

## 基于水声学探测的镜泊湖鱼类时空分布特征及资源量评估\*

宋 聘<sup>1,2</sup>, 都 雪<sup>1,2</sup>, 金 星<sup>1,2</sup>, 刘 辉<sup>1,2</sup>, 明 坤<sup>3</sup>, 王 乐<sup>1,2</sup>, 王 慧博<sup>1,2</sup>, 赵 晨<sup>1,2</sup>, 霍堂斌<sup>1,2\*\*</sup>

(1: 中国水产科学研究院黑龙江水产研究所, 寒地水域水生生物保护与生态修复重点实验室, 哈尔滨 150010)

(2: 农业农村部黑龙江流域渔业生态环境监测中心, 哈尔滨 150010)

(3: 第四储备资产管理局, 哈尔滨 150030)

**摘 要:** 2020年5、7和10月, 采用多网目复合刺网调查和水声学探测相结合的方式对镜泊湖鱼类群落时空动态和资源量进行调查。渔获物调查共采集鱼类4目6科29种, 其中鲤科鱼类最多, 主要经济鱼类为鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)、鳊(*Aristichthys nobilis*)、蒙古鲌(*Chanodichthys mongolicus*)、瓦氏雅罗鱼(*Leuciscus waleckii*)、鲤(*Cyprinus carpio*)、翘嘴鲌(*Culter alburnus*)。蒙古鲌和鳊(*Hemiculter leucisculus*)为优势种。水声学探测结果表明, 镜泊湖鱼类密度在春季、夏季和秋季分别为836、7216和2724 ind./hm<sup>2</sup>, 其中夏季鱼类密度最高且主要集中于中部和南部区域, 春季和秋季鱼类密度则呈现从南至北递减的趋势。春、夏、秋季鱼类的平均目标强度为-43.4、-50.0和-46.5 dB, 估算的平均全长分别为34.0、18.0和25.2 cm, 推算的平均体重分别为272.7、43.7和135.2 g。结合各季节平均密度, 估算出春、夏、秋季镜泊湖鱼类资源量分别为2052、2835和3313 t。镜泊湖鱼类密度与环境因子之间的冗余分析结果表明, 水体总悬浮物、叶绿素a、水温和溶解氧是影响鱼类群落结构变化的关键环境因子。从水声学探测和刺网调查的结果来看, 镜泊湖渔获物小型化问题突出, 鱼类资源呈现衰退趋势, 渔业资源的不合理利用是造成镜泊湖鱼类资源衰退的主要因素。因此建议强化对自然捕捞的管理, 严格控制捕捞数量和规格, 保障鱼类资源自然增殖, 结合牡丹江流域污染防治、改善鱼类栖息地环境等鱼类生境修复措施, 以促进鱼类资源的恢复。

**关键词:** 镜泊湖; 渔业水声学; 时空分布; 鱼类资源量评估; 群落结构

## The characteristics of spatial-temporal distributions of fish resources in Lake Jingpo based on hydroacoustic assessment\*

Song Dan<sup>1,2</sup>, Du Xue<sup>1,2</sup>, Jin Xing<sup>1,2</sup>, Liu Hui<sup>1,2</sup>, Ming Kun<sup>3</sup>, Wang Le<sup>1,2</sup>, Wang Huibo<sup>1,2</sup>, Zhao Chen<sup>1,2</sup> & Huo Tangbin<sup>1,2\*\*</sup>

(1: Key Laboratory of Aquatic Organism Protection and Ecological Restoration in Cold Waters, Heilongjiang River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Harbin 150010, P.R.China)

(2: Heilongjiang River Basin Fishery Ecological Environment Monitoring Center, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Harbin 150010, P.R.China)

(3: The Fourth Reserve Assets Authority, Harbin 150030, P.R.China)

**Abstract:** In May, July and October 2020, a combination of multi-mesh gillnet and hydroacoustic survey was undertaken to investigate the characteristics of spatial-temporal distributions of fish resources of Lake Jingpo. A total of 29 fish species, belonging to four orders and six families, were collected during the survey. The main economic fish are *Hypophthalmichthys molitrix*, *Aristichthys nobilis*, *Chanodichthys mongolicus*, *Leuciscus waleckii*, *Cyprinus carpio*, and *Culter alburnus*. The dominant species are *Chanodichthys mongolicus* and *Hemiculter leucisculus*. The average fish density was 836 ind./hm<sup>2</sup> in spring, 7216 ind./hm<sup>2</sup> in summer and

\* 2022-03-18 收稿; 2022-05-12 收修改稿。

国家重点研发计划项目(2019YFD0900602)、国家自然科学基金项目(31802298)和农业财政专项(东北地区重点水域渔业资源与环境调查)项目联合资助。

\*\* 通信作者; E-mail: huotangbin@hrfri.ac.cn.

2724 ind./hm<sup>2</sup> in autumn. In summer, fish mainly inhabited in the central and southern regions. In spring and autumn, the species density showed a decreasing trend from the south to the north. The average target strengths were -43.4, -50.0 and -46.5 dB in spring, summer and autumn, the estimated average total lengths 34.0, 18.0 and 25.2 cm, and the estimated average weights 272.7, 43.7 and 135.2 g, respectively. The estimated average density of fish resources in Lake Jingpo was 2052, 2835 and 3313 t in spring, summer and autumn, respectively. The results of redundancy analysis between the fish density and environmental factors in Lake Jingpo showed that the total suspended solids, chlorophyll-*a*, water temperature and dissolved oxygen were the key environmental factors affecting the changes of fish community structure. According to the results of hydroacoustic and gillnet survey, the problem of miniaturization of catches in Lake Jingpo is prominent, and the fish resources are declining. Irrational utilization is the main factor resulting in the decline of fishery resources in Lake Jingpo. We recommend the relevant authorities strengthen the management of natural fishing strictly control the number and size of fishing, ensure the natural proliferation of fish resources, and integrate the pollution control of the Mudanjiang River Basin and the improvement of fish habitat environment and other fish habitat restoration measures, in order to promote the recovery of fishery resources.

