

# 武汉市湖泊浮游动物群落特征及其影响因素

宋高飞<sup>1</sup>,朱宇轩<sup>1,2</sup>,米武娟<sup>1</sup>,Anila P. Ajayan<sup>1</sup>,毕永红<sup>1</sup>

(1.中国科学院淡水生态与生物技术国家重点实验室;水生生物研究所,武汉 430072;

2.中国科学院大学,北京 100049)

**摘要:**2020年4月新冠肺炎疫情肆虐期间对武汉市11个湖泊进行了浮游动物采集,同步测定了水体常规理化因子及消毒副产物含量.共检出浮游动物133种,其中原生动物32种,轮虫58种,枝角类28种,桡足类15种,密度范围为20.90 ind./L~23 108.50 ind./L.基于主坐标分析(PCoA),所有采样点聚为4个类群:A类群以甲壳类动物为主(55.13%),其丰度远高于其他水体,其中无节幼体优势度最高(0.30);B类群原生动物和轮虫占优势;C、D类群均以长肢多肢轮虫 *Polysartha dolichoptera* 为主,优势度分别为0.50和0.23.方差分解(VPA)显示常规理化因子与消毒副产物(DBPs)对浮游动物群落组成变化的解释度分别为21.3%和2.5%;Mantel test显示氮、磷、COD<sub>Mn</sub>、Chl *a*、卤乙酸 HAAs、亚硝胺类物质 NAs 含量与浮游动物群落组成具有显著相关性.研究表明,疫情期间营养盐含量、Chl *a*、COD<sub>Mn</sub>浓度是影响浮游动物群落组成的关键因素,但消毒副产物对浮游动物群落组成的影响不可忽视.

**关键词:**武汉;湖泊;浮游动物;群落结构;消毒副产物

**中图分类号:**Q178

**文献标志码:**A

武汉市在新冠肺炎疫情期间对居民社区、公共环境及饮用水采取或加强了消毒措施<sup>[1]</sup>.据相关资料,截至2020年2月18日,全市累计投放消毒剂1 963.58 t,其中,以含氯消毒剂为主.全市26座污水处理厂均采用次氯酸钠24 h连续消毒,累计强化消毒剂用量共计1 777.36 t,污泥消毒剂用量共计33.69 t<sup>[2-3]</sup>.大量消毒剂的使用在防控疫情传播方面发挥了重要作用,但水体是消毒剂的重要接纳场所和最终归宿,含氯消毒剂会与水中的多种有机与无机物成分反应,生成毒性强、危害生物健康的消毒副产物(disinfection by-products, DBPs)<sup>[4]</sup>.同时,由于次氯酸具有很强的氧化性,水体环境中原有的氧化还原平衡可能被打破,氮、磷、有机物等降解和归宿途径相应地被改变<sup>[5]</sup>.而氮、磷等营养盐含量及水体营养状态是影响水体浮游生物群落和湖泊生态系统结构功能的主要因子<sup>[4-7]</sup>.浮游动物在湖泊生态系统食物网中占据着重要的基础生态位.一方面是鱼类等上层营养级的食物来源,另一方面又制约着初级生产者浮游植物及其他微生物的种群组成及丰度变化.浮游动物的群落组成、种类丰富度、个体密度、优势种等群落结构特征与水体环境状况密切相关,对水体生态系统中的理化因子和生物因子的变化具有直接且敏感的反应<sup>[6,12-13]</sup>.

消毒剂的大量使用对武汉市湖泊水生生物和水生态系统是否存在影响以及具体影响效应是一个迫切需要回答的问题,为此,本研究以浮游动物为切入点,在野外原位调查的基础上运用多元统计分析大量消毒剂的使用对湖泊浮游动物群落的影响,浮游动物与环境因子的相关关系,探究常规理化因子与消毒副产物对浮游动物的影响权重,为认识消毒剂使用的生态环境效应提供理论依据.

收稿日期:2021-03-16;修回日期:2021-04-28.

基金项目:国家自然科学基金(51609239);中国博士后科学基金面上基金(2016M602394).

作者简介:宋高飞(1985-),女,河北邯郸人,中国科学院水生生物研究所实验师,博士,研究方向为水域生态学,E-mail: song@ihb.ac.cn.

通信作者:毕永红,E-mail: biyh@ihb.ac.cn.

