

李昌, 张新, 杨蓉, 孙晶, 李垒. 基于碳、氮稳定同位素技术分析密云水库鱼类群落营养结构[J]. 应用与环境生物学报, 2023, 29 (5): 1194-1202

Li C, Zhang X, Yang R, Sun J, Li L. Trophic structure of the fish community in the Miyun Reservoir based on carbon and nitrogen stable isotope analyses [J]. Chin J Appl Environ Biol, 2023, 29 (5): 1194-1202

基于碳、氮稳定同位素技术分析密云水库 鱼类群落营养结构

李昌^{1,2✉} 张新³ 杨蓉⁴ 孙晶⁵ 李垒¹

¹北京市水科学技术研究院 北京 100048

²中国科学院生态环境研究中心 北京 100085

³北京市密云水库管理处 北京 101512

⁴北京市水文总站 北京 100089

⁵北京交通大学环境学院 北京 100044

摘要 密云水库是北京重要的饮用水水源地, 水生态安全备受关注. 采用稳定同位素技术测定样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{15}\text{N}$ 值, 并利用R软件分析鱼类营养级、食物链、食物组成和群落营养结构. 通过现场采样, 共收集到鱼类、底栖动物、浮游动物、沉水植物和悬浮有机颗粒物样品256个, 其中, 鱼类28种203尾, 隶属于4目9科. 各样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 -31.35‰ – -21.33‰ , $\delta^{15}\text{N}$ 值范围为 6.15‰ – 17.94‰ . 消费者营养级范围为 1.47 – 3.88 , 食物链长度为 3.88 . 鲢 (*Hypophthalmichthys molitrix*) 比鳙 (*Aristichthys nobilis*) 摄食更高比例的悬浮有机颗粒物, 穗状狐尾藻 (*Myriophyllum spicatum*) 是草鱼 (*Ctenopharyngodon idellus*)、鲮 (*Hemiculter leucisculus*) 和黄尾鲮 (*Xenocypris davidi*) 的重要食物来源; 鲮等小型鱼类是马口鱼 (*Opsariichthys bidens*) 的主要食物来源. 鱼类群落的氮值范围 (NR) 为 7.86 、碳值范围 (CR) 为 9.95 、凸多边形总面积 (TA) 为 48.42 、标准椭圆校正面积 (SEAc) 为 15.10 、平均离心距离 (CD) 为 2.65 、平均最邻近距离 (MNND) 为 0.84 、最邻近距离标准差 (SDNND) 为 0.66 . 本研究表明, 与国内部分湖库相比, 密云水库鱼类群落营养多样性和稳定性相对中等, 建议及时系统地开展库区鱼类资源保护工作. (图4 表2 参71)

关键词 稳定同位素; 营养结构; 密云水库; 营养级; 食物组成

Trophic structure of the fish community in the Miyun Reservoir based on carbon and nitrogen stable isotope analyses

Li Chang^{1,2✉}, ZHANG Xin³, YANG Rong⁴, SUN Jing⁵ & LI Lei¹

¹ Beijing Water Science and Technology Institute, Beijing 100048, China

² Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

³ Beijing Administration Office of Miyun Reservoir, Beijing 101512, China

⁴ Beijing Hydrology Center, Beijing 100089, China

⁵ School of Environment, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Abstract The ecological security of the Miyun Reservoir is of great concern because it is an important surface water source in Beijing. In this study, the $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values of the samples were determined using stable isotope analysis. R software analyzed the trophic levels, food chain, feeding habits, and trophic structure of the fish community. A total of 256 samples of fish, zoobenthos, zooplankton, submerged macrophytes, and suspended organic particles were collected via field sampling, among which 203 fish belonged to four orders and nine families of 28 species. The $\delta^{13}\text{C}$ values of each sample ranged from -31.35‰ to -21.33‰ , and $\delta^{15}\text{N}$ values ranged from 6.15‰ to 17.94‰ . The consumer trophic level ranged from 1.47 to 3.88 , and the food chain length was 3.88 . The food contribution ratio of suspended organic particles to silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) was higher than that to bighead carp (*Aristichthys nobilis*). *Myriophyllum spicatum* is an important food source for *Ctenopharyngodon idellus*, *Hemiculter leucisculus*, and *Xenocypris davidi*. Small fish, such as *H. leucisculus*, were the main food source for *Opsariichthys bidens*. The values of $\delta^{15}\text{N}$ Range (NR), $\delta^{13}\text{C}$ Range (CR), Total Area (TA), Standard Ellipse Area (SEAc), Mean distance to Centroid (CD), Mean Nearest Neighbor Distance (MNND), and Standard Deviation of Nearest Neighbor Distance (SDNND) were 7.86 , 9.95 , 48.42 , 15.10 , 2.65 , 0.84 , and 0.66 , respectively. This study showed that the trophic diversity and stability of fish

收稿日期 Received: 2022-07-05 接受日期 Accepted: 2022-12-08

北京市水务局科研项目 (PXM2020_035202_000002) 资助 Supported by the Science Research Program of Beijing Water Authority (PXM2020_035202_000002)

✉通信作者 Corresponding author (E-mail: lichang1820@163.com)

communities in the Miyun Reservoir were relatively moderate compared to those in certain domestic lakes and reservoirs, and it is recommended that timely and systematic work be carried out on the conservation of fish resources in the reservoir area.

Keywords stable isotope; trophic structure; Miyun Reservoir; trophic level; feeding habits

鱼类群落营养结构是食物网结构的主要部分,能够描述群落内不同鱼类之间的营养相互作用,揭示不同营养级水平上的物质循环和能量流动过程^[1-3]。鱼类群落营养结构与饵料生物和水环境之间存在相互作用。鱼类群落营养结构发生改变时,在营养级联下行效应作用下会对饵料生物和水环境产生重要影响^[4-5],例如通过放养滤食性鱼类增加对藻类的捕食压力,可以防控水华^[6];通过定向捕捞草食性鱼类减弱它们对沉水植物的牧食压力,促进沉水植物群落恢复,可以提升水质;通过定向捕捞底层扰动性鱼类降低它们对沉积物-水界面的扰动效应,能够缓解营养盐释放,减少内源污染^[5]。当水环境改变时,鱼类饵料生物种类组成和丰度、产卵场的分布会受到直接影响,通过上行效应会对鱼类群落营养结构产生间接影响^[7-9],例如河流型水库蓄水后,水文水环境变化,鱼类优势种会由喜流水鱼类转变为喜静缓流鱼类,鱼类种群、营养级、食物组成等群落营养结构特征发生改变^[10]。鱼类群落营养结构与水环境之间的相互作用是水生生态系统调控的基础,开展相关研究不仅可以指示鱼类群落的组成、结构及物种之间复杂的摄食关系,揭示库区水环境变化对水生态的影响,还能通过利用人为调控鱼类群落结构,改善食物网结构和水环境、促进水生生态系统稳定。

食物网研究的方法主要包括胃肠内容物分析法^[11-12]、稳定同位素技术^[3]、脂肪酸组成分析法^[13]和DNA条形码技术^[14]。早期的研究多采用胃含物分析法,该方法的特点是比较直观,但存在一些缺陷,例如仅能提供瞬时摄食信息,不能反映消化道对食物的吸收和各食物组分的贡献^[15-16];在消化作用下,胃含物模糊不清,饵料生物鉴定工作存在困难和误差^[17];工作量大、耗时长,小型动物研究难度大^[18]。上述的这些缺陷使得胃含物分析法对食物网中低营养级种类研究较少,成果不全面。脂肪酸组成分析法前处理较为烦琐,存在定量研究模型不成熟、指示生物脂肪酸库不完善、无法计算营养级等劣势。DNA条形码技术仅能研究几天内物种的摄食信息,且成本高昂,无法定量分析^[19]。相比较而言,稳定同位素技术在食物网研究中应用更为广泛,具体研究内容包括食物来源^[20-24]、食物网及营养级^[3, 18, 25]、能量来源^[26]、洄游与分布^[27]、重金属生物富集效应^[28]、污染物溯源^[29-30]等。

密云水库是华北地区最大的水库,主要由上游潮河和白河两大支流汇流而成,是首都重要的饮用水水源地^[31]。密云水库自2015年起承担南水北调来水的调蓄任务,在库区水位上升和南水北调来水汇兑的共同作用下,密云水库浮游植物种类和数量增加,大型水生植物和鱼类在调水初期减少^[32],近些年受上游来水水质影响,库区水质总氮指标呈现超标趋势^[33]。水文水环境和饵料生物的变化会影响鱼类营养级、食物组成,不利于维护食物网结构稳定和水生态安全。为建立水生生态系统良性动态平衡、净化水质,自2003年起管理人员即在密云水库开展以鲢和鳙为主要对象的增殖放流活动^[34]。目前报道的相关研究主要关注增殖放流后鱼体生源要素含量和生源要素移除量、生态系统结构与物质流动特征,鱼类群落营养结构的研究成果很少,且研究的鱼类仅包含常见渔业捕捞品种,种类不足^[35-36]。本研究通过运用碳、氮稳定同位素技术,分析鱼类营养级、食物链、食物组成和群落营养结构,以为完善密云水库鱼类群落营养结构研究成果、维护水生生态系统安全提供基础科学资料。

1 材料与方法

1.1 调查区域概况

密云水库坐落于燕山南麓密云区境内,距北京市区中心约90 km,于1960年建成,兼顾供水、防洪、发电等功能,总库容 $43.75 \times 10^8 \text{ m}^3$,最大水面面积 188 km^2 ,流域面积 $15\,788 \text{ km}^2$,多年平均流量 $50 \text{ m}^3/\text{s}$ ^[32]。目前密云水库增殖放流品种包括鲢、鳙、草鱼、团头鲂等多种鱼类,以鲢和鳙为主^[34]。

