

白洋淀鱼类群落结构与环境因子关系分析

王银肖, 杨慧兰, 谭慧敏, 王敏, 穆淑梅, 康现江, 陈咏霞

Fish community structure and its relationship with environmental factors in Baiyangdian Lake

WANG Yinxiao, YANG Huilan, TAN Huimin, WANG Min, MU Shumei, KANG Xianjiang, CHEN Yongxia

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12024/jsou.20211003581>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

巢湖鱼类群落结构及多样性

The community structure and diversity of fish in the Chaohu Lake

上海海洋大学学报. 2022, 31(6): 1445 <https://doi.org/10.12024/jsou.20211003589>

滁河襄河口至马汊河段冬春季鱼类群落结构及其多样性

Spatial and temporal patterns of fish assemblages in Chuhe River between Xianghe estuary and Macha River

上海海洋大学学报. 2021, 30(6): 960 <https://doi.org/10.12024/jsou.20201003199>

淮河入海通道及其附近水系鱼类群落空间分布格局

Spatial distribution pattern of fish community in the passage from Huaihe River to sea and its adjacent river system

上海海洋大学学报. 2020, 35(6): 914 <https://doi.org/10.16535/j.cnki.dlhyxb.2019-305>

基于枝角类和桡足类多样性的白洋淀水环境监测与评价

Evaluation and monitoring of the water environment based on the diversity of Cladocera and Copepods in Baiyangdian Lake

上海海洋大学学报. 2021, 30(6): 1013 <https://doi.org/10.12024/jsou.20200403022>

广东东莞松木山水库鱼类群落结构及其与环境因子的关系

Structural characteristics of fish assemblage and its relationship with environmental factors in Songmushan Reservoir, Dongguan City of Guangdong Province

上海海洋大学学报. 2022, 31(4): 940 <https://doi.org/10.12024/jsou.20210403427>

文章编号: 1674-5566(2022)06-1488-14

DOI:10.12024/jsou.20211003581

白洋淀鱼类群落结构与环境因子关系分析

王银肖, 杨慧兰, 谭慧敏, 王 敏, 穆淑梅, 康现江, 陈咏霞

(河北大学 生命科学与绿色发展研究院, 河北 保定 072000)

摘 要: 2019 年 5 月、8 月、10 月和 2020 年 8 月、10 月对白洋淀 30 个位点进行了鱼类资源调查,并分析了白洋淀鱼类群落结构与环境因子的关系。结果表明:共采集鱼类 30 种,隶属 4 目 12 科,其中鲤形目最多,占 56.67%。相对重要性指数(IRI)分析显示,优势种(IRI \geq 500)有 9 种,以鲫、麦穗鱼和红鳍鲌为主。单因素方差(ANOVA)分析显示,个体数、物种数、Margalef 丰富度指数(D)、Shannon-Wiener 多样性指数(H')和 Pielou 均匀度指数(J')在不同季节间呈显著差异($P < 0.05$);SNK-q 多重比较检验显示,除均匀度指数(J')外,个体数、物种数、丰富度指数(D)和多样性指数(H')均以 2019 年 5 月最高。单因子相似性分析(ANOSIM)显示,不同季节间鱼类群落组成既重叠又呈一定的分离(Global $R = 0.524$)。丰度生物量比较曲线(ABC)显示,2019 年 5 月、8 月和 10 月鱼类群落受轻度干扰,2020 年 8 月和 10 月鱼类群落受中度干扰。冗余分析(RDA)显示,水温、DO、叶绿素 a 是影响白洋淀鱼类群落的主要环境因子。

关键词: 白洋淀; 鱼类群落结构; 物种多样性; 环境因子

中图分类号: S 932.4 **文献标志码:** A

鱼类作为水生生物多样性的组成部分,对环境的变化有着重要的指示作用。鱼类群落对自然栖息地具有不同的生态、形态和行为适应性,是评价水生态系统的有效指标^[1-2]。全球气候的变化和人类活动不同程度地影响着河流和湖泊系统中生物的栖息地,如湖泊面积萎缩、河流断流或干涸、人工筑坝和水库修建等导致水文连通性的改变,可能会对现有生物造成更大的生存压力,威胁到现有生物种群的长期生存能力^[3-4]。淡水鱼类多样性正迅速成为全球生物多样性的组成部分,更好地了解鱼类群落如何在空间和时间上对环境因素的反应,对于制定有效的保护策略非常重要^[4]。

白洋淀位于河北省雄安新区境内,是华北平原最大的内陆淡水湖泊,对华北地区生态环境有着重大影响,素有“华北之肾”之称。白洋淀鱼类是华北地区物种多样性的重要组成部分。关于白洋淀鱼类资源调查研究始于 20 世纪 30 年代,1960 年郑葆珊等^[5]所著《白洋淀鱼类》一书较为

详尽地记录了白洋淀 54 种鱼类,此时白洋淀鱼类的种类和数量极为丰富。但自 20 世纪中期以后,白洋淀上游修建水利工程、水量明显减少、淀区面积萎缩、水体污染事件频频发生、生态环境破坏严重^[6],水量、水质、水温等因素的改变对生境中的生物尤其是鱼类影响较大,致使鱼类资源数量、区系组成发生重大变化。如王所安等^[7]在 1975—1976 年间继白洋淀上游修库拦洪后的调查显示,白洋淀减少了沿海溯河入淀和上游河流产卵洄游入淀的鱼类,并且鱼产量明显下降。为恢复白洋淀生态功能,政府开展了“引黄济淀”、“南水北调”等一系列调水补水工程,白洋淀生态环境得到了改善,但白洋淀鱼类资源恢复并不乐观,对白洋淀鱼类资源定期性的调查显示^[8-12],白洋淀鱼类物种数和个体数仍维持在较低水平,物种数不到 40 种。然而,在 2019—2020 年的调查中,闫丽等^[13]记录了白洋淀鱼类 44 种,显示白洋淀鱼类资源得到了一定的恢复,但与最初的 54 种相比,仍缺少沿海溯河入淀和上游河流产卵洄

收稿日期: 2021-10-12 修回日期: 2022-05-13

基金项目: 河北省自然科学基金(C2016201055);白洋淀水生生物资源调查及水域生态修复示范项目(2130135)

作者简介: 王银肖(1989—),男,硕士研究生,研究方向为鱼类生态学。E-mail:971443044@qq.com

通信作者: 陈咏霞, E-mail:chenyongxia@hbu.edu.cn

游性鱼类。

于 2019—2020 年开展对白洋淀鱼类资源的调查,旨在了解淀区内现有的鱼类群落结构特征,分析鱼类群落结构与环境因子的关系,为今后白洋淀鱼类资源的管理、保护和生态修复提供科学依据,也为白洋淀鱼类多样性研究积累基础资料。

1 材料与方法

1.1 样品采集

2019 年 5 月、8 月、10 月和 2020 年 8 月、10 月(2020 年 5 月由于疫情影响未调查)共 5 次分 3 个季度对白洋淀淀区 30 个位点进行鱼类资源调查(图 1)。每个位点均设置 2 条单层丝网和 2 条地笼。丝网规格为 1 m × 30 m 和 1.5 m × 45 m,网目分别为 3 cm 和 7 cm;地笼规格为 35 cm × 30 cm 和 25 cm × 20 cm,网目为 1 cm。丝网和地笼设置时间约为 14 h,即下午 17:00 ~ 19:00 下网至次日 5:00 ~ 7:00 起网。依据最新鱼类学专著或研究论文对采集的渔获物进行分类鉴定及生态类型分类^[5, 14-18]。对现场采集到新鲜样本进行体长、体质量等常规生物学处理,体质量精确到

g,体长精确到 mm,并统计每个位点捕获鱼类的物种数和个体数。对于现场无法鉴定的物种经 10% 的甲醛溶液固定,并带回实验室进一步分类鉴定。

对 30 个位点使用水质测定仪测定水温(T)、溶解氧(DO)、生化需氧量(BOD₅)、pH、透明度(SD)、叶绿素 a(Chl. a)、总磷(TP)、总氮(TN)等环境因子,使用水深测定仪现场测定水深。

1.2 数据处理与分析

通过 Excel 2010 对每个位点每网的物种数(S)、个体数(N)、体质量(W)等原始数据进行统计。利用 Primer 5.0 软件计算 Margalef 种类丰富度指数(D)^[19]、Shannon-Wiener 多样性指数(H')^[20]和 Pielou 均匀度指数(J')^[21],利用 Excel 2010 计算 Pinkas 相对重要性指数^[22],丰度生物量比较曲线(ABC 曲线)^[23],公式如下:

