

鄱阳湖浮游植物功能群的长期变化特征(2009—2016年)*

钱奎梅¹, 刘宝贵², 陈宇炜³

(1: 徐州工程学院环境工程学院, 江苏省工业污染控制及资源化重点实验室, 徐州 221018)

(2: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

(3: 南昌工程学院, 南昌 330099)

摘要: 鄱阳湖是中国最大的淡水湖, 每年都有剧烈的季节性水位变化。为了解鄱阳湖浮游植物功能群特征及其与环境因子的关系, 2009—2016年每季度在鄱阳湖15个采样点采集水样, 分析鄱阳湖的水质和浮游植物群落结构, 并对浮游植物进行功能群划分。研究表明, 鄱阳湖共检出浮游植物8门106属。2009—2016年平均生物量分别为0.044、0.252、0.335、6.379、3.945、2.912、3.562和1.550 mg/L。硅藻门为鄱阳湖浮游植物的优势门类。鄱阳湖浮游植物可划分为27个功能群, 其中15个功能群(C、D、G、H1、J、Lo、M、MP、N、P、S1、Tc、Wo、W1和Y)为优势功能群。2009—2011年, 功能群P、Y、MP、D为优势类群, 2012—2016年, 功能群P、Y、MP、H1、Lo为优势类群。鄱阳湖浮游植物优势功能群不同水文阶段的演替规律为: 枯水期P、MP、Y、Lo、D, 涨水期P、Y、D、MP、H1, 丰水期P、Y、D、MP、Lo、H1, 退水期P、Y、MP、G。RDA分析结果显示, 水位变化、水温、透明度、电导率、悬浮物浓度和亚硝态氮浓度是影响鄱阳湖浮游植物功能群的主要环境因子。

关键词: 鄱阳湖; 浮游植物; 功能群; 水位波动

Long term dynamics of phytoplankton functional groups in Lake Poyang during 2009–2016

QIAN Kuimei¹, LIU Baogui² & CHEN Yuwei³

(1: *College of Environmental Engineering, Xuzhou University of Technology, Jiangsu Key Laboratory of Industrial Pollution Control and Resource Reuse, Xuzhou 221018, P.R.China*)

(2: *Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China*)

(3: *Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, P.R.China*)

Abstract: Lake Poyang is the largest freshwater lake in the Yangtze floodplain in China, with dramatic seasonal water level changes each year. The objective of the paper is to show the characteristics of phytoplankton functional groups and their relationship with environmental factors. Samples of water quality and phytoplankton were quarterly taken and analyzed at 15 sampling stations of Lake Poyang from 2009 to 2016. The phytoplankton function groups of phytoplankton were analyzed. The phytoplankton community structure and functional group characteristics of Lake Poyang were analyzed from 2009 to 2016. The results show that the phytoplankton in Lake Poyang can be divided into 27 functional groups, 15 of which (C, D, G, H1, J, Lo, M, MP, N, P, S1, Tc, Wo, W1 and Y) are dominant. Functional groups P, Y, MP, and D were dominant in 2009 to 2011. Functional groups P, Y, MP, H1, and Lo were dominant in 2012 to 2016. The successional routine of dominant phytoplankton functional groups in different phases are P, MP, Y, Lo, D in low water level phases, P, Y, D, MP, H1 in increasing water level phases, P, Y, D, MP, Lo, H1 in high water level phases and P, Y, MP, G in decreasing water level phases. RDA results showed that water level changes, water temperature, transparency, conductivity, suspended solids and nitrite are the most important environmental factors of phytoplankton functional groups in Lake Poyang.

Keywords: Lake Poyang; phytoplankton; functional group; water level fluctuation

浮游植物是指在水中以浮游生活的微小植物, 是水域生态系统中最重要初级生产者, 在水域生态系统的能量流动、物质循环和信息传递中起着至关重要的作用。浮游植物具有个体小、细胞结构简单等特点,

* 国家自然科学基金项目(31600345)和徐州工程学院校级课题(XKY2016232)联合资助。2018-11-05 收稿; 2018-11-30 收修改稿。钱奎梅(1982~), 女, 博士, 讲师; E-mail: qiankuimei@163.com.

故浮游植物对于环境变化极为敏感,其种类组成、数量变化和群落结构演化会受到栖息地环境的影响^[1-2]. 根据生态位原理,生态学家们把生活习性和生存策略相似的浮游植物种类归于同一个“功能群”^[2],作为群落结构与响应分析的基本单元. 目前,应用较多的功能群划分系统有 FG (Functional Groups)、MFG (Morphology-Functional Groups)、MBFG (Morphology-Based Functional Groups) 和 PFT (Plant Functional Types)^[3]. FG 是最早提出的功能群系统,它是根据浮游植物生理、生态、形态特点,认为属于同一功能群的浮游植物通常生长于相同的生境类型,且具有相似的功能性特征(如尺寸、形态、运动性、固氮作用和硅需求量等). 该功能群理论将不同种类的浮游植物缩小到一个或几个适应该生境的功能类群,具有相似的生态适应性和生境特征,是分析浮游植物群落结构季节变化的更为有效的途径. 2009 年 Padisák 等^[4]将这一理论进一步补充完善,共鉴定并描述了 39 种浮游藻类功能群. FG 法的提出具有划时代的意义,该方法能反映藻类的栖息地属性、对环境的耐受能力以及水体的营养等级等各个方面^[2,4]. 浮游植物功能群是近年来的研究热点,已被广泛应用于浮游植物生态学研究^[5-6].

