

后官湖浮游生物群落结构特征及其环境驱动因子

饶科¹, 郭雯淇², 汪平²

(1. 湖南师范大学生命科学学院 省部共建淡水鱼类发育生物学国家重点实验室, 湖南长沙 410081;

2. 湖北省武汉市水文水资源勘测局, 湖北武汉 430074)

摘要: 为了解武汉后官湖国家湿地公园水生态环境现状, 于 2020 年 1–12 月对后官湖的水质、浮游植物和浮游动物进行了监测, 并基于综合营养状态指数、生物多样性指数对后官湖水环境进行了评价, 使用 Spearman 相关分析以及冗余分析(RDA)探究环境因子对浮游植物群落的影响。结果表明, 后官湖西部湖区的总磷和高锰酸盐指数最高, 年均浓度分别达到了 0.11 mg/L 和 5.37 mg/L, 是后官湖的主要污染来源。综合营养状态指数为 29.15–46.97, 属于中营养状态; 浮游植物 Shannon–Weaver 指数和 Pielou 指数分别为 1.12–1.89、0.38–0.72, 显示后官湖总体上为轻度污染到中度污染状态。调查期间共检出浮游植物 7 门, 54 属, 其中 1 月和 4 月主要以绿藻门和隐藻门占优势, 5–12 月则以蓝藻门占优势。5 月、9–10 月桡足类在浮游动物群落中占优势, 其他月份则是轮虫类占优势。相比于 2017–2019 年, 2020 年后官湖的营养状态水平和浮游植物丰度出现了明显下降, 大型浮游动物在群落中的比例则明显上升。Spearman 相关分析和冗余分析表明, 影响后官湖浮游植物群落的主要环境因子为水温、透明度和浮游动物丰度。后官湖环境管理的不断加强和新冠疫情导致的流域内人类活动减弱, 可能是 2020 年后官湖水生态环境质量明显提升的原因。

关键词: 环境因子; 浮游植物; 浮游动物; 后官湖

中图分类号: X820

文献标志码: A

文章编号: 1674–3075(2022)04–0023–07

作为水生态系统中重要的初级生产者, 浮游植物与各种环境因子联系紧密; 同时, 浮游植物生命周期短、生长繁殖迅速, 能够快速对环境压力做出响应。因此, 浮游植物群落演替和种群分布的变化可以很好地反映水体, 特别是湖泊与水库等封闭缓流型水体的环境状况及营养状态(Carvalho et al, 2013; 冯佳等, 2016)。有研究表明, 温度、营养盐(特别是氮磷)、水文情势、气候条件、浮游动物、鱼类均可以对浮游植物的群落结构特征和生物量变化产生深刻影响(卡尔夫, 2011; 秦伯强等, 2011)。然而, 对于某一特定水体而言, 浮游植物群落与环境因子的关系需要具体研究(Reynolds, 2006)。

后官湖位于湖北省武汉市蔡甸区和汉阳区, 流域面积 360.1 km², 水域面积 34.1 km², 平均水深 2.43 m, 是武汉市重要的国家湿地公园以及湖景绿岛。近年来, 随着武汉市社会经济的快速发展, 其富营养化进程总体呈现出不断加快的趋势。根据 2012–2019 年《武汉市水资源公报》, 后官湖水质从 2012 年地表水Ⅲ类恶化至 2019 年的地表水Ⅳ类, 营养状态则从中营养

转化至轻度富营养。目前对后官湖的研究多集中在营养状态评价或藻类分布的单项分析, 对浮游植物群落结构及其环境驱动因子的相互作用, 特别是浮游动物对浮游植物的作用还鲜有研究(孙沿等, 2018; 杨水化等, 2020); 此外, 火神山医院毗邻后官湖, 2020 年的新冠肺炎疫情严重影响了后官湖流域的人类活动, 后官湖流域农业和渔业活动在冬季和初春减弱甚至停止。因此, 研究 2020 年后官湖水生态环境变化, 对考察人类活动减弱情况下浅水湖泊水生态环境的恢复具有重要的理论和实践意义。

本研究于 2020 年对后官湖 4 个子湖和出湖河流的水质、浮游植物群落、浮游动物群落进行了全面监测, 识别了水质和浮游生物群落的时空分布特征, 使用综合营养状态指数和多样性指数评价其水生态环境状况, 应用非参数 Spearman 相关分析和冗余分析, 探究影响浮游植物群落的环境驱动因子。通过对比历史数据和相关文献, 分析后官湖水生态环境变化的原因, 旨在为后官湖的生态状况评价和浅水湖泊保护提供数据资料和科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究地点和采样时间

