

鄱阳湖浮游植物时空变化特征及其对极端洪枯事件的响应^{*}

李文轩^{1,2}, 蒋名亮^{2,3}, 徐力刚^{2,3,4**}, 胡颂平^{1**}, 游海林^{3,5**}, 周权平^{6,7}, 陈 孜^{6,7}, 张 琳¹

(1: 江西农业大学植物功能基因与组培技术研究中心, 南昌 330045)

(2: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

(3: 中国科学院南京地理与湖泊研究所鄱阳湖湖泊湿地综合研究站, 庐山 332899)

(4: 中国科学院大学南京学院, 南京 211135)

(5: 江西省科学院流域生态研究所, 南昌 330096)

(6: 中国地质调查局南京地质调查中心, 南京 210016)

(7: 自然资源部流域生态地质过程重点实验室, 南京 210016)

摘 要: 鄱阳湖作为中国最大的淡水湖泊, 其水生态健康状态始终是人们关注的热点。近些年, 鄱阳湖极端洪旱灾害频发, 浮游植物生长受极端洪旱的影响发生了明显变化。为分析浮游植物时空变化特征、探究环境因子对鄱阳湖浮游植物影响机制以及极端洪枯事件对浮游植物的影响, 利用结构方程模型(SEM)构建浮游植物与环境因子的影响路径模型, 定量分析环境因子对浮游植物的影响程度。结果表明, 鄱阳湖浮游植物以蓝藻、绿藻为主且有明显的季节特征, 在7月丰水期浮游植物密度达到最高; 由结构方程模型(SEM)可知, 影响浮游植物密度最关键的因子为物理因子(水温>pH>透明度>溶解氧), 其次为营养物质(总氮>硝态氮>总磷>磷酸盐), 浮游植物对高温、高营养和高pH较偏好。2020年极端洪水和2022年极端高温干旱, 浮游植物密度主要受水温、溶解氧、透明度等物理因子的影响; 在影响较小的营养物质中, 主要的限制性因素分别为磷和氮。与正常年份相比, 极端洪水平年鄱阳湖受入湖来水及降雨的增多, 湖区水量急剧增加, “稀释”作用超过水温和透明度对浮游植物生长的促进作用造成浮游植物密度和生物量有所下降; 在营养物质中, 磷成为主要限制性因素。而极端高温干旱年受入湖来水的减少及湖水的快速蒸发, “浓缩”作用超过水温和透明度对浮游植物生长的抑制作用造成浮游植物密度和生物量显著增加, 同时, 营养物质对浮游植物的作用更加凸显。研究结果表明极端洪枯事件导致鄱阳湖浮游植物变化明显, 确定其对浮游植物的影响机制, 可以为极端洪枯事件下浮游植物监测、管理提供一定的理论基础。

关键词: 鄱阳湖; 浮游植物; 结构方程模型(SEM); 环境因子; 极端洪枯

Spatial and temporal characteristics of phytoplankton in Lake Poyang and its response to extreme flood and drying events^{*}

Li Wenxuan^{1,2}, Jiang Mingliang^{2,3}, Xu Ligang^{2,3,4**}, Hu Songping^{1**}, You Hailin^{3,5**}, Zhou Quanping^{6,7}, Chen Zi^{6,7} & Zhang Lin¹

(1: Research Center of Plant Functional Genes and Tissue Culture Technology, College of Bioscience and Bioengineering, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, P.R.China)

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

(3: Poyang Lake Laboratory for Wetland Ecosystem Research, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Lushan 332899, P.R.China)

(4: University of Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Nanjing 211135, P.R.China)

^{*} 2023-10-07 收稿; 2024-01-15 收修改稿。

国家自然科学基金项目(41971137, U2240224, 42001109, 42307106, 42261020)、江西省科技计划项目(20213AAG01012, 20212BBG71002, 20222BCD46002, 20224BAB213035)、江西省青年人才培养项目(20204BCJL23040)、中国地质调查局地质调查项目(DD20221728)和江西农业大学2023年大学生创新创业项目(S202310410095, S202310410098, X202310410304)联合资助。

^{**} 通信作者; E-mail: lgxu@niglas.ac.cn, sp6974@163.com, youhailin1985@163.com。

(5: Institute of Watershed Ecology, Jiangxi Academy of Sciences, Nanchang 330096, P.R.China)

(6: Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, P.R.China)

(7: Key Laboratory of Watershed Eco-Geological Processes, Ministry of Natural Resources, Nanjing 210016, P.R.China)

Abstract: As the largest freshwater lake in China, the water ecological health status of Lake Poyang has been highly concerned. In recent years, extreme floods and droughts occurred frequently in Lake Poyang. Phytoplankton growth has changed significantly under the influence of extreme floods and droughts. In order to investigate the spatial and temporal dynamics of phytoplankton, and to explore the influence mechanism of environmental factors on phytoplankton and the influence of extreme flood and drought events on phytoplankton in Lake Poyang, structural equation modeling was used to develop the influence path model between phytoplankton and environmental factors, and to quantify the extent of the influence of environmental factors on phytoplankton. The results showed that the phytoplankton in Lake Poyang was dominated by cyanobacteria and green algae with seasonal variation. The most critical factors affecting the abundance of phytoplankton were physical factors (water temperature>pH>secchi depth>dissolved oxygen), followed by nutrients (total nitrogen>nitrate nitrogen>total phosphorus>phosphate). Phytoplankton preferred high temperature, nutrients and pH. In the extreme flood in 2020 and the extreme high temperature and drought in 2022, the density of phytoplankton were mainly affected by physical factors such as water temperature, dissolved oxygen and secchi depth. For nutrients, the main limiting factors were phosphorus and nitrogen. Compared with normal years, in the extreme flood year, Lake Poyang suffered from the increase of incoming water, rainfall and lake water volume. The dilution effect exceeded the promotion of phytoplankton growth by water temperature, dissolved oxygen and secchi depth, resulting in the decrease of phytoplankton density and biomass. Among the nutrients, phosphorus was the main limiting factor. In extreme high temperature and drought years, due to the reduction of incoming water and the rapid evaporation of lake water, the concentration effect exceeded the inhibitory effect of water temperature and secchi depth on phytoplankton growth, resulting in a significant increase in phytoplankton density and biomass. Meanwhile, the impacts of nutrients on phytoplankton were enhanced. This study showed the significant impacts of the extreme flood and drought events on phytoplankton in Lake Poyang. Determining the mechanism of their impacts on phytoplankton can provide scientific support for phytoplankton monitoring and management under extreme meteorological events.

Keywords: Lake Poyang; phytoplankton; structural equation modeling (SEM); environmental factors; extreme flood and drought

浮游植物作为水生生态系统中食物网的基础部分,在维持营养水平和能量循环方面发挥着关键的作用^[1-2],因其对水环境的适应性和敏感性,常被作为水生生态健康等级的重要指示生物^[3-4]。大量研究表明,浮游植物水平分布和群落结构受较多因素影响,其水平分布主要取决于环境因子季节和空间的变化,群落结构变化主要受水文条件、水质状况和营养浓度等环境因子的影响^[5];浮游植物密度和组成主要与温度、光照、营养盐、水量波动和捕食强度有关^[6-8],氮和磷则是限制湖泊浮游植物生长的基本营养物质^[9-11]。

近些年人为因素导致气候变化,洪涝、干旱等极端气候事件频发^[12],其可能会对湖泊生态系统产生严重的负面影响^[13];Wang等^[14]发现洪水通过对长江洪泛平原湖泊理化因子的影响,会间接影响浮游植物群落结构;Mihaljević等^[15]研究发现,2006年多瑙河极端洪水导致浮游植物密度和生物量显著降低,群落结构出现了明显变化;而Dembowska^[16]研究表明,2010年春夏极端洪水导致维斯瓦河(Vistula River)下游大的牛轭湖中浮游植物物种数有所增加,但浮游植物密度和生物量分别减少了约60%和75%。而当湖泊遇到极端高温干旱的威胁时,水位明显下降^[17],也会对湖泊内的各种物理、化学和生物过程产生影响^[18],甚至会加剧湖泊分层,诱发蓝藻水华快速暴发,造成湖泊缺氧,使水生生物大规模死亡^[19]。Jöhnk等^[19]研究发现2013年欧洲夏季热浪导致新湖(Nieuwe Meer)有害蓝藻的发展;Huang等^[20]研究发现2016年千岛湖流域的热浪事件导致湖中浮游植物的大量繁殖;最终当极端高温干旱超过湖泊生态系统的承载力和恢复力时,会导致生态功能丧失^[21]。以上研究表明极端洪枯事件对浮游植物影响的过程复杂多变,严重时会对水生生态系统产生恶劣影响。

