

# 潮白河流域水库浮游动物群落季节变化特征及其驱动因素

张群 许旭明 陈倩<sup>†</sup>

国家环境保护河流全物质通量重点实验室, 北京大学环境科学与工程学院, 北京 100871;

<sup>†</sup> 通信作者, E-mail: qianchen@pku.edu.cn

**摘要** 为了解不同季节潮白河流域水库中浮游动物群落的结构特征及其影响因素, 分别于2020年9月(秋)和12月(冬), 2021年3月(春)和6月(夏)对12个水库监测断面的浮游动物群落开展调研。4个季度共采集并鉴定浮游动物67属90种, 其中夏季种类最丰富, 春季最少。水库浮游动物密度和生物量在夏季达到峰值, 均值分别为231.5 ind./L和0.199 mg/L; 春季浮游动物的平均密度(60.8 ind./L)和生物量(0.075 mg/L)均最低。不同季节浮游动物群落组成存在显著差异。夏秋两季浮游动物种类组成与密度组成均以轮虫为主, 冬春两季则以原生动物为主。侠盗虫在水库四季均为优势类群。相关性分析结果表明, 浮游动物 Shannon-Wiener 多样性指数与亚硝酸盐氮和总有机碳均显著正相关, 浮游动物丰富度则与硝酸盐氮、总氮和总磷显著正相关。典范对应分析结果表明, 溶解氧、水温、亚硝酸盐氮、总有机碳和电导率是影响浮游动物群落季节分布的主要环境因子。研究结果较全面地揭示了不同季节潮白河流域水库的浮游动物群落变化规律, 可为流域内水生生态健康评估提供基础资料。

**关键词** 浮游动物; 环境因子; 季节; 多样性; 潮白河

## Seasonal Variation and Drivers of Zooplankton Community in Reservoirs of Chaobai River Basin

ZHANG Qun, XU Xuming, CHEN Qian<sup>†</sup>

State Environmental Protection Key Laboratory of All Materials Fluxes in River Ecosystems, College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871; <sup>†</sup> Corresponding author, E-mail: qianchen@pku.edu.cn

**Abstract** To reveal the seasonal variations of zooplankton community and their drivers in reservoirs of the Chaobai River basin, 12 reservoir monitoring stations were deployed in September (autumn) and December (winter) of 2020, and March (spring) and June (summer) of 2021, respectively. Totally 90 zooplankton species belonging to 67 genera were identified in the four seasons, with the highest richness in summer and the lowest in spring. The mean abundance (231.5 ind./L) and biomass (0.199 mg/L) of zooplankton peaked in summer, while they were merely 60.8 ind./L and 0.075 mg/L in spring, respectively. Significant seasonal differences were observed in the structure of zooplankton community. Rotifers contributed the largest proportion of richness and abundance in autumn and summer, but the zooplankton in winter and spring were mainly dominated by protozoa. *Strobilidium* sp. was the most abundant species occurred in the four seasons of the reservoirs. Correlation analysis showed that the Shannon-Wiener diversity index of zooplankton was positively related with nitrite nitrogen and total organic carbon, while the richness was strongly associated with nitrate nitrogen, total nitrogen and total phosphorus. Canonical correspondence analysis exhibited that dissolved oxygen, water temperature, nitrite nitrogen, total organic carbon and conductivity were crucial in driving the seasonal distribution of zooplankton

community. This study further provided supplementary data for the assessment of ecosystem health in reservoirs of the Chaobai River basin.

**Key words** zooplankton; environmental factors; season; biodiversity; Chaobai River

浮游动物(zooplankton)指生活在自由水域,自主游动能力较弱,主要依靠随波漂流运动的小型动物<sup>[1]</sup>,广泛分布于各类水体中,是淡水生态系统的重要组成部分。浮游动物主要摄食浮游植物、细菌和腐质,同时被其他大型浮游动物和游泳动物等次级消费者捕食,在物质循环和能量流动中具有十分关键的作用<sup>[2]</sup>。作为水环境中的指示类群,浮游动物对水体理化因子的变化较为敏感,其种类组成、密度、生物量及多样性的变化是反映水环境质量的重要指标<sup>[3-4]</sup>。

潮白河水系是北京市五大水系之一,是京津冀都市区的重要水源地、国家水土保持重点控制区以及总体规划确定的重点景区<sup>[5]</sup>。受到北方地区经济发展和城市化速度加快的影响<sup>[6]</sup>,潮白河流域人类活动增强,水生态环境面临严峻的考验<sup>[7]</sup>。潮白河水系拥有包括密云水库、半城子水库和怀柔水库在内的众多水库,这些水库承担着防洪、蓄水、灌溉和供水等众多功能,为人类生活和经济发展带来巨大的效益。与河流相比,水库水体流动相对缓慢,营养物质及污染物容易富集。因此,对潮白河流域的水库开展研究,可以为京津冀地区水质监测与保护提供理论依据,为京津冀地区的高质量发展提供科学支撑。

近年来,已有研究人员对潮白河流域单一水库开展基于浮游动物群落与多样性的水生态评价研究。高思佳等<sup>[8]</sup>总结了白河堡水库中浮游动物的优势种,并通过多样性等指标反映出库区水质总体上清洁。周萌等<sup>[9]</sup>研究密云水库浮游动物多样性分布及其影响因素,并通过浮游动物群落结构对水库水质进行评价,结果表明密云水库水质状况总体良好。王媛媛等<sup>[10]</sup>研究南水北调前后密云水库浮游动物的群落结构,发现在南水北调开始阶段群落结构发生剧烈的变化,之后保持稳定,并与南水北调之前基本上持平。总体而言,目前对潮白河流域水库群不同季节的浮游动物群落变化规律及其驱动因素仍然缺乏系统性的认知。

基于上述背景,本研究于2020—2021年对潮白河流域主要水库4个季度的浮游动物群落进行样品采集,分析库区浮游动物群落结构的时空变化特征,

揭示影响浮游动物群落组成的主要环境因子,以期对潮白河流域水生生物群落结构的系统性研究提供支撑,并为流域内水生态健康评估和水资源合理开发提供基础资料。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

潮白河是海河水系的重要支流之一,全长467 km,流域面积为19354 km<sup>2</sup>,属于温带季风型大陆性半湿润半干旱气候区。流域内全年降雨量集中在6—8月,占年降水量的85%以上。潮白河流域湖库众多,解放后修建大型水库2座、中型水库5座以及小型水库33座<sup>[11]</sup>。其中,密云水库是华北地区第一大水库,位于北京市中心东北约100 km的密云县,其汇水流域主要为水库上游的潮河、白河流域,最大水深为60 m,最大库容为43.75亿m<sup>3</sup>。怀柔水库为京郊主要水利工程之一,位于北京市怀柔区城西侧,水库流域由怀九河及怀沙河组成,蓄水面积为1200万m<sup>2</sup>,总库容为1亿m<sup>3</sup>。此外,还包括白河堡水库、半城子水库、沙厂水库和大水峪水库等。水库的建设大大缓解北京地区供水不足的问题,产生巨大的经济效益、社会效益和生态效益,是北京重要的“战略库”和“资源库”。

