

doi: 10.7541/2021.2020.310

湖北长湖夏、秋季浮游生物功能群特征及主要影响因子

龚森森^{1,2} 李学梅^{3*} 吴嘉伟^{1,2} 柴毅^{1,2*} 杨德国³ 谭凤霞^{1,2} 朱挺兵³

(1. 长江大学湿地生态与农业利用教育部工程研究中心, 荆州 434025; 2. 长江大学动物科学学院, 荆州 434025; 3. 中国水产科学研究院长江水产研究所, 农业农村部淡水生物多样性保护重点实验室, 武汉 430223)

摘要: 为了解长湖浮游生物功能群特征及其主要影响因子, 于2017年7月(夏)及10月(秋)对长湖进行2次采样调查, 并结合冗余分析法(Redundancy analysis, RDA)和Pearson相关性分析法分析了浮游生物功能群的主要影响因子。结果显示, 鉴定出浮游植物7门49属, 共95种, 划分为25个浮游植物功能群, 平均密度为 5.12×10^6 ind./L, 平均生物量为1.663 mg/L; 鉴定出浮游动物3门41属, 共59种, 划分为8个浮游动物功能群, 平均密度为 3.76×10^3 ind./L, 平均生物量为2.803 mg/L。从功能群的平均密度和生物量来看, 夏季显著高于秋季($P < 0.01$), 其中夏季H1站位浮游动物功能群的密度最高, 秋季Y4站位的浮游生物密度和生物量均较高, 且存在功能群A、LCF向E和K的演替趋势。从优势功能群种类来看, B、D、J、L₀、MP、P、T_C、PF、RF及SCF是夏、秋两季的共有优势功能群, 其中L₀、T_C、RF及PF是绝对优势功能群。综合各功能群的主要代表种构成及其适应的生境特征表明, 长湖鱼类对浮游生物的摄食压力较大且水质仍处于富营养化状态。冗余分析结果显示, TN、TP及DO为影响长湖浮游生物功能群的主要环境因子, 水温及pH也与多数功能群呈明显正相关性。Pearson相关性分析结果显示, 浮游植物功能群B、D、J、L₀、Y及浮游动物PF、RF、SCF等彼此间多数具有极显著的相关性($P < 0.01$), 竞争及捕食等生物活动对功能群特征影响较明显。

关键词: 浮游生物; 长湖; 功能群; 环境因子; 冗余分析; Pearson相关性分析

中图分类号: Q145

文献标识码: A

文章编号: 1000-3207(2022)05-0707-11



长湖是湖北省第三大天然淡水湖泊, 也是国家级鲈类种质资源保护区, 其湖区狭长, 多湖湾和湖汊, 是兼具蓄洪、灌溉、养殖和航运等综合功能的重要水域^[1, 2]。因夏、秋季江汉平原降雨量充沛, 且水温、光照等条件适宜, 长湖夏、秋季浮游生物种类、密度及生物量通常居全年高位^[3-5]。目前对长湖生态系统的研究多集中在鱼类、高等水生植物、浮游生物等类群物种组成及水质评价等^[4, 6, 7], 对浮游生物的功能类群及其功能多样性研究尚少。

浮游生物(Plankton)是地球上重要的生命形式之一, 在湖泊生态系统中发挥着重要作用^[8]。其中浮游植物(Phytoplankton)作为水生态系统中的生产者, 在水体中担任固定能量、起始食物链的重要角

色。浮游植物种类众多且大多数个体微小, 其群落结构和功能群各项特征等对水域生态系统及其环境变化有较强的指示作用^[9]。浮游动物作为水域系统的初级消费者, 通过“上行下效”作用不仅影响着鱼、虾和其他经济动物的生物资源和结构, 还制约着浮游植物的群落结构, 调控水质。多种浮游动物的分布与气候有关, 可用作暖流、寒流的指示动物; 此外, 还有不少种类可作为水体污染的指示生物, 如在富营养化水体中, 剑水蚤(*Cyclops*)、臂尾轮虫(*Brachionus*)等一般作为优势类群存在^[10]。

系统分类法(Systematics)是研究浮游动、植物种群的传统方法, 2002年Reynolds^[11]首次提出了淡水浮游植物功能群(Functional group)的分类方法,

收稿日期: 2021-01-22; 修订日期: 2021-08-11

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFD0900603); 现代农业产业技术体系专项资金(CARS-46); 中国水产科学研究院基本科研业务费(2020TD57); 湿地生态与农业利用教育部工程研究中心(KFT202006)资助 [Supported by the National Key Research and Development Program (2019YFD0900603); China Agriculture Research System (CARS-46); Basic Scientific Research Operating Cost Support from Chinese Academy of Fishery Sciences (2020TD57); Funded by Engineering Research Centre of the Ministry of Education for Wetland Ecology and Agriculture (KFT202006)]

作者简介: 龚森森(1994—), 男, 硕士研究生; 研究方向为水生生物学。E-mail: 502496883@qq.com

通信作者: 李学梅(1985—), 女, 博士, 副研究员; 研究方向为水产健康养殖。E-mail: xmli@yfi.ac.cn 柴毅(1978—)女, 博士, 副教授; 研究方向为水生生物学。E-mail: chaiyi123456@126.com *共同通信作者

引起了生态学者们的广泛关注,并被运用到浮游动物的研究中。功能群是指具有相似结构或功能的一类物种的集合。即是将一个生态系统内一些具有相似特征,或行为上表现出相似特征的物种尽可能地归类。功能群的引入使学者们从单纯的对浮游生物群落特征研究及水质评估等层次上升到研究浮游生物在水体能量流动中的作用^[12]。大部分鱼类属春季产卵型,孵化出的鱼苗需要浮游生物作为开口饵料,此时浮游生物的充足与否、种类组成及水环境健康状况等可直接影响苗种的生长和成活率,夏、秋两季是鱼类生长的旺季,尤其对于对当年幼鱼的生长尤其重要。因此,本研究选取夏、秋两季的浮游生物作为研究对象,分析其功能类群特征及其主要影响因子,综合评价长湖水域生态系统健康状况,以期对长湖水生态系统功能多样性研究及可持续发展利用奠定基础。

1 材料与方法

1.1 区域概况及采样点设置

长湖位于荆州、荆门及潜江三市交界处,是长江中游流域典型的富营养化浅水湖泊,其水域面积为131 km²,年平均水深约为2.1 m,其中最深可达6 m^[13, 14]。如图1所示,长湖自西向东可分为庙湖区、海子湖区、马洪台湖区和圆心湖区4个区域。庙湖区被两条堤坝拦截成静水区域,故未在此区域设置采样点。海子湖区狭长,分布有多个进出水口,马洪台区和圆心湖区均为开阔水域,其中圆心湖区有较多的湖汊和湖湾。于2017年7月(夏)及10月(秋)分别对长湖进行样品采集,共设置10个采样点

(图1),其中海子湖区3个(H1—H3),马洪台区3个(M1—M3),圆心湖区4个(Y1—Y4)。

1.2 样品的采集与处理

将25号浮游生物网在水面之下0.5 m处呈“∞”型拖动采集浮游生物定性样本,反复涮洗网具并浓缩到30—50 mL塑料瓶中,立即加入4%甲醛溶液固定;用5 L采水器在水下0.5 m及1 m处各采水1次,混匀后用1 L塑料瓶取1 L水样并立即加入10—15 mL 鲁哥试剂固定,静置48h浓缩到30 mL后作为浮游植物和原动物轮虫的定量样本;剩下的水样用13号浮游生物网过滤并涮洗干净,立即用4%甲醛固定,于实验室静置48h后浓缩至30 mL,得到枝角类和桡足类定量样本。对浓缩后的浮游生物样本进行观察鉴定并计数;生物量通过查表(《水生生物学》P_{494—498}、P_{505—506})^[15]或采用体积换算法($10^9 \mu\text{m}^3 \approx 1 \text{ mg}$)计算获得。种类鉴定参照《水生生物学(形态和分类)》^[16]、《中国淡水轮虫志》^[17]及《淡水微型生物图谱》^[18]等书籍。

