

洞庭湖水质变化及其形成机制分析

胡光伟^{1,2,3}, 张明⁴, 刘珍^{1,2}, 徐佳豪^{1,2}, 樊姿^{1,2}

(1. 湖南工业大学 城市与环境学院, 湖南 株洲 412007; 2. 湖南工业大学 农牧业
废弃物资源化综合利用湖南省重点实验室, 湖南 株洲 412007; 3. 中国科学院陆地
水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101; 4. 湖南省国土资源规划院, 湖南 长沙 410007)

摘要: 利用洞庭湖区 14 个监测断面的 1991–2015 年水质监测数据以及入出湖 9 个水文站的径流量和输沙量数据, 结合水质单因子评价法和综合营养状态指数法系统评价和分析了洞庭湖水质与营养状态演变特征。结果表明: 洞庭湖水质整体上表现出明显的恶化趋势, 由 1991–1994 年的 II 类水质为主演变为 2011–2015 年的 IV 类水质为主; 洞庭湖富营养化状态由中营养状态逐步演变为轻度富营养化, 导致水质变化的关键指标是 TN 和 TP; 从空间分布看, 东洞庭湖污染最为严重, 西、南洞庭湖污染较轻。探讨了洞庭湖水质变化的主要致污因子, 点源和面源是其两大主要污染物来源, 同时还受江湖关系变化的影响, 尤其是受到荆江三口来水锐减的影响。最后对治理湖区水质环境提出建议和对策, 为湖区水生态安全提供理论基础和政策支持。

关键词: 洞庭湖; 水质污染; 富营养化; 水沙变异; 三峡工程

中图分类号: X524; X824

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)03-0039-07

Analysis of water quality change and its formation mechanism of Dongting Lake

HU Guangwei^{1,2,3}, ZHANG Ming⁴, LIU Zhen^{1,2}, XU Jiahao^{1,2}, FAN Zi^{1,2}

(1. College of Urban and Environment Science, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Agricultural and Animal Husbandry Waste Resources, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China; 3. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, CAS, Beijing 100101, China; 4. Hunan Planning Institute of Land Resources, Changsha 410007, China)

Abstract: Based on the water quality monitoring data of 14 monitoring sections of Dongting Lake in 1991–2015 and runoff and sediment discharge monitoring data of nine hydrological stations input and output of the lake, the temporal and spatial trends of water quality and characteristics of nutrient condition evolution in Dongting Lake were analyzed using single factor's evaluation and water trophic level index (TLI). The results showed that the overall water quality of Dongting Lake showed a significant deterioration. The water quality of Dongting Lake remained at a level of IV in the years 2011–2015, and the percentages of I–III level declined significantly from 1991 to 1994. The eutrophication of lakes gradually became mild eutrophication, and the main pollutants were TN and TP. From the spatial distribution, eastern Dongting Lake pollution was the most serious. Western Dongting Lake and Southern Dongting Lake were less polluted. Then the formation mechanism and the highest pollution factors of water quality change in Dongting Lake were reviewed. Industrial wastewater, domestic sewage and agricultural non-point source pollution comprised the main pollution sources. At the same time, water quality change was also adversely affected by the change of river-lake relation, especially the three outlets of the Jingjiang River. A series of prevention and control measures for water quality in the Lake District was later put forward, aiming at provi-

收稿日期: 2018-09-26; 修回日期: 2019-01-08

基金项目: 湖南省社会科学基金项目(16YBQ022); 湖南省自然科学基金项目(2017JJ3056); 湖南省社会科学成果评审委员会课题(XSP18YBC064); 株洲市科技计划项目; 中国科学院陆地水循环及地表过程重点实验室开放基金项目(WL2016A001); 湖南工业大学教学改革项目(2017B40)

