

南昌城市内湖夏季浮游植物群落分布及叶绿素荧光特征

王丽艳*, 黄文超, 王 华, 骆昱春, 万剑飏

江西省林业科学院, 江西 南昌

收稿日期: 2025年6月18日; 录用日期: 2025年7月14日; 发布日期: 2025年8月4日

摘 要

目的: 旨在探讨夏季城市内湖水华形成过程中浮游植物群落结构及其光合生理响应特征, 揭示水华形成的光合机制, 为城市湖泊藻华的监测与防控提供科学依据。方法: 本研究以南昌市黄家湖不同水深为对象, 采用分层采样技术, 并结合显微镜定量分析与PHYTO-PAM原位叶绿素荧光测定, 解析浮游植物群落结构与叶绿素荧光参数的响应规律。结果: 研究表明: (1) 夏季水华期共鉴定浮游植物36种, 以蓝藻(*Microcystis* sp., *Anabaena* sp., *Oscillatoria*等)和绿藻(*Chlorella vulgaris*, *Scenedesmus* sp.)为优势种。群落的香农指数由非水华期的2.23显著下降至1.88, 蓝藻丰度显著增加38.06% (其中微囊藻占比36.71%), 但生物量减少75.56%, 群落多样性明显降低。(2) 水华群落的光合最大效率Fv/Fm值(0.149)显著低于非水华期(0.423), 其中蓝藻表现出更高的光耐受力(Fv/Fm = 0.321), 远高于硅藻(Fv/Fm = 0.126); (3) 快速光响应曲线显示水华藻类的光适应参数 α 及电子传递速率最大值rETRmax分别下降39.78%和62.79%, 但随水深增加逐步恢复的趋势。结论: 蓝藻凭借更强的光合生理适应性, 成为夏季城市湖泊水华的主导生物; 而过强的光抑制效应则显著降低群落的光合效率, 增加表层水体的生态风险。

关键词

城市内湖, 夏季浮游植物群落, 有害藻华, 叶绿素荧光, 光合生理参数

Distribution of Phytoplankton Communities and Chlorophyll Fluorescence Characteristics in Urban Lakes of Nanchang in Summer

Liyan Wang*, Wenchao Huang, Hua Wang, Yuchun Luo, Jianbiao Wan

Jiangxi Academy of Forestry, Nanchang Jiangxi

Received: Jun. 18th, 2025; accepted: Jul. 14th, 2025; published: Aug. 4th, 2025

*第一作者。

文章引用: 王丽艳, 黄文超, 王华, 骆昱春, 万剑飏. 南昌城市内湖夏季浮游植物群落分布及叶绿素荧光特征[J]. 世界生态学, 2025, 14(3): 182-191. DOI: 10.12677/ije.2025.143023

Abstract

Objective: The aim is to explore the structure of phytoplankton communities and their photosynthetic physiological response characteristics during the formation process of summer urban lake blooms, revealing the photosynthetic mechanisms behind bloom formation, and providing a scientific basis for monitoring and controlling algal blooms in urban lakes. **Methods:** This study focused on different water depths of Huangjia Lake in Nanchang City, using a stratified sampling technique combined with quantitative analysis under a microscope and in situ chlorophyll fluorescence measurement with PHYTO-PAM to analyze the response patterns of phytoplankton community structure and chlorophyll fluorescence parameters. **Results:** The study shows that: (1) A total of 36 phytoplankton species were identified during the summer bloom period, with cyanobacteria (*Microcystis* sp., *Anabaena* sp., *Oscillatoria*, etc.) and green algae (*Chlorella vulgaris*, *Scenedesmus* sp.) being the dominant species. The Shannon index of the community significantly decreased from 2.23 during non-bloom periods to 1.88, with cyanobacteria abundance significantly increasing by 38.06% (of which *Microcystis* accounted for 36.71%), but biomass decreased by 75.56%, leading to a noticeable decline in community diversity. (2) The maximum photosynthetic efficiency F_v/F_m of the bloom community (0.149) was significantly lower than that during non-bloom periods (0.423), with cyanobacteria exhibiting higher light tolerance ($F_v/F_m = 0.321$), far exceeding diatoms ($F_v/F_m = 0.126$); (3) Rapid light response curves showed that the light adaptation parameters α and the maximum electron transport rate $rETR_{max}$ of blooming algae decreased by 39.78% and 62.79%, respectively, but showed a recovery trend with increasing water depth. **Conclusion:** Cyanobacteria, with stronger photosynthetic physiological adaptability, become the dominant organisms of urban lake blooms in summer; while the excessively strong light inhibition effect significantly reduces the community's photosynthetic efficiency, increasing the ecological risk of surface water.

