深水型水库环保疏浚对水质的影响及敏感参数研究——以通济桥水库为例^{*}

朱 伟¹, 冯甘雨^{1**}, 刘毅璠¹, 蒋秀丽², 李云全¹, 刘既明³, 王若辰¹, 胡思远¹, 陈怀民¹

(1: 河海大学环境学院, 南京 210098)

(2: 通济桥水库管理处, 金华 322200)

(3: 河海大学土木与交通学院, 南京 210098)

摘 要: 国内对于作为饮用水水源地并具有水温分层特征的深水型水库环保疏浚, 缺乏长期实测评价工程前后水质变化规律以及易于发生变化的水质参数的实例。因此, 对于这种类型的环保疏浚, 如何进行效果评价并在工程实施中控制敏感参数成为一个没有解决的问题。本文以典型的饮用水水源地、深水型的通济桥水库为对象, 通过长期水质监测, 研究了环保疏浚的影响。结果发现环保疏浚对总氮(TN)削减起到较好的效果, 但是疏浚期间总磷(TP)浓度明显上升, 完工半年后TP浓度仍略高于往年同期水平。其中, 坝前库区TN浓度降低至疏浚前多年同期均值的56%~87%, 而TP浓度却为疏浚前的1.87倍以上。并发现浊度、TN、TP和锰(Mn)对于环保疏浚敏感响应。其中, TP波动与底泥扰动引起的浊度变化有密切的关系; 坝前库区疏浚新生底泥Mn含量较高(1251.25 mg/kg), 夏季水温分层加剧了库底水体的厌氧状态, 是Mn出现异常的主要原因。以通济桥水库为鉴, 建议深水型环保疏浚重点考虑底泥扰动及后续季节性水温分层对水质控制效果产生的影响。

关键词: 环保疏浚; 深水型水库; 通济桥水库; 水质; 效果评价; 营养盐; 锰

Influence of environmental dredging on the water quality and studies on sensitive parameters of a typical deep reservoir (Tongjiqiao Reservoir)

ZHU Wei¹, FENG Ganyu^{1**}, LIU Yifan¹, JIANG Xiuli², LI Yunquan¹, LIU Jiming³, WANG Ruochen¹, HU Siyuan¹ & CHEN Huaimin¹

(1: College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, P.R.China)

(2: Management of Tongjiqiao Reservoir, Jinhua 322200, P.R.China)

(3: College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, P.R.China)

Abstract: The effect of environmental dredging projects in China has received wide attention with many case studies. However, little care was paid for dredging in stratified water sources. How to evaluate the effects and then control sensitive parameters is still an unsolved problem. Tongjiqiao Reservoir, a typical deep reservoir as well as a drinking water source, was chosen as a long-term case study. Result shows that Tongjiqiao Reservoir mainly reached water quality standard III. Within half a year after the project, environmental dredging partially reduced near-dam total nitrogen (TN) concentration to 56%–87% of the past level, but 1.87–5.12 times as high as before in total phosphorus (TP) concentration for near-dam area. Turbidity, TN, TP and manganese (Mn) concentrations were sensitive parameters. The change of TP was closely related to turbidity caused by sediment disturbance. Besides, exorbitant Mn concentration at the bottom of the reservoir was related to both the exorbitant Mn in after-dredging surface sediments, where the highest content located in the near-dam area, reaching 1251.25 mg/kg. The seasonal stratification caused anaerobic conditions in deep water area. Therefore, environmental dredging of deep source ought to consider the impact of both sediment disturbance during dredging and thermocline after dredging.

^{*} 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07603-003-04)和江苏省科技计划项目(BE2018737)联合资助。
2018-11-29 收稿; 2019-01-23 收修改稿。朱伟(1962~), 男, 博士, 教授; E-mail: zhuweiteam.hhu@gmail.com。

^{**} 通信作者; E-mail: fengganyuhhu@163.com。

Keywords: Environmental dredging; deep reservoir; Tongjiqiao Reservoir; water quality; effect evaluation; nutrients; manganese

我国河流、湖泊及水库等水体多数面临底泥中内源污染威胁水质的问题^[1-2]。使用环保疏浚清除污染底泥是目前常用的主要工程措施^[3]。据《2017—2022 年中国疏浚工程行业调研及未来前景预测报告》,我国年环保疏浚工程量巨大,水源地以及水库疏浚的实例正在增加。虽然环保疏浚可以在短期内去除底泥内积累的污染物,但是由于工程实施的技术控制和湖泊水库的具体特点造成其实际效果存在较大的不确定性^[4-6]。因此,积累环保疏浚效果研究的实例对于指导环保疏浚施工及后期管理工作具有重要意义。

