

陈桥东湖浮游植物群落结构与环境因子的关系

马剑敏,褚一凡,赵闪闪,李英臣,侯翠翠,靳同霞

(河南师范大学 生命科学学院,河南 新乡 453007)

摘要:为研究陈桥东湖浮游植物群落的时空变化及其与环境因子之间的关系,于 2017 年 1 月、4 月、7 月和 10 月对陈桥东湖的 4 个样点进行采样调查.调查共发现浮游植物 8 门 67 属 118 种.其中绿藻种类最多,共 47 种,硅藻其次,共 35 种.浮游植物丰度变化为 $2.52 \sim 39.7 \times 10^6$ cells \cdot L $^{-1}$,平均丰度为 8.54×10^6 cells \cdot L $^{-1}$,最高值出现在夏季.硅藻为陈桥东湖冬季的主要优势种类,绿藻和蓝藻则在夏、秋季节占优势.利用修正的卡尔森营养状态指数(TSI_M)来评价水质,结果显示陈桥东湖整体呈现富营养化状况,且夏季水质最差,冬季相对较好,主要与人为干扰有关.浮游植物丰度与环境因子的相关性分析表明,蓝藻、绿藻与营养盐及水温极显著正相关($P < 0.01$).金藻则与水温呈极显著负相关,与溶解氧呈极显著正相关($P < 0.01$).典范对应分析(CCA)结果表明,溶解氧、水温、pH、总氮、透明度和化学需氧量是影响陈桥东湖浮游植物优势种变化的重要环境因子.

关键词:陈桥东湖;浮游植物;环境因子;典范对应分析

中图分类号:Q171

文献标志码:A

浮游植物是水生态系统中最重要初级生产者和食物链基础,对水生态系统的物质循环和能量流动起着举足轻重的作用.其群落组成和结构变化与水体环境密切相关,且其对水环境的变化极为敏感,往往可以作为水体污染的指示物种,用于评价水质状况^[1-3].浮游植物群落变化与水环境因子之间的关系一直是生态学家们研究的热点^[4],不同环境条件下浮游植物群落也不尽相同,对其之间的关系研究是一个复杂的问题.

群落排序是生态学中常用的一种数据分析方法,典范对应分析(Canonical Correspondence Analysis, CCA),即是利用 CANOCO 所做的一种非线性多元直接梯度分析,可以将大量的物种与环境信息相结合进行降维分析,结果直观明确,可以很好地概括物种与环境因子之间的关系,近年来在浮游生物与环境因子的研究中应用广泛^[5-9].

陈桥东湖位于河南新乡黄河湿地鸟类国家级自然保护区(34°53'13"N~35°6'21"N,114°13'53"E~114°52'30"E)的中部实验区,是该区黄河大堤北侧少数的常年集水区之一.陈桥东湖为黄河泛滥遗留的沼泽型湿地,湿地总面积约为 124 hm²,水域面积约占总面积的 80%,水深较浅,最深处不超过 3 m.该湿地是许多珍稀鸟类的繁殖及栖息地,也是我国候鸟迁徙的重要驿站之一,湿地内动植物资源丰富,对区域生物多样性保护具有重要价值^[10-11].对陈桥东湖水体环境的调查研究有助于维持湿地内环境稳态,并为水生生物及湿地鸟类提供更好的生存环境.目前关于陈桥东湖浮游植物及水环境的相关调查还是空白,本研究将水质分析与浮游植物调查相结合,利用典范对应分析探讨环境因子与浮游植物之间的关系,以期陈桥东湖浮游植物群落的演变、水体富营养化的生态修复提供合理的科学依据.

1 材料与方法

1.1 采样点设置及采样时间

根据陈桥东湖水域分布及面积,研究共设置 4 个采样点(图 1),采样时间为 2017 年 1 月、4 月、7 月和

收稿日期:2018-01-05;修回日期:2018-11-01.

基金项目:河南省自然科学基金(182300410147);新乡国家级自然保护区管理处鸟类饵料调查项目.

作者简介(通信作者):马剑敏(1964-),男,河南偃师人,河南师范大学教授,博士,主要从事污染与修复生态学研究,
E-mail:mjm6495@sina.com.

10月(春/夏/秋/冬)共4次.每次采样于天气晴朗的上午进行,包括浮游植物样品及水质水样的采集.