Keywords

Urban Lake, Summer Phytoplankton Community, Harmful Algal Bloom, Chlorophyll Fluorescence, Photosynthetic Physiological Parameter

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

水华藻类群落及其光合特性是淡水与海洋生态系统中的重要研究领域。尤其是蓝藻(如微囊藻和鱼腥藻),在全球范围内频繁引发有害藻华(HABs),对水质、生态系统健康及水资源利用造成深远影响[1][2]。水华藻类群落的组成与结构高度依赖其光利用策略[3]-[5]。在淡水生态系统中,蓝藻通常通过调节浮力或聚集形成表面水华,从而获得最佳光照条件[1][4]。这种策略使其在分层水体中具有竞争优势,尤其在夏季营养盐丰富的条件下[4][5]。相比之下,硅藻与绿藻的光合特性更适合混合水体环境。它们通常具备较低的光饱和点,并能够快速适应光照变化[3]。浮游植物是水体中以漂浮方式生活的微小植物群体,是生态系统最主要的初级生产者,也是水生食物网的基石[6]-[8]。虽然浮游植物的光合组织仅占全球总植被生物量的一小部分,但其初级生产力却贡献了全球总初级生产力的45%以上,成为生态系统物质循环和能量流动的重要环节[5][7]。作为湖泊生态系统的初级生产者,浮游植物的动态分布受多种因素的共同影响,包括水体透明度[6][7]、浊度、水温、盐度[9]-[14]、溶解氧(DO)及pH值等水环境因子[8]-[11]。此外,其

分布还受到水平与垂直环境梯度的制约。本研究聚焦于夏季南昌市城市内湖不同水深处浮游植物群落的分布特征及其叶绿素荧光特性的表现。

浮游植物是湖泊生态系统的重要初级生产者，在物质循环和能量流动中发挥关键作用[15]。近年来，以蓝藻微囊藻(*Microcystis* sp.)、鱼腥藻(*Anabaena* sp.)等蓝藻为代表的有害藻华(HABs)频繁爆发，不仅威胁水质安全，还严重扰乱水体生态平衡[15][16]。蓝藻通常通过调节浮力或在水体表面聚集，形成密集水华，以最大化光能利用[17]-[20]；而硅藻和绿藻则更适应混合动力学下的光照条件[19]，表现出较低的光饱和点以及快速的光响应能力[21]-[23]。水华的形成受浮游植物群落构成[23]、光合特性、水体营养状况[24]和水文条件等多重因素影响[25]-[29]。南昌市黄家湖是一典型的城市内湖，其夏季高温与营养盐富集共同引发蓝藻水华。然而，针对其叶绿素荧光特性及不同水深群落光合响应的系统研究仍不充分。本研究结合群落多样性分析与 PHYTO-PAM 原位荧光测定，旨在揭示夏季水华事件中浮游植物的光合生理调控机制，为城市内湖藻华防控提供科学依据。

2. 试验方法

2.1. 样品的采集及鉴定

浮游植物采样依据《淡水浮游生物研究方法》等相关标准进行操作。对于水深小于 40 m 的水样，采用有机玻璃采水器采集；水深超过 40 m 的水样，则使用卡盖式采水器(QCC15)进行采集；河流水样直接使用 2 L 采水器采集。采集的 1 L 水样用于定性分析，现场通过 25 号浮游生物网过滤并浓缩至 50 mL，随后用 4% 的甲醛溶液固定保存。另一份 1 L 水样用于定量分析，现场立即加入 15 mL 鲁哥氏碘液固定，并带回实验室沉淀 48 小时后浓缩至 30 mL。计数时，取 0.1 mL 浓缩匀液至 0.1 mL 计数框，在 OLYMPUS CX23 显微镜下进行物种鉴定，每个样品重复计数 2 至 3 次。浮游植物生物量(湿重)通过体积换算间接获得。

2.2. 光合活性原位测定

主要光合作用参数通过 PHYTO-PAM (Walz, Effeltrich, Germany)测定，控制软件为 Phytowin2.13 (Walz)。采用 0.2 μm 滤器过滤的相应水样。为保证原位环境因子一致，进行现场测量：

1) 用移液器移取 2 mL 水样放入测量杯，经过暗适应 10 min，打开测量光获得初始荧光 F_0 ，然后打开饱和脉冲获得最大荧光 F_m ，系统自动计算获得最大光化学量子产量 F_v/F_m 。

2) 设置光合有效辐射 PAR 从 1 $\mu\text{mol}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$ 开始，每隔 20 s 使光化光增强 100 $\mu\text{mol}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$ 直至 2000 $\mu\text{mol}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$ ，得到快速光曲线 RLC，快速光曲线采用 Platt (Platt *et al.*, 1980) 的公式拟合后可以获得相对电子传递速率 $rETR$ ，光能利用效率 α ，饱和光强 E_k 。不同光强下的实际量子产量 $\Phi_{PSII}=(F_m'-F)/F_m'$ 。

