

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2015.05.009

扬州境内湖泊浮游植物群落结构及其与环境因子的关系

吴小伟, 刘平

(江苏省水文水资源勘测局扬州分局, 江苏 扬州 225002)

摘要: 2013年5月—2014年5月对扬州境内3个湖泊(高邮湖、邵伯湖和宝应湖)的浮游植物群落组成与水环境因子进行监测,运用相关系数法和典范对应分析(CCA)法分析了浮游植物群落结构与环境因子之间的关系。结果表明:3个湖泊的群落组成均主要以硅藻、绿藻为主要优势种群,群落结构的季节变化趋势较为相似;水温、N、P是影响3个湖泊浮游植物数量的主要环境因子;CCA分析结果表明,水温和TN是影响高邮湖浮游植物群落分布的主要环境因子,NH₄⁺-N、TP和pH是影响邵伯湖浮游植物群落分布的主要环境因子,COD_{Mn}、NH₄⁺-N和TP是影响宝应湖浮游植物群落分布的主要环境因子。

关键词: 浮游植物群落;环境因子;相关系数法;典范对应分析;高邮湖;邵伯湖;宝应湖

中图分类号: X173 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2015)05-0047-06

Phytoplankton community structure and its relationship with environmental factors in lakes in Yangzhou

WU Xiaowei, LIU Ping

(Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Yangzhou 225002, China)

Abstract: The phytoplankton community and water environmental factors in three lakes (Gaoyou Lake, Shaobo Lake and Baoying Lake) in Yangzhou City were monitored since May 2013 till May 2014. The relationship between the variations of phytoplankton and environmental factors was analyzed using the correlation coefficient method and canonical correspondence analysis (CCA). The results show that the phytoplankton community was dominated by *Chlorophyta* and *Diatom* in three lakes; temporal variability of phytoplankton species composition and Temporal variation in abundance of phytoplankton community were similar in the three lakes; water temperature, nitrogen and phosphorus were the main environmental factors influencing the phytoplankton abundance in the three lakes; according to the CCA, the main environmental factors which influence the distribution of the phytoplankton community are water temperature and total nitrogen in Gaoyou Lake, pH, NH₄⁺-N and total phosphorus in Shaobo Lake, potassium permanganate index, NH₄⁺-N and total phosphorus in Baoying Lake.

Key words: phytoplankton community; environmental factors; correlation coefficient method; canonical correspondence analysis (CCA); Gaoyou Lake; Shaobo Lake; Baoying Lake

浮游植物的种类组成和分布对环境变化具有指示作用,环境条件的变化也能直接或间接地影响浮游植物的群落结构^[1]。近几年,国内许多科研人员对不同区域湖泊(太湖、巢湖、白洋淀、上海淀山湖、湖北洪湖、宁夏沙湖等^[2-11])中的浮游植物与环境因

子的关系开展了研究,取得了颇多成果。但是关于扬州境内湖泊浮游植物的群落结构及其与环境因子变化还鲜有报道。

笔者通过对扬州市境内高邮湖、邵伯湖和宝应湖3个湖泊中浮游植物群落和环境因子的调查和测

定,运用相关关系分析和典范对应分析(canonical correspondence analysis, CCA)等统计学方法,探讨浮游植物群落分布与环境因子之间的关系,剖析影响浮游植物群落分布的主要环境因子,为扬州湖泊水质改善及其生态修复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 调查区概况

高邮湖地处苏皖交界,北与洪泽湖水系相连接,南与长江水系相连通,东临江苏高邮,西接安徽天长,湖区主属江苏省,是江苏省第三大湖,属浅水型湖泊,水域总面积为 760.67 km²,在扬州市高邮境内水域面积 392.82 km²。邵伯湖属淮河下游地区入江水道水系,为浅水湖泊,面积 146 km²,主要承泄淮河水,是淮水入江的主要通道,以新民滩控制线为界,以上为高邮湖,以下为邵伯湖,行洪期间两湖连为一片,行洪后期利用控制线上的漫水闸控制高邮湖蓄水。宝应湖属淮河流域入江水道水系,为草型浅水湖泊,面积为 38.69 km²。

1.2 采样点和采样时间

根据各个湖泊特征,设置不同的采样点,见图 1。高邮湖设置了 4 个采样点,分别为界首(G1)、马棚(G2)、水位站(G3)和郭集(G4);邵伯湖设置了 4 个采样点,分别为送桥(S1)、公道(S2)、陶庄(S3)和六闸(S4);宝应湖设置了 3 个采样点,分别为刘堡(B1)、华家庄(B2)和退水闸(B3)。采样时间为 2013 年 5 月、8 月、11 月和 2014 年 2 月、5 月。

