

温梦杰,邱龙辉,贾璐歌,等. 辽宁5座水源地水库底栖动物群落结构特征比较[J]. 华中农业大学学报, 2024, 43(2): 175-187.
DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2024.02.020

辽宁5座水源地水库底栖动物群落结构特征比较

温梦杰¹, 邱龙辉¹, 贾璐歌¹, 李江维², 李爽², 沈建忠¹

1. 华中农业大学水产学院, 武汉 430070; 2. 辽宁省汤河水库管理局有限责任公司, 辽阳 111000

摘要 为探究辽宁省5座水源地水库—观音阁、白石、柴河、清河和汤河水库底栖动物的群落结构特征,并根据底栖动物的现存量估算鱼产潜力,为这5座水库保水渔业的放养捕捞提供科学依据,于2019—2020年开展季节性调查,共检出底栖动物67种,其中,节肢动物52种,以摇蚊幼虫为主,有39种;寡毛类12种,主要为颤蚓和仙女虫;软体动物3种,分别为观音阁和汤河水库检出的椭圆萝卜螺,以及观音阁和白石水库的梨形环棱螺和褶纹冠蚌。检出种类以汤河水库最多,39种,其次为观音阁水库34种,白石水库最少,仅23种。密度以白石水库最高,1 546.89 ind/m²,其次为观音阁水库658.33 ind/m²,汤河水库最低,481.92 ind/m²。生物量以白石水库最高,7.76 g/m²,其次为汤河水库5.68 g/m²,清河水库最低,2.49 g/m²。5座水库密度在春、夏、秋季均可出现峰值,但最低值皆出现在夏季;生物量则以春、冬季较高,夏、秋季较低。各库密度和生物量总体表现为静水区最高,仅观音阁水库密度和生物量、白石水库生物量峰值出现在过渡区。观音阁和柴河水库河流区至坝前密度和生物量总体以寡毛类为主,而入水口以摇蚊幼虫占比最高;清河水库和汤河水库入水口至静水区密度和生物量总体以摇蚊幼虫为主,而坝前均以寡毛类占比最高;白石水库入水口至过渡区主要为摇蚊幼虫,坝前静水区以寡毛类为主。群落聚类与MDS排序结果显示,观音阁、柴河和清河水库群落较为相似,而白石水库和汤河水库群落相似性较低,且与观音阁、柴河和清河水库差异明显。CCA结果显示,水深、总氮、氨氮、DOC、叶绿素a含量是5座水库影响底栖动物密度的关键因子。底栖动物种类组成受总氮、氨氮影响明显,汤河水库总氮、氨氮含量最低,表现为种类最多,摇蚊幼虫优势地位高;白石水库中总氮、氨氮含量最高,表现为种类最少,水丝蚓优势地位高。基于底栖动物估算的鱼产潜力白石水库最高,汤河水库次之,清河水库最低。与以往调查数据相比,5座水库种类数均增加,主要是检测出的摇蚊幼虫种类增加;而密度和生物量表现有所不同,观音阁水库密度和生物量均降低,而清河和汤河水库均增加,白石水库则密度增加而生物量降低,柴河水库则密度降低而生物量增加。以上结果表明,应根据这5座水源地水库底栖动物群落结构特征,针对性地管理底栖动物食性鱼类的放养和捕捞。

关键词 底栖动物; 群落结构; 鱼产潜力; 环境因子; 水源地水库; 辽宁省

中图分类号 Q958.8 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2024)02-0175-13

观音阁水库坐落于辽宁省本溪市,属于太子河流域,水库控制流域面积为2 795 km²,总库容21.68亿m³,是太子河流域主要的大型水库之一。白石水库坐落于辽宁省北票市,属于大凌河流域,水库控制流域面积17 649 km²,总库容16.45亿m³,近年平均调节水量约5.28亿m³,水库规模居辽宁第三。柴河水库坐落于辽宁省铁岭县境内,属于辽河支流的柴河流域,水库控制流域面积1 355 km²,最大库容为6.36亿m³。清河水库坐落于辽宁省铁岭市清河区,属于辽河支流的清河流域,水库控制流域面积2 376

km²,总库容9.71亿m³。汤河水库坐落于辽宁省辽阳市弓长岭区,属于太子河支流的汤河流域,水库控制流域面积1 228 km²,总库容7.07亿m³。这5座水库以防洪、供水为主,同时兼具灌溉、发电、养鱼等综合功能,以往的渔业生产活动对水库水体生态系统稳定性影响较大,如网箱养殖产生的饵料残余及鱼类排泄物的累计增加了水库的营养负荷。近年来,我国水库的渔业发展加强了生物资源的保护,避免过度利用而引起生态失衡,同时注重生态环境的修复和改善。辽宁省这5座水库的功能随之进行转变,作

收稿日期: 2022-12-01

基金项目: 国家重点研发计划“蓝色粮仓科技创新”专项(2019YFD0900700); 辽宁省水源地有机渔业有限责任公司委托项目

温梦杰, E-mail: mengj8026@163.com

通信作者: 沈建忠, E-mail: jzhsh@mail.hzau.edu.cn

为周边地区的重要水源地管理,同时开展以改善水质为目的的保水渔业,通过合理的放养捕捞,转移出水体中的营养盐,提高水体生态系统的稳定性,从而使水质不断改善^[1]。

底栖动物是指大部分或者全部生活史栖息于水体底部的水生动物类群,主要以藻类和有机碎屑为食,是鲤、鲫等底层鱼类的天然饵料^[2]。对底栖动物群落结构和现存量开展调查,通过估算底栖动物可以提供的鱼产潜力,可为保水渔业合理的放养捕捞提供依据^[3-5]。本研究基于2019—2020年对辽宁省5座水源地水库底栖动物的季节性采样调查,对比分析其群落结构特征,解析驱动因子,并对鱼产潜力进行估算,旨在为这5座水源地水库实施保水渔业、合理放养捕捞提供指导,在保障水质的基础上增加经济效益,以实现水源地水库的生态保护和绿色发展目标,同时为我国其他水库提供参考。

1 材料与方法

1.1 采样点和采样时间设置

采样时间为2019年4月(春季)、7月(夏季)、10月(秋季)和2020年8月(夏季)、12月(冬季)。根据水库水域的面积、形状、来水、大坝位置等方面综合考虑,观音阁水库和白石水库设置9个采样位点,柴河水库和清河水库设置8个采样位点,汤河水库设置10个采样位点。根据水库的形态结构,吞吐流特征,自水库入水口至大坝可以分为河流区、过渡区和静水区^[6-7],主要特征为:河流区位于水库入水口区域,水深较小,流速入库后有所降低,但仍为水库中流速最快的区域;过渡区宽且深,相对河流区流速进一步降低,有机碎屑开始大量沉积;静水区位于水库坝前区域,为水库最宽且最深的区域,水体趋于静止,粒径更小的颗粒物进一步沉积。各水库采样点设置具体如图1、表1所示。

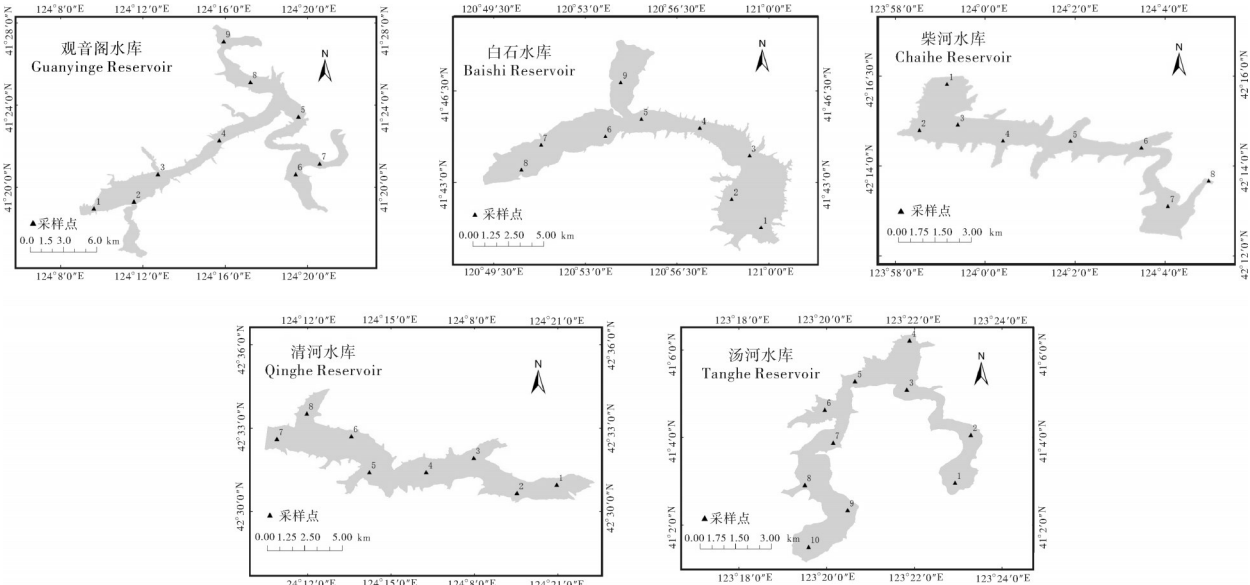


图1 辽宁省5座水库采样点分布图

Fig.1 Distribution of the sampling sites of the five reservoirs in Liaoning Province