鄱阳湖作为长江中下游典型的通江湖泊,水生生物资源丰富^[22]。2016—2022年期间鄱阳湖分别发生过一次极端洪涝和极端高温干旱事件,其中2020年江西省遭遇了持续性的暴雨天气,鄱阳湖水位迅速上升,湖区星子站水位达到了22.63 m,刷新了水文历史记录最高值^[23];2022年鄱阳湖流域发生了自1961年以来最严重的一次极端高温干旱事件,导致鄱阳湖水位迅速下降,出现“汛期反枯”的现象^[24]。湖泊在极端洪

枯胁迫下,水文形势的剧烈变化,使其在浑浊与清澈的状态之间不断转换,不仅会对生物与物质的交换产生显著影响,也会对藻类生长产生重要的影响^[25-26]。为深入探究极端洪枯事件对鄱阳湖浮游植物的影响,本研究基于 2016—2022 年鄱阳湖 6 个常规监测点位浮游植物及水环境的季度调查,分析 2016—2022 年鄱阳湖浮游植物密度和生物量时空变化特征,通过结构方程模型(structural equation modeling, SEM)探究水环境因子对浮游植物的影响路径,并以 2020 年(洪水年)和 2022 年(枯水年)作为典型年,分析浮游植物对极端洪枯事件的响应,解释其差异性的原因,为极端洪枯事件下鄱阳湖水生态保护和恢复,提供一定的理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

鄱阳湖位于长江中下游、江西省北部,是中国第一大淡水湖,汇聚了赣江、抚河、信江、修水、饶河等构成鄱阳湖水系^[27]。鄱阳湖水位有明显的季节性特征,年内和年际都有明显的变化^[28]。鄱阳湖星子站水位在枯水期低于 10 m(吴淞高程),同时湖区面积减少到 1000 km²左右;丰水期水位高于 14 m,湖泊面积可超过 4000 km²;退水期水位急剧下降至 10 m 左右^[2]。鄱阳湖与周边流域及长江的密切水力交互关系,造就了鄱阳湖独特的洪泛湖泊湿地生态系统,成为我国乃至全世界生物多样性保护与研究的热点区域^[29-30]。

1.2 数据来源

所有监测数据均来自江西鄱阳湖湖泊湿地生态系统国家野外科学观测研究站在主湖区设置的 6 个长期监测点,分别于 2016—2022 年 1 月(枯水期)、4 月(涨水期)、7 月(丰水期)和 10 月(退水期)^[2]采样获取了鄱阳湖的水质数据和浮游植物数据(2022 年数据包含了 7 月大采样 72 个点位数据),采样点如图 1 所示。水位数据采用星子站逐日水位,鄱阳湖水域面积数据来自江西省气象公报。

1.3 浮游植物采集方法

用采水器采集表、中和底层混合水样 1 L 带回实验室分析,浮游植物样品中加入水样体积 1.0%~1.5% 的鲁戈试剂固定沉淀 48 h,并用虹吸管慢慢吸去上清液,定容到 30 mL,最后取 0.1 mL 样品在放大 400 倍的显微镜下对浮游植物进行种类鉴定,之后根据测定的浮游植物细胞体积计算浮游植物生物量。

1.4 环境因子测定

使用 YSI EXO2 多参数水质监测仪现场测定水质指标,记录水体水温(WT)、电导率(Cond)、酸碱度(pH)、溶解氧(DO)等指标;使用 Secchi 盘测定水体透明度(SD),在实验室分析水体中的悬浮固体(SS)和营养盐浓度(总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH₃-N)、亚硝态氮(NO₂-N)、硝态氮(NO₃-N)、磷酸盐(PO₄³⁻-P)和高锰酸盐指数(COD_{Mn})。

1.5 统计分析

本文利用 Excel 对数据进行了前期的整理,用 ArcMap10.8.1 软件绘制了采样点位图,IBM SPSS Statistics 27 软件对数据进行处理,SPSS AMOS 软件进行模型分析,Origin 2021 软件对结果进行了可视化。

1.6 结构方程模型

SEM 是验证性因子分析和路径分析两种统计方法的结合,可以同时多个变量之间的直接或间接因果关系进行分析^[31-33],Chang^[34]是最早将 SEM 应用于生态研究的生态学家,最近十年 SEM 在生态学中被广泛应用^[32]。为了研究鄱阳湖浮游植物与环境因子之间复杂的影响关系,本文拟使用 SEM 分析环境因子对

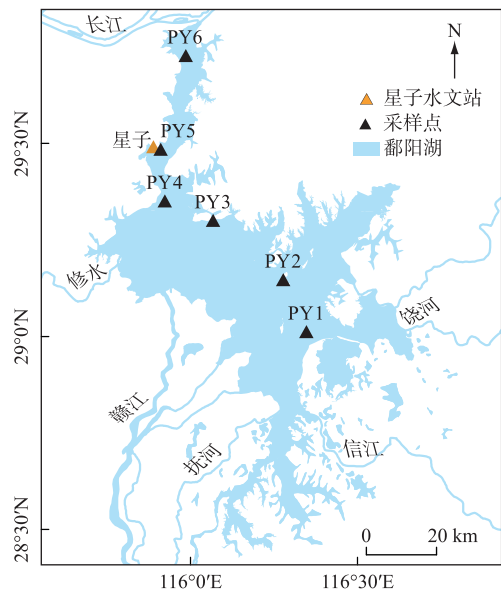


图 1 采样点分布

Fig.1 Distribution of the sampling sites

浮游植物影响关系及路径。

本文结构模型构建方案如下:

参选因子:浮游植物密度、WT、pH、DO、Cond、SD、SS、TN、TP、 NO_2^- -N、 NO_3^- -N、 NH_3 -N、 PO_4^{3-} -P 和 COD_{Mn} 。

指标选择:在结构方程分析时引入 2 个潜变量,分别为物理因子和营养物质^[31-33]。对样本数据分别进行 KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) 和 Bartlett 球形检验,当 KMO 大于 0.5、显著性水平 $P < 0.05$ 时,统计检验显著,接着利用最大方差法 (VARIMAX) 及浮游植物与水化学因子关系的机理研究筛选出分析的关键指标^[33]。基于以下原因:(a) 由于湖泊中 SD 和 SS 是相关的,保留 SD,删除 SS;(b) TN 和 NH_3 -N 具有较强的相关性,根据相应的因子负荷结果,选择与浮游植物相关性更强的一个指标;(c) 剔除掉路径不显著 ($P > 0.05$) 的指标,最终选择 12 个环境变量用于 SEM,可以构建如图 2 所示的初始模型。

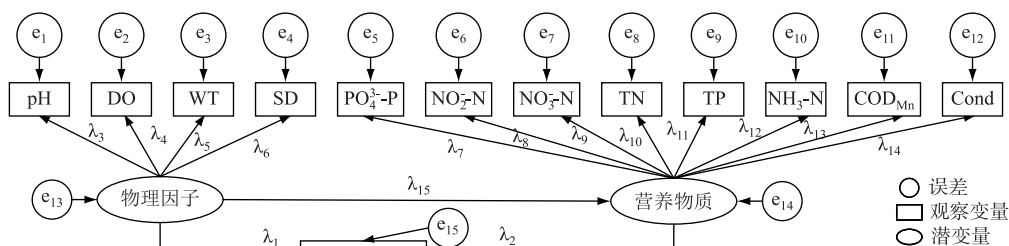


图 2 初始模型

Fig.2 Initial model

模型拟合:为了保证数据符合正态分布,并消除不同指标之间存在的差异,所有数据均进行 $\lg(x+1)$ 转换和标准化处理,由于样本量不大(2016—2022 年模型 196 个样本,2020 年模型 24 个样本,2022 年模型 102 个样本),为了得到更为准确的结果,在 Amos 软件中,所有模型均进行 Bootstrap 扩容并进行初步拟合,最后根据参数合理检验标准,对模型不断修正,得到最终模型。本文采取最常用模型适配指数:(1)绝对适配指数:卡方值/自由度(χ^2/df)、近似误差均方根(RMSEA)和拟合优度指数(GFI);(2)相对适配指数:规范拟合指数(NFI)和比较拟合指数(CFI)。当 χ^2/df 小于 3, RMSEA 小于 0.08, GFI、NFI 和 CFI 均大于 0.9 时,模型拟合度较好。