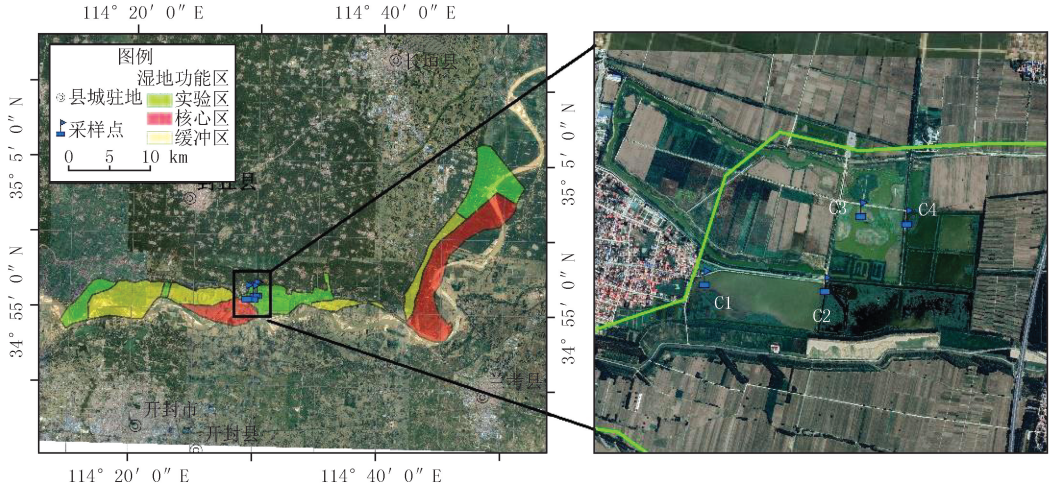


图1 陈桥东湖采样点分布

Fig.1 Distribution of sampling sites in Chenqiao East Lake

1.2 浮游植物的采样及鉴定

由于陈桥东湖水深较浅,定性样品利用25号浮游生物网,在水体表面下呈“∞”形来回拖动3 min左右,收集过滤后的水样,现场加入5%的鲁哥氏液进行固定.定量样品利用有机玻璃采水器采集1 L表层水,现场加入1.5%的鲁哥氏液固定,带回实验室,沉淀48~72 h后,浓缩定容至30 mL观察计数.

浮游植物的鉴定主要参照《淡水浮游生物研究方法》《河流水生生物调查指南》^[12-13].定量样品,计数前先将样品摇匀,每次准确吸取0.1 mL样品,于10×40倍显微镜下观察计数.每个样品计数两片,取平均值,每片与平均数的差值不能超过平均数的15%,否则需要继续计数,直到差值小于15%.

1.3 理化因子的测定

测定指标包括pH、透明度(SD)、水温(WT)、溶解氧(DO)、氧化还原电位(ORP)、总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH₄⁺-N)、化学需氧量(COD_{Cr})、叶绿素a(Chl-a).现场使用HACH便携水质分析仪测定pH、WT、DO、ORP,使用塞氏盘测量SD.其余指标使用有机玻璃采水器采集水样带回实验室尽快测定,样品的分析方法和保存方法均参照国家标准方法测定^[14-15],TN的测定采用过硫酸钾氧化法,TP的测定采用钼锑抗比色法,NH₄⁺-N的测定采用纳氏比色法,COD_{Cr}的测定采用重铬酸钾氧化法,Chl-a使用热乙醇萃取法.

1.4 数据分析

优势种的计算:

利用优势度(Y)判定优势种,以Y>0.02的藻类为优势种.

$$Y = n_i / N \times f_i,$$

式中: n_i 为第*i*种的个数; N 为所有种类的总个体数; f_i 为第*i*种出现的频率.

加权综合营养状态指数法:

采用修正的卡尔森营养指数评价方法评价水体的营养状况,修正的卡尔森营养状态指数法采用0~100的一系列数字对湖泊营养状态分级,使用的指标有Chl-a,SD,TP, TSI_M 指数在37以下为贫营养,38~53为中营养,54以上为富营养^[14,16],计算公式如下:

$$TSI_M(\text{Chl-a}) = 10 \times (2.46 + \ln \text{Chl a} / \ln 2.5),$$

$$TSI_M(\text{SD}) = 10 \times [2.46 + (3.69 - 1.53 \ln \text{SD}) / \ln 2.5],$$

$$TSI_M(\text{TP}) = 10 \times [2.46 + (6.71 + 1.15 \ln \text{TP}) / \ln 2.5],$$

$$\text{综合 } TSI = [TSI_M(\text{Chl-a}) + TSI_M(\text{SD}) + TSI_M(\text{TP})] / 3.$$

利用SPSS 19.0进行浮游植物丰度与环境因子之间的Person相关性分析.利用CANOCO 4.5对浮游植物优势种丰度与环境因子进行CCA排序分析.分析之前首先要对物种及环境数据进行lg(x+1)转换(不包括pH),使其趋于正态分布^[17-18].然后对物种数据进行DCA分析,根据第一轴长度选择适当的排序方法,本

文 DCA 结果显示第一轴长度为 3.76,所以选择 RDA 或 CCA 均可.这里选择 CCA 典范对应分析,通过软件自动筛选和蒙特卡洛检验剔除膨胀因子大于 10,且相关性系数大于 0.05 的环境变量,避免环境因子间存在较强的线性相关而影响排序结果.分析结果用 Canodraw 软件绘制物种与环境因子的双序图.

2 结果与分析

2.1 浮游植物群落时空变化

4 个季度调查共发现浮游植物 8 门 67 属 118 种.其中绿藻门种类最多,共 29 属 47 种,其次为硅藻,共 15 属 35 种.甲藻最少只有 2 种.浮游植物季节及空间分布见表 1、图 2,从季节分布来看,夏季最高共发现 77 种,冬季最少为 31 种.从样点分布来看,C1 样点发现种类最多共 90 种,C3 样点最少共 45 种.硅藻为陈桥东湖冬季的主要优势种类.绿藻和蓝藻则在夏、秋季节占优势.