1.2 样品采集与处理

本研究于2020年秋季和冬季按照图1所示采样点位采集悬浮有机颗粒物、水生维管束植物、浮游动物和底栖动物。从渔民渔获物中采集上层鱼类,2021年春季在白河库区与潮河库区交汇处沿岸带,布设地笼补充调查底层鱼类。

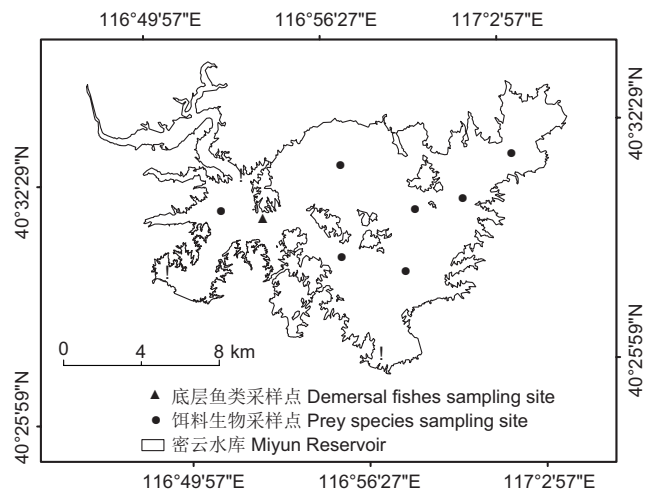


图1 密云水库采样点分布图。

Fig. 1 Distribution of the sampling sites in the Miyun Reservoir.

各样品具体采样方法和测定方法参考文献^[37-39],具体采样方法如下:悬浮有机颗粒物通过采集经13[#]浮游生物网过滤后的50 L水样,过滤至 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 预烧4 h的GF/C滤膜上,经过1 mol/L盐酸酸化处理,再用去离子水冲洗去除盐酸,在真空干燥仪中冷冻干燥样品至恒重,去除表面杂物后干燥保存。水生维管束植物采集活体叶片,将其表面附着藻类洗后,用去离子水反复冲洗3次,在真空干燥仪中冷冻干燥样品至恒重,干燥保存。浮游动物采用13[#]浮游生物网进行拖拽,样品放入装有去离子水的烧杯中清养3 h后,过滤至预烧的GF/C滤膜上,在真空干燥仪中冷冻干燥样品至恒重,去除表面杂物后干燥保存。底栖动物通过使用彼得森采泥器采集底泥,经筛网过滤挑出底栖动物,经去离子水清洗后在真空干燥仪中冷冻干燥样品至恒重,干燥保存。对采集到的所有鱼类鉴定到种并计数,测量全长、体重。取鱼体背部白色肌肉,用去离子水冲洗后在真空干燥仪中冷冻干燥样品至恒重,干燥保存。

1.3 测定方法

采用稳定同位素质谱仪进行样品的稳定性同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值测定。样品碾磨至粉末状后,采用锡杯包被样品进行上样。

碳氮稳定同位素的参考标准分别为美国拟箭石和空气中的氮气. 因在自然条件中含量很低, 所以其测定结果以 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 的形式表示, 计算公式如下:

$$\delta X = (R_{\text{sample}} - R_{\text{standard}}) / R_{\text{standard}} \times 1000\% \quad (1)$$

式中, X 为 $\delta^{13}\text{C}$ 或 $\delta^{15}\text{N}$, R_{sample} 为样本的同位素比值, R_{standard} 为参考标准样品的同位素比值. 每测30个样品之后再测两个标样, 通过测量的标样的值来测试仪器的准确度, 两个标样型号分别为USGS40和USGS41.

1.4 数据分析

采集的所有鱼类样品现场进行物种鉴定, 测量全长(精确到1 mm)以及体重(精确到0.01 g). 参考《北京鱼类志》^[40]、《北京及其邻近地区的鱼类》^[41], 对鱼类种类进行鉴定和鱼类营养类型划分.

生物体的新陈代谢会产生同位素分馏, 造成重同位素在捕食者体内富集. $\delta^{15}\text{N}$ 的富集系数通常为3‰-4‰, 常用于确定消费者在食物网中的营养级; $\delta^{13}\text{C}$ 富集系数通常为0‰-1‰, 常用于追溯捕食者的食物组成和贡献^[42]. 本研究中稳定同位素法营养级(trophic level, TL)计算参考下面的计算公式(2). 生态系统的食物链长度(food-chain length, FCL)取决于其营养级, 一般是根据最高营养级消费者的 $\delta^{15}\text{N}$ 进行计算, 计算方法参考公式(3)^[43-44].

$$\text{TL} = (\delta^{15}\text{N}_{\text{consumer}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}}) / \Delta\delta^{15}\text{N} + \lambda \quad (2)$$

$$\text{FCL} = (\delta^{15}\text{N}_{\text{max}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}}) / \Delta\delta^{15}\text{N} + \lambda \quad (3)$$

公式(2)中, $\delta^{15}\text{N}_{\text{consumer}}$ 为消费者的氮同位素比值; $\delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}}$ 为基线生物的氮同位素比值; $\Delta\delta^{15}\text{N}$ 是营养级间氮同位素的富集值, 通常取3.4‰; λ 是基线生物铜锈环棱螺的营养级, 当 $\delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}}$ 是生产者时, $\lambda = 1$; 当 $\delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}}$ 是初级消费者时, $\lambda = 2$. 公式(3)中, $\delta^{15}\text{N}_{\text{max}}$ 为最高营养级的氮同位素比值, 其余参数同公式(2).

通过基于R语言软件的稳定同位素混合模型程序包(SIAR)对同位素数据进行食源分析, 计算不同食物对鱼类的贡献率. 通过碳氮稳定同位素计算的指标可以反映鱼类群落特征^[45], 指标包括以下7个参数: ①氮值范围NR($\delta^{15}\text{N}$ range): ^{15}N 富集程度最高的鱼类的 $\delta^{15}\text{N}$ 值减去富集程度最低的鱼类 $\delta^{15}\text{N}$ 值得到, 代表鱼类群落的垂直结构, 数值越高代表营养层次越高; ②碳值范围CR($\delta^{13}\text{C}$ range): ^{13}C 富集程度最高的鱼类的 $\delta^{13}\text{C}$ 值减去富集程度最低的鱼类 $\delta^{13}\text{C}$ 值得到, 反映碳源范围, 表示食源的多样性; ③凸多边形总面积TA(total area): $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{15}\text{N}$ 值双坐标图中所有鱼类围成凸多边形面积, 反映鱼类对生态空间的利用情况, 表示营养结构多样性的总程度; ④标准椭圆校正面积SEAc(standard ellipse area): $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{15}\text{N}$ 值双坐标图中所有鱼类围成贝叶斯标准椭圆面积, 用来降低采样过程产生的随机误差和采样数据不确定性对TA的影响, 能更加准确地反映物种对生态空间的利用情况^[46]; ⑤平均离心距离CD(mean distance to centroid): 同一水域中所有鱼类距其中心点(即该处水域消费者的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 平均值)距离的平均值, 代表群落营养多样性平均水平; ⑥平均最邻近距离MNND(mean nearest neighbor distance)通过计算每种鱼类和距离其最近的鱼类距离的平均值得到, 反映物种聚集密度情况; ⑦最邻近距离标准差SDNND(standard deviation of nearest neighbor distance): 通过计算每种鱼类和距离其最近的鱼类距离的标准差得到, 反映物种聚集均匀度情况. 上述7个指标中, 前5个整体上是反映物种空间范围, 数值越高代表群落营养多样性越高; 后2个反映物种相对位置, 数值越低代表营养冗余程度越高、群落结构越稳定, 越不易受到外界干扰^[23, 45]. 上述参数均在R软件的SIBER包中进行计算. 采用Excel 2021、Origin 9.1、Arcgis 10.8软件对数据进

行统计分析和作图.

2 结果与分析

2.1 鱼类种类组成及样品碳氮稳定同位素值

本研究共采集到鱼类28种, 隶属于4目(鲑形目、鲤形目、鲇形目、鲈形目), 9科(胡瓜鱼科、鲤科、鳅科、鳊科、鲃科、塘鳢科、虾虎鱼科、鳢科), 26属(公鱼属、鱈属、马口鱼属、青鱼属、草鱼属、鳊属、原鲃属、红鲃属、鲃属、鲃属、鲃属、鲃属、鲃属、麦穗鱼属、棒花鱼属、鲃属、鲃属、鲤属、鲫属、泥鳅属、黄颡鱼属、鲃属、鳊属、黄魮鱼属、吻虾虎鱼属、鳢属)(表1). 本研究共采集到碳氮稳定同位素样品256个, 其中鱼类203尾28种. 各样品的同位素值如表1和图2所示. 从初级生产者到三级消费者, 样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{15}\text{N}$ 值总体逐渐升高. 消费者的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为-31.35‰-21.33‰, $\delta^{15}\text{N}$ 值范围为9.74‰-17.94‰. 具体而言, 摇蚊幼虫的 $\delta^{13}\text{C}$ 值最低(-31.35‰ $\pm$ 0.52‰), 翘嘴鲌的 $\delta^{13}\text{C}$ 值最高(-21.33‰ $\pm$ 0.22‰); 悬浮有机颗粒物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值最低(6.15‰ $\pm$ 1.97‰), 鳊的 $\delta^{15}\text{N}$ 值最高(17.94‰ $\pm$ 0.47‰). 其中, 鲢的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{15}\text{N}$ 值分别为-28.50‰ $\pm$ 0.63‰和12.82‰ $\pm$ 1.60‰, 鳙的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{15}\text{N}$ 值分别为-27.21‰ $\pm$ 0.60‰和14.47‰ $\pm$ 1.13‰.