# 1 材料与方法

## 1.1 研究区域概况

2020年4月27日至30日在武汉市共进行了11个湖泊的样品采集,分别为东湖(East Lake, DH)(DHS1 30°32′46.07″ N, 114°21′55.62″ E; DHS2 30°32′4.27″ N, 114°22′18.70″ E; DHS3 30°32′17.20″ N, 114°22′21.83″ E; DHS4 30°33′50.08″ N, 114°20′50.08″ E), 南湖(South Lake, NH)(NHS1 30°28′33.86″ N, 114°22′0.25″ E; NHS2 30°29′9.91″ N, 114°22′43.43016″ E; NHS3 30°29′36.50″ N, 114°21′47.01″ E; NHS4 30°29′33.93″ N, 114°21′6.69″ E; NHS5 30°29′16.29″ N, 114°20′44.38″ E; NHS6 30°29′51.19″ N, 114°20′19.03″ E; NHS7 30°30′6.55″ N, 114°20′54.32″ E), 北湖(North Lake, BH)(BHS1 30°35′59.25″ N, 114°30′52.92″ E; BHS2 30°36′9.62″ N, 114°30′47.61″ E; BHS3 30°36′17.16″ N, 114°30′51.77″ E; BHS4 30°36′50.09″ N, 114°30′43.87″ E; BHS5 30°37′13.51″ N, 114°30′16.63″ E), 墨水湖(Moshui Lake, MSH)(MSHS1 30°32′35.07″ N, 114°12′25.33″ E; MSHS2 30°32′57.57″ N, 114°12′45.11″ E; MSHS3 30°32′38.36″ N, 114°13′0.16″ E; MSHS4 30°32′41.23″ N, 114°13′35.46″ E; MSHS5 30°32′52.12″ N, 114°13′27.77″ E; MSHS6 30°32′16.10″ N, 114°13′56.26″ E), 西北湖(Northwest Lake, XBH)(XBHS1 30°36′2.13″ N, 114°15′46.19″ E; XBHS2 30°35′59.95″ N, 114°15′44.30″ E; XBHS3 30°35′54.85″ N, 114°15′54.85″ E), 沙湖(Sha Lake, SH)(SHS1 30°34′21.26″ N, 114°20′33.68″ E; SHS2 30°34′21.22″ N, 114°20′32.91″ E; SHS3 30°34′25.93″ N, 114°20′2.51″ E), 月湖(Yue Lake, YH)(YHS1 30°33′26.82″ N, 114°15′27.756″ E; YHS2 30°33′26.78″ N, 114°15′27.58″ E; YHS3 30°33′24.34″ N, 114.26 E), 莲花湖(Lianhua Lake, LHH)(LHHS1 30°33′11.56″ N, 114°16′21.14″ E; LHHS2 30°33′13.86″ N, 114°16′16.22″ E; LHHS3 30°33′8.30″ N, 114°16′27.40″ E), 皖子湖(Huanzi Lake, HZH)(HZHS1 30°35′55.82″ N, 114°16′38.53″ E; HZHS2 30°35′54.48″ N, 114°16′47.62″ E; HZHS3 30°35′53.81″ N, 114°16′47.39″ E), 梁子湖(Liangzi Lake, LZH)(LZHS1 30°14′44.42″ N, 114°27′1.69″ E; LZHS2 30°14′22.21″ N, 114°27′23.74″ E; LZHS3 30°14′40.2″ N, 114°27′1.66″ E), 沉湖(Chen Lake, CH)(CHS1 30°19′13.35″ N, 113°49′4.16″ E; CHS2 30°18′54.24″ N, 113°49′0.75″ E; CHS3 30°18′45.85″ N, 113°49′12.45″ E).

## 1.2 水样采集与分析

用 YSI Professional Plus 多参数仪(YSI, USA)测定水温(WT), pH, 电导(SPC), 氧化还原电位(ORP)和溶解氧(DO), 用塞氏盘测定水体透明度(SD). 采集表层水样测定总氮(TN), 总磷(TP), 铵盐( $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ), 硝酸盐( $\text{NO}_3^- - \text{N}$ ), 磷酸盐( $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ ), 化学需氧量( $\text{COD}_{\text{Mn}}$ )和叶绿素 *a* (Chl *a*), 测定方法参考文献[14]. 总碳(TC), 无机碳(IC), 总有机碳(TOC)则通过燃烧氧化-非分散红外吸收法利用 TOC 测定仪(Multi N/C 3100, Anlulikjena, Germany)进行测定.

采用气相色谱-三重四联质谱(GC/MS-TQ8050, Shimadzu, Japan)对17种卤代脂肪族DBPs进行分析, 包括6种三卤甲烷(THMs)、2种卤代酮(HKs)、9种亚硝胺类物质(NAs). 采用高效液相色谱-三重四联质谱(HPLC/MS-TQ8060, Shimadzu, Japan)对21种哈斯芳香族卤化DBPs分析, 包括9种卤乙酸(HAAs), 12种芳香卤化物(Aromatics). 具体方法详见文献[15].

## 1.3 浮游动物样品采集与分析

现场用13#浮游生物网采集浮游动物定性样品, 4%甲醛溶液固定. 采集1L水样用于原生动物和轮虫的鉴定与定量计数, 水样用鲁哥氏液进行固定保存. 用25#浮游生物网过滤20L表层湖水, 滤取物放入样品瓶中, 用甲醛溶液固定, 为甲壳类(枝角类和桡足类)定量样品. 浮游动物定性及定量样品用显微镜(Olympus CX21, Japan)鉴定并计数, 鉴定依据《水生生物学》《中国淡水轮虫志》《微型生物监测新技术》《中国动物志节肢动物门甲壳纲淡水枝角类》<sup>[16-20]</sup>.

## 1.4 数据分析与统计

### 1.4.1 多样性指数计算

采用物种丰富度, Shannon-Wiener 多样性指数( $H'$ )、物种均匀性指数( $J$ )对浮游动物群落多样性进行分析评价, 通过优势种优势度( $Y$ )确定样本优势种群. 利用 Past version 2.17<sup>[21]</sup>计算各样本物种的多样性指数<sup>[12]</sup>. 生物优势度  $Y \geq 0.02$  即为优势种<sup>[22]</sup>.