### 1.2 采样站点布设

参照北京市环境保护局的监测断面布设,我们分别于2020年9月(秋季)和12月(冬季)、2021年3月(春季)和6月(夏季)对潮白河流域水库12个监测站点开展4次浮游动物群落的样品采集。采样站点涉及密云水库(M1:库东;M2:库西;M3:内湖;M4:潮河主坝;M5:白河主坝)、怀柔水库(M6)、白河堡水库(M7)、遥桥峪水库(M8)、半城子水库(M9)、沙厂水库(M10)、大水峪水库(M11)和北台上水库(M12)。采样站点的分布如图1所示。

### 1.3 样品采集与鉴定

使用有机玻璃采水器采集混合水样20 L,通过25#浮游生物网进行过滤,然后浓缩至50 mL,加入5%的甲醛溶液固定。依据相关资料<sup>[12-15]</sup>,在实验室通过显微镜对浮游动物种类进行鉴定,并统计个数与生物量。

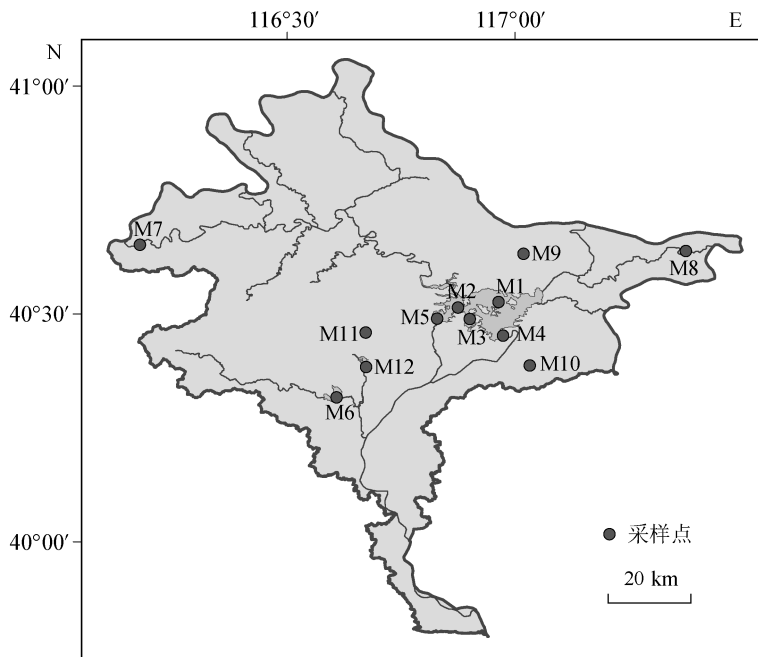


图 1 采样点分布  
Fig. 1 Distribution of the sampling sites

### 1.4 理化因子的测定

每个采样站点的经度、纬度和海拔通过手持 GPS (美国麦哲伦)记录。使用 YSI 6600 V2 多参数水质监测仪现场测定水体的 pH、温度(WT)、溶解氧(DO)以及电导率(COND)。同步采集适量水样,在实验室测定总有机碳(TOC, HJ 501—2009)、高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>, GB/T11892—1989)、亚硝酸盐(NO<sub>2</sub>-N, GB 7493—87)、硝酸盐氮(NO<sub>3</sub>-N, HJ/T 346—2007)、总氮(TN, HJ 636—2012)和总磷(TP, GB 11893—89)等理化指标。

### 1.5 数据处理与分析

浮游动物优势度( $Y$ )、Shannon-Wiener 多样性指数( $H'$ )、Simpson 多样性指数( $D$ )与 Pielou 均匀度指数( $J$ )的计算公式如下:

$$Y=f_i \times P_i, \quad (1)$$

$$H' = -\sum P_i \log_2 P_i, \quad (2)$$

$$D = 1 / \sum P_i^2, \quad (3)$$

$$J = H' / \ln S, \quad (4)$$

式中,  $f_i$  为第  $i$  个物种的出现频率,  $P_i$  为第  $i$  个物种个体数量与总个体数量的比值,  $S$  为种类数。本文将出现频率大于 65% 的物种确定为常见种,  $Y \geq 0.02$

的物种确定为优势物种。

采用非度量多维尺度分析(NMDS)方法计算样品两两之间的 Bray-Curtis 距离, 并可视化浮游动物群落的时空分布差异。通过相似性分析(ANOSIM), 进一步检验不同季节浮游动物群落组成差异的显著性。根据不同的季节, 对样品进行线性判别分析(LDA), 标记出对样品划分具有显著影响的类群。

采用典范对应分析(CCA)方法或者冗余分析(RDA)方法研究群落组成与环境因子的关系。首先, 对浮游动物密度数据进行除趋势对应分析(DCA); 然后, 根据趋势对应分析得到的排序轴长度最大值, 确定是使用典范对应分析还是冗余分析(梯度长度  $>4$ , 采用 CCA; 梯度长度  $<3$ , 采用 RDA;  $3 <$  梯度长度  $<4$ , CCA 或 RDA 均可)。该项分析工作使用 R 语言完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 水环境理化因子特征

表 1 给出不同季节潮白河流域水库水体的主要理化因子特征。参考《地表水环境质量标准(GB 3838—2002)》, 潮白河流域水库水体的高锰酸盐指数(均值范围: 2.43~3.17 mg/L)和总磷浓度(均值范围: 0.01~0.02 mg/L)满足地表水 II 类水质标准。但

表1 潮白河流域湖库水体理化性质  
Table 1 Physiochemical properties of the water from the reservoirs in the Chaobai River basin

年份和季节	pH	水温/°C	DO/(mg·L <sup>-1</sup> )	COND/(μs·cm <sup>-1</sup> )	COD <sub>Mn</sub> /(mg·L <sup>-1</sup> )
2020年秋季	8.40±0.26 <sup>a</sup>	22.43±2.38 <sup>b</sup>	7.65±0.51 <sup>b</sup>	301.00±69.97	2.85±0.53
2020年冬季	7.89±0.73 <sup>b</sup>	9.1±3.03 <sup>d</sup>	7.78±1.91 <sup>b</sup>	314.00±69.80	2.43±0.62
2021年春季	8.61±0.26 <sup>a</sup>	15.65±3.37 <sup>c</sup>	12.37±1.33 <sup>a</sup>	334.00±59.70	2.93±0.71
2021年夏季	8.74±0.31 <sup>a</sup>	30.46±2.47 <sup>a</sup>	11.31±2.18 <sup>a</sup>	347.50±59.22	3.17±1.05
年份和季节	NO <sub>2</sub> -N/(mg·L <sup>-1</sup> )	NO <sub>3</sub> -N/(mg·L <sup>-1</sup> )	TN/(mg·L <sup>-1</sup> )	TP/(mg·L <sup>-1</sup> )	TOC/(mg·L <sup>-1</sup> )
2020年秋季	0.02±0.02	1.28±1.88	1.57±1.97	0.01±0.01	3.59±0.85 <sup>b</sup>
2020年冬季	0.05±0.04	1.51±2.00	1.69±1.99	0.02±0.01	3.20±0.92 <sup>b</sup>
2021年春季	0.10±0.07	1.93±2.96	2.25±3.20	0.01±0.01	1.82±1.35 <sup>c</sup>
2021年夏季	0.10±0.14	3.36±3.22	3.88±3.19	0.02±0.01	4.45±0.80 <sup>a</sup>