浮游植物全年丰度变化范围为 $2.52 \sim 39.7 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$,平均丰度为 $8.54 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$,最高值出现在夏季的 C1 采样点.其丰度变化如图 3 所示,整体变化趋势为夏、秋季节高于春、冬季节.从样点分布由高到低 C1,C2,C4,C3.硅藻、绿藻和蓝藻全年丰度均较高,其中硅藻为冬季的主要优势种,其冬季平均丰度为 $1.5 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$,占总丰度的 47%.春季开始绿藻丰度逐渐增加,夏季绿藻平均丰度为 $4.05 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$.蓝藻则在夏秋季节爆发生长,主要为铜绿微囊藻的爆发增长.

表 1 陈桥东湖浮游植物种类时空分布

Tab.1 Spatial and temporal distribution of phytoplankton species in Chenqiao East Lake

采样点	季节	硅藻种数	绿藻种数	蓝藻种数	裸藻种数	隐藻种数	金藻种数	甲藻种数	黄藻种数	共计种数
C1	春季	10	17	4	5	1	1	1	0	39
	夏季	11	36	7	5	2	0	1	2	64
	秋季	13	15	7	3	4	1	1	0	44
	冬季	10	4	2	2	0	2	0	0	20
C2	春季	8	12	3	3	1	0	1	0	28
	夏季	5	28	7	3	1	0	0	1	45
	秋季	4	12	5	4	3	0	0	1	29
	冬季	6	5	1	2	0	1	0	0	15
C3	春季	11	9	3	3	0	1	0	0	27
	夏季	7	15	4	3	1	0	1	0	31
	秋季	5	4	5	1	1	0	0	0	16
	冬季	6	5	2	0	0	2	0	0	15
C4	春季	8	19	5	2	1	1	0	0	36
	夏季	10	30	6	2	1	0	2	1	52
	秋季	5	9	6	2	2	0	1	0	25
	冬季	7	7	7	3	1	1	0	0	26

调查期间共发现浮游植物优势种 16 种,如表 2 所示.优势种的变化与浮游植物丰度的变化相吻合,主要优势种类为硅藻 4 种、绿藻 4 种和蓝藻 5 种,还有尾裸藻 *Euglena caudata* (裸藻门),嗜蚀隐藻 *Cryptomonas erosa* (隐藻门),分歧锥囊藻 *Dinobryon divergens* (金藻门).

2.2 水环境因子及水质状况

各季节水环境因子测定结果见表 3.水温随季节变化,冬季最低平均水温 $4.22 \text{ }^\circ\text{C}$,夏季最高平均水温 $33.18 \text{ }^\circ\text{C}$.透明度整体呈现出春、冬季节好于夏、秋季节,因为除季节性的降水外,陈桥东湖湿地主要补给水来源为黄河水,黄河水泥沙含量较高,且因该湿地补水时间的不确定性,所以水体透明度波动较为明显,建议制定合理的补水机制,同时可以建造一个生态缓冲区,对湿地补给水进行预处理,可提高湿地水环境质量.pH 变化范围 $7.73 \sim 8.68$,季节变化为夏、秋季节好于春、冬季节.溶解氧含量表现出从冬季到夏季逐渐降低的趋

势,变化范围为 $5.75 \sim 12.52 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,最高值为冬季的 C3 采样点.氧化还原电位整体春冬季节高于夏秋季节,波动范围为 $90 \sim 226.1 \text{ mV}$,平均值为 166.78 mV .最高值最低值均出现在 C1 采样点,说明该采样点较为剧烈的环境波动.

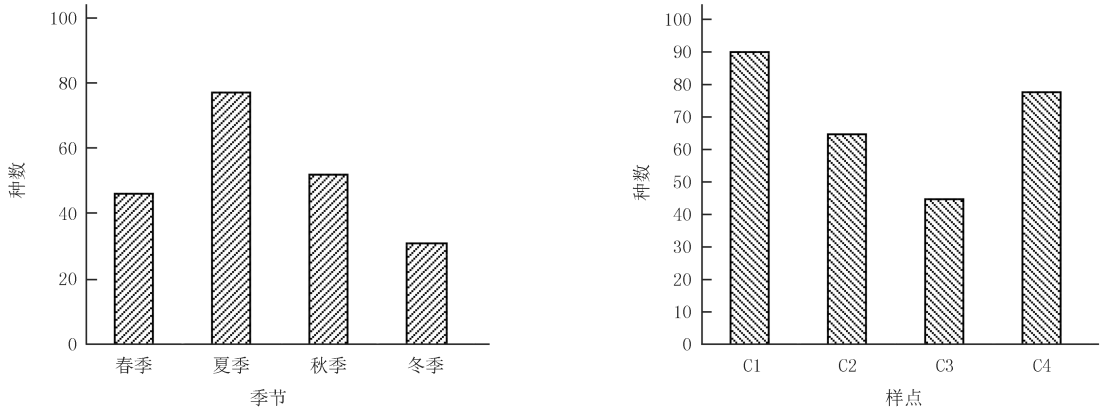


图2 陈桥东湖浮游植物种类季节及样点分布

Fig.2 Seasonal and sampling sites distribution of phytoplankton species in Chenqiao East Lake