环保疏浚的效果评价大多数都是以对水质的影响来进行分析,也有一些会考虑对底质和水生生物的影响。胡小贞等^[7]针对滇池草海环保疏浚的效果评价,从污染负荷削减量、施工前后 3 年内水质和底质变化以及疏浚后生态系统恢复 3 个方面进行研究,得出泥水两相氮磷和重金属污染得到显著削减,水质从劣 V 类提升到 V 类,并且疏浚后水生和底栖生态系统更加完善的结果。吴芝瑛等^[8]针对西湖环保疏浚工程,通过前后 1 年内底泥营养盐含量、水质和水生生物群落的比较,认为施工有效削减了内源负荷,降低了富营养化水平,藻类生物量得到控制。毛志刚等^[9]在东太湖环保疏浚完工后的第 2 年,采集底泥样品,实测了底泥重金属含量,结果显示疏浚点位重金属含量均低于未疏浚点位。原居林等^[10]收集了南太湖疏浚前(2008 年 4、5 月)和疏浚后(2009 年同期)北水塘内外水域浮游植物群落结构和水体富营养化程度两方面的数据,认为疏浚后水体富营养化水平降低,浮游植物种类增加,其中蓝藻生物量占比下降。从这些研究来看,环保疏浚都得到了较好的效果。但实例基本上都是以浅水型、富营养化程度较高的湖泊为对象,而最近的环保疏浚中与深水型或水质较好的湖库相关的工程较多,在水质良好且极为敏感的情况下的环保疏浚是否仍能得到相同的效果,在水温分层的水库底层疏浚对水质的影响规律均受到广泛关注。

而作为环保疏浚,哪些水质参数对工程扰动敏感地进行响应?这也是施工管理和控制必须了解的问题。对于一般自然水体水质而言主要涉及有机质、营养盐和重金属等与水质参数^[4-5],但各个参数的敏感性会由于水体的水质好坏、主要污染指标以及水层结构有较大的差异,并与施工期间的底泥扰动强度和污染物扩散的控制效果有关。水质的响应过程按环保疏浚的施工周期划分,总体上可以分为施工期和施工后 2 个阶段。施工期间一般会引起的底泥扰动,短期内会显著影响水质。王栋等^[11]对五里湖环保疏浚前后的水质变化进行分析,得出施工时水体浊度大幅上升,短期内总磷(TP)、溶解性总磷(DTP)和重金属浓度均有所上升。汤德意等^[12]在对通济桥水库环保疏浚工程进行环境影响评价时也主要关注了施工期的水质变化。而施工后由于泥水界面的性质发生了改变,当底泥中无机磷和氨氮浓度的垂向分布具有随深度增加而上升^[13],反而会导致疏浚后新生界面向水体释放营养盐。反过来,新生底泥污染物含量低、吸附能力较强^[14],对于水质改善非常有利,新生界面的氧化性还会有较强的固定磷、氨氮和重金属的作用^[15-16]。此外,以黄石市青山湖的 1[#]湖和 3[#]湖为例,1[#]湖尽管施工过程中水质改善,但是施工后总氮(TN)严重超标并且重金属含量有所增加^[17];而后期 3[#]湖则表现为施工后 TN、TP 和重金属均显著降低,但生化需氧量(COD)大幅上升^[18]。前后两次施工的对象属于一个湖的两个部分,水质较为相似,但环保疏浚后两个湖的水质变化情况却相差较大。由此可见,环保疏浚的效果除受施工本身的影响以外,污染物在底泥纵向的分布规律,水体在垂向的分布规律都可能对其效果产生较大影响。因此,根据不同水质、不同水体结构、不同底泥结构,筛选出易于检测、敏感变化的水质参数进行施工设计和施工控制是保证环保疏浚效果的关键。对于垂向水质存在分层、对水质变化非常敏感的深水型湖库,如何选择施工控制参数,评价环保疏浚效果成为一个问题。

由于深水型湖库往往具有温跃层,其垂向特征与浅水型湖库具有很大的差异。温跃层一般形成在夏季及初秋,其下的水体逐渐因缺氧而呈现还原状态,导致沉积于湖库底部沉积物中的高价态铁、锰(Mn)被还原而易溶于水,引起底部铁、锰浓度上升^[19]。其中,夏季底层 Mn 含量上升这一现象在国内其他一些饮用水水库中也有报道,如天津于桥水库^[20]、河北西大洋水库^[21]、贵州阿哈水库^[22]、浙江舟山的 23 座饮用水水库^[19]以及广东揭阳市供水水源水库^[23]。我们对于深水湖库泥水界面间 Mn 的迁移已经有了比较充分的认识,迁移主要受氧化还原水平和 pH 值的影响。在氧化条件下,Mn 主要以四价 Mn 存在,一般不溶于水,迁移能力很低,逐步在泥水界面附近沉淀,而还原性环境促使 Mn 向易于溶解的状态转化,引起水体 Mn 浓度上升^[24-25]。Mn 的氧化物及氢氧化物受 pH 影响较大,在碱性水体中游离金属能与羟基结合形成络合物沉积;而

偏酸性水体中的氢离子的竞争弱化了络合,使得 Mn 容易游离^[26]. 疏浚对于深水湖库泥水界面有较大的改变,并且疏浚后深度增加很可能引起垂向水温分层加剧,由此引起的环保疏浚后库底 Mn 浓度变化还缺少研究论证.

鉴于国内环保疏浚效果评价少有涉及深水型湖库,对于其环保疏浚后水质变化规律认识不足,因此,本文以通济桥水库作为研究对象,通过对环保疏浚前后水质变化的监测和分析,研究作为水源地的深水型水库在疏浚时的水质变化规律,并对施工和管理所需要关注的敏感性水质因子进行分析.

