



# 中国北方大型饮用水源水库水生生物多样性及 优水渔业技术研究综述

赵文

(大连海洋大学 水产与生命学院, 辽宁省水生生物学重点实验室, 辽宁 大连 116023)

**摘要:** 饮用水源水库面临水体富营养化污染威胁, 水质和生物协调的优水渔业是防控水污染的有效途径。本研究通过笔者 20 年来的调查资料并结合相关文献, 对中国北方大型饮用水源水库水生生物多样性特征和优水渔业技术研究进展进行了综述。北方大型水库优水渔业技术是以非经典的生物操纵为主的多元生物操纵, 存在特定水库适宜模型开发和精细化管控等问题, 应建立优水渔业多功能协同优化模型, 调控水质和水生生物资源, 实施优水渔业管理的精细化和智慧化。研究表明, 优水渔业是饮用水源水库生态绿色可持续发展的有效模式, 未来需通过多手段智慧调控, 实现饮用水安全和渔业的可持续绿色高质量发展。

**关键词:** 水生生物; 生物多样性; 群落特征; 水质; 生物操纵; 模型; 优水渔业; 北方大型饮用水源水库  
**中图分类号:** S 932 **文献标志码:** A

优水渔业 (high quality water fishery, HQWF) 作为水源水库重要的研究领域, 一直被广大研究者提及并在许多水源水库中加以应用, 优水渔业的目的在于保证水质优良情况下, 提高渔业经济效益, 同时实现经济发展、资源可持续性利用和环境保护的统一, 这与“生态渔业 (ecological fishery)”“保水渔业 (water conservation fishery)”或“洁水渔业 (water purification fishery)”的概念基本一致, 是强调“优水”为目的大水面生态渔业的方式<sup>[1]</sup>。

水是人类宝贵的自然资源, 随着国民经济和工农业的飞速发展, 人类社会对淡水的需求逐年增大。地球号称“水的行星”, 其表面有 71% 的面积被水覆盖, 世界水资源总量达  $15 \times 10^8 \text{ km}^3$ , 与海水相比, 淡水仅占地球表面较小的比例, 但是它对人类的重要性却是无与伦比的。据统计, 地球上咸水占 97.47%, 而淡水仅占 2.53%, 且这小部分淡水还包括占 70% 以上人类目前尚无法利用的南北两极的冰山和冰河, 以及深度在 750 m 以下的地下水, 故人类能利用的淡水仅占地球总储水量的 0.75%。因此, 世界各国对淡水资源都非常重视。

人工水库多为河流拦河筑坝而成, 兼具河流和湖泊的特点, 属于半流动的水体, 具有供水、发电、灌溉、防洪等用途, 水库因所处地理环境不同, 其物理、化学和生物学情况也有所差异, 因此水库生态系统在水域生态系统研究中具有特殊作用<sup>[2]</sup>。

笔者基于近 20 年的研究结果, 并结合相关文献, 对大型饮用水源水库水生生物多样性及优水渔业技术研究与实践进行了综述, 讨论了北方大型饮用水源水库 (库容大于  $1 \times 10^8 \text{ m}^3$ ) 优水渔业存在的问题及解决途径, 以期为深入开展大水面生态渔业或“淡水牧场”提供科学参考。

## 1 饮用水源水库优水渔业的技术原理

优水渔业最终目的是保证水库水质优良, 水质调控是其主要技术措施, 优水渔业技术原理是水域生态系统的生物操纵。生物操纵 (biomanipulation) 为 Shapiro 等<sup>[3]</sup>首次提出, 即通过调整生物群落结构控制藻类繁殖。该技术以食物网调控为核心, 主要用于治理水体富营养化。从广义上看, 生物操纵即是下行效应 (top-down effect), 即通过放养较高级生态位的鱼类贝类控制较低生态位的藻类, 从而

收稿日期: 2026-01-13

基金项目: 大连市蓝色领军人才项目; 汤河水库 (2023—2026)、柴河水库 (2023—2026)、观音阁水库 (2024—2026)、青山水库 (2021—2025) - 水库渔业资源调查评估和渔业发展规划

作者简介: 赵文 (1963—), 男, 教授, 博士生导师。E-mail: zhaowen@dlou.edu.cn

对水质产生影响, 又称为营养级联效应 ( trophic cascade interaction ) 或食物网操纵 ( food web manipulation )。生物操纵包括经典生物操纵 ( traditional biomanipulation ) 和非经典生物操纵 ( non-traditional biomanipulation )<sup>[4-8]</sup>。经典生物操纵主要是通过放养或增殖肉食性鱼类捕食浮游动物食性鱼类或直接人工去除浮游动物食性鱼类, 使浮游动物如枝角类种群增长, 从而减少浮游植物生物量, 提高水体透明度, 改善水质。非经典的生物操纵就是利用食浮游植物鱼类 [ 如鲢 ( *Hypophthalmichthys molitrix* )、鳙 ( *Aristichthys nobilis* ) ] 和软体动物 [ 如无齿蚌 ( *Anodonta woodiana* )、三角帆蚌 ( *Hyriopsis cumingii* ) ] 直接滤食浮游植物, 从而控制水体的富营养化。

经典生物操纵依赖浮游动物如枝角类, 一般很难滤取 40  $\mu\text{m}$  以下较小的浮游植物, 因此无法控制蓝藻群体<sup>[9]</sup>, 而鲢、鳙可滤食 10  $\mu\text{m}$  或 2~3 mm 的浮游植物, 滤食性贝类如壳长 10 cm 无齿蚌, 每天可滤除 60 L 水 ( 20  $^{\circ}\text{C}$  )。北方大型饮用水源水库优水渔业技术主要围绕非经典的生物操纵来实施。因此, 北方饮用水源水库的优水渔业技术措施主要有如下几个方面。

1) 治理水库周边生态环境, 切断污染源, 保护好水库渔业资源, 避免人为偷盗造成经济损失或影响优水效果。

2) 放养滤食性鲢、鳙, 根据调查结果, 确定水库的富营养化程度, 评估鱼产力, 根据鱼产力确定鲢、鳙的放养量、比例和规格, 并合理捕捞, 捕大留小, 轮捕轮放。

3) 放养螺、蚌等软体动物。螺、蚌类等均以浮游生物为主要食物, 其不间断滤食浮游植物有助于降低藻类密度和提高水体透明度。如在太湖、滇池、茜坑水库等开展的贝类控藻与净化水质研究, 发现不同贝类可有效滤食浮游植物, 并可有效补充滤食性鱼类调控效果。由于水库水位波动较大, 北方冬季寒冷结冰, 一般沿岸区螺蚌因冻结或干露不易存活, 影响净水效果。

4) 其他优水技术措施, 包括建设人工湿地、种植沉水植物、浮筏种菜, 以及围栏或网箱养殖等。人工湿地一般都在浅水区施工建成, 水库因供水、灌溉、干旱等水位波动较大, 湿地难以正常发挥功能。种植沉水植物, 选择适宜栽种植物种类很重要, 一般可选用伊乐藻 ( *Elodea nuttallii* )、苦草 ( *Vallisneria spiralis* )、眼子菜 ( *Potamogeton distictus* ) 等。实践证明, 饮用水源水库种草、种菜净

水现仅限于实验室和小规模试验阶段, 有的水库 ( 如天津于桥水库 ) 曾因菹草 ( *Potamogeton crispus* ) 泛滥成灾需要加强治理<sup>[10]</sup>。网箱养殖在水源水库属于禁止范畴, 但在特殊情况下可利用不投饵网箱养殖滤食性鱼类对有害藻华进行应急治理。

针对不同水库存在的生态问题, 基于鱼类、饵料生物和水质特征, 也需“一水一策”采取不同的组合调控策略, 即采用多元生物操纵, 提高调控效率, 共同重构生态系统结构, 发挥其生态服务功能, 达到优水目的。

## 2 大型饮用水源水库水生生物多样性特征

### 2.1 浮游细菌丰度和多样性

浮游细菌是水域生态系统中重要的生产者和分解者, 细菌的数量庞大且种类丰富, 是食物链与食物网的重要组成部分, 在物质循环、能量流动和信息联系中起着重要作用。因此, 水体浮游细菌丰度是水环境质量评价和鱼产力评估中的重要监测指标。作为生活饮用水而言, 微生物指标有 3 项, 即总大肠菌群和大肠埃希氏菌 ( *Escherichia coli* ) ( MPN/100 mL 或 CFU/100 mL ) 为未检出, 菌落总数限值为 100 ( MPN/100 mL 或 CFU/100 mL )。标准中并未规定浮游细菌丰度或生物量限值。北方典型大型饮用水源水库近 20 年来浮游细菌丰度汇总见附表 1。从附表 1 可见, 不同水库浮游细菌丰度存在差异, 有的相差 5 个数量级<sup>[1,11-14]</sup>, 如白石水库细菌丰度达  $6.23 \times 10^{10}$  cells/L, 新立城、汤河、柴河、观音阁、青山 5 座水库近年测得的细菌总数依次为  $0.51 \times 10^7$ 、 $1.88 \times 10^7$ 、 $1.32 \times 10^7$ 、 $1.11 \times 10^7$ 、 $13.20 \times 10^7$  cells/L。同一座水库不同年份浮游细菌差异较大, 如大伙房水库年际间浮游细菌丰度相差 1~2 个数量级。

近 10 年来, 利用 16S rDNA 测序技术研究水库细菌多样性和环境驱动积累了一些资料<sup>[15-17]</sup>。以碧流河水库为例, 王欢等<sup>[15]</sup>利用 16S rDNA 高通量测序技术和 RDA 分析方法研究了碧流河水库浮游细菌群落结构的季节性变化及其相关环境因子的关系。香农-维纳多样性指数分析结果表明, 细菌的群落多样性在冬季最低, 秋季最高, 菌群结构组成上冬春季与夏秋季存在差异, 主要菌门为变形菌门 ( Proteobacteria )、蓝藻门 ( Cyanophyta )、放线菌门 ( Actinobacteria ) 和拟杆菌门 ( Bacteroidetes )。RDA 分析结果显示, 总悬浮固体 ( TSS )、透明度

(SD)、pH、三磷酸腺苷 (ADP)、溶解氧 (DO)、总磷 (TP)、亚硝态氮 ( $\text{NO}_2\text{-N}$ ) 与微生物菌群多样性具有相关性, 为影响群落结构最显著的环境因子。Spearman 分析结果表明, 微生物物种丰富度与各个环境因子之间关系紧密。上述研究解释了碧流河水库细菌群落构成与环境因子的相关性, 为饮用水源水库水质管理提供了重要数据, 但如何将这些信息有效用于监控水质有待进一步研究。