作者简介: 胡光伟(1983-), 男, 河南固始人, 博士, 讲师, 研究方向为湖泊水资源与水环境。

软件使用 Origin2019。

3 结果与分析

3.1 洞庭湖整体水质演变状况

根据《地表水资源质量评价技术规程(SL 395 - 2007)》的要求,结合数据资料的可获取性,选取 TN、TP、NH₃-N、COD_{Cr}、COD_{Mn} 5 个常用评价指标分析湖区水质变化趋势。1991 - 2015 年 5 个关键水质指标变化趋势见图 2。

在 1991 - 2015 的 25 a 间,TP 浓度大致呈现出有升有降的波动变化(图 2(a)),浓度变化介于 0.027 ~ 0.172 mg/L 之间,1995 年之后均高于 0.05 mg/L(Ⅲ类水质标准限值),在Ⅳ类水质标准限值上下波动。其中 1991 - 1999 年 TP 浓度波动较大,从Ⅲ类水质变化到Ⅳ类水质,在 1999 年达到最大值;2000 - 2015 年 TP 浓度维持在Ⅳ类水质上下波动,其中,2004 - 2009 年 TP 浓度基本处于Ⅳ类水质,这一阶段的 TP 浓度是前一阶段的 1.47 倍,2009 年之后出现下降,但 2013 年重新开始上升,整体来看上升趋势较为明显。

TN 的浓度总体上呈现出较为显著的波动上升趋势(图 2(b)),TN 浓度变化介于 1.121 ~ 2.056 mg/L 之间,均高于 1 mg/L(Ⅲ类水质标准限值),且由Ⅳ类水质逐渐变化为Ⅴ类水质。其中,2009 年之前,TN 浓度基本处于Ⅲ - Ⅳ类水质之间变化,但从 2010 年 TN 浓度迅速上升至Ⅴ类水质,这一阶段的浓度是前一阶段的 1.43 倍。

COD_{Mn} 浓度的变化呈现出显著的上升趋势(图 2(c)),变化范围介于 2.087 ~ 4.859 mg/L 之间,其平均值 3.269 mg/L 低于 4 mg/L(Ⅱ类水质标准限值),表现出由Ⅱ类水质向Ⅲ类水质变化的趋势,但整体浓度处于较好的Ⅱ类水质。

COD_{Cr} 浓度波动变化无显著趋势性(图 2(d)),浓度最大值是最小值的 2.67 倍,但是整体处在Ⅰ - Ⅱ类水质范围内变化,在 2000 年达到峰值,其他时间段均处于较好的Ⅰ类水质。

NH₃-N 的浓度变化较小(图 2(e)),表现出先上升后下降再上升的趋势。浓度变化介于 0.181 ~ 0.394 mg/L 之间,均低于 0.5 mg/L(Ⅱ类水质标准限值)。