**Keywords:** Lake Jingpo; fisheries acoustics; spatial-temporal distribution; assessment of fish resources; community structure

镜泊湖是由第四纪火山喷发玄武岩浆流阻塞牡丹江河床而形成的中国最大的高山堰塞湖,在出湖口处的玄武岩堰塞台地上加筑堤坝,形成以发电为主,兼有灌溉、城市供水、旅游等综合效益的大型水库。镜泊湖南端与牡丹江上游及多条支流连接,充足的水资源和优越的自然环境孕育了湖内丰富的淡水鱼类资源,鱼类区系与牡丹江相似。据记载,镜泊湖分布有鱼类 12 科 52 种,以鲤科鱼类为主,共计 37 种(亚种)<sup>[1]</sup>。镜泊湖是牡丹江中游重要经济鱼类的种质资源库,主要经济鱼类有蒙古鲌(*Chanodichthys mongolicus*)、鳊(*Siniperca chuatsi*)、银鲫(*Carassius auratus gibelio*)、鲤(*Cyprinus carpio*)等。近年来,受生境破坏、鱼类引种、过度捕捞、流域内土地利用变化、江湖阻隔、工农业污染等因素影响<sup>[2-3]</sup>,镜泊湖捕捞渔获量逐年下降,渔获物趋于低龄化、小型化,渔获物以湖泊定居性鱼类为主,哲罗鲑(*Hucho taimen*)、江鲢(*Lota lota*)等溯河产卵的鱼类非常少见<sup>[2,4]</sup>。因此在镜泊湖开展鱼类资源监测,评估鱼类群落的时空分布特征,研究鱼类群落结构现状及影响因素,是镜泊湖鱼类资源保护及渔业资源合理利用的科学基础。

在内陆湖泊和水库中,刺网、拖网和张网等网具捕捞以及水声学探测均是渔业资源调查与评估的常用方法<sup>[5]</sup>。传统的网具捕捞在确定物种组成、丰度和生物学特征等方面具有优势,但其效率随空间范围、生境复杂性和鱼类种类而变化,同时对调查对象造成损伤、导致捕获的鱼类死亡率升高<sup>[6]</sup>。相比于传统方法,水声学方法具有速度快、调查区域广、不破坏鱼类资源、定位鱼类空间分布和准确估算鱼类密度等诸多优点,然而却无法直接获得鱼类样本和不易识别种类<sup>[7-8]</sup>。由于传统方法和水声学探测在鱼类资源调查研究中各有其优势及局限性,因此可以采用传统网具调查与水声学探测相结合的方式研究鱼类群落的种群结构、大小组成和分布特征的时空格局。

目前,关于镜泊湖鱼类资源的研究主要针对鱼类种类组成及生物学特征等方面<sup>[4,9-10]</sup>,尚缺少对鱼类密度、资源量及其时空分布等更为深入的研究。在此背景下,本研究以镜泊湖作为调查区域,采用多网目复合刺网调查和水声学探测相结合的方式对鱼类资源进行调查,评估镜泊湖鱼类群落结构的时空分布特征,估算鱼类密度与资源量,分析鱼类群落时空分布与环境因子之间的关系,以为镜泊湖鱼类资源保护及可持续利用、渔业管理提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域

镜泊湖(43°46'~44°18'N, 128°30'~129°30'E)位于中国黑龙江省牡丹江市宁安市境西南部的松花江支流牡丹江干流上,南北长约 45 km,东西宽 0.3~6 km,面积约 90.3 km<sup>2</sup>,湖泊南浅北深,平均深度 40 m,最深处 70 m。湖区春季多风少雨,夏季湿热多雨,冬季寒冷干燥。根据平均水深,将镜泊湖从南至北划分为南部、中部和北部 3 个区域(图 1),以便于整体分析镜泊湖鱼类资源的水平格局,从南至北 3 个区域的平均水深分别为 5.21、16.52 和 22.31 m。

### 1.2 渔获物调查

2020 年 5 月 15—20 日、7 月 25—30 日和 10 月 7—12 日采用多网目复合刺网(沉性和浮性)进行鱼类群

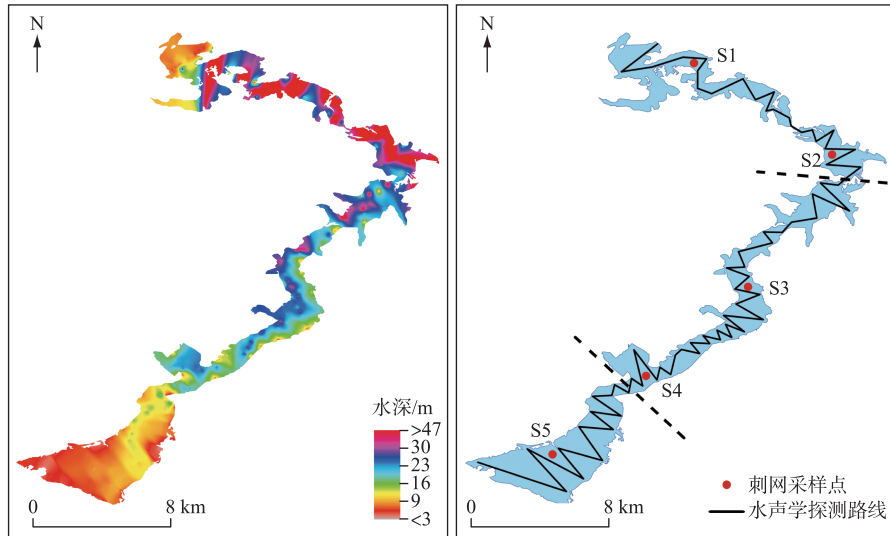


图 1 镜泊湖水底地形、水声学探测路线及刺网采样点

Fig.1 Bathymetric map and routes of hydroacoustics and sampling sites of gill nets in Lake Jingpo

落季节采样. 全湖共设置 5 个采样点(图 1). 采样时每个采样点均串联 3 条沉性多网目复合刺网和 3 条浮性多网目复合刺网,单片刺网长 30 m,高 5 m,由 12 种网目的网片拼接而成,每种网目长度为 2.5 m,网目分别为  $2a=8.5, 4.0, 12.5, 2.0, 11.0, 1.6, 2.5, 4.8, 3.1, 1.0, 7.5, 6.0$  cm. 采样时间为每天 18:00 至次日 6:00. 采集的所有鱼类进行种类鉴定、并测量其体长(精确度为 0.1 cm)、体重(精确度为 0.01 g)等指标. 种类鉴定参照《中国动物志》《黑龙江鱼类》和《黑龙江省鱼类志》<sup>[11-13]</sup>. 将鱼类捕获量换算成单位捕捞努力渔获量(CPUE,  $\text{kg}/(\text{d}\cdot\text{m}^2)$ ).