2 结果分析与讨论

2.1 鄱阳湖环境因子变化特征、浮游植物时空分布特征及对水位的响应

2.1.1 水环境因子年际变化特征 如表 1 和图 3 所示,在研究期间,WT 有明显的季节特性,在 7 月水温达到最高。其中,2020 年 7 月平均水温 26.24°C ,为同期最低;2022 年 7 月平均水温 32.08°C ,为同期最高。pH 稳定在 7.11~9.10 之间,均值为 7.80,2020 年和 2022 年 pH 分别为 8.13、7.79,高于均值。SD 呈现出一定的季节规律,通常在 7 月最高,2020 和 2022 年 SD 平均值分别为 0.58、0.34 m。DO 浓度与季节的变化有关,年内整体表现为先减后增的趋势,2020 年均值最高,为 11.95 mg/L 。TN 浓度和 Cond 也具有一定的季节性变化,但 2016—2019 年出现了一定的波动,与 2020 年相比,2022 年 7 月 TN 浓度和 Cond 显著下降。TP、 PO_4^{3-} -P、 NO_3^- -N 和 NH_3 -N 浓度变化不规律,有较大的波动。

2.1.2 典型年鄱阳湖水域面积变化特征 由图 4 可知,与历史同期相比鄱阳湖典型极端洪枯事件使鄱阳湖水域面积发生了巨大的变化。2020 年由于鄱阳湖降水时空分布不均,6—8 月平均降水量为 364.7 mm,较历史同期(184.4 mm)偏多 1 倍,出现了极端洪涝灾害,导致鄱阳湖水域面积不断增大。监测数据显示,7—10 月较近十年同期显著偏大。2020 年鄱阳湖最小水域面积出现在 1 月 8 日(910 km^2);最大水域面积出现在 7 月 14 日(4403 km^2),随后水域面积缓慢变小并逐渐恢复到正常水平。

2022 年江西省平均降水量较常年(1718.9 mm)平均偏少 11.7%。6 月下旬以来持续高温且降水持续偏少,出现了历史罕见的极端高温干旱,导致鄱阳湖水域面积不断减小。监测数据显示,6 月下旬之后鄱阳湖

表 1 2016—2022 年鄱阳湖水水质参数平均值及变化范围
Tab.1 Mean and range values of some water parameters in Lake Poyang during 2016–2022

时间	PO ₄ ³⁻ -P/ (mg/L)	TP/ (mg/L)	NO ₂ ⁻ -N/ (mg/L)	NO ₃ ⁻ -N/ (mg/L)	NH ₃ -N/ (mg/L)	COD _{Mn} / (mg/L)
2016 年	0.023 (0.002~0.098)	0.097 (0.043~0.175)	0.051 (0.005~0.359)	0.842 (0.137~1.844)	0.264 (0.11~1.175)	2.260 (0.564~5.80)
2017 年	0.031 (0.006~0.144)	0.111 (0.075~0.171)	0.040 (0.02~0.085)	1.193 (0.541~1.913)	0.610 (0.129~1.40)	2.973 (1.548~5.351)
2018 年	0.019 (0.003~0.039)	0.167 (0.142~0.288)	0.045 (0.012~0.35)	1.342 (0.964~1.901)	0.398 (0.159~0.894)	2.563 (1.558~5.00)
2019 年	0.048 (0.019~0.071)	0.132 (0.124~0.136)	0.029 (0.012~0.06)	1.080 (0.554~1.404)	0.265 (0.14~0.429)	3.360 (1.818~5.06)
2020 年	0.015 (0.001~0.042)	0.157 (0.063~0.241)	0.049 (0.009~0.118)	1.123 (0.667~1.599)	0.453 (0.206~0.692)	2.684 (1.328~4.042)
2021 年	0.014 (0.003~0.031)	0.115 (0.093~0.141)	0.037 (0.007~0.141)	1.074 (0.53~1.446)	0.315 (0.197~0.429)	3.507 (2.118~5.219)
2022 年	0.012 (0.002~0.061)	0.124 (0.107~0.154)	0.032 (0.001~0.15)	1.165 (0.177~2.071)	0.364 (0.121~0.805)	2.699 (1.446~5.44)

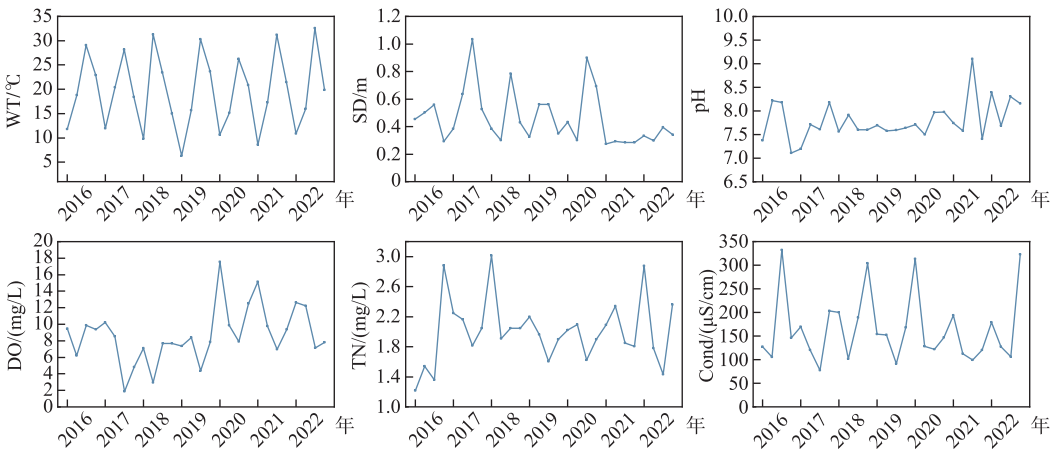


图 3 2016—2022 年鄱阳湖部分水质参数的年际变化
Fig.3 Temporal variations of some water parameters in Lake Poyang during 2016–2022

水域面积持续减小,较近十年同期出现显著差异。2022 年鄱阳湖最大水域面积出现在 6 月 27 日(3331 km²),8 月 24 日跌破十年来同期最小水域面积 878 km²,随后面积缓慢变小,屡破历史新低。

2.1.3 浮游植物时空变化特征 由图 5 和图 6 可知,2016—2022 年鄱阳湖检测出浮游植物共 7 门,分别是蓝藻门、绿藻门、硅藻门、隐藻门、甲藻门、金藻门、裸藻门,主要以蓝藻门、绿藻门和硅藻门为主。与钱奎梅等^[35]和吴召仕等^[36]研究结果相比,硅藻门占比有所下降,蓝藻门有所上升。近些年,随着鄱阳湖流域人口增长和经济的快速发展,农业化学品和工业废物的过度排放,影响了相关物理、化学和生物等环境因子,从而对浮游植物群落结构产生了影响^[37]。王艺兵等^[25]研究发现,当水质较好、水动力较强时,硅藻容易占据优势;Paerl 等^[38]则发现,随着全球气候变暖,湖泊在春季较早的分层和秋季较晚的分层延长了蓝藻的最佳生长期;同时城市、农业和工业发展对水体氮养分的过度富集也会促进蓝藻生长。以上研究结果表明,全球气候变暖和外源性污染的影响会增强水体中蓝藻的优势。

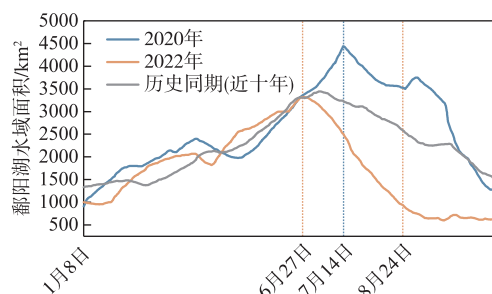


图4 典型年鄱阳湖水域面积变化
Fig.4 Changes in the water area of Lake Poyang in two typical years

