

以鲢、鳙放养为主的武山湖后生浮游动物群落结构特征

张佳敏 高健 杨诚 焦一滢 廖明军 熊文 赵以军¹

(湖北工业大学 土木建筑与环境学院, 河湖生态修复与藻类利用

湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430068)

【摘要】: 武山湖是紧邻长江的通江型富营养湖泊。为了解该湖在以鲢、鳙放养为主的情况下后生浮游动物结构特征, 于2017年9月至2018年8月对其后生浮游动物群落结构特征开展了监测。结果表明, 武山湖共采集浮游动物61种(属), 其中轮虫24种, 枝角类23种和桡足类14种; 优势种共有13种, 其中轮虫12种和桡足类1种。轮虫丰度全年有11个月占比超过70%, 而桡足类和枝角类全年占比均较小。就生物量而言, 轮虫全年有10个月占比超过80%, 但桡足类生物量占比在实施冬季捕捞期间即12月、1月和2月占比分别为20.1%、79.2%和51.8%, 明显比其他月份高, 表明减少鲢、鳙能够减缓浮游动物被捕食压力。冗余分析结果显示温度、叶绿素a和pH是影响武山湖浮游动物群落结构的关键因子。研究结果表明武山湖后生浮游动物以小型轮虫为主, 枝角类和桡足类数量少且仅为小型种类。

【关键词】: 武山湖 后生浮游动物 群落结构

【中图分类号】: X171.1 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)08-1848-10

后生浮游动物包括轮虫、枝角类和桡足类3大类。作为初级消费者, 大多数后生浮游动物以浮游植物为食, 而它们本身又是鱼类的食物, 其群落结构变化能够反映鱼类对浮游动物的捕食压力大小以及浮游动物对浮游植物的牧食压力等信息^[1]。随着湖泊营养水平的提高, 后生浮游生物食性鱼类密度往往增加而肉食性鱼类数量往往会减少, 导致后生浮游动物密度降低, 其中大个体的浮游动物减少尤其明显, 最终导致浮游动物控藻能力减弱, 后果是浮游植物密度增加, 水质进一步恶化^[2]。鉴于后生浮游动物在富营养湖泊控藻中扮演的重要角色^[3~6], 学者提出通过提高后生浮游动物中滤食能力强的类群如枝角类来控制浮游植物丰度, 即经典生物操纵^[7]。然而在我国富营养湖泊多数被用来养殖鲢、鳙, 一方面鲢、鳙鱼可以以浮游动物为食, 在富营养化湖泊中产量高, 经济效益好^[8]; 另一方面, 鲢、鳙尤其是鲢能够滤食藻类, 控制藻类水华的发生, 即非经典生物操纵^[9], 但目前对鲢、鳙控藻问题在富营养化湖泊中的应用效果仍存在争议^[10], 对鲢、鳙尤其是鳙的大量放养的湖泊中后生浮游动物群落特征研究情况报道也不多。

武山湖地处湖北省武穴市北郊, 位于长江北岸, 距长江约4km, 属长江中游中型浅水通江湖泊。20世纪80年代初, 武山湖水质清澈、水生高等植物多样性丰富, 但自1987年以来其周围6家工厂向其排污, 以及湖泊本身鱼类放养量逐渐增大, 再加上

¹**作者简介:** 张佳敏(1993~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水环境. E-mail: JiaminZ93@163.com

高健 E-mail: jgaol3@hotmail.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(31500378, 31670367); 国家重点基础研究项目(2016YFC0401702); 省科技厅重大专项(2018ZYYD037); 广东省水利科技创新项目(201714); 湖北工业大学高层次人才科研启动金(337301)

施肥和投饵养殖,使湖泊水生生态系统日趋退化,水生高等植物种类相继消失,变为富营养藻型湖泊生态系统^[11,12],其鱼类养殖品种逐渐变成以单一的鲢、鳙为主。根据武山湖武黄渔场 2014~2018 年数据统计,近年武山湖冬捕渔获量中鲢和鳙占 90%以上,且以鳙为主(占比在 65%~97%之间),其中在 2017~2018 年度,投放鳙鱼苗 208.4t(94.7%)、鲢鱼苗 11.6t(占 5.3%),鳙鱼苗约 0.25~0.5kg/尾,鲢鱼苗约 0.1~0.15kg/尾;2017 年冬捕鳙的捕捞量约 908.9t,鲢的捕捞量约 339.5t,冬捕鲢鳙鱼获总量约 55kg/亩,占总鱼捕获量为 91.7%^[13]。本研究于 2017~2018 年对武山湖后生浮游动物群落结构及其环境因子开展较系统的调查,分析在鲢、鳙放养为主水体的后生浮游动物群落结构特征。研究结果将为合理评估鲢、鳙放养在富营养湖泊中的生态效应提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 研究地点和采样时间