2.3. 数据处理与分析

为了避免单一多样性指数造成结果偏差，利用 Gleason-Margalef 丰富度指数 D 、Simpson 优势度指数 S (Simpson, 1997)、Shannon-Wiener 多样性指数 H' (Shannon & Weaver, 1949) 和 Pielou 均匀度指数 E (Pielou)。

$$D = \frac{N_s - 1}{\ln N}$$

$$S = 1 - \sum_{i=1}^s P_i^2$$

$$H = -\sum_{i=1}^s P_i \times \ln P_i$$

$$E = \frac{H}{\ln N_s}$$

式中： N 为同一样点中个体总数； N_i 为第 i 种的个体数； N_s 为物种数；其中 f_i 为第 i 种出现的频率[15]。

3. 结果与分析

3.1. 黄家湖浮游植物群落结构

3.1.1. 物种组成

黄家湖夏季共鉴定浮游植物 36 种，隶属于 5 门，7 纲，15 目，22 科，30 属。

Table 1. Phytoplankton community species in Huangjia lake

表 1. 黄家湖浮游植物群落物种

物种 Species	拉丁名 Latin Name	非水华 Non-bloom	水华 Algal Bloom	水华 Algal Bloom	门 Phylum
针杆藻	<i>Synedra</i> sp.	174	60	40	硅藻门
四尾栅藻	<i>Scenedesmus quadricauda</i>	216	96	112	绿藻门
二尾栅藻	<i>Scenedesmus dimorphus</i>	56	32	44	绿藻门
四棘鼓藻	<i>Arthrodesmas convergens</i> Her	228	48	16	绿藻门
微小四角藻	<i>Tetraedron minimum</i>	24	0	8	绿藻门
小球藻	<i>Chlorella vulgaris</i>	1280	1680	2320	绿藻门
色球藻	<i>Chroococcus</i>	168	340	128	蓝藻门
颤藻	<i>Oscillatoria</i>	1600	2300	2256	蓝藻门
二叉四角藻	<i>Tetraedron bifurcatum</i>	16	0	0	绿藻门
三叶四角藻	<i>Tetraedron triangulare</i>	52	32	24	绿藻门
小环藻	<i>Cyclotella</i> sp.	82	0	8	硅藻门
小席藻	<i>Phormidium tenue</i>	368	600	828	蓝藻门
弯形尖头藻	<i>Raphidiopsis curvata</i>	1560	1616	2440	蓝藻门
单角盘星藻具孔变种	<i>Pediastrum simplex</i> var. <i>duodenarium</i>	14	0	0	绿藻门
平裂藻	<i>Merismopedia</i> sp.	210	140	0	蓝藻门
鱼腥藻	<i>Anabaena</i> sp.	1592	3160	1740	蓝藻门
黄丝藻	<i>Tribonema</i> sp.	52	0	0	黄藻门
单角盘星藻	<i>Pediastrum simplex</i>	96	78	16	绿藻门
四足十字藻	<i>Crucigenia tetrapedia</i>	16	0	0	绿藻门
变异直链藻	<i>Melosira varians</i>	126	0	0	硅藻门
二角盘星藻	<i>Pediastrum duplex</i>	142	0	0	绿藻门
新月藻	<i>Closterium</i> sp.	8	20	0	绿藻门
角星鼓藻	<i>Staurostrum</i> sp.	24	0	26	绿藻门
卵形隐藻	<i>Cryptomonas ovata</i>	90	136	172	隐藻门
微囊藻	<i>Microcystis</i> sp.	4480	7408	4960	蓝藻门
光滑鼓藻	<i>Cosmarium laeve</i>	16	32	8	绿藻门
多芒藻	<i>Golenkinia</i> sp.	24	0	0	绿藻门

续表

月牙藻	<i>Selenastrum</i> sp.	8	0	0	绿藻门
等片藻	<i>Diatoma</i> sp.	16	0	0	硅藻门
杆裂丝藻	<i>Stichococcus bacillaris</i>	24	44	32	绿藻门
缢缩异极藻头状变种	<i>Gomphonema constrictum</i> var. <i>capitatum</i>	0	20	0	硅藻门
项圈藻	<i>Anabaenopsis</i> sp.	350	560	42	蓝藻门
菱形藻	<i>Nitzschia</i> sp.	0	16	0	硅藻门
拟菱形弓形藻	<i>Schroederia nitzschoides</i>	0	12	0	绿藻门
具孔盘星藻	<i>Pediastrum ctathratus</i>	0	0	32	绿藻门
平板藻	<i>Tebellaria</i> sp.	0	10	0	硅藻门
总计		13112	18440	15252	
香农指数 <i>Shannon index</i>		2.232495	1.8862	1.8821	
辛普森指数 <i>Simpson index</i>		0.826853	0.77519	0.80737	

水华发生期间，浮游植物的香农指数(Shannon index)和辛普森指数(Simpson index)显著下降。夏季水华期共鉴定出 36 种浮游植物，优势种主要包括蓝藻中的微囊藻(*Microcystis* sp.)、鱼腥藻(*Anabaena* sp.)、颤藻(*Oscillatoria*)和绿藻中的小球藻(*Chlorella vulgaris*)、栅藻属(*Scenedesmus* sp.)。群落香农指数从非水华期的 2.23 下降至水华期的 1.88 (表 1)。