## 2.2 大型饮用水源水库浮游植物群落结构特征

浮游植物 (phytoplankton) 是水域生态系统中生物群落的重要组成部分, 属初级生产者, 是滤食性动物的天然饵料, 其种类组成、密度和生物量将直接或间接影响水域生态系统的结构与功能<sup>[18]</sup>。浮游植物的群落结构及演替与水体理化因子、动物群落、微生物多样性等密切相关。因此, 浮游植物群落结构可作为水质监测的重要参考依据, 同时结合浮游动物可确定浮游生物对鱼类产量变化的影响。研究表明, 北方大型水库浮游植物的优势种及其季节演替与北温带湖泊浮游植物群落演替特征<sup>[2]</sup>相似。北方大型饮用水源水库主要的优势种有蓝藻中的点状黏球藻 (*Gloeocapsa punctata*)、针晶蓝纤维藻 (*Dactylococcopsis raphidioides*)、链状伪鱼腥藻 (*Pseudanabaena catenata*) 和小型色球藻 (*Chroococcus minor*), 硅藻中的尖齿骨藻 (*Ulnaria acus*) [即尖脆杆藻 (*Fragilaria acus*) 或尖针杆藻 (*Synedra acus*)]、条纹小环藻 (*Cyclotella striata* var. *striata*)、克洛脆杆藻 (*Fragilaria crotonensis*)、小环藻 (*Cyclotella* sp.), 金藻类的变形色金藻 (*Chromulina pascheri*), 隐藻门的尖尾蓝隐藻 (*Chroomonas acuta*)、啮蚀隐藻 (*Cryptomonas erosa*), 绿藻门中的普通小球藻 (*Chlorella vulgaris*)、椭圆小球藻 (*Chlorella ellipsoidea*)、蛋白核异养小球藻 (*Auxenochlorella pyrenoidosa*) [即蛋白核小球藻 (*Chlorella pyrenoidosa*)]、阿库栅藻 (*Scenedesmus acunae*)、多瑙河针胞藻 (*Raphidocelis danubiana*) [即扭曲蹄形藻 (*Kirchneriella contorta*)] 和湖生卵囊藻 (*Oocystis lacustris*)、小形卵囊藻 (*O. parva*)。

北方典型大型水库近 20 年浮游植物群落结构特征总结见附表 2<sup>[1,14,19-27]</sup>。从附表 2 可见, 浮游植物密度为  $0.07 \sim 12.2 \times 10^7$  ind./L, 生物量为  $0.97 \sim 12.06$  mg/L, 生物量优势类群多样, 多为硅藻-绿藻型或硅藻-隐藻型。种类数为 72~331 种。香农维纳多样性指数为 1.11~4.29, 均匀度指数为

0.36~0.82。

饮用水源水库除了以鱼控藻防治水体富营养化污染外, 还要预防有害水华、藻毒素和异味物质发生。预防蓝藻水华是重中之重, 据 Algaebase 网站 (2026 年 1 月) 统计<sup>[28]</sup>, 世界上蓝藻有 6 186 种。因蓝藻有喜高温耐强光, 以及偏爱高碱度、高 pH、低氮高磷等生态特点, 故在富营养化严重的水库可能暴发蓝藻水华。能形成蓝藻水华的种类主要有微囊藻 (*Microcystis*)、鱼腥藻 (*Anabaena*)、长孢藻属 (*Dolichospermum*)、伪鱼腥藻 (*Pseudanabaena*)、颤藻 (*Oscillatoria*)、平裂藻 (*Merismopedtia*)、束丝藻 (*Aphanizomenon*)、拟鱼腥藻 (*Anabaenopsis*)、湖旋藻 (*Limnospira*)、拟柱胞藻 (*Cylindrospermopsis*)、节球藻 (*Nodularia*)、细鞘丝藻 (*Leptolyngbya*)、鞘丝藻 (*Lyngbya*)、浮鞘丝藻 (*Planktolynngbya*)、微鞘藻 (*Microcoleus*) 及浮游蓝丝藻 (*Planktothrix*) 等。中国则以铜绿微囊藻 (*M. aeruginosa*)、水华微囊藻 (*M. flos-aquae*)、螺旋长胞藻 (*D. spirodes*) 和水华束丝藻 (*A. flos-aquae*) 最为常见。由于分布的广泛性和危害性, 微囊藻水华是目前最受关注且研究最多的一种藻类水华。近年来, 饮用水源水库中伪鱼腥藻的水华危害已引起广泛关注。此外, 世界卫生组织 (WHO) 指定的饮用水中蓝藻毒素的控制标准为  $1 \mu\text{g/L}$ <sup>[11]</sup>。2 种异味物质二甲基异茨醇 (2-Mib) 和土臭素均被列入中国《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022) 水质扩展指标和《饮用水源地水环境质量标准》特定项目指标, 前者规定二者限值均为  $0.000 01$  mg/L, 后者规定限值均为  $0.000 02$  mg/L。

## 2.3 大型饮用水源水库浮游动物群落结构特征

浮游动物 (zooplankton) 是指在水体中营浮游生活的微小动物。它是水域生态系统的初级消费者, 其中的微型和小型个体也是水域生态系统能流的重要中间环节。淡水浮游动物包括原生动物 (protozoa)、轮虫 (Rotifera)、枝角类 (Cladocera) 和桡足类 (Copepoda) 四大类群, 不同种类的浮游动物对水环境的适应能力是不同的, 所以可将其群落结构的变化及其多样性作为监测、评估水域生态系统性能的重要手段和途径。由于浮游动物对环境变化敏感, 研究中常将浮游动物作为反映水库环境变化的理想研究对象, 浮游动物的种类组成、密度及生物量变动, 更能反映水库水体的富营养化程度。浮游动物在水域生态系统的结构和功能中起着

重要的调控作用,它可通过摄食控制浮游植物的数量来调节水体生态平衡,同时其又是许多经济水产动物的饵料,因而浮游动物的数量变化可以直接影响渔业资源量。

研究表明,水域生态系统中浮游动物群落结构特别是其种群数量的季节变化与浮游植物、浮游细菌及腐质密切相关,且与水温季节变化、其本身生活史阶段及浮游动物食性鱼类的摄食压力也有关联。本文涉及的水库均位于北温带,水库浮游动物群落演替与北温带淡水湖泊相似,水库的浮游动物变化会呈现一定的规律性。桡足类是全年出现,冬季在冰下水层越冬,春季则随着水温升高和营养条件好转大量增长成为优势种,如碧流河水库<sup>[1]</sup>。北方大型饮用水源水库桡足类的常见种有汤匙华哲水蚤 (*Sinocalanus dorrii*)、近邻剑水蚤 (*Cyclops vicinus*)、台湾温剑水蚤 (*Thermocyclops taihokuensis*)、广布中剑水蚤 (*Mesocyclops leuckarti*)、扁平小剑水蚤 (*Microcyclops venoi*)、锯缘真剑水蚤 (*Eucyclops serrulatus*) 等。由于桡足类生命周期较长,繁殖较慢,其优势在夏季往往被多行孤雌生殖的枝角类所取代。枝角类常见种有长肢秀体溞 (*Diaphanosoma leuchtenbergianum*)、短尾秀体溞 (*D. brachyurum*)、透明溞 (*Daphnia hyalina*)、长额象鼻溞 (*Bosmina longirostris*)、微型裸腹溞 (*Moina micrura*)、角突网纹溞 (*Ceriodaphnia cornuta*)、圆形盘肠溞 (*Chydorus sphaericus*) 等,大多以冬卵越冬,冬卵要经过一段时间滞育并积累一定热量后才开始孵化,必须到春末夏初才出现较多的成体。夏季水温高,食物充足,孤雌生殖速度很快,种群数量迅速达到高峰。秋季降温以后又形成冬卵数量急减而至于绝迹。轮虫全年出现,与浮游植物数量成正比,在枝角类开始消退的秋季较多<sup>[1-2]</sup>。轮虫优势种较多,主要有前节晶囊轮虫 (*Asplachna priodonta*)、裂痕龟纹轮虫 (*Anuraeopsis fissa*)、广生多肢轮虫 (*Polyarthra vulgaris*)、暗小异尾轮虫 (*Trichocerca pusilla*)、等刺异尾轮虫 (*T. stylata*)、螺形龟甲轮虫 (*Keratella cochlearis*)、角突臂尾轮虫 (*Brachionus angularis*)、长圆疣毛轮虫 (*Synchaeta oblonga*)、尖尾疣毛轮虫 (*Synchaeta stylata*)、奇异六腕轮虫 (*Hexarthra mira*)、叉角聚花轮虫 (*Conochilus dossuarius*)。湖泊水库中的原生动物通常春秋各有一个高峰<sup>[29]</sup>。大型水库常见的原生动物优势种有绿色前管虫 (*Prorodon virides*)、小单环栉毛虫 (*Didinium balbianii nanum*)、团焰毛虫 (*Askenasia volvox*)、贪食射纤虫 (*Acti-*

*nobolina vorax*)、钟形钟虫 (*Vorticella campanula*)、湖累枝虫 (*Epistylis lacustris*)、旋回侠盗虫 (*Strobilidium gyrans*)、陀螺侠盗虫 (*Strobilidium velox*)、绿急游虫 (*Strombidium viride*)、中华拟铃壳虫 (*Tintinnopsis sinensis*) 等。

北方大型水库浮游动物群落结构近 20 年来的研究结果<sup>[1,9,20,25,27,30-33]</sup> 汇总见附表 3。由附表 3 可见,浮游动物密度为 137~4 497 ind./L,生物量为 0.36~7.50 mg/L,生物量优势类群多为轮虫。种类数为 42~222 种。香农维纳多样性指数为 1.83~4.33,均匀度指数为 0.55~0.78。浮游植物与浮游动物生物量比值 (PB/ZP) 为 0.78~11.31。

## 2.4 大型饮用水源水库底栖动物群落结构特征

通常栖息于水域底部且不能通过 500 μm 孔径筛网的动物类群称为大型底栖动物 (macroenthos),底栖动物是水域生态系统中的重要组成部分,在水域生态系统中起着非常重要的作用。在水体净化方面,底栖动物能在水体底部翻匀底质,加速腐质分解,使得腐质再循环,有助于水体内的物质循环和能量流动,促进水体自净。在渔业生产中,大型底栖动物控制着藻类的生物量,是初级生产力和鱼类的一个关键链接。在水环境监测中,底栖动物的寿命较长,迁移能力有限,且包括敏感种和耐污种,常有“水下哨兵”之称,能长期监测有机污染物的慢性排放。总之,研究底栖动物不仅能了解水域生态系统的物质循环和能量流动,还可为缓解水体富营养化及渔业资源的可持续利用等提供帮助。

北方典型水源水库底栖动物群落特征汇总见附表 4。从附表 4 可见,北方大型饮用水源水库底栖动物种类和丰度相对贫乏<sup>[1,23,25,34-39]</sup>,这与水库水深、底层鱼类摄食压力较大有关。常见的优势种主要是环节动物门的水丝蚓 (*Limnodrilus* spp.)、苏氏尾鳃蚓 (*Brachiuro sowerbyi*)、节肢动物门的摇蚊幼虫。摇蚊幼虫优势种为前突摇蚊 B 种 (*Procladius* sp. B)、红裸须摇蚊 (*Prosilocerus akamusi*)、苍白摇蚊 (*Chironomus pallidivittatus*)、菱跗摇蚊 A 种 (*Clintanypus* sp. A)。此外还有甲壳动物亚门的日本沼虾 (*Macrobrachium nipponense*)、中华锯齿米虾 (*Neocaridina denticuklate sinensis*) 等;软体动物门的铜锈环棱螺 (*Bellamya aeruginosa*)、背角无齿蚌、三角帆蚌等。