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

$$H' = - \sum P_i \times \ln P_i \quad (2)$$

$$J' = H' / \ln S \quad (3)$$

$$I_{IR} = (N_i + W_i) F_i \quad (4)$$

$$W = \sum (B_i - A_i) / 50 (S - 1) \quad (5)$$

式中:S 为某个位点渔获物的种类数,N 为某个位

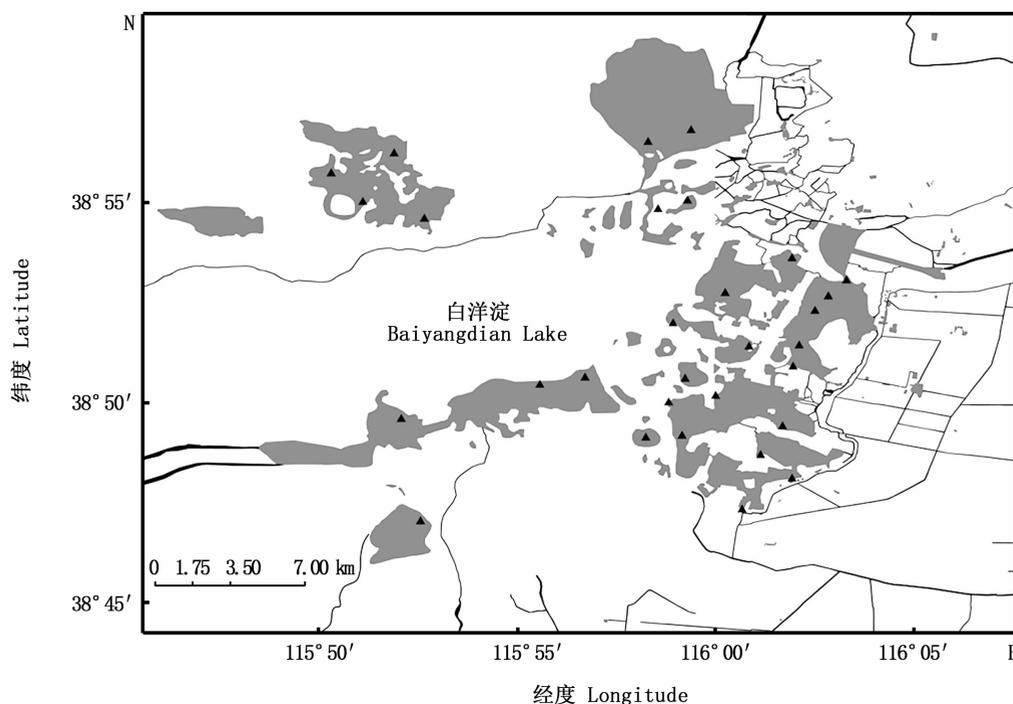


图 1 白洋淀位点示意图

Fig. 1 Collection sites in Baiyangdian Lake

点渔获物总的个体数, P_i 为某个位点第 i 种鱼类生物的个体数占总个体数的比例, N_i 为渔获物第 i 种鱼的尾数占总尾数的百分数, %; W_i 为第 i 种鱼的生物量占总生物量的百分数, %; F_i 为第 i 种鱼在所有采样次数中出现的频率, 定义 $I_{IR} < 1$ 为稀有种; $1 \leq I_{IR} < 10$ 为一般种; $10 \leq I_{IR} < 100$ 为常见种; $100 \leq I_{IR} < 500$ 为主要种; $I_{IR} \geq 500$ 为优势种; A_i 为某物种相对应的丰度累积百分比, %; B_i 为某物种相对应的生物量累积百分比, %; W 值作为 ABC 曲线定量的判断标准。

为满足数据的正态性和方差齐性, 对鱼类丰度数据分析时, 对原始数据进行 $\log_2(x+1)$ 对数转换, 然后运用 SPSS 22.0 进行单因素方差分析 (One-way ANOVA) 检验不同季节及位点的鱼类多样性差异。如鱼类多样性显著性差异, 进一步进行 SNK (Student-Newman-Keuls) 多重比较分析不同季节间及位点的鱼类多样性变化^[24]。

在 Primer 5.0 软件中, 以每个季节鱼类物种数量为原始矩阵, 进行 $\log_2(x+1)$ 转换后, 运用单因素分析 (ANOSIM) 检验不同季节对鱼类种群结构组成的影响^[25], 根据 Global R 值来确定鱼类种群的离散程度: 当 $R \leq 0.25$ 时, 鱼类群落重叠无分离现象; 当 $0.25 < R \leq 0.5$, 群落存在一定程度的重叠但仍可分离; $0.5 < R \leq 0.75$, 群落存在一定程度重叠但分离明显; $R > 0.75$, 群落完全分离。运用非参数多变量排序 (non-metric multidimensional scaling, NMS) 构建鱼类群落结构的二维双标图, 运用相似性百分比分析 (similarity percentages, SIMPER)^[26] 确定维持不同季节间结构相似性的关键物种。

利用 Canoco 5.0^[27] 软件对 2019 年 3 个季度鱼类物种组成和环境因子进行去趋势对应分析 (detrended correspondence analysis, DCA), 根据分析结果中各排序轴的大小选择线性模型 (redundancy analysis, RDA) 或单峰模型 (canonical correspondence analysis, CCA) 分析鱼类物种和环境因子的相关性。如果排序轴小于 3, 选择 RDA 分析; 介于 3 和 4 之间, RDA 分析和 CCA 分析均可; 排序轴大于 4, 选择 CCA 分析。在 RDA 分析时, 由于原始鱼类物种数据存在许多 0 值, 首先对原始数据进行 Hellinger 转化, 用转化后的鱼类物种数据作为响应变量, 原始环境因子数据作为解释变量, 对鱼类数据和环境因子进行 RDA 分

析。

2 结果

2.1 鱼类组成、生态类型及优势种

2019—2020 年在白洋淀共捕获鱼类 30 种, 隶属 4 目 12 科 (表 1)。其中, 鲤形目最多, 为 2 科 17 种, 占 56.67%; 其次为鲈形目, 为 6 科 9 种, 占 30.00%; 鲇形目为 2 科 2 种, 占 6.67%; 合鳃鱼目 2 科 2 种, 占 6.67%。

鱼类生态类型划分 (表 1): 按生活习性划分, 定居型鱼类 (S) 13 种, 占 43.33%; 河流型鱼类 (R) 13 种, 占 43.33%; 河湖洄游性鱼类 (RL) 4 种, 占 13.33%。按食性划分, 肉食性鱼类 (Car) 11 种, 占 36.67%; 植食性鱼类 (Her) 2 种, 占 6.67%; 杂食性鱼类 (Omn) 最多, 为 17 种, 占 56.67%。按栖息水层划分, 中上层鱼类 (U) 6 种, 占 20.00%; 中下层鱼类 (Lo) 11 种, 占 36.67%; 底栖鱼类 (De) 最多, 有 13 种, 占 43.33%。按产卵类型划分, 产黏性卵鱼类 (V) 10 种, 占 33.33%; 产沉性卵鱼类 (D) 有 7 种, 占 23.33%; 产漂流性卵鱼类 (Dr) 有 10 种, 占 33.33%; 喜贝性卵鱼类 (Sp) 有 3 种, 占 10.00%。

根据相对重要指数 $I_{IR} \geq 500$ 为优势种, 白洋淀鱼类优势种共 9 种 (表 1)。5 次调查中, 各月优势种不同, 其中, 2019 年 5 月优势种有鲫 (*Carassius auratus*)、红鳍鲌 (*Chanodichthys erythropterus*)、麦穗鱼 (*Pseudorasbora parva*)、子陵吻虾虎鱼 (*Rhinogobiu giurinus*); 2019 年 8 月白洋淀优势种有鲫、鲈 (*Hemiculter leucisculu*)、红鳍鲌、麦穗鱼、乌鳢 (*Channa argus*); 2019 年 10 月优势种有鲫、鲌、红鳍鲌、麦穗鱼、小黄魮鱼 (*Micropercops swinhonis*); 2020 年 8 月优势种有鲫、鲌、似鲮 (*Toxabramis swinhonis*)、红鳍鲌、麦穗鱼; 2020 年 10 月优势种有鲫、鲈、红鳍鲌、麦穗鱼、乌鳢。5 次调查中, 白洋淀优势种均有鲫、红鳍鲌、麦穗鱼。

2.2 鱼类群落结构特征

单因素方差分析结果显示 (表 2), 白洋淀鱼类在不同位点间鱼类的个体数 (N)、物种数 (S)、Margalef 种类丰富度指数 (D)、Shannon-Wiener 多样性指数 (H')、Pielou 均匀度指数 (J') 均无显著差异 ($P > 0.05$); 不同位点的鱼类个体数、物种数、丰富度指数、多样性指数、均匀度指数呈显著

的季节差异 ($P < 0.05$), 进一步使用 SNK 多重比较分析, 结果显示除均匀度指数外, 个体数、物种数、丰富度指数、多样性指数均为 2019 年 5 月最高(图 2)。2019 年 5 月, 多样性指数各位点为

0.82 ~ 2.03 (平均为 1.63); 丰富度指数各位点为 1.03 ~ 2.82 (平均为 2.03); 均匀度指数各位点为 0.34 ~ 0.84 (平均为 0.67)。

表 1 白洋淀鱼类组成、各月份相对重要指数 (I_{RI}) 及生态类型

Tab. 1 Fish composition, relative importance index (I_{RI}) of each month and ecological types in Baiyangdian Lake