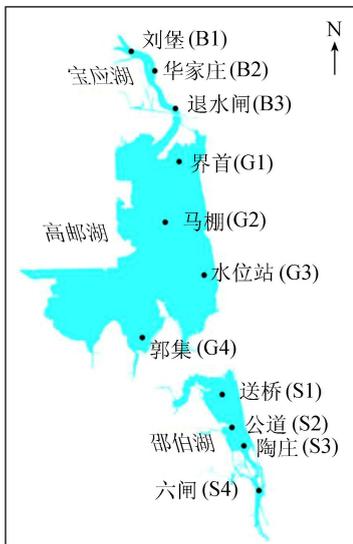


图 1 湖泊采样点示意图

1.3 浮游植物的采集与鉴定

采集水体表层 0.5 m 处 1 L 水样,加鲁哥试剂固定,静置沉淀 48 h 后浓缩至 30 mL。取 0.1 mL 样品放入浮游植物计数框内镜检,进行分类鉴别,并计算

出浮游植物细胞个数^[12-15]。

1.4 水体理化指标的测定

环境因子的取样测定与浮游植物样品的采集同步进行,水温、DO、透明度现场测定,其余指标主要参考《水和废水监测分析方法》(第四版)执行^[16]。其中 pH 采用玻璃电极法, NH₄⁺-N 采用纳氏试剂分光光度法, COD_{Mn} 采用酸性高锰酸钾法, TN 采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法, TP 采用钼酸铵分光光度法。

1.5 数据分析

浮游植物数量与环境因子的相关性采用 SPSS17.0 进行分析;应用 CANOCO4.5 进行典范对应分析(CCA),将浮游植物数量进行 lg(X+1)转换,各环境因子也都进行标准化处理。

多样性分析用香农-威纳(Shannon-Wiener index)多样性指数 H' 和 Pielou 均匀度指数 J 。

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \log_2 P_i \quad (1)$$

其中

$$P_i = N_i/N$$

$$J = H'/\log_2 S \quad (2)$$

式中: P_i 为站位中第 i 种浮游植物占站位中总浮游植物的比例; N_i 为站位中第 i 种浮游植物的个数; N 为站位中浮游植物总个数; S 为站位中浮游植物总种数。

2 结果与讨论

2.1 浮游植物种类组成

2013 年 5 月至 2014 年 5 月,高邮湖共检出浮游植物 8 门 71 属 153 种,邵伯湖共检出浮游植物 8 门 61 属 136 种,宝应湖共检出浮游植物 8 门 66 属 156 种。表 1 列出了 3 个湖泊浮游植物种类组成。3 个湖泊浮游植物均主要以绿藻、硅藻、蓝藻和裸藻为主,其中绿藻最多,硅藻次之,为湖泊中的主要优势种群。

表 1 3 个湖泊浮游植物种类组成

藻类名称	高邮湖		邵伯湖		宝应湖	
	种数量	百分率%	种数量	百分率%	种数量	百分率%
绿藻	62	40.5	62	45.6	69	44.2
硅藻	35	22.9	28	20.6	34	21.8
蓝藻	22	14.4	18	13.2	21	13.5
裸藻	21	13.7	17	12.5	20	12.8
隐藻	4	2.6	4	2.9	4	2.6
黄藻	3	2.0	3	2.2	3	1.9
甲藻	2	1.3	3	2.2	2	1.3
金藻	4	2.6	1	0.7	3	1.9

高邮湖水体中绿藻主要由小球藻属、四角藻属、纤维藻属、月牙藻属、卵囊藻属、栅藻属和弓形藻属组成,硅藻主要由直链藻属、小环藻属、脆杆藻属、舟形藻属、菱形藻属和肋缝藻属组成,蓝藻主要由鱼腥藻属、伪鱼腥藻属、平裂藻属和颤藻属组成,裸藻主要

表2 2013年5月—2014年5月3个湖泊

浮游植物数量及生物量

时间	高邮湖		邵伯湖		宝应湖	
	数量/ (万 cells · L ⁻¹)	生物量/ (mg · L ⁻¹)	数量/ (万 cells · L ⁻¹)	生物量/ (mg · L ⁻¹)	数量/ (万 cells · L ⁻¹)	生物量/ (mg · L ⁻¹)
2013-05	574.50	4.37	500.00	4.03	227.00	1.68
2013-08	670.25	6.26	603.25	5.88	295.00	2.33
2013-11	517.50	4.01	523.00	4.33	223.00	1.48
2014-02	500.00	4.22	504.00	4.08	303.00	1.60
2014-05	540.00	4.14	495.00	4.00	200.00	1.55

生物量较多的优势种有颗粒直链藻、岛直链藻、尖针杆藻。邵伯湖水体中细胞丰度较多的优势种有小球藻、尖尾蓝隐藻、卷曲纤维藻、菱形肋缝藻;生物量较多的优势种有小环藻、尖尾蓝隐藻、巨颤藻。宝应湖水体中细胞丰度较多的优势种有尖尾蓝隐藻、小球藻、小形色球藻、栅藻;生物量较多的优势种有双头针杆藻、反曲隐藻、尖尾蓝隐藻。