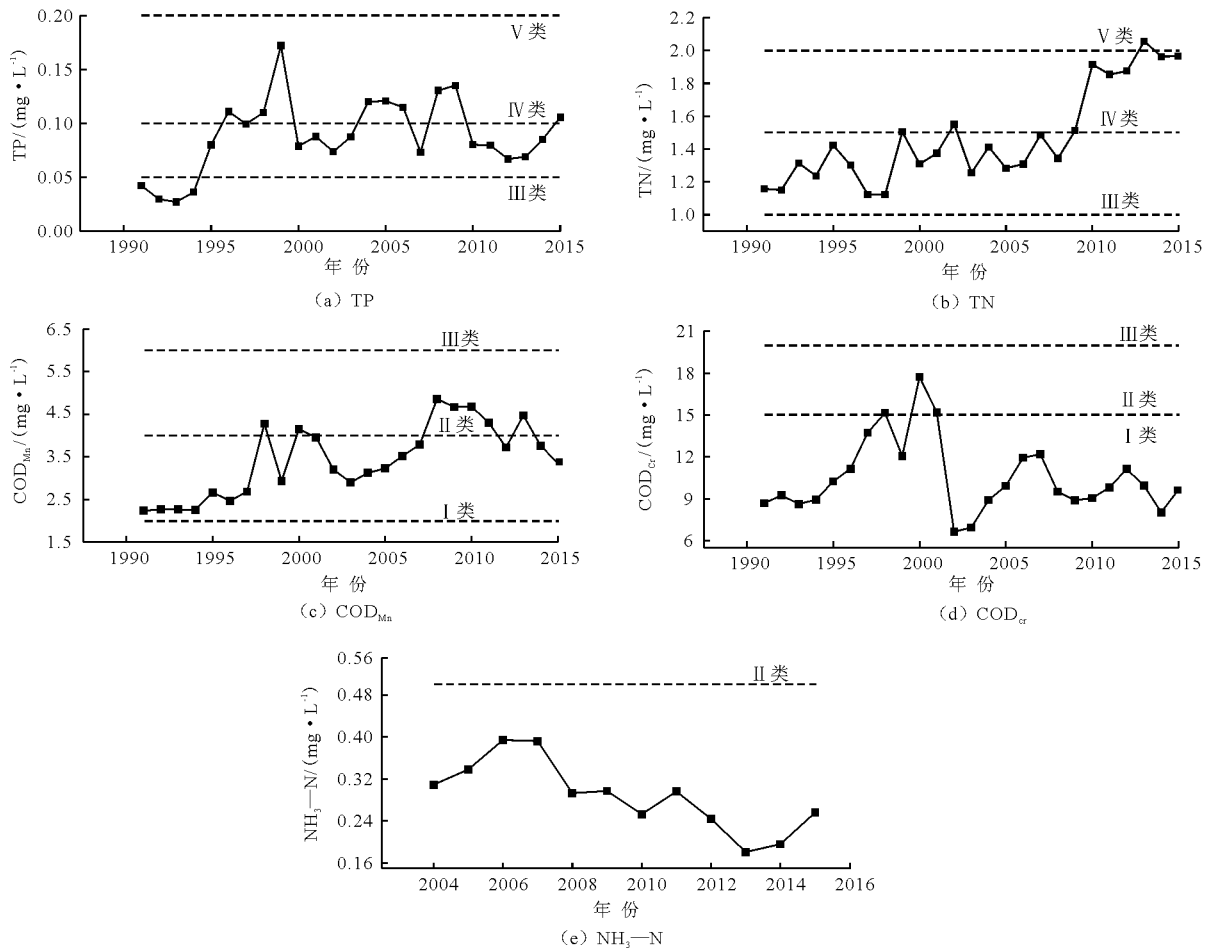


图 2 洞庭湖关键水质指标变化趋势图(1991 - 2015 年)

从洞庭湖的整体水质来看,可以发现洞庭湖水质由1991-1994年的II类水质为主演变为2011-2015年的IV类水质为主(图3),影响洞庭湖水质状况的主要污染物以TP和TN为主,超标率分别达71.9%和62.1%,其他指标介于I-III类水质(图2)。14个断面的水质评价结果见表1,由表1可看出,只有万家嘴、坡头、沙河口和樟树港4个断面水质呈现II或III类水质,水质优良,其余大部分断面都属于IV类水质,特别是东洞庭湖和岳阳楼断面出现V类水质,洞庭湖水质呈现出恶化趋势。通过计算,IV类水质和V类水质在不同阶段的平均比例为1991-1999年占13.2%,2000-2009年占14.1%,2001-2015年占30.6%,可以看出,洞庭湖整体水质呈现出加速恶化的趋势。

特别是通过评价洞庭湖各断面2015年水质可以看出,洞庭湖的不同类别水质(II~V类)的比例分别占14.07%、13.57%、58.12%和14.24%,IV类和V类水质的比例在不断增大,评价结果见表1、2。

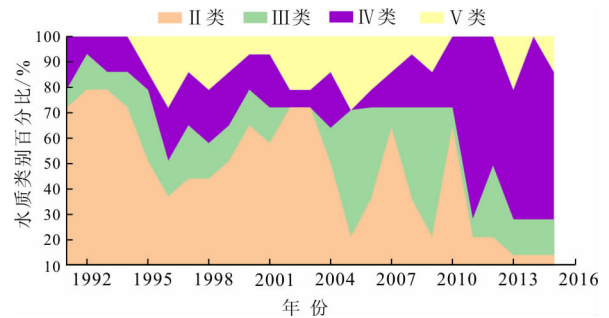


图3 洞庭湖水质类别演变特征(1991-2015年)

