 疏浚后的水生生物群落指示水体富营养化程度有所减轻.
**关键词**: 疏浚; 富营养化; 沉积物; 水生生物; 杭州西湖

## Ecological effects of the dredging in the West Lake, Hangzhou

WU Zhiying[1], YU Zuoming[2], SHENG Haiyan[2], XU Jun[1], HAN Yicai[2], XU Yuntai[2], FENG Ning[2] & YAO Jiamei[2]
(1: *Management of Water Area of the West Lake*, *Hangzhou* 310002, *P.R.China*)
(2: *Institute of Environmental Protection Science*, *Hangzhou* 310014, *P.R.China*)

Abstract: The West Lake, a famous scenic spot for tourists in China, is a small shallow eutrophic lake. However, the lake has been suffering from eutrophication from year to year and its beauty is marred by low transparency of the water. To control its eutrophication, a great deal funds had been invested and some projects had been organized by the government in the past twenty years. The effects of these projects were not satisfactory and the eutrophication is still progressing. Thus, the average depth 0.5m of silt on the bottom of the West Lake was dredged largely from 1999 to 2002. During the Jan. 1999 to Dec. 2000, the N and P of the sediment and water quality were surveyed, the phytoplankton, zooplankton and benthos communities (including species composition and density　biomass) were investigated in the West Lake. To compare the investigated result with previous results and data (before the dredging), the succession of the communities was discussed. Further, the ecological effect of the dredging and the present trophic state of the lake were evaluated. The results showed that the N and P content in the sediment were decreased after the dredge, the water quality had been improved obviously, and the density in the phytoplankton community and the chlorophyll-a concentrations had decreased obviously comparing those in 1999, and the trophic level also had decreased in main lake areas.
Keywords: Dredge; eutrophication; sediment; hydro-organism; West Lake, Hangzhou

西湖是国际著名的风景旅游湖泊, 杭州也因此而闻名于世. 在过去的半个多世纪, 西湖一直被富营养化问题所困扰. 杭州市政府为此投入了大量的人力、物力, 包括环湖截污、引钱塘江水入湖等一系列工程措施, 使影响西湖的外污染源得到有效的治理[1-2]. 在外源基本得到控制的情况下, 富含营养盐的沉积物成为西湖水质改善的主要限制因子. 与国内其它湖泊相比[3], 西湖沉积物中营养物含量非常高, 有机

*　2007–03–28 收稿; 2007–12–19 收修改稿. 吴芝瑛, 女, 1963 年生, 高级工程师.
**　通讯作者; E-mail: yuzm@hzhky.com.

质含量为 24.95%–68.7%, 总氮含量为 0.933%–1.264%, 总磷含量为 0.375%–0.416%, 清除沉积物已成为控制西湖富营养化的重要途径之一. 本次疏浚工程分两期进行, 一期工程实施时间为 1999 年 12 月–2000 年 9 月, 历时 9 个月, 采用海狸 750 型绞吸式挖泥船, 疏浚范围为外湖的大部分湖区; 二期工程实施时间为 2001 年 11 月–2003 年 4 月, 历时 17 个月, 采用海狸 1200 型环保绞吸式挖泥船, 对其余湖区进行疏浚. 工程主要清除表层约为 0.5m 的淤泥. 作者通过对工程前后西湖沉积物的营养物质含量、湖区水质及水生生物群落各主要类群的变化等方面的研究, 评价该工程对减轻西湖的营养盐内负荷、控制富营养化的效果以及所产生的生态效应.

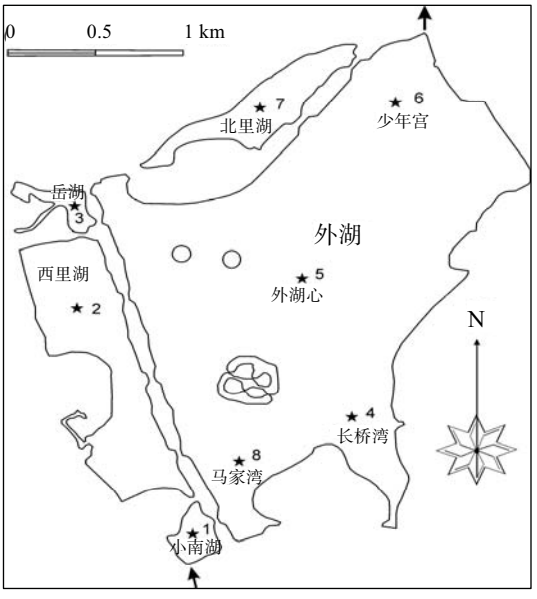


图 1 西湖采样位点示意

Fig.1 Sampling sites in West Lake

## 1 材料和方法

### 1.1 实验样点的设置

采样点位的设置按照《湖泊富营养化调查规范》[4], 结合西湖水域日常监测点位, 在湖内共布置 8 个监测点, 外湖设置 4 个, 其余 4 个湖区各设置 1 个, 监测点位如图 1.

