

# 新丰江水库浮游动物群落结构特征

秦云霞<sup>1</sup>, 周 雯<sup>2</sup>, 乔永民<sup>1</sup>, 陈 瑞<sup>1</sup>, 杨洪允<sup>1</sup>

(1. 暨南大学水生生物研究所, 广东 广州 510632; 2. 生态环境部华南环境科学研究所, 广东 广州 510655)

**摘要:** 分析华南大型饮用水源水库浮游动物群落结构特征及主要环境影响因子, 为水库生态环境保护提供基础资料和参考依据。于2019年8月至2020年6月在新丰江水库设置12个采样站点进行每2个月1次的浮游动物监测, 设置采样站点12个。结果显示, 调查期间共采集到浮游动物19属30种, 其中轮虫8属17种, 枝角类5属7种, 桡足类6属6种, 夏季出现的种类数最多(25种), 春季最少(14种); 各站点浮游动物密度和生物量月均值分别为11.52~161.52个/L和0.92~17.65 mg/L, 具有极显著的季节差异( $P < 0.01$ ), 表现为夏季高、冬季低的特点; 空间分布上呈现为上游和下游河道型库区高, 中心敞水区低的分布趋势; 浮游动物Shannon-Wiener多样性指数为0.87~1.19, Margalef丰富度指数为0.97~1.53, Pielou均匀度指数为0.54~0.93。浮游动物密度与环境因子的相关分析和冗余分析(RDA)结果表明, 水温、叶绿素a和pH是影响新丰江水库浮游动物群落结构的主要环境因子。

**关键词:** 浮游动物; 密度; 生物量; 环境因子; 冗余分析; 新丰江水库

**中图分类号:** Q145 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2023)04-0035-09

浮游动物是淡水生态系统中的重要生物类群, 既是浮游植物的摄食者, 又是鱼类等高营养级捕食者的开口饵料(杨宇峰和黄祥飞, 1992; Lomartire et al, 2021), 在物质转化、能量流动、信息传递等生态过程中起着承上启下的作用(Jia et al, 2016)。浮游动物作为中间营养级, 受上行效应和下行效应机制影响显著(Zhou et al, 2020), 对水体环境理化因子以及鱼类、浮游植物等生物因子的变化反应敏感, 其种类组成、密度、生物量变化及其生物多样性特征被视为反映水环境质量的重要指征(Shen et al, 2019)。因此探究浮游动物群落与水体环境因子的关系, 对于深入了解水生态系统结构特点, 科学评估其环境健康状态, 确保水质与水生态安全具有重要意义(杨苏文等, 2015)。

新丰江水库是广东省第一大水库, 库容 $1.39 \times 10^{10} \text{ m}^3$ , 是珠三角地区重要的饮用水源地和东江水量调节枢纽, 是支撑粤港澳大湾区社会经济发展的战略资源(文晓慧和钟标城, 2016)。新丰江水库主要水质指标常年保持在国家地表水Ⅰ类标准, 综合营养状态指数(TLI)为18~27, 水库整体处于贫营养状态, 具有

独特的生态系统结构(张辉等, 2022)。1995年, 白庆笙等(1995)对新丰江水库浮游动物群落特点进行了初步研究, 讨论了新丰江水库水质状况与浮游动物群落结构的关系; 2007年, 赵帅营和韩博平(2007)研究了贫营养环境状态下浮游动物的群落特征, 探讨了银鱼对浮游动物群落结构的影响。此后对新丰江水库浮游动物的相关研究鲜有报道。近年来, 随着人为干扰的加剧, 新丰江水库水质和水生态发生了较为明显的变化, 如偶发水质异常、藻类短期内快速增殖和水色变化等现象(张辉等, 2022)。因此, 从水质和水生态保护的角度对该水库进行深入的生态学研究, 可为水库生态环境保护提供基础资料和参考依据。

本研究在优化调查点位和频次的基础上, 对新丰江水库浮游动物进行了2个月1次为期1年的野外定量采样调查, 分析了新丰江水库浮游动物的群落结构特征及其时空变化; 结合水质分析数据, 并通过相关分析和冗余分析(RDA)研究了新丰江水库浮游动物群落结构与环境因子的相关关系; 探讨了贫营养水库中影响浮游动物群落结构的关键环境因子, 以期为新丰江水库生态系统长期变化研究积累资料。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

新丰江水库位于广东省河源市东源县(114°15'~114°50'E, 23°40'~23°10'N), 是全国第七大水库和广东省最大饮用水源保护地, 水域面积364 km<sup>2</sup>, 平

收稿日期: 2021-10-20 修回日期: 2023-06-07

基金项目: 国家重大科技专项(2013ZX07105-005-02); 地方科技服务项目(0658-19711L1039)。

作者简介: 秦云霞, 1996年生, 女, 硕士, 主要研究方向为淡水生态与环境修复。E-mail: 1107541533@qq.com

通信作者: 乔永民, 副教授。E-mail: qym77@163.com

均年入库水量 $0.6 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ,多年平均水深28.7 m,最大水深93 m(周梅等,2018)。新丰江水库所在区域属亚热带季风气候,年平均气温为 $20.7^\circ\text{C}$ ,气候温和。年均降水量1 793.2 mm,年最大降水量2 732 mm,最小1 050.9 mm(李可见等,2018)。

## 1.2 样点设置

根据《湖泊调查技术规程》(中国科学院南京地理与湖泊研究所,2015)、《全国淡水生物物种资源调查技术规定(试行)》(环境保护部生态司,2010)中关于水库浮游动物定量采样相关样点布设标准及新丰江水库的水文特点,在调查水库中共设置12个采样站点(图1),于2019年8月至2020年6月进行了浮游动物定量采样调查,采样频次为2个月1次。