武山湖水域面积 15.2km²,常水位湖容约 2690×10⁴m³,最大水深 2.46m,平均水深 1.27m。武山湖位于华阳水系源头,入湖河流主要有三部分:梅川河、大金河和铁石河在近湖处(即三河入湖口)汇水,城区东港来水和西港来水。武山湖出口在同一地方交叉,一是经丰收大港连通太白湖,经梅济港流入黄梅县龙感湖,再经安徽省华阳闸入长江;二是经官司桥大港通过闸入长江。2017~2018 年武山湖三大入湖河口来水的氮、磷污染严重,年输入到武山湖的 TN 约为 331.78t,TP 约 40.99t^[13]。

本次调查采样时间为 2017 年 9 月~2018 年 8 月,设有 7 个采样点(图 1),水样及浮游生物样品每月采集一次。



图 1 武山湖采样点(S1~S7 分别代表 7 个采样点)

1.2 样本采集及分析

透明度(SD)采用塞氏盘(Secchi-disk)现场测定。水温(WT)、pH 值和溶解氧(DO)等参数采用 YSIProPlus 多参仪(美国)现场测定。

用 5L 有机玻璃采水器采集水表面下 0.5m 处水样,采集 4 次共计 20L 水样放置在用湖水洗净的塑料桶内,取约 2.5L 水样低温保存,带回实验室分析水质。TN、TP 和高锰酸盐指数(COD_{Mn})等水质指标的检验方法依据《水和废水监测分析方法(第四版)》^[14],叶绿素 a(Chla)采用丙酮提取法检测^[14]。

取上述水样 1L 置于广口塑料瓶中用于轮虫的定量分析, 现场加入约水样体积 1% 的鲁哥试剂固定, 带回实验室静置沉淀 24h 以上后浓缩待鉴定。桡足类和枝角类样品采用 5L 采水器于水面 0.5m 下均匀采集 10 次, 共计 50L 水样, 用 25#浮游生物网 (64 μ m) 过滤、浓缩, 并定容至 50ml, 用福尔马林 (5%) 固定后带回实验室定量分析。浮游动物鉴定和生物量换算参考相关文献^[15~18]。

1.3 数据处理及分析

1.3.1 综合营养状态指数评价

参考湖泊富营养化评价方法及分级标准, 依据 Chla、TP、TN、SD 和 COD_{Mn} 监测结果, 运用综合营养状态指数法 (TLI) 对武山湖生态系统健康状况进行评价^[19]。综合营养状态指数计算公式:

$$TLI(\Sigma) = \sum W_j TLI(j) \quad (1)$$

式中: $TLI(\Sigma)$ 表示综合营养状态指数; $TLI(j)$ 代表第 j 种参数的营养状态参数; W_j 为第 j 种参数的营养状态指数的相关权重, 详细计算公式见参考文献^[20]。湖泊营养状态参考《中国水资源公报》分成 5 级^[20]。

1.3.2 优势种

后生浮游动物优势种根据种的 Mcnaughton 优势度指数 (Y) 来确定^[21]:

$$Y = \frac{n_i}{N} \times f_i \quad (2)$$

式中: n_i 为第 i 种的个体数; N 为所有种类总个体数; f_i 为出现频率; Y 值 > 0.02 的种类视为优势种。

1.3.3 数据分析

后生浮游动物类群丰度和生物量与 TN、TP、 COD_{Mn} 、Chla、WT、DO、pH、SD 和 TLI 的 Pearson 相关性分析用 SPSS Statistics 22.0 软件进行。所有数据分析前首先进行正态分布检验, 不符合正态分布的数据用 $\ln(x)$ 处理后分析。

冗余分析通过 CANOCO 4.5 进行, 在分析前, 先对物种丰度矩阵进行 DCA 去趋势分析, 用于排序的后生浮游动物物种满足以下 3 个条件: (1) $Y \geq 0.02$ 的优势属; (2) 该物种在不同采样点的不同时期出现频率 $> 12.5\%$; (3) 该物种至少在一个采样点的相对密度 $\geq 1\%$ 。对筛选后的武山湖后生浮游动物物种进行 DCA 分析, 本研究中最大轴小于 3, 因此采用冗余分析 (RDA)^[22] 探讨武山湖后生浮游动物丰度与环境因子 (包括 TN、TP、 COD_{Mn} 、Chla、WT、DO、pH、SD)。为了获得数据正态分布, 将后生浮游动物和环境因子 (除 pH) 均进行 $\ln(x+1)$ 转换。物种及环境因子选取 12 个月 7 个采样点均值共 12 个数据进行 RDA 分析。在线性排序图, 从样方的点在物种箭头及其延长线的投影点可以表示他们之间的关系。由样方到物种箭头线的垂点可以判断样方物种的多度值, 垂点在物种箭头方向越远位置代表其物种多度越高, 反之越低^[22]。

聚类分析利用大型多元统计软件 PRIMER 5.0 进行, 对武山湖后生浮游动物优势种分别进行时间和空间的聚类分析。

2 结果与分析

2.1 武山湖理化特征季节变化规律

武山湖在调查期间水温、溶解氧和 pH 值的变动范围分别为 7.8℃~34.0℃、5.57~15.03mg/L 和 7.41~9.12。透明度最低和最高值分别出现 4 月 (27.7cm) 和 12 月 (132.7cm), 有 8 个月的透明度在 40cm 以下 (图 2)。

