

三峡水库蓄水前后洞庭湖区水环境演化过程研究进展

黄韬¹, 张俊宏^{1,2}, 邓志民³, 陈璐⁴, 王党伟⁵, 张芹⁶, 冯罗杰¹

(1. 中南民族大学 资源与环境学院, 湖北 武汉 430074; 2. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098; 3. 长江水资源保护科学研究所, 湖北 武汉 430051; 4. 华中科技大学 水电与数字化工程学院, 湖北 武汉 430074; 5. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 6. 湖北省交通规划设计院, 湖北 武汉 430051)

摘要: 为揭示洞庭湖区水环境变化对三峡蓄水等因素的响应过程, 总结各学者研究成果的基础上得出以下主要结论: 三峡大坝建成运行后洞庭湖区主要污染物仍是总氮、总磷, 湖区水质由贫-中营养过渡到轻度富营养, 水质进一步恶化; 三峡蓄水改变了原有湖区水文节律及底床冲淤状况, 导致湖区水质指标变化; 荆江河段与四水流域排污量增大, 对湖区水质影响效应逐渐增强; 湖区湿地出露时间提前, 湿地生态系统受到一定程度破坏; 目前各学者对水质评价指标各有不同、评价结果迥异, 对水环境治理带来一定的影响。建立考虑三峡工程影响下合理的湖区水质预测预报机制已是当前亟需解决的重大科学问题, 为预测湖区水质的变化趋势和水环境综合治理提供科学合理的理论依据。

关键词: 三峡水库蓄水; 水环境变化; 成因分析; 洞庭湖

中图分类号: X524

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)06-0061-07

Research on the water environment changes in the Dongting Lake before and after impoundment of the Three Gorges Reservoir

HUANG Tao¹, ZHANG Junhong^{1,2}, DENG Zhimin³, CHEN Lu⁴,
WANG Dangwei⁵, ZHANG Qin⁶, FENG Luo jie¹

(1. College of Resources and Environmental Science, South-central University for Nationalities, Wuhan 430074, China;
2. State Key Laboratory of Hydrology - Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. Changjiang Water Resources Protection Institute, Wuhan 430051, China; 4. College of Hydropower & Information Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China; 5. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 6. Communications Planning and Design Institute of Hubei Province, Wuhan 430051, China)

Abstract: In order to reveal the response mechanism of water environment change in the Dongting Lake to the water impoundment of the Three Gorges Reservoir, the former research was summarized and analyzed. The main conclusions have been drawn as follows: The main pollutants in the Dongting Lake were still total nitrogen and total phosphorus after the Three Gorges Dam was put into operation. The water quality of the lake has changed from poor-medium to mild eutrophication, which implies that the water quality is further deteriorated; The Three Gorges Project changed the original hydrological rhythm and the bed erosion and deposition in the lake area, which resulted in some changes in water quality indexes; The increasing emissions from the tributaries and Jingjiang reach gradually deteriorated water quality in the Dongting Lake; Lake-bed exposure time was advanced, and the wetland ecosystem suffered some damage to some extent; In addition, there are some differences in the evaluation indexes and results among different scholars, which has a certain impact on the water environment governance. It has been an urgent scientific issue to be solved that the reasonable prediction mechanism of water quality should be es-

收稿日期: 2018-04-28; 修回日期: 2018-07-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51509273); 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放研究基金项目(2015491111); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(CZW15072、CZW15126)

作者简介: 黄韬(1993-), 男, 广西南宁人, 硕士研究生, 主要从事水环境数值模拟方面研究。

通讯作者: 张俊宏(1983-), 男, 内蒙古呼伦贝尔人, 博士, 讲师, 硕士生导师, 从事水动力学及水环境方面研究。

established under the operation of the Three Gorges reservoir. The prediction mechanism could provide us with the scientific grounds and theoretical basis for the trend prediction and comprehensive management of water environment in the lake area.

Key words: impoundment of the Three – Gorges reservoir; water environmental changes; cause analysis; Dongting Lake