### 1.3 水声学探测方法

水声学探测时间分为 2020 年 5 月 17—19 日(春季)、7 月 26—28 日(夏季)和 10 月 9—11 日(秋季). 水声学探测设备为 BioSonics DT-X EXTREME 分裂波束回声测深仪,换能器频率为 200 kHz, -3 dB 波束角为  $6.8^\circ\times 6.8^\circ$ ,通过不锈钢制支臂固定在探测船只右舷,位于水面以下约 0.5 m 处,波束发射方向垂直向下. 探测前,水声系统已经按照生产商(BioSonics, Inc.)推荐的程序进行了校准. 声学探测时脉冲宽度设定为 0.4 ms,脉冲发射频率设定为 5 pings/s. Garmin GPS 17x HVS GPS 接收器用于确定地理坐标. 通过控制软件 Visual Acquisition Version 6.3(BioSonics Inc., Seattle, U.S.A.)将数据存储在 Panasonic CF-31 计算机上. 探测时沿着预设路线探测(图 1),采用“Z”字形航线,走航速度为 1.8 m/s. 根据 Aglen<sup>[14]</sup>的公式计算每个季节的走航覆盖率: $D=L/\sqrt{A}$ ,其中  $L$  是每次走航的总长度(km), $A$  是探测水域的面积( $\text{km}^2$ ). 3 个季节的走航长度分别约为 81、87 和 85 km,走航覆盖率为 8.31~8.89,符合 Aglen 关于水声学探测覆盖率大于 6 的建议.

### 1.4 环境因子分析

在放置多网目复合刺网的采样点,同时使用 YSI 水质分析仪测定水温(WT,  $^\circ\text{C}$ )、溶解氧(DO, mg/L)、pH. 采用塞氏透明度盘测量透明度(SD, cm). 使用手持测深仪测量水深(WD, m). 现场采集 1 L 水样立即带回实验室,按照标准方法<sup>[15]</sup>于 24 h 内测定总磷(TP, mg/L)、总氮(TN, mg/L)、氨氮( $\text{NH}_3\text{-N}$ , mg/L)、硝态氮( $\text{NO}_3\text{-N}$ , mg/L)、亚硝态氮( $\text{NO}_2\text{-N}$ , mg/L)、可溶性磷酸盐( $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ , mg/L)、高锰酸盐指数( $\text{COD}_{\text{Mn}}$ , mg/L)、总悬浮物(TSS, mg/L)和叶绿素  $a$ (Chl. $a$ ,  $\mu\text{g/L}$ ).

### 1.5 数据分析

使用 Echoview(ver. 11.0)软件处理水声学原始数据. 首先对回声映像进行水底自动识别,必要时进行仔细检查和手动校正,表层线以上和底线以下的区域被排除分析,同时剔除水体中明显的噪音信号. 依据回声

积分法估算鱼类密度, 鱼类目标强度 (Target Strength,  $TS$ , 单位 dB) 平均值通过单体回波检测 (single echo detection, SED) 获得, 采用分裂波束单体目标判别方法 2 进行单体回波检测. 声学数据处理相关参数如下:  $TS = -64$  dB; 脉冲宽度决定水平 = 6 dB; 最小标准脉宽 = 0.6; 最大标准脉宽 = 1.5; 最大波束补偿 (2 ways) = 6 dB; 短轴角度最大标准偏差 =  $0.6^\circ$ ; 长轴角度最大标准偏差 =  $0.6^\circ$ .

鱼类长度采用 Frouzova 等<sup>[16]</sup> 建立的目标强度 ( $TS$ , dB) 和全长 ( $TL$ , cm) 的换算公式得出:

$$TS = 23.97 \lg(10TL) - 103.9 \quad (1)$$

为了解不同季节镜泊湖鱼类的水平分布状况, 将水声学探测所得到的声学映像以 200 m 划分为一个单元, 单独计算各单元的鱼类密度, 各探测单元中心坐标数据导入 ArcGIS 10.7 平台, 基于克里金插值法绘制镜泊湖各季节鱼类密度水平分布图.

将多网目复合刺网调查的所有渔获物进行全长 ( $TL$ , cm) 和体重 ( $W$ , g) 的关系拟合, 根据各季节鱼探仪探测的平均全长估算求得其平均体重:

$$W = a \cdot TL^b \quad (2)$$

由各季节鱼类平均密度和平均体重计算得出镜泊湖的平均生物量, 结合探测区域面积估算得到镜泊湖各季节相应的鱼类资源量.

采用 R 语言<sup>[17]</sup> 环境中的 vegan 数据包中的冗余分析 (redundancy analysis, RDA) 分析水体理化因子对鱼类群落结构时空变化的影响. 建立鱼类密度与环境因子的数据矩阵, 鱼类密度来自于刺网定量数据, 环境数据包括水体各种理化指标. 鱼类密度数据使用 Hellinger 距离进行转化, 环境数据进行 log 转化. 使用 Monte Carlo 置换检验 (permutations = 9999) 检测环境变量与鱼类群落之间相关性的显著性, 应用向前选择法 (forward selection) 识别包含在 RDA 分析中的环境变量.

## 2 结果与分析

### 2.1 刺网渔获物组成及比例

2020 年镜泊湖多网目复合刺网采样共采集鱼类 29 种, 隶属 4 目 6 科 (表 1). 其中鲤科鱼类最多, 为 23 种, 占物种总数的 79.31%; 鲮科鱼类 2 种, 占物种总数的 6.90%; 其他各科鱼类均为 1 种. 镜泊湖的主要经济鱼类为鲢、鳙、蒙古鲌、瓦氏雅罗鱼、鲤、翘嘴鲌, 占刺网渔获数量和重量比例分别为 47.74% 和 72.40%. 蒙古鲌和鳊为优势种, 二者在刺网渔获物中的数量比例分别为 36.09% 和 31.77%, 重量比例分别为 19.91% 和 14.76%.