后官湖自西向东由高湖、白莲湖、知音湖、天鹅湖 4 个子湖组成(图 1)。湖水汇入知音湖后, 通过打鼓渡河流出。本次调查的采样点为后官湖 4 个子湖, 即高湖(HG1)、白莲湖(HG2)、知音湖(HG3)、天鹅湖

收稿日期: 2021-02-21 修回日期: 2022-05-12

基金项目: 111 计划项目(D20007); 国家现代农业产业技术体系资助(CARS-45); 岭南现代农业项目实验室(NT2021008); 湖南省重点研发计划项目(2020NK2016)。

作者简介: 饶科, 1989 年生, 男, 博士, 工程师, 主要从事水生态环境研究。E-mail: 2016102060011@whu.edu.cn

(HG4)以及出湖河流打鼓渡河(HG5)。采样时间为2020年1-12月的每月月初,由于后官湖位于火神山医院附近,受到新冠疫情影响,2月和3月未进行采样。每个采样点均采集表层水样、浮游植物样品,湖区采样点还采集了浮游动物样品。

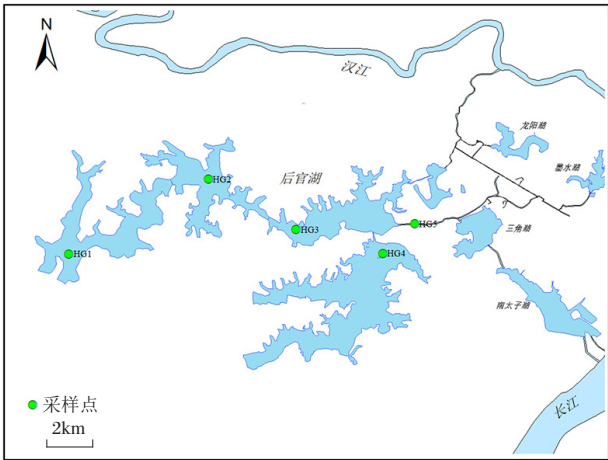


图 1 后官湖采样点位置

Fig.1 Location of the sampling sites in Houguan Lake

1.2 样本采集及分析方法

现场测定参数包括水温(WT)、溶解氧(DO)和透明度(SD),其中水温、溶解氧使用HACH溶解氧仪(型号HQ30d),透明度使用塞氏盘测定。使用2.5 L采样器在水面下0.5 m处采集水样后,将样品迅速放入冷藏箱中运输到实验室,24 h内测定水样的pH、总磷(TP)、磷酸盐(PO₄)、总氮(TN)、氨氮(NH₄)、硝酸盐氮(NO₃)、硅酸盐(SiO₂)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})和叶绿素a(Chl-a)。水质指标的测定方法均采用国家、地方或行业标准方法,每批样品在测定前均将仪器进行校准,制作标准曲线,同时通过控制加标回收率和平行偏差进行检测质量控制(国家环境保护总局,2002;陈伟民,2005)。

浮游植物及浮游动物样品采集后立即用1%的鲁哥氏碘液保存。其中,浮游植物样品经48 h沉淀浓缩至30 mL,使用光学显微镜(Nikon, E100)在0.1 mL计数室中计数并鉴定到属(胡鸿钧和魏印心,2006)。浮游动物使用25号筛绢网采集,样品沉淀浓缩后,使用光学显微镜(Nikon, E100)按照轮虫类、枝角类和桡足类鉴定计数(章宗涉和黄祥飞,1991)。

1.3 数据处理及分析

本研究使用综合营养状态指数TLI(Σ)对后官湖的营养状态进行评价,参与营养状态评价的水质参数为Chl-a、TN、TP、SD、COD_{Mn}(中华人民共和国环境保护部,2011)。计算公式如下:

TLI(j)=10(a_j+b_jlnc_{jx}) ①

W_j=r²_{ij}/∑^m_{j=1}r²_{ij} ②

TLI(Σ)=∑^m_{j=1}W_j×TLI(j) ③

式中:TLI(j)和TLI(Σ)分别是水质参数j营养状态指数和综合营养状态指数,W_j为水质参数j的相关权重。a_j、b_j是待定系数,c_{jx}是水质参数j实测值,r_{ij}为水质参数j与基准参数Chl-a的相关系数,m为评价水质参数的个数。营养状态指数为0~100的连续值;其中0~30为贫营养,30~50为中营养,50~60、60~70、70~100分别为轻度富营养、中度富营养、重度富营养。

使用Shannon-Weaver指数(H')和Pielou均匀度指数(J)对浮游植物群落多样性进行评价。浮游植物优势种通过Mcnaughton优势度指数(Y)确定。