### 1.2 底泥样品的采集与分析

在疏浚前后, 用柱状采样器获取西里湖(2#)、湖心(5#)、少年宫(6#)3 个点的柱状样各 2 份, 疏浚前从上至下分 0–10cm、10–25cm、25–40cm、40cm 以下共 4 层, 疏浚后由于水深加大、下层沉积物变硬, 采集的柱状样只能分 3 层, 分别为: 0–10cm、10–25cm、25cm 以下层. 泥样经风干、过 60 目筛后, 备用. 相关沉积物理化分析参照《湖泊富营养化调查规范》进行; 有关营养盐形态分析、沉积物磷释放实验参考国内外相关文献[5-7].

### 1.3 水质样品的采集与分析

水样采集及常规理化项目分析, 按照《水和废水监测分析方法》进行[8].

### 1.4 生物样品的采集与分析

疏浚前和疏浚后均是每月采集一次样品进行分析, 然后取年平均值进行比较.

浮游生物样品采集及分析, 按《淡水浮游生物研究方法》等文献的方法进行[9-11].

底栖大型无脊椎动物调查使用 15cm×15cm 的艾克曼式采样器采集泥样, 用 60 目不锈钢筛网筛洗, 按常规方法捡出底栖动物, 在显微镜和解剖镜下分类、计数. 生物量以湿重表示, 称重使用精度为 0.1mg 的电子天平.

### 1.5 湖泊营养状况评价

采用修正的卡尔森营养状态指数(TSIM), 对西湖富营养化程度进行评价[12].

## 2 结果与讨论

### 2.1 沉积物营养物质含量变化

2.1.1 沉积物有机质含量的变化 疏浚的主要目的是清除富含营养盐的表层沉积物, 检测结果表明, 经过疏浚西湖表层沉积物有机质的含量明显下降, 少年宫由 68.7%下降到 25.04%, 湖心区由 34.48%下降到 12.15%, 西里湖由 24.95%下降到 19.15%(图 2a).

2.1.2 沉积物氮含量的变化 经过疏浚西湖表层沉积物总氮含量明显下降, 疏浚之后湖心区表层沉积物总氮含量下降了 64.2%, 西里湖区下降了 14.3%, 少年宫湖区下降了 28.4%(图 2b).

2.1.3 沉积物磷含量的变化 沉积物中总磷含量及有机磷含量在疏浚前后的变化, 如图 3 所示. 对于湖心区和少年宫湖区而言, 疏浚大大降低了表层沉积物的总磷含量和有机磷的含量. 但是疏浚前后西里湖的 TP

和 Org-P 的下降幅度较小, 尤其是表层沉积物 TP 的含量还有所增加, TP 由疏浚前的 3.75 ± 0.08g/kg 反而增加到疏浚后的 3.88 ± 0.34g/kg, 增加了 3%, Org-P 则由疏浚前的 3.28 ± 0.12g/kg 下降到疏浚后的 2.94 ± 0.06g/kg, 降低了 10%, 明显低于其余两个湖区.

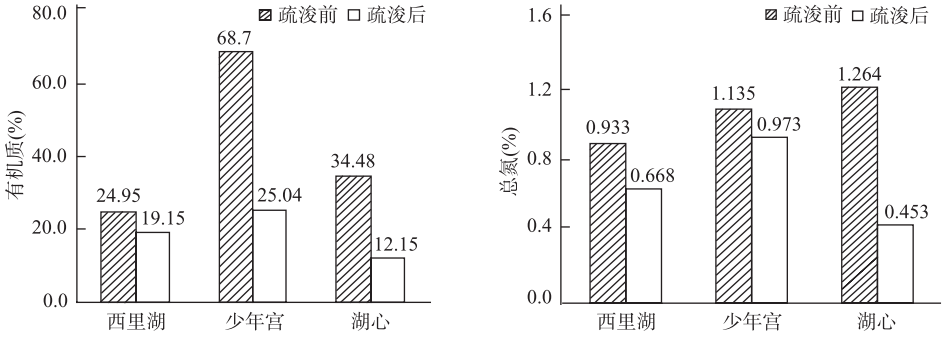


图 2 疏浚前后西湖沉积物有机质和总氮的变化

Fig.2 Variation of organic mater and TN in sediment in West Lake before and after dredging