### 2.2 镜泊湖鱼类分布格局与季节变化

镜泊湖鱼类密度在季节上和空间上存在差异 (图 2), 2020 年春、夏、秋三季水声学探测鱼类平均密度分别为 836、7216 和 2724 ind./hm<sup>2</sup>. 从水平方向上看, 春季从南至北鱼类密度呈现递减的趋势, 即南部最高 (平均为 1385 ind./hm<sup>2</sup>), 中部次之 (平均为 1328 ind./hm<sup>2</sup>), 北部最低 (平均为 270 ind./hm<sup>2</sup>); 夏季鱼类主要集中于中部和南部区域, 鱼类平均密度分别为 9848 和 7562 ind./hm<sup>2</sup>, 北部的鱼类密度仅为 270 ind./hm<sup>2</sup>; 秋季鱼类密度又呈现与春季相同的趋势, 从南至北 3 个区域的平均密度分别为 2512、2409 和 1391 ind./hm<sup>2</sup>. 镜泊湖刺网采样点单位捕捞努力渔获量 ( $CPUE$ , kg/(d·m<sup>2</sup>)) 与水声学探测结果时空差异趋势一致 (图 3), 同一采样点  $CPUE$  秋季最高 (平均为 0.12 kg/(d·m<sup>2</sup>)), 春季最低 (平均为 0.02 kg/(d·m<sup>2</sup>)), 同一季节  $CPUE$  从南至北呈现递减的趋势.

水声学探测的鱼类目标强度 ( $TS$ ) 表示鱼类个体大小, 一般来讲, 鱼类个体越小对应的目标强度越小, 反之亦然. 2020 年 3 个季节水声学探测镜泊湖鱼类目标强度为  $-64 \text{ dB} \leq TS \leq -30 \text{ dB}$  (图 4). 春、夏、秋季鱼类的平均  $TS$  分别为  $-43.4$ 、 $-50.0$  和  $-46.5$  dB. 根据各季节平均  $TS$  和公式 (1) 得到 3 个季节鱼类平均体长分别为 34.0、18.0 和 25.2 cm. 3 个季节鱼类  $TS$  主要集中在  $-64 \sim -48$  dB 之间, 对应鱼类全长在 4.7~21.8 cm 之间, 表明镜泊湖鱼类以中小型鱼类为主, 中小型鱼类个体比例夏季最高, 其次为春季和秋季.

### 2.3 镜泊湖鱼类资源量

根据 3 个季节渔获物调查结果, 分别拟合得到 3 个季节鱼类的全长-体重关系式:

$$\text{春季 } W = 0.0098TL^{2.9023} \quad (3)$$

表 1 镜泊湖鱼类种类组成及相对丰度和相对生物量  
Tab.1 Fish species composition and relative abundance and relative biomass of Lake Jingpo

科/种	缩写	相对丰度/%			相对生物量/%		
		5月	7月	10月	5月	7月	10月
鲤科 Cyprinidae							
马口鱼 <i>Opsariichthys bidens</i>	bide	1.16	—	1.76	1.02	—	0.92
瓦氏雅罗鱼 <i>Leuciscus waleckii</i>	wale	9.98	0.22	2.94	16.16	0.32	5.22
蒙古鲌 <i>Chanodichthys mongolicus</i>	mong	20.65	64.68	22.94	19.44	24.00	16.30
翘嘴鲌 <i>Culter alburnus</i>	albu	2.09	3.09	1.76	4.30	2.34	4.08
鲮 <i>Hemiculter leucisculus</i>	leuc	22.51	16.33	56.47	13.54	5.75	24.99
贝氏鲮 <i>Hemiculter bleekeri</i>	blee	3.48	—	—	0.45	—	—
鲮 <i>Aristichthys nobilis</i>	nobi	—	0.66	1.76	—	8.68	35.77
鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	moli	2.78	8.39	0.59	14.20	48.24	9.11
大鳍鱮 <i>Acheilognathus macropterus</i>	macr	0.23	0.44	1.18	0.02	0.04	0.23
兴凯鱮 <i>Acheilognathus chankaensis</i>	chan	—	—	0.59	—	—	0.11
黑龙江鲮 <i>Rhodeus sericeus</i>	seri	2.32	—	—	0.88	—	—
棒花鱼 <i>Abbottina rivularis</i>	rivu	1.16	—	0.59	0.33	—	0.01
唇鲮 <i>Hemibarbus labeo</i>	labe	0.93	—	—	3.47	—	—
花鲮 <i>Hemibarbus maculatus</i>	macu	2.79	—	1.18	3.04	—	1.78
麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i>	parv	—	0.22	—	—	0.02	—
克氏鳊 <i>Sarcocheilichthys czerskii</i>	czer	4.87	—	—	1.81	—	—
东北鳊 <i>Sarcocheilichthys lacustris</i>	lacu	—	1.34	—	—	0.59	—
黑鳍鳊 <i>Sarcocheilichthys nigripinnis</i>	nigr	5.34	—	1.18	2.75	—	0.54
蛇鲇 <i>Saurogobio dabryi</i>	dabr	4.87	0.22	0.59	5.61	0.12	0.16
银鲇 <i>Squalidus argentatus</i>	arge	4.18	1.77	3.53	3.98	0.14	0.41
兴凯银鲇 <i>Squalidus chankaensis</i>	chan	6.73	1.1	2.35	0.81	0.04	0.17
银鲫 <i>Carassius auratus gibelio</i>	gibe	2.32	0.44	—	3.68	1.11	—
鲤 <i>Cyprinus carpio</i>	carp	0.46	0.22	—	1.25	7.79	—
鲈科 Cobitidae							
黑龙江泥鳅 <i>Misgurnus mohoity</i>	moho	—	0.22	—	—	0.03	—
鲇科 Siluridae							
鲇 <i>Silurus asotus</i>	asot	0.46	—	—	2.04	—	—
鲿科 Bagridae							
黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	fulv	—	0.11	0.3	—	0.02	0.20
光泽黄颡鱼 <i>Pelteobagrus nitidus</i>	niti	—	0.11	0.29	—	—	—
胡瓜鱼科 Osmeridae							
池沼公鱼 <i>Hypomesus olidus</i>	olid	0.23	—	—	0.05	—	—
鲈科 Serranidae							
鳊 <i>Siniperca chuatsi</i>	chua	0.46	0.44	—	1.17	0.77	—

$$\text{夏季 } W = 0.0036TL^{3.2534} \quad (4)$$

$$\text{秋季 } W = 0.0185TL^{2.7279} \quad (5)$$

根据各季节鱼类平均全长(春季 34.0 cm,夏季 18.0 cm,秋季 25.2 cm)和公式(3)、(4)或(5),推算出 3 个季节的鱼类平均体重分别为 272.7、43.7 和 135.2 g,结合各季节平均密度,估算出春、夏、秋季镜泊湖鱼类资源现存量分别为 2052、2835 和 3313 t.

