

# 广西洪潮江水库浮游植物功能类群及其对环境因子响应

唐汇娟<sup>1,2</sup>, 刘培钦<sup>1</sup>, 伍洁丽<sup>3</sup>, 廖洪平<sup>1</sup>, 何安尤<sup>2</sup>

(1. 华南农业大学海洋学院, 广东 广州 510640;

2. 广西壮族自治区水产科学研究院, 广西水产遗传育种与健康养殖重点实验室, 广西南宁 530021;

3. 广州市南沙区农业农村局服务中心, 广东 广州 511455)

**摘要:** 研究洪潮江水库浮游藻类的功能类群及其与环境因子的关系, 了解水库生态系统的结构和功能, 为水库环境状况的评价及管理提供理论依据。于 2018 年夏(6 月)和 2019 年冬(1 月)对洪潮江水库 9 个采样点的理化因子和浮游植物功能类群进行研究。洪潮江水库在夏冬 2 个季节中共检测出浮游植物 7 门 59 属, 分别归属于 17 个功能类群。Sn 功能类群包含拟柱孢藻, 是洪潮江水库的主要优势种, 洪潮江水库较高的温度、磷限制环境以及较高的浊度是拟柱孢藻占据优势并在夏季产生水华的主要原因。功能类群 L<sub>m</sub> 主要包含微囊藻, 在部分采样点与拟柱孢藻共同占据优势, 表明拟柱孢藻和微囊藻之间存在较大种间竞争。其他优势功能类群包括 Lo(以多甲藻为主)、H(以鱼腥藻为主)、P(直链藻)、Y(隐藻属), 均属于中-富营养到富营养型的种类。环境监测表明, 洪潮江水库磷含量较低, 氮磷比高达 200, 该水体可能为磷限制。水库夏季均温为 30.5°C, 冬季均温为 13.6°C, 夏季硝态氮、氨氮、溶氧含量和透明度显著低于冬季。皮尔森相关系数和 RDA 分析表明, 浊度、高锰酸钾指数、TN、氨氮、DO、透明度等是影响大部分功能类群的主要环境因子, 而上述环境参数中高锰酸钾指数、浊度与大部分功能类群呈正相关, TN、氨氮、透明度以及 DO 与功能群呈负相关。根据浮游植物功能类群的组成可以判断洪潮江水库为中、富营养化, 而拟柱孢藻和微囊藻为优势的具有产毒潜力的蓝藻将会对水库水质安全产生威胁。

**关键词:** 浮游植物功能群; 拟柱孢藻; 理化因子; 洪潮江水库

**中图分类号:** Q178.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2022)06-0085-07

作为水生生态系统中最重要初级生产者, 浮游植物在维持水体稳定性及完整性等方面起着重要作用(Wilken et al, 2018)。浮游植物种类繁多、个体小、繁殖周期短, 对环境的变化反应迅速(Dong et al, 2016)。环境条件的改变常常导致浮游植物种类组成、丰度、生物量以及优势种的变化, 而浮游植物群落结构的变化也会通过上行效应影响浮游动物、鱼类的群落结构, 进而影响水生生态系统的功能(Mayer, 2020)。因此研究水体浮游植物群落结构的时空变化对了解水生生态系统具有重要的意义。传统的浮游植物研究主要在系统发育类群水平上进行, 并没有直接反映生态系统的生态功能(Salmaso et al, 2015)。Reynolds 等(2002)根据浮游植物的生理特征和对环境的适应对策, 将生境类似的种类划分为 31 个不同

的功能群, 在此基础上, Padisák 等(2009)将浮游植物升级为 39 个功能群, 目前基于浮游植物功能群的研究方法已经广泛应用于全球湖泊、水库和河流(Wang et al, 2020; 陈倩等, 2018)。

洪潮江水库是广西第四大水库, 也是北海市饮用水的储备水源, 但长期以来, 由于投饵网箱养殖、畜禽养殖以及周边的水土流失导致大量富含氮磷的营养物质进入水库, 水体富营养化严重(王晓辉等, 2010; 王晓辉, 2013)。近年来, 随着生态环境保护意识的提高, 当地政府也采取了一系列措施, 如取缔网箱养殖和周边的畜禽养殖, 开展净水渔业等以消减洪潮江水库的污染源(苏平, 2017)。但是除了何安尤等(2012)在 2007-2008 年研究了网箱养殖区的浮游植物以外, 近些年来, 针对洪潮江水库浮游植物现状的研究非常欠缺。本研究依托广西省重点专项对洪潮江水库中的浮游藻类功能类群及其与环境因子的关系进行研究, 以期深入了解水库生态系统的结构和功能, 为水库环境状况的评价及管理提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域