浮游植物演替一直是水生生态学中的重要研究内容,确定其演替机制,从而可以有效对湖泊进行管理^[7]. 除其他生态因素外,水文变化也是洪泛平原水生环境中影响浮游生物初级生产者季节性及多年的群落成分和丰度变化的一种重要外部因素^[8-9]. 水位波动被认为是浅水湖泊生态系统功能的重要影响因素,因此,极端水位变化可能导致湖泊在浑浊状态和清澈状态之间转换^[10-12],决定了物质和生物交换过程的程度. 巴拉那河浮游植物多样性的下降,与透明度、氮和磷形式有关,反映了通过筑坝导致悬浮物浓度和 N/P 比的增加,从而对游植物的多样性产生负面影响^[13]. 具有河流性质和湖泊性质时期的水文循环使得浮游植物物种数量和丰度呈现出更大的变异性和更少的持久性^[14]. 功能群将生境与浮游植物群落演替动态结合起来,能有效地反映和预测水体中优势浮游植物功能类群^[15-17]. 本研究将浮游植物功能群分类方法运用到鄱阳湖的浮游植物群落长期变化中,探究浮游植物功能群的变化特征,以及优势浮游植物功能群与其适应生境之间的相互关系,以为鄱阳湖水资源管理提供理论基础.

1 材料与方法

鄱阳湖(29°7'31.1"N, 116°16'39.7"E)位于长江中下游交汇处,属亚热带湿润性季风型气候,四季分明,年平均降水量 1680 mm,年平均气温 17.5℃. 作为少数几个自由连接河流的湖泊之一,鄱阳湖在维持长江漫滩生态系统独特生物群方面发挥着重要作用. 鄱阳湖的水位受到支流和湖盆、北部长江的影响. 鄱阳湖有明显的季节性水位阶段. 12 月到次年 3 月鄱阳湖星子站水位低于 10 m(吴淞),湖区面积通常减少到不到 1000 km²(图 1). 4—6 月,水位增加至 14 m,丰水期 7—9 月,水位高于 14 m,湖泊面积超过 4000 km². 10—11 月,水位急剧下降至 10 m 左右,并在次年 12 月—3 月保持在低水位阶段.

2009—2016 年每季度在 15 个采样点采集水样(图 1). 根据水情变化(枯水期、涨水期、丰水期及退水期)设定采样时间(1、4、7 和 10 月). 使用手持式超声波水深仪测定水深. 水样在每个采样点的 3 个不同深度(表层、中层和底层)利用 Ruttner 采样器采集,然后将从 3 个不同深度采集的样品在干净的白色塑料桶中混合作为最终的样品. 取一部分样品(1000 ml)分析浮游植物,浮游植物样品立即用 10 ml 鲁哥氏碘液固定,静止 24~48 h 后,弃去上清液,浓缩到 30 ml. 根据 Utermöhl^[18]的沉降和倒置显微镜方法鉴定和计数浮游植物. 浮游植物鉴定类群、属和物种,并估算生物量(按体积计). 依据 Reynolds 等^[2]和 Padisák 等^[4]进行功能群划分. 一部分样品(20 L)带到实验室分析理化指标. 现场采样时,使用多参数水质分析仪 YSI 6600 V2 原位测量温度、盐度、溶解氧、pH、氧化还原电位(ORP)、浊度和盐度,利用 Secchi 盘测定透明度. 根据 APHA^[19]分析水体中的悬浮固体(SS)、叶绿素 a(Chl. a)和营养盐浓度(总氮(TN)、总磷(TP)、亚硝态氮(NO₂⁻-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)、氨氮(NH₃-N)和磷酸盐(PO₄³⁻-P)). 2009 年 1 月至 2016 年 12 月期间的水位数据来自江西省水文网站(http://www.jxsl.gov.cn/id_jhsq201404101112508271/column.shtml).

使用 SigmaPlot (12.0 版)软件制作图表. 运用 Canoco for windows 5 软件首先对浮游植物功能群生物量数据先进行 DCA(detrended correspondence analysis, 除趋势对应分析),计算结果发现物种的单峰响应值 SD(梯度)<2, 经过蒙特卡洛置换检验后,采用 RDA(redundancy analysis, 冗余度分析)进一步对季度调查的功能群特征与环境因子相关性进行研究. 浮游植物功能群矩阵经过 $\lg(x+0.0001)$ 转换,环境因子数据除 pH 外

全部进行 $\lg(x+1)$ 转换. 利用方差膨胀因子分析,对所有纳入 RDA 分析的环境因子进行共线性分析,并删除掉共线性的环境因子.

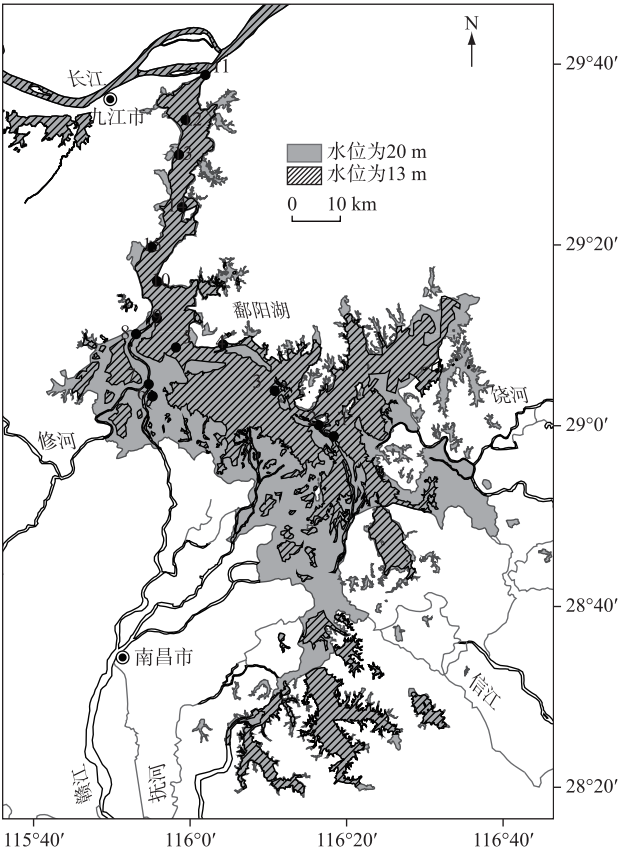


图 1 鄱阳湖采样点位分布
Fig.1 Distribution of the sampling sites in Lake Poyang

2 结果

2.1 水位和环境因素的变化

鄱阳湖的理化参数如表 1 和图 2 所示. 鄱阳湖水位波动在年内有显著差异. 全年包括四个水文阶段: 枯水期、涨水期、丰水期和退水期. 2009—2016 年研究期间, 最低水位为 7.54 m, 最大水位 21.35 m, 分别出现在 2013 年 1 月和 2016 年 7 月. 4—6 月的水位从 11 m 增加到 16 m, 7—9 月丰水期, 水位在 16 m 左右, 10—11 月水位急剧下降到 10 m 左右, 12 月至次年 3 月是枯水期. 规律频繁的水位波动是鄱阳湖的水文特征, 而强烈频繁的水位波动导致在丰水期静水区与激流区的水体混合. 环境类型发生变化, 并引起水质和浮游植物的变化. 水温呈现出季节性变化, 介于 6~33℃ 之间. 鄱阳湖的 pH 值在 7.5 以上, 平均值为 8.1. 在丰水期透明度通常较高, 而浊度与透明度相反. 溶解氧浓度随季节波动, 最低值出现在