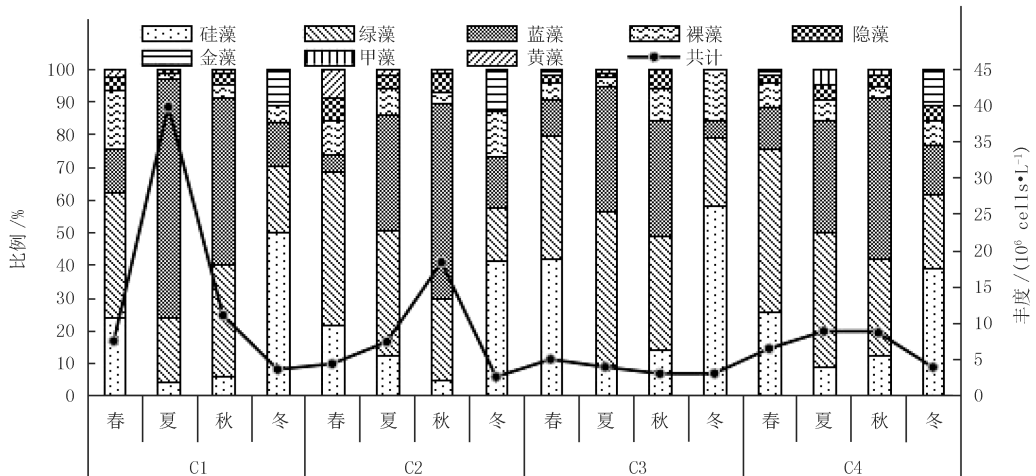


图3 陈桥东湖各采样点浮游植物丰度季节分布

Fig.3 Seasonal distribution of phytoplankton abundance at each sampling site in Chenqiao East Lake

总氮全年波动范围为 $1.112 \sim 2.362 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均值为 $1.506 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.从时间来看,降低趋势基本都是夏季、秋季、春季、冬季.从空间来看,C1 采样点最高,C3 采样点最低.氨氮变化趋势与总氮吻合,全年平均值为 $0.976 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,占总氮的 65%.总磷季节及样点变化情况与总氮基本一致,全年波动范围为 $0.051 \sim 0.261 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均值为 $0.105 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.其中最大值出现在夏季的 C1 采样点.化学需氧量值总体呈现出夏季显著高于其他 3 个季节,其他 3 季值较为接近,全年平均值为 $52.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.最高值出现在夏季的 C1 采样点,为 $126.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.最低值出现在 C4 采样点的冬季,为 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.叶绿素 a 季节降低趋势为夏季、秋季、春季、冬季,与浮游植物丰度季节变化趋势基本一致.

2.3 浮游植物丰度与水环境因子的相关性分析

浮游植物各门类丰度与水环境因子之间的相关性分析见表 5.结果显示硅藻与 DO 和氧化还原电位呈显著正相关,与 pH 呈显著负相关($P < 0.05$);蓝藻、绿藻与总氮、总磷、氨氮、化学需氧量和水温呈极显著正相关关系($P < 0.01$),与氧化还原电位呈显著负相关关系($P < 0.05$);隐藻与总氮、总磷、氨氮和水温呈显著正相关,与溶解氧和氧化还原电位显著负相关;金藻则与水温呈极显著负相关,与溶解氧呈极显著正相关($P < 0.01$);甲藻与 pH 显著正相关($P < 0.05$);未发现裸藻和黄藻与水环境因子之间的显著相关性.

表 2 陈桥东湖浮游植物优势种优势度

Tab.2 Dominance of dominant phytoplankton species in Chenqiao East Lake

编号	优势种	优势度			
		春季	夏季	秋季	冬季
S1	尖针杆藻 <i>Synedra acus</i>	0.032	0.024	0.022	0.056
S2	钝脆杆藻 <i>Fragilaria capucina</i>	0.029	—	—	0.025
S3	小环藻 <i>Cyclotella</i>	0.048	0.025	—	0.038
S4	短小舟形藻 <i>Navicula exigua</i>	0.022	—	—	0.045
S5	小球藻 <i>Chlorella</i>	0.096	0.07	0.06	—
S6	水溪绿球藻 <i>Chlorococum infusionum</i>	0.068	0.044	0.032	—
S7	四尾栅藻 <i>Scenedesmus quadricauda</i>	0.044	—	—	—
S8	链丝藻 <i>Hormidium flaccidum</i>	—	0.036	—	—
S9	铜绿微囊藻 <i>Microcystis aeruginosa</i>	0.037	0.12	0.14	—
S10	优美平裂藻 <i>Merismopedia elegans</i>	—	0.062	0.058	—
S11	中华尖头藻 <i>Raphidiopsis sinensis</i>	—	0.037	0.049	—
S12	小颤藻 <i>Oscillatoria tenuis</i>	—	0.026	—	—
S13	伪鱼腥藻属 <i>Anabeana</i>	—	0.02	0.032	—
S14	尾裸藻 <i>Euglena caudata</i>	0.05	—	—	0.028
S15	嗜蚀隐藻 <i>Cryptomonas erosa</i>	—	—	0.028	—
S16	分歧锥囊藻 <i>Dinobryon divergens</i>	—	—	—	0.032

