

长江流域重点湖泊的富营养化及防治

李琳琳^{1,2}, 卢少勇^{1,2}, 孟伟^{1,2}, 刘晓晖¹, 国晓春¹, 万正芬¹

1. 中国环境科学研究院, 湖泊水污染治理与生态修复技术国家工程实验室, 环境基准与风险评估国家重点实验室, 国家环境保护洞庭湖科学观测研究站, 北京 100012
2. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875

摘要 近几十年, 湖泊富营养化问题严峻, 限制了流域社会经济可持续发展。为实施长江大保护, 修复长江生态环境, 推动长江经济带可持续发展, 沿程湖泊富营养化问题亟需解决。本文以长江水系沿程6个重点湖泊为对象, 探讨其富营养化历史演变特征、成因及控制对策。结果表明, 长江流域6个主要湖泊的富营养化指数在近几年基本呈逐渐降低趋势, 富营养化程度得到进一步改善。富营养化成因复杂, 外源输入与内源释放是其主要原因, 湖泊形态与水文条件也起了辅助作用: 6个湖泊都是浅水湖泊, 且多为封闭或半封闭状态, 利于营养物质积累与藻类生长。对于外源中工业和生活源输入, 其控制措施相对成熟, 通过扩建污水处理厂、提高污水处理率及完善配套管网建设等措施, 可大大减少入湖营养物含量; 而外源中的面源污染则需通过种植结构调整、平衡施肥、生态工程(湿地、塘等)防治。对于内源释放, 其治理过程相对复杂, 目前主要有底泥疏浚、沉积物氧化、化学沉淀、底泥覆盖、微生物制剂、生物浮床等多种物理化学生物方法。但不同湖泊因其物理化学条件差异, 适用方法也不同, 故各湖采取的内源控制技术有待进一步论证。控制湖泊内外源营养盐输入的同时, 进行流域生态修复并保障治理与管理并重, 才能确保湖泊富营养化治理的长期有效性。

关键词 长江水系; 湖泊富营养化; 历史演变; 综合防治

长江流域是中国经济重心所在、活力所在, 保护长江生态环境就是保护流域生产、保护子孙后代的福祉。近年来, 随着经济发展, 工业与生活污水排放量增大, 农业面源污染加重, 长江流域湖泊水体污染日趋严重, 主要表现为: 富营养化、有机物污染、湖泊盐碱化、湖泊面积缩小、生态系统破坏等^[1]。其中, 湖泊富营养化问题最为突出与严峻, 由于其发展快、危害大、治理难, 限制了湖泊流域社会和经济的可持续发展。

位于长江水系上游的滇池(图1)属高原湖泊, 水体滞留时间较长, 水体交换能力弱, 入湖营养盐负荷超过湖泊的水环境承载力时, 会促进湖泊富营养化的发展, 是中国湖泊富营养化的易发区与敏感区^[2]。从20世纪80年代起, 水质开始恶化, 草海污染严重, 水质多年劣V类, 富营养化异常, 且局部沼泽化^[3]; 外海水质从20世纪90年代初由V类变成劣V类^[4], 一直持续到2015年, 虽然2016年以来草海、外海水质有所改善, 水质由劣V类转为V类, 但其治理与保护措施仍不能松懈。位于中游地区的鄱阳湖与洞庭湖分别为中国第一和第二大淡水湖泊, 近年来因城市排污、水利工程及农业面源等造成的富营养化日益严重^[5-6]。长江流域下游的太湖^[7]、巢湖^[8]及洪泽湖^[9]富营养化形势也十分严峻。为修复长江生态

环境, 先要解决沿程湖泊富营养化问题。

但目前对长江沿程重点湖泊的富营养化状况缺乏系统研究, 本文以长江水系沿程富营养化最严重的6大湖泊为研究对象, 分析其近年来富营养化变化趋势, 探求富营养化成因及综合治理对策, 为长江经济带生态修复问题提供借鉴, 对这6大湖泊流域乃至整个长江水系沿江区域的可持续发展, 具有重要战略意义。

1 流域湖泊富营养化演变特征

评价水体富营养化程度主要参数为总氮(TN)、总磷(TP)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、透明度(SD)及叶绿素a(Chla)5个指标。由这5个指标, 计算数十年以来长江流域6大湖泊的综合营养状态指数 ΣTLI (表1), 并分析其历史变化特征。

表1 湖泊(水库)营养状态分级表
Table 1 Lakes or reservoirs nutrient state grading

ΣTLI 数值	营养状态	ΣTLI 数值	营养状态
(0, 30)	贫营养	[50, 60)	轻度富营养
[30, 50)	中营养	[60, 70)	中度富营养
> 50	富营养	≥ 70	重度富营养

收稿日期: 2017-03-10; 修回日期: 2017-04-27

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07105-002); 国家科技支撑计划项目(2014BAC09B02)

作者简介: 李琳琳, 博士研究生, 研究方向为湖泊水生态过程, 电子信箱: stulilinlin@163.com; 卢少勇(通信作者), 研究员, 研究方向为湖泊流域控源治河技术机理及其应用, 电子信箱: lushy2000@163.com

引用格式: 李琳琳, 卢少勇, 孟伟, 等. 长江流域重点湖泊的富营养化及防治[J]. 科技导报, 2017, 35(9): 13-22; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.09.001