1.3 水质理化因子的检测及分析

现场采用哈希HQ40d水质分析仪测定水温(WT)、pH、溶解氧(DO)和电导率(Conductivity, δ)等参数,采用黑白盘测定透明度(SD),哈希2100Q便携式浊度仪测定固体悬浮物(TSS),SM-5测深仪测定水深(Depth)。

现场取水样(用采水器取0.5 m及1 m处湖水混合)1 L于采样瓶中并做好标记,运回实验室后立即进行其他理化因子分析:化学需氧量(COD)、总氮(TN)、总磷(TP)、磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)、硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)、氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)和亚硝态氮($\text{NO}_2^-\text{-N}$)分别通过重

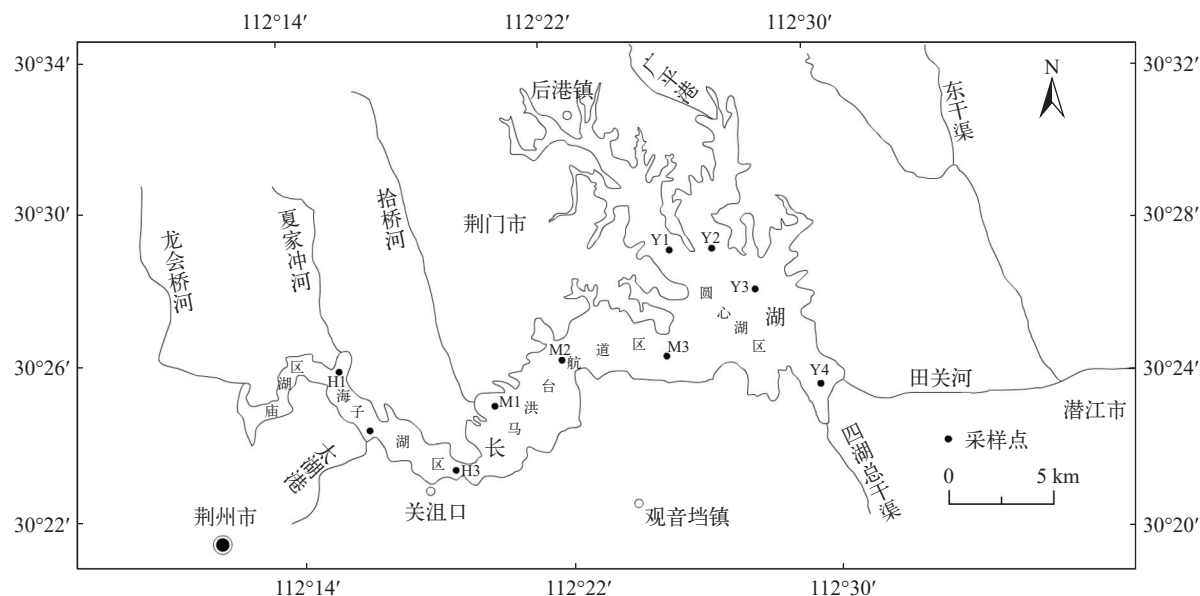


图1 长湖采样点示意图

Fig. 1 Map of the sampling sites in Changhu Lake

铬酸盐反应法、硫酸盐氧化法、消解-抗坏血酸法、磷钼兰比色法、镉反应法、水杨酸法和重氮化法在哈希多参数水质分析仪DR2900(美国)完成;另外取500 mL水样通过玻纤膜(0.45 μm 孔径)抽滤后,采用丙酮萃取,在分光光度计中测量相应波长的光密度,从而计算叶绿素 a (Chl. a)含量。

1.4 浮游生物功能群划分

参考Reynolds等^[11]及Padisák等^[19]提出的浮游植物功能群划分方法,根据浮游植物敏感性和耐受性将长湖浮游植物划分为B、D、J、L₀、MP、P和T_C等25个常见的功能类群;参考安睿等^[21]已报道的浮游动物功能群划分方法,根据浮游动物形体大小及摄食特性等特征,将长湖浮游动物划分为PF、RF、RC和SCF等8个功能群。

由于浮游生物功能群分类较多,部分功能群体只有一种浮游生物,且只在某个季节的某个样点出现,密度也较低,不足以代表整体功能群的特征,也不便于统计分析,因此参考浮游生物优势种的筛选方式^[20],计算出夏、秋季的浮游生物优势功能群代替整体进行研究分析。将相对密度(某功能类群密度占浮游植物或浮游动物总密度的百分比)记作 P_i ,第 i 类功能群在各站位出现的频率记作 f_i ,则浮游生物功能群的优势度 Y 表示为:

$$Y = P \times f_i$$

将优势度 $Y > 0.5\%$ 的功能群定义为优势功能群,将 $Y > 10\%$ 的功能群定义为绝对优势功能群。

1.5 数据分析

参考《数量生态学—R语言的应用》^[22],运用R_V3.5.3软件的Rstudio窗口进行排序及分析——两季节浮游植物优势功能群密度及浮游动物优势功能群生物量与环境因子数据经 $\lg(X+1)$ 转换后,先做去趋势对应分析(DCA),根据各轴距再进行冗余分析(RDA)或典型相关分析(CCA),确定其相关性。Pearson相关性分析则通过IMB SPSS Statistics 19进行分析。

2 结果

2.1 理化因子

如表1所示,参考GB3838-2002《地面水环境质量标准》^[23]可知,两次采样所测TP均严重超标,TN含量处于养殖用水及人体非直接接触用水水平之间(III—IV类水);全湖夏、秋季水质均呈弱碱性。此外,长湖夏季到秋季水质理化指标变化较明显,其中夏季Depth、WT、 δ 、TP和COD极显著($P < 0.01$)高于秋季,TSS夏季显著($P < 0.05$)高于秋季(表1)。

2.2 浮游生物功能群

功能群划分 经两次调查长湖共鉴定出浮

表1 长湖夏、秋两季水质理化因子

Tab. 1 Physical and chemical factors of water quality in summer and autumn of Changhu Lake

环境因子 Environmental factor	季节 Season		统计分析 Statistical analysis (ANOVA)	
	夏Summer	秋Autumn	F	P
水深Depth (m)	3.18±0.49	1.71±0.36	34.249	0
透明度SD (m)	0.44±0.026	0.41±0.067	3.784	0.068
pH	8.71±0.35	8.45±0.23	3.749	0.069
水温WT (°C)	29.71±0.60	19.24±0.88	703.685	0
溶解氧DO (mg/L)	9.90±1.83	8.81±1.02	1.637	0.217
电导率 δ ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	336.00±14.11	374.17±10.14	18.609	0
总悬浮物TSS (mg/L)	14.14±2.42	8.60±3.41	6.665	0.019
总磷TP (mg/L)	0.686±0.210	0.24±0.106	17.089	0.001
正磷酸盐PO ₄ ³⁻ -P (mg/L)	0.135±0.115	0.207±0.067	3.735	0.069
总氮TN (mg/L)	0.789±0.242	1.30±0.48	0.003	0.954
氨氮NH ₃ -N (mg/L)	0.059±0.005	0.040±0.005	0.046	0.833
硝酸盐氮NO ₃ ⁻ -N (mg/L)	0.444±0.034	0.26±0.014	1.869	0.188
亚硝酸盐氮NO ₂ ⁻ -N (mg/L)	0.017±0.0040	0.01±0.0064	2.83	0.11
化学需氧量COD (mg/L)	20.71±2.12	20.17±5.79	25.442	0
叶绿素 a Chl. a (mg/L)	14.00±3.74	8.00±2.86	0.463	0.505

