

贡湖水源地水体营养状态评价及富营养化防治对策

王阳阳¹, 霍元子¹, 曲宪成¹, 马家海¹, 姚 焱², 丁士明², 何培民¹

(1. 上海海洋大学 水域环境与生态工程研究中心, 上海 201306;

2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008)

摘要:于2008-2009年对太湖贡湖水源地金墅港、田鸡港、龙塘港等3条主要河道的水质及大型水生植物进行了季节性野外调查,并对该区3月和6月的浮游植物进行调查。水质调查结果表明,贡湖水源地河流水体富营养化风险较大,主要污染指标为总氮和总磷,全年TN平均浓度为3.094 mg/L,TP平均浓度为0.112 mg/L。以叶绿素a、总氮、总磷、高锰酸盐指数和透明度为主,并结合浮游植物指标,利用综合营养状态指数法对不同季节水质营养状况进行评价,春季(3月)和夏季(6月)水源地均处于富营养化状态,其中春季达到中度富营养化[LTI(Σ) = 64.113],秋冬季节水源地水质为中营养[LTI(Σ) = 53.526]。浮游植物调查结果显示,6月浮游植物总密度显著高于3月,6月和3月分别为 306.1×10^4 和 165.9×10^4 个/L,以蓝藻门、绿藻门和硅藻门为主。大型水生植物调查结果显示,3月和12月水生植物种类和生物量均较少,几乎没有大型水生植物,仅春季龙塘港有少量芦苇出现;6月水生植物增多,3条河道凤眼莲和芦苇均有较高生物量,金墅港的菊花草最多,其盖度达到90%,其次有紫萍、金鱼藻和穗状狐尾藻等,龙塘港和田鸡港苦草和漂浮植物(如紫萍和槐叶萍等)生物量较大;9月3条河道的菊花草、金鱼藻、紫萍、凤眼莲和芦苇都有较高生物量,而苦草生物量下降。结合调查结果和水源地实际情况,提出了水生动物控藻技术,水生植物水质净化与抑藻技术以及集成修复技术等防治水环境恶化的生态修复对策。

关键词:贡湖; 富营养化; 综合营养状态指数; 生态修复

中图分类号:X824 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2011)02-0075-07

我国湖泊富营养化程度日益加剧,导致浮游植物大量生长,水体透明度下降,并加速了沉水植物的衰退(苏睿丽等,2005)。21世纪以来,太湖蓝藻水华的暴发呈多峰形状态。太湖沙渚水源地藻类生物量“两峰三阶段”的特征进一步表明,太湖蓝藻水华的暴发进入了高频期(张宁红等,2009)。王志红(2006)认为高水平的初始氮、磷含量,使藻类具有很大的生长与繁殖潜力。底泥中营养物的释放是缓慢而长期的,水环境一旦恶化,恢复将是一个艰难而漫长的过程(范成新等,2007)。太湖贡湖水源地是白洋湾水厂和相城水厂的取水口,其水质直接关系到苏州市民的饮用水安全。近年来,受太湖高氮、磷营养盐负荷及藻类繁殖的影响,贡湖草型生态系统

有逐步退化趋势。特别是2007年,蓝藻暴发导致贡湖湾水厂发生了严重的水危机事件,严重威胁到了苏州市民的正常生活(朱广伟,2008)。因此,对当前水质状况做出合理评价并防止水体环境恶化是至关重要的。

营养状态指数法最早由Carlson(1977)建立,之后有学者(Aizaki, 1981; Goda, 1981)对其进行了修正和完善。此方法评价范围全面,评价因子综合考虑了总氮(TN)、总磷(TP)、透明度(SD)、叶绿素和高锰酸盐指数(COD_{Mn}),克服了单一因子评价的不足,并可对湖泊营养状态进行连续的数值化分级,可为湖泊富营养化机理的定量研究提供基础。

浮游植物作为水域生态系统的初级生产者,其群落结构和动态变化能很好的反映水环境现状及变化,因此,其可指示湖泊河流营养水平(Salmaso et al, 2006; Crossetti et al, 2008; Marchetto et al, 2009)。大型水生植物是湖泊演化和湖泊生态平衡的重要调控者,常常被视为湖泊环境变化的指示物(Bini et al, 1999)。本文采用营养状态指数法,并结合浮游植物和大型水生植物指标对贡湖水源地入湖河流水体进行了周年营养状态评价,并对其生态防治对策进行了初步探讨,为贡湖水源地的保护管理和生态修复提供数据和理论支持。