表1 洞庭湖各断面水质评价结果

樟树港	万家嘴	坡头	沙河口	南嘴	目平湖	小河嘴	万子湖	横岭湖	虞公庙	鹿角	东洞庭湖	岳阳楼	洞庭湖出口
III	II	II	III	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	V	V	IV
良好	优	优	良好	轻度污染	轻度污染	轻度污染	轻度污染	轻度污染	轻度污染	轻度污染	中度污染	中度污染	轻度污染

整体水质评价一般按下述判别标准进行: I-III类水质比例大于等于90%时,水质为优; I-III类水质比例小于90%同时大于等于75%时,水质为良好; I-III类水质比例小于75%,且劣V类比例小于20%时,水质为轻度污染; I-III类水质比例小于75%,且劣V类比例小于40%但大于等于20%时,水质为中度污染; I-III类水质比例小于75%,且劣V类比例大于等于40%时,水质为重度污染。因此,根据各水质类别断面所占比例(表2)可以得出,洞庭湖III类水质断面比例小于75%,劣V类水质断面比例为0,根据水质类别判定标准,洞庭湖整体水质为轻度污染。另外,通过Spearman秩相关系数对洞庭湖整体I-III类水质的年际变化进行趋势检验,结果显示,Spearman相关系数 R 值为-0.673, T 统计量值为-2.490,在95%的置信水平下, T 临界值为2.060, $|T| > 2.060$,充分表明25年来洞庭湖I-III类水质呈现出极显著的下降趋势,即洞庭湖的水质恶化趋势显著。

3.2 洞庭湖分湖区主要污染物分析

洞庭湖分为西洞庭湖、南洞庭湖和东洞庭湖3个部分,使用算术平均数的方法分别对其控制断面的污染物进行计算处理,限于篇幅,本文仅列出1991-2015年3个湖区TN和TP的变化趋势,见图

4。分别对影响洞庭湖水质污染的TN、TP、 COD_{Mn} 、 NH_3-N 和 COD_{Cr} 的变化趋势进行秩相关趋势检验,见表3。结果表明,湖区TN浓度表现出的上升趋势非常显著(图4(a)),在0.840~2.283 mg/L之间波动上升,且从表3的趋势检验中看出,西、南、东洞庭湖均呈现出极显著的上升趋势。从图4(a)可以看出,在2003年以前,TN浓度无明显变化趋势,2003-2007年波动变化幅度变大,而2009年以后呈现极显著的上升态势。在空间分布上,TN浓度的变化总体上表现出:东洞庭湖最大,南洞庭湖次之,西洞庭湖最小。

湖区的TP浓度表现出不同的变化趋势,整体的波动较TN浓度变化平缓,由图4(b)和表3可知,东、西、南洞庭湖TP浓度变化均表现出较为显著上升趋势,其中南洞庭湖的TP浓度上升趋势更为显著。3个湖区的TP浓度变化均呈现出由III-IV类水质向V类水质转化的趋势,但3个湖区的TP浓度变化在空间上表现的差异性并不明显,东洞庭湖的TP浓度比其他湖区略高。

3.3 洞庭湖富营养化变化趋势

总体来看,全湖长期处于中营养状态,但洞庭湖全湖TLI指数呈现逐年波动上升趋势,1991-2015年洞庭湖3个湖区TLI指数变化趋势见图5。

表 2 洞庭湖各水质类别所占比例

I 类	II 类	III 类	IV 类	V 类	劣 V 类	I - III 类	I - IV 类
0.00	14.07	13.57	58.12	14.24	0.00	27.64	85.76