游植物95种,隶属于7门48属,其中绿藻门50种,硅藻门28种,蓝藻门11种,裸藻门和隐藻门各2种,金藻门和甲藻门各1种;共划分为25个浮游植物功能群,包括寡营养型功能群2种[A(扎卡四棘藻*Attheya zachariasii*) and E(锥囊藻*Dinobryon* sp.)],中、富营养型功能群15种(B、H₁、K、T_C等),及广营养型功能群8类(D、J、L₀、MP等)。浮游植物功能群平均密度为 5.12×10^6 ind./L(其中夏季平均为 6.48×10^6 ind./L,秋季平均为 4.59×10^6 ind./L),平均生物量为1.663 mg/L(其中夏季平均为2.395 mg/L,秋季为0.931 mg/L)。

共鉴定出浮游动物59种,隶属于3门41属。其中原生动物13属18种,轮虫14属25种,枝角类6属6种,桡足类7属10种。共划分出8个浮游动物功能群:PF(原生动物滤食者)、RC(轮虫捕食者)、RF(轮虫滤食者)、SCF(小型浮游动物滤食者)、MCF(中型浮游动物滤食者)、MCC(中型浮游动物捕食者)、LCF(大型浮游动物滤食者)和LCC(大型浮游动物捕食者)。此外,秋季未检测到功能群LCF。浮游动物功能群平均密度为 3.76×10^3 ind./L(其中夏季平均为 5.95×10^3 ind./L,秋季平均为 1.58×10^3 ind./L),平均生物量为2.80 mg/L(其中夏季平均为3.97 mg/L,秋季为1.63 mg/L)。

优势功能群 选取Y>0.5%的浮游生物功能群为优势功能群, 由表 2 可知, 夏季优势功能群为 RF、SCF, 秋季为B、D、J、K、L₀、Lr、MP、P、T_C、X₁、PF、RF、RC、SCF, 其中B、D、J、B、D、H₁、J、L₀、MP、P、T_C、W₁、Y、PF、L₀、MP、P、T_C、PF、RF及SCF是两季的共有优

表 2 长湖浮游生物优势功能群

Tab. 2 Dominant functional groups of plankton in Changhu Lake

优势功能群 Dominant functional group	生境描述或摄食习惯 Habitat described or feeding habit	代表种类 Representative species	门类 Class	优势度Y Degree of dominance (%)	
				夏Summer	秋Autumn
B	中小型中营养湖泊	小环藻 <i>Cyclotella</i> sp.	硅藻门	6.27	12.90
D	浑浊的浅水水体	谷皮菱形藻 <i>Nitzschia palea</i> , 尖针杆藻 <i>Synedra acus</i> , 针杆藻 <i>Synedra</i> sp., 肘状针杆藻 <i>Synedra ulna</i>	硅藻门	2.75	3.85
H ₁	富营养型小型湖泊, 有分层现象, N含量低	螺旋鱼腥藻 <i>Anabaena spiroides</i> , 固氮鱼腥藻 <i>Anabaena azotica</i>	蓝藻门	4.95	0.47
J	浅的混合高富集水体	微小四角藻 <i>Tetraedron minimum</i> , 二角盘星藻 <i>Pediastrum duplex</i> , 集星藻 <i>Actinastrum hantzschii</i> , 二尾栅藻 <i>Scenedesmus bicaudatus</i> , 四尾栅藻 <i>Scenedesmus quadricauda</i> , 四角十字藻 <i>Crucigenia quadrata</i> 等	绿藻门	4.84	9.35
K	营养物质丰富的浅水水体	细小隐球藻 <i>Aphanocapsa elachista</i>	蓝藻门	0.00	0.53
L ₀	寡营养型到富营养型、大型到中型、深水型到浅水型湖泊	普通等片藻 <i>Diatoma vulgare</i> , 银灰平裂藻 <i>Merismopedia glauca</i> , 优美平裂藻 <i>Merismopedia elegans</i>	硅藻门、蓝藻门	39.19	42.03
Lr	深的、水体排放引起强烈和持续扰动的富营养水库	颗粒直链藻 <i>Melosira granulata</i> (和角甲藻 <i>Ceratium hirundinella</i> 协同时出现时)	硅藻门	0.24	10.09
MP	经常受到搅动的、无机的、浑浊的浅水湖泊	橄榄形异极藻 <i>Gomphonema olivaceum</i> , 扁圆舟形藻 <i>Navicula placentula</i> , 偏肿桥弯藻 <i>Cymbella ventricosa</i> 等	硅藻门	0.51	0.93
P	与功能类群N相似的生境, 但水体营养状态更高	脆杆藻 <i>Fragilaria</i> sp., 颗粒直链藻最狭变种 <i>Melosira granulata</i> var. <i>Angustissima</i> , 拟新月藻 <i>Closteropsis longissima</i> 等	硅藻门、绿藻门	9.18	1.69
T _C	富营养化静止水体, 水流速度慢、大型挺水植物密集河流	席藻 <i>Phormidium</i> sp., 蜂巢席藻 <i>Phormidium favosum</i> , 窝形席藻 <i>Phormidium faveolarum</i>	蓝藻门	22.65	10.15
X ₁	富营养和高度富营养型的浅水水体	小球藻 <i>Chlorella vulgaris</i> , 狭形纤维藻 <i>Ankistrodesmus angustus</i> , 湖生小椿藻 <i>Characium limneticum</i> , 小型月牙藻 <i>Selenastrum minutum</i> 等	绿藻门	0.16	1.00
Y	牧食强度低的静水水体	扁圆卵形藻 <i>Cocconeis placentula</i> , 尖尾蓝隐藻 <i>Chroomonas acuta</i> , 嗜蚀隐藻 <i>Cryptomonas erosa</i>	硅藻门、隐藻门	0.62	0.66
PF	滤食者, 以细菌、藻类和有机质为食	原生动物绝大部分种类: 王氏似铃壳虫 <i>Tintinnopsis wangi</i> , 针棘匣壳虫 <i>Centropyxis aculeata</i> , 纤毛虫 <i>Ciliophora</i> sp., 毛板壳虫 <i>Coleps hirtus</i> , 侠盗虫 <i>Strobilidium</i> sp., 钟虫 <i>Vorticella</i> sp.等	原生动物	60.04	30.39
RF	滤食者, 以细菌、藻类和有机质为食	广布多肢轮虫 <i>Polyarthra vulgaris</i> , 暗小异尾轮虫 <i>Trichocerca pusilla</i> , 长三肢轮虫 <i>Filinia longiseta</i> , 萼花臂尾轮虫 <i>Brachionus calyciflorus</i> , 螺形龟甲轮虫 <i>Keratella cochlearis</i> , 矩形龟甲轮虫 <i>Keratella quadrata</i> 等	轮虫类	26.69	63.34
RC	捕食者, 以其他轮虫和小型甲壳动物等为食	前节晶囊轮虫 <i>Asplanchna priodonta</i>	轮虫类	0.39	0.67
SCF	滤食者, 以细菌、藻类、有机质和原生动物为食	角突网纹溞 <i>Ceriodaphnia cornuta</i> , 长额象鼻溞 <i>Bosmina longirostris</i> , 近亲裸腹溞 <i>Moina affinis</i> , 颈沟基合溞 <i>Bosminopsis deitersi</i> , 中型尖额溞 <i>Alona intermedia</i> , 剑水蚤桡足幼体, 无节幼体	桡足类, 枝角类	2.07	1.50

注: 表中“代表种类”均为此次调查鉴定出的物种
Note: The “representative species” in the table are all the species identified in this survey

势功能群, 浮游植物功能群代表生境为中度富营养化浅水水体, 浮游动物功能群则主要为中小型滤食性种类组成。 L_0 和 T_c 为两季共有绝对优势功能群, 其相对平均密度及相对平均生物量分别占39.19%、22.65%和42.03%、10.55%。浮游动物功能群生物量及密度数据差异较大, 从生物量来看, 两季浮游动物功能群均以RF、SCF、PF及RC为主(>99.6%), 其中功能群RF生物量在夏、秋季分别占总量的63.95%及73.15%, 占绝对优势; 从浮游动物密度来看, PF及RF是密度主要提供者(>96.36%)。从浮游生物功能群水平分布来看(图2), 各功能群的时空差异较为明显, 夏季H1站位浮游动物功能群密度及生物量均最高, 圆心湖区浮游植物生物量普遍较高(T_c 为生物量主要提供者); 秋季Y4站位浮游生物密度及生物量均较高, H2及M1站位在夏秋两季较其他站位均低。优势功能群从夏季到秋季的演替表现为 $H_1+W_1+Y \rightarrow K+Lr+X_1$ 。