和生物量下降可能与水量急剧增加有关;而2022年浮游植物密度显著升高可能与水量急剧减少有关。从年内来看,浮游植物密度变化有明显的季节特性,并在7月达到最高值;蓝藻和绿藻也有类似的季节特性,其他藻类变化不规律,主要原因是蓝藻比其它藻类更适合高温,其在高于25℃水温下达到最大生长速率^[19],而水温与浮游植物相同的季节特性,促进了浮游植物特别是蓝藻在7月快速增殖并使浮游植物密度达到全年最高。

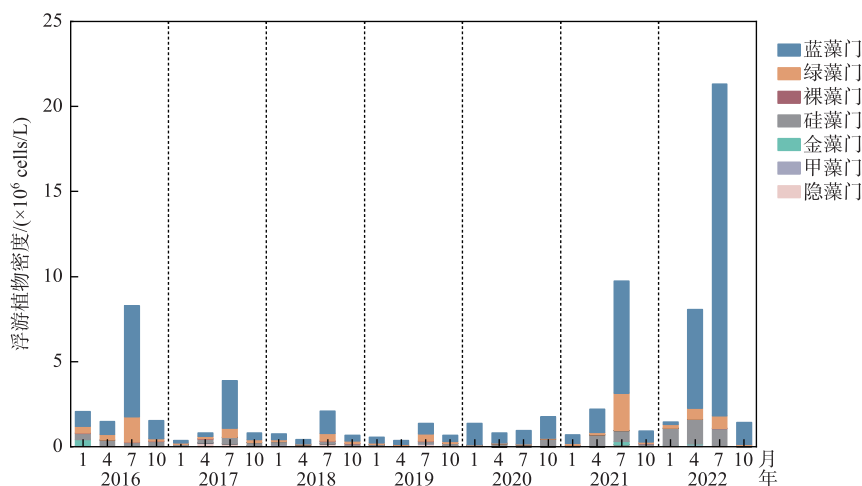


图5 鄱阳湖浮游植物密度的时间变化

Fig.5 Temporal variation of phytoplankton density in Lake Poyang

在6个采样断面中,2017—2019年和2021年位于湖区(PY1、PY2、PY3)的3个断面浮游植物密度高于湖口(PY4、PY5、PY6)的3个点位,均占总量的50%以上;2016、2020和2022年湖口浮游植物密度高于湖区,占总量的60%左右。蓝藻门、绿藻门和硅藻门为每个点位的优势门类,其中蓝藻门占比最高。

2.1.4 浮游植物对水位的响应 鄱阳湖浮游植物密度和生物量受季节性水位波动的影响,具有规律的季节性变化^[28]。由图7可知,除典型年外,2016—2022年研究期间其他正常年份浮游植物密度、生物量与水位有相同的变化趋势,随着水位的波动而波动;年内先增高后降低,有明显的季节特征,并在7月达到最高。2020年7—10月水位显著升高,7月平均水位更是达到了同期最高(21.06 m),然而随着水位的升高浮游植物密度和生物量却有所下降;2022年6月下旬水位开始迅速下降,7月平均水位更是下降到同期最低(16.13 m),浮游植物密度(2.13×10^7 cells/L)和生物量(5.68 mg/L)却随之显著增加,较上年同期(浮游植物密度

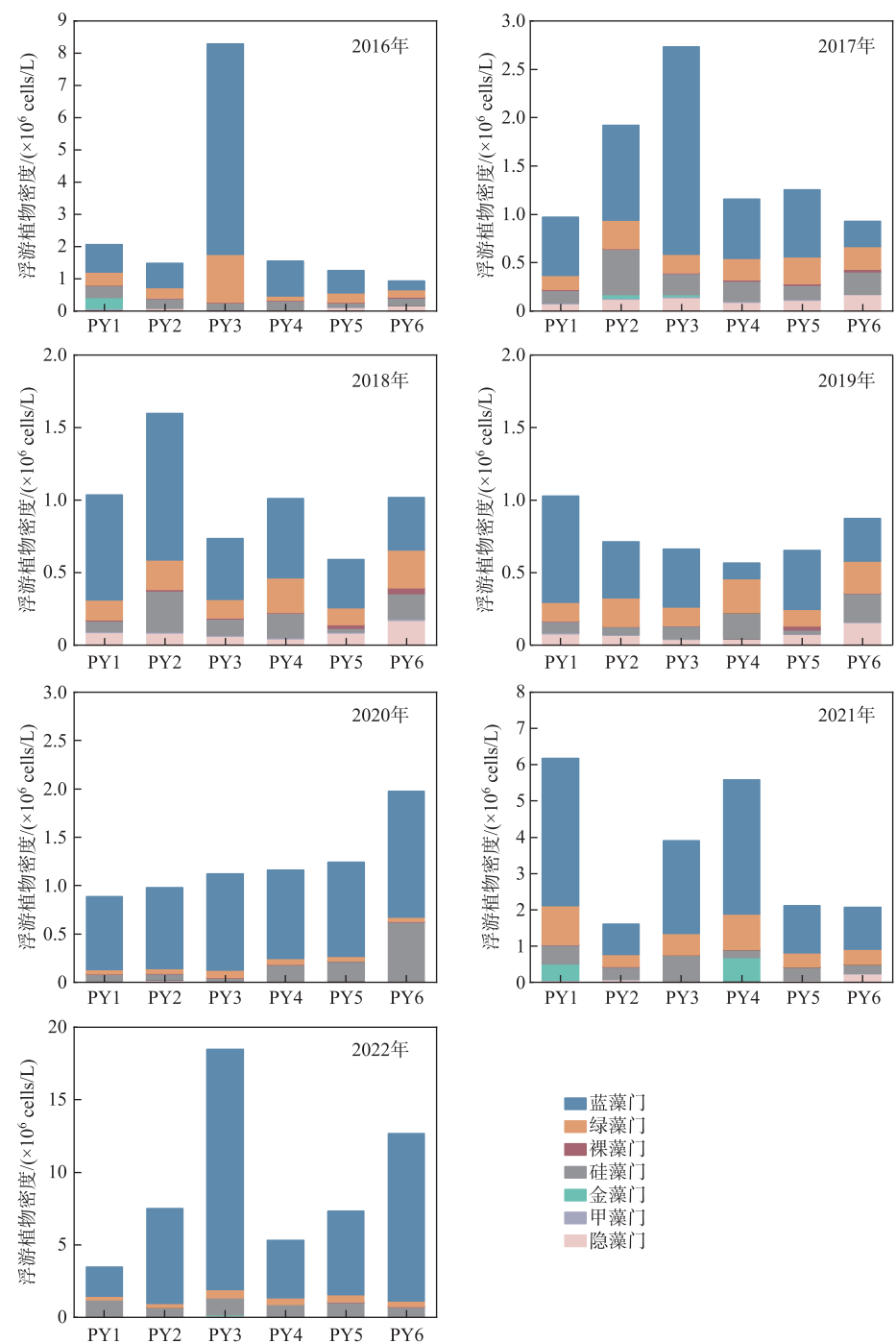


图6 鄱阳湖浮游植物密度的空间变化

Fig.6 Spatial variation of phytoplankton density in Lake Poyang

9.74×10^6 cells/L, 生物量 3.23 mg/L) 相比产生明显的变化。Liu 等^[39] 研究表明浮游植物的分类和组成受水文波动的直接影响和间接影响, 直接影响包括高水位期的稀释效应和低水位期的混合效应, 水位可以通过

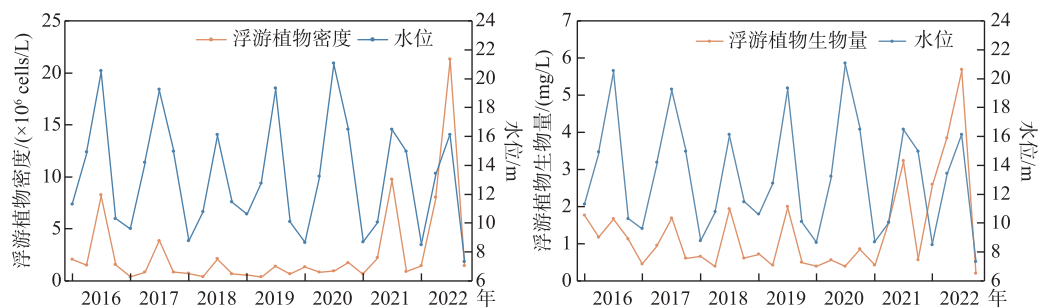


图 7 浮游植物对水位的响应
Fig.7 Phytoplankton response to water levels

稀释和混合效应直接影响浮游植物的组成;同时也能通过营养物质浓度和水下光利用率的变化间接影响浮游植物的组成。也有研究证实鄱阳湖高水位期水体快速交换、水位快速上升时,存在较强的稀释效应,当水体的稀释作用超过了浮游植物的生长速度,就会导致浮游植物密度和生物量有所下降^[40-41],而水位与透明度之间显著的正相关关系表明,高水位下能利用的有效光源较高,有利于浮游植物光合作用,水位下降则反之^[2,42]。

