

夏季短期调水对太湖贡湖湾湖区水质及藻类的影响^{*}

杨倩倩¹, 吴时强^{1,2}, 戴江玉¹, 吴修锋¹, 薛万云¹, 刘 方³

(1: 南京水利科学研究院, 南京 210029)

(2: 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210029)

(3: 河海大学公共管理学院, 南京 210098)

摘 要: 贡湖湾作为“引江济太”工程长江来水进入太湖的第一站, 湖湾水体生态环境的变化是对调水工程净水效果的最好响应, 因此本文针对贡湖湾一次夏季短期调水展开调查研究, 分别取 2013 年 7 月 24 日(调水前)和 2013 年 8 月 18 日(短期调水后)两次监测水样的水体理化指标和浮游藻类群落数据进行了对比分析, 并对浮游藻类群落与环境因子做了相关性分析。结果表明: 受来水影响, 短期调水后监测区水体的 pH 略有下降, 溶解氧、浊度、硝态氮、总氮、总磷以及高锰酸盐指数等水体理化指标浓度均较调水前有所升高; 其中受调水影响最为显著的区域为望虞河的入湖口区、湾心区。两次监测调水前后湖区水体优势藻种属未发生变化, 仍以微囊藻为主, 但蓝藻种属比例有所下降, 绿藻和硅藻等种属比例则有所上升。望虞河入湖口区和贡湖湾湾心区的 Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数受调水的影响升高。同时, 浮游藻类群落结构与受水水体理化参数的冗余分析结果表明, 此次监测的短期调水后, 太湖贡湖湾监测湖区水体 pH、溶解氧、硝态氮、总氮、总磷、高锰酸盐指数等环境因子与浮游藻类的群落分布呈显著相关, 是影响受水水体中藻类群落的主要环境因子。

关键词: “引江济太”; 贡湖湾; 太湖; 藻类群落; 富营养化

Effects of short-term water diversion in summer on water quality and algae in Gonghu Bay, Lake Taihu

YANG Qianqian¹, WU Shiqiang^{1,2}, DAI Jiangyu¹, WU Xiufeng¹, XUE Wanyun¹ & LIU Fang³

(1: Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, P.R.China)

(2: State Key Laboratory of Hydrology-water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210029, P.R.China)

(3: Hohai University Institute of Public Administration, Nanjing 210098, P.R.China)

Abstract: As the first stop that “Water diversion from Yangtze River to Lake Taihu” project water flowing into, Gonghu Bay is the base place to evaluate the water ecological environment changes in response to the project. In this paper, a short-term water diversion in summer in Gonghu Bay is investigated. The physical and chemical indicators and phytoplankton community of the two monitoring water samples before (July 24, 2013) and after short-term water diversion (August 18, 2013) is compared and analyzed, and then the relationship between phytoplankton community and environmental factors is analyzed. Our results showed that the short-term water diversion in summer had a significant effect on the water quality in Gonghu Bay. After short-term water diversion, the pH value of the water body in the monitored area decreased slightly. The values of turbidity, dissolved oxygen (DO), nitrate nitrogen (NO_3^- -N), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) and permanganate index (COD_{Mn}) in the monitoring area during the water diversion were higher than those before water diversion. The most significant area affected by the water diversion was the entrance to Gonghu Bay of Wangyu River and the middle area of Gonghu Bay. Dominant genus of algae is still microcystis, while the proportion of cyanobacteria species decreased and non-blue algae species such as green algae and diatoms increased. Affected by the water diversion, Shannon-Wiener diversity index and Pielou evenness index in the entrance to Gonghu Bay of Wangyu River

^{*} 国家重点研发计划项目(2016YFC0401506)、国家国际科技合作项目(2015DFA01000)、国家自然科学基金项目(51679146, 51479120, 51409165)、江苏省自然科学基金项目(BK20141075)、水利部公益性行业科研专项(201501015-01)和南京水利科学研究院基金项目(Y116006, Y116022)联合资助。2016-10-26 收稿; 2017-04-28 收修改稿。杨倩倩(1989~), 女, 硕士, 工程师; E-mail: qqyang1109@163.com.

and the middle area of Gonghu Bay were increased as well. However, the short-term water diversion in summer didn't significantly affect the algal community structure in the middle area of Taihu Lake. Meanwhile, the redundancy analyses of phytoplankton community structure and environmental factors by the use of CANOCO software showed that the pH, DO, NO_3^- -N, TN TP and COD_{Mn} were significantly correlated with the distribution of phytoplankton community in Gonghu Bay of Lake Taihu, which were the main environmental factors influencing the phytoplankton community.

Keywords: “Water diversion from Yangtze River to Lake Taihu”; Gonghu Bay; Lake Taihu; phytoplankton community; eutrophication

引水调控工程作为减轻浅水湖泊水华灾害和改善水质的应急措施,不仅对水体有稀释冲刷作用,还能促进湖泊内部水体的流动,强化流域范围内江、河、湖水系的连通性,从水利工程学角度为湖泊藻类水华控制的研究和应用提供了新的思路,成为 1990s 以来国际社会及众多学者关注的焦点. 资料显示,许多国家都曾经或正在开展引水调控改善水生态环境的试验,国外如荷兰 Veluwemeer 湖的调水工程试验^[1]和美国东华盛顿的 Moses 湖引水工程^[2],国内塔里木河的下流引清调水实践^[3]、西湖的引水冲污工程^[4]、“引江济太”工程^[5]等. 但由于引水调控的复杂性^[6],一方面来水流量引起的湖泊水文水力学特性的改变会对湖泊生态环境产生影响;另一方面来水所携带的营养盐、有机物和重金属等污染物质会直接输入湖泊水体^[7],其赋存、迁移和转化也会对生物群落的生长、消亡及群落演替甚至会对湖泊生态系统的稳定性产生影响^[8-9].