说明: 上角标字母表示不同季节之间的理化因子多重比较结果具有显著性差异( $p < 0.05$ )。

是, 总氮浓度相对较高, 平均值范围为 1.28~3.36 mg/L, 主要是白河堡水库(7.87±2.35 mg/L)和大水峪水库(6.58±1.76 mg/L)水体总氮浓度偏高所致。单因素方差分析表明, pH ( $F_{3,44} = 8.69$ ,  $p = 0.000$ )、TOC ( $F_{3,44} = 14.35$ ,  $p = 0.000$ )、水温 ( $F_{3,44} = 125.43$ ,  $p = 0.000$ )和 DO ( $F_{3,44} = 25.93$ ,  $p = 0.000$ )存在显著的季节差异, 其余指标季节差异不明显。

## 2.2 浮游动物种类组成

潮白河流域水库浮游动物种类组成如图 2(a)所示。2020—2021 年共采集并鉴定出浮游动物 67 属 90 种, 其中轮虫为 24 属 34 种, 占 37.8%; 原生动物为 23 属 27 种, 占 30.0%; 枝角类为 12 属 19 种, 占 21.1%; 桡足类为 8 属 10 种, 占 11.1%。不同季节水库中浮游动物种类变化如图 2(b)所示。其中, 2021 年夏季采集到的浮游动物种类数最为丰富(44 属 47 种), 而 2021 年春季采集到的种类数最少(26 属 26 种)。2020 年冬季和 2021 年春季浮游动物中原生动物种类占比最高, 分别为 38.9%和 42.3%。2020 年秋季和 2021 年夏季浮游动物中轮虫种类占比最高, 分别为 52.9%和 42.6%。2020 年秋季水库的常见种为狭盗虫(*Strobilidium* sp.)、针簇多肢轮虫(*Polyarthra trigla*)、螺形龟甲轮虫(*Keratella cochlearis*)和裂痕龟纹轮虫(*Anuraeopsis fissa*), 2020 年冬季水库的常见种为狭盗虫(*Strobilidium* sp.)、疣毛轮属一种(*Synchaeta* sp.)、螺形龟甲轮虫(*Keratella cochlearis*)、急游虫属一种(*Strombidium* sp.)和圆形盘肠溇(*Chydorus sphaericus*), 2021 年春季水库的常见种为筒弧象鼻溇(*Bosmina coregoni*), 2021 年夏季水库的常见种为钟虫(*Vorticella* sp.)和广布多肢轮虫(*Polyarthra vulgaris*)。

## 2.3 浮游动物密度与生物量

潮白河流域水库浮游动物密度与生物量的季节变化如图 3 所示。白河堡水库(M7)浮游动物平均密度最高(415.2 ind./L), 在 2021 年夏季, 其浮游动物密度高达 1264.1 ind./L。库西(M2)浮游动物平均密度最低, 仅为 43.5 ind./L。不同季节浮游动物平均密度排序为 2021 年夏季(范围: 10.1~1264.1 ind./L; 均值: 231.5 ind./L)>2020 年冬季(范围: 12.5~510.1 ind./L; 均值: 176.9 ind./L)>2020 年秋季(范围: 15.7~366.4 ind./L; 均值: 88.9 ind./L)>2021 年春季(范围: 12.3~227.9 ind./L; 均值: 60.8 ind./L)。白河堡水库(M7)浮游动物平均生物量同样最高(0.32 mg/L), 其中在 2021 年夏季达到 1.11 mg/L。相对而言, 库东(M1)浮游动物平均生物量最低(0.05 mg/L)。不同季节浮游动物平均生物量排序为 2021 年夏季(范围: 0.008~1.108 mg/L; 均值: 0.199 mg/L)>2020 年秋季(范围: 0.023~0.439 mg/L; 均值: 0.096 mg/L)>2020 年冬季(范围: 0.006~0.267 mg/L; 均值: 0.083 mg/L)>2021 年春季(范围: 0.009~0.348 mg/L; 均值: 0.075 mg/L)。单因素方差分析结果表明, 不同季节浮游动物密度( $F_{3,44} = 1.82$ ,  $p = 0.158$ )与生物量( $F_{3,44} = 1.32$ ,  $p = 0.281$ )不存在显著差异。

## 2.4 浮游动物群落结构特征

为进一步揭示群落组成的季节差异性, 我们对浮游动物群落密度数据进行非度量多维尺度(NMDS)分析, 结果如图 4(a)所示。可以看出, 潮白河流域水库中浮游动物群落结构存在明显的季节差异。与此同时, 相似性分析(ANOSIM)结果也表现出一致的规律(Global  $R = 0.474$ ,  $p = 0.001$ )。

