

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2024.03.009

<https://xuebao.xaut.edu.cn>

引文格式:刘子萌,冯民权,杨锐婧,刘果果,史喜胜,吴文平.漳泽水库浮游生物群落结构和鲢、鳙食性及鱼产力评估[J].西安理工大学学报,2024,40(3):392-399.

LIU Zimeng, FENG Minquan, YANG Ruijing, LIU Guoguo, SHI Xisheng, WU Wenping. Community structure of plankton and the feeding habits of silver carp and bighead silver carp, as well as the assessment of fish productivity in Zhangze Reservoir[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2024, 40(3): 392-399.

# 漳泽水库浮游生物群落结构和鲢、鳙食性及鱼产力评估

刘子萌<sup>1</sup>, 冯民权<sup>1</sup>, 杨锐婧<sup>1</sup>, 刘果果<sup>1</sup>, 史喜胜<sup>2</sup>, 吴文平<sup>2</sup>

(1. 西安理工大学 西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 山西漳河水务集团有限公司, 山西 长治 046000)

**摘要:** 为探究漳泽水库中鲢、鳙放养对富营养化控制的效果,基于碳( $\delta^{13}\text{C}$ )、氮( $\delta^{15}\text{N}$ )稳定同位素技术于2022年7月研究了漳泽水库鲢、鳙的主要食物来源和营养级,同时于2022年春夏及2023年秋季进行了浮游生物的群落组成调查和鲢、鳙鱼产力评估,探讨鲢、鳙控藻效果。结果表明,浮游植物对鲢、鳙的平均相对贡献分别为68.5%和68.8%,浮游动物对鲢、鳙的平均相对贡献分别为31.5%和31.2%,用来控藻的鲢、鳙均以浮游植物为主要食物来源。而浮游植物生物量有所增加,蓝藻代替2019年的绿藻成为新的优势种,水库富营养化未得到有效控制。根据浮游生物生物量估算鲢的鱼产力为732.521 t,鳙的鱼产力为310.106 t。本研究可为富营养化湖库中鲢、鳙控藻效果及生态利用提供参考。

**关键词:** 鲢; 鳙; 浮游生物; 稳定同位素; 鱼产力

**中图分类号:** S917.4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-4710(2024)03-0392-08

## Community structure of plankton and the feeding habits of silver carp and bighead silver carp, as well as the assessment of fish productivity in Zhangze Reservoir

LIU Zimeng<sup>1</sup>, FENG Minquan<sup>1</sup>, YANG Ruijing<sup>1</sup>, LIU Guoguo<sup>1</sup>, SHI Xisheng<sup>2</sup>, WU Wenping<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Shanxi Zhanghe Water Group Co., Ltd, Changzhi 046000, China)

**Abstract:** In order to explore the effect of stocking silver carp and bighead carp on eutrophication control in Zhangze Reservoir, we studied the main food sources and nutrient levels of silver carp and bighead carp in the reservoir based on the stable carbon( $\delta^{13}\text{C}$ ) and nitrogen( $\delta^{15}\text{N}$ ) isotope technology in July 2022. Meanwhile, the plankton community composition and productivity assessment of silver carp and bighead carp were conducted in spring and summer 2022 and autumn 2023 to explore the algal control effect of silver carp and bighead carp. The results show that the average relative contributions of phytoplankton to silver carp and bighead carp are 68.5% and 68.8%, respectively, and that the average relative contributions of zooplankton to silver carp and bighead carp are 31.5% and 31.2%, respectively. The main food source of silver carp and bighead carp used to control algae is phytoplankton. While phytoplankton biomass increases, cyanobacteria replaces the green algae in 2019 as the new dominant species, and the eu-

收稿日期: 2023-09-06; 网络首发日期: 2023-12-29

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.n.20231229.0927.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51679191); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2019JZ-42)

第一作者: 刘子萌,女,硕士生,研究方向为水污染治理。E-mail:2313575222@qq.com

通信作者: 冯民权,男,博士,教授,研究方向为水环境模拟与污染控制。E-mail:mqfeng@xaut.edu.cn

trophication of the reservoir is not effectively controlled. The productivity of silver carp is estimated to be 732.521 t and that of bighead carp is 310.106 t based on plankton biomass. This study can provide reference for the algal control effect and ecological utilization of silver carp and bighead carp in eutrophic lakes and reservoirs.

**Key words:** silver carp; bighead carp; plankton; stable isotopes; fish productivity

内陆湖泊和水库由于多种人工干扰而产生严重的富营养化,已成为全球范围内日趋严重的水环境问题之一<sup>[1-2]</sup>,尤其是可以作为饮用水水源地的湖库,若水质发生恶化,对城市居民生活和社会经济发展都将造成严重影响。目前国内外对于湖库富营养化治理从水质改善逐渐转向生态治理,利用鲢、鳙的滤食性控制富营养化(非经典生物操纵)引起了极大关注<sup>[3]</sup>,但其有效性仍存在争议<sup>[4]</sup>,因为不清楚鲢、鳙是否可以消化蓝藻,其繁殖还可能对控藻效果产生负面影响。故迫切需要研究富营养化湖库中鲢、鳙食性及浮游生物的群落结构,对于鲢、鳙控藻的效果研究和富营养化治理都具有重要意义。