在吉林省长春市新立城水库 2020—2022 年调查中,发现底栖动物 14 种,新立城水库底栖动物

密度为 149 ind./L, 平均生物量为 1.10 g/m<sup>2</sup>。桓仁水库 2015—2018 年调查结果表明, 该水库有 33 种底栖动物, 密度为 221.45 ind./m<sup>2</sup>, 平均生物量为 4.51 g/m<sup>2</sup>, 多样性指数为 1.2, 均匀度指数为 0.72<sup>[23]</sup>。

## 2.5 大型饮用水源水库水生大型植物的群落结构特征

水生大型植物是水域生态系统初级生产者的重要组成部分, 能够发挥多种生态功能, 如通过光合作用将光能转化为化学能, 并向周围环境释放氧气, 储存和转化水体中的植物营养物质, 去除污染物, 抑制低等藻类的生长, 促进水中其他水生生物的代谢等。在水域生态系统中, 水生大型植物是草食性动物的天然饵料, 也是一些产黏性卵鱼类的天然鱼巢。水生植物的恢复与重建在淡水生态系统的稳态转化(从浊水到清水)中具有重要作用, 是水生态修复的主要措施。水生大型植物能够为水体中的各类动物提供食物和栖息地, 还能通过过滤和吸附水体中污染物起到净化水质作用, 因而能在一定程度上反映水体生态系统的健康状况。

大型饮用水源水库由于水较深、水位波动大且有草食性鱼类摄食, 水生大型植物较为贫乏, 少量的水草多分布于水库上游浅水处和水库周边沿岸带。以密云水库、碧流河水库和新立城水库为例, 总结北方大型水库水草物种多样性特点如下。笔者自 2016—2023 年对密云水库水草进行了 6 次调查, 结果表明, 密云水库水生维管束植物(不包括湿生草本)有 18 种, 即芦苇 (*Phragmites australias*)、头状穗莎草 (*Cyperus glomeratus*)、水蓼 (*Polygonum hydropiper*)、红蓼 (*Polygonum orientale*)、野菱 (*Trapa incisa*)、穗状狐尾藻 (*Myriophyllum spicatum*)、紫萍 (*Spirodela polyrhiza*)、翼果苔草 (*Carex neurocarpa*)、荻 (*Miscanthus sacchariflorus*)、水芹 (*Oenanthe javanica*)、千屈菜 (*Lythrum salicaria*)、酸模叶蓼 (*Polygonum lapathifolium*)、毛茛 (*Ranunculus japonicas*)、槐叶苹 (*Salvinia natans*)、大狼把草 (*Bidens tripartita*)、沼生薹菜 (*Rorippa palustris*)、狭叶香蒲 (*Typha angustifolia*)、荇菜 (*Nymphoides peltatum*)。碧流河水库共发现大型水生植物 24 种<sup>[1]</sup>, 其中漂浮植物 1 种, 沉水植物 7 种, 挺水植物 16 种。碧流河库区下游河道地区物种最为丰富, 共发现 21 种, 碧流河库区大坝和周围沿岸发现 4 种, 碧流河上游河道发现 12 种。与其他北方大型山谷型水库一样,

碧流河水库库区水生维管束植物种类较少, 主要为芦苇、狭叶香蒲、水蓼等挺水植物, 沉水植物有穗状狐尾藻和轮叶黑藻 (*Hydrilla verticillata*) 等。笔者 2020—2022 年在新立城水库的调查结果显示, 新立城水库有水草 32 种, 其中挺水植物 23 种, 沉水植物 5 种, 漂浮植物和浮叶植物各 2 种。上游湿地分布较多, 常见种有芦苇、酸模叶蓼、菹草、酸模叶蓼、野菱、菖蒲和莲 (*Nelumbo nucifera*)。

## 2.6 大型饮用水源水库鱼类群落结构特征

大型饮用水源水库鱼类多样性既是水库水质的“生态指示剂”, 也是“优水渔业”的物质基础。附表 5 汇总了近 10 年来 10 座北方典型水库鱼类物种多样性, 从附表 5 可见, 水库鱼类物种数为 13~41 种, 10 座水库中桓仁水库鱼类最多, 为 41 种, 碧流河水库为 35 种, 其余水库为 20 种左右。

大型饮用水源水库鱼类多样性的特征为鱼类种类组成简单, 以放养鱼类为主, 即普遍以鲤科鱼类为优势, 如鲢、鳙、鲤 (*Cyprinus carpio*)、草鱼 (*Ctenopharyngodon idella*)、鲫 (*Carassius auratus*)、团头鲂 (*Megalobrama amblycephala*) 等常见经济鱼类<sup>[1,40]</sup>。曲疆奇等<sup>[40]</sup>基于 eDNA 技术研究表明, 密云水库有 86 种鱼类物种 eDNA 信息, 均大幅高于笔者于 2016—2023 年实际监测到的 27 鱼类、李昌等<sup>[41]</sup>的 28 种、曲疆奇等<sup>[42]</sup>的 27 种和邱士兴<sup>[43]</sup>的 7 种, 说明 eDNA 信息揭示的密云水库鱼类物种多样性远远高于实际观测的鱼类多样性。碧流河水库 1982 年有鱼类 62 种<sup>[44]</sup>, 以后调查结果均未超过 35 种<sup>[1]</sup>。

大型水库鱼类存在明显的水平和垂直分布, 一般库湾、沿岸浅水区鱼类多样性最高, 聚集麦穗鱼 (*Pseudorasbora parva*)、棒花鱼 (*Abbottina rivularis*) 等小型鱼类; 敞水区以鲢、鳙等中上层滤食性鱼类为主; 水库上游河流入口处因有机质丰富, 常成为鲤、鲫等底栖鱼类的繁殖场。表层以鲮 (*Hemiculter leucisulus*)、马口鱼 (*Opsariichthys bidens*) 等上层鱼类为主; 中层分布鲢、鳙等; 底层则有黄颡鱼 (*Pelteobagrus fulvidraco*)、鲇 (*Silurus asotus*)、鲤、鲫等。

## 3 大型饮用水源水库优水渔业模型研究与应用

### 3.1 基于改进的狄龙模型建立优水渔业模型

饮用水源水库为内陆淡水水域, 磷元素为水体

富营养化唯一限制因子<sup>[1]</sup>。水体中磷元素的迁移转化受扩散（包括弥散、分子扩散和紊流扩散）、随流、沉积物释放、沉降、再悬浮和源汇及生物作用影响，因此水体中总磷浓度取决于这六个方面的综合作用，在此基础上建立的瓦伦韦德模型和狄龙模型都得到广泛应用<sup>[45]</sup>。

赵文等<sup>[1]</sup>选择改进的狄龙模型构建了碧流河水库优水渔业模型，将向水库规模化投放鱼类对水质的影响作为重要的模型参数，将水库放养鱼类对磷元素的利用总量设定为参数  $P_f$ ，假设水库中所有鱼类同化的磷元素将不会再返回水体，则得出

$$R_p = 1 - (P_{out} + P_f) / P_{in} \quad (1)$$

将公式(1)代入狄龙模型基础方程，整理得出

$$P = \frac{L_p [(P_{out} + P_f) / P_{in}]}{h \times \beta} \quad (2)$$

式中： $R_p$ 为磷的滞留系数 ( $1 - P_{out} / P_{in}$ )； $L_p$ 为水库面积负荷的总磷浓度 [ $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ] ( $L_p = P_{in} / A$ ,  $A$ 为水库面积 ( $\text{m}^2$ ))； $h$ 为平均水深； $\beta$ 为冲刷系数 [ $= Q_a / V$ ,  $Q_a$ 为水库年均出库水量 ( $\text{m}^3/\text{a}$ )， $V$ 为水库容积]； $P_{out}$ 为水库磷年输出量（出水+捕鱼）； $P_{in}$ 为磷污染负荷的年输入量（包括点源、面源、降水、降尘、河流等）； $P_f$ 为鱼类对磷元素的利用总量 ( $\text{kg}/\text{a}$ )。

按照城市供水水源水库的水质要求，水库水质需符合国家《地表水环境质量标准》（GB3838—2002）水质Ⅱ类标准，也就是要求总磷含量  $\leq 0.025 \text{ mg/L}$ ，即  $[P_{max}] = 0.025 \text{ mg/L}$ 。将改进的狄龙模型进行验证，结果表明，增加参数后的模型对水库磷含量的预测值更接近实测值 ( $0.072 \text{ mg/L}$ )，验证结果为  $0.110 \text{ mg/L}$ 。

### 3.2 基于深度学习的富营养化预警模型

优水渔业目标是获取预期鱼产量后确保水质优良，不导致水体富营养化，而叶绿素 a (Chl-a) 含量是评估水体富营养化的重要指标，通常认为当水体 Chl-a 浓度大于  $10 \mu\text{g/L}$  时，即认为该水体处于富营养化的状态。利用 BP 神经网络方法可构建水库水体富营养化的预警模型，选取水库 pH、溶氧、水温、总氮、总磷、浮游植物密度及生物量、浮游动物密度及生物量、Chl-a 含量 10 项指标作为预测 BP 神经网络的输入量。其中采用 Chl-a 作为水体富营养化评价的基本因子，将水质管理的目标定为达到并保证Ⅱ类水体标准，即 Chl-a 浓度低于  $10 \mu\text{g/L}$  的水平。如碧流河水库<sup>[1]</sup>构建的 DNN 模

型较好地预警了水体富营养化标志性 Chl-a 含量指标。

### 3.3 EWE 生态通道模型

生态通道模型 (ecopath model) 是由 Polovina<sup>[46]</sup>首次提出，可对一个平衡状态生态系统的结构和功能进行定量分析的方法<sup>[47]</sup>。Ecopath 模型是在生态调查获得大量数据的基础上进行生物网络分析，通过模型软件综合基础信息，对特定生态系统食物网结构和功能进行分析评价，现已成为新一代水域生态系统研究和渔业生态系统管理的核心工具，在海洋渔业水域<sup>[47]</sup>、湖泊<sup>[48-52]</sup>、城市供水水库<sup>[53]</sup>等水域生态系统均得到了广泛的应用。目前，基于生态通道模型的水库生态系统结构和功能，以及鲢鳙生态容量分析的研究也日益增多，如南湾水库<sup>[54]</sup>、密云水库<sup>[55]</sup>、滄水水库<sup>[56]</sup>、长潭水库<sup>[57]</sup>、棋盘山水库<sup>[58]</sup>、漳泽水库<sup>[59]</sup>、千峡湖水库<sup>[60]</sup>等。该模型在水源水库优水渔业方面具有广阔的应用前景。