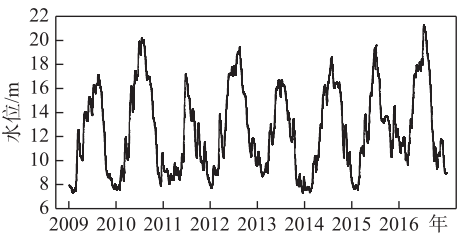


图 2 2009—2016 年鄱阳湖水位变化
Fig.2 Water level variations of Lake Poyang during 2009—2016

上, 平均值为 8.1. 在丰水期透明度通常较高, 而浊度与透明度相反. 溶解氧浓度随季节波动, 最低值出现在

枯水期. 在研究期间,总氮浓度具有明显的季节性变化,7月份的总氮浓度较低(丰水期). 硝态氮和氨氮浓度在研究期间具有一定的波动. 总磷浓度的变化不规则,磷酸盐浓度在研究期间略有波动.

表 1 2009—2016 年鄱阳湖部分湖沼参数的平均值及变化范围

Tab.1 Mean and range values of limnological parameters in Lake Poyang during 2009–2016

| 参数 | 2009 年 | 2010 年 | 2011 年 | 2012 年 | 2013 年 | 2014 年 | 2015 年 | 2016 年 |
|---|------------------------|-------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 水温/ ℃ | 19.40 (5.69~32.12) | 18.72 (4.66~30.79) | 20.48 (3.89~30.80) | 19.88 (6.36~32.04) | 18.50 (3.37~32.33) | 24.32 (7.97~34.49) | 21.39 (0.25~32.99) | 20.50 (5.37~32.13) |
| pH | 7.83 (7.25~8.89) | 8.09 (6.85~8.86) | 7.80 (6.56~8.36) | 8.37 (7.68~9.57) | 8.52 (7.65~9.72) | 8.32 (6.19~11.65) | 7.95 (6.62~12.66) | 8.37 (7.68~9.57) |
| DO/ (mg/L) | 8.88 (1.00~15.90) | 8.14 (4.30~10.80) | 11.03 (3.87~10.78) | 9.25 (6.24~16.8) | 8.35 (3.33~22.6) | 8.82 (4.42~19.12) | 10.28 (3.46~31.32) | 9.14 (5.24~15.8) |
| Chl.a/ (mg/m ³) | 3.54 (0.40~12.45) | 5.20 (0~25.57) | 6.65 (1.45~22.18) | 5.14 (0.69~18.74) | 2.92 (0.28~11.72) | 5.65 (0.50~72.54) | 6.30 (0.25~98.77) | 10.47 (0.59~67.52) |
| SS/ (mg/L) | 49.08 (6.00~169.00) | 42.94 (2.67~202) | 58.84 (3.14~262.29) | 54.57 (7.60~230.3) | 45.39 (1.80~160.67) | 37.83 (1.20~372.40) | 30.53 (0.40~346.67) | 35.22 (0.80~235.00) |
| NO ₃ ⁻ -N/ (mg/L) | 0.79 (0.19~1.62) | 1.19 (0.51~2.12) | 0.74 (0.23~1.30) | 0.78 (0.22~1.91) | 0.83 (0.232~1.476) | 0.93 (0.026~2.47) | 0.92 (0.29~2.08) | 0.65 (0.08~1.84) |
| NO ₂ ⁻ -N/ (mg/L) | 0.023 (0.003~0.06) | 0.029 (0.001~0.065) | 0.06 (0.001~0.56) | 0.03 (0.006~0.14) | 0.02 (0.001~0.105) | 0.04 (0.0003~0.85) | 0.04 (0.001~0.86) | 0.07 (0.001~0.40) |
| NH ₃ -N/ (mg/L) | 0.23 (0.06~1.36) | 1.05 (0.216~4.22) | 0.43 (0.03~3.62) | 0.33 (0.02~2.15) | 0.26 (0.019~2.102) | 0.28 (0.025~1.889) | 0.29 (0.007~2.96) | 0.28 (0.08~1.18) |
| PO ₄ ³⁻ -P/ (mg/L) | 0.015 (0.003~0.04) | 0.0358 (0.001~0.271) | 0.02 (0.001~0.16) | 0.03 (0.002~0.086) | 0.01 (0.001~0.044) | 0.03 (0.001~0.282) | 0.04 (0.018~0.113) | 0.02 (0.001~0.10) |

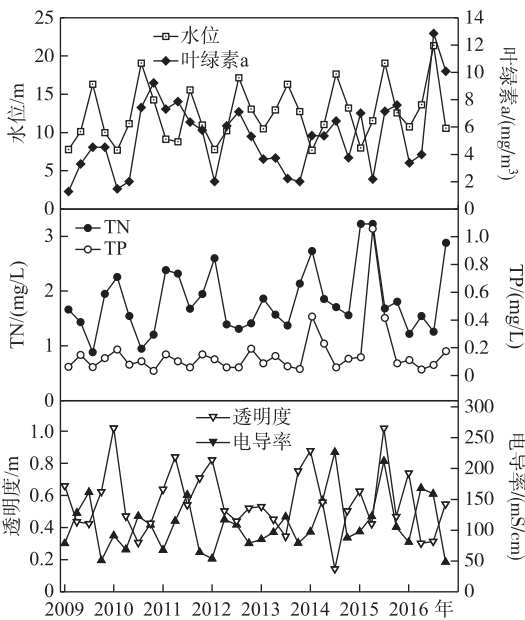


图 3 2009—2016 年鄱阳湖部分水质参数的年际变化
Fig.3 Temporal variations of some parameters in Lake Poyang during 2009–2016