洪潮江水库地跨广西钦州市钦南区、灵山县和北

收稿日期: 2021-05-12 修回日期: 2022-11-03

基金项目: 广西科技重大专项(桂科 AA17204095-8); 广东省重点领域研发项目(2019B020219003)。

作者简介: 唐汇娟, 1973 年生, 女, 博士, 副教授, 主要从事水域生态学方面的研究。E-mail: tanghj@scau.edu.cn

通信作者: 何安尤, 1964 年生, 男, 高级工程师, 主要从事渔业资源调查及水域生态修复研究。E-mail: heanyou2000@aliyun.com

海市合浦县,坐落在南流江下游主要支流洪潮江上。水库兴建于 1960 年初,1965 年建成运行,集雨面积 402 km<sup>2</sup>,水域面积 66 km<sup>2</sup>,总库容 7.14 亿 m<sup>3</sup>,水库有众多小岛分布,又名“星岛湖”。本研究在库区上中下游共设置 9 个代表性采样点(S1~S9),见图 1。

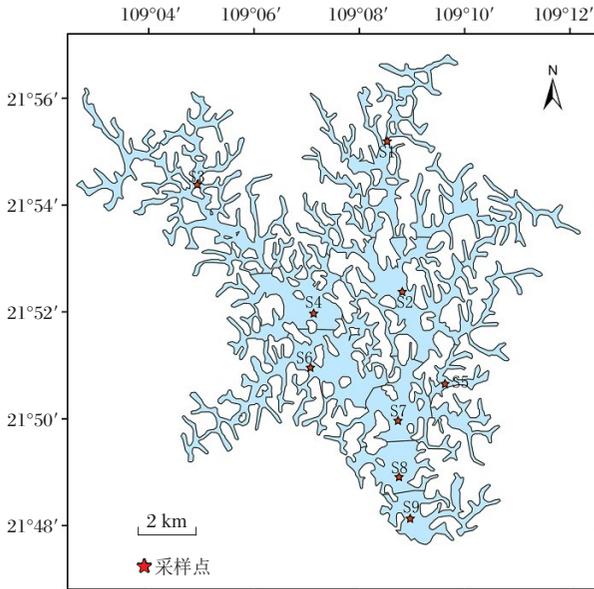


图 1 洪潮江水库及采样点位置

Fig.1 Sketch map of Hongchaojiang reservoir and location of sampling sites

## 1.2 水样采集和分析

于 2018 年 6 月(夏季)和 2019 年 1 月(冬季)进行样品采集,采集各层水样,混合后取 2.5 L 用于水化学分析。现场测定透明度(SD),用 YSI proplus 原位测定浊度(Turb)、水温(Temp)、pH、溶解氧(DO)等。水样带回实验室尽量在当天测完,氨态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)采用纳氏比色法、硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)用镉柱还原重氮化偶合分光光度法、总氮(TN)用过硫酸钾氧化紫外分光光度法、总磷(TP)用过硫酸钾消解磷钼蓝比色法(Sun et al, 2017),COD<sub>Mn</sub>用高锰酸钾消解法测定,TOC用总有机碳分析仪(Elementar,德国)测定;叶绿素 a(Chl-a)采用丙酮提取、分光光度法测定。其中夏季 TP 和 TOC 以及冬季 Chl-a 数据缺失。

## 1.3 浮游植物样品的采集和分析

采集水化学样品的同时,取 1 L 混合水样置于带内盖的聚乙烯瓶中,立即加入 1% 的鲁哥氏液,避光带回实验室静置 48 h 沉淀后,用虹吸管吸取上层清液,将样品浓缩至 50 mL 左右待定量计数。计数时,将浓缩样品充分摇匀,吸取 0.1 mL 浓缩样品置于计数框中计数(Li et al, 2018)。浮游植物的种类鉴定参考资料(胡鸿钧和魏印心, 2006)。根据 Reynolds 等

(2002)和 Padisák 等(2009)对浮游植物功能类群进行划分,平均生物量占总生物量 5% 以上的功能类群被认为是优势类群。

## 1.4 数据分析

采用 SPSS 22.0 对夏季和冬季理化因子进行单因素方差分析(ANOVA)、对浮游植物主要功能群的生物量和理化因子进行 Pearson 相关分析,利用 CANOCO 5.0 进行趋势对应分析,选择冗余分析(RDA)研究浮游藻类功能群与环境因子的关系,选择主成分分析(PCA)研究环境因子与采样点之间的关系。

## 2 结果

### 2.1 水体理化性质

洪潮江水库主要环境因子检测结果见表 1。冬季总磷为 0.0014~0.0154 mg/L,总氮 0.482~2.02 mg/L,冬季氮磷比高达 200。水库夏季硝态氮、氨氮、溶氧含量和透明度显著低于冬季( $P < 0.05$ );浊度、pH 无显著季节差异( $P > 0.05$ )。