### 3.4 AQUATOX Model 水生态模型

AQUATOX 模型基于水质、水量和食物网构建，其以友好的界面和强大的功能对水域生态系统进行模型化计算，可模拟多个环境因素（包括物理、化学和生物因子），以及它们对浮游植物、水生大型植物、无脊椎动物、鱼类群落甚至整个生态系统的影响，并可模拟计算生态系统生产力<sup>[61]</sup>。该模型可帮助识别和理解水质、物理环境、水生生物之间的关系，在试验围隔、河口、海岸、溪流、湖泊、水库、池塘等地方均可进行应用，目前国内在白洋淀、北运河<sup>[61]</sup>、景观水体<sup>[62]</sup>、洱海<sup>[63]</sup>和乌梁素海<sup>[64]</sup>均有应用，而在水库优水渔业上的应用鲜见报道。

### 3.5 水污染评价指数模型

污染物进入水体导致其化学、物理、生物特征的改变，从而影响水的有效利用，危害人体健康或者破坏生态环境，造成水质恶化的现象称为水污染 (water pollution)，水体富营养化实质上也是有机质引起的水污染。以往都是用单一指标评价水质优劣，目前水体富营养化或水污染可用多项水质指标的水质指数来综合评价，常用的综合指标有综合营养状态指数 (trophic level index, TLI) 和水质指数 (water quality index, WQI)。

TLI 方法以修正的卡尔森营养状态指数 TSI 为基础，以 Chl-a 的状态指数为基准，从其余参数的

状态指数中，再选择 2~3 个与基准状态指数较接近（指绝对值偏差较小）的状态指数，同基准状态指数一起进行相关加权综合<sup>[2,65]</sup>。对饮用水源水库，可用简化的 *TLI* 评估水体污染程度，一般推荐使用 *Chl-a*、*SD*、*TP* 3 项指标计算综合营养状态指数<sup>[1,2]</sup>。水质良好要求  $TLI < 50$ 。

*WQI* 是一种用于综合评价水质状况的量化指标，它通过将多个关键水质参数（如 *pH*、溶解氧、浊度、氨氮等）的测量值整合为一个单一数值，直观反映水体的整体污染程度和适用性。*WQI* 值为 0~100 或 0~1 000 的指数值，可用于地表水、地下水等水体的污染监测。水质指数最初用于评估河流污染<sup>[66]</sup>，近 20 年来，水质指数有了一定发展，指标逐渐增多，在 20 多个国家被广泛用于河流、湖泊、水库等污染评价，在中国使用 *WQI* 评价水质已很广泛<sup>[67]</sup>。最常用的水质指数是加权运算水质指数（weighted arithmetic water quality index, *WAWQI*）。计算的 *WQI* 值划分为 5 级评价<sup>[68]</sup>， $WQI > 100$ ，不适合饮用；76~100，水质很差；51~75，水质差；26~50，水质好；0~25，水质极好（优水）。也有以常见的 0~100 为评分体系，如 *NSF-WQI*（美国），依次对应红色，0~25，水质极差；橙色，26~50，水质差；黄色，51~70，水质适中；绿色，71~90，水质好；蓝色，91~100，水质极好。在实际应用中，建议根据目标水体的特点选择或调整 *WQI* 模型，并定期验证其适用性。

### 3.6 粒径谱模型及其应用

将生物按照大小（等效球体直径 *ESD* 或体质量）分为几个粒径，然后算出每一粒径的生物量，由此便得出一条反映生物量与粒径大小关系的曲线，称为粒径谱。应用较多的是生物量谱，即标准化了的生物量谱采用双对数坐标，横坐标为个体生物量，以含能量的对数级数表示（ $\lg KJ$ ）；纵坐标为生物量密度，以单位面积下含能量的对数级数（ $\lg KJ/m^2$ ）表示，因此生物量谱实际上是生物量能谱<sup>[2]</sup>。粒径谱、生物量谱理论上可以提供一个简便、实用的手段。它以生态学的观点和方法从总体上宏观地研究了不同水域生态系统的状态（status）和动态（dynamics）及其机制和影响因素，同时也可以比较不同类型生态系统的差别，甚至可以估计生产力和鱼产量。粒径谱模型在海洋<sup>[69]</sup>、湖泊<sup>[70]</sup>应用较多，其在中国水库研究和管理中仅处于研究阶段<sup>[71]</sup>。

## 4 水库优水渔业管理存在问题及其解决途径

### 4.1 水生生物资源监测与鱼产力评估

水质管理和优水渔业管理模型均需要水质和水生生物资源的长期监测数据。否则再好的模型和指数也存在时效性。准确评估鱼产力对优水渔业合理放养和合理捕捞至关重要，鱼产力评估方法较多，目前应用较多的仍然是传统的浮游植物初级生产力估算法和基础饵料法<sup>[2]</sup>。

推荐使用基础饵料法。即采用浮游植物、浮游动物、底栖动物和腐质（腐质计算按照牧食链的 1/2 计算）数据来计算鱼产力，计算公式为

$$F = 10a/k [B_p(P/B) + B_z(P/B) + B_b(P/B)] VD + 1/2 [10 a/k [B_p(P/B) + B_z(P/B)] VD] \quad (3)$$

式中： $F$  为鱼产力（ $kg$ ）； $B_p$  为浮游植物年平均生物量（ $mg/L$ ）； $B_z$  为浮游动物年平均生物量（ $mg/L$ ）； $B_b$  为底栖动物年平均生物量（ $g/m^2$ ）； $P/B$  为饵料生物年生产量与年平均生物量之比，水库  $P/B$  系数为浮游植物 60，浮游动物 20，底栖动物 8； $a$  为鱼类等水生经济动物对该类饵料生物允许的最大利用率（浮游植物 40，浮游动物 50，底栖动物 50）； $k$  为鱼类等水生经济动物对该类饵料生物的饵料系数（鲢 20，鳙 10，鲤、鲫为 5）； $V$  为可养库容； $D$  为有效水深（ $m$ ），通常为 1  $m$  或 2 倍透明度。

水库鲢、鳙鱼种的合理放养量应为

$$\text{鲢的合理放养量} = \frac{\text{鲢鱼产力}}{\text{鲢起捕规格}} \times \frac{1}{\text{鲢回捕率}}, \quad (4)$$

$$\text{鳙的合理放养量} = \frac{\text{鳙鱼产力}}{\text{鳙起捕规格}} \times \frac{1}{\text{鳙回捕率}}. \quad (5)$$

### 4.2 供水系统桡足类的危害及其防治

近年来，以饮用水源水库剑水蚤为代表的桡足类，常因水体富营养化和鱼类放养不足等原因出现季节性爆发性增长，尤其是春季较为突出。桡足类游动快速，对水处理药剂抵抗力强，可通过供水系统进入自来水中，影响感官且有传播寄生虫疾病风险。因此，了解桡足类的生物学特点、种群季节动态和食物链位置，对桡足类防控和利用具有重要意义。水源水库存在剑水蚤对水质的威胁隐患，如何控制及去除剑水蚤已成为供水单位水处理工艺的重

要问题,具体防控措施为:对水源水库进行生态治理,减轻水体富营养化。桡足类是鲮等浮游动物食性鱼类的优良饵料,通过调查获得其密度和生物量,合理放养滤食性鱼类可有效控制桡足类,一般桡足类成体个体较大,难以穿过滤层进入水处理系统,但其蚤卵、无节幼体和桡足幼体较小,或堵塞滤料或能进入水系统造成水处理困难,在进水口可用氯制剂(2.0 mg/L)进行杀灭。

北方大型水库桡足类常见优势种前已述及,剑水蚤常见种有近邻剑水蚤、台湾温剑水蚤、广布中剑水蚤、锯缘真剑水蚤、扁平小剑水蚤等。一般体长大小为0.7~1.53 mm,无节幼体为0.15~0.5 mm,桡足幼体体长为0.5~0.89 mm(附表6)。桡足类的卵通常较小,一般为50~200  $\mu\text{m}$ ,其发育有变态,一般有6个无节幼体期和5个桡足幼体期<sup>[18,72]</sup>。锯缘真剑水蚤生活史、幼体发育<sup>[73-75]</sup>等国外已有研究。今后有必要研究特定水库桡足类的种类组成、食性、系统发育、种群季节动态及其各生长发育阶段对安全药剂的耐受性,研制有效防控剑水蚤的无公害药剂。合理放养鲢、鳙等滤食性鱼类,有效控制水源水库的桡足类,变害为利,从源头上消除剑水蚤对饮用水的安全隐患。

#### 4.3 调水对渔业的影响和鸬鹚危害问题

饮用水源水库存在调水问题,调水水库交换量大,水温低,直接影响鱼类生长。调水间接影响饵料生物生长,饵料不足则影响鱼产量。调水可引起水位波动,影响鱼类产卵场、索饵场和越冬场。此外,调水可带来外来种生物入侵,影响生物多样性和渔业资源,并带来病害,导致鱼类发病。今后应加强研究缓解调水渔业影响的关键措施,如合理增殖放流、鱼类通道建设、科学调度和水质智能实时监测等。

鸬鹚(*Phalacrocorax carbo*)被列为中国Ⅱ类保护动物,其主要以鱼类为食,而且食量惊人。据观察,一只成年鸬鹚每天可捕食1.25~1.40 kg鱼类,鸬鹚可潜水捕食鱼类,甚至能多只鸬鹚组团联合捕食,水库中尾重1.25 kg以下的鱼类都可被其吞入囊中。目前,鸬鹚种群数量急剧增加,据卫星遥感估测,辽东地区鸬鹚有 $100\times 10^4$ 只左右,仅桓仁水库初步统计鸬鹚种群数量就已达到 $6\times 10^4$ 只,若每只鸬鹚1 d捕食1.4 kg鱼,每天桓仁水库损失鱼类达 $8.40\times 10^4$  kg。鸬鹚造成了水库湖泊鱼类补充群体锐减,鱼类资源匮乏,影响渔业产量,间接导致“以鱼净水”失败,破坏水库生态平衡,引

起水体严重的富营养化。此外,鸟粪对水源水库用水安全的威胁日趋严重,鸬鹚捕鱼同时,排出的粪便具有腐蚀性,且鸬鹚食量惊人,消化快,可产生大量粪便,据统计,桓仁水库明水期有 $6\times 10^4$ 只鸬鹚栖息,每月产生的鸟粪达到2 250 t,这些鸟粪多数都排泄进入水体,鸟粪富含尿酸和磷酸盐,可使水体氮、磷含量增加,造成严重的水体富营养化,并发生有害蓝藻水华,严重威胁水源地水库的用水安全。另外,鸬鹚捕食大鱼不成功会造成鱼类啄伤,发生鱼病,并形成鱼类传染病,造成鱼类大量死亡。因此,如何防范鸬鹚危害已成为优水渔业发展的新课题。

鉴于鸬鹚对渔业和林业等的现实威胁,希望国家相关部门考虑鸬鹚的生存现状,通过立法控制其种群数量。保护是为了更好地开发,“山水林田湖草沙一体化保护和系统治理”现已深入人心,鉴于鸬鹚对水域生物多样性造成一定威胁,在保护鸬鹚同时,也要采取平衡措施保护好水生野生资源。