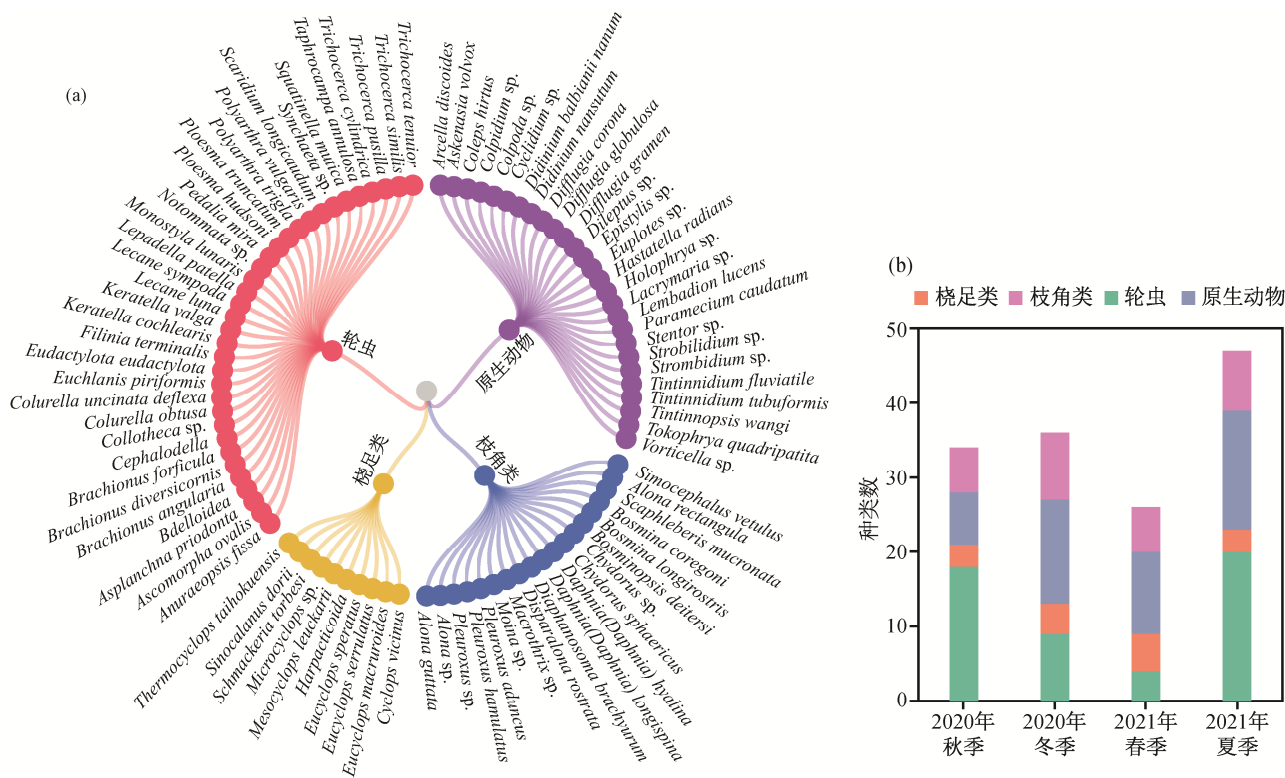


图 2 潮白河流域水库浮游动物群落组成(a)和不同季节种类变化(b)

Fig. 2 Taxonomic tree of zooplankton (a) and species variation in different seasons (b) in reservoirs of the Chaobai River basin

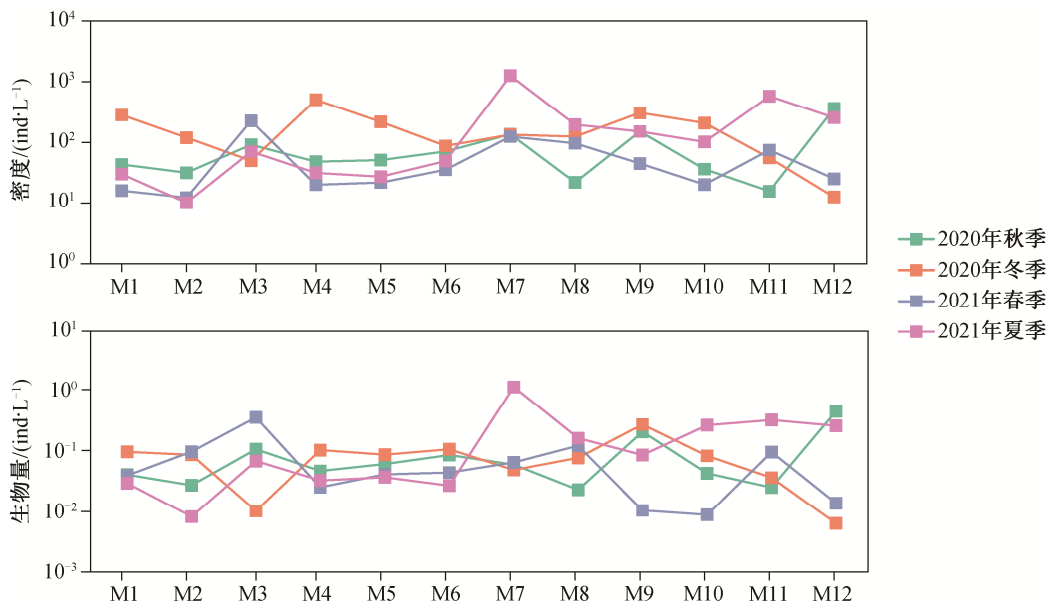
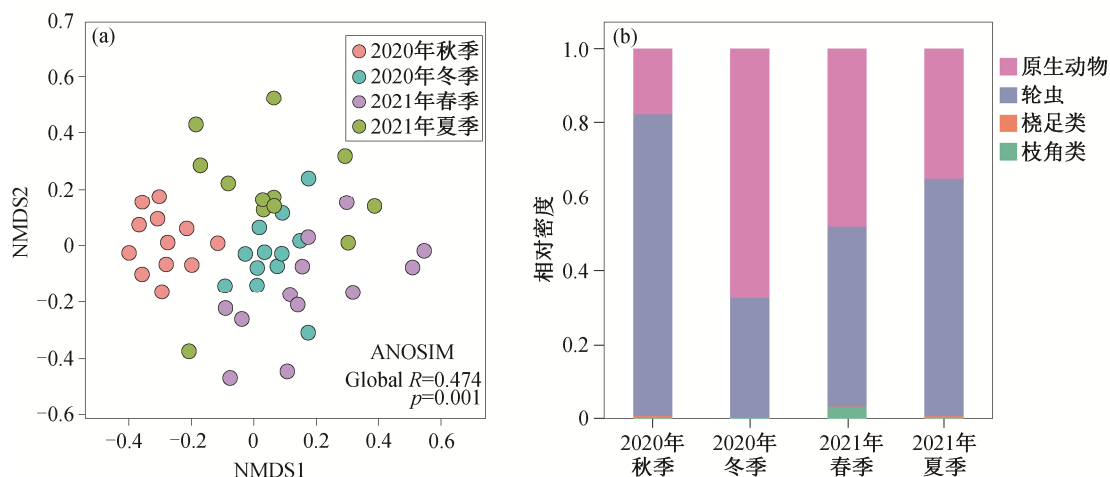


图 3 潮白河流域水库浮游动物密度与生物量

Fig. 3 Abundance and biomass of zooplankton in reservoirs of the Chaobai River basin

不同季节浮游动物中原生动物、轮虫、桡足类与枝角类的密度组成如图4(b)所示。2020年秋季轮虫密度占绝对优势(81.4%)，而2020年冬季原生动物密度的占比显著上升(67.5%)。2021年春季浮游

动物中原生动物密度最高(48.8%)，其次为轮虫(47.9%)。2021年夏季则轮虫密度占比最高(64.2%)，其次为原生动物(35.0%)。总体而言，夏季与秋季潮白河水水库浮游动物密度组成以轮虫为主，春季与冬



(a) NMDS 分析; (b) 不同季节原生动物、轮虫、桡足类和枝角类的密度组成

图 4 潮白河流域水库底栖动物群落组成季节差异

Fig. 4 Seasonal variation of zooplankton community in reservoirs of the Chaobai River basin