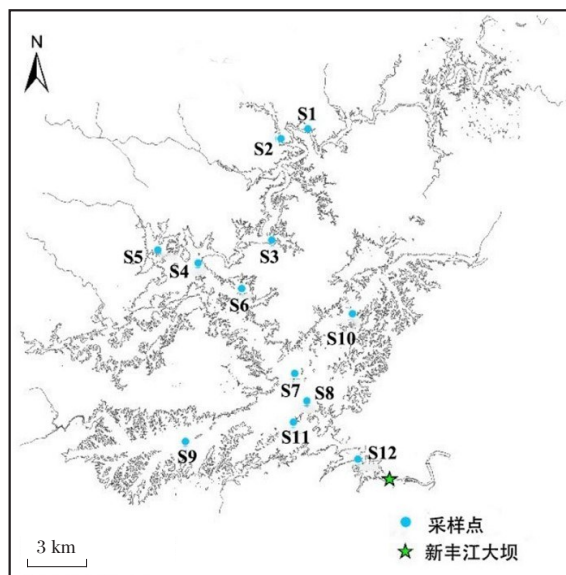


图1 新丰江水库浮游动物采样点分布

Fig.1 Location of the zooplankton sampling sites in Xinfengjiang reservoir

## 1.3 样品采集与处理

浮游动物定性样品采集使用13号浮游生物网,网口在水面下50 cm作“∞”状多次拖网采集,水样收集到50 mL聚乙烯瓶中,加入4%福尔马林溶液进行现场固定。定量样品采用采水器分别在0.5、5、10、15 m处采集水样置于水桶中混合均匀,经25号浮游生物网过滤浓缩,加入4%福尔马林溶液现场固定,静置24 h后吸取上清液浓缩定容至30 mL,在光学显微镜下进行物种鉴定与计数。浮游动物的种类鉴定参考《中国淡水轮虫志》(王家楫,1961)、《中国动物志·淡水枝角类》(蒋燮治和堵南山,1979)和《中国动物志·淡水桡足类》(中国科学院动物研究所甲壳动物研究组,1979)。浮游动物计数以及密度和生物量的计算方法参照《淡水浮游生物研究方法》(章宗涉和黄祥飞,1991)。

浮游动物采样的同时,现场测定部分水体理化指标。透明度(SD)用塞氏透明度盘测定,水温(WT)、pH、溶解氧(DO)和电导率(EC)使用YSI水质分析仪(Hash, DS5X)测定。总磷(TP)、总氮(TN)、高锰酸盐指数( $\text{COD}_{\text{Mn}}$ )、叶绿素a(Chl-a)采集水样带回实验室检测,分析方法参照《国家地表水环境质量监测网监测任务作业指导书(试行)》(环境保护部环境监测司,2017)。

## 1.4 数据分析

1.4.1 优势度 浮游动物优势物种依据其优势度值(Y)确定,当 $Y > 0.02$ 时为优势种。

$$Y = \frac{n_i}{N} \cdot f_i$$

式中: $n_i$ 为第*i*种在各采样点的总个体数; $N$ 为各采样点中浮游动物的总个体数; $f_i$ 为第*i*种在各采样点出现的频率。

1.4.2 多样性指数 Margalef丰富度指数( $D$ )、Shannon-Wiener多样性指数( $H'$ )和Pielou均匀度指数( $J$ )计算公式如下:

$$D = (S-1)/\ln N \quad (1)$$

式中: $D$ 为物种丰富度指数; $S$ 为浮游动物种类数; $N$ 为浮游动物总个体数。

$$H' = -\sum (N_i/N) \cdot \ln (N_i/N) \quad (2)$$

式中: $H'$ 为生物多样性指数; $N_i$ 为第*i*种的个体数; $N$ 为浮游动物总个体数。

$$J = H'/\ln S \quad (3)$$

式中: $H'$ 为Shannon-Wiener多样性指数; $S$ 为浮游动物种类数。

## 1.5 统计分析

采用Canoco for Windows5软件对浮游动物密度数据进行去趋势分析(DCA),结果显示,排序轴梯度长度(LGA)最大长度为2.3,因此对浮游动物密度与环境因子进行冗余分析(RDA)。其中以该物种在各样点出现的频率 $\geq 25\%$ 且相对密度 $\geq 1\%$ 的条件进行筛选(Lopes et al, 2005)。采用SPSS17.0、Excel2013、ArcGIS10.6和Origin pro 8.0软件对数据进行处理和统计绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 水质理化指标

调查期间新丰江水库的平均水温为 $(25.4 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ ,变化范围在 $20.7 \sim 30.9^\circ\text{C}$ ,具有典型的亚热带水域特点;溶解氧浓度为 $7.08 \sim 8.43 \text{ mg/L}$ ,均值为 $(7.84 \pm 0.08) \text{ mg/L}$ ;

pH 平均值为  $7.56\pm0.05$ , 变化范围为  $7.16\sim8.31$ , 水体呈弱碱性; 叶绿素 a 浓度为  $0.4\sim3.3\ \mu\text{g/L}$ , 均值为  $(1.4\pm0.5)\ \mu\text{g/L}$ 。TP 浓度为  $0.003\sim0.021\ \text{mg/L}$ , 均值为  $(0.009\pm0.001)\ \text{mg/L}$ , TP 含量在春夏季高于秋冬季; TN 浓度  $0.4\sim0.99\ \text{mg/L}$ , 均值为  $(0.54\pm0.04)\ \text{mg/L}$ ; 高锰酸盐指数的变化范围为  $0.9\sim2.4\ \text{mg/L}$ , 均值为  $(1.52\pm0.07)\ \text{mg/L}$ 。研究期间, 除总氮外, 新丰江水库其他主要水质指标浓度均值均达到《地表水环境质量标准》(GB3838-2002) I 类水质标准。

2.2 浮游动物种类组成

调查期间共鉴定出浮游动物 19 属 30 种, 以轮虫种类数最多, 为 8 属 17 种, 占总种类数的 56.7%; 枝角类次之, 为 5 属 7 种, 占总种类数的 23.3%; 桡足类为 6 属 6 种, 占 20.0%(表 1)。其中夏季浮游动物种类数最多(25 种), 春季最少(14 种)。舌状叶镖水蚤(*Phyllodiaptomus tunguidus*)、右突新镖水蚤(*Neodiaptomus schmackeri*)、广布中剑水蚤(*Mesocyclops leuckarti*)、台湾温剑水蚤(*Thermocyclops taihokuensis*)和长额象鼻蚤(*Bosmina longirostris*)在各月份均有出现。