#### 2.4 鱼类群落与环境因子的关系

RDA 分析结果显示镜泊湖鱼类群落的时空变化受环境因子的影响(图 5). 根据 Monte Carlo 检验,在  $P < 0.05$  水平下,对鱼类群落分布具有显著影响的环境因子为 TSS ( $r^2 = 0.45$ ,  $P = 0.029$ )、Chl.a ( $r^2 = 0.42$ ,  $P =$

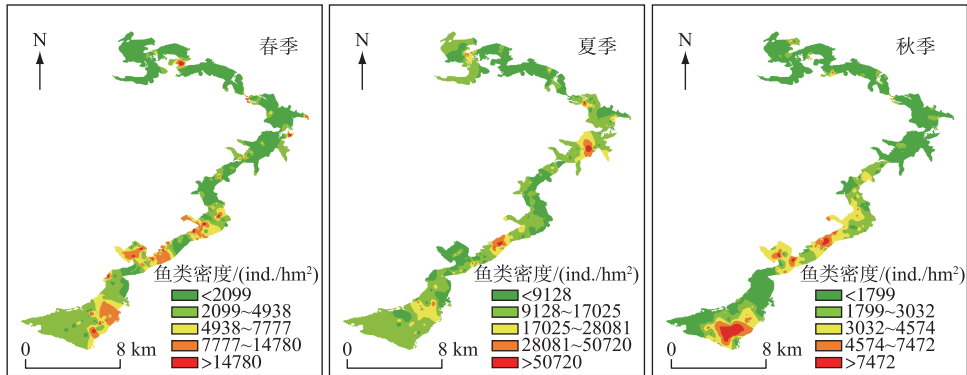


图2 镜泊湖鱼类密度水平分布及季节动态

Fig.2 Seasonal variations of fish horizontal distribution in Lake Jingpo

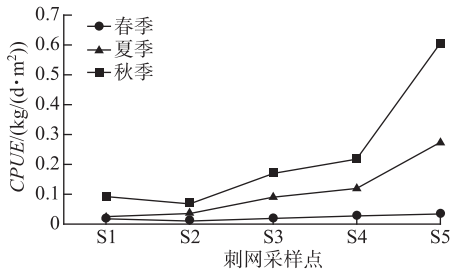


图3 镜泊湖不同刺网采样点鱼类单位捕捞努力渔获量季节差异

Fig.3 Seasonal variations of catch per unite effort (CPUE) of different gillnet sampling sites in Lake Jingpo

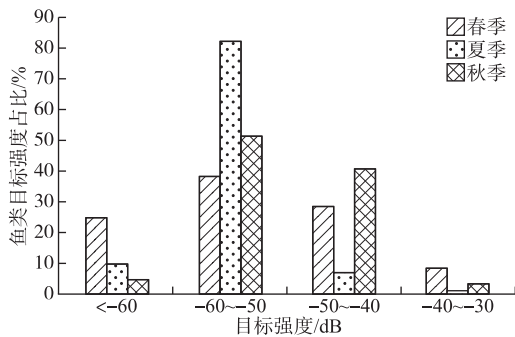


图4 镜泊湖不同季节鱼类目标强度分布

Fig.4 Distribution of target strength during different seasons in Lake Jingpo

0.036)、WT( $r^2=0.41$ ,  $P=0.045$ )和DO( $r^2=0.41$ ,  $P=0.046$ ). RDA第1排序轴( $P=0.006$ )和第2排序轴( $P=0.022$ )所代表的环境因子与物种之间具有显著相关性,前两轴分别解释了36.35%和22.68%的鱼类群落结构变异(表2).从RDA结果来看,WD和SD与第1排序轴呈负相关;WT、TSS和Chl.a与第2排序轴呈正相关,DO与第2排序轴呈负相关,表明第2排序轴主要体现了鱼类组成的季节变化和水质理化因子的关系.

### 3 讨论

镜泊湖是典型的河道堰塞湖,其水域涵盖了河流和湖泊的环境特征,形成多种不同的生境,适于多种生态类群鱼类的生存繁衍.本研究中的鱼类物种数(29种)相较于历史记载数量(53种)减少,并且种类组成也发生了改变.与之前相比,繁殖季节洄游至沿岸水草带、砾石或者牡丹江上游的鱼类种类数减少,如雷氏七鳃鳗(*Lampetra reissneri*)、细鳞鲑(*Brachymystax lenok*)、哲罗鲑、江鲑<sup>[1]</sup>等江湖洄游性鱼类均未采集到.牡丹江上游已开发的4座小型水电站<sup>[18]</sup>导致河流生境破碎化,生态环境和水文形势发生了巨大变化,这些变化势必会影响到鱼类的群落结构.建坝蓄水后,底质、流速、水温、水深等原有水域环境特征发生改变<sup>[19-20]</sup>,鱼类索饵和产卵的洄游通道受到阻隔,生态系统之间的物质交换和能量流动也被中断,栖息地和种群丧失导致食物网改变、生物多样性丧失、物种减少和灭绝<sup>[21-22]</sup>.蒙古鲌和鲈等为镜泊湖的主要优势种,能够形成一定产量的种类仅包括鲢、鳙、蒙古鲌、瓦氏雅罗鱼、鲤、翘嘴鲌6种,且以鲢、鳙和蒙古鲌的产量占绝对优势.镜泊湖历史上盛产包括细鳞鲑(*Xenocypris microlepis*)、银鲫、黑龙江茴鱼(*Thymallus arcticus grubei*)、细鳞鲑、哲罗鲑、江鲑、鳊等多种优质经

的鱼类.镜泊湖历史上盛产包括细鳞鲑(*Xenocypris microlepis*)、银鲫、黑龙江茴鱼(*Thymallus arcticus grubei*)、细鳞鲑、哲罗鲑、江鲑、鳊等多种优质经



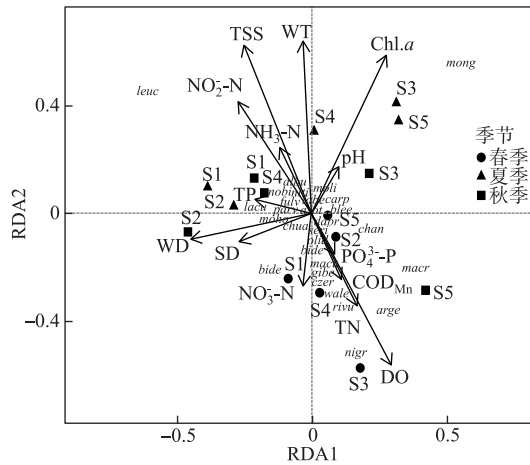


图5 镜泊湖鱼类群落与环境因子之间的冗余分析(鱼类物种缩写参见表1, S1~S5代表采样点)