表 3 陈桥东湖各采样点水体理化指标

Tab.3 Physical and chemical indicators of water at each sampling site of Chenqiao East Lake

采样点	季节	TN/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TP/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\text{NH}_4^+ \text{-N}/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\text{COD}_{\text{Cr}}/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	Chl-a/ ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	WT/ $^{\circ}\text{C}$	SD/cm	pH	DO/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	ORP/mV
C1	春季	1.384	0.118	1.099	66.9	25.2	17.0	35.0	7.73	8.68	192.30
	夏季	2.362	0.261	1.668	126.4	89.3	33.9	15.0	8.30	6.82	98.80
	秋季	1.982	0.200	1.412	60.2	16.7	17.0	27.0	8.60	6.32	90.00
	冬季	1.575	0.054	1.038	60.0	4.1	4.1	40.0	8.20	12.17	226.10
C2	春季	1.421	0.064	0.932	56.3	20.0	16.7	110.0	7.81	8.16	210.30
	夏季	1.478	0.144	0.853	61.7	36.3	33.6	30.0	8.18	5.75	125.20
	秋季	1.922	0.108	1.298	48.2	25.1	16.3	45.0	8.34	6.00	123.30
	冬季	1.419	0.058	0.751	52.0	3.6	4.1	76.0	8.09	12.43	182.40
C3	春季	1.296	0.084	0.844	35.2	12.8	17.2	40.0	8.07	10.33	215.10
	夏季	1.274	0.128	0.738	48.2	35.0	32.7	25.0	8.68	7.60	117.60
	秋季	1.112	0.074	0.680	36.1	6.5	17.3	50.0	8.42	7.24	180.30
	冬季	1.373	0.054	0.719	32.0	1.9	4.1	50.0	8.43	12.52	182.70
C4	春季	1.299	0.081	0.923	42.0	27.0	17.2	75.0	7.94	8.69	208.00
	夏季	1.440	0.108	0.640	45.2	38.1	32.5	38.0	8.76	7.41	127.20
	秋季	1.628	0.099	1.080	33.1	15.3	17.7	52.0	8.29	7.70	191.00
	冬季	1.134	0.051	0.946	36.0	3.8	4.1	85.0	8.37	10.27	198.10
平均值		1.506	0.105	0.976	52.5	22.5	17.8	50.0	49.56	8.26	166.78

参考《地表水环境质量标准》,总氮、总磷、氨氮和化学需氧量显示陈桥东湖湿地水体全年处于 IV-V 水

质状况,水质较差.通过修正的卡尔森营养状态指数来评价水质状况,结果显示陈桥东湖水体全年呈现出富营养化状况(表 4).从季节来看夏季水质最差,偏中重度富营养化.相比而言冬、春季节水质条件较好.从样点分布来看,C1 采样点水质最差,富营养化最为严重,其次为 C2 采样点,C4 采样点水质季节波动较为平稳,C3 采样点相对最好.

表 4 陈桥东湖各采样点 TSI_M 值季节变化

Tab.4 Seasonal variations of TSI_M values at different sampling sites in Chenqiao East Lake

采样点	季节	$TSI_M(\text{Chl-a})$	$TSI_M(\text{SD})$	$TSI_M(\text{TP})$	综合 TSI	营养状态
C1	春季	59.8	79.0	64.8	67.9	富营养型
	夏季	73.6	93.2	74.8	80.5	富营养型
	秋季	55.3	83.4	71.5	70.1	富营养型
	冬季	46.3	74.8	53.5	58.2	富营养型
C2	春季	57.3	59.9	57.3	58.2	富营养型
	夏季	63.8	81.6	67.4	70.9	富营养型
	秋季	59.8	74.8	63.8	66.1	富营养型
	冬季	45.5	68.7	54.4	56.2	富营养型
C3	春季	52.4	76.8	60.7	63.3	富营养型
	夏季	63.4	84.6	65.9	71.3	富营养型
	秋季	45.0	73.1	59.0	59.0	富营养型
	冬季	37.3	68.7	55.1	53.7	富营养型
C4	春季	60.6	66.3	60.2	62.4	富营养型
	夏季	64.3	77.7	63.7	68.6	富营养型
	秋季	54.4	72.4	62.7	63.2	富营养型
	冬季	46.7	71.2	55.9	57.9	富营养型
均值	55.3	75.4	61.9	64.2	富营养型	

表 5 浮游植物各门类丰度与环境因子的相关分析

Tab.5 Correlation analysis between abundance of phytoplankton and environmental factors