2.3 相关性分析

理化因子与浮游生物功能群的相关性 利用回归分析筛选出与优势功能群有相关性的环境因子(SD、pH、WT、DO、TP、 PO_4^{3-} -P、TN、 NH_3 -N和 NO_3^- -N)作为解释变量, 以优势浮游植物功能群密度及优势浮游动物功能群生物量作为响应变量, 进行排序分析——解释变量进行 $\ln(X+1)$ 转化; 响应变量经hellinger转化后再做DCA分析, 结果显示Axis lengths最大值(DCA1)为1.119(夏)和0.586(秋), 均小于3.0, 因此选做冗余分析(RDA), 获得优势功能群-环境因子相关双序图(图3)。物种-环境的累计解释比率均>70%(表3), 说明该RDA排序可以较好的反映浮游生物功能群与环境因子的关系^[24]。

夏季RDA双序图显示, 水温(WT)与MP、B、D、 L_0 等多数浮游植物功能群具有较强的正相关性, 与 W_1 、Y具有明显负相关性; 总氮(TN)、总磷(TP)、正磷酸盐(PO_4^{3-} -P)、溶解氧(DO)、pH等环境因子与RC、RF、PF等浮游动物具有较强正相关性, 与SCF则明显负相关。秋季的RDA双序图显示, 氨氮(NH_3 -N)、硝酸盐氮(NO_3^- -N)、总氮(TN)、正磷酸盐(PO_4^{3-} -P)是功能群B、D、J、 L_0 、Lr、Tc、 X_1 的主要影响因子, 也是功能群K、RC、PF的主要限制因子; 总磷(TP)、pH及溶解氧(DO)对功能群MP、RF、SCF的影响较大。

浮游生物功能类群间的相关性 将浮游植物优势功能群及全部浮游动物功能群进行Pearson相关性分析。结果表明, 夏季功能群B与D、J、Y、PF、RF, 功能群D与J、 L_0 、 W_1 、Y、RF, 功能

群J与Y、SCF及功能群 L_0 与 W_1 等显著相关($P<0.01$), 功能群PF与RF、LCC和MCC呈显著相关性($P<0.01$), 功能群MCF与LCF具有一定的相关性($P<0.05$; 表4); 秋季的主要相关性变化为浮游植物优势功能群K与B、D、 L_0 、Lr显著相关($P<0.01$), Tc与B、D、 L_0 及Lr显著相关($P<0.01$), 同时也与PF具有相关性($P<0.05$; 表4)。

3 讨论

3.1 浮游生物功能群特征

研究浮游生物功能群的时空变化特征是监测水域环境变化的重要手段之一^[25]。从时间上看, 长湖夏季到秋季浮游生物功能群总数虽未发生变化, 但存在功能群A、LCF向E和K的演替, 且秋季平均密度和生物量显著低于夏季($P<0.01$)。功能群A为寡营养型功能群, 在富营养化水体中不常见, LCF为大型浮游动物滤食者, 趋向于有机质丰富的水环境; E检测到为适应低有机质的水体锥囊藻种属(*Dinobryon*), K检测到为适应低水温环境的隐球藻种属(*Aphanocapsa*)。夏季水温较高, 且有机质含量丰富, 浮游生物各类功能群体均大量增殖, 功能群A及LCF作为环境敏感类群出现, 但在富营养化的长湖中并不形成优势类群; 秋季水温下降, 降雨量减少, 水中有机质含量降低, 更符合功能群E和K生存条件, 但对其他多数浮游生物类群的生长具有一定的限制作用^[26], 因而造成物种演替以及浮游生物平均密度和生物量下降。从空间上看, 夏季H1站位浮游动物功能群密度及生物量远高于其他站位, H1、H3及M2站位浮游植物功能群密度较高; 秋季Y4浮游动物、植物功能群密度均较高。分析原因主要是H1位点靠近庙湖区及夏家冲河的河口, “引江入汉”将庙湖区隔离成静水, H1的地理位置处于支流汇入口到拦截坝前的一个回水湾, 营养盐、有机碎屑等易沉积, 也会造成浮游植物大量繁殖; H3站位靠近关沮口码头和村落, 人类活动频繁, 机船搅动、生活排污等造成水体N、P等营养盐含量上升, 易导致水体中藻类暴发; 尤其是夏季水温高, 藻类生长速度远快于其他季节^[27]。Y4位点作为四湖总干渠及田关河的入湖口, 也是流域面源污染的入湖口, 因此浮游植物密度也较高。滤食性浮游动物以浮游植物及有机碎屑等作为饵料来源, 二者功能类群的密度及生物量变化趋势通常也相同。

优势功能群的变化特征能够很大程度上反映水环境中浮游生物的整体变化规律。本研究中浮游生物功能群 L_0 、 T_c 、PF及RF在夏、秋两季均占绝对优势(优势度 $Y>10\%$), 说明其为长湖最有代表

性的浮游生物功能类群。分析其在长湖的物种组成及生境特征, L_0 以等片藻属(*Diatoma*)和平裂藻属(*Merismopedia*)为代表种, 属于广营养型种属, 是长

湖常见的蓝藻及硅藻种类; T_c 检测到的均为胶鞘藻(席藻)属(*Phormidium*), 该藻属是能够引起水华的蓝藻之一, 此类群成为优势功能类群表明长湖富营