基于水环境因子变化(表 1 和图 3)和上述研究结果可知,2020 年洪水期间水位、营养物质平均浓度均有所上升,水体透明度也有所增加,浮游植物生长空间也随之提高。同时,2020 年 6 月下旬—7 月上旬,长江中下游降雨比多年平均高 1.5 倍,提高的有效光源和减少的光照对洪水期浮游植物生长速度的影响有可能相互抵消,而营养物质浓度的升高则可能会促进浮游植物的生长。因此,造成 2020 年浮游植物密度和生物量减少最有可能的原因是水体的稀释作用超过了生长速度。2022 年极端干旱鄱阳湖水位迅速下降,营养物质平均浓度较上年没有太大上升,水体透明度虽高于上年,但仍低于往年整体水平,光合作用能利用的有效光源较低。同时,2022 年流域平均高温日数 56.5 d,高温日有所增加,降低的有效光源和增加的光照对早期浮游植物生长速度的影响有可能相互抵消,而营养物质对浮游植物生长产生了一定的促进作用。因此,2022 年浮游植物密度和生物量显著增加可能是高温导致水体快速蒸发、水量减少导致的。

表 2 2016—2022 年数据
旋转后各指标的因子负荷*

Tab.2 Factor loadings of the measured water parameters on VARIMAX rotated factors during 2016–2022

监测指标	VF ₁	VF ₂	VF ₃	VF ₄	VF ₅
NO ₃ ⁻ -N	0.816	0.211	-0.133	0.120	—
TN	0.781	0.327	—	0.203	0.192
NH ₃ -N	0.653	-0.274	0.309	—	—
SD	—	-0.838	—	0.115	—
TP	0.246	0.534	—	0.386	0.235
Cond	—	—	0.775	—	0.328
DO	—	0.220	0.774	—	—
WT	-0.470	-0.154	-0.599	-0.104	-0.391
PO ₄ ³⁻ -P	—	—	—	0.877	—
pH	-0.437	—	-0.189	-0.590	—
COD _{Mn}	—	0.210	—	-0.129	0.789
NO ₂ ⁻ -N	0.212	-0.108	—	0.251	0.584

* 加粗数字为载荷较大的监测指标(因子负荷 ≥ 0.50),“—”为该成分下载荷为 0。

2.2 鄱阳湖浮游植物变化关键影响因子识别

2.2.1 2016—2022 年结构方程模型结果分析 2016—2022 年样本数据 KMO 为 0.689, Bartlett 球形检验 $P < 0.001$,统计检验显著。通过主成分分析法对 196 个样本提取因子,结果表明,特征值大于 1 的主成分有 5 种,解释了 68.88% 的原始数据信息和方差。并利用最大方差法(VARIMAX)旋转得到载荷较大的监测指标作为 SEM 分析的关键指标(表 2),并构建环境因子对 2016—2022 年浮游植物结构方程模型,结果如表 3 和图 8 所示。

一般来说,光照条件、营养物质浓度^[45]、pH 值、水温^[46-47],以及浮游动物和食草动物的捕食^[8]是影响水生生态系统中浮游植物生长和繁殖的主要因素。由图 8 可知,影响 2016—2022 年采样点浮游植物密度的主要是物理因子(0.54),营养物质(0.12)影响较小。同时,物理因子的变化对营养物质产生负向影响(-0.66)。浮游植物生长离不开营养盐,鄱阳湖丰水期虽会有外源性营养输入,但由于湖水与 5 条入湖河流及长江水流相混合,水体

中的营养物质稀释,总体上丰水期营养物质浓度较其他水文时期变化不大^[22],所以营养物质对浮游植物密度的影响较小且氮为限制浮游植物生长的主要营养物质。在物理因子中,WT(0.60)是最重要的正向影响因子,其次为 pH(0.57)和 SD(0.36);DO(-0.34)是负向影响因子,且 DO、SD 与浮游植物密度之间存在着正负反馈作用。

表 3 2016—2022 年 SEM 拟合指标
Tab.3 Indices of fit of SEM during 2016–2022

拟合指数	χ^2/df	RMSEA	GFI	NFI	CFI	Bollen-Stine bootstrap
标准	<3	<0.08	>0.9	>0.9	>0.9	$P=0$
拟合值	1.02	0.01	0.93	0.93	1.00	

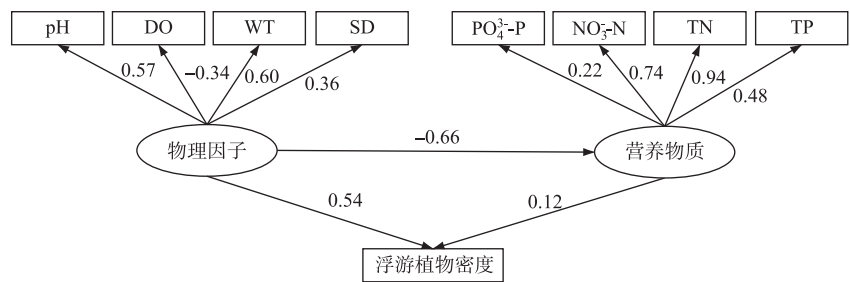


图 8 2016—2022 年环境因子对浮游植物密度影响作用模型

Fig.8 The model of the effects of environmental factors on phytoplankton density during 2016–2022

有研究表明,在自然群落中绿藻适合中等温度,硅藻喜欢较冷的水域,通常高于 25℃时,蓝藻比硅藻、绿藻等其他浮游植物生长得更好^[19,38],董静等^[48]进一步研究发现 24~30℃的温度区间最适合蓝藻的生长。研究期间鄱阳湖浮游植物以蓝藻为主,在适宜的 WT 下浮游植物会随着 WT 的升高快速繁殖,所以 WT 对浮游植物产生了正向影响,促进浮游植物的生长。SD 是反映水体悬浮物的重要指标,何书晗等^[49]研究发现 SD 变化决定了浮游植物生长繁殖所需要有效光源,进而会影响到浮游植物的群落结构^[50],因此 SD 对鄱阳湖浮游植物产生了正向作用。DO 对浮游植物的影响具有双重性,俞焰等^[51]研究发现,浮游植物通过光合作用向水体中释放氧气,增加水体中 DO 浓度,当 DO 较低时又会反过来抑制浮游植物的生长;杨潇等^[22]通过研究不同水文期浮游生物与水质的关系时发现,DO 还可能与浮游动物的活动有关。刘春光等^[52]通过研究 pH 对藻类的影响时发现,藻类都有其适宜的 pH 范围,pH 的变化不仅会影响藻类的生长繁殖,还会影响到种类的演替,当浮游植物光合作用消耗水体中的 CO₂,导致水体 pH 值升高,而 pH 越高,浮游植物数量特别是蓝藻数量也会越多^[53];近些年鄱阳湖 pH 年平均值逐年升高,偏碱性的水体一定程度上促进了鄱阳湖浮游植物的生长。以上结果表明,水环境因子对浮游植物生长和组成的影响是一个相互作用、相互制约的过程。

2.2.2 典型年结构方程模型结果分析 2020 年样本数据 KMO 值为 0.476, Bartlett 球形检验 $P<0.001$,统计检验显著。通过主成分分析法对 24 个样本分别提取因子,结果表明特征值大于 1 的 5 种主成分,解释了 83.17% 的原始数据信息和方差;2022 年样本数据 KMO 值为 0.776, Bartlett 球形检验 $P<0.001$,统计检验显著。通过主成分分析法对 102 个样本分别提取因子,结果表明,特征值大于 1 的 4 种主成分,解释了 74.45% 的原始数据信息和方差。并利用最大方差法 (VARIMAX) 旋转得到载荷较大的监测指标作为 SEM 分析的关键指标 (表 4),并构建环境因子对典型年浮游植物结构方程模型,结果如表 5 和图 9 所示。