贡湖湾作为太湖东北部靠近无锡市的一个湖湾,水域面积约为 163.8 km²,是无锡市重要的水源地. 但是由于周边城镇的工业废水和生活污水大量排入及农业污染,贡湖湾成为太湖蓝藻水华暴发严重的湖区之一,带来了居民的饮用水危机. 贡湖西南通太湖湖心区,东北与望虞河相连,是出入太湖流域河流与太湖湖区进行物质能量交汇、污染物输入与输出的重要水域,具有高度的敏感性,同时更是“引江济太”工程长江来水进入太湖的第一站,湖湾水体生态环境的改变是对调水工程净水效果的最好响应,也直接影响着湖体的水质特征. 而作为浅水湖泊中的初级生产者之一,浮游藻类更是直接反映水体生态环境变化的重要指标,其群落的种类数量、优势种群等在不同营养水平下的变化很大^[10].

因此针对贡湖湾一次夏季短期调水前后水体生态环境的时空变化情况展开调查研究,重点关注湖湾水体理化指标和浮游藻类群落的变化,分析浮游藻类群落与环境因子之间的相关性,探究调水对受水水体的影响机制,并进一步分析对湖心区水体的影响情况,为更深入地认识调水工程提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 监测点位布设

根据贡湖湾湖区形状特征、望虞河入湖口位置、引江济太入湖水体流向等,共设置 22 个监测点位(图 1),分布在望虞河入湖口(R)、贡湖湾湾心(G1~G7)、贡湖湾西岸带(G11~G16)、贡湖湾东岸带(G17~G21)以及湖心区(G8~G10). 考虑到监测点位需覆盖整个研究区域,以湖区每个点位间隔 2.5 km 为标准进行布设.

1.2 样品采集与测定

本研究分别于 2013 年 7 月 24 日(调水前)和 2013 年 8 月 18 日(短期调水后)对 22 个监测点处水样进行采集. 水质样品利用卡盖式有机玻璃采水器在水面下 50 cm 处采集,并装于聚乙烯采样瓶中,置于车载冷藏箱中低温避光保存. 浮游藻类样品用卡盖式采水器在水面下 50 cm 处采集 1 L 水样置于聚乙烯采样瓶中,现场加 15 ml 鲁哥试剂固定样品,样品带回实验室后静置沉降 24 h 以上,采用虹吸法去除上清液,浓缩样品至 30~50 ml,供显微镜检测^[11].

现场利用哈希(HACH) AP-2000 便携式多参数水质分析仪测定监测点位的水温(Tem)、pH、溶解氧(DO)、浊度(Tur)等物理指标. 水体总氮(TN)、总磷(TP)浓度参照《湖泊富营养化调查规范》中的相关方法进行测定^[12],水样过滤后测定溶解性理化指标,其中硝态氮(NO_3^- -N)浓度采用双波长法测定^[13]、铵态氮(NH_4^+ -N)浓度采用纳氏试剂光度法测定^[14],高锰酸盐指数(COD_{Mn})采用紫外分光光度法测定^[15],叶绿素 a(Chl.a)浓度采用热乙醇法测定^[16].

加了鲁哥试剂并经浓缩处理后的水样用于浮游藻类群落鉴定与计数. 采用藻类细胞自动识别和计数软

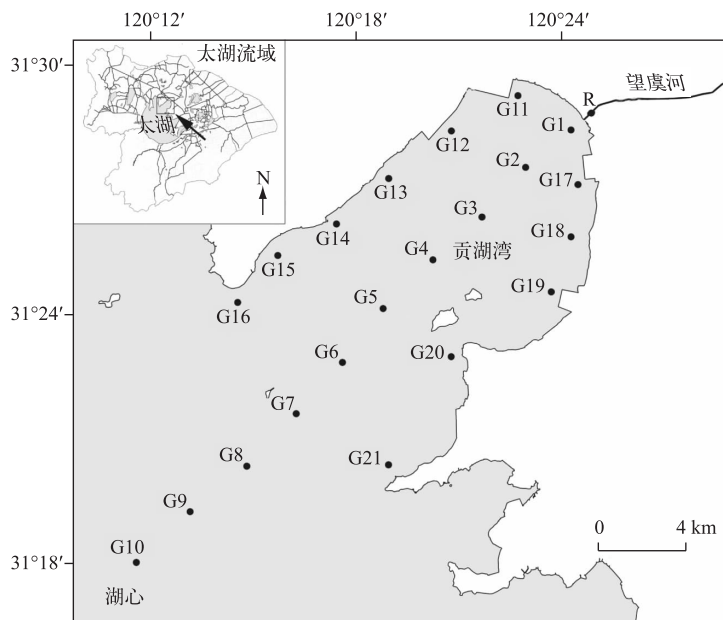


图1 太湖贡湖湾监测点位布设

Fig.1 Location of monitoring sites in Gonghu Bay, Lake Taihu

件进行浮游藻类群落的鉴定和计数,将静置浓缩预处理后的样品充分摇匀后立即用移液枪取 0.1 ml 于 0.1 ml 藻类计数框中,在 16×40 倍的生物显微镜下成像和计数,每个样品随机均匀读取 100 个可用视野. 所获得的视野图片经藻类自动识别和计数软件处理,用以鉴定浮游藻类群落并计算浮游藻类生物量. 每个样品计数 2 片,如果两次的误差大于 15%,则进行第 3 片计数,取误差在 15% 以内的计数结果的均值作为最终鉴定结果^[17].

1.3 数据处理方法

1) 采用 Sigma Plot 软件对水质数据、藻类群落组成和细胞密度数据进行作图与拟合,对比调水前后不同点位的水质、浮游藻类群落差异.

2) 利用 PRIMER-E 软件计算藻类 Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数.

3) 利用 CANOCO for windows 软件对浮游藻类的群落结构做主成分分析 (PCA),比较调水前后藻类群落结构的差异性;并通过相似性分析检验 (ANOSIM) 来进一步比较调水前后藻类群落结构的差异显著性.

4) 利用 CANOCO for windows 软件将群落结构与水体环境因子进行排序、多元统计和蒙特卡洛检验,完成冗余分析 (RDA),找出影响藻类群落变化的主要环境因子,分析调水引起的湖区水环境条件的改变对浮游藻类群落变化的贡献.