| 物种 Species | 相对重要指数 Relative importance index, IRI | | | | | 生态类型 Ecological types |
|--|---------------------------------------|----------|----------|----------|----------|--------------------------|
| | 2019-05 | 2019-08 | 2019-10 | 2020-08 | 2020-10 | |
| 鲤形目 Cypriniformes | | | | | | |
| 鲤科 Cyprinidae | | | | | | |
| 鲫 <i>Carassius auratus</i> | 11 215.34 | 6 220.17 | 6 921.25 | 5 884.36 | 6 494.51 | S, Omn, Lo, V |
| 鲤 <i>Cyprinus carpio</i> | 120.87 | 289.23 | 18.61 | 1.18 | 23.92 | S, Omn, Lo, V |
| 鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i> | 99.11 | 302.42 | 1 666.85 | 620.99 | 476.92 | RL, Omn, U, Dr |
| 鳙 <i>Hypophthalmichthys nobilis</i> | 2.92 | 2.60 | 31.04 | 27.62 | 153.24 | RL, Omn, U, Dr |
| 鲮 <i>Hemiculter leucisculus</i> | 137.45 | 1 881.67 | 479.72 | 14.82 | 2 060.6 | S, Omn, U, V |
| 似鲮 <i>Toxabramis swinhonis</i> | - | - | 249.48 | 647.5 | 401.23 | S, Omn, U, V |
| 红鳍鲌 <i>Chanodichthys erythropterus</i> | 1 052.77 | 4 129.56 | 3 160.27 | 707.36 | 1 733.76 | S, Car, U, V |
| 团头鲂 <i>Megalobrama amblycephala</i> | - | 0.92 | 11.94 | 1.90 | - | S, Her, Lo, V |
| 兴凯鲮 <i>Acheilognathus chankaensis</i> | 33.00 | 0.85 | 2.99 | 0.76 | - | S, Omn, Lo, Sp |
| 中华鲮 <i>Rhodeus sinensis</i> | 62.76 | 5.36 | 1.62 | 19.64 | 1.79 | S, Omn, Lo, Sp |
| 高体鲮 <i>Rhodeus ocellatus</i> | 85.14 | 13.58 | 1.30 | - | - | S, Omn, Lo, Sp |
| 草鱼 <i>Ctenopharyngodon idella</i> | 66.14 | 41.33 | 3.15 | 103.03 | - | RL, Her, Lo, Dr |
| 麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i> | 1 817.77 | 1 277.36 | 1 209.64 | 2 080.01 | 3 938.55 | R, Omn, Lo, V |
| 黑鳍鳊 <i>Sarcocheilichthys nigripinnis</i> | - | - | 0.11 | - | - | R, Omn, Lo, Dr |
| 棒花鱼 <i>Abbottina rivularis</i> | 20.50 | - | 6.13 | 1.03 | - | R, Omn, De, V |
| 鳅科 Cobitidae | | | | | | |
| 泥鳅 <i>Misgurnus anguillicaudatus</i> | 11.57 | 4.13 | 0.11 | 0.39 | - | R, Omn, De, Dr |
| 大鳞副泥鳅 <i>Misgurnus dabryanus</i> | 4.54 | 13.48 | 3.63 | 2.00 | 155.20 | R, Omn, De, Dr |
| 合鳃鱼目 Synbranchiformes | | | | | | |
| 刺鳅科 Mastacembelidae | | | | | | |
| 刺鳅 <i>Sinobdella aculeatus</i> | 0.23 | - | - | - | - | R, Car, De, D |
| 合鳃鱼科 Symbranchidae | | | | | | |
| 黄鳝 <i>Monopterus albus</i> | 4.20 | 8.66 | 56.88 | 44.32 | 22.32 | S, Car, De, Dr |
| 鲈形目 Percoidae | | | | | | |
| 虾虎鱼科 Gobiidae | | | | | | |
| 子陵吻虾虎鱼 <i>Rhinogobius giurinus</i> | 899.31 | 195.72 | 327.53 | 409.35 | 331.11 | R, Car, De, D |
| 林氏吻虾虎鱼 <i>Rhinogobius lindbergi</i> | 238.09 | 14.92 | 6.43 | - | - | R, Car, De, D |
| 波氏吻虾虎鱼 <i>Rhinogobius cliffordpopei</i> | 44.15 | 14.86 | 3.21 | - | 4.90 | R, Car, De, D |
| 福岛虾虎鱼 <i>Rhinogobius fukushimai</i> | 71.57 | 1.00 | 11.92 | 2.15 | 8.11 | R, Car, De, D |
| 沙塘鳢科 Odontobutidae | | | | | | |
| 小黄鲷鱼 <i>Microperops swinhonis</i> | 427.39 | 82.55 | 942.64 | 47.44 | 246.25 | R, Car, De, D |
| 斗鱼科 Osphronemidae | | | | | | |
| 圆尾斗鱼 <i>Macropodus ocellatus</i> | 1.07 | 26.60 | 200.98 | 54.38 | 0.09 | R, Omn, Lo, Dr |
| 鲈科 Serranidae | | | | | | |
| 鳊 <i>Siniperca chuatsi</i> | - | 1.06 | - | - | - | S, Car, U, Dr |
| 慈鲷科 Cichlidae | | | | | | |
| 奥利亚罗非鱼 <i>Oreochromis aureus</i> | - | - | 1.39 | - | - | RL, Omn, Lo, V |
| 鲤科 Channidae | | | | | | |
| 乌鲤 <i>Channa argus</i> | 164.78 | 1 382.89 | 193.80 | 466.03 | 728.94 | S, Car, De, Dr |
| 鲇形目 Siluriformes | | | | | | |
| 鲇科 Bagridae | | | | | | |
| 黄颡鱼 <i>Tachysurus fulvidraco</i> | 94.22 | 98.21 | 14.49 | 119.72 | 10.01 | R, Omn, De, D |
| 鲇科 Siluridae | | | | | | |
| 鲇 <i>Silurus asotus</i> | 220.60 | 101.82 | 0.54 | 0.42 | 0.75 | S, Car, De, V |

注: S. 定居型; R. 河流型; RL. 河湖洄游型; Her. 植食性; Car. 肉食性; Omn. 杂食性; U. 中上层; Lo. 中下层; De. 底栖; V. 黏性卵; D. 沉性卵; Dr. 漂流性卵; Sh. 喜贝性卵。

Notes: S. sedentary fish; R. riverine fish; RL. river-lake migratory fish; Car. carnivorous; Omn. omnivorous; U. upper; Lo. lower-middle; De. demersal; V. viscous; D. demersal; Dr. drifting; Sp. spawning in shellfish.

表 2 基于单因素方差分析检验 (F 值) 白洋淀鱼类多样性指数不同位点及季节的变化
 Tab. 2 Changes of fish diversity index at different loci and in different seasons
 in Baiyangdian Lake on one-way ANOVA test (F value)

| 环境参数 Environment variables | 个体数 Number of individuals, N | 物种数 Number of species, S | 多样性指数 Shannon-Weaver Diversity, H' | 丰富度指数 Margalef richness, D | 均匀度指数 Pielou evenness, J' |
|----------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|--|------------------------------------|-----------------------------------|
| 位点 Loci | 0.969 ^{ns} | 0.756 ^{ns} | 1.438 ^{ns} | 0.811 ^{ns} | 1.192 ^{ns} |
| 季节 Season | 19.854 ^{**} | 6.267 ^{**} | 4.024 ^{**} | 2.765 ^{**} | 5.157 ^{**} |

注:表格中的数值为 F 值; ns、* 和 ** 分别代表 $P > 0.05$ 、 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 。

Notes: Values in the table represent F ; ns, * and ** represent $P > 0.05$, $P < 0.05$ and $P < 0.01$ respectively.

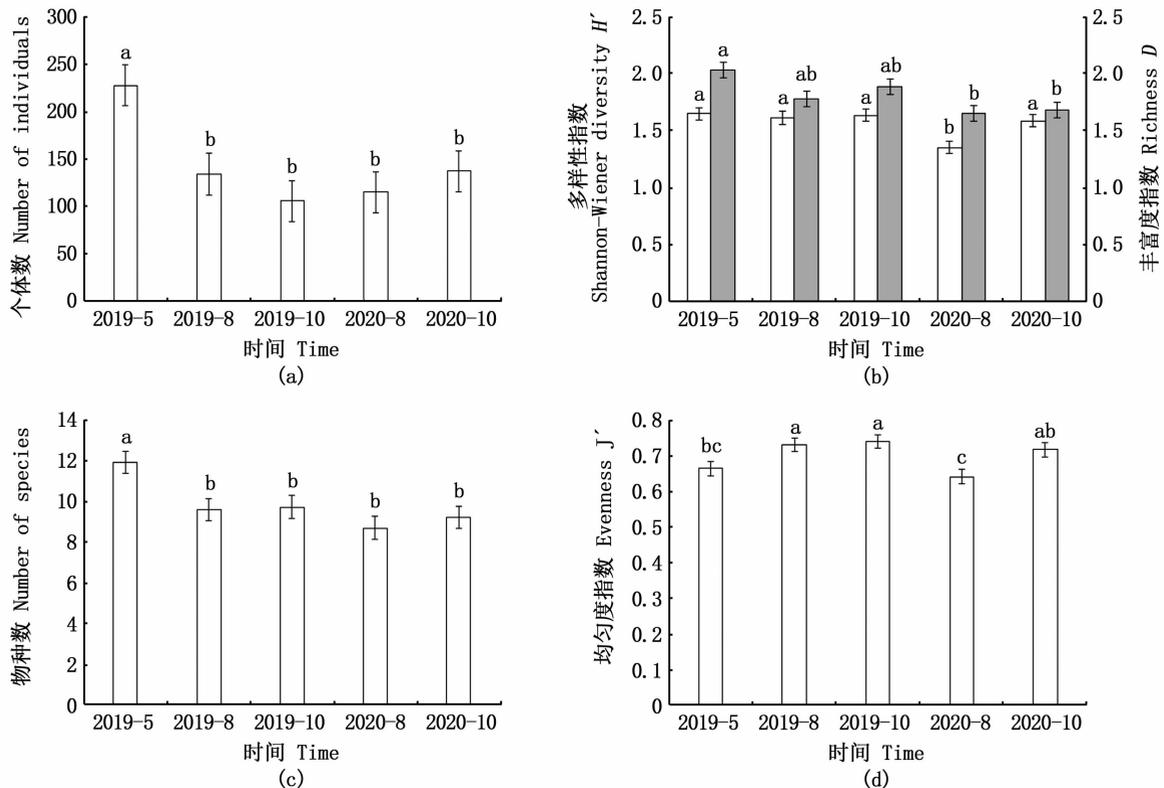


图 2 不同季节间白洋淀鱼类多样性指数差异

Fig. 2 Differences of fish diversity index in different seasons in Baiyangdian Lake