由于 2020 年样本数 (24 个) 较小,模型部分指标未达标,但环境因子对浮游植物的影响路径仍具有一定的参考价值。由图 9 可知,影响 2020 年采样点浮游植物密度的主要是物理因子 (0.29),营养物质 (0.16) 影响较小。同时,2020 年极端洪水导致物理因子的剧烈变化对营养物质产生了更重要的负向影响 (-1.38);在影响较小的营养物质中,TP 浓度较上年有所升高 (表 1),磷成为了主要的限制因素。在物理因子中 WT 是

表 4 典型年旋转后各指标的因子负荷*

Tab.4 Factor loadings of the measured water parameters on VARIMAX rotated factors in two typical years

监测指标	2020 年					2022 年			
	VF ₁	VF ₂	VF ₃	VF ₄	VF ₅	VF ₁	VF ₂	VF ₃	VF ₄
NO ₃ ⁻ -N	-0.862	—	-0.151	0.199	—	0.892	—	-0.153	—
TN	0.804	—	0.286	0.168	—	0.896	0.138	—	—
NH ₃ -N	0.757	0.491	—	-0.161	0.253	0.871	—	0.316	—
SD	0.726	0.128	0.426	-0.211	—	-0.336	-0.609	-0.194	0.385
TP	—	0.871	0.344	0.118	—	—	0.575	0.303	0.565
Cond	-0.339	-0.688	-0.579	0.158	—	0.655	—	-0.167	—
DO	0.317	0.133	0.884	—	—	0.761	-0.357	0.259	—
WT	—	-0.126	—	0.914	0.240	-0.899	0.196	-0.213	—
PO ₄ ³⁻ -P	-0.222	—	-0.470	0.715	-0.198	0.182	0.669	-0.170	0.295
pH	—	—	—	0.258	0.903	-0.141	-0.568	0.311	0.577
COD _{Mn}	0.196	0.537	0.340	-0.225	0.593	—	-0.167	—	0.655
NO ₂ ⁻ -N	0.238	—	0.395	-0.181	0.402	0.370	0.439	-0.653	0.234

* 加粗数字为载荷较大的监测指标(因子负荷≥0.50),“—”为该成分下载荷为 0。

表 5 典型年 SEM 拟合指标

Tab.5 Indices of fit of SEM in two typical years

拟合指数	χ^2/df	RMSEA	GFI	NFI	CFI	Bollen-Stine bootstrap
标准	<3	<0.08	>0.9	>0.9	>0.9	
2020 年	2.01	0.21	0.45	0.45	0.59	$P=0.351$
2022 年	1.04	0.02	0.94	0.94	1.00	$P=0.000$

最重要的影响因子(1.00),其次是 DO(-0.73)、SD(0.43)、pH(0.31);其中 WT、SD 和 pH 对浮游植物均有正向影响,促进了浮游植物的生长。虽然最主要的物理影响因子 WT 对浮游植物生长有正向作用,但实际上 2020 年鄱阳湖浮游植物密度和生物量较同期却有所下降。有研究表明,洪水对浮游植物的生长具有双重影响,早春洪水对浮游植物生长有促进作用,晚春和夏季洪水对浮游植物生长有负面影响^[15]。因此造成 2020 年浮游植物密度和生物量较正常年有所下降最直接的原因是,涨水过程的强“稀释”作用超过了物理因子对浮游植物生长的促进速度,以及浮游动物等食草性动物的活动对“稀释”作用也起到了一定促进作用。

2022 年采样点浮游植物密度受到物理因子(0.69)和营养物质(0.29)的共同影响,物理因子影响高于营养物质。在物理因子中,WT(-1.02)是最重要的影响因子,其次为 DO(0.81)和 SD(-0.25);其中,WT 和 SD 对浮游植物有负向影响,抑制了浮游植物的生长(图 9)。同时,物理因子的变化对营养物质有重要的负向影响(-0.91),与 2020 年相比,在影响较小的营养物质中,氮取代磷成为主要的限制因素。研究表明适合蓝藻快速生长的 WT 范围为 25~30℃,大于 30℃的高温,对以蓝藻为主的浮游植物生长有明显的抑制作用^[54],而 2022 年样本数据以 7 月居多且 7 月平均 WT 高于 30℃,所以 WT 产生了负向影响。虽然主要的物理影响因子对浮游植物生长产生了负向作用,但实际上 2022 年鄱阳湖浮游植物特别是蓝藻密度和生物量较同期却显著增高。因此造成 2022 年浮游植物密度和生物量较正常年显著增长最直接的原因是,极端高温干旱鄱阳湖受入湖来水减少及蒸发作用,导致湖区水量急剧减少的“浓缩”作用超过了物理因子对浮游植物生长的抑制速度,造成了浮游植物聚集,而浮游动物等食草性动物活动对“浓缩”作用可能起到了一定的抑制作用。

综上所述,浮游植物生长繁殖受诸多环境因子共同影响,而水文的极端变化加剧了环境因子之间相互作用、相互转换,对浮游植物生长产生了更为复杂的影响,从而引起浮游植物的快速响应。与极端洪水相比,极端高温干旱对浮游植物生长产生了更大的影响,有造成蓝藻集聚的风险。因此当鄱阳湖面临极端高温干旱的威胁时,应当加强长江干流大中型水利工程下泄流量对鄱阳湖水量的补给,使鄱阳湖水位能够维

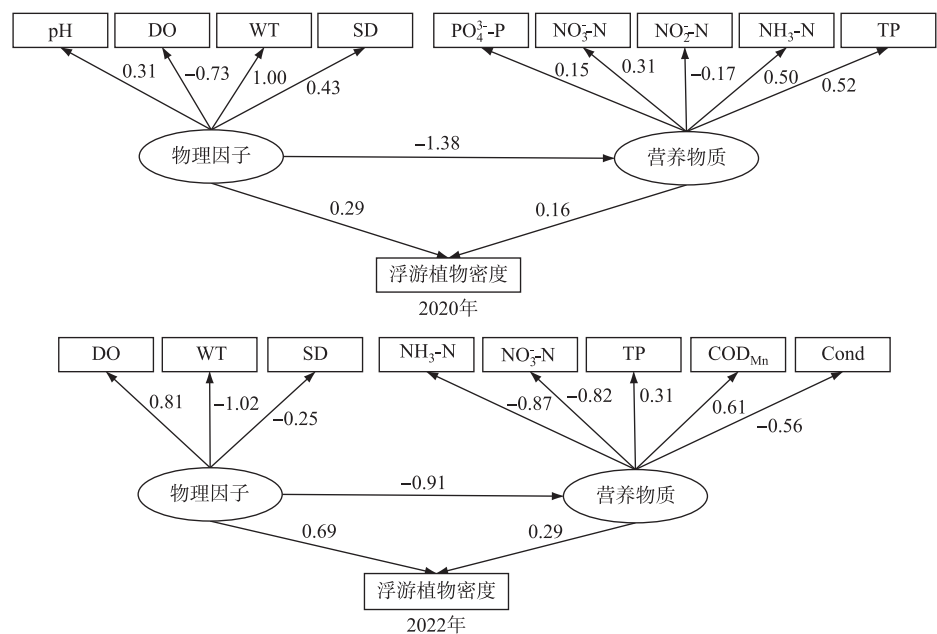


图 9 典型年环境因子对浮游植物密度影响作用模型

Fig.9 The model of the effects of environmental factors on phytoplankton density in two typical years

持在一定范围内,减缓极端高温干旱对鄱阳湖浮游植物的影响。

3 结论

- 1) 研究期间,鄱阳湖浮游植物以蓝藻门、绿藻门为优势门类,年内浮游植物变化有明显的季节特征;典型年湖口浮游植物密度高于湖区。
- 2) 极端洪枯事件对鄱阳湖浮游植物生长产生了重要的影响,2020 年极端洪水鄱阳湖受入湖来水及降雨增多的影响,“稀释”作用超过物理因子对浮游植物的生长促进作用,导致浮游植物密度和生物量较同期有所下降;2022 年极端高温干旱鄱阳湖受入湖来水减少及湖水快速蒸发的影响,导致湖区水量急剧减少,“浓缩”作用超过物理因子对浮游植物生长抑制作用,导致浮游植物密度较同期显著增加,并以蓝藻最为显著;同时浮游动物等食草性动物也会对浮游植物的变化产生一定的影响。
- 3) 影响鄱阳湖浮游植物密度的主要因素为物理因子,其次为营养物质,且营养物质的影响较小。此外,近些年鄱阳湖极端洪枯事件频发,导致浮游植物密度和生物量变化剧烈,尤其是喜高温、高营养和高 pH 的蓝藻,应加强监测和治理,来应对夏季高温有可能形成的蓝藻集聚现象。

4 参考文献

[1] Yu XP, Chen YW, Liu JF *et al.* Analysis on the current situation of phytoplankton in the typical river-lake ecotone of Lake Poyang. *Environmental Science*, 2023, **44**(9): 4954-4964. DOI: 10.13227/j.hjx.202211066. [于新平, 陈宇炜, 刘金福等. 鄱阳湖典型河湖交汇区浮游植物现状分析. 环境科学, 2023, **44**(9): 4954-4964.]