调查期间共出现浮游动物优势种 8 种( $Y\geq 0.02$ ), 其中桡足类 4 种: 舌状叶镖水蚤、右突新镖水蚤、广布中剑水蚤和台湾温剑水蚤; 枝角类 4 种: 短尾秀体蚤(*Diaphanosoma brachyurum*)、僧帽蚤(*Daphnia cucullata*)、长额象鼻蚤和微型裸腹蚤(*Moina micrura*)。从时间分布特征来看, 仅有广布中剑水蚤密度在各调查月份均处于优势地位, 其次为长额象鼻蚤, 其密度优势在调查期间也非常明显, 仅在 2020 年 4 月的优势度低于 0.02(表 2)。

2.3 浮游动物密度和生物量的时间分布

新丰江水库浮游动物密度范围是  $0.20\sim880.00$  个/L, 平均值为  $(60.13\pm14.47)$  个/L。浮游动物密度具显著季节性变化( $P<0.01$ ), 月均密度最高值出现在 2019 年 8 月, 为  $(171.66\pm72.79)$  个/L, 此后大幅下降, 2020 年 2 月出现最低值  $(0.75\pm0.19)$  个/L。由春季至夏季, 浮游动物密度缓慢上升, 至 2020 年 6 月达到  $(81.31\pm29.65)$  个/L。从密度组成特征来看, 桡足类和枝角类占绝对优势(图 2a)。

生物量在调查期间变化范围为  $0.02\sim98.96\ \text{mg/L}$ , 均值为  $(5.00\pm1.48)\ \text{mg/L}$ 。生物量季节变化呈现为夏季高于冬季。从月度变化看, 浮游动物月均生物量在 2019 年 8 月最高, 为  $(16.99\pm7.99)\ \text{mg/L}$ , 此后, 生物量大幅下降, 至 2020 年 2 月出现最低值  $(0.09\pm0.02)\ \text{mg/L}$ , 与密度变化相似。浮游动物生物量在种类组成上均以桡足类的生物量占比最大(图 2b)。

表 1 新丰江水库浮游动物的种类及代码  
Tab.1 Species and code of the zooplankton in Xinfengjiang reservoir

| 代码            | 种类                                       |
|---------------|------------------------------------------|
| 桡足亚纲 Copepoda |                                          |
| S1            | 舌状叶镖水蚤 <i>Phyllodiaptomus tunguidus</i>  |
| S2            | 右突新镖水蚤 <i>Neodiaptomus schmackeri</i>    |
| S3            | 广布中剑水蚤 <i>Mesocyclops leuckarti</i>      |
| S4            | 台湾温剑水蚤 <i>Thermocyclops taihokuensis</i> |
| S5            | 跨立小剑水蚤 <i>Microcyclops varicans</i>      |
| S6            | 无节幼体 Nauplii                             |
|               | 枝角亚目 Cladocera                           |
| S7            | 透明薄皮蚤 <i>Leptodora kindti</i>            |
| S8            | 短尾秀体蚤 <i>Diaphanosoma brachyurum</i>     |
| S9            | 多刺秀体蚤 <i>D. sarsi</i>                    |
| S10           | 长额象鼻蚤 <i>Bosmina longirostris</i>        |
| S11           | 颈沟基合蚤 <i>Bosminopsis deitersi</i>        |
| S12           | 微型裸腹蚤 <i>Moina micrura</i>               |
| S13           | 僧帽蚤 <i>Daphnia cucullata</i>             |
| 轮虫纲 Rotifera  |                                          |
| S14           | 裂足臂尾轮虫 <i>Brachionus diversicornis</i>   |
| S15           | 角突臂尾轮虫 <i>B. angularis</i>               |
| S16           | 镰形臂尾轮虫 <i>B. falcatus</i>                |
| S17           | 剪形臂尾轮虫 <i>B. forficula</i>               |
| S18           | 矩形臂尾轮虫 <i>B. leydigi</i>                 |
| S19           | 圆筒异尾轮虫 <i>Trichocerca cylindrica</i>     |
| S20           | 纵长异尾轮虫 <i>T. elongata</i>                |
| S21           | 暗小异尾轮虫 <i>T. pusilla</i>                 |
| S22           | 刺盖异尾轮虫 <i>T. capucina</i>                |
| S23           | 长刺异尾轮虫 <i>T. longiseta</i>               |
| S24           | 热带龟甲轮虫 <i>Keratella tropica</i>          |
| S25           | 螺形龟甲轮虫 <i>K. cochlearis</i>              |
| S26           | 裂痕龟纹轮虫 <i>Amuraeopsis fissa</i>          |
| S27           | 前节晶囊轮虫 <i>Asplanchna priodonta</i>       |
| S28           | 广布多肢轮虫 <i>Polyarthra vulgaris</i>        |
| S29           | 十指平甲轮虫 <i>Platyas militaris</i>          |
| S30           | 胶鞘轮虫 <i>Collotheca</i> sp.               |

表 2 新丰江水库浮游动物优势种及优势度  
Tab.2 Dominant species and dominance of zooplankton in Xinfengjiang reservoir

| 优势种    | 优势度(Y)  |         |         |         |         |         |
|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|        | 2019.08 | 2019.10 | 2019.12 | 2020.02 | 2020.04 | 2020.06 |
| 舌状叶镖水蚤 | 0.06    |         |         |         |         |         |
| 右突新镖水蚤 |         |         |         | 0.09    | 0.03    |         |
| 广布中剑水蚤 | 0.37    | 0.24    | 0.21    | 0.17    | 0.49    | 0.22    |
| 台湾温剑水蚤 | 0.08    | 0.05    |         | 0.04    | 0.03    |         |
| 短尾秀体蚤  |         | 0.04    |         |         | 0.06    | 0.10    |
| 僧帽蚤    |         |         |         |         | 0.11    |         |
| 长额象鼻蚤  | 0.42    | 0.44    | 0.68    | 0.05    |         | 0.23    |
| 微型裸腹蚤  |         |         |         | 0.02    |         | 0.06    |