对白洋淀鱼类群落进行非参数多变量 (NMS) 排序分析和单因子相似性分析 (ANOSIM) 结果显示 (图 3), 不同季节间鱼类群落组成既重叠又呈现一定的分离状态 ($Global R = 0.524$)。相似性百分比分析 SIMPER 显示 (表 3), 2019 年 5 月各位点鱼类平均相似性为 61.31%, 主要贡献种为鲫、麦穗鱼、子陵吻虾虎鱼、小黄魮鱼、红鳍鲌, 累积贡献率为 79.50%; 2019 年 8 月各位点鱼类平均相似性为 65.62%, 主要贡献种为鲫、红鳍鲌、鲈、麦穗鱼、乌鳢, 累积贡献率为 90.50%;

2019 年 10 月各位点鱼类平均相似性为 58.36%, 主要贡献种为鲫、红鳍鲌、麦穗鱼、小黄魮鱼, 累积贡献率为 78.19%。2020 年 8 月各位点平均相似性为 63.61%, 主要贡献种为鲫、似鲮、麦穗鱼、子陵吻虾虎鱼、红鳍鲌, 累积贡献率 89.12%; 2020 年 10 月各位点鱼类平均相似性为 71.55%, 主要贡献种为麦穗鱼、鲫、鲈、红鳍鲌、似鲮, 累积贡献率为 85.67%。贡献度大于 5% 的物种详情见表 3。

表 3 白洋淀不同季节的主要贡献种相似性百分比分析(贡献度大于 5%)

Tab. 3 The main contribution species of Baiyangdian Lake in different seasons and similarity percentage analysis (contribution rate greater than 5%)

| 物种 Species | 2019-5 | | | 2019-8 | | | 2019-10 | | | 2020-8 | | | 2020-10 | | |
|--|--------|-------|-------|--------|-------|-------|---------|-------|-------|--------|-------|-------|---------|-------|-------|
| | AA | AS | Con | AA | AS | Con | AA | AS | Con | AA | AS | Con | AA | AS | Con |
| 鲫 <i>Carassius auratus</i> | 92.03 | 16.92 | 27.60 | 30.40 | 17.59 | 26.81 | 25.57 | 18.46 | 31.63 | 17.97 | 17.00 | 26.73 | 33.43 | 17.65 | 24.67 |
| 鲈 <i>Hemiculter leucisculu</i> | | | | 23.77 | 10.16 | 15.49 | | | | | | | 16.90 | 11.32 | 15.83 |
| 似鲮 <i>Toxabramis swinhoni</i> | | | | | | | | | | 54.47 | 15.06 | 23.67 | 5.53 | 4.06 | 5.67 |
| 红鳍鲌 <i>Chanodichthys erythropterus</i> | 26.67 | 9.99 | 16.29 | 41.20 | 18.08 | 27.55 | 25.60 | 13.96 | 23.92 | 4.33 | 5.48 | 8.61 | 11.77 | 10.50 | 14.67 |
| 麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i> | 34.80 | 11.97 | 19.52 | 15.60 | 9.03 | 13.76 | 13.07 | 8.13 | 13.94 | 22.03 | 14.15 | 22.24 | 51.17 | 17.76 | 24.83 |
| 子陵吻虾虎鱼 <i>Rhinogobiu giurinus</i> | 24.77 | 5.80 | 9.46 | | | | | | | 5.50 | 5.00 | 7.86 | | | |
| 小黄鲮鱼 <i>Micropercops swinhonis</i> | 17.43 | 4.07 | 6.63 | | | | 13.70 | 5.08 | 8.71 | | | | | | |
| 乌鳢 <i>Channa argus</i> | | | | 7.17 | 4.52 | 6.89 | | | | | | | | | |

注:AA. 平均多度; AS. 平均相似度; Con. 贡献度。
Notes: AA. average abundance; AS. average similarity; Con. contribution.

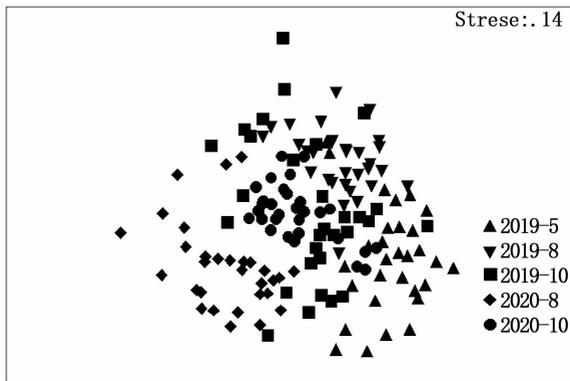


图 3 白洋淀鱼类群落不同季节分布 NMS 图
Fig. 3 Non-metric multi-dimensional scaling (NMS) analysis of fish community in Baiyangdian Lake in different seasons

ABC 曲线分析结果显示(图 4),2019 年 5 月、8 月、10 月鱼类丰度优势度在生物量优势度之下, W 值分别为 0.092、0.032、0.105, 鱼类群落受轻度干扰的状态;2020 年 8 月、10 月鱼类丰度优势度在生物量优势度之上, W 值分别为 -0.039、-0.022, 鱼类群落受中度干扰状态。

2.3 鱼类群落与环境因子的关系

DCA 排序结果显示 4 个排序轴长度均小于 3 (表 4), 其中第一轴长为 2.36, 物种累积解释变量为 18.83%, 物种和环境累积解释变量为 18.17%, 物种和环境与排序轴相关性最高为 75.49%。白洋淀鱼类群落与环境因子分析适用于线性模型 RDA 分析。

RDA 分析中第一轴和第二轴为主成分轴(表 5), 第一轴解释变化率为 22.01%, 第一轴和第二轴累积解释变化率为 25.71%, 物种和环境与前两轴相关性分别为 68.94% 和 51.75%。白洋淀鱼类群落与环境因子 RDA 排序图结果显示(图 5), 在第一轴上(Axis 1), 对鱼类群落组成影响最大的环境变量为叶绿素 a 和溶解氧, 蒙特卡洛检验叶绿素 a 与第一轴的正相关性较高 ($F = 7.8$, $P = 0.002$), 以鲫、鲌 (*Silurus asotus*)、麦穗鱼、棒花鱼 (*Abbottina rivularis*) 等具有较强耐受性鱼类为主; 在第二轴上(Axis 2), 水温对鱼类群落组成影响较大, 蒙特卡洛检验呈正相关性 ($F = 12.5$, $P = 0.002$), 以鲈、红鳍鲌、乌鳢为主。

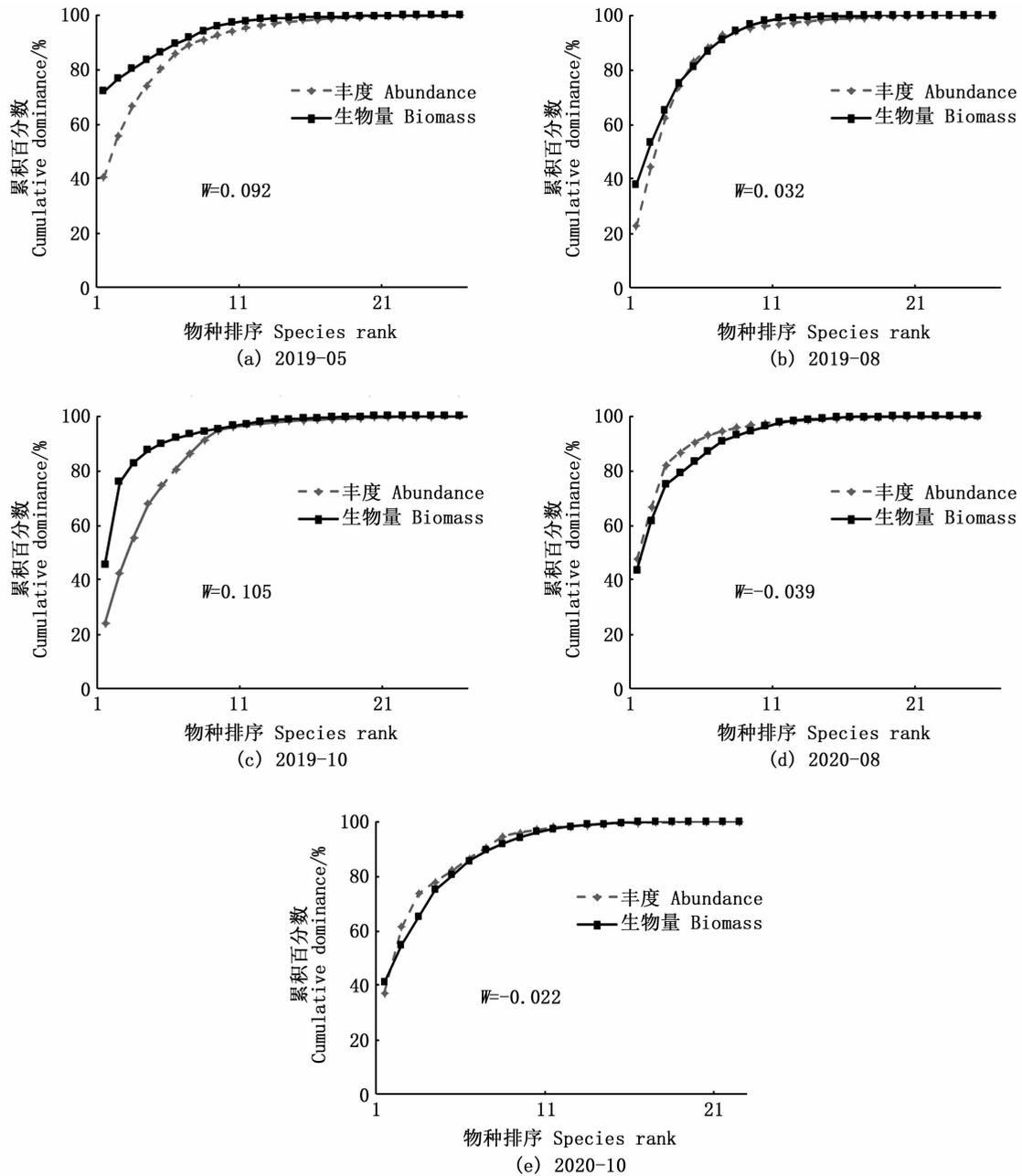


图 4 白洋淀鱼类群落不同季节 ABC 曲线

Fig. 4 Abundance-biomass comparison curves of fish community in Baiyangdian Lake in different seasons

