

长江三峡船闸上下引航道鱼类空间分布特征

朱佳志, 郭文韬, 黄安阳, 郜星辰, 姜伟

Characteristics of spatial distributions of fish community in upper and lower approach channels of the Three Gorges ship lock, Yangtze River

ZHU Jiazhi, GUO Wentao, HUANG Anyang, GAO Xingchen, JIANG Wei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12024/jsou.20200703108>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

热带大西洋拟锥齿鲨资源动态和空间分布研究

Preliminary analysis of crocodile shark (*Pseudocarcharias kamoharai*) resources information and spatial distribution in the tropical Atlantic Ocean

上海海洋大学学报. 2017, 26(4): 570 <https://doi.org/10.12024/jsou.20161101910>

基于DIDSON双频识别声纳技术的青草沙水库鱼类资源量评估

Evaluation of fish resources in Qingcaosha Reservoir based on dual-frequency identification sonar technology

上海海洋大学学报. 2017, 26(4): 561 <https://doi.org/10.12024/jsou.20161201919>

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>

金泽水库鱼类的群落结构和资源量

Fish community structure and resource in Jinze Reservoir

上海海洋大学学报. 2020, 29(6): 847 <https://doi.org/10.12024/jsou.20200803153>

马里亚纳海沟海域深渊潜器作业海况条件分析

Analysis of wave condition for submersible operation in Mariana Trench

上海海洋大学学报. 2017, 26(5): 766 <https://doi.org/10.12024/jsou.20161201913>

文章编号: 1674-5566(2022)01-0242-10

DOI:10.12024/jsou.20200703108

长江三峡船闸上下引航道鱼类空间分布特征

朱佳志^{1,2}, 郭文韬^{1,2}, 黄安阳^{1,2}, 郜星辰^{1,2}, 姜伟^{1,2}

(1. 中国长江三峡集团有限公司 中华鲟研究所, 湖北 宜昌 443100; 2. 三峡工程鱼类资源保护湖北省重点实验室, 湖北宜昌 443100)

摘要: 为了解三峡船闸上下引航道的鱼类空间分布特征, 分别于 2018 年 1 月、5 月、10 月和 2019 年 5 月对靖江溪(区域 I)、上引航道(区域 II)、下引航道(区域 III)和三斗坪(区域 IV)等区域开展水声学调查。将探测目标声学强度换算成鱼类体长, 结果显示, 区域 I、区域 II 和区域 IV 的鱼类体长主要集中在 2.5~5.0 cm, 区域 III 的鱼类体长集中在 7.0~20.0 cm。区域 I、区域 II、区域 III 和区域 IV 的平均鱼类密度分别为 (99.53 ± 47.78) 、 (57.37 ± 33.45) 、 (61.51 ± 1.72) 和 (30.61 ± 15.75) ind./1000 m³, 区域 I 和区域 II 低水位期鱼类密度显著大于高水位期, 区域 III 低水位期鱼类密度显著小于高水位期。区域 I 和区域 II 鱼类在不同水位期均倾向于中层偏下水体, 区域 III 鱼类在高水位期集中分布于 6 m 以上水层, 低水位期集中分布于 8 m 以下水层。三峡船闸上下引航道鱼类空间分布差异主要受三峡库区水位变动及过闸通航船舶等因素影响。

关键词: 空间分布; 水声学; 鱼类密度; 三峡库区; 引航道

中图分类号: S 932.4 **文献标志码:** A

水利工程在发挥防洪、航运作用的同时, 也对河流生态系统带来一些不利影响, 最显著的影响就是大坝使原来连续的河流生境破碎化, 鱼类洄游通道被阻断, 上、下游水生生物交流困难, 不利于维持鱼类自然种质资源和种群结构多样化^[1-2]。虽然三峡工程未设计过鱼通道, 但双线五级船闸和升船机等附属通航建筑(以下统称为“三峡船闸”)使大坝上、下游之间存在较大体积的规律性连通水体, 因而三峡船闸具有成为上、下游水生生物交流通道的生态潜力。2009 年、2012 年^[3-4]及 2017 年(内部资料, 未发表)三峡船闸检修期间, 闸室内共发现 36 种鱼类, 主要种类为常见的小型经济鱼类(贝氏鲮 *Hemiculter bleekeri*、蛇鮈 *Saurogobio dabryi*、银鮈 *Squalidus argentatus*、瓦氏黄颡鱼 *Pelteobagrus vachelli* 等)和中长距离洄游性鱼类(草鱼 *Ctenopharyngodon idella*、青鱼 *Mylopharyngodon piceus*、鳊 *Hypophthalmichthys nobilis*、长薄鳅 *Leptobotia*

