

退圩还湖影响下过水型湖泊水生态演变特征及影响机制

朱晓龙¹, 祝秋恒^{1*}, 王冬梅², 王文辉², 石一凡²

¹ 南京水利科学研究院生态环境研究所 江苏南京

² 江苏省水利科学研究院 江苏南京

【摘要】圩垸养殖等人类活动对湖泊水生态健康造成巨大挑战,影响南水北调东线湖泊群水质稳定,而退圩还湖等生态工程的实施有望实现湖泊水生态系统的重构与修复。为系统探究退圩还湖对南水北调东线过水型湖泊水生态系统的影响,选取了典型过水型湖泊骆马湖作为研究区域,系统揭示了退圩还湖下过水型湖泊水生态要素时空分布特征,采用典型对应分析(CCA)与层次分割分析(HP)等方法解析湖泊水生态系统的响应机制及关键影响因子,构建基于关键影响因子的水污染指数(WPI)评价方法,量化退圩还湖影响下湖泊水生态健康状况变化。结果表明,退圩还湖后,退圩区水体透明度有所提升,但高锰酸盐指数和氨氮浓度均有所升高,且叶绿素a浓度显著高于其他区域(27.43 μg/L),蓝藻浓度整体较高,部分监测点位出现严重水华现象。此外,该区域水生生物水生生态系统呈现一定的恢复趋势,多样性指数(1.78–2.66)与均匀度(0.60–0.67)均处于较高水平。进一步分析表明,不同环境因子对水生生物群落的调控作用存在显著差异。总体而言,总氮、氨氮、高锰酸盐指数和溶解氧被识别为影响骆马湖水生态健康的关键环境因子。本研究系统揭示了退圩还湖影响下的水生态演变特征及机制,为保障南水北调东线湖泊水质提供了理论依据及技术支撑。

【关键词】过水型湖泊;退圩还湖;水质;水生态;关键指标表征;健康评价

【基金项目】国家重点研发计划项目(2023YFC3208804)、国家自然科学基金项目(52121006, 52309096)和中国博士后基金(2023TQ0163, 2024M751470)联合资助

【收稿日期】2025 年 2 月 21 日

【出刊日期】2025 年 3 月 22 日

【DOI】10.12208/j.aes.20250010

Characteristics and mechanisms of aquatic ecological evolution in water-carrying lakes under the influence of retreating polder

Xiaolong Zhu¹, Qiuheng Zhu^{1*}, Dongmei Wang², Wenhui Wang², Yifan Shi²

¹Center for Eco-Environmental Research, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing, Jiangsu

²Jiangsu Hydraulic Research Institute, Nanjing, Jiangsu

【Abstract】Human activities such as polder aquaculture have posed significant challenges to the ecological health of lakes, affecting the water quality stability of the water-carrying lake system along the Eastern Route of the South-to-North Water Diversion Project. The implementation of ecological restoration projects such as retreating polder holds promise for reconstructing and rehabilitating lake ecosystems. To systematically explore the impact of retreating polder on the aquatic ecosystem of water-carrying lakes along the Eastern Route, Lake Luoma—a typical water-carrying lake—was selected as the study area. This study comprehensively examined the spatial and temporal distribution characteristics of aquatic ecological elements under the influence of retreating polder and applied Canonical Correspondence Analysis (CCA) and Hierarchical Partitioning (HP) analysis to elucidate the response

第一作者简介:朱晓龙(2000-)男,江苏,汉,本科,河湖水环境治理与生态修复;

*通讯作者:祝秋恒(1994-)男,安徽马鞍山,汉族,博士,高级工程师,河湖水环境治理与生态修复。

mechanisms and key influencing factors of the lake ecosystem. Based on these key factors, a Water Pollution Index (WPI) evaluation method was developed to quantify changes in aquatic ecological health under the influence of retreating polder. The results showed that following the retreating polder, water transparency in the polder-retreated area improved, but the permanganate index and ammonia nitrogen concentration increased. Meanwhile, chlorophyll-a concentration was significantly higher than in other regions (27.43 $\mu\text{g/L}$), with an overall high abundance of cyanobacteria, and severe algal blooms were observed at certain monitoring sites. Additionally, the aquatic biological community in this region exhibited signs of recovery, with relatively high diversity indices (1.78–2.66) and evenness values (0.60–0.67). Further analysis revealed significant differences in the regulatory effects of various environmental factors on aquatic biological communities. Overall, total nitrogen, ammonia nitrogen, the permanganate index, and dissolved oxygen were identified as key environmental factors influencing the ecological health of Lake Luoma. This study systematically elucidates the ecological evolution characteristics and mechanisms of water-carrying lakes under the influence of retreating polder, providing theoretical foundations and technical support for safeguarding water quality in lakes along the Eastern Route of the South-to-North Water Diversion Project.