2.2 浮游植物物种及功能群变化

鄱阳湖共检出浮游植物 8 门 106 属. 其中,蓝藻门 19 种(属),占 17.9%;硅藻门 30 种(属),占 28.3%;绿藻门 46 种(属),占 43.4%;裸藻门 5 属,占 4.7%;隐藻门 3 种,占 2.8%;甲藻门 2 种,占 1.9%;金藻门 1 种,占 0.9%. 2009—2016 年平均生物量分别为 0.044、0.252、0.335、6.379、3.945、2.912、3.562 和 1.550 mg/L(图 4). 鄱阳湖一般以硅藻门为优势门类,硅藻门的优势种主要为颗粒直链藻、双菱藻和脆杆藻.

根据 Reynolds 等^[2]和 Padisak 等^[4]提出的功能群分类法,鄱阳湖浮游植物隶属于 27 个功能群,包括 A、B、C、D、E、F、G、H1、J、K、L_M、Lo、M、MP、N、P、S1、S2、T、T_C、T_D、Wo、W1、X1、X2、X3、Y(表 2).

鄱阳湖浮游植物功能群年际变化如图 5 所示. 2009—2011 年,功能群 P、Y、MP、D 为优势类群, 2012—2016 年,功能群 P、Y、MP、H1、Lo 为优势类群. 对比不同水文阶段,鄱阳湖枯水期的优势功能群为 P、MP、Y、Lo、D,涨水期为 P、Y、D、MP,丰水期为 P、Y、D、MP、Lo,退水期转变为 P、Y、MP、G. 由颗粒直链硅藻、脆杆藻等构成的功能群 P,卵形隐藻等构成的功能群 Y 和羽纹藻、桥弯藻、异极藻、舟形

藻、布纹藻、双菱藻、曲壳藻、短缝藻等构成的功能群 MP 在 4 个水位时期都占优势地位.

2.3 浮游植物优势功能群与环境因子的 RDA 分析

浮游植物生长需要的环境因子,如营养、生物作用都可能成为其生长发展的限制因子,同样这些因子也是影响浮游植物功能群分布的环境因子. 通过对浮游植物功能群数据进行去趋势分析(DCA),发现最大梯度长为 1.06,浮游植物功能群群落分布更接近线性模型,故对浮游植物功能群数据和环境因子进行冗余分析(RDA). 对功能群数据进行筛选,选择 15 个优势功能群(C、D、G、H1、J、Lo、M、MP、N、P、S1、Tc、Wo、W1 和 Y)用于排序. 从

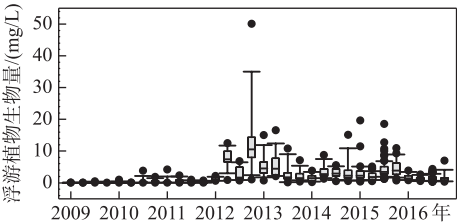


图 4 2009—2016 年浮游植物生物量变化
Fig.4 Variations of phytoplankton biomass during 2009–2016

表 2 鄱阳湖浮游植物功能群划分
Tab.2 Phytoplankton function groups division in Lake Poyang

| 功能群 | 代表性种(属) | 功能群生境特征 |
|----------------|--|------------------------|
| A | 扎卡四棘藻 <i>Attheya zachariasii</i> | 清水、深水,对 pH 值变化敏感 |
| B | 岛直链藻 <i>Aulacoseira islandica</i> | 中富营养分层湖泊 |
| C | 小环藻 <i>Cyclotella</i> sp.、星杆藻 <i>Asterionella</i> sp. | 富营养、中小型水体 |
| N | 鼓藻 <i>Cosmarium</i> sp.、角星鼓藻 <i>Staurastrum</i> sp. | 中营养型混合层水体 |
| P | 新月藻 <i>Closterium</i> sp.、杆藻 <i>Fragilaria</i> sp.、颗粒直链硅藻 <i>Aulacoseira granulate</i> | 混合程度较高的中富营养浅水水体 |
| MP | 异极藻 <i>Gomphonema</i> sp.、舟形藻 <i>Navicula</i> sp.、羽纹藻 <i>Pinnularia</i> spp.、桥弯藻 <i>Cymbella</i> spp.、颤藻 <i>Oscillatoria</i> sp.、双菱藻 <i>Surirella</i> sp.、丝藻 <i>Ulothrix</i> sp. | 频繁扰动的浑浊型浅水湖泊 |
| X1 | 纤维藻 <i>Ankistrodesmus</i> sp. | 超富营养、浅水水体 |
| X3 | 小球藻 <i>Chlorella</i> sp.、弓形藻 <i>Schroederia</i> sp. | 浅水、清水、混合层水体 |
| Y | 卵形隐藻 <i>Cryptomonas ovata</i> | 静水水体 |
| F | 月牙藻 <i>Selenastrum</i> sp.、卵囊藻 <i>Oocystis</i> sp.、柄球藻 <i>Stilocapsa</i> sp.、网球藻 <i>Dictyosphaeria</i> spp.、棘球藻 <i>Echinospaerilla</i> spp. | 浅水、清水、混合层水体 |
| J | 盘星藻 <i>Pediastrum</i> sp.、空星藻 <i>Coelastrum</i> sp.、十字藻 <i>Crucigenia</i> sp.、四角藻 <i>Fetraedron</i> sp.、栅藻 <i>Scendesmus</i> sp. | 混合的高富营养浅水水体 |
| H1 | 束丝藻 <i>Aphanizomenon</i> sp.、鱼腥藻 <i>Anabaena</i> spp. | 富营养分层水体,浅水湖泊 |
| L _M | 飞燕角甲藻 <i>Ceratium hirundinella</i> | 富营养混合水体 |
| M | 微囊藻 <i>Microcystis</i> sp. | 较稳定的中富营养水体 |
| W1 | 裸藻 <i>Euglena</i> sp.、扁裸藻 <i>Phacus</i> sp.、尖尾裸藻 <i>Euglena gasterosteu</i> 、盘藻 <i>Gonium</i> spp. | 富含有机质,或农业废水和生活污水的水体 |
| D | 针杆藻 <i>Synedra</i> spp. | 河流在内浅的浑浊水体/冲刷/低营养盐 |
| E | 锥囊藻 <i>Dinobryon</i> sp. | 小型浅水贫营养水体 |
| G | 集星藻 <i>Actinastrum</i> spp.、实球藻 <i>Pandorina</i> sp.、空球藻 <i>Eudorina</i> spp. | 小型富营养化水体 |
| Lo | 多甲藻 <i>Peridinium</i> sp. | 深层和浅层,富营养化,中型到大型湖泊 |
| S1 | 浮游蓝丝藻 <i>Planktothrix</i> spp. | 浑浊水体/弱光、浑浊/冲刷 |
| S2 | 螺旋藻 <i>Spirulina</i> sp. | 浅层浑浊混合层 |
| T | 细丝藻 <i>Planctonema</i> sp.、转板藻 <i>Mougeotia</i> sp. | 持续混合的分层 |
| Wo | 衣藻 <i>Chlamydomonas</i> spp.、小球藻 <i>Chlorella</i> spp. | 有机物含量高的河流 |
| X2 | 尖尾蓝隐藻 <i>Chroomonas acuta</i> | 中度富营养化水体/分层/混合 |
| K | 隐球藻 <i>Aphanocapsa</i> spp. | 富营养浅水湖泊 |
| T _c | 鞘丝藻 <i>Leptolyngbya</i> spp. | 富营养水体,或有大型水生植物缓慢流动的河流 |
| T _D | 水绵 <i>Spirogyra</i> sp. | 中富营养水体,或有大型水生植物缓慢流动的河流 |