elongata 等), 最大个体体长达 100 cm(匙吻鲟 *Polyodon spathula*)。引航道作为连接船闸与主航道的特殊河段, 其水深及流态受三峡库区水位变动影响较大, 河段内的鱼类资源状况可能与自然水体存在差异, 研究引航道内鱼类种类、数量及群落结构变化对于分析船闸过鱼能力具有重要意义。三峡大坝上游水域鱼类研究^[5-7]多集中于秭归江段, 针对三峡船闸引航道水域的鱼类研究相对较少, 仅 TAN 等^[8]的调查覆盖了三峡船闸上引航道水域; 在三峡大坝下游水域开展鱼类资源调查时, 距离下引航道最近的采样断面也仅达到引航道以外的三斗坪镇^[9-10]。

水声学方法作为评估渔业资源的一种重要手段, 可以快速地对整个水体进行连续精准探测, 在鱼类资源量评估^[11-12]、鱼类时空分布^[13-14]等研究中被广泛应用。因其不拘泥于调查区域地形, 探测方式灵活机动, 往往被用于近坝区等对调查方法有特殊要求的水域。林鹏程等^[15]于

收稿日期: 2020-07-12 修回日期: 2021-01-28

基金项目: 国家重点研发计划“典型脆弱生态修复与保护研究”重点专项(2016YFC0502210); 三峡工程后续工作资助项目(2136902)

作者简介: 朱佳志(1989—), 男, 工程师, 研究方向为鱼类行为学。E-mail: zhu_jiazhi@ctg.com.cn

通信作者: 姜伟, E-mail: jiang_wei6@ctg.com.cn

2009年在葛洲坝上、下游江段开展了水声学调查,探测范围既覆盖了库区的深水区域,又兼顾二江的急流区域和三江的引航道区域。在地理信息系统(geographic information system, GIS)中,反距离加权插值法(inverse distance weighting, IDW)通过计算与邻近区域样点的加权平均值来估算出单元格的值,进而插值得到一个区域的值^[16],该方法常用于鱼类空间分布研究^[17-18]。本研究采用水声学方法对三峡船闸上、下引航道及其邻近水域开展鱼类空间分布特征研究。

1 材料与方法

1.1 调查区域

三峡船闸位于三峡大坝左岸,包括双线五级船闸和升船机等两处通航建筑物。本研究的调查区域(30°49'N ~ 30°51'N, 110°59'E ~ 111°03'E)包括船闸上、下游引航道及其邻近水域,主要分为4个区域:区域I为靖江溪区域,靖江溪紧邻刘家河库湾,三峡库区蓄水前为长江支流,蓄水后淹没形成回水区,河口宽约1.3 km,纵深约4.2 km,探测水域面积约192 hm²;区域II为上引航道区域,包含刘家河库湾,上引航道水面和坝前水面由隔离带(浮标)隔开,隔离带末端可达到刘家河库湾外侧,上引航道长约2.1 km,宽度300~800 m,航道底部高程130 m,探测水域面积约185 hm²;区域III为下引航道区域,包括船闸六闸首和升船机下口门至隔流堤末端之间的河道,长度分别为2.7 km和4.2 km,下引航道宽度80~430 m,航道底部高程56.5 m,探测水域面积约84.4 hm²;区域IV为三斗坪水域,包括隔流堤末端至三斗坪镇三峡神牛文化广场江段,江面宽

度700~800 m,探测水域面积约61.8 hm²。因隔离带外侧坝前水域和隔流堤外侧坝下水域为军事警戒区,无法在该水域开展探测工作,同时,区域II和区域III之间的船闸闸室区域也因通航需要无法开展水声学调查。