1 研究对象与方法

1.1 工程概况

通济桥水库位于浦阳江上游,坝址距浦江县城 4 km,水质较好,是金华市浦江县饮用水水源地,最大水深 30 m 左右,水库平面概况见图 1. 近年来发现水库底泥中 As、Hg、Cd 含量超过当地背景值 2 倍以上,对其生态安全构成潜在危害,其中坝前区域处于强生态风险等级^[27]. 为了消除重金属危害和进一步提高水质,水库于 2015—2017 年进行了环保疏浚,施工采取深水型环保绞吸式挖泥船方案. 2015 年 8、9 月,施工方开

表 1 环保疏浚施工顺序

Tab.1 Chronological sequence of environmental dredging engineering

疏浚时间	施工区域
2015 年 10 月—2016 年 5 月	东部库区
2016 年 6 月	中部库区
2016 年 7 月	东部库区
2016 年 8 月—2017 年 4 月	中部库区
2017 年 5 月	中部库区、西南库区
2017 年 6 月—2017 年 7 月	西部库区
2017 年 8 月—2017 年 10 月	中部库区、坝前库区
2017 年 11 月	坝前库区

展了深水型绞吸式挖泥船进场组装与其他配套设施的组建. 同年 10 月,通济桥水库正式开始环保疏浚. 考虑到施工后原有疏浚方案有所变更,本研究根据施工月报整理出水库的实际施工顺序(表 1). 而恰好自同年 9 月之后,据浦江县水务集团有限公司通济桥水库水质检测的相关报表显示,尽管其他金属指标正常,取水口附近(坝前库区)库底水体连续几年的夏季均出现 Mn 浓度轻微超标的现象(0.10~0.13 mg/L),引起了当地水库管理部门的高度重视. 这一现象是否与疏浚有关缺乏有效的解释,因此,从饮用水安全角度,本研究还探讨了疏浚后 Mn 浓度异常的原因.

图 1 通济桥水库采样点分布

Fig.1 Location of the sampling sites in Tongjiqiao Reservoir

1.2 水质监测及分析

如图1所示,6个采样点分别位于通济桥水库的不同库区.于2017年7月—2018年6月,逐月进行采样.在每个采样点通过有机玻璃采水器采集分层水样,水下0~8 m内的采样深度为0、0.5、1、2、4和8 m,水下8 m至库底每隔2 m采集1个水样.2018年1月,对每个样点采集了表层0~10 cm的底泥样品.原位对每个分层水样的水温、pH、浊度和溶解氧(DO)进行测定.采样后依据《水和废水监测分析方法》测定水样TN、TP和与底泥Mn含量^[28].调查阶段水库浮游植物生物量很低,因此本文并未对浮游植物进行系统的分析.此外,坝前库区2014—2017年上半年的TN、TP数据由浦江县通济桥水库管理处提供.

2 结果与分析

2.1 2014—2018年水库取水口附近水质的变化

鉴于仅坝前库区有常年水质监测数据,因此以坝前库区为例对水库水质的长期变化规律展开分析(图2).疏浚前,通济桥水库TN浓度具有季节性的变化规律,其峰值基本出现在春夏季,而TP浓度的季节性规律不明显.疏浚后水库TN浓度明显下降,降低至疏浚前多年同期均值的56%~87%.疏浚前水库TP维持在0.02 mg/L左右,波动较小,季节性规律不明显.TN浓度在初次疏浚后呈现的季节性变化趋势与疏浚前类似,但峰值提前出现,并且波动减小.疏浚工程开始后的半年内坝前库区TP浓度没有明显的波动.坝前库区TP浓度峰值滞后于东部库区和坝前库区的疏浚施工,并且对坝前疏浚的响应最为迅速,响应幅度最大.以上的现象显示,距离监测点越近的施工引起的TP波动越大.疏浚后TP浓度为疏浚前多年同期均值的1.87~5.12倍.施工结束后TP浓度迅速下降,半年左右后趋于平稳,目前基本符合Ⅲ类水水质标准,但仍然略高于疏浚前的TP水平.相比于疏浚前,疏浚阶段水库营养盐,尤其是TP,呈现中下层高于表层的现象.

图2 2014—2018年通济桥水库坝前TN、TP浓度逐月数据

Fig.2 Monthly TN and TP concentrations in the near-dam of Tongjiqiao Reservoir from 2014 to 2018

2.2 环保疏浚后水库水质的变化

2.2.1 工程进度与水库TN、TP浓度 以坝前库区环保疏浚施工为例进行研究.如图3所示,环保疏浚期间坝前库区垂向平均TN浓度约为0.57 mg/L,TP浓度超过0.05 mg/L.疏浚阶段TP的空间差异性较TN更大,其中坝前6号点的TP浓度最高.疏浚结束后2018年1—3月内,疏浚区TN浓度低于未疏浚区,并且具有离坝前越近TN浓度越低的趋势.目前而言,相比于1—3月,同年4—6月,不同采样点TN浓度均有所上升,符合

往年季节性变化规律. 疏浚后不同库区间 TP 浓度存在明显差异, 但基本呈现随时间逐步好转的趋势(图 3). 就坝前库区而言, 与往年同期水质进行比较后发现, 其疏浚后的 TP 浓度高于往年同期水平, TN 浓度明显低于往年同期水平, 说明环保疏浚有效削减了 TN, 但是引起 TP 浓度在短期内大幅上升, 并且 TP 浓度恢复到往年水平需要较长时间(半年以上).

图 3 整水库垂向平均 TN、TP 浓度的变化

Fig.3 Vertical changes of averaged TN and TP concentrations of Tongjiqiao Reservoir

2.2.2 工程进度与其他理化参数 不同采样点间 pH 值没有明显的差异, 疏浚区 pH 略低于其他区域. 而浊度表现出浅水区较高, 深水区较低的特点. 施工前后浊度波动十分明显, 施工过程中整水库的浊度明显高于完工半年后的水平, 并且疏浚后的 2018 年 1—3 月内浊度仍然较高(图 4). 浊度与 TP 浓度有类似的变化规律(图 3, 4).