研究鲢、鳙食性的方法主要有胃肠内容物分析法<sup>[5]</sup>、稳定同位素技术等。早期利用胃肠内容物分析法,人们普遍认为鲢、鳙主要摄食对象分别为浮游植物、浮游动物,二者在生态系统中具有不同的食物来源和营养级<sup>[6]</sup>。相比之下,稳定同位素技术能更加准确地表示消费者(鱼类)真实的食物来源和营养水平<sup>[7-8]</sup>,通过稳定同位素分析发现在室内外试验、自然水体中鲢和鳙的食物来源均呈现出高度的相似性<sup>[9-10]</sup>。后续研究发现鲢、鳙的食性与其所处生境密切相关。在贫营养和富营养湖泊中,鲢、鳙的食性和营养水平重叠程度较高,而在中营养湖泊中重叠程度较低<sup>[9,11]</sup>。鲢、鳙对不同种类浮游生物的利用率也有所差异,如鳙对浮游动物中的桡足类利用率较高<sup>[6]</sup>,滤食性鱼类也会对枝角类生物量产生明显的影响<sup>[12-13]</sup>。鲢、鳙的食物组成重叠程度还会随着共享的浮游生物资源减少而提高<sup>[14]</sup>。以上结果说明鲢、鳙的食性受水体营养状态、浮游生物群落结构特征等多种因素影响。目前鲢、鳙对浮游生物的影响还具有不确定性,故全面地调查不同水体中两种滤食性鱼类的食性和浮游生物的群落结构,结合鱼产力的估算,才能更好地评估鲢、鳙的放养对生态系统的影响,合理利用水库的天然饵料。

漳泽水库以大水面鲢、鳙增殖养殖模式为主导,但仍然存在富营养化问题,为探讨漳泽水库中鲢、鳙的控藻效果,前提是确定鲢、鳙的食性、营养水平及浮游生物的群落结构。本研究中,运用碳氮稳定同位素技术对漳泽水库水域中的浮游生物和鲢、鳙的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值进行分析,明晰鲢、鳙的食物来源和营

养级,结合浮游生物群落结构评估鲢、鳙的鱼产力并判断富营养化治理效果,讨论鲢、鳙控藻效果不显著的原因,以期为实现湖库生态保护和利用提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域

漳泽水库位于山西省长治市北郊浊漳河南源干流上,是一座以灌溉、防洪为主,兼顾渔业养殖和旅游等综合利用的大(II)型多年调节水库,被誉为“上党明珠”。水库库容为 $4.27 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,控制流域面积 $3176 \text{ km}^2$ ,水库正常蓄水位(902.4 m)时,坝前最大水深为8.94 m,库尾水深0.94 m,平均深度5.49 m<sup>[15]</sup>。浊漳河南源为漳泽水库的主要水源,浊漳河接纳了沿途大量工农业和生活废水,导致浊漳河形成了以氮、磷为主要污染物的现状,且浊漳河南源为污染物集中地,漳泽水库接近十分之一的区域呈现重度富营养化。20世纪90年代,漳泽水库为了控制富营养化开始增加滤食性鱼类的比例。

### 1.2 样品采集与处理

根据水库地理形态、面积及水文等特点,在漳泽水库设置3个采样断面(坝前、库中、库尾),于2022年7月采集浮游植物、浮游动物、中华园田螺及鲢、鳙样本用以碳氮稳定同位素分析(图1),于2022年度春夏及2023年秋季采集浮游生物分析样本进行富营养化研究及鱼产力计算。

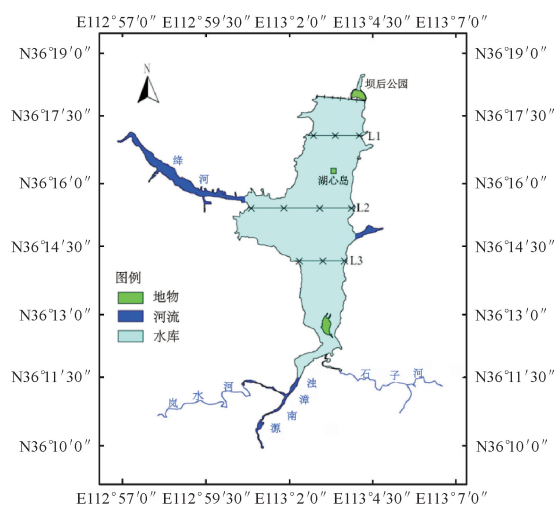


图1 漳泽水库采样点分布图

Fig. 1 Distribution of sampling points in Zhangze Reservoir

采集浮游植物的样本时用有机玻璃采水器在表层(距水面 0.5 m)、中层和底层(距水底 0.5 m)采集水样,充分混匀后装入 1 L 广口瓶中,加入 10~15 mL 鲁哥氏液进行固定。静置 48 h 以上,虹吸去除上清液后浓缩至 50 mL,收集藻类细胞。在显微镜下用浮游植物计数框对浮游植物进行观察计数。采集浮游动物样本时用有机玻璃采水器采三层(表、中、底层)水样的混合水样 10 L,经过 25 号浮游生物网过滤浓缩至 100 mL,加入 4~5 mL 福尔马林固定,经 24 h 沉淀浓缩至 30 mL。在显微镜下对浮游动物的种类进行观察计数。