Fig.5 Redundancy analysis between fish community and environmental variables in Lake Jingpo (Abbreviations for fish species see Tab.1, S1-S5 represented sampling sites)

表2 冗余分析前4轴汇总统计数据

Tab.2 Summary statistics for the first four axes of the redundancy analysis

	轴 1	轴 2	轴 3	轴 4
特征根	0.145	0.091	0.041	0.022
物种与环境因子相关性的累计百分比/%	36.35	59.03	69.3	74.81
Monte Carlo test	$F=5.88$ $P=0.006$	$F=3.25$ $P=0.022$	$F=1.80$ $P=0.39$	$F=0.87$ $P=0.85$

济鱼类<sup>[1]</sup>,现阶段哲罗鲑、江鳕几乎已经在镜泊湖水域消失,这些物种的消失与水域逐渐增大的捕捞压力和上游河流携带的农业退水及其农药残留等污染息息相关<sup>[4,23]</sup>。

水声学探测结果表明,镜泊湖鱼类密度存在时空差异.在时间上,夏季鱼类密度最高、春季最低.由于夏季水温升高,更适于鱼类的快速生长和繁殖.优势鱼类蒙古鲈、鲮每年6-7月进入产卵期开始大量繁殖<sup>[12-13]</sup>,加上镜泊湖渔场向湖区内人工增殖放流鲢、鳙、蒙古鲈等夏花鱼种,水体中的鱼类密度会大大增加.此外,镜泊湖每年5月中旬至7月末进入禁渔期,渔业活动减少,鱼类资源得到补充.秋季,随水温逐渐下降,鱼类的越冬行为增强,鱼类向下迁移至深水区的石堆、水下洞穴等水声学探测的盲区,不利于水声学探测<sup>[24]</sup>,因而鱼类密度逐渐降低.每年10月下旬至次年4月,镜泊湖进入冰封期,渔业生产以冬季冰下拉网为主,由于捕捞和自然死亡等原因,在鱼类越冬结束、且水温不高的春季,鱼类密度相对较低.在空间上,夏季鱼类主要集中于中部和南部区域,春季和秋季鱼类密度均呈现从南至北递减的趋势.镜泊湖鱼类呈现这种分布格局的主要原因是饵料资源,由于多条支流自南部汇入镜泊湖,河水夹带泥沙和有机物冲击,底质为泥沙和淤泥,生境异质性较高,有利于浮游动、植物的生长,为鱼类提供了丰富的饵料资源<sup>[25-27]</sup>,湖泊北部底质多为基岩,水较深,饵料资源相对贫乏.其次是捕食压力<sup>[24]</sup>,镜泊湖从南至北水深逐渐增加,追击型捕食者蒙古鲈、翘嘴鲈和伏击型捕食者鳊等多栖于此区域,小型鱼类面临更高的被捕食风险<sup>[28]</sup>.另外,湖泊北部建有镜泊湖国家级风景名胜,游船较多,鱼类可能会受到一定程度的干扰.

鱼类的群落组成与环境因子有密切关系<sup>[29-30]</sup>.RDA分析结果表明,镜泊湖鱼类受到总悬浮物、叶绿素a、水温、溶解氧等环境因子的影响.溶解氧是影响鱼类群落结构及丰度的重要环境因子,可以直接影响鱼类的摄食、生长、繁殖和分布等行为<sup>[31-32]</sup>.春季气温上升,冰雪逐渐融化,入湖河流和地表径流开始向湖内注入,携带入大量的氧气和有机质,导致水体溶解氧和氮、磷等营养物质浓度升高,银鲌、黑瞎鲮、棒花鱼等小

型鱼类丰度增加。夏季随水温升高,蒙古鲌、鲮等鱼类资源量增加,表明较高的温度有利于浮游植物和浮游动物的快速生长和繁殖<sup>[33]</sup>,为鱼类提供充足的饵料资源。鲢、鳊、鲤等经济鱼类由于其广适性,在镜泊湖各季节和不同采样点均匀分布。

运用水声学评估鱼类资源量时,鱼类目标强度  $TS$  是将声学数据转化为鱼类体长、体重的关键参数<sup>[16]</sup>。因此,选择合适的  $TS-TL$  理论关系式是提高水声学评估准确性的重要因素<sup>[34]</sup>。在渔获物调查中,蒙古鲌和鲮为镜泊湖的优势种,二者在刺网渔获物中总的数量比例分别为:春季 45.16%、夏季 81.0%、秋季为 79.4%;全长范围分别为:春季 9.8~35.7 cm、夏季 9.9~26.9 cm、秋季 9.4~27.6 cm;体重范围分别为:春季 5.2~330.0 g、夏季 6.5~134.5 g、秋季 7.9~146.4 g。2020 年镜泊湖 3 个季节鱼类  $TS$  主要集中在 -64~-48 dB 之间,该信号区间鱼类所占比例春季为 71.1%,夏季为 94.5%,秋季为 65.2%,根据公式  $TS=23.97 \lg(10TL)-103.9$ ,该目标强度范围内的鱼类全长在 4.7~21.8 cm 之间,表明水声学探测和刺网渔获物调查的结果较为一致。另外,鱼类  $TL-W$  之间的关系式也是鱼类资源量评估的重要参数。本研究中将 3 个季节的渔获物样本分别混合在一起拟合了不同季节鱼类  $TL-W$  关系式<sup>[35]</sup>,根据拟合关系式,3 个季节鱼类的体重范围分别为:春季 7.4~314.4 g、夏季 6.2~161.4 g、秋季 7.4~176.3 g,与渔获物调查结果也较为一致,表明利用水声学对镜泊湖鱼类资源量的评估具有较高的可靠性。