收稿日期:2010-09-20 收修改稿日期:2011-01-19

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大项目(2008ZX07101-012),上海市科委重点科技攻关项目(09391912000),上海市科委应用基础研究项目(09DZ1200903),上海市水生生物学重点学科资助项目(S30701),上海海洋大学博士启动基金项目(B-8201-08-0285)。

通讯作者:何培民,男,教授,博士生导师,研究方向海藻生物学技术与水域生态修复。E-mail: pmhe@shou.edu.cn

作者简介:王阳阳,1985年生,女,硕士研究生,从事水域环境生态修复研究。E-mail: wangyang0121@hotmail.com

1 材料与方法

1.1 采样点设置

太湖贡湖水源地(31°21'~31°25'N、120°19'~20°24'E),位于苏州市高新区西部临湖地带,其中金墅港、龙塘港和田鸡港是3条横贯东西的主要入湖河流。此次调查以主干河道金墅港为重点,在金墅港布设7个采样点,在龙塘港和田鸡港各布设3个采样点,如图1所示。

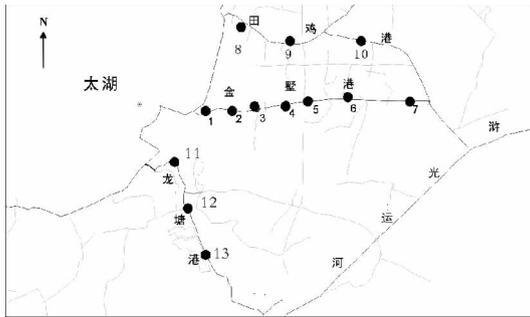


图1 贡湖水源地采样点分布

Fig.1 Distribution of the water quality monitoring sites in Gonghu Lake

1.2 采样与分析

1.2.1 水质 2008年12月,2009年3月、6月和9月各采水样1次。叶绿素a(Chl-a)采用丙酮法测定(金相灿等,1990)。TN、TP和COD_{Mn}按照GB3838—2002《地表水质量标准》规定的方法进行测定。

1.2.2 浮游植物 2008年3月和6月对浮游植物进行2次采样,其中浮游植物定量水样采集1L,加10%鲁哥氏液固定后浓缩至30mL镜检。同时使用Secchi盘现场测定水体透明度。

1.2.3 大型水生植物 2008年12月,2009年3月、6月和9月各进行1次大型水生植物采集,采样时依据每个采样点的植物盖度和多样性,各设立5~10个样方(0.5m×0.4m),用带网铁框采集。记录样方内水生植物种类及生物量(湿重)。

1.3 数据处理

综合营养状态指数计算公式:

$$TLI(\text{Chl-a}) = 10(2.5 + 1.086 \ln \text{Chl-a})$$

$$TLI(\text{TP}) = 10(9.436 + 1.624 \ln \text{TP})$$

$$TLI(\text{TN}) = 10(5.453 + 1.694 \ln \text{TN})$$

$$TLI(\text{SD}) = 10(5.118 - 1.94 \ln \text{SD})$$

$$TLI(\text{COD}_{Mn}) = 10(0.109 + 2.661 \ln \text{COD}_{Mn})$$

$$TLI(\Sigma) = \sum_{j=1}^m W_j \times TLI(j)$$

式中:TLI(Σ)为综合营养状态指数;W_j为第j种参数的营养状态指数的相关权重;TLI(j)为第j种参数的营养状态指数。

TLI(Σ) < 30 贫营养(Oligotropher); 30 ≤ TLI(Σ) ≤ 50 中营养(Mesotropher); TLI(Σ) > 50 富营养(Eutropher),其中 50 < TLI(Σ) ≤ 60 轻度富营养(Light eutropher), 60 < TLI(Σ) ≤ 70 中度富营养(Middle eutropher), TLI(Σ) > 70 重度富营养(Hyper eutropher)。

数据处理主要采用数理统计学方法,数据分析及作图利用Origin 7.5软件和Excel软件进行。

2 结果与分析

2.1 水质及分级

3条主要河道的水质季节变化见图2。可以看出,金墅港、田鸡港和龙塘港水体中TP和COD_{Mn}季节变化不大,且3条河道中差异不大;3月TN和叶绿素a含量高于其他季节,其中金墅港和田鸡港的TN略高于龙塘港,而叶绿素a在田鸡港最高。表1为4个季节3条河道各站位水化指标的平均值,依据地表水环境质量标准,对3条河道的水质情况进行分级。可以看出,TP除在田鸡港9月达到Ⅱ类水标准外,其余均超出Ⅳ类水;COD_{Mn}除在12月的金墅港和田鸡港达到Ⅳ外,其他均为Ⅲ类;3条河道TN含量在6月均有所下降,但仍超过国家地表水水质Ⅴ类标准,TN超标现象严重,12月TN含量大幅降低,金墅港和田鸡港降至Ⅲ类水质,但龙塘港依然为Ⅳ类水质;叶绿素a含量在3月极显著高于其他季节,平均达到273.169 μg/L。