制备稳定同位素样本前先将孔径 0.45  $\mu\text{m}$ 、直径 25 mm 的 Whatman GF/F 玻璃纤维滤膜置于马弗炉中 450  $^{\circ}\text{C}$  灼烧 4 h 去除有机物,冷却后在 1 mol/L 的浓盐酸中酸化 24 h,后置于烘箱中 60  $^{\circ}\text{C}$  下恒温烘干 48 h,备用。采集浮游植物样本时,在各采样点用有机玻璃采样器采集表层(距水面 0.5 m)、中层、底层(距水底 0.5 m)水样,等体积混合得各采样断面的 5 L 混合水样,利用浮游生物网(112  $\mu\text{m}$ )过滤去除浮游动物,减压过滤至预处理过的 Whatman 玻璃纤维滤膜上获得浮游植物样品。在现场利用浮游生物网(112  $\mu\text{m}$ )以“ $\infty$ ”形拖行 3~5 min 采集浮游动物,置于聚乙烯瓶中析出杂质,后置于蒸馏水中 24 h 以排空肠胃,过滤至预燃烧后的 Whatman 玻璃纤维滤膜上收集样品。附着藻类在各采样断面处的水生植物或礁石表面采集,用小刀刮取其表面样品,去除杂质后过滤至预燃烧后的 Whatman 玻璃纤维滤膜上。使用 Peterson 抓斗采集水库底泥,利用注射器吸取顶部 2 cm 处底泥并放置于样品袋中,以得到 SOM 样本。采集挺水植物需采集地面以上部分作为样本,而浮叶植物需连根拔起,约 30~50 g 为一个样本。以上稳定同位素样本数均为 3 个。鱼类通过拖网(网目长度  $a=5$  mm)定置张网、地笼(网目长度  $a=4$  mm,长 15 m)联合采集,其中在水深较深且水生植物较少的区域采用拖网及定置张网,在湖泊两岸及库尾部分采用地笼。采集滤食性鱼类鲢、鳙各 5 条,测量鱼类全长、体长,取其背部白色肌肉 5~8 g<sup>[16]</sup>。以上稳定同位素样品均在 60  $^{\circ}\text{C}$  干燥至恒重、研磨、通过 100 目筛子并储存于锡囊中用于碳、氮同位素分析。

### 1.3 稳定同位素分析

#### 1.3.1 碳氮稳定同位素比值

碳和氮同位素比率是在科学指南针科研服务机构实验室使用稳定同位素质谱仪 Isoprime 进行测定的。使用国际通用的标准物质 peeDee 石灰岩中

的碳作为<sup>13</sup>C 的标准,使用大气氮作为<sup>15</sup>N 的参考标准。稳定 C、N 同位素计算公式<sup>[17]</sup>为:

$$\delta X (\text{‰}) = \left( \frac{R_{\text{sample}}}{R_{\text{standard}}} - 1 \right) \times 1000 \quad (1)$$

式中:  $X$  表示<sup>13</sup>C 或<sup>15</sup>N;  $R_{\text{sample}}$  为样品<sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C 或<sup>15</sup>N/<sup>14</sup>N;  $R_{\text{standard}}$  为标样<sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C 或<sup>15</sup>N/<sup>14</sup>N。

#### 1.3.2 消费者营养级及食物源贡献率

用氮稳定同位素估算营养级(TL)<sup>[18]</sup>,计算公式为:

$$L_T = \frac{\delta^{15}N_{\text{consumer}} - \delta^{15}N_{\text{baseline}}}{F_{\text{TE}}} + \lambda \quad (2)$$

式中: $L_T$ 表示所计生物的营养级; $\delta^{15}N_{\text{consumer}}$ 为消费者的氮同位素比值; $\delta^{15}N_{\text{baseline}}$ 为食物网中基线物种的氮同位素比值; $F_{\text{TE}}$ 为为营养级传递过程中在每一营养级的传递富集值 TEF(trophic enrichment factor),本研究取 3.4‰; $\lambda$ 为基线生物中华圆田螺的营养级,取 $\lambda=2$ 。

基于 R 语言软件的稳定同位素混合模型程序包(SIMMR)计算不同食物对鱼类的贡献率<sup>[19]</sup>。

### 1.4 浮游生物多样性

Margalef 丰富度指数( $H$ )表示环境中物种数目的多寡。Shannon-Wiener 多样性指数( $H'$ )的大小反映群落结构的复杂和稳定程度,指数越大,说明群落的结构越复杂。Pielou 均匀度指数( $J$ )则反映群落中各物种个体数目分配的均匀程度,指数越大,说明物种空间分布越均匀。

计算 Mcnaughton 优势度( $Y$ )<sup>[20]</sup>、Margalef 丰富度指数( $H$ )<sup>[21]</sup>、Shannon-Wiener 多样性指数( $H'$ )<sup>[22]</sup>和 Pielou 均匀度指数( $J$ )<sup>[23]</sup>。计算公式分别为:

$$Y = \frac{n_i}{N} \times f_i \quad (3)$$

$$H = S - 1/\ln N \quad (4)$$

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \log_2 P_i \quad (5)$$

$$J = H' / \log_2 S \quad (6)$$

式中: $n_i$ 为物种 $i$ 的个体数; $N$ 为全部样品总个体数; $f_i$ 为物种 $i$ 出现的频率; $S$ 为采集样品中浮游植物的物种总数; $P_i$ 为物种 $i$ 的个体数与总体数的比值。优势种则取优势度 $Y \geq 0.02$ 的物种。

### 1.5 鲢、鳙鱼产力评估

根据《水库鱼产力评价标准》<sup>[24]</sup>中的计算方法对漳泽水库的鲢、鳙鱼产力进行推算:

$$F = B \cdot (P/B) \cdot aV \cdot 100/k \quad (7)$$

式中: $F$ 为浮游生物鱼产力(t); $B$ 为浮游生物生物量(mg/L); $P/B$ 为浮游生物年生产量与年平均生



物量之比; $a$ 为鱼类对该饵料生物最大利用率; $V$ 为表层 10m 以内的库容( $10^8 \text{ m}^3$ ); $k$ 为鱼类对该类饵料生物的饵料系数。

### 1.6 数据处理

采样点图在 AutoCAD 2019 中完成,统计分析在 SPSS 22.0 中完成,稳定同位素分析图在 R 4.2.2 中完成,浮游生物分析图在 Origin 2018 中完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 主要食物源和鲢、鳙的稳定同位素值特征