图 4 通济桥整水库垂向平均 pH 值、浊度的变化

Fig.4 Vertical changes of averaged pH and turbidity of Tongjiqiao Reservoir

图 5 所示为疏浚库区(6 号点)和远离疏浚库区(1 号点)水温、DO 和 pH 的垂向分布情况. 在坝前库区疏浚阶段和疏浚后 1—3 月内水库垂向分层不明显; 而同年 4—6 月, 水下 4~10 m 之间存在明显的分层现象, 水库水体上下混合程度弱. 水温、DO 和 pH 的垂向分布情况与浊度情况具有对应关系(图 4, 5). 图 6 所示为施工后坝前库区 Mn 浓度垂向分布的变化. 上层 20 m 内, Mn 浓度垂向分布始终较为均匀, 处于较低水平, 并随时间有所降低. 水深超过 20 m 后, 越接近库底 Mn 浓度越高. 较之 3、4 月, 同年 6 月库底 Mn 浓度垂向差异最明显, 库底 Mn 浓度略高于 0.1 mg/L (Ⅲ类水水质标准).

2.3 环保疏浚后水库底泥 Mn 含量

环保疏浚完工后 1~6 号点底泥 Mn 含量分别为 662.50、656.25、526.25、920.00、726.25、1251.25 mg/kg, 环保疏浚后各采样点底泥表层 0~10 cm 处 Mn 含量均超过金衢地区土壤背景值(429.10 mg/kg)^[29]. 底泥

图 5 通济桥水库不同样点水温、DO、pH 值垂向分布的变化

Fig.5 Vertical distribution of water temperature, DO and pH in different sites of Tongjiqiao Reservoir

Mn 含量总体上表现出靠近坝前库区逐渐增加的趋势. 其中,坝前库区底泥 Mn 含量最高,高达当地土壤背景值的 2.92 倍. 由于缺少水库环保疏浚前底泥 Mn 含量的相关历史数据,无法分析疏浚对表层底泥 Mn 含量的影响. 因此,表 2 仅说明了环保疏浚后表层底泥 Mn 含量相比于当地背景值而言,处于较高的水平.

2.4 水库水质与浊度的关系

图 7 为水库坝前库区各采样点不同阶段(环保疏浚期间与疏浚完工后)平均营养盐浓度与浊度的关系. 浊度单位选取散射浊度单位(nephelometric turbidity unit, NTU). 考虑到溶解性总氮(DTN)和溶解性总磷(DTP)对 TN、TP 有一定的贡献,因此采用区间最小值的方法评价水库 TN、TP 浓度与浊度的关系,数据与拟合函数较为吻合(R^2 分别为 0.630 和 0.980). TP 与浊度的关系较显著($P<0.01$). 相对于 TN,浊度上升更容

图6 水库坝前库区 Mn 浓度垂向分布的变化
Fig.6 Vertical distribution of Mn concentration in the near-dam of Tongjiqiao Reservoir

易引起 TP 超标, TP 超过地表Ⅲ类水水质标准对应的浊度仅为 31.4 NTU, 大幅低于 TN 对应的浊度 (62.3 NTU)。值得注意的是, 在浊度低于 12 NTU 的情况下, TN、TP 数据明显高于拟合函数, 其成因有以下两方面。根据中国科学院南京地理与湖泊研究所《浦江县通济桥水库底泥污染调查及疏浚方案》研究报告, 通济桥水库坝前库区底泥 TP 含量明显高于其他库区 (3 倍左右), 因此 6 号点拟合函数 (点线) 的斜率明显高于平均水平。此外, 异常现象 (灰色区域) 显示 TN、TP 中溶解态氮磷占比较高。其中, TN 浓度偏高与其季节性变化规律有关, 浊度低于 5 NTU 处的点均处于 4—6 月, 即一年中 TN 峰值附近, 期间底泥中 TN 以 DTN 的形式释放到水体中, 因此表现出低浊度、高 TN 的异常现象。对于 3、5 号点 TP 异常, 很可能为前期施工产生的颗粒物沉降后, DTP 释放所致。

图7 水库坝前各采样点疏浚期间与完工后水库营养盐浓度与浊度的关系
Fig.7 The relationship between nutrient concentrations and turbidity during and after near-dam environmental dredging of each site in Tongjiqiao Reservoir

3 讨论

3.1 对环保疏浚敏感的水质参数

本研究从水质变化的角度对通济桥水库环保疏浚效果进行评价。总体而言, 环保疏浚对水库水体 TN 的削减起到了积极的作用, 但是对 TP 的削减效果不明显。仅坝前库区而言, 相比于多年同期水平, 水质仍基本处于Ⅲ类水附近。施工后半年内 TN 削减了 13%~44%, 但 TP 增长了 87% 以上。此外, 环保疏浚施工后表层底泥 Mn 含量较高, 坝前库区 Mn 浓度的垂向分布具有季节性规律, 库底 Mn 浓度超标一般出现在春夏季温跃层形成时。