### 1.4.2 统计分析方法

在进行统计学分析前, 除 pH 外其他环境因子及物种矩阵均经过  $\lg(x+1)$  转换及标准化. 在进行环境因

子与物种的相关性分析时,所有因子都进行了共线性检测。利用主坐标分析(PCoA)对物种组成进行聚类;利用相似性分析(ANOSIM)对不同类群浮游动物群落结构进行差异显著性检验;利用方差分解(VPA)来划分外界因子对浮游动物群落结构变化的解释比例;利用 Mantel test 分析了不同类型物种组成与环境因子的相关性。所有统计分析和作图均在 R 软件包(version 4.0.4, <https://mirrors.tuna.tsinghua.edu.cn/CRAN/>)环境下完成,用到的程序包有 Vegan, reshape2, ggplot2, Rmisc, ggcor, corrplot。

## 2 结 果

### 2.1 水环境状况

各湖泊常规理化因子及 DBPs 情况见表 1, TN 含量最高点出现在北湖(5.484 mg/L),最低点出现在月湖(0.301 mg/L); TP 含量最高点出现在沉湖(0.797 mg/L),最低点出现在鲢子湖(0.030 mg/L);各湖泊常规理化因子含量差别较大, Oneway ANOVA 结果显示 11 个湖泊间理化因子间的差异极其显著( $P < 0.01$ )。

所测的 5 类 DBPs 中, THMs 含量最高点出现在北湖(4.366  $\mu\text{g/L}$ ), 沉湖未检出; HAAs 含量最高点出现在南湖(14.533  $\mu\text{g/L}$ ), 最低点出现在墨水湖(3.070  $\mu\text{g/L}$ ); HKs 含量最高点出现在莲花湖的 S1 位点(0.14  $\mu\text{g/L}$ ), 其他采样点均未检出; NAs 含量最高点出现在北湖(0.024 ng/L)为, 莲花湖和南湖未检出; Aaromatics 含量最高点出现在南湖(0.054 ng/L), 最低点出现在沙湖(0.002 ng/L); Oneway ANOVA 结果显示 THMs, HAAs, NAs 含量在 11 个湖泊间差异显著( $P < 0.01$ ), 而 HKs, Aaromatics 含量在 11 个湖泊间分布差异不显著( $P > 0.05$ )。

表 1 武汉各湖泊常规理化因子及 DBPs 状况

Tab. 1 Means(minimum-maximum) of routine physics and chemistry and DBPs index in Wuhan Lakes

种类	平均值	最大值	最小值	<i>P</i>	种类	平均值	最大值	最小值	<i>P</i>
TN/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	1.679	5.484	0.301	<b>0.000</b>	SPC/( $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ )	390.642	832.000	155.900	<b>0.000</b>
$\text{NO}_3^- - \text{N}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	0.512	2.496	0.085	<b>0.000</b>	pH	8.307	9.640	6.740	<b>0.000</b>
$\text{NH}_4^+ - \text{N}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	0.286	1.539	0.026	<b>0.002</b>	ORP/(mV)	120.791	170.600	81.500	<b>0.000</b>
TP/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	0.207	0.797	0.030	<b>0.000</b>	TC/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	35.115	59.280	11.040	<b>0.000</b>
$\text{PO}_4^{3-} - \text{P}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	0.030	0.203	—	<b>0.000</b>	IC/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	30.063	46.720	10.990	<b>0.000</b>
COD	5.114	8.000	2.062	<b>0.000</b>	TOC/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	5.124	15.470	—	<b>0.001</b>
NTU	31.456	186.700	1.100	<b>0.000</b>	THMs/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	1.155	4.366	—	<b>0.000</b>
$\text{COD}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	5.114	8.000	2.062	<b>0.000</b>	HAAs/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	7.591	14.533	3.070	<b>0.000</b>
$\text{Chl } a/(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	31.456	186.700	1.100	<b>0.000</b>	HKs/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	0.033	0.140	—	0.189
NTU	67.266	299.021	0.945	<b>0.000</b>	NAs/( $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )	0.008	0.024	—	<b>0.000</b>
WT/ $^{\circ}\text{C}$	24.449	29.000	21.800	<b>0.000</b>	Aaromatics/( $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )	0.020	0.054	0.002	0.060
$\text{DO}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	7.856	15.100	3.500	<b>0.000</b>					

注:加粗字体表示差异显著( $P < 0.05$ ),“—”表示未检出。

### 2.2 群落组成

共鉴定浮游动物 133 种,其中原生动物 32 属种,占总种数的 24.06%;轮虫 58 属种,占总种数的 43.61%;枝角类 28 属种,占总种数的 21.05%;桡足类 15 属种,占总种数的 11.28%。不同采样位点的密度为 20.90 ind./L~23 108.50 ind./L,其中梁子湖的密度最低,墨水湖最高。图 1 展示各湖泊样点浮游动物的群落组成,不同采样点 4 大类浮游动物相对丰度差异显著( $P < 0.05$ )。

基于 Bray-Curtis 距离对所有采样位点浮游动物群落组成数据进行 PCoA 分析,共聚为 4 大类群(图 2)。LHH, LZH, HZH 聚为 A 类群, DH, XBH, YH, NH, BH, SH 聚为 B 类群, CH 聚为 C 类群, MSH 聚为 D 类群。前 2 轴分别解释了 27.86% 和 14.82% 的群落组成变化。ANOSIM 结果表明,4 个类群的浮游动物组成具有显著差异( $P = 0.001$ )。

不同类群浮游动物群落特征各异(表 2, 表 3)。A 类群以甲壳纲为主(55.13%),其组成远高于其他 3 个类群湖泊,其中无节幼体优势度最高(0.30);B 类群以原生动物和轮虫占主要优势;C, D 类群均以长肢多肢轮

虫 *Polyarthra dolichopectera* 为主,优势度分别为 0.50 和 0.23.

