

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2024.05.009

纪翔, 张闫涛, 叶少文, 等. 基于生境分析的于桥水库鱼类群落结构及多样性时空分布 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2024, 46(5): 99-110.

基于生境分析的于桥水库鱼类群落结构及多样性时空分布

纪翔^{1,2}, 张闫涛^{2,3}, 叶少文², 杨洁⁴,
张堂林², 姚维志¹, 何文平¹

1. 西南大学 水产学院/淡水鱼类资源与生殖发育教育部重点实验室, 重庆 400715;
2. 中国科学院 水生生物研究所/淡水生态与生物技术国家重点实验室, 武汉 430072;
3. 大连海洋大学 水产与生命学院, 辽宁 大连 116023; 4. 天津市水利科学研究院, 天津 300061

摘要: 为掌握华北地区典型水库于桥水库的鱼类组成现状及群落时空动态, 为该类水体的生物操纵尤其是小型鱼类的生态调控提供基础资料和科学依据, 于 2020—2021 年中 4 个季度在天津于桥水库选取 7 个区域, 每个区域从沿岸带到敞水区布设 4~5 个采样点, 涵盖主要生境类型, 使用多网目刺网和地笼对各采样点的鱼类群落进行采样, 对获得的数据进行优势种、物种多样性、群落结构时空变化分析。调查显示: 本次共采集鱼类 16 321 尾, 隶属 3 目 9 科 26 属 29 种; 按相对重要性指数排序, 全年优势种为似鲮、鲫、鳊和红鳍原鲈; 秋季鱼类物种多样性显著高于其他季节, 苻菜生境(H3)及穗状狐尾藻生境(H1)的物种多样性高于其他生境。PCoA 及 PERMANOVA 检验显示各季节之间及生境之间的小型鱼类群落结构差异有统计学意义; SIMPER 分析表明造成群落结构季节及生境差异的主要贡献种为小型鱼类。结果表明于桥水库当前鱼类群落结构较为简单, 物种多样性较低, 鱼类小型化程度较高。

关键词: 于桥水库; 鱼类群落; 时空分布; 生境

中图分类号: S932.4

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2024)05-0099-12

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Temporal-spatial Distribution of Fish Community Structure and Diversity in Yuqiao Reservoir Based on Habitat Analysis

收稿日期: 2022-09-22

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(32071651); 天津市水务局科技计划项目(TJRD-2020-B-0142); 国家重点研发计划课题(2020YFD0900502); 重庆市自然科学基金面上项目(cstc2020jcyj-msxmX0438)。

作者简介: 纪翔, 博士研究生, 主要从事渔业生态学研究。

通信作者: 何文平, 副教授。

JI Xiang^{1,2}, ZHANG Yantao^{2,3}, YE Shaowen²,
YANG Jie⁴, ZHANG Tanglin², YAO Weizhi¹, HE Wenping¹

1. College of Fisheries, Southwest University/Key Laboratory of Freshwater Fish Reproduction and Development (Ministry of Education), Chongqing 400715, China;

2. Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences/State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Wuhan 430072, China;

3. College of Fisheries and Life Science, Dalian Ocean University, Dalian Liaoning 116023, China;

4. Tianjin Academy of Hydro Science, Tianjin 300061, China

Abstract: This study chose seven areas from whole Yuqiao reservoir in four seasons from 2020 to 2021 to set up four to five sampling sites for each area from the coastal zone to open water area to conduct the study in order to understand the current fish composition and spatial and temporal community dynamics of this typical reservoir in North China. The fish community at each sampling site was sampled using multi-mesh gillnets and ground cages to collect the data for analyzing the dominant species, species diversity, and temporal-spatial changes in community structure. The findings revealed that a total of 16 321 fish, representing 3 orders, 9 families, 26 genera, and 29 species, were collected in this investigation. The dominant species in the entire year, as measured by the index of relative importance, were *Toxabramis swinhonis*, *Carassius auratus*, *Hemiculter leucisculus*, and *Culter erythropterus*. When compared to other times of the year, the diversity of fish species was significantly higher in the autumn. The habitats of *Nymphoides peltatum* (H3) and *Myriophyllum spicatum* (H1) had higher species diversity than other habitats. The results of the PCoA and PERMANOVA tests revealed that there were significant differences in the community structure of small-sized fish between seasons and between habitats. The results show that the current fish community structure of Yuqiao Reservoir is relatively simple, with low species diversity and a high degree of fish miniaturisation.

Key words: Yuqiao reservoir; fish community; temporal-spatial distribution; habitat

近年来受流域污染、气候和水文变化、不合理养殖方式等影响,我国大部分湖泊及水库生态系统出现了富营养化现象^[1],湖泊生态系统从草型湖泊向藻型湖泊转变^[2]. 水体富营养化修复主要有物理修复、化学修复和生物修复,但物理和化学修复手段普遍存在修复成本高、费时费力且无法根治等问题;生物修复手段对环境危害最小、成本相对较低且可持续. 目前已有许多案例通过生物操纵手段对富营养化湖泊进行修复且取得了良好效果,如捷克 Rimov 水库中采用经典生物操纵的方式放养凶猛性鱼类的方法控制小型浮游食性鱼类,从而控制浮游植物群落改善水质^[3];东湖^[4]、太湖^[5]则通过非经典生物操纵投放滤食性鱼类控制蓝藻水华.

于桥水库是华北地区典型的淡水湖盆型水库,承载着天津市饮用水水源供给的重要任务. 近年来水库富营养化状况日趋严重,夏季存在藻华爆发现象,且由于人为干扰及水质恶化等影响,使得水库生境栖息地遭受破坏,鱼类群落结构发生改变,水库大型经济鱼类捕捞量下降,以小型鱼类为主^[6-10]. 当前研究大多针对渔业资源现状或鱼类群落整体,对小型鱼类群落结构的研究相对较少或年代较早^[11-12]. 小型鱼类作为湖泊食物链中的一部分,在初级生产力及上一级生产力之间有承上启下的重要作用,但其对浮游动物的捕食压力及对沉水植物生长的干扰会促进藻类生长,加剧水体富营养化,因此对小型鱼类的研究可以对湖泊

水质状况及渔业资源起到指示作用,同时也能反映当前鱼类群落结构的变动状况^[3,13]。

20 世纪 90 年代以来,大量科研工作者对于桥水库做了水质、浮游生物及水生植物等调查研究^[7, 14-18],但是关于鱼类群落结构的相关报道较少,且年代较早、区域有限^[10, 19-21],难以反映于桥水库鱼类群落结构现状。本研究于 2020—2021 年中 4 个季节对于桥水库的渔业资源及生境进行了调查,并着重探讨了小型鱼类群落结构组成及多样性时空分布特征,旨在对于桥水库的渔业资源可持续利用及生物操纵提供基础资料和理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况及采样点分布