表1 辽宁省5座水库采样点的区域划分

Table 1 Regional division of sampling sites in five reservoirs in Liaoning Province

水库区域 Reservoir zone	观音阁水库 Guanying Reservoir	白石水库 Baishi Reservoir	柴河水库 Chaihe Reservoir	清河水库 Qinghe Reservoir	汤河水库 Tanghe Reservoir
河流区 River zone	<u>6[#]</u> 、 <u>7[#]</u> 、 <u>8[#]</u> 、 <u>9[#]</u>	<u>7[#]</u> 、 <u>8[#]</u>	<u>6[#]</u> 、 <u>7[#]</u> 、 <u>8[#]</u>	<u>1[#]</u> 、 <u>2[#]</u>	<u>1[#]</u> 、 <u>2[#]</u> 、 <u>9[#]</u> 、 <u>10[#]</u>
过渡区 Transition zone	4 [#] 、5 [#]	4 [#] 、5 [#] 、6 [#] 、9 [#]	4 [#] 、5 [#]	3 [#] 、4 [#] 、5 [#]	6 [#] 、7 [#] 、8 [#]
静水区 Still water zone	<u>1[#]</u> 、 <u>2[#]</u> 、 <u>3[#]</u>	<u>1[#]</u> 、 <u>2[#]</u> 、 <u>3[#]</u>	<u>1[#]</u> 、 <u>2[#]</u> 、 <u>3[#]</u>	6 [#] 、 <u>7[#]</u> 、8 [#]	3 [#] 、 <u>4[#]</u> 、5 [#]

注:下划线“—”表示坝前;下划线“=”表示水库入水口。Note: Underline “—” indicates in front of dam, underline “=” indicates the reservoir entrance.

1.2 底栖动物样品采集及处理

定量采样时使用1/16 m²彼得森采泥器采集底

栖动物定量样品,定性样品采用D型网在水库周边采样。采集到的定量和定性样品使用0.35 mm孔径

的网筛分选,分筛后的残留物置于白瓷盘中,将其中的底栖动物分类挑出并置于样品瓶中,加入75%的乙醇固定保存后带回实验室。

在解剖镜和显微镜下对底栖动物样品的种类进行鉴定,每个种类分别计数,用吸水纸吸去表面水分后,使用精确度为0.000 1 g的电子天平称质量,结果换算为每平方米的生物量。种类鉴定参照文献[8-12]进行。

1.3 环境因子测定

本次调查测定的理化指标:水温(WT)、水深(WD)、酸碱度(pH)、溶解氧(DO)、总氮(TN)、氨氮(NH_4^+-N)、硝酸盐氮(NO_3^--N)、总磷(TP)、正磷酸盐($\text{PO}_4^{3--}\text{P}$)、叶绿素a(Chl a)、化学需氧量(COD_{Mn})、溶解性有机碳(DOC)。使用YSI多参数水质分析仪对水温、溶解氧、酸碱度进行现场检测;水深通过采样时彼得森采泥器的入水深度测得;采集1 L水样低温保存带回实验室,根据文献[13]对总氮、氨氮、硝酸盐氮、总磷、正磷酸盐、叶绿素a、化学需氧量、溶解性有机碳进行测定。

1.4 数据分析

1) 优势度。使用优势度指数(Y)^[14]确定各水库底栖动物的优势种。计算公式为: $Y=(n_i/N)\times f_i$ 。

式中: n_i 为第*i*种的个体数, N 为样品中所有个体总数, f_i 为第*i*种在各采样位点出现的频率, $Y\geq 0.02$ 为优势种, $Y\geq 0.10$ 为绝对优势种。

2) 群落结构相似性。采用非参数多变量群落结构分析方法对各水库底栖动物群落结构进行分析,使用Bray-Curtis相似性系数构建群落矩阵,基于矩阵进行群落相似性聚类分析和非参数多变量排序(multidimensional scaling, MDS)对底栖动物群落结构进行分析^[15]。以上分析在PRIMER 6.0软件中完成。

3) 与环境因子之间的关系。使用典范对应分析法(canonical correspondence analysis, CCA)分析大型底栖动物群落与环境因子之间的关系,CCA分析在Canoco 5.0软件中完成。分析之前进行除趋势对应分析(detrended correspondence analysis, DCA),发现5座水库最大梯度长度值均大于3,故选择单峰模型(CCA)排序,通过蒙特卡罗检验(Monte Carlo test)验证显著性($P<0.05$),使用向前选择法(forward selection)筛选贡献率高的环境因子,CCA分析前,将物种的密度数据进行平方根转换,环境因子进行 $\lg(x+1)$ 转换,以使数据呈正态分布^[16]。

4) 鱼产潜力估算。底栖动物每年可提供的鱼产潜力计算公式^[17]: $F=0.7B_0+0.4B_1+0.02B_M$ 。

式中: F 为每年水库底栖动物可以提供的鱼产潜力, B_0 为寡毛类生物量, B_1 为水生昆虫生物量, B_M 为软体动物生物量。

2 结果与分析

2.1 底栖动物种类组成及优势种

2019—2020年调查的这5座水库中,共采集到底栖动物67种,包括节肢动物52种,寡毛类12种以及软体动物3种。节肢动物中水生昆虫种类最多,有50种,以摇蚊幼虫为主,为39种;寡毛类主要为仙女虫和颤蚓类;3种软体动物分别为观音阁和汤河水库检出的椭圆萝卜螺,以及观音阁和白石水库的梨形环棱螺和褶纹冠蚌。汤河水库种类数最高,有39种,节肢动物31种,寡毛类7种,软体动物1种;其次为观音阁水库35种,节肢动物24种,寡毛类9种,软体动物2种;清河水库29种,节肢动物22种,寡毛类7种;柴河水库25种,节肢动物16种,寡毛类9种;白石水库23种,节肢动物14种,寡毛类8种,软体动物1种(表2)。

汤河水库优势种数量最多,有5种,观音阁、柴河和清河水库次之,均为4种,白石水库优势种数量最少,仅3种(表2)。其中,霍普水丝蚓是观音阁水库、白石水库和柴河水库的绝对优势种,也是5座水库的共同优势种,清河水库的绝对优势种为花翅前突摇蚊,汤河水库为黄色羽摇蚊和红裸须摇蚊。

2.2 底栖动物密度与生物量

密度以白石水库最高,1 546.89 ind/m²,然后依次为观音阁水库658.33 ind/m²、柴河水库589.82 ind/m²、清河水库587.63 ind/m²,汤河水库最低,481.92 ind/m²。生物量也以白石水库最高,7.76 g/m²,其次为汤河水库5.68 g/m²,其他3座水库生物量相近,柴河、观音阁和清河水库分别为2.65、2.61和2.49 g/m²。各库不同底栖动物类群对密度和生物量的贡献不同,观音阁和柴河水库寡毛类对密度和生物量贡献最高,而白石、清河和汤河水库水生昆虫对密度和生物量贡献最高。这5座水库水生昆虫密度和生物量组成中摇蚊幼虫的贡献比例均在99%以上,鞘翅目和半翅目的贡献比例不足1%;寡毛类密度和生物量主要来自颤蚓类,其贡献比例超过70%,其他为仙女虫和带丝蚓等。

表 2 辽宁省5座水库底栖动物种类组成

Table 2 The species composition of zoobenthos in five reservoirs in Liaoning Province