## 5 结论与展望

### 5.1 优水渔业是饮用水源水库生态绿色可持续发展的有效模式

北方大型饮用水源水库不是单一的供水工程,而是处于干旱半干旱区且有冰封期的综合水域生态系统,面临着气候变化、环境污染与人类活动的多重压力,因此,需要通过精准生态治理、多手段智慧调控和多学科合作解决问题。未来的核心路径是借助智慧化手段,实现从水库到流域的精准治理与协同管控,最终保障水资源的长期安全与生态健康,实现饮水安全和渔业可持续绿色高质量发展。水库优水渔业是解决上述问题的关键技术手段,优水渔业是在保证水源水质优良情况下的大水面生态渔业模式,即优质水养优质鱼,优水渔业的基本定义是依赖大水面天然饵料资源从事渔业生产并通过这种生产活动维护水域生态系统健康确保水质优良的生态渔业方式。

### 5.2 水生生物多样性是开展水库优水渔业的重要基石

水库渔业应走生态优先、绿色发展之路,坚持“以鱼净水,以鱼养水”的优水渔业。饮用水源水库主要是利用非经典的生物操纵原理,利用鱼类等水生动物在水生态系统物质转化中的调节功能,促进水域内源物质循环利用,增强生态系统的服务功能。这需要优化生物群落结构,注重水库资源环境

保护, 研究各种生态渔业技术, 使水库渔业从“高投入高产出”的资源消耗型模式向质量、效益和生态并重的养护型模式转变, 使水库得以生态修复, 保障渔业生产与环境保护兼顾、渔业产量与优质高效兼顾, 实现水库生态系统结构与功能完善, 以及渔业价值利用与环境保护协调发展。因此, 水库管理中应采用传统手段结合“天空地”一体化、eDNA 技术、浮游生物现场成像技术、稳定同位素等新技术, 长期持续进行水生生物资源监测和理化环境监测, 实时掌握水库生态系统结构与功能特征, 依此准确评估水库鱼产力和养殖生态容量, 避免出现有害蓝藻水华, 有效控制水体富营养化, 保障水质优良。

### 5.3 通过精准溯源多维管控实现优水渔业的精细化、智慧化管理

饮用水源综合治理过程中, 可通过农业面源进行系统整治, 如退耕还林、减少化肥使用、清理水库周边违法养殖等; 还可通过同位素与指纹溯源, 精确解析水库总氮、总磷等污染来源。此外, 还可通过生态清淤, 加强内源治理, 建设多级人工湿地净化入库河水, 最终实现从末端治理转向源头精准管控。

在现有研究成果和实践经验基础上, 整合优化营养状态水质指数、生态通道、水生态、磷平衡、粒径谱模型, 建立优水渔业多功能协同优化模型, 可实现优水渔业的精细化、智慧化管理。水库管理中应保证水质优良目标, 即达到地表水Ⅱ类水质标准以上, 水质目标为  $TP < 0.2 \text{ mg/L}$ ,  $Chl-a$  含量  $< 10 \mu\text{g/L}$ ,  $TLI < 50$ ,  $WAWQI < 50$  或  $SRFWQI > 70$ 。

总之, 北方大型饮用水源水库优水渔业可持续发展应遵从的原则是: 持优水渔业目标, 走绿色发展之路, 尽生态平衡之举, 执渔业增量之实。此外, 在科学精准治理的同时, 还要应对气候变化适应性、新污染物风险、病害和鸟类危害等新挑战。(附表参见网址 <https://xuebao.dlou.edu.cn>)

## 参考文献:

[1] 赵文, 魏杰, 王珊, 等. 大型饮用水源水库水生生物多样性及优水渔业技术——以碧流河水库为例 [M]. 北京: 科学出版社, 2022: 1-405.  
ZHAO W, WEI J, WANG S, et al. Aquatic biodiversity and high-quality water fishery technology in large drinking water source reservoirs: a case study of Biliuhe Reservoir [M]. Beijing: Science Press, 2022: 1-405. (in Chinese)

[2] 赵文. 养殖水域生态学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2011.  
ZHAO W. Ecology of aquaculture waters [M]. Beijing: China Agri-

culture Press, 2011. (in Chinese)

[3] SHAPIRO J, LAMARRA V, LYNCH M. Biomaniplulation; an ecosystem approach to lake restoration//BREZONIKPL, FOX J L. Proceedings of a Symposium on Water Quality Management Through Biological Control [M]. Gainesville: University of Florida Press, 1975: 85-96.

[4] 董双林, 田相利, 高勤峰. 水产养殖生态学 (第 2 版) [M]. 北京: 科学出版社, 2021: 194-197.  
DONG S L, TIAN X L, GAO Q F. Aquaculture ecology [M]. 2nd Edition. Beijing: Science Press, 2021: 194-197. (in Chinese)

[5] SHAPIRO J, WRIGHT D G. Lake restoration by bomanplulation; Round Lake, Minnesota the first two years [J]. Freshwater Biology, 14: 371-383.

[6] CARPENTER S R, KITCHEL J F, HODGSON J R. Cascading trophic interactions and lake productivity [J]. Bio Science, 1985, 3: 634-639.

[7] MCQUEEN D J, POST J R, MILLS E L. Trophic relationships in freshwater pelagic ecosystems [J]. Canadian Journal of Fisheries & Aquatic Science, 1986, 35: 1571-1581.

[8] 赵文, 董双林, 张兆琪, 等. 鲢放养和施肥对盐碱池塘围隔生态系统浮游生物群落的影响 [J]. 应用生态学报, 2001, 12 (2): 299-303.  
ZHAO W, DONG S L, ZHANG Z Q, et al. The effects of silver carp stocking and fertilization on the plankton community in the enclosure ecosystem of saline-alkali ponds [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12 (2): 299-303. (in Chinese)

[9] 谢平, 陈隽, 刘佳睿. 非经典生物操纵驱动从水华向非水华的稳态转化——来自武汉东湖的全湖验证实验 [J]. 湖泊科学, 2023, 35 (1): 1-11.  
XIE P, CHEN J, LIU J R. A redime shift from cyanobacterial steady state to noncyanobacterial one by using non traditional bio-manipulation—a whole lake testing experiment in Lake Donghu, Wuhan [J]. Journal of Lake Sciences, 2023, 35 (1): 1-11. (in Chinese)

[10] 朱海燕, 戴学颖, 陈孝君. 于桥水库富营养化现状及水草控制措施 [J]. 水科学与工程技术, 2010 (2): 16-18.  
ZHU H Y, DUE X Y, CHEN X J. Eutrophication status and aquatic plant control measures of Yuqiao Reservoir [J]. Water Science and Engineering Technology, 2010 (2): 16-18. (in Chinese)

[11] 赵文, 魏杰. 我国饮用水源水库微生物多样性研究述评 [J]. 微生物学杂志, 2018, 38 (4): 1-10.  
ZHAO W, WEI J. A Review of microbial diversity research in drinking water source reservoirs of China [J]. Journal of Microbiology, 2018, 38 (4): 1-10. (in Chinese)

[12] 王欢, 李宇轩, 赵文, 等. 辽宁省三座大型水源水库细菌数量的时空分布特征 [J]. 微生物学杂志, 2018 (4): 75-83.  
WANG H, LI Y X, ZHAO W, et al. Spatio-temporal distribution characteristics of bacterial quantity in three large water source reservoirs in Liaoning Province. [J]. Journal of Microbiology, 2018 (4): 75-83. (in Chinese)

[13] 朱文字, 赵文, 王天宇, 等. 北京市五大水系水体浮游细菌的数量特征研究 [J]. 微生物学杂志, 2020, 40 (5): 43-50.  
ZHU W Y, ZHAO W, WANG T Y, et al. Study on the quantitative

- characteristics of airborne bacteria in the five major water systems of Beijing[J]. *Journal of Microbiology*, 2020, 40(5): 43-50. (in Chinese)
- [14] 赵文,殷旭旺,王吉桥,等.英那河水库渔业生态学调查[J].大连水产学院学报,2009,24(3):221-230.  
ZHAO W, YIN X W, WANG J Q, et al. Fisheries ecological survey of yingna reservoir [J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2009, 24(3): 221-230. (in Chinese)
- [15] 王欢,赵文,谢在刚,等.碧流河水库细菌群落结构特征及其关键驱动因子[J].环境科学,2018,39(8):3660-3669.  
WANG H, ZHAO W, XIE Z G, et al. Characteristics of bacterial community structure and its key driving factors in Biliuhe Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2018, 39(8): 3660-3669. (in Chinese)
- [16] 邵纛迪,赵文,尹东鹏,等.大伙房水库细菌群落结构及其环境驱动因子研究[J].微生物学杂志,2021,41(1):33-42.  
SHAO Y D, ZHAO W, YIN D P, et al. Study on bacterial community structure and its environmental driving factors in Dahuofang Reservoir [J]. *Journal of Microbiology*, 2021, 41(1): 33-42. (in Chinese)
- [17] 陈兆进,丁传雨,朱静亚,等.丹江口水库枯水期浮游细菌群落组成及影响因素研究[J].中国环境科学,2017,37(1):336-344.  
CHEN Z J, DING C Y, ZHU J Y, et al. Study on the composition and influencing factors of plankton bacterial community in Danjiangkou Reservoir during the dry season [J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(1): 336-344. (in Chinese)
- [18] 赵文.水生生物学(第2版)[M].北京:中国农业出版社,2016:1-518.  
ZHAO W. *Hydrobiology* [M]. 2nd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2016: 1-518. (in Chinese)
- [19] 焉鸿启,赵文,郭凯,等.观音阁水库浮游生物群落结构的时空格局研究[J].北京农业,2015(36):204-208.  
YAN H Q, ZHAO W, GUO K, et al. Study on the spatio-temporal pattern of plankton community structure in Guanying Reservoir [J]. *Beijing Agriculture*, 2015(36): 204-208. (in Chinese)
- [20] 张玉.浮游植物对大伙房水库水质影响分析[J].环境保护与循环经济,2020,40(11):45-48.  
ZHANG Y. Analysis of the impact of phytoplankton on water quality of Dahuofang Reservoir [J]. *Environmental Protection and Circular Economy*, 2020, 40(11): 45-48. (in Chinese)
- [21] 李浙軒,鞠哲,赵文,等.白石水库浮游植物的群落结构研究[J].大连海洋大学学报,2016,31(4):404-409.  
LI Y X, JU Z, ZHAO W, et al. Study on the community structure of phytoplankton in Baishi Reservoir [J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2016, 31(4): 404-409. (in Chinese)
- [22] 赵文,王安璞,王珊,等.辽宁桓仁水域物种多样性图集[M].大连:大连出版社,2023:1-418.  
ZHAO W, WANG A P, WANG S, et al. Atlas of species diversity in Huanren Waters, Liaoning Province [M]. Dalian: Dalian Publishing House, 2023: 1-418. (in Chinese)
- [23] 王哲,尹东鹏,赵文,等.南水北调后密云水库浮游植物多样性及水生态环境评价[J].吉林水利,2020(5):1-6,17.  
WANG Z, YIN D P, ZHAO W, et al. Diversity of planktonic algae and water ecological environment evaluation of Miyun Reservoir after the south-to-north water diversion project [J]. *Jilin Water Resources*, 2020(5): 1-6, 17. (in Chinese)
- [24] 张湾,赵文,王哲,等.锦凌水库水生生物群落结构及鱼产力研究[J].吉林水利,2021,464(1):24-31.  
ZHANG W, ZHAO W, WANG Z, et al. Study on the aquatic bioecosis structure and fish productivity of Jinling Reservoir [J]. *Jilin Water Resources*, 2021, 464(1): 24-31. (in Chinese)
- [25] 魏洪祥.水丰水库浮游生物组成及初级生产力研究[J].水产学杂志,2021,34(4):73-80.  
WEI H X. Study on the Composition of plankton and primary productivity in Shuifeng Reservoir [J]. *Chinese Journal of Fisheries*, 2021, 34(4): 73-80. (in Chinese)
- [26] 郭凯,赵文,焉鸿启.柴河水库浮游生物群落结构的时空格局及其渔产力研究[J].水生态学杂志,2013,34(6):22-26.  
GUO K, ZHAO W, YAN H Q. Spatio-temporal patterns of plankton community structure and fish productivity in Chaihe Reservoir [J]. *Journal of Hydroecology*, 2013, 34(6): 22-26. (in Chinese)
- [27] 牟悦.辽宁三座水源地水库浮游植物群落结构分析[D].华中农业大学,2022.  
MOU Y. Analysis of phytoplankton community structure in Three Water Source Reservoirs of Liaoning [D]. Huazhong Agricultural University. 2022. (in Chinese)
- [28] GUIR M D, GUIRY G M. Algae base world-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway [EB/OL], [2026-01-15]. <http://www.algaebase.org>.
- [29] 沈毓芬,顾曼如.武昌东湖原生动动物生态初步研究[J].水生生物学报,1965,5(2):146-182.  
SHEN Y F, GU M R. Preliminary study on the ecology of protozoa in east lake, Wuchang [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1965, 5(2): 146-182. (in Chinese)
- [30] 庞雨佳,赵文,魏杰,等.桓仁水库和碧流河水库浮游生物群落结构及水环境特征的比较研究[J].大连海洋大学学报,2020,35(3):407-416.  
PANG Y J, ZHAO W, WEI J, et al. Comparative study on plankton community structure and water environment characteristics of Huanren Reservoir and Biliuhe Reservoir [J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2020, 35(3): 407-416. (in Chinese)
- [31] 刘丙阳,赵文,郭凯,等.辽宁汤河水库浮游动物的群落结构及其时空格局[J].大连海洋大学学报,2011,26(6):526-531.  
LIU B Y, ZHAO W, GUO K, et al. Community structure and spatio-temporal pattern of zooplankton in Tanghe Reservoir, Liaoning [J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2011, 26(6): 526-531. (in Chinese)
- [32] 张荣坤,尹东鹏,赵文,等.白石水库浮游动物群落结构及鱼产力研究[J].吉林水利,2021,4:1-5,17.  
ZHANG R K, YIN D P, ZHAO W, et al. Study on the plankton community structure and fish productivity of Baishi Reservoir [J]. *Jilin Water Resources*, 2021, 4: 1-5, 17. (in Chinese)
- [33] 董昆坤,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[J].吉林水利,2020(6):1-6,11.  
DONG X K, ZHAO W, REN J S, et al. Diversity of zooplankton