[2] Qian KM, Liu BG, Chen YW. Long term dynamics of phytoplankton functional groups in Lake Poyang during 2009–2016. *J Lake Sci*, 2019, **31**(4): 1035-1044. DOI: 10.18307/2019.0402. [钱奎梅, 刘宝贵, 陈宇炜. 鄱阳湖浮游植物功能群的长期变化特征(2009–2016 年). 湖泊科学, 2019, **31**(4): 1035-1044.]

[3] Badruzzaman M, Pinzon J, Oppenheimer J *et al.* Sources of nutrients impacting surface waters in Florida: A review. *Journal of Environmental Management*, 2012, **109**: 80-92. DOI: 10.1016/j.jenvman.2012.04.040.

[4] Suikkanen S, Laamanen M, Huttunen M. Long-term changes in summer phytoplankton communities of the open northern Baltic Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, **71**(3/4): 580-592. DOI: 10.1016/j.ecss.2006.09.004.

[5] Liu HB, Li YH, Leng F *et al.* Stage variation of phytoplankton and environmental factors in a large drinking water reservoir: From construc-

- tion to full operation. *Water Air & Soil Pollution*, 2016, **227**(9): 352. DOI: 10.1007/s11270-016-3062-1.
- [6] Liu LM, Yang J, Lv H *et al.* Phytoplankton communities exhibit a stronger response to environmental changes than bacterioplankton in three subtropical reservoirs. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(18): 10850-10858. DOI: 10.1021/acs.est.5b02637.
- [7] Davis TW, Bullerjahn GS, Tuttle T *et al.* Effects of increasing nitrogen and phosphorus concentrations on phytoplankton community growth and toxicity during *Planktothrix* blooms in Sandusky Bay, Lake Erie. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(12): 7197-7207. DOI: 10.1021/acs.est.5b00799.
- [8] Silva LHS, Huszar VLM, Marinho MM *et al.* Drivers of phytoplankton, bacterioplankton, and zooplankton carbon biomass in tropical hydroelectric reservoirs. *Limnologia*, 2014, **48**: 1-10. DOI: 10.1016/j.limno.2014.04.004.
- [9] Yang K, Yu ZY, Luo Y *et al.* Spatial and temporal variations in the relationship between lake water surface temperatures and water quality—A case study of Dianchi Lake. *Science of the Total Environment*, 2018, **624**: 859-871. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.12.119.
- [10] Xu S, Wang Y, Huang B *et al.* Nitrogen and phosphorus limitation of phytoplankton growth in different areas of Lake Taihu, China. *Journal of Freshwater Ecology*, 2015, **30**(1): 113-127. DOI: 10.1080/02705060.2014.960901.
- [11] Yang JR, Lv H, Isabwe A *et al.* Disturbance-induced phytoplankton regime shifts and recovery of cyanobacteria dominance in two subtropical reservoirs. *Water Research*, 2017, **120**: 52-63. DOI: 10.1016/j.watres.2017.04.062.
- [12] Hegerl GC, Hanlon H, Beierkuhnlein C. Elusive extremes. *Nature Geoscience*, 2011, (4): 142-143. DOI: 10.1038/ngeo1090.
- [13] Williamson CE, Saros JE, Vincent WF *et al.* Lakes and reservoirs as sentinels, integrators, and regulators of climate change. *Limnology and Oceanography*, 2009, **54**(6part2): 2273-2282. DOI: 10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2273.
- [14] Wang YT, Fan ZY, Wang WC *et al.* Effects of flood on phytoplankton diversity and community structure in floodplain lakes connected to the Yangtze River. *Diversity*, 2022, **14**(7): 581. DOI: 10.3390/d14070581.
- [15] Mihaljević M, Stević F, Horvatić J *et al.* Dual impact of the flood pulses on the phytoplankton assemblages in a Danubian floodplain lake (Kopački Rit Nature Park, Croatia). *Hydrobiologia*, 2009, **618**(1): 77-88. DOI: 10.1007/s10750-008-9550-6.
- [16] Dembowska EA. The impact of an extreme flood in spring/summer 2010 on phytoplankton communities in oxbow lakes of the lower Vistula River, central Poland. *Annales De Limnologie - International Journal of Limnology*, 2017, **53**: 19-26. DOI: 10.1051/limn/2016030.
- [17] Nie X, Hu XR, Liu GH *et al.* Effects of water level on zooplankton community during “plate-shaped lake enclosed in autumn” in a sub-lake of the Poyang Lake. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2019, **43**(2): 402-414. [聂雪, 胡旭仁, 刘观华等. 鄱阳湖子湖“玺秋湖”过程中水位变化对浮游动物群落结构的影响. 水生生物学报, 2019, **43**(2): 402-414.]
- [18] Li XY, Peng SS, Deng XW *et al.* Attribution of lake warming in four shallow lakes in the middle and Lower Yangtze River Basin. *Environmental Science & Technology*, 2019, **53**(21): 12548-12555. DOI: 10.1021/acs.est.9b03098.
- [19] Jöhnk KD, Huisman J, Sharples J *et al.* Summer heatwaves promote blooms of harmful cyanobacteria. *Global Change Biology*, 2008, **14**(3): 495-512. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2007.01510.x.
- [20] Huang QF, Li N, Li Y. Long-term trend of heat waves and potential effects on phytoplankton blooms in Lake Qiandaohu, a key drinking water reservoir. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, **28**(48): 68448-68459. DOI: 10.1007/s11356-021-15414-z.
- [21] Woolway RI, Dokulil MT, Marszelewski W *et al.* Warming of Central European Lakes and their response to the 1980s climate regime shift. *Climatic Change*, 2017, **142**(3): 505-520. DOI: 10.1007/s10584-017-1966-4.
- [22] Yang X, Ma JS, Zhang H *et al.* Community structure and the water quality during different hydrological periods in Poyang Lake. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2021, **45**(5): 1093-1103. DOI: 10.7541/2021.2020.148. [杨潇, 马吉顺, 张欢等. 鄱阳湖不同水文期浮游生物群落结构特征和影响因素及水质评价. 水生生物学报, 2021, **45**(5): 1093-1103.]
- [23] Zhang C, Li YK, Ren Q *et al.* Community structure and the water quality during different hydrological periods in Poyang Lake. *J Lake Sci*, 2022, **34**(5): 1584-1599. DOI: 10.18307/2022.0528. [张超, 李言阔, 任琼等. 鄱阳湖夏季极端水位条件下越冬水鸟多样性、空间分布及其保护对策. 湖泊科学, 2022, **34**(5): 1584-1599.]
- [24] Wang WJ, Shi K, Wang XW *et al.* A record-breaking extreme heat event caused unprecedented warming of lakes in China. *Science Bulletin*, 2023, **68**(6): 578-582. DOI: 10.1016/j.scib.2023.03.001.
- [25] Wang YB, Hou ZY, Ye BB *et al.* The characteristics of spatial and temporal variations of phytoplankton in Poyang Lake and their influencing factors. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(5): 1310-1317. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2014.1052. [王艺兵, 侯泽英, 叶碧碧等. 鄱阳湖浮游植物时空变化特征及影响因素分析. 环境科学学报, 2015, **35**(5): 1310-1317.]
- [26] Nöges T, Nöges P. The effect of extreme water level decrease on hydrochemistry and phytoplankton in a shallow eutrophic lake. *Shallow Lakes'98*. Dordrecht: Springer, 1999: 277-283. DOI: 10.1007/978-94-017-2986-4_30.
- [27] Du BX, Xu LG, Zhang J *et al.* The spatial-temporal characteristics of eutrophication in Poyang Lake and its relation-ship with the water level. *Research of Environmental Sciences*, 2019, **32**(5): 795-801. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2018.10.07. [杜冰雪, 徐力刚, 张杰等. 鄱阳湖富营养化时空变化特征及其与水位的关系. 环境科学研究, 2019, **32**(5): 795-801.]
- [28] Liu YB, Wu GP, Zhao XS. Recent declines in China's largest freshwater lake: Trend or regime shift? *Environmental Research Letters*, 2013, **8**(1): 014010. DOI: 10.1088/1748-9326/8/1/014010.
- [29] Wetland indicators: A guide to wetland identification, delineation, classification, and mapping. *Choice Reviews Online*, 1999, **37**(3). DOI: 10.1201/9781315374710.
- [30] Yin SB, Li B, Shen F *et al.* Study on wetland definition. *Wetland Science*, 2015, **13**(1): 55-65. [殷松柏, 李冰, 沈方等. 湿地定义研究. 湿地科学, 2015, **13**(1): 55-65.]