种类组成 Species composition	观音阁水库 Guanyinge Reservoir	白石水库 Baishi Reservoir	柴河水库 Chaihe Reservoir	清河水库 Qinghe Reservoir	汤河水库 Tanghe Reservoir
节肢动物门 Arthropoda					
软甲纲 Malacostraca					
端足目 Amphipoda					
异钩虾 <i>Anisogammarus</i> sp.	+	+	-	-	-
十足目 Decapoda					
白虾属一种 <i>Exopalaemon</i> sp.	+	-	-	+	+
昆虫纲 Insecta					
蜻蜓目 Odonata					
虻 <i>Caenagrionidae</i> spp.	-	-	-	+	-
鞘翅目 Coleoptera					
龙虱 <i>Dytiscidae</i> spp.	-	+	-	-	+
青步甲 <i>Chlaenius</i> sp.	-	-	-	-	+
毛翅目 Trichoptera					
沼石蛾 <i>Hydrotophylax</i> sp.	-	-	+	-	-
蜉蝣目 Ephemeroptera					
东方蜉 <i>Ephemera orientalis</i>	+	-	-	-	-
半翅目 Hemiptera					
横纹划蝽 <i>Sigara substriata</i>	+	-	+	+	+
斑点小划蝽 <i>Micronecta guttata</i>	-	-	-	+	+
中华螳螂蝽 <i>Ranatra chinensis</i>	+	-	-	-	-
铜锈负子蝽 <i>Diplonychus rusticus</i>	+	-	-	-	-
双翅目 Diptera					
库蠅 <i>Culicoides</i> sp.	-	+	-	-	-
雅大蚊 <i>Tipula</i> sp.	-	-	-	-	+
三带环足摇蚊 <i>Cricotopus tnifasciatus</i>	-	-	-	-	+
伊尔克真开氏摇蚊 <i>Eukieffeeriella ilkleyensis</i>	-	-	-	-	+
红裸须摇蚊 <i>Prosilocerus akamusi</i>	+	+	+	+	++
软异三突摇蚊 <i>Heterotrissocladius marcidus</i>	+	-	-	-	+
海滨摇蚊 <i>Clunio</i> sp.	+	+	-	+	+
平桡枝角摇蚊 <i>Cladopelma edwardsi</i>	-	-	-	-	+
墨墨摇蚊 <i>Chironomus anthracinus</i>	+	-	-	-	-
三段二叉摇蚊 <i>Dicrotendipus tritomus</i>	+	-	-	-	-
亮黑弯铗摇蚊 <i>Crytochironomus nigronitens</i>	-	+	-	-	+
凹铗隐摇蚊 <i>Crytochironomus defectus</i>	-	+	-	-	-
小云多足摇蚊 <i>Polypedilum nubeculosm</i>	+	-	+	+	-
俊才齿斑摇蚊 <i>Stictochironomus juncai</i>	+	-	-	-	-
梯形多足摇蚊群 A 种 <i>Polypedilum scalaenumgroup</i> sp. A	+	-	-	+	+
猛摇蚊 <i>Chironomus acerbiphilus</i>	-	-	+	+	-
黄色羽摇蚊 <i>Chironomus flaviplumus</i>	+	+	+	+	++
隐摇蚊属一种 <i>Crytochironomus</i> sp.	-	-	-	-	+
柔嫩雕翅摇蚊 <i>Glyptotendipes cauliginellus</i>	-	-	-	-	+
德永雕翅摇蚊 <i>Glyptotendipes tokunagai</i>	+	-	-	-	+
拟踵突多足摇蚊 <i>Polypedilum paraviceps</i>	++	-	+	+	+
多齿斑摇蚊 <i>Stictochironomus multannulatus</i>	-	-	-	+	-
喙隐摇蚊 <i>Crytochironomus rostratus</i>	-	-	-	+	-

续表 2 Continued Table 2

种类组成 Species composition	观音阁水库 Guanyinge Reservoir	白石水库 Baishi Reservoir	柴河水库 Chaihe Reservoir	清河水库 Qinghe Reservoir	汤河水库 Tanghe Reservoir
云集多足摇蚊 <i>Polypedilum nubifer</i>	—	—	—	—	+
弯缺摇蚊属 A 种 <i>Cryptotendipes</i> sp. A	+	+	+	++	+
喜盐摇蚊 <i>Chironomus salinarius</i>	—	+	—	—	+
苍白摇蚊 <i>Chironomus palidivittatus</i>	+	+	+	+	+
溪流摇蚊 <i>Chironomus riparius</i>	—	—	—	+	+
尼提达单寡角摇蚊 <i>Monodiamesa nitida</i>	—	—	—	+	—
博尔拉普摇蚊 <i>Lappodiamesa boltoni</i>	—	—	+	+	—
大粗腹摇蚊属一种 <i>Macropelopia thienemann</i> sp.	—	—	—	—	+
花翅前突摇蚊 <i>Procladius choreus</i>	++	—	+	++	++
红前突摇蚊 <i>Procladius rufovittatus</i>	—	—	—	—	+
长足摇蚊属一种 <i>Tanypus</i> sp.	—	—	+	—	+
合缺特突摇蚊 <i>Thienemannimyia fuscipes</i>	—	—	—	—	+
前突摇蚊属 C 种 <i>Procladius</i> sp. C	—	—	+	+	—
绒缺长足摇蚊 <i>Tanypus villipennis</i>	—	+	+	+	—
刺缺长足摇蚊 <i>Tanypus punctipennis</i>	+	++	+	+	—
斑点塔纳摇蚊 <i>Natarsia punctata</i>	+	+	—	—	+
拟杂色大粗腹摇蚊 <i>Macropelopia paranebulosa</i>	+	—	+	—	+
前突摇蚊属 B 种 <i>Procladius</i> sp. B	+	—	—	—	—
环节动物门 Annelida					
寡毛纲 Oligochaeta					
夹杂带丝蚓 <i>Lumbriculus variegatus</i>	+	+	++	+	+
参差仙女虫 <i>Nais variabilis</i>	+	++	++	+	+
肥满仙女虫 <i>Nais inflata</i>	—	—	—	—	+
克拉泊水丝蚓 <i>Limnodrilus claparedeianus</i>	—	+	—	—	—
巨毛水丝蚓 <i>Limnodrilus grandisetosus</i>	—	+	+	—	—
颤蚓属一种 <i>Tubifex</i> sp.	+	—	+	—	—
中华颤蚓 <i>Tubifex sinicus</i>	++	+	+	+	++
正颤蚓 <i>Tubifex tubifex</i>	+	+	+	++	+
霍甫水丝蚓 <i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>	++	++	++	++	++
厚唇嫩丝蚓 <i>Teneridrilus mastix</i>	+	—	+	—	—
维奈夫盘丝蚓 <i>Bothrioneurem vejdvoskyanum</i>	+	—	—	+	—
苏氏尾鳃蚓 <i>Branchiura sowerbyi</i>	+	+	++	+	+
软体动物门 Mollusca					
腹足纲 Gastropoda					
基眼目 Basommatophora					
椭圆萝卜螺 <i>Radix swinhoei</i>	+	—	—	—	+
中腹足目 Mesogastropoda					
梨形环棱螺 <i>Bellamya purificata</i>	+	—	—	—	—
瓣鳃纲 Lamellibranchia					
真瓣鳃目 Eulamellibranchia					
褶纹冠蚌 <i>Cristaria plicata</i>	—	+	—	—	—
总计 Total	35	23	25	29	39

注：“+”表示存在，“++”表示优势种，“-”表示未见。Note: "+" indicates presence, "++" indicates dominant species, and "-" indicates not seen.

1) 5座水库底栖动物密度与生物量水平分布。5座水库底栖动物密度和生物量总体表现为静水区最高,仅观音阁水库密度和生物量、白石水库生物量在过渡区最高(图2)。其中,观音阁和柴河水库河流区

至坝前密度和生物量总体以寡毛类为主,而观音阁水库入水口(7[#])和柴河水库入水口(8[#])均以摇蚊幼虫对密度和生物量贡献最高;清河水库入水口(1[#])和汤河水库入水口(1[#]和10[#])至静水区密度和生物量总