【Keywords】 Water-carrying lakes; Retreating polder; Water quality; Aquatic ecology; Ecological response

近五十年来,网围养殖因其成本低、管理便捷及较高的经济效益,已发展为我国淡水养殖的主要模式之一,尤其在长江中下游区域湖泊中广泛应用。然而,大规模养殖活动不仅削弱了湖泊的蓄洪与泄洪功能,阻碍区域水资源的合理调配,同时大量养殖废弃物的排放对水生态系统造成显著影响。为提升区域防洪能力、改善湖泊水质与生态环境,并保障水资源供给及灌溉需求,各地陆续实施了退圩还湖及围网拆除工程。相关研究表明,该类工程对湖泊水动力及生态环境具有不同程度的影响。例如,王俊等^[1]研究指出蜈蚣湖在退圩工程实施后水动力条件得到改善,水流更加通畅,泥沙淤积风险降低。洪泽湖退圩还湖后,行洪能力显著提升,但短期内水质未得到明显改善^[2]。贾冰婵^[3]等研究发现,固城湖退圩还湖区表层沉积物中重金属污染风险有所降低。综合而言,退圩还湖工程在改善湖泊污染状况,恢复水生态系统健康方面发挥了积极作用。然而,不同类型湖泊对该类工程的响应存在差异,尤其是过水型湖泊,其水流交换频繁、水动力条件复杂,退圩还湖的影响机制及生态效应尚需进一步研究。

南水北调东线工程过水型湖泊相较于传统湖泊,其水交换速率高,流速变化频繁,水体补给和排放主要通过外源河流实现。这类湖泊通常具有较短的水力停留时间,受流域来水量、流速和水文季节变化的影响较大,水质和沉积物环境处于持续动态变化之中^[4]。退圩还湖会直接改变湖泊的水文连通性和水动力特征,增加入湖水量的同时可能导致流速

提升、水体紊动增强,进而缩短水交换周期。水体流动性的增强在一定程度上有助于加速污染物扩散和稀释,但同时也可能提高底泥再悬浮的频率,使沉积物中吸附的重金属、持久性有机污染及富营养物质释放至水体,加剧水质波动。在典型过水型湖泊鄱阳湖^[5]中,水动力变化已被证实会显著影响叶绿素a的输移过程,进而影响水生态系统的稳定性。其次,过水型湖泊的高频水文波动增加了生态系统恢复的不确定性,在高水动力条件下,藻类繁殖受水流扰动的调控较大,浮游植物群落可能向适应高流速环境的种类转变,甚至可能导致水华暴发的风险上升。此外,底栖动物及水生植被的恢复依赖于稳定的水文环境,而过水型湖泊的水位波动和流速变化可能限制这些生物种群的重建,影响湖泊生态系统的长期演替。因此,相比于封闭型或半封闭型湖泊,过水型湖泊实施退圩还湖工程对其水动力结构、物质循环过程及生态系统的影响更为复杂。

目前,针对传统湖泊退圩还湖效应的研究已经较为系统,但针对过水调蓄型湖泊的水生态健康影响尚不清楚。因此,本文以南水北调东线典型过水型湖泊骆马湖为研究对象,通过揭示退圩还湖下过水型湖泊水环境及水生态演变规律,识别影响其水生态健康的关键因子及机制,系统阐明退圩还湖水生态效应,为保障南水北调东线湖泊水质稳定提供科学依据。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域概况

骆马湖(北纬 $34^{\circ}00' - 34^{\circ}11'$, 东经 $118^{\circ}04' - 118^{\circ}18'$)位于江苏省徐州市与宿迁市交界处, 总面积约 260 平方公里, 水量约 9.2 亿立方米, 平均水深 4.4 米, 主要入湖河道有中运河、沂河、新沂河等。骆马湖是典型的过水型湖泊。作为南水北调东线工程的重要水利枢纽, 不仅在区域防洪方面发挥着关键作用, 还在上游水体调节过程中承担了重要功能。湖泊接纳上游南四湖、沂河干流及邳苍区域的水流, 流域面积达 58000 平方公里。骆马湖入湖水量主要集中在每年 7 至 9 月, 占年均总流量的 70%, 且水位受人为调控大。近年来, 在汛期北方湖泊水量过大时, 骆马湖会作为调节水体的缓冲区, 接收来自上游的水流, 以缓解上游水库的水量压力。而在非汛期, 水流则由南向北调配, 维持上游水域水量和水质的稳定。国内外学者围绕骆马湖水水质水生生态变

化特征进行了广泛研究, Zhang 等人^[6]于 2014–2018 年间对该湖开展了连续监测, 研究发现总氮、高锰酸盐指数及电导率呈现逐年上升趋势, 并指出总氮是藻类群落变化的主要影响因素。Qin 等人^[7]认为骆马湖围网养殖活动对水质以及藻类群落造成了较大的影响。因此, 为恢复湖泊生态功能, 骆马湖拆除了约 49.5 平方公里的堤坝和养殖围网, 恢复了约 30 平方公里的开放水面。