- [31] Kruk M, Paturej E. Indices of trophic and competitive relations in a planktonic network of a shallow, temperate lagoon. A graph and structural equation modeling approach. *Ecological Indicators*, 2020, **112**: 106007. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.106007.
- [32] Eisenhauer N, Bowker MA, Grace JB *et al.* From patterns to causal understanding: Structural equation modeling (SEM) in soil ecology. *Pedobiologia*, 2015, **58**(2/3): 65-72. DOI: 10.1016/j.pedobi.2015.03.002.
- [33] Liu Y, Guo HC, Yang PJ. Exploring the influence of lake water chemistry on chlorophyll *a*: A multivariate statistical model analysis. *Ecological Modelling*, 2010, **221**(4): 681-688. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2009.03.010.
- [34] Chang WYB. Path analysis and factors affecting primary productivity. *Journal of Freshwater Ecology*, 1981, **1**(1): 113-120. DOI: 10.1080/02705060.1981.9664021.
- [35] Qian KM, Liu X, Duan M *et al.* Distribution and its influencing factors of bloom-forming cyanobacteria in Poyang Lake. *China Environmental Science*, 2016, **36**(1): 261-267. DOI: 1000-6923(2016)01-0261-07. [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.]
- [36] Wu ZS, Cai YJ, 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**(3): 476-483. DOI: 10.1016/j.jglr.2013.06.008.
- [37] Huang DL, Ni ZK, Zhao S *et al.* Correlation analysis of water quality between lake inflow and outflow: A case study of Poyang Lake. *Environmental Science*, 2019, **40**(10): 4450-4460. DOI: 10.13227/j.hjxx.201902103. [黄冬凌, 倪兆奎, 赵爽等. 基于湖泊与出入湖水水质关联性研究: 以鄱阳湖为例. 环境科学, 2019, **40**(10): 4450-4460.]
- [38] Paerl H, Huisman J. Blooms like it hot. *Science*, 2008, **320**: 57-58. DOI: 10.1126/science.1155398.
- [39] Liu JF, Chen YW, Li MJ *et al.* Water-level fluctuations are key for phytoplankton taxonomic communities and functional groups in Poyang Lake. *Ecological Indicators*, 2019, **104**: 470-478. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.05.021.
- [40] 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**(4): 533-545. DOI: 10.1007/s10452-007-9135-x.
- [41] 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. *Limnologia*, 2009, **40**(3): 260-268. DOI: 10.1016/j.limno.2009.09.001.
- [42] do Socorro Rodrigues Ibañez M. Phytoplankton composition and abundance of a central Amazonian floodplain lake. *Hydrobiologia*, 1997, **362**(1): 79-83. DOI: 10.1023/A: 1003124905996.
- [43] Lei S. Review and reflection on Poyang Lake flood in 2020. *Water Resources Protection*, 2021, **37**(6): 7-12. DOI: 10.3880/j.issn.10046933.2021.06.002. [雷声. 2020年鄱阳湖洪水回顾与思考. 水资源保护, 2021, **37**(6): 7-12.]
- [44] Lei S, Shi S, Qu YP *et al.* Characteristics of extreme drought in the Poyang Lake Basin in 2022 and implications for future response. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2023, **54**(3): 333-346. [雷声, 石莎, 屈艳萍等. 2022年鄱阳湖流域特大干旱特征及未来应对启示. 水利学报, 2023, **54**(3): 333-346.]
- [45] Siegel DA, Behrenfeld MJ, Maritorena S *et al.* Regional to global assessments of phytoplankton dynamics from the SeaWiFS mission. *Remote Sensing of Environment*, 2013, **135**: 77-91. DOI: 10.1016/j.rse.2013.03.025.
- [46] Boyd PW, Strzepek R, Fu FX *et al.* Environmental control of open-ocean phytoplankton groups: Now and in the future. *Limnology and Oceanography*, 2010, **55**(3): 1353-1376. DOI: 10.4319/lo.2010.55.3.1353.
- [47] O'Neil JM, Davis TW, Burford MA *et al.* The rise of harmful cyanobacteria blooms: The potential roles of eutrophication and climate change. *Harmful Algae*, 2012, **14**: 313-334. DOI: 10.1016/j.hal.2011.10.027.
- [48] Dong J, Wang FH, Zhang M *et al.* Research progress on colony formation of green algae and influencing factors. *Journal of Hydroecology*, 2023, **44**(1): 145-154. DOI: 10.15928/j.1674-3075.202107010225. [董静, 王飞虎, 张曼等. 绿藻群体形成及其影响因素研究进展. 水生态学杂志, 2023, **44**(1): 145-154.]
- [49] He SH, Ouyang T, Zhao L *et al.* Analysis of phytoplankton community stability and influencing factors in a tributary of the three gorges reservoir. *Environmental Science*, 2021, **42**(7): 3242-3252. DOI: 10.13227/j.hjxx.202012096. [何书晗, 欧阳添, 赵璐等. 三峡库区支流浮游植物群落稳定性及其驱动因子分析. 环境科学, 2021, **42**(7): 3242-3252.]
- [50] Pan JZ, Xiong F, Li WZ *et al.* Structure, distribution and its impact factors of phytoplankton community in Fuxian Lake. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, **29**(10): 5376-5385. DOI: 1000-0933(2009)10-5376-10. [潘继征, 熊飞, 李文朝等. 抚仙湖浮游植物群落结构、分布及其影响因素. 生态学报, 2009, **29**(10): 5376-5385.]
- [51] Yu Y, Liu DF, Yang ZJ *et al.* Vertical stratification characteristics of dissolved oxygen and phytoplankton in thousand-island lake and their influencing factors. *Environmental Science*, 2017, **38**(4): 1393-1402. DOI: 10.13227/j.hjxx.201606085. [俞焰, 刘德富, 杨正健等. 千岛湖溶解氧与浮游植物垂向分层特征及其影响因素. 环境科学, 2017, **38**(4): 1393-1402.]
- [52] Liu CG, Jin XC, Sun L *et al.* Responses of algae to the variation of pH level and aeration mode. *Environmental Pollution & Control*, 2006, (3): 161-163. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3865.2006.03.001. [刘春光, 金相灿, 孙凌等. 水体 pH 和曝气方式对藻类生长的影响. 环境污染与防治, 2006, (3): 161-163.]
- [53] Hörnström E. Phytoplankton in 63 limed lakes in comparison with the distribution in 500 untreated lakes with varying pH. *Hydrobiologia*, 2002, **470**(1): 115-126. DOI: 10.1023/A: 1015619921119.
- [54] Chen YW, Qin BQ, Gao XY. Prediction of blue-green algae bloom using stepwise multiple regression between algae & related environmental factors in Meiliang Bay, Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2001, **13**(1): 63-71. DOI: 10.18307/2001.0110. [陈宇炜, 秦伯强, 高锡云. 太湖梅梁湾藻类及相关环境因子逐步回归统计和蓝藻的初步预测. 湖泊科学, 2001, **13**(1): 63-71.]