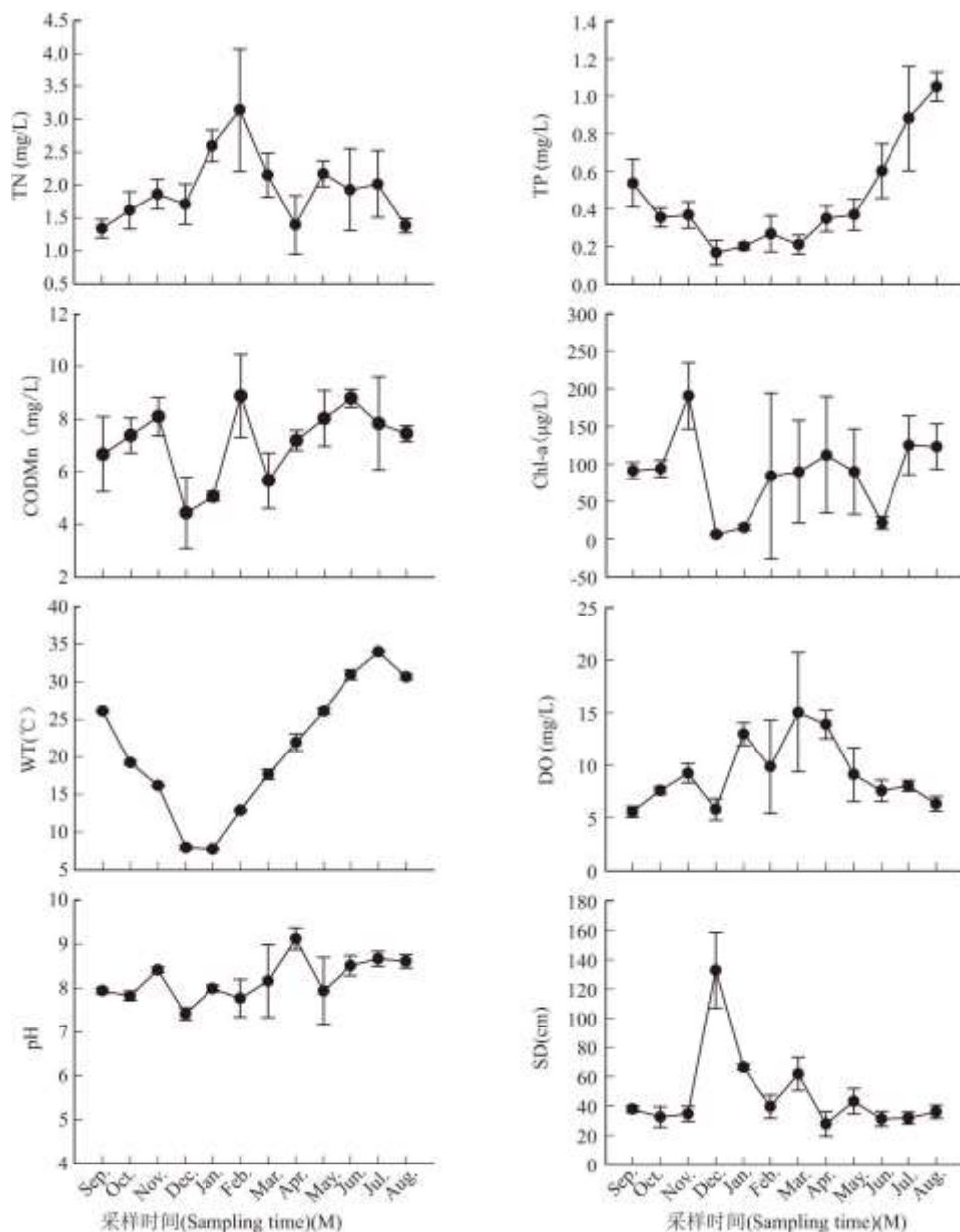


图 2 武山湖水体理化指标变化 (均值±标准差)

武山湖 TP 浓度冬季低夏季高, 12 月均值最低, 为 0.17mg/L; 8 月均值最高为 1.05mg/L。TN 浓度与 TP 的季节变化相反, 其值冬季高夏季低, 9 月均值最低, 为 1.34mg/L; 2 月最高, 为 3.14mg/L。COD_{Mn} 浓度 12 月最低, 均值为 4.44mg/L, 2 月最高, 均值为 8.88mg/L。武山湖不同月份 Chl-a 浓度差别很大, 12 月值最低, 平均 6.22 μg/L; 11 月 Chl-a 浓度最高, 达 190.44 μg/L (图 2)。武山湖富营养指数 TLI 均值变化范围在 51.09~73.1 之间, 全湖全年处于轻度富营养到重度富营养水平, 其中 12 月和 1 月处于轻度富营养, 7 月、8 月和 11 月为重度富营养, 其它月份为中度富营养。