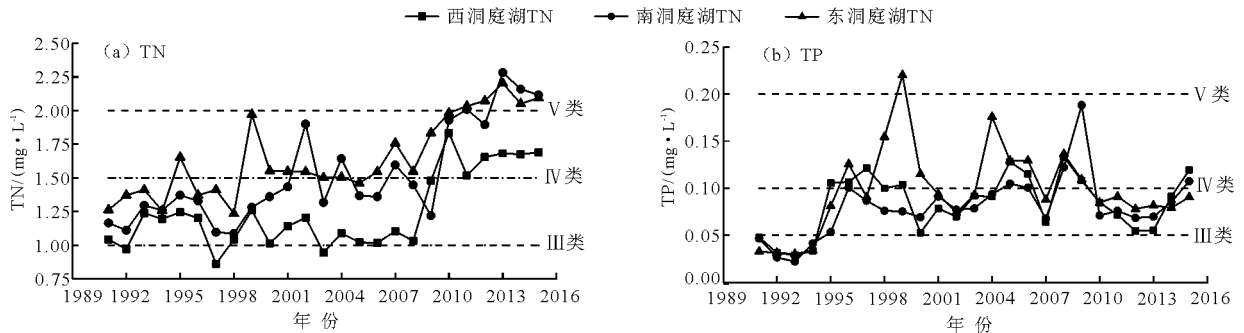


图 4 洞庭湖 3 个湖区 TN、TP 浓度变化趋势图(1991 - 2015 年)

表 3 洞庭湖 TN、TP、COD_{Mn}、氨氮和 COD_{Cr} 变化趋势统计

湖区	指标	Spearman 相关系数	T 统计量值	T (P < 0.05)	T (P < 0.01)	显著性
西洞庭湖	TP	0.388	2.480	2.060	2.787	显著上升
南洞庭湖		0.437	2.912	2.060	2.787	极显著上升
东洞庭湖		0.381	2.421	2.060	2.787	显著上升
西洞庭湖	TN	0.591	4.621	2.060	2.787	极显著上升
南洞庭湖		0.817	9.549	2.060	2.787	极显著上升
东洞庭湖		0.855	11.227	2.060	2.787	极显著上升
西洞庭湖	COD _{Mn}	0.382	2.430	2.060	2.787	显著上升
南洞庭湖		0.631	5.194	2.060	2.787	极显著上升
东洞庭湖		0.823	9.781	2.060	2.787	极显著上升
西洞庭湖	NH ₃ -N	-0.818	-2.102	2.060	2.787	显著下降
南洞庭湖		-0.25	-0.775	2.060	2.787	不显著下降
东洞庭湖		0.254	1.019	2.060	2.787	不显著上升
西洞庭湖	COD _{Cr}	-0.79	-2.952	2.060	2.787	显著下降
南洞庭湖		-0.211	-0.959	2.060	2.787	不显著下降
东洞庭湖		0.151	0.819	2.060	2.787	不显著上升

分湖区来看(表 4),除了西洞庭湖的富营养化指数趋势变化不显著外,南洞庭湖、东洞庭湖和全湖区的富营养化指数均呈现出显著的趋势变化,特别是南洞庭湖的富营养化上升的极为显著。1991 - 2007 年,洞庭湖各湖区综合富营养化指数(ΣTLI 指数)一直保持在 40 ~ 50 之间波动,洞庭湖始终处于中营养状态;但 2008 年以后,洞庭湖各湖区 ΣTLI 指数上升趋势变得更为显著,特别是东洞庭湖 ΣTLI 指数开始超过 50,洞庭湖出现轻度富营养化状态。从湖区的富营养化空间分布规律来看,洞庭湖出湖口富营养化程度比入湖口的富营养化程度重,南洞