于桥水库(40°00′—40°07′N, 117°43′—117°64′E)控制流域面积 2 060 km²,占整个州河流域面积的 96%,主要入库河流为果河、淋河。该水库于 1960 年建成,1969 年蓄水,总库容 15.59 亿 m³,调蓄库容 3.85 亿 m³。库区北岸地势平缓,南岸由于老河道存在地势变化陡峭,总体深度较大。沉水植物的主要分布区域为北岸,最大水深 12.2 m,平均水深 4.6 m,正常蓄水位 21.2 m,相应的水域面积 86.8 km²。秋季降水丰富,整体水位较高,冬季 12 月到次年 2 月为结冰期。

根据于桥水库的库区条件状况如离岸距离、水深梯度变化、沉水植被覆盖程度、人类干扰强度等,在全库共设置 7 个采样区域(图 1,分别为 WR-库西、NR-库北、FSN-峰山南、ER-库东、SR-库南、MR-库心、FSD-放水洞),每个区域从沿岸带到敞水区布设 4~5 个采样点,基本涵盖全库主要生境类型。生境类型的划分主要根据沉水植物的种类及分布进行划分,季度采样时对每个点位进行水生植物生物量调查,每个点位采 3 个样方,采样工具使用自制的圆周面积为 0.125 6 m²的水下采草镰刀对水生植物进行采样收集并进行种类鉴定及鲜质量测定,同时对离岸距离进行测量。调查结果表明,于桥水库水生植被组成中,春季及冬季菹草(*Potamogeton crispus*)占据绝对优势,其他季节穗状狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)及荇菜(*Nymphoides peltatum*)占优势,零星出现的种类有苦草(*Vallisneria spiralis*)、小茨藻(*Najas minor*)、大茨藻(*Najas marina*)、轮叶黑藻(*Hydrilla verticillata*)、蓖齿眼子菜(*Potamogeton pectinatus*)、菱角(*Trapa bispinosa*)、香蒲(*Typha orientalis*)、金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)、马来眼子菜(*Potamogeton malainus*)等。根据于桥水库水生植物优势种情况及分布可分为 5 个主要生境:穗状狐尾藻生境(H1)、菹草生境(H2)、荇菜生境(H3)、菱角-金鱼藻生境(H4)和裸地生境(H5)。

1.2 样品采集与处理

样品采集时间为 2020 年秋季(9 月)、2020 年冬季(12 月)、2021 年春季(4 月)、2021 年夏季(7 月)。鱼类采集使用多网目复合刺网和地笼(长 25 m,网目 2 a=4 cm),多网目复合刺网网目共分 12 个,分别为 2 a=12.5,11.0,8.5,7.5,6.0,4.8,4.0,3.1,2.5,2.0,1.6,1.0 cm,每个采样点使用高为 2 m、长为 30 m 的浮性多网目复合刺网和沉性多网目复合刺网各 2 条及地笼 1 条,放置时间为当日傍晚,次日清晨进行回收。依据《中国动物志》和《天津鱼类志》鉴定鱼类物种,对渔获的样品分类计数、测量全长和体质量。将性成熟时个体平均质量较小、生长周期短、经济价值低且作为食鱼性鱼类饵料的鱼类划分为小型鱼类^[22-23]。

1.3 数据分析与处理

1.3.1 优势种

先计算各种类的相对生物量(W)、相对丰度(N)和出现率(F),再由公式计算 Pinkas 相对重要性指数(Index of relative importance, I_{RI})^[24],以此反映各种鱼类在群落中的优势程度。

$$I_{RI} = (N + W) \times F$$

$I_{RI} \geq 1\,000$ 时判定为优势种, $1\,000 > I_{RI} \geq 100$ 时判定为重要种, $100 > I_{RI} \geq 10$ 时判定为常见种, $I_{RI} < 10$ 时判定为稀有种^[25].

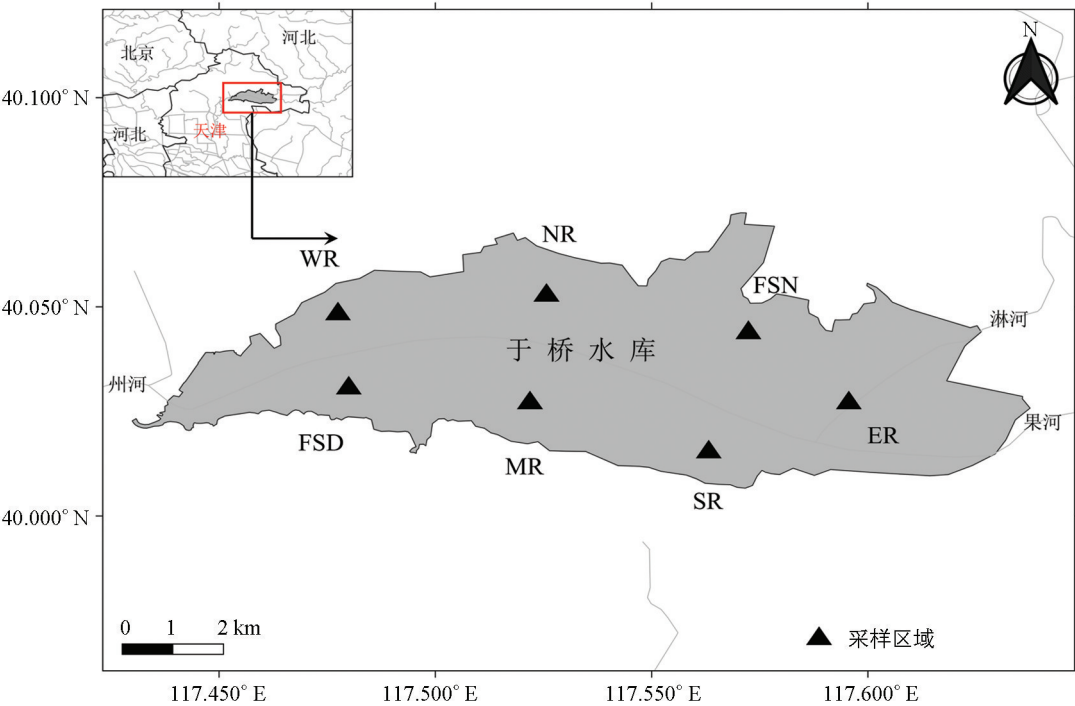


图 1 于桥水库采样点分布

1.3.2 群落多变量分析

为了在空间和时间上将鱼类群落分为不同的组合, 采用了基于对数转换的鱼类物种丰度数据的 Bray-Curtis 距离的主坐标分析 PCoA(principal coordinates analysis)排序图. 根据 PERMANOVA 及多重比较结果得出各个季节及生境之间群落结构是否存在差异, 用相似性百分比(SIMPER)分析两两之间群落相异性的平均贡献率及其主要贡献种, 将贡献率大于 5%且 $p < 0.05$ 的物种作为划分标准^[26].