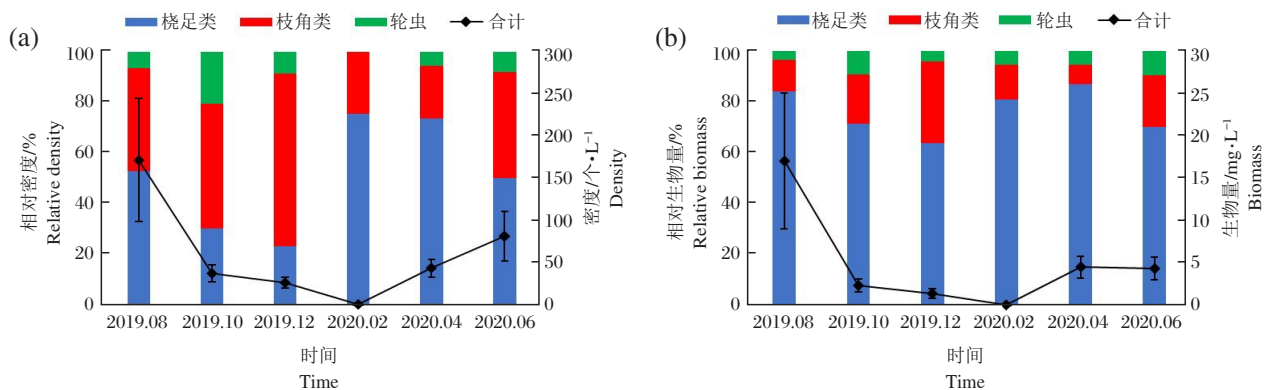


图2 新丰江水库浮游动物密度(a)和生物量(b)时间分布

Fig.2 Temporal distribution of zooplankton density (a) and biomass (b) in Xinfengjiang reservoir

2.4 浮游动物密度和生物量的空间分布

研究期间,各站点月均密度水平为 11.52~161.52 个/L,表现为水库中心敞水区低,上游和下游的河道型库区高的特点。其中,最高值出现在下游 S12 站点,为(161.52±143.76)个/L,次高值出现在上游的 S1 站点,为(124±66.50)个/L,最低值出现在水库中心敞水区的 S10 站点,为(11.52±2.75)个/L(图 3a);生物量在各站点变化范围为 0.92 ~ 17.65 mg/L,其空间分布特征与密度相似,表现为开阔的中心区域低,河道型库区上游和下游高的特点,其中最高值出现在 S12 采样点,在 S10 采样点出现最低值(图 3b)。

2.5 浮游动物多样性时空变化

浮游动物 Margalef 丰富度指数 ( $D$ ) 均值为  $1.21\pm1.32$ ,变化范围为 0.97~1.53。最高值出现在 2019 年 12 月 ( $1.53\pm0.80$ ),2019 年 10 月和 2020 年 2 月的丰富度指数略低于 2019 年 12 月,表现为秋冬季偏高的特点(图 4a);在各站点的变化范围为 0.41~1.95,上游峡谷型库区较高,然后降低,至水库开阔的中心区域再次出现高值,最高值出现在 S9 站点(图 4b)。

Shannon–Wiener 多样性指数 ( $H'$ ) 均值为  $1.03\pm0.33$ ,变化范围在 0.87~1.19 之间,其时间变化与  $D$  值呈相反趋势,最低值出现在 2019 年 12 月,最高值出现在 2020 年 6 月(图 4a);从空间分布来看,由上游至下游呈下降趋势,并在 S12 站点出现极低值(图 4b)。Pielou 均匀度指数 ( $J$ ) 均值为  $0.66\pm0.17$ ,变化范围在 0.54~0.93 之间,其时间变化有别于  $D$  值和  $H'$  值,在 2020 年 2 月份出现最高值,最低值出现在 2019 年 12 月(图 4a);在空间分布上无显著变化,变化范围为 0.59~0.71(图 4b)。

2.6 浮游动物与环境因子相关性分析

浮游动物密度和生物量与环境因子进行 Pearson 相关性分析,结果表明浮游动物的密度和生物量与温度、pH、叶绿素 a 之间呈显著的正相关关系 ( $P<0.05$ ),表明水温、pH 和以叶绿素 a 为指征的浮游植物对浮游动物的生长与繁殖起着重要的调节作用;密度和生物量与透明度呈显著负相关,表明浮游动物在透明度高的水域,密度和生物量较低;密度和生物量与总氮、总磷以及溶解氧的相关性不显著。

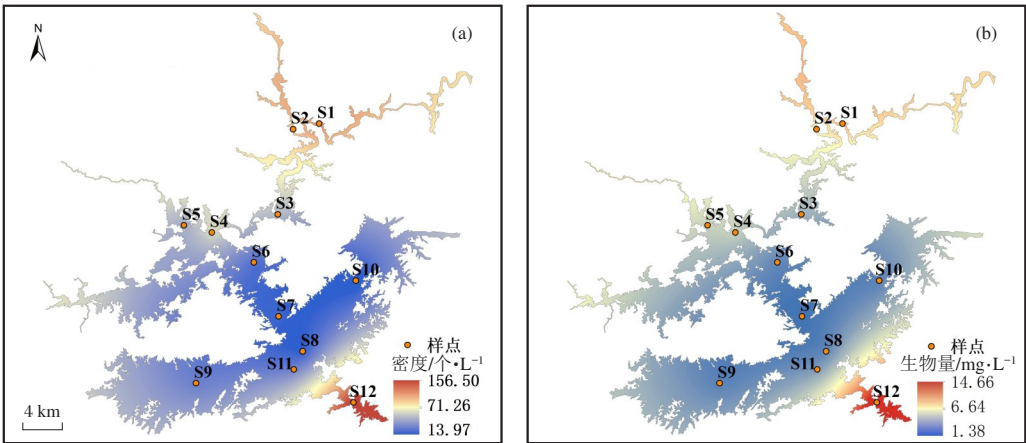


图3 新丰江水库浮游动物密度(a)和生物量(b)空间分布

Fig.3 Spatial distribution of zooplankton density (a) and biomass (b) in Xinfengjiang reservoir