表 4 白洋淀鱼类群落 DCA 分析

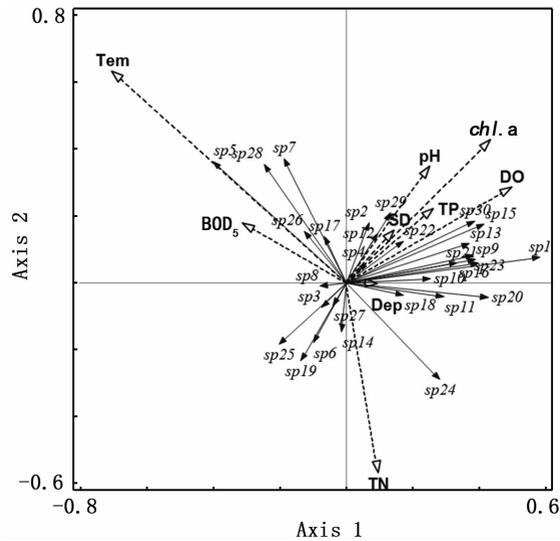
Tab. 4 Detrended correspondence analysis of fish community in Baiyangdian Lake

| 统计学变量 Statistical variables | Axis 1 | Axis 2 | Axis 3 | Axis 4 |
|--|---------|---------|---------|---------|
| 特征值 Eigenvalues | 0.271 8 | 0.166 2 | 0.099 5 | 0.063 2 |
| 排序轴梯度长度 Gradient length | 2.36 | 1.90 | 1.43 | 1.33 |
| 物种累计解释变量百分比 Cumulative percentage explained variation of species/% | 18.83 | 30.34 | 37.23 | 41.61 |
| 物种和环境关系累积解释变量百分比 Cumulative percentage explained variation of species-environment/% | 18.17 | 30.49 | 38.42 | 42.50 |
| 物种和环境因子与排序轴相关关系 Species-environment correlations /% | 0.754 9 | 0.650 4 | 0.324 4 | 0.409 8 |

表 5 白洋淀鱼类群落 RDA 分析

Tab. 5 Redundancy analysis of fish community in Baiyangdian Lake

| 统计学变量 Statistical variables | Axis 1 | Axis 2 | Axis 3 | Axis 4 |
|---|---------|---------|---------|---------|
| 特征值 Eigenvalues | 0.220 1 | 0.037 | 0.014 | 0.009 2 |
| 累计解释变化率 Cumulative percentage explained variation | 22.01 | 25.71 | 27.11 | 28.03 |
| 物种和环境因子与排序轴相关关系 Species-environment correlations /% | 0.689 4 | 0.517 5 | 0.381 2 | 0.301 9 |
| 累计解释拟合变化率 Explained fitted variation (cumulative) | 75.99 | 88.76 | 93.61 | 96.77 |



Tem. 水温; Dep. 水深; DO. 溶解氧; Chl. a. 叶绿素 a; SD. 透明度; BOD₅. 生化需氧量; TN. 总氮; TP. 总磷; sp1. 鲫; sp2. 鲤; sp3. 鲢; sp4. 鳙; sp5. 鲈; sp6. 似鲮; sp7. 红鳍鲌; sp8. 团头鲂; sp9. 兴凯鲌; sp10. 中华鲮; sp11. 高体鲮; sp12. 草鱼; sp13. 麦穗鱼; sp14. 黑鳍鳊; sp15. 棒花鱼; sp16. 泥鳅; sp17. 大鳞副泥鳅; sp18. 刺鳅; sp19. 黄颡; sp20. 子陵吻虾虎鱼; sp21. 林氏吻虾虎鱼; sp22. 波氏吻虾虎鱼; sp23. 福岛吻虾虎鱼; sp24. 小黄鲷; sp25. 圆尾斗鱼; sp26. 鳊; sp27. 奥利亚罗非鱼; sp28. 乌鳢; sp29. 黄颡鱼; sp30. 鲇。

Tem. Temperature; Dep. Depth; DO. Dissolved Oxygen; Chl. a. Chlorophyll a; SD. Spectral distribution; BOD₅. Biochemical Oxygen Demand; TN. Total Nitrogen; TP. Total Phosphorus; sp1. *Carassius auratus*; sp2. *Cyprinus carpio*; sp3. *Hypophthalmichthys molitrix*; sp4. *Hypophthalmichthys nobilis*; sp5. *Hemiculter leucisculus*; sp6. *Toxabramis swinhonis*; sp7. *Chanodichthys erythropterus*; sp8. *Megalobrama amblycephala*; sp9. *Acheilognathus chankaensis*; sp10. *Rhodeus sinensis*; sp11. *Rhodeus ocellatus*; sp12. *Ctenopharyngodon idella*; sp13. *Pseudorasbora parva*; sp14. *Sarcocheilichthys nigripinnis*; sp15. *Abbottina rivularis*; sp16. *Misgurnus anguillicaudatus*; sp17. *Misgurnus dabryanus*; sp18. *Sinobdella sinensis*; sp19. *Monopterus albus*; sp20. *Rhinogobius giurinus*; sp21. *Rhinogobius lindbergi*; sp22. *Rhinogobius cliffordpopei*; sp23. *Rhinogobius fukushima*; sp24. *Micropercops swinhonis*; sp25. *Macropodus ocellatus*; sp26. *Siniperca chuatsi*; sp27. *Oreochromis aureus*; sp28. *Channa argus*; sp29. *Tachysurus fulvidraco*; sp30. *Silurus asotus*.

图 5 白洋淀鱼类群落与环境因子 RDA 分析

Fig. 5 Redundancy analysis of fish community and environmental factors in Baiyangdian Lake

3 讨论

3.1 白洋淀鱼类群落组成结构特征

白洋淀位于古北区的华北亚区^[28],兴起于第三纪,成于第四纪^[29]。白洋淀鱼类特点是以江河平原鱼类为主,因其地理位置临近渤海湾,因而有部分海产鱼类可溯河进入淀区。白洋淀鱼类代表性的资料《白洋淀鱼类》记录了 54 种鱼类,隶属 11 目 17 科 50 属^[5]。国内其他调查资料显示,水库、大坝等涉水工程的修建,导致洄游通道阻塞,是造成洄游性鱼类资源衰退甚至灭绝的主要原因^[30]。20 世纪 60 年代在入淀河系上游相继建库修坝,白洋淀鱼类减少了沿海溯河入淀和上游河流产卵洄游入淀的种类,如日本鳗鲡 (*Anguilla japonica*)、龟鲛 (*Chelon haematocheilus*)、安氏新银鱼 (*Neosalanx anderssoni*)、赤眼鳟 (*Squaliobarbus curriculus*)、鳊 (*Elopichthys bambusa*) 等^[7]。随后的几十年调查结果显示,白洋淀鱼类仍在持续减少,重要的经济鱼类也消失了,如鳊 (*Siniperca chuatsi*)、鲌 (*Parabramis pekinensis*),白洋淀鱼类维持在 24 ~ 33 种之间^[8-12] (附表)。本研究于 2019—2020 年对白洋淀鱼类资源调查共收集到 30 种,与早期的 54 种相比,仍缺失沿海溯河入淀和部分上游河流产卵洄游入淀的鱼类,以及部分重要的经济鱼类;与同期闫丽等^[13] 的 44 种鱼类相比 (附表),减少了 14 种,减少的种类多为养殖品种或稀有物种,如青鱼 (*Mylopharyngodon piceus*)、三角鲂 (*Megalobrama terminalis*) 均为养殖品种;瓦氏黄颡鱼 (*Pseudobagrus vachelli*) 为北方地区稀有物种,郑葆珊等^[5] 在《白洋淀鱼类》中以及张春光等^[31] 在《北京及其邻近地区的鱼类》中对瓦氏黄颡鱼的评价均为不常见,产量较少。本次调查收集的物种数较同期闫丽等^[13] 的调查物种数少,应是采样位点不同而造成的差异。此次调查采集到的鱼类主要以定居性鱼类为主,虽有 4 种江河

洄游性鱼类,如草鱼、鲮、鲢和奥利亚罗非鱼均为人工养殖物种或白洋淀渔业增殖放流种类^[32]。从食性上看,以杂食性鱼类为主,肉食性鱼类次之。在肉食性鱼类中,除了采集到的 2 尾人工养殖鳊外,以摄食小型水生动物如小鱼、小虾和水生昆虫为主的红鳍鲌、乌鳢较多。植食性鱼类均为人工养殖物种或增殖放流种类,有草鱼和团头鲂。

2019—2020 年白洋淀鱼类优势种有鲫、红鳍鲌、麦穗鱼,这与 1976 年的调查结果一致^[7],与 20 世纪 60 年代初相比,白洋淀鱼类以耐低氧的种类为主。除上述优势种外,经济价值低的小型鱼类,如鲮、似鲮、子陵吻虾虎鱼和小黄魮鱼为淀区内主要种类组成,这些物种均为性早熟类型,通常 1 冬龄即达性成熟,这表明白洋淀以小型鱼类为主。淀区鱼类小型化和低龄化现象自 20 世纪 70 年代就已经在白洋淀出现了^[7],这同国内其他内陆湖泊和河流类似^[33-35],其原因主要是栖息环境受到污染和捕捞过度。