1 研究背景

三峡大坝位于洞庭湖水系上游,洞庭湖水系由三口(原为四口,调弦口于 1958 年建闸堵塞)与长江相连。洞庭湖水系来水、来沙量主要由四水、三口(四口)汇入,研究区域如图 1 所示。三峡工程 2003 年 6 月开始试验性蓄水,并于该月蓄水至 136 m,同年 11 月蓄水至 139 m,2006 年 10 月蓄水至 156 m,2008 年开始 175 m 的试验性蓄水,在 2010 年 10 月 26 日首次蓄水至 175 m。三峡有效库容为 $393 \times 10^8 \text{ m}^3$,约为长江干流径流量的 9.2%,由于水库的调度影响,三口汇入洞庭湖水系的水量在不同调度时段发生了变化,主要表现为汛期入湖流量减少,枯水期入湖流量增加。三峡蓄水水位 139 m 对三口分流影响不大,蓄水至 156 m 三口年分流量减少 $7.7 \times 10^8 \text{ m}^3$,蓄水至 175 m 使三口年径流总量减少 $83.1 \times 10^8 \text{ m}^3$,荆江干流中高流量决定了三口分流量,特别是大流量持续天数对三口分流量有着显著影响^[1]。三峡水库汛期有明显的削峰效应,汛期调度使得三口分流年径流量年均值减少约 $29 \times 10^8 \text{ m}^3$,而枯水期由于三峡水库的补偿调度,三口分流量增加了约为 $8 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[2]。此外,受极端天气、上游梯级水库调度等因素的影响,使得上游来水量减少,并且荆江河段受水库清水下泄冲刷,导致河床下切、水位下降,进而使得三口分流量再度减少。水库调节后不仅入湖水量发生了变化,入湖泥沙也同样受到影响,三峡大坝拦蓄泥沙,下泄水流含沙量减少,因而三口分流量也急剧降低,极大地改善了湖区多年淤积情况。王涛等^[3]对湖区南咀等水文站来沙量进行了分析,通过 1993 – 2002 年与 2003 – 2012 年的多年平均含沙量对比,发现含沙量从 0.426 kg/m^3 减少到 0.136 kg/m^3 ,并且在 2006 年蓄水至 156 m 时,多年平均含沙量减少到 0.107 kg/m^3 。

湖区含沙量减少,透明度增大,水生植物光合作用增强促进植物生长,植物大量消耗水中溶解氧影响水生动物生长繁殖,从而影响洞庭湖区水环境变化。洞庭湖流域是湖南省重要的工农业生产基地,在城镇建设过程中,每年向洞庭湖区排放的污水达到 8×10^8

t ^[4]。在工业上,湖区周围造纸、化工、食品、纺织、冶金等工业排污量增大,荆江河段主要为化工、复合肥、热电厂等向荆江连续排污,工厂废水通常含 Zn、Pb、Ni 等重金属,废水排入水体中通过四水与三口分流汇入湖区导致水中营养物质、重金属浓度增大,据统计,2014 年洞庭湖生态区湖南部分工业废水排放总量达 $28\,162 \times 10^4 \text{ t/a}$,氮磷浓度分别以 35、3 mg/L 计算则总氮排放量为 6 487.05 t、总磷为 287.65 t;在农业上,大量使用农药、有机复合肥等,且 Cu、Zn、Cd 常用作农药添加剂,残留的农药在雨水或者水携带作用下进入河流,再汇入湖区中,进一步影响湖区水质,据统计,2014 年湖区农业面源污染排放总氮、总磷分别为 442.81、18.7 t/d^[5-6]。由于三口分流入湖水量减少,湖区在春秋发生不同程度的旱情,湿地出露时间提前且面积增加,湖区水生动植物与微生物死亡,降低了湖区水体环境容量与自净能力^[7-8]。在洪水期,出露的湿地被淹没,动植物残骸在水中分解与降解,大量消耗水中的溶解氧,导致水中溶解氧浓度降低,影响水生动植物的生长,对湖区水体水质产生严重影响^[9-10]。在三峡蓄水影响下,洞庭湖多年水沙平衡被打破,调蓄功能下降,湿地系统受不同程度影响,湖区水环境问题日益凸显,湖区水质治理已迫在眉睫。

