

太湖底泥的生态疏浚工程

陈荷生

(水利部太湖流域水资源保护局,上海 200434)

摘要 指出:①太湖底泥是湖体水生态系统的基本要素,也是重要的内污染源.②在湖泊外源污染得到一定控制后,以减少内源污染负荷为目的的生态疏浚是控制内源污染效果较为明显的工程措施.③太湖底泥疏浚属水生态整治工程,以最大可能取走污染物、改善水生态环境为控制目标,生态疏浚是局部的薄层精确疏浚.经采用生态调查方法,查明太湖底泥总蓄积量为 19 亿 m^3 .主要疏浚范围是底泥厚且污染重的重点功能湖区,如梅梁湖、贡湖等.依据太湖底泥的污染特性,疏浚深度以 40~50 cm 为宜,并应为后续生物修复技术介入创造必要的生态环境条件.密闭无扰动抽吸式头部掘进是关键,冬初至春末为最佳施工期.排泥场防渗、尾水处理达标后排放、淤泥安全处置和资源化利用是生态疏浚的环保要求.

关键词 太湖 底泥 生态疏浚

中图分类号 TV851

文献标识码 B

文章编号 1006-7647(2004)06-0034-04

2 338 km^2 的太湖是太湖流域的主要水体,具有向城镇和农业供水、调节洪水、水产养殖、航运和旅游等综合功能,是流域水资源生态系统的主体基础.

目前,流域内水环境污染严重,河网水质污染和太湖湖体富营养化发生并发展,已严重影响流域经济可持续发展和人民生活质量的提高.党和国家十分重视太湖的水污染防治工作,国务院批准实施了太湖水污染防治“九五”计划及 2010 年规划和“十五”计划.规划将太湖底泥的生态疏浚作为重要综合治理工程之一列入实施计划.

1 底泥生态疏浚是综合治理太湖水污染的重要措施之一

湖泊底泥是太湖水生态系统的重要组成部分和湖泊营养物质循环的中心,也是水-土界面物质(物理的、化学的、生物的)积极交替带.湖泊底泥不仅可以间接地反映湖泊水体的污染情况,湖泊水动力、泥沙及营养物沉积动力学状况,而且由于底泥在外部水动力因子作用下向上覆水体释放营养成分,对湖泊水质和富营养化过程予以影响和制约^[1].湖泊底泥既是湖体水-土界面各类物质的特殊缓冲载体,也是各类营养物质的聚集库,这也是太湖这一浅水型湖泊生态系统的个性特征之一.

各种来源的营养物质,在湖泊中经一系列物理、

化学及生化作用,沉积于湖底,形成较低密度、高含水率、富含有机质和各类营养物质的淤积物,形成太湖富营养化成因的内负荷,或称内源污染.由于太湖是一宽浅型的湖体,底泥造成的二次污染是不可忽视的重要污染源.据有关资料分析,内源污染 TN 可占 18.5%~34.7%,TP 占 23.7%~29.4%,即使将外部入湖污染全部控制,仅湖内底泥释放和动力作用下的再悬浮、溶出,也可能造成湖水富营养化和藻类的发生、发展^[2].以减少内源污染负荷为目的的湖泊底泥生态疏浚,被认为是控制湖泊内源污染效果明显的工程技术措施之一.

2 太湖底泥及其污染状况调查

查清太湖湖底沉积淤泥的分布、蓄积量、污染物在沉积层中的垂直分布,对研究太湖的内源污染及富营养化具有重要的科学价值,可为太湖现代沉积物疏浚工程提供技术支撑和决策依据.