采集到的同位素样本中,主要食物源包括浮游植物、附着藻类及水生植物,初级消费者包括浮游动物和螺类。本研究中主要食物源和浮游动物的  $\delta^{13}\text{C}$  平均值最高为附着藻类、其次为浮叶植物、浮游动物和浮游植物,浮游动物和浮游植物的  $\delta^{13}\text{C}$  值分别为  $-25.45\% \pm 0.46\%$  和  $-26.84\% \pm 0.58\%$ 。 $\delta^{15}\text{N}$  平均值最高为浮游动物、其次是浮游植物、浮叶植物、附着藻类和挺水植物,其中浮游动物和浮游植物的  $\delta^{15}\text{N}$  值分别为  $13.99\% \pm 1.19\%$  和  $12.98\% \pm 0.45\%$  (表 1)。

表 1 漳泽水库主要食物来源和滤食性鱼类的碳氮稳定同位素值(平均值 $\pm$ 标准差)

Tab.1 Carbon and nitrogen stable isotope values of the primary food sources and filter-feeding fish species in Zhangze Reservoir (Mean $\pm$ SD)

种类	样本数	$\delta^{13}\text{C}/\%$	$\delta^{15}\text{N}/\%$
浮游植物	3	$-26.84 \pm 0.58$	$12.98 \pm 0.45$
SOM	3	$-25.68 \pm 0.41$	$7.99 \pm 0.27$
附着藻类	3	$-21.80 \pm 2.17$	$11.09 \pm 0.59$
挺水植物	3	$-29.13 \pm 0.45$	$9.47 \pm 2.25$
浮叶植物	3	$-24.36 \pm 0.71$	$11.37 \pm 2.72$
中华园田螺	3	$-24.45 \pm 0.48$	$15.37 \pm 0.37$
浮游动物	3	$-25.45 \pm 0.46$	$13.99 \pm 1.19$
鲢	5	$-27.17 \pm 0.19$	$17.68 \pm 0.17$
鳙	5	$-27.21 \pm 0.08$	$19.53 \pm 0.13$

滤食性鱼类样本中,每尾鲢或鳙构成一个样本,样本数均为 5,鲢的体长为 14.4~22.6cm, $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  值分别为  $-27.17\% \pm 0.19\%$  和  $17.68\% \pm 0.17\%$ ;鳙的体长为 21~26.1cm, $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  值分别为  $-27.21\% \pm 0.08\%$  和  $19.53\% \pm 0.13\%$  (表 1)。单因素方差分析表明,鲢、鳙的  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  值没有显著性差异( $P > 0.05$ ),两种滤食性鱼类的  $\delta^{15}\text{N}$  值远高于浮游动物,而  $\delta^{13}\text{C}$  值比较接近,分别比浮游植物低 0.33‰ 和 0.37‰ (图 2), $\delta^{13}\text{C}$  值变异性低表明饮食偏好受到限制<sup>[25]</sup>。

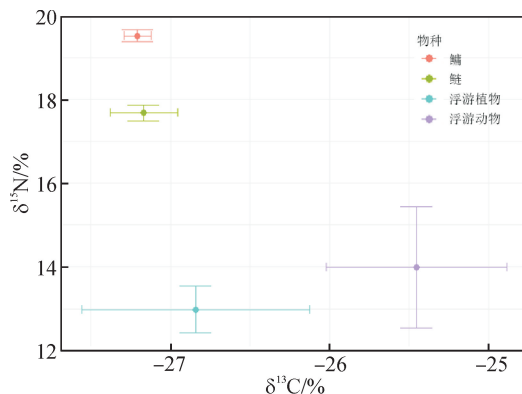


图 2 漳泽水库中浮游生物和滤食性鱼类的稳定同位素特征  
Fig.2 Stable isotope characteristics of plankton and filter-feeding fish in Zhangze Reservoir

### 2.2 鲢、鳙的营养级及食物来源特征

中华圆田螺的平均  $\delta^{15}\text{N}$  值为 15.37‰,以其为基线物种计算得鲢和鳙的营养级分别为  $2.63 \pm 0.05$  和  $3.18 \pm 0.04$  (图 3),且单因素方差分析表明二者差异不显著( $P > 0.05$ )。

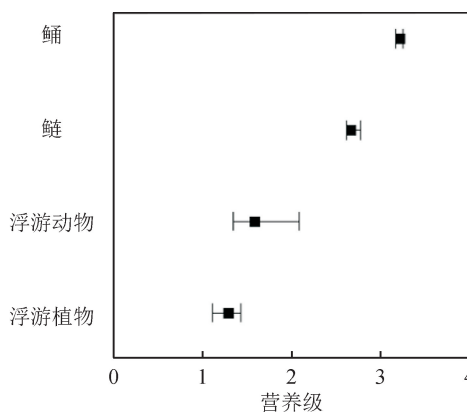


图 3 漳泽水库中浮游生物及鲢、鳙的营养级分布  
Fig.3 Trophic level distribution of plankton, silver carp and bighead in Zhangze Reservoir

使用同位素混合模型计算发现,漳泽水库中浮游植物和浮游动物对鲢、鳙的贡献相似(表 2),均表现为浮游植物是主要的食物来源,其次为浮游动物,其中浮游植物对鲢和鳙的平均相对贡献分别为 0.685 和 0.688,浮游动物对鲢和鳙的平均相对贡献分别为 0.315 和 0.312。浮游植物对鲢和鳙的碳源相对贡献的平均值都在 50% 以上,因此理论上鲢和鳙都有利于净化富营养化湖库的水质。

表 2 漳泽水库鲢、鳙基础食物源相对贡献率估计

Tab.2 Estimation of relative contribution rate for basic food sources of silver carp and bighead in Zhangze Reservoir