2.2 武山湖后生浮游动物特征

2.2.1 浮游后生动物种类组成及优势种

在武山湖 12 次调查中共采集到后生浮游动物 61 种(属), 其中轮虫 24 种, 枝角类 23 种和桡足类 14 种。

后生浮游动物优势种共有 13 种, 其中轮虫 12 种和桡足类 1 种, 优势种无枝角类。轮虫优势种包括广布多肢轮虫、暗小异尾轮虫、裂痕龟纹轮虫、疣毛轮虫、裂足臂尾轮虫和螺形龟甲轮虫(表 1), 其他出现较多的种类包括: 萼花臂尾轮虫、角突臂尾轮虫、顶生三肢轮虫和前节晶囊轮虫。桡足类优势种为英勇剑水蚤, 其他出现较多的种类包括透明温剑水蚤、跨立小剑水蚤、毛饰拟剑水蚤和如意真剑水蚤。枝角类出现较多的种类包括秀体蚤、近亲裸腹蚤、微型裸腹蚤、长额象鼻蚤、圆形盘肠蚤、矩形尖额蚤等, 大型枝角类盔形蚤、僧帽蚤在武山湖冬季捕捞后出现(2 月份), 其平均密度 0.089 和 0.034ind./L。

2.2.2 后生浮游动物丰度和生物量

武山湖轮虫丰度月均值在 85.7~17622.9ind./L 之间, 1 月最低, 4 月最高; 桡足类月均值在 0.2~293.9ind./L, 7 月最低, 2 月最高; 而枝角类月均值在 0.03~3.6ind./L, 丰度全年均较低(图 3)。轮虫均值丰度占比在 48.9~99.9%之间, 除 1 月外其他月份均值占比超过 70%。桡足类 12 月、1 月和 2 月占比分别为 8.7%、50.9%和 30.0%, 而枝角类全年占比均小于 0.02%(图 4)。

轮虫生物量月均值在 2.52~21.15mg/L 之间; 桡足类在 0.0015~0.9mg/L; 枝角类在 0.0006~0.1mg/L(图 3); 后生浮游动物生物量最高值和最低值出现月份与丰度趋势相同。轮虫生物量占比在 19.5~99.9%之间, 轮虫全年有 10 个月占比超过 80%。而桡足类占比在 0~79.2%, 其中 12、1 和 2 月占比分别为 20.1%、79.2%和 51.8%, 其他月均小于 15%。枝角类生物量全年均小于 3.0%(图 4)。

2.3 武山湖后生浮游动物与环境因子关系

Pearson 相关性分析结果(表 2)表明, 武山湖后生浮游动物轮虫丰度和生物量与 TN 呈显著负相关, 与温度呈显著正相关; 桡足类丰度和生物量与 TP 呈显著负相关, 与水温呈极显著负相关。其它浮游动物与环境因子相关性不明显。

通过冗余分析(RDA)对后生浮游动物各优势属的丰度和生物量与环境因子之间的关系进行分析。

基于丰度数据, 主成分轴 1 和轴 2 特征值分别是 0.579 和 0.170, 即前两个轴共解释了 74.9%的浮游动物各优势属的丰度变化(图 5a)。主成分轴 1 和轴 2 的物种与环境因子相关性分别为 99.1%和 96.6%, 表明前两个轴的物种与环境因子相关性高。RDA 蒙特卡罗检验前向选择检验表明 WT 和 Chla 对浮游动物丰度变化影响最大, 这两个变量共解释了 60.0%(图 5a)。WT、TP、COD_{Mn} 与各优势属(L1, L2, L3, L5, L6, L11, L12)丰度呈正相关; 而 TN 反之。

表 1 武山湖后生浮游动物不同月份优势种组成

优势种		采样时间(月)											
		Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.
轮虫	疣毛轮虫(L1)		0.06			0.033	0.19	0.69	0.03	0.03			0.03
	裂足臂尾轮虫 B(L2)	0.05	0.05	0.10					0.04		0.03	0.06	0.165

	广布多肢轮虫(L3)	0.39	0.39	0.09			0.15	0.05	0.39	0.03	0.26	0.26	0.26
	长肢多肢轮虫(L4)				0.83	0.03							
	顶生三肢轮虫(L5)										0.02	0.11	0.07
	裂痕龟纹轮虫(L6)	0.22	0.08	0.04					0.07	0.10	0.12	0.17	0.04
	螺形龟甲轮虫(L7)				0.04	0.13	0.10	0.03	0.04				
	暗小异尾轮虫(L8)	0.23	0.37	0.53				0.06	0.32	0.67	0.50	0.32	0.25
	前翼轮虫(L9)								0.07				
	迈氏三肢轮虫(L10)	0.05											
	前节晶囊轮虫(L11)			0.06									0.05
	萼花臂尾轮虫(L12)			0.04									
桡足类	英勇剑水蚤(R1)				0.07								