体以摇蚊幼虫为主,而2座水库坝前均以寡毛类对密度和生物量贡献最高;白石水库则表现为入水口(8[#])至过渡区摇蚊幼虫贡献比例最高,坝前静水区以寡毛类为主。

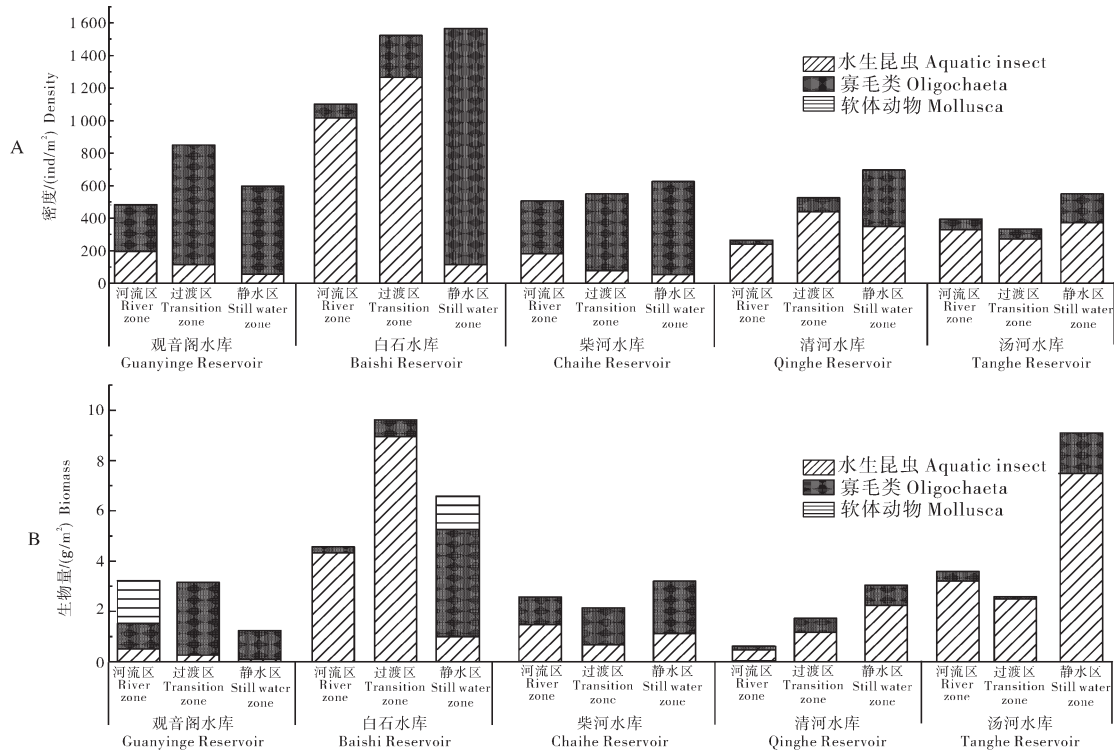


图2 底栖动物密度(A)和生物量(B)的水平分布

Fig.2 Horizontal distribution of density(A) and biomass(B) of zoobenthos

2) 5座水库底栖动物密度与生物量季节变化。5座水库底栖动物密度和生物量季节变化不完全一致(图3),密度在春季、夏季和冬季均可出现峰值,但最低值皆在夏季,而生物量总体表现为春季最高,夏季最低,仅白石水库最高值在冬季,观音阁水库最低值在秋季。5座水库水生昆虫密度和生物量季节变化明显,总体以春季最高,夏季最低,仅白石水库密度和生物量最高值在冬季,摇蚊幼虫季节变化趋势与之一致。各水库寡毛类无明显季节变化规律。

2.3 5座水库底栖动物群落聚类与排序

群落相似性聚类与MDS排序(2D Stress=0.01<0.05)结果一致(图4),在相似性为50%时,5座水库可分为3组:第1组汤河水库,第2组白石水库,第3组观音阁水库、柴河水库和清河水库。从MDS排序图中水库之间的距离可以看出,观音阁、柴河和清河水库底栖动物群落结构相似性高,以观音阁、柴河相似性最高;白石和汤河水库群落结构相似性低,且与观音阁、柴河和清河水库的差异明显。

2.4 5座水库底栖动物与环境因子的关系

本研究选用CCA分析(图5),蒙特卡洛检验(Monte Carlo permutation test)验证显著性,通过向前引入法(forward selection)筛选出贡献率较高的环境因子,分别为水深、总氮、氨氮、DOC、叶绿素a含量,其贡献率分别为22.1%、14.8%、10.9%、10.1%、8.6%。前两轴共解释了环境-物种关系的60.82%。第1排序轴与总氮、氨氮、叶绿素a、DOC呈正相关,与水深呈负相关,第2排序轴与叶绿素a呈正相关,与水深、总氮、氨氮、DOC呈负相关。从环境因子对底栖动物密度的影响上看,观音阁和柴河水库底栖动物密度与水深密切相关,呈正相关关系;汤河和清河水库底栖动物密度与总氮、氨氮呈明显的负相关关系;白石水库底栖动物密度与总氮、氨氮、DOC关系更为密切,呈正相关关系。底栖动物种类数和组成受总氮、氨氮含量影响明显,表现为5座水库中汤河水库总氮、氨氮含量最低,底栖动物种类最多,摇蚊幼虫优势地位较高;白石水库中总氮、氨氮含量最高,而底栖动物种类最少,水丝蚓优势地位较高。

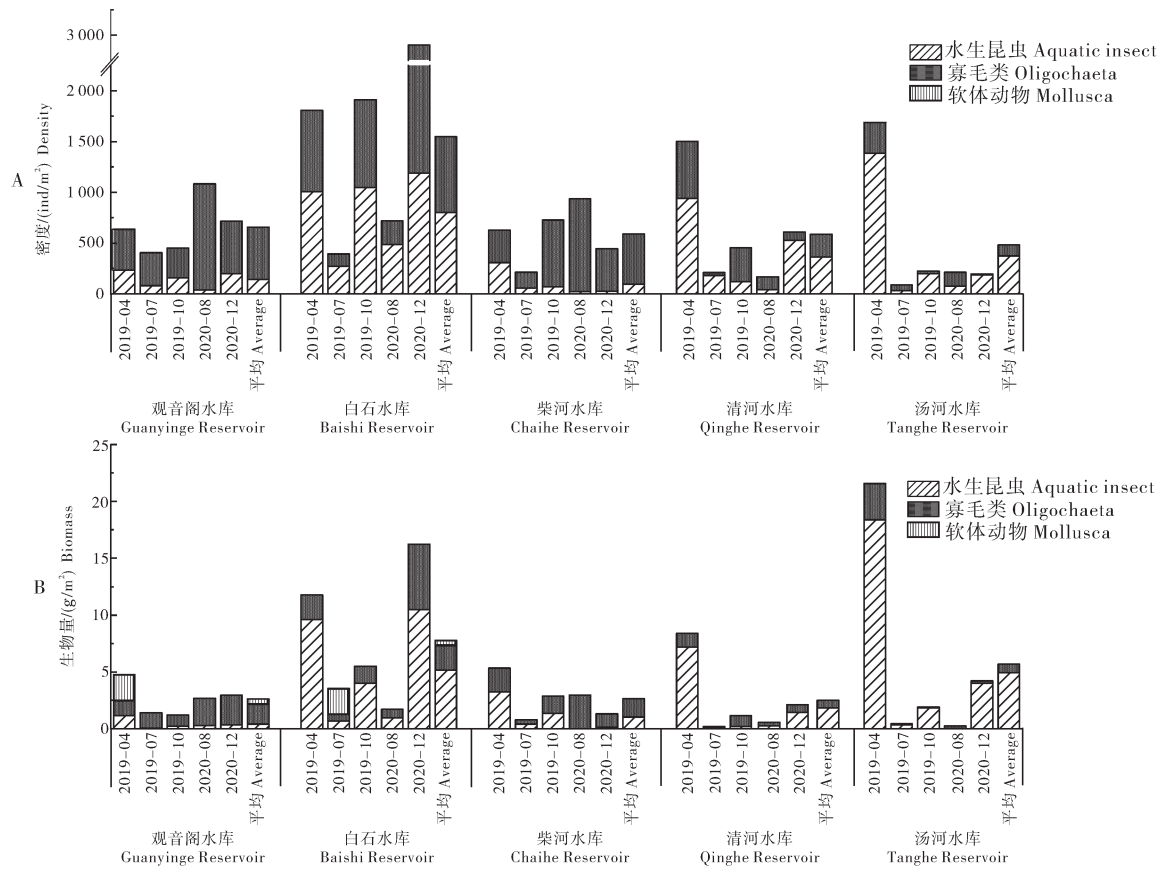


图3 底栖动物密度(A)、生物量(B)季节变化

Fig.3 Seasonal variation of density(A) and biomass(B) of zoobenthos

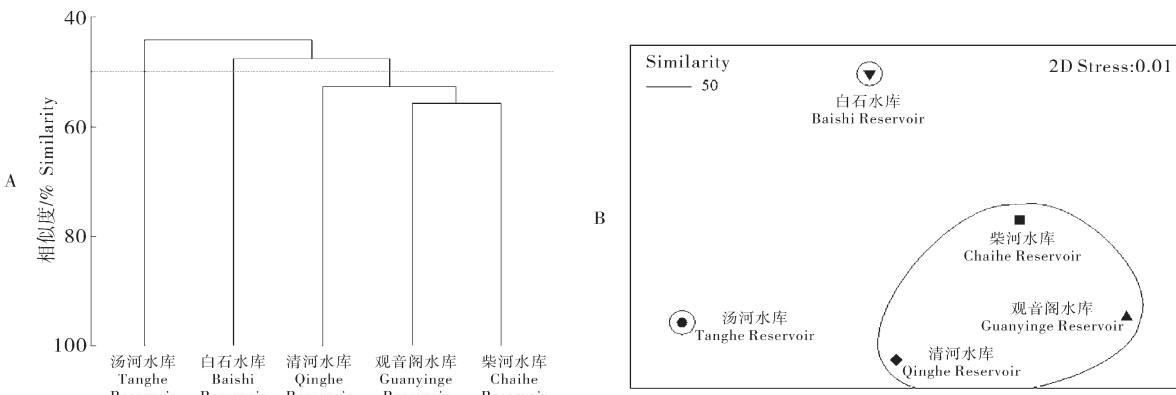


图4 各水库底栖动物的系统聚类(A)与非参数多变量标序(B)