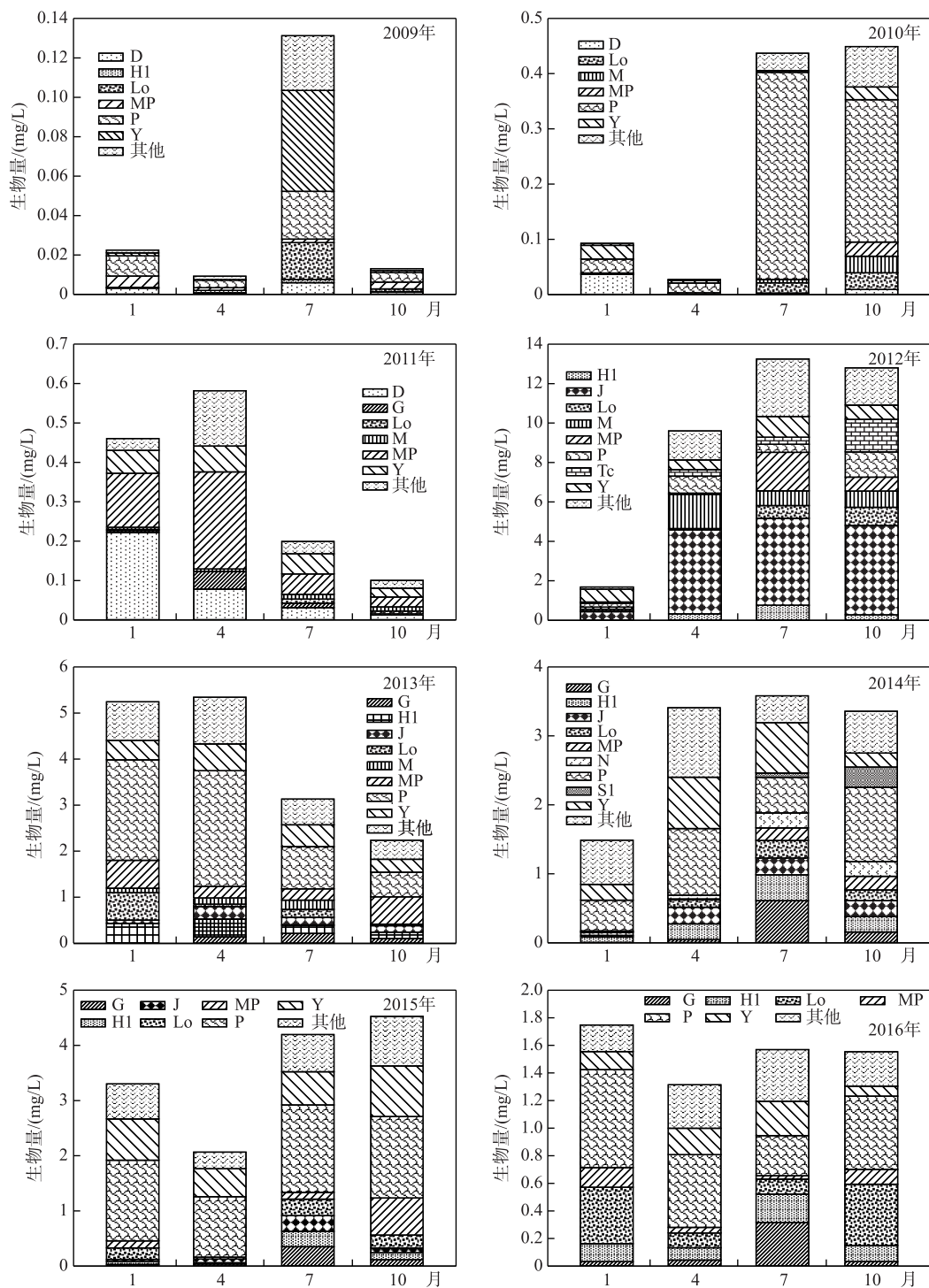


图 5 2009—2016 年鄱阳湖浮游植物功能群年际变化

Fig.5 Temporal variations in biomass of phytoplankton functional groups in Lake Poyang during 2009–2016

