

抚仙湖夏季热分层时期浮游植物与水温的响应关系研究

周书祥¹, 明升平^{1*}, 李志林², 刘绍俊², 鲁瑞梅², 平云鹏³

1. 云南省生态环境监测中心, 云南 昆明 650100

2. 云南省生态环境厅驻玉溪市生态环境监测站, 云南 玉溪 653100

3. 云南省生态环境对外合作中心, 云南 昆明 650100

DOI:10.61369/EAE.2026020008

摘 要 : 在新时代背景下, 湖泊生态学研究的深化对深水湖泊生态系统的精准认知提出了更高要求。抚仙湖作为我国典型深水湖泊, 其夏季热分层期间浮游植物群落动态直接关系到水质演化趋势与生态安全。然而, 当前全球气候变化与流域人为活动的加剧, 使浮游植物对水温分层的响应机制研究面临数据积累不足、响应规律不明等挑战。因此, 深入探究抚仙湖夏季热分层时期浮游植物与水温的响应关系, 具有重要的理论意义与现实价值。本文基于2022年抚仙湖8月现场监测数据及已有研究成果, 系统分析水温垂向分层特征及其对浮游植物分布的影响。结果表明, 抚仙湖夏季形成稳定热分层结构, 温跃层位于15 ~ 40m水层, 温度由24.6℃骤降至15.2℃, 温差达9.4℃; 溶解氧浓度在温跃层内总体呈逐渐下降的变化特征, 20 m处为5.0 mg/L, 随后随水深增加继续缓慢降低, 至60 m处为4.74 mg/L, 其最低值应出现在更深水层; 浮游植物生物量在温跃层上部达到峰值。水温分层通过调控营养盐垂向分布与光照条件, 直接驱动浮游植物的垂向异质性分布。

关 键 词 : 抚仙湖; 热分层; 浮游植物; 水温响应; 温跃层

Study on the Response Relationship Between Phytoplankton and Water Temperature During the Thermal Stratification Period in Fuxian Lake in Summer

Zhou Shuxiang¹, Ming Shengping^{1*}, Li Zhilin², Liu Shaojun², Lu Ruimei², Ping Yunpeng³

1. Yunnan Provincial Ecological Environment Monitoring Center, Kunming, Yunnan 650100

2. Yunnan Provincial Department of Ecology and Environment stationed in Yuxi City Ecological Environment Monitoring Station, Yuxi, Yunnan 653100

3. Yunnan Ecological Environment External Cooperation Center, Kunming, Yunnan 650100

Abstract : In the context of the new era, the deepening of lake ecology research has put forward higher requirements for precise understanding of deep-water lake ecosystems. As a typical deep-water lake in China, Fuxian Lake's phytoplankton community dynamics during the summer thermal stratification period are directly related to the water quality evolution trend and ecological security. However, the current global climate change and intensified human activities in river basins pose challenges to the study of the response mechanism of phytoplankton to water temperature stratification, such as insufficient data accumulation and unclear response patterns. Therefore, in-depth exploration of the response relationship between phytoplankton and water temperature during the summer thermal stratification period in Fuxian Lake has important theoretical significance and practical value. This article is based on the on-site monitoring data of Fuxian Lake in August 2022 and existing research results, systematically analyzing the vertical stratification characteristics of water temperature and its impact on the distribution of phytoplankton. The results indicate that a stable thermal stratification structure is formed in Fuxian Lake during summer, with the thermocline located in the 15–40m water layer. The temperature drops sharply from 24.6 °C to 15.2 °C, with a temperature difference of 9.4 °C; The dissolved oxygen concentration shows a gradually decreasing trend within the thermocline, with a concentration of 5.0 mg/L at 20 meters, and then continues to slowly decrease with increasing water depth, reaching 4.74 mg/L at 60 meters. Its lowest value should occur in deeper water layers; The biomass of phytoplankton reaches its peak in the upper part of the thermocline. The stratification of water temperature directly drives the vertical heterogeneity distribution of phytoplankton by regulating the vertical distribution of nutrients and lighting conditions..