3.1.2. 细胞丰度和生物量

城市内湖产生水华的主要藻类以蓝藻和绿藻为主。水华水体蓝藻丰度达到 24.24×10^4 cell/L，相较于非水华水体增长了 38.06%。在水华期间，蓝藻类群中微囊藻占比达 36.71%、颤藻占 13.52%、鱼腥藻占 14.54%、弯形尖头藻占 12.04% (图 1)。

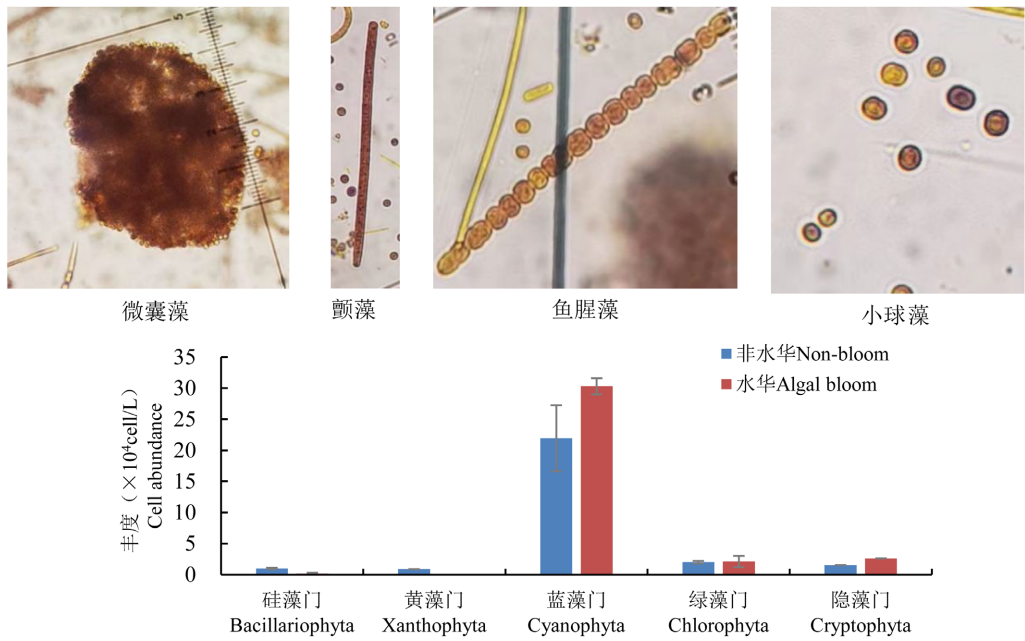


Figure 1. Phytoplankton abundance in urban inland lakes
图 1. 城市内湖浮游植物丰度图

水华期间(图 2), 水体中浮游植物的生物量由 1237.529 mg/L 显著下降至 861.854 mg/L。其中, 蓝藻门的生物量由 396.97 mg/L 减少至 97 mg/L, 减幅达 75.56%。

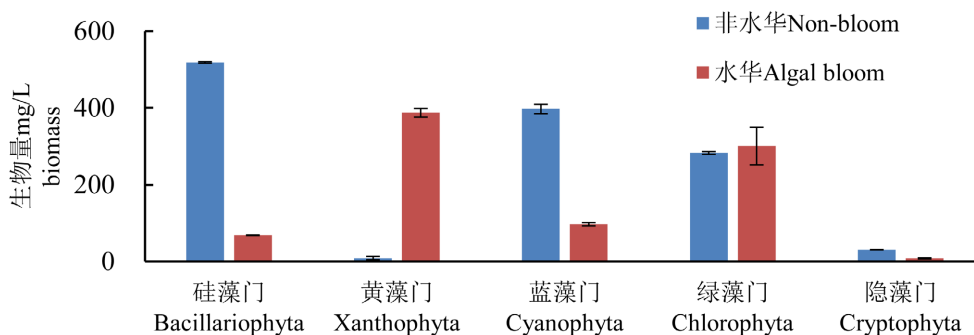


Figure 2. Phytoplankton biomass in urban inland lakes

图 2. 城市内湖浮游植物生物量图

3.2. 不同水深浮游植物光合作用 PSII 的最大光化学量子产量 Fv/Fm

非水华水体中, 各水深处 PSII 最大光化学量子产量 Fv/Fm 均保持较高水平, 约为 0.423; 其中蓝藻 (Bl) Fv/Fm 平均值为 0.297, 绿藻 (Gr) 为 0.541, 硅藻为 0.433。相比之下, 水华水体的 Fv/Fm 显著偏低, 约为 0.149; 蓝藻 (Bl) Fv/Fm 平均值为 0.321, 硅藻则仅为 0.126 (图 3)。