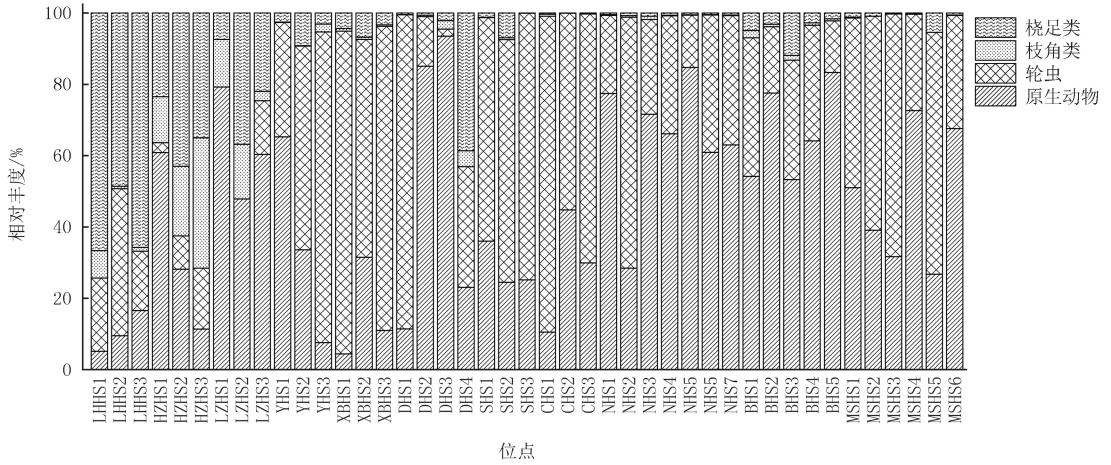


图1 各样点浮游动物群落特征及分布

Fig.1 The community characteristics and proportions of phytoplankton in each site

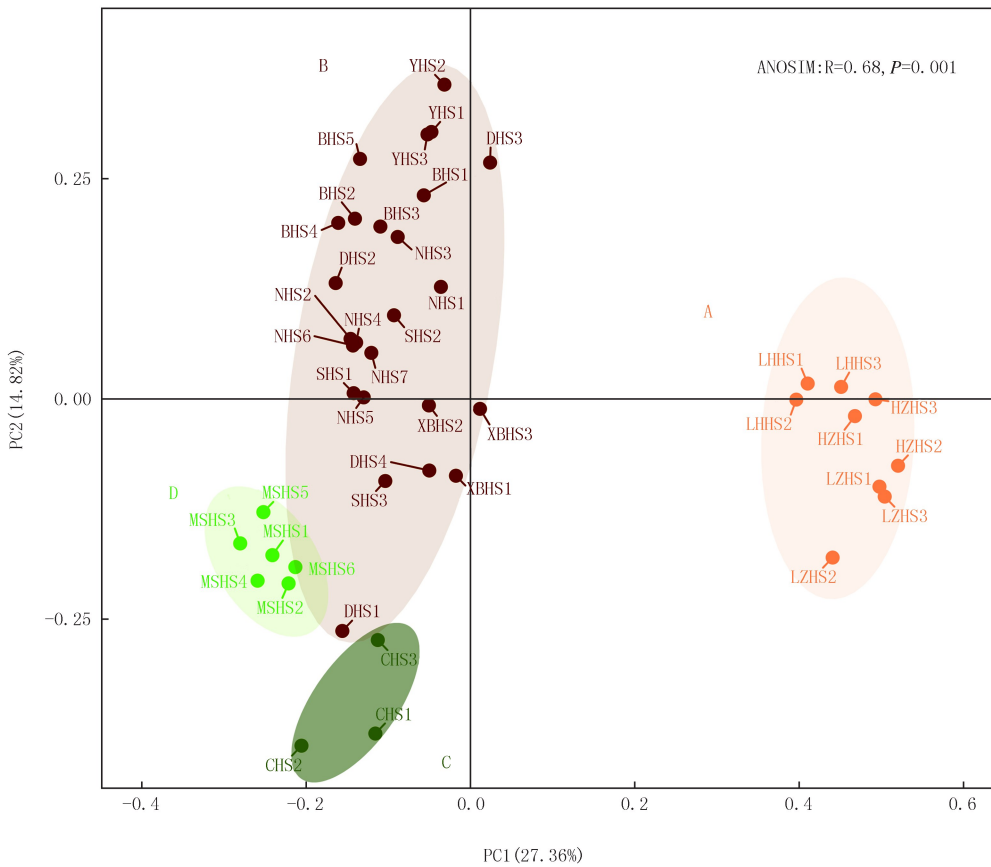


图2 武汉各湖泊浮游动物物种组成的PCoA和ANOSIM分析

Fig.2 PCoA and ANOSIM of zooplankton communities in Wuhan lakes

### 2.3 浮游动物与环境因子的关系

通过共线性检测,TP,PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P,NTU 具有共线性,TP 参与后续分析;COD<sub>Mn</sub> 与 Chl *a* 具有共线性,COD<sub>Mn</sub> 参与后续分析;SPC,TC,IC 具有共线性,TC 参与后续分析.通过 VPA 分析进一步探讨外界因子对浮游动物群落结构变化的解释比例(图 3),水体常规理化因子对其解释度最高,为 21.3%,空间因子效应解释度为 14.6%,消毒副产物的解释度为 2.5%,常规理化因子与 DBPs 联合作用的解释度为 6.4%,常规理化因子与空间因子联