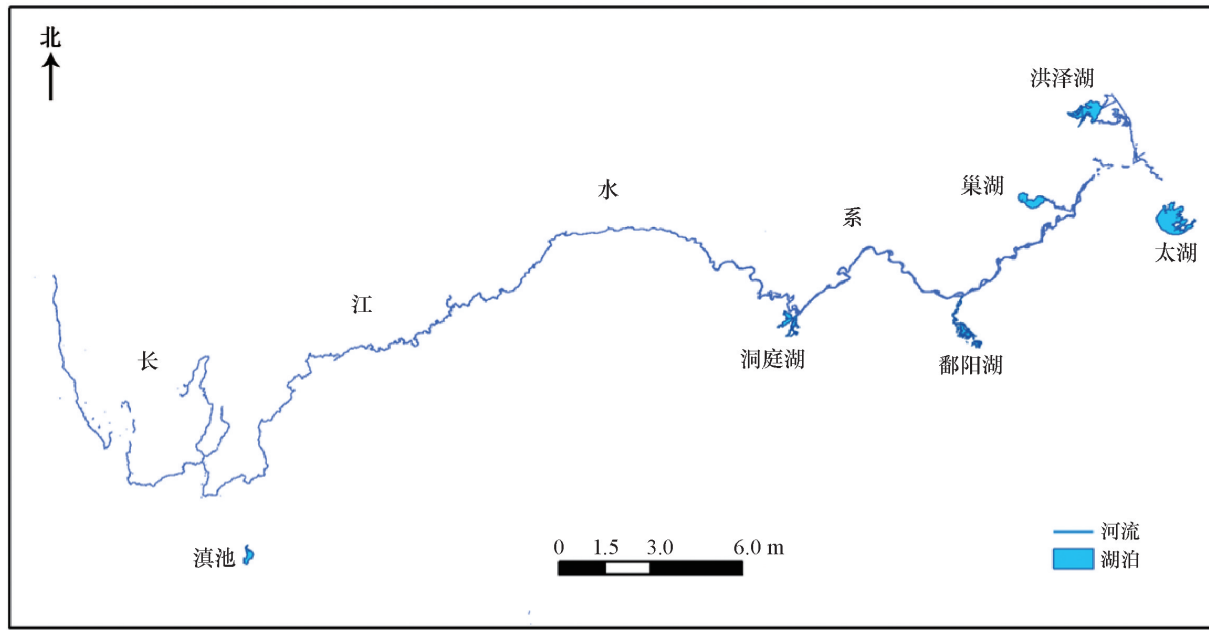


图1 长江水系沿程6大湖泊位置示意
Fig. 1 Six lakes along the Yangtze river

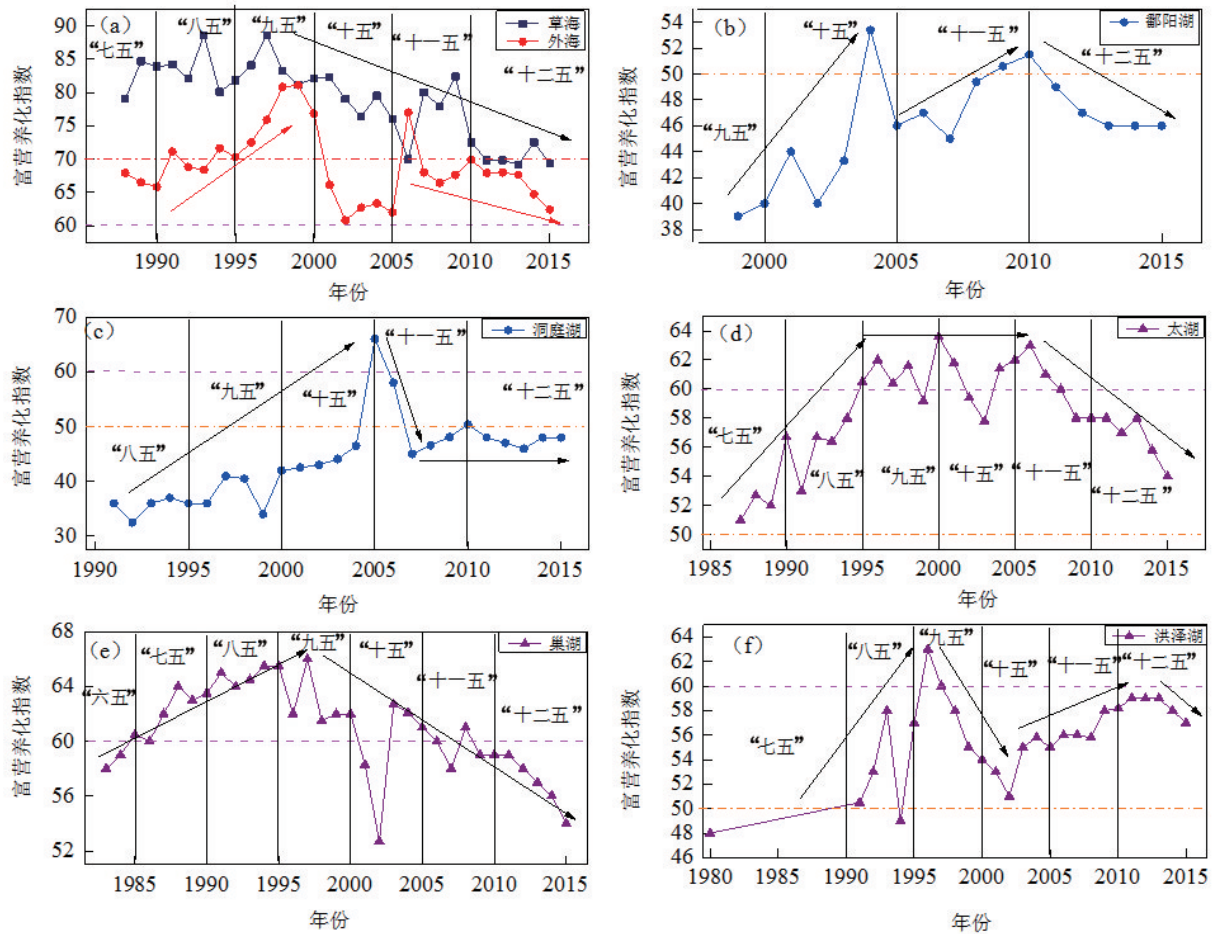


图2 长江上、中、下游6大湖泊富营养化指数历史变化
Fig. 2 Historical change of eutrophication index of six lakes from upper to lower of Yangtze river

滇池位于长江上游,并以海埂为界分北部草海和南部外海,从“七五”至今富营养化程度一直较严重(图2(a))。北部草海面积仅10.7 km²,富营养化程度比外海(面积约为其29倍)重,因其北部是滇池流域重污染排水区^[10-11]。草海虽从“九五”中期起富营养化指数呈缓慢下降趋势,但以2010年为界,2011年前依然处于重度富营养化,2011年后明显改善,有向中度富营养化发展趋势,可能与滇池在2009年起修建环湖截污工程、西园隧洞调度及部分牛栏江引水进入草海有关^[2]。外海富营养化指数虽低于草海,但一直不优于中度富营养。1990—1999年富营养化指数一直增加,2000年后开始改善,富营养指数直线下降,但在2006年剧升,从2007年至今整体呈下降趋势,尤其2013年后趋势明显,2014年12月—2015年3月,滇池外海连续4月水质已转为轻度富营养,这可能与2013年开始运行的牛栏江调水及西园隧洞调度相关。滇池为典型缺水湖,湖泊自净能力差,牛栏江调水工程全线贯通后,每年向滇池补水5.6亿 m³洁净水,供水工程实施后,加快水体置换,稀释了水中的叶绿素a、总氮与总磷,促进滇池水质富营养化状态较大改善。

鄱阳湖与洞庭湖位于长江中游,为长江仅存的2个大型通江湖泊,受长江来水量与来沙量影响较大。富营养化指数在2003年前总体呈缓升趋势,在2003—2005年间有明显升势(图2(b)、(c))。2003年三峡工程建成运行后,湖泊来沙量和来水量明显减少,尤其是洞庭湖,总入湖沙量比例由1996—2002年的81.5%降为2003—2012年的57.2%,来水来沙量减少导致水位降低,湖水透明度增加,换水周期变长,湖泊水体交换不畅,湖体自身净化能力降低且利于营养物积累与藻类生长,导致湖泊富营养化指数升高。2007年后鄱阳湖与洞庭湖富营养化指数变化基本一致。从“十一五”中期到“十二五”初期为缓慢升势,在“十二五”期间又缓慢降势,这与在此期间鄱阳湖与洞庭湖的综合整治力度逐步加强有关;但是洞庭湖目前磷超标问题逐步凸显。

太湖、巢湖与洪泽湖位于长江下游地区。太湖富营养化指数“七五”中期至“八五”期间速升(图2(d)),富营养化程度由轻度变差至中度,从“九五”初至“十一五”基本维持在中度富营养状态,“十一五”中期开始明显改善,2002年“引江济太”工程实施,增加了太湖水资源量,加快了局部水体流动,提高了水域纳污和自净能力,改善了湖泊富营养化。而“十二五”期间,因太湖污水处理厂提标改造、河长制推行、“五水共治”和“嘉兴模式”等的实施,富营养化指数呈稳定下降趋势,引江济太来水中磷含量对太湖水质等级的影响值得关注。巢湖富营养化指数从“六五”中期至“九五”中期明显上升,从1985年开始就一直处于中度富营养状态(图2(e))。从“九五”中期至“十五中期”富营养化指数呈下降趋势,2001年由中度富营养化改善至轻度,2002年继续改善,但2003年急剧加重至中度富营养化,2009—2011年,富营养化指数基本稳定,2012年起,富营养化指数平稳下降,维持在轻度富营养。洪泽湖富营养化指数1980—2015年由最初大起大落变

为后来缓慢变化(图2(f))。从“七五”到“十五”中期先明显上升后来速降。从“十五”中期再到“十二五”末期,则表现为缓升与缓降的稳定趋势,尤其2013年后富营养化指数呈一直下降趋势。2013年底南水北调东线一期工程建成通车,洪泽湖作为东线工程重要调蓄水库,水位抬升,流速变快,换水频率提高,不利于营养物积累与藻类大量繁殖,富营养化程度有所改善。

总体上,长江流域6个主要湖泊的富营养化指数在近几年基本呈波动性降低趋势,富营养化程度不再恶化,有进一步改善趋势。2015年,6个典型湖泊除滇池草海富营养水平相对较高外,其余湖泊的富营养水平基本持平,说明近年来控制与治理措施有效。但因这些湖泊历史污染严重,仍需进一步治理与修复,使其不成为区域经济可持续发展的阻碍。

2 湖泊富营养化成因分析

2.1 湖泊形态与水文特性

上游滇池是中国著名高原浅水型沉积湖泊^[13-14],自然状态下,换水周期长,约3年,境内20余条入湖河道,仅有一个出水口,封闭度大,水体交换弱,加剧营养物在湖体内的滞留和积累^[15],造成营养过剩,成为富营养化易发区;因湖盆浅平,平均水深4.4 m,利于光照,平均水温16℃,适合藻类生长;无分层现象,底泥易被风浪掀起,利于氮、磷在水土界面的交换和底泥中氮、磷释放^[15]。