2.2 营养级及食物链

本研究选择铜锈环棱螺的 $\delta^{15}\text{N}$ 值作为基准线. 经计算, 各消费者的营养级如表1所示. 营养级范围为1.47-3.88. 从营养类型的食性分析, 食鱼性鱼类的营养级范围为2.73-3.88, 无脊椎动物食性的鱼类营养级范围为2.42-3.18, 杂食性鱼类和滤食性鱼类的营养级范围为1.57-2.86, 草食性鱼类的营养级范围为2.05-2.29. 经济鱼类中, 鲢营养级为2.38, 鳙营养级为2.86, 草鱼营养级为2.05. 鳊为消费者中 $\delta^{15}\text{N}$ 值最高的种类, 经计算, 密云水库食物链长度为3.88.

2.3 食物组成及鱼类群落营养结构

鲢、鳙、草鱼、鳊、黄尾鲴、马口鱼的食物组成如表2所示. 悬浮有机颗粒物和浮游动物为鲢和鳙的食物来源, 对鲢的贡献率分别为54.56%和45.44%, 对鳙的贡献率分别为16.58%和83.42%. 鲢比鳙捕食更高比例的悬浮有机颗粒物, 对水华控制效率更高. 悬浮有机颗粒物和穗状狐尾藻为草鱼的食物来源, 贡献率分别为19.78%和80.22%. 浮游动物和穗状狐尾藻是鳊的重要食物来源, 贡献率分别为26.72%和43.70%. 黄尾鲴为杂食偏植食性鱼类, 植物性饵料如悬浮有机颗粒物和穗状狐尾藻是其重要食物来源, 贡献率分别为24.44%和23.91%. 马口鱼为杂食偏肉食性鱼类, 小型鱼类鳊、麦穗鱼等是其重要食物来源, 贡献率总和为64.40%. 鱼类群落特征参数结果如图3所示. 经计算, 密云水库鱼类群落NR为7.86, CR为9.95, TA为48.42, SEAc为15.10, CD为2.65, MNND为0.84, SDNND为0.66.

3 讨论

3.1 鱼类种类组成及碳氮稳定同位素值

密云水库作为北京市一级水源保护区, 同时也是南水北调中线工程的最终调蓄和受水水库, 水生态安全备受关注. 鱼类多样性是维护生态系统稳定的基础, 尽管密云水库已运行多年, 有关库区鱼类的研究成果却不多. 2013年通过回声探测法对密云水库鱼类资源空间分布特征进行评估, 现场共采集到9种主要经济鱼类, 包括鲢、鳙、鲤、鲫、达氏鲌、团头鲂、草鱼、鳊和池沼鱼. 鲢和鳙是最主要的渔获物, 分别占总渔获量的52.7%和

表1 不同样品的碳氮稳定同位素值、营养级、体长体重范围和生态学类型
Table 1 $\delta^{13}\text{C}$ value, $\delta^{15}\text{N}$ value, trophic level, body length range, body weight range, and ecological guild value for different samples

类别 Classification	种类 Species	$\delta^{13}\text{C}$ 平均值± 标准差 [(Mean ± SD)/‰]	$\delta^{15}\text{N}$ 平均值± 标准差 [(Mean ± SD)/‰]	营养级 Trophic level	全长范围 Body length range (l/mm)	全重范围 Body weight range (m/g)	营养类型 Nutrition type	样本数 Number of sample
鱼类 Fishes	池沼公鱼 <i>Hypomesus olidus</i>	-27.99 ± 0.95	14.41 ± 1.12	2.85	92-132	4.5-15.7	PE, O	15
	宽鳍鱮 <i>Zacco platypus</i>	-25.68 ± 2.44	10.29 ± 0.59	1.63	101-118	11.4-12.6	PE, O	3
	马口鱼 <i>Opsariichthys bidens</i>	-25.45 ± 1.87	11.97 ± 1.05	2.13	82-150	11.6-29.4	PE, O	14
	青鱼 <i>Mylopharyngodon piceus</i>	-23.82 ± 1.13	15.55 ± 2.86	3.18	152-800	33.5-6685.0	DE, I	3
	草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>	-22.75 ± 2.17	11.69 ± 1.97	2.05	332-482	600.0-1441.0	DE, H	7
	鲮 <i>Hemiculter leucisculus</i>	-24.74 ± 1.59	11.73 ± 1.62	2.06	122-162	9.9-24.8	PE, O	13
	红鳍原鲌 <i>Cultrichthys erythropterus</i>	-24.49 ± 0.97	14.86 ± 0.48	2.98	188-294	62.3-283.5	PE, P	11
	达氏鲌 <i>Culter dabryi</i>	-26.35 ± 0.58	16.61 ± 0.70	3.49	263-368	184.9-492.5	PE, P	9
	翘嘴鲌 <i>Culter alburnus</i>	-21.33 ± 0.22	16.60 ± 0.32	3.49	271-331	140.2-287.2	PE, P	7
	团头鲂 <i>Megalobrama amblycephala</i>	-23.10 ± 1.14	12.52 ± 1.35	2.29	321-341	526.7-606.1	ML, H	5
	黄尾鲮 <i>Xenocypris davidi</i>	-27.89 ± 2.95	10.09 ± 1.21	1.57	123-130	14.3-19.8	DE, O	3
	鳊 <i>Aristichthys nobilis</i>	-27.21 ± 0.60	14.47 ± 1.13	2.86	520-650	1720.0-3290.0	PE, F	9
	鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	-28.50 ± 0.63	12.82 ± 1.60	2.38	492-634	1515.0-2645.0	PE, F	13
	唇鲮 <i>Hemibarbus labeo</i>	-27.46	14.16	2.77	280-282	214.2-262.6	DE, I	2
	麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i>	-26.11 ± 2.09	11.24 ± 1.17	1.91	46-110	0.8-12.4	DE, O	9
	棒花鱼 <i>Abbottina rivularis</i>	-25.40 ± 0.67	13.08 ± 1.06	2.45	71-123	10.2-15.3	DE, O	5
	兴凯鲌 <i>Acanthorhodeus chankaensis</i>	-31.29 ± 0.37	11.45 ± 0.14	1.97	82-108	5.1-16.9	ML, H	3
	高体鲂 <i>Rhodeus ocellatus</i>	-26.48 ± 0.97	11.58 ± 0.26	2.01	44-52	0.7-1.3	ML, H	3
	中华鲂 <i>Rhodeus sinensis</i>	-24.81 ± 0.66	11.25 ± 0.04	1.92	38-46	1.0-1.3	ML, H	3
	鲤 <i>Cyprinus carpio</i>	-24.79 ± 1.64	11.93 ± 0.92	2.12	371-451	830.0-1430.0	DE, O	5
	鲫 <i>Carassius auratus</i>	-23.53 ± 1.77	12.36 ± 1.25	2.24	132-242	65.0-268.5	DE, O	13
	泥鳅 <i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	-24.67	12.97	2.42	102	5.2	DE, O	1
	黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	-23.62 ± 0.43	15.45 ± 0.67	3.15	232-300	122.2-252.8	DE, P	14
	鲇 <i>Silurus asotus</i>	-25.22 ± 1.22	15.95 ± 0.78	3.30	194-532	44.2-1075.0	DE, P	7
	鳊 <i>Siniperca chuatsi</i>	-26.57 ± 0.33	17.94 ± 0.47	3.88	342-421	780.0-1295.0	DE, P	3
	小黄鲮鱼 <i>Micropercops swinhonis</i>	-28.11 ± 2.83	12.95 ± 1.22	2.42	4-33	0.1-1.2	DE, I	5
	子陵吻鲈鱼 <i>Rhinogobius giurinus</i>	-23.05 ± 1.41	15.43 ± 0.50	3.14	47-68	1.0-2.5	DE, I	4
	乌鳢 <i>Channa argus</i>	-23.35 ± 0.66	14.03 ± 3.51	2.73	431-480	780.0-1025.0	DE, P	4
饵料生物 Prey species	日本沼虾 <i>Macrobrachium nipponense</i>	-24.00 ± 0.91	13.10 ± 0.77	2.46	44-68	0.6-3.7	DE, O	20
	平原龙溪蟹 <i>Sinopotamon planum</i>	-24.39 ± 0.92	12.55 ± 1.51	2.30	28-40	3.1-13.0	DE, O	8
	铜锈环棱螺 <i>Bellamya aeruginosa</i>	-24.80 ± 1.45	11.54 ± 1.04	2.00	—	—	DE, O	3
	摇蚊幼虫 Chironomidae	-31.35 ± 0.52	9.74 ± 0.70	1.47	—	—	DE, O	3
	寡毛纲 Oligochaeta	-30.99 ± 1.42	10.70 ± 0.88	1.75	—	—	DE, O	6
	浮游动物 Zooplankton	-28.26 ± 2.97	9.79 ± 1.65	1.49	—	—	—	10
	穗状狐尾藻 <i>Myriophyllum spicatum</i>	-26.88 ± 0.68	7.17 ± 1.02	—	—	—	—	3
	悬浮有机颗粒物 Suspended organic particles	-30.62 ± 0.51	6.15 ± 1.97	—	—	—	—	10

P: 食鱼性; O: 杂食性; H: 草食性; I: 食无脊椎动物性; F: 滤食性; PE: 中上层; D: 中下层; DE: 底层; —: 无数据。
P: Piscivorous; O: Omnivorous; H: Herbivorous; I: Invertebrate; F: Filter-feeding; PE: Pelagic; ML: Middle and low tiers; DE: Demersal; —: No data.