Fig.4 The dendrogram(A) and MDS ordination(B) of zoobenthos communities in each reservoir

2.5 5座水库底栖动物鱼产潜力

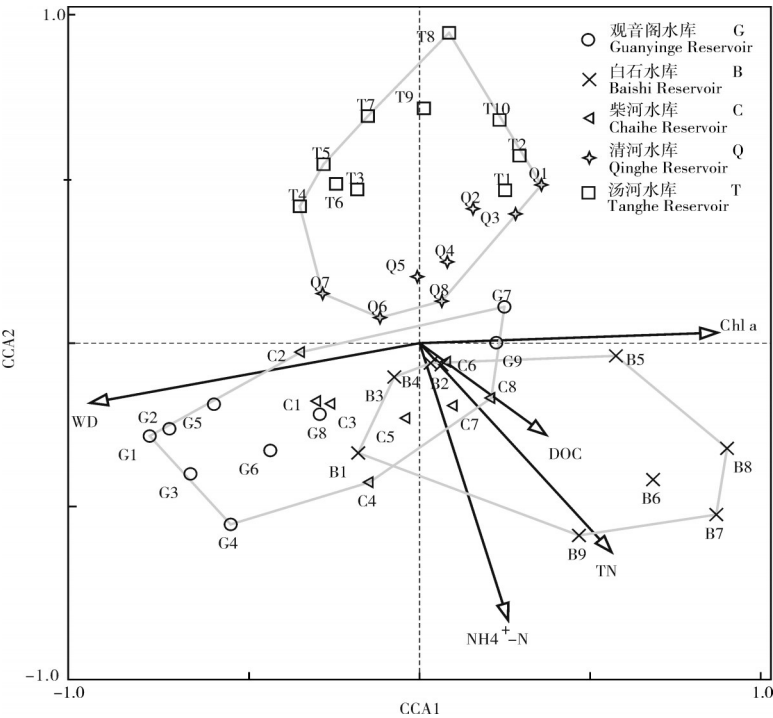
5座水库底栖动物每年可提供的鱼产潜力估算如表4所示,白石水库鱼产潜力最高,为35.75 kg/hm²,其次为汤河水库25.01 kg/hm²,柴河水库15.47 kg/hm²,观音阁水库13.48 kg/hm²,清河水库最低,为11.68 kg/hm²。其中,白石水库、汤河水库和清河水库水生昆虫对鱼产潜力的贡献最高;而观音阁水库与柴河水库则以寡毛类对鱼产潜力贡献最高。观音阁、白石、柴河、清河和汤河水库有效面积按5 660、4 560、

1 660、4 240、1 740 hm²,得出5座水库底栖动物的总鱼产潜力,分别为7.63×10⁴、16.30×10⁴、2.57×10⁴、4.95×10⁴、4.35×10⁴ kg。对比5座水库2019—2021年除鲢、鳙、大银鱼和池沼公鱼以外的其他鱼类总渔获量(图6),此渔获量包括了鲤、鲫等底栖动物食性鱼类,可以看出5座水库底栖动物的总鱼产潜力均高于同时期各库除鲢、鳙、大银鱼和池沼公鱼以外其他鱼类的平均渔获量。

表 3 辽宁省 5 座水库的环境因子

Table 3 The environmental factors of five reservoirs in Liaoning Province

环境因子 Environmental factors index	观音阁水库 Guanyinge Reservoir	白石水库 Baishi Reservoir	柴河水库 Chaihe Reservoir	清河水库 Qinghe Reservoir	汤河水库 Tanghe Reservoir
TN/(mg/L)	1.665 ± 0.173	2.306 ± 0.621	2.095 ± 0.470	2.061 ± 0.116	1.257 ± 0.313
TP/(mg/L)	0.055 ± 0.018	0.058 ± 0.012	0.054 ± 0.009	0.054 ± 0.008	0.036 ± 0.006
NO ₃ ⁻ -N/(mg/L)	1.248 ± 0.097	1.677 ± 0.522	1.697 ± 0.362	1.544 ± 0.203	0.952 ± 0.164 5
NH ₄ ⁺ -N/(mg/L)	0.153 ± 0.030	0.180 ± 0.042	0.106 ± 0.035	0.047 ± 0.018	0.038 ± 0.015 6
PO ₄ ³⁻ -P/(mg/L)	0.046 ± 0.009	0.035 ± 0.009	0.030 ± 0.006	0.042 ± 0.013	0.025 ± 0.005
pH	8.547 ± 0.056	8.608 ± 0.180	8.412 ± 0.152	8.419 ± 0.134	8.439 ± 0.157
WD/m	29.406 ± 12.904	8.572 ± 4.809	13.284 ± 4.249	10.852 ± 3.429	11.316 ± 3.997
Chl a/(μg/L)	6.770 ± 3.914	15.167 ± 7.236	10.594 ± 1.744	14.253 ± 4.353	9.155 ± 2.826
WT/°C	17.002 ± 0.488	16.767 ± 3.464	16.788 ± 0.565	13.803 ± 2.700	17.363 ± 0.633
DO/(mg/L)	9.480 ± 0.649	9.773 ± 1.329	8.296 ± 0.313	9.651 ± 1.024	9.325 ± 0.619
COD _{Mn} /(mg/L)	1.801 ± 0.285	2.267 ± 0.348	2.608 ± 0.198	2.868 ± 0.387	2.028 ± 0.348
DOC/(mg/L)	6.733 ± 0.582	8.807 ± 1.049	9.732 ± 1.025	8.079 ± 0.694	7.598 ± 0.478



图中数字为水库的采样点编号。The numbers in the figure are the numbers of the sampling points in the reservoirs.

图 5 底栖动物密度与环境因子的 CCA 排序图

Fig.5 CCA ordination plots of zoobenthos density and environmental factors

表 4 辽宁省 5 座水库底栖动物的鱼产潜力

Table 4 The fish production potential of zoobenthos in five reservoirs in Liaoning Province kg/hm²

种类 Species	观音阁水库 (占比/%) Guanyinge Reservoir (percentage)	白石水库(占比/%) Baishi Reservoir (percentage)	柴河水库(占比/%) Chaihe Reservoir (percentage)	清河水库(占比/%) Qinghe Reservoir (percentage)	汤河水库(占比/%) Tanghe Reservoir (percentage)
水生昆虫 Aquatic insects	2.26(16.76%)	20.61(57.65%)	4.11(26.59%)	7.29(62.42%)	19.67(78.66%)
寡毛类 Oligochaete	11.13(82.57%)	15.05(42.09%)	11.35(73.42%)	4.39(37.58%)	5.34(21.34%)
软体动物 Mollusca	0.09(0.67%)	0.09(0.25%)	0.00	0.00	0.00
总计 Total	13.48	35.75	15.47	11.68	25.01