1.3.3 物种多样性

物种多样性指数的计算选择了观测物种数、香农威纳指数^[27]、Pielou 均匀度指数^[28]和辛普森指数^[29-30]、ACE 指数^[31]和 Chao1 指数^[32]. 对不同生境和季节的物种多样性进行非参数双因素方差分析 (Two-way non-parametric ANOVA), 使用 Wilcoxon 法对各组进行两两比较并进行 p 值校正.

以上数据使用 Excel 2019, R 4.1.2 进行处理, 地图的绘制使用 QGIS 3.22 进行, 制图及其余数据分析采用 R 4.1.2.

2 结果与分析

2.1 鱼类物种组成及渔获物优势种组成

本次调查共采集鱼类样本 16 321 尾, 经鉴定共有 29 种, 隶属于 3 目 9 科 26 属, 其中小型鱼类 15 种共 16 024 尾, 占总数量的 98.18%(表 1). 鲤科种类数最多, 有 19 种, 占总物种数的 65.50%; 鲮科、鳊科各 2 种, 占 6.90%; 鲇科、真鲈科、虾虎鱼科、丝足鲈科、鳢科、沙塘鳢科各 1 种, 均占 3.45%. 在季节上, 春、夏、秋、冬分别采集鱼类 21, 23, 23, 16 种, 冬季最少. 4 次都采集到的有 13 种, 仅在夏季采集到的是斑点叉尾鲷(*Ictalurus punctatus*)、镜鲤(*Cyprinus carpio* var. *specularis*), 仅在秋季采集到的是鳊(*Siniperca chuatsi*), 仅在春季采集到的是大鳞副泥鳅(*Paramisgurnus dabryanus*). 只在单个季节捕获到的鱼类数量较少, 均不超过 5 尾, 其中夏季鱼类总丰度最高, 其次为秋季、春季和冬季(表 2).

表 1 于桥水库渔获物组成

科	种类	丰度/ 尾	生物量/ g	相对重要 性指数	相对重要 性分类
鲤科 Cyprinidae	似鲮 * <i>Toxabramis swinhonis</i>	6 372	32 726.41	3 909.71	优势种
	鲫 * <i>Carassius auratus</i>	1 601	64 794.72	3 218.06	优势种
	鲮 * <i>Hemiculter leucisculus</i>	2 829	28 582.64	2 336.86	优势种
	红鳍原鲃 * <i>Culter erythropterus</i>	1 200	20 795.69	1 284.69	优势种
	鲤 <i>Cyprinus carpio</i>	68	17 926.00	282.14	重要种
	麦穗鱼 * <i>Pseudorasborn parra</i>	840	1 880.11	275.58	重要种
	大鳍鲮 * <i>Acheilognathus macropterus</i>	722	3 609.29	212.08	重要种
	鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	46	14 693.48	175.03	重要种
	兴凯鲮 * <i>Acheilognathus chankaensis</i>	345	1 674.94	85.83	常见种
	草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>	15	6 039.19	31.98	常见种
	棒花鱼 * <i>Abbottina rivularis</i>	160	723.25	23.44	常见种
	鳊 <i>Aristichthys nobilis</i>	8	4 678.88	11.32	常见种
	高体鳊 * <i>Rhodeus ocellatus</i>	100	131.54	7.42	稀有种
	团头鲂 <i>Megalobrama amblycephala</i>	6	2 807.21	5.69	稀有种
	镜鲤 <i>Cyprinus carpio</i> var. <i>specularis</i>	2	3 807.00	3.02	稀有种
	黄尾鲮 * <i>Xenocypris davidi</i>	6	720.66	1.89	稀有种
	翘嘴鲌 <i>Culter alburnu</i>	7	766.91	0.68	稀有种
	细鳞鲮 * <i>Xenocypris microlepis</i>	2	47.33	0.09	稀有种
	马口鱼 * <i>Opsariichthys bidens</i>	1	101.90	0.05	稀有种
虾虎鱼科 Gobiidae	子陵吻虾虎鱼 * <i>Rhinogobius giurinus</i>	1 691	1 021.99	229.59	重要种
鲮科 Bagridae	黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	76	1 554.81	43.34	常见种
	斑点叉尾鲷 <i>Ictalurus punctatus</i>	1	26.43	0.02	稀有种
鳊科 Channidae	乌鳊 <i>Channa argus</i>	19	3 253.44	19.35	常见种
沙塘鳊科 Odontobutidae	小黄鲮鱼 * <i>Micropercops swinhonis</i>	152	55.14	6.49	稀有种
鲇科 Siluridae	鲇 <i>Silurus asotus linnaeus</i>	4	1 195.73	1.97	稀有种
真鲈科 Percichthyidae	鳊 <i>Siniperca chuatsi</i>	2	246.68	0.22	稀有种
丝足鲈科 Osphronemidae	圆尾斗鱼 * <i>Macropodus ocellatus</i>	3	2.66	0.05	稀有种
鳅科 Cobitidae	泥鳅 <i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	42	912.64	6.94	稀有种
	大鳞副泥鳅 <i>Paramisgurnus dabryanus</i>	1	43.89	0.02	稀有种

注: * 为小型鱼类.