2.1 调查项目^[3]

底泥是河湖水生态系统的基本构成要素,因此底泥调查应采用生态调查方法.该调查立足于工程应用层面,必须抓住九大特性:

a. 底泥时空分布特性.测点按网格法布置,河流入湖口、湖湾、水源地、重要旅游区域及水污染较重水域加密测点,以查清底泥分布范围和厚度,较准

确地计算底泥蓄积量。

b. 底泥土工和空间分布特性. 主要为粒径、天然密度、孔隙率、含水率、塑限、流限、液限、内摩擦角、压实系数。

c. 底泥营养特性和空间分布. 主要应包括 Eh, Mn, Fe²⁺, OM, TOC, TN, TP(DTP), NH₃-N 等。

d. 重金属特性和空间分布. 重金属为汞、砷、铜、铅、锌、镉、铬、镍等。

e. 底泥间隙水水化学特性. 间隙水中溶解成分测定主要为 OM, Fe²⁺, Mn, Eh, NH₃-N, TOC, TN, TP(DTP), pH 值等。

f. 底泥水环境特性. 沉降系数、释放或吸收系数和溶出率的试验和测定。

g. 底泥水生态特性. 水生植物(种类、分布、密度、生物量等)、底栖动物、细菌、微生物及生物多样性指数评估, chl_a, BOD₅ 等。

h. 湖泊水质和水力学特征. 底泥上面 0.1 m 和 0.5 m 处水质、湖体水质(水下 0.5 m)、泥沙、风浪、湖泊动力学特点和水交换系数。

i. 湖滨带环境特性. 湖滨 1 ~ 2 km 范围内土壤类型特征、土地利用现状和规划、工业点源、居民社区情况等。

2.2 底泥状况^[4]

2.2.1 底泥分布

太湖底泥以大于 0.1 m 厚度的泥层计, 全湖底泥分布面积为 1 632.9 km², 占全湖的 69.84%, 底泥的蓄积总量为 19.15 亿 m³(自有太湖以来累积在湖内的沉积量), 平均底泥厚度为 0.82 m。图 1 为太湖底泥等厚线示意图。

太湖底泥有 3 个蓄积带: 一是自大浦口向东北至金墅港; 二是长兴港向东偏北至漫山湖; 三是西部沿岸。3 个蓄积带底泥平均深超过 1.5 m, 泥量占底泥总量的 2/3。北部竺山湖、梅梁湖、贡湖、东太湖等湖湾淤积严重。

太湖表层底泥沉积物以粉沙级为主, 河流携入湖中泥沙粒度分异作用不明显。各湖区底泥平均密度为 1.6 g/cm³, 含水率为 59%。沉积物以含有大量动植物残体和底栖动物的活体为其显著特点。

表 2 太湖底泥中主要营养物历年含量比较^[4]

年份	TN		TP		OM	
	范围	均值	范围	均值	范围	均值
1960		0.067		0.044	0.54 ~ 6.23	0.68
1980	0.022 ~ 0.147	0.065	0.037 ~ 0.067	0.052	0.24 ~ 3.78	1.04
1990 ~ 1991	0.049 ~ 0.558	0.080	0.040 ~ 0.107	0.056	0.57 ~ 5.10	1.90
1995 ~ 1996	0.022 ~ 0.450	0.094	0.039 ~ 0.237	0.058	0.31 ~ 9.04	1.70
1997	0.022 ~ 0.318	0.082	0.028 ~ 0.180	0.059	0.31 ~ 5.73	1.53