H'=-∑^S_{i=1}(N_i/N)ln(N_i/N) ④

J=H'/lnS ⑤

Y=(N_i/N)×f_i ⑥

式中:N_i是第i个物种的丰度,N是样品总丰度,S为样品中的种类总数,f_i是第i个物种的出现频率。H'>3时水体为轻度污染或者无污染,H'为1-3时为中度污染,H'<1时为重度污染;J>0.5时水体为轻度污染或者无污染,J在0.3~0.5时为中度污染,J<0.3时为重度污染(孙沿等,2018;张佳敏等,2020)。

水质指标、浮游生物丰度、综合营养状态指数和多样性指数之间的时空差异显著性使用单因素方差分析确定。其中,空间差异由每个采样点的全年数据比较得到,时间差异则由每月全部采样点的数据比较得出。浮游植物丰度与水质参数、浮游动物丰度的相关关系使用非参数Spearman相关分析。在分析浮游植物和环境因子时,使用去趋势对应分析(Detrended correspondence analysis, DCA)确定选择线性模型或单峰模型。结果表明,最大排序轴的长度小于3,因此使用冗余分析(Redundancy analysis, RDA)探究浮游植物群落结构与环境因子(WT、DO、pH、TN、TP、PO₄、NH₄、NO₃、SiO₂、COD_{Mn}由于受到浮游植物丰度的影响而排除)的关系(刘林峰等,2018;孙文秀等,2019);另外,将轮虫类、枝角类、桡足类丰度也归入环境因子进行分析(张玮等,2017)。为获得正态分布,浮游植物和环境因子(除了pH)数据均进行ln(x+1)转换(张佳敏等,2020)。

综合营养状态指数、多样性指数及相关系数计算使用R 3.6.1,DCA和RDA使用CANOCO 5.0。

2 结果与分析

2.1 水质时空分布特征

2020年1–12月,后官湖水温为8.0~35.1℃,溶解氧为2.43~17.39 mg/L, pH在7.42~8.93,透明度为0.2~1.0 m。不同采样点的TP和TN月际变化趋势基本相似。

从时间上看,7月后官湖TP均值达到全年最大值0.124 mg/L,这可能与该月较大的地表径流有关,TN则是在12月达到全年的最大值1.67 mg/L。从空间上看(表1),后官湖湖区采样点的TP年均浓度呈现

从西到东逐渐降低的趋势。单因素方差分析表明,HG1和HG5的TP显著大于HG4($P<0.05$),HG1的 COD_{Mn} 、 SiO_2 显著大于HG4($P<0.05$)。

综合营养状态指数评价结果表明,2020年后官湖的TLI(Σ)指数最小为29.15,最大为46.97,基本在中营养范围(30~50)。单因素方差分析表明,后官湖的TLI(Σ)指数有显著的时空差异($P<0.05$,箱线图上不同字母表示分组在0.05水平上有显著性差异,图2)。从时间上来看,后官湖10月和11月的TLI(Σ)指数显著大于1月、4月、6月、8月($P<0.05$);从空间上来看,HG4的TLI(Σ)指数(均值33.7)显著小于HG2(均值39.3)($P<0.05$)。

表1 后官湖水质理化指标的空间分布

Tab.1 Water quality parameters for each section of Houguan Lake

样点	WT/℃	DO/mg·L ⁻¹	pH	TP/mg·L ⁻¹	TN/mg·L ⁻¹	COD _{Mn} /mg·L ⁻¹	PO ₄ /mg·L ⁻¹	NH ₄ /mg·L ⁻¹	NO ₃ /mg·L ⁻¹	SiO ₂ /mg·L ⁻¹	SD/m
HG1	22.2±9.1	8.2±2.6	7.9±0.2	0.11±0.05 ^a	1.07±0.28	5.37±1.17 ^a	0.05±0.05	0.48±0.46	0.26±0.24	6.4±3.1 ^a	0.49±0.29
HG2	23.1±9.2	9.7±3.2	7.9±0.4	0.08±0.02 ^{ab}	1.11±0.36	5.03±1.04 ^{ab}	0.04±0.05	0.32±0.21	0.23±0.24	4.5±2.8 ^{ab}	0.47±0.16
HG3	22.9±8.8	9.5±2.9	7.9±0.4	0.08±0.02 ^{ab}	1.06±0.40	5.25±0.92 ^{ab}	0.08±0.13	0.20±0.15	0.21±0.25	4.3±2.1 ^{ab}	0.58±0.24
HG4	22.3±8.4	7.8±1.2	7.8±0.2	0.06±0.02 ^b	0.91±0.35	4.06±0.89 ^b	0.04±0.04	0.21±0.22	0.21±0.15	3.3±1.4 ^b	0.65±0.24
HG5	23.1±8.3	8.3±3.3	7.7±0.2	0.10±0.02 ^a	1.24±0.50	4.92±0.62 ^{ab}	0.06±0.07	0.28±0.23	0.27±0.23	3.4±1.7 ^b	0.58±0.24

注:上标不同字母表明分组在0.05水平上有显著性差异。
Note: Values with different superscripts were significantly different at the level of $P<0.05$.