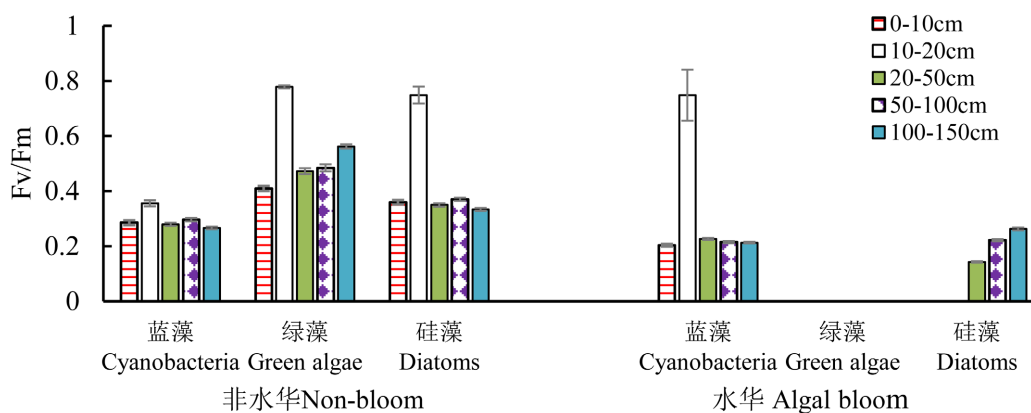


Figure 3. Maximum photochemical quantum yield of phytoplankton at different water depths

图 3. 不同水深浮游植物最大光化学量子产量图

3.3. 不同水深浮游植物光合作用快速光曲线 RLC

快速光曲线系数如图 4 所示, 与非水华水体相比, 水华水体中蓝藻、绿藻和硅藻的光合利用效率(α)、最大光电子传递速率($rETR_{max}$)以及半饱和光强(IK)均呈下降趋势。光曲线的初始斜率反映了光能利用效率。在水华发生时, 蓝藻和硅藻的光合利用效率显著降低。水华蓝藻的光曲线初始斜率(α)为 0.089, 下降幅度达 39.78%; 水华硅藻的 α 值为 0.098, 下降 47.54%。此外, 随着取样深度的增加, 水华水体中蓝藻和硅藻的光合利用效率(α)呈现出逐步增强的趋势。

图 5 表明, 水华蓝藻与水华硅藻的最大光电子传递速率($rETR_{max}$)较非水华浮游植物有所下降。其中, 水华蓝藻的 $rETR_{max}$ 为 $12.73 \mu\text{mol}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$, 下降幅度达 62.79%; 水华硅藻的 $rETR_{max}$ 为 $13.07 \mu\text{mol}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$, 下降了 64.77%。此外, 水华水体中蓝藻和硅藻的 $rETR_{max}$ 随着水深的增加呈现逐步上升的趋势。

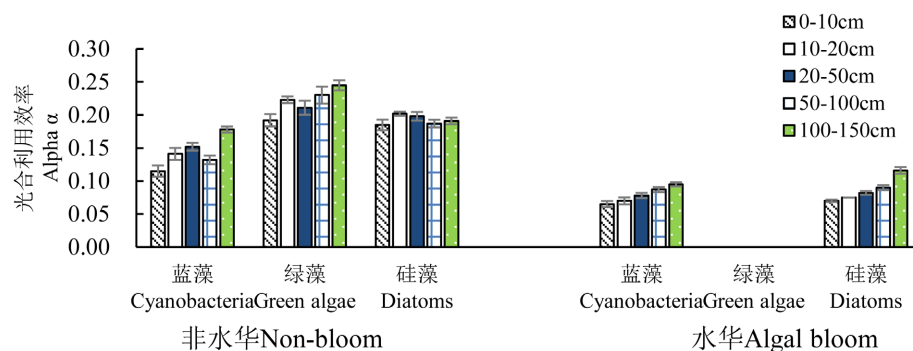


Figure 4. Initial slopes of phytoplankton light-response curves at different water depths in urban inland lakes

图 4. 城市内湖不同水深浮游植物光曲线初始斜率图

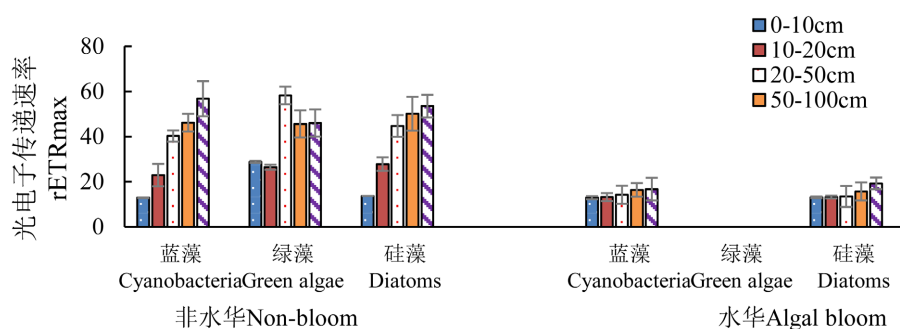


Figure 5. Maximum photochemical electron transport rate of phytoplankton at different water depths