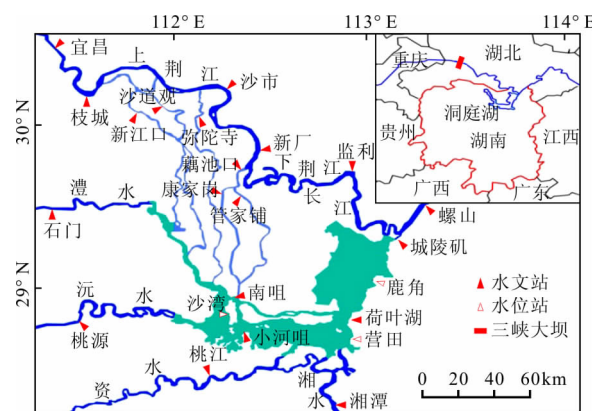


图 1 洞庭湖流域区域图

2 研究现状

2.1 洞庭湖水系水体质量变化趋势

近 30 年来,关于洞庭湖区水环境演化趋势的研

究成果不断涌现,虽然对水质的分析方法和表征指标各有差异,但分析的内容相接近,均表明洞庭湖水质污染愈发严重。研究指出,洞庭湖区三个湖区富营养化程度逐年上升,2008–2015年,东洞庭湖区呈轻度富营养化,西、南洞庭湖湖区总体呈中营养水平,其中东洞庭湖水质富营养化程度上升显著^[11–12]。2003年经三峡工程蓄水调度之后,下游洞庭湖区的水质在汛期污染更加严重,水质各指标呈上升趋势,总体仍处于中–富营养化程度,湖区水质从Ⅱ类水逐渐过渡到Ⅳ类水^[13–19],2005年监测数据发现Ⅴ类水与劣Ⅴ类水出现频率增大,尤其是Ⅴ类水出现最多,虽然在枯水期水质有所改善,但仍有40%~70%的Ⅴ类水。王琦等^[15]分析了1990–2012年出入湖水质监测数据,结果如图2所示。

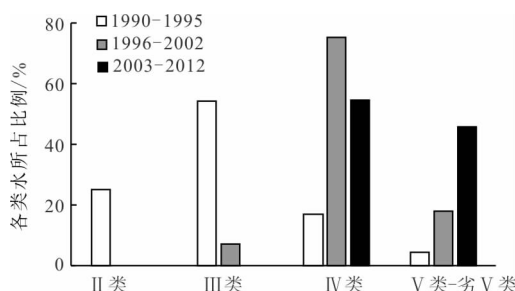
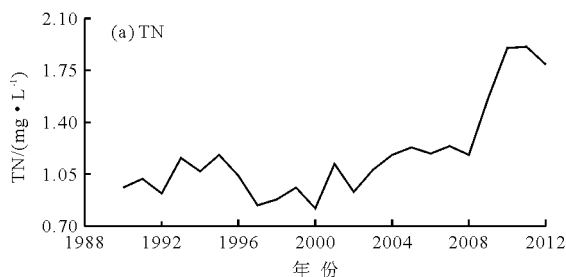


图2 不同时期洞庭湖各类水质占比图

由图2可见,在三峡蓄水之后,湖区的水质下降明显,Ⅳ、Ⅴ、劣Ⅴ类水增多,Ⅱ、Ⅲ类水消失,污染加重,以卡尔森综合营养状态指数(TLI)等评价方法对湖区水质指标进行了评价,2008年–2010年的 TLI 指数呈上升趋势,呈轻度富营养,说明湖区污染加重,水质变化形势严峻。

2.2 三峡蓄水前后洞庭湖区水环境指标变化趋势

大量学者对湖区水质的主要表征指标TP、TN



等进行了深入的分析^[20–22]。总氮、总磷年际变化如图3所示,1990–2002年,TN呈现上下波动状态,TP呈波动上升趋势^[23]。在三峡蓄水期(2003–2008年),TN指标呈波动上升趋势,但在2008年至2012年呈现出剧烈的上升的趋势。TP在三峡蓄水前波动上升,于2008年达到峰值,在2008–2012年呈下降趋势。磷主要是附着于泥沙表面,随泥沙入湖,三峡蓄水后下泄泥沙减少,三口分流入湖泥沙也大幅减少,因此TP呈下降趋势,但湖区水体总磷指标仍处于较高水平。总氮总磷主要来源为四水河道中汇集的生活、生产排污水、农业残留农药、化肥被雨水冲刷进入水体,导致四水入湖水体中含有大量溶解态的氮磷,使得湖区总氮总磷含量增加,且湖区整体氮磷的污染以面源污染为主^[7]。此外,重金属污染在有关部门的整治之下,污染程度远远小于上述两大指标。特别在三峡蓄水以后,库区重金属污染在靠近坝前河段水质得到明显改善,对比库区清溪场、奉节两断面水质TP、TN、COD_{Mn}、Pb、Cu、Cd等指标发现TP、COD_{Mn}、Pb、Cu的含量沿程降低,其使得下泄水流水质也得到了改善^[24]。毕斌^[6]对湖区重金属污染研究指出,湖区Zn、As、Cu、Ni、Pb、Cr、Cd、Hg等重金属指标中,并未在水体中检测出Hg,且其余金属含量均低于地表水环境质量Ⅲ类标准值,但重金属污染物大多数吸附于颗粒物体,并于流速缓慢区域沉积于底泥中,研究表明湖区沉积层中Cd、Zn、Hg超标严重;在2003–2013年,沉积层中Cd、As、Pb、Cu、Cr含量呈波动上升的趋势,Cr在湖区沉积物中的含量由2003年100 mg/kg增长到2013年140 mg/kg,因此重金属污染物的含量应根据底泥沉积物以及表层水体两个方面进行评价。