- and water ecological environment evaluation of Miyun Reservoir after the south-to-north water diversion project[J]. *Jilin Water Resources*, 2020(6):1-6, 11. (in Chinese)
- [34] 赵文, 陈立斌, 蒲红宇, 等. 碧流河水库底栖动物群落结构、底层鱼类产量及其水质评价[J]. *中国科技成果*, 2011, 21: 49-51, 54.
- ZHAO W, CHEN L B, PU H Y, et al. Benthic animal community structure, bottom fish yield and water quality evaluation of Biliuhe Reservoir [J]. *China's Science and Technology Achievements*, 2011, 21: 49-51, 54. (in Chinese)
- [35] 史键, 赵文, 李赫, 等. 汤河水库和大伙房水库底栖动物群落结构、底层鱼类产量及水质生态评价[J]. *大连海洋大学学报*, 2013, 28(4): 383-389.
- SHI J, ZHAO W, LI H, et al. Evaluation of benthic animal community structure, bottomfish yield and water quality ecology in Tanghe Reservoir and Dahuofang Reservoir [J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2013, 28(4): 383-389. (in Chinese)
- [36] 陈立斌, 赵文, 殷守仁, 等. 官厅水库底栖动物的群落结构及其时空格局[J]. *大连海洋大学学报*, 2012, 27(1): 44-52.
- CHEN L B, ZHAO W, YIN S R, et al. Community structure and spatiotemporal pattern of benthic animals in Guanting Reservoir [J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2012, 27(1): 44-52. (in Chinese)
- [37] 邢壮壮. 官厅水库及入库河流的大型底栖动物研究和水质评价[D]. 济南: 山东师范大学, 2020.
- XING Z Z. Study on large benthic animals and water quality evaluation of Guanting Reservoir and its inflowing rivers [D]. Jinan: Shandong Normal University, 2020. (in Chinese)
- [38] 胡涛, 魏开建, 张桂蓉, 等. 密云水库大型底栖动物群落结构及水质生物学评价[J]. *水生态学杂志*. 2018, 39(4): 79-88.
- HU T, WEI K J, ZHANG G R, et al. Community structure of macrozoobenthos and water quality biological evaluation in Miyun Reservoir [J]. *Journal of Hydroecology*. 2018, 39(4): 79-88. (in Chinese)
- [39] 马秀娟, 沈建忠, 孙金辉, 等. 天津于桥水库大型底栖动物群落结构及其水质生物学评价[J]. *生态学杂志*, 2012, 31(9): 2356-2364.
- MA X J, SHEN J Z, SUN J H, et al. Community structure of macrobenthic animals and water quality biological evaluation in Yuqiao Reservoir, Tianjin [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(9): 2356-2364. (in Chinese)
- [40] 曲疆奇, 郝桐锋, 李永刚, 等. 基于 eDNA 技术的密云水库鱼类群落结构及生态位变化分析[J]. *大连海洋大学学报*, 2024, 39(2): 298-307.
- QU J Q, HAO T F, LI Y G, et al. Analysis of fish community structure and ecological niche changes in Miyun Reservoir based on environmental DNA technology [J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2024, 39(2): 298-307. (in Chinese)
- [41] 李昌, 张新, 杨蓉, 等. 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, et al. 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. (in Chinese)
- [42] 曲疆奇, 张清靖, 贾成霞, 等. 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 J Q, ZHANG Q J, JIA C X, et al. Evaluation of spatial distribution characteristics of fish resources in Miyun Reservoir based on echo detection method [J]. *Fisheries Science & Technology Information*, 2015, 42(5): 234-238. (in Chinese)
- [43] 邱士兴. 密云水库渔业调查[J]. *水生态学杂志*, 1981, 2(2): 32-35.
- QIU S X. Fishery investigation of Miyun Reservoir [J]. *Journal of Hydroecology*, 1981, 2(2): 32-35. (in Chinese)
- [44] 牟秀林, 姜存有, 吴连秋, 等. 碧流河鱼类资源调查及水库建成后可能对鱼类区系的影响. *水产科学*, 1982, 3: 58-62.
- MOU X L, JIANG C Y, WU L Q, et al. Investigation on fish resources of Biliu River and possible impact on fish fauna after reservoir construction [J]. *Journal of Fisheries Sciences*, 1982, 3: 58-62. (in Chinese)
- [45] 彭泽洲, 杨天行, 梁秀娟, 等. 水环境数学模型及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 131-134.
- PENG Z Z, YANG T X, LIANG X J, et al. Water Environment mathematical models and their applications [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 131-134. (in Chinese)
- [46] POLOVINA J J. Model of a coral reef ecosystem. I. The ECOPATH model and its application to French Frigate Shoals. [J]. *Coral Reefs*, 1984, 3(1): 1-11.
- [47] 吴忠鑫. 人工鱼礁生态效应研究——以山东俚岛海域人工鱼礁区为例[M]. 北京: 中国农业出版社, 2021: 62-71.
- WU Z X. Study on the ecological effects of artificial fish reef—taking the artificial fish reef area in lidao sea area of Shandong Province as an example [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2021: 62-71. (in Chinese)
- [48] 赵旭昊, 徐东坡, 任泷基, 等. 基于 Ecopath 模型的太湖鲢鳙生态容量评估[J]. *中国水产科学*, 2021, 28(6): 785-795.
- ZHAO X H, XU D P, REN L J, et al. Evaluation of silver carp and bighead carp ecological carrying capacity in Lake Taihu based on the ecopath model [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2021, 28(6): 785-795. (in Chinese)
- [49] 邓悦, 郑一琛, 常剑波. 利用 Ecopath 模型评价鲢鳙放养对千岛湖生态系统的影响[J]. *生态学报*, 2022, 42(16): 6853-6862.
- DENG Y, ZHENG Y C, CHANG J B. Evaluation of the impact of silver carp and bighead carp stocking on Qiandaohu ecosystem using Ecopath model [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(16): 6853-6862. (in Chinese)
- [50] 刘家寿, 王齐东, 解绥启, 等. 内陆大水面生态牧场化管理: 群落调控、生物多样性恢复与资源利用[J]. *科技促进发展*, 2020, 16(2): 237-242.
- LIU J S, WANG Q D, XIE S Q, et al. Ecological ranch management of large inland water bodies: community regulation, biodiversity restoration and resource utilization [J]. *Science & Technology for Development*, 2020, 16(2): 237-242. (in Chinese)