图 5. 不同水深浮游植物最大光电子传递速率图

从图 6 的光响应曲线可以看出, 不同深度水样的快速光曲线表现出明显的特征。在低光照强度范围内, 随着光照强度的增强, 浮游植物样品的相对电子传递速率(rETR)迅速升高。当光强超过 $1000 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, rETR 的增长趋于缓慢, 并逐渐达到稳定状态(rETRmax)。当光强进一步超过 $1200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, rETR 开始出现下降趋势。

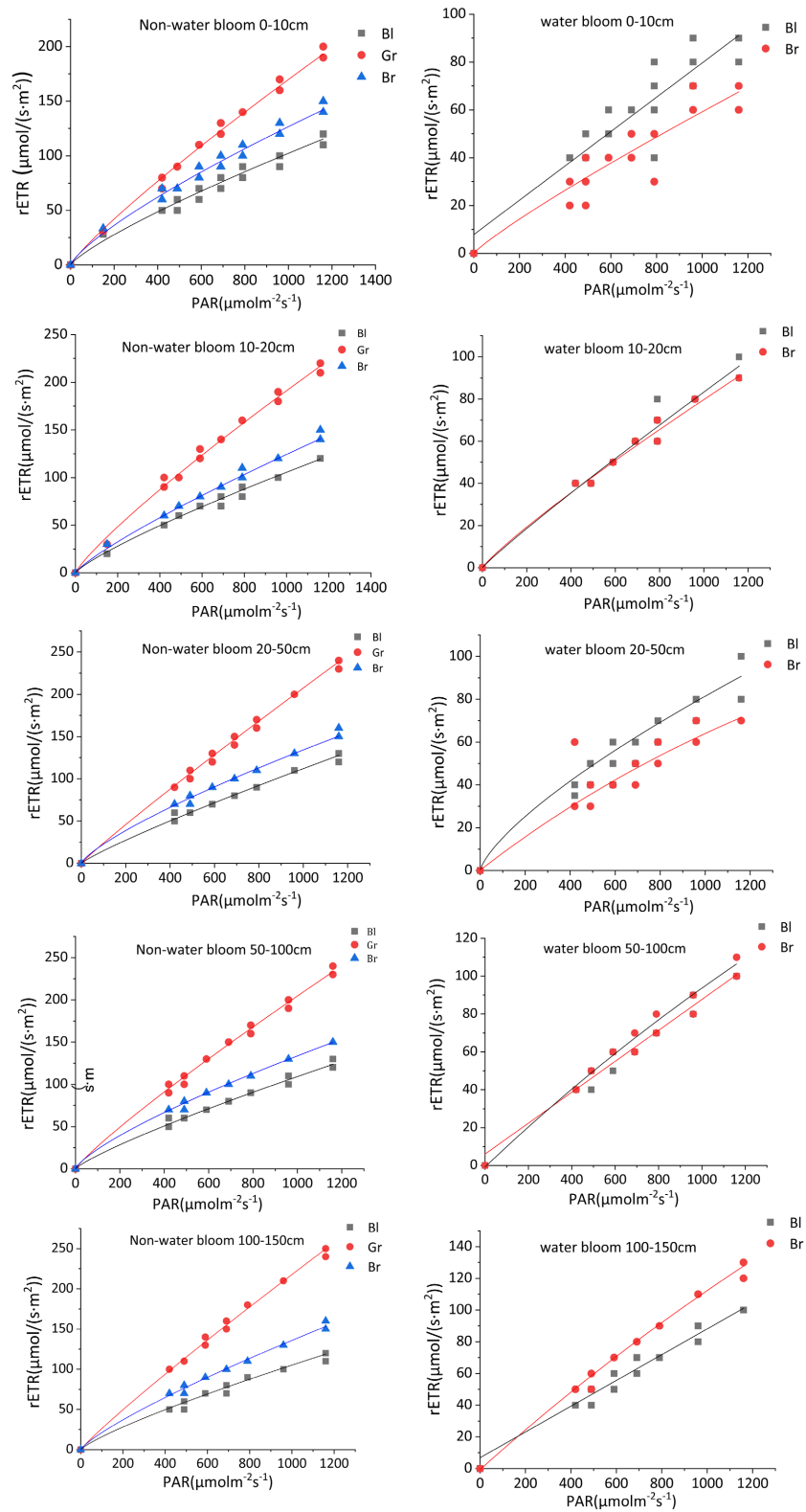
4. 讨论

4.1. 群落结构与多样性变化

本研究发现, 夏季黄家湖水华期间, 浮游植物群落结构显著向蓝藻门偏移, 其中微囊藻(*Microcystis* sp.)、鱼腥藻(*Anabaena* sp.)和颤藻(*Oscillatoria*)等优势种共同占据了丰度的 60%以上, 而绿藻与硅藻的相对比例明显下降。群落的香农指数由非水华期的 2.23 降至水华期的 1.88, Simpson 优势度指数则从 0.83 降至 0.78, 均表明蓝藻的单一优势对群落多样性产生了显著压制作用。夏季高温导致水体热分层加剧, 表层水体富含营养且透明度下降, 为浮水型蓝藻创造了稳定的高光条件和氮、磷资源的富集环境, 促进了其快速繁殖。蓝藻的竞争优势体现在其能够通过产生大气泡或多细胞胶团增强浮力, 迅速聚集于表层以最大限度地获得光照, 同时通过分泌胞外聚合物优化微环境, 从而抑制其他浮游植物类群的生长[28]。群落演替趋势显示, 随着蓝藻的持续主导, 中层和底层水体中的硅藻与绿藻虽然丰度较低, 但呈现出向深层或混合层分布的微量补偿现象, 这暗示非优势类群可能通过垂直分布或时空错位策略维持生存。

4.2. 光合生理响应与适应机制

叶绿素荧光参数揭示了水华过程对浮游植物光合活性的整体抑制作用。非水华期群落的最大荧光



注：图中 Bl 为蓝藻、Gr 为绿藻、Br 为硅藻。

Figure 6. Phytoplankton light-response curves at different water depths
图 6. 不同水深浮游植物光响应曲线

量子效率(Fv/Fm)约为 0.42, 而水华期则骤降至约 0.15, 表明 PSII 反应中心受到过量光能和营养胁迫的综合限制。相比之下, 蓝藻的 Fv/Fm(约 0.32)显著高于硅藻(约 0.13), 暗示其具有更强的光化学自我调节和修复能力。光合特性方面, 水华期蓝藻的初始光响应斜率(α)下降了 39.8%, 最大相对电子传递速率(rETRmax)减少了 62.8%; 硅藻的 α 下降 47.5%, rETRmax 减少 64.8%, 同时群落的半饱和光强(Ek)亦同步降低。这说明水华期间浮游植物群落的光饱和点大幅下移, 提高了对低至中等光强的利用效率, 但在高光强下易发生饱和和光抑制。在高光强(光合有效辐射 PAR > 1200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)条件下, 实际电子传递速率明显下降, 非光化学淬灭(NPQ)显著升高, 表明浮游植物以热耗散途径将过量光能转化为热能, 从而保护光系统免受损伤[29]。此外, 随着采样深度的增加, α 和 rETRmax 逐步回升, 展现出深层样点在光抑制减弱环境下恢复光合潜力的趋势。这表明浮游植物通过垂直迁移或群落结构调整, 有效缓解了表层的高光胁迫。

5. 结论

(1) 夏季黄家湖水华期间, 浮游植物群落多样性显著下降。受益于浮力调节、胶团形成及对营养盐的高效利用, 蓝藻占据主导地位, 而绿藻与硅藻的相对优势明显减弱。

(2) 水华群落的最大光化学量子产量(Fv/Fm)、光能利用效率(α)及最大电子传递速率(rETRmax)在非水华期显著下降, 显示强光与富营养条件的双重胁迫显著限制了群落的光合潜能。蓝藻对光抑制具有更强的耐受性, 其 Fv/Fm 显著高于其他类群。