2.3 浮游植物群落的多样性分析

2013年5月—2014年5月,3个湖泊浮游植物的香农-威纳多样性指数和 Pielou 均匀度指数变化情况见图2。由图2可见,3个湖泊浮游植物多样性和均匀度较好,年度变化趋势平缓,多样性指数均大于3.0,均匀度指数均大于0.7,表明群落种类组成的稳定程度及其数量分布均匀程度较高。

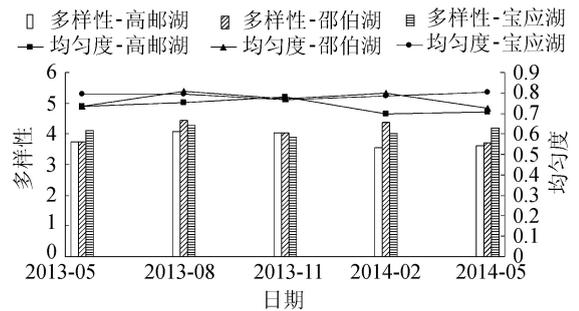


图2 多样性和均匀度的季节变化

2.4 浮游植物与水质因子相关性分析

选取了水温(T)、溶解氧(DO)、透明度(SD)、pH、氨氮(NH₄⁺-N)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、总氮(TN)、总磷(TP)共8个环境因子。采用相关系数法分析浮游植物总数量和主要优势种与各项水质理化指标之间的相关关系,分析结果见表3~5。

表3 高邮湖浮游植物优势种与水质因子的相关性分析

因子	群落	卷曲纤维藻	小环藻	湖泊伪鱼腥藻	颗粒直链藻	尖尾蓝隐藻	尖针杆藻	岛直链藻
T	0.865*	0.084	-0.737	0.916*	-0.628	0.234	-0.558	-0.640
DO	0.051	-0.521	0.541	-0.467	0.529	-0.015	0.522	0.517
SD	-0.654	-0.232	-0.733	0.237	-0.688	0.614	-0.626	-0.700
pH	0.300	0.902*	0.116	0.178	0.128	-0.621	0.182	0.116
NH ₄ ⁺ -N	0.684	-0.432	-0.319	-0.401	-0.345	0.730	-0.336	-0.357
COD _{Mn}	0.625	-0.712	-0.670	0.459	-0.589	0.715	-0.522	-0.601
TN	0.609	-0.318	-0.329	0.778	-0.317	0.047	-0.288	-0.329
TP	0.920	-0.255	0.033	-0.780	0.052	0.456	0.124	0.040

注: * 表示显著相关, $P < 0.05$ (双尾检验)。

由鳞孔藻属、扁裸藻属和囊裸藻属组成,隐藻主要由尖尾蓝隐藻和嗜蚀隐藻组成,金藻主要由北方金杯藻和分歧椎囊藻组成,黄藻主要由小型黄丝藻组成。

邵伯湖水体中绿藻主要由小球藻属、四角藻属、纤维藻属、月牙藻属、卵囊藻属、栅藻属和丝藻属组成,硅藻主要由直链藻属、小环藻属、脆杆藻属和肋缝藻属组成,蓝藻主要由颤藻属、伪鱼腥藻属和色球藻属组成,裸藻主要由鳞孔藻属、扁裸藻属和囊裸藻属组成,隐藻主要由尖尾蓝隐藻和嗜蚀隐藻组成,金藻主要由北方金杯藻组成,黄藻主要由短圆柱单胞藻和小型黄丝藻组成。

宝应湖水体中绿藻主要由小球藻属、四角藻属、月牙藻属、卵囊藻属、栅藻属和十字藻属组成,硅藻主要由直链藻属、小环藻属、脆杆藻属、舟形藻属、曲壳藻属和肋缝藻属组成,蓝藻主要由色球藻属、平裂藻属和颤藻属组成,裸藻主要由鳞孔藻属和扁裸藻属组成,隐藻主要由尖尾蓝隐藻、卵形隐藻、反曲隐藻和嗜蚀隐藻组成,甲藻主要由带多甲藻组成,金藻主要由北方金杯藻和分歧椎囊藻组成。

季节变化上来看,3个湖泊总种数量均在8月最多,2月降至最低。其中,绿藻种类变化显著,2月份绿藻最少,尤其是宝应湖绿藻减少显著;蓝藻在8月份均显著增加,随后逐渐减少,2月份至最低;硅藻和裸藻随季节变化不大;其他藻类种类及变幅均较小。每个湖泊中不同采样点的变化趋势一致,种类数量均于2月份降至最低。