表 1 洪潮江水库主要环境因子均值及范围

Tab.1 Primary physiochemical variables of water in Hongchaojiang reservoir

因子	夏季	冬季	P
总磷/mg·L <sup>-1</sup>	-	0.008±0.007	-
总氮/mg·L <sup>-1</sup>	0.740±0.249	1.60±0.21	0.003**
硝态氮/mg·L <sup>-1</sup>	0.089±0.039	0.15±0.06	0.031*
氨氮/mg·L <sup>-1</sup>	0.477±0.234	1.26±0.23	0.004**
高锰酸钾指数/mg·L <sup>-1</sup>	3.911±0.76	2.27±0.53	0.234
透明度/cm	62.3±20.4	126.1±39.4	0.042*
深度/m	15.67±5.52		
pH	7.50±0.73	7.52±0.47	0.410
温度/°C	30.50±0.78	13.57±0.66	0.039*
浊度/NTU	22.19±11.71	7.08±6.09	0.132
溶氧/mg·L <sup>-1</sup>	6.30±0.65	9.02±0.62	0.017*
总有机碳/mg·L <sup>-1</sup>	-	3.01±0.67	-
叶绿素 a/μg·L <sup>-1</sup>	24.94±16.72	-	-

注:- 数值缺失;\*  $P < 0.05$ ; \*\*  $P < 0.01$ 。

Note: - denotes the data is lacking; \* denotes significant difference ( $P < 0.05$ ); \*\* denotes highly significant difference ( $P < 0.01$ ).

### 2.2 浮游植物群落结构

洪潮江水库在夏冬 2 个季节中共检测出 7 门 59 属。其中硅藻门(Bacillariophyta) 9 属、绿藻门(Chlorophyta) 31 属、蓝藻门(Cyanophyta) 10 属、裸藻门(Euglenophyta) 3 属、金藻门(Chrysophyta) 1 属、甲藻门(Pyrrophyta) 3 属、隐藻门(Cryptophyta) 2 属,归属于 17 个功能群(表 2)。其中 J 和 P 类群分别包含绿球藻目、硅藻和鼓藻目的种类,种类组成最为丰

富。Sn、P、L<sub>m</sub>、L<sub>o</sub>、Y和H是洪潮江水库的优势功能类群,其生物量组成见图2。拟柱孢藻(*Cylindrospermopsis raciborskii*),又称尖头藻(*Raphidiopsis raciborskii*) (下文统一称拟柱孢藻),是洪潮江水库最主要的优势种,夏季生物量为3.26~13.49 mg/L,占总生物量的34.4%~83.2%;冬季生物量为0.13~1.48 mg/L,占总生物量的3.3%~31.8%;夏季平均生物量为8.59 mg/L,显著高于冬季0.51 mg/L( $F=40.3, P=0.000$ )。L<sub>m</sub>类群包含微囊藻(*Microcystis* sp.),具有较大的空间分布差异,夏季在S3和S9采样点其生物量占比达50%左右,而在其他采样点中生物量很小,在冬季其生物量占比为0~30.5%。以多甲藻属(*Peridinium*)为主的L<sub>o</sub>类群冬季生物量占总生物量的13.0%~48.7%,夏季生物量占总生物量的0~33.7%。以隐藻属为主的Y功能群生物量绝对值没有明显季节差异,但冬季所占比例(平均值12.4%)高于夏季(1.4%),P类群生物量没有明显的季节优势。另外,包含锥囊藻(*Dinobryon*)的E功能群只出现在冬季,包含裸

藻(*Euglena*)和扁裸藻(*Phacus*)的W1功能群只出现在夏季。洪潮江水库浮游植物具有较大空间分布差异,夏季生物量的平均值(15.4 mg/L)显著高于冬季(2.4 mg/L) ( $F=24.6, P<0.001$ )。

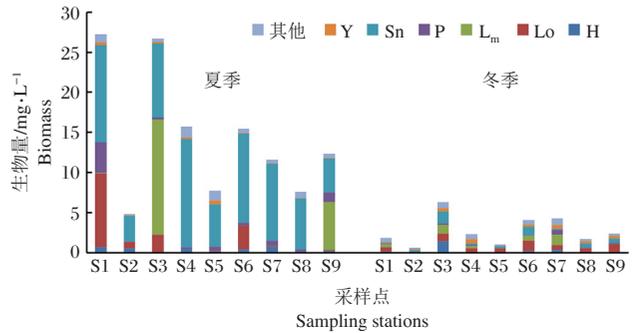


图2 洪潮江水库夏季和冬季浮游植物功能类群生物量

Fig.2 Biomass of phytoplankton functional groups at each sampling site during summer and winter in Hongchaojiang reservoir