季则以原生动物为主。

不同季节潮白河流域水库中浮游动物优势类群如表 2 所示。从属种水平方面分析, 2020 年秋季的优势类群为针簇多肢轮虫(*Polyarthra trigla*)、侠盗虫(*Strobilidium* sp.)、螺形龟甲轮虫(*Keratella cochlearis*)、暗小异尾轮虫(*Trichocerca pusilla*)、裂痕龟纹轮虫(*Anuraeopsis fissa*)和钟虫(*Vorticella* sp.)。2020 年冬季的优势类群为侠盗虫属一种(*Strobilidium* sp.)、急游虫属一种(*Strombidium* sp.)、疣毛轮属一种(*Synchaeta* sp.)、螺形龟甲轮虫(*Keratella cochlearis*)和广布多肢轮虫(*Polyarthra vulgaris*)。2021 年春季的优势类群为广布多肢轮虫(*Polyarthra vulgaris*)、侠盗虫属一种(*Strobilidium* sp.)、螺形龟甲轮虫(*Keratella cochlearis*)、疣毛轮属一种(*Synchaeta* sp.)、喇叭虫属一种(*Stentor* sp.)和筒弧象鼻溞(*Bosmina coregoni*)。2021 年夏季的优势类群为广布多肢轮虫(*Polyarthra vulgaris*)、暗小异尾轮虫(*Trichocerca pusilla*)、卵形无柄轮虫(*Ascomorpha ovalis*)、侠盗虫属一种(*Strobilidium* sp.)、钟虫(*Vorticella* sp.)、裂痕龟纹轮虫(*Anuraeopsis fissa*)和疣毛轮属一种(*Synchaeta* sp.)。其中, 侠盗虫在 4 个季节中均为优势类群。

线性判别分析(LDA)进一步标记出不同季节的水库标志性浮游动物类群, 如图 5 所示。2020 年秋季浮游动物中标志性类群为针簇多肢轮虫(*Polyarthra trigla*)、裂足臂尾轮虫(*Brachionus diversicornis*)、截头皱甲轮虫(*Ploesma truncatum*)、广布中剑

水蚤(*Mesocyclops leuckarti*), 2020 年冬季侠盗虫属一种(*Strobilidium* sp.)、急游虫属一种(*Strombidium* sp.)的相对密度较高。2021 年春季的标志性浮游动物类群为广布多肢轮虫(*Polyarthra vulgaris*)、筒弧象鼻溞(*Bosmina coregoni*)和圆形盘肠溞(*Chydorus sphaericus*), 2021 年夏季则为卵形无柄轮虫(*Ascomorpha ovalis*)。

## 2.5 浮游动物多样性特征

不同季节潮白河流域水库中浮游动物多样性的变化趋势如图 6 所示。浮游动物 Shannon-Wiener 多样性指数的波动范围为 0.02~2.27, 平均值为 1.39。半城子水库浮游动物 Shannon-Wiener 指数平均值最高(1.82), 大水峪水库最低(1.07)。不同季节浮游动物 Shannon-Wiener 多样性指数排序为 2021 年夏季(1.61±0.45)>2020 年秋季(1.41±0.40)>2020 年冬季(1.39±0.40)>2021 年春季(1.15±0.59)。Simpson 多样性指数的波动范围为 0.01~0.88, 平均值为 0.66。与 Shannon-Wiener 指数类似, Simpson 指数的最大值和最小值分别出现在半城子水库(0.82)和大水峪水库(0.49)。Simpson 多样性指数排序为 2021 年夏季(0.73±0.11)>2020 年冬季(0.66±0.15)≈2020 年秋季(0.66±0.13)>2021 年春季(0.58±0.27)。Pielou 均匀度指数的波动范围为 0.02~0.96, 平均值为 0.68。半城子水库浮游动物 Pielou 指数平均值最高(0.81), 而大水峪水库最低(0.48)。Pielou 均匀度指数排序为 2021 年夏季(0.77±0.12)>2020 年冬季(0.67±0.17)>2020 年秋季(0.64±0.14)>2021 年春季(0.63±0.27)。

表 2 潮白河流域水库不同季节浮游动物优势类群  
Table 2 Dominant zooplankton species in different seasons in reservoirs of the Chaobai River basin

类别	优势种	优势度			
		2020 年秋季	2020 年冬季	2021 年春季	2021 年夏季
轮虫	疣毛轮属一种		0.11	0.03	0.02
	广布多肢轮虫		0.04	0.12	0.12
	卵形无柄轮虫				0.08
	针簇多肢轮虫	0.27			
	螺形龟甲轮虫	0.09	0.09	0.08	
	暗小异尾轮虫	0.08			0.08
	裂痕龟纹轮虫	0.06			0.03
原生动物	侠盗虫	0.15	0.27	0.08	0.05
	钟虫	0.02			0.04
	急游虫属一种		0.12		
	喇叭虫属一种			0.02	
枝角类				0.02	

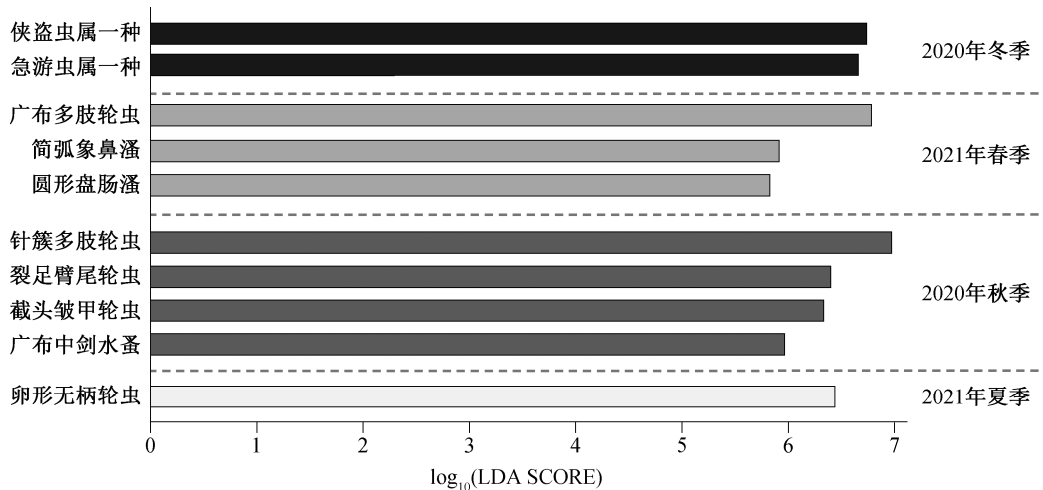


图 5 潮白河流域水库不同季节浮游动物标志性类群  
Fig. 5 Biomarkers of zooplankton in different seasons in reservoirs of the Chaobai River basin

总体而言,夏季浮游动物的多样性最高,春季则最低。但是,单因素方差分析结果表明,不同季节浮游动物 Shannon-Wiener 多样性指数( $F_{3,44}=1.98, p=0.130$ )、Simpson 多样性指数( $F_{3,44}=1.45, p=0.243$ )和 Pielou 均匀度指数( $F_{3,44}=1.44, p=0.245$ )的差异不显著。