1.4 短期调水时间及调水量

2013 年夏季调水时间为 2013 年 7 月 28 日—2013 年 10 月 5 日,持续共 70 天,望亭水利枢纽共计调水 8.51 亿 m^3 . 2013 年 7 月 24 日监测处于非调水期,即调水前期,2013 年 8 月 18 日监测处于调水进行的第 22 天,即调水进行期间,处于整个夏季调水期的 1/3 时,望亭水利枢纽调水量共计 2.12 亿 m^3 ,占整个夏季调水量的 25%,具体每日的调水量如表 1 所示.

2 结果与分析

2.1 水质变化特征

2013 年 7 月和 8 月采样时湖区各监测点位的理化指标情况如图 2 所示.

由于两次均是夏季监测,调水前后水温受外界气温影响,所以两次监测时湖区水温在 30.8~34.2℃ 之间(图 2a). 比较 2013 年 8 月不同监测区域的平均水温,其空间分布大小为:西岸带>东岸带>湾心区>湖心区.

望虞河来水的 DO 浓度低于调水前(2013 年 7 月)湖区浓度(图 2b),除调水入湖口区(G1、G11、G17)的 DO 浓度受来水影响明显,较调水前有明显下降,其他点位 DO 浓度未受望虞河来水影响,短期调水后(2013 年 8 月)两次水温相差较大的湖心区(G8~G10)DO 浓度相比 2013 年 7 月变化不大,下降不明显,而两次水温相差不大的湾心区(G3~G7)和西岸带(G12~G16)DO 浓度则明显高于调水前,说明此次监测的短期调水过程中,DO 的变化受水温的影响不大. 另外,两次采样所测风速相近,故分析此次短期调水 DO 浓度的变化主要是受调水引起的水体扰动影响. 2013 年 8 月监测湖区的 DO 浓度空间分布大小为:西岸带>湾心区>东岸带>湖心区>入湖口区.

对调水前(2013 年 7 月)和短期调水后(2013 年 8 月)监测湖区的浊度值进行对比(图 2c),湾心区(G6、G7)、湖心区(G8~G10)和西岸带(G14~G16)浊度有明显增加,表明各点浊度主要受调水影响,来水中悬浮物质随着调水的进行不断沉降,同时来水的流动性又给受水湖区水体带来扰动引起水底沉积物再悬浮,使得入湖口区(G1、G2、G11~G13、G17)的悬浮物输移到湖心区,导致湖心区浊度增加,而入湖口区的浊度远低于调水前.

其中东岸带 G20 处浊度较高,分析原因是 G20 处为陆地凸进湖区的位置,调水会在此引起回流,造成水体扰动. 2013 年 8 月监测湖区浊度的空间分布大小为:西岸带>湾心区>湖心区>东岸带>入湖口区.

两次采样相比较,pH 值的差异不大,基本在 8.5 上下(图 2d). 望虞河来水 pH 值低于调水前(2013 年 7 月)湖区 pH 值,受来水影响,短期调水后(2013 年 8 月)的湖区 pH 值整体低于调水前,尤其是入湖口区(G1、G2 和 G17)的 pH 值下降明显,与河水 pH 值接近.

TN 浓度的对比发现(图 2e),由于望虞河来水的 TN 浓度高于湖区水体平均 TN 浓度,短期调水后(2013 年 8 月)除湖心区(G8~G10)的 TN 略低于调水前(2013 年 7 月),其他监测点位均高于调水前. 2013 年 8 月 TN 浓度的空间分布大小为:西岸带>湾心区>东岸带>湖心区.

虽然望虞河来水的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度略低于调水前(2013 年 7 月)湖区平均值(图 2f), $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度整体上变化不明显,但部分点位的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度要略高于调水前. 2013 年 8 月各监测点位的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度空间分布情况:西岸带>东岸带>湖心区>湾心区.

望虞河来水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度显著高于调水前(2013 年 7 月)湖区的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度的变化受来水影响明显(图 2g),短期调水后(2013 年 8 月)的湾心区(G1~G5)、西岸带(G11~G15)的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度增加很多,远大于 2013 年 7 月的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度,而湖心区(G6~G10)的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度却远小于调水前(2013 年 7 月). 2013 年 8 月贡湖湾湖区 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度的空间分布大小为:湾心区>西岸带>东岸带>湖心区.

水体中 TP 浓度与浊度值有一定相关性,悬浮物质的再悬浮会引起被吸附的磷向水体释放,由于经望虞河所调长江水浊度较大,悬浮物浓度高,来水中 TP 浓度远高于调水前(2013 年 7 月)浓度(图 2h),受来水影响,短期调水后(2013 年 8 月)的湖区 TP 浓度较调水前有所增加. 2013 年 8 月贡湖湾湖区 TP 浓度的空间分布大小为:西岸带>东岸带>湾心区>湖心区.

表 1 望亭水利枢纽短期每日调水量

Tab.1 The daily water volume of diversion of Wangting hydro-junction in short term

调水时间	调水量/万 m ³
7 月 28 日—7 月 29 日	515
7 月 29 日—7 月 30 日	609
7 月 30 日—7 月 31 日	631
7 月 31 日—8 月 1 日	684
8 月 1 日—8 月 2 日	890
8 月 2 日—8 月 3 日	798
8 月 3 日—8 月 4 日	792
8 月 4 日—8 月 5 日	629
8 月 5 日—8 月 6 日	968
8 月 6 日—8 月 7 日	1123
8 月 7 日—8 月 8 日	1210
8 月 8 日—8 月 9 日	1382
8 月 9 日—8 月 10 日	1279
8 月 10 日—8 月 11 日	1365
8 月 11 日—8 月 12 日	1270
8 月 12 日—8 月 13 日	1192
8 月 13 日—8 月 14 日	1166
8 月 14 日—8 月 15 日	1184
8 月 15 日—8 月 16 日	1253
8 月 16 日—8 月 17 日	1158
8 月 17 日—8 月 18 日	1123
总计	21221