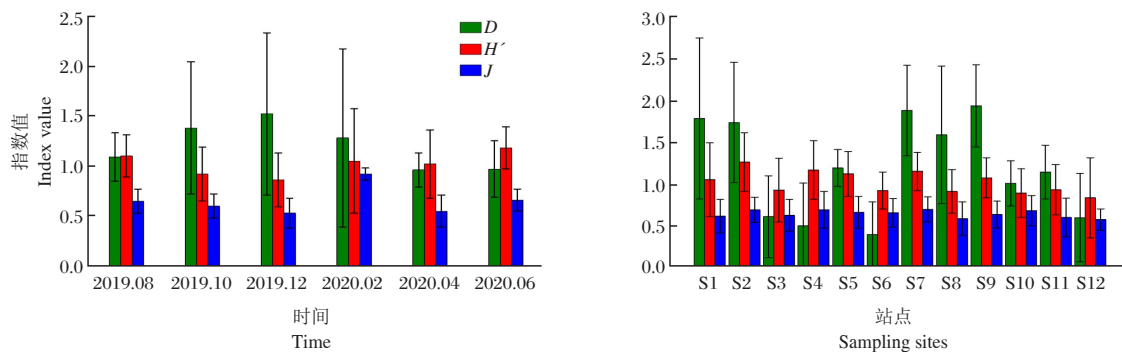


图4 新丰江水库浮游动物多样性指数时间(a)和空间(b)分布

Fig.4 Temporal (a) and spatial (b) distribution of zooplankton diversity indices in Xinfengjiang reservoir

表3 新丰江水库浮游动物密度和生物量与环境因子的 Pearson 相关性分析

Tab.3 Pearson correlation analysis of zooplankton density and biomass with environmental factors in Xinfengjiang reservoir

| 参数  | WT      | pH      | DO     | Chl-a   | SD       | TP    | TN    | COD <sub>Mn</sub> |
|-----|---------|---------|--------|---------|----------|-------|-------|-------------------|
| 密度  | 0.331** | 0.425** | -0.055 | 0.308** | -0.371** | 0.191 | 0.159 | 0.263*            |
| 生物量 | 0.265*  | 0.466** | 0.039  | 0.272*  | -0.361** | 0.093 | 0.128 | 0.213             |

注:\*\*:  $P<0.01$ ; \*:  $P<0.05$ 。  
Note: \*\* denotes significant difference at 0.01 level ( $P<0.01$ ); \* denotes significant difference at 0.05 level ( $P<0.05$ ).

2.7 浮游动物与环境因子多元分析

从采集到的浮游动物种类中筛选出共10种与环境因子进行RDA分析,物种及代码见图5和表1。结果表明2个环境排序轴的相关系数为0, Monte Carlo置换检验所有排序轴均达到显著水平( $P<0.05$ ),排序结果可靠(表4)。第一排序轴和第二排序轴累计解释了88.9%的物种信息量。

表4 新丰江水库浮游动物和环境因子的 RDA 分析统计信息

Tab.4 Statistical information of redundancy analysis (RDA) between zooplankton and environmental factors in Xinfengjiang reservoir

| 参数            | 轴1    | 轴2    | 轴3    | 轴4    |
|---------------|-------|-------|-------|-------|
| 特征值           | 0.367 | 0.116 | 0.052 | 0.005 |
| 物种环境相关性       | 0.827 | 0.781 | 0.612 | 0.41  |
| 物种方差累计百分数/%   | 36.7  | 48.3  | 53.5  | 54.0  |
| 物种环境方差累计百分数/% | 67.6  | 88.9  | 98.5  | 99.3  |

由表5和图5可知,温度、pH、透明度和叶绿素a与浮游动物群落结构密切相关。其中水温、pH和叶绿素a与第一排序轴为正相关,相关系数分别为0.6779、0.6054和0.6497;总氮与第二排序轴呈正相关,相关系数为0.4909。就物种与环境因子的关系而言,舌状叶镖水蚤、右突新镖水蚤、广布中剑水蚤、台

湾温剑水蚤、长额象鼻溞和颈沟基合溞与pH、叶绿素a和水温呈正相关,与透明度呈负相关;微型裸腹溞、僧帽溞和无节幼体与总氮和总磷呈正相关关系,螺形龟甲轮虫主要受透明度影响。

表5 RDA 分析中环境因子的显著性及重要性检验  
Tab.5 Significance and importance test of environmental factors in RDA

| 环境因子              | F    | P     |
|-------------------|------|-------|
| WT                | 24.1 | 0.002 |
| pH                | 11.4 | 0.002 |
| Chl-a             | 10.8 | 0.002 |
| SD                | 6.4  | 0.002 |
| TN                | 2.2  | 0.066 |
| TP                | 2.2  | 0.058 |
| DO                | 7.0  | 0.006 |
| COD <sub>Mn</sub> | 0.3  | 0.914 |

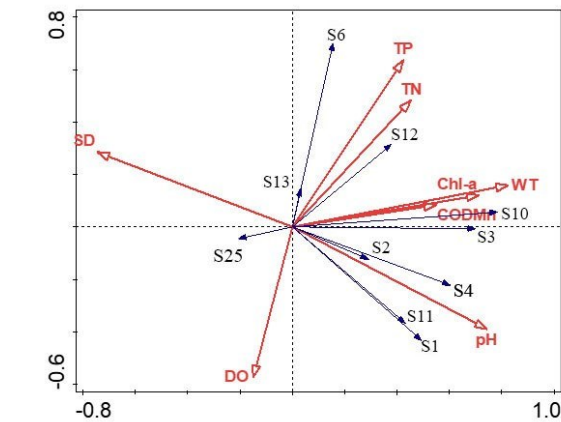


图5 新丰江水库浮游动物与环境因子RDA分析排序  
Fig.5 RDA ordination diagram of zooplankton and environmental factors in Xinfengjiang reservoir

