J. Lake Sci.(湖泊科学), 2027, 39(1):000-000
DOI 10.18307/2027.0134
©2026 *by Journal of Lake Sciences*

长江中下游华阳河湖群后生浮游动物群落结构时空特征、影响因子及水质生态学评价*

宋志玉[1, 2]，王浩然[1, 3]，李冰[1, 3]，赵晓松[1, 3]，宋继鹏[1, 3]，蒋宇[1, 3]，戴雪[2]，万荣荣[1, 3, 4**]
（1：中国科学院南京地理与湖泊研究所，湖泊与流域水安全全国重点实验室，南京 211135）
（2：河海大学地理与遥感学院，南京 211000）
（3：中国科学院大学南京学院，南京 211135）
（4：中国科学院大学资源与环境学院，北京 100049）

摘要：浮游动物群落结构是反映湖泊健康状况的关键指标，研究其时空动态及环境驱动机制，对于湖泊生态保护与水环境管理具有重要意义。华阳河湖群位于长江中下游，是典型闸控通江湖群和区域重要饮用水源地，阐明其后生浮游动物群落结构的时空变化及环境驱动机制，对湖泊生态保护、水质改善和饮用水源地管理具有重要意义。本研究于 2023 年 4 月（春季）、7 月（夏季）、10 月（秋季）及 2024 年 1 月（冬季）对华阳河湖群后生浮游动物群落结构和水体理化因子开展了系统调查，采用冗余分析（RDA）和方差分解分析（VPA）探讨群落结构的主要驱动因素。调查期间共鉴定出后生浮游动物 50 属 67 种，其中轮虫 23 属 37 种，枝角类 14 属 15 种，桡足类 13 属 15 种；丰度和生物量范围分别为 21–956 ind./L 和 2.83–17.09 mg/L。时间尺度上，后生浮游动物群落结构表现出明显季节差异，丰度在秋季最高、生物量在春季最高，夏季丰度和生物量均处于最低水平；秋、冬季优势种数、Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数高于春、夏季，Margalef 丰富度指数则在夏季达到最高。空间尺度上，后生浮游动物丰度和生物量总体呈现龙感湖＞黄大湖＞泊湖，而 Margalef 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数则表现为泊湖＞黄大湖＞龙感湖。环境驱动分析表明，不同时间和空间尺度上影响后生浮游动物群落结构的关键环境因子存在差异。时间上，春季后生浮游动物群落与悬浮物（SS）和氨氮（NH_4^+–N）呈显著正相关，夏季与溶解性总磷（DTP）和磷酸盐（PO_4^{3-}–P）呈显著正相关，秋季与 PO_4^{3-}–P 和高锰酸盐指数（COD_{Mn}）呈显著正相关，冬季与总磷（TP）和溶解氧（DO）呈显著正相关。在空间上，SS、PO_4^{3-}–P、SD 分别是驱动龙感湖、黄大湖和泊湖后生浮游动物群落结构分布的主要环境因子。VPA 结果表明，水环境因子与闸控水文因子共同解释了后生浮游动物群落结构变异的 54.7%，其中水环境因子独立解释率为 28.1%，水文因子独立解释率为 17.4%，二者共同解释率为 9.2%，说明闸控水位过程通过影响水体交换、悬浮物输移和营养盐分布，对群落结构变化具有重要作用。从季节变化看，夏季华阳河湖群总体处于贫–中营养状态、寡污型，春、秋、冬季则处于富营养状态、α-中污型；从空间分布看，泊湖属于贫–中营养状态、寡污型，黄大湖属于中营养状态、α-中污型，龙感湖属于富营养状态、β-中污型。总体来看，华阳河湖群后生浮游动物群落结构具有显著时空异质性，其形成受营养盐、悬浮物、透明度、溶解氧及闸控水文过程的共同驱动。研究结果可为闸控通江湖泊水生态保护、富营养化防控和饮用水源地精细化管理提供科学依据。
关键词：后生浮游动物；群落结构；环境因子；水质评价；华阳河湖群

Spatiotemporal characteristics, driving factors, and water quality ecological assessment of metazoan zooplankton communities in the Huayanghe lakes, middle-lower reaches of the Yangtze River*

Song Zhiyu[1, 2], Wang Haoran[1, 3], Li Bing[1, 3], Zhao Xiaosong[1, 3], Song Jipeng[1, 3], Jiang Yu[1, 3], Dai Xue[2], Wan Rongrong[1, 3, 4**]
(*1: State Key Laboratory of Lake and Watershed Science for Water Security, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, P.R.China)*
(2: College of Geography and Remote Sensing, Hohai University, Nanjing 211000, P.R.China)
(3: University of Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, P.R.China)

*2025-11-23 收稿；2026-05-19 收修改稿;2026-05-20 录用.
国家重点研发计划项目（2022YFC3204104）、国家自然科学基金项目（42071146）联合资助。
** 通讯作者：E-mail: rrwan@niglas.ac.cn.

(4: College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R.China)

Abstract: Zooplankton community structure is a critical indicator of lake ecosystem health. Clarifying its spatiotemporal dynamics and environmental drivers is important for ecological conservation and water environment management. The Huayanghe lakes are typical sluice-controlled river-connected lake groups in the middle and lower reaches of the Yangtze River, and they also serve as an important regional drinking water source. Investigating the spatiotemporal variations and driving mechanisms of metazoan zooplankton community structure in this lake group provides essential references for lake ecological protection, water quality improvement, and drinking water source management. This study conducted systematic field investigations on metazoan zooplankton community structure and aquatic physicochemical parameters in the Huayanghe lakes across four seasons: April 2023 (spring), July 2023 (summer), October 2023 (autumn), and January 2024 (winter). Redundancy analysis (RDA) and variation partitioning analysis (VPA) were used to identify the core factors shaping the zooplankton community structure. In total, 67 metazoan zooplankton species from 50 genera were identified, including 37 Rotifer species from 23 genera, 15 Cladoceran species from 14 genera, and 15 Copepod species from 13 genera. Abundance and biomass of metazoan zooplankton ranged from 21 to 956 ind./L and from 2.83 to 17.09 mg/L, respectively. The zooplankton community showed clear seasonal changes. Abundance peaked in autumn, while biomass was highest in spring; both were lowest in summer. The number of dominant species, Shannon-Wiener diversity, and Pielou evenness were higher in autumn and winter than in spring and summer, whereas Margalef richness was highest in summer. Spatially, abundance and biomass followed the order: Lake Longgan > Lake Huangda > Lake Bo. In contrast, Margalef richness, Shannon-Wiener diversity, and Pielou evenness showed the opposite pattern: Lake Bo > Lake Huangda > Lake Longgan. Environmental correlation analysis revealed that the key factors affecting zooplankton community structure differed markedly across seasons and lakes. Seasonally, zooplankton communities correlated positively with suspended solids (SS) and ammonium nitrogen (NH_4^+-N) in spring, with dissolved total phosphorus (DTP) and phosphate (PO_4^{3-}–P) in summer, with PO_4^{3-}–P and permanganate index (CODMn) in autumn, and with total phosphorus (TP) and dissolved oxygen (DO) in winter. Spatially, SS, PO_4^{3-}–P, and water transparency (SD) were the main drivers for zooplankton structure in Lake Longgan, Lake Huangda, and Lake Bo, respectively. VPA results showed that water environmental factors and sluice-regulated hydrological factors together explained 54.7% of the total variation in zooplankton community structure. Specifically, water environmental factors independently explained 28.1%, hydrological factors independently explained 17.4%, and their joint effect explained 9.2%. These results indicate that sluice-regulated water levels modulate water exchange, suspended sediment transport, and nutrient distribution, thereby substantially shaping the zooplankton community. Seasonal assessment showed that the Huayanghe lakes were oligotrophic–mesotrophic and oligosaprobic in summer, but eutrophic and α-mesosaprobic in spring, autumn, and winter. Spatially, Lake Bo was oligotrophic–mesotrophic and oligosaprobic, Lake Huangda was mesotrophic and α-mesosaprobic, and Lake Longgan was eutrophic and β-mesosaprobic. Overall, the metazoan zooplankton community in the Huayanghe lakes exhibited clear spatiotemporal heterogeneity, driven by multiple environmental variables including nutrients, suspended solids, and dissolved oxygen. This study provides a scientific basis for ecological protection, eutrophication control, and drinking water source management in the Huayanghe. lakes

Keywords: Metazoan zooplankton; Community structure; Environmental factors; Water quality assessment; The Huayanghe lakes

湖泊生态系统在水质净化、生物多样性维持和水资源供给等方面发挥着重要作用，为人类社会提供了关键的生态服务[1]。然而，在人类活动和气候变化的双重影响下，湖泊生态系统正面临富营养化加剧、水体生态功能退化以及生物多样性下降等问题。这些变化不仅削弱了湖泊生态系统的自净能力，还可能增加水华暴发、生态失衡的风险，进而对区域水生态安全和水资源可持续利用构成威胁[2]。因此，科学、有效地评估湖泊水生态系统健康状况，已成为开展水资源管理和生态修复的重要基础[3]。

在湖泊生态系统健康评价体系中，生物指标因能综合反映环境变化的长期效应而被广泛应用。其中，浮游动物作为连接初级生产者和高营养级生物的重要纽带，在维持湖泊生态系统的物质循环与能量流动中发挥着不可替代的作用[4,5]。同时，浮游动物具有生命周期短、更新快、对环境变化响应迅速等特点，其群落结构和功能状态能够敏感地反映水体营养状况和生态扰动程度[6]，因此常被视作湖泊水质、营养状态及生态系统健康的重要指示指标，并广泛应用于湖泊生态系统健康评估[7,8]。已有研究表明，不同水体中浮游动物群落结构受多种环境因子的综合影响，且具有明显的时空异质性。如刘俏等[9]发现福建山美水库浮游动物群落结构存在显著季节变化，主要受电导率、水温和营养盐等因素控制；杨姣姣等[10]指出溶解氧、pH、和 chl.*a* 是影响滇池不同湖区浮游动物稳定性的主导因子；沈玉莹等[11]的研究表明鄱阳湖浮游动物群落结构在干旱季节主要受水温、水位、硝态氮、氨氮等的共同影响，非干旱季节受化学需氧量和水位的影响较大。此外，徐梅[12]和周蒙蒙[13]的研究也进一步证实了水温、透明度、营养盐及水动力条件对华阳河湖群的浮游动物群落结构的重要影响。总体来看，现有研究已较充分揭示了自然湖泊及通江湖泊中浮游动物群落对环境变化的响应规律，但对于具有典型闸控特征的湖群系统，闸控调度引起的江湖连通与水动力过程变化可能重塑关键环境梯度，从而使其群落响应机制具有一定特殊性。而目前针对典型闸控湖群浮游动物群落结构及其环境驱动机制的系统研究仍显不足，尤其缺乏将闸控特征与水生态健康评价相结合的综合研究。