2.2 浮游植物数量及生物量

2013年5月至2014年5月,3个湖泊浮游植物数量及生物量变化见表2。从表2可以看出,浮游植物细胞数量和生物量在夏季均明显增加,其他季节变化相对平缓。

从细胞数量上来看,硅藻门和绿藻门数量相当,而且全年均占有相对高的比例,为优势种群;其次为蓝藻门,仅在夏季上升为优势种群;隐藻门在冬季数量增多,变为优势种群。从生物量上来看,一年中硅藻门为绝对优势种群,占比较高;其次为绿藻门和蓝藻门。

经计算,高邮湖水体中细胞丰度较高的优势种有小环藻、卷曲纤维藻、尖尾蓝隐藻、湖泊伪鱼腥藻;

表4 邵伯湖浮游植物优势种与水质因子的相关性分析

因子	群落	小球藻	小环藻	巨颤藻	菱形肋缝藻	尖尾蓝隐藻	卷曲纤维藻
T	0.721	0.626	-0.399	0.812	-0.105	-0.336	0.455
DO	0.169	-0.113	-0.406	0.056	0.326	0.273	0.291
SD	-0.644	-0.057	0.643	-0.552	-0.362	-0.133	-0.453
pH	-0.240	0.523	-0.590	-0.004	-0.488	-0.616	0.343
NH ₄ ⁺ -N	0.960**	0.139	-0.241	0.748	-0.466	0.101	0.067
COD _{Mn}	0.498	0.790	-0.646	0.692	-0.024	0.713	0.154
TN	0.740	0.511	-0.430	0.778	-0.329	0.310	-0.014
TP	0.948*	0.356	-0.590	0.920*	-0.043	0.130	0.538

注: *表示显著相关, $P < 0.05$; **表示极显著相关, $P < 0.01$ (双尾检验)。

表5 宝应湖浮游植物优势种与水质因子的相关性分析

因子	群落总数量	小球藻	双头针杆藻	小形色球藻	反曲隐藻	尖尾蓝隐藻	四尾栅藻
T	-0.229	0.400	-0.503	0.921*	-0.208	-0.476	0.452
DO	0.688	0.136	0.334	-0.315	0.352	0.285	-0.297
SD	-0.893	-0.734	-0.060	-0.505	-0.285	-0.206	-0.407
pH	-0.613	-0.183	0.231	-0.112	-0.101	-0.358	-0.105
NH ₄ ⁺ -N	-0.118	0.471	-0.477	0.033	-0.365	0.530	0.660
COD _{Mn}	0.126	0.793	-0.385	0.772	0.091	0.413	0.277
TN	0.900*	0.905*	-0.135	0.616	0.696	0.338	0.192
TP	-0.557	0.169	-0.209	0.262	0.124	0.118	0.473

注: *表示显著相关, $P < 0.05$ (双尾检验)。

分析高邮湖浮游植物优势种与水质因子的相关性, 结果表明, 高邮湖浮游植物群落总数量与水温呈显著正相关; 优势种卷曲纤维藻数量与 pH 呈显著正相关; 湖泊伪鱼腥藻数量与水温呈显著正相关; 尖尾蓝隐藻数量与氮磷营养盐正相关; 硅藻门的 3 种优势藻与环境因子的相关关系不显著。

邵伯湖浮游植物群落总数量与 TP 呈显著正相关, 与 NH₄⁺-N 呈极显著相关, 相关系数在 0.01 水平上达 0.960; 蓝藻中的巨颤藻数量与 TP 呈显著正相关, 与水温 T 和 NH₄⁺-N 呈正相关; 小球藻和尖尾蓝隐藻与 COD_{Mn} 正相关; 菱形肋缝藻和卷曲纤维藻与环境因子相关关系均不显著。

宝应湖浮游植物群落总数量与 TN 呈显著正相关; 蓝藻中的小形色球藻数量与水温 T 呈显著正相关; 小球藻与 TN 呈显著正相关; 反曲隐藻与 TN 呈正相关; 四尾栅藻与 NH₄⁺-N 呈正相关; 双头针杆藻和尖尾蓝隐藻与环境因子的相关关系不显著。