1.2 样品的采集及处理

1.2.1 点位布置及监测频次

本次调查共监测 3 次, 分别于 2023 年 7 月(汛期)、2024 年 1 月和 2024 年 4 月开展。根据退圩还湖工程的实施, 骆马湖被划分为四个代表性区域: 退圩区、对照区(未退圩区)、水源地和出入口。具体监测点位的分布及坐标见图 1。

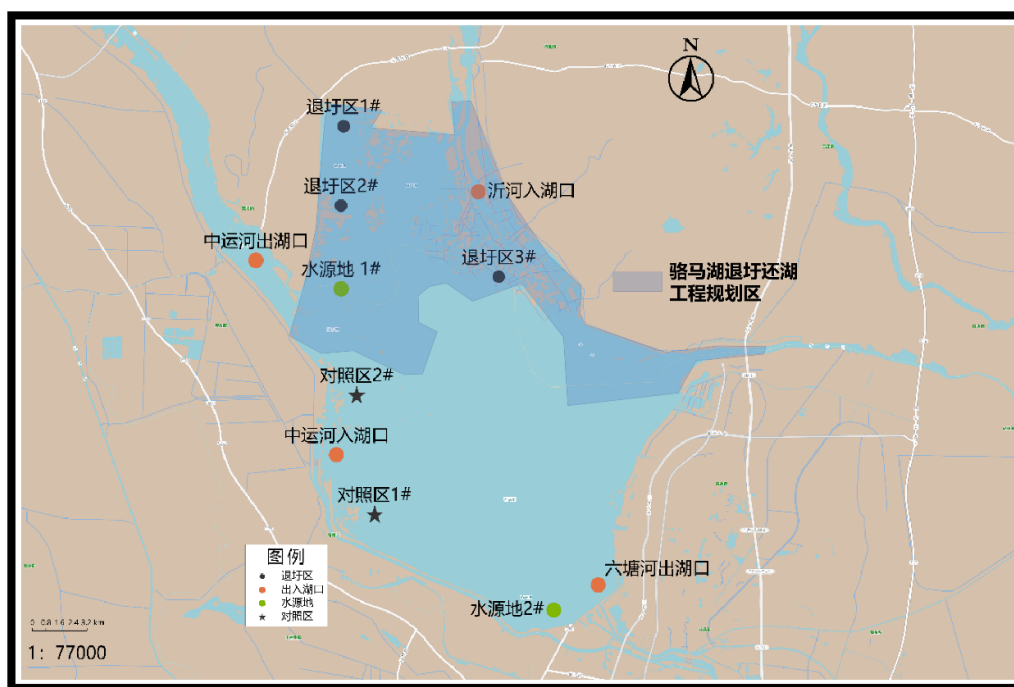


图 1 骆马湖水水质生态监测断面位置

1.2.2 水样及沉积物样品采集与分析

现场水质参数采用 YSI 水质分析仪进行测定, 包括 pH、溶解氧(DO)、电导率(EC)等指标。此外, 水体透明度(SD)由现场使用塞氏盘测定。水样的采集采用 采水器 进行, 样品经固定处理后带回实验室进行深入分析。实验室测定的水质指标涵盖总悬浮固体(TSS)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、

叶绿素 a (Chl.a)、总磷(TP)、总氮(TN)、硝氮($NO_3^- - N$)、氨氮($NH_4^+ - N$)等^[8]。沉积物样品的采集使用彼得森采泥器, 现场剔除碎石、贝壳及动植物残体后, 将沉积物密封至洁净的聚乙烯袋中, 并迅速送回实验室储存。样品在 $0 - 4^{\circ}C$ 避光条件下保存。

1.2.3 底栖动物样品采用抓斗式采泥器采集, 现

场使用分样筛进行初步筛洗, 并存放于低温保温箱中, 以确保生物完整性。随后, 样品被带回实验室进行动物标本的分拣与计数分析。浮游植物监测过程中, 使用采水器采集 1 L 水样, 并加入鲁哥氏碘液进行固定。样品经沉淀法处理后, 通过显微镜计数, 测定浮游植物的种类组成、数量及生物量。浮游动物的采集采用 25 号浮游生物网, 在水体表层至 0.5 m 水深范围内, 以 20–30 cm/s 的速度沿“∞”形轨迹缓慢拖动约 3 分钟。完成采样后, 网底部的样品收集容器用于存储定性样品。随后, 将网底出口插入 100 mL 聚乙烯瓶, 开启底端活塞收集样品, 最终通过显微镜计数进行定量分析^[9]。