2.2 水体营养状态评价

表2为综合营养状态指数评价的计算结果,水源地3月和6月均处于富营养化状态,其中3月达到中度富营养化,秋冬季节水源地水质为中营养。

2.3 浮游植物群落结构特征

对贡湖水源地3条河道的2次调查中,3月采集到浮游植物共8门63属,6月采集到8门82属。6月浮游植物总密度高于3月,6月和3月分别为306.1×10⁴和165.9×10⁴个/L,其中绿藻门密度最高,分别为119.7×10⁴和65.63×10⁴个/L。3月共发现硅藻门45种,绿藻门31种,蓝藻门11种,分别占总种数的42.45%、29.25%和10.38%;6月绿藻门数量增加,达62种,占总种数的40.52%,其次为硅藻门和蓝藻门,分别占总种数的30.07%和11.11%。在3月和6月的2次调查中,太湖取样水

域的浮游植物种类呈增长趋势。

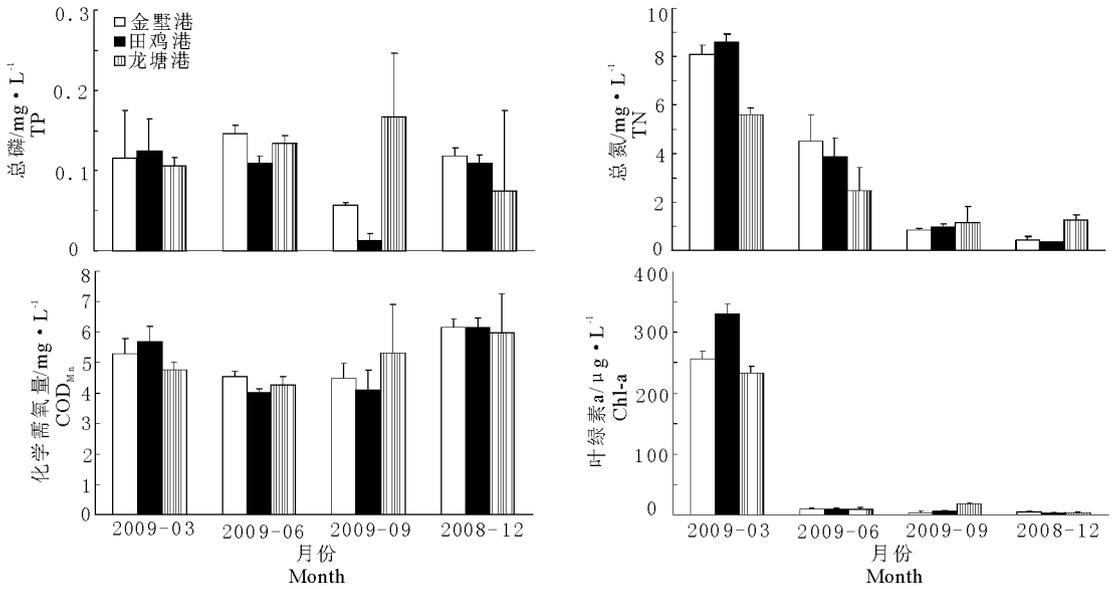


图2 金墅港、田鸡港和龙塘港水质的季节变化

Fig. 2 Seasonal variation of water quality in Jinshu Harbor, Tianji Harbor and Longtang Harbor