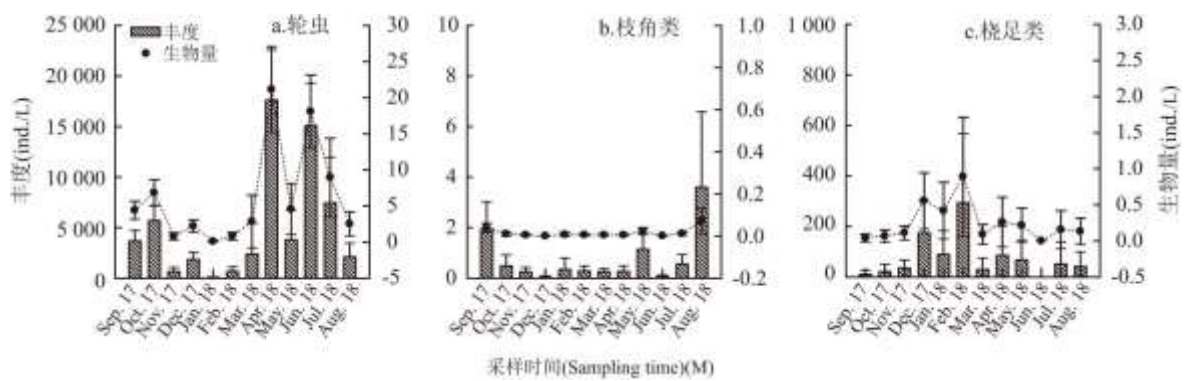


图 3 武山湖轮虫、枝角类和桡足类丰度和生物量季节变化(均值±标准差)

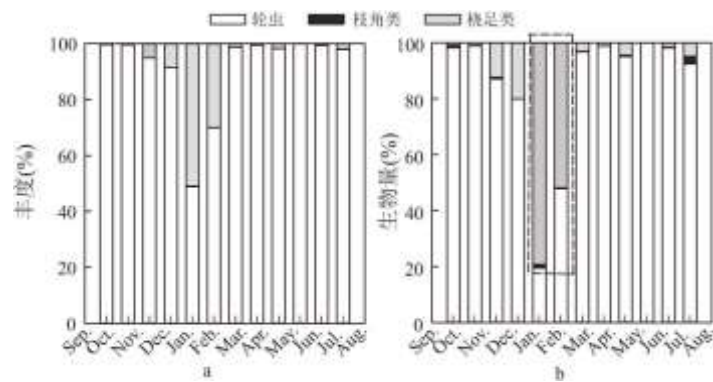


图 4 武山湖轮虫、枝角类和桡足类所占比率

基于生物量数据，主成分轴 1 和轴 2 特征值分别是 0.833 和 0.065, 即前两个轴共解释了 89.8%的浮游动物各优势属的生物

量变化(图 5b)。主成分轴 1 和轴 2 的物种与环境因子相关性分别为 98.6%和 99.1%,表明前两个轴的物种与环境因子相关性高。RDA 蒙特卡罗检验前向选择检验表明 pH 和 Chl a 对浮游动物生物量变化影响最大,这两个变量共解释了 44.0%(图 5b)。WT、COD_{Mn} 和 pH 与各优势属(L2,L3,L6,L8)生物量呈正相关,而 TN 反之。

表 2 武山湖后生浮游动物与环境因子相关性分析 (n=84)

相关系数	lnTN	lnTP	lnCOD _{Mn}	lnChl-a	lnWT	lnDO	lnpH	lnSD	lnTLI
ln(轮虫生物量)	-0.583*	0.441	0.374	0.237	0.703*	-0.218	0.418	-0.487	0.343
ln(桡足类生物量)	0.321	-0.577*	-0.409	-0.331	-0.753**	0.039	-0.505	0.523	-0.491
ln(枝角类生物量)	-0.412	0.469	-0.276	0.531	0.349	-0.498	-0.068	0.135	0.391
ln(轮虫丰度)	-0.583*	0.441	0.374	0.236	0.703*	-0.218	0.418	-0.487	0.343
ln(桡足类丰度)	0.320	-0.590*	-0.407	-0.329	-0.756**	0.036	-0.512	0.531	-0.496
ln(枝角类丰度)	-0.412	0.469	-0.276	0.531	0.349	-0.498	-0.068	0.135	0.391