食物源	鲢	鳙
浮游植物	0.685	0.688
浮游动物	0.315	0.312

## 2.3 浮游生物群落特征及鲢、鳙鱼产力评估

### 2.3.1 浮游植物群落特征

调查期间,漳泽水库检测到浮游植物 8 门 56 属 87 种,平均细胞密度为  $13.28 \times 10^6$  个/L,其中夏季 ( $24.66 \times 10^6$  个/L) > 春季 ( $9.73 \times 10^6$  个/L) > 秋季 ( $5.44 \times 10^6$  个/L)。春季蓝藻门细胞密度最大,占总密度的 41.4%,其次是绿藻门(30.18%)和硅藻门(25.25%);夏季蓝藻门细胞密度最大,占总密度的 43.39%,其次是硅藻门(28.39%)和绿藻门(21.09%);秋季绿藻门细胞密度最大,占总密度的 72.26%,其次是隐藻门(14.71%)和蓝藻门(9.07%)(图 4)。浮游植物的平均生物量为 17.48 mg/L,其中夏季( $32.82$  mg/L) > 春季( $11.66$  mg/L) > 秋季( $7.97$  mg/L)。春季硅藻门生物量最大,占总生物量的 36.71%,其次是蓝藻门(28.82%)和绿藻门(24.70%);夏季蓝藻门生物量最大,占总生物量的 43.39%,其次是硅藻门(28.39%)和绿藻门(21.09%);秋季蓝藻门生物量最大,占总生物量的 44.16%,其次是绿藻门(31.17%)和隐藻门(21.05%)。

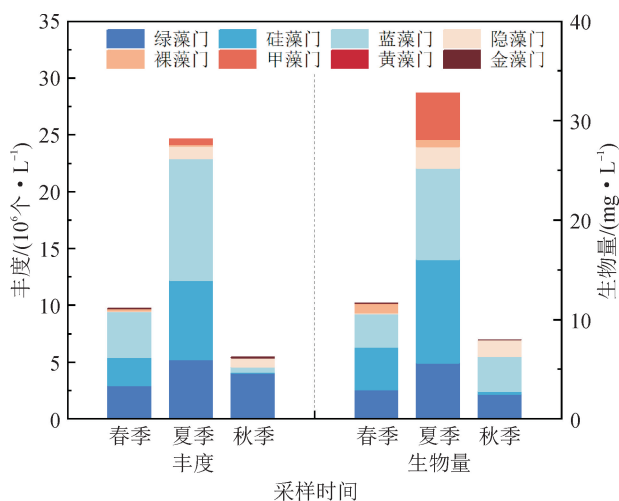


图 4 漳泽水库浮游植物丰度及生物量

Fig. 4 Abundance and biomass of phytoplankton in Zhangze Reservoir

漳泽水库浮游植物 Pielou 均匀度指数变化范围为 0.643~0.771(均值 0.713),Shannon-Wiener 多样性指数和 Margalef 丰富度指数变化范围分别为 2.621~3.216(均值 3.469)、1.289~2.173(均值 1.804)(图 4)。

### 2.3.2 浮游动物群落特征

调查期间,漳泽水库共鉴定 4 大类浮游动物 61 种,其中轮虫和原生动物分别有 30 种和 16 种,枝角类和桡足类分别有 10 种和 5 种。浮游动物平均细胞密度为 5 541.89 个/L,其中夏季( $6 593.07$  个/L) > 春季( $4 683$  个/L) > 秋季( $4 479$  个/L)。春季原生

动物密度最大,占总密度的 61.38%,夏季和秋季轮虫的密度最大,分别占总密度的 73.00%和 71.22%,春季桡足类密度最小,夏季和秋季均为枝角类密度最小(图 5)。浮游动物的平均生物量为 3.45 mg/L,其中夏季( $4.32$  mg/L) > 春季( $3.14$  mg/L) > 秋季( $2.88$  mg/L)。春季枝角类生物量最大,占总生物量的 58.62%,夏季和秋季均为轮虫生物量最大,分别占总生物量的 80.59%和 80.04%,三个季度均为原生动物生物量最小。

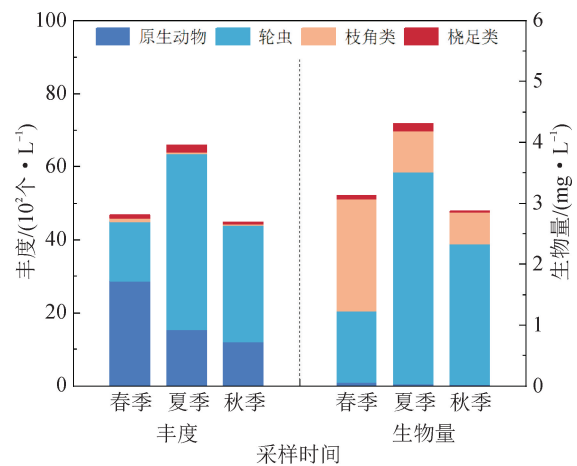


图 5 漳泽水库浮游动物丰度及生物量

Fig. 5 Abundance and biomass of zooplankton in Zhangze Reservoir

漳泽水库浮游动物的多样性指数大小均体现为夏季最大(图 6),其中 Pielou 均匀度指数变化范围为 0.642~0.684(均值 0.665),Shannon-Wiener 多样性指数和 Margalef 丰富度指数变化范围分别为 2.479~2.980(均值 2.735)、1.585~2.324(均值 2.035)。