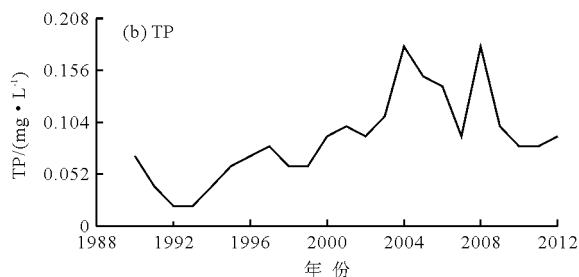


图3 洞庭湖区水质总氮、总磷浓度年际变化图

湖区水情变化同样影响到湖区藻类生长,藻类的丰富程度能够在一定程度上反映水体的富营养状态。藻类中含有叶绿素a,叶绿素作为衡量水体中藻类数量丰富程度的重要指标,同样也是反映水质

状况的一个重要指标。洞庭湖区水体叶绿素含量与水体总氮、总磷含量呈正相关,当湖区水体氮磷浓度呈增大趋势,叶绿素a指标也随之增高,湖区叶绿素a指标还具有一定的季节变化特性,呈现出夏季含

量最大,春季最小的特点,且湖内各区域水体叶绿素含量也有所差异,其中东洞庭湖高于西、南洞庭湖^[25-27]。三峡蓄水拦沙,入湖沙量减少,湖区水体透明度增加,四水水体含大量氮磷污染物注入洞庭湖区,增加了藻类生长所需营养物质与光照条件,有利于藻类的繁殖,因此也加速了湖区水质的恶化^[28-31]。此外,不仅湖区水体水环境受到影响,湖区湿地系统水环境问题也日益突出,李有志等^[9]采用了非参数统计检验法(Mann-Kendall)对洞庭湖湿地水环境指标进行了趋势分析,结果表明湿地系统 TP、TN 指标与湖区水体 TP、TN 指标同样呈上升趋势, COD、BOD₅ 等水体指标也呈上升趋势,湿地环境整体水质下降。

2.3 湖区湿地生态系统环境现状

在三峡大坝的调蓄作用下,入湖水量在汛期有所减少,枯水期增多,但三口断流天数有所增加^[32-34]。三峡蓄水运用以后,三口分流量减少,湖区湿地系统受到影响,湖区水位下降,湿地提前出露,导致湿地土壤开裂,湿地植物枯萎死亡^[35-38]。湖区湿地生态系统平衡的破坏,对湖区水质也产生了一定程度的影响。湖区湿地出露对土壤潜育化、血吸虫病传播、钉螺的繁殖扩散也产生了不同程度的影响。三峡蓄水后使得枯水期提前,湿地、滩地出露时间也随之提前,加快了钉螺繁衍、血吸虫病传播,钉螺繁殖加快直接影响湖区周围农业生产,血吸虫病也会对人们的健康造成严重威胁^[39-41]。同时,三峡水库调蓄对洞庭湖湿地的生态结构变化还产生了一定的影响,三峡蓄水减少了湖区泥沙的淤积量,泥沙滩地面积明显减少,各类滩地相互转化,旱地大面积转化为水田,水体面积减少,泥沙滩地转变成旱地,水田转换成苔草滩地,滩地的相互转化促使着植被群落的演替。入湖水量减少,芦苇等水生植物群落向前推进,促进湖区植被群落的正向演替^[37,42]。此外,洞庭湖作为国家级的湿地自然保护区,其湖区湿地生态系统具有很强的景观效应,其服务价值亦不容忽视^[43-44]。因此,三峡蓄水影响下的湖区湿地生态系统修复与保护问题十分重要,需要得到相关管理部门的高度重视。