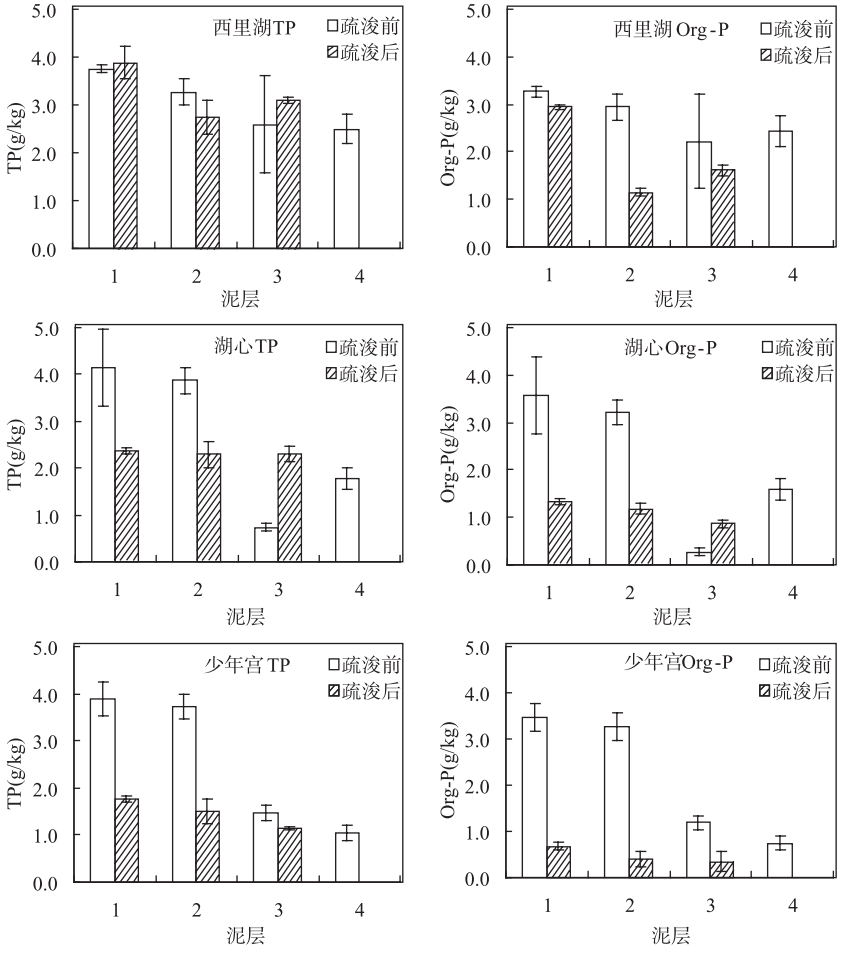


图 3 疏浚前后西湖沉积物 TP 和 Org-P 含量的变化

Fig.3 Variation of TP and Org-P in sediment in West Lake before and after dredging

值得注意的是, 尽管疏浚前后一些湖区 TP 和 Org-P 的含量大幅度下降, 但是与国内其他城市湖泊相比, 西湖表层沉积物中磷的含量仍属较高水平. 如太湖的五里湖重富营养化湖区, 沉积物 TP 的含量也在 2.0g/kg 以下, 而太湖的其他富营养化湖区沉积物 TP 含量则基本在 1.0g/kg 以下.

### 2.2 疏浚前后水质的变化

疏浚后西湖水质有所改善, 除总氮超过Ⅳ类水质指标外, 其它指标均达到Ⅳ类水体的要求. 水体透明度、悬浮物(SS)、高锰酸盐指数、生化需氧量、总氮、氨氮、硝酸盐氮、总磷、可溶性磷、叶绿素 a 等指标均有不同程度的改善(表 1).