华阳河湖群主要位于安徽省安庆市宿松县，地处长江中下游左岸，由龙感湖、黄大湖（黄湖、大官湖）、泊湖组成。湖泊之间相互连通，水体自西向东分别流经龙感湖、黄大湖、泊湖，湖水经华阳闸、杨湾闸注入长江，具有水体连通性强、闸控调度频繁等特征，为探讨闸控条件下后生浮游动物群落驱动机制提供了理想研究对象。作为安庆市沿江湿地的重要组成部分，华阳河湖群被世界自然基金会确认为长江中下游三处最重要的湿地区域之一，是候鸟重要的越冬地和迁徙停歇地，同时是周边城镇重要的饮用水源地。其水环境质量和生态安全不仅关系区域湿地保护，也直接区域影响饮用水安全和水资源可持续利用，因此其水生态健康评价与生态调控具有重要的科学意义和现实价值。本研究通过对华阳河湖群后生浮游动物群落开展季度调查，系统分析其群落结构的时空变化特征，并结合水体理化因子，识别在闸控通江湖泊中影响后生浮游动物群落结构的关键环境驱动因素，以期为华阳河湖群水生态系统的管理与生态修复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 采样点的分布及样品采集

华阳河湖群（116° 00′～116° 33′ E，29° 52′～30° 58′ N）位于长江中下游左岸，总面积约 686.24 km^2，其中龙感湖、黄大湖、泊湖的面积分别为 280.11 km^2、255.10 km^2 和 151.03 km^2，平均水深分别为 3.78 m、3.93 m 和 4.41 m。湖群位于北亚热带湿润季风气候区，具有典型的季风气候特征，气候四季分明。年均气温为 16.6 ℃，多年平均降水量 1301.05 mm，降水季节分配不均，春、夏两季分别占年降水量的 33.10%和 39.22%，其中 5 月中旬至 7 月中旬的梅雨期降水最为集中；秋、冬季降水较少，仅占 14.46%和 13.21%。湖群区域整体呈现典型的长江中下游滨湖平原土地利用格局，土地利用类型以水域与湿地生态系统为主体，其周缘分布有耕地、鱼塘等农用地，并夹杂部分村镇建设用地。

由于华阳河湖群受闸坝调控影响显著，湖泊间水文连通性及水动力条件在不同调度阶段存在明显差异。根据常规调度规程，5 月进入汛期管理，7—10 月为主要防汛期，当长江水位高于湖内水位时关闭闸门以防止江水倒灌，当江水位低于湖内水位时适时开闸排湖入江；10 月至次年 4 月为非汛期蓄水期，调度以蓄水保水和生态水位维持为主。为反映空间异质性，本研究在华阳河湖群共设置 10 个采样点（图 1）。其中龙感湖设置 4 个采样点，编号为 L1、L2、L3、L4；黄大湖设置 3 个采样点，编号为 H1、H2、H3；泊湖设置 3 个采样点，编号为 P1、P2、P3。分别于 2023 年 4 月（春季）、7 月（夏季）、10 月（秋季）及 2024

年 1 月（冬季）开展华阳河湖群后生浮游动物和水体理化因子要素调查，分别对应汛前低水位/腾库后阶段、主汛期防洪调度阶段、汛末—非汛期初期蓄水阶段和非汛期蓄水阶段。

现场测定采用 YSI-EXO 多参数水质监测仪，记录水温（WT）、溶解氧（DO）、电导率（Cond）、pH 及氧化还原电位（ORP）；透明度（SD）使用塞氏盘（Secchi disk）测定。根据实际水深情况进行分层采样：当水深不足 3 m 时，采集表层水样（距水面 0.5 m 处）；当水深介于 3～10 m 之间时，分别采集表层（距水面 0.5 m）与底层（距底 0.5 m）水样，并混合均匀作为代表样品。所有水样分别分装于 1 L 与 500 mL 聚乙烯瓶中密封保存，并带回实验室测定水体其他理化指标。水体总氮（TN）、总磷（TP）、氨氮（NH_4^+–N）、硝态氮 NO_3^-–N）、亚硝态氮（NO_2^-–N）、磷酸盐（PO_4^{3-}–P）、溶解性总磷（DTP）、溶解性总氮（DTN）、叶绿素 a（Chl.*a*）的测定方法参照《水和废水监测分析方法（第四版）》[14]，悬浮物（SS）采用 Whatman CF/F 滤膜过滤，采用 105℃烘干重量法测定[15]。

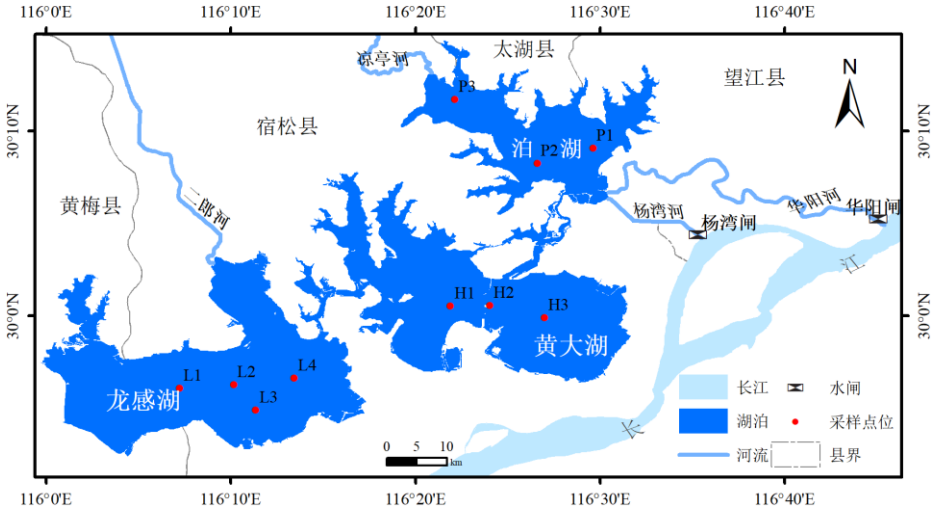

图 1 华阳河湖群采样点设置

Fig. 1 Sampling points of the Huayanghe lakes

后生浮游动物定性样品采用 13 号浮游生物网采集，每次抛网 3～5 min，重复三次后合并样品，并立即加入鲁哥试剂进行固定保存。轮虫定量样品采用取水器在不同水深采集 1 L 混合水样，并加入鲁哥试剂固定。当水深小于 5 m 时，在水面下 0.5 m 处设置一个采样点；当水深介于 5～10 m 之间时，分别在水面下 0.5 m 处和透光层底部各设置一个采样点，混合后作为代表样品。枝角类和桡足类定量样品采用 25 号浮游生物网过滤 30 L 混合水样，并同样加入鲁哥试剂进行固定。所有采集样品均带回实验室，在显微镜下进行后生浮游动物分类鉴定与个体计数，主要参考《中国动物志（淡水桡足类）》[16]、《中国动物志（淡水枝角类）》[17]、《中国淡水轮虫类》[18]。后生浮游动物生物量的计算中，轮虫根据平均湿重进行换算，枝角类和桡足类生物量湿重根据体长-体重回归方程换算[19]。

1.2 数据处理与分析

1.2.1 多样性分析 采用优势度指数（*Y*）来评估优势种，*Y*≥0.02 的物种为优势种[20]。采用 Shannon-Wiener 多样性指数（*H′*）[21]、Pielou 均匀度指数（*J*）[22]，以及 Margalef 丰富度指数（*D*）[23]分析后生浮游动物群落的多样性特征，计算公式分别如下：

$$Y = \frac{n_i}{N} f_i \tag{1}$$

$$H' = -\sum \left(\frac{n_i}{N}\right) ln \left(\frac{n_i}{N}\right) \tag{2}$$

$$J = \frac{H'}{lnS} \tag{3}$$

$$D = \frac{(S-1)}{lnN} \tag{4}$$

式中，n_i为第 i 个物种的丰度，N 为全部物种的总丰度，f_i为第 i 个物种的出现频率，S 为总种类数。

1.2.2 水质生态学评价依据 以多样性指数评估水质的标准如下[24]：H'：0-1 为多污型，1-2 为 α-中污型，2-3 为 β-中污型，＞3 为清洁-寡污型；D：0-1 为多污型，1-2 为 α-中污型，2-3 为 β-中污型，3-4 为寡污型，＞4 为清洁型；J：0-0.3 为多污型，0.3-0.5 为中污型，0.5-0.8 为寡污型，0.8-1.0 为清洁型。

浮游动物丰度和生物量可作为表征湖泊富营养化的生物指标之一，其中，丰度对轮虫等小型后生浮游动物数量变化较为敏感，而生物量则更能反映枝角类、桡足类等大型后生浮游动物的生物体积及其在能量流动中的作用。因此，本文同时采用丰度与生物量两项指标，以全面评估湖泊富营养化状态[25-28]。判断依据为，丰度：＜1000 ind./L 为贫营养，1000-3000 ind./L 为中营养，＞3000 ind./L 为富营养；生物量：生物量＜1 mg/L 为贫营养，1-3 mg/L 为中营养，＞3 mg/L 为富营养。