中游鄱阳湖和洞庭湖受河流来水、来沙量影响,兼具河流与湖泊双重属性^[16-17]。鄱阳湖是世界上7个重要湿地之一和中国最大的吞吐型淡水湖^[5],因丰、枯水期降雨量、5河(赣江、抚河、信江、饶河、修河)来水输入的巨大差异,导致鄱阳湖丰、枯水期水循环交换差异大^[18],景观独特,是长江干流重要的调蓄性湖泊,在长江流域发挥着重要调蓄洪水作用。与鄱阳湖不同,洞庭湖为典型过水性洪道型湖泊^[19-20],湖水流速、年净流量较大,更新、交换频繁^[21],湖泊水循环周期(<20 d)短,自净能力较强,具有较大的水环境容量,这种独特的水文情势使得洞庭湖的氮、磷滞留系数较小,营养物质不易沉降,富营养化程度相对其他浅水湖泊较低^[22]。相比于其他封闭性湖泊,洞庭湖的水文、水动力条件,使得洞庭湖中的营养物质来不及被藻类充分利用即被水流带走,不易发生蓝藻水华。但是2003年后随三峡工程运行,洞庭湖入口来水来沙量明显减小^[6],洞庭湖水位降低,换水周期变长,湖泊水体交换不畅,一方面将削弱湖泊水体对污染物的净化能力^[23],另外,水体透明度增大,藻类光合作用增强,利于藻类生长繁殖^[24-25],而在水流相对静止的天然湖泊环境中,蓝藻比硅藻和绿藻更有竞争优势^[26],洞庭湖富营养化形势严峻。

下游太湖、巢湖与洪泽湖均为平原浅水湖泊^[9,27-29]。太湖是外高内低的碟形洼地,地表径流从四周汇入,养分易聚集,且水体停留时间较长,丰水年换水周期为215 d,其他时间换水周期更长,湖水更新自净能力较差。作为浅水湖,平均水深不足2 m,表层与底层易交替循环将养分带给表层植物,促

进藻类植物生长,引起水华^[30]。巢湖属蓝藻型温带性平地湖,水深较小^[31],平均水深仅 2.5 m,氧气足,光热资源丰富,透光性好,温度上升快,气候适宜,利于藻类生长繁殖^[32];加上水利调控使整个湖面水域处于封闭或半封闭状态^[33],水量交换少,水力冲刷系数小^[34],氮磷等营养盐在湖体蓄积,闸控还造成湖滩地急剧减少,大型水生植物难萌发和生长,种类逐渐减少,生态系统遭严重破坏,湖内营养物主要为藻类摄取,致使藻类迅猛繁殖^[35],加剧了水体富营养化发展^[36]。洪泽湖是中国第 4 大淡水湖泊^[9],湖盆呈浅碟形,其总趋势为西高东低,湖盆由西北向东南倾斜;是具防洪、灌溉、调水、水产、水运等综合利用功能的平原浅水型湖泊^[37],也是南水北调东线工程的重要调蓄水库。洪泽湖换水率高,径流量大,流速较大,不利于藻类等浮游植物的繁殖生长^[9]。

2.2 外源

外源输入是湖泊中营养盐的主要来源。其输入途径包括生活与工业的点源排放及湖周农业面源输入等。流域内工业化、城市化发展,直接导致用水量和废污水排放量增加。但污水处理厂的污水负荷有限^[25],部分地区污水未经处理就直排入湖,即使部分区域勉强达标,但过量污染负荷仍会造成营养盐累积。2015 年,滇池流域污水排放量 3.6 亿 m³,陆域主要污染物入湖量分别为化学需氧量 3.97 万 t、氨氮 5205 t、总氮 7321 t、总磷 614 t。而对污水处理管网并不完备的乡镇区域,除工业污水外,还有大量未经处理的生活污水直排入河,进一步增加了营养物输入。

同时,经济发展推动了城镇化进程,土地利用结构发生了很大变化,大量耕地变为乡镇建设用地,但为满足人口对粮食的需求量,不得不通过加大化肥施用量来增加产出,过剩肥料流失随径流入湖,成为湖泊营养盐的主要输入源。研究表明,仅水稻田中氮肥的流失率就达 12%~17%。近十几年来,人类过分改造自然,围湖造田,不但使大量湖滨湿地变为耕地,既增加了耕地中化肥输入,还导致本可吸收减少营养物的河滨带水生植物大量死亡,增大湖水营养负荷。

滇池污染原因较复杂,主要因入湖污染负荷远大于环境容量^[38]。滇池流域以约占云南省 0.75% 的土地面积承载了全省约 23% 的 GDP 和 8% 的人口,是云南省人口高度密集、城镇化程度最高地区,污染排放远超环境承载力。滇池水体富营养化的污染源,主要来自城市生活污水和农业径流中的氮、磷流失^[39]。城市生活污水大多未经处理直排,成为滇池重要污染源之一。据统计,滇池流域附近的污水处理厂的污水处理能力远不能满足要求,流域内大部分地区的生活污水未经处理直入滇池,是滇池富营养化的主要污染物总磷、总氮的来源。工业废水虽达标排放,但附近工业企业及养殖场、酒店等排放的工业废水都低达标排放,废水中所携营养盐总量仍不容小觑。另,滇池沿湖有几十万亩农田,大多以种植水稻、蔬菜和花卉为主,化肥和农药使用量大,利用率低,大量未吸收降解的化肥、农药随农田排水或雨水进入湖泊,成为滇池总磷、总氮超标的重要原因之一。另外,滇池水土流失

和池底淤积也较严重^[35]。

鄱阳湖接纳 5 河(赣江、抚河、信江、饶河、修河)来水,并由湖口注入长江,鄱阳湖约 80% 以上的 TN 和 60% 以上的 TP 都来自这 5 大河流^[40]。同时鄱阳湖受农业面源污染影响显著,沉积物 OP 累积量与流域单位面积磷肥施用量显著正相关,单位面积磷肥施用量在不断增长,磷肥使用量由 1985 年的 21.8 kg·hm⁻² 增长为 2012 年的 41.1 kg·hm⁻²,而农作物单产的提升速度远小于磷肥增速。以谷物为例,1985 年江西省产量为 4200 kg·hm⁻²,2012 年为 5898 kg·hm⁻²,约增产 40%。肥料利用率低,大量磷肥未被有效利用而流失入环境,造成农业面源污染,继而促进鄱阳湖富营养化^[41]。

洞庭湖总氮、总磷、溶解态氮、溶解态磷均与叶绿素 a 无显著相关性,目前氮磷主要来自外源^[42]。对西洞庭湖而言,其氮、磷来源主要有二:一是入湖流域上游各大工业城市排放的工业废水,据调查,西洞庭湖周围工业废水年排放量近亿吨,主要是造纸和化肥行业;二是入湖流域所经城镇排放的生活污水。对南洞庭湖而言,农业源为主,南洞庭湖区域地势平坦,土地肥沃,拥有大面积农业种植和养殖区,大量农药化肥及畜禽粪便的流失,不仅造成了流域内土壤污染,也间接增加了湖区内各河流氮、磷含量;对东洞庭湖而言,其氮、磷的重要来源是生活污水。东洞庭湖是洞庭湖区人口最稠密地区。来自居民厨房、洗手间及生活垃圾的污水最终都入湖。据计算,每日流入湖生活污水量大,相当于每日入洞庭湖纯氮 10 余 t,纯磷 1 t^[43]。洪泽湖是多河流输入湖泊,河道总氮、总磷年输入量分别为 28333.78 t 和 942.88 t,其中淮河是洪泽湖主要氮磷来源,占 61.29%;而面源氮、磷的输入主要为湖周农业、生活污水、围网养殖等,作为分散污染源,用中国科学院南京土壤研究所对太湖研究成果——系数计算法,求得其总氮、总磷年输入量分别为 15957.05 t 和 992.94 t^[44]。

太湖从 2007 以后,工业废水、生活污水与农业废水的入湖排放量大体接近;但是近年来,工业废水集中处理量增大,并且污水处理厂提标改造,排放入湖的工业废水中营养盐含量减少,生活污水与农业废水成为湖泊营养盐的主要来源。