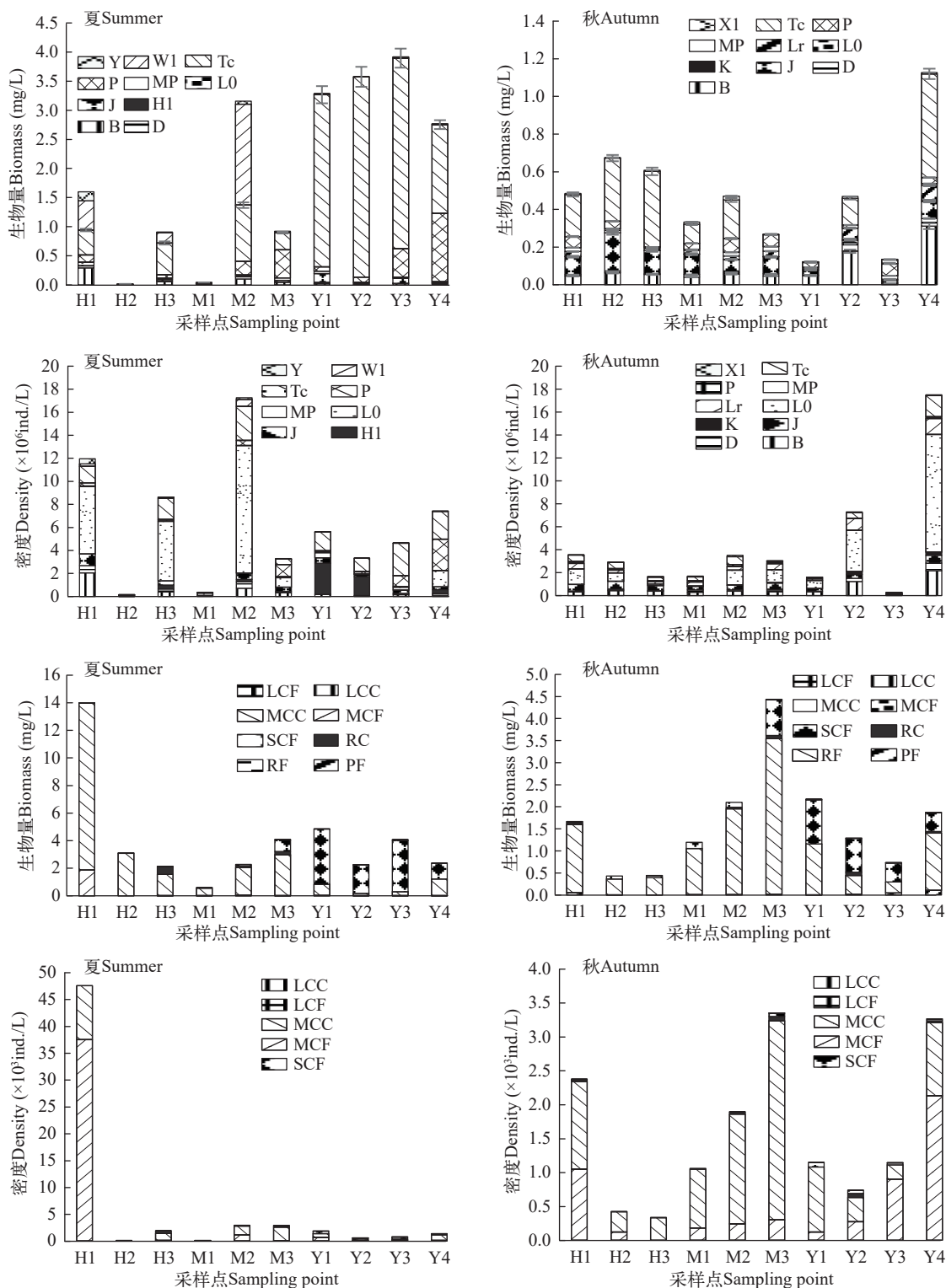


图2 长湖夏、秋季浮游生物功能群水平分布

Fig. 2 Horizontal distribution of plankton function groups in summer and autumn in Changhu Lake

由于浮游植物功能群和浮游动物功能群密度及生物量数据数量级不同, 故分别作图

Because the density and biomass data of phytoplankton functional groups and zooplankton functional groups are different in magnitude, they are drawn separately

养化比较严重; 功能群PF(原动物虑食者)个体微小, 繁殖快, 常在小块有利环境中集群生长, 如本研究中显示PF于夏季在H1站位大量聚集, 且主要种属为纤毛虫 (*Ciliophora* sp.; 49.22%) 和狭盗虫 (*Strobilidium* sp.; 33.59%) 等有机质丰富的淡水中常见种^[15], 表明H1站位有机质较丰富, 与上述时空分布特征结论相一致。功能群RF(轮虫滤食者)生物量及密度均较高, 且生物量占比最高(89.32%), 检测到的种属较多, 主要包括广布多肢轮虫(*Polyarthra vulgaris*; 39.57%), 暗小异尾轮虫(*Trichocerca pusilla*; 32.93%)及螺形龟甲轮虫(*Keratella cochlearis*; 10.65%), 均为广营养型轮虫, 且在营养盐及有机质丰富的水体中较易形成优势, 大部分为仔鱼的良好开口饵料。已有研究报道鱼类摄食压力大的水体浮游动物生物量以小型的轮虫和小型枝角类为主, 鱼类摄食压力小的水体以大型的枝角类和桡足类为主^[28, 29], 表明长湖夏季和秋季鱼类的摄食压力较大, 浮游动物功能群以小型的浮游动物功能类群(PF和RF)为主。此次划分的长湖夏、秋季浮游植物功能群与祁梅等^[30]报道的长湖2015年浮游植物功能群相比, 功能群总数仅减少1个, 浮游植物优势功能群由16个减少为10个, 可能是种属差异性及采样点变动导致部分类群出现变化及优势种筛选指标变动等因素导致; 但主要优势类群除Tc外都包含在其中(B、D、J、L₀和MP), 表明长湖从2015到

2017的浮游植物功能类群保持在相对稳定状态。

3.2 浮游生物功能群主要影响因子

环境因子 浮游生物功能群在不同水体具有不同的特征, 其变化规律是众多环境因子在时间和空间上相互影响的结果^[31]。本研究RDA分析显示, 夏季TP、TN、DO、pH、PO₄³⁻-P及SD对多数浮游生物功能群的有明显相关性, 秋季TN、NO₃⁻-N、pH、DO和WT对部分功能群的影响较大(图3)。众多研究表明, 水体中N、P作为浮游生物合成蛋白质、核酸及脂类等物质的关键元素, 是影响浮游动、植物群落特征的主要环境因子^[3, 32-35]。pH通过影响浮游生物细胞膜电荷变化而影响其对营养物质的吸收, 从而对其群落结构产生影响^[13], Husserr等^[36]研究表明, pH降低对浮游植物具有抑制性。DO表示水体中分子态氧的含量, 图3显示其主要与B、D、MP、RC及RF呈现正相关性, 功能群B、D和MP为小环藻属(*Cyclotella* sp.)、菱形藻属(*Nitzschia*)、舟形藻属(*Navicula*)及针杆藻属(*Synedra*)等一些常见硅藻门种类, 此类群作为优势功能群大量存在时, 叶绿素含量高, 其光合作用产物的DO含量也会随之升高。功能群PF主要以细菌、藻类和有机质为食, 水体中DO含量的变化一定程度上反映了藻类丰度变化, 藻类的代谢及死亡也会造成细菌及有机质含量的变化; RF以细菌、藻类、有机质和原生动物为食, TN、TP及DO含量正

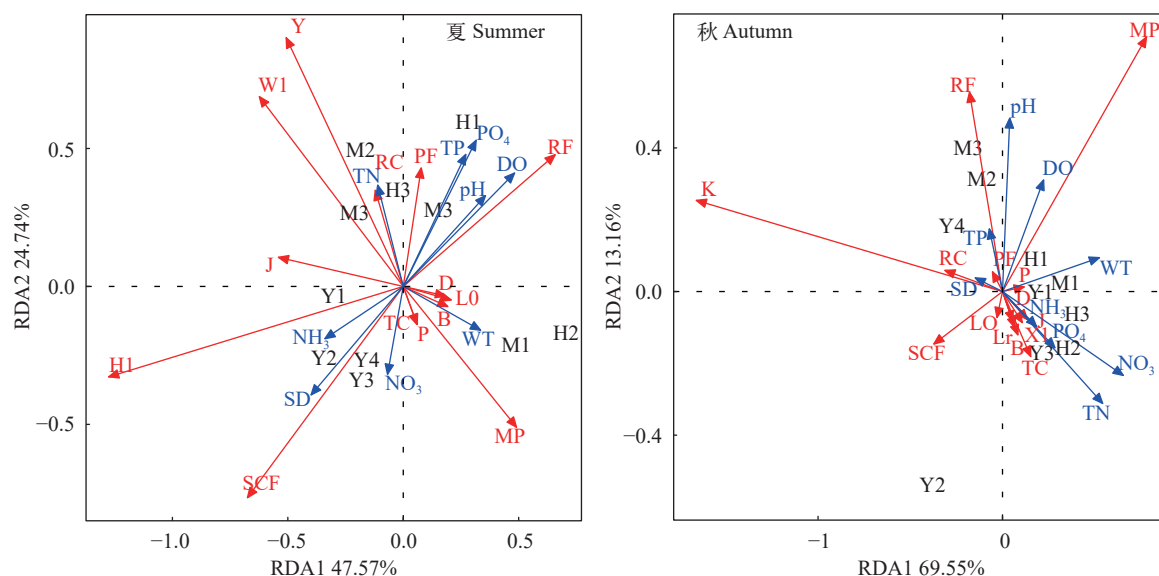


图3 长湖夏、秋季浮游植、动物功能群与环境因子RDA分析图

Fig. 3 RDA analysis of zooplankton and phytoplankton functional groups and environmental factors in summer and autumn of Changhu Lake

图中箭头表示浮游生物功能群(表2)和环境因子(SD-透明度、pH、WT-水温、DO-溶解氧、TP-总磷、PO₄-正磷酸盐、TN-总氮、NH₃-氨氮和NO₃-硝酸盐氮); H1—H3、M1—M3、Y1—Y4表示采样点