镜泊湖鱼类资源量从春季到秋季逐渐升高,一方面与鱼类的生长有关,另一方面也与鱼类的人工增殖放流有关。但从水声学探测和刺网调查的结果来看,镜泊湖渔获物小型化问题突出,渔业资源呈现衰退趋势<sup>[36]</sup>。主要表现为 2 个方面:一是小型蒙古鲌成为渔获物中的优势种类,蒙古鲌的渔获个体偏小且以 1~2 龄鱼为主,多为前一年或当年放流的群体,大部分未达到性成熟年龄,鱼类繁殖群体和补充群体比例较低;二是主要渔获对象的捕捞规格越来越小,蒙古鲌在镜泊湖当地主要采用干炸的烹饪方式,这种烹饪方式和消费习惯更倾向于选择个体较小且未达到性成熟的鱼类,所以小型蒙古鲌是镜泊湖主要的渔业捕捞对象,捕捞强度加大、网目缩小,导致个体较大、达到性成熟的蒙古鲌基本在渔获物中消失。捕捞群体中小个体增多,说明捕捞方式不合理。选择性捕捞目标种群,可以导致其生长速度、死亡率、繁殖力和补充量发生改变,从而鱼类群落的生物量、物种组成、多样性以及大小结构等发生变化<sup>[37-38]</sup>。蒙古鲌在 3<sup>+</sup> 龄开始性成熟,性成熟前的年龄阶段鱼类的增长速度最快,3<sup>+</sup> 龄蒙古鲌鱼类体重几乎是 2<sup>+</sup> 龄鱼类体重的 2 倍<sup>[1]</sup>,因此加强科学捕捞管理,严格控制捕捞数量,限定蒙古鲌的起捕规格以 3<sup>+</sup> 龄为准,可有效增加蒙古鲌渔产量;同时在阎王鼻子至河口等浅水区增设人工鱼巢,保障鱼类资源自然增殖,结合牡丹江流域污染防治、改善鱼类栖息地环境等鱼类生境修复措施,以促进鱼类资源的恢复。

本研究采用的水声学探测和刺网调查相结合的方法为镜泊湖的鱼类群落时空动态和资源量提供了更深入的了解。调查结果及资源量评估也可为镜泊湖土著鱼类保护、渔业资源合理开发和利用等方面提供数据基础。建议加强对镜泊湖渔业资源开展持续性监测,并结合鱼类行为学,深入研究自然因素和人为干扰影响下鱼类群落的演替方向,以期对牡丹江流域鱼类资源保护提供科学依据。

#### 4 参考文献

- [ 1 ] Zhang JM ed. Fishery resources in Heilongjiang Province. Mudanjiang: Heilongjiang Korean Nationality Publishing House, 1985. [张觉民. 黑龙江省渔业资源. 牡丹江: 黑龙江朝鲜民族出版社, 1985.]
- [ 2 ] Sun M, Zhang JJ, Ma J et al. Fish survey and water quality analysis in Lake Jingpo. *Northern Chinese Fisheries*, 2014, (2): 25-29. [孙森, 张佳洁, 马晶等. 镜泊湖鱼类调查与水质分析. 黑龙江水产, 2014, (2): 25-29.]
- [ 3 ] Du X, Song D, Ming K et al. Functional responses of phytoplankton assemblages to watershed land use and environmental gradients. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2022, 9: 1-11. DOI: 10.3389/fevo.2021.819252.
- [ 4 ] Chen X. Composition and protection of fish population in Lake Jingpo. *Fisheries of Heilongjiang*, 2017, (6): 8-11. [陈兴. 镜泊湖鱼类种群组成及保护. 黑龙江水产, 2017, (6): 8-11.]
- [ 5 ] Murphy BR, Willis DW eds. Fisheries techniques, 2nd ed. Bethesda, MD: American Fisheries Society, 1996.
- [ 6 ] Winfield IJ, Fletcher JM, James JB et al. Assessment of fish populations in still waters using hydroacoustics and survey gill netting: Experiences with Arctic charr (*Salvelinus alpinus*) in the UK. *Fisheries Research*, 2009, 96(1): 30-38. DOI: 10.1016/j.fishres.2008.09.013.