巢湖相对特殊,其北岸分布大片古老含磷变质岩系^[45],北部肥东群的产磷层位是主要露采区,从磷矿区发源的水系大部分入巢,而这些河流水补给又源于含磷层位出露区的地表径流^[35],成为巢湖磷污染来源之一。

2.3 内源

湖泊富营养化实际上是氮、磷等生源要素增加、积累的过程,而湖泊沉积物是营养盐的蓄存库^[46]。颗粒态有机磷极易沉降湖底,使湖底沉积物中营养盐含量远高于上覆水。在一定条件下,这些营养物会释放进入上覆水而形成内源负荷。而天然湖泊中磷约 70% 以颗粒态有机磷形式存在,故特别易沉积富集于湖底沉积物,成为上覆水体营养盐的“潜在源”。影响湖泊沉积物营养盐释放的途径与因素很多,主要有风浪与底栖动物扰动、浮游植物上浮及水生植物根部传递等^[47-49]。温度、pH 值、氧化还原电位、铁和锰含量等^[50-54]通过

影响分子运动及动植物活性等,成为影响沉积物内源释放的主要外部因素。研究表明,当水体 pH<2 或 pH>9 时,营养盐释放量明显增大^[52-54],此现象在蓝藻爆发的夏季尤甚,蓝藻光合作用导致水体 pH 值升高,沉积物释放量也增大^[55]。而水土界面上的氧化还原状态对磷释放影响很大,还原条件下,沉积物中营养盐释放速率甚至比氧化环境下高 1 个数量级^[50]。对长江流域浅水湖泊而言,受风浪扰动影响强,当外源磷输入得到控制后,内源释放仍可使水体富营养化问题持续数十年^[56-58]。浅水湖泊透光层相对比例较高,加上水土界面频受风浪扰动,好氧生物层的相对比例较高,生态系统结构复杂,内源释放的影响因素多样。秦伯强等^[59]研究风浪扰动对浅水湖泊水土界面营养盐释放的影响,发现有过程变化,在此过程初期,风浪扰动引起水体溶解性磷浓度显著提高,有明显爆发性释放。但随风浪过程继续,风浪引起的内源磷释放效应显著减弱,水体磷浓度呈不断下降趋势,当风浪过程过去后,水体磷浓度恢复到很低水平,且在水体恢复风平浪静后,磷降低过程仍持续相当长时间。

滇池沉积物中磷释放量较大,中国环境科学研究院 1997 完成的《草海底泥污染现状调查与评价》中,甚至估计沉积物释放的 TP 仍可维持滇池草海目前水平 63 年。因此,滇池内源污染十分严重。除滇池外,鄱阳湖、洞庭湖、洪泽湖、太湖、巢湖等也都存在沉积物内源污染问题^[60]。鄱阳湖 TN、TP 内源年输入量分别为 2149.34、238.55 t,对水体 TN、TP 的贡献率分别为 1.52% 和 2.74%^[61],远小于外源输入的贡献率^[40]。洞庭湖沉积物 TN 含量处于轻度污染、TP 含量处于重度污染水平^[43],沉积物中氮磷含量对水体富营养化构成潜在威胁,需重视洞庭湖沉积物中 N、P 释放对水体造成的影响。资料显示洪泽湖底质营养盐年释放量约为总氮 1899.8 t、总磷 150.85 t^[44],与外源输入量比不大。太湖平均水深在 2 m 左右,且位于季风气候区,台风影响强烈,受风浪扰动和湖流作用,湖底沉积物中的营养物质极易释放进入水体,导致湖泊氮、磷等有机盐处于较高水平^[7]。对于巢湖而言,除历史累计的底泥中磷含量较高外,巢湖流域内还广布含磷地层,湖底有些地方的磷含量水平极高,成为巢湖水体磷的重要污染源。

3 富营养化控制对策

3.1 控源

3.1.1 外源营养输入控制

控制外源性营养盐输入是解决湖泊水体富营养化的首要步骤。提高城镇生活污水处理率,加快城镇生活污水处理厂建设,在污水处理厂超负荷运行地区,新增或扩建污水处理厂,确保辖区内污水处理能力满足要求。厂网并重,利用旧城改造、拆迁整治等,进一步建设、完善配套管网,重点推进城市二、三级污水管网建设,提高配套管网覆盖率和污水收集率^[9]。引导城市污水处理厂转变运营机制,推广 BOT (build-operate-transfer,建设—运营—转让)、BT (build-transfer,建设—转让)运行模式,鼓励中水回用。实现城市雨污分

流^[62-63],洗车水、饭店洗地水、理发店洗头水及洗涤废水避免进入雨水管,而通过污水管网收集排入污水处理厂处理达标后再排放。另外,生活污水中磷有 25% 来自洗涤剂与洗衣粉,推广使用不含磷洗涤剂与洗衣粉可大大减少生活污水中磷总量。同时,改进污水处理厂处理工艺,增加除氮磷环节,目前欧美等国常用三级处理工艺除氮磷^[35],但三级处理主要去除氮,对磷去除效果不理想,且费用昂贵,难在中国污水处理厂大规模推广。因此,开发新的除氮磷工艺,对于减少营养盐排放,控制点源引起的富营养化十分关键。

削减农业面源污染,积极调整种植结构,大力发展有机农业、生态农业,建设有机农业生态圈,构建生态屏障^[64]。改进施肥方式^[35],提高肥料利用率,控制氮、磷肥使用及排放量。按“减量化、无害化、资源化、生态化”要求,进一步提高畜禽养殖污染治理的技术水平,对养殖废水、牲畜粪便等实施有效处理,治理规模化养殖污染。大力开展农村环境综合整治,开展乡镇生活污水处理厂建设,完善镇区雨污管网,提高污水集中处理。

3.1.2 内源营养负荷控制

对于长江流域的浅水湖泊^[65-66],控制内源磷释放是控制富营养化的关键^[67]。浅水富营养化湖泊营养负荷及蓝藻水华对外源营养盐控制的响应非常缓慢^[68],甚至无响应,其营养来源主要是沉积物释放,因此,控制内源释放可有效减少蓝藻水华爆发。控制内源的方法包括物理、化学和生物等多种方法。若湖泊周围存在低营养水源及较高流速的河流,引水冲刷的物理机械法可很快减小或稀释湖泊中营养物的浓度,同时可将部分浮萍冲刷出湖体,但此法一般适于小型浅水湖泊。同时对湖底处于厌氧状态且受风浪扰动较弱的小型湖泊,还可采用沉积物氧化、化学沉淀、底泥覆盖等方法增加沉积物对磷的束缚能力或在沉积物表面形成覆盖层,抑制内源磷释放。对面积稍大的中型湖泊,底泥疏浚可作为控制内源的重要措施。适当疏浚,可短期内减少沉积物中营养物释放。但若长期疏浚,还要综合考虑湖泊底泥中营养盐含量及吸附解吸条件等。微生物方法也可广泛应用于控制内源释放。微生物制剂可有效去除湖泊水体中有机质、氨氮及叶绿素 a 等,同时还可增大溶解氧含量,改变水体还原条件。无论大型或小型湖泊水体^[68],水生植物法被认为是有效生物控制方法^[69]。利用植物本身根、茎、叶对湖泊水体悬浮物的捕获及吸收作用,控制营养盐释放与浮萍过渡繁殖^[70]。生物浮床技术^[71-74]是利用生物方法把高等水生植物或改良的陆生植物种植到富营养化水域水面上,其净化原理是通过植物根部吸收、吸附和对悬浮物的拦截作用净化水质,富集水体中氮、磷及有害物质,从而达到净化水质的效果^[75]。利用水生植物净化原理,出现了人工模仿水草技术拦截颗粒物使之沉积及通过其附着生物来净化水质,该项人工模拟水草的生物处理技术在“十一五”期间,已应用于太湖梅梁湾,初步结果表明可有效去除总磷、总氮、悬浮物^[76-77]。