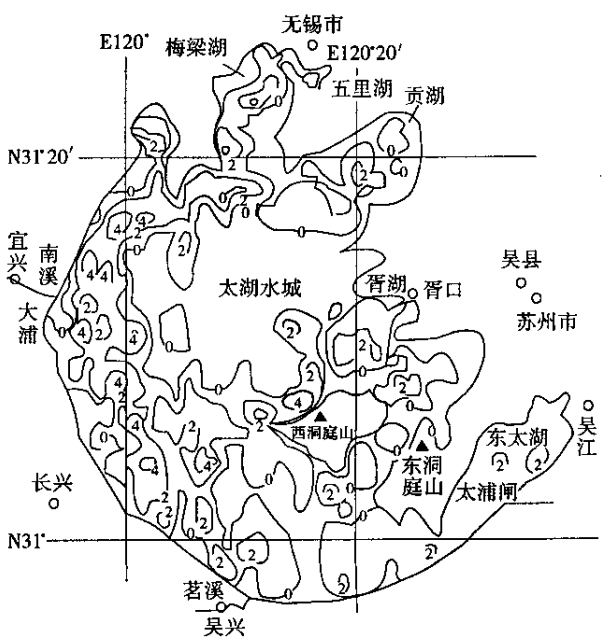


图 1 太湖底泥等厚线示意图

2.2.2 底泥中主要营养物

太湖底泥中的主要营养物为 TN, TP 和 OM, 见表 1^[4]。

表 1 20 世纪 90 年代太湖沉积物中的营养物质含量 %

湖 区	OM	TN	TP(P ₂ O ₅)
东太湖	4.180	0.206	0.124
五里湖	3.117	0.196	0.230
梅梁湖	1.347	0.092	0.153
湖心区	0.802	0.057	0.117
全 湖	2.098	0.124	0.149

从底泥营养盐含量分析, 五里湖、梅梁湖、竺山湖及环湖入湖河口营养盐含量较高。东太湖由于水生植物茂盛, 底泥沉积量大, OM 和 TN 含量高。

底泥营养盐垂直分布受水动力学等多种因素影响, 各湖区含量分布变化复杂。从不同测点营养盐垂直分布变化统计, 有几种较典型的分布趋势类型: 营养盐基本呈均匀分布、随深度呈高一低一高分布、表层含量高, 随深度增加含量明显下降。从总的垂直分布趋势分析, 底泥表层 0 ~ 25 cm 处营养盐含量普遍较高, 表聚性明显。

太湖底泥中营养盐含量呈逐年增高积累状态(表 2), TN, TP 和 OM 自 20 世纪 80 年代以来均有较

大幅度的增加.底泥中营养盐含量有 3 个特点:①自 20 世纪 80 年代后期起呈急剧上升趋势,TN 上升 12%,OM 增长 22%,TP 增加 3%;②底泥营养盐含量受制于湖水水质变化,呈同步增加,耦合关系明显;③湖底淤泥化学成分受人为活动影响明显^[4].

太湖底泥中重金属含量总体不高.个别入湖河口含量稍高.

3 太湖底泥的生态疏浚

国内外工程实践经验表明,不能简单地用河流、港口清淤的方法来进行太湖的疏浚.进行环境、生态、经济的综合谨慎研究是十分重要的.

3.1 太湖底泥疏浚是湖泊水生态整治工程^[5]

底泥是湖泊水生态系统中物质交换和能流循环的重要中枢之一,底泥疏浚工程属于水生态整治工程.太湖生态疏浚的目的在于清除高营养盐含量的表层沉积物,包括沉积在淤积物表层的悬浮、半悬浮状的絮状胶体等,属生态工程范畴,有别于一般的工程清淤概念.工程疏浚为物理工程,是按工程目的要求,设计疏浚的深度和底部标高,以设计高程、疏浚后几何形状尺寸、土方量作为控制依据.而生态疏浚是以取走污染物或营养盐量为主要控制目标.生态疏浚和工程疏浚区别在于:①目的不同.前者为清除底泥中的污染物;后者为清除淤积土方.②性质不同.前者为生态修复工程;后者为物理工程.③控制和监理参数不同.前者为去除污染营养盐的数量和位置,保护生物多样性;后者为疏浚泥沙土方量和几何尺寸、底部标高.④疏浚深度不同.前者为富含营养盐的淤泥层;后者按工程标高设计深度.⑤疏浚范围不同.前者为重污染区、水源地等局部区域;后者为工程设计区域或地段.⑥施工机械不同.前者为清洁生产工艺,采用环保无扰动型挖泥设备;后者为通用疏浚机械(按土工特性选择).⑦堆泥场不同.前者为符合无风险环保安全要求的场地,以水质指标控制排水;后者为常规物理堆放的场地,以浊度或含沙量控制排水.⑧最佳施工期不同.前者为当年 11 月至次年 4 月(生物休眠期);后者全年均可.⑨监测参数不同.前者为疏浚设备头部和尾水排放泥沙含量及水质污染参数,属生物物种保护监测;后者为物理泥沙含量和浊度等.