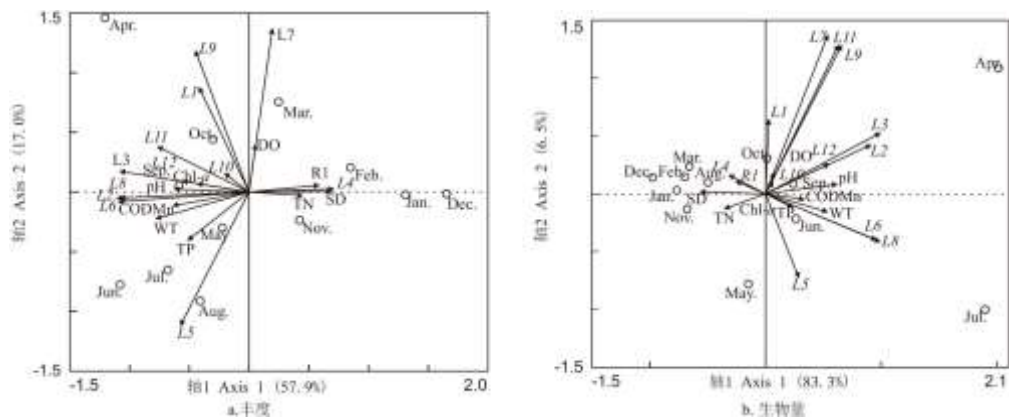


图 5 武山湖后生浮游动物优势种、环境变量和采样点的冗余分析(RDA)三元图

3 讨论

武山湖后生浮游动物以小型种类轮虫为主,浮游甲壳动物种类数和丰度均较少。已有研究表明,浮游动物生物量和密度随着湖泊营养水平的上升而增加,这种增加得益于小型浮游动物如轮虫所占比重的增加^[23-25]。一般高浓度的营养物质(TP)会导致浮游动物的数量和生物量增加,小型枝角类、桡足类和轮虫的比例增加,而大型浮游动物(溞类)减少^[25,26],原因是轮虫等小型浮游动物的食性具有较强的可塑性,能以小的颗粒物如细菌和有机碎屑等为食,而这些物质在富营养水体中往往很丰富^[27]。此外,营养水平的提高促使浮游动物不可食藻类增加(如鱼腥藻、束丝藻和微囊藻),从而导致大型浮游动物生物量减少^[28]。调查期间,武山湖夏季外源磷污染严重,湖泊处于重度富营养水平,不利于大型浮游动物生长。同期监测浮游植物优势种主要为蓝藻和绿藻,其中蓝藻优势种为平裂藻和微囊藻^[13],很难被浮游动物取食。RDA 分析表明 WT、Chl a 等对浮游动物丰度或生物量变化影响最大也说明浮游植物浓度是影响浮游动物优势种的关键因素。武山湖由于外源营养盐输入和内源释放,水体氮、磷营养盐水平高,浮游植物常年浓度都比较高,其优势种主要为蓝藻和绿藻^[13],其生物量峰值达 34.77mg/L,丰度最高达 341.46×10⁶cells./L,这种以蓝绿藻为主的浮游植物群落结构不利于大型桡足类和枝角类生长,浮游动物对浮游植物的下行效应随着营养盐的增加将被抑

制^[29]。

浮游动物在不同水环境中群落种类组成及动态存在差异,水质营养状况、温度、pH、浮游植物等因素^[30,31]和捕食者强度是湖泊浮游动物群落变化的关键影响因素^[32~35]。RDA 分析表明武山湖水体的 pH 值对浮游动物具有重要影响。轮虫和枝角类均有其最适宜生长的 pH,对 pH 反映敏感^[36],如在东湖,由于 pH 值的上升,导致一些酸水性轮虫种类几近消失^[37];在滴水湖,浮游动物密度和生物量也随着 pH 的升高而相应地减少,RDA 分析也表明第一排序轴与 pH 的负相关性最大^[38]。武山湖鱼类以鳙、鲢为主,它们大量存在时能显著降低枝角类和桡足类的丰度^[39~41],并促使浮游动物群落主要是以体型较小的个体为主^[35,42,43]。参考当年冬捕鳙的捕捞量约 908.9t,鲢的捕捞量约 339.5t,冬捕鲢、鳙鱼捕获量约 820.9kg/hm²^[13],而检出的浮游动物又主要是个体小的浮游动物,暗示浮游动物面临较大的捕食压力。研究期间冬捕(12 月)后,桡足类生物量在 12~2 月间明显有增加趋势,除了受温度的影响,捕食压力降低可能是主要原因之一,而后期在投放鱼苗(鳙鱼苗约 0.5~1.0 斤/尾,鲢鱼苗约 0.2~0.3 斤/尾)后桡足类生物量又急剧降低。Li 等^[45]对长江流域浅水湖泊的研究表明,富营养化和鱼类捕食的综合作用导致轮虫对浮游动物的生物量贡献增加,蓝藻主要导致小型枝角类生物量对总枝角类的贡献增加,浮游生物食性鱼类导致了剑水蚤对桡足类的贡献越来越大。

多项研究表明鳙对浮游动物的滤食率高于鲢,在非经典生物操纵中提高鲢占比而降低鳙占比更有利于藻类防控^[46~48]。目前,武山湖浮游植物丰度和生物量在夏季很高^[13],而浮游甲壳动物相比滴水湖、西凉湖、巢湖等其他长江中下游富营养湖泊^[38,49,50]丰度低很多,面临的捕食压力更大。原因之一可能是滤食性鱼类是以鳙为主,在后期管理中需要适当调整鲢、鳙放养比例,降低鳙密度,既能增加滤食藻类能力,又能降低对浮游动物捕食压力,增加滤食性浮游动物的比例。