- [51] 于佳,刘佳睿,王利,等.基于 Ecopath 模型的千岛湖生态系统结构和功能分析[J].水生生物学报,2021,45(2):308-317.  
YU J, LIU J R, WANG L, et al. Analysis on the ecosystem structure and function of lake Qiandao based on Ecopath model [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2021, 45(2): 308-317. (in Chinese)
- [52] 刘恩生,李云凯,臧日伟,等.基于 Ecopath 模型的巢湖生态系统结构与功能初步分析[J].水产学报,2014,38(3):417-425.  
LIU E S, LI Y K, ZANG R W, et al. A preliminary analysis of the ecosystem structure and functioning of Lake Chaohu based on Ecopath model [J]. Journal of Fisheries of China, 2014, 38(3): 417-425. (in Chinese)
- [53] 靳聪聪,翟振起,王赛,等. Ecopath 模型的城市型供水水库生态系统结构和功能评估.环境生态学,2025,7(11):7-29.  
JIN C C, ZHAI Z Q, WANG S, et al. Ecological system structure and function assessment of urban water supply reservoir based on Ecopath model [J]. Environmental Ecology, 2025, 7(11): 7-29. (in Chinese)
- [54] 王瑞,米玮洁,李睿,等.基于 Ecopath 模型的南湾水库生态系统结构与功能定量分析[J].三峡生态环境监测,3(4):37-46.  
WANG R, MI W J, LI R, et al. Quantitative analysis of the ecosystem structure and function of the Nanwan Reservoir based on ecopath model [J]. Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges, 3(4): 37-46. (in Chinese)
- [55] 李昌,张新,赵龙,等.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, et al. Structure and material flow characteristics of Miyun Reservoir ecosystem based on ecopath model [J]. Biological Resources, 2021, 43(3): 292-302. (in Chinese)
- [56] 范泽宇,白雪兰,徐聚臣,等.基于 Ecopath 模型的澧水水库生态系统特征及鲢、鳙生态容量分析[J].中国水产科学,2021,28(6):773-784.  
FAN Z Y, BAI X L, XU J C, et al. Analysis of ecological system characteristics and ecological capacity of *Hypophthalmichthys molitrix* and *Aristichthys nobilis* in the Weishui Reservoir based on ecopath model [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 28(6): 773-784. (in Chinese)
- [57] 石展耀,张靖天,霍守亮. EwE 模型在水生态系统中的应用研究及长潭水库案例分析[J].环境工程技术学报,2023,13(2):567-577.  
SHI Z Y, ZHANG J T, HUO S L. Application research of EwE model in aquatic ecosystem and case analysis of Changtan Reservoir [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, 13(2): 567-577. (in Chinese)
- [58] 韩丽娟,李淑婷,张鹏,等.基于 Ecopath 模型的棋盘山水库生态系统结构和功能分析[J].安徽农业科学,2023,51(24):191-195.  
HAN L J, LI S T, ZHANG P, et al. The ecosystem structure and functioning of Qipanshan Reservoir based on ecopath model [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2023, 51(24): 191-195. (in Chinese)
- [59] 刘子萌,冯民权,杨锐婧,等.基于 Ecopath 模型的漳泽水库生态系统特征及鲢、鳙生态容量评估[J].水生生物学报,2024,48(9):1553-1565.  
LIU Z M, FENG M Q, YANG R J, et al. Ecosystem characteristics of Zhangze Reservoir and ecological capacity assessment of silver carp and bighead carp based on the ecopath model [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2024, 48(9): 1553-1565. (in Chinese)
- [60] 练青平,吴燕琴,刘梅,等.浙江千峡湖水库生态系统特征评价及鲢鳙生态容量评估[OL/J].海洋湖沼通报(中英文),2025. <https://link.cnki.net/urlid/37.1141.P.20251126.1519.008>
- LIAN Q P, WU Y Q, LIU M, et al. Evaluation of ecosystem characteristics and ecological capacity of silver carp and bighead carp in Qianxiahu Reservoir [OL/J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2025. <https://link.cnki.net/urlid/37.1141.P.20251126.1519.008> (in Chinese)
- [61] 闫金霞. AQUATOX 生态模拟原理与模拟应用[M].北京:中国水利水电出版社,2020:1-147.  
YAN J X. Principles and simulation application of AQUATOX ecological modeling [M]. Beijing: China Water and Power Press, 2020: 1-147. (in Chinese)
- [62] 张少彤.基于 AQUATOX 的景观水体水生态模拟及生态修复[J].水利科学与寒区工程,2025,8(1):71-74.  
ZHANG S T. Water ecological simulation and ecological restoration of landscape water bodies based on AQUATOX [J]. Hydraulic Science and Cold Zone Engineering, 2025, 8(1): 71-74. (in Chinese)
- [63] 陈无歧,李小平,陈小华,等.基于 Aquatox 模型的洱海营养物质投入响应关系模拟[J].湖泊科学,2012,24(3):362-370.  
CHEN W Q, LI X P, CHEN X H, et al. Simulation of the response of eutrophic state to nutrient input in Lake Erhai using aquatox model [J]. Journal of Lake Sciences, 2012, 24(3): 362-370. (in Chinese)
- [64] 李建茹,李兴,李卫平,等.基于 AQUATOX 模型的乌梁素海富营养化模拟及控制研究[J].生态环境学报,2020,29(6):1215-1224.  
LI J R, LI X, LI W P, et al. Simulation and control of eutrophication in Wuliangsu Lake using aquatox model [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, 29(6): 1215-1224. (in Chinese)
- [65] 中华人民共和国水利部. SL 167—96 水库渔业资源调查规范[S].北京:中国水利水电出版社,2014.  
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Standards for the investigation of reservoir fishery resources (SL167—96) [S]. Beijing: China Water & Power Press, 2014. (in Chinese)
- [66] HORRON R K. An index-number system for rating water quality [J]. J Water Pollut Con F, 1965, 37: 292-315.
- [67] CHIDIAC R, NAJJAR P E, OUAINI N. A comprehensive review of water quality indices (WQIs): history, models, attempts and perspectives [J]. Rev Environ Sci Biotechnol, 2023, 22: 349-395.
- [68] YOGENDRA K, PUTTAIAH E T. Determination of water quality index and suitability of an urban waterbody in Shimoga Town, Karnataka [C]. Proceedings of Taal 2007: The 12th world lake conference, 2008: 342-346.
- [69] FOGARTY M J, COLLIE J S. 渔业生态系统动力学[M].张崇良,关丽莎,张魁,译.北京:中国农业出版社,2024:227-229.  
FOGARTY M J, COLLIE J S. Fisheries ecosystem dynamics [M].

- ZHANG C L, GUAN L S, ZHANG K. Beijing: China Agricultural Press, 2024; 227-229. (in Chinese)
- [70] SPRULES W G, STOCKWELL J D. Size-based biomass and production models in the St Lawrence Great Lakes [J]. ICES J Mar Sci, 1994, 52: 705-710.
- [71] 方义, 赵文, 李文宽. 辽宁省典型水库浮游植物粒径大小的分布特征研究 [J]. 大连海洋大学学报, 2013, 28(4): 390-394.
- FANG Y, ZHAO W, LI W K. Study on the distribution characteristics of phytoplankton size classes in typical reservoirs of Liaoning Province [J]. Journal of Dalian Ocean University, 2013, 28(4): 390-394. (in Chinese)
- [72] 沈嘉瑞, 等. 中国动物志 节肢动物门 甲壳纲 淡水桡足类 [M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- SHEN J R, et al. Fauna Sinica: Arthropoda, Crustacea, Freshwater Copepod [M]. Beijing: Science Press, 1979. (in Chinese)
- [73] NANDINI S, SARMA S S S. Effect of algal and animal diets on life history of the freshwater copepod *Eucyclops serrulatus* (Fischer, 1851) [J]. Aquat Ecol, 2007, 41: 75-84.
- [74] DOS SANTOS L U, DE ANDRADE C F S. Survey of Cyclopids (Crustacea, Copepoda) in Brazil and preliminary screening of their potential as dengue vector predators [J]. Revista de Saude Publica, Sao Paulo, 1997, 31: 221-226.
- [75] MAIER G. The effect of temperature on the development, reproduction, and longevity of two common cyclopoid copepods—*Eucyclops serrulatus* (Fischer) and *Cyclops strenuus* (Fischer) [J]. Hydrobiologia, 1990, 203: 165-175.

## Research progress on aquatic biodiversity and high-quality water fishery technology in large drinking water source reservoirs in Northern China

ZHAO Wen

(Key Laboratory of Hydrobiology in Liaoning Province, College of Fisheries and Life Science, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China)

**Abstract:** Drinking water reservoirs face the threat of eutrophication, and high-quality water fisheries coordinating with water quality and biology are an effective strategy to prevent and control water pollution. Based on data from the past two decades and relevant literature, I reviewed the characteristics of aquatic biodiversity and the research progress of high-quality water fishery technologies in large drinking water reservoirs in northern China. High-quality water fishery technology in northern large reservoirs primarily employs non-classical biomanipulation as part of a diversified biomanipulation strategy. It is essential to establish a multifunctional collaborative optimization model for high-quality water fisheries to regulate water quality and aquatic biological resources and to implement refined and intelligent management of such fisheries. In summary, in-depth research and vigorous implementation of high-quality water fisheries aim to achieve ecologically green and high-quality development of fisheries while ensuring excellent water quality.

**Key words:** Aquatic organisms; biodiversity; community characteristics; water quality; biological manipulation; model; high-quality water fisheries; large drinking water reservoirs in Northern China

附表 1 基于 AODC 法的大型饮用水源水库浮游细菌丰度

Appendix Tab. 1 Planktonic bacterial abundance in the large drinking water reservoirs in northern China based on the AODC method

水库 reservoir	英文名 English name	调查年份 survey year	细菌丰度/ $(10^7 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1})$ bacterial abundance	参考文献 references
大伙房水库	Dahuofang Reservoir	2008—2009	736	赵文等 <sup>[11]</sup>
大伙房水库	Dahuofang Reservoir	2010	5 370	赵文等 <sup>[11]</sup>
大伙房水库	Dahuofang Reservoir	2016—2017	66.9	王欢等 <sup>[12]</sup>
碧流河水库	Biliuhe Reservoir	2016—2019	3.38	赵文等 <sup>[1]</sup>
桓仁水库	Huanren Reservoir	2008	1 990	赵文等 <sup>[11]</sup>
白石水库	Baishi Reservoir	2013—2014	6 230	赵文等 <sup>[11]</sup>
新立城水库	Xinlicheng Reservoir	2020—2022	0.51	本文
密云水库	Miyun Reservoir	2016—2018	0.012 7	朱文字等 <sup>[13]</sup>
英那河水库	Yingnahe Reservoir	2002—2003	2.57	赵文等 <sup>[14]</sup>
汤河水库	Tanghe Reservoir	2023—2025	1.88	本文
柴河水库	Chaihe Reservoir	2023—2025	1.32	本文
观音阁水库	Guanyinge Reservoir	2024—2025	1.11	本文
青山水库	Qingshan Reservoir	2025	13.20	本文

附表 2 北方大型饮用水源水库浮游植物的群落结构特征

Appendix Tab. 2 Characteristics of phytoplankton community structure in the large drinking water reservoirs in Northern China

水库 reservoir	调查年份 survey year	密度/ $(10^7 \text{ ind.} \cdot \text{L}^{-1})$ density	生物量/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$ biomass	生物量 优势类群 dominant taxa	种类数 number of species	多样性 指数 $H'$	均匀度 指数 $J$	参考文献 references
新立城水库	2020.09—2022.08	1.22	4.88	隐藻-绿藻-硅藻	292	2.60	0.56	本文
碧流河水库	2016.10—2019.09	0.51	5.77	硅藻	331	3.47	0.72	赵文等 <sup>[1]</sup>
英那河水库	2002—2003	2.50	10.58	硅藻-绿藻	151	1.75	0.48	赵文等 <sup>[14]</sup>
观音阁水库	2008	0.58	5.59	硅藻	72	3.27	0.71	焉鸿启等 <sup>[19]</sup>
大伙房水库	2012.07—2013.05	5.89~12.2	2.60~5.80	硅藻	82	2.29~4.07	—	张玉 <sup>[20]</sup>
大伙房水库	2015.05—2017.01	0.54	2.39	硅藻	164	2.73	0.60	本文
白石水库	2013.09—2014.07	1.34	11.33	硅藻-隐藻	239	2.61	0.36	李沂軒等 <sup>[21]</sup>
桓仁水库	2015.07—2018.08	4.93	12.06	硅藻-隐藻	249	2.68	0.55	赵文等 <sup>[22]</sup>
密云水库	2016.06—2018.09	0.37	7.90	硅藻-绿藻	108	2.99	0.59	王哲等 <sup>[23]</sup>
锦凌水库	2019.05—2020.06	0.70	3.03	隐藻	116	2.77	0.67	张湾等 <sup>[24]</sup>
水丰水库	2015.06—2019.10	0.07	0.97	—	76	1.11	—	魏洪祥 <sup>[25]</sup>
柴河水库	2018—2021	1.16	6.25	硅藻-隐藻-绿藻	135	4.27	0.82	郭凯等 <sup>[26]</sup>
柴河水库	2018.11—2021.04	1.66	5.32	绿藻-硅藻	244	2.33	—	牟悦 <sup>[27]</sup>
柴河水库	2023.07—2025.12	5.32	3.99	硅藻-绿藻	107	2.97	0.55	本文
汤河水库	2023.07—2025.12	3.26	2.23	硅藻	134	3.61	0.76	本文
观音阁水库	2024.07—2025.12	1.07	3.99	硅藻-隐藻	101	2.79	0.72	本文