表2 各种饵料资源对鱼类的食物组成贡献率 (r/%)
Table 2 Potential contribution rate of various bait resources to the diet of fishes (r/%)

食物源 Food source	鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	鳊 <i>Aristichthys nobilis</i>	草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>	鲮 <i>Hemiculter leucisculus</i>	黄尾鲮 <i>Xenocypris davidi</i>	马口鱼 <i>Opsariichthys bidens</i>
棒花鱼 <i>Abbottina rivularis</i>	—	—	—	—	—	10.65
子陵吻鲈鱼 <i>Rhinogobius giurinus</i>	—	—	—	—	—	8.52
池沼公鱼 <i>Hypomesus olidus</i>	—	—	—	—	—	7.36
小黄鲮鱼 <i>Micropercops swinhonis</i>	—	—	—	—	—	9.35
麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i>	—	—	—	—	—	14.25
鲮 <i>Hemiculter leucisculus</i>	—	—	—	—	—	14.27
日本沼虾 <i>Macrobrachium nipponense</i>	—	—	—	—	—	11.97
摇蚊幼虫 Chironomidae	—	—	—	9.13	17.08	12.56
寡毛纲 Oligochaeta	—	—	—	9.32	16.15	11.07
浮游动物 Zooplankton	45.44	83.42	—	26.72	18.42	—
穗状狐尾藻 <i>Myriophyllum spicatum</i>	—	—	80.22	43.70	23.91	—
悬浮有机颗粒物 Suspended organic particles	54.56	16.58	19.78	11.13	24.44	—

—: 无数据。 —: No data.

37.8%^[47]。2014-2016年通过现场采样,共采集到库区鱼类18种^[48]。2017年调查结果显示密云水库历史上及现今分布的鱼类共有41种,隶属于6目11科36属。目前在水库水体中自然分布的原生物种数量为27种,有约29%的原生物种(种群)已经在水库水体

消失^[49]。本研究以渔民捕捞的渔获物为主,同时补充地笼捕捞的底层鱼类,较为全面地采集到了密云水库现存的主要鱼类,并发现北京市二级保护物种马口鱼、宽鳍鱮和鳊在此分布。

本研究中食鱼性鱼类(如翘嘴鲌、黄颡鱼、乌鳢) $\delta^{13}\text{C}$ 值高于

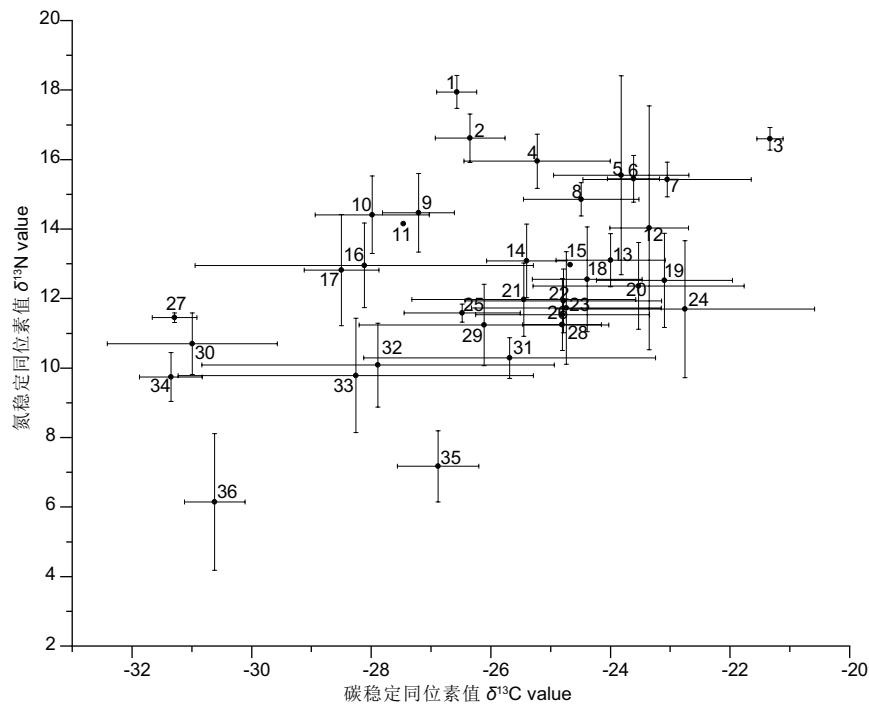


图2 密云水库鱼类及饵料生物 $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{15}\text{N}$ 值分布图。1: 鳊; 2: 达氏鲃; 3: 翘嘴鲃; 4: 鲇; 5: 青鱼; 6: 黄颡鱼; 7: 子陵吻鲈虎鱼; 8: 红鳍原鲈; 9: 鳙; 10: 池沼公鱼; 11: 唇鲮; 12: 乌鳢; 13: 日本沼虾; 14: 棒花鱼; 15: 泥鳅; 16: 小黄鲈; 17: 鲢; 18: 平原龙溪蟹; 19: 团头鲂; 20: 鲫; 21: 马口鱼; 22: 鲤; 23: 鲶; 24: 草鱼; 25: 高体鳊; 26: 铜锈环棱螺; 27: 兴凯鲮; 28: 中华鲮; 29: 麦穗鱼; 30: 寡毛蠕; 31: 宽鳍鳊; 32: 黄尾鲮; 33: 浮游动物; 34: 摇蚊幼虫; 35: 穗状狐尾藻; 36: 悬浮有机颗粒物。

Fig. 2 $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{15}\text{N}$ value of fishes and prey species of the Miyun Reservoir. 1: *Siniperca chuatsi*; 2: *Culter dabryi*; 3: *Culter alburnus*; 4: *Silurus asotus*; 5: *Mylopharyngodon piceus*; 6: *Pelteobagrus fulvidraco*; 7: *Rhinogobius giurinus*; 8: *Cultrichthys erythropterus*; 9: *Aristichthys nobilis*; 10: *Hypomesus olidus*; 11: *Hemibarbus labeo*; 12: *Channa argus*; 13: *Macrobrachium nipponense*; 14: *Abbottina rivularis*; 15: *Misgurnus anguillicaudatus*; 16: *Micropercops swinhonis*; 17: *Hypophthalmichthys molitrix*; 18: *Sinopotamon planum*; 19: *Megalobrama amblycephala*; 20: *Carassius auratus*; 21: *Opsariichthys bidens*; 22: *Cyprinus carpio*; 23: *Hemiculter leuciscus*; 24: *Ctenopharyngodon idellus*; 25: *Rhodeus ocellatus*; 26: *Bellamyia aeruginosa*; 27: *Acanthorhodeus chankaensis*; 28: *Rhodeus sinensis*; 29: *Pseudorasbora parva*; 30: *Oligochaeta*; 31: *Zacco platypus*; 32: *Xenocypris davidi*; 33: Zooplankton; 34: Chironomidae; 35: *Myriophyllum spicatum*; 36: Suspended organic particles.

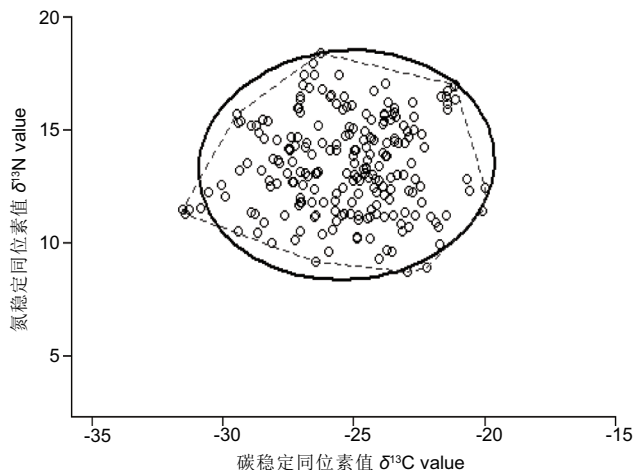


图3 密云水库鱼类群落营养结构图。

Fig. 3 Trophic structure of fish community in the Miyun Reservoir.