表1 3条河道主要水化指标调查结果及水质分级情况

Tab. 1 Main indicators of river water quality of the findings and classification

时间	站点	Chl-a/ μg · L ⁻¹	SD/ m	TP		TN		COD _{Mn}	
				浓度/mg · L ⁻¹	分级	浓度/mg · L ⁻¹	分级	浓度/mg · L ⁻¹	分级
2009年 3月	金墅港	256.358 ± 12.82	0.988 ± 0.05	0.115 ± 0.06	V	8.09 ± 0.39	劣V	5.274 ± 0.51	III
	田鸡港	330.196 ± 16.51	0.633 ± 0.03	0.124 ± 0.04	V	8.592 ± 0.35	劣V	5.680 ± 0.51	III
	龙塘港	232.953 ± 11.65	0.575 ± 0.03	0.106 ± 0.01	V	5.617 ± 0.28	劣V	4.764 ± 0.24	III
2009年 6月	金墅港	9.613 ± 1.15	0.458 ± 0.16	0.146 ± 0.01	V	4.521 ± 1.09	劣V	4.539 ± 0.18	III
	田鸡港	9.178 ± 1.42	0.393 ± 0.29	0.109 ± 0.01	V	3.878 ± 0.75	劣V	4.011 ± 0.12	III
	龙塘港	9.230 ± 2.89	0.583 ± 0.23	0.134 ± 0.01	V	2.460 ± 0.979	劣V	4.255 ± 0.28	III
2009年 9月	金墅港	4.063 ± 1.80	0.836 ± 0.40	0.057 ± 0.003	IV	0.839 ± 0.05	III	4.476 ± 0.48	III
	田鸡港	5.978 ± 1.28	0.450 ± 0.12	0.012 ± 0.01	II	0.973 ± 0.12	III	4.087 ± 0.65	III
	龙塘港	17.754 ± 2.77	0.908 ± 0.33	0.166 ± 0.08	V	1.162 ± 0.69	III	5.304 ± 1.59	III
2008年 12月	金墅港	5.405 ± 0.98	0.400 ± 0.02	0.119 ± 0.098	V	0.422 ± 0.18	II	6.155 ± 0.28	IV
	田鸡港	3.528 ± 0.14	0.300 ± 0.07	0.110 ± 0.01	V	0.354 ± 0.01	II	6.153 ± 0.31	IV
	龙塘港	4.000 ± 0.43	0.400 ± 0.24	0.074 ± 0.10	IV	1.261 ± 0.19	IV	5.983 ± 1.28	III

表2 综合营养状态指数法计算结果

Tab. 2 Results calculated by integrated nutrition index method

时间	站点	LTI(Chl-a)	LTI(TP)	LTI(TN)	LTI(SD)	LTI(COD _{Mn})	LTI(Σ)	营养状态
2009年 3月	金墅港	22.695	11.135	16.088	9.432	3.781	63.13	中度富营养
	田鸡港	23.427	11.367	16.270	11.013	3.945	66.02	中度富营养
	龙塘港	22.418	10.872	14.984	11.357	3.555	63.19	中度富营养
2009年 6月	金墅港	13.201	11.866	14.327	12.170	3.447	55.01	轻度富营养
	田鸡港	13.067	10.975	13.863	12.708	3.173	53.79	轻度富营养
	龙塘港	13.083	11.603	12.486	11.305	3.304	51.78	轻度富营养
2009年 9月	金墅港	10.710	9.000	9.233	10.025	3.416	42.39	中营养
	田鸡港	11.827	4.110	9.679	12.229	3.215	41.06	中营养
	龙塘港	14.974	12.250	10.217	9.730	3.793	50.97	轻度富营养
2008年 12月	金墅港	11.536	11.242	7.149	12.648	4.123	46.70	中营养
	田鸡港	10.302	10.987	6.620	13.672	4.123	45.70	中营养
	龙塘港	10.665	9.802	10.464	12.648	4.061	47.64	中营养

贡湖水源地浮游植物优势种见表3。2个季节的优势种种类存在差异,从种类组成上来看,绿藻门和隐藻门是该区域的优势群体,对浮游植物的群落结构和群落环境的形成具有明显控制作用。

2.4 大型水生植物分布特征

水生植物生物量调查结果见表4。3月和12月水生植物种类和生物量均较少,几乎没有大型水生

植物,仅春季龙塘港有少量芦苇出现;6月水生植物增多,3条河道凤眼莲和芦苇均有较高生物量,金墅港的菊花草最多,其盖度达到90%,其次有紫萍、金鱼藻和穗状狐尾藻等,龙塘港和田鸡港苦草和漂浮植物(如紫萍和槐叶萍等)生物量较大;9月3条河道的菊花草、金鱼藻、紫萍、凤眼莲和芦苇都有较高生物量,而苦草生物量下降。