表 1 疏浚前后西湖主要水质指标的变化 (mg/L)

Tab.1 Variation of water quality index in West Lake before and after dredging (mg/L)

| | SS | $COD_{Mn}$ | $BOD_5$ | TN | TP | DP | $NH_3$-N | Chl.a | TOC |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 疏浚前 | 26.76 | 6.63 | 5.04 | 2.37 | 0.123 | 0.014 | 0.69 | 0.099 | 9.82 |
| 疏浚后 | 18.60 | 5.25 | 3.80 | 2.18 | 0.084 | 0.012 | 0.45 | 0.063 | 8.58 |

根据修正的卡尔森指数法计算的各湖区疏浚前后的营养状况指数(表 2), 各子湖的营养状态改善程度有所差异, 北里湖的 TSI 指数下降了 5.18, 西里湖下降了 4.55, 小南湖下降了 3.38, 外湖下降了 1.69.

反映出疏浚后西湖水域的营养状况得到一定程度改善, 本次的底泥疏浚工程有助于西湖水质的进一步改善及富营养化控制. 从主要水质指标和营养状况指数的变化可以反映疏浚前后西湖水域的营养状况变动, 以及底泥疏浚工程在改善浅水湖泊富营养化方面所产生的积极效果.

表2 疏浚前后西湖各子湖的卡尔森营养状态指数变化

Tab.2 Variation of TSI in different area of West Lake before and after dredging

| 湖区 | 年份 | TSIM (Chl.a) | TSIM (SD) | TSIM (TP) | TSI |
|---|---|---|---|---|---|
| 小南湖 | 1999 | 61.82 | 68.60 | 63.48 | 66.04 |
| | 2003 | 57.47 | 65.09 | 65.41 | 62.66 |
| 西里湖 | 1999 | 75.68 | 78.42 | 70.91 | 74.67 |
| | 2003 | 70.39 | 73.38 | 66.58 | 70.12 |
| 岳湖 | 1999 | 73.77 | 75.21 | 71.40 | 73.31 |
| | 2003 | 71.32 | 76.09 | 71.51 | 72.97 |
| 北里湖 | 1999 | 75.12 | 81.93 | 77.54 | 79.73 |
| | 2003 | 73.32 | 78.90 | 71.42 | 74.55 |
| 外湖 | 1999 | 75.42 | 77.91 | 71.31 | 74.61 |
| | 2003 | 71.26 | 77.41 | 70.10 | 72.92 |
| 全湖平均 | 1999 | 72.36 | 76.41 | 70.93 | 73.67 |
| | 2003 | 68.75 | 74.17 | 69.00 | 70.64 |

### 2.3 疏浚前后水生生物群落变化

2.3.1 浮游植物群落变化 对 1999–2003 年五年间所采集样本进行了定性和定量的鉴定, 结果表明(图 4), 全湖共有浮游植物 218 种(包括变种), 隶属于 7 门 97 属. 种类最多的是绿藻门, 有 38 属 92 种, 占全部种类的 41.9%, 其次是硅藻门, 24 属 53 种, 占 25.2%, 再次是蓝藻门, 共 18 属 45 种, 占 20.3%. 裸藻门、甲藻门、金藻门和隐藻门的种类较少, 分别为 3 属 11 种、3 属 6 种、3 属 6 种和 2 属 5 种, 这 4 个门的种类之和只占全部种类的 12.6%.

浮游植物个体数量占绝对优势的是蓝藻门的一些种. 优势种为浮游蓝丝藻(*Planktothrix* sp. )、中华尖头藻(*Raphidiopsis sinensia*.)和微小平裂藻(*Merismopedia tenuissima*.), 年均个体数量在 $10^7$–$10^8$cells/L 左右.

西湖中分布频率较高的亚优势种有蓝藻门的曲氏平裂藻(*Merismopedia trolleri*.)和螺旋鞘丝藻(*Lyngbya contorta*.), 绿藻门的四尾栅藻(*Scenedesmus quadricauda*.), 硅藻门的尺骨针杆藻(*Synedra ulna*.)、尖针杆藻(*Synedra acus*.)、放射针杆藻(*Synedra berolinensis*.)、缢缩脆杆藻(*Fragilaria construens*.)、颗粒直链藻(*Melosira granulata*.)和冠盘藻(*Stephanodiscus hantzschii*.), 这些种类的年均个体数量在 $10^6$ cells/L 左右. 此外, 隐藻门的啮蚀隐藻(*Cryptomonas erosa*.)和尖尾蓝隐藻(*Chroomonas acuta*.)在某些季节或某些湖区也具相当的优势.