3.2 太湖底泥生态疏浚的基本特点

生态疏浚是在湖库水生态系统中底泥受到污染的背景下运用发展生态理论实施的生态修复工程,其本质是以工程、环境、生态相结合来解决湖泊的可持续发展或称湖泊‘生态位’的修复.在污染底泥沉积层,采用工程措施,最大可能地将储积在该层中的

污染营养物质移出湖体以外,以改善水生态循环,遏制湖泊稳定性的退化.它必须注重生物多样性和物种的保护,以不破坏水生生物自我修复繁衍为前提,同时又为生物技术介入创造有利条件.因此,生态疏浚是局部的薄层精确疏浚,注重水生态系统的保护,生态疏浚的可行性应经风险评估确认.

3.3 生态疏浚厚度的确定

生态疏浚厚度的确定是一非常复杂而目前尚未从机理上完全解决的问题.目前为工程急需主要运用分析污染营养物垂直分布特性和释放强度,采用评估法确定.生态疏浚为二层物质清除:①淤泥表层沉积物的清除.太湖污染始于 20 世纪 80 年代,年均淤积量 1.69 mm,有机营养盐富集层主要在 0~25 cm 左右.考虑到沉积层微地形不均匀影响,参照国内外已实施工程,淤泥疏浚深度以 40~50 cm 为宜.②在底泥沉积层界面——水-土界面上,有 7~15 cm 左右半悬浮的类胶体状有机质.这部分物质除部分藻类活体、浮游动植物、死亡藻类和动植物残骸外,还有在水-土界面特定的生化环境条件下形成的半悬浮状的类胶体物质,这部分物质营养盐含量很高,必须予以清除.

3.4 生态疏浚关键技术

a. 鉴于生态疏浚目的和底泥表层淤积物的特点,关键是疏浚机械的头部装置密闭程度和抽吸能力.采用分区机械化作业,封闭吸疏式施工,避免产生大的扰动导致发生清除泥沙而未清除污染营养盐的问题.生态疏浚定义为薄层精确疏浚,疏浚深度误差小于或等于 10 cm,疏浚底泥扩散距离小于或等于 5 m.

b. 科学谨慎地控制疏浚深度,为后续生物技术介入创造必要的生态环境条件.环太湖沿岸沉水植物一般分布在水深不超过 2.0~2.2 m 的范围内,因此生态疏浚要控制疏浚后新形成底泥表面高程,且自湖区向湖岸形成缓坡,为沉水植物修复繁衍创造必要的湖底基质条件.

c. 疏浚必须注重划定物种保护区或保护带.当已确定的疏浚区域较大时,应专门划出一定面积的物种保护区,或留出保护带不予疏浚,类似条田状,隔一疏一,作为物种基因库.疏浚以后,以保护带物种库为基点,藉自然之力繁衍扩大,力求在较短时间内使疏浚区域的物种得以恢复和发展.

d. 湖泊底泥疏浚易发生二次污染主要有 3 个关键点.疏浚挖掘、泥水远距离输送和排泥场.应在施工设计、机械选型(底泥密度小于 1.8 g/cm^3 的可采用环保型绞吸式挖泥船,密度大于 1.8 g/cm^3 的宜采用环保型斗轮式挖泥船)、排泥场设计、泥沙促沉固化、施工工艺等方面从严谨慎处置.