深水型的饮用水水源地兼具水质优良、季节性水温分层的特性, 对环保疏浚的响应与一般浅水湖库相比存在很大差异。包括滇池^[7]、太湖^[8-10]、五里湖^[11]在内, 国内以往环保疏浚评价的对象多为富营养化水体或浅水湖库。富营养化水体水质较差, 施工引起的水质负面影响不明显; 而对于水质较好的水源地而言, 相同施工引起的水质波动更加明显, 尤其是施工过程中 TP 浓度的波动 (图 2)。另一方面, 浅水湖库易受风力扰动, 垂向混合程度高, 不易形成温跃层, 而深水湖库相比于浅水湖库具有季节性分层的特性。在春、夏季,

深—浅水湖库底部泥水界面的氧化还原条件存在明显的差异,底泥中污染物的释放规律也不同,其中深水型湖库底泥营养盐释放更加明显. Martin 等^[30]研究了丹麦 265 个浅水湖泊,发现仅 5—9 月月均 TP 浓度高于 0.1 mg/L 的湖泊才存在较为明显的季节性变化规律;而 Yasushi 等^[31]针对日本一个营养水平较低的水温分层型湖泊,发现其营养盐浓度具有明显的季节变化,表明深水型湖库的季节性变化规律更明显. 因此,温跃层的存在使深水型饮用水水源地环保疏浚后的水质参数具有独特的变化规律.

以往水质评价主要选取 TN、TP、溶解态氮磷、氨氮、硝态氮、COD_{Cr}(或 I_{Mn})、重金属(一般为 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn)、浊度(或悬浮物)、叶绿素 a、持久性有机物浓度等^[5,8-9]. 上述参数都会受到疏浚施工的影响产生波动,部分水质参数之间存在着关联,尤其是 TP 或颗粒态磷(PTP,图 7). 由于底泥悬浮会导致水体颗粒态的 TN、TP、有机物和重金属等含量急剧上升^[5],浊度可以作为施工期间的代表性参数. 此外,疏浚本身会引起水体浊度大幅波动^[11]. 因此,可以通过浊度大致评价施工中污染扩散的控制情况. 施工过程中控制浊度参数对于减小水质波动有较大的意义. 而在施工结束后,底泥扰动强度大大削减,浊度不再作为敏感指标,水质主要受到新生底泥污染物释放的影响. 尤其是深水水库的水温、DO 和 pH 在垂向上均存在明显的季节性分层现象(图 5),对于泥水界面营养盐和金属(如 Fe、Mn)相互交换有很大影响^[15,31]. 因此,营养盐(如 TN、TP)和部分重金属(如 Mn)可以作为疏浚后的敏感水质参数.

3.2 疏浚前后敏感参数的变化规律

疏浚后水库 TP 浓度上升与施工扰动有关,疏浚对泥水界面营养盐内源负荷的有效去除对 TN 浓度改善起到重要的作用. 图 4 和前人研究^[11-12]均表明疏浚阶段底泥扰动引起浊度明显上升. 汤德意等^[12]对通济桥水库环保疏浚施工过程中绞吸式作业扰动引起的 TN、TP 扩散进行了监测,其结果显示扰动对 TP 的影响较大,尤其是在疏浚点周围 20 m 范围内. 本研究也发现 TP 浓度与浊度具有显著的正相关关系(图 7),施工对区域性的 TP 浓度造成了极大波动,但对 TN 浓度没有类似的影响. 调查期间,通济桥水库流入湖河流较小,水库上游泥沙带入的可能性存在于汛期、库尾,而对于坝前库区而言,上游泥沙带入引起的浊度变化相比于疏浚的影响基本可以忽略. 此外,水库浮游植物生物量很低,其生长繁殖对水体 TN、TP 的影响相对较低. 在疏浚阶段后,还原性的深层底泥孔隙水中通常含有较多的活性氨氮^[13],氨氮的释放速率通常在疏浚后的几个月内增加,因此引起 TN 浓度峰值比往年提前出现(图 2),并且疏浚新生底泥氨氮释放的现象在夏季出现水温分层时更为明显^[33]. 《浦江县通济桥水库底泥污染调查及疏浚方案》显示,水库底泥中 TN 含量垂向递减趋势较明显,表明疏浚后新生底泥表层 TN 含量较低;而在疏浚后几个月,当新生泥水界面形成好氧环境,氨氮的释放速率会降低^[34]. 由此,相比于往年同期,水库 TN 浓度得到了较为明显的控制(图 3). 伴随 PTP 的沉降,疏浚后半年左右 TP 浓度相比于疏浚阶段有大幅降低. 但仍然略高于疏浚前往年同期水平,可能是期间部分悬浮的 PTP 缓慢向 DTP 转化引起的^[35]. 疏浚后,TP 浓度恢复到疏浚前同期水平很可能需要更长的时间^[36].

环保疏浚施工设计未考虑底泥中 Mn 含量垂向分布情况可能是库底水体 Mn 浓度异常的主要原因. 疏浚后新生底泥表层 Mn 含量仍然较高,底泥 Mn 残留过高可能是库底 Mn 浓度异常的主要原因. 据浦江县水务集团有限公司通济桥水库水质检测的相关报表显示,近几年来通济桥水库底部 Mn 浓度超标基本出现在 6—9 月(图 6),而结果显示进入 6 月后水库垂向分层也较为明显(图 5),两者均具有季节性变化规律. 相关研究表明水体 Mn 浓度的变化与泥水界面氧化还原条件和 pH 值有密切的联系^[31,36-37]. 其中,深水型湖库在夏季容易形成水温分层,底部往往会形成厌氧和低 pH 的环境,从而促进底泥 Mn 释放,引起底部水体 Mn 浓度偏高;而在秋冬季,水库垂向混合均匀,库底氧化条件较好,Mn 不易释放^[39]. 从上述湖库底泥 Mn 释放机理上看,通济桥水库夏季水温分层的特性(图 5)很可能是库底 Mn 浓度异常季节性出现的主要原因. 此外,在水温分层型水体的中上层水体中,游离态 Mn 容易被氧化成难溶性的物质而沉降到底泥表层,形成 Mn 垂向聚集在水底的现象^[39]. 此外,据浦江县水务集团有限公司通济桥水库水质检测的相关报表显示,除 Mn 外的其他金属(铜、锌、汞、铬、镉、铅等)在水中的浓度基本达标. 因此,鉴于库底 Mn 浓度仅小幅超标,将取水口布置在水库的中上层基本可以保证饮用水取水安全.