表2 洪潮江水库浮游植物功能群落

Tab.2 Phytoplankton functional groups in Hongchaojiang reservoir

功能群代码	代表的生境	功能类群所包含的种或属
C	混合的富营养的中小型湖泊	小环藻 <i>Cyclotella meneghiniana</i> , 星杆藻 <i>Asterionella formosa</i>
D	浑浊富营养的潜水水体	针杆藻属 <i>Synedra</i> sp., 菱形藻 <i>Nitzschia</i> sp.
E	小型贫营养水体	锥囊藻属 <i>Dinobryon</i>
F	透明的表层水体	蓝纤维藻 <i>Dactylococcopsis acicularis</i> , 蹄形藻 <i>Kirchneriella</i> sp., 卵囊藻 <i>Oocystis</i> sp., 纺锤藻属 <i>Elakatothrix</i> , 胶球藻 <i>Dictyosphaerium</i> sp.
H	固氮, 氮缺乏的水体	鱼腥藻属 <i>Anabaena</i>
K	富营养的水体	隐球藻 <i>Aphanacapsa</i> sp.
J	浅、富营养的池塘、湖泊或河流	集星藻 <i>Actina strum</i> , 月牙藻 <i>Selena strum</i> , 四角藻 <i>Tetraedron</i> sp., 弓形藻 <i>Schroederia</i> sp., 十字藻 <i>Crucigenia</i> sp., 空星藻 <i>Coelastrum</i> sp., 盘星藻 <i>Pediastrum</i> sp., 栅藻 <i>Scenedesmus</i> sp., <i>Treubaria</i> sp., 微茫藻 <i>Micractinium pusillum</i> , 多芒藻 <i>Golenkinia radiata</i>
L <sub>m</sub>	夏季富营养湖泊的表层水	铜绿微囊藻 <i>Microcystis aeruginosa</i> sp. 和 惠氏微囊藻 <i>Microcystis wesenbergii</i>
L <sub>o</sub>	夏季中营养湖泊的表层水	多甲藻 <i>Peridinium</i> sp., 裸甲藻 <i>Gymnodinium</i> sp., 飞燕角甲藻 <i>Ceratium hirundinella</i> , 色球藻 <i>Chroococcus</i> sp., 平裂藻 <i>Merismopedia</i> sp.
MP	中到富营养	异极藻 <i>Gomphonema</i> sp., 布纹藻 <i>Gyrosigma</i> sp., 平板藻 <i>Tabellaria</i> sp., 舟形藻 <i>Navicula</i> sp., 颤藻 <i>Oscillatoria</i> sp.
N	中营养的表层水	鼓藻 <i>Cosmarium</i> sp., 角叉藻 <i>Staurodesmus</i> sp., 角星鼓藻 <i>Staurastrum</i> sp.
P	富营养的表层水	颗粒直链藻 <i>Melosira granulate</i> , 模糊直链藻 <i>Melosira ambigua</i> , 脆杆藻 <i>Fragilaria</i> sp., 新月鼓藻 <i>Closteriopsis</i> sp.
R	中营养水体的斜温层	拟鱼腥藻 <i>Pseudoanabaena</i> sp.
S <sub>n</sub>	温暖的浑浊度高的水体	拟柱孢藻 <i>Cylindrospermopsis raciborskii</i>
W1	小型富含有机质的池塘	裸藻属 <i>Euglena</i> , 扁裸藻属 <i>Phacus</i>
W2	浅的中营养水体	旋转囊裸藻 <i>Trachelomonas volvocina</i>
X1	浅的富营养的混合层	单针藻 <i>Monoraphidium</i> sp., 针尖纤维藻 <i>Ankistrodesmus angustus</i> , 狭形纤维藻 <i>Ankistrodesmus acicularis</i> , 蛋白核小球藻 <i>Chlorella pyrenoidosa</i> ,
X2	浅, 中到富营养的水体	隐藻 <i>Chlamydomonas</i> sp.
Y	富营养的小水体	尖尾蓝隐藻 <i>Chroomonas acuta</i> , 嗜噬隐藻 <i>Cryptomonas erosa</i> , 卵形隐藻 <i>Cryptomonas ovata</i>

### 2.3 浮游植物功能类群与理化因子的关系

对浮游植物主要功能类群和理化因子关系进行冗余分析,结果显示,功能类群  $L_o$ 、P、 $S_n$ 、H 以及总生物量 TB 与 Turb、 $COD_{Mn}$ 、Temp 呈正相关,与 SD、 $NH_4^+-N$ 、DO、TN 呈负相关, Y 功能类群与上述理化因子的关系正好相反。而功能类群  $L_m$  除了与 pH 和  $NO_3^- - N$  存在一定程度的正相关外,与其余的理化因子没有明显的关系(图 3)。

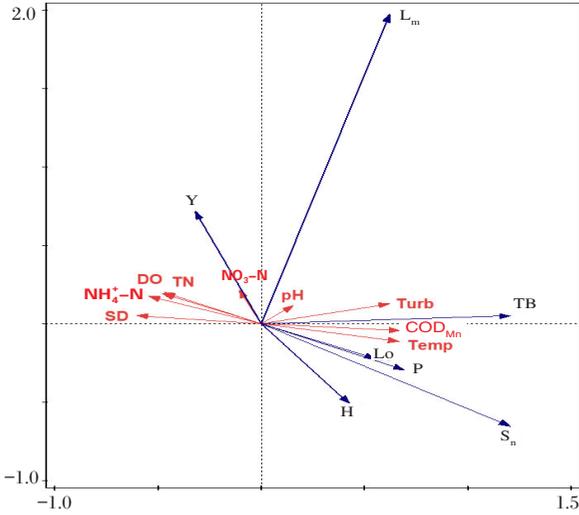


图 3 洪潮江水库浮游植物主要功能类群生物量(蓝色箭头)与理化因子(红色箭头)的 RDA 排序

Fig.3 Redundancy analysis (RDA) ordination of the biomass of the primary phytoplankton functional groups (blue arrows) and physicochemical variables (red arrows) in Hongchaojiang reservoir