3.5 疏浚重点区域

太湖面积大,没有可能也没有必要实施全面疏浚,施工重点应在湖泊重点功能区域:污染淤积严重,重要城市的供水水源地取水口,重点风景旅游区,现状和规划调水入湖区,对太湖生态系统影响大的湖区,鱼类繁殖场,水生植物基因库区,污染淤积严重的入湖河口及有特殊需要必须疏浚的地区.重点疏浚湖区有梅梁湖、竺山湖、贡湖及东太湖等湖湾,以及湖西、湖南部主要重污染河流的入湖河口.清淤范围四周应考虑 200 ~ 300 m 的安全值,减缓回淤影响.并按实际需要和财政能力分年度有计划实施.底泥疏浚工程投资很大,必须充分论证,慎重确定,切记疏浚目的是治理底泥污染,而不是湖体扩容疏浚.目前,五里湖疏浚工程已基本完成.

3.6 适宜施工期

生态疏浚作业最佳施工期为冬初至春末.这一时期太湖正值低水位期,风浪相对较小,湖泊水体交换缓慢,沉积物基本处于相对静态.活体藻类因水温低、

日照强度小,大部分积聚在水-土界面上,呈休眠状态,此时开展疏浚可做到费省效高,最大限度地去除营养物质.此外,低水位也有利于提高机械作业效率.

3.7 清淤物的安全处置和尾水处理

清淤物安全处置是底泥疏浚的关键工序.排泥场要采用封闭围隔处理,防止高浓度营养盐澄清水返流入河流或湖体中.做好排泥场基底处理和防渗,防止污染地下水.尾水排放一定要经过处理(尾水处理率大于 90%,ss 质量浓度低于 150 ~ 200 mg/L),或经小型净化处理设施,或氧化塘处理达标后才准予排放.

对疏浚出的底泥,一般肥力高又不含有毒有害物质的,可用于农田、菜地、果园基肥,或用于道路、土建基土.对重污染河流入湖口含有毒物质的淤泥应慎重移出影响区外,进行环保填埋.也可把生态疏浚和资源利用结合起来,开辟新的资源化利用途径.堆泥场可结合城镇景观规划,建设成绿地或湿地.生态疏浚方案技术路线见图 2.