1.3 数据处理与分析

配对样本间的显著性差异采用 Wilcoxon 符号秩检验 (Wilcoxon signed-rank test) 进行统计分析。CCA 排序图与层次分割图的绘制采用 R 语言 ggplot2 包完成。浮游植物群落的结构特征通过 Shannon-Wiener 多样性指数 (H') 及均匀度指数 (J') 进行定量评估。水生生物群落的优势种分析则基于 Pinkas 等^[10]提出的相对重要性指数 (IRI)。样点空间分布图及各监测点 WPI 值分布图由 ArcGIS 10.7 软件绘制, 其余图件均使用 Origin 9.0 完成。

2 结果与讨论

2.1 退圩还湖对水环境的影响

骆马湖水体中的氮、磷及其他水质指标表现出明显的区域差异。水体中总氮浓度的平均值范围为 1.7 至 2.32 mg/L, 整体水体质量保持在 IV 类至劣 V 类之间。总磷浓度变化较小, 范围为 0.08 至 0.13 mg/L, 且均保持 II 类至 III 类之间。相比于对照区, 退圩区的水体透明度较高, 总悬浮固体浓度较低, 养殖活动减少后水体变得更加清澈。然而退圩区高锰酸盐指数与氨氮高于对照区, 这可能是由于拆除围网后水体流动性增加, 底泥中长期积累的有机物 (如饲料残余和鱼类排泄物) 受到扰动在水体中释放。与此同时, 退圩区的叶绿素 a 浓度 ($27.43 \pm 49.99 \mu\text{g/L}$) 显著高于其他区域, 且监测点位之间差距很大。表明退圩区内部分区域藻类生长较为旺盛, 可能与水体中较高的营养盐 (如氮、磷) 浓度、高透明度 (66.43 cm) 及相比出入湖口更好的水动力条件 (如水流较缓、风浪扰动小等) 有关。此外, 拆除围网后, 水体中的鱼类数量减少, 藻类得以快速繁殖, 实地考察

中也发现了退圩区部分监测点位有严重的藻华现象。

水源地的整体水质相对较好, 该区域的总氮 ($1.7 \pm 1.08 \text{ mg/L}$)、总磷 ($0.08 \pm 0.07 \text{ mg/L}$)、叶绿素 a 浓度 ($5.67 \pm 4.95 \mu\text{g/L}$) 以及高锰酸盐指数 ($4.15 \pm 0.85 \text{ mg/L}$) 都为所有区域中最低的。这表明水源地水体未受到过多的外源污染物输入, 且具备较强的自净能力, 是一个相对健康、稳定的水环境。溶解氧浓度为 $9.05 \pm 5.02 \text{ mg/L}$, 是所有区域中最高的, 充足的溶解氧有助于维持水体中有害物质 (如氨氮和硫化物) 的转化和去除, 对水体生态系统的稳定性和生物多样性具有积极影响。出入湖口区域的总氮和氨氮浓度较高, 表明该区域可能受到农业径流、城市污水等外部氮源的输入。但磷污染相对较低, 藻类生长控制较好。出入湖口区域的水体流动性较强, 这有助于其中的氮、磷等营养盐的稀释和有机物的去除, 从而减缓了富营养化的进程。与水体相反, 相比于对照区, 退圩区底泥中的总氮、总磷与 TOC 浓度分别降低了 60.9%、66% 与 75%。这可能与退圩还湖后养殖活动减少、底泥中营养盐和有机物积累减少并逐渐释放入水体相关。同时水体净化逐步促进了底质的恢复。相比之下, 对照区的高营养盐和有机物浓度与持续的养殖活动和饲料残余密切相关^[11], 该区域底质仍处于较高的富营养化状态。

季节性的水体调度对过水型湖泊的水文特征影响深刻, 同时对退圩还湖后的恢复过程起着复杂的作用。图 2 展示了骆马湖在不同水情下水质参数的巨大差异: 汛期 TN、TP 和 COD_{mn} 显著高于非汛期, 反之非汛期 DO 浓度显著高于汛期 ($P < 0.05$)。汛期水质的显著恶化可能由于上游水流引入的大量营养盐和有机物, 而退圩还湖引发的水体流动性增强进一步加剧了这一现象。在汛期, 退圩区底质中的有机物受到更强扰动, 容易释放到水体中, 从而导致水体中的氮磷浓度高于对照区。与此同时, 非汛期的水体排放有助于去除底质和水质中围网养殖时期遗留的污染物。例如, 氨氮在汛期主要积聚于退圩区, 而在非汛期则随水流大量转移至出入湖口区。结合非汛期良好的湖泊自净能力 (高 DO), 进一步促进了水质改善和生态恢复。从长远来看, 过水型湖泊的特性有助于骆马湖在退圩还湖后水生生态健康的逐步恢复。然而, 当前上游来水仍是造成汛期水质恶化的重要因素。