1.2.3 统计分析 为检验不同季节与不同湖区之间各水体理化要素的差异性，本研究采用 R 语言（版本 4.5.0）及其 dplyr 包进行数据整理与统计分析。首先采用 Shapiro–Wilk 检验（shapiro.test）对各变量进行正态性检验；对符合正态分布的数据，利用 Bartlett 方差齐性检验（bartlett.test）对各环境要素进行方差齐性检验。若数据符合方差齐性假设，则采用单因素方差分析（One-way ANOVA）检验差异；当检验结果显示存在显著性差异（P＜0.05）时，进一步使用 agricolae 包中的 LSD 法（Least Significant Difference）进行两两比较。对于不满足正态分布或方差齐性假设的数据，则采用 Kruskal–Wallis 非参数检验，并在总体差异显著时通过 Bonferroni 校正的 Wilcoxon 秩和检验进行两两比较。

为探究后生浮游动物群落结构与环境因子之间的关系，采用 vegan 包进行去趋势对应分析（detrended correspondence analysis，DCA）、冗余分析（redundancy analysis，RDA）和和方差分解分析（variation partitioning analysis，VPA）。在进行 DCA 分析前，对后生浮游动物数据进行筛选，选取在单个采样点“相对丰度≥1% 且出现频率≥30%”的物种纳入分析[29]。共筛选出 15 种后生浮游动物（附录I）进行分析，DCA 结果显示最大梯度长度为 2.05，最大梯度值在 1-3 之间，因而选用 RDA 探究后生浮游动物与环境因子之间的关系[30]。在进行冗余分析时，为避免环境因子的共线性，先对各环境因子进行 Pearson 相关性分析，并计算方差膨胀因子（VIF）以检验变量间的共线性。依据 Pearson 相关性分析结果，结合 VIF 值剔除相关性较高或共线性较强的变量（VIF＞10），并综合考虑各环境因子的生态学意义，最终筛选出代表性水环境因子纳入 RDA 模型。为进一步定量区分水环境因子与闸控水文过程对群落结构变异的相对贡献，采用 vegan 包中的 varpart 函数进行 VPA，计算水环境、水位波动及二者共同作用的独立解释率和共同解释率，并以调整后的决定系数（R^2）表征解释贡献。

2 结果分析

2.1 水体理化特征

本研究以下游的杨湾闸作为代表水文断面，分别计算采样当日闸上游水位、闸下游水位、上下游水位差、采样前 7 天平均水位差，以及采样前 7 天和 15 天水位差变化，用于表征华阳河湖群的闸控背景下水位变化特征。结果显示，夏季闸上游水位最高，为 13.74 m；冬季最低，为 11.92 m。闸下游水位同样表现为夏季最高、冬季最低，分别为 10.84 m 和 7.51 m。四次采样时上游湖泊水位均高于下游水位，采样日上下游水位差为 2.90–4.41 m。其中，冬季采样日水位差最大，为 4.41 m；采样前 7 天平均水位差也以冬季最高，为 4.67 m。夏季和秋季采样前水位差呈增加趋势，前 7 天水位差分别增加 1.27 m 和 0.81 m，前 15 天水位差分别增加 2.73 m 和 2.05 m。春季和冬季采样前水位差呈减小趋势，前 15 天水位差分别减少 0.43 m 和 0.93 m。

华阳河湖群的水体理化因子除 COD_{Mn}、DTN 和 TP 外，所有水质指标均呈现出显著的季节变化（P＜0.05；表 2）。其中 WT、SD、NO_2^-–N、DTP、Chl.*a* 呈现先上升再下降的季节变化，WT、DTP、Chl.*a* 在夏季达到最大值，SD、NO_2^-–N 在秋季达到最大值，冬季均为最小值；TN、DTN、TP 呈上升趋势，在冬季达到最大值；SS 呈现下降趋势，且冬季显著低于其他三个季节；NO_3^-–N 冬季显著高于春、夏季；PO_4^{3-}

–P 春季显著低于其他三个季节；NH_4^+–N 春季显著高于夏、秋季。TN 在冬季显著高于其他季节。DTN、TP 和 COD_{Mn} 在四季间差异不显著（$P>0.05$）。

表 1 华阳河湖群四次采样期闸上、闸下水位过程特征

Tab. 1 Water level characteristics upstream and downstream of the sluice during the four sampling periods in the Huayang lakes

季节	上游当日水位/m	下游当日水位/m	当日水位差/m	前 7 天平均水位差/m	前 7 天水位差变化/m	前 15 天水位差变化/m
春季	12.30	9.36	2.94	3.28	-0.43	-0.43
夏季	13.74	10.84	2.90	2.28	1.27	2.73
秋季	13.37	10.23	3.14	2.75	0.81	2.05
冬季	11.92	7.51	4.41	4.67	-0.53	-0.93

*上下游水位差=闸上游水位−闸下游水位；前 7 天和前 15 天窗口均包括采样当日；水位差变化为采样日水位差与窗口起始日水位差之差，正值表示水位差扩大，负值表示水位差缩小

表 2 华阳河湖群水体理化因子季节变化

Tab. 2 Seasonal variations of physicochemical parameters in the Huayanghe Lakes

理化因子	春季	夏季	秋季	冬季	*P*
DO（mg/L）	9.54±0.18	10.29±0.42	8.3±0.28	14.66±0.15	**＜0.001**
WT（℃）	24.57±0.22	30.06±0.24	20.13±0.18	3±0.09	**＜0.001**
SD（m）	0.14±0.04	0.46±0.10	0.32±0.07	0.54±0.12	**0.032**
SS（mg/L）	101.83±18.44	25.4±5.61	19.05±3.37	0.16±0.01	**＜0.001**
NO_3^-–N（mg/L）	0.1±0.03	0.05±0.02	0.16±0.03	0.42±0.08	**＜0.001**
NO_2^-–N（mg/L）	0.004±0.001	0.008±0.005	0.014±0.003	0.003±0.001	**0.015**
PO_4^{3-}–P（mg/L）	0.001±0.0002	0.005±0.001	0.004±0.0004	0.008±0.001	**＜0.001**
NH_4^+–N（mg/L）	0.017±0.002	0.007±0.001	0.006±0.001	0.012±0.002	**＜0.001**
DTN（mg/L）	0.50±0.04	0.47±0.05	0.56±0.07	0.76±0.11	0.22
DTP（mg/L）	0.01±0.001	0.03±0.002	0.02±0.001	0.01±0.002	**＜0.001**
TN（mg/L）	0.58±0.04	0.61±0.06	0.64±0.07	1.21±0.18	**0.041**
TP（mg/L）	0.04±0.005	0.04±0.004	0.04±0.004	0.22±0.055	0.19
Chl.*a*（mg/L）	9.73±1.75	24.3±4.22	9.63±2.04	4.46±0.82	**＜0.001**
COD_{Mn}（mg/L）	3.62±0.22	4.45±0.34	3.39±0.28	4.58±0.65	0.1

*字体加粗表示季节差异显著，数据为平均值 ± 标准差（SD）

从不同的湖泊水体理化指标比较来看（图 2），PO_4^{3-}–P、WT、DTP、NH_4^+–N、DO、NO_2^-–N 在三个湖区无显著差异（$P>0.05$）。COD_{Mn}、DTN 在龙感湖和黄大湖的浓度显著高于泊湖，Chl.*a*、NO_3^-–N、SS、TN 在龙感湖的浓度显著高于泊湖，SD 在泊湖显著高于黄大湖和龙感湖。

2.2 后生浮游动物群落结构

2.2.1 物种组成 研究期间共鉴定后生浮游动物 50 属 67 种，其中轮虫 23 属 37 种，占总种类数的 55.22%；枝角类 14 属 15 种，占 22.39%；桡足类 13 属 15 种，占 22.39%。从季节变化来看，后生浮游动物物种数差异明显，其中秋季物种数最高，为 46 种，冬季最低，为 15 种。从空间分布来看，不同湖区后生浮游动物物种数也存在一定差异，其中黄大湖物种数最高，为 51 种，龙感湖最低，为 42 种。

2.2.2 丰度和生物量 研究期间华阳河湖群后生浮游动物的平均丰度为 292 ind./L，其中轮虫占 55.14%，枝角类占 27.66%，桡足类占 17.20%。后生浮游动物生物量年均值 10.33 mg/L，其中桡足类占 85.71%，轮虫和枝角类合计占 14.29%。后生浮游动物丰度和生物量的季节分布(图 3)揭示，后生浮游动物丰度在季节

间差异显著（P＜0.05），总体表现为秋季＞春季＞冬季＞夏季，其中秋季后生浮游动物丰度最大，为 956 ind./L，显著高于其他三个季节，且该季节轮虫密度占总密度的 76.37%。夏季后生浮游动物丰度最低，仅为 21 ind./L；春季和冬季后生浮游动物丰度差异不显著（P＞0.05）。后生浮游动物生物量在季节间同样存在显著差异（P＜0.05）。春季的生物量最高，为 17.09 mg/L，其中桡足类生物量占比 84.02%；夏季生物量最低，仅为 2.83 mg/L；秋季与冬季后生浮游动物生物量差异不显著（P＞0.05）。

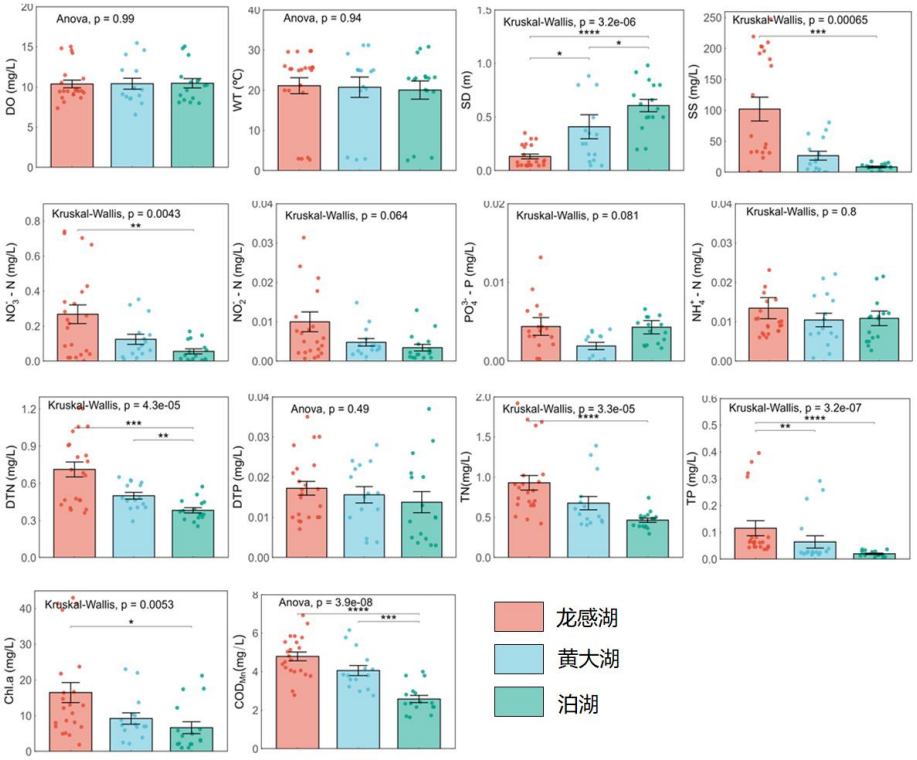

图 2 华阳河湖群水体理化因子指标空间变化

Fig. 2 Spatial changes of main physical and chemical indicators in Huayanghe lakes