其他食性鱼类,大多数杂食性鱼类的 $\delta^{13}\text{C}$ 值位于范围中部,而滤食性鱼类(鲢和鳙)的 $\delta^{13}\text{C}$ 值则位于较低水平,大多数样品 $\delta^{13}\text{C}$ 值递增分布符合食性规律,但草鱼的 $\delta^{13}\text{C}$ 值却处于高水平,明显和其他鱼类不同。密云水库在调蓄南水北调来水前,大型水生植物主要分布在135 m高程以下的库滨带,尤其以库北和内湖2个区域较为茂密,以沉水植物为主,优势种类是水毛茛(*Batrachium pекinense*)、穗状狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)和小茨藻(*Najas minor*)^[32]。南水北调来水入库后,水位不断上升,原有

的大型水生植物生长区域水深过深,导致在调水后的一段时间内资源量减少^[32-33]。穗状狐尾藻空间分布范围小、对草鱼食物贡献率高,同时 $\delta^{13}\text{C}$ 值比其他食物源的 $\delta^{13}\text{C}$ 值高,因此草鱼的 $\delta^{13}\text{C}$ 值相比于其他鱼类处于较高水平。在大型水生植物分布较少的香溪河水域,也出现了同样的研究结果^[37]。

本研究中,悬浮颗粒有机物和穗状狐尾藻作为生态系统中消费者的基础食源, $\delta^{15}\text{N}$ 值是最低的。食鱼性鱼类(如鳊、达氏鲃、翘嘴鲃、鲇)由于全部以鱼类为食,其 $\delta^{15}\text{N}$ 值都很高。食无脊椎动物食性的鱼类(青鱼、子陵吻鲈虎鱼、小黄鲈和唇鲮)由于以底栖动物为食, $\delta^{15}\text{N}$ 值处于较高水平。杂食性鱼类和滤食性鱼类则以肉食量与植食量占比的高低决定其 $\delta^{15}\text{N}$ 值的高低。鱼类的 $\delta^{15}\text{N}$ 值除与其食物来源有关外,还可能在人类活动的影响下而增加^[22, 37]。近年来,上游白河和潮河不断汇入密云水库,库区蓄水量不断提升,同时总氮浓度也呈现上升趋势^[31]。经溯源解析,库区氮素主要来自生活污水,这类污水的 $\delta^{15}\text{N}$ 值通常较高^[50]。水环境 $\delta^{15}\text{N}$ 值的改变将直接改变悬浮颗粒有机物等基础食源,进而影响鱼类的 $\delta^{15}\text{N}$ 值^[51]。

3.2 鱼类营养级及食物链

营养级计算结果整体呈现出食鱼性鱼类最大,无脊椎动物食性的鱼类、杂食性鱼类和滤食性鱼类逐渐减小的现象,符合生态系统的营养级变化规律。2014年中国淡水养殖的种类及其营养级研究显示,国内鲢的平均营养级为2.19,鳙为2.73^[52]。本研究中,鲢营养级(2.38)和鳙营养级(2.86)略高于国内平均水平。鲢和鳙以浮游生物为食,浮游动物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值高于浮游植物,当浮

游动物占据的食物组成比例偏高时,鲢和鳙的营养级可能偏高。此外,徐军等根据基准值的季节变化,模拟评估了不同采样频次对营养级的影响,发现基准值的季节变化对营养级的大小有较大影响^[53]。本研究的鲢、鳙及基线生物铜锈环棱螺采集于秋冬季节,不能代表整个年度的营养级平均值,存在一定误差,后续需要进一步完善。

食物链长度是生态系统的基本属性,能够反映食物网的垂直结构、养分循环和初级生产力等生态功能^[54]。在自然生态系统中,食物链长度受众多因素和过程共同决定,这些因素和过程的作用使得食物链长度在时空尺度上呈现出明显的格局多样性,因此不同时空范围内决定食物链长度的主导因子也不同^[55]。资源可利用性假说、干扰假说和生态系统大小假说是影响食物链长度远因作用的传统假说,分别认为食物链长度受能量或资源可利用性影响、较长食物链不能存在于常受扰动的栖息地、较大生态系统空间能增加食物链长度^[44, 56]。食物网结构和功能的改变是决定食物链长度的近因作用,直接影响因素是顶级捕食者的添加、移除及其营养级位置的改变^[55]。鳊(*S. chuatsi*)作为密云水库顶级捕食者,是食物链长度的直接决定因素。作为典型的肉食性鱼类,鳊喜食活饵料,是小型鱼类种群的重要调节者,可通过下行效应影响生态系统的结构和功能,对维持淡水生态系统的平衡和稳定有着重要的作用^[57]。密云水库的食物链长度为3.88(由鳊 $\delta^{15}\text{N}$ 值计算得到),接近全球219个水域生态系统中湖泊生态系统食物链长度平均值(4.0)^[58],食物链较长。受水文水环境变化影响,密云水库生态系统仍处于发育过程中^[36],食物链长度的主要决定因子为资源可利用性,即资源不足则食物链长度受到限制^[59]。鳊作为密云水库食物链的重要物种,应注意保护其栖息地和饵料资源,维护食物网结构稳定。

3.3 鱼类食物组成

鲢因有更加密集的鳃耙间距和侧突间距,对悬浮颗粒有机物的摄食比例高于鳙(54.56%),与千岛湖的研究结果^[60, 61]相

近。近些年来,草鱼一直是密云水库增殖放流品种,和团头鲂一起占到总投放比例的8%^[34]。密云水库蓄水量增加、水位上涨后,水生维管束植物资源仍处在恢复期。穗状狐尾藻对草鱼的食物贡献率高达80.22%,增殖放流草鱼对资源恢复不利。黄尾鲮属于底层杂食偏植物性动物,常以附着藻类、腐殖质、水生维管束植物碎屑等为食^[41]。本研究中悬浮有机颗粒物对黄尾鲮食物贡献率最高(24.44%),其次是穗状狐尾藻(23.91%)。增殖放流黄尾鲮可提高悬浮有机颗粒物利用率。鲮是小型鱼类的优势种,繁殖迅速、生长周期短,食物包括浮游动物、底栖动物、水生维管束植物碎屑等^[62]。本研究中穗状狐尾藻对鲮食物贡献率最高(43.70%),其次分别是浮游动物(26.72%)和底栖动物(18.45%)。从食物组成分析,提高鲮的被利用率对恢复水生维管束植物资源、提高控藻效率有利。马口鱼是东亚大陆淡水水域所特有的鱼类,多生活于江河溪流中,湖泊水库的种群数量也较为丰富,在我国大部分淡水水域中有广泛分布,是一种小型凶猛鱼类,主要摄食小型鱼类、水生昆虫等^[63]。本研究中,马口鱼的食物包括小型鱼类(贡献率占比64.40%)和底栖动物,其中,鲮和麦穗鱼对其贡献率相对较高(贡献率占比14.27%和14.25%)。保护马口鱼资源可以提高鲮等小型鱼类资源利用率。

3.4 鱼类群落营养结构

经文献检索整理,国内部分湖库的鱼类群落营养结构指标如图4所示^[4, 37, 64-66]。不同季节和水文期鱼类群落营养结构指标不同,因本研究的样品主要是在秋冬季采集,对比其他水域鱼类群落营养结构指标时,也选择相似季节的研究结果。密云水库的NR值低于鄱阳湖、三峡水库坝前和香溪河;CR值和TA值分别低于香溪河和鄱阳湖;SEAc值最高;CD值低于三峡水库坝前和香溪河,这些指标表明相比国内部分湖库,密云水库鱼类群落营养多样性处于中等水平。密云水库的MNND值和SDNND值都比鄱阳湖和阳澄湖高,低于三峡水库坝前和香溪河,表明群落结构稳定性处于相对中等水平。鱼类多样性对群落结构稳定性有直接影

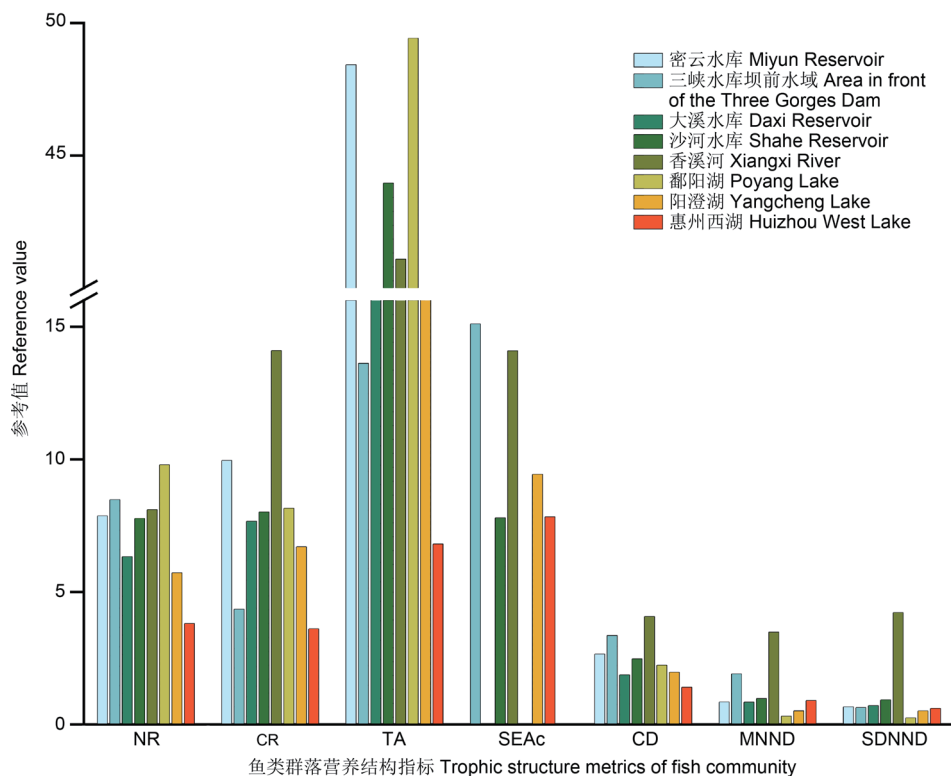


图4 湖泊和水库鱼类群落营养结构指标参考值。

Fig. 4 Reference value of trophic structure metrics of fish community in lakes and reservoirs.