水位、水温、透明度、电导率、pH、浊度、盐度、COD、总氮、总磷、硝态氮、亚硝态氮、正磷酸盐、氨氮、溶解氧、总无机氮这 16 个环境因子中筛选出具有显著解释性的 11 个环境变量与采样点进行 RDA 分析(图 6),去掉共线性的硝态氮、氨氮、总无机氮,采用蒙特卡拟合方法对浮游植物功能群和环境因子间的关系进行显著性检验,结果显示,水位、水温、透明度、亚硝态氮、悬浮物、氧化还原电位、浊度和电导率是主要影响因子,轴 1、轴 2 的特征值分别为 0.473 和 0.100,功能群 $Wo+G+N+S1$ 与水位、透明度、水温、亚硝态氮均呈显著正相关,与电导率呈显著负相关,功能群 $MP+D+Tc+C$ 与氧化还原电位、浊度均呈显著正相关,功能群 $Wo+G+N+J+Lo+H1+M+W1+P+Y$ 与 SS 呈显著负相关.

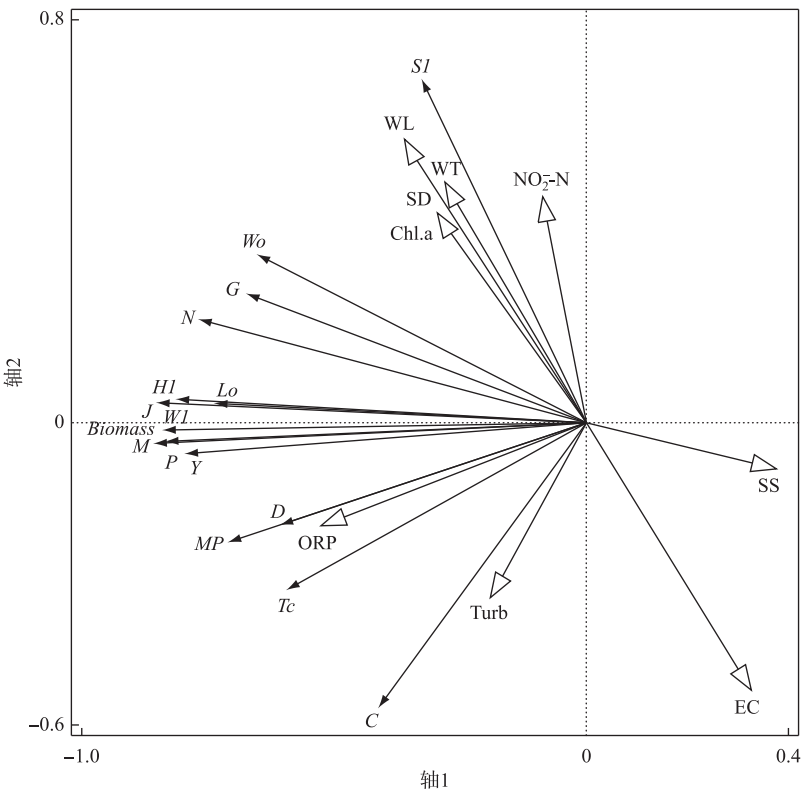


图 6 鄱阳湖水质参数与浮游植物功能群参数的 RDA 分析(WL 为水位,WT 为水温,SD 为透明度,SS 为悬浮物,EC 为电导率,Turb 为浊度,ORP 为氧化还原电位,NO₂-N 为亚硝态氮,Chl.a 为叶绿素 a 浓度)
Fig.6 RDA analysis of phytoplankton dominant function groups and principal environment factors in Lake Poyang
(WL-water level, WT-water temperature, SD-transparency, SS-suspended solids, EC-conductivity, Turb-turbidity, ORP-oxidation-reduction potential, NO₂-N-nitrite, Chl.a-chlorophyll-a)

3 讨论

3.1 浮游植物功能群的年际变化特征

鄱阳湖在当地社会和经济的发展以及全球的生态保护中起着重要作用. 2009—2016 年采样分析发现,总氮浓度平均值为 1.82 mg/L,总磷浓度为 0.15 mg/L. 在研究期间,鄱阳湖的富营养化水平较高,这主要是由于近几十年鄱阳湖地区随着人口增长和工业化、城镇化进程的加快,从而导致农业化学品过度投入和工业废物排放. 水体中浮游植物群落的种类组成和数量结构的变化主要受相关的物理、化学和生物等环境因子的影响^[3]. 鄱阳湖浮游植物生物量与悬浮物浓度呈负相关($P<0.01$),说明鄱阳湖的涨退水过程中悬浮物浓度影响了浮游植物光合作用所需光照^[20]. 总体来说鄱阳湖浮游植物生物量具有增加的趋势,而鄱阳湖水体

中较高的营养盐有利于藻类增殖^[20-21]。随年际变化 Chl.a 浓度的上升是对浮游植物生物量增加的佐证。2009—2011 年浮游植物生物量较低,但营养浓度较高。浮游植物总生物量,特别是蓝藻生物量在 2012 年 10 月明显较高,就导致了以小细胞形态的鱼腥藻、平裂藻、微囊藻、空球藻、实球藻等构成的功能群 H1、Lo、M、G 开始占优势。M、H1 功能群的代表种类微囊藻和鱼腥藻均为易形成水华的蓝藻类群,在 2012—2016 年期间成为优势类群,这也证实了该时期鄱阳湖的某些湖区发生的水华蓝藻聚集现象。