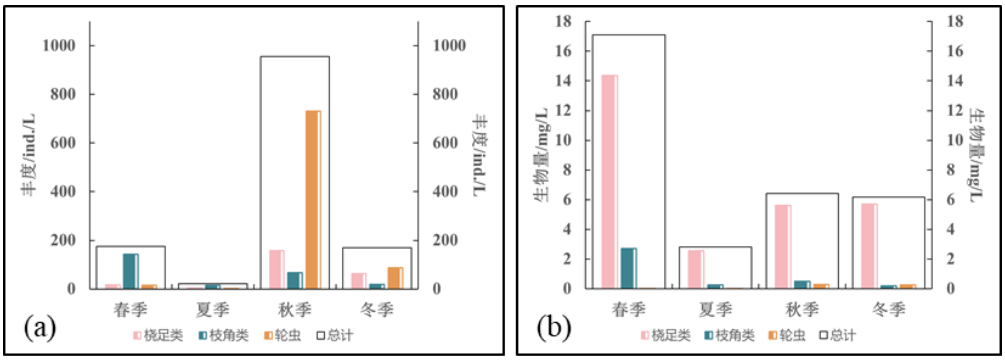

图 3 华阳河湖群后生浮游动物丰度（a）和生物量（b）季节变化

Fig. 3 Seasonal variations of metazoan zooplankton abundance (a) and biomass (b) in the Huayanghe lakes

后生浮游动物丰度和生物量的空间分布(图 4)揭示。后生浮游动物丰度在空间上差异显著（*P*＜0.05），其中龙感湖丰度最高，为 612 ind./L，显著高于黄大湖和泊湖，黄大湖平均丰度为 113 ind./L，泊湖最低，为 21 ind./L。从类群组成来看，龙感湖中轮虫平均丰度最高，为 357.79 ind./L，占总丰度的 58.51%；枝角类和桡足类分别占 27.39%和 14.10%。黄大湖中桡足类、轮虫和枝角类所占比例相对接近，分别占 39.55%、

30.64%和 29.81%。泊湖中轮虫占比最高，为 43.61%，桡足类和枝角类分别占 28.59%和 27.80%。按各湖区采样点平均值计算，龙感湖生物量最高，为 17.19 mg/L；黄大湖次之，为 9.12 mg/L；泊湖最低，为 2.02 mg/L。类群组成上，三个湖区后生浮游动物生物量均以桡足类为主。龙感湖桡足类平均生物量为 14.57 mg/L，占总生物量的 84.80%；黄大湖桡足类平均生物量为 8.02 mg/L，占 87.95%；泊湖桡足类平均生物量为 1.76 mg/L，占 86.91%。枝角类在三个湖区中的生物量占比分别为 13.88%、11.52%和 12.36%；轮虫生物量占比均较低，分别为 1.32%、0.52%和 0.73%。

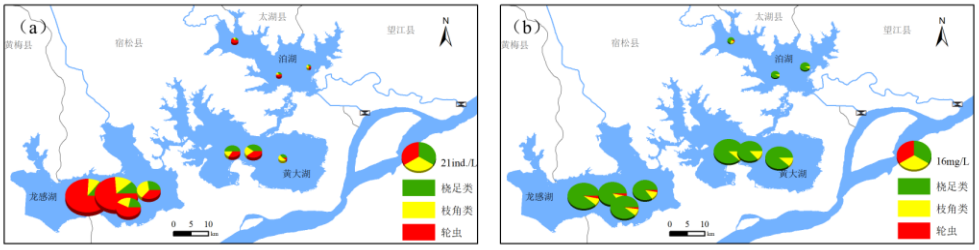

图 4 华阳河湖群后生浮游动物丰度（a）和生物量（b）空间变化

Fig. 4 Spatial variation of metazoan zooplankton abundance (a) and biomass (b) in the Huayanghe lakes

2.2.3 优势种与多样性特征 后生浮游动物优势种存在明显季节差异（表 3，在空间上，优势种差异表现不明显（表 4）。从季节变化来看，春季和夏季优势种组成相对简单，主要以枝角类为主，长额象鼻溞（*Bosmina longirostris*）在春、夏季均为绝对优势种。秋季和冬季优势种组成相对复杂，且优势类群以轮虫为主。秋季优势种包括角突臂尾轮虫（*Brachionus angularis*）、矩形龟甲轮虫（*Keratella quadrata*）、针簇多肢轮虫（*Polyarthra trigla*）、沟痕泡轮虫（*Pompholyx sulcata*）、长圆疣毛轮虫（*Synchaeta oblonga*）及长额象鼻溞等，其中长圆疣毛轮虫和沟痕泡轮虫仅在秋季处于优势地位。冬季则以角突臂尾轮虫、矩形龟甲轮虫、针簇多肢轮虫和螺形龟甲轮虫（*Keratella cochlearis*）等为主要优势种，其中螺形龟甲轮虫仅在冬季成为优势种。从空间分布来看，各湖泊优势种组成相似性较高，均以枝角类和轮虫类为主，桡足类相对较少，其中长额象鼻溞在三湖中均为绝对优势种。部分物种表现出明显的局域性优势特征：微型裸腹溞（*Moina micrura*）和沟痕泡轮虫仅在龙感湖形成优势种；点滴尖额溞（*Alona guttata*）和中华窄腹剑水蚤（*Limnoithona sinensis*）仅在黄大湖形成优势种；僧帽溞（*Daphnia cucullata*）和短尾秀体溞（*Diaphanosoma brachyurum*）仅在泊湖形成优势种。

表 3 华阳河湖群不同季节后生浮游动物优势种

Tab. 4Dominant species of metazoan zooplankton in different seasons in the Huayanghe lakes

种	春季	夏季	秋季	冬季
针簇多肢轮虫（*Polyarthra trigla*）			0.02	0.06
长圆疣毛轮虫（*Synchaeta oblonga*）			0.05	
长额象鼻溞（*Bosmina longirostris*）	0.29	0.21	0.03	0.04
微型裸腹溞（*Moina micrura*）		0.02		
透明须足轮虫（*Euchlanis pellucida*）		0.02		
螺形龟甲轮虫（*Keratella cochlearis*）				0.02
聚花轮属（*Conochilus spp*）	0.02			
矩形龟甲轮虫（*Keratella quadrata*）			0.03	0.04
角突网纹溞（*Ceriodaphnia cornuta*）		0.03		
角突臂尾轮虫（*Branchionus angularis*）			0.03	0.04
剑水蚤幼体（*Cyclopoid Copepodid*）		0.02	0.02	0.04
沟痕泡轮虫（*Pompholyx sulcata*）			0.14	

*表格里数字表示物种优势度

表 4 华阳河湖群不同湖泊后生浮游动物优势种

Tab. 4 Dominant species of metazoan zooplankton in different regions in the Huayanghe Lakes

种	龙感湖	黄大湖	泊湖
透明温剑水蚤（*Thermocyclops hyalinus*）	0.03	0.03	0.04
广布（刘氏）中剑水蚤（*Mesocyclops leuckarti*）	0.02	0.03	0.02
哲水蚤幼体（*Calanoida Copepodid*）	0.03	0.02	0.03
中华窄腹剑水蚤（*Limnoithona sin*ensis）		0.02	
角突网纹溞（*Ceriodaphnia cornuta*）	0.04		
微型裸腹溞（*Moina micrura*）	0.03		
长额象鼻溞（*Bosmina longirostris*）	0.69	0.26	0.37
短尾秀体溞（*Diaphanosoma brachyurum*）			0.02
僧帽溞（*Daphnia cucullata*）			0.03
点滴尖额溞（*Alona guttata*）		0.02	
角突臂尾轮虫（*Branchionus angularis*）	0.08	0.05	
萼花臂尾轮虫（*Branchionus calyciflorus*）	0.02	0.02	
透明须足轮虫（*Euchlanis pellucida*）	0.02		
螺形龟甲轮虫（*Keratella cochlearis*）	0.04	0.08	0.05
矩形龟甲轮虫（*Keratella quadrata*）	0.09	0.05	0.02
曲腿龟甲轮虫（*Keratella valga*）		0.04	0.03
针簇多肢轮虫（*Polyarthra trigla*）	0.09	0.11	0.22
长圆疣毛轮虫（*Synchaeta oblonga*）	0.08	0.03	
沟痕泡轮虫（*Pompholyx sulcata*）	0.15		
聚花轮属（*Conochilus spp*）	0.03	0.03	0.06
弧形彩胃轮虫（*Chromogaster testudo*）			0.02
异尾轮属（*Trichocerca spp.*）		0.03	0.05
长三肢轮虫（*Filinia longiseta*）		0.02	0.02

*表格里数字表示物种优势度

华阳河湖群后生浮游动物多样性指数季节变化如图所示（图 5），丰富度指数夏季（6.11）显著高于其他三个季节，春季均匀度指数（1.18）和多样性指数（2.20）显著低于其他三个季节。综合后生浮游动物多样性指数，其中夏季华阳河湖群属于寡污型，春季、秋季、冬季属于 α-中污型。华阳河湖群后生浮游动物多样性指数空间变化如图所示（图 6），泊湖丰富度指数（4.76）显著高于龙感湖、黄大湖；龙感湖丰富度指数（2.04）和多样性指数（1.31）显著低于黄大湖。综合后生浮游动物多样性指数，其中华阳河湖群中泊湖属于寡污型，黄大湖属于 α-中污型，龙感湖属于 β-中污型。