1.2 水声学调查

使用分裂波束回声探测仪(Simrad EY60)进行声学探测,换能器频率为200 kHz, -3 dB波束宽为7°。调查时功率设定为150 W,脉冲宽度选择256 μs,脉冲发射间隔0.02 s。探测前使用38.1 mm钨钢合金球对仪器进行实地校准。实时坐标数据采集使用GPS导航仪(Garmin 60CSx),声学数据采集使用ER60软件。工作船选用小型渡船(长×宽=25.7 m×4.5 m),工作时航速约8 km/h。使用铁质支架将换能器固定于右侧船舷,换能器垂直入水约0.5 m,用尼龙绳前后斜拉固定,保证入水角度不发生偏移。工作期间使用流速测算仪(重庆华正水文仪器有限公司HR型)采集流速数据,使用便携式溶氧仪(Hach HQ30)采集水温数据,由中国长江三峡集团有限公司官网(<https://www.ctg.com.cn/sxjt/sqqk/index.html>)获取各调查区域的水位数据。

实际探测过程中,区域I和区域II、区域III和区域IV分别作为一个探测大区,每个探测大区探测3 d/次,工作时长6 h/d。探测开始时间和探测期间的水文信息见表1。除2018年1月22日、23日区域I和区域II出现大雨天气,其他区域在调查期间均为晴天。探测期间,区域I、区域II、区域III处于缓流水环境,平均流速0.23 m/s,区域IV处于流水环境,平均流速超过0.7 m/s。

表1 探测开始时间和探测期间的水文信息

Tab.1 start time of acoustic survey and hydrological information during survey

探测开始时间 Start time of survey	监测项目 Monitoring items	探测区域的平均值 Average value of survey areas	
		区域I和区域II Area I and area II	区域III和区域IV Area III and area IV
2018.1.22	水位 Water level/m	172.7	65.6
	水温 Water temperature/°C	22.0	21.8
2018.5.28	水位 Water level/m	153.2	67.4
	水温 Water temperature/°C	21.9	22.1
2018.10.10	水位 Water level/m	174.2	67.2
	水温 Water temperature/°C	22.4	22.9
2019.5.20	水位 Water level/m	152.3	66.7
	水温 Water temperature/°C	19.4	21.3

考虑到 2018 年 1 月和 2018 年 10 月的库区水位超过 172 m, 2018 年 5 月和 2019 年 5 月库区水位降至 152 m 附近, 定义 2018 年 1 月和 10 月为高水位期, 2018 年 5 月和 2019 年 5 月为低

水位期。在 4 个区域均采用“之”字形轨迹进行水声学探测。由于区域 II 过闸船只较多, 在船闸一闸首和升船机上口门外侧水域探测时, 工作船的探测轨迹稍有改变。具体探测轨迹见图 1。