表3 3月和6月贡湖水源地浮游植物优势种

Tab.3 Dominant species of phytoplankton in Gonghu Lake in March and June

门类	2009年3月	2009年6月
蓝藻门 Cyanophyta	二分双色藻(<i>Cyanobium distomicola</i>) 针状蓝纤维藻(<i>Dactylocoopsis acicularis</i>)	二分双色藻(<i>Cyanobium distomicola</i>) 沼泽颤藻(<i>Oscillatoria lacustris</i>)
绿藻门 Chlorophyta	小球藻(<i>Chlorella vulgaris</i>) 绿柄球藻(<i>Stylosphaeridium stipitatum</i>) 莱哈衣藻(<i>Chlamydomonas reinhardi</i>) 四尾栅藻(<i>Scenedesmus quadricauda</i>) 月牙藻(<i>Selenastrum biraianum</i>) 四角十字藻(<i>Crucigenia quadrata</i>)	小球藻(<i>Chlorella vulgaris</i>) 月牙藻(<i>Selenastrum biraianum</i>) 球衣藻(<i>Chlamydomonas globosa</i>) 波吉卵囊藻(<i>Oocystis borgei</i>) 集球藻(<i>Palmellocooccus miniatus</i>)
硅藻门 Bacillariophyta	扭曲小环藻(<i>Cyclotella comta</i>) 美丽星杆藻(<i>Asterionella formosa</i>) 日本星杆藻(<i>Asterionella japonica</i>)	尖针杆藻(<i>Synedra acus</i>) 肘状针杆藻(<i>Synedra ulna</i>) 短线脆杆藻(<i>Fragilaria brevisriata</i>)
黄藻门 Xanthophyta	近缘黄丝藻(<i>Tribonema affine</i>)	拟气球藻(<i>Botrydiopsis arhiza</i>) 小型黄丝藻(<i>Tribonema ulothrichoides</i>)
隐藻门 Cryptophyta	具尾蓝隐藻(<i>Chroomonas caudata</i>) 嗜蚀隐藻(<i>Cryptomonas erosa</i>)	嗜蚀隐藻(<i>Cryptomonas erosa</i>) 具尾蓝隐藻(<i>Chroomonas caudata</i>)

表4 3条河道各大型水生植物生物量

Tab.4 Biomass of macrophytes in three rivers

种类	调查时间								
	2009年3月			2009年6月			2009年9月		
	金墅港	田鸡港	龙塘港	金墅港	田鸡港	龙塘港	金墅港	田鸡港	龙塘港
菊花草 <i>Cabomba caroliniana</i>				4 010.0	150.0	210.0	3 917.0	4 010.0	4 010.0
金鱼藻 <i>Ceratophyllum demersum</i>				1 044.3	244.3	543.4	1 057.3	1 044.3	1 044.3
穗状狐尾藻 <i>Myriophyllum spicatum</i>				477.3		47.3	501.3		177.3
苦草 <i>Vallisneria spiralis</i>					1 110.7	981.7		213.7	117.7
轮叶黑藻 <i>Hydrilla verticillata</i>				203.0			213.0		
伊乐藻 <i>Elodea nuttallii</i>						97.7			197.7
荇菜 <i>Hydrocharis dubia</i>				90.3		290.3	191.4		94.5
竹叶眼子菜 <i>Potamogeton malaianus</i>				60.3	80.3	180.3	81.3	98.8	130.3
紫萍 <i>Spirodela polyrhiza</i>				2 102.7	102.7	3 102.7	1 104.7	2 102.7	1 304.7
槐叶萍 <i>Salvinia natans</i>					1 361.0			1 361.0	
菱 <i>Trapa natans</i>						82.0			109.3
喜旱莲子草 <i>Alternanthera philoxeroides</i>				836.0	136.0		1 836.0	836.0	
凤眼莲 <i>Echhornia crassipes</i>				1 537.0	2 248.0	1 137.0	1 958.0	837.0	1 379.0
芦苇 <i>Phragmites communis</i>			549.8	632.3	437.3	832.3	938.6	645.7	1 433.0

注:2008年12月未采集到大型水生植物,未列出;表中空项表示未采集到。

3 讨论

3.1 贡湖水源地水体富营养化状况

根据综合营养状态指数法对水源保护区3条主要河道各季节的营养水平进行评估,贡湖水源地主要入湖河道周年的 LTI(Σ)值 40~70,平均值为 52.28,各季节的水质状态差异较大,3月达到中度富营养化状态,主要污染指标为总氮和总磷。

有关调查结果表明,我国大中型湖泊和水库的总氮含量一般在 2.5 mg/L 以下,只有南四湖等少数湖泊总氮含量超过 3 mg/L,而一些城郊小湖泊总氮含量较高,可以超过 8.3 mg/L(金相灿等,1990)。一般认为,水体易出现富营养化的临界条件为:总氮浓度 >0.2 mg/L,总磷浓度 >0.02 mg/L。本次调查 3月金墅港和田鸡港 TN 均超过 8.0 mg/L;总磷含量普遍超过 III 类标准,全部在 0.05 mg/L 以上,超