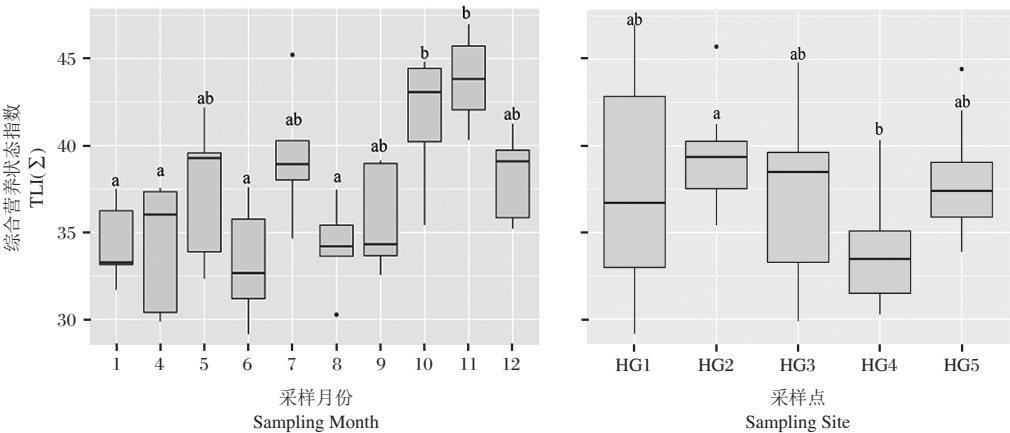


图2 后官湖综合营养状态指数的时空变化

Fig.2 Spatial and temporal dynamics of TLI(Σ) index in Houguan Lake

2.2 浮游生物群落时空变化特征

2020年1–12月后官湖共鉴定出7门、54属浮游植物。其中,绿藻门26属,蓝藻门12属,硅藻门8属,隐藻门1属,裸藻门4属,甲藻门2属,金藻门1属。优势度指数(括号内数字)表明,绿藻门的栅藻属(*Scenedesmus*,0.01),蓝藻门的平裂藻属(*Merismopedia*,0.05)、假鱼腥藻属(*Pseudanabaena*,0.06)、鱼腥藻属(*Anabaena*,0.02)、微囊藻属(*Microcystis*,0.02),隐藻门的隐藻属(*Cryptomonas*,0.01)以及硅藻门的针杆藻属(*Synechra*,0.01)是主要的优势种属。1月和4月,后官湖浮

游植物群落主要以绿藻门和隐藻门占优势,二者的丰度超过了浮游植物总丰度的60%。5月开始,蓝藻门浮游植物在群落中的比例迅速上升,从5月的48%上升到8月的92%,到年底均维持在75%以上(图3-a)。2020年后官湖浮游动物丰度变化较大,为0~1800个/L,其中,9月浮游动物丰度均值最大为694个/L,6月的浮游动物丰度均值最小,仅为13个/L。5月、9–10月桡足类在浮游动物群落中占优势,分别占到了浮游动物总丰度的55.3%、51.4%和61.1%,其他月份则主要以轮虫类在浮游动物群落中占优势(图3-b)。

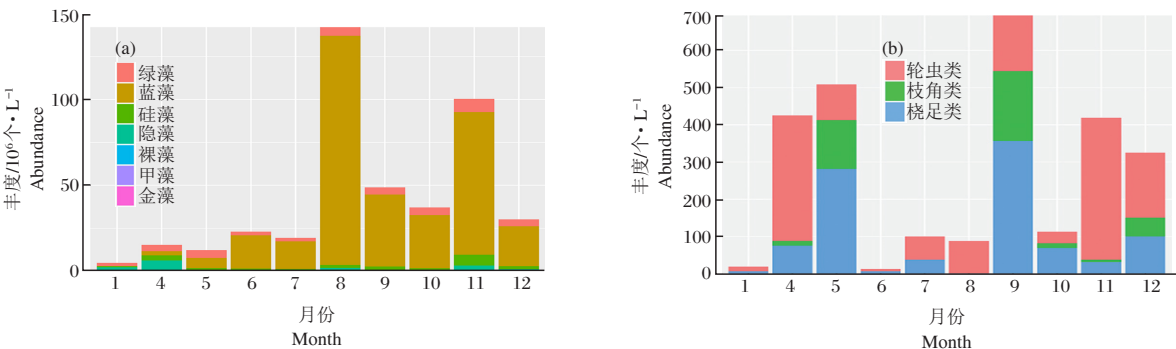


图3 后官湖浮游植物(a)和浮游动物(b)丰度的时间变化

Fig.3 Temporal changes of phytoplankton (a) and zooplankton (b) abundance in Houguan Lake