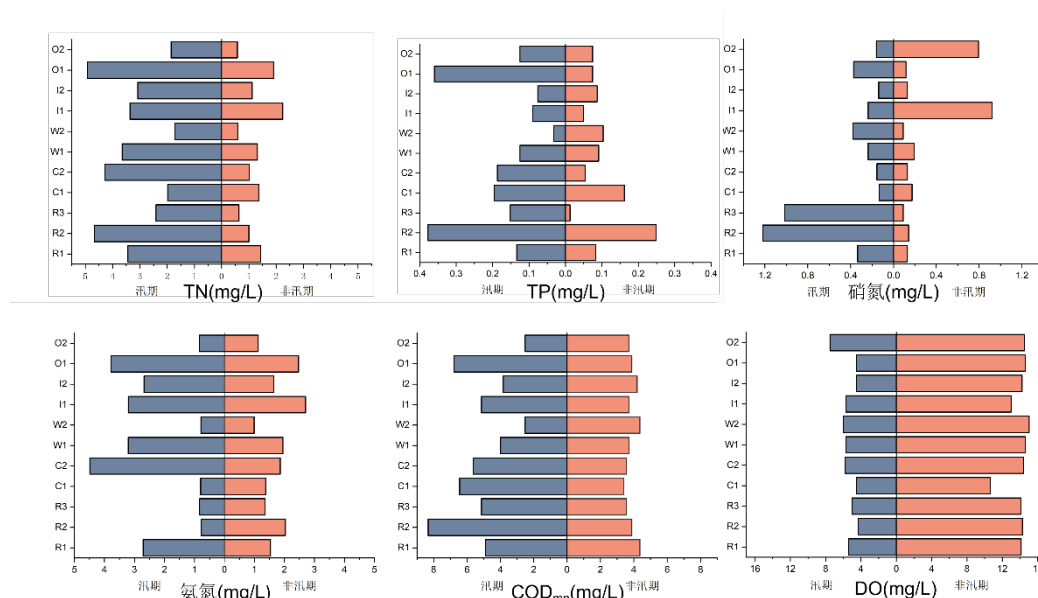


图2 骆马湖汛期-非汛期水质主要理化参数对比

2.2 退圩还湖下水生生物演变过程

2.2.1 浮游植物群落变化

本次调查共鉴定出 8 个门类的浮游植物, 共计 153 种。其中, 绿藻门 (63 种) 和硅藻门 (46 种) 占据优势地位, 分别占浮游植物总数的 41.2% 和 30.1%; 其次是 蓝藻门 (21 种, 占 13.7%), 而其他门类, 如裸藻门 (7 种)、甲藻门 (3 种)、隐藻门 (7 种)、金藻门 (5 种) 和隐藻门 (1 种), 种类较少。图 3a 直观展示了骆马湖不同区域浮游植物的密度与生物量的年均水平。结果表明, 蓝藻在各区域均占据主导地位, 其密度占比介于 39.8%–74.2% 之间。尽管微囊藻 (*Microcystis* spp.) 等蓝藻种类在各区域均大量分布, 但由于其单细胞质量较小, 对整体生物量的贡献有限。相比之下, 绿藻、硅藻和裸藻等单细胞质量较大的藻类, 其生物量占比相对更高。出入湖口区域的藻类密度最低, 但生物量最高, 可能与该区域水动力条件较强有关, 水流扰动影响蓝藻聚集及繁殖, 使得耐受风浪和流动性较强的硅藻和绿藻成为优势类群。叶绿素 a 浓度的分布趋势与蓝藻密度的变化趋势相一致, 退圩区的蓝藻密度及生物量最高。蓝藻的高密度可能会阻碍光线透入水体, 进而影响其他藻类和沉水植物的光照利用效率, 限制其光合作用及生物量积累, 从而增加该区域生态系统恢复的难度^[12]。

骆马湖浮游植物 H' 和 J 的计算结果如表 1 所示。

整体来看, 各区域的多样性和均匀性处于较高水平, 其中出入湖口区域的 H' (3.37) 和 J (0.74) 最高, 反映出该区域浮游植物群落的结构较为稳定。退圩区的浮游植物优势种中假鱼腥藻 (蓝藻门)、微囊藻 (蓝藻门) 和囊裸藻 (裸藻门) 占据主导。其中, 囊裸藻不仅在退圩区具有优势, 还在对照区和出入湖口区域占据重要地位。

2.2.2 浮游动物群落变化

本研究共鉴定出 51 种浮游动物, 涵盖轮虫 (31 种, 占 60.8%)、枝角类 (10 种, 占 19.6%) 和桡足类 (10 种, 占 19.6%)。骆马湖不同区域的浮游动物群落存在明显差异, 退圩区的浮游动物密度 (401.94 ind./L) 和生物量 (3.46 mg/L) 均显著高于其他区域 (图 3b)。水质因子和藻类密度是影响浮游动物群落的重要驱动因素。退圩区藻类资源丰富, 为浮游动物提供了充足的食物来源。此外, 水动力条件也对浮游动物群落具有重要影响。水流扰动可能增强浮游动物的新陈代谢, 从而影响其生物量累积, 这或许能解释出入湖口区域浮游动物生物量偏低的原因。