合作用的解释度为 1.7%,空间因子与 DBPs 联合作用的解释度为 0.3%,三者联合作用的解释度为 0%。

表 2 不同类群优势种与优势度

Tab. 2 Dominant species and dominant index of different groups

A		B		C		D	
优势种	优势度	优势种	优势度	优势种	优势度	优势种	优势度
旋回侠盗虫	0.09	膜袋虫属	0.04	膜袋虫属	0.05	双环栉毛虫	0.04
纤毛虫	0.05	旋回侠盗虫	0.09	钟虫属	0.05	团睥睨虫	0.02
圆形盘肠溇	0.04	王氏似铃壳虫	0.10	纤毛虫	0.03	篮口虫属	0.03
剑水蚤桡足幼体	0.11	纤毛虫	0.04	锯齿龟纹轮虫	0.03	梨形四膜虫	0.04
无节幼体	0.30	东方角突臂尾轮虫	0.08	裂痕龟纹轮虫	0.03	瞬目虫属	0.06
		无棘龟甲轮虫	0.04	椎尾水轮虫	0.05	膜袋虫属	0.13
		长肢多肢轮虫	0.09	长肢多肢轮虫	0.50	纤毛虫	0.03
				罗氏异尾轮虫	0.06	东方角突臂尾轮虫	0.02
						双棘萼花臂尾轮虫	0.06
						曲腿龟甲轮虫	0.02
						前节晶囊轮虫	0.02
						长肢多肢轮虫	0.23
						广布多肢轮虫	0.06
						长三肢轮虫	0.05

表 3 不同类群浮游动物群落特征

Tab. 3 Characteristics of zooplankton communities in different groups

类别	甲壳纲动物相对丰度	种类数	香浓维纳指数	均匀性指数
A	55.13%	55	1.86	0.45
B	3.23%	75	1.83	0.35
C	0.44%	33	1.92	0.32
D	1.52%	36	2.41	0.50
<b>P</b>		<b>0.001</b>	<b>0.017</b>	<b>0.002</b>

注:加粗字体表示差异显著( $P < 0.05$ )。

Mantel test 分析(图 4)显示,所有浮游动物群落组成与 TN( $R = 0.34, P = 0.001$ ),  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ( $R = 0.28, P = 0.001$ ), TP( $R = 0.38, P = 0.001$ ),  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ ( $R = 0.30, P = 0.001$ ), Chl  $\alpha$ ( $R = 0.31, P = 0.001$ ), HAAs( $R = 0.18, P = 0.001$ ), NAs( $R = 0.25, P = 0.001$ )具有较高的相关性;原生动动物群落组成与 TN( $R = 0.34, P = 0.001$ ),  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ( $R = 0.30, P = 0.001$ ), TP( $R = 0.26, P = 0.001$ ),  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ ( $R = 0.30, P = 0.001$ ), Chl  $\alpha$ ( $R = 0.33, P = 0.001$ ), HAAs( $R = 0.17, P = 0.001$ ), NAs( $R = 0.22, P = 0.001$ )具有较高的相关性;轮虫群落组成与 TN( $R = 0.27, P = 0.001$ ), TP( $R = 0.36, P = 0.001$ ),  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ ( $R = 0.26, P = 0.001$ ), Chl  $\alpha$ ( $R = 0.27, P = 0.001$ )具有较高的相关性;而甲壳类与 NAs( $R = 0.30, P = 0.001$ )具有较高的相关性。

### 3 讨 论

#### 3.1 浮游动物群落结构

基于浮游动物群落组成对武汉 11 个湖泊所有采样点的群落进行聚类分析,共划分为 4 种群落类型。A 类群湖泊甲壳纲物种含量较为丰富,B,C,D 3 个类群甲壳纲物种丰度急剧下降.这可能是由于甲壳纲动物喜生活在较清洁的水体,当水体污染加剧时,其多样性及丰度会急剧降低,因此常作为水体污染的指示生物。

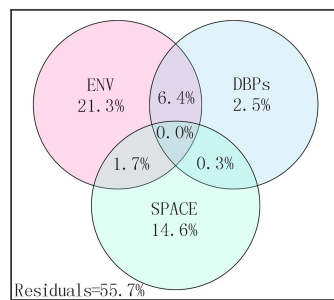


图3 浮游动物群落组成的方差分解分析  
Fig.3 Variance partitioning analysis of zooplankton community explained by environmental and space factors

相反,随着富营养化的加剧,原生动物和轮虫的种类、丰度也随水体富营养化程度的加剧而增加<sup>[16,23-24]</sup>。而本研究中 B 类群以原生动物和轮虫占主要优势,C 和 D 类群以寡营养/ $\beta$ -中污型物种长肢多肢轮虫 *Polyarthra dolichoptera* 为主要优势种,说明 4 个类群浮游动物的群落组成与水体营养水平显著相关。