2020年后官湖浮游植物群落 Shannon–Weaver 指数(H')均值为1.55,月均值为1.12~1.89,表明后官湖主要处于中度污染状态。单因素方差分析表明,不同月份和采样点间 Shannon–Weaver 指数差异不显著($P>0.05$);浮游植物群落 Pielou 指数(J)均值为0.59,月均值为0.38~0.72,属于轻度污染到中度污染(熊莲等,2016;刘林峰等,2018),单因素方差分析表明,浮游植物群落的 Pielou 指数也没有显著的时间和空间差异($P>0.05$)。

2.3 浮游植物群落与环境因子的关系

Spearman 相关分析结果表明(表2),绿藻门丰度与透明度显著负相关,与轮虫类丰度显著正相关;蓝藻门丰度与水温、pH、氨氮显著正相关,与透明度和桡足类丰度显著负相关;硅藻门丰度与溶解氧、高锰酸盐指数、轮虫类丰度显著正相关;隐藻门丰度与水温、pH、磷酸盐和枝角类丰度显著负相关,与溶解氧显著正相关;裸藻门丰度与溶解氧、轮虫类丰度显著正相关;甲藻门丰度与溶解氧显著正相关。

冗余分析表明,主成分轴1和轴2的特征值分别为0.373和0.131,两轴共解释了50.42%的浮游植物各门丰度变化(图4)。主成分轴1和轴2与环境因子的相关性分别为80.9%和81.8%,两轴累计变化率达

到了89.8%,这说明主成分轴1和轴2与环境因子相关性高。基于RDA蒙特卡罗检验前向选择检验的结果表明,水温、透明度和轮虫类丰度对浮游植物丰度变化有显著影响,3个变量分别解释了21.2%、5.5%和11.4%。其中,水温与蓝藻门丰度正相关,与其他门丰度的相关性较小,透明度与蓝藻门丰度负相关,轮虫类丰度与各门浮游植物均为正相关。

3 讨论

3.1 后官湖水质时空变化的原因

杨水化等(2020)分析了2016年后官湖的主要污染负荷来源,发现COD和氨氮主要来自于点源污染,而总磷则主要来自于农业种植和水产养殖的面源污染。本次调查发现,后官湖营养盐浓度呈现出明显的空间分布规律。西部的子湖高湖(HG1)和东部的出湖河流打鼓渡河(HG5)最大,中间白莲湖(HG2)和知音湖(HG3)其次,天鹅湖(HG4)最小(表1)。后官湖西部位于蔡甸区,主要土地利用类型为农田,而东部主要位于汉阳区,主要土地利用类型为城镇建筑。因此,后官湖受到来自于湖泊西部的农业面源污染和来自于湖泊东部的城镇生活污水污染的影响。天鹅湖因为仅和知音湖通过渠道相连,其位置相对独立,

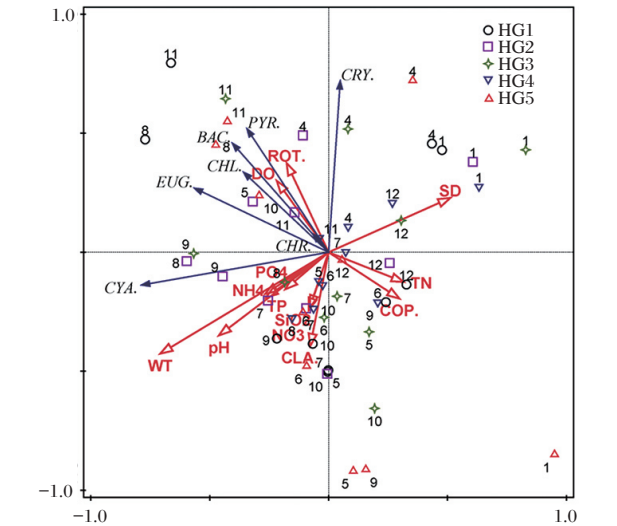
表2 浮游植物丰度与环境因子的Spearman相关分析

Tab.2 Spearman correlation analysis between phytoplankton and environmental factors