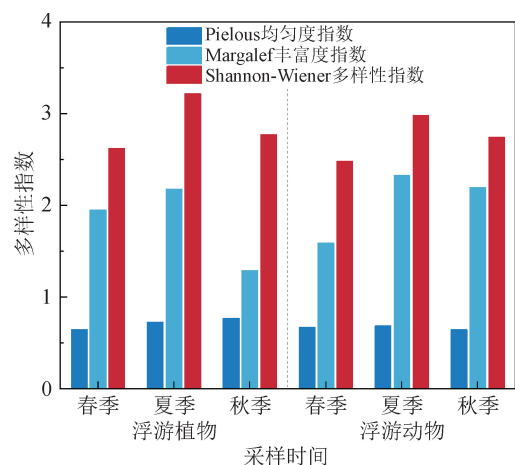


图 6 漳泽水库浮游生物多样性指数

Fig. 6 Diversity indices of plankton in Zhangze Reservoir

### 2.3.3 鱼产力评估

依据何志辉<sup>[26]</sup>对  $P/B$  系数、可利用率和饵料系数取值的建议,漳泽水库属于富营养化的北方水

库,主要放养鲢和鳙,对浮游生物的利用率较高,对于P/B系数、可利用率和饵料系数的取值,浮游植物分别取75、40%和80,浮游动物分别取25、30%和10。漳泽水库实际养殖库容 $V$ 取 $1.49 \times 10^8 \text{ cm}^3$ ,得出漳泽水库浮游植物生物量为2 604.52 t,提供的鱼产力为732.521 t;浮游动物生物量为469.17 t,提供的鱼产力为310.106 t。

### 3 讨论

研究证明,在浅水富营养化湖库中,鲢、鳙主要的食物来源是水中的悬浮颗粒有机物和浮游生物<sup>[27]</sup>。一般情况下,用 $\delta^{13}\text{C}$ 值来追溯消费者的食物来源,用 $\delta^{15}\text{N}$ 值来判断生物在生态系统中所在的营养级。鱼类的 $\delta^{13}\text{C}$ 值主要与其所在环境及饵料生物有关<sup>[28]</sup>。漳泽水库中鲢、鳙与浮游植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值比较接近,相差不到1‰, $\delta^{15}\text{N}$ 值则相差5‰左右。结合对鲢、鳙的食物来源贡献率分析发现,二者均以浮游植物为主要食物来源,且浮游植物对鲢、鳙的平均相对贡献相差不大,分别为68.5%和68.8%。通过对中营养水平的千岛湖和富营养化的太湖中鲢、鳙的食性研究显示,在两个湖泊中,浮游植物占鳙的食物组成比例均超过50%,其中太湖中浮游植物占鲢、鳙的食物组成比例分别达82%和75%。说明在两个湖泊中浮游植物均为鲢、鳙的主要食物来源,这与本研究结果一致。在富营养化水体中,理论上利用鲢和鳙的滤食性对藻类进行控制是有效果的。

漳泽水库采用大水面鲢、鳙增殖模式为主导来进行富营养化治理,鲢、鳙的投放量占总投放量的90%。2019年检测到7门57属135种,以绿藻-硅藻为优势种<sup>[29]</sup>;2022—2023年检测到浮游植物8门56属87种,春季和夏季分别以蓝藻-绿藻、蓝藻-硅藻为优势种。一般以蓝藻为优势种的湖库处于富营养化状态<sup>[30]</sup>,漳泽水库浮游植物总细胞密度和生物量在坝前、库中处均显示为2022年略高于2019年,且蓝藻代替绿藻成为主要优势种。小型浮游动物由于生活史简单、繁殖速率快,常在营养水平高的水体中作为优势种。漳泽水库浮游动物优势种以轮虫为主,桡足类仅有一种,说明水库中多为小型浮游动物。臂尾轮虫和长额象鼻溞被列为中-富营养型种,在漳泽水库三次采样中分别出现3次、2次,臂尾轮虫在夏、秋季均为优势种。结合浮游生物种类及密度、多样性指数判断,漳泽水库富营养化水平较高。故在增殖鲢、鳙的情况下,漳泽水库的富营养化没有得到有效控制。

利用鲢、鳙控藻的非经典生物操纵自提出以来

便始终存在争议,但通过调控食物网实现富营养化治理涉及复杂的种间互作,故仍未达成共识。有学者<sup>[31]</sup>通过富营养化湖泊中鲢、鳙控藻的典型案例分析认为,在进行围隔实验时实验条件的差异是造成鲢、鳙控藻成败与否的主要原因,在实际应用中,鲢、鳙的密度大小也会影响其控藻的作用。有研究表明,鲢、鳙的局部丰度与生态位宽度密切相关,丰度高的物种可以消耗广泛的资源,占据广泛的生态位宽度<sup>[32]</sup>,故需对鲢、鳙的投放量及比例加以讨论。目前国内根据能量转化原理,通过浮游生物的生物量来估算鲢、鳙的潜在鱼产力<sup>[33-36]</sup>,如杞麓湖、丹江口水库、打虎石水库等地都进行了鲢、鳙的鱼产力评估,漳泽水库的鲢、鳙鱼产力大于上述湖库,这与漳泽水库规模较大及富营养化程度较高有关。

同时,鱼类的摄食活动会加速水体营养物质的再生,改变系统群落结构和代谢强度,导致水体中总磷、氨氮的浓度增加<sup>[37]</sup>。在投放鲢、鳙进行控藻的过程中,通过对漳泽水库水体及沉积物氮磷营养盐分布分析<sup>[38]</sup>发现,库尾和部分坝前污染较严重,库中污染程度较轻,TN、TP的浓度明显升高,水浅处鲢、鳙产生的排泄物更容易增加水体中的营养物质含量从而影响水质。鱼类是否会消化肠道中的蓝藻相当一部分取决于蓝藻的种类。微囊藻经鲢的代谢后生长速率及光合活性均能得到增强<sup>[11]</sup>,鲢、鳙粪便中具有光合活性的微囊藻很有可能对系统中小型藻类的繁殖做出贡献<sup>[39]</sup>。漳泽水库中蓝藻门微囊藻占有10%的比例,仅次于小席藻和弯型尖头藻,故此也是鲢、鳙控藻效果不佳的一方面原因。