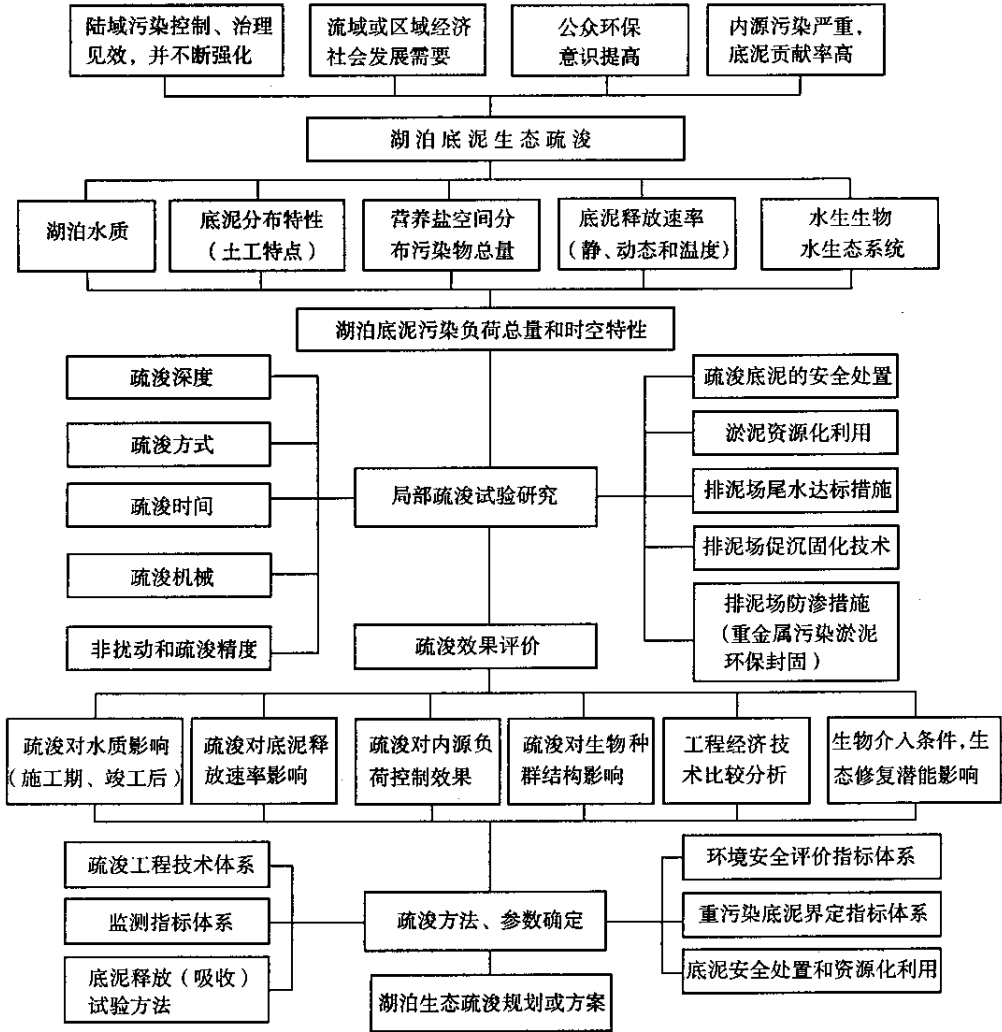


图 2 湖泊底泥生态疏浚规划方案技术路线

(下转第 54 页)

e. 现浇 U 形混凝土渠道和土工膜复合衬砌. U 形断面近似水力最佳断面, 流速快, 输水、输沙能力强, 现浇 U 形混凝土渠道整体性好, 再加上土工膜作为防渗层, 该衬砌形式防渗效果好, 抗冻胀性能强. 缺点是造价高, 如 D100U 形渠道, 当现浇混凝土造价 245 元/m³, 土工布 13.55 元/m² 时, 该衬砌形式的渠道材料造价约 500 元/m, 再加上土方开挖、夯实、清淤等工程, 造价约 600 元/m.

f. 浆砌石、混凝土和土工膜复合衬砌. 全断面铺设土工膜, 渠道边墙为重力式浆砌石, 渠底现浇混凝土保护层, 这种衬砌形式抗冻胀性能好, 防渗效果好, 但造价较高. 如山西省潇河灌区, 年平均气温 10.5℃, 极端最低气温 -27℃, 最大冻土深 0.9 m, 2002 年对一部分支渠进行了渠道防渗改造, 渠道边墙为重力式浆砌石挡土墙, 渠底为现浇混凝土保护层, 混凝土为 C20F50, 渠底及边墙外侧均采用土工膜防渗^[6]. 这种防渗形式在山西省北部的滹沱河灌区和桑干河灌区也得到了运用, 区别在于渠底. 滹沱河灌区渠底为 60 cm 厚覆土保护层, 每隔 50 m 左右设防冲坎一道. 桑干河灌区渠底铺 30 cm 厚河卵石, 同时护堤底部采用碎石换基 10 cm. 这两个灌区位于山西北部, 年最低气温分别为 -27.8℃和 -32℃, 经多年运行考验, 使用情况良好, 缺点是造价较高.

g. 渠底和渠坡下部采用现浇混凝土, 断面采用弧形底梯形或弧形坡脚梯形, 渠坡上部采用预制混凝土, 再与土工膜构成复合衬砌. 这种衬砌形式结合了现浇混凝土和预制混凝土的优点, 提高了施工速度, 保证了施工质量, 克服了预制板接缝多的缺点, 使输水、输沙能力增强, 同时采用土工膜全断面防渗, 阻断了地下水补给渠基土的通道, 防止渠道水下渗, 提高了渠道防渗、防冻胀性能, 是一种较好的防渗形式. 如山西省汾河灌区二坝西干迎四支渠道防渗, 采用了渠底现浇 12 cm 厚 C15 混凝土, 混凝土抗冻等级 F100, 混凝土下铺设一布一膜土工膜, 渠内