表 2 于桥水库不同季节鱼类总丰度

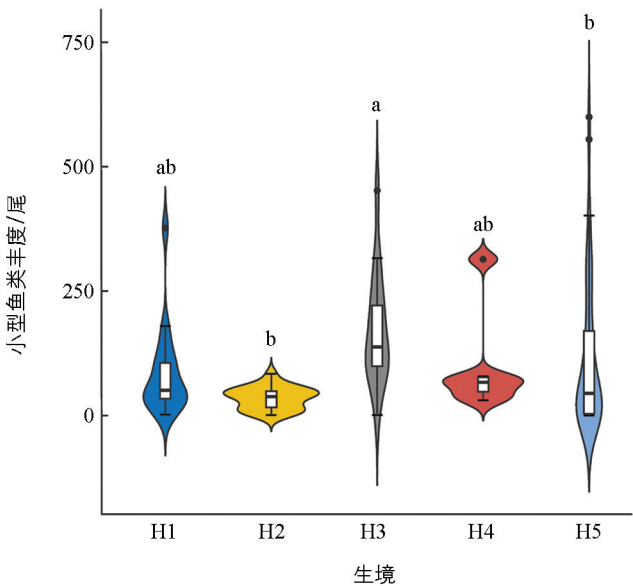
季节	秋季	冬季	春季	夏季
鱼类总丰度/尾	4 380	779	2 920	8 242

根据相对重要性指数(I_{RI})及丰度(N)对于桥水库渔获鱼类进行种类优势度排序(表 1), 优势种为 4 种小型鱼类, 共占渔获物总丰度的 73.54%以及总生物量的 68.38%, 在鱼类群落中占高度优势. 重要种有 5 种, 占渔获物总丰度的 20.63%以及总生物量的 18.22%, 其中 3 种为小型鱼类, 分别为麦穗鱼(*Pseudorasborn parra*)、子陵吻虾虎鱼(*Rhinogobius giurinus*)、大鳍鲮(*Acheilognathus macropterus*). 常见种共 6 种, 占渔获物总丰度的 3.82%和总生物量的 8.34%, 其中兴凯鲮(*Acheilognathus chankaensis*)和棒花鱼(*Abbottina rivularis*)为小型鱼类. 其余 14 种为稀有种, 其相对丰度、生物量分别为 2.01%和 5.06%, 在鱼类群落中占极小的比重.

对不同生境小型鱼类丰度进行非参数方差分析发现, 荇菜生境(H3)的小型鱼类丰度显著高于菹草生境(H2)和裸地生境(H5)(图 2)。

2.2 物种多样性时空分布

鱼类物种多样性分析结果显示(表 3), 于桥水库物种多样性指数与季节之间差异有统计学意义, Pielou 均匀度、香农威纳和辛普森指数在生境之间差异有统计学意义($p<0.01$), 生境和季节之间的交互作用对物种多样性影响差异无统计学意义($p>0.05$)。6 个物种多样性指数最高的季节大多为秋季, 表明秋季的物种多样性高于其他 3 个季节(图 3)。荇菜生境(H3)及狐尾藻生境(H1)的物种多样性大多高于其他生境(图 4)。总体来说, 物种多样性的季节差异较大, 生境差异相对较小。



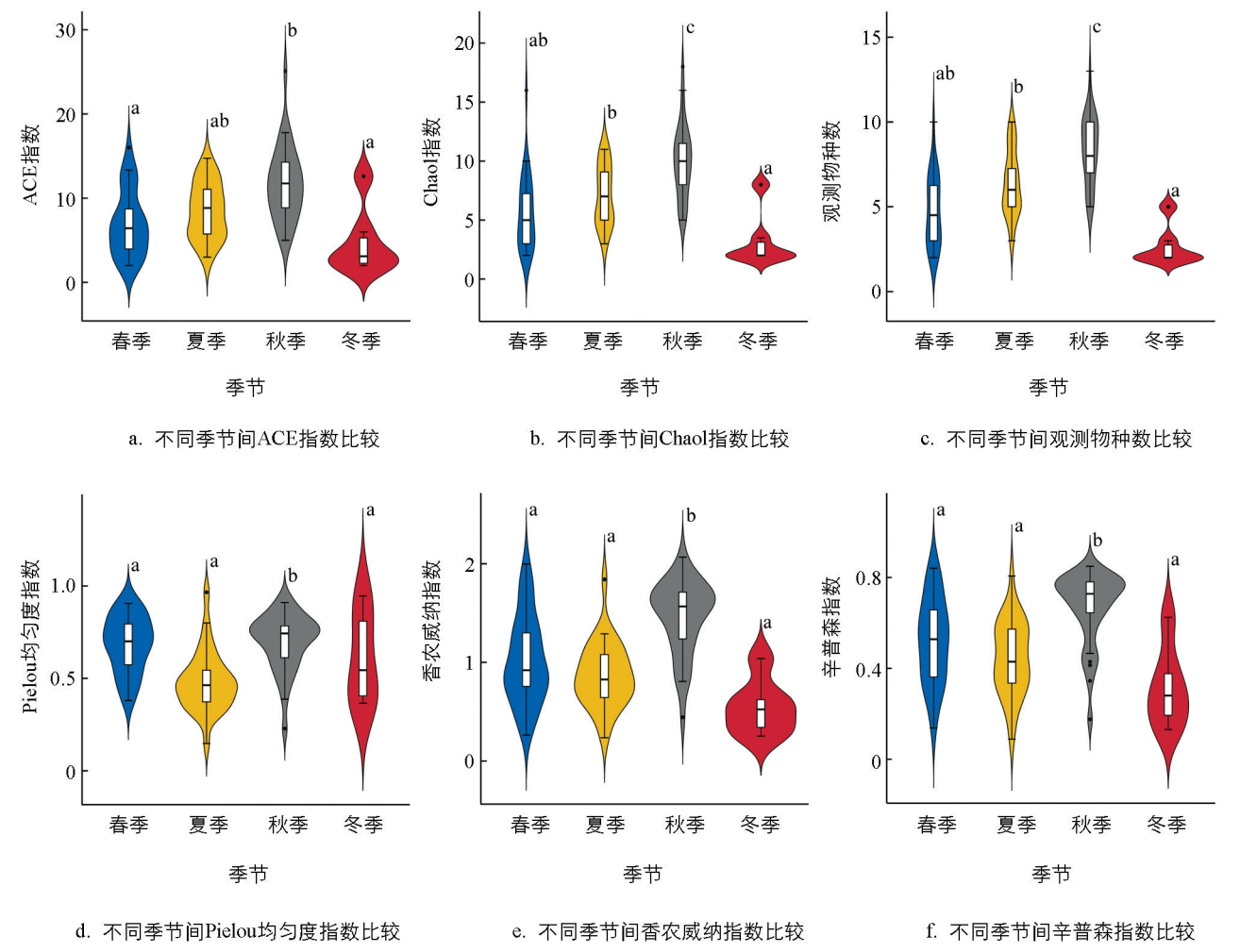
小写字母不同表示 $p<0.05$, 差异有统计学意义。

图 2 于桥水库不同生境小型鱼类丰度差异

表 3 4 个季节及 5 种生境非参数双因素方差分析对鱼类物种多样性的检验

物种多样性	因素	<i>H</i> 值	<i>p</i> 值	显著性
ACE 指数	季节	22.379 3	5.44×10^{-5}	* * *
	生境	7.611 8	0.106 9	
	季节×生境	1.455 5	0.834 5	
	残差			
Chao1 指数	季节	33.275 6	2.82×10^{-7}	* * *
	生境	5.899 1	0.206 8	
	季节×生境	1.278 4	0.865 0	
	残差			
观测物种数	季节	39.410 8	1.42×10^{-8}	* * *
	生境	7.610 2	0.106 9	
	季节×生境	0.857 5	0.930 6	
	残差			
Pielou 均匀度指数	季节	24.164 5	2.31×10^{-5}	* * *
	生境	13.330 2	0.009 8	* *
	季节×生境	2.148 8	0.708 4	
	残差			
香农威纳指数	季节	34.067 3	1.92×10^{-7}	* * *
	生境	14.333 6	0.006 3	* *
	季节×生境	0.483 2	0.975 1	
	残差			
辛普森指数	季节	28.395 1	3.00×10^{-6}	* * *
	生境	15.778 6	0.003 3	* *
	季节×生境	0.443 9	0.978 7	
	残差			