TP、 $NO_3^- - N$ 、叶绿素 a、pH 与浮游植物各功能类群和总生物量均没有显著相关(表 3); 而 TN、 $NH_4^+ - N$  与  $S_n$ 、Y 功能类群呈显著负相关; $COD_{Mn}$ 、Temp 与  $S_n$  和 TB 呈极显著相关;功能群 H、 $S_n$  和 TB 与透明度呈显著负相关,但与 TOC 呈显著正相关;Turb 与  $L_o$ 、 $L_m$ 、P、 $S_n$  以及 TB 均呈显著相关;DO 与 P、 $S_n$  和 TB 呈显著正相关。

### 3 讨论

洪潮江水库冬季总磷平均值为 0.008 mg/L, 低于 2007–2008 年的总磷含量 0.03–0.07 mg/L(王晓辉等, 2010), 表明洪潮江水库总磷一直处于较低水平, 近年来削减外源营养负荷的举措取得了一定的效果。当 TP 低于 0.01 mg/L 时, 该水体可能为磷限制 Reynolds(2000), 洪潮江水库氮磷比高达 200, 表明该水库可能存在磷限制。水体形成水华时, 叶绿素 a 含量一般高于 10  $\mu\text{g/L}$ (孔繁翔和高光, 2005), 而洪潮江水库夏季叶绿素 a 平均值为 24  $\mu\text{g/L}$ , 存在发生水华的风险。

表 3 浮游植物功能类群生物量与理化因子的皮尔森相关分析  
Tab.3 Pearson's correlation between physicochemical variables and the biomass of the predominant functional groups

理化因子	主要功能类群						
	H	$L_o$	$L_m$	P	$S_n$	Y	TB
TP	0.506	0.181	0.314	-0.195	0.309	0.152	0.391
TN	-0.163	-0.128	0.047	-0.281	-0.689**	0.555*	-0.449
$NO_3^- - N$	0.427	-0.106	0.313	-0.277	-0.353	0.408	-0.104
$NH_4^+ - N$	-0.222	-0.140	0.064	-0.286	-0.704**	0.607**	-0.455
$COD_{Mn}$	0.352	0.457	0.426	0.328	0.845**	-0.243	0.852**
Chl-a	-0.181	0.123	0.349	-0.147	0.550	0.455	0.515
SD	-0.499*	-0.425	-0.346	-0.375	-0.747**	0.172	-0.726**
pH	0.095	-0.083	0.394	-0.432	0.138	0.012	0.178
Temp	0.143	0.337	0.317	0.411	0.871**	-0.388	0.735**
Turb	0.156	0.507*	0.683**	0.556*	0.642**	-0.159	0.843**
DO	0.013	-0.394	-0.065	-0.556*	-0.777**	0.367	-0.601*
TOC	0.901**	0.456	0.394	-0.083	0.844**	0.250	0.707*

注: \* $P < 0.05$ ; \*\*  $P < 0.01$ 。

Note: \* denotes significant difference ( $P < 0.05$ ); \*\* denotes highly significant difference ( $P < 0.01$ ).

浮游植物的种类组成和群落结构是与水环境相适应的结果。归属于  $S_n$  类群的拟柱孢藻是洪潮江水库的优势种, 全年存在, 占总生物量的 3.3%~83.2%。拟柱孢藻是一个全球性的种类, 已经在很多国家的河流、水库和湖泊中发现了拟柱孢藻水华, 引起越来越多的关注(Wang et al, 2020)。拟柱孢藻的扩张与其较强的环境适应能力有关, 如固氮、储磷、较高的营养盐利用效率等(Yang et al, 2018; 雷腊梅等, 2017)。在我国不同省份, 特别是广东省的多个水库中均发生了不同程度的拟柱孢藻水华(雷腊梅等, 2017)。洪潮江水库地处南亚热带, 与广东省大部分水库处于相似的地理纬度, 其拟柱孢藻的生物量和广东的镇海水库(5.9~15.5 mg/L)(赵莉等, 2017)以及广东东莞的 20 多个水库(0.00074~17.95 mg/L, 占比 0.1~90.3%)相当(Lei et al, 2014)。研究表明, 拟柱孢藻能适应较广的温度范围(11~39 $^{\circ}\text{C}$ ), 最适温度在 29~31 $^{\circ}\text{C}$ (雷腊梅等, 2017)。洪潮江水库冬夏的均温在 13~31 $^{\circ}\text{C}$ , 为拟柱孢藻的常年存在提供了温度条件。夏季高温易促使拟柱孢藻水华的发生, 其生物量与温度表现出极显著的正相关。本次研究中所观察到的拟柱孢藻极少产生异形胞或厚壁孢子, 这与广东镇海水库的情况类似(赵莉等, 2017)。一般认为, 拟柱孢藻在氮缺乏时可能会通过藻丝末端产生异型胞来固氮(Plominsky et al, 2013)。洪潮江水库总氮平均值在 1.17 mg/L 以上, 主要以氨氮的形式存