综上所述可以看出, 3 个湖泊优势种中的几种硅藻与环境因子相关性不大, 蓝藻与温度 T 正相关, 隐藻及绿藻中的小球藻和栅藻主要与氮磷等营养盐有一定的正相关性。

2.5 浮游植物主要属(种)数量和水质因子的 CCA 排序分析

根据浮游植物出现的频度和相对密度, 高邮湖、邵伯湖和宝应湖分别选取了 21 种(属)、19 种(属)和 20 种(属)浮游植物用于 CCA 分析, 浮游植物的

代码见表 6。

表6 CCA 分析中浮游植物种类代码

代码	浮游植物种类			代码	浮游植物种类		
	高邮湖	邵伯湖	宝应湖		高邮湖	邵伯湖	宝应湖
1	小球藻属	小球藻属	小球藻属	12	菱形藻属	伪鱼腥藻属	肋缝藻属
2	纤维藻属	纤维藻属	纤维藻属	13	肋缝藻属	色球藻	色球藻属
3	月牙藻属	月牙藻属	月牙藻属	14	鱼腥藻属	颤藻属	平裂藻属
4	卵囊藻属	卵囊藻属	卵囊藻属	15	伪鱼腥藻属	鳞孔藻属	颤藻属
5	栅藻属	栅藻属	栅藻属	16	色球藻属	扁裸藻属	鳞孔藻属
6	弓形藻属	丝藻属	十字藻属	17	颤藻属	囊裸藻属	扁裸藻属
7	四角藻属	四角藻属	直链藻属	18	鳞孔藻属	蓝隐藻属	蓝隐藻属
8	直链藻属	直链藻属	小环藻属	19	扁裸藻属	隐藻属	隐藻属
9	小环藻属	小环藻属	脆杆藻属	20	蓝隐藻属		椎囊藻属
10	脆杆藻属	脆杆藻属	舟形藻属	21	隐藻属		
11	舟形藻属	肋缝藻属	曲壳藻属				

图 3~5 分别反映了高邮湖、邵伯湖和宝应湖浮游植物群落与环境因子间的关系, 从排序图上明显反映出浮游植物对环境条件的不同适应特点。3 个排序图中环境因子轴与物种排序轴之间的相关系数分别为 0.995 和 0.942、0.940 和 0.918、0.993 和 0.989; 两个物种排序轴近似垂直; 两个环境排序轴间的相关系数都为 0, 说明排序轴与环境因子间线性结合的程度较好地反映了物种与环境之间的关系, 排序结果是可靠的^[17]。

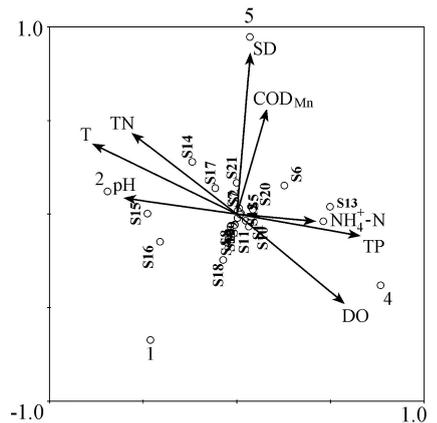


图3 高邮湖浮游植物主要属(种)与环境因子的双轴排序

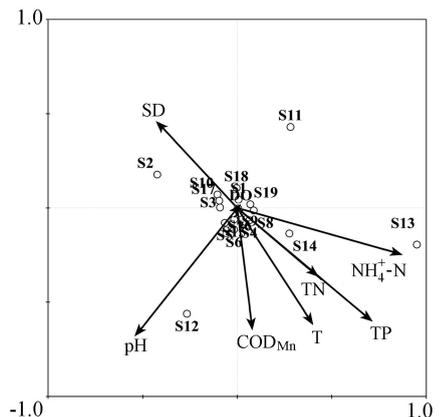


图4 邵伯湖浮游植物主要属(种)与环境因子的双轴排序

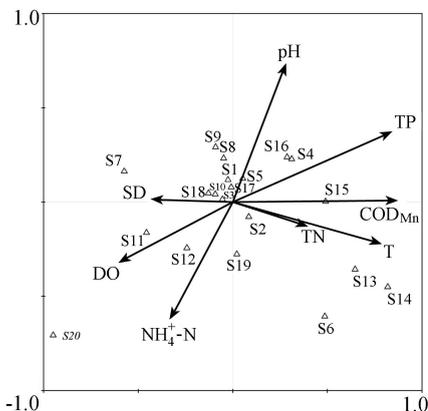


图5 宝应湖浮游植物主要属(种)与环境因子的双轴排序

由图3可见,从箭头的长短可知, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与浮游植物群落的分布的相关性不大,其余环境因子与高邮湖浮游植物群落分布均有明显的相关性,其中与水温 T 、 SD 和 TN 相关性最大。绿藻中除了弓形藻属均与 COD_{Mn} 和 SD 呈负相关外,与其他环境因子关系不明显;蓝藻中的伪鱼腥藻属和色球藻属与水温 T 和 pH 的正相关性较明显,鱼腥藻属和颤藻属与 TN 正相关性显著;尖尾蓝隐藻属和隐藻属与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 COD_{Mn} 正相关。

由图4可见,第一排序轴与 SD 和 pH 呈负相关,与其他环境因子呈正相关;第二排序轴与 SD 呈正相关,与其他环境因子呈负相关。从箭头的长短可知, DO 与邵伯湖浮游植物群落分布的相关性较小, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 TP 和 pH 与邵伯湖浮游植物群落的相关性显著。蓝藻中的色球藻属和颤藻属与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 正相关,伪鱼腥藻属与 pH 正相关明显;绿藻中的纤维藻属与 SD 正相关。