各区域的浮游动物优势种包括僧帽溞、筒弧象鼻溞、针簇多肢轮虫、角突臂尾轮虫和中华窄腹剑水蚤。不同水域的浮游动物种类及其优势度存在明

显变化。退圩区以枝角类为主,简弧象鼻溞(*Bosmina coregoni*, $IRI=2835.99$)为主要优势种。对照区与水源区中挠足类的占比有所上升,出入湖口的优势物种主要是轮虫,如角突臂尾轮虫(*Brachionus angularis*, $IRI=969.70$)。

2.2.3 大型底栖动物群落变化

本次调查共鉴定出 7 纲 28 种底栖动物,其中昆虫纲 10 种、腹足纲 7 种、双壳纲和甲壳纲各 3 种、瓣鳃纲和寡毛纲各 2 种、蛭纲 1 种。不同水域的底

栖动物群落组成存在显著差异。出入湖口区域的底栖动物密度和生物量均高于其他区域,分别为 64.38 ind/m²和 47.69 g/m²,其中腹足纲物种占据主导地位。腹足纲物种通常栖息于水体较为清澈的环境,该区域水透明度较高(71.22 cm),为其提供了适宜的生存环境,使其种群数量较为丰富。相比之下,退圩区和对照区的水动力条件较弱,同时浮游植物及底栖藻类生长环境较为适宜,为底栖动物提供了良好的栖息条件,从而导致这两个区域的底栖密度相对较高。

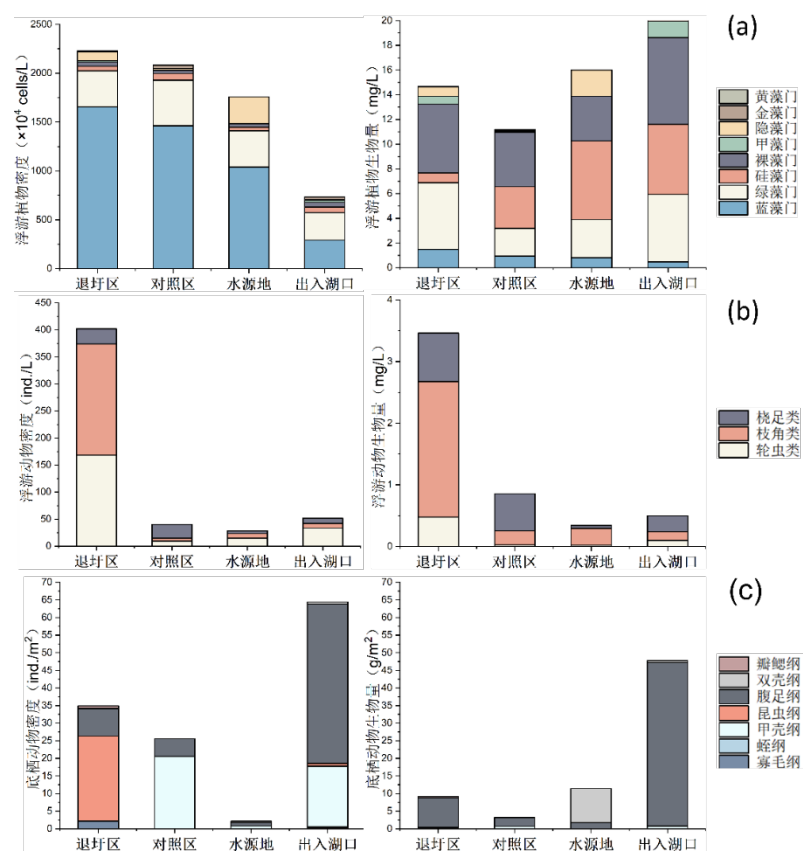


图 3 骆马湖各区域浮游植物 (a)、浮游动物 (b) 和大型底栖动物 (c) 的密度及生物量

表 1 骆马湖各区域水生生物多样性指数

区域	浮游植物		浮游动物		底栖动物	
	H'	J	H'	J	H'	J
退圩区	2.66	0.63	2.14	0.60	1.78	0.67
对照区	2.83	0.67	2.67	0.84	0.59	0.54
水源区	2.82	0.69	2.77	0.84	1.34	0.94
出入湖口	3.37	0.74	2.78	0.76	1.38	0.51