附表 3 北方大型饮用水源水库浮游动物群落结构特征

Appendix Tab. 3 Characteristics of zooplankton community structure in the large drinking water reservoirs in Northern China

水库 reservoir	调查年份 survey year	密度/ (ind. · L <sup>-1</sup> ) density	密度优势类群 dominant taxa	生物量/ (mg · L <sup>-1</sup> ) biomass	优势类群 dominant taxa	种类数 number of species	多样性 指数 H'	均匀度 指数 J	PB/ZB	参考文献 references
新立城水库	2020.09—2022.08	4 260	原生动物、轮虫	2.36	桡足类、轮虫	154	2.65	0.65	2.07	本文 (n=7)
碧流水库	2016.10—2019.08	398.8	原生动物、轮虫	0.51	轮虫、桡足类	199	3.01	0.68	11.31	赵文等 <sup>[1]</sup>
英那河水库	2002—2003	992	轮虫、原生动物	4.21	轮虫、原生动物	83	3.43	0.71	2.51	谢平等 <sup>[9]</sup>
大伙房水库	2015.05—2017.01	209	轮虫、原生动物	0.36	轮虫、桡足类	202	2.65	0.70	6.64	赵文等 <sup>[1]</sup>
桓仁水库	2018.04—2018.08	526.6	轮虫、原生动物	2.16	轮虫、枝角类	107	2.59	0.55	5.58	庞雨佳等 <sup>[30]</sup>
汤河水库	2007	1 521	原生动物、轮虫	1.78	轮虫、枝角类	53	1.83	—	10.78	刘丙阳等 <sup>[31]</sup>
观音阁水库	2008.09—2008.10	137	轮虫、原生动物	3.49	桡足类、轮虫	29	2.90	0.78	1.54	焉鸿启等 <sup>[19]</sup>
锦凌水库	2019—2020	2 192	原生动物、轮虫	3.88	枝角类、桡足类	70	3.22	0.72	0.78	张湾等 <sup>[24]</sup>
白石水库	2013.09—2014.07	770	轮虫、原生动物	2.60	轮虫、原生动物	222	2.87	0.49	4.36	张荣坤等 <sup>[32]</sup>
密云水库	2016.06—2018.09	4 497	原生动物、轮虫	7.50	枝角类、桡足类	113	4.33	0.64	1.05	董显坤等 <sup>[33]</sup>
柴河水库	2008	358	轮虫、原生动物	3.49	轮虫、枝角类	42	3.15	0.74	1.79	郭凯等 <sup>[26]</sup>
柴河水水库	2023.07—2025.12	3 322	原生动物、轮虫	2.10	轮虫、枝角类	84	3.07	0.69	1.90	本文 (n=7)
汤河水库	2023.07—2025.12	1 037	原生动物、轮虫	1.28	轮虫、枝角类	76	2.80	0.69	1.74	本文 (n=7)
观音阁水库	2024.07—2025.12	2 019	原生动物、轮虫	4.54	枝角类、轮虫	93	2.72	0.69	0.88	本文 (n=6)

附表 4 北方大型饮用水源水库底栖动物的群落结构特征

Appendix Tab. 4 Characteristics of benthic animal community structure in the drinking water reservoirs in Northern China

水库 reservoir	调查年份 survey year	种类数 numbers of species	密度/ (ind. · L <sup>-1</sup> ) density	生物量/ (mg · L <sup>-1</sup> ) biomass	优势类群 dominant taxa	多样性 指数 H'	均匀度 指数 J	参考文献 references
新立城水库	2020.09—2022.08	14	148.65	1.10	水丝蚓、红裸须摇蚊	1.63	0.71	本文
碧流河水水库	2008—2009	11	2 011	5.52	霍甫水丝蚓、正颤蚓	0.77	0.52	赵文等 <sup>[34]</sup>
碧流河水水库	2016.10—2018.04	31	1 770	7.53	水丝蚓、红裸须摇蚊	2.04	0.76	赵文等 <sup>[1]</sup>
汤河水库	2010.07—2011.09	15	224.6	4.69	水丝蚓	1.23	0.81	史键等 <sup>[35]</sup>
大伙房水库	2010.05—2011.09	19	235.8	101.56	水丝蚓、苏氏尾腮蚓	1.46	0.69	史键等 <sup>[35]</sup>
大伙房水库	2015.05—2017.01	70	143	0.63	水丝蚓	0.74	0.25	赵文等 <sup>[1]</sup>
锦凌水库	2019.05—2020.06	9	290	10.33	红裸须摇蚊、水丝蚓	0.75	0.58	张湾等 <sup>[24]</sup>
官厅水库	2007.03—12	43	5 037	39.8	水丝蚓、红裸须摇蚊	2.03	0.56	陈立斌等 <sup>[36]</sup>
官厅水库	2019.04—10	19	259	37.2	直缘萝卜螺	—	—	邢壮壮 <sup>[37]</sup>
密云水库	2015.04—10	15	1 864	3.10	正颤蚓、红裸须摇蚊	—	—	胡涛等 <sup>[38]</sup>
于桥水库	2010.05—2011.05	51	159.58	3.31	水丝蚓、侧叶雕翅摇蚊	—	—	马秀娟等 <sup>[39]</sup>
桓仁水库	2015—2018	33	221.49	4.51	水丝蚓	1.20	0.72	赵文等 <sup>[22]</sup>
柴河水库	2023.07—2025.12	4	116.2	0.79	水丝蚓、若西摇蚊	0.22	0.23	本文
汤河水库	2023.07—2025.12	6	50.6	0.74	水丝蚓、摇蚊幼虫	0.42	0.20	本文
观音阁水库	2024.07—2025.12	6	69.72	0.31	霍甫水丝蚓	0.09	0.09	本文



续附表 5 北方大型饮用水源水库的鱼类物种多样性

Cont. Appendix Tab. 5 Fish diversity in the large drink water reservoirs in Northern China

编号 No.	物种 species	拉丁名 latin name	水库 reservoir											
			碧 流 河 水 库	新 立 城 水 库	柴 河 水 库	汤 河 水 库	观 音 阁 水 库	大 伙 房 水 库	密 云 水 库	白 石 水 库	青 山 水 库	桓 仁 水 库		
	<b>鲇形目</b>	<b>Siluriformes</b>												
	<b>鲿科</b>	<b>Bagridae</b>												
34	黄颡鱼	<i>Pelteobagrus fulvidraco</i> (Richardson, 1846)	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	+
35	光泽黄颡鱼	<i>Pelteobagrus nitidus</i> (Sauvage et Dabry, 1874)		+										
36	乌苏里拟鲿	<i>Pseudobagrus ussuriensis</i> (Dybowski, 1872)	+											+
	<b>鲇科</b>	<b>Siluridae</b>												
37	鲇	<i>Silurus asotus</i> (Linnaeus, 1758)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
38	怀头鲇	<i>Silurus soldatovi</i> (Nikolsky, 1851)	+											+
	<b>刺鱼目</b>	<b>Gasterosteiformes</b>												
39	中华多刺鱼	<i>Pungitius sinensis</i> (Guichennot, 1869)												
	<b>鲈形目</b>	<b>Perciformes</b>												
	<b>鲈科</b>	<b>Percichthyidae</b>												
40	鳊	<i>Siniperca chuatsi</i> (Basilewsky, 1855)	+					+	+					+
41	斑鳊	<i>Siniperca scherzeri</i> (Steindachner, 1892)	+				+	+				+		+
	<b>虾虎鱼科</b>	<b>Gobiidae</b>												
42	波氏吻虾虎鱼	<i>Rhinogobius cliffordpopei</i> (Nichols, 1925)	+								+		+	
43	条尾裸身虾虎鱼	<i>Gymnogobius urotaenia</i> (Hilgendorf, 1879)	+											
44	斑尾腹虾虎鱼	<i>Synechogobius ommaturus</i> (Richardson, 1845)	+											
	<b>塘鳢科</b>	<b>Eleotridae</b>												
45	葛氏鲈塘鳢	<i>Percottus glehni</i> (Dybowski, 1877)	+	+		+					+			+
	<b>沙塘鳢科</b>	<b>Odontobutidae</b>												
46	鸭绿沙塘鳢	<i>Odontobutis yaluensis</i> (Wu, 1993)												+
47	河川沙塘鳢	<i>Odontobutis potamophila</i> (Günther, 1861)												
48	小黄鲷鱼	<i>Micropercops swinhonis</i> (Günther, 1873)	+	+	+			+			+	+		+
	<b>鳢科</b>	<b>Channidae</b>												
49	乌鳢	<i>Chana argus</i> (Cantor, 1842)	+	+		+					+		+	+
	<b>鲑形目</b>	<b>Salmoniniformes</b>												
	<b>胡瓜鱼亚目</b>	<b>Osmeriformes</b>												
	<b>胡瓜鱼科</b>	<b>Osmeridae</b>												
50	池沼公鱼	<i>Hypomesus olidus</i> (Pallas, 1811)					+	+		+	+		+	+
	<b>银鱼科</b>	<b>Salangidae</b>												
51	大银鱼*	<i>Protosalanx chinensis</i> (Basilewsky, 1855)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	总计		35	23	13	18	18	23	27	22	18	41		

附表 6 北方大型引用水源水库桡足类常见种的个体大小

Appendix Tab. 6 Individual sizes of common species of Copepods in the large drinking water reservoirs in northern China

物种 species	拉丁名 latin name	体长 body length
汤匙华哲水蚤	<i>Sinocalanus dorrii</i> (Brehm, 1909)	1.30~1.73
近邻剑水蚤	<i>Cyclopsvicinus</i> (Uljanin, 1875)	0.76
台湾温剑水蚤	<i>Thermocyclops taihokuensis</i> (Harada, 1931)	0.7~1.53
广布中剑水蚤	<i>Mesocyclops leuckarti</i> (Claus, 1851)	0.64~1.20
锯缘真剑水蚤	<i>Eucyclops serrulatus</i> (Fischer, 1851)	0.60~1.12
扁平小剑水蚤	<i>Microcyclops venoi</i> (Kiefer, 1937)	0.76
桡足幼体	Copepodid	0.50~0.89
无节幼体	Nauplius	0.15~0.50