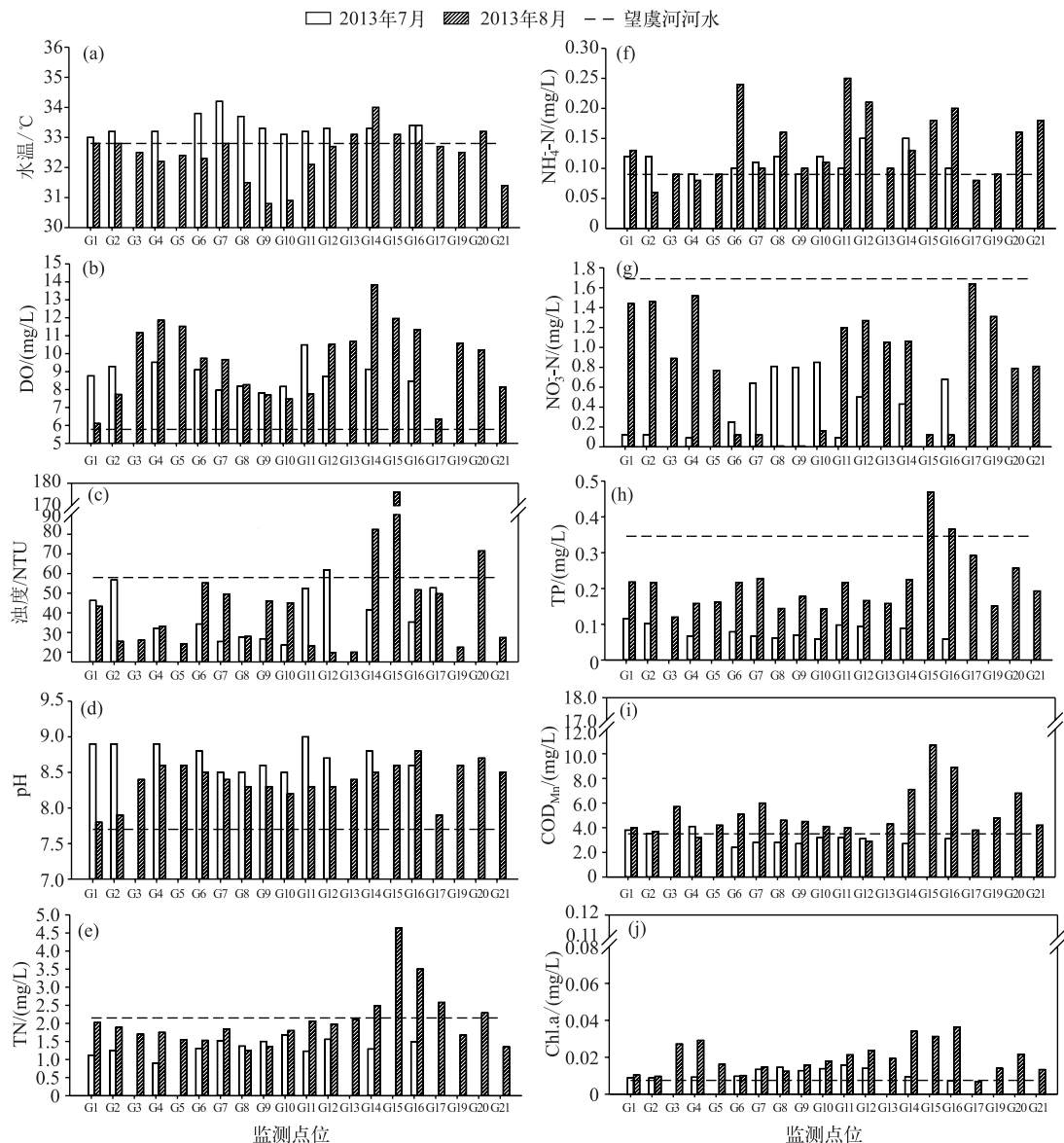


图2 不同监测时间下各监测点位的理化指标变化

Fig.2 Changes of physical and chemical indicators at each monitoring site under different periods

COD_{Mn}是表征水体有机物浓度的指标之一,望虞河来水的 COD_{Mn} 浓度较调水前(2013年7月)湖区 COD_{Mn} 浓度略高,短期调水后(2013年8月)的 COD_{Mn} 浓度较调水前有所增加(图2i). 2013年8月各监测点位 COD_{Mn} 浓度的空间分布为:西岸带>东岸带>湾心区>湖心区.

Chl.a 是表征浮游植物生物量最常用的指标之一,是藻类细胞的重要组成成分. 对比发现,望虞河来水的 Chl.a 浓度低于调水前(2013年7月)湖区的浓度(图2j),但短期调水后(2013年8月)湾心区和西岸带的 Chl.a 浓度却高于调水前,此次调水未能使 Chl.a 浓度明显下降. 分析调水后 Chl.a 浓度的分布情况与 DO、COD_{Mn} 浓度有明显的相关性^[17]. 2013年8月各监测点位的 Chl.a 浓度空间分布为:西岸带>湾心区>东岸带>湖心区.

2013年7月采样时太湖风向为西南风,2013年8月为东南风.2013年7月和8月太湖贡湖湾湖区水体理化指标的对比结果表明,在东南风盛行的前提下,贡湖湾湖区受调水影响最为显著的区域为望虞河的入湖口区,湾心区也受到一定影响;东南风不利于贡湖湾西部区域水体交换^[18],所以西岸带受风场影响,一方面蓝藻水华堆积,另一方面水体的各营养盐浓度也相对较高;而湖心区相较于其他监测区各理化指标值均较低.通过对夏季2013年7月、2013年8月监测区水体理化指标进行对比发现,此次夏季短期调水对监测区水体的pH、DO、浊度、NO₃-N浓度、TN浓度、TP浓度、COD_{Mn}、Chl.a浓度有显著影响.