响。生态系统的营养级是按串联方式组合的,而每一个营养级内的成分主要是并联组合的,这种并联组合即是冗余的表现形式。对于冗余程度高的生态系统来说,由于同一营养级有足够多的物种或种群备用,当某个物种或种群的一些个体灭绝后,不会引起营养级结构和功能的失调,稳定性就高^[67]。相比历史记录,密云水库鱼类种类数量下降^[49],这将影响群落结构稳定,后期应注意保护鱼类资源、尽量减少人为干扰。

3.5 基于食物网结构的鱼类资源保护建议

密云水库水生生态系统是由环境与生物组成的具有自我调节功能的复合体。随着近几年库区水位高程提升、水面面积增大,适宜水生生物生存的环境发生了很大改变。在与新环境相适应的过程中,库区水生生物群落结构发生演替,食物网受到干扰。开展基于食物网结构的鱼类资源保护,对维护水生生态系统稳定具有重要意义。

第一,系统开展鱼类资源本底调查。鱼类作为生物体,揭示其种群、群落的生态学特征需要全面且持续的监测。近年密云水库尽管开展了鱼类种类和资源量调查,但在内容上缺少对主要鱼类生长特性、年龄结构、繁殖力等生物学习性的系统基础研究,在调查时间上也缺乏持续性。密云水库鱼类研究前期不足,在新的水文水环境条件下,其资源量变化趋势更加未知,需要及时开展相关工作。鲢和鳙是密云水库主要的增殖放流和渔业捕捞对象,主要摄食浮游动物和悬浮有机颗粒物,对控制藻类水华具有一定作用^[6]。建议先开展鲢和鳙资源本底调查,再逐步扩大至保护鱼类。第二,恢复水生维管束植物资源。沉水植物等水生维管束植物为水生生态系统的重要组成部分,可通过与浮游植物竞争光照和营养物质来净化水体,为浮游动物、底栖动物、附生真菌和细菌等提供良好的生长环境、维持生物的多样性^[68],还能为鱼类等水生生物提供饵料,在稳定底质环境、固定和缓冲营养盐等方面也发挥着重要作用^[69]。建议后期开展水生维管束植物种类组成、空间分布及现存量调查,划分资源保护区。同时增殖放流时不再投放草鱼等草食性鱼类,促进穗状狐尾藻等土著种资源自然恢复。第三,开展基于生境调查与栖息地数值模拟的鱼类资源保护技术研究。鱼类栖息地的环境特征,包括水文、水质和河

流特性等,是鱼类生长、繁殖及其他生命活动的必要条件。无论是人工增殖放流还是原地隔离保护,鱼类资源恢复都不能脱离水文条件、不能脱离水环境特征。保护马口鱼资源对控制密云水库小型鱼类种群数量方面具有重要作用,同时还能通过捕食产生的营养级联效应对藻类控制和水生维管束植物资源恢复产生积极影响。黄尾鲴喜生活在江河、湖泊、水库等大水域中,并可自然繁殖、适应能力强,容易形成自然种群,提高黄尾鲴资源量对净化水质、减缓水体富营养化进程具有重要作用^[70]。建议选择土著保护物种或具有重要生态功能的物种,根据其他水域关于其栖息地水文环境特征的研究成果,结合密云水库的生境本底调查,确定库区鱼类三场等重要生境的主要分布区域,再开展栖息地模型模拟,预测在不同水文条件下适宜生境的分布情况^[71],对重要的适宜生境采取划定禁渔区等管理措施,维护好生存环境,促进鱼类资源的自然增殖。第四,持续开展库区食物网结构等方面的研究,关注更多保护鱼种的食物组成现状,对比分析库区不同时期群落结构指标的变化,为制定鱼类保护策略提供数据支撑。

4 结论

本研究共采集到密云水库鱼类28种,隶属于4目9科。所有采集生物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 -31.35‰ – -21.33‰ , $\delta^{15}\text{N}$ 值范围为 6.15‰ – 17.94‰ 。消费者营养级范围为 1.47 – 3.88 ,食物链长度为 3.88 。悬浮有机颗粒物和浮游动物对鲢的食物贡献率分别为 54.56% 和 45.44% ,对鳙的食物贡献率分别为 16.58% 和 83.42% ;穗状狐尾藻是草鱼、鲮和黄尾鲴的重要食物来源;鲮等小型鱼类是马口鱼的主要食物来源。鱼类群落结构指标NR为 7.86 ,CR为 9.95 ,TA为 48.42 ,SEAc为 15.10 ,CD为 2.65 ,MNND为 0.84 ,SDNND为 0.66 。综上所述,与部分湖库相比,密云水库鱼类群落营养多样性和稳定性处于中等水平,建议后期开展鲢、鳙等鱼类资源本底调查,沉水植物现状调查与恢复,保护鱼种栖息地数值模拟等方面的工作。本研究弥补了密云水库鱼类群落营养结构研究的不足,为进一步开展库区水生态保护提供了基础科学资料。

参考文献 [References]

- Cohen JE, Beaver RA, Cousins SH, DeAngelis DL, Goldwasser L, Heong KL, Holt RD, Kohn AJ, Lawton JH, Martinez N, O'Malley R, Page LM, Patten BC, Pimm SL, Polis GA, Rejmánek M, Schoener TW, Schoenly K, Sprules WG, Teal JM, Ulanowicz RE, Warren PH, Wilbur HM, Yodzis P. Improving food webs [J]. *Ecology*, 1993, **74** (1): 252-258
- Post DM, Pace ML, Hairston NG. Ecosystem size determines food-chain length in lakes [J]. *Nature*, 2000, **405** (6790): 1047-1049
- Fry B. Food web structure on Georges Bank from stable C, N, and S isotopic compositions [J]. *Limnol oceanogr*, 1988, **33** (5): 1182-1190
- 叶学瑶, 任洸, 匡箴, 王媛, 徐东坡. 基于稳定同位素技术的阳澄湖鱼类群落营养结构研究[J]. 中国水产科学, 2021, **28** (6): 703-714 [Ye XY, Ren L, Kuang Z, Wang Y, Xu DP. Analysis of the trophic structure of fish populations in Yangcheng Lake based on stable isotope technology [J]. *J Fish Sci China*, 2021, **28** (6): 703-714]
- 蔡杏伟, 李为, 樊厚瑞, 方涛, 李伟, 常锋毅, 刘家寿, 廖传松. 鱼类群落调控在浅水湖泊生态修复中的作用: 以傀儡湖为例[J]. 中国水产科学, 2021, **28** (6): 737-742 [Cai XW, Li W, Fan HR, Fang T, Li W, Chang FY, Liu JS, Liao CS. Roles of fish assemblage regulation on ecological restoration in a shallow lake: a case study from the Kuilei Lake, China [J]. *J Fish Sci China*, 2021, **28** (6): 737-742]
- 谢平. 鲢、鳙与藻类水华控制[M]. 北京: 科学出版社, 2003 [Xie P. Silver carp and bighead carp, and their use in the control of algal blooms [M]. Beijing: Science Press, 2003]
- 何春, 邓华堂, 王果, 刘寒文, 沈子伟, 刘绍平, 段辛斌, 陈大庆, 李云. 基于氮稳定同位素分析的三峡水库主要鱼类营养级研究[J]. 渔业科学进展, 2022, **43** (4): 116-126 [He C, Deng HT, Wang G, Liu HW, Shen ZW, Liu SP, Duan XB, Chen DQ, Li Y. Trophic level of major fish species in the Three Gorges Reservoir based on nitrogen stable isotope analysis [J]. *Prog Fish Sci*, 2022, **43** (4): 116-126]
- Wang JZ, Li L, Xu J, Gu BH. Initial response of fish trophic niche to hydrological alteration in the upstream of Three Gorges Dam [J]. *Ecol Process*, 2016, **5** (1): 1-9
- Liu XJ, Qin JJ, Xu Y, Ouyang S, Wu XP. Biodiversity decline of fish assemblages after the impoundment of the Three Gorges Dam in the Yangtze River Basin, China [J]. *Rev Fish Biol Fish*, 2019, **29** (1): 177-195
- 魏念, 张燕, 吴凡, 沈子伟, 茹辉军, 倪朝辉. 三峡库区鱼类群落结构现状及变化[J]. 长江流域资源与环境, 2021, **30** (8): 1858-1869 [Wei N, Zhang Y, Wu F, Shen ZW, Ru HJ, Ni ZH. Current status and changes in fish assemblages in the Three Gorges Reservoir [J].