3.3 如何更好地发挥环保疏浚的作用

控制浊度参数、减小施工时底泥扰动强度是提高环保疏浚效果的关键. 通济桥水库疏浚采用的是深水

型环保绞吸式挖泥船方案,其基本原理是绞刀扰动,再吸走泥浆转送至堆料场进行干化处理,并且在进口泵的周围增加环保安全罩,防治泥浆扩散^[12]。但是,TP和浊度的监测数据均显示施工扰动对水库水质影响较大。由于通济桥水库疏浚前初始水质条件较好(基本达到Ⅲ类水),施工对TP浓度的影响比较明显。因此,针对水质较好的水体,尤其是水源地,后续环保疏浚施工需要采取更有效的底泥扰动控制措施。而环保疏浚前需要充分考虑当地底泥重金属含量的分布,不建议仅限于As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 8种常规重金属;尤其是对于深水型水库而言,参考疏浚后通济桥水库水体Mn浓度的变化规律,环保疏浚施工设计要考虑价态易发生变化的重金属在底泥中的分布情况。此外,温跃层的季节性规律与水体DO、pH值的垂向分布关系密切,其形成加剧了库底新生底泥营养盐和重金属(如Mn)的二次释放;因此,环保疏浚前后均需充分考虑温跃层的影响。

4 结论

1)通济桥环保疏浚明显削减了水库TN,与往年同期相比降低了13%~44%。但是目前的数据显示疏浚没有起到削减TP的效果,TP浓度相比于往年同期出现上升,但仍基本满足Ⅲ类水水质要求。库底Mn浓度偶尔会在春夏季出现轻微超标的现象,但对上层水体的威胁较小。

2)结合浊度与颗粒态污染物的关联,底泥扰动引起的浊度波动可以作为反映施工期间的水质变化情况的敏感参数。考虑到通济桥水库具有饮用水水源地和深水水库的双重特性,TN、TP和Mn浓度也是其环保疏浚的敏感水质参数。

3)TP浓度变化与工程施工有密切的关系,主要表现为扰动引起底泥PTP悬浮而造成水库短期内TP升高。施工后,TP随颗粒的沉降而降低,但半年内仍高于疏浚前水平。库底Mn浓度偏高初步认为与疏浚后底泥新生界面Mn残留量过高和水温分层下底部产生低pH值的还原性环境有关。

4)更好地发挥环保疏浚的效果需要在施工过程中对底泥扰动和颗粒物的扩散进行有效的控制。对于深水型湖库的环保疏浚施工,施工前后均需要考虑温跃层对底泥污染物二次释放的影响。

5 参考文献

- [1] Hu XZ, Jin XC, Lu SY *et al.* Techniques for sediment pollution control and discussion on the applicability in lakes of China. *Engineering Science*, 2009, **11**(9): 28-33. [胡小贞, 金相灿, 卢少勇等. 湖泊底泥污染控制技术及其适用性探讨. 中国工程科学, 2009, **11**(9): 28-33.]
- [2] Hu LW, Chen M, Yang Q *et al.* Present situation of heavy metal pollution in sediment and its remediation technologies. *Environmental Engineering*, 2017, **12**: 115-118. DOI: 10.13205/j.hjgc.201712023. [胡兰文, 陈明, 杨泉等. 底泥重金属污染现状及修复技术进展. 环境工程, 2017, **12**: 115-118.]
- [3] Nayar S, Goh BPL, Chou LM. Environmental impact of heavy metals from dredged and resuspended sediments on phytoplankton and bacteria assessed in situ mesocosms. *Ecotoxicology & Environmental Safety*, 2004, **59**(3): 349-369. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2003.08.015.
- [4] Pu PM, Wang GX, Hu CH *et al.* We control lake eutrophication by dredging? *J Lake Sci*, 2000, **12**(3): 269-279. DOI: 10.18307/2000.0312. [濮培民, 王国祥, 胡春华等. 底泥疏浚能控制湖泊富营养化吗? 湖泊科学, 2000, **12**(3): 269-279.]
- [5] Zhong JC, Fan CX. Advance in the study on the effectiveness and environmental impact of sediment dredging. *J Lake Sci*, 2007, **19**(1): 1-10. DOI: 10.18307/2007.0101. [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.]
- [6] Hu JB, Liu L, Peng S *et al.* Analysis of new environmental sludge dredging layer phosphorus absorption characteristics. *China Rural Water and Hydropower*, 2008, (9): 73-75. [胡进宝, 刘凌, 彭杜等. 底泥环保疏浚新生表层对磷的吸附特征分析. 中国农村水利水电, 2008, (9): 73-75.]
- [7] Hu XZ, Jin XC, Liu Q *et al.* Study on environmental benefits of environmental dredging the first phase project in Lake Dianchi. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2010, **2**(4): 46-49. [胡小贞, 金相灿, 刘倩等. 滇池污染底泥环保疏浚一期工程实施后环境效益评估. 环境监控与预警, 2010, **2**(4): 46-49.]
- [8] Wu ZY, Yu ZM, Sheng HY *et al.* Ecological effects of the dredging in the West Lake, Hangzhou. *J Lake Sci*, 2008, **20**