2.2 浮游藻类群落变化特征

浮游藻类的生长和增殖取决于水体营养盐浓度以及光照、温度、盐度、有机物成分、水循环、浮游动物取食等生态因素,驱动浮游藻类细胞密度和群落结构变化的主要因素通常为营养盐(特别是氮、磷)、光照和水温^[19].调水会带来水体环境中物理化学和生物因素的改变从而引起浮游藻类群落结构变化.

2.2.1 藻类群落组成及细胞密度分析 2013年7月共检出浮游藻类5门26属,藻细胞密度由多到少的顺序依次为蓝藻门8属,占藻类总密度的95.5%;绿藻门11属,占藻类总密度的1.76%;硅藻门5属,占藻类总密度的1.55%;黄藻门1属,占藻类总密度的0.99%;隐藻门1属,占藻类总密度的0.2%.其中蓝藻门的微囊藻(*Microcystis*)占据绝对优势(图3).

2013年8月共检出浮游藻类6门41属,藻细胞密度由多到少的顺序依次为蓝藻门8属,占藻类总密度的95.09%;绿藻门22属,占藻类总密度的2.44%;硅藻门8属,占藻类总密度的2.1%;裸藻门1属,占藻类总密度的0.19%;隐藻门1属,占藻类总密度的0.17%;金藻门1属,占藻类总密度的0.01%.其中蓝藻门的微囊藻占据绝对优势(图3).

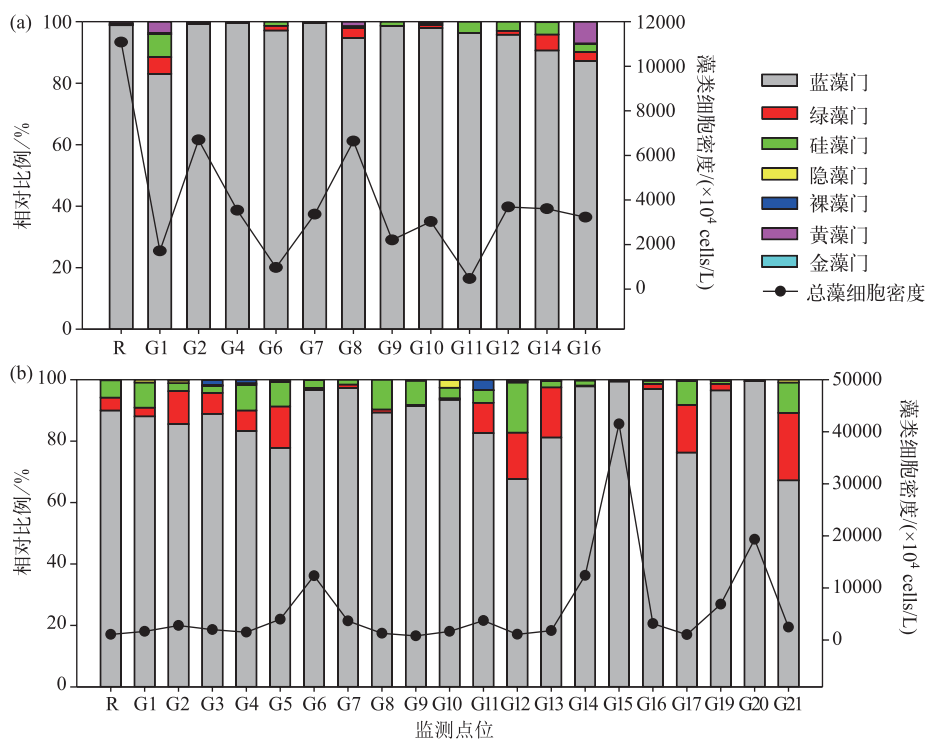


图3 2013年7月(a)和8月(b)藻类群落组成变化(R代表望虞河河水)

Fig.3 Changes of phytoplankton community composition in July (a) and August (b) of 2013

短期调水后(2013年8月)的蓝藻比例较调水前(2013年7月)降低,尤其是湾心区(G1~G7)和湖心区(G8~G10)的蓝藻比例变化明显,短期调水后的藻类种属数量增加,绿藻和硅藻等非蓝藻种属比例略有上

升. 但各个监测点调水前后的优势藻种属未发生明显变化, 仍以微囊藻为主, 贡湖湾仍是蓝藻型湖区 (图 3).

短期调水后 (2013 年 8 月) 湾心区和湖心区的总藻细胞密度较调水前 (2013 年 7 月) 降低, 西岸带 (G11~G16) 由于夏季风场影响造成藻类水华堆积, 总藻细胞密度增高 (图 3). 夏季短期的调水活动对受水湖区的藻细胞增长有一定的抑制作用, 而沿岸带的藻细胞增长仍然急剧. 营养物质的丰富对于浮游藻类整体生长速率有正面的影响, 总藻细胞密度达到峰值意味着湖水包含了大部分藻类生长所需的营养物质, 这与前述水体中营养物质的分布一致.

结合浮游藻类群落组成、相对比例和藻类细胞密度的变化分析可以看出, 监测期间, 调水后湾心区和湖心区总藻细胞密度有所下降, 而藻类种属数量增加, 蓝藻种属比例有所下降, 非蓝藻种属比例有所上升.