- Resour Environ Yangtze Basin*, 2021, **30** (8): 1858-1869]
- 11 胡忠军, 史先鹤, 吴昊, 李亚雷, 李晓雪, 陈立桥, 刘其根. 上海青草沙水库食物网结构特征分析[J]. 水生生态学杂志, 2019, **40** (2): 47-54 [Hu ZJ, Shi XH, Wu H, Li YL, Li XX, Chen LQ, Liu QG. Food web structure in Qingcaosha Reservoir of Shanghai, China [J]. *J Hydroecol*, 2019, **40** (2): 47-54]
- 12 Hamano T, Hayashi KI, Kubota K, Matsushita H, Tabuchi K. Population structure and feeding behavior of the stomatopod crustacean *Kempina mikado* (Kemp and Chopra, 1921) in the East China Sea [J]. *Fish Sci*, 1996, **62** (3): 397-399
- 13 Graeve M, Kattner G, Wiencke C, Karsten U. Fatty acid composition of Arctic and Antarctic macroalgae: indicator of phylogenetic and trophic relationships [J]. *Mar Ecol Prog Ser*, 2002, **231**: 67-74
- 14 席晓晴, 鲍宝龙, 章守宇. DNA条形码在鱼类胃含物种类鉴定中的应用[J]. 上海海洋大学学报, 2015, **24** (2): 203-210 [Xi XQ, Bao BL, Zhang SY. Application of DNA barcoding in species analysis of fish stomach content [J]. *J Shanghai Ocean Univ*, 2015, **24** (2): 203-210]
- 15 Grey J. The use of stable isotope analyses in freshwater ecology: current awareness [J]. *Pol J Ecol*, 2006, **54** (4): 563-584
- 16 Zanden MJV, Rasmussen JB. Variation in $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ trophic fractionation: implications for aquatic food web studies [J]. *Limnol Oceanogr*, 2001, **46** (8): 2061-2066
- 17 石焱, 何雄波, 李军, 沈忱, 冯晨, 郭峻宏, 招春旭, 康斌. 基于稳定同位素方法的闽江口常见鱼类群落营养结构的季节性变化[J]. 应用生态学报, 2018, **29** (10): 3457-3463 [Shi Y, He XB, Li J, Shen C, Feng C, Guo JH, Zhao CX, Kang B. Seasonal variation in trophic structure of fish community in Minjiang Estuary based on stable isotope technique [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2018, **29** (10): 3457-3463]
- 18 李峥, 魏廷, 马原野, 曾鹏, 杨东辉, 郭旭升, 赵良杰, 黄荣静. 基于稳定同位素技术的南湾水库食物网结构研究[J]. 水产学杂志, 2021, **34** (4): 15-21 [Li Z, Wei T, Ma YY, Zeng P, Yang DH, Guo XS, Zhao LJ, Huang RJ. Food web structure in Nanwan Reservoir based on analysis of carbon and nitrogen stable isotopes [J]. *Chin J Fish*, 2021, **34** (4): 15-21]
- 19 高小迪, 陈新军, 李云凯. 水生食物网研究方法的发展和应用[J]. 中国水产科学, 2018, **25** (6): 1347-1360 [Gao XD, Chen XJ, Li YK. A review on the methods used in aquatic food web research: development and applications [J]. *J Fish Sci China*, 2018, **25** (6): 1347-1360]
- 20 Whitedge GW, Rabeni CF. Energy sources and ecological role of crayfishes in an Ozark stream: insights from stable isotopes and gut analysis [J]. *Can J Fish Aquat Sci*, 1997, **54** (11): 2555-2563
- 21 Wedchaparn O, Zhao LJ, Fan YC, He D, Zhang HY, Ivan LN, Liu QG, Ayisi CL. Comparison of the trophic niches between two planktivorous fishes in two large lakes using stable isotope analysis [J]. *Biochem Syst Ecol*, 2016, **68**: 148-155
- 22 王媛, 徐东坡, 王小林, 沈振华, 徐跑. 基于碳氮稳定同位素技术探究太湖北部湖区鲢、鳙食性差异[J]. 大连海洋大学学报, 2017, **32** (5): 597-602 [Wang Y, Xu DP, Wang XL, Shen ZH, Xu P. Feeding differences of silver carp and bighead carp in the northern part of Taihu Lake: based on stable carbon and nitrogen isotope analysis [J]. *J Dalian Ocean Univ*, 2017, **32** (5): 597-602]
- 23 周正, 米武娟, 许元钊, 宋庆洋, 毕永红. 克氏原螯虾两种养殖模式的食物网结构及其食性比较[J]. 水生生物学报, 2020, **44** (1): 133-142 [Zhou Z, Mi WJ, Xu YZ, Song QY, Bi YH. Feeding habits of *Procambarus clarkia* and food web structure in two different aquaculture systems [J]. *Acta Hydrob Sin*, 2020, **44** (1): 133-142]
- 24 袁泉, 吕巍巍, 黄伟伟, 孙小淋, 吕卫光, 周文宗. 基于碳、氮稳定同位素技术分析黄鳝对稻田饵料资源的利用特征[J]. 上海农业学报, 2021, **37** (6): 91-95 [Yuan Q, Lu WW, Huang WW, Sun XL, Lv WG, Zhou WZ. Analysis of utilization characteristics of *Monopterus albus* to feed resources in rice field based on stable carbon and nitrogen isotopes [J]. *Acta Agric Shanghai*, 2021, **37** (6): 91-95]
- 25 Herwig BR, Wahl DH, Dettmers JM, Soluk DA. Spatial and temporal patterns in the food web structure of a large floodplain river assessed using stable isotopes [J]. *Can J Fish Aquat Sci*, 2007, **64** (3): 495-508
- 26 Araujo-Lima CARM, Forsberg BR, Victoria R, Martinelli L. Energy sources for detritivorous fishes in the Amazon [J]. *Science*, 1986, **234** (4781): 1256-1258
- 27 Fry B. Natural stable carbon isotope tag traces Texas shrimp migrations [J]. *Fish Bull*, 1981, **79** (2): 337-345
- 28 韦丽丽, 周琼, 谢从新, 王军, 李君. 三峡库区重金属的生物富集、生物放大及其生物因子的影响[J]. 环境科学, 2016, **37** (1): 325-334 [Wei LL, Zhou Q, Xie CX, Wang J, Li J. Bioaccumulation and biomagnification of heavy metals in Three Gorges Reservoir and effect of biological factors [J]. *Environ Sci*, 2016, **37** (1): 325-334]
- 29 Min JH, Yun ST, Kim K, Kim HS, Hahn J, Lee KS. Nitrate contamination of alluvial groundwaters in the Nakdong River basin, Korea [J]. *Geosci J*, 2002, **6** (1): 35-46
- 30 Nyilithy B, Mureithi S, Boeckx P. Tracking sources and fate of groundwater nitrate in Kisumu City and Kano Plains, Kenya [J]. *Water*, 2020, **12** (2): 401
- 31 张新, 赵龙, 李亚楠, 王景仕, 李垒. 密云水库主要入库河流氮磷营养盐输入现状分析[J]. 北京水务, 2021 (2): 21-25 [Zhang X, Zhao L, Li YN, Wang JS, Li L. Current situation analysis of nitrogen and phosphorus nutrient input in main inflow rivers of Miyun Reservoir [J]. *Beijing Water*, 2021 (2): 21-25]
- 32 吴晓辉, 吴钢, 潘轲旻, 刘立才. 南水北调来水对密云水库水质和水生生物影响的预测分析[J]. 北京水务, 2015 (6): 4-6 [Wu XH, Wu G, Pan KM, Liu LC. Predicting analysis on impact of incoming water from South-to-North water transfer project on water quality and aquatic organisms in Miyun Reservoir [J]. *Beijing Water*, 2015 (6): 4-6]
- 33 王景仕, 薛新娟. 密云水库总氮时空变化及与蓄水量关系分析[J]. 北京水务, 2020 (S1): 31-35 [Wang JS, Xue XJ. Analysis of temporal and spatial variation of total nitrogen and its relationship with water storage in Miyun Reservoir [J]. *Beijing Water*, 2020 (S1): 31-35]
- 34 梁勇, 王荣臣, 李翌, 郭久波, 肖研, 刘云鹏. 密云水库滤藻鱼类增殖放流对水生态环境影响分析[J]. 北京水务, 2020 (S1): 60-63 [Liang Y, Wang RC, Li Z, Guo JB, Xiao Y, Liu YP. Analysis on the impact of filter-algae fish proliferation and release on water ecological environment in Miyun Reservoir [J]. *Beijing Water*, 2020 (S1): 60-63]
- 35 贾成霞, 张清靖, 曲疆奇, 王增立, 许赞焕, 刘盼, 杨慕. 北京地区增殖放流鲢、鳙的净水效果评估[J]. 水产科技情报, 2015, **42** (1): 11-15+19 [Jia CX, Zhang QJ, Qu JQ, Wang ZL, Xu ZH, Liu P, Yang M. Evaluation of water purification effects of enhancement and release of *Hypophthalmichthys molitrix* and *Aristichthys nobilis* in Beijing [J]. *Fish Sci Technol Inf*, 2015, **42** (1): 11-15+19]
- 36 李昌, 张新, 赵龙, 李垒, 王景仕, 李亚楠. 基于Ecopath模型的密云水库生态系统结构与物质流动特征[J]. 生物资源, 2021, **43** (3): 292-302 [Li C, Zhang X, Zhao L, Li L, Wang JS, Li YN. Ecosystem structure and material flows of Miyun Reservoir based on the Ecopath model [J]. *Biot Resour*, 2021, **43** (3): 292-302]
- 37 周正, 黄宇波, 王斌梁, 米武娟, 宋庆洋, 许元钊, 毕永红. 运用稳定同位素技术分析三峡坝前水域的食物网结构[J]. 生态科学, 2020, **39** (5): 82-90 [Zhou Z, Huang YB, Wang BL, Mi WJ, Song QY, Xu YZ, Bi YH. The analysis of food web structure in the area in front of the Three Gorges Dam using the stable isotope technology [J]. *Ecol Sci*, 2020, **39** (5): 82-90]
- 38 谢青, 徐勤勤, 王永敏, 孙涛, 樊宇飞, 刘伟豪, 王定勇. 三峡水库与长寿湖水库鱼类碳、氮稳定同位素特征及营养级的比较[J]. 湖泊科学, 2019, **31** (3): 837-845 [Xie Q, Xu QQ, Wang YM, Sun T, Fan YF, Liu WH, Wang DY. Stable isotope value and trophic position of fishes in