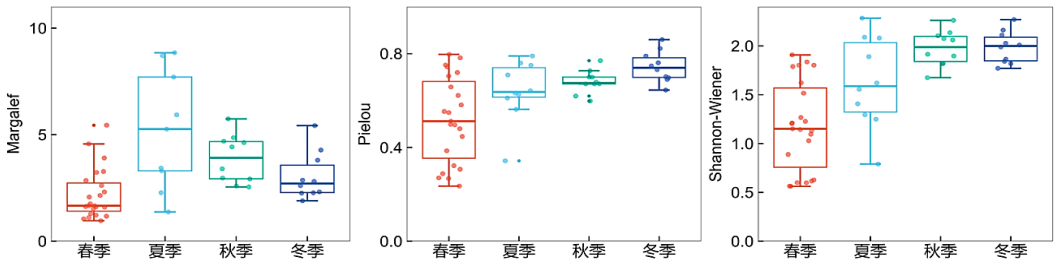

图 5 华阳河湖群后生浮游动物多样性指数季节变化

Fig. 5 Seasonal variation of metazoan zooplankton diversity index in the Huayanghe lakes

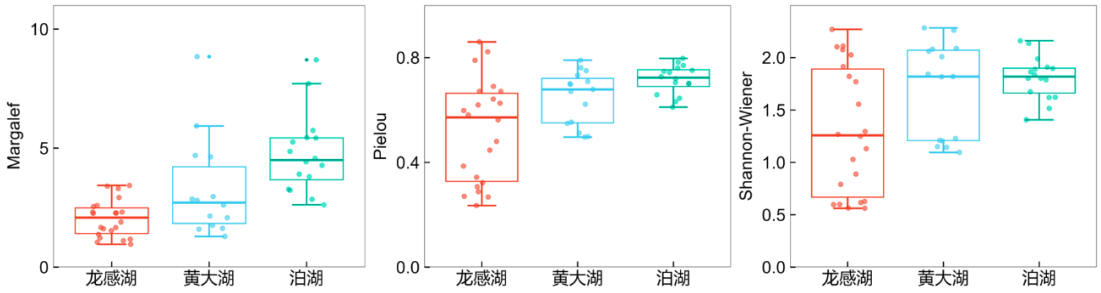

图 6 华阳河湖群后生浮游动物多样性指数空间变化

Fig. 6 Spatial variation of metazoan zooplankton diversity index in the Huayanghe lakes

2.3 后生浮游动物群落结构与环境因子的关系

采用 Pearson 相关性分析和方差膨胀因子（VIF）对环境因子进行共线性分析（图 7），Pearson 结果显示，TP 与 DTN、TN、NO_3^--N 均呈极显著正相关（P<0.001），相关系数分别为 0.70、0.91、0.83；WT 与 DO 呈显著负相关（P<0.001），相关系数为-0.74；TN 与 COD_{Mn}、DTN 呈极显著正相关（P<0.001），相关系数分别为 0.66 和 0.88。在此基础上，进一步采用 VIF 对环境因子共线性进行诊断（表 5）。结果显示，NO_3^--N、DTN、TN 和 TP 的 VIF 值分别为 41.01、40.29、25.11 和 11.83，均表现出较强共线性。最终结合 Pearson 相关分析和 VIF 结果，并考虑到 TP 在湖泊营养状态表征中的重要生态学意义，并为更好地反映磷限制特征，最终选取 TP、NH_4^+–N、COD_{Mn}、PO_4^{3-}-P、DTP、NO_2^-–N、Chl.*a*、DO、SD、SS 等指标与浮游动物群落结构进行分析。

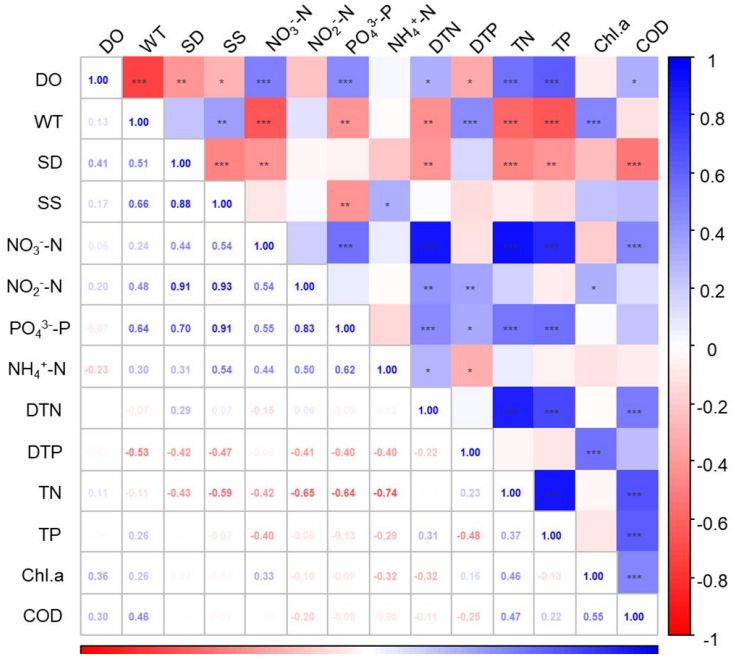

图 7 环境因子相关性分析

Fig. 7 Correlation analysis of physicochemical parameters

RDA 排序结果显示，前两排序轴累计解释了 52.84%的后生浮游动物群落变异。其中，第一排序轴（RDA1）和第二排序轴（RDA2）分别解释了 43.17%和 9.67%的变异，表明所选环境因子能够较好地解释后生浮游动物群落结构的变化特征，且 RDA1 为主要解释轴。在排序图中，SS、NH_4^+–N、COD_{Mn} 和 Chl.*a* 主要位于 RDA1 轴负向一侧，SD、DO、TP、DTP 和 PO_4^{3-}–P 主要位于 RDA1 轴正向一侧，NO_2^-–N 主要

沿 RDA2 轴负向分布。环境因子向量长度显示，SS、SD、NH_4^+–N、DTP 和 PO_4^{3-}–P 的向量相对较长，表明这些因子与后生浮游动物群落排序格局的相关性相对较强。从季节样点分布来看，四季样点在排序图中存在一定程度重叠，说明不同季节后生浮游动物群落结构并未完全分离。其中，春季样点主要分布于 RDA1 轴负向区域，与 SS 和 NH_4^+–N 方向较为接近；夏季和秋季样点多集中于排序图中心及 RDA1 轴正向区域，与 DTP 和 PO_4^{3-}–P 方向较为接近；冬季样点主要分布于 RDA1 轴和 RDA2 轴正向区域，与 SD 和 DO 方向较为接近。长额象鼻溞、矩形龟甲轮虫、角突臂尾轮虫、针簇多肢轮虫和螺形龟甲轮虫等物种主要沿 RDA1 轴方向展开，表明其分布与 RDA1 所代表的环境梯度关系较为密切。

表 5 环境因子方差膨胀因子（VIF）结果

Tab. 5 Variance Inflation Factor (VIF) results of physicochemical parameters

环境因子	VIF	环境因子	VIF
COD_{Mn}	5.21	DTP	4.14
NO_3^--N	41.01	DTN	40.29
NO_2^-–N	3.35	TP	11.83
NH_4^+–N	4.55	TN	25.11
SS	2.69	Chl.*a*	3.57
WT	6.53	DO	4.73
SD	2.859	PO_4^{3-}-P	3.095

为进一步分析闸控条件对后生浮游动物群落结构的影响，将前 7 天平均水位差和前 15 天水位差变化作为水位波动因子（VIF=4.84），用于表征采样前短期水位差异及其阶段性波动过程，并与筛选出的水环境因子共同纳入到方差分解分析（VPA）中。结果显示，水位波动因子与水环境因子共解释后生浮游动物群落结构总变异的 54.72%（调整后 R^2=0.547）。其中，水环境因子的独立解释率为 28.07%，水位波动因子的独立解释率为 17.43%，二者共同解释率为 9.22%，未解释部分为 45.28%。999 次置换检验结果显示，全模型及两组因子的独立效应均达到极显著水平（P = 0.001）。

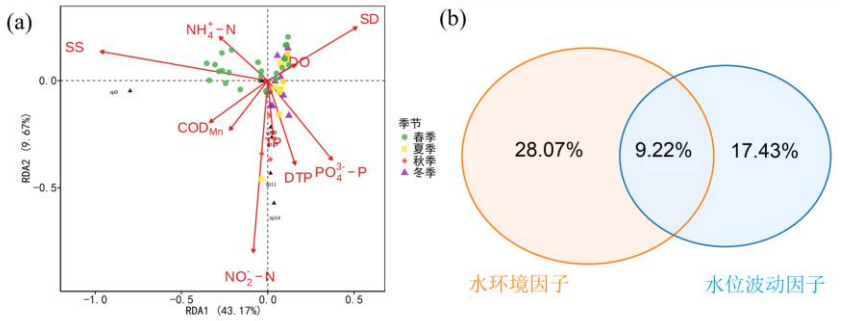

图 8 华阳河湖群后生浮游动物群落与环境因子的 RDA 排序(a)及 VPA 分析(b)

Fig. 8 RDA ordination (a) and VPA analysis (b) of metazoan zooplankton communities and environmental factors in the Huayanghe lakes

空间尺度上（图 9），龙感湖、黄大湖和泊湖的 RDA 分析结果显示，第一排序轴及全部排序轴均达到极显著水平（P<0.001）。其中，龙感湖第一排序轴解释了 80.05%的群落变异。SS 和 NH_4^+–N 主要分布于龙感湖排序图的一侧，SD、NO_2^-–N 和 DTP 分布方向与其相反。黄大湖第一、第二排序轴累计解释了 87.80%的群落变异，其中 PO_4^{3-}–P 向量较长。泊湖第一、第二排序轴累计解释了 79.09%的群落变异，SD 和 NH_4^+–N 向量较长，且二者在排序图中方向相反。