由图5可见,第一排序轴与 COD_{Mn} 呈显著正相关,与 SD 呈显著负相关。从箭头的长短可知, TN 与宝应湖浮游植物群落的相关性较小, COD_{Mn} 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TP 与宝应湖浮游植物群落相关性显著。宝应湖中大部分的藻属分布在图中左上方,与 TP 、 COD_{Mn} 和 TN 均呈负相关;绿藻中的十字藻属与水温 T 呈正相关,纤维藻属与 TN 呈正相关,卵囊藻属与 TP 呈正相关;蓝藻中的色球藻属和平裂藻属与水温 T 呈正相关,颤藻属与 COD_{Mn} 呈正相关;金藻中的椎囊藻属与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 DO 呈正相关。

2.6 浮游植物与环境因子相关性的原因探讨

扬州境内3个湖泊的浮游植物群落组成均主要以绿藻、硅藻、蓝藻为主,群落结构的季节变化规律较为相似,温度高时种类和数量均增加,硅藻和绿藻在全年不同时期均占优势,而蓝藻受温度影响较大,夏季骤增,冬季骤减。这种季节变化上的相似性可能是因为3个湖泊均为浅水型湖泊,水温的变化影

响着水体物理化学和生物活动,从而影响着水体上下层的交换、营养盐的生化循环和分布。夏季水温高,物质循环加快,营养盐含量增大,浮游植物生物量增大,出现浮游植物密度高峰。硅藻和绿藻对水温和光照有很好的适应能力,在不同季节均能获得优势地位;而蓝藻适温较高,水温上升,蓝藻大幅度增加,水温下降,蓝藻亦大幅度减少;其他藻类数量相对较少,与水温关系不明显。

影响扬州境内湖泊浮游植物群落结构的环境因子主要有水温、 pH 及 N 、 P 等,不同湖泊的主要影响因素略有差异。3个湖泊虽同为浅水型湖泊,但亦有不同,高邮湖大而浅,且湖面常起风浪,物质循环较快。宝应湖相对小而深,属草型湖泊,水体透明度较高,相对较封闭。邵伯湖小而浅,水体相对较浑,湖内养殖较少。有文献^[4]报道, pH 值与藻类初级生产力呈显著正相关,杨丽标等^[18]研究表明,藻类种群分布与水体 pH 值的相关性可能是由于不同环境条件下藻类种群的生长繁殖变化导致水体 pH 值变化所致。高邮湖和宝应湖由于大面积养殖导致氮磷营养盐成为水环境主要的变化因子,氮、磷等营养元素能调节浮游植物的生长,在一定浓度范围内氮、磷对浮游植物的生长有促进作用,过低的氮、磷质量浓度会限制浮游植物的数量^[19],过高的氮、磷质量浓度不仅会导致富营养化,还会导致浮游植物种类组成发生变化^[20]。养殖差异导致湖泊的氮磷质量浓度和氮磷比不同,是导致其对3个湖泊群落结构影响程度不同的一个主要因素。

3 结论

a. 高邮湖共鉴定浮游植物8门71属153种,细胞丰度变化范围为 $5.00 \times 10^6 \sim 6.7 \times 10^6$ cells/L,生物量较高的优势种有颗粒直链藻、岛直链藻、尖针杆藻;邵伯湖共鉴定浮游植物8门61属136种,细胞丰度变化范围为 $4.95 \times 10^6 \sim 6.03 \times 10^6$ cells/L,生物量较高的优势种有小环藻、尖尾蓝隐藻、巨颤藻;宝应湖共鉴定浮游植物8门66属156种,细胞丰度变化范围为 $5.00 \times 10^6 \sim 6.7 \times 10^6$ cells/L,生物量较高的优势种有双头针杆藻、反曲隐藻、尖尾蓝隐藻。

b. 高邮湖浮游植物群落总数量与水温 T 呈显著正相关,邵伯湖浮游植物群落总数量与 TP 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 呈显著正相关,宝应湖浮游植物群落总数量与 TN 呈显著正相关。3个湖泊优势种中的硅藻与环境因子相关性不大,蓝藻主要受水温 T 的影响,隐藻及绿藻中的小球藻和栅藻主要受氮磷等营养盐的影响。

c. 影响高邮湖浮游植物群落分布的主要环境因子为水温 T 和 TN ;影响邵伯湖浮游植物群落分布

的主要环境因子为 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 和 pH;影响亚应湖浮游植物群落分布的主要环境因子为 COD_{Mn} 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TP。

d. 3 个湖泊均为长江中下游浅水型湖泊,群落结构的季节变化规律较为相似。3 个湖泊的水深、养殖结构及规模相差较大,养殖差异导致氮磷比不同,这些因素是造成不同湖泊群落结构影响因子不同的重要原因。

参考文献:

[1] LEPISTO L, HOLOPAINEN A L, VUORIE TO H. Type-specific and indicator taxa of phytoplankton as a quality criterion for assessing ecological status of Finnish boreal lakes [J]. *Limnologia-Ecology and Management of Inland Waters*, 2004, 34(3): 236-248.