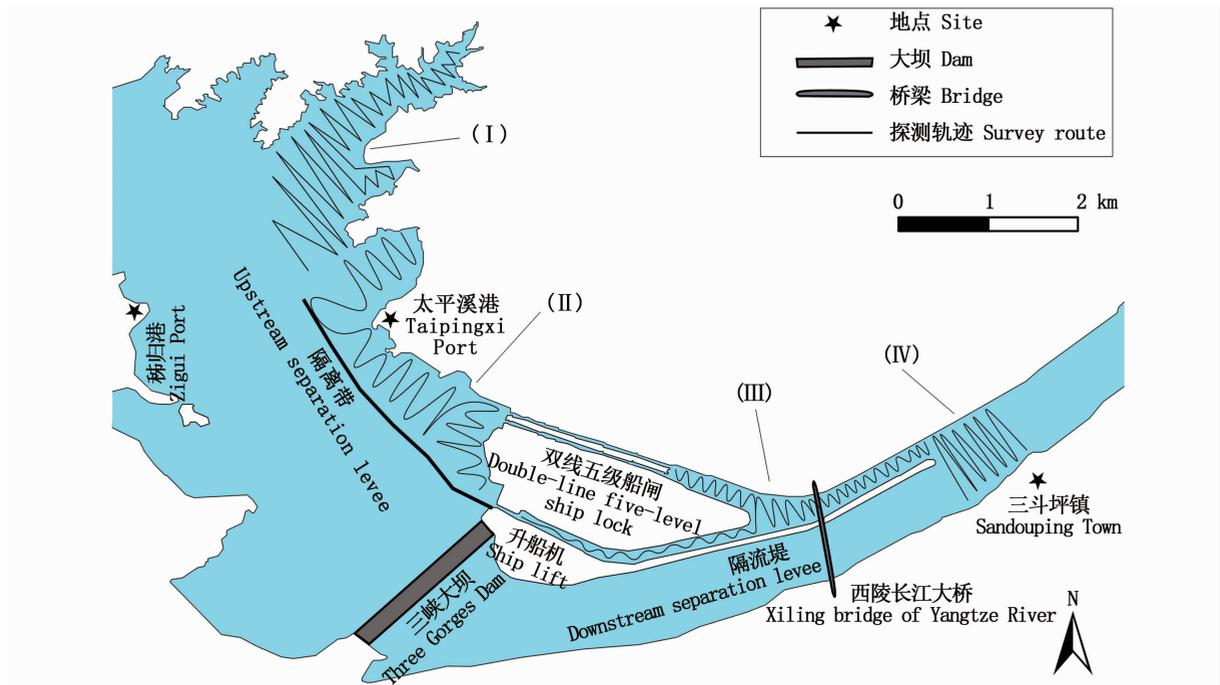


图 1 三峡大坝上下游的声学区域及探测轨迹示意图

Fig. 1 Acoustic survey areas and routes upstream and downstream of the Three Gorges Dam

1.3 水声学数据处理及分析

ER60 软件采集的探测数据使用 Echoview 7.0 软件进行处理。首先, 对回声映像进行水底自动识别, 为避免水底杂物/淤泥干扰, 提取水底上方 0.5 m 至换能器前方 1 m 的数据, 采用分裂波束单体目标判别方法 2 (single target detection → split beam → method 2) 对探测信号进行判别, 相关参数设置: 信号目标强度 (target strength, TS) 阈值设为 -70 dB, 脉冲宽度决定水平 6 dB, 最小标准脉冲宽度 0.7, 最大标准脉冲宽度 1.5, 最大波束补偿 6 dB, 长、短轴角度最大标准偏差均为 0.6。

鱼类密度计算方法参考连玉喜等^[19]的研究方法:

$$V = \frac{1}{3} \times \tan(\theta/2) \times \tan(\phi/2) \times (R_2^3 - R_1^3) \quad (1)$$

$$\varphi = \frac{N}{P \times V} \quad (2)$$

式中: V 为发射脉冲探测波束的水体体积, m^3 ; θ

和 ϕ 分别为换能器水平和垂直方向的有效检测角度, ($^\circ$); R_2 为水面至水底上方 0.5 m 的水层深度, m; R_1 为换能器前方 1 m 的水层深度, m; φ 为单位体积水体内的鱼类数量, $\text{ind.}/\text{m}^3$; N 为各单元探测到的鱼类总数量, ind. ; P 为脉冲探测波束的数量。

探测信号目标强度 (target strength, TS) 和鱼类估算体长的换算公式采用有鳔鱼类经验公式^[20]:

$$T_{TS} = 20 \lg L - 71.9 \quad (3)$$

式中: T_{TS} 为探测信号目标强度, dB; L 为换算后的鱼类体长, cm。

1.4 鱼类时空分布的 GIS 建模

为清楚展示三峡船闸上下游的鱼类空间分布特征, 使用 ArcGIS 10.2 软件对上述 4 个区域的鱼类空间分布进行 GIS 建模。将处理好的水声学数据 (包括采样点 GPS 坐标和鱼类密度) 导入 ArcGIS 平台, 对相关数据进行栅格化处理, 采

用 IDW 进行插值运算。参照陶江平等^[17]的方法,设定幂值 $P=2$,最大搜寻半径 $N=3$,输出栅格的大小为 $100\text{ m} \times 50\text{ m}$ 。