庭湖 < 西洞庭湖 < 东洞庭湖,以东洞庭湖富营养化程度最重。

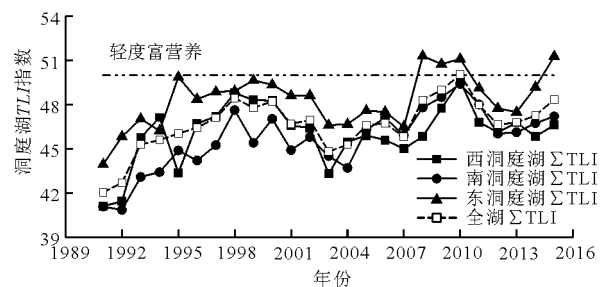


图 5 洞庭湖 TLI 指数变化趋势图(1991 - 2015 年)

表4 洞庭湖 TLI 指数趋势检验统计值

湖区	Kendall 秩次检验		非参数统计检验	
西洞庭湖	0.890	不显著	0.1267	不显著
南洞庭湖	4.064	显著	U(0.05)	0.5800 显著
东洞庭湖	2.011	显著	=1.96	0.2867 显著
全湖区	2.852	显著		0.2797 显著

4 讨论

4.1 水质污染与富营养化驱动机制

洞庭湖区水质污染和富营养化是受工业污染、农业污染、地表径流污染和生活污染等点源污染和面源污染共同作用形成的,洞庭湖的 N、P 元素超标是水质恶化的关键因素^[1, 11]。

以洞庭湖富营养化出现拐点的时间节点将洞庭湖水水质变化分为 3 个不同的阶段来分析,可以发现 3 个阶段的主要影响因素有一定的差异性。

(1)第 1 阶段为 1991-2002 年。洞庭湖水水质以 II 类水质为主,首先是工业污染,1999 年对湖区的 100 家工业企业调查数据显示^[12-14],年工业废水排放量达 2.0046×10^8 t, COD 排放量达 17.0201×10^4 t, BOD 排放量达 53.7128×10^4 t, $\text{NH}_3\text{-N}$ 排放量达 0.2487×10^4 t, 其中造纸和化肥行业废水排放量分别占 49.6%、28.4%^[14-15];其次,从图 4 可以看出,湖区 TN 和 TP 浓度的显著变化与洪水灾害有一定的相关关系,这一阶段经历了 1996、1998 和 1999 年几次较大规模的全流域性洪水,地表径流的增加使农业面源污染随着暴雨径流进入洞庭湖。造成湖区水质恶化的农业面源污染与农业养殖、农药化肥、水土流失存在相关关系,其中每年因使用化肥而流入水体的全氮量超过 2 700 t^[14];另外,从三口入湖水沙量方面分析,1997-2002 年三口年均入湖沙量达 $5\,660.2 \times 10^4$ t, 淤积泥沙 $4\,794.9 \times 10^4$ t, 泥沙淤积率为 70.3%, 四水年均入湖沙量 $1\,164.7 \times 10^4$ t, 大量泥沙作为 N、P 等污染物的载体,影响了湖区的水环境质量。同时,三口入湖水量在逐年减少,三口分流比由 1951-1966 年的 31.2% 下降至 1997-2002 年的 14.4%, 来水量的减少减弱了洞庭湖的水体自净能力。

(2)第 2 阶段为 2003-2007 年。首先,1998-2003 年洞庭湖退田还湖工程成功实施,湖泊面积扩大至 3 970 km², 增强了湖区水体的稀释和自净能力, TN 和 TP 等主要污染物浓度有所下降, Σ TLI 指数稳定在 42.2~47.6 的较低水平;但是面源污染

(主要包括农业、生活、地表径流污染等)的比重开始上升,导致洞庭湖由 II 类水质为主下降为 II-III 类水质;其次,2003 年三峡工程开始蓄水运行,2003-2007 年三口年均入湖水量为 492.5×10^8 m³, 比 1991-2002 年均值减少了 129.5×10^8 m³, 最为明显的还是三口输沙量的锐减,2003-2007 年三口年均入湖沙量为 1872.7×10^4 t, 比 1991-2002 年均值 6785.0×10^4 t, 减少了 4912.3×10^4 t, 减少幅度达 72.4%, 水沙量的锐减使湖泊自净能力受到影响。