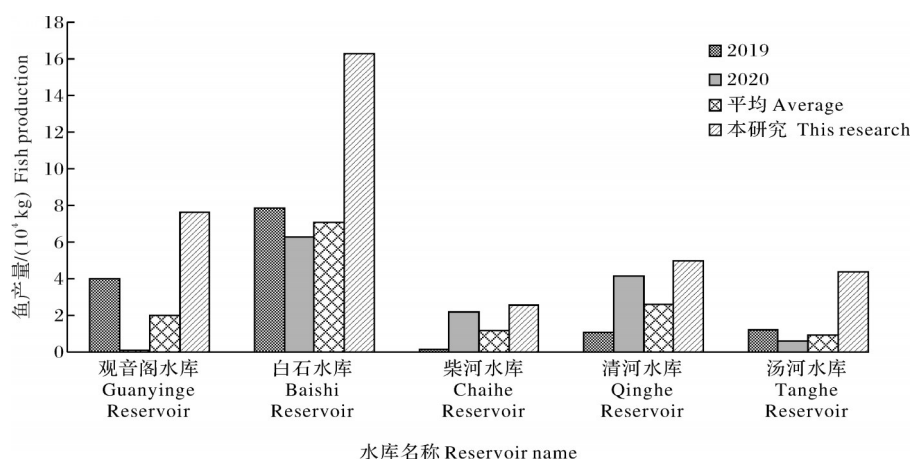


图6 2019—2020年5座水库除鲢、鳙、大银鱼和池沼公鱼之外的其他鱼类总渔获量

Fig.6 Total catch of fish in the five reservoirs except *Hypophthalmichthys molitrix*, *Aristichthys nobilis*, *Protosalanx hyalocranius* and *Hypomesus olidus* from 2019 to 2020

3 讨论

3.1 辽宁省5座水源地水库底栖动物的群落结构特征

底栖动物长期生活在水底,不同类型的水库环境不同,底栖动物种类组成也会有所差异。浅水型水库中光照充足,水生植物丰富,水生植物可为底栖动物提供栖息环境和食物来源,一些软体动物如田螺科、椎实螺科等对水生植物的依赖性较强^[18-20],如官厅水库^[21]、团泊水库^[22]、泥河水库^[23]水域平均深度均未超过3 m,底栖动物除水生昆虫和寡毛类外,软体动物种类也较多。而深水型水库底质以淤泥为主,水底植被覆盖率低,水底环境严酷,底栖动物以耐低温低氧条件的摇蚊幼虫和寡毛类为主,软体动物较少,如大伙房水库^[24]、锦凌水库^[25]、碧流河水库^[3]平均深度均 ≥ 13 m,底栖动物主要为摇蚊幼虫和寡毛类,软体动物未检出或仅检出1~2种。本研究的5座水库位于丘陵地形中,水下地形陡峭,浅水区少,水库较深,底栖动物群落特征,以摇蚊幼虫和寡毛类为主,软体动物仅检出3种。其中,观音阁和汤河水库采集到椭圆萝卜螺和梨形环棱螺的上游河流区有少量水草分布,而白石水库则是在底质以淤泥为主的静水区采集到褶纹冠蚌,这种软体动物喜好隐于底质中以有机碎屑为食,对水生植物的依赖性相对较弱^[26]。

在水库的不同生态区域中,底栖动物组成也有所差异。本研究对5座水库的河流区、过渡区和静水区底栖动物的分布进行分析发现,清河、汤河和白石水库的河流区和过渡区密度及生物量主要来自于摇蚊幼虫。原因在于河流区受水体流速影响,有机质

无法大量沉积,底质粒径相对较大,这种底质适宜摇蚊幼虫的生长,寡毛类分布较少^[7,27]。而过渡区水体流速降低,有机物质开始沉积,底质中有机质含量增加,底质环境趋于适宜寡毛类的生长条件转变^[28-29],清河、汤河和白石水库此区域寡毛类的密度和生物量贡献比例增加,但仍以摇蚊幼虫为主。自过渡区至静水区,这3座水库寡毛类的密度和生物量贡献比例持续增加,不同的是清河和汤河水库寡毛类密度和生物量占比仍未超过摇蚊幼虫,仅白石水库寡毛类的贡献比例超过摇蚊幼虫成为优势类群。但在坝前,清河、汤河和白石水库均以寡毛类为优势类群,且生存状态良好,胡涛等^[30]和池仕运等^[31]在研究中也发现水库坝前适宜寡毛类生长。观音阁和柴河水库底栖动物分布与上述3座水库差异较大,自河流区至静水区2座水库密度和生物量均以寡毛类为主,原因在于观音阁水库水体深度大,平均深度是其他4座水库的2倍以上,柴河水库河流区和过渡区采样点底质中死亡植物碎屑含量相对较多,2座水库的水底环境对寡毛类的生长更为有利^[31-32],而在观音阁水库入水口(7#)和柴河水库入水口(8#),河道狭窄,河流的冲击力较强,不适宜寡毛类的生长^[33],底栖动物密度和生物量以摇蚊幼虫为主。

本研究中5座水库底栖动物密度和生物量季节变化不完全一致,密度最高值在春、夏、秋季均可出现,而最低值皆在夏季,生物量则表现为春、冬季高,夏、秋季低。国内其他水库底栖动物的研究也发现,密度和生物量最高值可以出现在春、夏季^[34-35],也可以出现在秋、冬季^[33,36],但最低值往往在夏、秋季^[33-34,36-37]。原因之一在于夏、秋季由于温度升高,

鱼类的摄食强度提升,底层鱼类的捕食使底栖动物的密度和生物量明显降低^[38-39]。另一方面,摇蚊幼虫的生活习性也是此趋势产生的重要原因,春、冬季是摇蚊幼虫繁殖的重要时期,夏、秋季摇蚊羽化离开水体^[40-41]。此外,本次调查中的常见种红裸须摇蚊还存在高温下潜、低温上移的垂直迁移习性^[42],夏、秋季下潜至深层底质中的红裸须摇蚊难以采集,而春、冬季易采集,进而影响以采集样品数据分析得出的密度和生物量季节变化。

3.2 辽宁省5座水源地水库底栖动物群落结构的变化与保水渔业发展建议

近年来,观音阁、白石、柴河、清河和汤河水库作为当地重要水源地水库管理,全方面实施水源地保护工作,网箱养殖被取缔转而实施保水渔业,网箱养殖被取缔后水体的营养负荷降低,对底栖动物的群落结构产生重要影响。对比历史研究发现,5座水库底栖动物种类均增多,主要是摇蚊幼虫种类增多,而密度和生物量变化趋势不同^[24,28,43-46]。观音阁水库密度和生物量降低^[43],2004年观音阁水库5—9月调查,正处于寡毛类的繁殖期,而观音阁水库主要为寡毛类,密度和生物量因此较高。白石水库密度增加而生物量降低^[44],2013—2014年白石水库的主要优势种如苏氏尾鳃蚓、黄色羽摇蚊等体型明显大于本研究的主要优势种霍普水丝蚓,因此本研究白石水库虽密度增加但生物量有所降低。柴河水库密度降低而生物量增加^[45],原因在于本次调查的优势种苏氏尾鳃蚓体型较大,对生物量贡献高,导致与以往相比密度降低但生物量增加。清河水库生物量较2014年提升明显,2014年生物量较低可能受水库维修工程影响,水库由正常水位降至枯水位运行使底栖动物的生存环境发生变化,水库恢复运行后大量有机质进入,同时鱼类捕捞力度增大,底层鱼类数量得到控制促进了底栖动物的繁衍^[46]。汤河水库2010—2011年与2007—2008年相比密度和生物量明显降低^[24,28],摇蚊幼虫和寡毛类均减少,这可能与2010—2011年采样期间辽宁省内洪水爆发和水库泄洪有关,本次调查汤河水库密度和生物量较2010—2011年有所提升,但仍低于2007—2008年。

对比以往研究估算的鱼产潜力发现,白石鱼产潜力明显降低,柴河和清河水库鱼产潜力均有提高,汤河水库相较于2010—2011年有所提高,但仍低于2007—2008年^[24,28,43-46]。对比5座水库鱼产潜力与同时期的渔获量(图6),建议适当提高5座水库