- [ 7 ] Godlewska M, Świerzowski A, Winfield IJ. Hydroacoustics as a tool for studies of fish and their habitat. *Ecohydrology and Hydrobiology*, 2004, **4**(4): 417-427.
- [ 8 ] Wheeland LJ, Rose GA. Acoustic measures of lake community size spectra. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2016, **73**(4): 557-564. DOI: 10.1139/cjfas-2014-0446.
- [ 9 ] Xia CZ, Jiang ZF. Population character of *Culter mongolicus* in Lake Jingpo and its effects to stocking "seeding". *Freshwater Fisheries*, 1993, **23**(3): 13-16. [夏重志, 姜作发. 镜泊湖蒙古红鲌的种群特征及其对放养鱼种的影响. *淡水渔业*, 1993, **23**(3): 13-16.]
- [ 10 ] Ren ML, Ren B. The age and growth of *Plagiognathops microlepis* (Bleeker) in Heilongjiang River. *Chinese Journal of Fisheries*, 1995, **8**(1): 13-17. [任慕莲, 任波. 黑龙江细鳞斜颌鲴鱼生长的研究. *水产学杂志*, 1995, **8**(1): 13-17.]
- [ 11 ] Chen YY ed. Fauna sinica (Osteichthyes) Cypriniformes. Beijing: Science Press, 1998. [陈宜瑜. 中国动物志·硬骨鱼纲·鲤形目(中卷). 北京: 科学出版社, 1998.]
- [ 12 ] Ren ML ed. Fishes of Heilongjiang River. Harbin: Heilongjiang People's Publishing House, 1981. [任慕莲. 黑龙江鱼类. 哈尔滨: 黑龙江人民出版社, 1981.]
- [ 13 ] Zhang JM ed. Ichthyography of Heilongjiang Province. Harbin: Heilongjiang Science and Technology Press, 1995. [张觉民. 黑龙江省鱼类志. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 1995.]
- [ 14 ] Aglen A. Random errors of acoustic fish abundance estimates in relation to the survey grid density applied. FAO fisheries report, 1983: 293-298.
- [ 15 ] American Public Health Association ed. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (18th ed.). Washington DC: American Public Health Association, 1992.
- [ 16 ] Frouzova J, Kubecka J, Balk H *et al.* Target strength of some European fish species and its dependence on fish body parameters. *Fisheries Research*, 2005, **75**(1/2/3): 86-96. DOI: 10.1016/j.fishres.2005.04.011.
- [ 17 ] R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2019. URL <https://www.R-project.org/>.
- [ 18 ] Jing ZS ed. Encyclopedia of rivers and lakes in China: Section of Heilongjiang River and Liaohe River Basins. Beijing: Chinese Water & Power Press, 2014: 180-181. [敬正书. 中国河湖大典: 黑龙江、辽河卷. 北京: 中国水利水电出版社, 2014: 180-181.]
- [ 19 ] Poff NL, Allan JD, Bain MB *et al.* The natural flow regime: a paradigm for river conservation and restoration. *Bioscience*, 1997, **47**(11): 769-784. DOI: 10.2307/1313099.
- [ 20 ] Humphries P, Winemiller KO. Historical impacts on river fauna, shifting baselines, and challenges for restoration. *BioScience*, 2009, **59**(8): 673-684. DOI: 10.1525/bio.2009.59.8.9.
- [ 21 ] Hall CJ, Jordaan A, Frisk MG. The historic influence of dams on diadromous fish habitat with a focus on river herring and hydrologic longitudinal connectivity. *Landscape Ecology*, 2011, **26**(1): 95-107. DOI: 10.1007/s10980-010-9539-1.
- [ 22 ] Kuriqi A, Pinheiro AN, Sordo-Ward A *et al.* Water-energy-ecosystem Nexus: Balancing competing interests at a Run-of-river hydropower plant coupling a hydrologic-ecohydraulic approach. *Energy Conversion and Management*, 2020, **223**: 113267. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.113267.
- [ 23 ] Cai Y, Lu XX, Ba QS *et al.* Plankton community structure in Lake Jingpo and the relationship with environmental factors. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2019, **50**(1): 116-128. DOI: 10.11693/hyhz20180200040. [蔡阳, 陆欣鑫, 巴秋爽等. 镜泊湖春、夏两季浮游生物群落结构及其与环境因子的关系. *海洋与湖沼*, 2019, **50**(1): 116-128.]
- [ 24 ] Lian YX, Huang G, Godlewska M *et al.* Hydroacoustic assessment of spatial-temporal distribution and abundance of fish resources in the Xiangxi River. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2015, **39**(5): 920-929. DOI: 10.7541/2015.121. [连玉喜, 黄耿, Godlewska M 等. 基于水声学探测的香溪河鱼类资源时空分布特征评估. *水生生物学报*, 2015, **39**(5): 920-929.]
- [ 25 ] Schaus MH, Vanni MJ. Effects of gizzard shad on phytoplankton and nutrient dynamics: role of sediment feeding and fish size. *Ecology*, 2000, **81**(6): 1701-1719. DOI: 10.1890/0012-9658(2000)081[1701:EOGSOP]2.0.CO;2.
- [ 26 ] Kraus CN, Bonnet MP, Miranda CA *et al.* Interannual hydrological variations and ecological phytoplankton patterns in Amazonian floodplain lakes. *Hydrobiologia*, 2019, **830**(1): 135-149. DOI: 10.1007/s10750-018-3859-6.
- [ 27 ] Chen WJ, He G, Wu B *et al.* Spatial distribution and biomass assessment of fish in the channel connecting the Lake Poy-

- ang and the Yangtze River. *J Lake Sci*, 2017, **29**(4): 923-931. DOI: 10.18307/2017.0416. [陈文静, 贺刚, 吴斌等. 鄱阳湖通江水道鱼类空间分布特征及资源量评估. 湖泊科学, 2017, **29**(4): 923-931.]
- [28] Rypel AL, Layman CA, Arrington DA. Water depth modifies relative predation risk for a motile fish taxon in Bahamian tidal creeks. *Estuaries and Coasts*, 2007, **30**(3): 518-525. DOI: 10.1007/BF03036517.
- [29] Mao ZG, Gu XH, Gong ZJ *et al.* The structure of fish community and changes of fishery resources in Lake Hongze. *J Lake Scis*, 2019, **31**(4): 1109-1119. DOI: 10.18307/2019.0401. [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. 湖泊科学, 2019, **31**(4): 1109-1119.]
- [30] Rodríguez MA, Lewis Jr WM. Structure of fish assemblages along environmental gradients in floodplain lakes of the Orinoco River. *Ecological Monographs*, 1997, **67**(1): 109-128. DOI: 10.1890/0012-9615(1997)067[0109:SOFAAE]2.0.CO;2.
- [31] Yacobi YZ, Kalikhman I, Gophen M *et al.* The spatial distribution of temperature, oxygen, plankton and fish determined simultaneously in Lake Kinneret, Israel. *Journal of Plankton Research*, 1993, **15**(6): 589-601. DOI: 10.1093/plankt/15.6.589.
- [32] Flood B, Wells M, Midwood JD *et al.* Intense variability of dissolved oxygen and temperature in the internal swash zone of Hamilton Harbour, Lake Ontario. *Inland Waters*, 2021, **11**(2): 162-179. DOI: 10.1080/20442041.2020.1843930.
- [33] Berger SA, Diehl S, Stibor H *et al.* Water temperature and mixing depth affect timing and magnitude of events during spring succession of the plankton. *Oecologia*, 2007, **150**(4): 643-654. DOI: 10.1007/s00442-006-0550-9.
- [34] Godlewska M, Frouzova J, Kubecka J *et al.* Comparison of hydroacoustic estimates with fish census in shallow Malta Reservoir—which TS/L regression to use in horizontal beam applications? *Fisheries Research*, 2012, **123/124**: 90-97. DOI: 10.1016/j.fishres.2011.11.023.
- [35] Huang G, Wang QD, Chen XH *et al.* Evaluating impacts of an extreme flood on a fish assemblage using hydroacoustics in a large reservoir of the Yangtze River Basin, China. *Hydrobiologia*, 2019, **841**(1): 31-43. DOI: 10.1007/s10750-019-04003-4.
- [36] Liu F, Lin PC, Li MZ *et al.* Situations and conservation strategies of fish resources in the Yangtze River Basin. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2019, **43**(S1): 144-156. DOI: 10.7541/2019.177.
- [37] Bianchi G, Gislason H, Graham K *et al.* Impact of fishing on size composition and diversity of demersal fish communities. *ICES Journal of Marine Science*, 2000, **57**(3): 558-571. DOI: 10.1006/jmsc.2000.0727.
- [38] Biro PA, Post JR. Rapid depletion of genotypes with fast growth and bold personality traits from harvested fish populations. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, **105**(8): 2919-2922. DOI: 10.1073/pnas.0708159105.