疏浚前后西湖浮游植物群落结构稍有变化, 总体上仍属蓝藻(丝状蓝藻)型, 蓝藻数量占群落总数量的 50%以上, 近几年硅藻丰度逐步上升, 超过了绿藻, 成为西湖浮游植物的第二大类群, 同时, 隐藻的数量也有所增加. 从群落密度看浮游植物群落结构由疏浚前的蓝藻—绿藻—硅藻型演变为疏浚后的蓝藻—硅藻—隐藻型. 蓝藻丰度降低预示着富营养化程度的改善, 表明西湖水质向好的方向转变(图 5).

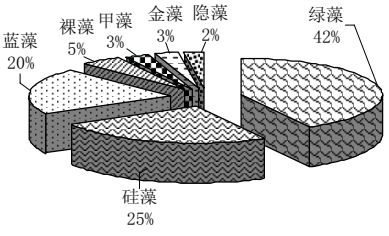


图 4 西湖浮游植物各门种类组成和百分比

Fig.4 Phytoplankton groups and percentage in West Lake

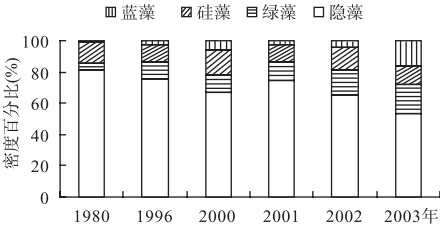


图 5 西湖浮游植物群落结构动态变化

Fig.5 Dynamics of phytoplankton community structure in West Lake

疏浚工程对浮游植物密度影响较为明显(图 6), 疏浚后北里湖、小南湖、西里湖、外湖的藻类密度下降明显, 分别下降了 48.40%、45.49%、44.93%、42.97%.

图 7 显示西湖底泥疏浚前后各个子湖的叶绿素 a 浓度变化情况, 西里湖下降幅度最大, 达 38.7%, 依次是: 小南湖、外湖和北里湖, 分别下降 32.9%、31.67%、30.76%, 岳湖(没有疏浚)的情况基本没变.

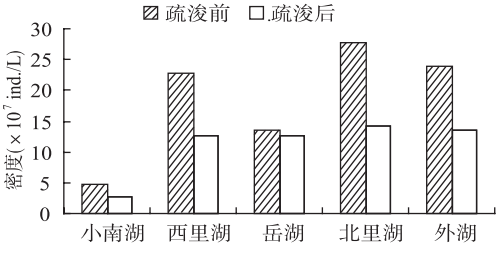


图 6 疏浚前后各子湖区浮游植物群落密度变化

Fig.6 Variation of phytoplankton community density in different area of West Lake before and after dredging

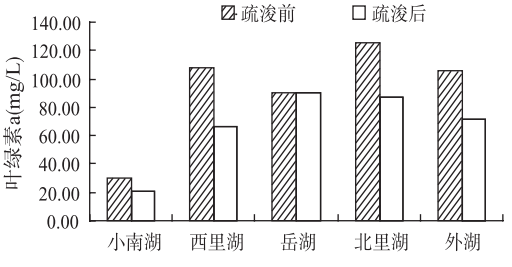


图 7 疏浚前后西湖各子湖区的叶绿素 a 的变化

Fig.7 Variation of chlorophyll-a in different area of West Lake before and after dredging

2.3.2 *浮游动物群落变化* 疏浚后, 定量样品中共发现西湖浮游动物 69 种(原生动物 26 种, 轮虫 27 种, 枝角类和桡足类各 8 种). 西湖浮游动物平均密度为 6518ind./L, 其中原生动物占 63.4%, 轮虫 36.1%, 枝角类 0.1%, 桡足类 0.4%.

疏浚后西湖浮游动物群落中轮虫的种类数在西里湖增加了 5 种, 其余各湖区均增加 2 种, 全湖增加 5 种. 轮虫优势种在疏浚前后也发生了变化, 疏浚前西湖轮虫密度优势种排列顺序分别为暗小异尾轮虫

(*Trichocerca pusilla*)、裂痕龟纹轮虫(*Anuraeopsis fissa*)、针簇多肢轮虫(*Polyarthra trigla* )和迈氏三肢轮虫(*Filinia maior*), 疏浚后优势种次序变为针簇多肢轮虫、暗小异尾轮虫、细异尾轮虫(*T. Gracilis*)和裂痕龟纹轮虫. 轮虫生物量优势种不变, 仍为晶囊轮虫(*Asplanchna* spp.).