注: * * 表示 $p<0.01$, * * * 表示 $p<0.001$, 差异有统计学意义。



小写字母不同表示 $p < 0.05$, 差异有统计学意义.

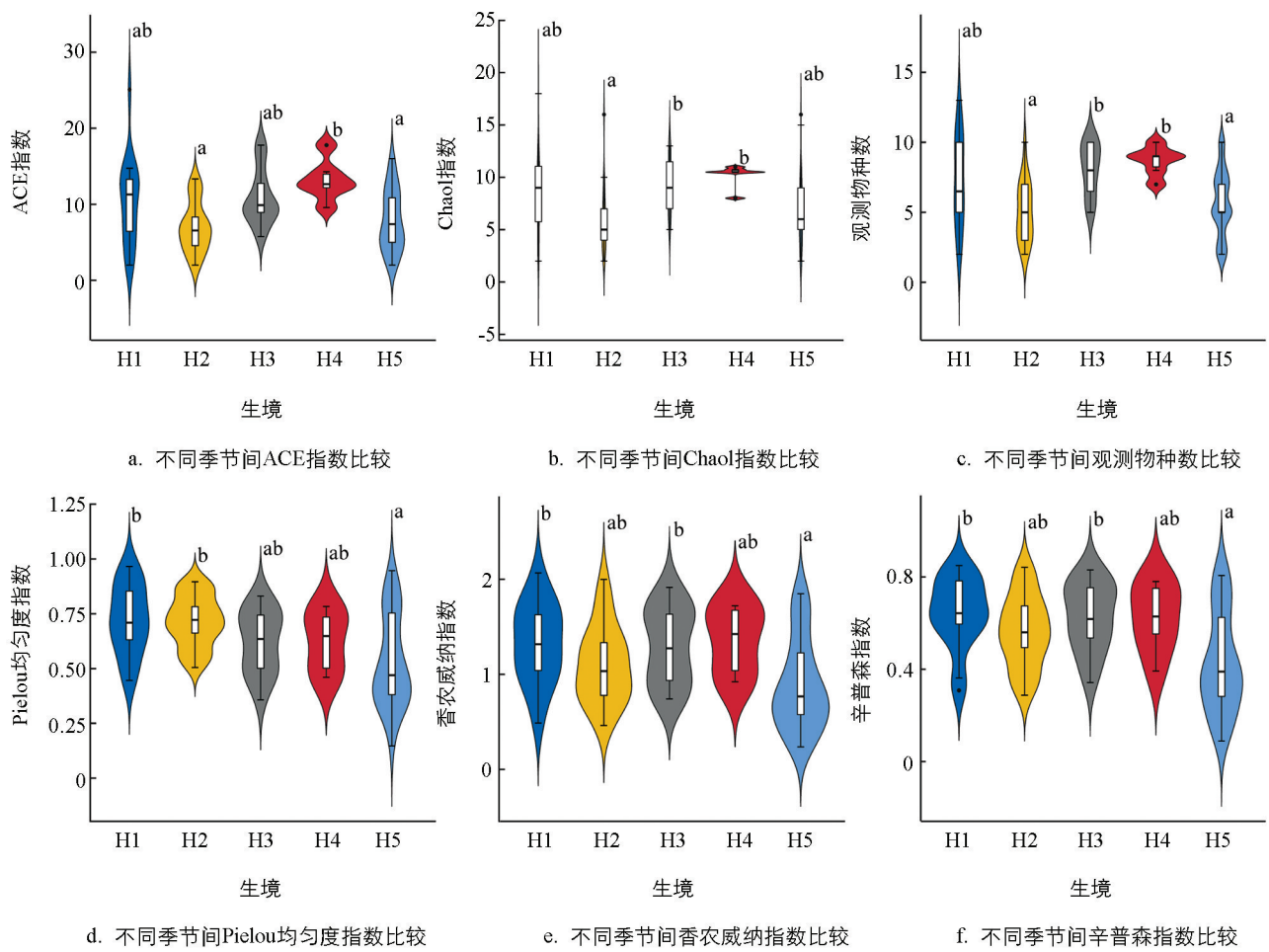
图 3 于桥水库不同季节鱼类物种多样性

2.3 鱼类群落结构时空分布

从 PCoA 排序结果及 PERMANOVA 中(图 5, 表 4)可以看出, 5 种生境以及 4 个季节组间的鱼类群落结构之间差异有统计学意义($p < 0.001$), 5 个生境中只有 H1-H4, H3-H4 间的鱼类群落差异无统计学意义($p > 0.05$), 而且季节与生境之间的相互作用对鱼类群落结构也产生了显著影响($p < 0.001$). 似鲮(*Toxabramis swinhonis*)主要分布在夏季, 鲮(*Hemiculter leucisculus*)、红鳍原鲃(*Culter erythropterus*)主要分布在春夏秋季节, 剩余几种鱼类主要在春秋季分布, 5 个生境中有部分采样点重合, 大部分鱼类分布在有水生植被的生境中.

2.4 群落相异性及主要贡献种

相似性百分比(SIMPER)分析表明, 季节之间及生境之间的两两比较群落相异性为 69.91%~95.41% (表 5). 在 6 组季节的两两比较中, 造成群落差异的主要贡献种为似鲮、鲮和大鳍鲮, 且夏季与其他季节的群落差异的主要贡献种都为似鲮; 在生境两两比较的群落差异中, 造成群落差异的主要贡献种为红鳍原鲃、大鳍鲮、鲫、似鲮和鲮等.



小写字母不同表示 $p < 0.05$, 差异有统计学意义.