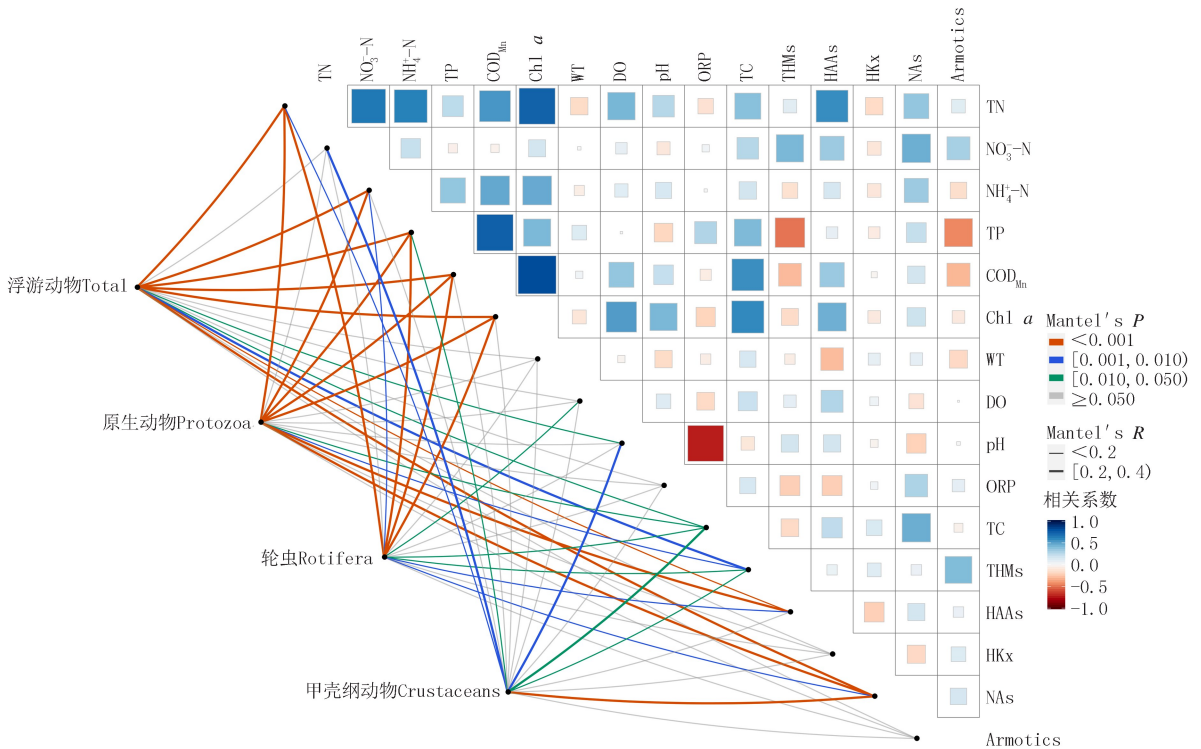


图4 浮游动物群落组成的环境驱动因素

Fig. 4 Environmental drivers of zooplankton community composition

### 3.2 浮游动物群落与环境因子的关系

浮游动物群落组成分析发现其变化与水体营养水平有关.VPA 分析显示,水体常规理化对浮游动物群落组成的解释度为 21.3%,在各湖泊中浮游动物的群落组成与氮、磷、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、Chl *a* 具有较高的相关性,这是因为水体营养状态和营养盐含量水平会通过影响浮游植物和细菌等其他浮游动物饵料生物的生长来对浮游动物造成影响<sup>[25-27]</sup>。氮、磷营养盐是浮游植物生长所必须的物质,通过影响浮游植物的群落组成及丰度进而直接影响浮游动物的群落组成<sup>[7,12]</sup>。除营养盐外,Chl *a* 和  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 也是影响武汉各湖泊浮游动物群落组成的关键因素。Chl *a* 和  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 分别代表了水体中浮游植物和有机碎屑的含量,作为浮游动物的主要食物来源,对浮游动物的细胞丰度具有较大的影响<sup>[28]</sup>。随有机质含量的增加,武汉各湖泊原生动物及轮虫的优势种类数量变多及丰度变大也证实了这点。因此,营养盐与 Chl *a*、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 一起对浮游动物群落结构产生了决定性影响。

作为疫情期间水体重要组成部分 DBPs 对水体中浮游动物的群落组成也有一定影响.VPA 分析显示 DBPs 组成及含量及其与其他因子联合对浮游动物群落组成的解释度分别为 2.5%和 6.7%。消毒剂具有很强的氧化性,当其达到一定浓度时可破坏水体的氧化还原平衡,也可改变氮、磷、有机物等的降解和归趋途径<sup>[3,29]</sup>。水体有机质组分也可为残留的消毒剂生成 DBPs 提供环境底物<sup>[30]</sup>,因此其与常规理化的联合解释度较高。DBPs 同样危害水生生物的生长、发育和繁殖,打破水生生态系统的平衡,从而降低水体的自净能力<sup>[31-32]</sup>。但当其浓度较低时,浮游生物生长反倒会出现“低促高抑”现象<sup>[33]</sup>。Mantel test 显示浮游动物组成与 HKs、Armotics 具有负相关;原生动物和甲壳类动物群落组成与 NAs 具有一定的正相关关系,甲壳类动物与 NAs 的相关性更高,说明尽管武汉湖泊的消毒副产物浓度相对较低,但不同浮游动物类群对 DBPs 种类及浓度已经呈现明显的响应。