### 4 结论

1) 在漳泽水库中,浮游植物对鲢、鳙的平均相对贡献分别为68.5%和68.8%,浮游动物对鲢、鳙的平均相对贡献分别为31.5%和31.2%。鲢、鳙均以浮游植物为主要食物来源。

2) 浮游生物调查显示,2022—2023年间,春季和夏季漳泽水库浮游植物的优势种分别为蓝藻-绿藻、蓝藻-硅藻,夏季和秋季浮游动物中轮虫丰度最高,浮游生物多样性指数较高,群落结构较稳定。

3) 漳泽水库浮游植物生物量为2 604.52 t,提供的鱼产力为732.521 t;浮游动物生物量为469.17 t,提供的鱼产力为310.106 t。

#### 参考文献:

- [1] VINÇON-LEITE B, CASENAVE C. Modelling eutrophication in lake ecosystems: a review[J]. Science

- of The Total Environment, 2019, 651 (Part 2): 2985-3001.
- [2] LIU B, MCLEAN C E, LONG D T, et al. Eutrophication and recovery of a Lake inferred from sedimentary diatoms originating from different habitats[J]. Science of The Total Environment, 2018, 628-629: 1352-1361.
- [3] SU Haojie, PAN Jiamin, FENG Yuhao, et al. Stocking alien carp leads to regime shifts in native fish populations: evidence from long-term observation and ecological modelling of a Chinese reservoir[J]. Ecological Indicators, 2021, 132:108327.
- [4] WANG Haijun, LIAN Xiaomin, JIANG Pinghong, et al. TN: TP ratio and planktivorous fish do not affect nutrient-chlorophyll relationships in shallow lakes[J]. Freshwater Biology, 2008, 53(5):935-944.
- [5] 胡忠军, 史先鹤, 吴昊, 等. 上海青草沙水库食物网结构特征分析[J]. 水生态学杂志, 2019, 40 (2): 47-54.  
HU Zhongjun, SHI Xianhe, WU Hao, et al. Food web structure in Qingcaosha Reservoir of Shanghai, China[J]. Journal of Hydroecology, 2019, 40 (2): 47-54.
- [6] 孙晓明, 孟庆闻. 鲢、鳙滤食及消化器官的发育、构造与食性的相互关系[J]. 水产学报, 1992 (3): 202-212.  
SUN Xiaoming, MENG Qingwen. Development and structure of the filter and digestive organs and their relations with the food habits in silver carp and bighead [J]. Journal of Fisheries of China, 1992(3): 202-212.
- [7] 梁越, 肖化云, 刘小真, 等.  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  指示不同生态类型湖泊无机氮及有机质来源[J]. 湖泊科学, 2014, 26(5): 691-697.  
LIANG Yue, XIAO Huayun, LIU Xiaozhen, et al. Identifying provenance of inorganic nitrogen and organic matter in different lakes ecotype lakes using  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  [J]. Journal of Lake Sciences, 2014, 26 (5): 691-697.
- [8] 李云凯, 贡艺. 基于碳、氮稳定同位素技术的东太湖水生食物网结构[J]. 生态学杂志, 2014, 33(6): 1534-1538.  
LI Yunkai, GONG Yi. Food web structure of the East Lake Taihu by analysis of stable carbon and nitrogen isotopes [J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(6): 1534-1538.
- [9] CHEN Gang, WU Zaohe, GU Binhe, et al. Isotopic niche overlap of two planktivorous fish in southern China[J]. Limnology, 2011, 12: 151-155.
- [10] JAYASINGHE U A D, GARCÍA-BERTHOU E, LI Zhongjie, et al. Co-occurring bighead and silver carps show similar food preference but different isotopic niche overlap in different lakes[J]. Environmental Biology of Fishes, 2015, 98(4): 1185-1199.
- [11] JAN ČULA D, MÍKOVCOVÁ M, ADÁMEK Z, et al. Changes in the photosynthetic activity of Microcystis colonies after gut passage through Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) and silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) [J]. Aquaculture Research, 2008, 39 (3): 311-314.
- [12] YIN Chengjie, HE Wanchao, GUO Longgen, et al. Can top-down effects of planktivorous fish removal be used to mitigate cyanobacterial blooms in large subtropical highland lakes? [J]. Water Research, 2022, 218:118483.
- [13] YIN Chengjie, YANG Yalan, NI Leyi, et al. Temperature, nutrients and planktivorous fish predation interact to drive crustacean zooplankton in a large plateau lake, southwest China[J]. Aquatic Sciences, 2023, 85: 22.
- [14] HARRIS B S, DEBOER J A, LAMER J T. Trophic reorganization of native planktivorous fishes at different density extremes of bigheaded carps in the Illinois and Mississippi rivers, USA[J]. Biological Invasions, 2022, 24: 3013-3031.
- [15] 陈启斌, 樊贵盛. 漳泽水库水环境要素的时空变化特征研究[J]. 水生态学杂志, 2011, 32(1): 14-19.  
CHEN Qibin, FAN Guisheng. Temporal and spatial characteristics of water environment variables of Zhanze Reservoir[J]. Journal of Hydroecology, 2011, 32 (1): 14-19.
- [16] ZHANG Man, WANG Yifan, GU Binhe, et al. Resources utilization and trophic niche between silver carp and bighead carp in two mesotrophic deep reservoirs[J]. Journal of Freshwater Ecology, 2019, 34 (1): 199-212.
- [17] PETERSON B J, FRY B. Stable isotopes in ecosystem studies[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1987, 18: 293-320.
- [18] POST D M. Using stable isotopes to estimate trophic position: models, methods, and assumptions[J]. Ecology, 2002, 83(3): 703-718.
- [19] PARNELL A C, INGER R, BEARHOP S, et al. Source partitioning using stable isotopes: coping with too much variation[J]. PloS ONE, 2010, 5(3): e9672.
- [20] HABIB O A, TIPPETT R, MURPHY K J. Seasonal changes in phytoplankton community structure in relation to physico-chemical factors in Loch Lomond, Scotland[J]. Hydrobiologia, 1997, 350: 63-79.