底层鱼类的放养量,以利于转移水体中氮、磷等营养盐,同时带来经济效益,维持水库保水渔业的可持续发展。

参考文献 References

- [1] 孙露,刘金殿,杨元杰.保水渔业在新建水库渔业中的应用[J].浙江农业科学,2014,55(9):1444-1447.SUN L, LIU J D, YANG Y J. Application of water conservation fishery in newly-built reservoir fishery[J]. Journal of Zhejiang agricultural sciences, 2014, 55(9): 1444-1447 (in Chinese).
- [2] 李俊.山湖水库的渔业资源及其利用[J].水利渔业,2007,28(6):41,48.LI J. Fishery resources and their utilization in Shanhu Reservoir[J]. Reservoir fisheries, 2007, 28(6): 41, 48 (in Chinese).
- [3] 杜瑜,闫洪山,张艳萍.碧流河水库底栖动物及其鱼产力的研究[J].水利渔业,2006,27(3):45-47.DU Y, YAN H S, ZHANG Y P. Study on zoobenthos and their fish productivity in Biliuhe Reservoir[J]. Reservoir fisheries, 2006, 27(3): 45-47 (in Chinese).
- [4] 李涛,周小愿,张星朗,等.蕲河电站水库渔业资源调查和鱼产力估算[J].安徽农业科学,2022,50(19):106-109.LI T, ZHOU X Y, ZHANG X L, et al. Investigation of fishery resources and estimation of fish productivity in Linhe hydropower plant reservoir[J]. Journal of Anhui agricultural sciences, 2022, 50(19): 106-109 (in Chinese with English abstract).
- [5] 谢钦铭,李云,熊国根.鄱阳湖底栖动物生态研究及其底层鱼产力的估算[J].江西科学,1995,13(3):161-170.XIE Q M, LI Y, XIONG G G. Studies on the ecology of zoobenthos and the estimation of bottom-fish productivity in Poyang Lake[J]. Jiangxi science, 1995, 13(3): 161-170 (in Chinese).
- [6] 林秋奇,韩博平.水库生态系统特征研究及其在水库水质管理中的应用[J].生态学报,2001,21(6):1034-1040.LIN Q Q, HAN B P. Reservoir limnology and its application in water quality management: an overview[J]. Acta ecologica sinica, 2001, 21(6): 1034-1040 (in Chinese with English abstract).
- [7] 韩博平.中国水库生态研究的回顾与展望[J].湖泊科学,2010,22(2):151-160.HAN B P. Reservoir ecology and limnology in China: a retrospective comment[J]. Journal of lake sciences, 2010, 22(2): 151-160 (in Chinese with English abstract).
- [8] 齐钟彦.中国动物图谱-第四册-软体动物[M].北京:科学出版社,1985.QI Z Y. Atlas of China animals-volume IV-molluscs[M]. Beijing: Science Press, 1985 (in Chinese).
- [9] 王俊才,王新华.中国北方摇蚊幼虫[M].北京:中国言实出版社,2011.WANG J C, WANG X H. Chironomid larvae in Northern China[M]. Beijing: China Yanshi Press, 2011 (in Chinese).
- [10] 辽宁省环境监测实验中心.辽河流域底栖动物监测图鉴[M].北京:中国环境出版社,2014.Liaoning Environmental

- Monitoring Experimental Center. Illustration of zoobenthos monitoring in Liaohe River Basin[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2014(in Chinese).
- [11] 段学花, 王兆印, 徐梦珍. 底栖动物与河流生态评价[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010. DUAN X H, WANG Z Y, XU M Z. Benthic macroinvertebrate and application in the assessment of stream ecology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010(in Chinese).
- [12] EPLER J H. Identification manual for the larval *Chironomidae* (Diptera) of North and South Carolina[M]. Washington D.C., US: Environment Protection Agency, 2001.
- [13] 国家环境保护总局水和废水监测分析方法编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002. Environmental Protection Administration the Water and Wastewater Monitoring Analysis Method Editorial Board. Water and wastewater monitoring analysis method[M]. 4th edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002(in Chinese).
- [14] 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. Macrozoobenthos community structure and water quality evaluation of Yuqiao Reservoir in Tianjin, North China [J]. Chinese journal of ecology, 2012, 31(9): 2356-2364 (in Chinese with English abstract).
- [15] 周红, 张志南. 大型多元统计软件PRIMER的方法原理及其在底栖群落生态学中的应用[J]. 青岛海洋大学学报(自然科学版), 2003, 33(1): 58-64. ZHOU H, ZHANG Z N. Rationale of the multivariate statistical software PRIMER and its application in benthic community ecology [J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 2003, 33(1): 58-64 (in Chinese with English abstract).
- [16] LEPS J, ŠMILAUER P. Multivariate analysis of ecological data using CANOCO [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [17] 崔奕波, 李钟杰. 长江流域湖泊的渔业资源与环境保护[M]. 北京: 科学出版社, 2005. CUI Y B, LI Z J. Fishery resources and conservation of environment in lakes of the Changjiang River Basin[M]. Beijing: Science Press, 2005(in Chinese).
- [18] THOMAS J D. Mutualistic interactions in freshwater modular systems with molluscan components [M]//Advances in Ecological Research. Amsterdam: Elsevier, 1990: 125-178.
- [19] CARPENTER S R, LODGE D M. Effects of submersed macrophytes on ecosystem processes[J]. Aquatic botany, 1986, 26: 341-370.
- [20] PIP E. Species richness of freshwater gastropod communities in central North America [J]. Journal of molluscan studies, 1987, 53(2): 163-170.
- [21] 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 spatio-temporal pattern of zoobenthos in Guanting Reservoir, Beijing, China [J]. Journal of Dalian Ocean University, 2012, 27(1): 44-52 (in Chinese with English abstract).
- [22] 王新华, 纪炳纯, 王宏鹏. 天津市团泊水库底栖动物研究与水环境评价[J]. 四川动物, 2008, 27(5): 809-811. WANG X H, JI B C, WANG H P. Investigation of zoobenthos and water quality assessment in Tuanbo Reservoir of Tianjin [J]. Sichuan journal of zoology, 2008, 27(5): 809-811 (in Chinese).
- [23] 于洪贤. 泥河水库底栖动物群落的研究[J]. 水利渔业, 2001, 22(5): 36-38. YU H X. Study on zoobenthos community in Nihe Reservoir [J]. Reservoir fisheries, 2001, 22(5): 36-38 (in Chinese).
- [24] 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. The zoobenthos community structures, ground fish production and ecological assessment for water quality in Tanghe Reservoir and Dahufang Reservoir [J]. Journal of Dalian Ocean University, 2013, 28(4): 383-389 (in Chinese with English abstract).
- [25] 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(1): 24-31. ZHANG W, ZHAO W, WANG Z, et al. Study on community structure of aquatic organisms and fish productivity in Jinling Reservoir [J]. Jilin water resources, 2021(1): 24-31 (in Chinese).
- [26] 赵文. 水生生物学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005. ZHAO W. Hydrobiology [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005 (in Chinese).
- [27] ZHANG M, SHAO M L, XU Y Y, et al. Effect of hydrological regime on the macroinvertebrate community in Three-Gorges Reservoir, China [J]. Quaternary international, 2010, 226(1/2): 129-135.
- [28] 邱春刚, 赵文, 陈立斌, 等. 汤河水库底栖动物的群落结构及时空格局的研究[J]. 大连水产学院学报, 2009, 24(S1): 107-112. QIU C G, ZHAO W, CHEN L B, et al. Community structure and spatial-temporal pattern of zoobenthos in Tanghe Reservoir, Liaoning Province, China [J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2009, 24(S1): 107-112 (in Chinese with English abstract).
- [29] MATISOFF G, WANG X S, MCCALL P L. Biological redistribution of lake sediments by tubificid oligochaetes: *Branchiura sowerbyi* and *Limnodrilus hoffmeisteri*/ *Tubifex tubifex* [J]. Journal of great lakes research, 1999, 25(1): 205-219.
- [30] 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. Macroinvertebrate communities and bioassessment of water quality in Miyun Reservoir, Beijing [J]. Journal of hydroecology, 2018, 39(4): 79-88 (in Chinese with English abstract).
- [31] 池仕运, 赵先富, 高少波, 等. 丹江口水库秋季底栖动物群落状态和空间分布及其与环境因子的关系[J]. 生态学报,