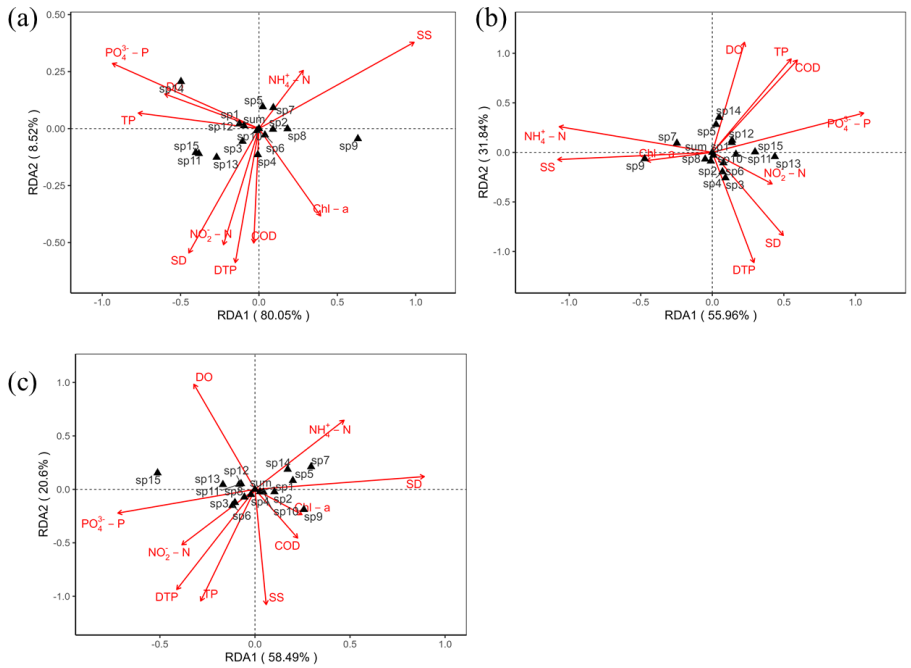

图 9 华阳河湖群空间上后生浮游动物与环境因子的 RDA 分析排序（a：龙感湖；b：黄大湖；c：泊湖）

Fig. 9 RDA analysis ranking plot of spatial zooplankton and environmental factors in the Huayanghe lakes

（a：Lake Longgan ；b：Lake Huangda；c: Lake Po）

3 讨论

3.1 华阳河湖群水体理化因子的时空变化

与自然通江湖泊相比，闸控通江湖泊的水体交换过程更易受到人工调度制约，进而影响水体更新、颗粒物输移和营养盐迁移过程[12]。因此，华阳河湖群水体理化因子可能受到区域降雨径流、湖泊水位波动、水体交换过程以及闸控调度等因素的共同影响，从而在季节与空间尺度上均表现出明显差异。

在季节尺度上，华阳河湖群春季 SS 浓度显著升高，一方面可能与丰水期前期降雨增强、地表径流增加和入湖输沙量上升有关，大量颗粒物随径流输入湖区，可导致水体浑浊度升高。该现象与洞庭湖、鄱阳湖等长江中下游湖泊春季 SS 偏高的特征相一致[31,32]，表明降雨—径流过程是影响区域浅水湖泊悬浮颗粒物动态的重要因素。另一方面，春季采样时湖区水位仅为 12.30 m，采样前 7 天平均水位为 12.23 m，处于汛前低水位阶段。此时湖区水位相对较低，水体有效容积和交换能力有限，外源输入颗粒物的稀释与输出过程可能减弱，从而延长细颗粒悬浮物在局部水域中的停留时间[9]。浅水湖泊受风浪扰动影响明显，底泥再悬浮也可能进一步维持较高的 SS 水平[33]。夏季华阳河湖群 WT 和 Chl.*a* 均达到较高水平，说明高温期浮游植物生物量明显增加。长江中下游浅水湖泊中，夏季高温、光照增强和相对稳定的水体环境通常有利于藻类快速生长，尤其在水体交换较弱时，浮游植物更易积累[34]。本研究中，夏季湖区水位升至 13.74 m，采样前 15 天水位上升 0.52 m，为四次采样中升水最明显阶段；同时，采样日前 15 天上下游水位差扩大 2.73 m，表明夏季主汛期湖泊水位和闸下游河道水位变化不同步，湖泊—河道水体交换受防洪调度影响较强。较高水位可增加湖泊水体体积并提高水体稳定性，而闸控条件下的水体交换受限可能削弱水体更新和稀释作用，从而有利于藻类生物量维持在较高水平。与此同时，夏、秋季 NH_4^+–N 浓度较低，可能与藻类对无机氮的吸收利用有关，已有研究表明浮游植物在快速生长期能够吸收并同化无机氮，且部分藻类对铵态氮具有优先利用特征[34,35]。在闸控湖泊中，主汛期防洪调度可能降低湖泊与外河之间的水体交换频率，使局部水体更新和稀释作用减弱，从而有利于藻类生物量维持在较高水平[13]。然而，从水质评价结果来看，

湖群夏季整体仍维持在贫－中营养、寡污型水平，说明夏季水质状态仍受营养盐供给、藻类消耗、水体更新和沉降等多过程共同控制，不能仅由 Chl.*a* 升高作单一判断。

冬季华阳河湖群 DO 浓度达到全年较高水平，这与低温条件下氧溶解度升高有关[36-38]。同时，冬季水温较低，浮游植物和微生物代谢活动减弱，耗氧过程相对降低，也可能有利于 DO 维持较高水平。本研究中，冬季湖区水位降至 11.92 m，采样前 15 天水位下降 0.13 m，处于非汛期低水位阶段，低水位条件下湖泊有效容积减小，水体浓缩效应增强，可能是冬季 TN 和 TP 浓度相对较高的重要原因[34]。此外，在闸控条件下，冬季蓄水保水和水体交换减弱可能进一步限制营养盐的稀释与输出，使氮、磷浓度在枯水期维持较高水平。另一方面，低水位也可能增强风浪扰动下的水体混合作用，有利于氧气在水体中的扩散和补给，从而共同维持冬季较高 DO 水平。

在空间尺度上，湖群水质整体表现为“泊湖优于黄大湖，黄大湖优于龙感湖”的梯度格局。泊湖部分理化指标相对较低，透明度较高；龙感湖 COD_{Mn}、SS、TN 等指标相对较高。该空间分异可能与湖群地形、水体流向、水动力交换强度及人为扰动强度有关。华阳河湖群湖底高程总体呈西南向东北递减，水体沿湖群内部连通方向输移，外源营养盐、悬浮颗粒物及有机物可能在径流补给和水动力输送过程中逐步向中下游湖区累积[39]。类似的沿程累积现象在河流—湖泊复合系统中较为常见[40,41]。在闸控背景下，湖群内部水体交换受到调度过程影响，物质输出和稀释过程可能减弱，从而进一步增强不同湖区之间的水环境差异。

3.2 华阳河湖群后生浮游动物群落结构特征及演变趋势

后生浮游动物群落结构受温度、营养盐、食物资源、水动力条件和鱼类捕食等多因素共同影响。华阳河湖群作为闸控通江湖泊，其后生浮游动物群落不仅响应季节性水环境变化，也可能受到水位调度、水体交换强度及湖区间连通格局变化的影响。

本研究共鉴定后生浮游动物 50 属 67 种。从丰度组成来看，轮虫为主要类群；而从生物量组成来看，桡足类占比最高。这表明华阳河湖群后生浮游动物群落具有“小型类群在数量上占优、大型类群在生物量上占优”的结构特征。类似现象在长江中下游浅水湖泊中较为常见[12,36]。轮虫具有个体小、世代周期短、繁殖速度快和对环境波动响应迅速等特点，因此在营养盐波动、悬浮物升高或水体扰动较强的环境中，往往更容易在丰度上形成优势。相比之下，枝角类和桡足类个体较大，即使丰度较低，也可能在生物量中占据较高比例[37]。

从季节动态来看，后生浮游动物丰度与生物量呈现不同步的变化特征。秋季丰度达到全年峰值，且轮虫占比较高，说明秋季丰度峰值主要与轮虫数量增加有关。春季后生浮游动物丰度并不最高，但生物量较高，可能与枝角类和桡足类等较大个体类群所占比例较高有关。夏季后生浮游动物丰度和生物量均处于较低水平，而同期水温和 Chl.*a* 较高，说明高藻量并未同步对应较高的后生浮游动物丰度或生物量。该现象可能与夏季蓝藻占优、食物质量下降或水体环境稳定性增强有关。蓝藻颗粒较大、可消化性较差，部分种类还可能产生藻毒素，从而降低后生浮游动物的有效食物供给，并影响其摄食、生长和繁殖[43]。类似的夏季低丰度现象也见于部分水动力较弱或水体交换受限的水体[31,42]。

此外，华阳河湖群后生浮游动物群落结构受到渔业活动变化的影响。自 20 世纪 80 年代以来，华阳河湖群后生浮游动物群落经历了明显的阶段性变化。2007—2017 年高密度网箱养殖阶段，滤食性鱼类对枝角类和桡足类施加了较强的捕食压力，导致群落小型化趋势明显[12,44,45]。2018 年后，随着围网拆除、渔业减量及水生植被恢复等措施的实施，后生浮游动物属种数逐步回升，大型类群生物量增加，群落结构呈现一定恢复趋势[36]。这一变化与保安湖、洞庭湖禁捕区的研究结果较为一致[46,32]，表明降低渔业干扰有利于后生浮游动物群落恢复。然而，在当前水动力背景下，华阳河湖群后生浮游动物丰度组成仍以轮虫等小型类群占比较高，群落结构恢复可能仍受到水体交换受限、悬浮物浓度较高及营养盐累积等环境因素的制约[31,42]。这表明，渔业干扰减弱虽有利于大型后生浮游动物恢复，但在闸控型浅水湖泊中，水动力条件和水环境因子仍可能对群落结构产生持续影响。