(3)第 3 阶段为 2008-2015 年,洞庭湖的水质污染和富营养化又出现加重趋势,特别是 TN 和 Σ TLI 指数呈现出显著的波动上升态势。整体水质下降为 IV 类水质为主,这一时期的水质恶化是由工业污染、农业污染、生活废水^[7, 14]和三峡工程运行等共同作用的影响。湖区每年排入湖中的城镇生活废水总量达 4.03×10^8 t, 其中生态移民带来的年均入湖废水量约为 2.7×10^8 t^[13], 化学需氧量年入湖排放量达 9.78×10^4 t, 直接排入湖中的 TN 和 TP 分别达 1 124 t 和 17 622 t, 导致 N、P 浓度显著上升^[16], 人畜粪便作为肥料引起湖区大肠杆菌严重超标也是水质恶化的重要原因^[17]。而湖区每年的污水处理量仅为 $7\,975 \times 10^4$ t, 污水处理率不到 20%^[18]。其次,这一时期正值三峡水库蓄水至 175m 最高水位的关键时期,导致三口入湖水量较前期减少幅度提高,年均入湖水量锐减至 305.8×10^8 m³。20 世纪 90 年代水沙交换频率仅为 4.7d, 三峡工程建设前江湖水沙交换周期为 18.2d^[7, 19], 而三峡水库蓄水导致换水周期延长至 214 d, 水体自净功能随之降低, N、P 滞留在湖泊水体中的可能性增大,为藻类的过度繁殖提供了条件;三峡水库清水下泄导致荆江河段河床被冲刷,而下游趋于淤积,洞庭湖出湖水流受到长江的顶托作用,水流不畅不利于湖泊水体的自身净化能力,加剧了水质污染。根据 2008 年 7 月的现场调查,东洞庭湖蓝藻面积将近达到 10 km², 叶绿素浓度最高处达 40 mg/m³^[18, 20], 而 2013 年水华面积增加到 400 km², 叶绿素浓度最高处达 411 mg/m³^[20]。最后,水质污染最严重的是东洞庭湖,洞庭湖区的废纸再生浆企业主要分布在东洞庭湖,制浆能力占到湖区的一半以上^[14]。

4.2 水质污染防治措施

根据前文的讨论,洞庭湖的污染主要受工业污染、农业污染、生活废水和三峡工程的作用等共同影响,要实现洞庭湖水水质环境的改善须做到以下几个方面。(1)逐步调整环湖区产业结构。一是加强污

染企业的治理,建设高技术、生态化工业体系^[14];二是发展绿色生态农业,推广生物防治虫害的成功经验,减少面源污染。调整农业种植结构,壮大精深加工产业,发展节水型绿色农业^[21],推广灌排分离技术控制农田N、P的流失;(2)探索建立湖区生态补偿机制。按照谁污染、谁付费,谁受益、谁补偿的原则,加强污染源的治理;(3)逐步提高城乡生活污水处理率,强化污水处理配套管网建设,逐步构建雨污排水管道分流体系;实行城市污水排放许可制度,加强对污水排放的监管;严格控制含磷洗涤剂的使用量^[14]。(4)推动城陵矶枢纽工程建设,减轻洞庭湖出湖顶托作用;同时加快湖区蓄滞洪区的建设,退田还湖,退耕还林,解决湖区洪旱灾害威胁。

5 结 论

(1)从空间分布上看,3个湖区以东洞庭湖水质污染最为严重,东洞庭湖的TN和TP浓度基本均高于其他湖区,而且富营养化 Σ TLI指数也大于其他两个湖区,这与东洞庭湖与城市位置较近有关,出湖口的水质较各水系入湖口的水质差,并且三峡工程运行后湖区水质整体有变劣趋势。

(2)从时间演化规律来看,洞庭湖水质有逐年恶化的趋势。1994年以前,洞庭湖水质以I~III类为主,而到2004年以后,水质以IV类水质为主,由Spearman相关系数趋势性检验结果可知,洞庭湖水质污染和富营养化状态在25a间呈现显著的上升趋势,特别是主要污染物TN、TP和COD_{Mn}浓度呈显著增长趋势,湖区富营养化趋势将继续加强。