## 4 结论

1) 浮游动物群落随着营养含量增加,甲壳纲物种丰度急剧下降,原生动物和轮虫的种类、丰度则随之增加。

2) 疫情期间营养盐含量与 Chl *a*, COD<sub>Mn</sub> 浓度是影响浮游动物群落组成的关键因素,但消毒副产物对浮游动物的群落组成的影响不可忽视。

### 参 考 文 献

- [1] 张玉勤,高丽君,樊金星,等.社区居民防控新型冠状病毒肺炎疫情的消毒措施调查[J].中国消毒学杂志,2020,37(6):451-453.  
ZHANG Y Q,GAO L J,FAN J X,et al.Investigation on disinfection measures of some community residents to prevent and control the epidemic of COVID-19[J].Chinese Journal of Disinfection,2020,37(6):451-453.
- [2] 孙亚全,黄兴,李国洪.疫情期间消毒剂对污水处理厂及水环境的影响分析与建议[J].水处理技术,2020,46(9):7-10.  
SUN Y Q,HUANG X,LI G H.Influence analysis and suggestion of disinfectants on the wastewater treatment plant and water environment during epidemic period[J].Technology of Water Treatment,2020,46(9):7-10.
- [3] 湖北日报.实施城市下水道消毒武汉投放消毒剂 1963.58 吨[EB/OL].[2020-02-19].[https://weibo.com/hubeiribao?profile\\_ftype=1&is\\_all=1&is\\_search=1&key\\_word=%E6%AC%A1%E6%B0%AF%E9%85%B8%E9%92%A0#\\_0](https://weibo.com/hubeiribao?profile_ftype=1&is_all=1&is_search=1&key_word=%E6%AC%A1%E6%B0%AF%E9%85%B8%E9%92%A0#_0).
- [4] ZHANG X X,CHEN Z L,SHEN J M,et al.Formation and interdependence of disinfection byproducts during chlorination of natural organic matter in a conventional drinking water treatment plant[J].Chemosphere,2020,242:125227.
- [5] HULYAL S B,KALIWAL B B.Dynamics of phytoplankton in relation to physico-chemical factors of Almatti reservoir of Bijapur District,Karnataka State[J].Environmental Monitoring and Assessment,2009,153(1/2/3/4):45-59.
- [6] 朱新鹏.梁子湖浮游动物群落结构及其与环境因子的关系研究[D].武汉:华中农业大学,2014.  
ZHU X P.Studies on zooplankton community structure and their relationships with environmental conditions in liangzi lake[D].Wuhan: Huazhong Agricultural University,2014.
- [7] 杨晓明,韩雪梅,梁子安,等.人类活动干扰下大型底栖动物功能多样性评价[J].河南师范大学学报(自然科学版),2020,48(4):96-102.  
YANG X M,HAN X M,LIANG Z A,et al.Assessment of macroinvertebrate functional diversity under human disturbance in Nanyang section of Baihe River[J].Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition),2020,48(4):96-102.
- [8] 赵坤,陈皓,庞婉婷,等.不同类型景观水体浮游动物群落差异及其影响因素[J].生态学报,2020,40(6):2149-2157.  
ZHAO K,CHEN A,PANG W T,et al.Characteristics of zooplankton community in different types of landscape waters and their influencing factors[J].Acta Ecologica Sinica,2020,40(6):2149-2157.
- [9] CALBET A,LANDRY M R.Phytoplankton growth,microzooplankton grazing,and carbon cycling in marine systems[J].Limnology and Oceanography,2004,49(1):51-57.
- [10] SUZUKI K,TSUDA A,KIYOSAWA H,et al.Grazing impact of microzooplankton on a diatom bloom in a mesocosm as estimated by pigment-specific dilution technique[J].Journal of Experimental Marine Biology and Ecology,2002,271(1):99-120.
- [11] BOUCHER J,IBANEZ F,PRIEUR L.Daily and seasonal variations in the spatial distribution of zooplankton populations in relation to the physical structure in the Ligurian Sea Front[J].Journal of Marine Research,1987,45(1):133-173.
- [12] 董雅欠,赵文,季世琛,等.北京潮白河水系浮游动物群落结构特征及水质评价[J].大连海洋大学学报,2020,35(3):424-431.  
DONG Y Q,ZHAO W,JI S C,et al.Community structure of zooplankton and water quality evaluation in Chaobai River system in Beijing [J].Journal of Dalian Ocean University,2020,35(3):424-431.
- [13] GULATI R D.Zooplankton and its grazing as indicators of trophic status in Dutch lakes[J].Environmental Monitoring and Assessment,1983,3(3/4):343-354.
- [14] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法[M].4版.北京:中国环境科学出版社,2002.
- [15] LI Z G,SONG G F,BI Y H,et al.Occurrence and distribution of disinfection byproducts in domestic wastewater effluent,tap water,and surface water during the SARS-CoV-2 pandemic in China[J].Environmental Science & Technology,2021,55(7):4103-4114.
- [16] 赵文.水生生物学[M].北京:中国农业出版社,2005.
- [17] 沈蕴芬.微生物监测新技术[M].北京:中国建筑工业出版社,1990.
- [18] 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.
- [19] 蒋燮治.中国动物志(节肢动物门甲壳纲淡水枝角类)[M].北京:科学出版社,1979.
- [20] 王家楫.中国淡水轮虫志[M].北京:科学出版社,1961.
- [21] HAMMER-MUNTZ O,HARPER D,RYAN P.PAST:paleontological statistics software package for education and data analysis[J].Palaeontologia Electronica,2001,1(4):9.
- [22] LAMPITT R S,WISHNER K F,TURLEY C M,et al.Marine snow studies in the Northeast Atlantic Ocean:distribution,composition and role as a food source for migrating plankton[J].Marine Biology,1993,116(4):689-702.
- [23] AZEVÉDO 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.
- [24] SLÁDEČEK V.Rotifers as indicators of water quality[J].Hydrobiologia,1983,100(1):169-201.