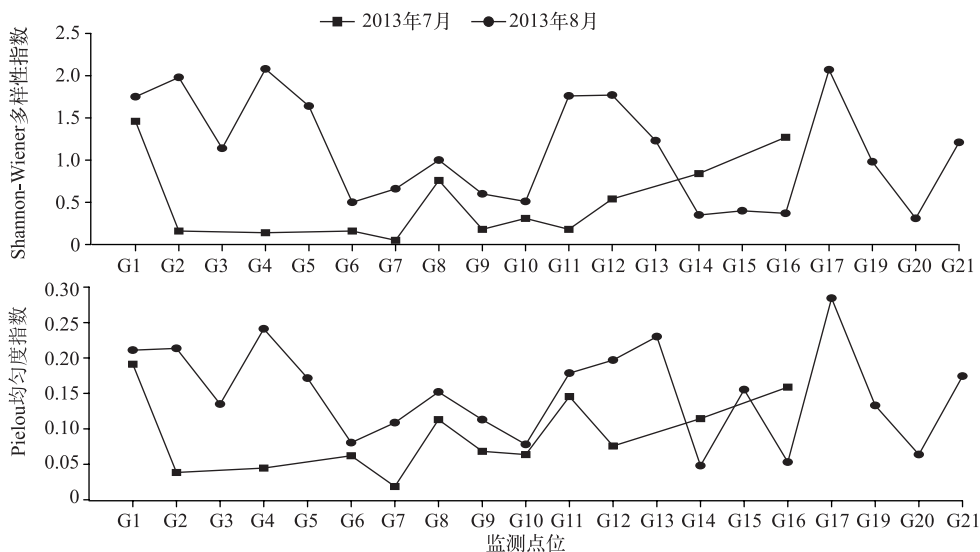


图 4 不同监测时间下藻类 Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数的变化

Fig.4 Changes of Shannon-Wiener diversity index and Pielou evenness index

2.2.2 藻类群落多样性和均匀度 利用 PRIMER-E 软件计算了两次监测的湖区浮游藻类 Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数, 变化曲线如图 4 所示.

对比可以看出, 短期调水后 (2013 年 8 月) 的 Shannon-Wiener 多样性和 Pielou 均匀度水平都高于调水前

(2013 年 7 月). 营养物质浓度高的点位 (G14~G16) 其蓝藻细胞密度大, Shannon-Wiener 多样性指数就小, 说明该水域水体浮游藻类群落的稳定性弱, 水质状况差. 望虞河入湖口区 (G1、G11、G17) 和贡湖湾湾心区 (G2~G6) 的 Shannon-Wiener 多样性和 Pielou 均匀度水平较高, 受调水影响明显, 说明短期调水后该水域的藻类物种较丰富, 各种属数量分配趋向均匀, 水环境状况较好, 这与姜宇^[20]的研究结果一致.

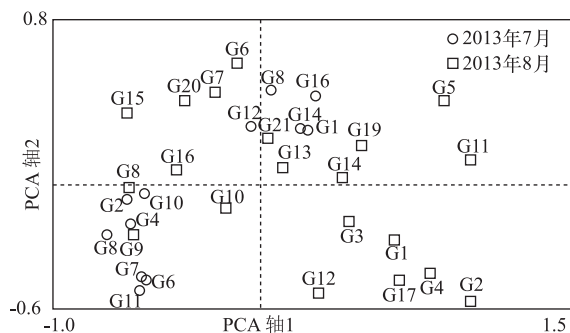


图 5 各监测点位的浮游藻类群落结构的 PCA 排序图

Fig.5 PCA ordination diagram of phytoplankton community structure at each monitoring site

2.2.3 藻类群落结构相似性分析 为了比较不同水体藻类群落结构的演替及差异性, 对藻类数据进行主成分分析, 排序结果如图 6 所示.

由图 5 可以看出, 第 1 主坐标轴的贡

献率为 29.4%,解释了藻类群落结构差异信息的29.4%,第2 主坐标轴的贡献率为 11.4%,解释了藻类群落结构差异的 11.4%,二者累积贡献率为 40.8%. 图中代表不同监测时间的藻类群落结构的样方点距离越近,反映在排序图上的样方差异性越小,则藻类群落结构越相似. 从图 5 可以直观地看出,调水前(2013 年 7 月)监测湖区藻类群落结构的空分布差异小,而调水后(2013 年 8 月)监测湖区藻类群落结构的空分布差异大. 调水前和调水后两次监测的藻类群落结构差异大.

同时,对藻类群落结构进行相似性分析,结果表明,受水湖区各监测时期均表现出显著差异($P<0.05$),也说明从整个贡湖湾监测湖区来分析,两次监测的湖区藻类群落结构有明显的差异. 另外分别对 2013 年 7 月和 8 月湾心区(G1~G7)、湖心区(G8~G10)的藻类群落结构作相似性分析,结果发现,调水前后湾心区的藻类群落结构有显著性差异($P=0.004<0.05$),而湖心区的藻类群落结构并未因调水的进行而发生明显差异($P>0.05$).

总体分析说明,夏季短期调水活动期间,贡湖湾整个湖区的藻类群落结构有明显变化,有别于非调水期,但调水未对湖心区浮游藻类群落结构产生明显影响.

2.3 藻类群落变化与环境因子的相关性分析

对短期调水后(2013 年 8 月)受水湖区浮游群落结构与水体环境因子进行排序分析,首先根据藻类群落结构除趋势对应分析(DCA)的结果,最大排序轴的长度为 1.797,故选用基于线性模型的冗余分析(RDA),并用二维排序图展示环境因子与藻类群落之间的关系(图 6).

RDA 分析结果表明,第 1 排序轴和第 2 排序轴的特征值分别为 0.286 和 0.078,种类与环境因子排序轴的相关系数为 0.956 和 0.893,藻类群落与水体环境因子相关关系的 47.1%体现在第 1 排序轴上,前两个排序轴集中了全部排序轴所能反映全部相关关系的 59.9%. 此排序分析可以较好地反映浮游藻类群落与环境因子的关系(表 2).

冗余分析手动选择的水温、DO、pH、浊度、TN、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、TP、 COD_{Mn} 9 个环境因子共解释了 60.8%的藻类物种数据,从 RDA 分析图上显示的箭头连线的长度可以看出选取的几个环境因子对浮游藻类群落都有一定程度的影响. 向量长短代表环境因子在主轴中的作用, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ ($P=0.002$) 因子的箭头连线长度较长,与藻类群落结构的相关性极显著. 其次是 COD_{Mn} 、浊度、pH、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、TP 和 TN,而温度和 DO 的连线长度较短,说明温度和 DO 在此 RDA 分析的 1、2 排序轴中作用较小,但与藻类群落仍存在相关性.