Keywords : Fuxian Lake; thermal stratification; phytoplankton; water temperature response; thermocline

作者简介: 周书祥 (1987.10–), 男, 汉族, 本科学历, 云南师宗人, 目前职称: 工程师, 主要从事: 生态环境现场采样与监测分析工作。

通讯作者: 明升平 (1992.05–), 男, 汉族, 硕士研究生学历, 陕西安康人, 目前职称: 工程师, 主要从事: 生态环境监测工作。

引言

深水湖泊的水温垂向分层是影响湖泊生态系统结构与功能的关键过程。抚仙湖位于云南省中部，是我国第二深水湖泊，最大水深155m，每年3月至12月形成稳定热分层，仅在冬季短暂混合，为研究水温分层与浮游植物关系提供了理想场所^[1]。浮游植物作为湖泊初级生产者核心类群，其生长繁殖受水温、光照、营养盐等因子控制，而水温分层通过改变水体垂直交换与物质运移，塑造浮游植物的群落结构与空间分布。已有研究表明，抚仙湖夏季热分层期间，温跃层位于15 ~ 40m 水层，温度由23℃降至15℃，溶解氧、pH等理化因子呈现显著垂向分层特征。然而，当前关于浮游植物对水温分层响应的定量研究仍较薄弱，基于高分辨率现场监测数据的系统分析尚不多见。本研究整合2022年8月抚仙湖多个测点垂向监测数据，结合历史研究成果，揭示夏季热分层时期浮游植物与水温的响应关系，为深水湖泊生态保护提供科学依据。

一、研究区域与方法

（一）研究区域概况

抚仙湖地处滇中高原，湖面海拔1721m，水域面积212km²，蓄水量189.3亿 m³，是我国蓄水量最大的深水型淡水湖泊之一。湖泊呈南北向延伸，北部湖区宽而深，南部湖区窄而浅，这种地形特征导致南北湖区的水动力条件与热力结构存在一定差异。抚仙湖流域属亚热带高原季风气候，年平均气温15.6℃，年降雨量800 ~ 1100mm，雨季集中于5 ~ 10月，占全年降雨量的84%。湖泊补给主要依赖大气降水和流域地表径流，入湖河流多分布于北部湖区，这使得北部湖区的外源营养盐输入相对较高。抚仙湖目前整体处于贫营养状态，水质清澈，透明度高，但近年来随着流域人类活动增强，局部湖区已呈现富营养化趋势，这使浮游植物动态监测与研究显得尤为重要^[2]。

（二）数据来源与方法

本研究数据主要来源于2022年8月抚仙湖现场监测数据，监测点位包括湖心、尖山、哨嘴、路居等代表性湖区，每个测点按照水深分层采样，表层采样深度为0.5m，深层采样深度涵盖20m、40m、60m、80m、100m、120m、130m、140m等 不同水层。现场使用多参数水质监测仪同步测定水温、pH、溶解氧、溶解氧饱和度等指标，透明度采用塞氏盘法现场测定。浮游植物生物量以叶绿素 a 浓度作为表征指标，结合历史研究资料进行综合分析。温跃层的界定依据温度垂向梯度≥ 0.2℃ /m 的标准，计算温跃层顶界深度、底界深度、温跃层厚度与温跃层强度等特征参数，以量化热分层的结构特征。

二、抚仙湖夏季水温垂向分层特征

（一）水温垂向分布总体规律

抚仙湖夏季水温垂向分布呈现典型的三层结构，即表层变温层、中部温跃层和底层均温层。根据2022年8月监测数据，湖心点位表层0.5m 水温为24.6℃，随着水深增加，水温呈现逐渐降低趋势，至20m处降至19.7℃，40m处进一步降至16.3℃，

60m处为15.2℃，100m处为15.6℃。从温度垂向梯度来看，15 ~ 40m 水层温度变化最为剧烈，由24.6℃降至15.2℃，温差达9.4℃，平均温度梯度为0.33℃ /m，符合温跃层的界定标准。表层0.5 ~ 15m 为变温层，水温变化相对平缓，主要受气象条件与水面热交换控制^[3]；40m以下为均温层，水温稳定维持在15.2 ~ 15.6℃之间，变化幅度小于0.5℃。尖山、哨嘴、路居等其他测点的水温垂向分布与湖心基本一致，表明抚仙湖夏季热分层具有全湖尺度的空间一致性。为系统展示抚仙湖夏季水温的垂向分布特征，整理2022年8月各主要测点不同水深的水温监测数据，详见表1。从表中可见，各测点水温随水深增加均呈现一致的递减趋势，且表层至深层温差显著，印证了夏季热分层的稳定存在。

表1 2022年8月抚仙湖各测点水温垂向分布（单位：℃）

水深（m）	湖心	尖山	哨嘴	路居
0.5	24.6	24.9	24.2	24.4
20	19.7	20.3	20.6	21.9
40	16.3	15.9	16.0	15.4
60	15.2	14.8	16.0	15.4
80	—	15.0	15.6	—
100	15.6	15.0	15.8	—
120	—	15.3	—	—
130	—	15.3	—	—
140	—	15.4	—	—