- Three Gorges Reservoir and Changshou Reservoir [J]. *J Lake Sci*, 2019, **31** (3): 837-845]
- 39 徐军, 王玉玉, 王康, 曾庆飞, 张敏, 张欢. 水域生态学中生物稳定同位素样品采集、处理与保存[J]. 水生生物学报, 2020, **44** (5): 989-997 [Xu J, Wang YY, Wang K, Zeng QF, Zhang M, Zhang H. Protocols for sample collection, pretreatment and preservation of aquatic organisms in stable isotope ecology [J]. *Acta Hydrob Sin*, 2020, **44** (5): 989-997]
 - 40 王鸿媛. 北京鱼类志[M]. 北京: 北京出版社, 1984 [Wang HY. *Fishes of Beijing* [M]. Beijing: Beijing Press, 1984]
 - 41 张春光, 赵亚辉. 北京及其邻近地区的鱼类[M]. 北京: 科学出版社, 2013 [Zhang CG, Zhao YH. *Fishes in Beijing and adjacent areas, China* [M]. Beijing: Science Press, 2013]
 - 42 DeNiro MJ, Epstein S. Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1978, **42** (5): 495-506
 - 43 Xu J, Xie P. Studies on the food web structure of Lake Donghu using stable carbon and nitrogen isotope ratios[J]. *J Freshw Ecol*, 2004, **19** (4): 645-650
 - 44 Post DM. The long and short of food-chain length [J]. *Trends Ecol Evol*, 2002, **17** (6): 269-277
 - 45 Layman CA, Arrington DA, Montaña CG, Post DM. Can stable isotope ratios provide for community-wide measures of trophic structure? [J]. *Ecology*, 2007, **88** (1): 42-48
 - 46 Jackson AL, Inger R, Parnell AC, Bearhop S. Comparing isotopic niche widths among and within communities: SIBER-Stable Isotope Bayesian Ellipses in R [J]. *J Anim Ecol*, 2011, **80** (3): 595-602
 - 47 曲疆奇, 张清靖, 贾成霞, 王增立, 许赞焕, 刘盼, 杨慕. 基于回声探测法的密云水库鱼类资源空间分布特征评估[J]. 水产科技情报, 2015, **42** (5): 234-238 [Qu JQ, Zhang QJ, Jia CX, Wang ZL, Xu ZH, Liu P, Yang M. Assessment of spatial distribution characteristics of fish resources in Miyun Reservoir based on echo sounding method [J]. *Fish Sci Technol Inf*, 2015, **42** (5): 234-238]
 - 48 徐雷. 北京密云水库及上游潮、白河鱼类群落多样性及生长特性[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017 [Xu L. Community diversity and growth characteristics of fish in the Miyun Reservoir and its upstream Chaohe River and Baihe River in Beijing [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017]
 - 49 郭久波, 刘海波, 赵亚辉. 北京密云水库鱼类多样性的历史演替[R]. 成都: 中国生态学会, 2017 [Guo JB, Liu HB, Zhao YH. Historical succession of fish diversity in Miyun Reservoir, Beijing [R]. Chendu: Ecological Society of China, 2017]
 - 50 刘忱. 密云水库氮素分布特征及污染源解析研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021 [Liu C. Distribution characteristics of nitrogen and analysis of pollution sources in Miyun Reservoir [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021]
 - 51 Peterson BJ. Stable isotopes as tracers of organic matter input and transfer in benthic food webs: a review [J]. *Acta Oecol*, 1999, **20** (4): 479-487
 - 52 唐启升, 韩冬, 毛玉泽, 张文兵, 单秀娟. 中国水产养殖种类组成、不投饵率和营养级[J]. 中国水产科学, 2016, **23** (4): 729-758 [Tang QQ, Han D, Mao YZ, Zhang WB, Shan XJ. Species composition, non-fed rate and trophic level of Chinese aquaculture [J]. *J Fish Sci China*, 2016, **23** (4): 729-758]
 - 53 徐军, 张敏, 谢平. 氮稳定同位素基线的可变性及对营养级评价的影响[J]. 湖泊科学, 2010, **22** (1): 8-20 [Xu J, Zhang M, Xie P. Variability of stable nitrogen isotopic baselines and its consequence for trophic modeling [J]. *J Lake Sci*, 2010, **22** (1): 8-20]
 - 54 Worm B, Lotze HK, Hillebrand H, Sommer U. Consumer versus resource control of species diversity and ecosystem functioning [J]. *Nature*, 2002, **417** (6891): 848-851
 - 55 王玉玉, 徐军, 雷光春. 食物链长度远因与近因研究进展综述[J]. 生态学报, 2013, **33** (19): 5990-5996 [Wang YY, Xu J, Lei GC. Proximate and ultimate determinants of food chain length [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, **33** (19): 5990-5996]
 - 56 Doi H. Resource productivity and availability impacts for food-chain length [J]. *Ecol Res*, 2012, **27**: 521-527
 - 57 李为, 刘家寿, 叶少文, 林明利, 苑晶, 李钟杰, 张堂林. 大水面鳊增殖放流技术及效果评估研究进展[J]. 中国水产科学, 2021, **28** (6): 808-818 [Li W, Liu JS, Ye SW, Lin ML, Yuan J, Li ZJ, Zhang TL. Research progress on technique and effect evaluation of mandarin fish stock enhancement in large water bodies [J]. *J Fish Sci China*, 2021, **28** (6): 808-818]
 - 58 Jake VZM, Fetzer WW. Global patterns of aquatic food chain length [J]. *Oikos*, 2007, **116** (8): 1378-1388
 - 59 Arim M, Abades SR, Laufer G, Loureiro M, Marquet PA. Food web structure and body size: trophic position and resource acquisition [J]. *Oikos*, 2010, **119** (1): 147-153
 - 60 刘焕亮, 崔和, 李立萍, 孙长铭, 朱文慧. 鲮滤食器官胚后发育生物学的研究[J]. 大连水产学院学报, 1992, **7** (1): 1-10 [Liu HL, Cui H, Li LP, Sun CM, Zhu WH. A study on the biology of post-larval development of the filterling apparatus in bighead carp [J]. *J Dalian Fish coll*, 1992, **7** (1): 1-10]
 - 61 刘焕亮, 李梦河, 李立萍, 朱文慧. 鲮滤食器官胚后发育生物学的研究[J]. 大连水产学院学报, 1993, **8** (2-3): 1-19 [Liu HL, Li MH, Li LP, Zhu WH. A study on the biology of post-larval development of the filterling apparatus in silver carp [J]. *J Dalian Fish coll*, 1993, **8** (2-3): 1-19]
 - 62 李宝林, 王玉婷. 达赉湖的鳊条鱼生物学[J]. 水产学杂志, 1995, **8** (2): 46-49 [Li BL, Wang YT. Biology of *Hemiculter leucisculus* in Lake DaLai [J]. *Chin J Fish*, 1995, **8** (2): 46-49]
 - 63 钟全福, 樊海平, 叶小军. 马口鱼的研究现状及开发利用进展[J]. 江苏农业科学, 2020, **48** (24): 37-41 [Zhong QF, Fan HP, Ye XJ. Research status and utilization progress of *Opsariichthys bidens* [J]. *Jiangsu Agric Sci*, 2020, **48** (24): 37-41]
 - 64 王媛, 凡迎春, 徐东坡. 大溪水库和沙河水库主要鱼类营养结构的时空变化[J]. 生态学报, 2021, **41** (8): 3215-3225 [Wang Y, Fan YC, Xu DP. Temporal and spatial variations in the trophic structure of key species in Daxi and Shahe Reservoir [J]. *Acta Ecol Sin*, 2021, **41** (8): 3215-3225]
 - 65 吴佳佳. 鄱阳湖洪泛湿地水生食物网结构和动态[D]. 南昌: 南昌大学, 2021 [Wu JJ. Aquatic food web structure and dynamics in the floodplain of Poyang Lake [D]. Nanchang: Nanchang University, 2021]
 - 66 Gao J, Zhong P, Ning J, Liu ZW, Jeppesen E. Herbivory of omnivorous fish shapes the food web structure of a Chinese tropical eutrophic lake: evidence from stable isotope and fish gut content analyses [J]. *Water*, 2017, **9** (1): 69-90
 - 67 党承林, 黄瑞复. 生态系统的冗余与营养结构模型[J]. 生态学杂志, 1997 (4): 40-47 [Dang CL, Huang RF. Redundancy in ecosystems and the model for trophic structure [J]. *Chin J Ecol*, 1997 (4): 40-47]
 - 68 郭雅倩, 薛建辉, 吴永波, 周之栋, 华建峰. 沉水植物对富营养化水体的净化作用及修复技术研究进展[J]. 植物资源与环境学报, 2020, **29** (3): 58-68 [Guo YQ, Xue JH, Wu YB, Zhou ZD, Hua JF. Research progress on purification effects and restoration technologies of submerged macrophytes on eutrophic water [J]. *J Plant Resour Environ*, 2020, **29** (3): 58-68]
 - 69 吴振斌. 水生植物与水体生态修复[M]. 北京: 科学出版社, 2011 [Wu ZB. *Macrophyte and aquatic ecological restoration* [M]. Beijing: Science Press, 2011]
 - 70 黄邦星. 黄尾密鲮生物学特性及养殖技术[J]. 水产养殖, 2006, (3): 32-34 [Huang BX. Biological characteristics and aquaculture techniques of *Xenocypris davidi* [J]. *J Aquac*, 2006, (3): 32-34]
 - 71 易雨君, 张尚弘. 水生生物栖息地模拟方法及模型综述[J]. 中国科学: 技术科学, 2019, **49** (4): 363-377 [Yi YJ, Zhang SH. Review of aquatic species habitat simulation method and modelling [J]. *Sci China Technol Sci*, 2019, **49** (4): 363-377]