过形成水华的临界条件。较高的氮磷含量导致3月叶绿素a浓度出现极高现象。

影响水体水质状况的主要因素是全方位复合污染物的输入,包括点源、面源和内源污染(王浩,2010)。另外,大气沉降物也是研究水体生态系统富营养化污染时需要考虑的重要外源性污染。调查所涉及3条河流各有特点。金墅港河道两侧人口多、居民集中,生活污水大部分排入河道;田鸡港河道两侧有村庄分布,村落间有大量农田、苗圃园与螃蟹养殖塘,水质受农业面源和鱼塘养殖等污染的影响大;龙塘港河道两侧分布农田,基本无村落,水质主要受农业面源污染影响。

3.2 贡湖水源地主要河道浮游植物分布特征

水体富营养化的重要指示生物之一是浮游植物(代玲玲,2007)。浮游藻类的群落结构、数量和污染指示种是评价水质的重要指标之一。据有关研究,浮游植物数量小于 30×10^4 个/L时水体为贫营养型, $30 \times 10^4 \sim 100 \times 10^4$ 个/L为中营养型,大于 100×10^4 个/L的为富营养型(沈治蕊,1997)。然而,由于各种藻类对营养因子和其他环境条件的变化有适应能力,同一种优势藻类也可以反映不同的营养类型,因而需要结合水质评价指标综合考虑(金相灿等,1990)。研究表明微囊藻水华的适应范围是水温 $>20^\circ\text{C}$,水体TP浓度 $0.1 \sim 0.8 \text{ mg/L}$,TN浓度 $2.5 \sim 3.5 \text{ mg/L}$,以及适度浑浊的透明度条件,有利于微囊藻与其他藻类竞争(Chen et al, 2003)。对贡湖水源地的调查显示,春、夏季营养盐浓度均达到了发生富营养化的条件,且蓝藻和绿藻均占有明显趋势,这将对取水口水质造成非常不利的影响。

优势种与营养状态的对应关系一般为:金藻门—贫营养;隐藻门—贫、中营养;甲藻门—中营养;硅藻门—中富营养;硅藻门、绿藻门—富营养;蓝藻门、绿藻门—重富营养(阮仁良,2000)。另外,无论是淡水还是海水环境,硅藻都是春季水华的优势种类,绿藻是温带湖库春、夏大量繁殖的种类(黄廷林等,2009)。水源地3条河道浮游植物以硅藻门、绿藻门和蓝藻门为主,已存在水华隐患,且3月和6月水体均处于富营养状态,对水源地保护区的水质形成潜在威胁。

3.3 贡湖水源地主要河道大型水生植物分布特征

调查显示,大型水生植物不论种类还是生物量,在各季节都存在显著差异,水生植物分布情况不同,对水环境的影响也不同。夏季水源地大型水生植物尤其是沉水植物增多,可能是其营养盐浓度降低的

原因之一。雷泽湘等(2008)研究表明,大型水生植物对太湖中N、P营养盐有显著影响。水生植物将湖水中的氮和有机碳传输到底泥中,对于防止水体富营养化有积极意义。冬季,尽管水体中营养物浓度升高,由于水温低、光照强度低和日照时间短,藻类生物量和生产力很低。富营养化的水质状态可能是导致沉水植被单一的原因,并可能引起沉水植被退化。高等水生植物与浮游植物是营养物质和光能利用上的竞争者,高等水生植物个体大、生命周期长、吸收和储存营养盐的能力强,它的存在可抑制浮游藻类的生长;某些高等水生植物的分泌物可以破坏藻类细胞结构,从而限制水生藻类地大量繁殖。况琪军(1997)研究表明,沉水植物苦草、沮草和伊乐藻对藻类有抑制作用,因此,提出利用水生植物对藻类的克制效应控制藻类地恶性增长,提高水体的自净能力。李文朝(1997)研究表明耐寒植物伊乐藻在冬季具有较强的净化能力,可以保证其所建常绿型水生植被具有较强的环境生态功能及其周年连续性。而Van等(1999)研究发现,轮叶黑藻能耐较高的营养盐,相对于苦草具有较强的竞争优势。另外,水生植物的水质净化功能还表现在对湖水中污染物的吸附作用和促进沉降等方面(李文朝,1997)。本次调查发现,春、夏2季除颤藻和双色藻外,其他蓝藻门藻类随大型高等水生植物生物量的增加而减少。