In the figure, the arrows represent functional groups of plankton (Tab. 2) and environmental factors (SD-transparency, pH, WT- water temperature, DO- dissolved oxygen, TP-total phosphorus, PO₄-orthophosphate, TN-total nitrogen, NH₃-ammonia nitrogen, NO₃-nitrate nitrogen); H1—H3, M1—M3 and Y1—Y4 represent sampling points

表 3 夏、秋季优势功能群RDA分析特征值、解释比率及累积解释比率

Tab. 3 The eigenvalue, interpretation rate and cumulative interpretation rate on summary statistics of RDA

季节 Season	排序轴 Sorting shaft	特征值 The eigenvalue	解释比率 Interpretation rate (%)	累积解释比率 Cumulative interpretation rate (%)
夏Summer	RDA1	0.0035	47.57	72.31
	RDA2	0.0018	24.74	
秋Autumn	RDA1	0.0307	69.55	82.71
	RDA2	0.0058	13.16	

向反馈影响水体中藻类及滤食性浮游动物的类群丰度,也间接影响大型捕食类浮游动物,是浮游生物功能群的主要环境影响因子。

竞争与捕食 相同生态位(Ecological niche)上的两个功能类群,利用资源的形式相近,其密度越大竞争也越激烈;不同生态位上的功能类群则可能存在捕食关系,捕食者与被捕食者互相影响群落结构变化^[37, 38],浮游生物种间竞争及捕食等行为会对其种群变化产生作用力。Pearson相关性分析的结果表明,小型浮游生物功能群B、D、L₀、J、Y、RF、PF及SCF等彼此间多数具有极显著的相

关性($P<0.01$)。一方面,B、D、L₀、J、Y等类群均包含硅藻门及蓝、绿藻门中营浮游生活的常见种属,适应的特征生境大多接近为富营养化的浅水水体,在同一生态位的不同物种彼此竞争栖息地、食物来源等,受到鱼类及浮游动物的摄食压力时也是同等的,可替代的,往往一种藻类的群落特征变化就牵动着其他类群变化,互相协同又互相制约,形成明显竞争关系^[39];另一方面,PF、RF及SCF为滤食性浮游动物功能群体,自身形体较小,小型浮游植物(功能群B、D等)为其主要的食物来源,双方构成捕食关系。大中型浮游动物类群LCC和MCC呈显著相关性($P<0.01$),MCF与LCF具有一定的相关性($P<0.05$)。LCC及MCC以捕食轮虫、枝角类、双翅目昆虫(摇蚊幼虫)和寡毛类等为生,不仅存在竞争关系,LCC对MCC还可能存在捕食关系。表4可以看出,大型浮游动物功能群与浮游植物群均无显著相关性,原因可能有两种:第一,长湖在2017年鱼类资源丰富,大型浮游动物功能类群受到捕食压力较大,密度及丰富度被压缩的很低,其种群变化主要与鱼类资源量相关;第二,捕食类大型浮游动物主要捕食小型浮游动物,与浮游植物无直接捕食关系,间接影响的作用力较小。

表 4 夏、秋季浮游生物功能群间Pearson相关性分析

Tab. 4 Pearson correlation analysis among functional groups of plankton in summer and autumn

秋	B	D	J	K	L ₀	L _r	MP	P	Tc	X1	PF	RF	RC	SCF	MCF	MCC	LCC		
秋	夏	B	D	H1	J	L ₀	MP	P	Tc	W1	Y	PF	RF	RC	SCF	MCF	MCC	LCF	LCC
B	B		0.940**	0.439	0.946**	0.971**	0.940**	0.132	-0.077	0.864**	0.14	0.670*	-0.058	0.396	0.108	0.317	0.072		-0.144
D	D	0.893**		0.482	0.876**	0.947**	0.920**	0.291	0.119	0.862**	0.179	0.713*	0.118	0.381	0.049	0.446	-0.054		-0.231
J	H1	-0.248	-0.343		0.292	0.446	0.458	0.666*	0.501	0.551	0.061	0.259	0.322	0.303	-0.33	0.128	-0.286		-0.327
K	J	0.912**	0.833**	0.042		0.899**	0.958**	-0.068	-0.122	0.698*	0.1	0.588	-0.001	0.591	0.282	0.389	0.342		-0.194
L ₀	L ₀	0.604	0.889**	-0.251	0.616		0.913**	0.294	0.052	0.897**	0.109	0.805**	0.056	0.386	0.099	0.45	-0.009		-0.137
L _r	MP	-0.053	-0.316	0.045	0.022	-0.48		0.12	0.055	0.769**	0.169	0.640*	0.132	0.638*	0.131	0.353	0.224		-0.28
MP	P	-0.129	-0.052	-0.202	-0.037	-0.097	-0.017		0.669*	0.374	-0.134	0.468	0.54	-0.014	-0.209	0.382	-0.493		0.008
P	Tc	0.184	0.405	0.079	0.392	0.524	-0.55	0.422		0.112	0.259	0.093	0.840**	0.379	-0.061	0.242	-0.171		-0.084
Tc	W1	0.508	0.811**	-0.207	0.527	0.950**	-0.507	-0.117	0.503		0.335	0.759*	-0.062	0.165	-0.323	0.223	-0.391		-0.312
X1	Y	0.991**	0.878**	-0.251	0.881**	0.58	-0.068	-0.148	0.127	0.517		-0.109	0.18	0.19	-0.427	-0.269	-0.327		-0.345
PF	PF	0.945**	0.718*	-0.197	0.805**	0.338	0.017	-0.137	0.007	0.248	0.953**		0.047	0.173	-0.073	0.582	-0.206		-0.219
RF	RF	0.970**	0.785**	-0.249	0.873**	0.429	0.127	-0.043	0.046	0.319	0.963**	0.966**		0.587	0.252	0.462	0.132		-0.015
RC	RC	0.02	0.2	-0.175	0.075	0.385	0.079	-0.127	0.114	0.159	-0.083	-0.177	-0.026		0.337	0.343	0.606		-0.299
SCF	SCF	-0.363	-0.498	0.801**	-0.067	-0.474	0.06	0.139	0.305	-0.387	-0.372	-0.268	-0.338	-0.388		0.334	0.807**		0.634*
MC	MC	-0.183	-0.262	0.167	-0.121	-0.3	0.437	0.018	-0.326	-0.245	-0.164	-0.175	-0.077	0.041	0.135		0.09		-0.215
F	F	-0.247	-0.305	-0.082	-0.125	-0.35	0.075	0.464	0.465	-0.294	-0.28	-0.211	-0.225	-0.225	0.517	-0.029			0.283
MC	MC																		
C	C																		
		LCF	-0.195	-0.244	0.427	-0.191	-0.237	-0.226	-0.176	-0.103	-0.171	-0.159	-0.117	-0.187	-0.177	0.341	0.667*	-0.133	
		LCCLCC	-0.138	-0.183	-0.182	-0.099	-0.216	-0.082	0.16	0.441	-0.158	-0.168	-0.115	-0.177	-0.177	0.376	-0.167	0.923**	-0.111

注: “**”表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关; “*”表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。斜线下方为夏季,斜线上方为秋季
Note: “**” indicates a significant correlation at 0.01 level (bilateral); “*” indicates a significant correlation at 0.05 level (bilateral). Below the diagonal is summer, above the diagonal is autumn

3.3 长湖水域生态系统的健康状况评价及可持续发展建议

根据浮游生物功能群群落结构特征(种类组成、生境类型、丰度、生物量)和水质因子综合评价长湖2017年水域生态系统为富营养化状态。与2012年、2015年郭坤^[13]的评价结果趋于一致,但根据TN、TP等营养盐含量降低及物种丰富度的增加等判断富营养化程度有所下降。2016年长湖已经完成养殖围网的全面拆除,本研究结果是2017年的长湖水生态浮游生物群落结构特征状况,表明现阶段长湖水域生态系统整体健康状况并未出现根本性转变,建议实施有效的人工调控措施恢复沉水植物多样性、构建生态屏障控制污染物入湖量、开展鲢鳙增殖放流控藻等实现长湖水域生态环境的改善优化,进而助力于长江流域的生态保护和可持续发展。