1.5 渔获物采集及生物学数据分析

根据相关部门审批意见及禁捕期禁捕要求,于 2019 年 7 月 21 日和 9 月 6 日开展了 2 次渔获物采集工作。使用 6 张定置刺网(长 \times 宽 = $50\text{ m} \times 5\text{ m}$,外层网目 8.0 cm ,内层网目 $2.0 \sim 3.0\text{ cm}$)进行渔获物收集,在靖江溪、刘家河及秭归县城一侧等坝上水域和岱石渡口、隔流堤末端及西陵长江大桥下方等坝下水域各放置 1 张网具,下午 18:00 ~ 19:00 放网,次日上午 5:00 ~ 6:00 收网,每日收网 1 次,每月连续采样 3 d。7 月 21 日和 9 月 6 日,三峡库区平均水位分别为 145.2 m 和 161.5 m ,坝下平均水位分别为 68.5 m 和 68.4 m 。统计渔获物的生物学数据,包括体长、体质量、尾数、捕捞时间等,以鱼类相对重要性指数(index of relative importance, IRI)表征鱼类种类优势度,划定 IRI 大于 1 000 的种类为优势种:

$$I_{\text{IRI}} = (W + N) \times F \times 10^4 \quad (4)$$

式中: I_{IRI} 为鱼类相对重要性指数; W 为某一种类的鱼类样本的质量占总质量的比例,%; N 为某一种类的鱼类样本尾数占总渔获尾数的比例,%; F 为某一种类的鱼类样本出现的站数占总站数的比例,%。

1.6 统计与分析

对区域 I、区域 II、区域 III 和区域 IV 鱼体 TS 值进行 K-S 正态性检验,若符合正态分布,采用 F 检验比较区域间鱼体 TS 值差异,非正态分布则采用 K-W 非参数检验比较差异。采用卡方独立性检验分析区域 I、区域 II 和区域 IV 的鱼类密度差异及垂直分布组成差异。

2 结果

2.1 鱼类组成

区域 I、区域 II 和区域 IV 鱼体 TS 值均集中在 $-64 \sim -58\text{ dB}$,区域 III 鱼体 TS 值则集中在 $-55 \sim -46\text{ dB}$ (图 2),根据公式 3 将鱼体 TS 值换算成鱼类体长,结果显示,区域 I、区域 II 和区域 IV 的鱼类体长主要集中在 $2.5 \sim 5.0\text{ cm}$,区域 III 的鱼类体长则集中在 $7.0 \sim 20.0\text{ cm}$ 。对 4 个区域的鱼体 TS 值进行 K-S 正态性检验, $P < 0.05$,数据不符合正态分布,采用 K-W 非参数检验比较各区域鱼体 TS 值差异。结果显示区域 I、区域 II 和区域 IV 的 TS 值差异不显著(K-W 检验, $P_{\text{I-IV}} > 0.05, P_{\text{II-IV}} > 0.05$),区域 III 的 TS 值分别与区域 I、区域 II 和区域 IV 呈现出显著差异(K-W 检验, $P_{\text{III-I}} < 0.01, P_{\text{III-II}} < 0.01, P_{\text{III-IV}} < 0.05$),区域 I、区域 II、区域 III 和区域 IV 体长小于 10 cm 的鱼类比例分别为 $99.13\%、99.85\%、81.38\%$ 和 94.13% 。