3.4 防治河道富营养化的生态修复对策

目前,贡湖水源地保护区的水质已然开始受到威胁,主要污染物是TN和TP,尤其TN污染严重。贡湖水源地保护区内居民和农田分布较密集,面源污染严重,是其主要污染输入方式。为改善水源地水质,保障城市供水安全,苏州市已于2008年1-4月对太湖金墅水源地取水口进行底泥疏浚清淤,清淤范围为取水口一级保护区、二级保护区的局部以及二级保护区外侧淤泥较深区,经过清淤工程,金墅湾取水口及其流域水质有所改善,但清淤范围仅限于部分主要河道,支流河道的污染状况仍很严重。

沉水植被的恢复和重建是贡湖水源地水质稳定和改善的关键。调查中发现,虽然贡湖水源地3条河道的沉水植物覆盖率较大,但种类过于单一,其中金墅港90%被菊花草覆盖。这种单一的水生植物群落结构,极易造成生态系统的不稳定和水质的恶化。因此,加快对水源地的生态修复工作,合理配置水生植物群落,建立有效的氮、磷输出模式,构建健康的生态系统是改善水质的根本途径。

因此,提出以下几种生态修复技术用以防治河道富营养化。

(1)水生动物控藻技术 根据特定水域浮游植物自然初级生产力,定量放养鲢、鳙等鱼类,通过滤食浮游藻类,有效控制蓝藻水华;N、P通过藻类营养级转化,以鱼产量形式得到固定,进而达到净化水质的目的。

(2)水生植物水质净化与抑藻技术 水生植物直接吸收氮、磷等营养物质,净化水质,抑制藻类生长,改善环境,增加生物多样性,增强系统自净功能。

(3)集成修复技术 科学放养滤食性鱼类和底栖动物,通过营养级联顶端控制蓝藻水华爆发和实现水质净化;恢复挺水和沉水植被以吸收水体和水底沉积库中氮、磷等营养物质;调查和分析水生生物本底状况,应用营养级联的加环、减环技术,进行水生生态系统修复,构建多样性水生稳态系统。

参考文献

- 蔡庆华. 1997. 湖泊富营养化评价方法[J]. 湖泊科学, 9(1): 89-94.
- 代玲玲. 2007. 三峡水库富营养化藻类特征及环境因素影响研究[D]. 重庆:重庆大学城市建设与工程学院.
- 范成新,王春霞. 2007. 长江中下游湖泊环境地球化学与富营养化[M]. 北京:科学出版社:230-231.
- 黄廷林,丛海兵,柴蓓蓓. 2009. 饮用水水源水质污染控制[M]. 北京:中国建筑工业出版社.
- 金相灿,刘鸿亮,屠清瑛等. 1990. 中国湖泊富营养化[M]. 北京:中国环境科学出版社.
- 金相灿,屠清瑛. 1990. 湖泊富营养化调查规范[M]. 2版. 北京:中国环境科学出版社:274-276.
- 况琪军. 1997. 人工模拟生态系统中水生植物与藻类的相关性研究[J]. 水生生物学报, 21(1): 90-93.
- 雷泽湘,徐德兰,顾继光,等. 2008. 太湖大型水生植物分布特征及其对湖泊营养盐的影响[J]. 农业环境科学学报, 27(2): 698-704.
- 李文朝. 1997. 富营养水体中常绿水生植被组建及净化效果研究[J]. 中国环境科学, 17(1): 53-57.
- 阮仁良. 2000. 上海水环境研究[M]. 北京:科学出版社.
- 沈治蕊,卞小红,赵燕,等. 1997. 南京煦园太平湖富营养化及其防治[J]. 湖泊科学, 12(4): 377-380.
- 苏睿丽,李伟. 2005. 沉水植物光合作用的特点与研究进展

[J]. 植物学通报, 22(增刊): 128-138.