多样性指数(H')和均匀度指数(J')是群落结构稳定的重要评价指标,当物种丰富度越高,个体数分布越均匀,群落结构越稳定,多样性指数和均匀度指数则较大,反之,物种受到环境的胁迫,多样性指数和均匀度指数则低^[36-37]。本次研究中,白洋淀鱼类个体数、物种数、丰富度指数、多样性指数和均匀度指数均为 2019 年 5 月最高,这与其他研究结果类似^[27,37],通常春节鱼类多样性指数较高,可能原因是春节为鱼类繁殖季节,水位也较其他季节低,鱼类多在浅水区活动,容易被地笼和刺网等捕捞工具捕获。白洋淀鱼类多样性指数(平均为 1.63)与北方其他水域接近,如济南市黄河流域多样性指数为 1.64 ~ 1.90^[38];与南方水域相比,白洋淀鱼类资源多样性水平明显较低,如东太湖多样性指数为 2.14 ~ 3.26^[27]。原因可能是北方地区鱼类物种多样性原本就低于南方地区^[39],在一定程度上北方地区鱼类群落结构较简单,更容易受环境胁迫的影响。

ABC 曲线最早被应用于对海洋大型底栖动物群落结构的研究,随后被越来越广泛地用于评价水体中游泳动物或无脊椎动物群落受污染、干扰的程度^[23]。一般认为生物量曲线始终在丰度曲线之上,群落趋向稳定的状态,一旦两曲线相

交或重叠,说明群落收到干扰,稳定性下降^[23]。白洋淀鱼类群落 ABC 曲线的结果与优势种、鱼类多样性和相似性百分比 SIMPER 结果大体一致,物种数、丰富度指数、多样性指数 2019 年高于 2020 年。2019 年 5 月、8 月、10 月鲫、红鳍鲌等体型较大的鱼类相对重要指数、百分比贡献度较高,鱼类生物量曲线中生物量优势度略高于丰度优势度;而 2020 年 8 月、10 月体型较小的麦穗鱼相对重要指数、百分比贡献度较高,鱼类生物量曲线中丰度优势度略高于生物量优势度,这表明白洋淀鱼类资源的捕捞压力过大,体型较大的类群或个体数量减少速度大于体型小的鱼类。

3.2 白洋淀鱼类群落结构与环境因子关系

通常鱼类多样性与栖息生境异质性相关,栖息地异质性高,鱼类多样性就高^[40]。白洋淀各位点鱼类群落的物种组成、个体数、丰富度指数、多样性指数、均匀度指数均不存在显著差异,这在一定程度上反映白洋淀各区域鱼类群落结构处在一个相对稳定的状态。在不同季节间,白洋淀鱼类的多样性指数、丰富度指数以及均匀度指数均存在差异,这表明白洋淀鱼类群落主要受非生物环境因子影响。相似性分析显示,白洋淀鱼类 2019 年 5 月与 2020 年 8 月差异性最大,2019 年 8 月和 2020 年 10 月差异性最小。鲫、红鳍鲌、麦穗鱼相似性贡献度最高,达 60% 左右,而分歧种为团头鲂、鳊、黑鳍鳊(*Sarcocheilichthys nigripinnis*)、刺鲃(*Sinobdella aculeatus*),表明白洋淀以耐污的小型鱼类为主。

已有研究表明,水温、水深、透明度、溶解氧、pH、叶绿素 a、总磷、总氮等环境因子对湖泊鱼类群落结构分布均有一定的影响^[40-43]。通常认为水草覆盖度高,透明度高,与之相反总磷、总氮和叶绿素 a 低的湖泊鱼类多样性和生物量高^[41-44]。本研究中,叶绿素 a、溶解氧和水温是影响白洋淀鱼类群落结构的主要环境因子。其中以叶绿素 a 为主,白洋淀鱼类中鲫、麦穗鱼、鲈、黄颡鱼(*Tachysurus fulvidraco*)等与之相关性强,叶绿素 a 与浮游植物密度相关,这也符合白洋淀以耐污的杂食性鱼类为主的特点。溶解氧是许多鱼类分布的限制因子,大部分鱼类尤其是肉食性耗氧高的种类喜生活在高溶氧区域^[45-46],白洋淀鱼类中鳊鱼和虾虎鱼类与溶解氧相关性强,该类群通常在较为清澈的水草中分布。在一定范围内,

水温升高,鱼类的摄食量和活跃性增强,白洋淀鱼类中蟹、红鳍鲌、乌鳢等与水温相关性较高,蟹、红鳍鲌产卵期较长,从5月到7、8月,水温为28.9℃范围内均为其繁殖期,在此期间,这些鱼类活动比较频繁;乌鳢因是增殖放流的鱼类,在夏季数量较多,因此与水温有明显的正相关。

4 结论

通过对白洋淀鱼类资源调查及其与环境因子关系分析,调查中共采集到4目12科30种鱼类,优势种为鲫、蟹、麦穗鱼和红鳍鲌等;从鱼类相对重要指数和相似性百分比贡献度组成上来看,白洋淀鱼类小型化趋势较为严重;ABC丰度优势度曲线显示2019年鱼类群落为轻度干扰状态,2020年鱼类群落则处于中度干扰状态;冗余分析显示水温、溶解氧、叶绿素a是影响白洋淀鱼类群落的主要环境因子。

参考文献:

- [1] KARR J R. Assessment of biotic integrity using fish communities [J]. Fisheries, 1981, 6(6): 21-27.
- [2] MCCORMICK F H, PECK D V, LARSEN D P. Comparison of geographic classification schemes for Mid-Atlantic stream fish assemblages [J]. Journal of the North American Benthological Society, 2000, 19(3): 385-404.
- [3] JACKSON D A, PERES-NETO P R, OLDEN J D. What controls who is where in freshwater fish communities - the roles of biotic, abiotic, and spatial factors [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2001, 58(1): 157-170.
- [4] PEASE A A, TAYLOR J M, WINEMILLER K O, et al. Multiscale environmental influences on fish assemblage structure in central Texas streams [J]. Transactions of the American Fisheries Society, 2011, 140(5): 1409-1427.
- [5] 郑葆珊, 范勤德, 戴定远. 白洋淀鱼类 [M]. 石家庄: 河北人民出版社, 1960.
ZHENG B S, FAN Q D, DAI D Y. Fish of Baiyangdian lake [M]. Shijiazhuang: Hebei People's Publishing House, 1960.
- [6] 王玉蛟, 李桃. 浅析白洋淀生态意义及环境保护与治理 [J]. 河北地质, 2017(2): 31-33.
WANG Y J, LI T. Analysis of Baiyangdian ecological significance, environmental protection and governance [J]. Hebei Geology, 2017(2): 31-33.
- [7] 王所安, 顾景龄. 白洋淀环境变化对鱼类组成和生态的影响 [J]. 动物学杂志, 1981(4): 8-11.
WANG S A, GU J L. Effects of environmental changes on fish composition and ecology in Baiyangdian Lake [J]. Chinese Journal of Zoology, 1981(4): 8-11.
- [8] 曹玉萍. 白洋淀重新蓄水后鱼类资源状况初报 [J]. 淡水渔业, 1991(5): 20-22.
CAO Y P. Preliminary report on fish resources after re-impoundment of Baiyangdian Lake [J]. Freshwater Fisheries, 1991(5): 20-22.
- [9] 韩希福, 王所安, 曹玉萍, 等. 白洋淀重新蓄水后鱼类组成的生态学分析 [J]. 河北渔业, 1991(6): 8-11.
HAN X F, WANG S A, CAO Y P, et al. Ecological analysis of fish composition after re-impounding in Baiyangdian Lake [J]. Hebei Fisheries, 1991(6): 8-11.
- [10] 曹玉萍, 王伟, 张永兵. 白洋淀鱼类组成现状 [J]. 动物学杂志, 2003, 38(3): 65-69.
CAO Y P, WANG W, ZHANG Y B. Present situation of fish stocks in Baiyangdian lake [J]. Chinese Journal of Zoology, 2003, 38(3): 65-69.
- [11] 赵春龙, 肖国华, 罗念涛, 等. 白洋淀鱼类组成现状分析 [J]. 河北渔业, 2007(11): 49-50.
ZHAO C L, XIAO G H, LUO N T, et al. Analysis on current fish composition in Baiyangdian Lake [J]. Hebei Fisheries, 2007(11): 49-50.
- [12] 谢松, 贺华东. “引黄济淀”后河北白洋淀鱼类资源组成现状分析 [J]. 科技信息, 2010(9): 17, 75.
XIE S, HE H D. Present condition analysis of Hebei Baiyangdian lake fish stocks after diversion from Yellow River to the lake [J]. Science & Technology Information, 2010(9): 17, 75.
- [13] 闫丽, 邓鹏春, 慕建东, 等. 白洋淀衡水湖鱼类多样性区系比较研究 [J]. 水产研究, 2021, 8(2): 53-60.
YAN L, DENG P C, MU J D, et al. Comparative study on fish diversity fauna in Hengshui Lake of Baiyangdian Lake [J]. Open Journal of Fisheries Research, 2021, 8(2): 53-60.
- [14] 王所安, 王志敏, 李国良, 等. 河北动物志: 鱼类 [M]. 石家庄: 河北科学技术出版社, 2001.
WANG S A, WANG Z M, LI G L, et al. The fauna of Hebei, China: Pisces [M]. Shijiazhuang: Hebei Science & Technology Press, 2001.
- [15] 朱松泉. 中国淡水鱼类检索 [M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1995.
ZHU S Q. The synopsis of freshwater fishes of China [M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Publishing House, 1995.
- [16] 陈咏霞, 管敏. 河北省淡水虾虎鱼类形态特征和分类地位的研究 [J]. 凯里学院学报, 2011, 29(6): 60-64.
CHEN Y X, GUAN M. Study on morphological character and taxonomic status of the freshwater Gobioides fishes of Hebei Province, China [J]. Journal of Kaili University, 2011, 29(6): 60-64.
- [17] 陈宜瑜. 中国动物志 硬骨鱼纲 鲤形目 (中卷) [M]. 北京: 科学出版社, 1998.
CHEN Y Y. Fauna sinica: Osteichthyes: Cypriniformes