### 2.6 浮游动物群落与环境因子的关系

浮游动物优势类群与理化因子的相关性分析结果如图 7 所示。可以看出,侠盗虫、广布多肢轮虫、钟虫、暗小异尾轮虫、裂痕龟纹轮虫的相对密度均与 TP, TN 和  $\text{NO}_3\text{-N}$  等营养因子呈显著( $p<0.05$ )正相关关系。卵形无柄轮虫( $r=0.468, p=0.001$ )、

螺形龟甲轮虫( $r=-0.368, p=0.011$ )、裂痕龟纹轮虫( $r=0.364, p=0.012$ )、暗小异尾轮虫( $r=0.322, p=0.027$ )和疣毛轮属一种( $r=-0.311, p=0.033$ )的相对密度与水温显著相关,而螺形龟甲轮虫的相对密度与 pH 呈显著负相关关系( $r=-0.349, p=0.016$ )。

浮游动物多样性指数与理化因子的相关性如表 3 所示。结果表明,浮游动物 Shannon-Wiener 多样性指数与  $\text{NO}_2\text{-N}$ ( $r=0.302, p=0.039$ )和 TOC( $r=0.307, p=0.036$ )呈显著正相关关系。浮游动物丰富度与  $\text{NO}_3\text{-N}$ ( $r=0.372, p=0.010$ ), TN( $r=0.378, p=0.009$ )和 TP( $r=0.518, p=0.001$ )呈显著正相关关系。

为进一步研究影响潮白河流域水库中浮游动物

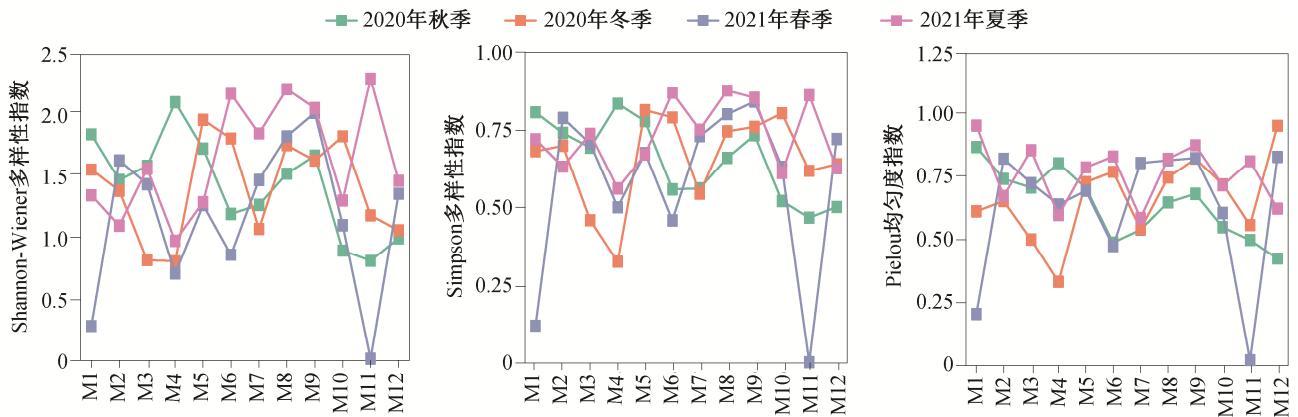


图 6 潮白河流域水库浮游动物群落的 Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 多样性指数和 Pielou 均匀度指数  
 Fig. 6 Shannon-Wiener diversity index, Simpson diversity index and Pielou evenness index of zooplankton community in reservoirs of the Chaobai River basin

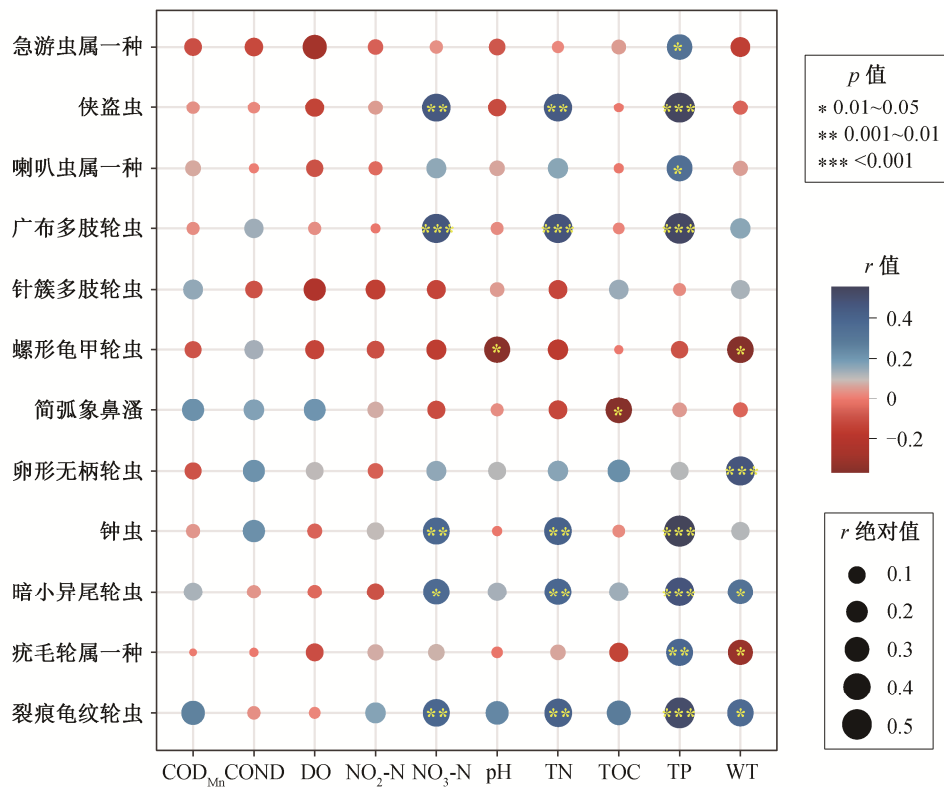


图 7 潮白河流域水库浮游动物优势种与环境因子的相关性分析  
 Fig. 7 Correlation analysis between dominant species of zooplankton and environmental factors in reservoirs of the Chaobai River basin

群落季节分布的主要理化因子，首先使用浮游动物密度数据和环境因子数据进行除趋势对应分析。由于轴长最大值大于4，属于单峰模型，故进行典范对应分析，结果如图8所示。从图8可以看出，所有排序轴共可以解释28.0%的群落变化，其中前两轴共解释10.4%的群落变化。通过前选和Monte

Carlo转置法分析( $p < 0.05$ )，筛选出影响浮游动物的主要环境因子，结果表明，溶解氧( $r = 0.36, p = 0.001$ )、水温( $r = 0.33, p = 0.001$ )、亚硝酸盐氮( $r = 0.32, p = 0.001$ )、总有机碳( $r = 0.25, p = 0.004$ )和电导率( $r = 0.17, p = 0.017$ )是影响浮游动物群落结构的主要环境因子。

表 3 浮游动物多样性指数与理化因子的相关性  
Table 3 Relationships between biodiversity indices of zooplankton and environmental factors