	TN	TP	NH_4^+-N	COD_{Cr}	Chl-a	WT	DO	SD	pH	ORP
硅藻	-0.048	-0.128	0.139	0.074	-0.033	-0.324	0.514*	-0.032	-0.528*	0.520*
绿藻	0.765**	0.858**	0.738**	0.740**	0.891**	0.640**	-0.617*	-0.498*	0.040	-0.599*
蓝藻	0.824**	0.830**	0.759**	0.855**	0.853**	0.575*	-0.391	-0.464	0.144	-0.565*
裸藻	0.234	0.351	0.340	0.417	0.376	0.200	-0.222	-0.269	-0.411	-0.139
隐藻	0.611*	0.655**	0.630**	0.461	0.614*	0.535*	-0.776**	-0.322	0.028	-0.551*
金藻	-0.272	-0.484	-0.126	-0.138	-0.441	-0.650**	0.673**	0.386	-0.139	0.495
甲藻	0.106	0.176	-0.133	-0.125	0.140	0.372	-0.284	-0.222	0.586*	-0.372
黄藻	0.120	-0.029	0.188	0.116	0.074	0.080	-0.354	0.244	-0.491	-0.010

注:**在 0.01 水平(双侧)上显著相关.*在 0.05 水平(双侧)上显著相关.

2.4 浮游植物优势种与水环境因子的 CCA 分析

CCA 排序前两个物种轴之间的相关系数为 -0.029,几乎互相垂直.前两个环境轴的相关系数为 0,相互垂直.前两个排序轴的特征值分别为 0.642 和 0.195,共解释了物种信息的 42.7%,物种与环境间关系的 68.1%(表 6).说明排序图能较好地反应浮游植物优势种与水环境因子之间的关系,排序结果是可靠的^[17,19].

利用 CANOCO 4.5 对环境变量进行自动筛选和蒙特卡洛检验,结果共选出 6 个环境变量,与浮游植物优势种相关性从大到小排列依次为溶解氧、水温、pH、透明度、总氮和化学需氧量.从图 4 可以看出,透明度

和溶解氧与第一轴为正相关(0.58,0.95),水温、总氮和化学需氧量与第一轴呈负相关关系(-0.89,-0.55,-0.37),pH 与第二轴呈负相关(-0.63)。浮游植物优势种与环境因子之间的关系可以分成三组,一组为 S3(小环藻)、S4(舟形藻)、S16(分歧锥囊藻),与溶解氧关系密切,溶解氧越高,其丰度越高。第二组为 S1(尖针杆藻)、S2(钝脆杆藻)、S14(尾裸藻),与透明度相关性较高,说明其喜欢生长于透明度较高的水体中。其余浮游植物优势种为第三组,主要为绿藻和蓝藻,与总氮、水温、pH 及化学需氧量成正相关,而与透明度和溶

氧显著负相关,说明这些物种适宜在富营养化水体中生长,其中包括常见的水华藻类,铜绿微囊藻 *Microcystis aeruginosa* (S9)、小球藻 *Chlorella* (S5)、伪鱼腥藻属 *Anabeana* (S13)等。

表 6 陈桥东湖浮游植物优势种 CCA 分析结果

Tab.6 CCA analysis results of dominant phytoplankton species in Chenqiao East Lake

排序轴 CCA axes	1	2	3	4	总惯量 Total inertia
特征值 Eigenvalues	0.642	0.195	0.15	0.126	1.962
物种与环境因子相关性 Species-environment correlations	0.979	0.85	0.865	0.865	—
物种数据累计变量比例/% Cumulative percentage variance of species data	32.7	42.7	50.3	56.8	—
物种-环境相关 species-environment relation	52.3	68.1	80.4	90.7	—
总特征值 Sum of all eigenvalues	—	—	—	—	1.962
典范特征值的总和 Sum of all canonical eigenvalues	—	—	—	—	1.229

3 讨论

浮游植物群落的变化主要受水温、营养盐的影响^[20]。陈桥东湖浮游植物群落呈现明显的季节变化趋势,冬季以耐低温的硅藻为主;春季水温升高,转为以绿藻-硅藻为主的群落结构;夏、秋季节绿藻蓝藻则为主要优势种,种类及丰度均达到全年最高,相对而言,绿藻夏季丰度较高,蓝藻则在秋季较高。研究发现水温高于 14 °C 时微囊藻生物量随水温增加而增加,水温超过 22 °C 时微囊藻生物量占优势^[21]。这与本研究调查结果相吻合,铜绿微囊藻是陈桥东湖夏秋季节的主要优势物种。除此之外陈桥东湖夏秋季节较高的 pH 也是促进蓝藻生长的主要影响因子之一^[22]。PEG(plankton ecology group)模式^[23]是被广泛认可的普适的浮游植物季节变化规律,研究表明该模式也适用于描述陈桥东湖浮游植物的季节变化趋势。

研究结果表明陈桥东湖湿地水体整体呈现富营养化状况,程度较为严重。从季节来看,夏季水质差于其他季节。主要因为该湿地目前处于生态旅游开发状态,全年施工较为频繁,且紧邻居民区,受人为干扰十分严重。湿地周边原为农田,夏季雨水增多,地表径流对水体的营养盐输入也是夏季水体营养状况较差的原因之一。从样点来看,C1 采样点水面相对开阔,全年受风浪影响较大,且该采样点底泥深厚,水深较浅,湖中鱼类资源丰富,很容易造成底泥再悬浮,导致水体营养盐含量增高,水质变差。C3 采样点为一新建的人工湖,除季