3 讨论

3.1 浮游动物群落结构特征

1995年在新丰江水库进行的浮游动物调查发现

轮虫14种,枝角类2种,桡足类9种,优势种为螺形龟甲轮虫和针簇多肢轮虫(*Polyarthra trigla*)(白庆笙等,1995);2002年的调查发现轮虫10种,枝角类7种,桡足类3种,在丰水期以轮虫居多,枯水期以桡足类为主(陈丽芬等,2002);2007年的调查发现轮虫32种,枝角类7种,桡足类7种,浮游动物在数量上以桡足类占优势(赵帅营和韩博平,2007)。而本研究的调查,鉴定发现轮虫17种,枝角类7种,桡足类6种,浮游动物的优势种和密度均以桡足类和枝角类为主,研究结果与前期的调查报道稍有差异。综上可知,新丰江水库浮游动物在群落组成上由以轮虫、桡足类为主的群落特征向以桡足类和枝角类占优势的格局转变,在组成个体上趋向大型化。该现象产生的原因,一方面取决于调查范围和时间的差异;另一方面还受到下行效应的影响。浮游动物作为鱼类的饵料,鱼类捕食常常会导致浮游动物群落结构中的个体大小发生变化(Chaparro et al, 2014)。根据大小效率假说(Brooks & Dodson, 1965),鱼类在摄食选择上,通常会优先选择个体较大的浮游动物。因此,在鱼类捕食压力增加的情况下,个体较小的种类(如轮虫、小型枝角类)因能够逃避捕食而占据优势(Yang et al, 2005),反之则以大型枝角类和桡足类数量占优势(Jemberg et al, 2017)。因此鱼类捕食强度是调控浮游动物重要因素之一,近年来,新丰江水库鱼类捕捞强度有增无减。实际调查显示,渔获量与10年前相比大幅下降,部分种类生物量已不足过去的1%,捕食压力的降低,为大型枝角类增殖和发育创造了有利的条件,其密度达到26.46个/L,约为之前调查结果的10倍。Korponai等(2003)对Balaton湖浮游动物群落特征的研究也发现了类似现象。桡足类和枝角类作为轮虫食物竞争的有力对手,它们的大量存在会使轮虫的生长受到抑制(温新利等,2006),这是新丰江水库轮虫密度相对较低的主要原因之一。

一般认为,浮游动物密度与水体营养水平呈正相关(Pinto-Coelho et al, 2011; 鲁敏和谢平, 2002)。本次调查发现新丰江水库浮游动物的平均密度为60.13个/L,远低于处于富营养化水平的湖泊,如太湖梅梁湾浮游动物的平均密度为1 774.33个/L(杨佳等, 2020),滇池为6 478个/L(杨苏文等, 2015)。浮游动物密度较低的特点与新丰江水库所处的贫营养状态有关。潘继征等(2009)对抚仙湖浮游动物的群落研究发现,湖泊的贫营养状态是浮游动物密度低的主要原因之一。营养盐作为浮游植物生长的必需元素,通

过上行效应来影响浮游动物的分布(Li et al, 2019)。当水体营养盐不足,浮游植物的种群数量会处于较低水平。新丰江水库浮游植物在数量上属于比较低的水平(张辉等, 2022),作为浮游动物食物的浮游植物在水体中的数量较少必然会使浮游动物的数量受到限制。有研究表明,藻类密度的降低会导致桡足类体型变小和产卵量降低(Makino & Ban, 2000)。

新丰江水库浮游动物密度分布的显著特点是水库上游和下游的河道型库区高于中心敞水区。水库上游有入库支流恶马坑、南溪坑、大寨水和小水河的汇入,营养盐相对丰富(TP浓度为0.15 mg/L, TN浓度为2.2 mg/L),增加了浮游动物的种类和密度,如微型裸腹溞、短尾秀体溞等主要在这一区域出现;而中心敞水区是连接大坝的开阔水域,此区深度和透明度较高,营养盐含量相对较低(TP: 0.001~0.009 mg/L; TN: 为0.40~0.62 mg/L),不利于浮游动物的生长繁殖(陈佳琪等, 2020)。

### 3.2 浮游动物群落结构与环境因子的关系

不同的水体中环境因素对浮游动物群落结构的影响存在差异(Cai et al, 2020)。相关分析和RDA分析显示新丰江水库浮游动物群落结构与温度、叶绿素a和pH呈极显著正相关关系。其中水温是影响浮游动物生长、繁殖发育、群落组成和数量变化等极为重要的环境因子(Zhao et al, 2020; Kubo et al, 2013),也是影响浮游动物季节演替的关键因子(Record et al, 2010)。新丰江水库地处亚热带地区,夏秋季节具有良好的光照和水温条件,而春冬季温度相对较低,水温条件的季节差异为浮游动物群落结构的季节性变化创造了条件。在本次调查中,浮游动物密度呈现出夏秋季节高,春冬季节低的特点。温度的升高可以使浮游动物的繁殖速度加快,发育期缩短(刘宝贵等, 2016),进而使浮游动物丰度在夏季(8月)达到峰值。金琼贝等(1991)研究发现,桡足类、枝角类和无节幼体的个体数随着温度的升高呈上升趋势,并在30℃时达到最高值,其中广布中剑水蚤受温度影响最为显著,其个体数占桡足类总数的63.93%。RDA分析也表明,在新丰江水库中,常见的浮游动物种和优势种受水温影响,与之呈密切的正相关性。

浮游动物的季节性变化与食物浓度也有着密切的关系(Rinke & Vijverberg, 2005)。浮游植物作为水生态系统的初级生产者,是浮游动物重要的食物来源,而叶绿素a作为浮游植物生物量的代表参数(James et al, 1988),能够直接影响浮游动物的分布。本研究中,叶绿素a季节性变化与浮游动物一致,表

现为叶绿素a含量在夏季明显高于冬季。其原因主要是浮游植物由于夏季高温大量繁殖,导致叶绿素a含量明显上升,为浮游动物提供了充足的食物来源。研究表明,桡足类倾向于摄食藻类和有生命的高营养颗粒(Russo et al, 2016),在整个调查期间,新丰江水库浮游植物生物量以小型的小球藻属(*Chlorella*)和小环藻属(*Cyclotella*)为主,是浮游动物主要摄食类群,而枝角类倾向于摄食直径为3~15  $\mu\text{m}$ 的藻类(如*Chlorella*),100  $\mu\text{m}$ 以上的则不能利用(Sommer et al, 2003)。本研究中,RDA分析也显示了浮游动物与叶绿素a呈极显著的正相关关系,同时表明了以小球藻属和小环藻属为主的浮游植物为浮游动物繁殖发育提供了一定的饵料资源。

浮游动物的种类、数量变化与水体pH值密切相关(杨丽丽等, 2011)。研究表明轮虫和桡足类适宜生活在偏碱性水体中,枝角类则在酸性、中性及微碱性水体中生活得更好(高原等, 2013)。此次调查期间,新丰江水库pH为7~9,属于典型的弱碱性水体。其中夏季pH明显高于其他季节( $P<0.05$ ),其主要原因之一在于夏季藻类增殖和光合作用增强,消耗大量溶解态 $\text{CO}_2$ ,使水体酸碱平衡向碱性偏移,受其影响新丰江水库夏季浮游动物密度也明显高于其他季节,相关分析也显示浮游动物的密度和生物量与pH呈极显著的正相关关系。类似的现象也出现于百花水库(胡艺等, 2020)、鄱阳湖(陈佳琪等, 2020)、西凉湖(吴利等, 2011)等水体。