图 4 于桥水库不同生境鱼类物种多样性

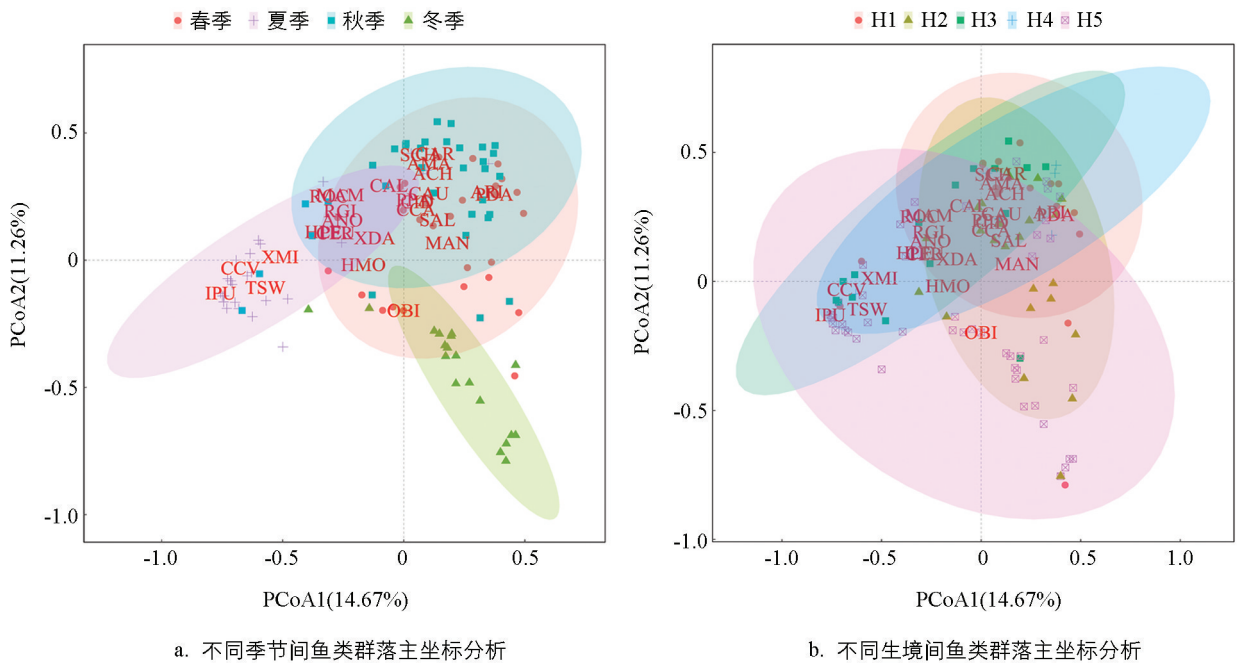


图 5 于桥水库不同季节间及生境间鱼类群落主坐标分析 (PCoA)

表 4 于桥水库鱼类群落 PERMANOVA 及多重比较

	自由度	平方和	均方	F 值	变异	p 值
季节	3	11.196 8	3.732 3	18.655 3	0.314 5	0.001
生境	4	2.410 4	0.602 6	3.012 0	0.067 7	0.001
季节-生境	7	2.585 6	0.369 4	1.846 3	0.072 6	0.001
残差	97	19.406 3	0.200 1		0.545 1	
总和	111	35.599 1			1.000 0	
春季-夏季	1	4.061 2		21.580 8	0.285 5	0.001
春季-秋季	1	1.932 3		9.303 7	0.136 2	0.001
春季-冬季	1	3.318 5		11.677 5	0.192 5	0.001
夏季-秋季	1	3.619 0		20.378 7	0.256 7	0.001
夏季-冬季	1	5.330 6		21.500 5	0.305 0	0.001
秋季-冬季	1	4.408 6		16.717 6	0.236 4	0.006
H2-H1	1	0.771 4		3.193 8	0.077 5	0.003
H2-H5	1	1.921 3		6.032 1	0.078 3	0.003
H2-H3	1	1.691 6		7.125 9	0.161 5	0.003
H2-H4	1	0.617 4		2.498 3	0.084 7	0.026
H1-H5	1	1.743 3		5.419 2	0.077 0	0.003
H1-H3	1	0.850 8		3.725 8	0.107 3	0.007
H1-H4	1	0.065 1		0.275 4	0.012 9	0.982
H5-H3	1	1.125 9		3.512 3	0.052 0	0.006
H4-H5	1	0.728 8		2.138 4	0.038 1	0.036
H3-H4	1	0.321 4		1.405 4	0.065 7	0.219

注：p<0.05 表示差异有统计学意义。

表 5 于桥水库不同时空鱼类群落结构的相异性及判别种

组别	平均	相似性百分比/%					
	相异性/%	判别种 1	贡献比	判别种 2	贡献比	判别种 3	贡献比
春-夏	79.22	似鲮	59.43				
春-秋	71.21	大鳍鲮	17.03	兴凯鲮	5.19		
春-冬	89.55	鲮	30.28	鲫	20.48	麦穗鱼	6.76
夏-秋	73.89	似鲮	53.15				
夏-冬	95.41	似鲮	56.05	鲮	28.57	鲫	7.18
秋-冬	92.28	似鲮	22.01	大鳍鲮	17.72	红鳍原鲃	6.98
H1-H2	70.97	红鳍原鲃	8.32	麦穗鱼	5.60		
H1-H3	69.91	大鳍鲮	11.87				
H1-H5	81.72	鲫	16.99				
H2-H3	77.27	鲮	29.12	大鳍鲮	11.41	红鳍原鲃	7.80
H2-H4	73.50	鲮	33.15	兴凯鲮	6.83		
H2-H5	81.89	似鲮	44.30				
H3-H5	77.06	大鳍鲮	9.89				

3 讨论

3.1 鱼类物种组成及变化

本次调查共采集鱼类 29 种, 鱼类组成相较 20 世纪 80 年代的调查结果^[20]有较大差异, 主要捕获种类大部分为小型杂食性鱼类, 大多为中上层、湖泊定居性鱼类. 结合渔民走访、当地水产局调查结果发现, 有 6 种历史记录种已多年未见捕获, 其中大部分为凶猛肉食性鱼类, 且于桥水库经济鱼类鲤(*Cyprinus carpio*)捕捞量急剧减少, 同时池沼公鱼(*Hypomesus olidus*)、大银鱼(*Protosalanx hyalocranius*)等经济鱼类仍存在一定捕捞量, 但本次调查均未采集到. 这与调查手段的频次和广度有关, 在一定程度上可以说明经济鱼类资源量在减少.