- (3): 277-284. DOI: 10.18307/2008.0303. [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.]
- [9] Mao ZG, Gu XH, Lu XM *et al.* Pollution distribution and potential ecological risk assessment of heavy metals in sediments from the different eastern dredging regions of Lake Taihu. *Environmental Science*, 2014, 35(1): 186-193. [毛志刚, 谷孝鸿, 陆小明等. 太湖东部不同类型湖区疏浚后沉积物重金属污染及潜在生态风险评价. 环境科学, 2014, 35(1): 186-193.]
- [10] Ju YL, Shen JY, Yi WL *et al.* Evaluation of dredging effects at southern Taihu Lake by phytoplankton community and trophic index. *Journal of Hydorecology*, 2010, 3(1): 14-17. [原居林, 沈锦玉, 尹文林等. 应用浮游植物群落结构及富营养化指数评价南太湖底泥疏浚效果. 水生生态学杂志, 2010, 3(1): 14-17.]
- [11] Wang D, Kong FX, Liu AJ *et al.* Analysis of the influence of the ecological dredging to ecosystem of Lake Wuli, Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2005, 17(3): 263-268. DOI: 10.18307/2005.0312. [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.]
- [12] Tang DY, Shen J. Application of ecological dredging and silt disposal technique in reservoir dredging engineering. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2018, 38(3): 70-75. [汤德意, 沈杰. 生态清淤及淤泥处置技术在水库整治中的应用. 水利水电技术, 2018, 38(3): 70-75.]
- [13] Fan CX, Yang LY, Zhang L. The vertical distributions of nitrogen and phosphorus in the sediment and interstitial water in Taihu Lake and their interrelations. *J Lake Sci*, 2000, 12(4): 359-366. DOI: 10.18307/2000.0410. [范成新, 杨龙元, 张路. 太湖底泥及其间隙水中氮磷垂直分布及相互关系分析. 湖泊科学, 2000, 12(4): 359-366.]
- [14] Sebetich MJ, Ferriero N. Lake restoration by sediment dredging. *Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie; Verhandlungen*, 1997, 26(2): 776-781. DOI: 10.1080/03680770.1995.11900822.
- [15] Fan CX, Morihiro A. Effects of aerobic and anaerobic conditions on exchange of nitrogen and phosphorus across sediment-water interface in Lake Kasumigaura. *J Lake Sci*, 1997, 9(4): 337-342. DOI: 10.18307/1997.0408. [范成新, 相崎守弘. 好氧和厌氧条件对霞浦湖沉积物-水界面氮磷交换的影响. 湖泊科学, 1997, 9(4): 337-342.]
- [16] Gu XZ, Jiang WH. Dissolved oxygen dynamic across the new-born interface of bottom water and sediment after dredging contaminated sediment. *J Lake Sci*, 2018, 30(6): 1518-1524. DOI: 10.18307/2018.0604. [古小治, 姜维华. 湖泊污染底泥疏浚后新生沉积物-水界面溶解氧的动态响应. 湖泊科学, 2018, 30(6): 1518-1524.]
- [17] Wang Z, Ma M, Xiao WS. Analysis of dynamic change of water quality before and after dredging project in Qingshan NO.1 Lake of Huangshi. *Journal of Hubei Polytechnic University*, 2013, 29(6): 20-25. [王振, 马敏, 肖文胜. 黄石市青山湖1#湖清淤施工前后水质动态变化的分析. 湖北理工学院学报, 2013, 29(6): 20-25.]
- [18] Ai XC, Wang Z, Xiao YL. Study on environmental dredging effect of Qingshan No.3 Lake in Huangshi. *Journal of Hubei Polytechnic University*, 2016, 32(3): 16-21. [艾新成, 王振, 肖宇伦. 黄石市青山湖3#湖环保疏浚效果初步分析. 湖北理工学院学报, 2016, 32(3): 16-21.]
- [19] Xu YR, Xu ZJ, Xiang S *et al.* Vertical distribution of Fe and Mn and optimal pumping depth in a seasonal oxygen shortage reservoir. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1999, 19(2): 147-152. [徐毓荣, 徐钟际, 向申等. 季节性缺氧水库铁、锰垂直分布规律及优化分层取水研究. 环境科学学报, 1999, 19(2): 147-152.]
- [20] Cong HB, Huang YL, Li CY *et al.* Study on internal pollution of sediments in Yuqiao Reservoir. *Water Resources Protection*, 2006, 22(4): 20-23, 61. [丛海兵, 黄廷林, 李创宇等. 于桥水库沉积物内源污染特性研究. 水资源保护, 2006, 22(4): 20-23, 61.]
- [21] Zhang GF, Yu SF, Cui XL. Analysis of the reason why the water quality of manganese and ammonia nitrogen exceeds the standard of surface drinking water source. World Lakes Congress, 2009. [张国峰, 于世繁, 崔秀丽. 地表饮用水源水质锰、氨氮超标原因探析. 世界湖泊大会, 2009.]
- [22] Chen XF, Zhao WY, Song RP *et al.* Discussion on the characteristics and causes of iron and manganese pollution in drinking water sources in Zhoushan, Zhejiang Province. *Earth and Environment*, 2011, 39(2): 181-187. [陈心凤, 邵卫云, 宋瑞平等. 舟山饮用水源中铁锰污染及其成因分析. 地球与环境, 2011, 39(2): 181-187.]
- [23] Wang HX, Yang H. Vertical distribution and reason of Fe and Mn in drinking water source reservoir. *Resource Development & Market*, 2005, 21(2): 83-85. [王海霞, 杨华. 饮用水源水库铁锰垂直分布规律及原因. 资源开发与市场, 2005, 21(2): 83-85.]
- [24] Forstner U, Wittman GTW eds. Metal pollution in the aquatic environment. West Germany: Springer Press, 1988, (2):