(3) 在高光强环境下, 非光化学淬灭显著增强, 表明浮游植物通过热耗散机制保护光系统; 随着采样深度的增加, 光合作用参数逐步恢复, 体现了其适应垂直光补偿的策略。

综上所述, 南昌市城市内湖夏季水华的形成, 源于群落结构演替与光合生理调控的协同作用。为有效治理, 可建议采用人工混合或深水曝气等方式打破水体热分层, 并同时严格控制外源营养盐的输入, 以降低表层水华暴发的生态风险。

基金项目

江西省林业科学院基础研究与人才科研专项“南昌艾溪湖等城市湖泊水华藻类产生生物学机制及预警”(2022510801)。

参考文献

- [1] Islam, M. and Beardall, J. (2017) Growth and Photosynthetic Characteristics of Toxic and Non-Toxic Strains of the Cyanobacteria *Microcystis Aeruginosa* and *Anabaena Circinalis* in Relation to Light. *Microorganisms*, **5**, Article 45. <https://doi.org/10.3390/microorganisms5030045>
- [2] Kazmi, S.S.U.H., Yapa, N., Karunarathna, S.C. and Suwannarach, N. (2022) Perceived Intensification in Harmful Algal Blooms Is a Wave of Cumulative Threat to the Aquatic Ecosystems. *Biology*, **11**, Article 852. <https://doi.org/10.3390/biology11060852>
- [3] Guislain, A., Beisner, B.E. and Köhler, J. (2018) Variation in Species Light Acquisition Traits under Fluctuating Light Regimes: Implications for Non-Equilibrium Coexistence. *Oikos*, **128**, 716-728. <https://doi.org/10.1111/oik.05297>
- [4] Wu, H., Wu, X., Rovelli, L. and Lorke, A. (2024) Selection of Photosynthetic Traits by Turbulent Mixing Governs Formation of Cyanobacterial Blooms in Shallow Eutrophic Lakes. *The ISME Journal*, **18**, wrac021. <https://doi.org/10.1093/ismej/wrae021>
- [5] Nazari Sharabian, M., Ahmad, S. and Karakouzian, M. (2018) Climate Change and Eutrophication: A Short Review. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, **8**, 3668-3672. <https://doi.org/10.48084/etasr.2392>
- [6] 杨芷萱, 黎云祥, 朱广伟, 等. 2003-2023 年太湖蓝藻水华面积变化的影响因子分析[J]. 湖泊科学, 2025, 37(3): 734-751.
- [7] 华兆晖, 李锐, 杨智, 等. 2017-2022 年洱海水体营养状态的时空变化趋势及其成因分析[J]. 湖泊科学, 2024,