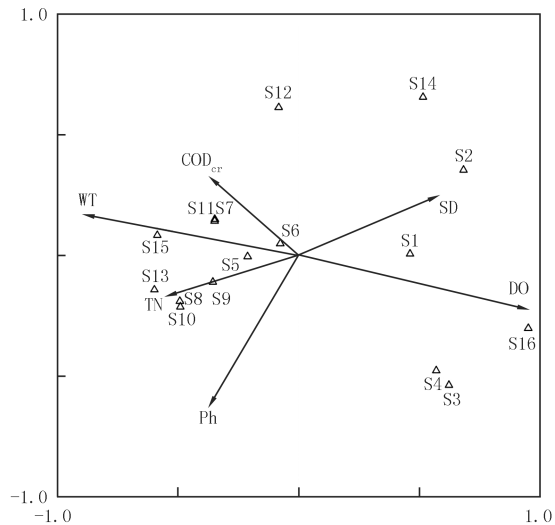


图 4 陈桥东湖浮游植物优势种与环境因子的 CCA 排序图

Fig.4 CCA ordination chart of dominant phytoplankton species and environmental factors in Chenqiao East Lake

节性种植作物带来的农业污染外,整体水质较好。

浮游植物丰度与环境因子的相关性分析结果显示,蓝藻、绿藻与营养盐含量呈极显著正相关,说明蓝藻、绿藻对水质条件的恶化具有一定指示作用,这与水质的调查结果一致。金藻与水温呈极显著负相关,与溶氧极显著正相关,只有在冬季低温的条件下存在优势,这主要与其耐低温的特性有关,且与其他物种几乎无种间关联^[24],也间接反映出冬季较好的水质状况。硅藻则与溶解氧和氧化还原电位呈显著正相关,与pH呈显著负相关,与营养盐含量相关性较差,调查中也发现其种类及数量变化相对稳定,说明其对水体环境的变化具有较强的适应性^[25]。

浮游植物的群落结构变化受物理、化学和生物等因素影响显著,不同地区不同水体不同时期对浮游植物具有显著影响的环境因子也不尽相同。陈洋等^[26]在研究太湖不同区域浮游植物群落结构与环境因子的关系时发现,水温、溶解氧、硝态氮、生化需氧量是影响该地区浮游植物的主要环境因子。在汉丰湖的研究中,发现浮游植物群落结构变化受水温、溶解氧、pH、总氮、总磷、可溶性氮和可溶性磷影响显著^[27]。孟睿等^[28]人在研究长江中下游草型湖泊时发现pH和总磷是影响浮游植物群落分布的主要环境因子。氮磷营养盐、水温以及化学需氧量是影响西枝江流域浮游植物群落结构分布的重要环境因子^[29]。本研究表明陈桥东湖浮游植物优势种受溶解氧和水温影响最为显著,与邓建明等^[30]人的研究结果一致,其次为pH、总氮、透明度和化学需氧量。综合来看,浮游植物普遍与水体营养盐含量、水温、溶解氧、pH等物理化学指标关系密切,但对于不同环境条件下水体中浮游植物群落的结构变化仍应具体情况具体分析。为控制陈桥东湖水体富营养化,可以从降低营养盐输入、定期补水和减少人为干扰着手。

4 结 论

1)调查共发现陈桥东湖浮游植物8门67属118种,其中绿藻47种,种类最多,其次是硅藻,有35种。其丰度变化范围为 $2.52 \sim 39.7 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$,最高值出现在陈桥东湖临近村庄的C1采样点,平均丰度为 $8.54 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

2)浮游植物优势种季节变化规律为:从冬季的硅藻占优到夏秋季的绿藻和蓝藻占优势,与PEG模式基本符合。

3)利用修正的卡尔森营养状态指数(TSI_M)来评价水质,结果显示陈桥东湖整体呈现富营养化状况,且夏季水质最差,冬季相对较好,主要与人为干扰有关。

4)典范对应分析(CCA)结果表明,溶解氧、水温、pH、总氮、透明度和化学需氧量是影响陈桥东湖浮游植物优势种变化的重要环境因子。

参 考 文 献

- [1] 王瑜,刘录三,舒俭民,等.白洋淀浮游植物群落结构与水质评价[J].湖泊科学,2011,23(4):575-580.
- [2] 鞠永富,于洪贤,于婷,等.西泉眼水库夏季浮游动物群落结构特征及水质评价[J].生态学报,2016,36(16):5126-5132.
- [3] 洪松,陈静生.中国河流水生生物群落结构特征探讨[J].水生生物学报,2002,26(3):295-305.
- [4] Salmaso N, Morabito G, Buzzi F, et al. Phytoplankton as an indicator of the water quality of the deep lakes south of the alps[J]. Hydrobiologia, 2006, 563(1): 167-187.
- [5] 任辉,田恬,杨宇峰,等.珠江口南沙河涌浮游植物群落结构时空变化及其与环境因子的关系[J].生态学报,2017,37(22):7729-7740.
- [6] Ter Braak C J F. Canonical Correspondence Analysis: a new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis[J]. Ecology, 1986, 67(5): 1167.
- [7] Naselli-Flores L. Phytoplankton assemblages in twenty-one Sicilian reservoirs: relationships between species composition and environmental factors[J]. Hydrobiologia, 2000, 424(1-3): 1-11.
- [8] 胡俊,郑金秀,池仕运,等.苏皖交界河网区浮游植物群落结构及其与环境因子关系的研究[J].长江流域资源与环境,2017,26(2):282-288.
- [9] 陈丹琴,叶然,魏永杰,等.三门湾浮游植物群落结构与环境因子的关系研究[J].海洋环境科学,2017,36(1):70-75.
- [10] 张家洋.新乡黄河湿地恢复研究[J].现代农业科技,2010,(11):305-307.
- [11] 徐文茜,汤茜,丁圣彦.河南新乡黄河湿地鸟类国家级自然保护区景观格局动态分析[J].湿地科学,2016,14(2):101-107.
- [12] 陈大庆.河流水生生物调查指南[M].北京:科学出版社,2014:315.