在,另外皮尔森相关系数和RDA分析均表明拟柱孢藻生物量与总氮和氨氮含量存在极显著的负相关,表明氮并不是该水库拟柱孢藻的限制因子。Chislock等(2014)指出,拟柱孢藻能在很宽的总磷水平下占据优势,与其比其他蓝藻对活性磷有更强的利用效率和储磷能力有关(Richie et al, 2001)。研究发现,拟柱孢藻在磷含量低至 $0.06 \mu\text{mol/L}$ (约为 $0.0019 \text{ mg/L}$ )时也能占据优势(Padisák, 1997),并且往往在高氮低磷的水体中达到较高生物量(Dolman et al, 2012),这与本研究得到的结果一致。皮尔森相关系数和RDA分析还表明,洪潮江水库拟柱孢藻生物量与浊度、透明度、高锰酸钾指数、TOC以及溶氧呈显著相关关系。拟柱孢藻属于耐阴种,具有较强的适应低光能力同时又能适应各种光照强度(雷腊梅等, 2017),因此在透明度低的水体中容易占据优势,并且当藻类大量繁殖时,又进一步降低透明度,增加浊度、高锰酸钾指数、TOC,同时因呼吸作用及水体中有机质的积累消耗了水中的氧气,从而导致溶解氧下降(杨瑞丰, 2019)。

在夏季的S3和S9采样点, $L_m$ 功能类群(主要是铜绿微囊藻和惠氏微囊藻)生物量超过或与拟柱孢藻相当,与拟柱孢藻共同成为这2个采样点的优势种,但在其余采样点,其生物量很低甚至在定量样品中难以发现。微囊藻和拟柱孢藻共存的情况非常普遍。调查的华中地区42个湖泊中,在149个样点发现了微囊藻和拟柱孢藻共存,并且随着浮游植物生产力的提高,拟柱孢藻的增长率高于微囊藻。而在室内实验中,以不同生物量比例共培养情况下,拟柱孢藻生长率高于微囊藻,并逐渐取代微囊藻(Jia et al, 2020)。拟柱孢藻和微囊藻的种间竞争的研究表明,在DIP限制或DOP丰度较低的水体中,磷竞争可能为拟柱孢藻带来一定的优势(Bai et al, 2020)。然而Lei等(2014)研究指出,拟柱孢藻与微囊藻的竞争排斥结果取决于微囊藻的藻株及水温。皮尔森相关分析表明微囊藻仅与水体浊度呈显著正相关( $P < 0.01$ ),RDA分析表明理化因子对微囊藻的影响较小。目前对洪潮江水库浮游植物群落结构的研究较少,对微囊藻和拟柱孢藻在洪潮江水库的竞争结果尤其需要更多的关注,作为可能产毒的2种蓝藻,拟柱孢藻和微囊藻均可对洪潮江水库的水质安全产生威胁。

除了拟柱孢藻和微囊藻,H类群的鱼腥藻占总生物量的 $0.47\% \sim 23.3\%$ ,属于中-富营养的种类(Salmaso et al, 2015),以多甲藻为主的功能群Lo是洪潮

江水库冬季最主要的优势种,在夏季的S1和S6采样点也占有较高的优势,甲藻具有鞭毛能在水层中移动,在水体稳定的枯水季可以进入深层从而克服可利用型营养盐较低的限制而占据优势(Xiao et al, 2011),但甲藻适宜生活在中到富营养的水体(Lei et al, 2020)。P类群主要包含直链藻,是富营养水体的代表种(Reynolds et al, 2002)。Y类群主要包含隐藻属的种类,一般生长在富营养、静止、摄食率较低的水体中(Wang et al, 2020; Yang et al, 2019),在洪潮江水库中全年存在,但冬季相对生物量更高。J功能类群的种类主要包含栅藻、十字藻和盘星藻等没有胶被和鞭毛的绿球藻类,一般生活于高度富营养的水体(Reynolds et al, 2002),在洪潮江水库中虽然种类丰富,但其生物量很低。

综上所述,洪潮江水库浮游植物主要由富营养以及中-富营养的功能类群组成,其中拟柱孢藻是洪潮江水库最主要的优势种,适宜的温度、较低的磷含量以及较高的浊度是促进拟柱孢藻夏季水华的主要原因。在有些采样点,微囊藻在夏季和拟柱孢藻共同占据优势。与微囊藻在典型的富营养水体占据优势的状况不同,拟柱孢藻能适应更广的营养盐范围,甚至在很低的营养状态下也能产生水华。这无疑给南亚热带水库的治理带来了难度,拟柱孢藻是一种产毒蓝藻,对水库饮用水的安全将产生威胁。因此有必要对洪潮江水库浮游植物动态以及相关的蓝藻毒素进行长期监测和防控,以保证水库饮用水源地的安全。