4 结论

武山湖水质营养程度处于中度——重度富营养水平。武山湖后生浮游动物种类较多且丰度大,但优势种主要是轮虫,采集到的桡足类和枝角类均为小型种类,暗示武山湖营养条件不适合大型种类的浮游动物生长以及大型种类浮游动物被捕食压力大。

参考文献:

- [1]MCQUEEN D J, JOHANNES M R S, POST J R, et al. Bottom-up and top-down impacts on freshwater pelagic community structure[J]. Ecological Monographs, 1989, 59(3):289-309.
- [2]JEPPESEN E, LAURIDSEN T L, MITCHELL S F, et al. Trophic structure in the pelagic of 25 shallow New Zealand lakes: Changes along nutrient and fish gradients[J]. Journal of Plankton Research, 2000, 22(5):951-968.
- [3]HABERMAN J, HALDANA M. Indices of zooplankton community as valuable tools in assessing the trophic state and water quality of eutrophic lakes: Long term study of Lake Vortsjarv[J]. Journal of Limnology, 2014, 73(2):263-273.
- [4]AZEVEDO D J S, BARBOSA J E L, GOMES W I A, et al. Diversity measures in macroinvertebrate and zooplankton communities related to the trophic status of subtropical reservoirs: Contradictory or complementary responses?[J]. Ecological Indicators, 2015, 50:135-149.
- [5]黄尤优, 曾燊, 刘守江, 等. 大渡河老鹰岩河段的水生生物群落结构及水质评价[J]. 环境科学, 2016, 37(1):132-140.
- [6]GREEN J. The temperate-tropical gradient of planktonic Protozoa and Rotifer[J]. Hydrobiologia, 1994, 272(1-3):13-26.

-
- [7]SHAPIRO J, LAMARRA V A, LYNCH M. Biomanipulation: An ecosystem approach to lake restoration[J]. In: Water Quality Management Through Biological Control (Brezonik PL and Fox JL, eds), University of Florida, 1975, pp 85-96.
- [8]袁浩. 大水面投肥和网箱肥水养花白鲢[J]. 科学养鱼, 2012, 000(10): 85-85.
- [9]刘建康, 谢平. 揭开武汉东湖蓝藻水华消失之谜[J]. 长江流域资源与环境, 1999, 8(3): 312-319.
- [10]刘其根, 张真. 富营养化湖泊中的鲢、鳙控藻问题: 争议与共识[J]. 湖泊科学, 2016, 28(3): 463-475.
- [11]简永兴, 王建波, 何国庆, 等. 湖北省海口湖、太白湖与武山湖水生植物多样性的比较研究[J]. 生态学报, 2000, 21(11): 1815-1824.
- [12]彭映辉, 倪乐意, 简永兴, 等. 两湖平原六个湖泊水生植物多样性的比较研究[J]. 云南植物研究, 2004, 26(2): 191-198.
- [13]张佳敏, 高健, 杨诚, 等. 以鲢、鳙养殖为主的武山湖浮游植物群落结构特征[J]. 湖泊科学, 2020, 32(6): 1771-1783.
- [14]国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法: 第4版[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2005.
- [15]蒋燮治, 堵南山. 中国动物志: 淡水枝角类[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [16]沈嘉瑞, 戴爱云, 张崇洲. 中国动物志: 淡水桡足类[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [17]王家楫. 中国淡水轮虫志[M]. 北京: 科学出版社, 1961.
- [18]黄祥飞. 湖泊生态调查观测与分析[M]. 北京: 湖泊生态调查观测与分析, 2000.
- [19]王明翠, 刘雪芹. 湖泊富营养化评价方法及分级标准[J]. 中国环境监测, 2002, 18(5): 47-49.
- [20]中华人民共和国水利部. 中国水资源公报[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [21]MCNAUGHTON S J. Relationships among functional properties of californian grassland[J]. Nature, 1967, 216(5111): 168-169.
- [22]LEPŠ J, ŠMILAUER P ed. Multivariate analysis of ecological data using CANOCO[M]. London: Cambridge University Press, 2003.
- [23]王松波. 长江中下游浅水湖泊的浮游动物群落结构研究[D]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2008.
- [24]朱迟. 经典生物操纵在我国典型富营养化浅水湖泊条件下的应用基础研究[D]. 华中师范大学, 2011.
- [25]LI Y, CHEN F. Are zooplankton useful indicators of water quality in subtropical lakes with high human impacts? [J]. Ecological Indicators, 2020, 113: 106167.