(3)从水质污染形成机制分析,洞庭湖区水质污染和富营养化是点源污染和面源污染共同作用所形成的,其中点源污染主要指工业污染,面源污染主要包括农业污染、地表径流污染和生活污染等。受江湖关系变化的影响,荆江三口来水锐减减弱了湖泊水体的自净能力。

(4)调整湖区工业结构、发展生态农业、治理小城镇和乡村环境、探索建立湖区生态补偿机制是洞庭湖水质综合治理的最终出路。

参考文献:

[1] 胡光伟,毛德华,李正最,等.三峡工程建设对洞庭湖的影响研究综述[J].自然灾害学报,2013,22(5):44-52.
[2] 胡光伟,黄作维,许滢,等.洞庭湖生态经济区水资源与社会经济发展协同度评价[J].水资源与水工程学报,

2018,29(5):21-27+34.
[3] 胡光伟,毛德华.2016年春夏初洞庭湖流域降雨特征与水情分析[J].国土与自然资源研究,2017(4):20-26.
[4] 曾文,钟声.新中国成立以来洞庭湖区生态环境危机与治理[J].经济地理,2016,36(10):172-178.
[5] 张光贵,王丑明,田琪.三峡工程运行前后洞庭湖水质变化分析[J].湖泊科学,2016,28(4):734-742.
[6] 胡光伟,毛德华,李正最,等.三峡工程运行以来洞庭湖水沙过程变异及其影响分析[J].水土保持研究,2013,20(5):170-175+192.
[7] 胡光伟,张连.三峡工程运行后洞庭湖区饮用水的安全现状及影响因素分析[J].科技导报,2018,36(12):86-93.
[8] 胡光伟,毛德华,李正最,等.三峡工程运行对洞庭湖与荆江三口关系的影响分析[J].海洋与湖沼,2014,45(3):453-461.
[9] 王旭,孙长虹,杨龙,等.江湖关系演变对洞庭湖水质变化影响研究[J].环境保护科学,2014,40(6):7-13.
[10] 申锐莉,鲍征宇,周旻,等.洞庭湖湖区水质时空演化(1983-2004年)[J].湖泊科学,2007,19(6):677-682.
[11] 彭莹莹.洞庭湖水质综合评价研究[D].长沙:湖南师范大学,2016.
[12] 刘妍,张建明,陈政,等.洞庭湖水质污染现状及影响因素分析[J].当代水产,2007,32(8):34-35.
[13] ZHANG M,ZHANG W J. Water quality analysis and water environment protection in Dongting Lake[J]. Journal of Changjiang Engineering Vocational College,2011.
[14] 毛德华,李正最,李志龙,等.后三峡时代洞庭湖区水生态安全问题研究[C]//后三峡时代洞庭湖区水生态安全问题研究.湖南省农业系统工程学会2012年年会论文集.2012.
[15] ZHONG Zhenyu,CHEN Can. Water Quality and Eutrophication Analysis in Lake Dongting[J]. Environmental Science & Management,2011,25(6):1771-1797(27).
[16] 何介南,康文星,袁正科.洞庭湖湿地污染物的来源分析[J].中国农学通报,2009,25(17):239-244.
[17] 谭支良,王久荣,潘亚飞,等.洞庭湖退田还湖区畜牧业资源与环境评估[J].长江流域资源与环境,2005,14(3):327-332.
[18] 钟振宇,陈灿.洞庭湖水质及富营养状态评价[J].环境科学与管理,2011,36(7):169-173.
[19] 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.
[20] 王婷,王坤,王丽婧,等.三峡工程运行对洞庭湖水环境及富营养化风险影响评述[J].环境科学研究,2018,31(1):15-24.
[21] 庾瑞锐.三峡工程运营后对洞庭湖水环境影响及其治理对策研究[D].长沙:湖南农业大学,2011.