#### 参考文献

- 陈倩,李秋华,胡月敏,等,2018. 贵州百花水库浮游藻类功能群时空分布特征及影响因子分析[J]. 环境科学研究, 31(7): 1266-1274.
- 何安尤,韩耀全,雷建军,2012. 洪潮江水库网箱养殖区浮游植物调查[J]. 广西水产科技, (3): 6-14.
- 胡鸿钧,魏印心,2006. 中国淡水藻类——系统、分类及生态[M]. 北京:中国科学出版社.
- 孔繁翔,高光,2005. 大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考[J]. 生态学报, (3): 589-595.
- 雷腊梅,雷敏婷,赵莉,等,2017. 入侵蓝藻-拟柱孢藻的分布特征及生理生态研究进展[J]. 生态环境学报, 26(3): 531-537.
- 苏平,2017. 洪潮江水库水资源开发利用现状及前景展望[J]. 环境与发展, 29(7): 211-212.
- 王晓辉,2013,洪潮江水库富营养成因分析[J]. 中国水运(下半月刊), 13(8):122-123.
- 王晓辉,黄翠梅,覃秋荣,等,2010. 北部湾地区洪潮江水库氮磷时空分布及富营养成因研究[J]. 湖南农业科学, (24):

24–25, 29.

杨瑞丰, 2019. 大连松树水库浮游植物特征及对环境因子的响应[J]. 中国水土保持, (7): 34–37.

赵莉, 雷腊梅, 彭亮, 等, 2017. 广东省镇海水库拟柱孢藻 (*Cylindrospermopsis raciborskii*) 的季节动态及驱动因子分析[J]. 湖泊科学, 29(1): 193–199.

Bai F, Shi J, Yang S, et al, 2020. Interspecific competition between *Cylindrospermopsis raciborskii* and *Microcystis aeruginosa* on different phosphorus substrates[J]. Environmental Science Pollution Research, 27: 42264–42275.

Chislock M F, Sharp K L, Wilson A E, 2014. *Cylindrospermopsis raciborskii* dominates under very low and high nitrogen to phosphorus ratios[J]. Water Research, 49: 207–214.

Dolman A M, Rucker J, Pick F R, et al, 2012. Cyanobacteria and cyanotoxins: the influence of nitrogen versus phosphorus[J]. PLoS ONE, 7(6): e38757.

Dong X, Li B, He F, et al, 2016. Flow directionality, mountain barriers and functional traits determine diatom metacommunity structuring of high mountain streams[J]. Science Report, 6: 24711.

Jia N, Yang Y, Yu G, et al, 2020. Interspecific competition reveals *Raphidiopsis raciborskii* as a more successful invader than *Microcystis aeruginosa*[J]. Harmful Algae, 97: 101858.

Li B, Chen M, Liao H, et al, 2018. Combined effects of dietary phosphorus level and polyculture on fish production, water quality and plankton composition in intensive culture of crucian carp[J]. The Israeli Journal of Aquaculture – Bamidgah, 70: 1516.

Lei L M, Peng L, Huang X H, et al, 2014. Occurrence and dominance of *Cylindrospermopsis raciborskii* and dissolved cylindrospermopsin in urban reservoirs used for drinking water supply, South China[J]. Environmental Monitoring Assessment, 186: 3079–3090.

Lei L, Dai J, Lin Q, et al, 2020. Competitive dominance of *Microcystis aeruginosa* against *Raphidiopsis raciborskii* is strain- and temperature-dependent[J]. Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems, 421: 36.

Mayer T, 2020. Interactions of fish, algae, and abiotic factors in a shallow, tropical pond[J]. Hydrobiologia, 847(20): 4145–4160.

Padisák J, Crossetti L O, Naselli-Flores L, 2009. Use and misuse in the application of the phytoplankton functional classification: a critical review with updates[J]. Hydrobiologia, 621(1): 1–19.

Padisák J, 1997. *Cylindrospermopsis raciborskii* (Woloszyns-

ka) Seenayya et Subba Raju, an expanding, highly adaptive cyanobacterium: worldwide distribution and review of its ecology[J]. Archiv für Hydrobiologie, 107: 563–593.

Plominsky A M, Larsson J, Bergman B, et al, 2013. Dinitrogen fixation is restricted to the terminal heterocytes in the invasive cyanobacterium *Cylindrospermopsis raciborskii* CS-505[J]. PLOS ONE, 8(2): e51682.

Reynolds C S, Huszar V, Kruk C, et al, 2002. Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton[J]. Journal of Plankton Research, 24: 417–428.

Reynolds C S. 2000. Phytoplankton designer or how to predict compositional responses to trophic state change[J]. Hydrobiologia, 424: 147–152.

Richie R J, Trautman D A, Larkum A W D, 2001. Phosphate limited cultures of the cyanobacterium *Synechococcus* are capable of very rapid, opportunistic uptake of phosphate [J]. New Phytologist, 152: 189–201.