## 4 结论

(1)调查期间在新丰江水库共鉴定出浮游动物19属30种,其中优势种为舌状叶镖水蚤、右突新镖水蚤、广布中剑水蚤、台湾温剑水蚤、短尾秀体蚤、僧帽蚤、长额象鼻蚤和微型裸腹蚤。鱼类的长期过度捕捞是新丰江水库浮游动物群落以大型桡足类和枝角类为优势的主要原因。

(2)新丰江水库浮游动物密度为0.20~880.00个/L,月均密度为 $(60.13\pm 14.47)$ 个/L,其季节表现为夏季>秋季>春季>冬季;在空间上河道型库区浮游动物较为丰富,中心敞水区浮游动物较少,营养盐时空分异是该现象产生的主要调控因素;生物量时空变化与密度相似,其变化范围为0.02~98.96 mg/L,均值为 $(5.00\pm 1.48)$ mg/L。

(3)相关分析和RDA分析结果表明,水温是影响新丰江水库浮游动物季节变化的主导因素,其次为叶绿素a和pH值。

## 参考文献

- 白庆笙,徐润林,余日清,等,1995. 新丰江水库浮游动物群落结构研究[J]. 中山大学学报丛论, (1): 135-141.
- 陈佳琪,赵坤,曹玥,2020. 鄱阳湖浮游动物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 40(18): 1-14.
- 陈丽芬,林秋奇,胡韧,等,2002. 亚热带大型水库——新丰江水库的浮游生物群落特征[J]. 生态学报, 21(2): 104-107.
- 胡艺,李秋华,何应,等,2020. 贵州高原水库浮游动物分布特征及影响因子——以阿哈水库为例[J]. 中国环境科学, 40(1): 227-236.
- 高原,赖子尼,李捷,等,2013. 连江浮游动物多样性的空间分布[J]. 生物多样性, 21(6): 699-708.
- 环境保护部环境监测司,2017. 国家地表水环境质量监测网监测任务作业指导书(试行)[M]. 北京:中国环境出版社.
- 环境保护部生态司,2010. 全国淡水生物物种资源调查技术规定(试行)[M]. 北京:环境保护部.
- 蒋燮治,堵南山,1979. 中国动物志·淡水枝角类[M]. 北京:科学出版社.
- 金琼贝,盛连喜,张然,1991. 温度对浮游动物群落的影响[J]. 东北师大学报(自然科学版), (4): 103-111.
- 李可见,黄芳芳,张卫强,等,2018. 新丰江水库及库区地表水水质分析与评价[J]. 林业与环境科学, 34(3): 6-13.
- 刘宝贵,刘霞,吴瑶,等,2016. 鄱阳湖浮游甲壳动物群落结构特征[J]. 生态学报, 36(24): 8205-8213.
- 鲁敏,谢平,2002. 武汉东湖不同湖区浮游甲壳动物[J]. 海洋与湖沼, 33(2): 174-181.
- 潘继征,熊飞,李文朝,等,2009. 抚仙湖浮游甲壳动物群落结构与空间分布[J]. 湖泊科学, 21(3): 408-414.
- 王家楫,1961. 中国淡水轮虫志[M]. 北京:科学出版社.
- 温新利,席贻龙,张雷,等,2006. 芜湖市镜湖轮虫群落结构分析及水质的生态学评价[J]. 水生生物学报, 30(2): 152-158.
- 文晓慧,钟标城,2016. 新丰江水库水质现状研究[J]. 环境与发展防治与处理, 6(12): 55-58.
- 吴利,冯伟松,张堂林,等,2011. 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, 23(4): 619-625.
- 杨佳,周健,秦伯强,等,2020. 太湖梅梁湾浮游动物群落结构长期变化特征(1997-2017年)[J]. 环境科学, 41(3): 1246-1255.
- 杨丽丽,周小玉,刘其根,等,2011. 新疆乌伦古湖浮游甲壳动物的季节演替及与环境因子的关系[J]. 生态学报, 31(15): 4468-4476.
- 杨苏文,金位栋,何佳,等,2015. 滇池、洱海浮游动植物环境图谱[M]. 北京:科学出版社.
- 杨宇峰,黄祥飞,1992. 鲢鳙对浮游甲壳动物群落结构的影响[J]. 湖泊科学, 4(3): 78-86.
- 张辉,彭宇琼,邹贤妮,等,2021. 华南大型深水水库浮游植物