从轮虫密度和生物量分析(图 8), 疏浚后西湖轮虫平均密度比疏浚前略有下降, 而平均生物量比疏浚前略有上升, 这主要是由于个体较大的晶囊轮虫(*Asplanchna* spp.)由疏浚前的 14.6ind./L 增加到疏浚后 21.8ind./L.

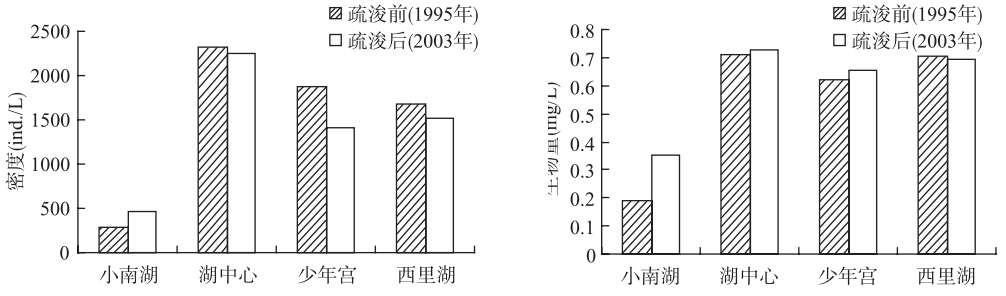


图 8 疏浚前后西湖轮虫数量与生物量变化

Fig.8 Variation of quantity and biomass of rotifer in West Lake before and after dredging

疏浚后枝角类种类数较疏浚前略有增加. 疏浚后观察到的枝角类有 10 种, 比疏浚前多 2 种. 但小南湖湖区减少了 1 种; 少年宫和西里湖湖区均增加 2 种; 湖中心枝角类种类数不变. 4 种优势种(长肢秀体溞 *Diaphanosoma leuchtenbergianum*、长额象鼻溞 *Bosmina longirostris*、微型裸腹溞 *Moina micrura* 和颈沟基合溞 *Bosminopsis deitersi*)组成没有发生改变.

在枝角类密度和生物量方面(图 9), 疏浚后西湖枝角类平均密度比疏浚前增加了近 1.4 倍, 平均生物量比疏浚前增加 82.4%, 枝角类密度和生物量在各湖区分布仍然为小南湖>湖中心>少年宫>西里湖. 由于淡水湖泊中枝角类的数量, 除受水体营养状况的影响之外, 在一定程度上还受制于食物链上一级的消费者, 尤其是西湖这类兼有水产养殖功能的浅水湖泊.

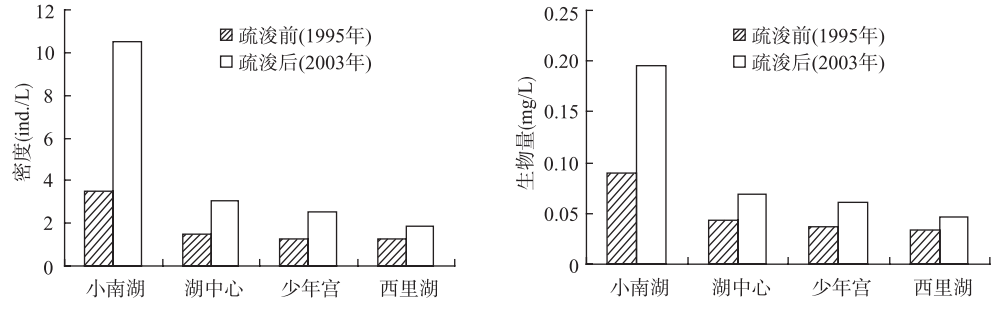


图 9 疏浚前后西湖枝角类密度、生物量变化

Fig.9 Variation of density and biomass of cladoceran in West Lake before and after dredging

疏浚前桡足类中的哲水蚤中一直是以汤匙华哲水蚤(*Sinocalanus dorrii*)为优势种, 剑水蚤中除常见近邻剑水蚤(*Cyclops vicinus*)外, 还有猛水蚤的记录, 但疏浚后调查期间没有发现该种类. 疏浚后记录到 10 种桡足类, 其中哲水蚤中汤匙华哲水蚤、剑水蚤中粗壮温剑水蚤(*Thermocyclops dybowskii*)为优势种, 常见种还有近邻剑水蚤. 疏浚前、后西湖桡足类的密度和生物量的变化见图 10.