- 2021, 41(3): 1229-1241. CHI S Y, ZHAO X F, GAO S B, et al. The spatial distribution pattern of autumn macroinvertebrates in relation to environmental factors in Danjiangkou Reservoir[J]. Acta ecologica sinica, 2021, 41(3): 1229-1241 (in Chinese with English abstract).
- [32] 纪炳纯, 王新华, 秦保平, 等. 引滦入津流域底栖动物研究及水质评价[J]. 南开大学学报(自然科学版), 2002, 35(2): 106-112. JI B C, WANG X H, QIN B P, et al. Study on zoobenthos and bio-assessment of water quality in Yinluan Project[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis, 2002, 35(2): 106-112 (in Chinese with English abstract).
- [33] 李永刚, 胡庆杰, 曲疆奇, 等. 北京密云水库底栖动物群落结构及其时空变化[J]. 水生态学杂志, 2018, 39(5): 31-38. LI Y G, HU Q J, QU J Q, et al. Community structure and spatial-temporal variation of zoobenthos in Miyun Reservoir, Beijing[J]. Journal of hydroecology, 2018, 39(5): 31-38 (in Chinese with English abstract).
- [34] 池仕运, 韦翠珍, 胡俊, 等. 南湾水库底栖动物群落结构初步研究[J]. 环境保护科学, 2018, 44(6): 34-41. CHI S Y, WEI C Z, HU J, et al. Preliminary study of macroinvertebrate communities in Nanwan Reservoir[J]. Environmental protection science, 2018, 44(6): 34-41 (in Chinese with English abstract).
- [35] 张敏, 邵美玲, 蔡庆华, 等. 丹江口水库大型底栖动物群落结构及其水质生物学评价[J]. 湖泊科学, 2010, 22(2): 281-290. ZHANG M, SHAO M L, CAI Q H, et al. Macroinvertebrate community structure and the biological assessment to the water quality of the Danjiangkou Reservoir[J]. Journal of lake sciences, 2010, 22(2): 281-290 (in Chinese with English abstract).
- [36] 胡旭仁, 金斌松, 王文娟, 等. 鲢鳙鱼养殖小型水库底栖动物群落季节动态[J]. 生态学报, 2017, 37(20): 6875-6883. HU X R, JIN B S, WANG W J, et al. Seasonal dynamics of zoobenthos communities in a small reservoir stocked with silver and bighead carp[J]. Acta ecologica sinica, 2017, 37(20): 6875-6883 (in Chinese with English abstract).
- [37] 池仕运, 彭建华, 万成炎, 等. 湖北省三道河水库底栖动物的初步研究[J]. 湖泊科学, 2009, 21(5): 705-712. CHI S Y, PENG J H, WAN C Y, et al. Preliminary study on macrozoobenthos of Sandaohe Reservoir, Hubei Province[J]. Journal of lake sciences, 2009, 21(5): 705-712 (in Chinese with English abstract).
- [38] 彭建华, 刘家寿, 熊邦喜, 等. 湖北浮桥河水库底栖动物的群落结构及生物多样性[J]. 湖泊科学, 2002, 14(1): 90-96. PENG J H, LIU J S, XIONG B X, et al. Preliminary studies on community structure and biodiversity of zoobenthos in Fuchiaohe Reservoir, Hubei Province[J]. Journal of lake science, 2002, 14(1): 90-96 (in Chinese with English abstract).
- [39] VIZER A M. Zoobenthos of the drainage zone of Novosibirsk Reservoir[J]. Contemporary problems of ecology, 2011, 4(1): 50-55.
- [40] MAKINO W, KATO H, TAKAMURA N, et al. Did chironomid emergence release *Daphnia* from fish predation and lead to a *Daphnia*-driven clear-water phase in Lake Towada, Japan? [J]. Hydrobiologia, 2001, 442(1): 309-317.
- [41] SMUKALLA R, MEYER E. Insect emergence from a shallow southern West German Lake, with special reference to the parasitic host-associated water mite larvae[J]. Hydrobiologia, 1988, 169(2): 149-166.
- [42] YAMAGISHI H, FUKUHARA H. Ecological studies on chironomids in Lake Suwa[J]. Oecologia, 1971, 7(4): 309-327.
- [43] 石俊艳, 于伟君, 解涵, 等. 观音阁水库渔业资源调查报告[J]. 水利渔业, 2006, 27(3): 109-112. SHI J Y, YU W J, XIE H, et al. Investigation report on fishery resources of guanying reservoir[J]. Reservoir fisheries, 2006, 27(3): 109-112 (in Chinese).
- [44] 张荣坤, 赵文, 尹东鹏, 等. 白石水库底栖动物群落结构特征及多样性研究[J]. 吉林水利, 2022(8): 1-5. ZHANG R K, ZHAO W, YIN D P, et al. Study on benthic community structure and diversity in Baishi Reservoir[J]. Jilin water resources, 2022(8): 1-5 (in Chinese).
- [45] 袁士友, 邱振海, 杨天祥, 等. 柴河水库渔业资源调查及利用意见[J]. 水产科学, 1992, 11(7): 16-20. YUAN S Y, QIU Z H, YANG T X, et al. Investigation and utilization of fishery resources in Chaihe Reservoir[J]. Fisheries science, 1992, 11(7): 16-20 (in Chinese).
- [46] 安百胜. 清河水库底栖动物鱼产力及水质分析[J]. 农业与技术, 2015, 35(11): 57-60. AN B S. Analysis on productivity and water quality of benthic fish in Qinghe Reservoir[J]. Agriculture and technology, 2015, 35(11): 57-60 (in Chinese).

Comparative study on zoobenthos community characteristics in five drinking water reservoirs in Liaoning Province

WEN Mengjie¹, QIU Longhui¹, JIA Luge¹, LI Jiangwei², LI Shuang², SHEN Jianzhong¹

1. College of Fisheries, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2. Liaoning Tanghe Reservoir Management Bureau Co. Ltd., Liaoyang 111000, China

Abstract To find out the community structure of zoobenthos in five drinking water reservoirs including Guanying Reservoir, Baishi Reservoir, Chaihe Reservoir, Qinghe Reservoir, and Tanghe Reservoir, in Liaoning Province, and to estimate the potential fishery production according to the stock of zoobenthos, then to provide scientific guidance for the stocking and fishing of water conservation fisheries, seasonal surveys of the five reservoirs were carried out in 2019—2020. A total of 67 taxa, belonging to 3 phyla were identified. Among them, 39 species were chironomid larvae and 12 species were oligochaetes mainly Tubifex and Naididae. Only three species of mollusks were identified, including *Radix swinhoei* collected from Guanying Reservoir and Tanghe Reservoir, *Bellamya purificata* collected from Guanying Reservoir, and *Cristaria plicata* collected from Baishi Reservoir. The most species were detected in Tanghe Reservoir with 39 species, followed by 34 species in Guanying Reservoir, and the least in Baishi Reservoir with 23 species. The density was the highest in Baishi Reservoir with 1 546.89 ind/m², followed by Guanying Reservoir with 658.33 ind/m², and the lowest was Tanghe Reservoir with 481.92 ind/m². The biomass was the highest in Baishi Reservoir with 7.76 g/m², followed by Tanghe Reservoir with 5.68 g/m², and the lowest was Qinghe Reservoir with 2.49 g/m². The highest density of five reservoirs occurred in spring, summer and autumn, but the lowest values were all in summer. The biomass was higher in spring and winter, and lower in summer and autumn. The density and biomass of each reservoir was the highest in the still water zone. Only the highest density and biomass in Guanying Reservoir and biomass in Baishi Reservoir appeared in the transition zone. The density and biomass of Guanying Reservoir and Chaihe Reservoir were mainly composed of oligochaetes from the river zone to the front of the dam, while the reservoir entrance was dominated by chironomid larvae. The density and biomass of Qinghe Reservoir and Tanghe Reservoir were mainly composed of chironomid larvae from the reservoir entrance to the still water zone, while the front of the dam was dominated by oligochaetes. Baishi Reservoir was dominated by chironomid larvae from the reservoir entrance to transition zone, while the still water zone and the front of the dam were mainly composed of oligochaetes. The results of clustering and MDS ordination indicated that the communities of Guanying, Chaihe and Qinghe reservoirs were more similar. The communities of Baishi and Tanghe reservoirs were less similar and significantly different from those of Guanying, Chaihe and Qinghe reservoirs. Canonical correspondence analysis indicated that the density of zoobenthos were significantly correlated with the depth of water, total nitrogen, ammonia nitrogen, dissolved organic carbon and chlorophyll-a in five reservoirs. The species and composition of zoobenthos were obviously influenced by the contents of total nitrogen and ammonia nitrogen. The contents of total nitrogen and ammonia nitrogen in Tanghe Reservoir were the lowest, showing the most species and high dominance of chironomid larvae. The contents of total nitrogen and ammonia nitrogen in Baishi Reservoir were the highest, showing the least species and high dominance of tubificid worm. The fish production potential based on zoobenthos of Baishi Reservoir was the highest, followed by Tanghe Reservoir, and lowest in Qinghe Reservoir. Compared with previous surveys, the species numbers of five reservoirs increased, mainly due to the increase of chironomid larvae species. The trends of density and biomass were different from that of the number of species. The density and biomass of Guanying Reservoir decreased, while those of Qinghe and Tanghe Reservoirs increased. The density of Baishi Reservoir increased and the biomass decreased, while the density of Chaihe Reservoir decreased and the biomass increased. The stocking and fishing of demersal fish in five water source reservoirs should be managed in a targeted manner according to the characteristics of zoobenthos community structure.

Keywords zoobenthos; community structure; fish production potential; environmental factors; drinking water reservoirs; Liaoning Province

(责任编辑:边书京)