- 群落特征及营养状态评价[J]. 环境科学与技术, 44(4): 186–194.
- 张辉, 彭宇琼, 邹贤妮, 等, 2022. 新丰江水库浮游植物功能分组特征及其与环境因子的关系[J]. 中国环境科学, 42(1): 380–392.
- 章宗涉, 黄祥飞, 1991. 淡水浮游生物研究方法[M]. 北京: 科学出版社.
- 赵帅营, 韩博平, 2007. 大型深水贫营养水库——新丰江水库浮游动物群落分析[J]. 湖泊科学, 19(3): 305–314.
- 中国科学院动物研究所甲壳动物研究组, 1979. 中国动物志·淡水桡足类[M]. 北京: 科学出版社.
- 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 2015. 湖泊调查技术规范[M]. 北京: 科学出版社.
- 周梅, 叶丽菲, 张超, 等, 2018. 广东新丰江水库表层水体CO<sub>2</sub>分压及其影响因素[J]. 湖泊科学, 30(3): 770–781.
- Brooks J L, Dodson S I, 1965. Predation, Body size, and Composition of Plankton[J]. Science, 150(3692): 28–35.
- Cai W W, Xia J H, Yang M Z, 2020. Cross-basin analysis of freshwater ecosystem health based on a zooplankton-based index of biotic integrity: Models and application[J]. Ecological Indicators, 114: 106333.
- Chaparro G, Fontanarrosa M S, Cataldo D, et al, 2014. Hydrology driven factors might weaken fish predation effects on zooplankton structure in a vegetated warm temperate floodplain lake[J]. Hydrobiologia, 752(1): 187–202.
- James J, Elser, Monica, et al, 1988. Zooplankton-mediated transitions between N- and P- limited algal growth[J]. Limnology & Oceanography, 33(1): 1–14.
- Jemberg S, Lehtiniemi M, Uusitalo L, 2017. Evaluating zooplankton indicators using signal detection theory[J]. Ecological Indicators, 77: 14–22.
- Jia Z N, Swadling K M, Meiners K M, et al, 2016. The zooplankton food web under East Antarctic pack ice—A stable isotope study[J]. Deep-See Research Part II, 131: 189–202.
- Korponai J, Paulovits G, Mátyás K, et al, 2003. Long-term changes of cladoceran community in a shallow hypertrophic reservoir in Hungary[J]. Hydrobiologia, 504(1/3): 193–201.
- Kubo T, Asai T, Okumura Y, 2013. Environmental study of the seasonal succession of mesozooplankton in a brackish water Odra River estuary during 2003–2005[J]. Journal of Ecological Engineering, 14(2): 12–25.
- Li Y, Liu L, Cui S Z, et al, 2019. Long-term effects of nutrient changes on rotifer communities in a subtropical lake[J]. Limnology, 20(1): 191–201.
- Lomartire S, Marques J C, Goncalves A M, 2021. The key role of zooplankton in ecosystem services: A perspective of interaction between zooplankton and fish recruitment[J]. Ecological Indicators, 129: 107867.
- Lopes M, Bicudo C, Ferragut M C, 2005. Short term spatial and temporal variation of phytoplankton in a shallow tropical oligotrophic reservoir, southeast Brazil[J]. Hydrobiologia, 542(1): 235–247.
- Makino W, Ban S, 2000. Response of life history traits to food conditions in a Cyclopoid copepod from an oligotrophic environment[J]. Limnology & Oceanography, 45(2): 396–407.
- Pinto-Coelho R, Pinel-Alloul B, Méthot G, et al, 2011. Crustacean zooplankton in lakes and reservoirs of temperate and tropical regions: Variation with trophic status[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 62(2): 348–361.
- Record N R, Pershing A J, Jossi J W, 2010. Biodiversity as a dynamic variable in the Gulf of Maine continuous plankton recorder transect[J]. Journal of Plankton Research, 32(12): 1675–1684.
- Rinke K, Vijverberg J, 2005. A model approach to evaluate the effect of temperature and food concentration on individual life-history and population dynamics of Daphnia[J]. Ecological Modeling, 186(3): 326–344.
- Russo E, Franke K, Hager H, et al, 2016. Modifying the functional diversity in the zooplankton assemblage of an oligotrophic lake differentially affects pelagic community structure and biomass[J]. Food Webs, (8): 23–31.
- Shen J C, Zhang Z H, Liu R, et al, 2019. Ecological restoration of eroded karst utilizing pioneer moss and vascular plant species with selection based on vegetation diversity and underlying soil chemistry[J]. International Journal of Phytoremediation, 20(7): 1–11.
- Sommer U, Sommer F, Santer B, et al, 2003. Daphnia versus copepod impact on summer phytoplankton: functional compensation at both trophic levels[J]. Oecologia, 135: 639–647.
- Yang Y F, Huang X F, Liu J K, et al, 2005. Effects of fish stocking on the zooplankton community structure in a shallow lake in China[J]. Fisheries Management and Ecology, 12(2): 81–89.
- Zhao Q Y, Liu S T, Niu X L, 2020. Effect of water temperature on the dynamic behavior of phytoplankton-zooplankton model[J]. Applied Mathematics and Computation, 378: 125211.
- Zhou J, Qin B Q, Zhu G W, et al, 2020. Long-term variation of zooplankton communities in a large, heterogenous lake: Implications for future environmental change scenarios[J]. Environmental Research, 187(12): 109704.

Zooplankton Community Structure in Xinfengjiang Reservoir

QIN Yun-xia<sup>1</sup>, ZHOU Wen<sup>2</sup>, QIAO Yong-min<sup>1</sup>, CHEN Rui<sup>1</sup>, YANG Hong-yun<sup>1</sup>

(1. Institute of Hydrobiology, Jinan University, Guangzhou 510632, P.R. China;

2. South China Institute of Environmental Science, MEE, Guangzhou 510655, P.R. China)

**Abstract:** Xinfengjiang reservoir is the largest reservoir in Guangdong Province, serving both as a drinking water source for the Pearl River Delta region and as the water volume regulation hub for Dongjiang River. In this study, we explored the community structure and spatiotemporal variation of zooplankton in Xinfengjiang reservoir based on zooplankton monitoring at 12 sampling sites once every two months from August 2019 to June 2020. Then, combined with the results of water quality monitoring, we analyzed the relationship of the zooplankton community with water environmental parameters and discussed the primary environmental factors in large drinking water source reservoirs of South China. The aim was to accumulate baseline data for a study of long-term ecosystem variation in Xinfengjiang reservoir and provide a reference to support the protection of water resources and aquatic ecology. A total of 30 zooplankton species from 19 genera were observed including 17 rotifer species from 8 genera, 7 cladoceran species from 5 genera and 6 copepod species from 6 genera. There were 8 dominant species ( $Y \geq 0.02$ ) identified during the investigation, consisting of 4 cladoceran species and 4 copepod species. The number of zooplankton species was highest (25 species) in summer and lowest (14 species) in spring. The ranges of zooplankton density and biomass were 11.52–161.52 ind/L and 0.92–17.65 mg/L, with extreme seasonal variation ( $P < 0.01$ ), and both were generally higher in summer and lower in winter. Spatially, zooplankton density and biomass were higher in the riverine sections, upstream and downstream, and lower in the central lacustrine area. The ranges of the Shannon–Wiener diversity index, Margalef richness index and Pielou evenness index were, respectively, 0.87–1.19, 0.97–1.53 and 0.54–0.93. Correlation and redundancy analyses of zooplankton density and water environmental parameters show that water temperature, Chl-a and pH were the primary environmental factors affecting zooplankton community structure.

**Key words:** zooplankton; density; biomass; environmental factors; redundancy analysis; Xinfengjiang reservoir