理化因子	丰富度	Shannon-Wiener 多样性指数	Simpson 多样性指数	Pielou 均匀度指数
pH	-0.041	0.006	-0.028	-0.012
COND	-0.126	0.026	0.115	0.217
WT	0.113	0.164	0.136	0.157
DO	-0.162	0.071	0.077	0.181
COD <sub>Mn</sub>	0.065	0.146	0.062	0.061
NO <sub>2</sub> -N	0.155	0.302*	0.237	0.271
NO <sub>3</sub> -N	0.372*	0.164	0.025	-0.103
TN	0.378*	0.180	0.036	-0.084
TP	0.518**	0.205	0.095	-0.010
TOC	0.224	0.307*	0.233	0.210

注: \*表示在 0.05 水平上显著相关; \*\*表示在 0.01 水平上显著相关。

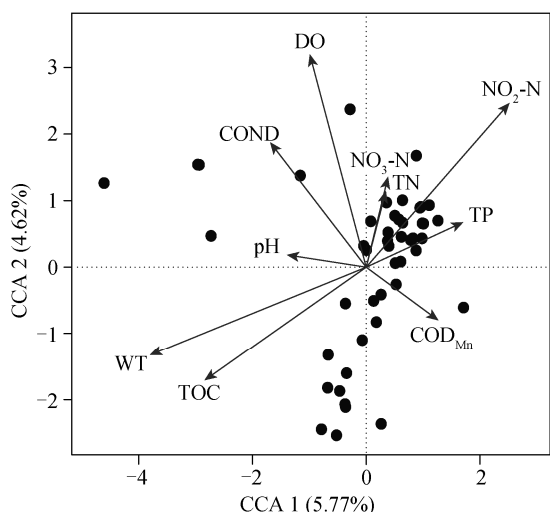


图 8 潮白河流域水库浮游动物群落与环境因子的典范对应分析

Fig. 8 Canonical correspondence analysis of zooplankton community in reservoirs of the Chaobai River basin

### 3 讨论

本研究发现,无论在种类还是在密度方面,不同季节潮白河流域水库中浮游动物均以轮虫与原生动动物为主,枝角类和桡足类相对较少。这是因为轮虫类食性丰富、繁殖速度快、发育时间短,有较强的适应能力<sup>[16]</sup>,而原生动动物摄食细菌及腐质的速率高,具有较强的摄食能力<sup>[17-18]</sup>。吴利等<sup>[19]</sup>同样发现原生动动物和轮虫是武湖浮游动物密度的主体,主要与湖泊中氮磷等营养盐长期累积导致水体富营养化有关。本研究中,浮游动物的平均密度和生物量范围分别为 60.8~231.5 ind./L 和 0.075~0.199 mg/L,现存生物量水平低于团结水库(0.79~1.70 mg/L)<sup>[20]</sup>和

伊朗中部的 Zayandehrud 湖(密度为  $4.5 \times 10^4 \sim 3.9 \times 10^5$  ind./L)<sup>[21]</sup>,与西泉水库(0.054~0.246 mg/L)相当<sup>[22]</sup>。此外,董显坤等<sup>[23]</sup>发现,2016—2018 年密云水库浮游动物的平均密度和生物量分别达到 4497 ind./L 和 7.5 mg/L,明显高于本研究的调查结果,可能是由于南水北调通水对水库原有的浮游动物群落造成扰动。王媛媛等<sup>[10]</sup>也发现,2018—2019 年密云水库浮游动物中原生动物、轮虫和枝角桡足类的平均密度分别维持在 5~25, 20~30 和 15~55 ind./L。本研究结果与之接近。

潮白河流域水库浮游动物群落存在明显的季节变化规律。一方面,夏季水库浮游动物种类数、密度和生物量均最高,而春季最低。这主要与夏季温度较高,食物来源较为丰富,从而提升了浮游动物的繁殖能力有关<sup>[24]</sup>。浮游动物群落现存量的季节变化在湖库中比较普遍。比如,夏季印度乌卡丹湖的浮游动物丰度最高,主要与良好的环境条件和浮游植物的丰富有关<sup>[25]</sup>。Picapedra 等<sup>[26]</sup>在对巴西的两个梯级水库的研究中也发现,夏季浮游动物的丰度一直高于冬季,主要与温度季节性、水文和食物供应等有关。

另一方面,夏秋两季浮游动物种类与密度组成以轮虫为主,冬春两季则以原生动动物为主。本研究进一步探讨了潮白河流域水库中浮游动物群落组成的季节差异原因。典范对应分析结果表明,溶解氧、水温、营养盐和电导率是驱动浮游动物群落季节变化的最重要因素。首先,较高的溶解氧浓度通常会减少浮游动物的代谢压力和死亡率<sup>[27]</sup>。与此同时,较高溶解氧的环境有利于鱼类的增加<sup>[28]</sup>,从

而增强对原生动物的捕食能力,造成浮游动物群落结构的季节变化。其次,浮游动物的基本生理过程与环境温度密切相关。作为变温动物,不同浮游动物种类的适宜生长温度存在差异,温度的轻微上升会导致浮游动物群落结构的变化<sup>[29]</sup>。Liu等<sup>[30]</sup>发现水温的季节波动影响鄱阳湖甲壳类浮游动物(枝角类和桡足类)的群落结构,在水温较低的冬季和春季,大型水蚤(*Daphnia*)的比例明显上升。再者,营养盐水平差异会对浮游动物群落造成影响。比如,Li等<sup>[31]</sup>发现夏季五里湖由于营养物质丰富,轮虫类密度会增加。Alzeny等<sup>[32]</sup>对Burullus湖的研究发现,由于夏秋两季的集约化农业活动,营养物质显著提升,并通过直接或间接作用增加了原生动物的密度。本研究中浮游动物的Shannon-Wiener多样性指数和丰富度与氮磷指标显著相关,表明这些营养物质为浮游动物正常生命所需。同时,营养盐也是作为初级生产者的浮游植物生长所必需的物质,浮游植物群落的变化会通过上行效应影响以其为食的浮游动物。最后,电导率也会对浮游动物群落造成影响。在一定范围内,电导率的增加有助于浮游植物的生长,进而促进浮游动物的繁殖<sup>[33]</sup>,但过高的电导率会造成某些对其生理敏感的浮游动物(如枝角类和轮虫)的丰度下降<sup>[34-35]</sup>。

## 4 结论

本研究分别于2020年9月(秋)和12月(冬)以及2021年3月(春)和6月(夏)对潮白河流域水库12个监测站点的浮游动物群落进行样品采集,共鉴定出浮游动物67属90种。夏季水库浮游动物种类数、密度和生物量均最高,而春季最低。浮游动物群落组成存在明显的季节变化规律。其中,秋季和夏季浮游动物种类与密度组成以轮虫为主,冬季和春季以原生动物为主。侠盗虫为水库四季的优势类群。