- 170-171. DOI: 10.1007/978-3-642-69385-4.
- [25] Angino EE, Magmuson LM, Waugh TC. Mineralogy of suspended sediment and concentration of Fe, Mn, Ni, Zn, Cu and Pb in water and Mn and Pb in suspended load of selected stream. *Water Research*, 1974, **10**(6): 1187-1191. DOI: 10.1029/WR010i006p01187.
- [26] Zhang C, Yu Z. Effects of sediment geochemical properties on heavy metal bioavailability. *Environment International*, 2014, **73**: 270-281. DOI: 10.1016/j.envint.2014.08.010.
- [27] Kuang S, Bao QB, Kang DJ *et al.* Distribution patterns and ecological risk assessment of heavy metal contamination in surface sediments deposited in a typical small sized water reservoir. *J Lake Sci*, 2018, **30**(2): 336-348. DOI: 10.18307/2018.0206. [匡帅, 保琦蓓, 康得军等. 典型小型水库表层沉积物重金属分布特征及生态风险. 湖泊科学, 2018, **30**(2): 336-348.]
- [28] Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, Editorial Board of Water and Wastewater Monitoring and Analysis Methods eds. *Water and Wastewater Monitoring and Analysis Methods*: 4th edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 243-372. [国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法: 第4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 243-372.]
- [29] Fan YH, Wang YQ. Background characteristics of soil elements in four plains of Zhejiang province. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2009, **33**(2): 132-134. [范允慧, 王艳青. 浙江省四大平原区土壤元素背景值特征. 物探与化探, 2009, **33**(2): 132-134.]
- [30] Søndergaard M, Jensen JP, Jeppesen E. Internal phosphorus loading in shallow Danish lakes. *Hydrobiologia*, 1999, **408**: 145-152. DOI: 10.1023/A:1017063431437.
- [31] Yasushi S, Kunio K, Osamu M *et al.* Seasonal variation in nutrients and chlorophyll a in the stratified brackish Lake Na-kaumi, Japan. *Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie: Verhandlungen*, 2006, **29**(4): 1959-1965. DOI: 10.1080/03680770.2006.11903032.
- [32] Wan GJ, Chen ZL, Wan X *et al.* New progress in research on Fe-Mn cycling in lake sediment-water boundary. *Geology Geochemistry*, 1996, **2**: 5-8. [万国江, 陈振楼, 万曦等. 湖泊沉积物—水界面铁—锰循环研究新进展. 地质地球化学, 1996, **2**: 5-8.]
- [33] Jing LD, Wu CX, Liu JT *et al.* The effects of dredging on nitrogen balance in sediment-water microcosms and implications to dredging projects. *Ecological Engineering*, 2013, **52**: 167-174. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2012.12.109.
- [34] Liu C, Shao S, Shen Q *et al.* Effects of riverine suspended particulate matter on the post-dredging increase in internal phosphorus loading across the sediment-water interface. *Environmental Pollution*, 2016, **211**: 165-172. DOI: 10.1016/j.envpol.2015.12.045.
- [35] Kleeberg A, Kohl JG. Assessment of the long-term effectiveness of sediment dredging to reduce benthic phosphorus release in shallow Lake Muggelsee (Germany). *Hydrobiologia*, 1999, **394**: 153-161. DOI: 10.1023/A:1003680425229.
- [36] Lohrer AM, Wetz JJ. Dredging-induced nutrient release from sediments to the water column in a southeastern saltmarsh tidal creek. *Marine Pollution Bulletin*, 2003, **46**: 1156-1163. DOI: 10.1016/s0025-326x(03)00167-x.
- [37] Zoumis T, Schmidt A, Grigorova L *et al.* Contaminants in sediments: remobilisation and demobilisation. *Science of the Total Environment*, 2001, **266**(1): 195-202.
- [38] Belzile N, Chen YW, Gunn JM *et al.* Sediment trace metal profiles in lakes of Killarney Park, Canada: from regional to continental influence. *Environmental Pollution*, 2004, **130**(2): 239-248. DOI: 10.1016/S0048-9697(00)00740-3.
- [39] Xu YR, Xu ZJ, Xu W *et al.* Characteristics of Fe, Mn vertical distribution in a thermal stratified reservoir. *J Lake Sci*, 1999, **11**(2): 117-122. DOI: 10.18307/1999.0205. [徐毓荣, 徐钟际, 徐玮等. 水温分层型水库铁、锰垂直分布特征. 湖泊科学, 1999, **11**(2): 117-122.]