浮游植物	WT	DO	pH	COD _{Mn}	TP	PO ₄	TN	NH ₄	NO ₃	SiO ₂	SD	轮虫类	枝角类	桡足类
绿藻门	0.04	0.31	0.16	0.40	0.22	-0.15	0.05	0.25	0.12	0.04	-0.37*	0.39*	0.15	0.00
蓝藻门	0.49**	0.24	0.41**	0.14	0.17	0.00	-0.19	0.33*	0.18	0.11	-0.48**	0.08	-0.06	-0.35*
硅藻门	-0.04	0.38**	-0.04	0.28*	-0.04	-0.12	-0.03	0.21	0.00	-0.24	-0.24	0.43**	0.08	-0.08
隐藻门	-0.32*	0.41**	-0.29*	0.08	-0.26	-0.37**	-0.06	-0.06	-0.07	-0.07	0.14	0.29	-0.38*	-0.19
裸藻门	0.24	0.30*	0.15	0.10	0.08	-0.25	-0.20	0.14	0.01	-0.02	-0.26	0.36*	-0.03	-0.07
甲藻门	0.00	0.52**	0.10	0.07	-0.08	-0.22	-0.23	0.10	-0.07	-0.05	-0.05	0.29	-0.08	-0.18
金藻门	-0.10	0.18	-0.04	0.21	-0.02	0.11	0.17	0.05	0.10	-0.13	-0.25	0.28	-0.13	0.01

注:*表示相关系数在0.05水平上显著,**表示相关系数在0.01水平上显著。
Note: * indicates significant correlation at the level of 0.05, ** indicates significant correlation at the level of 0.01.

所以受到的污染程度最小,营养状态指数最低;此外,导致后官湖10月、11月营养状态指数年度最高的原因可能是10月疫情后,后官湖渔业生产逐渐恢复,湖泊受人类影响逐渐增加,同时光照、温度和营养盐等条件在此时间段均适宜浮游植物生长繁殖,进一步增加了水体的高锰酸盐指数浓度,降低了水体的透明度,最终导致较高的营养状态水平。



CHL:绿藻, CYA:蓝藻, BAC:硅藻, CRY:隐藻, EUG:裸藻, PYR:甲藻, CHR:金藻; ROT:轮虫类, CLA:枝角类; COP:桡足类; 样本上方为采样月份,不同采样点符号如图例所示

图4 后官湖浮游植物、环境因子与采样点的冗余分析

CHL:Chlorophyta, CYA:Cyanophyta, BAC:Bacillariophyta, CRY:Cryptophyta, EUG:Euglenophyta, PYR: Pyrroptata, CRH: Chrysophyta; ROT: Rotifers, CLA: Cladoceras, COP: Copepods; Numbers mean different sampling months, and the symbols of different sampling sites were shown in the legend

Fig.4 Triplot of redundancy analysis between phytoplankton, environmental factors and sampling sites in Houguan Lake

相比于本课题组前期(2017–2019年)的监测数据,后官湖2020年的营养状态出现了明显的下降,湖泊从轻度富营养化下降为中营养;同时,2017–2019年的TP、TN年均浓度分别为0.11、1.35 mg/L,2020年分别下降到了0.09、1.08 mg/L。导致后官湖2020年环境状况明显提升的原因,首先是自2017年开始,政府积极对后官湖的潜在污染源进行了整治。例如,政府投资对受到城镇居民生活污水污染的打鼓渡河(HG5)进行了集中整治与截污,HG5的NH₄、COD_{Mn}、TN的年均值从2017–2019年的0.95、5.47、2.28 mg/L分别下降到了2020年的0.28、4.92、1.24 mg/L(表1);同时,监管部门也通过安装监控、巡湖等措施规范了后官湖流域的农业、渔业活动。其次是后官湖毗邻

火神山医院,2020年的新冠肺炎疫情在一定程度上可能减弱了流域人类活动的影响。

3.2 环境因子及浮游动物对浮游植物影响显著

在后官湖浮游植物群落中,占据优势的隐藻(β-中污染)、鱼腥藻(P-中污染)、伪鱼腥藻(β-中污染)、针杆藻(β-中污染)、微囊藻(β-中污染)均是富营养化的指示种属(熊莲等,2016;彭凯等,2018)。本研究中,Shannon–Weaver指数和Pielou指数表明,后官湖处于轻度污染到中度污染状态,这一结果与2017年的评价结果相似(孙沿等,2018)。本次调查发现,后官湖的浮游植物年平均丰度从2017–2019年的5 626万~6 785万个/L降至2020年的4 325万个/L。虽然2020年后官湖的营养水平和浮游植物丰度有了明显的下降,但浮游植物群落的多样性依然比较稳定。有研究表明,浮游植物群落中不同物种间的相互作用会使群落结构对环境的变化有一定的抵抗性和恢复性,只有当营养水平下降到足以克服群落恢复性时,群落结构才会发生明显变化(Jochimsen et al, 2013; Yang et al, 2017)。