Salmaso N, Naselli-Flores L, Padisák J, et al, 2015. Functional classifications and their application in phytoplankton ecology[J]. Freshwater Biology, 60: 603–619.

Sun Y, Chen M, Kong C, et al, 2017. Enclosure experiment of effects of dietary phosphorus level on water quality, phosphorus budget, and plankton composition in intensive culture of crucian carp[J]. Aquaculture International, 25: 1145.

Wang Y, Cai Y, Yin X, et al, 2020. Succession of phytoplankton functional groups in Macau's two shallow urban border reservoirs under multiple changing factors[J]. Journal of Cleaner Production, 264: 121553.

Wilken S, Soares M, Urrutia-Cordero P, et al, 2018. Primary producers or consumers? Increasing phytoplankton bacterivory along a gradient of lake warming and browning: Increasing phytoplankton bacterivory[J]. Limnology and Oceanography, 63: S142–S155.

Xiao L J, Wang T, Hu R, et al, 2011. Succession of phytoplankton functional groups regulated by monsoonal hydrology in a large canyon-shaped reservoir[J]. Water Research, 45: 5099–5109.

Yang C, Nan J, Li J, 2019. Driving factors and dynamics of phytoplankton community and functional groups in an estuary reservoir in the Yangtze River, China[J]. Water, 11: 1184.

Yang Y M, Chen Y X, Cai F F, et al, 2018. Toxicity-associated changes in the invasive cyanobacterium *Cylindrospermopsis raciborskii* in response to nitrogen fluctuations[J]. Environmental Pollution, 237: 1041–1049.

(责任编辑 郑金秀)

## Phytoplankton Functional Groups and Their Response to Water Physiochemical Factors in Hongchaojiang Reservoir in Guangxi Province

TANG Hui-juan<sup>1,2</sup>, LIU Pei-qing<sup>1</sup>, WU Jie-li<sup>3</sup>, LIAO Hong-ping<sup>1</sup>, HE An-you<sup>2</sup>

- (1. College of Marine Sciences, South China Agricultural University, Guangzhou 510640, P.R. China;
2. Guangxi Academy of Fisheries Science, Guangxi Key Laboratory of Aquatic Genetic Breeding and Healthy Aquaculture, Nanning 530021, P.R. China;
3. Service Center in Bureau of Agricultural and Rural Affairs of Nansha District, Guangzhou, Nansha 511455, P.R. China)

**Abstract:** Hongchaojiang reservoir, in southern Guangxi Province, provides flood protection, hydropower, irrigation, fishery resources and recreation. In this study, we explored the characteristics of phytoplankton functional groups as well as their relationship with the physiochemical factors of the water in Hongchaojiang reservoir. The objectives were to understand the structure and function of the reservoir ecosystem and provide theoretical support for evaluating and managing water quality in Hongchaojiang reservoir. In June 2018 (summer) and January 2019 (winter), a field investigation of phytoplankton functional groups and physiochemical parameters of the water was conducted at 9 sampling sites representing the upper, middle and lower reaches of Hongchaojiang reservoir. Total phosphorus (TP) levels were low and the N/P ratio was as high as 200, indicating that P is the limiting nutrient. The average water temperature was 30.5°C in summer and 13.6°C in winter. Levels of nitrate nitrogen ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ), ammonium nitrogen ( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ), dissolved oxygen (DO) and Secchi depth (SD) in summer were significantly lower than in winter. A total of 59 phytoplankton genera from 7 classes and 17 functional groups were identified during the investigation. The dominant functional groups were Sn, P, Lm, Lo, Y and H, and *Cylindrospermopsis raciborskii* (aka *Raphidiopsis raciborskii*) in the Sn functional group was the most dominant species in the reservoir. High temperature, high turbidity and a P-limited environment were the primary factors resulting in the dominance, and for summer blooms of *C. raciborskii*. *Microcystis* sp. of Lm functional group was co-dominant with *C. raciborskii* at S3 and S9, indicating the presence of intense competition between the two cyanobacteria species. Other dominant species, including *Peridinium* (Lo), *Cryptomonas* (Y), *Anabeana* (H) and *Melosira* sp. (P) indicate a mesotrophic to eutrophic environment and their percentages of total biomass were higher in winter than in summer. Pearson correlation and redundancy analysis show that turbidity,  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ , TN,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ , DO and transparency were the primary environmental parameters affecting the distribution of most functional groups. Among these parameters, turbidity and  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  were positively correlated with functional group density, while TN,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ , DO and transparency were negatively correlated with the density of most functional groups. According to the composition of phytoplankton functional groups in Hongchaojiang reservoir, we concluded that the trophic status of Hongchaojiang reservoir was mesotrophic-eutrophic, and the potentially toxic *C. raciborskii* and *Microcystis*, with absolute dominance, threaten water quality safety.

**Key words:** phytoplankton functional group; *Cylindrospermopsis raciborskii*; physiochemical factors; Hongchaojiang reservoir