3.2 浮游植物对水位波动的响应

水位波动可以调节浮游植物群落结构(包括物种组成、优势种等)以及季节演替,调节湖泊的营养状态。鄱阳湖通常受季节性水位波动的影响。浮游植物生物量变化在不同水文时期具有规律性变化,涨水期和退水期浮游植物生物量较高。鄱阳湖春末和夏季(即涨水期)水温较高、光照较强^[22]以及养分(总氮和总磷浓度)增加,有利于浮游植物生长,导致浮游植物生物量在涨水期增加。丰水期,由于水量增加,不仅会对浮游植物进行稀释,同时对营养物质也有稀释作用,从而对浮游植物生长产生抑制作用。同时,当水位上升时,尽管夏季的水体透明度值很高^[23],水体的稀释超过了浮游植物的生长速度,其生物量显著下降^[24],这与其他洪泛平原湖泊中的研究类似^[25-26]。浮游植物生物量在涨水期最高,然后在丰水期达到其最小值,表明尽管有适当水平的必需营养物,水位波动也可以抑制浮游植物的生长^[27]。水文变化是改善水质和维持生物多样性以及生态系统良好状况的关键因素^[28]。快速的水体交换对浮游植物丰度产生显著的稀释作用^[29]。水位波动和浮游植物生物量的标准化测试表明,退水期的生物量增加表明水位波动对浮游植物的影响大于水位降低导致的营养物质浓缩的影响^[30]。虽然具有静水环境和较高的养分,但由于温度较低,浮游植物生物量在枯水期较低。研究表明,规律频繁的水位波动对浮游植物的组成具有显著影响,并在洪泛区产生了交替变化的稳定状态^[31]。鄱阳湖水体理化参数(透明度、电导率和 SS)与水位存在显著相关性($P=0.002$)表明,水位波动对鄱阳湖的理化条件有直接或间接的影响。结果表明,浮游植物的变化与水体的理化特征有关。

功能群数量及功能群内物种数的变化,与其所栖息的生境质量紧密相关。由颗粒直链藻、脆杆藻等构成的功能群 P、卵形隐藻等构成的功能群 Y 和羽纹藻、桥弯藻、异极藻、舟形藻、布纹藻、双菱藻、曲壳藻、短缝藻等构成的功能群 MP 在 4 个水位时期都占优势地位,证实了鄱阳湖的典型环境,即水位波动导致的较浑浊至富营养化条件。另外,功能群能够提供群落对于干扰反应的广泛和预测性的理解。功能群对环境变化的反映比个体及种群的反映更为重要、综合性更强。鄱阳湖的水位波动会导致浮游植物种类组成和群落结构变化。由针杆藻、菱形藻、潘多藻等构成的功能群 D、羽纹藻、桥弯藻、异极藻、舟形藻、布纹藻、双菱藻、曲壳藻、短缝藻等构成的功能群 MP 和多甲藻、飞燕角甲藻等构成的功能群 Lo 在枯水期时占优势,为耐浑浊低光照的富营养类群;丰水期,随着水温升高和水位上升,浮游植物功能群季节动态明显,以小细胞形态的鱼腥藻、平裂藻、微囊藻、空球藻、实球藻等构成的功能群 H1、Lo、M、G 开始占优势。适合富营养化、分层、低氮条件的功能群 H1(鱼腥藻)在涨水期和丰水期成为优势种群,不仅由于夏季较高的水温条件,为蓝藻的生长提供有利的条件,同时,该功能群与无机氮、氨氮、硝态氮浓度等呈显著的负相关,是由于涨水期和丰水期的稀释作用,导致鄱阳湖中的氮营养盐浓度降低,显示了其能够在低氮条件直接固氮的优势。退水期为由空球藻、实球藻等构成的功能群 G 提供了其需要的丰富营养。Lo 功能群的代表种类飞燕角甲藻、多甲藻,该功能群的生长条件比较广泛,如深或浅的、贫营养到富营养的中等到大型湖泊均可以生长,这可以就很好地解释了该功能群在枯水期和丰水期均为优势类群。由此可知,水位波动是影响鄱阳湖浮游植物功能群变化的重要因素,因此,在湖区水生态管理中,考虑水位波动这一重要参数对富营养化防控具有重要意义。

4 结论

鄱阳湖浮游植物生物量在研究期间有逐年增加的趋势。鄱阳湖浮游植物隶属于 27 个功能群,包括 A、B、C、D、E、F、G、H1、J、K、L_M、Lo、M、MP、N、P、S1、S2、T、T_C、T_D、Wo、W1、X1、X2、X3、Y,有 15 个为优势功能群(C、D、G、H1、J、Lo、M、MP、N、P、S1、T_C、Wo、W1 和 Y)。鄱阳湖浮游植物优势类群随着时间变化有一定的差异,即从 2009—2011 年的功能群 P、Y、MP、D 转变为 2012—2016 年的功能群 P、Y、MP、H1、Lo,表明鄱阳湖的富营养化水平有一定的加剧。同时,不同的水文阶段,其优势类群也有一定的差异,表明浮游植物受到鄱阳湖水位变化的影响,并对鄱阳湖的水位波动具有一定的响应。RDA 分析结果显示,鄱阳湖浮游植物功能群

分布受水环境因子影响较为明显. 整体上,水位变化、水温、透明度、电导率、悬浮物和亚硝态氮是影响鄱阳湖浮游植物功能群分布格局的主要因素.