3 主要水质指标变化成因分析

3.1 重金属含量

湖区周围为居民区和工农业基地,城镇化过程中会产生大量的生活污水以及工业废水,污水、废水排入水体造成水体污染,其中连接洞庭湖区的四水

流域承接了大量的工农业污水排放,是湖区重金属污染物的主要来源。重金属污染物进入湖区后一部分随水流流向下流,一部分附着于泥沙表面在流速变缓处沉积富集。经三峡调蓄后,经三口进入洞庭湖的江水含沙量大幅降低,湖区多年淤积情况发生变化,湖区泥沙在汛期淤积、非汛期冲刷^[45-46]。三峡蓄水前湖区在长期淤积的情况下底泥重金属含量丰富,在蓄水后冲刷过程中,底泥中的重金属污染物再悬浮、溶解于水中或吸附于泥沙表面,增大了水体重金属污染物浓度。在湖区底泥冲淤发生变化情况下,不同时期底泥对湖区水质重金属指标也发生变化。张光贵^[47-48]以加拿大安大略省保护和管理淡水水生环境沉积物质量评价标准对洞庭湖区沉积层中的重金属生态评价指标进行评测,结果指出 Cd、Hg、As、Cu、Pb、Cr 等金属对生态环境风险较低,但部分湖区的 Cd、As 有较高的生态环境风险,因此,在湖区底泥冲刷情况下,湖区水质重金属指标对湖区生态环境风险同样存在着影响。而万群等^[16]认为重金属污染物中 Cu 是对生态风险贡献最大的指标,并指出除 Cu 外其余重金属含量未超过国家标准。湖区重金属污染物扩散传输不仅受到四水工农业污水汇入影响,还与荆江河段工业排污口连续排污密切相关^[49-50]。荆江沙市河段分布的石油化工厂、热电厂炼油车间以及氮肥厂等生产产生的废气经降雨作用流入水体,荆江河段还排布着各城市工厂的排污口,连续向江中排污,造纸厂排污带有砷污染物,化肥厂排污带有铜污染物,经三口分流汇入洞庭湖区。此外,荆江河段和洞庭湖航线作为我国长江黄金水道的重要组成部分,长江航运船舶每年产生油污约为 6×10^4 t^[51-52],船舶运行时产生的污染物排入水中,对湖泊水质的影响亦不能忽视。上游来水经三峡调蓄后,枯水期下泄补水,三口分流入湖水量增加,所携带污染物增多,但湖区水环境容量增大,湖区整体重金属污染情况有所好转,在汛后蓄水期,由三口分流入湖水量减少,湖区水环境容量减小,但三口分流与四水入汇所携带污染物共同作用下,湖区重金属污染物浓度反而上升,因此三峡调度在一定程度上改变了湖区水质的季节特征^[7,51]。因此为降低洞庭湖重金属风险,各生产排污部门应该严格把控排污水中的重金属污染物浓度,也有学者提出改进工厂工艺技术,减少重金属污染物的排放。

3.2 总氮及总磷含量

三峡蓄水运用以后,大量泥沙被拦蓄在库内,因此吸附于泥沙表面的磷等污染物同样也被拦蓄其

中,同时分流入湖氮磷等污染物也随泥沙减少而减少,因而由干流水质变化而引起湖区水质恶化的情况得到一定程度遏制,但湖区总磷指标仍处于超标状态。这是因为湖区总氮总磷浓度调控的主要因素是湖区周围城镇乡村工农业地区氮磷污染物的排放量。三峡蓄水减少入湖沙量在一定程度上降低了总磷浓度,但在湖区周围城镇化快速发展过程中,企业发展迅速,农业需水量增大,城镇生活用水增多,排放的水中氮磷污染物大量增加,同时洪水或降雨将沿岸农业残留肥料冲刷入湖,也大幅增加了水体氮磷含量^[20-21]。此外,氮磷污染物还由荆南三口分流汇入湖区水体,荆江河段排布了大量冶金、化学、纺织、造纸厂的排污口,由排污口向河流连续排放工业废水,废水中含有大量的氮磷化物,枝江、荆州、公安等城市工厂连续向水体排放废水,排放流量在 $0.0061 \sim 0.6200 \text{ m}^3/\text{s}$ 不等,主要排放的污染物为氮磷、砷、铜、悬浮物、BOD、COD等,不仅增加了水体氮磷含量,也增大了水体的生化需氧量、化学需氧量,需氧量增大,水体中的溶解氧含量降低^[53]。总之,造成洞庭湖水环境的总氮总磷超标的主要原因是农业残留肥料冲刷入湖的面源污染以及各工厂排污口排放废水的污染。图4为2014年洞庭湖工业、农业、生活污水排放总量统计图,由图4可知湖区总氮总磷污染物主要由生活污水排放以及农业污染物排放占主导地位。因此应大力控制湖区周边工农业排污,或提高污水处理能力,减少污染物的排放。