3.3 环境因子与闸控水文过程对后生浮游动物群落的作用及管理启示

RDA 分析结果显示，SS、SD、NH_4^+–N、DTP 和 PO_4^{3-}–P 等环境因子与后生浮游动物群落分布关系较为密切，表明悬浮物、透明度和营养盐条件是影响华阳河湖群后生浮游动物群落结构的重要因素。其中，SS 和 SD 分别反映水体浑浊度和透明度状况。SS 升高可降低水体透明度，削弱光照条件，并可能通过增加非营养性颗粒物摄入，影响滤食性后生浮游动物的摄食效率[47–49]。NH_4^+–N、DTP 和 PO_4^{3-}–P 等营养盐因子可通过影响浮游植物生长及藻类组成，进一步改变后生浮游动物的食物资源条件。因此，悬浮物、透明度和营养盐变化可能共同影响后生浮游动物群落组成。VPA 结果显示，除常规水质因子外，闸控背景下的水位差和水位变化过程也与后生浮游动物群落结构变化密切相关。前 7 天平均水位差和前 15 天水位差变化可能通过影响水体交换强度、颗粒物输移和营养盐分布，进而改变后生浮游动物的栖息环境和食物条件。综合 RDA 和 VPA 结果，华阳河湖群后生浮游动物群落结构受水环境因子与闸控水文过程共同影响。

结合群落结构特征与水质状况可以看出，华阳河湖群当前生态问题主要表现为悬浮物浓度升高与透明度下降，这一过程进一步促进蓝藻占优，从而驱动后生浮游动物群落向小型化方向演替。在空间尺度上，泊湖生态状态相对较好，黄大湖处于过渡状态，而龙感湖受悬浮物和营养盐累积影响，生态压力最为显著。后生浮游动物群落结构与水质空间梯度高度一致（图 2, 图 4）。表明相较于单一理化指标，后生浮游动物群落能够整合多种环境因子的综合效应，更全面反映水体生态状态及其变化过程，并有效指示水质状况及生态风险。

从区域尺度看，本文研究结果表明，网箱拆除、渔业减量等生物干扰削弱措施能够有效促进后生浮游动物群落结构向“大型化、多样化”方向恢复，但其生态效应在不同湖泊间存在显著差异。这种差异主要受水体交换能力和水动力条件制约[13]。因此，华阳河湖群生态管理应从“单一营养盐控制”转向“水动力—悬浮物—生物过程协同调控”。在空间上，应实施分区管理：泊湖水质状况相对较好，应以维持现有生态结构、防控新增污染为主；黄大湖处于过渡区，应重点控制面源输入并改善局部水体交换条件；龙感湖污染负荷较高，应优先降低悬浮物与营养盐输入，作为治理重点区域。时间上，春季重点控制径流携带泥沙入湖，降低 SS 水平；夏季在高温和蓝藻易发时期，应通过优化闸门调度增强水体交换、缩短局部水体滞留时间，以降低水华风险；秋冬季则可维持相对稳定水位，促进后生浮游动物群落恢复及生物量积累。总体而言，在闸控型浅水湖泊中，仅依靠营养盐削减难以实现后生浮游动物群落的全面恢复，需通过优化水位调度、降低悬浮物负荷并协同控制生物扰动，才能实现水质改善与生态系统结构恢复的协同提升。

3.4 不确定性分析

本研究在采样设计与数据分析过程中已尽可能减少误差，以确保结果的科学性与代表性。然而，由于湖泊生态系统的复杂性，仍存在一定不确定性。首先，本研究基于四次季节尺度采样，能够反映华阳河湖群后生浮游动物群落的总体季节变化特征，但后生浮游动物对短期降雨、风浪扰动、水位波动及局地水动力变化较为敏感，季度采样难以完全捕捉闸门调度条件下群落结构的快速响应过程，这可能在一定程度上影响季节差异显著性及环境因子解释强度的判定。其次，闸控湖泊闸门调度具有阶段性和一定随机性，不同年份调度方式差异可通过改变水位、水体交换及水力停留时间，进一步影响悬浮物、营养盐及浮游植物结构，从而导致后生浮游动物群落响应存在一定的情景依赖性。再次，水文年际差异会影响入湖径流、泥沙输入及蓝藻水华发生过程，从而改变 SS 等关键因子的作用强度。此外，湖泊空间异质性及方法学误差（如网目筛选和物种鉴定）仍可能对局部群落特征及小型类群丰度估计产生一定影响。总体而言，上述不确定性可能主要影响群落变化幅度及部分环境因子解释强度，但不改变本研究关于华阳河湖群后生浮游动物群落呈小型化特征，且主要受悬浮物、营养盐及闸控水文过程共同驱动的总体结论。未来研究有必要结合高频连续监测、多水文年份比较以及闸门调度过程记录，进一步解析闸控湖泊中后生浮游动物群落对短期水文扰动和长期调控情景的生态响应机制，从而为闸控湖泊水生态精细化管理提供更加可靠的科学依据。

4 结论

通过对华阳河湖群后生浮游动物开展季度调查，共鉴定出后生浮游动物共鉴定 67 种，全年群落组成以轮虫占优势；丰度与生物量分别为 21–956 ind./L 和 2.83–17.09 mg/L，季节变化总体呈现“秋季最高、

夏季最低”的特征，空间分布表现为龙感湖＞黄大湖＞泊湖。群落多样性与优势种具有显著季节性和空间异质性：夏季丰富度较高，而春季均匀度与多样性偏低；多样性指数整体为泊湖＞黄大湖＞龙感湖，且秋冬优势种数量较多并多为中富营养化指示类群。RDA 结果显示，群落结构主要受 SS、TP、DO 和 COD_{Mn} 等因子共同驱动，其中 SS 的解释度最高，说明悬浮物可能是影响群落结构的重要环境因子。进一步的 VPA 结果显示，水环境因子与闸控相关水位波动因子共同解释了后生浮游动物群落结构变异的 54.7%，其中水环境因子的独立解释率为 28.1%，水位波动因子的独立解释率为 17.4%，二者共同解释率为 9.2%。表明在闸控条件下，浅水湖泊底泥易受风浪扰动发生再悬浮，叠加闸控条件下水体交换受限，悬浮物更易在水体中累积并维持较高水平，从而对后生浮游动物群落恢复产生持续影响。综合历史资料与本次结果可知，单一水质改善难以实现群落全面恢复，需协同推进控渔、水位调控优化与水生植被恢复；管理上应优先降低悬浮物输入、优化闸门调度以缩短夏季高温期滞留时间并缓解蓝藻水华，同时在秋冬维持相对稳定水位以促进群落恢复与生物量积累。总体而言，后生浮游动物可作为评价营养状态与检验修复措施成效的敏感生态指示单元，生态修复应充分考虑不同水文类型湖泊的响应差异并实施分区、分季节相结合的精细化管理策略。

5 参考文献

[1] Smith VH, Schindler DW. Eutrophication science: Where do we go from here? *Trends in Ecology & Evolution*, 2009, **24**(4): 201-207. DOI: 10.1016/j.tree.2008.11.009.

[2] Dodds WK, Bouska WW, Eitzmann JL *et al*. Eutrophication of U.S. freshwaters: Analysis of potential economic damages. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(1): 12-19.

[3] Xu FL, Tao S, Dawson RW *et al*. Lake ecosystem health assessment: Indicators and methods. *Water Research*, 2001, **35**(13): 3157-3167. DOI: 10.1016/s0043-1354(01)00040-9.

[4] Cavan EL, Henson SA, Belcher A *et al*. Role of zooplankton in determining the efficiency of the biological carbon pump. *Biogeosciences*, 2017, **14**(1): 177-186. DOI: 10.5194/bg-14-177-2017.

[5]袁丹妮. 珠江口广州-珠海水域浮游动物群落结构及其环境特征[学位论文]. 暨南大学, 2014.

[6]Ejsmont-Karabin J. The usefulness of zooplankton as lake ecosystem indicators: Rotifer Trophic State Index. *Polish Journal of Ecology*, 2012, **60**(2): 339-350.

[7]Caroni R, Irvine K. The potential of zooplankton communities for ecological assessment of lakes: redundancy and predictive value. *Ecological Indicators*, 2010, **10**(6): 1123-1130.

[8]Zhang YH, Yang GS, Wan RR. Ecosystem Health Assessment Indictors for Lakes. *Resources Science*. 2014, **36**(06): 1306-1315.[张艳会, 杨桂山, 万荣荣. 湖泊水生态系统健康评价指标研究. 资源科学, 2014, **36**(06): 1306-1315.]

[9] Liu Q, Liu ZY, Wang JB *et al*. Spatial-temporal characteristics of zooplankton community structure and analysis for the impact factors in the Shanmei Reservoir, Fujian Province. *J Lake Sci*, 2022, **34**(6): 2039-2057. DOI: 10.18307/2022.0619. [刘俏, 刘智暘, 王江滨等. 福建山美水库浮游动物群落结构时空特征及其影响因子分析.湖泊科学, 2022, **34**(6): 2039-2057.]

[10] Yang JJ, Chen D, Huang LC *et al*. Patterns and the determinants of zooplankton community stability in different regions of Lake Dianchi, Yunnan Province, China. *J Lake Sci*, 2023, **35**(5): 1752-1766. DOI: 10.18307/2023.0534. [杨姣姣,陈冬,黄立成等.滇池不同湖区浮游动物群落稳定性及其驱动因子分析.湖泊科学,2023,**35**(5):1752-1766.]

[11] Shen YY, Cheng JX, Xu LG *et al*. Characteristics of zooplankton community structure in Poyang Lake and their influencing factors under extreme hydrological drought. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, **43**(24): 10399-10412. DOI: 10.20103/j.stxb.202306161291. [沈玉莹, 程俊翔, 徐力刚等. 极端水文干旱下鄱阳湖浮游动物群落结构特征及其影响因素. 生态学报, 2023, **43**(24): 10399-10412.]

[12]徐梅. 华阳河湖群和焦岗湖的后生浮游动物群落结构研究[学位论文]. 安徽大学, 2016.

[13]周蒙蒙.华阳河湖群后生浮游动物群落结构及其对洪水的响应研究[学位论文]. 安徽大学, 2023.

[14]国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法（第四版）. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.

[15] Yang J, Zhou J, Qin BQ, *et al*. Long-term variation characteristics of zooplankton community structure in Meiliang Bay, Lake Taihu.

Environmental Science, 2020, **41**(3): 1246-1255. DOI: 10.13227/j.hjkx.201907054. [杨佳, 周健, 秦伯强等. 太湖梅梁湾浮游动物群落结构长期变化特征(1997—2017 年). 环境科学, 2020, **41**(3): 1246-1255.]