- 36(6): 1639-1649.
- [8] 许可. 不同氮磷浓度对普通小球藻生长及光合作用的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2018.
- [9] 郑传坤, 刘晓真, 李卫国, 等. 不同氮素对冠盘藻生长和光合荧光特性的影响[J]. 水生态学杂志, 2022, 44(1): 1674-3075.
- [10] 王小冬, 刘兴国, 陆诗敏, 等. 不同浓度蓝藻水华在好氧条件下的光合作用[J]. 中国环境科学, 2019, 39(8): 3412-3419.
- [11] 王小冬, 刘子秋, 刘兴国, 等. 不同浓度微囊藻水华在曝气扰动下的光合作用[J]. 环境科学技术, 2021, 44(12): 136-144.
- [12] 顾晓妍, 杨昌涛, 崔志杰, 等. 不同营养条件下铜锈环棱螺对假鱼腥藻生长及光合活性的抑制作用[J]. 环境科学学报, 2025, 45(6): 425-435. <https://link.cnki.net/urlid/11.1843.X.20250320.1314.004>
- [13] 石雨鑫, 汤春宇, 谭梦, 等. 常见入侵植物水提液对水华藻生长及光合荧光特性的影响[J]. 上海农业学报, 2020, 36(2): 101-107.
- [14] 李嘉仪. 东张水库浮游植物群落特征及水体富营养化评价[J]. 海峡科学, 2024(7): 53-57.
- [15] 陈丽光. 古田水库浮游生物群落结构特征分析及其生物控藻技术探讨[J]. 海峡科学, 2024(8): 83-86.
- [16] 陈静. 光谱结构和波动光强对铜绿微囊藻的影响[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2023.
- [17] 董向前, 袁宇翔, 路永正, 等. 光照与浮游动物耦合作用对浮游植物群落的影响——以小兴凯湖为例[J]. 湿地科学, 2024, 22(2): 227-235.
- [18] 戴兴露. 光质对铜绿微囊藻的光合生理及营养吸收的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2022.
- [19] 王玉婷. 过氧化钙治理蓝藻水华的作用机制与生态效应研究[D]: [硕士学位论文]. 无锡: 江南大学, 2024.
- [20] 刘泽碧, 毛旭锋, 吴艺, 等. 海湖湿地水体蓝藻水华期浮游生物群落特征及其影响因素[J]. 生态环境学报, 2024, 33(6): 946-957.
- [21] 牛漾聃, 黄清辉, 沈小兵, 等. 金鱼藻与环棱螺对铜绿微囊藻生长及光合活性的抑制作用[J]. 环境科学学报, 2022, 42(7): 299-309.
- [22] 王俊涛. 近 20 年全球浮游植物物候时空变化及环境气候影响因素研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2021.
- [23] 吴铭杰, 许海, 詹旭蓝, 等. 藻生长与衰亡对太湖沉积物-上覆水系统 CO₂ 和 CH₄ 排放通量的影响及其来源途径[J]. 湖泊科学, 2025, 37(2): 401-414.
- [24] 张玉晴, 刘佳音, 蔡元锋, 等. 蓝藻-细菌互作及其对碳、氮循环的影响研究进展[J]. 湖泊科学, 2025, 37(2): 339-353.
- [25] 姚学杏. 澎溪河水华季浮游植物群落结构及其对水环境的响应[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 西南大学, 2024.
- [26] 郭咏琪, 孟晗, 邓代兰, 等. 气候变暖对微囊藻的生长、代谢及机制研究进展[J]. 环境生态学, 2023, 5(7): 79-86.
- [27] 许珍, 殷大聪, 陈进, 等. 温度和光强对 4 种常见水华藻叶绿素荧光特性的影响[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(6): 39-44.
- [28] 李大命, 张彤晴, 唐晟凯, 等. 太湖微囊藻光合作用活性的周年动态变化. 环境科学学报[J], 2016, 36(8): 3066-3072.
- [29] Borics, G., Abonyi, A., Salmaso, N. and Ptasnik, R. (2020) Freshwater Phytoplankton Diversity: Models, Drivers and Implications for Ecosystem Properties. *Hydrobiologia*, **848**, 53-75. <https://doi.org/10.1007/s10750-020-04332-9>