5 参考文献

- [1] Reynolds CS. What factors influence the species composition of phytoplankton in lakes of different trophic status? *Hydrobiologia*, 1998, **369/370**: 11-26.
- [2] Reynolds CS, Huszar V, Kruk C *et al.* Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton. *Journal of Plankton Research*, 2002, **24**(5): 417-428.
- [3] Hu R, Lan YQ, Xiao LJ *et al.* The concepts, classification and application of freshwater phytoplankton functional groups. *J Lake Sci*, 2015, **27**(1): 11-23. DOI: 10.18307/2015.0102. [胡韧, 蓝于倩, 肖利娟等. 淡水浮游植物功能群的概念、划分方法及应用. 湖泊科学, 2015, **27**(1): 11-23.]
- [4] Padisák J, Crossetti LO, Naselli-Flores L. Use and misuse in the application of the phytoplankton functional classification: a critical review with updates. *Hydrobiologia*, 2009, **621**(1): 1-19.
- [5] Xiao LJ, Zhu Y, Yang Y *et al.* Species-based classification reveals spatial processes of phytoplankton meta-communities better than functional group approaches: A case study from three freshwater lake regions in China. *Hydrobiologia*, 2018, **811**(1): 313-324.
- [6] Santana LM, Crossetti LO, Ferragut C. Ecological status assessment of tropical reservoirs through the assemblage index of phytoplankton functional groups. *Brazilian Journal of Botany*, 2017, **40**(3): 695-704.
- [7] Yang Y, Pettersson K, Padisák J. Repetitive baselines of phytoplankton succession in an unstably stratified temperate lake (Lake Erken, Sweden): a long-term analysis. *Hydrobiologia*, 2016, **764**(1): 211-227.
- [8] Saigo M, Zilli FL, Marchese MR *et al.* Trophic level, food chain length and omnivory in the Paraná River: A food web model approach in a floodplain river system. *Ecological Research*, 2015, **30**(5): 843-852.
- [9] Devercelli M, Scarabotti P, Mayora G *et al.* Unravelling the role of determinism and stochasticity in structuring the phytoplanktonic metacommunity of the Paraná River floodplain. *Hydrobiologia*, 2016, **764**(1): 139-156.
- [10] O'Farrell I, Chaparro G, Unrein F *et al.* Water level as the main driver of the alternation between a free-floating plant and a phytoplankton dominated state: a long-term study in a floodplain lake. *Aquatic Sciences*, 2011, **73**(2): 275-287.
- [11] Coops H, Beklioglu M, Crisman TL. The role of water-level fluctuations in shallow lake ecosystems-workshop conclusions. *Hydrobiologia*, 2003, **506**: 23-27.
- [12] Mihaljević M, Špoljarić D, Stević F *et al.* The influence of extreme floods from the River Danube in 2006 on phytoplankton communities in a floodplain lake: Shift to a clear state. *Limnologica*, 2010, **40**: 260-268.
- [13] Rodrigues LC, Simões NR, Bovo-Scomparin VM *et al.* Phytoplankton alpha diversity as an indicator of environmental changes in a neotropical floodplain. *Ecological Indicators*, 2015, **48**: 334-341.
- [14] Bortolini JC, Train S, Rodrigues LC. Extreme hydrological periods: effects on phytoplankton variability and persistence in a subtropical floodplain. *Hydrobiologia*, 2016, **763**: 223-236.
- [15] Wang XL, Zhang M, Yin J. Composition and influential factors of phytoplankton function groups in Lake Chaohu. *J Lake Sci*, 2018, **30**(2): 431-440. DOI: 10.18307/2018.0214. [王徐林, 张民, 殷进. 巢湖浮游藻类功能群的组成特性及其影响因素. 湖泊科学, 2018, **30**(2): 431-440.]
- [16] Dong J, Li GB, Song LR. Historical changes of phytoplankton functional groups in Lake Fuxian, Lake Erhai and Lake Dianchi since 1960s. *J Lake Sci*, 2014, **26**(5): 735-742. DOI: 10.18307/2014.0511. [董静, 李根保, 宋立荣. 抚仙湖、洱海、滇池浮游藻类功能群 1960s 以来演变特征. 湖泊科学, 2014, **26**(5): 735-742.]
- [17] Wang X, Li LQ, Zheng BH *et al.* Composition and influential factors of algal function groups in Dongting Lake. *China Environmental Science*, 2016, **36**(12): 3766-3776. [汪星, 李利强, 郑丙辉等. 洞庭湖浮游藻类功能群的组成特征及其影响因素研究. 中国环境科学, 2016, **36**(12): 3766-3776.]
- [18] Utermöhl H. Zur Vervollkommen der quantitativen phytoplankton-methodik. *Mitt int Ver ther angew Limnol*, 1958, **9**: 1-38.
- [19] APHA (American Public Health Association). Standard methods for the examination of water and waste water, 20th ed. Washington D.C: American Public Health Association, 1998.

- [20] Wu Z, Cai Y, Liu X *et al.* Temporal and spatial variability of phytoplankton in Lake Poyang, the largest freshwater lake in China. *Journal of Great Lakes Research*, 2013, **39**: 476-483.
- [21] Qian KM, Liu X, Duan M *et al.* Distribution and its influencing factors of bloom-forming cyanobacteria in Lake Poyang. *China Environmental Science*, 2016, **36**(1): 261-267. [钱奎梅, 刘霞, 段明等. 鄱阳湖蓝藻分布及其影响因素分析. 中国环境科学, 2016, **36**(1): 261-267.]
- [22] Schmidt A. Main characteristics of the phytoplankton of the Southern Hungarian section of the River Danube. *Hydrobiologia*, 1994, **289**: 97-108.
- [23] Qian K, Liu X, Chen Y. Effects of water level fluctuation on phytoplankton succession in Lake Poyang, China-A five year study. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 2016, **16**(3): 175-184.
- [24] Salmaso N, Braioni MG. Factors controlling the seasonal development and distribution of the phytoplankton community in the lowland course of a large river in Northern Italy (River Adige). *Aquatic Ecology*, 2008, **42**: 533-545.
- [25] Emiliani MOGD. Effects of water level fluctuations on phytoplankton in a river-floodplain lake system (Paraná River, Argentina). *Hydrobiologia*, 1997, **357**(1/2/3): 1-15.
- [26] Unrein F. Changes in phytoplankton community along a transversal section of the Lower Paraná floodplain, Argentina. *Hydrobiologia*, 2002, **468**: 123-134.
- [27] Gomes LC, Miranda LE. Hydrologic and climatic regimes limit phytoplankton biomass in reservoirs of the Upper Paraná River Basin, Brazil. *Hydrobiologia*, 2001, **457**(1-3): 205-214.
- [28] Chícharo L, Hamadou RB, Amaral A *et al.* Application and demonstration of the Ecohydrology approach for the sustainable functioning of the Guadiana estuary (South Portugal). *Ecohydrology & Hydrobiology*, 2009, **9**(1): 55-71.
- [29] Ibañez MDSR. Phytoplankton composition and abundance of a central Amazonian floodplain lake. *Hydrobiologia*, 1997, **362**(1-3): 79-83.
- [30] Qian K, Liu X, Chen Y. Effects of extreme water level changes on phytoplankton succession in Poyang Lake, China-a five year study. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 2016, **16**(3): 175-184.
- [31] Liu X, Qian K, Chen Y. Effects of water level fluctuations on phytoplankton in a Changjiang River floodplain lake (Poyang Lake): Implications for dam operations. *Journal of Great Lakes Research*, 2015, **41**(3): 770-779.