（二）温跃层结构与空间差异

温跃层作为热分层的核心结构，其厚度、强度与位置直接影响水体垂向交换与物质运移。2022年8月监测数据显示，抚仙湖北部湖心温跃层顶界深度约为15m，底界深度约为40m，温跃层厚度达25m，温跃层强度为0.33℃ /m。与其他季节相比，夏季温跃层厚度最大、强度最高，这与夏季太阳辐射强、水面温度高、水体垂向对流弱密切相关^[4]。不同测点的温跃层结构存在一定差异，尖山点位由于水深较大，温跃层底界延伸至40m 以下，温跃层厚度略大于湖心；哨嘴与路居点位水深相对较浅，温跃层厚度较小，但温跃层强度相近。这种空间差异主要受局部地形与水文条件影响，北部湖区

水深且汇水面积大，热分层更为稳定；南部湖区水深较浅，受风浪扰动影响相对较大，温跃层结构略有弱化^[6]。

（三）水温分层对理化因子的调控

水温分层通过限制水体垂向混合，深刻调控溶解氧、营养盐、pH等理化因子的垂向分布。2022年8月监测数据显示，湖心表层溶解氧浓度为7.47mg/L，饱和度达110.9%，呈现过饱和状态，这与表层浮游植物光合作用强烈释放氧气密切相关。随着水深增加，溶解氧浓度迅速降低，20m处降至5.0mg/L，饱和度降至67.5%，表明温跃层上部存在明显的氧消耗过程。值得注意的是，溶解氧在40m处进一步降至4.29mg/L后，在60m处回升至4.74mg/L，呈现先降后升的独特变化趋势，这与此前研究观测到的规律一致。这种变化可能与温跃层内浮游动物垂直迁移、微生物代谢活动以及弱水动力交换条件下的局部氧补给有关。pH值垂向变化与溶解氧相似，表层pH达8.9，随水深增加逐渐降低至7.9，反映表层光合作用消耗CO₂使pH升高，底层呼吸作用占优使pH降低。营养盐方面，均温层总磷、溶解性总磷、正磷酸盐浓度相对较高，表明沉积物释放的营养盐在底层累积，而温跃层的存在阻碍了这些营养盐向上层输送^[9]。

三、浮游植物对水温分层的响应机制

（一）浮游植物垂向分布特征

浮游植物的生长与分布受水温、光照、营养盐制约，水温分层导致的生境异质性塑造了浮游植物的垂向分布格局。根据叶绿素a浓度变化，抚仙湖夏季浮游植物生物量在温跃层上部达到峰值。历史数据显示，湖心点位叶绿素a浓度从表层1.0μg/L升至20m处1.6μg/L后逐渐降低，温跃层以下维持在0.5μg/L左右。这种单峰型分布与温跃层结构密切相关：表层光照充足但营养盐匮乏，温跃层上部既有一定光照，又能从温跃层扰动中获得营养盐补给，形成最适生境^[7]。温跃层内部及以下光照急剧衰减，光合作用受限，生物量显著降低^[8]。不同湖区分布略有差异，北部外源营养盐输入多，表层生物量较高；南部透明度高，光照穿透深，浮游植物峰值水深略深。

（二）水温分层对光照与营养盐的调控

水温分层通过影响水体垂向混合与物质循环，间接调控浮游植物可利用的光照与营养盐条件。光照方面，夏季热分层使表层水体稳定，悬浮颗粒物沉降加速，水体透明度提高，2022年8月抚仙湖各测点透明度介于550~600cm之间，这有利于光照向深层穿透，扩展了浮游植物的光合作用带。然而，温跃层的存在使水体的垂向湍流扩散系数显著降低，表层浮游植物难以向下输送，而深层浮游植物又因光照不足而生长受限，最终形成温跃层上部的生物量峰值。营养盐方面，热分层阻碍了底层富营养盐水体的向上补充，使表层变温层处于相对贫营养状态，这限制了表层浮游植物的持续增殖。温跃层内部由于水体剪切作用，局部存

在微弱混合，使部分营养盐可从均温层向上扩散，加之沉降有机物的矿化释放，形成温跃层上部的营养盐相对富集区，支撑了浮游植物的峰值分布。

（三）浮游植物群落结构的水温响应

水温不仅控制浮游植物的总体生物量，还通过影响不同类群的生理生态特性，塑造浮游植物的群落结构。已有研究表明，抚仙湖浮游植物群落以蓝藻、绿藻、硅藻等为主要类群，不同类群对水温的适应性存在显著差异。夏季表层水温高达24℃以上，这有利于蓝藻的生长竞争优势，但抚仙湖目前仍处于贫营养状态，蓝藻水华尚未大规模暴发，表层浮游植物仍以绿藻和硅藻为主。温跃层水温介于15~20℃之间，这一温度区间适合多种硅藻和甲藻的生长，这些类群可适应较低光照条件，在温跃层上部形成优势^[8]。均温层水温稳定在15℃左右，光照极度匮乏，浮游植物难以进行有效光合作用，生物量极低，主要以一些耐低光照的隐藻和部分甲藻为主。水温分层导致的温度梯度还影响浮游植物的垂直迁移行为，一些具鞭毛的类群可通过主动迁移在温跃层内寻找最适光温条件，这进一步增加了浮游植物垂向分布的复杂性。