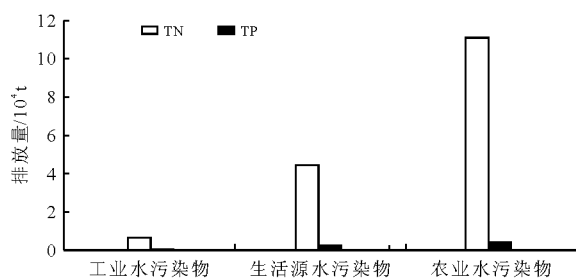


图4 2014年洞庭湖各部门总氮总磷排放总量统计图

湖区总氮总磷含量的变化直接反映在其表征指标的变化,如叶绿素a含量逐年上升,其中东洞庭湖叶绿素a含量大于西、南洞庭湖。主要原因是东洞庭湖紧邻岳阳市,承纳较多的工农业废水以及生活污水,而污水、废水中氮磷含量较高,水体氮磷浓度增大,补充了藻类生长所需营养元素,生长环境改善,营养物质充足,促使藻类大量繁殖,进而叶绿素a含量上升。此外,TN、TP变化还受到三峡蓄水湖区来沙量减少的影响。三峡蓄水后,湖区含沙量也

有所降低,水体透明度增大,有利于藻类的光合作用,加快藻类繁殖。同时,三峡水库蓄水后江湖关系发生变化,洞庭湖湖区水质更新周期变长,藻类可利用的氮磷等营养物质在湖中富集、浓度增大,也致使其繁殖加快,导致叶绿素a含量上升。目前湖区尚未发生水华现象,其原因之一是三峡水库调蓄运行加快了局部湖区水体流速,水体流速增大将藻类随水流带到下游,分散了藻类的生存环境,使得藻类生长受到抑制^[54]。

4 存在的问题及展望

洞庭湖湖区承接荆江三口、四水的来水,三峡工程的调蓄下,湖区水环境变化情势复杂,总氮总磷指标变化不容乐观,水文条件变化对水环境变化影响较大,洞庭湖水环境进行治理面临重大挑战。三峡蓄水减少三口分流量,入湖水量减少同时降低洞庭湖水环境容量,湖区周围城镇持续向水体排污,影响洞庭湖水质,为对洞庭湖水环境进行治理,应对湖区进行更全面细致的分析,精确评价湖区水环境现状。湖区水环境研究现存问题主要有:

(1)三峡蓄水后,湖区冲淤情况发生变化,缺乏不同时期底泥冲淤的定量分析,难以确定沉积层中污染物再悬浮对水环境的风险分析。

(2)三峡蓄水后,湖区水情发生变化,在三峡不同的调度形式之下,尚未见到对各部门用、排水量变化的研究和分析,湖区周围工农业以及生活用水量发生变化,排污量同样受到影响,入湖水量减少同时降低了水环境容量,在水环境容量发生变化时,各用水部门排污量应有定量分析,以减少对湖区水环境的影响。

(3)对湖区水质进行评价时,缺乏系统全面和统一的评价标准,各学者的评价指标以及评价方法迥异,导致对湖区水环境评价分析结果有所差别,这将影响有关部门对湖区水体治理的决策。

(4)三峡蓄水运用后,湖区生态湿地系统遭受了不同程度的破坏,目前仍缺乏水环境、水生态恶化的细致评估指标体系以及恢复生态系统的有效整治措施。

(5)湖区氮磷污染物主要来源为生活用水以及农业排污水,水环境治理应从源头治理,如何有效减少生产、生活污染水,降低排污水体中污染物浓度,实现在不同水文条件下湖区废水排放量的管控。总之,在研究湖区水环境变化过程时,应注意湖区污染源的调查,不同水文条件下湖区污染物状态的异同

点,以及不同用水部门之间用排水量的变化等,这些因素对湖区水环境变化影响较大。

荆江-洞庭湖区由众多水系共同影响,确切评价其水质及其污染来源十分困难。污染物在时空分布上发生变化,且各污染物在不同环境的降解和容量也有所差异。人类活动频繁导致了污染物来源的不确定性,且河道不断发生沉积、冲刷,动态变化难以确定。湖区在不同冲淤条件下引起湖区底泥污染物的再悬浮,因此,在对湖区水环境进行研究时,应加强监测的频率,采用多点源采样分析,分析污染物来源,确定水质动态变化过程。同时根据三峡水量调度规则,优化各部门的用水、排污过程,提高水资源的利用效率,降低排放废水的污染物浓度。此外,三峡水库运行的调度方式不同,对湖区水环境影响也不一致,因此在治理湖区水环境问题时,还需结合三峡水量调度规则,对湖区水质水环境进行治理,实现湖区水量水质的综合调控。

参考文献:

- [1] 王冬,方娟娟,李义天. 三峡水库调度方式对洞庭湖入流的影响研究[J]. 长江科学院院报,2016,33(12):10-16.
- [2] 朱玲玲,许全喜,戴明龙. 荆江三口分流变化及三峡水库蓄水影响[J]. 水科学进展,2016,27(6):822-831.
- [3] 王涛,程遥. 三峡水库蓄水前后洞庭湖区主要水文站泥沙变化趋势分析[J]. 长江工程职业技术学院学报,2014,31(2):1-3+6.
- [4] 杨喜生,齐增湘,王宽. 洞庭湖水生态环境的演变与保护措施分析[J]. 资源节约与环保,2016(4):162-163.
- [5] 吕志贤,石广明,彭小丽. 基于污染物来源的洞庭湖水环境生态补偿主客体研究[J]. 中国环境管理,2016,8(6):25-31.
- [6] 毕斌. 洞庭湖水环境中重金属污染特征、赋存形态及其源解析[D]. 临汾:山西师范大学,2017.
- [7] 李广源. 三峡工程运行后对洞庭湖水体污染及水环境容量的影响研究[D]. 南京:河海大学,2005.
- [8] YANG Shijun, HU Haiying, HAO Zhenchun. Trend forecast for the influence of the three gorges project on the water environmental capacity of Dongting Lake[C]//Power and Energy Engineering Conference, 2009, APPEEC 2009. Asia-Pacific. IEEE, 2009:1-4.
- [9] 李有志,刘芬,张灿明. 洞庭湖湿地水环境变化趋势及成因分析[J]. 生态环境学报,2011,20(Z2):1295-1300.
- [10] HOU Ying, CHEN Weiping, LIAO Yuehua, et al. Scenario analysis of the impacts of socioeconomic development on phosphorous export and loading from the Dongting Lake watershed, China[J]. Environmental Science & Pollution Research, 2017,24(34):1-18.
- [11] 熊剑,喻方琴,田琪,等. 近30年来洞庭湖水质营养状况演变特征分析[J]. 湖泊科学,2016,28(6):1217-1225.
- [12] 周泓,欧伏平,刘妍. “十一五”期间洞庭湖水环境质量状况及变化趋势分析[J]. 湖南理工学院学报(自然科学版),2011,24(2):88-90.
- [13] 申锐莉,张建新,鲍征宇,等. 洞庭湖水质评价(2002-2004年)[J]. 湖泊科学,2006,18(3):243-249.
- [14] 李忠武,赵新娜,谢更新,等. 三峡工程蓄水对洞庭湖水环境质量特征的影响[J]. 地理研究,2013,32(11):2021-2030.
- [15] 王琦,欧伏平,张雷,等. 三峡工程运行后洞庭湖水环境变化及影响分析[J]. 长江流域资源与环境,2015,24(11):1843-1849.
- [16] 万群,申升,汪铁,等. 三峡工程截流后洞庭湖水体污染及风险分析[J]. 环境科学与技术,2012,35(S1):225-228+247.
- [17] 段玮娟,王旭,史璇. 洞庭湖三口河系地区水环境演变趋势研究[J]. 长江流域资源与环境,2012,21(S2):132-137.
- [18] 郭晶,田琪,黄艳芳. 三峡工程截流后洞庭湖的水质和富营养化变化[J]. 岳阳职业技术学院学报,2014,29(4):82-85.
- [19] 禹雪中,彭期冬,廖文根,等. 三峡蓄水前后库区水质特征及泥沙影响研究[C]//全国水力学与水利信息学大会,2007.
- [20] 黄代中,万群,李利强,等. 洞庭湖近20年水质与富营养化状态变化[J]. 环境科学研究,2013,26(1):27-33.
- [21] 王丽娟,汪星,刘录三,等. 洞庭湖水质因子的多元分析[J]. 环境科学研究,2013,26(1):1-7.
- [22] 杜乔乔,孙甲岚,周潮晖. 引滦调水期河道水中氮素形态特征分析[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(5):82-86.
- [23] 秦迪岚,罗岳平,黄哲,等. 洞庭湖水环境污染状况与来源分析[J]. 环境科学与技术,2012,35(8):193-198.
- [24] 卢宏伟,曾光明,何理. 洞庭湖流域水体污染物变化趋势及风险分析[J]. 水土保持通报,2004(2):12-16.
- [25] 周海东,胡涛,轩玉梅,等. 典型微量金属元素对铜绿微囊藻生长影响的研究[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(5):9-13.
- [26] 张屹,李利强,欧伏平,等. 洞庭湖水体叶绿素a的时空变化特征[J]. 南方农业,2016,10(3):161+165.
- [27] 龙云芳,葛大兵,谢小魁,等. 洞庭湖立体养殖生态系统底泥总氮与总磷的时空变化及其与叶绿素a的关系[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版),2012,38(2):