根据代表不同监测点位藻类群落的样方点与环境因子的分布情况,可以看出 RDA 排序结果与前述理化指标变化特征和浮游藻类细胞密度及群落组成比例变化相一致. 水温能影响藻类新陈代谢活动的酶活性从而影响藻类的生理活性,一定温度范围内,水温升高酶活性增强,使得藻类代谢速率加快,此次夏季短期调水后水温主要受外界环境影响,调水前

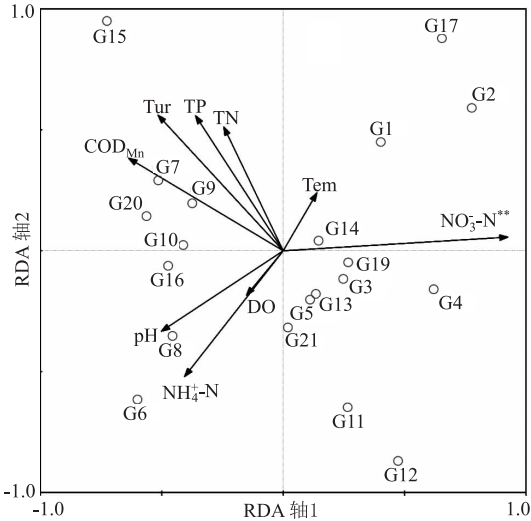


图 6 各监测点位浮游藻类群落结构与环境因子的 RDA 排序图(►代表环境因子,○代表样品,**代表极显著相关($P\leq 0.01$))

Fig.6 RDA ordination diagram of phytoplankton community structure and environmental factors at each monitoring site(►represent environmental factors, ○ represent samples, ** represent highly significant correlation)

表 2 RDA 排序结果

Tab.2 RDA sort results

项目	排序轴			
	1	2	3	4
特征值	0.286	0.078	0.065	0.062
物种—环境相关性	0.956	0.893	0.883	0.857
物种累计百分比	28.6	36.4	42.9	49.0
物种—环境关系累计百分比	47.1	59.9	70.5	80.6

后除湖心区水温略有下降外,其他监测点位水温变化不大,对浮游藻类群落结构影响较小,并非因调水引起的水温变化对浮游藻类群落造成的影响。

RDA 分析结果表明,短期调水后太湖贡湖湾湾心区的藻类群落结构与 NO_3^- -N 呈明显正相关,而湖心区的藻类群落与 NO_3^- -N 浓度呈明显负相关,受调水影响湾心区的 NO_3^- -N 浓度高于湖心区, NO_3^- -N 作为藻类容易利用的氮营养盐形态,是调水过程中影响浮游藻类群落结构的关键环境因子。

氮和磷作为浮游植物生长所必需的营养元素,被认为是淡水系统中重要的生长限制性因素。在调水过程中,贡湖湾水体 pH 值、TN、TP、 COD_{Mn} 浓度受望虞河来水的影响较为明显,这几个环境因子主要与湖心区浮游藻类群落结构呈明显正相关,同时与湾心区浮游藻类群落结构呈负相关,也是调水影响浮游藻类群落结构的主要环境因子。

在水体自净过程中,DO 浓度的增加会促进 NH_4^+ -N 不断向 NO_3^- -N 转化, NH_4^+ -N 和 DO 存在自相关,也是调水影响浮游藻类群落结构的主要环境因子。

调水后不同监测区域 TP 浓度分布与浊度基本一致,水体中的磷主要附着在沉积物上,故浊度与 TP 浓度存在着自相关,也是影响着监测区藻类群落结构的环境因子之一。

总体上看,此次监测短期调水后,太湖贡湖湾监测湖区水体的 pH、DO、 NO_3^- -N、TN、TP、 COD_{Mn} 等环境因子与浮游藻类的群落分布显著相关。此次调水过程中,望虞河来水引起了受水水体相关环境因子的变化,进而对受水湖区浮游藻类群落结构产生影响。

3 结论

1) 夏季短期调水对贡湖湾受水湖区的水质产生显著影响,受水湖区水质在短期调水后与调水前有明显差异,受来水水质影响,短期调水后监测区水体的 pH 略有下降,DO、浊度、 NO_3^- -N、TN、TP 以及 COD_{Mn} 等水体理化指标浓度均较调水前有所升高;不同水域变化特征不同,受调水影响最为显著的区域为望虞河的入湖口区、湾心区;在夏季东南风盛行的前提下,西岸带水体的各营养盐浓度相对较高,湖心区相较于其他监测区各理化指标值均较低。

2) 两次监测水体中分别检出浮游藻类 5 门 26 属(2013 年 7 月)、6 门 41 属(2013 年 8 月),其中蓝藻为绝对优势藻种,调水前后各个监测点的优势藻种属未发生变化,仍以微囊藻为主,太湖贡湖湾仍是蓝藻型湖区,但蓝藻种属比例有所下降,绿藻和硅藻等非蓝藻种属比例则有所上升。望虞河入湖口区和贡湖湾湾心区的 Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数受调水影响升高,短期调水后该水域的藻类种属数量略有增加,水环境状况相对转好。夏季短期的调水活动期间,贡湖湾整个湖区的藻类群落有明显变化,有别于非调水期,但调水未对湖心区的藻类群落结构产生明显影响。

3) RDA 分析结果表明,此次监测短期调水后,太湖贡湖湾监测湖区水体的 pH、DO、 NO_3^- -N、TN、TP、 COD_{Mn} 等环境因子与浮游藻类的群落分布显著相关,是影响受水水体中藻类群落的主要环境因子,其中 NO_3^- -N 作为藻类容易利用的氮营养盐形态,与浮游藻类群落结构变化呈极显著相关,是调水影响浮游藻类群落结构的关键环境因子。

4 参考文献

- [1] Hosper H, Meyer ML. Control of phosphorus loading and flushing as restoration methods for Lake Veluwe, the Netherlands. *Hydrobiological Bulletin*, 1986, 20(1/2): 183-194. DOI: 10.1007/BF02291162.
- [2] Welch EB, Barbiero RP, Bouchard D et al. Lake trophic state change and constant algal composition following dilution and diversion. *Ecological Engineering*, 1992, 1(3): 173-197. DOI: 10.1016/0925-8574(92)90001-1.
- [3] Cui WC. Research on ecological effect in the lower reaches of Tarim River after water transport [Dissertation]. Wulumuqi: Xinjiang Agricultural University, 2004. [崔旺诚. 塔里木河下游输水后生态效应研究[学位论文]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2004.]
- [4] Ma JL. Water quality analysis after 9 years what water diversion from Qiantang River to West Lake. *Environmental Pollution & Control*, 1996, 18(5): 31-33. [马玖兰. 西湖引流钱塘江水 9 年后的水质分析. 环境污染与防治, 1996, 18(5): 31-33.]