- [25] GULATI R D. Zooplankton and its grazing as indicators of trophic status in Dutch lakes[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 1983, 3(3/4): 343-54.
- [26] WANG S B, XIE P, WU S K, et al. Crustacean zooplankton distribution patterns and their biomass as related to trophic indicators of 29 shallow subtropical lakes[J]. *Limnologica*, 2007, 37(3): 242-249.
- [27] PINTO-COELHO R, PINEL-ALLOUL B, MÉTHOT G, et al. Crustacean zooplankton in lakes and reservoirs of temperate and tropical regions: variation with trophic status[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2005, 62(2): 348-361.
- [28] AUER B, ARNDT H. Taxonomic composition and biomass of heterotrophic flagellates in relation to lake trophy and season[J]. *Freshwater Biology*, 2001, 46(7): 959-972.
- [29] 王毅, 李师, 王璐. 含氯消毒剂的应用及其对水环境的影响[J]. *三峡生态环境监测*, 2020, 5(2): 20-29.  
WANG Y, LI S, WANG L. Application of chlorine-containing disinfectants and their influence on water environment[J]. *Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges*, 2020, 5(2): 20-29.
- [30] 李晓宇. 高有机物原水消毒副产物三氯乙醛的生成特性与控制技术[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.  
LI X Y. Formation characteristics and control techniques of chloral hydrate in high organic containing source water[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [31] 尹炜, 王超, 张洪, 等. 新冠肺炎疫情期消毒剂的使用对水环境的影响: 以武汉市为例[J]. *人民长江*, 2020, 51(5): 29-33.  
YIN W, WANG C, ZHANG H, et al. Effects of disinfectants on aquatic environment in Wuhan City during COVID-19 pandemic[J]. *Yangtze River*, 2020, 51(5): 29-33.
- [32] CHAVES R S, GUERREIRO C S, CARDOSO V V, et al. Toxicological assessment of seven unregulated drinking water Disinfection By-products (DBPs) using the zebrafish embryo bioassay[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 742: 140522.
- [33] MORALES-FERNÁNDEZ L, FERNÁNDEZ-CREHUET M, ESPIGARES M, et al. Study of the hormetic effect of disinfectants chlorhexidine, povidone iodine and benzalkonium chloride[J]. *European journal of clinical microbiology & infectious diseases*, 2014, 33(1): 103-109.

## Characteristics of zooplankton community and their influencing factors in lakes of Wuhan

Song Gaofei<sup>1</sup>, Zhu Yuxuan<sup>1,2</sup>, Mi Wujian<sup>1</sup>, Anila P. Ajayan<sup>1</sup>, Bi Yonghong<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Fresh Water Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Zooplankton was sampled from 11 lakes and *in situ* routine physicochemical factors and disinfectants by products (DBPs) were measured in April 2020. A total of 133 zooplankton species were identified, of which 32 species were recorded as protozoa, 58 species as rotifera, 28 species as cladocera, and 15 of them as copepoda. The zooplankton abundance ranged from 20.90 ind./L to 23 108.50 ind./L. The spatial distribution characteristic of zooplankton was analyzed by using the principal co-ordinates analysis (PCoA) and the relationship between the zooplankton composition and abundance and the various environmental factors was studied by using Variance partitioning analysis (VPA) and Mantel test. The results showed that the zooplankton communities in all sampling sites were clustered into four groups. The relative abundance of crustaceans in Group A (55.13%) was much higher than others. The dominant taxa in waters of Group A was Nauplius. The dominant taxa in waters of Group B were protozoa and rotifera. The dominant taxa in waters of Group C and D was *Polyarthra dolichoptera*. The VPA indicated that the routine physics and chemistry index and DBPs content could explained 21.3% and 2.5% of variations of zooplankton community structure respectively. The Mantel test analysis indicated that the content of nitrogen, phosphorus, Chl *a*, COD<sub>Mn</sub>, HAAs, NAs was the key factors explaining best of the four types of zooplankton community structure. Our study revealed that the content of nitrogen, phosphorus, Chl *a*, COD<sub>Mn</sub> was the determining factors on zooplankton community composition, but DBPs also had negligible effects on zooplankton community composition in lakes of Wuhan during the COVID-19 Pandemic.

**Keywords:** Wuhan; lake; zooplankton; community structure; DBPs