对于滇池,沉积物释放的磷量较大且持续时间太长,底

泥疏浚是解决内源污染最有效措施^[45]。“九五”期间已完成草海海底泥一期疏浚工程,盘龙江中段和大观河等入滇池河道截污疏浚工程,疏浚后局部水质改善较明显。后续先后实施了继续疏浚、二期疏浚等工程。但疏浚费昂贵,对大型湖泊并不宜长期使用,对鄱阳湖、洞庭湖^[78]、太湖^[79]、巢湖^[80-82]等长江中下游浅层湖泊,可适当采用底泥污染原位控制技术,如底泥覆盖及人工曝气等^[83],但目前中国这方面工程化应用较少。

3.2 生态修复

通过对长江流域生态修复,逐步恢复生态系统平衡,提高湖泊水体自净能力,延缓富营养化进程^[84-86]。加快实施退耕退房还湖还湿工程,重视科学划定并建立湖泊缓冲带,保护湖周及上游森林植被,防止营养物过度流失,通过人工修复或重建湖泊生态系统实现湖泊生态系统的良性可持续发展^[87-88]。在浅水区种植水生植物、集中投放鱼苗、保护生物多样性、恢复湖区原有生态系统结构。严格执行生态保护红线,实行强制性保护,严禁不符合区域功能定位的开发建设和人为破坏活动。

充分利用现有水利设施,蓄泄并重,合理调度,使水位满足生态需求,为湖泊生态环境修复创造良好水环境。对处在南水北调工程线上的洪泽湖,可通过入江水道,将清洁长江水调入湖泊,补充清洁水源,稀释营养盐浓度,降低湖体富营养化水平^[9]。要充分考察流域社会经济发展、污染治理等综合作用下带来的长江水质、太湖及巢湖水质的动态变化,以及长江水的磷和氮对太湖、巢湖水质的影响,再慎重确定是否引水及引水时段与引水水量。

3.3 湖泊管理与治理并重

湖泊水体富营养化治理是系统工程,要治理与管理相结合,基于湖泊要在保护中发展的理念制定相关发展规划。一些湖泊的污染与管理上的不足有较大关系。必须建立和完善水资源保护和污染防治管理体系。把湖泊保护和治理工作统一协调,分口负责、分级管理,条块结合,各司其职,各负其责,齐抓共管。要促进对污染物排放和水质达标管理的对接,实现流域的综合治理,建立科学的水质环境监测网络,提高对水质安全的预警能力。要把具有“枯水一线、洪水一片”的湖泊与长期湖湘的湖泊的水质标准实现差别化。要加强管理理顺机制,确保已经建成的污染治理与生态修复工程的长效运行。要大力支持和推进湖泊科学观测研究站的工作,并建成网络以实时、统一推进长江上、中、下游的湖泊保护和治理工作;要设立流域保护治理研究基金,支持湖泊各项研究,进一步为湖泊富营养化防治提供具有预见性、科学性、经济性和有效性的决策依据。同时,开发新的湖泊治理技术,并保证可以推广应用,使得湖泊研究不仅具科学性,还具实用性与有效性。加强对群众的宣传教育,提高流域内公众的环保意识。

4 结论

长江流域6大浅水湖泊,由于前期大量资金投入与大批

生态恢复工程建设,水质出现改善趋势,但由于富营养化痼疾难除,潜在威胁依然存在。环湖截污工程、扩建污水处理厂等点源控制措施虽然方法较为成熟,但需要监管体系配合;湖周农业、围网养殖等面源污染,需要通过调整种植结构,集中化处理,构建生态屏障等方式防治;而沉积物中积累的大量营养盐等内源污染负荷,则需适当采用底泥污染原位/异位控制技术,如底泥覆盖、人工曝气、底泥疏浚、微生物制剂及生物浮床等。除了污染源控制,管理系统的完善与基层组织的有效监管,是污染治理与生态修复工程长效运行的保障,必须加强管理机制建设,确保治理与保护协调一致。

参考文献(References)

- [1] 陈小锋. 我国湖泊富营养化区域差异性调查及氮素循环研究[D]. 南京: 南京大学, 2012.
Chen Xiaofeng. Investigation of the regional differences and nitrogenous cycling in China's lakes[D]. Nanjing: Nanjing University, 2012.
- [2] 马经安, 李红清. 浅谈国内外江河湖库水体富营养化状况[J]. 长江流域资源与环境, 2002, 11(6): 575-578.
Ma Jingan, Li Hongqing. Preliminary discussion on eutrophication status of lakes, reservoirs and rivers in China and overseas[J]. Resources & Environment in the Yangtze Basin, 2002, 11(6): 575-578.
- [3] 刘润堂, 许建中, 冯绍元, 等. 农业面源污染对湖泊水质影响的初步分析[J]. 中国水利, 2002(6): 54-56.
Liu Runtang, Xu Jianzhong, Feng Shaoyuan, et al. Analysis of impact of non-point pollution from agriculture to lake water quality[J]. China Water Resources, 2002(6): 54-56.
- [4] 臧小平, 吴国平, 涂敏. 长江流域湖泊水库水华防治对策[J]. 人民长江, 2009, 40(21): 5-8.
Zang Xiaoping, Wu Guoping, Tu Min. Algae bloom control countermeasures for the lakes and reservoirs in the Yangtze Basin[J]. Yangtze River, 2009, 40(21): 5-8.
- [5] 胡春华. 鄱阳湖水环境特征及演化趋势研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2010.
Hu Chunhua. The water environmental characteristic and its evolutionary trends of Poyang Lake[D]. Nanchang: Nanchang University, 2010.
- [6] 熊剑, 喻方琴, 田琪, 等. 近30年来洞庭湖水水质营养状况演变特征分析[J]. 湖泊科学, 2016, 28(6): 1217-1225.
Xiong Jian, Yu Fangqin, Tian Qi, et al. The evolution of water quality and nutrient condition in Lake Dongting in recent 30 years[J]. Journal of Lake Sciences, 2016, 28(6): 1217-1225.
- [7] 李婧. 太湖富营养化的原因及预防策略[J]. 资源节约与环保, 2015(12): 185.
Li Jing. Causes and prevention strategies of eutrophication in Taihu lake[J]. Resources Economization & Environmental Protect, 2015(12): 185.
- [8] 张民, 孔繁翔. 巢湖富营养化的历程、空间分布与治理策略(1984—2013年)[J]. 湖泊科学, 2015(5): 791-798.
Zhang Min, Kong Fanxiang. The process, spatial and temporal distributions and mitigation strategies of the eutrophication of Lake Chaohu(1984-2013)[J]. Journal of Lake Sciences, 2015, 27(5): 791-798.
- [9] 杨广利. 洪泽湖富营养化状态调查及防治技术研究初探[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2003.
Yang Guangli. Investigation and bioremediation of Hongze lake