[2] 苏玉,文航,王东伟,等.太湖武进港区域浮游植物群落特征及其主要水质污染影响因子分析[J]. *环境科学*, 2011, 32(7): 1945-1951. (SU Yu, WEN Hang, WANG Dongwei, et al. Analysis on the key water quality factors to phytoplankton community in Wujingang Region of Taihu Lake [J]. *Environmental Science*, 2011, 32(7): 1945-1951. (in Chinese))

[3] 路娜,尹洪斌,邓建才,等.巢湖流域春季浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系[J]. *湖泊科学*, 2010, 22(6): 950-956. (LU Na, YIN Hongbin, DENG Jiancai, et al. Spring community structure of phytoplankton from Lake Chaohu and its relationship to environmental factors [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22(6): 950-956. (in Chinese))

[4] 沈会涛,刘存歧.白洋淀浮游植物群落及其与环境因子的典范对应分析[J]. *湖泊科学*, 2008, 20(1): 773-779. (SHEN Huitao, LIU Cunqi. Canonical correspondence analysis of phytoplankton community and its environmental factors in the Lake Baiyangdian [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2008, 20(1): 773-779. (in Chinese))

[5] 王丽卿,许莉,卢子园,等.淀山湖浮游植物数量消长及其与环境因子的关系[J]. *环境科学*, 2011, 32(10): 2868-2874. (WANG Liqing, XU Li, LU Ziyuan, et al. Dynamic of phytoplankton abundance and the relationship with environmental factors in Dianshan Lake, Shanghai [J]. *Environmental Science*, 2011, 32(10): 2868-2874. (in Chinese))

[6] 邓建明,蔡永久,陈宇炜,等.洪湖浮游植物群落结构及其与环境因子的关系[J]. *湖泊科学*, 2010, 22(1): 70-78. (DENG Jianmin, CAI Yongjiu, CHEN Yuwei, et al. Structure of phytoplankton community and its relationship with environmental factors in Lake Honghu [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22(1): 70-78. (in Chinese))

[7] 邱小琮,赵红雪,孙晓雪.宁夏沙湖浮游植物与水环境因子关系的研究[J]. *环境科学*, 2012, 33(7): 2265-

2271. (QIU Xiacong, ZHAO Hongxue, SUN Xiaoxue. Studies on relationship on phytoplankton and water environmental factors in Shahu Lake [J]. *Environmental Science*, 2012, 33(7): 2265-2271. (in Chinese))

[8] 蒋玉玲,李青,陈晓宏,等.广州市大金钟水库浮游植物与环境因子的关系[J]. *水资源保护*, 2011, 27(1): 46-50. (JIANG Yuling, LI Qing, CHEN Xiaohong, et al. Relationship between phytoplankton and environmental factors in Dajinzong Reservoir of Guangzhou [J]. *Water Resources Protection*, 2011, 27(1): 46-50. (in Chinese))

[9] 孟睿,何连生,过龙根,等.长江中下游草型湖泊浮游植物群落及其与环境因子的典范对应分析[J]. *环境科学*, 2013, 34(7): 2588-2596. (MENG Rui, HE Liansheng, GUO Longgen, et al. Canonical correspondence analysis between phytoplankton community and environmental factors in macrophytic lakes of the middle and lower reaches of Yangtze River [J]. *Environmental Science*, 2013, 34(7): 2588-2596. (in Chinese))

[10] 严莹.秦淮河秋冬季浮游植物群落与环境因子典范对应分析[J]. *河海大学学报:自然科学版*, 2013, 41(6): 505-510. (YAN Ying. Canonical correspondence analysis of phytoplankton community and environmental factors in Qinhuai River in autumn and winter [J]. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2013, 41(6): 505-510. (in Chinese))

[11] COSTE M, BOUTRY S, ROSEBERY J T, et al. Improvements of the biological diatom index (BDI): description and efficiency of the new version (BDI-2006) [J]. *Ecological Indication*, 2009, 9(4): 621-650.

[12] 章宗涉,黄祥飞.淡水浮游生物研究方法[M].北京:科学出版社,1991:333-815.

[13] 韩茂森,束蕴芳.中国淡水生物图谱[M].北京:科学出版社,1995:2-129.

[14] 胡钧钧,魏印心.中国淡水藻类:系统、分类及生态[M].北京:科学出版社,2006.