2.3 骆马湖水生态健康关键因子识别

选取各群落 IRI 排名前 10 的物种绘制了骆马湖

水生生物群落与环境因子的 CCA 排序图并通过置换检验 (999 次) 绘制了层次分割图 (图 4), 环境

因子对不同水生生物群落的作用机制各异。在浮游植物方面, 所有环境因子均未达到显著性水平, 表明单一因子的解释能力较低, 浮游植物群落的变化主要受到多种因子的综合作用。从解释率来看, 溶解氧 (14.66%) 和高锰酸盐指数 (14.27%) 是对浮游植物影响最大的环境因子。环境因子对不同区域浮游植物群落的作用机制各异, 退圩区样点主要分布在 CCA1 轴的负向, 溶解氧浓度与电导率是调控退圩区藻类丰度的重要因子。减少溶解氧浓度, 增加电导率或许能有效减缓该区域的藻华现象。而进出湖口区域则主要受总氮、氨氮与高锰酸盐指数的影响, 并且与溶解氧呈负相关。总氮 (13.94%) 与氨氮 (11.87%) 对浮游动物群落的调控作用达到了显著水平, 表明浮游动物的分布受氮源的强烈驱动,

这反映了富营养化条件对浮游动物摄食资源和栖息环境的影响。较低的氮浓度可能是水源地浮游动物丰度和生物量较低的原因。CCA 图则显示出大部分点位的环境因子作用机制较为相似, 全湖浮游动物的绝对优势物种僧帽藻 (*Daphnia cucullata*) 受到硝氮、电导率指数的强烈影响。与浮游植物类似, 底栖生物的分布与所有环境因子的关联均未达到显著性。叶绿素 *a* (13.1%) 和 TSS (11.8%) 是对浮游植物影响最大的环境因子, 其他解释度较高的环境因子如氨氮、电导率、溶解氧、高锰酸盐指数的解释率在 10.27% - 11.3%。CCA 图表明, 大部分点位与物种受到溶解氧的负面调控。退圩区样点靠近叶绿素 *a* 和溶解氧, 该区域主要由昆虫纲组成, 对高藻类密度与高含氧量的环境有更好的忍耐性。

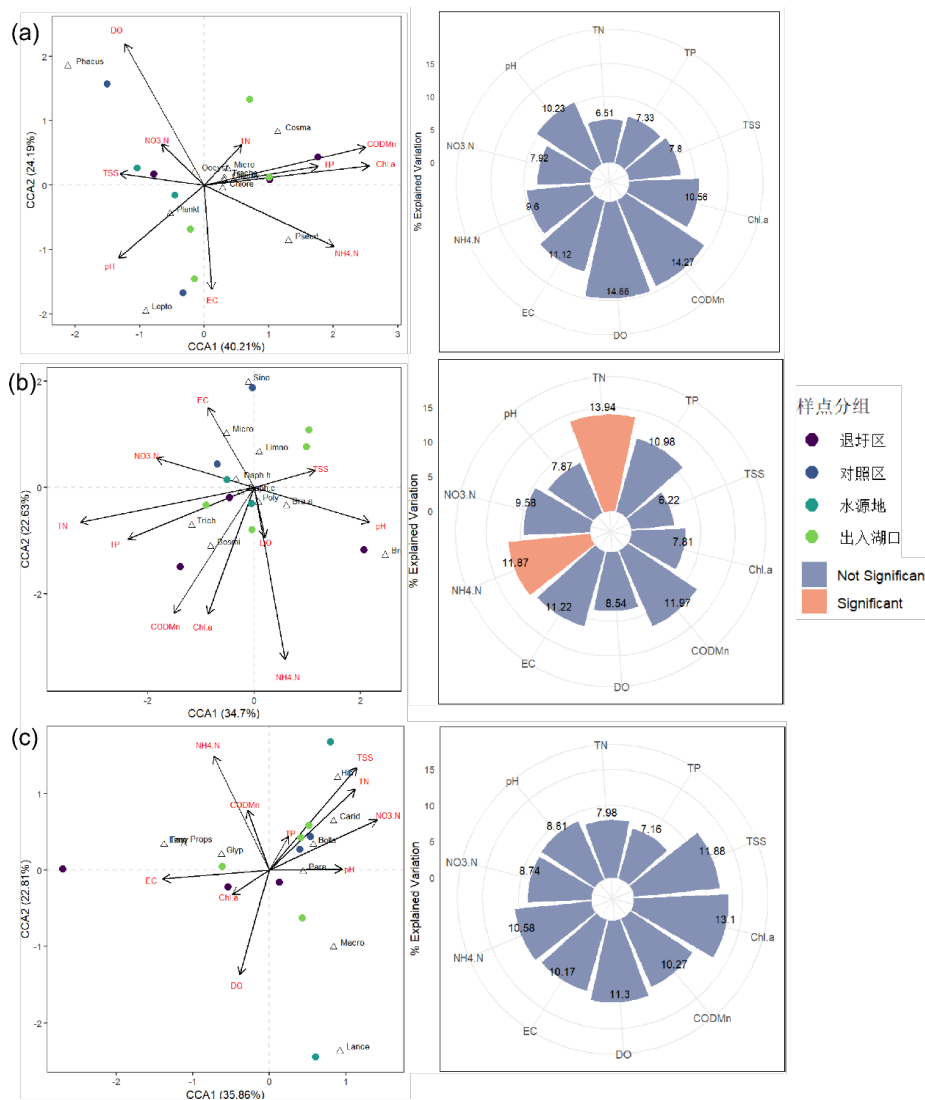


图4 骆马湖水生生物群落与环境因子的 CCA 排序图与层次分割图 (a.浮游植物、b.浮游动物、c.大型底栖动物)