相关性分析表明,浮游动物Shannon-Wiener多样性指数与亚硝酸盐氮和总有机碳均呈显著正相关关系,浮游动物丰富度则与硝酸盐氮、总氮和总磷显著正相关。典范对应分析结果表明,溶解氧、水温、亚硝酸盐氮、总有机碳和电导率是驱动浮游动物群落季节变化的最主要环境因子。

## 参考文献

- [1] 郑重,李少菁,许振祖. 海洋浮游生物学. 北京: 海洋出版社, 1984
- [2] 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. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2002, 271(1): 99-120
- [3] Radi T, Pospelova V, de Vernal A, et al. Dinoflagellate cysts as indicators of water quality and productivity in British Columbia estuarine environments. *Marine Micropaleontology*, 2007, 62(4): 269-297
- [4] 陈光荣, 钟萍, 张修峰, 等. 惠州西湖浮游动物及其与水质的关系. *湖泊科学*, 2008, 20(3): 351-356
- [5] Li X, Yu X, Wu K, et al. Land-use zoning management to protecting the regional key ecosystem services: a case study in the city belt along the Chaobai River, China. *Science of the Total Environment*, 2021, 762: 143167
- [6] Su D, Ben W, Strobel B W, et al. Occurrence, source estimation and risk assessment of pharmaceuticals in the Chaobai River characterized by adjacent land use. *Science of the Total Environment*, 2020, 712: 134525
- [7] Zhang L, Sun Q, You Y, et al. Compositional and structural characteristics of dissolved organic matter in overlying water of the Chaobai River and its environment significance. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(42): 59673-59686
- [8] 高思佳, 陈卫. 白河堡水库浮游动物调查与水质评价. *首都师范大学学报(自然科学版)*, 2008, 29(3): 37-40
- [9] 周萌, 李裴, 王忠锁. 密云水库浮游动物多样性格局. *首都师范大学学报(自然科学版)*, 2013, 34(6): 33-42
- [10] 王媛媛, 张俊娥, 王永刚, 等. 南水北调后密云水库水生生物群落结构特征分析——以浮游生物及底栖动物为例. *环境污染与防治*, 2021, 43(5): 620-625
- [11] 姚治君, 管彦平, 高迎春. 潮白河径流分布规律及人类活动对径流的影响分析. *地理科学进展*, 2003, 22(6): 599-606
- [12] 赵文. 水生生物学. 北京: 中国农业出版社, 2016
- [13] 韩茂森, 束蕴芳. 中国淡水生物图谱. 北京: 海洋出版社, 1995
- [14] 蒋燮治, 堵南山. 中国动物志: 淡水枝角类. 北京: 科学出版社, 1979
- [15] 王家楫. 中国淡水轮虫志. 北京: 科学出版社, 1961
- [16] Sharma B K. Rotifer communities of Deepor Beel, Assam, India: richness, abundance and ecology. *Journal of Threatened Taxa*, 2010, 2(8): 1077-1086

- [17] 邱小琮, 赵红雪, 孙晓雪. 沙湖浮游动物与水环境因子关系的多元分析. *生态学杂志*, 2012, 31(4): 896–901
- [18] Arndt H. On the importance of planktonic protozoans in the eutrophication process of the Baltic Sea. *Internationale Revue der Gesamten Hydrobiologie*, 1991, 76(3): 387–396
- [19] 吴利, 冯伟松, 张堂林, 等. 春、秋季武湖浮游动物群落特征及其与环境因子的关系. *水生态学杂志*, 2011, 32(2): 31–37
- [20] Sun X, Chai F Y, Mwangona P C, et al. Seasonal variations of zooplankton functional groups and relationship with environmental factors in a eutrophic reservoir from cold region. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2019, 17(4): 7727–7740
- [21] Dorche E E, Shahraki M Z, Farhadian O, et al. Seasonal variations of plankton structure as bioindicators in Zayandehrud Dam Lake, Iran. *Limnological Review*, 2018, 18(4): 157–165
- [22] Mwangona P C, Ma C X, Yu H X. Seasonal dynamics of Zooplankton functional groups in relation to environmental variables in Xiquanyan Reservoir, Northeast China. *Annales de Limnologie — International Journal of Limnology*, 2018, 54: 33
- [23] 董显坤, 赵文, 任剑申, 等. 南水北调后密云水库浮游动物多样性及水生态环境评价. *吉林水利*, 2020, 6: 1–6
- [24] Hu B, Hu X, Nie X, et al. Seasonal and inter-annual community structure characteristics of zooplankton driven by water environment factors in a sub-lake of Lake Poyang, China. *Peer J*, 2019, 7: e7590
- [25] Manickam N, Bhavan P S, Santhanam P, et al. Impact of seasonal changes in zooplankton biodiversity in Ukkadam Lake, Coimbatore, Tamil Nadu, India, and potential future implications of climate change. *The Journal of Basic and Applied Zoology*, 2018, 79(1): 1–10
- [26] Picapedra P H S, Fernandes C, Taborda J, et al. A long-term study on zooplankton in two contrasting cascade reservoirs (Iguacu River, Brazil): effects of inter-annual, seasonal, and environmental factors. *Peer J*, 2020, 8: e8979
- [27] Doubek J P, Campbell K L, Doubek K M, et al. The effects of hypolimnetic anoxia on the diel vertical migration of freshwater crustacean zooplankton. *Ecosphere*, 2018, 9(7): e02332
- [28] Vaquer-Sunyer R, Duarte C M. Thresholds of hypoxia for marine biodiversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(40): 15452–15457
- [29] Carter J L, Schindler D E, Francis T B. Effects of climate change on zooplankton community interactions in an Alaskan lake. *Climate Change Responses*, 2017, 4(1): 1–12
- [30] Liu B, Wu J, Hu Y, et al. Seven years study of the seasonal dynamics of zooplankton communities in a large subtropical floodplain ecosystem: a test of the PEG model. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(2): 956
- [31] Li Y, Liu L, Cui S, et al. Long-term effects of nutrient changes on rotifer communities in a subtropical lake. *Limnology*, 2019, 20(2): 191–201
- [32] Alzeny A, Abdel Aziz N E, El-Ghobashy A E, et al. Distribution, composition, and abundance of protozoa in Burullus Lake, Egypt, and relationships with environmental variables. *Regional Studies in Marine Science*, 2021, 48: 102076
- [33] Hayat S, Naeem M, Ramzan M, et al. Study on zooplankton diversity during spring season in Chashma Lake, Pakistan. *Biological and Clinical Sciences Research Journal*, 2020, 2020: e009
- [34] Sarma S S S, Nandini S, Morales-Ventura J, et al. Effects of NaCl salinity on the population dynamics of freshwater zooplankton (rotifers and cladocerans). *Aquatic Ecology*, 2006, 40(3): 349–360
- [35] Andrade V S, Gutierrez M F, Gagneten A M. Effect of rainfall runoff from agricultural areas and seasonal crop practices on zooplankton community in Pampean streams, Argentina. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(27): 41713–41724