- entroPhication[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2003.
- [10] 王泉, 李跃勋, 何佳, 等. 滇池北岸入湖河流水质变化趋势分析[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(2): 191-194.
Wang Quan, Li YueXun, He Jia, et al. Analysis of water quality variation trend in lake inlet river on north of lake Dianchi[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 35(2): 191-194.
- [11] 杨逢乐, 吴文卫, 陈建中, 等. 滇池沉积物中磷的释放行为研究[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(11): 48-52.
Yang Fengle, Wu Wenwei, Chen Jianzhong, et al. Release behavior of phosphate in Dianchi sediment[J]. Environmental Science & Technology, 2009, 32(11): 48-52.
- [12] 邱明海, 王海玲. 滇池环湖截污工程设计技术方案[J]. 中国给水排水, 2015(12): 56-59.
Qiu Minghai, Wang Hailing. Design scheme of wastewater interception project around dianchi lake[J]. China Water & Wastewater, 2015(12): 56-59.
- [13] 栢元蒙. 滇池富营养化现状、趋势及其综合防治对策[J]. 云南环境科学, 2002, 21(1): 35-38.
Tuo Yuanmeng. Eutrophication of dianchi and its trend and treatment [J]. Yunnan Environmental Science, 2002, 21(1): 35-38.
- [14] 赵世民, 王道玮, 李晓铭, 等. 滇池及其河口沉积物中重金属污染评价[J]. 环境化学, 2014, 33(2): 276-285.
Assessment on heavy metals pollution in surface sediments of Dianchi Lake and its estuaries[J]. Environmental Chemistry, 2014, 33(2): 276-285.
- [15] 吴德玲, 钱彪, 何琳晖. 滇池富营养化成因分析[J]. 环境科学研究, 1992(5): 26-28.
Wu Deling, Qian Biao, He Linhui. Contributing factor analysis of eutrophication of dianchi lake[J]. Research of Environmental Sciences, 1992, 5(5): 26-28.
- [16] 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(8/9): 1295-1300.
Li Youzhi, Liu Fang, Zhang Canming. Analysis of change trend of water environment and cause in the Dongting Lake wetland[J]. Ecology & Environmental Sciences, 2011, 20(8/9): 1295-1300.
- [17] 曹承进, 秦延文, 郑丙辉, 等. 三峡水库主要入库河流磷营养盐特征及其来源分析[J]. 环境科学, 2008, 29(2): 310-315.
Cao Chengjin, Qin Yanwen, Zheng Binghui, et al. Analysis of phosphorus distribution characters and their sources of the major input rivers of Three Gorges Reservoir[J]. Environmental Science, 2008, 29(2): 310-315.
- [18] 吴颖靖. 鄱阳湖湖区水体营养盐分布格局及富营养化动态分析[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2009.
Wu Yingjing. The distribution Pattern of nutrient and dynamic analysis of eutrophication in Poyang lake region[D]. Changsha: Central South University of Forestry&Technology, 2009.
- [19] 杨珊, 胡利梅, 高瑞, 等. 洞庭湖区湿地生态系统存在的问题及其对策研究[J]. 环境科学与管理, 2006, 31(8): 111-113.
Yang Shan, Hu Limei, Gao Rui, et al. Study of the problems and countermeasures in the ecosystem of Dongting Lake Wetland[J]. Environmental Science & Management, 2006, 31(8): 111-113.
- [20] Havens K E, Jin K R, Rodusky A J, et al. Hurricane effects on a shallow lake ecosystem and its response to a controlled manipulation of water level[J]. Thescientificworldjournal, 2001(1): 44.
- [21] 赵运林, 肖正军, 戴梅斌, 等. 洞庭湖区湿地资源及生态系统现状的研究[J]. 湖南城市学院学报(自然科学版), 2007, 16(4): 1-5.
Zhao YunLin, Xiao Zhengjun, Dai Meibin, et al. Research on the wetland resources and ecosystems in Dongting Lake Area[J]. Journal of Hunan City University(Natural Science), 2007, 16(4): 1-5.
- [22] 王岩, 姜霞, 李永峰, 等. 洞庭湖氮磷时空分布与水体营养状态特征[J]. 环境科学研究, 2014, 27(5): 484-491.
Wang Yan, Jiang Xia, Li Yongfeng, et al. Spatial and temporal distribution of nitrogen and phosphorus and nutritional characteristics of water in Dongting Lake[J]. Research of Environmental Sciences, 2014, 27(5): 484-491.
- [23] 孙占东, 黄群, 姜加虎. 洞庭湖主要生态环境问题变化分析[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(9): 1108-1113.
Sun Zhandong, Huang Qun, Jiang Jiahu. Changes of major ecological and environmental issues in Dongting Lake region[J]. Resources & Environment in the Yangtze Basin, 2011, 20(9): 1108-1113.
- [24] 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.
Huang Daizhong, Wan Qun, Li Liqiang, et al. Changes of water quality and eutrophic state in recent 20 years of dongting lake[J]. Research of Environmental Sciences, 26(1): 27-33.
- [25] 秦伯强. 长江中下游浅水湖泊富营养化发生机制与控制途径初探[J]. 湖泊科学, 2002, 14(3): 193-202.
Qin Boqiang. Approaches to mechanisms and control of eutrophication of shallow lakes in the middle and lower reaches of the yangze river [J]. Journal of Lake Science, 2002, 14(3): 193-202.
- [26] 吴晓辉, 李其军. 水动力条件对藻类影响的研究进展[J]. 生态环境学报, 2010, 19(7): 1732-1738.
Wu Xiaohui, Li Qijun. Reviews of influences from hydrodynamic conditions on algae[J]. Ecology & Environmental Sciences, 2010, 19(7): 1732-1738.
- [27] 张光生, 王明星, 叶亚新, 等. 太湖富营养化现状及其生态防治对策[J]. 中国农学通报, 2004, 20(3): 235-237.
Zhang Guangsheng, Wang Mingxing, Ye Yaxin, et al. The current eutrophication atatus of Taihu lake and its ecological control countermeasures[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2004, 20(3): 235-237.
- [28] Jin X, Hu X. A comprehensive plan for treating the major polluted regions of Lake Taihu, China[J]. Lakes & Reservoirs Research & Management, 2003, 8(3/4): 217-230.
- [29] 奚姗姗. 巢湖水体氮、磷结构特征、环境效应与防控对策研究[M]. 安徽: 中国科学技术大学, 2016.
Xi Shanshan. The distribution, environmental impacts and prevention countermeasures of nitrogen and phosphate in the Chaohu Lake[M]. Anhui: University of Science and Technology of China, 2016.
- [30] 何开丽. 巢湖富营养化现状与治理对策[J]. 环境保护, 2002(4): 22-24.
He Kaili. Study of eutrophication control in Chao lake[J]. Environmental Conservation, 2002(4): 22-24.
- [31] Shang G P, Shang J C. Causes and control countermeasures of eutrophication in chaohu lake, china[J]. Chinese Geographical Science, 2005, 15(4): 348-354.
- [32] Cai Y, Gong Z, Xie P. Community structure and spatiotemporal patterns of macrozoobenthos in Lake Chaohu (China)[J]. Aquatic Biology, 2012, 17(1): 35-46.
- [33] 王凤. 巢湖水体营养状态分析及富营养化防治对策[J]. 环境科技, 2007, 20(增刊1): 47-49.
Wang Feng. Analysis of trophic status and prevention-control measures for entrophication in Chaohu lake[J]. Environmental Science and Technology, 2007, 20(Suppl 1): 47-49.