- [21] MARGALEF R. Information theory in ecology[J]. *General Systems*, 1958, 3(1): 36-71.
- [22] SHANNON C E, WEAVER W. The mathematical theory of communication[M]. Urbana: University of Illinois Press, 1949: 8-16.
- [23] PIELOU E C. An introduction to mathematical ecology[M]. New York: Wiley-Interscience, 1969: 1-108.
- [24] 中华人民共和国水利部. 水库鱼产力评价标准: SL 563-2011[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011: 1-5.
- [25] RAOULT V, GASTON T F, TAYLOR M D. Habitat-fishery linkages in two major south-eastern Australian estuaries show that the C4 saltmarsh plant *Sporobolus virginicus* is a significant contributor to fisheries productivity[J]. *Hydrobiologia*, 2018, 811: 221-238.
- [26] 何志辉. 湖泊水库鱼产力的估算[J]. *水产科技情报*, 1982(4): 2-5.
- [27] WEDCHAPARN O, ZHAO Liangjie, FAN Yingchun, et al. Comparison of the trophic niches between two planktivorous fishes in two large lakes using stable isotope analysis[J]. *Biochemical Systematics and Ecology*, 2016, 68: 148-155.
- [28] 王晓玲, 徐东坡, 刘凯, 等. 太湖 3 个典型水域红鳍原鲌(*Cultrichthys erythropterus*)  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  值的变化规律[J]. *湖泊科学*, 2015, 27(5): 925-931.  
WANG Xiaoling, XU Dongpo, LIU Kai, et al. The changes of  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  values in *Cultrichthys erythropterus* from three typical waters within Lake Taihu[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, 27(5): 925-931.
- [29] 杨锐婧. 漳泽水库浮游植物生长的限制性因子研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.  
YANG Ruijing. Study on limiting factors of phytoplankton growth in Zhangze Reservoir[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.
- [30] 张民, 于洋, 钱善勤, 等. 云贵高原湖泊夏季浮游植物组成及多样性[J]. *湖泊科学*, 2010, 22(6): 829-836.  
ZHANG Min, YU Yang, QIAN Shanqin, et al. Phytoplankton community structure and biodiversity in summer Yunnan-Guizhou Plateau Lakes[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22(6): 829-836.
- [31] 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.  
LIU Qigen, ZHANG Zhen. Controlling the nuisance algae by silver and bighead carps in eutrophic lakes: disputes and consensus[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2016, 28(3): 463-475.
- [32] ROCHA M P, BINI L M, SIQUEIRA T, et al. Predicting occupancy and abundance by niche position, niche breadth and body size in stream organisms[J]. *Oecologia*, 2018, 186: 205-216.
- [33] 赵祺, 张秀文, 于佳, 等. 安格庄水库浮游生物群落季节演替及鲢、鳙鱼产力评估[J]. *水产科学*, 2022, 41(5): 876-882.  
ZHAO Qi, ZHANG Xiuwen, YU Jia, et al. Seasonal succession of plankton community and evaluation of silver carp and bighead carp production in Angezhuang Reservoir[J]. *Fisheries Science*, 2022, 41(5): 876-882.
- [34] 朱文静, 胡文革, 张映东, 等. 新疆蘑菇湖水库浮游生物种群结构及鲢鳙鱼产力的研究[J]. *水产学杂志*, 2020, 33(3): 50-54.  
ZHU Wenjing, HU Wenge, ZHANG Yingdong, et al. Population structure of plankton and silver carp and bighead carp productivity in Moguhu Reservoir, Xinjiang Uygur Autonomous Region[J]. *Chinese Journal of Fisheries*, 2020, 33(3): 50-54.
- [35] 杜红春, 朱挺兵, 龚进玲, 等. 杞麓湖浮游植物群落结构对富营养化的响应及鱼产力评估[J]. *淡水渔业*, 2023, 53(1): 75-83.  
DU Hongchun, ZHU Tingbing, GONG Jinling, et al. Phytoplankton community structure, eutrophication and fish productivity of Qilu Lake, a plateau lake[J]. *Freshwater Fisheries*, 2023, 53(1): 75-83.
- [36] 邵旭东, 李毅超, 白禄军, 等. 打虎石水库浮游生物群落结构特征及鱼产力评估[J]. *水产科学*, 2022, 41(3): 467-474.  
SHAO Xudong, LI Yichao, Bai Lujun, et al. Community structure characteristics of phytoplankton and estimation of fish productivity in Dahushi Reservoir[J]. *Fisheries Science*, 2022, 41(3): 467-474.
- [37] 曾庆飞, 谷孝鸿, 毛志刚, 等. 鲢鳙控藻排泄物生态效应研究进展[J]. *生态学杂志*, 2010, 29(9): 1806-1811.  
ZENG Qingfei, GU Xiaohong, MAO Zhigang, et al. Ecological effects of the excretion from silver carp and bighead carp in acid bloom control: a review[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(9): 1806-1811.
- [38] 刘娜. 漳泽水库藻类调查与富营养评价[J]. *海河水利*, 2012(5): 14-18.
- [39] KOLMAKOV V I, GLADYSHEV M I, KRAVCHUK E S, et al. Species-specific stimulation of cyanobacteria by silver carp *Hypophthalmichthys molitrix* (Val.) [J]. *Doklady Biological Sciences*, 2006, 408: 223-225.

(责任编辑 王绪迪)