- (volume II) [M]. Beijing: Science Press, 1998.
- [18] 乐佩琦. 中国动物志: 硬骨鱼纲 鲤形目(下卷) [M]. 北京: 科学出版社, 2000.
YUE P Q. Fauna sinica: Osteichthyes: Cypriniformes (volume III) [M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [19] MARGALEF R. Information theory in ecology [J]. *General Systems*, 1957, 3(1): 36-71.
- [20] SHANNON C E. A mathematical theory of communication [J]. *The Bell System Technical Journal*, 1948, 27(3): 379-423.
- [21] PIELOU E C. The measurement of diversity in different types of biological collections [J]. *Journal of Theoretical Biology*, 1966, 13: 131-144.
- [22] PINKAS L, OLIPHANT M S, IVERSON I L K. Food habits of albacore, Bluefin tuna, and bonito in California waters [R]. Long Beach: Department of Fish and Game, 1971: 1-105.
- [23] YEMANE D, FIELD J G, LESLIE R W. Exploring the effects of fishing on fish assemblages using Abundance Biomass Comparison (ABC) curves [J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2005, 62(3): 374-379.
- [24] 张东, 宛凤英, 储玲, 等. 青弋江鱼类分类群和功能群的 α 和 β 多样性纵向梯度格局 [J]. *生物多样性*, 2018, 26(1): 1-13.
ZHANG D, WAN F Y, CHU L, et al. Longitudinal patterns in α and β diversity of the taxonomic and functional organizations of stream fish assemblages in the Qingyi River [J]. *Biodiversity Science*, 2018, 26(1): 1-13.
- [25] CLARKE K R, WARWICK R M. Change in marine communities: an approach to statistical analysis and interpretation [M]. Plymouth: PRIMER-E Laboratory, 1994.
- [26] CLARKE K R. Non-parametric multivariate analyses of changes in community structure [J]. *Austral Ecology*, 1993, 18(1): 117-143.
- [27] 刘燕山, 谷先坤, 唐晟凯, 等. 东太湖鱼类群落结构特征及其与环境因子的关系 [J]. *生态学报*, 2021, 41(2): 769-780.
LIU Y S, GU X K, TANG S K, et al. Fish community structure and its relationship with main environmental variables in the East Taihu Lake [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(2): 769-780.
- [28] 李思忠. 中国淡水鱼类的分布区划 [M]. 北京: 科学出版社, 1981.
LI S Z. Distribution division of freshwater fishes in China [M]. Beijing: Science Press, 1981.
- [29] 常利伟. 白洋淀湖群的演变研究 [D]. 长春: 东北师范大学, 2014.
CHANG L W. The evolution of Baiyangdian Lake group research [D]. Changchun: Northeast Normal University, 2014.
- [30] 刘鹏飞, 张婉平, 徐东坡, 等. 钱塘江西湖段鱼类群落结构特征 [J]. *上海海洋大学学报*, 2021, 30(3): 525-535.
LIU P F, ZHANG W P, XU D P, et al. Current situation of fish community structure in West Lake section of Qiantang River [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2021, 30(3): 525-535.
- [31] 张春光, 赵亚辉. 北京及其邻近地区的鱼类: 物种多样性、资源评价和原色图谱 [M]. 北京: 科学出版社, 2013.
ZHANG C G, ZHAO Y H. Fishes in Beijing and adjacent areas, China [M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [32] 韩占江. 加大增殖放流力度推动白洋淀渔业可持续发展 [J]. *河北渔业*, 2008(10): 48, 50.
HAN Z J. Improve sustainable development of fisheries in Baiyangdian Lake by strengthen artificial releasing [J]. *Hebei Fisheries*, 2008(10): 48, 50.
- [33] 韩婵, 高春霞, 田思泉, 等. 淀山湖鱼类群落结构多样性的年际变化 [J]. *上海海洋大学学报*, 2014, 23(3): 403-410.
HAN C, GAO C X, TIAN S Q, et al. Analysis of annual variations for fish community structure in Dianshan Lake [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2014, 23(3): 403-410.
- [34] 徐东坡, 凡迎春, 周彦锋, 等. 太湖鲢鳙亚科鱼类群落结构及其时空变动 [J]. *上海海洋大学学报*, 2018, 27(1): 115-125.
XU D P, FAN Y C, ZHOU Y F, et al. Spatial and temporal variations of Acheilognathinae in Lake Taihu [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2018, 27(1): 115-125.
- [35] 田佳丽, 王银平, 李佩杰, 等. 长江近口段近岸段鱼类群落多样性现状 [J]. *上海海洋大学学报*, 2021, 30(2): 320-330.
TIAN J L, WANG Y P, LI P J, et al. Species diversity of fish in the section near the Yangtze River estuary [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2021, 30(2): 320-330.
- [36] 徐开达, 张洪亮, 谢汉阳, 等. 中街山列岛水域甲壳类资源及其群落多样性 [J]. *海洋渔业*, 2012, 34(3): 308-315.
XU K D, ZHANG H L, XIE H Y, et al. Resource density and community diversity of crustaceans in the waters of Zhongjieshan Islands [J]. *Marine Fisheries*, 2012, 34(3): 308-315.
- [37] 张静, 陈永俊, 张然, 等. 2008 年夏季东山湾游泳动物种类的组成和多样性 [J]. *应用海洋学学报*, 2013, 32(2): 222-230.
ZHANG J, CHEN Y J, ZHANG R, et al. Nekton species composition and biodiversity in Dongshan Bay during 2008 Summer [J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2013, 32(2): 222-230.
- [38] 商书芹, 王帅帅, 殷旭旺. 济南市黄河流域鱼类群落结构及多样性研究 [C] // 2020(第八届) 中国水生态大会论文集. 郑州: 北京沃特咨询有限公司, 2020: 1-16.
SHANG S Q, WANG S S, YIN X W. Study on fish community structure and species diversity in Yellow River Basin of Jinan [C] // 2020 (8th) China Water Ecology

- Conference. Zhengzhou: Beijing Water Consulting Co., Ltd., 2020: 1-16.
- [39] 隋晓云. 中国淡水鱼类的分布格局研究[D]. 北京: 中国科学院水生生物研究所, 2010.
- SUI X Y. Studying on the distribution pattern of Chinese freshwater fishes [D]. Beijing: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [40] KEAST A. Trophic and spatial interrelationships in the fish species of an Ontario temperate lake [J]. *Environmental Biology of Fishes*, 1978, 3(1): 7-31.
- [41] XIE S G, CUI Y B, LI Z J. Small fish communities in two regions of the Liangzi Lake, China, with or without submersed macrophytes[J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 2010, 17(2): 89-92.
- [42] YE S W, LI Z J, LEK-ANG S, et al. Community structure of small fishes in a shallow macrophytic lake (Niushan Lake) along the middle reach of the Yangtze River, China [J]. *Aquatic Living Resources*, 2006, 19(4): 349-359.
- [43] 程琳. 长江流域湖泊鱼类群落与主要环境因子关系及其预测模型 [D]. 北京: 中国科学院水生生物研究所, 2011.
- CHENG L. Studying on the distribution pattern of Chinese freshwater fishes [D]. Beijing: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, 2011.
- [44] 李经纬, 徐东坡, 李巍, 等. 涌湖鱼类群落时空分布及其与环境因子的关系[J]. *水产学报*, 2022, 46(4): 546-556.
- LI J W, XU D P, LI W, et al. Spatial and temporal distribution of fish assemblages and its relationship with environmental factors in Lake Gehu [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2022, 46(4): 546-556.
- [45] 胡翠林, 张洪亮, 张亚洲, 等. 带鱼保护区春秋鱼类群落特征及与环境因子的关系 [J]. *水产学报*, 2018, 42(5): 694-703.
- HU C L, ZHANG H L, ZHANG Y Z, et al. Fish community structure and its relationship with environmental factors in the Nature Reserve of *Trichiurus japonicus* [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2018, 42(5): 694-703.
- [46] 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.

Fish community structure and its relationship with environmental factors in Baiyangdian Lake

WANG Yinxiao, YANG Huilan, TAN Huimin, WANG Min, MU Shumei, KANG Xianjiang, CHEN Yongxia
(*Institute of Life Science and Green Development, Hebei University, Baoding 072000, Hebei, China*)

Abstract: In order to understand the fish community structure in Baiyangdian Lake and its relationship with the environmental factors. 30 sampling stations in Baiyangdian Lake were surveyed in May, August and October, 2019 and August and October, 2020. A total of 30 species of fish were collected, belonging to 12 families and 4 orders, among which Cypriniformes had the most, accounting for 56.67%, and 9 species had Index of relative importance $IRI \geq 500$. *Carassius auratus*, *Pseudorasbora parva*, and *Chanodichthys erythropterus* were the dominant species. One-way analysis of variance (ANOVA) showed that the number of individuals, species, Margalef richness index (D), Shannon-Wiener diversity index (H') and Pielou evenness index (J') were significantly different in different months ($P < 0.05$), and except for Pielou evenness index (J'), the other indexes were all the highest in May 2019 based on the SNK-q multiple comparison test. Non-metric multidimensional scaling (NMS) and one-way analysis of similarity (ANOSIM) showed that the composition of fish community overlapped and separated in different seasons (Global $R = 0.524$). Abundance biomass comparison curve (ABC) showed that the fish community in May, August and October 2019 was slightly disturbed, and the fish community in August and October 2020 was moderately disturbed. Redundancy analysis (RDA) showed that water temperature, DO and chlorophyll a were the main environmental factors affecting the fish community in Baiyangdian Lake.