- [13] 章宗涉,黄祥飞.淡水浮游生物研究方法[M].北京:科学出版社,1995.
- [14] 金相灿,屠清瑛.湖泊富营养化调查规范[M].北京:中国环境科学出版社,1990.
- [15] 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].北京:中国环境科学出版社,2002.
- [16] 吕唤春,王飞儿,陈英旭,等.千岛湖水体叶绿素 a 与相关环境因子的多元分析[J].应用生态学报,2003,14(8):144-147.
- [17] Flores L N, Barone R. Phytoplankton dynamics in two reservoirs with different trophic state (Lake Rosamarina and Lake Arancio, Sicily, Italy)[J]. Hydrobiologia, 1998, 369-370: 163-178.
- [18] 周然,彭士涛,覃雪波,等.渤海湾浮游植物与环境因子关系的多元分析[J].环境科学,2013,34(3):50-59.
- [19] 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(6):773-779.
- [20] 邱小琼.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):123-129.
- [21] 代龚圆,李杰,李林,等.滇池北部湖区浮游植物时空格局及相关环境因子[J].水生生物学报,2012,36(5):142-152.
- [22] 田志强,田秉晖,辛丽花,等.于桥水库秋季浮游植物群落结构与水质因子的关系[J].环境污染与防治,2011,33(5):64-68.
- [23] Sommer U. The PEG-model of seasonal succession of planktonic events in fresh waters[J]. Archiv Fur Hydrobiologie, 1986, 106(4): 443-471.
- [24] 鲁蕾,吴亦潇,张维昊.城市小型湖泊浮游植物群落结构特征及演替规律——以武汉沙湖为例[J].生态学报,2017,37(18):5993-6004.
- [25] 石晓丹,阮晓红,邢雅囡,等.苏州平原河网区浅水湖泊冬夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析[J].环境科学,2008,29(11): 9-18.
- [26] 陈洋,胡晓东,张建华,等.太湖不同区域浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系[J].水生生态学杂志,2017,38(3):38-44.
- [27] 王宇飞,赵秀兰,何丙辉,等.汉丰湖夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析[J].环境科学,2015,36(3):922-927.
- [28] 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):94-102.
- [29] 李思阳,张娟,姚玲爱,等.西枝江流域浮游植物群落结构特征与主要环境因子的关系研究[J].环境科学学报,2016,36(6):52-60.
- [30] 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):72-80.

Relationship between phytoplankton community structure and environmental factors in Chenqiao East Lake

Ma Jianmin, Chu Yifan, Zhao Shanshan, Li Yingchen, Hou Cuicui, Jin Tongxia

(College of Life Sciences, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

Abstract: In order to study the spatio-temporal variations of phytoplankton community and its relationship with environmental factors in Chenqiao East Lake, four sites were sampled in January, April, July and October of 2017. During this period, 118 phytoplankton species, from 8 phyla and 67 genera were recorded. The most diverse group was the green algae (47 spp, 29 genera), followed by diatoms (35 spp., 15 genera). The abundance of the phytoplankton was varied from 2.52×10^6 to 3.97×10^7 cells $\cdot L^{-1}$, the average abundance was 8.54×10^6 cells $\cdot L^{-1}$, the highest value occurred in the summer. Bacillariophyta dominating during the winter, while Chlorophyta and Cyanophyta dominating during the summer and autumn. Using TSI_M Index to evaluated the water quality, the results showed that Chenqiao East Lake was eutrophication, with the worst in summer and the relatively good in winter, which was mainly related to human interference. Correlation analysis between phytoplankton abundance and environmental factors showed that, cyanobacteria and green algae were significantly positive correlation with nutrients and water temperature ($P < 0.01$), Chrysophyta was significantly negative correlation with water temperature and significantly positive correlation with dissolved oxygen ($P < 0.01$). Canonical correspondence analysis (CCA) results showed that dissolved oxygen, water temperature, pH, total nitrogen, transparency and Chemical oxygen demand are important environmental factors that affect the dominant species of phytoplankton in Chenqiao East Lake.

Keywords: Chenqiao East Lake; phytoplankton; environmental factors; canonical correspondence analysis

[责任编辑 王凤产]