- 208–211.
- [28] 张光贵. 洞庭湖水体叶绿素 a 时空分布及与环境因子的相关性[J]. 中国环境监测, 2016, 32(4): 84–90.
- [29] PAN Baozhu, WANG Haijun, LIANG Xiaoming, et al. Factors influencing chlorophyll a concentration in the Yangtze – connected lakes [J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2009, 18(10): 1894–1900.
- [30] 姜岩. 洞庭湖营养机理研究及叶绿素 a 与各影响因子的多元分析[D]. 长春: 吉林建筑大学, 2014.
- [31] 田琪, 李利强, 黄代中. 洞庭湖浮游植物群落结构与富营养化特征分析[J]. 当代水产, 2012, 37(7): 72–74.
- [32] 李景保, 张照庆, 欧朝敏, 等. 三峡水库不同调度方式运行期洞庭湖区的水情响应[J]. 地理学报, 2011, 66(9): 1251–1260.
- [33] 韩剑桥, 孙昭华, 杨云平. 三峡水库运行后长江中游洪、枯水位变化特征[J]. 湖泊科学, 2017, 29(5): 1217–1226.
- [34] 唐国民, 袁晓玲, 张磊. 三峡蓄水后宜昌水位流量关系变化分析[J]. 中国水运·航道科技, 2016(6): 20–23.
- [35] 黄维, 王为东. 三峡工程运行后对洞庭湖湿地的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(20): 6345–6352.
- [36] 李景保, 代勇, 殷日新, 等. 三峡水库蓄水对洞庭湖湿地生态系统服务价值的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(3): 809–817.
- [37] 秦建新, 尹晓科. 洞庭湖区湿地生态环境问题与对策[J]. 人民长江, 2009, 40(19): 12–14.
- [38] 贺建林, 陶建军. 三峡工程对洞庭湖环境影响的几个主要方面的探讨[J]. 湘潭师范学院学报, 1996(3): 61–65.
- [39] LI Zhongwu, NIE Xiaodong, ZHANG Yan, et al. Assessing the influence of water level on schistosomiasis in Dongting Lake region before and after the construction of Three Gorges Dam[J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2016, 188(1): 1–10.
- [40] LI Feiyue, MA Shujuan, LI Yiyi, et al. Impact of the Three Gorges project on ecological environment changes and snail distribution in Dongting Lake area [J]. *Plos Neglected Tropical Diseases*, 2017, 11(7): e0005661.
- [41] 邓帆, 王学雷, 厉恩华, 等. 1993–2010 年洞庭湖湿地动态变化[J]. 湖泊科学, 2012, 24(4): 571–576.
- [42] 杨利, 谢炳庚, 秦建新, 等. 三峡建坝前后洞庭湖区湿地景观格局变化[J]. 自然资源学报, 2013, 28(12): 2068–2080.
- [43] 杨利. 三峡工程对洞庭湖区湿地景观格局及生态健康的影响研究[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2013.
- [44] 郭小虎, 韩向东, 朱勇辉, 等. 三峡水库的调蓄作用对荆江三口分流的影响[J]. 水电能源科学, 2010, 28(11): 48–51.
- [45] DAI Minglong, WANG Jun, ZHANG Mingbo, et al. Impact of Three Gorges Project operation on the water exchange between Dongting Lake and the Yangtze River[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2017, 32(4): 506–514.
- [46] 李义天, 郭小虎, 唐金武, 等. 三峡建库后荆江三口分流的变化[J]. 应用基础与工程科学学报, 2009, 17(1): 21–31.
- [47] 张光贵. 洞庭湖表层沉积物中重金属污染特征、来源与生态风险[J]. 中国环境监测, 2015, 31(6): 58–64.
- [48] 张光贵. 洞庭湖表层沉积物营养盐和重金属污染特征及生态风险评价[J]. 水生态学杂志, 2015, 36(2): 25–31.
- [49] LI Fei, HUANG Jinhui, ZENG Guangming, et al. Spatial risk assessment and sources identification of heavy metals in surface sediments from Dongting Lake, Middle China [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2013, 132(3): 75–83.
- [50] HU Cong, DENG Zhengmiao, XIE Yonghong, et al. The risk assessment of sediment heavy metal pollution in the east Dongting Lake Wetland [J]. *Journal of Chemistry*, 2015, 2015(15): 1–8.
- [51] 冯敏. 航运对长江水质的影响分析[D]. 上海: 上海海事大学, 2005.
- [52] 袁群. 长江航运对流域水环境质量影响的分析研究[J]. 生态经济, 2014, 30(7): 92–95.
- [53] 郭满姣. 浅析荆江河段三氧污染状况[J]. 建筑工程技术与设计, 2014(33): 648+1193.
- [54] 王岩. 洞庭湖氮磷时空分布及生态风险评价[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014.