- 王浩. 2010. 湖泊流域水环境污染治理的创新思路与关键对策研究[M]. 北京:科学出版社:15-17.
- 王志红,崔福义,安全. 2006. 氮磷与“藻华”生物量预测的模型探讨[J]. 哈尔滨工业大学学报, 38(5): 740-743.
- 张宁红,黎刚,郁建桥,等. 2009. 太湖蓝藻水华爆发的主要特征初析[J]. 中国环境监测, 25(1): 71-74.
- 中国科学院南京地理与湖泊研究所. 2007. 太湖梅梁湾 2007 年蓝藻水华形成及取水 13 污水团成因分析与应急措施建议[J]. 湖泊科学, 19(4): 357-358.
- Aizaki M. 1981. Application of modified Carlson's trophic state index to Japanese lakes and its relationships to other parameters related to trophic state[J]. Res. Rep. Natl. Inst. Environ. Stud., 23: 13-31.
- Bini L M, Thomaz S M, Murphy K J, et al. 1999. Aquatic macrophyte distribution in relation to water and sediment conditions in the Itaipu Reservoir, Brazil[J]. Hydrobiologia, 415: 147-154.
- Carlson R E. 1977. A trophic state index for lakes[J]. Limnology and Oceanography, 22(2): 361-369.
- Chen Y W, Fan C X, Teubner K, et al. 2003. Long-term dynamics of phytoplankton assemblages: Microcystis domination in Lake Taihu, a large shallow lake in China [J]. Journal of Plankton Research, 25(1): 445-453.
- Crossetti L O, Bicudo C E M. 2008. Phytoplankton as a monitoring tool in a tropical urban shallow reservoir (Garcas Pond): The assemblage index application[J]. Hydrobiologia, 610: 161-173.
- Goda T. 1981. Comprehensive studies on the eutrophication of freshwater areas. XI: summary of researches [J]. The National Institute for Environmental Studies, (27): 59-71.
- Marchetto A, Padedda B M, Marinani M, et al. 2009. A numerical index for evaluation phytoplankton response to changes in nutrient levels in deep mediterranean reservoirs [J]. Journal of Limnology, 68: 106-121.
- Salmaso N, Morabito G, Buzzi F, et al. 2006. Phytoplankton as an indicator of the water quality of deep lakes south of the Alps[J]. Hydrobiologia, 563: 167-187.
- Van T K, Wheeler G S, Canter T D. 1999. Competition between *Hydrilla verticillata* and *Vallisneria spiralis* as influenced by soil fertility[J]. Aquatic Botany, 11(6): 225-233.

(责任编辑 杨春艳)

Nutrition Status Evaluation and Eutrophication Control Measures on Water Source Area of Gonghu Lake

WANG Yang-yang¹, HUO Yuan-zi¹, Qu Xian-cheng¹, MA Jia-hai¹, YAO Yao², DING Shi-ming², HE Pei-min¹

(1. Shanghai Ocean University, Water Environment & Ecology
Engineering Research Center, Shanghai 201306, China;

(2. Chinese Academy of Sciences, Njing Institute of Geography and limnology, Nanjing 210008, China)

Abstract: Using field survey methods, conducted an annual survey of water quality and macrophytes in Jinshu Harbor, Tianji Harbor and Longtang Harbor in water sources area of Gonghu Lake, in Taihu Lake in 2008 – 2009. In March and June, the phytoplankton samples were collected. The results showed that Gonghu Lake water resource areas had a greater risk of being eutrophic. The major pollution indicators were TN and TP. The annual average concentration of TN was 3.094 mg/L, TP was 0.112 mg/L. The water Quality and nutriture were evaluated by Integrated Nutrition Index Method, which use the Chl a, TN, TP, COD_{Mn}, and SD as the main water quality indicators and the phytoplankton data as bio-indicators. In March and June, the water quality was in a eutrophic state, which in March reached moderate eutrophication [LTI (Σ) = 64.113], and it was in moderate nutrition [LTI (Σ) = 53.526] in autumn and winter. The total density phytoplankton in June of phytoplankton was significantly higher than that in March, which were 306.1×10^4 ind/L and 165.9×10^4 ind/L, respectively. The mainly species were Cyanophyta, Chlorophyta and Bacillariophyta. Large aquatic plants in spring were only *Phragmites communis*. There were no Large aquatic plants in winter. Species were increased in summer; there were many *Echhornia crassipes* and *Phragmites communis* in three rivers. *Cabomba caroliniana* was the main specie in Jinshu Harbor, which covered 90% of the river. There were also many *Spirodela polyrhiza*, *Ceratophyllum demersum* and *Myriophyllum spicatum* in Jinshu Harbor. In Longtang Harbor and Tianji Harbor, there were *Vallisneria spiralis* and floating plant (such as *Spirodela polyrhiza* and *Salvinia natans*). In autumn, *Cabomba caroliniana*, *Ceratophyllum demersum*, *Spirodela polyrhiza*, *Echhornia crassipes* and *Phragmites communis* had big biomass, but biomass of *Vallisneria spiralis* decreased. According to these results, some ecological restoration measures were proposed to prevent the water from deteriorating.

Key words: Gonghu Lake; eutrophication; integrated nutrition index; ecological restoration