-
- [26]MOODY E K, WILKINSON G M. Functional shifts in lake zooplankton communities with hypereutrophication[J]. *Freshwater biology*, 2019, 64(3):608–616.
- [27]NOGUEIRA M G. Zooplankton composition, dominance and abundance as indicators of environmental compartmentalization in Jurumirim Reservoir (Paranapanema River), São Paulo, Brazil[J]. *Hydrobiologia*, 2001, 455(1–3):1–18.
- [28]GHADOUANI A, PINEL-ALLOUL B, PREPAS E E. Effects of experimentally induced cyanobacterial blooms on crustacean zooplankton communities[J]. *Freshwater Biology*, 2003, 48(2):363–381.
- [29]MCQUEEN D J, POST J R, MILLS E L. Trophic relationships in freshwater pelagic ecosystems[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1986, 43(8):1571–1581.
- [30]吴卫菊, 王玲玲, 张斌, 等. 洪湖水生生物多样性及水质评价研究[J]. *环境科学与管理*, 2015, 40(10):184–187.
- [31]苗滕, 高健, 陈炳辉, 等. 惠州西湖生态修复对浮游甲壳动物群落结构的影响[J]. *生态科学*, 2013, 32(3):324–330.
- [32]卢慧斌, 陈光杰, 陈小林, 等. 上行与下行效应对浮游动物的长期影响评价——以滇池与抚仙湖沉积物象鼻溞(*Bosmina*)为例[J]. *湖泊科学*, 2015, 27(1):67–75.
- [33]HERRERA-MARTINEZ Y, PAGGI J C, GARCIA C B. Cascading effect of exotic fish fry on plankton community in a tropical Andean high mountain lake: a mesocosm experiment[J]. *Journal of limnology*, 2017, 76(2):397–408.
- [34]GAO J, ZHONG P, NING J, et al. Herbivory of omnivorous fish shapes the food web structure of a Chinese tropical eutrophic lake: Evidence from stable isotope and fish gut content analyses[J]. *Water*, 2017, 9(1):69.
- [35]VAKKILAINEN K, KAIRESAALO T, HIETALA J, et al. Response of zooplankton to nutrient enrichment and fish in shallow lakes: A pan-European mesocosm experiment[J]. *Freshwater Biology*, 2004, 49(12):1619–1632.
- [36]刘健康. 东湖生态学研究(一)[M]. 北京: 科学出版社, 1990. LIU J K. Ecological study of East Lake (1)[M]. Beijing: Science Press. 1990.
- [37]HUANG X F, HU C Y, WU D T. Rotifers in Donghu Lake [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1985, 9(2):129–143.
- [38]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[J]. *生态学报*, 2014, 34(23):6918–6929.
- [39]杨宇峰, 黄祥飞. 鲢鳙对浮游动物群落结构的影响[J]. *湖泊科学*, 1992, 4(3):78–86.
- [40]RADKE R J, KAHL U. Effects of a filter-feeding fish [silver carp, *Hypophthalmichthys molitrix* (Val.)] on phyto- and zooplankton in a mesotrophic reservoir: results from an enclosure experiment[J]. *Freshwater Biology*, 2002, 47(12):2337–2344.
- [41]WANG Y, GU X, ZENG Q, et al. Contrasting response of a plankton community to two filter-feeding fish and their feces: An in situ enclosure experiment[J]. *Aquaculture*, 2016, 465:330–340.

-
- [42] IGLESIAS C, MAZZEO N, MEERHOFF M, et al. High predation is of key importance for dominance of small-bodied zooplankton in warm shallow lakes: Evidence from lakes, fish enclosures and surface sediments[J]. *Hydrobiologia*, 2011, 667(1):133-147.
- [43] JERNBERG S, LEHTINIEMI M, UUSITALO L. Evaluating zooplankton indicators using signal detection theory[J]. *Ecological Indicators*, 2017, 77:14-22.
- [44] ERSOY Z, BRUCET S, BARTRONS M, et al. Short-term fish predation destroys resilience of zooplankton communities and prevents recovery of phytoplankton control by zooplankton grazing[J]. *PLOS ONE*, 2019, 14(2):e0212351.
- [45] LI Y, XIE P, ZHANG J, et al. Effects of filter-feeding planktivorous fish and cyanobacteria on structuring the zooplankton community in the eastern plain lakes of China[J]. *Ecological Engineering*, 2017, 99:238-245.
- [46] 杨姣姣, 过龙根, 尹成杰, 等. 富营养化初期湖泊放养鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)、鳙(*Aristichthys nobilis*)控藻生态效果的初步评估[J]. *湖泊科学*, 2019, 31(2):386-396.
- [47] 谷孝鸿, 刘桂英. 滤食性鲢鳙鱼对池塘浮游生物的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 1996, 12(1):6-10.
- [48] YI C L, GUO L G, NI L Y, et al. Silver carp exhibited an enhanced ability of biomanipulation to control cyanobacteria bloom compared to bighead carp in hypereutrophic Lake Taihu mesocosms[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 89:7-13.
- [49] 吴利, 冯伟松, 张堂林, 等. 湖北省西凉湖浮游动物群落周年动态变化及其与环境因子的关系[J]. *湖泊科学*, 2011, 23(4):619-625.
- [50] 吴利, 周明辉, 沈章军, 等. 巢湖及其支流浮游动物群落结构特征及水质评价[J]. *动物学杂志*, 2017(5):69-88.