坡铺 60 cm × 40 cm × 12 cm 的混凝土预制板, 混凝土板错缝铺设, 用 1:4 水泥砂浆填缝, 在混凝土与土工膜之间用 M7.5 水泥砂浆做垫层^[7].

h. 机织模袋混凝土衬砌是近几年才发展起来的, 它的特点是施工速度快、可塑性强, 用坍落度 20 cm 左右的混凝土泵送入模袋, 模袋具有反滤作用, 排出混凝土中多余水分. 如辽宁省大洼灌区, 1997 年采用机织模袋混凝土进行渠道衬砌, 断面为梯形断面, 混凝土的坍落度为 21.4 cm, 掺加 15% 粉煤灰, 同时掺加引气剂、减水剂、硫化剂. 渠道运行至今, 防渗效果良好.

i. 钢筋混凝土衬砌. 钢筋混凝土衬砌的渠道, 混凝土衬砌的厚度增加, 同时配置钢筋, 增加了对压力的抵抗力, 抗磨损性能好, 同时又能防止由于不均匀沉降、温度变化而产生的裂缝. 这种衬砌形式造价高, 在我国采用不多, 只在一些重要工程上使用, 如在引滦入唐工程明渠段的泥夹石渠段中采用, 断面为矩形断面.

参考文献：

[1] 李安国, 建功, 曲强. 渠道防渗工程技术 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998. 93 ~ 113.
[2] 韩苏建, 陈涛. 关中灌区渠道衬砌结构形式现状综述 [J]. 防渗技术, 2002(2): 27 ~ 30.
[3] 朱强, 何韧, 高启仁, 等. 我国渠道混凝土防渗技术的发展 [J]. 防渗技术, 1991(1): 1 ~ 7.
[4] 朱强, 付思宁. 甘肃省渠道防渗概况及各种衬砌形式介绍 [J]. 渠道防渗技术, 1988(1): 14 ~ 18.
[5] 任之忠. 对混凝土 U 形衬砌渠道的分析总结 [J]. 渠道防渗技术, 1988(6): 40 ~ 42.
[6] 《山西省渠道防渗工程技术手册》编委会. 山西省渠道防渗工程技术手册 [M]. 太原: 山西科学技术出版社, 2003. 161 ~ 190.
[7] 崔延军, 冯民权, 李荣丰, 等. 渠道防渗在山西省节水农业改造中的重要地位 [J]. 防渗技术, 1996(1): 1 ~ 5.

(收稿日期 2004-04-23 编辑 马敏峰)

(上接第 37 页)

湖泊污染底泥的生态疏浚对污染湖体内负荷的控制效果, 仍是工程技术界和科技部门十分关注的焦点, 国内外尽管不少湖泊采用了疏浚方法, 但仍需持慎重态度. 因此, 从环境、生态和经济角度科学地研究生态清淤问题是十分必要和迫切的任务.

参考文献：

[1] 秦伯强, 胡维平, 高光, 等. 太湖沉积物悬浮的动力机制及内源释放的概念性模式 [J]. 科学通报, 2003, 48(17):

1822 ~ 1830.
[2] 蔡启铭. 太湖环境生态研究(一) [M]. 北京: 气象出版社, 1998. 55 ~ 62.
[3] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范 [M]. 第 2 版. 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 208 ~ 238.
[4] 范成新, 刘元波, 陈荷生. 太湖底泥蓄积量估算及分布特征探讨 [J]. 上海环境科学, 2000, 19(2): 72 ~ 75.
[5] 陈荷生, 江溢, 宋祥甫, 等. 太湖湖内综合治理技术 [J]. 水利水电技术, 2002, 33(12): 46 ~ 49.

(收稿日期 2004-01-28 编辑 高建群)