参考文献:

- [1] Tan F X, Luo J B, Qi M, *et al.* Seasonal variation on the diversity, niche breadth and niche overlap of aquatic plant in Changhu Lake [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, **30**(5): 1121-1129. [谭凤霞, 罗静波, 祁梅, 等. 长湖水生植物多样性与生态位的季节性变化研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2021, **30**(5): 1121-1129.]
- [2] Gong S S, Wu J W, Chai Y, *et al.* Structural characteristics and seasonal changes in zooplankton community in Changhu Lake [J]. *Fisheries Science*, 2021, **40**(3): 329-338. [龚森森, 吴嘉伟, 柴毅, 等. 长湖浮游动物群落结构特征及其季节变化 [J]. 水产科学, 2021, **40**(3): 329-338.]
- [3] Guo K, Peng T, Luo J B, *et al.* Community structure of zooplankton and the driving physicochemical factors in Changhu Lake [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2017, **48**(1): 40-49. [郭坤, 彭婷, 罗静波, 等. 长湖浮游动物群落结构及其与环境因子的关系 [J]. 海洋与湖沼, 2017, **48**(1): 40-49.]
- [4] Peng T. Phytoplankton community and biological evaluation of water quality in Changhu Lake [D]. Jingzhou: Yangtze University, 2015: 1-16. [彭婷. 长湖浮游生物群落结构及水质生物学评价 [D]. 荆州: 长江大学, 2015: 1-16.]
- [5] Wei Z B, Chai Y, Luo J B, *et al.* Seasonal succession and ecological niche analysis of the dominant species of phytoplankton in Changhu Lake [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2020, **44**(3): 612-621. [魏志兵, 柴毅, 罗静波, 等. 长湖浮游植物优势种季节演替及生态位分析 [J]. 水生生物学报, 2020, **44**(3): 612-621.]
- [6] He Y F, Li H C, Wang X G, *et al.* Spatial-temporal variation of fish community structure in Lake Changhu [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, **25**(2): 265-273. [何勇凤, 李昊成, 王旭歌, 等. 长湖鱼类群落结构的时空变化 [J]. 长江流域资源与环境, 2016, **25**(2): 265-273.]
- [7] Hao M X, Yang L, Kong X H, *et al.* Diversity and community succession of macrophytes in Lake Changhu, Hubei Province [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, **27**(1): 94-102. [郝孟曦, 杨磊, 孔祥虹, 等. 湖北长湖水生植物多样性及群落演替 [J]. 湖泊科学, 2015, **27**(1): 94-102.]
- [8] Zhou J, Qin B Q. A review of the effects of wind waves on plankton in lakes [J]. *Advances in Water Science*, 2018, **29**(2): 293-300. [周健, 秦伯强. 风浪对湖泊浮游生物影响的研究进展 [J]. 水科学进展, 2018, **29**(2): 293-300.]
- [9] Han X, Pan B Z, Zhao G N, *et al.* Phytoplankton community structure and distribution characteristics in the source region of the Yangtze River [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, **28**(11): 2621-2631. [韩谓, 潘保柱, 赵耿楠, 等. 长江源区浮游植物群落结构及分布特征 [J]. 长江流域资源与环境, 2019, **28**(11): 2621-2631.]
- [10] Zhu H, Liu X G, Chen X L, *et al.* The Characteristics of zooplankton community and water quality in zhe Shihoudian Lake [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2020, **44**(6): 1313-1321. [朱浩, 刘兴国, 陈晓龙, 等. 鲢鳙淀浮游动物群落特征及水质评价 [J]. 水生生物学报, 2020, **44**(6): 1313-1321.]
- [11] Reynolds C S, Huszar V, Kruk C, *et al.* Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton [J]. *Journal of Plankton Research*, 2002, **24**(5): 417-428.
- [12] Hu R, Lan Y Q, Xiao L J, *et al.* The concepts, classification and application of freshwater phytoplankton functional groups [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, **27**(1): 11-23. [胡韧, 蓝于倩, 肖利娟, 等. 淡水浮游植物功能群的概念、划分方法和应用 [J]. 湖泊科学, 2015, **27**(1): 11-23.]
- [13] Guo K. Characteristics of phytoplankton community and water quality assessment in Changhu Lake [D]. Jingzhou: Yangtze University, 2017: 1-2. [郭坤. 长湖浮游植物生态特征分析及水质评价 [D]. 荆州: 长江大学, 2017: 1-2.]
- [14] Yang J, Wang H Y, Chai Y. The effect of ecological restoration on spatial and temporal variations of water quality in Changhu Lake [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2020(7): 77-84. [杨军, 王海艳, 柴毅. 生态恢复对长湖水水质时空变化的影响 [J]. 中国农村水利水电, 2020(7): 77-84.]
- [15] Zhao W. Aquatic Biology [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2005: 16-232. [赵文. 水生生物学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2005: 16-232.]
- [16] Liang Q X, Fang J Z, Yang H Q. Hydrobiology. Morphology and Classification [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2003: 2-410. [梁秋象, 方纪祖, 杨和荃. 水生生物学. 形态和分类 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2003: 2-410.]
- [17] Wang J J. Freshwater Rotifers in China [M]. Beijing: Sci-