- [5] Shen AC. Influence of water diversion from Yangtze River to Lake Taihu through Wangyu River on water environment. *Water Resources Protection*, 2002, (1): 29-32. [沈爱春. 望虞河引江对太湖的影响研究. 水资源保护, 2002, (1): 29-32.]
- [6] Wu SQ, Fan ZW, Zhou J *et al.* Simulation of sewage detention and transfer owing to water diversion measures and its risk analysis. *Hydro-science and Engineering*, 2009, (2): 1-8. [吴时强, 范子武, 周杰等. 引江济太措施对太湖西北部湖区污水滞留和转移风险评估. 水利水运工程学报, 2009, (2): 1-8.]
- [7] Zhai SH, Guo MP. Prospect analysis on influence of water diversion from Yangtze River to Lake Taihu through Wangyu River on Lake Taihu. *Water Resources Protection*, 1996, (4): 12-15. [翟淑华, 郭孟朴. 望虞河引水对太湖影响前景分析. 水资源保护, 1996, (4): 12-15.]
- [8] Xu H, Qin BQ, Zhu GW. Nutrient Limitation of cyanobacterial growth in different regions of Lake Taihu in summer. *China Environmental Science*, 2013, 32(12): 2230-2236. [许海, 秦伯强, 朱广伟. 太湖不同湖区夏季蓝藻生长的营养盐限制研究. 中国环境科学, 2013, 32(12): 2230-2236.]
- [9] Xu H, Paerl HW, Qin B *et al.* Nitrogen and phosphorus inputs control phytoplankton growth in eutrophic Lake Taihu, China. *Limnology and Oceanography*, 2010, 55(1): 420-432. DOI: 10.4319/lo.2010.55.1.0420.
- [10] Han BP, Li YT, Lin XD *et al.* eds. Study on eutrophication status and control measures of large and medium Reservoirs in Guangdong Province. Beijing: Science Press, 2003. [韩博平, 李瑶铁, 林旭钊等. 广东省大中型水库富营养化现状与防治对策研究. 北京: 科学出版社, 2003.]
- [11] Huang J. The collection and preservation of water sample. *West-China Exploration Engineering*, 2006, 18(2): 256-257. [黄静. 水样的采集和保存. 西部探矿工程, 2006, 18(2): 256-257.]
- [12] Jin XC, Tu QY eds. Specifications for lake eutrophication survey: 2nd Edition. Beijing: China Environmental Science Press, 1990. [金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范: 第2版. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.]
- [13] He Y, Wang Z, Wei B *et al.* Dual-wavelength and double beam spectrophotometric method for the determination of nitrate nitrogen in water. *Chinese Journal of Health Laboratory Technology*, 2006, 15(9): 1135-1135. [何漪, 王钟, 魏滨等. 双波长双光束分光光度法测定水中硝酸盐氮. 中国卫生检验杂志, 2006, 15(9): 1135-1135.]
- [14] Wei FS *et al.* eds. Water and wastewater monitoring and analysis methods. Beijing: China Environmental Press, 2002. [魏复盛等. 水和废水监测分析方法. 北京: 中国环境出版社, 2002.]
- [15] Song BJ, Meng XL, Zhang YL *et al.* UV spectrophotometric method for the determination of permanganate index of water. *China Metrology*, 2009, (10): 82-83. [宋保军, 孟新立, 张艳丽等. 紫外分光光度法测定水中高锰酸盐指数. 中国计量, 2009, (10): 82-83.]
- [16] Feng QY, Chen S, Cheng Q *et al.* Research on extraction of chlorophyll a from phytoplankton by heat-ethanol method. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2012, 40(29): 14398-14399. [冯青英, 陈盛, 程麒等. 应用热乙醇法提取浮游植物中叶绿素 a 的探讨. 安徽农业科学, 2012, 40(29): 14398-14399.]
- [17] Ruan XH, Shi XD, Zhao ZH *et al.* Correlation between chlorophyll-a concentration and environmental factors in shallow lakes in plain river network areas of Suzhou. *J Lake Sci*, 2008, 20(5): 556-562. DOI: 10.18307/2008.0502. [阮晓红, 石晓丹, 赵振华等. 苏州平原河网区浅水湖泊叶绿素 a 与环境因子的相关关系. 湖泊科学, 2008, 20(5): 556-562.]
- [18] Lü XY. Influence of water diversion on the growth of dominant eutrophic algae in Lake Taihu [Dissertation]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2012. [吕学研. 调水引流对太湖富营养化优势藻的生长影响研究[学位论文]. 南京: 南京水利科学研究院, 2012.]
- [19] Tian C. Variation of phytoplankton community and its driving factors in Hongze Lake [Dissertation]. Jinan: Shandong University, 2015. [田昌. 洪泽湖浮游植物种群结构变化的水环境驱动因子分析[学位论文]. 济南: 山东大学, 2015.]
- [20] Jiang Y. Influence of water diversion from Yangtze River to Lake Taihu on water quality and algae in water source location [Dissertation]. Shanghai: Fudan University, 2013. [姜宇. 引江济太对太湖水源地水质及藻类影响研究[学位论文]. 上海: 复旦大学, 2013.]