作为水体初级消费者,浮游动物在水生态系统的物质循环和能量循环中扮演者重要角色。后官湖浮游动物丰度和群落结构相比于浮游植物的变化更大(图3),这可能是由于浮游动物受到上行作用和下行作用的双重影响造成的(卡尔夫,2011)。研究表明,随着水体营养水平的提高,浮游动物群落会由大型浮游动物向小型浮游动物转变,大多数受污染水体中浮游动物群落主要是轮虫类占优势(陈红等,2019)。与这些结果相似,本研究中轮虫类在富营养化程度最高的HG2中具有最大比例(79%),在富营养化程度最低的HG4中比例最小(35%);此外,2020年桡足类丰度在浮游动物总丰度中的比例有明显的上升,HG1、HG3的桡足类比例达到了33%左右,HG4更是达到了56%,而本课题组2017–2019年的监测数据表明,HG1–HG3桡足类在浮游动物群落中的年均占比仅18%左右,HG4也仅为33%。除了后官湖整体营养水平下降带来的影响外,养殖管理的加强和新冠疫情期间渔业活动下降导致鱼类对浮游动物下行作用的减弱,也可能是2020年后官湖桡足类比例上升的原因。鲢、鳙是后官湖的主要放养品种,其滤食作用会大量减少大型浮游动物的丰度(汪梦琪等,2018);此外,研究表明轮虫类对浮游植物的牧食效率远低于桡足类和枝角类(Liu et al, 2014),因此2020年后官湖大型浮游动物比例上升可能是浮游动物对浮游植物群落产生显著性影响的原因(表2,图4)。

3.3 水温和透明度显著影响后官湖浮游植物丰度

Spearman 相关分析和 RDA 结果表明,水温和透明度对浮游植物丰度有显著影响,这一结果与熊莲等(2016)在安徽太平湖的研究结果相似。水温是推动浮游植物群落演替的重要驱动因子。有研究认为高温有利于蓝藻生长繁殖,进而导致蓝藻水华暴发(Paerl & Huisman, 2008);相反,隐藻则多在温度较低的冬季和春季占优势(Reynolds, 2006; Rao et al, 2018)。水体透明度受到浊度、悬浮物、叶绿素 a 的直接影响以及 pH 和氮磷比的间接影响,透明度的高低可以直接影响水生生态系统的初级生产力(张晓晶等, 2009);此外,营养盐(特别是氮和磷)也是影响浮游植物生长繁殖重要的环境因子(秦伯强等, 2011)。然而,本研究中,无论是非参数 Spearman 相关分析还是 RDA 结果均表明, TN 和 TP 对浮游植物丰度和群落结构没有显著性影响(表 2, 图 4)。可能是因为尽管 2020 年后官湖的氮磷浓度相比于往年有所下降,但水体的氮磷浓度仍然处于较高水平所致。

参考文献

- 陈红,刘清,潘建雄,等,2019. 灞河城市段浮游生物群落结构时空变化及其与环境因子的关系[J]. 生态学报,39(1):173–184.
- 陈伟民,2005. 湖泊生态系统观测方法[M]. 北京:中国环境科学出版社.
- 冯佳,郭宇宁,王飞,等,2016. 太原汾河景区浮游植物群落结构及其与环境因子关系分析[J]. 环境科学,37(4):1353–1361.
- 国家环境保护总局,2002. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京:中国环境科学出版社.
- 胡鸿钧,魏印心,2006. 中国淡水藻类——系统、分类及生态[M]. 北京:科学出版社.
- 卡尔夫,2011. 湖泊学:内陆水生态系统[M]. 古滨河,刘正文,李宽意,等译. 北京:高等教育出版社.
- 刘林峰,周先华,高健,等,2018. 神农架大九湖湿地浮游植物群落结构特征及营养状态评价[J]. 湖泊科学,30(2):417–430.
- 彭凯,李太民,刘利,等,2018. 苏北骆马湖浮游植物群落结构及其水质生物评价[J]. 湖泊科学,30(1):183–191.
- 秦伯强,许海,董百丽,2011. 富营养化湖泊治理的理论与实践[M]. 北京:高等教育出版社.
- 孙文秀,武道吉,裴海燕,等,2019. 山东某新建水库浮游藻类的群落结构特征及其环境驱动因子[J]. 湖泊科学,31(3):734–745.
- 孙沿,蔡芸,王亚飞,2018. 武汉市后官湖浮游植物群落特征分析[J]. 中国资源综合利用,36(7):5–7.