- [34] 陈慧, 王进. 巢湖富营养化危害及控制对策[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 1999(增刊1): 63-66.
Chen Hui, Wang Jin. Endangerment and control strategy of eutrophication of Lake Chaohu[J]. Journal of Hefei University of Technology, 1999(Suppl 1): 63-66.
- [35] 李雷, 戴万宏. 巢湖水体富营养化污染现状及防治对策[J]. 中国水土保持, 2009(7): 55-57.
Li Lei, Dai Wanhong. Pollution status and control countermeasures of water eutrophication in Chaohu Lake[J]. Soil and Water Conservation in China, 2009(7): 55-57.
- [36] Shang G P. Analysis on the causes and variation tendency of eutrophication in west Chaohu Lake, China[J]. Journal of Biology, 2010, 27(5): 56-59.
- [37] 王兆群, 张宁红, 张咏, 等. 洪泽湖水水质富营养化评价[J]. 仪器仪表与分析监测, 2010, 2(2): 31-35.
Wang Zhaoqun, Zhang Ninghong, Zhang Yong, et al. Eutrophication assessment of water quality in hongze lake[J]. Environmental Monitoring & Forewarning, 2010, 2(2): 31-35.
- [38] 徐猛. 滇池流域入湖河流污染状况调查与综合整治对策研究[D]. 上海: 同济大学, 2009.
Xu Meng. Study on pollution status and comprehensive control of inflow rivers in Dianchi lake basin[D]. Shanghai: Tongji University, 2009.
- [39] 郭慧光, 闫自申. 滇池富营养化及面源控制问题思考[J]. 环境科学研究, 1999, 12(5): 43-44.
Guo Huiguang, Yan Zishen. Reflection on eutrophication and non point source control in dianchi lake[J]. Research of Environmental sciences, 1999, 12(5): 43-44.
- [40] 陈波, 王鹏, 张华. 鄱阳湖水体氮磷污染研究进展[J]. 江西师范大学学报(自然科学版), 2016, 40(4): 437-440.
Chen Bo, Wang Peng, Zhang Hua. The review of nitrogen and phosphorus pollution in Poyang Lake Water[J]. Journal of Jiangxi Normal University(Natural Science Edition), 2016, 40(4): 437-440.
- [41] 刘凯, 倪兆奎, 王圣瑞, 等. 鄱阳湖沉积物有机磷累积特征及其与流域发展间的响应关系[J]. 环境科学学报, 2015, 35(5): 1292-1301.
Liu Kai, Ni Zhaokui, Wang Shengrui, et al. Accumulation characteristics of organic phosphorus in sediments of Poyang Lake and its relationship with watershed development[J]. Huanjing Kexue Xuebao, 2015, 35(5): 1292-1301.
- [42] 田琪, 李利强, 欧伏平, 等. 洞庭湖氮磷时空分布及形态组成特征[J]. 水生态学杂志, 2016, 37(3): 19-25.
Tian Qi, Li Liqiang, Ou Fuping. Temporal-spatial distribution and speciation of nitrogen and phosphorus in Dongting Lake[J]. Journal of Hydroecology, 2016, 37(3): 19-25.
- [43] 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]. 吉林: 吉林建筑大学, 2014.
Jiang Yan. Study on eutrophication mechanisms of Dongting Lake and the mutlianalysis between chlorophyll a and other impact factors of water environment[D]. Jilin: Jilin Jianzhu University, 2014.
- [44] 马斌. 洪泽湖水水质富营养化现状、原因及对策研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2006.
Ma Bin. The research on the eutrophication status of Hongze Lake and measure of preventing&cure[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2006.
- [45] 罗小勇, 丁洪亮, 廖奇志. 滇池富营养化状况及其综合防治对策[J]. 长江工程职业技术学院学报, 2004, 21(1): 4-7.
Luo Xiaoyong, Ding Hongliang, Liao Qizhi. Eutrophication state of dianchi lake and comprehensive countermeasures against it[J]. Journal of Changjiang Vocational University, 2004, 21(1): 4-7.
- [46] 秦伯强, 杨柳燕, 陈非洲, 等. 湖泊富营养化发生机制与控制技术及其应用[J]. 科学通报, 2006, 51(16): 1857-1866.
Qin Boqiang, Yang Liuyan, Chen Feizhou, et al. The mechanism and control technology of lake eutrophication and its application[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(16): 1857-1866.
- [47] 朱广伟, 秦伯强, 高光. 风浪扰动引起大型浅水湖泊内源磷暴发性释放的直接证据[J]. 科学通报, 2005, 50(1): 66-71.
Zhu Guangwei, Qin Boqiang, Gao Guang. Direct evidence of internal phosphorus fulminant release caused by waves disturbance in large shallow lakes[J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(1): 66-71.
- [48] Wang S, Jin X C, Pang Y. Phosphorus fractions and phosphate sorption characteristics in relation to the sediment compositions of shallow lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River region, China [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2005, 289(2): 339-346.
- [49] Wang S, Jin X, Zhao H, et al. Effect of organic matter on sorption of dissolved organic and inorganic phosphorus in lake sediment[J]. Colloids & Surfaces A: Physicochemical & Engineering Aspects, 2007, 297(1/3): 154-162.
- [50] Wang S, Jin X, Pang Y, et al. The study of the effect of pH on phosphate sorption by different trophic lake sediments[J]. Journal of Colloid & Interface Science, 2005, 285(2): 448-457.
- [51] 王庭健, 苏睿, 金相灿, 等. 城市富营养湖泊沉积物中磷负荷及其释放对水质的影响[J]. 环境科学研究, 1994(4): 12-19.
Wang Tingjian, Su Rui, Jin Xiancan, et al. The effects to waterquality of phosphorus loading and its rel ease in the sediments of urban eutrophic lakes[J]. Research of Environmental sciences, 1994(4): 12-19.
- [52] 王晓蓉, 华兆哲, 徐菱, 等. 环境条件变化对太湖沉积物磷释放的影响[J]. 环境化学, 1996(1): 15-19.
Wang Xiaorong, Hua Zhaozhe, Xu Ling, et al. The effects of the environmental conditions on phosphorus release in lake sediments[J]. Environmental Chemistry, 1996(1): 15-19.
- [53] 谢平. 浅水湖泊内源磷负荷季节变化的生物驱动机制[J]. 中国科学: 地球科学, 2005, 35(增刊2): 14-26.
Xie Ping. Bio-driving mechanism of seasonal variation of internal phosphorus load in shallow lakes[J]. Science China Earth Sciences, 2005, 35(Suppl 2): 14-26.
- [54] Eugene B. Welch, G. Dennis Cooke. Effectiveness and longevity of phosphorus inactivation with alum[J]. Lake & Reservoir Management, 1999, 15(1): 5-27.
- [55] Li M, Xu K, Watanabe M, et al. Long-term variations in dissolved silicate, nitrogen, and phosphorus flux from the Yangtze River into the East China Sea and impacts on estuarine ecosystem[J]. Estuarine & Coastal Marine Science, 2007, 71(1/2): 3-12.
- [56] Sondergaard M. Retention and internal loading of phosphorus in shallow, eutrophic lakes[J]. Scientific World Journal, 2001, 1(1/3): 427-442.
- [57] Sondergaard M, Jensen J P, Jeppesen E. Role of sediment and internal loading of phosphorus in shallow lakes[J]. Hydrobiologia, 2003, 506-509(1): 135-145.
- [58] 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[J]. 环境科学学报, 2004, 24(3): 381-388.
Zhu Guangwei, Qin Boqiang, Gao Guang, et al. Fractionation of