Key words: Baiyangdian Lake; fish community structure; species diversity; environmental factor

附表 白洋淀鱼类资源历史变化
Appendix Historical changes of fish resources in Baiyangdian Lake

| 种名 Species | 调查时间 Survey time | | | | | | |
|---|----------------------|------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|---------------|-------------------------------|
| | —1958 ^[5] | 1975— 1976 ^[7] | 1989— 1990 ^[8-9] | 2001— 2002 ^[10] | 2007— 2009 ^[11-12] | 2018— 2020 | 2019— 2020 ^[13] |
| 鳗鲡目 Anguilliformes | | | | | | | |
| 鳗鲡科 Anguillidae | | | | | | | |
| 日本鳗鲡 <i>Anguilla japonica</i> | + | | | | | | |
| 鲈形目 Perciformes | | | | | | | |
| 鳊科 Engraulidae | | | | | | | |
| 刀鲚 <i>Coilia nasus</i> | + | | | | | | |
| 鲤形目 Cypriniformes | | | | | | | |
| 鲤科 Cyprinidae | | | | | | | |
| 马口鱼 <i>Opsariichthys bidens</i> | + | | | | + | | + |
| 尖头大吻鲈 <i>Rhynchocypris oxycephalus</i> | + | | | | | | |
| 青鱼 <i>Mylopharyngodon piceus</i> | + | | | | | | + |
| 草鱼 <i>Ctenopharyngodon idella</i> * | + | + | + | + | + | + | + |
| 赤眼鲮 <i>Squaliobarbus curriculus</i> | + | | | | | | |
| 鳊 <i>Ochetobius elongatus</i> | + | | | | | | |
| 鳊 <i>Elopichthys bambusa</i> | + | | | | | | + |
| 似鲮 <i>Toxabramis swinhonis</i> | + | | | | | + | + |
| 鲮 <i>Hemiculter leucisculus</i> | + | + | + | + | + | + | + |
| 贝氏鲮 <i>Hemiculter bleekeri</i> | + | + | + | + | | | + |
| 翘嘴鲮 <i>Culter alburnus</i> | + | + | + | + | + | | |
| 红鳍鲮 <i>Chanodichthys erythropterus</i> | + | | | | | + | |
| 鳊 <i>Parabramis pekinensis</i> | + | + | + | | | + | |
| 团头鲂 <i>Megalobrama amblycephala</i> * | | | | | + | + | + |
| 鲂 <i>Megalobrama skolkovii</i> * | | | + | + | + | | |
| 三角鲂 <i>Megalobrama terminalis</i> | | | | | | | + |
| 银鲌 <i>Xenocypris macrolepis</i> | + | | | | | | + |
| 刺鲃 <i>Pseudobrama simoni</i> | + | | | | | | |
| 鲃 <i>Hypophthalmichthys nobilis</i> * | + | + | + | + | + | + | + |
| 鲃 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i> * | + | + | + | + | + | + | + |
| 花鲢 <i>Hemibarbus maculatus</i> | + | + | + | | | | |
| 麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i> | + | + | + | + | + | + | + |
| 寡鳞银鲌 <i>Pseudolaubuca sinensis</i> | | | | | | | + |
| 华鲮 <i>Sarcocheilichthys sinensis</i> | + | | | | | | |
| 银鮠 <i>Squalidus argentatus</i> | | | | | | | + |
| 点纹银鮠 <i>Squalidus wolterstorffi</i> | + | | | | | | + |
| 长须铜鱼 <i>Coreius heterodon</i> | + | | | | | | |
| 棒花鱼 <i>Abbottina rivularis</i> | + | + | + | + | + | + | + |
| 蛇鮠 <i>Saurogobio dabryi</i> | + | | | + | | | |
| 黑鳍鲮 <i>Sarcochilichthys nigripinnis</i> | + | + | + | + | | + | + |
| 中华鲮 <i>Rhodeus sinensis</i> | + | + | + | + | + | + | + |
| 彩石鲮 <i>Rhodeus lighti</i> | + | + | | | | | |
| 高体鲮 <i>Rhodeus ocellatus</i> | | | | | + | + | + |
| 越南鲮 <i>Acheilognathus tonkinensis</i> | | | + | | | | |
| 彩副鲮 <i>Acheilognathus imberbis</i> | + | | | | | | |
| 大鳍鲮 <i>Acheilognathus macropterus</i> | + | | | | | | + |
| 兴凯鲮 <i>Acheilognathus chankaensis</i> | + | + | + | + | + | + | + |
| 短须鲮 <i>Acheilognathus barbatus</i> | + | | | | | | |
| 白河鲮 <i>Acheilognathus peihoensis</i> | | | | | | + | |
| 鲤 <i>Cyprinus carpio</i> | + | + | + | + | + | + | + |
| 鲫 <i>Carassius auratus</i> | + | + | + | + | + | + | + |
| 鲃科 Cobitidae | | | | | | | |
| 花斑鲃 <i>Cobitis melanoleuca</i> | + | + | | + | | | |
| 泥鳅 <i>Misgurnus anguillicaudatus</i> | + | + | + | + | + | + | + |
| 大鳞副泥鳅 <i>Misgurnus miszolepis</i> | + | + | + | + | + | + | + |
| 花斑副沙鳅 <i>Parabotia fasciata</i> | + | | | | | | |
| 脂鲤目 Characiformes | | | | | | | |
| 脂鲤科 Characidae | | | | | | | |
| 短盖巨脂鲤 <i>Piaractus brachypomus</i> * | | | + | | | | |

· 续附表 ·

| 种名 Species | 调查时间 Survey time | | | | | | |
|---|----------------------|------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|---------------|-------------------------------|
| | —1958 ^[5] | 1975— 1976 ^[7] | 1989— 1990 ^[8-9] | 2001— 2002 ^[10] | 2007— 2009 ^[11-12] | 2018— 2020 | 2019— 2020 ^[13] |
| 鲇形目 Siluriformes | | | | | | | |
| 鲿科 Bagridae | | | | | | | |
| 乌苏里黄颡 <i>Pelteobagrus ussuriensis</i> | + | | + | | | | |
| 黄颡鱼 <i>Tachysurus fulvidraco</i> | + | + | + | + | + | + | + |
| 瓦氏黄颡鱼 <i>Pseudobagrus vachellii</i> | + | | + | | | | + |
| 鲇科 Siluridae | | | | | | | |
| 鲇 <i>Silurus asotus</i> | + | + | + | + | + | + | + |
| 胡瓜鱼目 Osmeriformes | | | | | | | |
| 银鱼科 Salangidae | | | | | | | |
| 安氏新银鱼 <i>Neosalanx anderssoni</i> | | + | | | | | |
| 大银鱼 <i>Protosalanx hyalocranius</i> | | | | | | | + |
| 寡齿新银鱼 <i>Neosalanx oligodontis</i> | + | | | | | | |
| 鲮形目 Mugiliformes | | | | | | | |
| 鲮科 Mugilidae | | | | | | | |
| 龟鲚 <i>Chelon haematocheilus</i> | + | | | | | | |
| 颌针鱼目 Beloniformes | | | | | | | |
| 鱊科 Hemiramphidae | | | | | | | |
| 细鳞下鱊 <i>Hyporhamphus sajori</i> | + | | | | | | |
| 大颌鱊科 Adrianichthyidae | | | | | | | |
| 青鲮 <i>Oryzias latipes</i> | + | + | + | + | + | | + |
| 合鳃鱼目 Synbranchiformes | | | | | | | |
| 合鳃鱼科 Synbranchidae | | | | | | | |
| 黄鳝 <i>Monopterus albus</i> | + | + | + | + | + | + | + |
| 刺鳅科 Mastacembelidae | | | | | | | |
| 刺鳅 <i>Mastacembelus aculeatus</i> | + | + | + | + | + | + | + |
| 鲈形目 Tetraodontiformes | | | | | | | |
| 鲈科 Tetraodontidae | | | | | | | |
| 暗色多纪鲈 <i>Takifugu obscurus</i> | + | | | | | | |
| 鲈形目 Perciformes | | | | | | | |
| 鲈科 Percichthyidae | | | | | | | |
| 鳊 <i>Siniperca chuatsi</i> * | + | + | + | | | + | + |
| 梭鱼 <i>Sphyraenus</i> | | | | | | | + |
| 斗鱼科 Osphronemidae | | | | | | | |
| 圆尾斗鱼 <i>Macropodus ocellatus</i> | + | + | + | + | + | + | + |
| 沙塘鳢科 Odontobutidae | | | | | | | |
| 小黄鲮鱼 <i>Micropercops swinhonis</i> | + | + | + | + | + | + | + |
| 虾虎鱼科 Gobiidae | | | | | | | |
| 波氏吻虾虎鱼 <i>Rhinogobius cliffordpopei</i> | | | | | | + | + |
| 福岛吻虾虎鱼 <i>Rhinogobius fukushimai</i> | | | | | | + | + |
| 子陵吻虾虎鱼 <i>Rhinogobius giurinus</i> | + | + | + | + | + | + | + |
| 林氏吻虾虎鱼 <i>Rhinogobius lindbergi</i> | | | | | | + | + |
| 鱧科 Channidae | | | | | | | |
| 乌鱧 <i>Channa argus</i> | + | + | + | + | + | + | + |
| 慈鲷科 Cichlidae | | | | | | | |
| 奥利亚罗非鲫 <i>Oreochromis aureus</i> * | | | | + | | + | |

注：“*”为人工养殖或外来物种。

Notes：“*” means artificial culture or alien species.