四、热分层演化与浮游植物的季节响应

（一）热分层的季节演化规律

抚仙湖热分层并非静止不变，而是呈现显著的季节演化特征。每年3~4月，随着太阳辐射增强，表层水温开始升高，温跃层开始形成，但此时温跃层强度不大，厚度较薄，处于间歇性分层阶段。5~6月，温跃层进一步强化，位置处于10~25m水层，温跃层强度增至0.3℃/m以上，热分层趋于稳定。7~10月，热分层达到鼎盛阶段，温跃层下移至15~30m水层，温跃层厚度最大，强度最高，水体垂向交换被最大程度抑制。11月，随着太阳辐射减弱和表层降温，温跃层下移至30~40m水层，强度开始减弱。12月至次年2月，温跃层逐渐消失，水体进入垂向混合期，全湖水温趋于均匀^[9]。这种季节演化规律使浮游植物在不同时期面临截然不同的生境条件，驱动其群落结构与生物量的季节更替。

（二）浮游植物对热分层演化的响应

浮游植物群落对热分层演化的响应表现为生物量季节波动与群落结构季节演替的双重特征。春季热分层形成初期，随着水温升高和光照增强，浮游植物开始复苏增殖，生物量逐渐上升，此时硅藻常占优势。夏季热分层稳定期，温跃层上部形成稳定的高生物量区，蓝藻和绿藻比例上升，但受营养盐限制，总体生物量未达富营养化水平。秋季热分层衰退期，温跃层下移，水体垂向混合增强，底层营养盐向上补充，可能引发浮游植物的秋季增殖高峰，此时硅藻和甲藻常占优势^[10]。冬季混合期，水温低、光照弱，浮游植物生物量降至全年最低，群落以一些耐低温的类群为主。水温分层强度与浮游植物生物量的相关性分析表明，温跃层

强度与表层叶绿素 a 浓度呈负相关趋势，这反映强分层限制底层营养盐向上补充，抑制了表层浮游植物的持续增殖；温跃层深度与浮游植物峰值水深呈正相关，表明浮游植物通过垂直分布调整适应温跃层位置变化。

五、结语

抚仙湖夏季热分层是控制浮游植物垂向分布的关键过程。研究

表明，温跃层上部为浮游植物最适生境，水温分层通过限制垂向混合塑造其空间分布格局。在全球变化背景下，热分层结构可能改变进而影响浮游植物动态。未来需加强长期监测，揭示热分层变化对浮游植物的潜在影响，为深水湖泊生态保护提供科学基础。

参考文献

[1] 金星, 刘绍俊, 代鑫, 等. 抚仙湖浮游植物群落结构年度特征及分析 [J]. 昆明理工大学学报 (自然科学版), 2025, 50(01): 158–169.

[2] 朱先龙, 雷逸伦, 杨予, 等. 抚仙湖浮游植物群落结构对水体垂直混合过程的响应 [J]. 湖泊科学, 2025, 37(01): 36–49.

[3] 武桂竹. 极端气候对抚仙湖水质影响的定量评估 [D]. 云南大学, 2024.

[4] 袁红香, 孙惠玲, 段立曾, 等. 抚仙湖悬浮颗粒物正构烷烃来源及季节特征 [J]. 中国环境科学, 2021, 41(06): 2812–2820.

[5] 刘晓曦. 抚仙湖浮游植物和浮游细菌群落的时空变化特征及其影响因子 [D]. 云南师范大学, 2020.

[6] 张文娜. 湖库水生态系统多稳态转换趋势及其影响因素研究 [D]. 天津大学, 2018.

[7] 王芳. 南京市典型景观湖泊浮游植物群落结构及生态健康评价 [D]. 桂林理工大学, 2023.

[8] 万蕾. 富营养化水体中浮游植物优势种形成规律研究 [D]. 河海大学, 2008.DOI: 10.7666/d.y1241824.

[9] 马晓雅. 基于自然资源的皖南地区民居区划与建造研究 [D]. 北京建筑大学, 2020.DOI: 10.26943/d.cnki.gbjze.2020.000412.

[10] 杨潇. 长江干流浮游植物群落结构和功能群特征及其与环境因子的关系 [D]. 华中农业大学, 2021.