本次调查的全年优势种均为小型鱼类, $I_{RI} > 100$ 的优势种和重要种共 9 种, 其中 7 种为小型鱼类, 优势度最高的 3 种均为小型杂食性鱼类, 占全年渔获物生物量的 58.70%, 大型凶猛性鱼类生物量占比仅为 1.99%(鳊、翘嘴鲌、乌鳢). 于桥水库整体鱼类群落结构趋于小型化, 渔业资源质量出现下滑现象, 这可能与渔民过度捕捞及选择性捕捞大型鱼类有关. 大量的网箱养殖、上游污染支流输水造成的水体生态系统恶化也是原因之一^[33-35], 且该现象在其他富营养化淡水湖泊中同样出现^[12, 36-37].

3.2 物种多样性时空分布

于桥水库鱼类物种多样性存在明显的季节性差异与生境差异, 季节性差异明显高于生境差异, 主要是因为生境的差异与季节存在很强的关联性, 例如菹草冬季发芽, 春季生长旺盛^[38], 在春季时所有采样点生境都为菹草生境, 而菱角和金鱼藻生长时期在夏秋季节, 冬季由于高水位及低温, 水生植物较难存活, 但生境和季节的交互作用对物种多样性影响较弱. 季节性差异主要表现在秋季的物种多样性高于其他 3 个季节. 由于北方水库气温较低, 鱼类繁殖期相对较晚^[39], 小型鱼类大量繁殖使得渔获物中小型鱼类的丰度较高, 水库中的大个体鱼类如鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)、鳙(*Aristichthys nobilis*)、草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)等均属于人工放流的洄游性鱼类, 无法在水库中繁殖, 因此春、夏季的鱼类物种多样性指数较低; 经过繁殖期后水库禁渔期也随之结束, 大量的捕捞行为使得水库中的鱼类资源减少, 但当地政府组织增殖放流活动, 如将细鳞鲴(*Xenocypris microlepis*)、鲢、鳙、鲤等鱼类投放到水库中, 秋季的物种多样性较高. 生境差异体现在沉水植物生境的鱼类物种多样性显著高于裸地生境, 以往研究也显示沉水植被生境中鱼类多样性及丰度一般高于其他水生植物生境^[40], 茂密的沉水植被会为小型鱼类提供庇护所, 一定范围内鱼类密度会随沉水植物生物量升高而升高^[12].

3.3 鱼类群落的时空分布

本研究表明季节之间和生境之间的鱼类群落结构差异有统计学意义. 造成季节差异的主要原因可能是群落优势种的更替, 春季鲫(*Carassius auratus*)丰度最高, 夏季似鲮丰度最高, 冬季红鳍原鲌丰度最高; 夏季的鱼类总丰度在 4 个季节中最高, 其次为秋季、春季和冬季, 而冬季的渔获物数量及物种数均为 4 个季节中最低, 原因可能是冬季调查时水库温度较低, 库区大部分结冰, 鱼类受低温影响活动范围减小且频率降低^[41]. 造成各季节群落差异的主要分歧种为似鲮, 其原因可能是分批产卵的习性, 似鲮的繁殖季节从繁殖初期的 3—4 月持续到后期的 7—8 月^[42]. 优势种是对鱼类群落结构造成影响的重要因素之一, 其变化通常会引起鱼类物种组成变化及水域生态系统物质循环和能量流动的变化. 似鲮的高度优势会挤压其他鱼类的生存空间, 且不利于渔业资源的发展^[43-44]. 目前研究表明似鲮在我国众多湖泊、河流中已成为最具优势的小型鱼类^[45-46].

本研究中, 水生植物分布区域的小型鱼类种类数和丰度显著高于敞水区生境, 但荇菜生境(H3)的小型鱼类显著高于菹草生境(H2), 可能是过高的菹草密度限制了鱼类活动, 同时对使用复合刺网的捕捞工作造成影响, 使得刺网无法完整地在水层中展开. 采样中也发现复合刺网回收过程中会有较多的沉水植物缠

挂,降低了网具的捕捞效率,且沉水植物生境水深较浅,离岸较近,受到干扰的可能性较大.本次调查中发现沉水植被旺盛的区域,复合刺网捕获的似鲮数量非常少,但在无沉水植物分布的敞水区域似鲮的捕获量较大.造成生境之间的差异可能是因为似鲮对水温较高和有机质丰富生境的喜好及对枝角类、桡足类等浮游动物的摄食偏好^[42],耐污性小型鱼类似鲮及鲮在鱼类群落中的高度优势也在一定程度上说明目前于桥水库整体水质的富营养化程度较高.

据此,对控制水库的水体富营养化及鱼类资源小型化现象提出以下建议:1)针对水生植被资源匮乏的水库优先恢复沉水植被,探明水生植被种植、恢复管理技术,同时控制草食性及底层杂食性鱼类的生物量;2)投放大型凶猛性鱼类,通过经典生物操纵的方式控制小型杂鱼,优化鱼类群落结构,通过下行效应改善水生态系统,结合非经典生物操纵投放鲢、鳙等浮游生物食性鱼类控制藻类过度生长,综合治理水体的富营养化.

参考文献:

- [1] 范荣桂,朱东南,邓岚.湖泊富营养化成因及其综合治理技术进展[J].水资源与水工程学报,2010,21(6):48-52.
- [2] QIN B Q, GAO G, ZHU G W, et al. Lake Eutrophication and Its Ecosystem Response [J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(9): 961-970.
- [3] JEPPESEN E, MEERHOFF M, JACOBSEN B A, et al. Restoration of Shallow Lakes by Nutrient Control and Biomani-pulation-The Successful Strategy Varies with Lake Size and Climate [J]. Hydrobiologia, 2007, 581(1): 269-285.
- [4] 刘建康,谢平.用鲢鳙直接控制微囊藻水华的围隔试验和湖泊实践[J].生态科学,2003,22(3):193-198.
- [5] 李燕萍,夏晴晴,程花,等.多层级生物操纵技术在人工湿地控制蓝藻的应用研究[J].安徽农业科学,2019,47(15):81-84.
- [6] 王洪起.于桥水库的水质保护与渔业生产[J].湖泊科学,1995,7(4):379-384.
- [7] 金丹越,黄艳菊.天津于桥水库主要环境问题及其防治对策[J].环境科学研究,2004,17(S1):77-79,85.
- [8] 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.
- [9] 孟宪献,胡阶斌,张南,等.2017—2018年天津市于桥水库藻类种群变化分析[J].中国防汛抗旱,2020,30(7):58-61.
- [10] 吴会民,姜巨峰,孟一耕,等.于桥水库鱼类种类组成及其多样性[J].水产学杂志,2021,34(3):61-65.
- [11] 冯广朋,李钟杰,谢从新,等.湖北牛山湖小型鱼类的群落结构及多样性[J].湖泊科学,2006,18(3):299-304.
- [12] 叶少文,张堂林,李钟杰,等.牛山湖两种优势小型鱼类空间分布与沉水植被的关系[J].应用生态学报,2012,23(9):2566-2572.
- [13] PENG G, ZHOU X, XIE B, et al. Ecosystem Stability and Water Quality Improvement in a Eutrophic Shallow Lake via Long-term Integrated Biomani-pulation in Southeast China [J]. Ecological Engineering, 2021, 159: 106119.
- [14] 刘枫,王华东,刘培桐.流域非点源污染的量化识别方法及其在于桥水库流域的应用[J].地理学报,1988,43(4):329-340.
- [15] 葛宁,冯平,孙冬梅,等.库区面源氮、磷污染对于桥水库水质的影响[J].南水北调与水利科技,2015,13(3):427-433.
- [16] 刘长杰,余明辉,周潮晖,等.输水对于桥水库水质时空变化的影响[J].湖泊科学,2019,31(1):52-64.
- [17] 张晨,宋迪迪,廉铁辉.引水结构变化对天津于桥水库磷滞留的影响分析与生态水量估算[J].湖泊科学,2020,32(2):370-379.
- [18] LIU X, PENG W, HE G, ET A L. A Coupled Model of Hydrodynamics and Water Quality for Yuqiao Reservoir in Haihe River Basin [J]. Journal of Hydrodynamics, 2008, 20(5): 574-582.
- [19] 南开大学生物系,天津市水产研究所.于桥水库渔业生物学基础调查[J].天津水产,1979(2):40-70.
- [20] 韩桢锆,张德珠,梁素秀,等.天津市于桥水库的鱼类区系及其资源合理利用的探讨[J].水产科技情报,1983,10(1):10-12.
- [21] 李明德,杨竹舫.于桥水库鱼类年龄、生长与繁殖[J].生态学报,1991,11(3):269-273.
- [22] 张堂林,方榕乐,崔奕波.渔业发展阶段不同的五个水体鱼类多样性的比较[J].水生生物学报,1996,20:191-199.
- [23] LYONS J. Distribution, Abundance, and Mortality of Small Littoral-Zone Fishes in Sparkling Lake, Wisconsin [J]. En-

- vironmental Biology of Fishes, 1987, 18(2): 93-107.
- [24] PINKAS L. Food Habits of Albacore, Bluefin Tuna, and Bonito In California Waters [J]. Fish Bull US, 1971, 152: 1-139.
- [25] 凌炜琪, 张丽姿, 吴文秀, 等. 环境变化对北部湾海域春季鱼类多样性的影响 [J]. 水生态学杂志, 2023, 44(1): 10.
- [26] 曾嘉维, 林坤, 王学锋, 等. 雷州湾附近海域鱼类群落结构及其与环境因子的关系 [J]. 中国水产科学, 2019, 26(1): 108-117.
- [27] ELWOOD SHANNON C, WEAVER W. The Mathematical Theory of Communication [M]. Urbana: University of Illinois Press, 1963.
- [28] PIELOU E C. Species-diversity and Pattern-diversity in the Study of Ecological Succession [J]. Journal of Theoretical Biology, 1966, 10(2): 370-383.
- [29] SIMPSON E H. Measurement of Diversity [J]. Nature, 1949, 163(4148): 688.
- [30] 王崑, 罗垚, 李萍, 等. 城市化背景下滨海城市绿地木本植物物种多样性特征研究——以东营市建成区为例 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2019, 41(7): 53-61.
- [31] CHAO A, YANG M C K. Stopping Rules and Estimation for Recapture Debugging with Unequal Failure Rates [J]. Biometrika, 1993, 80(1): 193-201.
- [32] CHAO A. Nonparametric Estimation of the Number of Classes in a Population [J]. Scandinavian Journal of Statistics, 1984, 11(4): 265-270.
- [33] 曹文宣, 张国华. 洪湖鱼类小型化现象的初步探讨 [M] //中国科学院水生生物研究所洪湖课题组. 洪湖水体生物生产力综合开发及湖泊生态环境优化研究. 北京: 海洋出版社, 1991.
- [34] 刘其根, 沈建忠, 陈马康, 等. 天然经济鱼类小型化问题的研究进展 [J]. 上海水产大学学报, 2005, 14(1): 79-83.
- [35] DAVIDA J, ABELL R, HOGAN Z, et al. Overfishing of Inland Waters [J]. BioScience, 2005, 55(12): 1041-1051.
- [36] 毛志刚, 谷孝鸿, 曾庆飞. 呼伦湖鱼类群落结构及其渔业资源变化 [J]. 湖泊科学, 2016, 28(2): 387-394.
- [37] 毛志刚, 谷孝鸿, 龚志军, 等. 洪泽湖鱼类群落结构及其资源变化 [J]. 湖泊科学, 2019, 31(4): 1109-1119.
- [38] 曾宪锋, 邱贺媛, 刘稳昌. 菹草石芽的初步研究 [J]. 生物学杂志, 1996, 13(1): 28.
- [39] 雷欢, 陈锋, 黄道明. 水温对鱼类的生态效应及水库温变对鱼类的影响 [J]. 环境影响评价, 2017, 39(4): 36-39, 44.
- [40] MAES J, STEVENS M, BREINE J. Modelling the Migration Opportunities of Diadromous Fish Species along a Gradient of Dissolved Oxygen Concentration in a European Tidal Watershed [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2007, 75(1-2): 151-162.
- [41] 吕为群, 袁明哲. 温度变化对鱼类行为影响的研究进展 [J]. 上海海洋大学学报, 2017, 26(6): 828-835.
- [42] 董响红. 长江中下游浅水湖泊小型优势物种似鱊的生态学研究 [D]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2020.
- [43] 刘建康. 从生物生产力角度看湖泊渔业增产的途径 [J]. 海洋与湖沼, 1964(2): 224-225.
- [44] 聂振林, 王咏雪, 胡成业, 等. 三门湾春秋季节鱼类群落特征及其与环境因子的关系 [J]. 水产学报, 2018, 42(9): 1390-1398.
- [45] 葛珂珂, 钟俊生, 吴美琴, 等. 长江口沿岸碎波带刀鲚仔稚鱼的数量分布 [J]. 中国水产科学, 2009, 16(6): 923-930.
- [46] LI W, HICKS B J, LIN M L, et al. Impacts of Hatchery-reared Mandarin Fish *Siniperca chuatsi* Stocking on Wild Fish Community and Water Quality in a Shallow Yangtze Lake [J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 11481.

责任编辑 周仁惠