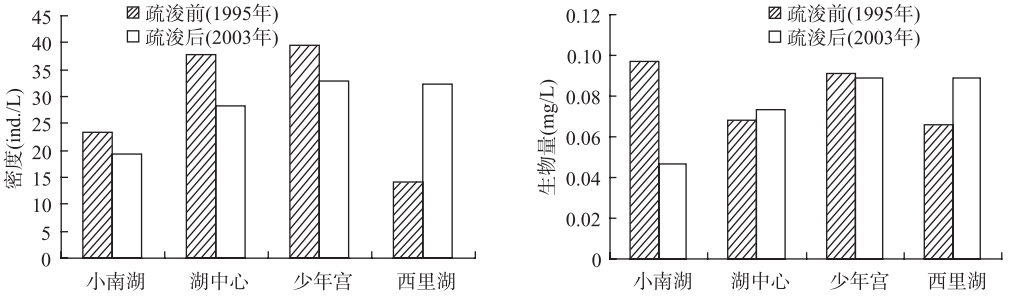


图 10 疏浚前后西湖桡足类密度、生物量变化

Fig.10 Variation of density and biomass of copepod in West Lake before and after dredging

从全湖平均水平看(图 11), 疏浚前后西湖浮游动物的生物量变化, 除桡足类外, 群落的平均生物量均有明显增加.

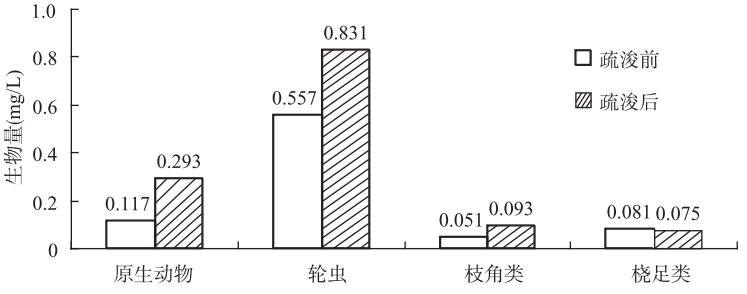


图 11 疏浚前后西湖浮游动物的生物量变化

Fig.11 Biomass variation of zooplankton in West Lake before and after dredging

2.3.3 底栖动物群落变化 底栖动物生活在沉积物的表层, 在疏浚过程中整个群落必然受到破坏. 从西湖底泥疏浚工程开始, 对疏浚后的区域进行连续监测, 结果显示底栖动物群落恢复迅速, 在疏浚后的区域, 部份种类 2 个月后开始出现, 3 个月后大部分原有优势种类都可出现, 但个体数较少, 整个群落的密度较低. 首先在疏浚后区域出现的种类有: 刺夹长足摇蚊(*Tanypus punctipennis*)、花翅前突摇蚊(*Procladius choreus*), 大红德永摇蚊(*Tokunagayusurika akamusi*). 随后出现的种类有: 羽摇蚊(*Tendipes plumosus*)、蠓蚊幼虫(*Ceratopogonidae*)、裸泽蛭(*Helobdella nuda*), 霍甫水丝蚓(*Limnodrilus hoffmeisteri*), 苏氏尾腮蚓(*Branchiura sowerbyi*). 疏浚后调查期间, 在定量与定性样本中共发现底栖大型无脊椎动物 20 种, 其中寡毛类 4 种, 摇蚊 5 种, 软体动物 6 种, 其它种类 5 种. 与疏浚前相比, 各种类群的种类都有所减少. 疏浚后保存下来并且最先出现的种类都是疏浚前群落中的优势种类.

群落的定量分析结果显示: 疏浚后的西湖底栖动物群落特征仍然是: 缺乏软体动物、寡毛类和摇蚊幼虫占绝对优势; 疏浚后的群落在密度与生物量上都有较大幅度的降低, 群落密度降低了 77%; 生物量降低了 74%; 优势种群没有变化, 只是在密度与生物量的排列顺序上有所变化; 同时各个类群在群落中所占的份额也有所变化(图 12), 从生物量看, 摇蚊所占的比例从 49%上升到 77%, 寡毛类从 51%下降到 23%; 在密度方面, 摇蚊从 61%进一步上升到 91%, 而寡毛类从 39%下降到 9%.