[16]中国科学院动物研究所甲壳动物研究组. 中国动物志 • 节肢动物门 • 甲壳纲 • 淡水桡足类. 北京: 科学出版社, 1979.

[17]蒋燮治, 堵南 山. 中国动物志 • 节肢动物门 • 甲壳纲 • 淡水枝角类. 北京: 科学出版社, 1979.

[18]王家楫. 中国淡水轮虫志. 北京:科学出版社, 1961.

[19]章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法. 北京: 科学出版社, 1991.

[20]Dufrêne M, Legendre P. Species assemblages and indicator species: The need for a flexible asymmetrical approach. *Ecological Monographs*, 1997, **67**(3): 345-366. DOI: 10.1890 /0012-9615(1997)067[0345: SAAIST]2.0.CO;2.

[21]Shannon CE. A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*, 1948, **27**(3): 379-423. DOI: 10. 1002 /j.1538-7305.1948.tb01338.x.

[22]Pielou EC. The measurement of diversity in different types of biological collections. *Journal of Theoretical Biology*, 1966, **13**: 131-144. DOI: 10.1016 /0022-5193(66)90013-0.

[23]Margalef R. Information theory in ecology. *General Systems*, 1958, **3**(1): 36-71.

[24] Chen X, Li Z, Tang FJ *et al*. Zooplankton community structure and its relationship with environmental factors in Lianhuan Lake. *Journal of Hydroecology*, 2020, **41**(6): 89-97. DOI: 10.15928/j.1674-3075.2020.06.011. [陈昕, 李喆, 唐富江等. 连环湖两水体浮游动物群落结构特征及水质评价. 水生态学杂志, 2020, **41**(6): 89-97.]

[25] Lin Q, You WH, Xu FJ *et al*. Zooplankton community structure and its relationship with environmental factors in Dishui Lake. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(23): 6918-6929. DOI: 10.5846/stxb201303060360. [林青, 由文辉, 徐凤洁等. 滴水湖浮游动物群落结构及其与环境因子的关系.生态学报, 2014, **34**(23): 6918-6929.]

[26]张觉民, 何志辉. 内陆水域渔业自然资源调查手册. 北京: 农业出版社, 1991.

[27] Wu L, Feng WS, Chen XJ *et al*. Community structure characteristics of zooplankton in Yili region of Xinjiang in summer. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, **19**(1): 163-172. DOI: 10.13287/j.1001-9332.2008.0006 ?. [吴利, 冯伟松, 陈小娟等. 新疆伊犁地区夏季浮游动物群落结构特征. 应用生态学报, 2008, **19**(1): 163-172.]

[28]温新利. 青弋江芜湖段和芜湖市镜湖轮虫群落结构研究[学位论文]. 芜湖:安徽师范大学, 2005.

[29]Muylaert K, Sabbe K, Vyverman W. Spatial and temporal dynamics of phy-toplankton communities in a freshwater Tidal Estuary (Schelde, Belgium). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2000, **50** (5): 673-687. DOI: 10. 1006 /ecss. 2000.0590.

[30]Piirsoo K, Vilbaste S, Truu J, et al. Origin of phytoplankton and the environmental factors governing the structure of mi- croalgal communities in lowland streams. *Aquatic Ecology*, 2007, **41**(2): 183-194. DOI: 10.1007 /s10452-007-9077-3.

[31] Xiong LL, Guan ZW, Zhou YY *et al*. Spatial and seasonal hydrological variation patterns of zooplankton community structure in sub-lakes of the Poyang LakeWetland. *Journal of Nanchang University*: *Natural Science*, 2025, **49**(2): 184-197. DOI: 10.13764/j.cnki.ncdl.2025.02.014. [熊露莉, 关志为, 周源远等. 鄱阳湖碟形湖浮游动物群落结构的空间及季节性水文变化规律. 南昌大学学报: 理科版, 2025, **49**(2): 184-197.]

[32] Zhang JB, Wang CM, Huang DZ *et al*. Community characteristics and bioassessment of metazooplankton in Dongting Lake. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2023, **32**(2): 394-402. DOI: 10.11870/cjlyzyyhj202302015. [张建波, 王丑明, 黄代中等. 洞庭湖后生浮游动物群落结构及水质生物学评价.长江流域资源与环境, 2023, **32**(2): 394-402.]

[33] Zhu W, Hou H, Liu H *et al*. A review of sediment phosphorus release amount and rules in Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2025, **37**(1): 14-35. DOI: 10.18307/2025.0102. [朱伟,侯豪,刘环等.太湖底泥磷释放量及释放规律的研究综述.湖泊科学,2025,**37**(1):14-35.]

[34] Zeng K, Wang JS, Zhang YC *et al*. Influence of water level fluctuation on water quality of Huayang River and lake group. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2020, **37**(8): 49-53, 68. DOI: 10.11988/ckyyb.20190419. [曾凯,王家生,章运超等.华阳河湖群水位变化对水质的影响.长江科学院院报,2020,**37**(8):49-53,68.]

[35] Zeng J, Yang LY, Xiao L *et al*. Biogeochemicai cycling of nitrogen in lakes and the role of microorganisms in conversion of nitrogen compounds. *J Lake Sci*, 2007, **19**(4): 382-389. DOI: 10.18307/2007.0405. [曾巾,杨柳燕,肖琳等.湖泊氮素生物地球化学循环及微生物的作用.湖泊科学,2007,**19**(4):382-389.]

[36]Zhou M, Zhou Z., Chen W. Effects of floods on zooplankton community structure in the Huayanghe Lake. *Diversity*, 2023, **15**(2),

250. DOI: 10.3390/d15020250.

[37] Pu MY, Xu JQ, Hu KY *et al*. Community structure and driving factors of zooplankton in the littoral zone of Lake Hongze. *J Lake Sci*, 2023, **35**(2): 610-623. DOI: 10.18307/2023.0218. [濮梦圆,徐锦前,胡恺源等.洪泽湖湖滨带浮游动物群落结构及驱动因素.湖泊科学,2023,**35**(2):610-623.]

[38]Atkinson D., Morley S. A., Hughes R. N. From cells to colonies: at what levels of body organization does the 'temperature-size rule' apply? *Evolution and Development*, 2006, **8**(2): 202-214. DOI: 10.1111/j.1525-142X.2006.00090.x.

[39] Wu QL, Zhang K, Chen H *et al*. Seasonal and spatial variation of chlorophyll-a concentration in the huayanghe lake group. *Journal of Hydroecology*, 2019, **40**(2): 66-72. DOI: 10.15928/j.1674-3075.2019.02.010. [吴奇丽, 张坤, 陈欢等. 华阳河湖群叶绿素 a 浓度的季节动态和空间分布. 水生态学杂志, 2019, **40**(2): 66-72.]

[40] Tong M, Li MT, Niu SJ *et al*. Changes in chlorophyll and nutrients in reservoirs of the Changjiang River basin: The “biological filter” effect. *Journal of East China Normal University*: *Natural Science*, 2021(2): 63-72. [同萌, 李茂田, 牛淑杰等. 长江流域水库叶绿素及营养盐变化: 生物过滤器效应.华东师范大学学报: 自然科学版, 2021(2): 63-72.]

[41] Chen Y, Peng K, Zhang QJ *et al*. Spatio-temporal distribution characteristics and driving factors of zooplankton in Hongze Lake. *Environmental Science*, 2021, **42**(8): 3753-3762. DOI: 10.13227/j.hjkx.202010195. [陈业, 彭凯, 张庆吉等. 洪泽湖浮游动物时空分布特征及其驱动因素. 环境科学, 2021, **42**(8): 3753-3762.]

[42] Chen XL, Shang JW, Wang YW *et al*. Seasonal dynamic changes and driving factors of zooplankton community in a silver carp and bighead carp stocked reservoir. *J Lake Sci*, 2025, **37**(2): 566-579. DOI: 10.18307/2025.0234. [陈欣蕾,商静雯,王耀伟等.鲢鳙放养水库浮游动物群落季节演替及影响因素分析.湖泊科学,2025,**37**(2):566-579.]

[43] Xue QJ, Rediske RR, Gong ZJ *et al*. Spatio-temporal variation of microcystins and its relationship to biotic and abiotic factors in Hongze Lake, China. *Journal of Great Lakes Research*, 2018, **44**(2): 253-262. DOI: 10.1016/j.jglr.2017.12.004.

[44]朱文忠, 周立志. 安庆沿江湖泊湿地生物多样性及其保护与管理. 合肥工业大学出版社, 2010.

[45]Zhang Y, Wang Y, Zhou Z. The impact of withdrawing aquaculture facilities on metazooplankton communities in the lakes are connected to the Yangtze River, China. *PLoS One*. 2021, **16**(5): e0252100. DOI: 10.1371/journal.pone.0252100.

[46] Liu Y, Li ZF, Bao SP *et al*. Community succession and mechanisms of community assembly of macroinvertebrates over the past three decades in Lake Baoan. *J Lake Sci*, 2023, **35**(4): 1397-1412. DOI: 10.18307/2023.0433. [刘洋, 李正飞, 鲍少攀等. 近三十年保安湖大型底栖动物群落结构演变及其构建机制.湖泊科学, 2023, **35**(4): 1397-1412.]

[47] Lü Q, Hu XR, Nie X *et al*. Impact of water level fluctuations on the succession of zooplankton in Poyang lake. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(4): 1486-1495. DOI: 10.5846/stxb201812142730. [吕乾, 胡旭仁, 聂雪等. 鄱阳湖丰水期水位波动对浮游动物群落演替的影响.生态学报, 2020, **40**(4): 1486-1495.]

[48]Breckenridge J K, Bollens S M, Rollwagen-Bollens G, *et al*. Plankton assemblage variability in a river-dominated temperate estuary during late spring (High-flow) and late summer (Low-flow) periods. *Estuaries and Coasts*, 2015, **38**(1): 93- 103.

[49]Zhang L, Wang J, Liu H. Effects of environmental factors on the temporal stability of phytoplankton biomass in a eutrophic man-made lake. *Water*, 2016, **8**(12): 582. DOI: 10.3390/w8120582.