[15] 金相灿,屠清瑛.湖泊富营养化调查规范[M].2版.北京:中国环境科学出版社,1990:239-245.

[16] 国家环境保护总局,《水和废水监测分析方法》编委会.水和废水监测分析方法[M].4版.北京:中国环境科学出版社,2002.

[17] TERBRAAK C J F. Canonical correspondence analysis: a new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis [J]. *Ecology*, 1986, 67(5): 1167-1179.

[18] 杨丽标,韩小勇,孙璞,等.巢湖藻类组成与环境因子典范对应关系[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(5): 952-958. (YANG Libiao, HAN Xiaoyong, SUN Pu, et al. Canonical correspondence analysis of algae community and its environmental factors in the Lake Chaohu [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(5): 952-958. (in Chinese))

(下转第 71 页)

- Yu, CHANG Lin. A fuzzy comprehensive evaluation model of the water environment quality in Xi'an area[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2007, 21(11): 22-26. (in Chinese))
- [7] 马蓓蓓, 薛东前, 延军平. 西部城市水环境与经济发展协调模式研究: 以西安市浐灞生态区为例[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(5): 53-58. (MA Beibei, XUE Dongqian, YAN Junping. Research on the harmonization between urban water environment and economic development in Western China: a case study of Chanba ecology district in Xi'an City[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2007, 21(5): 53-58. (in Chinese))
- [8] 张蓉珍, 李剑. 陕西省西安市水环境生态安全评价[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(25): 12129-12131. (ZHANG Rongzhen, LI Jian. Ecological security assessment of the water environment in Xi'an City of Shaanxi[J]. Journal of Anhui Agricultural Science, 2009, 37(25): 12129-12131. (in Chinese))
- [9] 卓悦. 关中地区经济发展与渭河水环境质量演变关系研究[D]. 西安: 西北大学, 2010.
- [10] 西安市统计局. 西安市统计年鉴(2011年)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2012: 3-4.
- [11] 西安市水务局. 西安市再生水利用“十二五”规划[R]. 西安: 西安市人民政府, 2011: 63-78.
- [12] 李华, 师谦友, 高楠, 等. 西安城市化与水资源利用关系的量化研究[J]. 地域研究与开发, 2012, 31(5): 131-134. (LI Hua, SHI Qianyou, GAO Nan, et al. Study on the quantitative relationship between urbanization and water resources utilization in Xi'an City[J]. Areal Research and Development, 2012, 31(5): 131-134. (in Chinese))
- [13] 西安市环境保护局. 西安市2012年主要污染物减排实施方案[R]. 西安: 西安市人民政府, 2013.
- [14] 徐世龙. 可持续发展定量评价指标体系的构想[J]. 统计与信息论坛, 2000, 15(1): 7-14. (XU Shilong. Suggestions on statistic index system for the quantitative evaluation of sustainable development[J]. Statistics & Information Tribune, 2000, 15(1): 7-14. (in Chinese))
- [15] 徐建华. 地理建模方法[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [16] 樊彦芳, 刘凌, 陈星, 等. 层次分析法在水环境安全综合评价中的应用[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2004, 32(5): 512-514. (FAN Yanfang, LIU Ling, CHEN Xing, et al. Application of analytic hierarchy process method to comprehensive evaluation of water environmental safety system[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2004, 32(5): 512-514. (in Chinese))
- [17] 杨士弘. 城市生态环境学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 254-256.
- [18] 西安市统计局. 社会保障体系建立健全和谐西安建设成效显著; 改革开放以来西安经济社会发展成就系列统计报告之十五[R]. 西安: 西安市统计局, 2009.
- [19] 耿雅妮. 基于向量模法的西安市水环境承载力研究[J]. 中国农学通报, 2013, 29(11): 168-172. (GENG Yani. Water environmental carrying capacity in Xi'an City based on vector norm method[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(11): 168-172. (in Chinese))

(收稿日期: 2014-10-22 编辑: 徐娟)

(上接第52页)

- [19] 曲克明, 陈碧娟, 袁有宪, 等. 氮磷营养盐影响海水浮游硅藻种群组成的初步研究[J]. 应用生态学报, 2000, 11(3): 445-448. (QU Keming, CHEN Bijuan, YUAN Youxian, et al. A preliminary study on influence of N and P on population constituent of planktonic diatoms in seawater[J]. Journal of Applied Ecology, 2000, 11(3): 445-448. (in Chinese))
- [20] 王汉奎, 董俊德, 张恩, 等. 三亚湾氮磷比值分布及其对浮游植物生长的限制[J]. 热带海洋学报, 2002, 21(1): 33-39. (WANG Hankui, DONG Junde, ZHANG Si, et al. Distribution of N/P ration and its limitation to growth of phytoplankton in Sanya Bay[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2002, 21(1): 33-39. (in Chinese))

(收稿日期: 2014-07-29 编辑: 彭桃英)