- ence Press, 1961: 23-282. [王家楫. 中国淡水轮虫志 [M]. 北京: 科学出版社, 1961: 23-282.]
- [18] Zhou F X, Chen J H. Microbiological Atlases of Freshwater [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 35-367. [周凤霞, 陈剑虹. 淡水微型生物图谱 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 35-367.]
- [19] Padisák J, Crossetti L O, Naselli-Flores L. Use and misuse in the application of the phytoplankton functional classification: a critical review with updates [J]. *Hydrobiologia*, 2009, **621**(1): 1-19.
- [20] Deng L, Qi J, Song Y J, *et al.* Characteristics of phytoplankton functional groups and their influencing factors in Chenghai Lake in summer [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, **28**(11): 2281-2288. [邓乐, 戚菁, 宋勇军, 等. 程海湖夏季浮游植物功能群特征及其影响因素研究 [J]. 生态环境学报, 2019, **28**(11): 2281-2288.]
- [21] An R, Wang F Y, Yu H X, *et al.* Seasonal dynamics of zooplankton functional groups and their relationships with environmental factors in the sanhuanpao wetland reserve [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(6): 1851-1860. [安睿, 王凤友, 于洪贤, 等. 三环泡湿地浮游动物功能群季节变化及其影响因素 [J]. 生态学报, 2017, **37**(6): 1851-1860.]
- [22] Daniel B, Franois G, Pierre L, *et al.* Quantitative Ecology: Application of R Language (trans. Lai J S) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2013, 103-178. [Daniel B, Franois G, Pierre L, 等. 数量生态学: R语言的应用(赖江山译) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2013: 103-178.]
- [23] State General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, State Environmental Protection Administration. GB3838-2002 Environmental Quality Standard for Surface Water [S]. National Standard, 2002(6): 1-15. [国家质量监督检验检疫总局, 国家环境保护总局. GB3838-2002地表水环境质量标准 [S]. 国家标准, 2002(6): 1-15.]
- [24] Wu H S, Hu H, Li Z Y, *et al.* Community characteristics of plankton and its relationship with water environmental factors in Dagou River in autumn of 2018 [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2020(5): 148-154. [吴慧双, 胡泓, 李正炎, 等. 2018年秋季大沽河浮游生物群落特征及其与水环境因子的关系 [J]. 海洋湖沼通报, 2020(5): 148-154.]
- [25] Liu X. Long-term dynamics of cyanobacteria related to environment factors in Lake Taihu [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012: 11-14. [刘霞. 太湖蓝藻水华中长期动态及其与相关环境因子的研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2012: 11-14.]
- [26] Fan X C. Characteristics of algal plant community structure in Jinhewan wetland of Harbin and environmental relevance research [D]. Harbin: Harbin Normal University, 2019: 12-21. [范小晨. 哈尔滨金河湾湿地藻类植物群落结构特征及环境相关性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2019: 12-21.]
- [27] Xu L, Feng P, Sun D M, *et al.* Numerical simulation for the effect of temperature on the algae growth [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2013, **13**(5): 76-81. [徐良, 冯平, 孙冬梅, 等. 水温对藻类生长变化影响的数值模拟 [J]. 安全与环境学报, 2013, **13**(5): 76-81.]
- [28] Miao T, Gao J, Chen B H, *et al.* The effects of ecological restoration on the community structures of planktonic crustaceans in Huizhou West Lake [J]. *Ecological Science*, 2013, **32**(3): 324-330. [苗滕, 高健, 陈炳辉, 等. 惠州西湖生态修复对浮游甲壳动物群落结构的影响 [J]. 生态科学, 2013, **32**(3): 324-330.]
- [29] Xi L H, Li H M, Lin Q Q, *et al.* Structure and seasonality variations of zooplankton community in the pelagic zone of tropical Dashahe Reservoir, Guangdong, South China [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, **27**(6): 1049-1058. [习丽红, 李慧明, 林秋奇, 等. 热带富营养水库敞水区浮游动物群落结构与季节变化: 以广东大沙河水库为例 [J]. 湖泊科学, 2015, **27**(6): 1049-1058.]
- [30] Qi M, WU J W, Gong S S, *et al.* Relationship between Characteristics of phytoplankton functional groups and their environmental factors in Changhu Lake [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2020, **51**(1): 75-84. [祁梅, 吴嘉伟, 龚森森, 等. 长湖浮游植物功能群特征及其与环境因子的关系 [J]. 海洋与湖沼, 2020, **51**(1): 75-84.]
- [31] Li Y, Li Q H, Chen W S, *et al.* Dynamic changes of metazooplankton community structure in Sanbanxi Reservoir, Guizhou Province [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2016, **28**(2): 340-349. [李钥, 李秋华, 陈文生, 等. 贵州三板溪水库后生浮游动物群落结构的动态变化 [J]. 湖泊科学, 2016, **28**(2): 340-349.]
- [32] Huisman J, Codd G A, Paerl H W, *et al.* Cyanobacterial blooms [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2018, **16**(8): 471-483.
- [33] He Y F, Li H C, Zhu Y J, *et al.* Status and spatial-temporal variations of eutrophication in Lake Changhu, Hubei Province [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, **27**(5): 853-864. [何勇凤, 李昊成, 朱永久, 等. 湖北长湖富营养化状况及时空变化(2012-2013年) [J]. 湖泊科学, 2015, **27**(5): 853-864.]
- [34] Xu C. Spatial and temporal variation characteristics and driving factors of plankton community in Weishan Lake [D]. Jinan: University of Jinan, 2020: 41-47. [徐畅. 微山湖浮游生物群落时空变化特征及其驱动因子分析 [D]. 济南: 济南大学, 2020: 41-47.]
- [35] Wang J, Liu J D, Zhang A J, *et al.* Spatial and temporal changes of zooplankton community structure and its relationship with environmental factors in Fuyang section of Fuchun River [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2020, **48**(14): 283-290. [王俊, 刘金殿, 张爱菊, 等. 富春江富阳段浮游动物群落结构时空变化及与环境因子的关系 [J]. 江苏农业科学, 2020, **48**(14): 283-290.]
- [36] Husherr R, Levasseur M, Lizotte M, *et al.* Impact of ocean acidification on Arctic phytoplankton blooms and dimethyl sulfide concentration under simulated ice-free and under-ice conditions [J]. *Biogeosciences*, 2017, **14**(9): 2407-2427.
- [37] Xiao J, Wang B L, Zhang H T, *et al.* Succession of phyto-

- plankton functional groups in the Wujiang River-reservoir system and its environmental impact factors identification [J]. *Earth and Environment*, 2019, **47**(6): 829-838. [肖晶, 王宝利, 张海涛, 等. 乌江河流-水库体系浮游植物功能群演替及其环境影响因子辨识 [J]. 地球与环境, 2019, **47**(6): 829-838.]
- [38] Wang T. Predation and competition——interspecies interactions of zooplankton communities in Liuxihe Reservoir [D]. Guangzhou: Jinan University, 2010: 1-14 [望甜. 捕食与竞争——流溪河水库浮游动物群落的种间关系研究 [D]. 广州: 暨南大学, 2010: 1-14.]
- [39] Xu S N, Chen Z Z, Li S Y. The habitat functions of mangroves for aquatic fauna and fisheries [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(1): 186-196. [徐姗姗, 陈作志, 李适宇. 红树林水生动物栖息地功能及其渔业价值 [J]. 生态学报, 2010, **30**(1): 186-196.]

CHARACTERISTICS AND MAIN INFLUENCING FACTORS OF PLANKTON FUNCTIONAL GROUPS IN SUMMER AND AUTUMN OF CHANGHU LAKE

GONG Sen-Sen^{1,2}, LI Xue-Mei³, WU Jia-Wei^{1,2}, CHAI Yi^{1,2}, YANG De-Guo³, TAN Feng-Xia^{1,2} and ZHU Ting-Bing³

(1. Engineering Research Center of Wetland Ecology and Agricultural Utilization, Ministry of Education, Changjiang University, Jingzhou 434025, China; 2. College of Animal Science, Yangtze University, Jingzhou 434025, China; 3. Key Laboratory of Freshwater Biodiversity Conservation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs of China Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuhan 430223, China)

Abstract: Changhu Lake, is a typical eutrophication shallow lake in Jiangnan Plain, Hubei Province, with comprehensive functions such as flood storage, irrigation, aquaculture and navigation, higher productivity, rich fishing. Plankton can reflect the water quality, the primary productivity of ecosystem, the fishing productivity, feeding pressure, and so on. By plenty of rainfall, the conditions of water temperature and light are suitable, the biomass and population density of plankton are the highest in the whole year in summer and autumn. The division of plankton into functional groups is one of the hot topics at present. To explore the characteristics of plankton functional groups and their main influencing factors, two sample surveys were conducted in Changhu Lake, in July (summer) and October (autumn) 2017. The main influencing factors were analyzed by RDA analysis and Pearson correlation analysis. The results showed that 95 species, 49 genera and 7 phyla of phytoplankton were identified, which were divided into 25 functional groups with an average density of 5.12×10^6 ind./L and an average biomass of 1.663 mg/L. There were 59 species in 41 genera, 3 phyla, which were divided into 8 zooplankton functional groups with an average density of 3.76×10^3 ind./L and an average biomass of 2.803 mg/L. The average density and biomass of plankton functional groups were significantly higher in summer than those in autumn ($P < 0.01$), and the highest density was at H1 station in summer, the highest density and biomass were at Y4 station in autumn; and from summer to fall the function groups A and LCF are inherited by E and K. From the perspective of dominant functional groups, the dominant functional groups were B, D, J, L₀, MP, P, T_C, PF, RF and SCF in two seasons, among which functional groups L₀, T_C, RF and PF were the absolute dominant groups. Redundancy analysis showed that TN, TP and DO were the main environmental factors affecting plankton functional groups, and water temperature and pH were positively correlated with most of the functional groups. Pearson correlation analysis showed the phytoplankton functional groups B, D, J, L₀, Y and zooplankton PF, RF, SCF were significantly correlated with each other ($P < 0.01$), and competition and predation and other biological activities had significant effects on the functional group characteristics. It is concluded that the feeding pressure of fishes to plankton is high and the water quality is still in the state of eutrophication in Changhu Lake. This study provides theoretical basis and reference for the subsequent assessment of the ecological restoration effect, artificial regulation, natural proliferation and sustainable development of large-surface fishery resources.

Key words: Plankton; Changhu Lake; Functional groups; Environmental factors; Redundancy analysis; Pearson correlation analysis