- phosphorus in sediments and its relation with soluble phosphorus contents in shallow lakes located in the middle and lower reaches of Changjiang River, China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004, 24(3): 381-388.
- [59] 秦伯强, 朱广伟. 长江中下游地区湖泊水和沉积物中营养盐的赋存、循环及其交换特征[J]. *中国科学(地球科学)*, 2005, 35(增刊2): 4-13.
- Qin Boqiang, Zhu Guangwei. Occurrence, circulation and exchange characteristics of nutrients in water and sediments of lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. *Science China Earth Sciences*, 2005, 35(Suppl 2): 4-13.
- [60] Huang J, Wang X, Xi B, et al. Long-term variations of TN and TP in four lakes fed by Yangtze River at various timescales[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(5): 3993-4009.
- [61] 吴志强. 江湖关系变化对鄱阳湖沉积物氮磷形态及释放风险的影响[D]. 南昌: 南昌大学, 2014.
- Wu Zhiqiang. The influence of river-lake relation change on the Poyang Lake sediments nitrogen/phosphorus form and release risk [D]. NanChang: NanChang university, 2014.
- [62] 霍守亮, 席北斗, 姚波, 等. 中国湖泊富营养化防治策略研究[J]. *环境保护*, 2009(4): 16-18.
- Huo Shouliang, Xi Beidou, Yao Bo, et al. Study on the prevention and control of lake eutrophication in China[J]. *Environmental Protection*, 2009(4): 16-18.
- [63] 毛春梅, 张文锦. 固城湖富营养化评价及防治对策[J]. *安徽农业科学*, 2007, 35(28): 9005-9006.
- Mao Chunmei, Zhang Wenjin. Assessment and control countermeasures of the eutrophication of gucheng lake[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2007, 35(28): 9005-8999.
- [64] 朱喜, 胡明明, 朱金华, 等. 巢湖水环境综合治理思路和措施[J]. *水资源保护*, 2016, 32(1): 120-124.
- Zhu Xi, Hu Mingming, Zhu Jinhua, et al. Thoughts and measures of water environment comprehensive management in Chaohu Lake[J]. *Water Resources Protection*, 2016, 32(1): 120-124.
- [65] Jin X C, Lu S Y, Hu X Z, et al. Control concept and countermeasures for shallow lakes' eutrophication in China[J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering in China*, 2008, 2(3): 257-266.
- [66] 胡玲珍, 陈振楼, 刘杰. 长江三角洲湖泊富营养化演变趋势及其调控对策[J]. *重庆环境科学*, 2003, 25(3): 6-9.
- Hu Lingzhen, Chen Zhenlou, Liu Jie. Variational trends and control countermeasures of lake eutrophication in the Yangtze River Delta [J]. *Chongqing Environmental Science*, 2003, 25(3): 6-9.
- [67] 李慧, 余能智. 富营养化浅水湖泊沉积物磷释放机理研究综述[J]. *水资源开发与管理*, 2016(4): 56-59.
- Li Hui, Yu Nengzhi. Review of studying eutrophication shallow water lake sediment phosphorus release mechanism[J]. *Water Resources Development and Management*, 2016(4): 56-59.
- [68] 秦伯强. 湖泊富营养化治理的技术对策[J]. *环境保护*, 2007(19): 22-24.
- Qin Boqiang. Technical countermeasures for lake eutrophication control [J]. *Environmental Protection*, 2007(19): 22-24.
- [69] 刘士哲, 林东教, 唐淑军, 等. 利用漂浮植物修复系统栽培风车草、彩叶草和茉莉净化富营养化污水的研究[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(7): 1261-1265.
- Liu Shizhe, Lin Dongjiao, Tang Shujun, et al. Purification of eutrophic wastewater by *Cyperus alternifolius*, *Coleus blumei* and *Jasminum sambac* planted in a floating phytoremediation system[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(7): 1261-1265.
- [70] 田琦, 王沛芳, 欧阳萍, 等. 5种沉水植物对富营养化水体的净化能力研究[J]. *水资源保护*, 2009, 25(1): 14-17.
- Tian Qi, Wang Peifang, Ou Yangping, et al. Purification of eutrophic water with five submerged hydrophytes[J]. *Water Resources Protection*, 2009, 25(1): 14-17.
- [71] Hu G J, Zhou M, Hou H B, et al. An ecological floating-bed made from dredged lake sludge for purification of eutrophic water[J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36: 1448-1458.
- [72] Guo Y M, Liu Y G, Zeng G M, et al. A restoration-promoting integrated floating bed and its experimental performance in eutrophication remediation[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, 26(13): 1090-1098.
- [73] Li X N, Song H L, Li W, et al. An integrated ecological floating-bed employing plant, freshwater clam and biofilm carrier for purification of eutrophic water[J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36: 382-390.
- [74] Nakai S, Zou G, Song X, et al. Release of anti-cyanobacterial allelochemicals from aquatic and terrestrial plants applicable for artificial floating islands[J]. *Journal of Water & Environmental technology*, 2008, 18(2): 277-286.
- [75] 王俭, 吴阳, 王晶彤, 等. 生态浮床技术研究进展[J]. *辽宁大学学报(自然科学版)*, 2016, 43(1): 50-55.
- Wang Jian, Wu Yang, Wang Jintong, et al. A review of ecological floating bed technology[J]. *Journal of Liaoning University*, 2016, 43(1): 50-55.
- [76] 胡绵好, 奥岩松, 杨肖娥, 等. 不同N水平的富营养化水体中经济植物净化能力比较研究[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(2): 147-150.
- Hu Mianhao, Ao Yansong, Yang Xiaoe, et al. Comparative studies on purification ability of economic plants in different N level eutrophic water[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(2): 147-150.
- [77] 纪荣平, 吕锡武, 李先宁. 人工介质对富营养化水体中氮磷营养物质去除特性研究[J]. *湖泊科学*, 2007, 19(1): 39-45.
- Ji Rongping, Lü Xiwu, Li Xianning. Performance of artificial medium for removing nutrients in eutrophic water[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2007, 19(1): 39-45.
- [78] 杨静. 东洞庭湖底泥中磷的释放特性及其原位控制技术试验研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2010.
- Yang Jing. Study on characteristics of phosphorus release from sediments of east Dongting lake and in-situ control the release technology[J]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2010.
- [79] 范成新, 羊向东, 史龙新, 等. 江苏湖泊富营养化特征、成因及解决途径[J]. *长江流域资源与环境*, 2005, 14(2): 218-223.
- Fan Chengxin, Yang Xiangdong, Shi Longxin, et al. Characteristics and cause of lake eutrophication in Jiangsu province with suggestions on its control measures[J]. *Resources & Environment in the Yangtze Basin*, 2005, 14(2): 218-223.
- [80] 李梦, 刘桂建, 吴蕾, 等. 冬季巢湖西半湖的富营养化及污染状况研究——基于浮游藻类的多样性分析[J]. *中国科学技术大学学报*, 2015, 45(2): 150-158.
- Li Meng, Liu Guijian, Wu Lei, et al. Eutrophication and water quality characteristics of Western Chaohu Lake in winter via planktonic alga diversity analysis[J]. *Journal of University of Science & Technology of China*, 2015, 45(2): 150-158.
- [81] 王成贵, 曹勇, 汪海波. 巢湖西半湖水体富营养化污染状况及防治对

- 策[J]. 安徽农业科学, 2005, 33(8): 1475-1476.
Wang Chenggui, Cao Yong, Wang Haibo. Analysis of eutrophication in the west part of chaohu lake[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2005, 33(8): 1475-1476.
- [82] 田春. 巢湖东半湖浮游植物分布特征及富营养化评价[D]. 安徽: 安徽农业大学, 2005.
Tian Chun. Characteristic of phytoplankton distribution and eutrophication evaluation in the east-half of Chaohu Lake[D]. Anhui: AnHui Agricultural University, 2005.
- [83] Tang X Q, Wu M, Yang W J, et al. Ecological strategy for eutrophication control[J]. Chongqing Environmental Science, 2012, 223(20): 723-737.
- [84] 王圣瑞, 倪兆奎, 席海燕. 我国湖泊富营养化治理历程及策略[J]. 环境保护, 2016, 44(18): 15-19.
Wang Shengrui, Ni Zhaokui, Xi Haiyan. Management process and strategy of lake eutrophication in China[J]. Environmental Conservation, 2016, 44(18): 15-19.
- [85] Li C, Zha Y, Li Y, et al. Eutrophication of lake waters in China: Cost, causes, and control[J]. Environmental Management, 2010, 45(4): 662-668.
- [86] Qin B Q. Lake eutrophication: Control countermeasures and recycling exploitation[J]. Ecological Engineering, 2009, 35(11): 1569-1573.
- [87] Qin B Q. Special Issue: Lake Taihu eutrophication: control countermeasures and recycling exploitation[J]. Ecological Engineering, 2009: 1569-1684.
- [88] 范敬兰, 刘奉, 刘雨. 城市湖泊富营养生态修复技术研究与应用[J]. 江苏水利, 2016(2): 21-27.
Fan Jinglan, Liu Feng, Liu Yu. Research and application on ecological rehabilitation technology of urban eutrophic lakes[J]. Jiangsu Water Resources, 2016(2): 21-27.

Eutrophication and control measures of key lakes in the Yangtze River Basin

LI Linlin^{1,2}, LU Shaoyong^{1,2}, MENG Wei^{1,2}, LIU Xiaohui¹, GUO Xiaochun¹, WAN Zhengfen¹

1. State Environmental Protection Scientific Observation Station of Dongting Lake, State Key Laboratory of Environmental Benchmark and Risk Assessment, National Engineering Laboratory for Lake Water Pollution Control and Ecological Restoration, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China
2. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract In recent decades, lake eutrophication has severely limited the economic and social sustainable development in the lake basin. To repair the ecological environment and promote the development of the Yangtze river economic belt, solutions to the lake's eutrophication problem are urgently needed. The six key lakes along the Yangtze river are taken as the research objects, and their historical changes, characteristics, cause analysis and control measures for eutrophication are discussed. It is shown that the eutrophication indexes of the six lakes have been gradually reduced in recent years and the state of lake eutrophication has a tendency of getting better. Causes of lake eutrophication are complex, the main influence factors include exogenous input and endogenous release. In terms of lake forms and hydrological conditions, the six lakes are shallow lakes and mostly are closed or semi-closed state, which is advantageous to the accumulation of nutrients and algae growth. The control measures of exogenous input are relatively mature and can greatly reduce the nutrients discharged into the lake, such as the expansion of the sewage treatment plant, improvement of sewage treatment and supporting pipe network construction. But for internal release, the governance process is relatively complicated. At present there are mainly physical and chemical methods and technologies such as dredging, sediment oxidation, chemical precipitation, sediment cover, microbial agents, biological floating bed, and so on. Due to the differences of physical and chemical conditions, the applicable method to each lake is also different, so the appropriate lake endogenous control technology remains to be demonstrated. Controlling nutrients input from inside and outside sources, executing river ecological restoration and security governance, and management together could ensure the long-term effectiveness of eutrophic lakes governance.

Keywords Yangtze river; lakes eutrophication; historical evolution; precaution and comprehensive treatment

(责任编辑 祝叶华)