3 结论

(1) 骆马湖整体水体质量在Ⅳ类-劣Ⅴ类之间, 主要原因是氮浓度过大。各区域水质、底质差异明显。撤除围网后, 退圩区透明度上升, TSS 降低, 水体变得更加清澈。但是高锰酸盐指数与氨氮含量上升, 可能由于水体流动性增加导致底泥中积累的有机物如鱼类粪便、饲料等释放入水体中。同时, 退圩区叶绿素 a 浓度显著高于其他区域, 部分点位出现严重的藻华现象。汛期上游来水是目前骆马湖水水质恶化的重要因素。

(2) 退圩还湖显著改善了骆马湖退圩区的水生生物群落结构和生态功能, 使其在多样性和生物量方面逐步恢复, 显示了水生态修复的积极成效。退圩区浮游植物、浮游动物密度与生物量均高于其他区域、大型底栖动物仅低于出入湖口区域。与此同时, 该区域的物种多样性指数(1.78-2.66)和均匀度(0.6-0.67)均处于较高水平, 显示了生态系统多样性的良好恢复。然而, 退圩区存在蓝藻密度过高的问题, 可能对生态系统的长期稳定性造成威胁, 应加强蓝藻的控制和营养盐管理, 进一步促进生态系统的均衡恢复。

(3) 骆马湖水生态健康关键因子识别研究表明, 不同水生生物群落的分布与环境因子的调控机制具有显著差异。浮游植物与大型底栖动物群落受到多种环境因子的综合作用, 单一因子的解释能力较低。浮游动物群落分布则受到氮源强烈驱动, 总氮(13.94%)和氨氮(11.87%)的显著调控反映了富营养化对其摄食资源和栖息环境的重要影响。

参考文献

- [1] 王俊, 王轶虹, 王强, 等. 退圩还湖后湖泊水动力条件分析——以蜈蚣湖为例[J]. 中国农村水利水电, 2020: 91-97.
- [2] 刘新宇, 薛联青, 刘远洪. 洪泽湖退圩还湖前后调蓄能力模拟及对比分析[J]. 水电能源科学, 2022, 40(8): 88-91.
- [3] 贾冰婵, 张鸣, 武娟, 等. 固城湖退圩还湖区沉积物重金属特征及生态风险评价[J]. 中国环境科学, 2022, 42(10): 4741-4751.
- [4] Liu, Yun, et al. "The nitrate cycling process in a through-flow lake under the water transfer project: Insights from multiple isotopes." *Environmental Technology & Innovation* 36 (2024): 103929.
- [5] Xu, Jiajun, Jiayi Pan, and Adam T. Devlin. "Variations in chlorophyll-a concentration in response to hydrodynamics in a flow-through lake: Remote sensing and modeling studies." *Ecological Indicators* 148 (2023): 110128.
- [6] Zhang Q J, Wang Y Y, Wang J D, et al. Succession pattern of phytoplankton and its drivers in Lake Luoma, Jiangsu Province[J]. *Huanjing Kexue*, 2020, 41(4): 1648-1656.
- [7] Qin B, Tang J, Wang X, et al. Analysis of Phytoplankton Community Structure Changes and the Driving Factors in Summer of Luoma Lake[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, 35(9): 1172-1181.
- [8] Hu B, Liu Y, Chen Y, et al. Water quality and pollution source apportionment responses to rainfall in steppe lake estuaries: A case study of Hulun Lake in northern China[J]. *Ecological Indicators*, 2024, 168: 112791.
- [9] Kostelnik, Eddie, et al. "Synthetic microfibers are ubiquitous in benthic algae from the Laurentian Great Lakes." *Journal of Great Lakes Research* (2025): 102527.
- [10] Pinkas L, Oliphant M S, Iverson I L K. Fish bulletin 152. food habits of albacore, bluefin tuna, and bonito in California waters[J]. 1970.
- [11] 施炜纲, 王博, 周昕. 蟹、鱼网混养对草型湖泊氮磷平衡的影响. *湖泊科学*, 1999, 11(4): 363-368.
- [12] Paerl H W, Hall N S, Calandrino E S. Controlling harmful cyanobacterial blooms in a world experiencing anthropogenic and climatic-induced change[J]. *Science of the total environment*, 2011, 409(10): 1739-1745.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

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



OPEN ACCESS