底栖无脊椎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. 对比分析疏浚前后西湖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、生物量的较大幅度降低, 指示西湖水域沉积物的营养环境有了较大变化, 表明西湖水域的沉积环境正向好的方向转变.

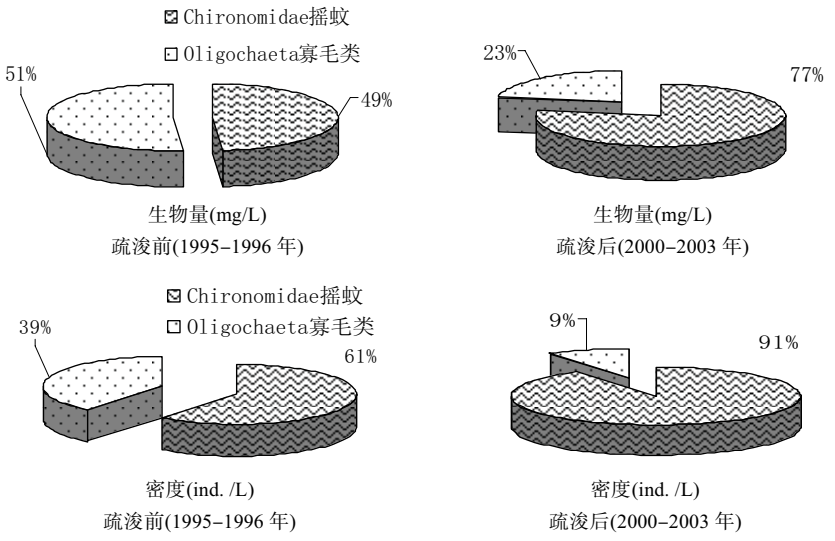


图 12 疏浚前后西湖底栖动物群结构变化

Fig.12 Structure variation of benthos community in West Lake before and after dredging

## 3 结论

通过本次西湖底泥疏浚工程, 有效地降低了表层沉积物的营养物质含量, 减轻了西湖的内负荷; 与此同时, 疏浚后西湖水体与富营养化相关的主要指标均有不同程度的改善, 水体营养状况指数好转; 浮游植物现存量明显减少. 西湖水域生态系统这三个重要环节的变化证明西湖底泥疏浚工程所产生的生态效应是明显的, 对西湖水域生态环境的进一步改善以及生态修复具有非常积极的作用.

## 4 参考文献

[1] 吴芝瑛, 吴 洁, 虞左明. 杭州西湖水生高等植物的恢复与水生生态修复. 环境污染与防治, 2005, **27**(1): 38-40, 46.

[2] 吴 洁, 虞左明. 杭州西湖浮游植物的演潜及富营养化治理措施的生态效应. 中国环境科学, 2001, **21**(6): 540-554.

[3] 朱广伟, 秦伯强, 高 光等. 长江中下游浅水湖泊沉积物中磷的形态及其与水相磷的关系. 环境科学学报, 2004, **24**(3): 381-388.

[4] 金相灿. 湖泊富营养化调查规范(第二版). 北京: 中国环境科学出版社, 1990.

[5] Psenner R, Pucskso, Sager M. Fracktionierung organoishcher and anorganischer Phosphorverbindungen von Sedimenten. Versuch einer Definition okologschwichtiger Fractionen. *Arch Hydrobiol/Suppl*, 1985, **70**: 111-115.

[6] Reyeynolds S. Phosphorus and the eutropjication of lakes-a personal view. Phosphorus in the environment-its chemistry and biochemistry. Siba Foundation Symposium 57, Elsevier, Amsterdam, 1978: 201-215.

[7] Kelderman P. Phosphate buget and sediment-water exchange in Lake Grevelingen. *Netherlands Journal of Sea Research*, 1980, **14**(4): 229-230.

[8] 国家环保局编委会. 水和废水监测分析方法(第四版). 北京: 中国环境出版社, 2002.

[9] Wehr JD, Sheath RG. Freshwater algae of North America. Ecology and classification. Academic Press, 2003.

[10] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法. 北京: 科学出版社, 1991.

[11] 李尧英, 魏印心, 朱蕙忠等. 中国淡水藻类. 上海: 上海科学技术出版社, 1980.

[12] 蔡庆华, 刘建康. 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.