- 汪梦琪,汪金成,王琪,等,2018. 洞庭湖区平水期浮游生物群落结构特征及富营养化现状[J]. 生态学杂志,37(8):2418–2429.
- 熊莲,刘冬燕,王俊莉,等,2016. 安徽太平湖浮游植物群落结构[J]. 湖泊科学,28(5):1066–1077.
- 杨水化,彭正洪,焦洪赞,等,2020. 城市富营养化湖泊的外源污染负荷与贡献解析——以武汉市后官湖为例[J]. 湖泊科学,32(4):941–951.
- 张佳敏,高健,杨诚,等,2020. 以鲢、鳙养殖为主的长江中下游武山湖浮游植物群落结构特征[J]. 湖泊科学,32(6):1771–1783.
- 张玮,赵凤斌,徐后涛,等,2017. 松雅湖成湖初期夏季浮游植物群落及其与环境因子的关系[J]. 生物学杂志,34(3):47–52.
- 张晓晶,李畅游,贾克力,等,2009. 乌梁素海水体透明度分布及影响因子相关分析[J]. 湖泊科学,21(6):879–884.
- 章宗涉,黄祥飞,1991. 淡水浮游生物研究方法[M]. 北京:科学出版社.
- 中华人民共和国环境保护部,2011. 关于印发《地表水环境质量评价办法(试行)》的通知[EB/OL]. http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/bgt/201104/t20110401_208364.htm.
- Carvalho L, McDonald C, De Hoyos C, et al, 2013. Sustaining recreational quality of European lakes: Minimizing the health risks from algal blooms through phosphorus control[J]. Journal of Applied Ecology, 50(2):315–323.
- Jochimsen M C, Kümmerlin R, Straile D, 2013. Compensatory dynamics and the stability of phytoplankton biomass during four decades of eutrophication and oligotrophication[J]. Ecology Letters, 16(1): 81–89.
- Liu Z W, Zhong P, Zhang X, et al, 2014. Successful restoration of a tropical shallow eutrophic lake: strong bottom-up but weak top-down effects recorded[J]. Water Research, 146: 88–97.
- Paerl H W, Huisman J, 2008. Blooms Like It Hot[J]. Science, 320:57–58.
- Rao K, Zhang X, Yi X J, et al, 2018. Interactive effects of environmental factors on phytoplankton communities and benthic nutrient interactions in a shallow lake and adjoining rivers in China[J]. Science of The Total Environment, 619/620:1661–1672.
- Reynolds C S, 2006. The ecology of phytoplankton[M]. Cambridge:Cambridge University Press.
- Yang J R, Lv H, Isabwe A, et al, 2017. Disturbance-induced phytoplankton regime shifts and recovery of cyanobacteria dominance in two subtropical reservoirs[J]. Water Research, 120: 52–63.

(责任编辑 万月华)

Characteristics of the Plankton Community and Driving Environmental Factors in Houguan Lake

RAO Ke¹, GUO Wen-qi², WANG Ping²

(1. State Key Laboratory of Developmental Biology of Freshwater Fish, College of Life Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410081, P.R. China;

2. Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Wuhan City, Wuhan 430074, P.R. China)

Abstract: In this study, monthly data were collected on water quality, phytoplankton and zooplankton in the National Wetland Park of Houguan Lake from January to December 2020. Then, the current aquatic environmental condition of Houguan Lake was evaluated based on the data collected using the comprehensive trophic level index TLI(Σ) and biodiversity indices. The influences of environmental factors on the phytoplankton community were analyzed by Spearman's correlation analysis and redundancy analysis (RDA). The aim was to provide data and scientific evidence to support ecological evaluation of Houguan Lake and shallow lake conservation. Houguan Lake consists of four sub-lakes (HG1: Gaohu Lake; HG2: Bailian Lake; HG3: Zhiyin Lake; HG4: Tian'e Lake) and an outflow river (HG5: Dagudu River). Water samples were collected in each section and the outflow river for determination of water quality parameters, phytoplankton and zooplankton each month except February and March (due to the COVID-19 pandemic). The concentration of total phosphorus and COD_{Mn} were highest in the western lake (HG1), with respective average annual values of 0.11 mg/L and 5.37 mg/L. The comprehensive trophic level index of Houguan Lake ranged from 29.15 to 46.97, indicating a mesotrophic condition. The ranges of the Shannon-Weaver diversity and Pielou evenness indices of the phytoplankton community were, respectively, 1.12–1.89 and 0.38–0.72, indicating light to medium pollution. A total of 54 phytoplankton genera from 7 families were identified during the investigation, dominated by Chlorophyta and Cryptophyta in January and April, and Cyanophyta from May to December. Copepods dominated the zooplankton community in May, September, and October, while rotifers dominated the community in other months. Compared with data from 2017 to 2019, the trophic level and phytoplankton abundance of Houguan Lake significantly decreased in 2020, while the proportion of macrozooplankton in the zooplankton community significantly increased. Spearman correlation analysis and redundancy analysis showed that the main driving factors affecting the phytoplankton community of Houguan Lake were water temperature, transparency, and zooplankton abundance. Strengthening of environmental management and reduced human activity in the catchment due to COVID-19 could explain the environmental quality improvement in Houguan Lake in 2020.

Key words: environmental factors; phytoplankton; zooplankton; Houguan Lake