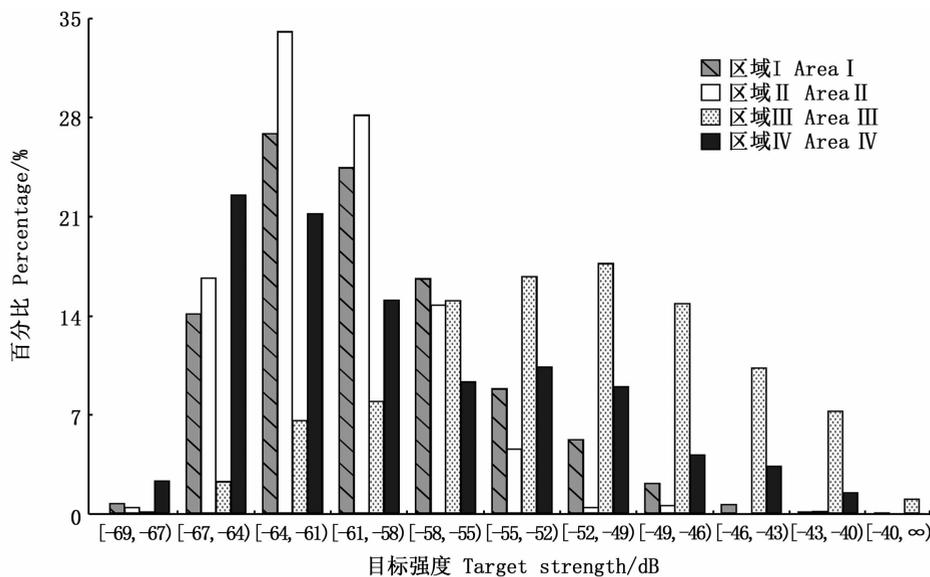


图 2 各区域的目标强度分布

Fig. 2 Distributions of target strength in survey areas

2.2 鱼类时空分布

区域 I、区域 II、区域 III 和区域 IV 的平均鱼类密度分别为 (99.53 ± 47.78) 、 (57.37 ± 33.45) 、 (61.51 ± 1.72) 和 (30.61 ± 15.75) ind./1 000 m³ (图 3)。比较 4 个区域在各调查时期鱼类密度差异,结果显示区域 I 的鱼类密度显著高于其他区域 ($P < 0.01$),区域 IV 的鱼类密度则显著低于其他区域 ($P < 0.05$),区域 II 和区域 III 的平均鱼类密度差异不显著 ($P > 0.05$)。

区域 I、区域 II 和区域 III 的鱼类密度在不同水位期呈现出显著差异,区域 I 和区域 II 低水位期鱼类密度显著高于高水位期 ($P < 0.05$),区域 III 低水位期时鱼类密度显著低于高水位期 ($P < 0.05$),区域 IV 的鱼类密度在不同调查时期内差异不显著 ($P > 0.05$)。

对 4 个调查区域在高、低水位期鱼类密度进行 GIS 建模 (图 4)。低水位期区域 II 内鱼类在一闸首外侧至太平溪港的近岸水域聚集,平均密度可达 (196.12 ± 56.12) ind./1 000 m³。随着水位上升,鱼类逐渐向区域 I 和区域 II 的湾区集中。区域 III 内鱼类在低水位期仅在西陵长江大桥下方水域集中分布,平均密度 (82.16 ± 41.11) ind./1 000 m³,高水位期鱼类的集群范围从西陵长江大桥下游延伸至船闸六闸首及升船机下口门下方,平均密度高达 (152.16 ± 22.01) ind./1 000 m³。

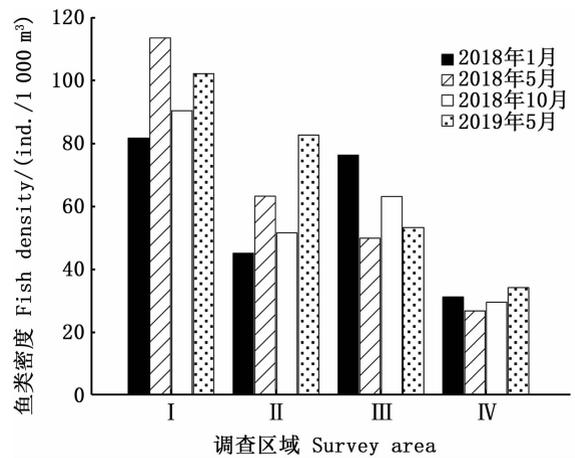


图 3 各区域在不同调查时期的鱼类密度

Fig. 3 Fish density of survey areas at different periods

2.3 鱼类垂直分布

比较 4 个区域在各调查时期内鱼类的垂直分布差异,结果显示区域 I、区域 II 和区域 IV 的鱼类垂直分布在不同调查时期均未表现出差异性 ($P_I > 0.05, P_{II} > 0.05, P_{IV} > 0.05$)。区域 I 和区域 II 鱼类在高、低水位期分别集中于 40 ~ 60 m 和 16 ~ 24 m, 30 ~ 50 m 和 20 ~ 30 m, 区域 IV 鱼类在高、低水位期均集中分布于 15 ~ 25 m。考虑各区域调查期间的水深差异,区域 I 和区域 II 的鱼类在不同水位期均倾向于中层偏下水体,而区域 IV 鱼类在不同水位期集中分布于中

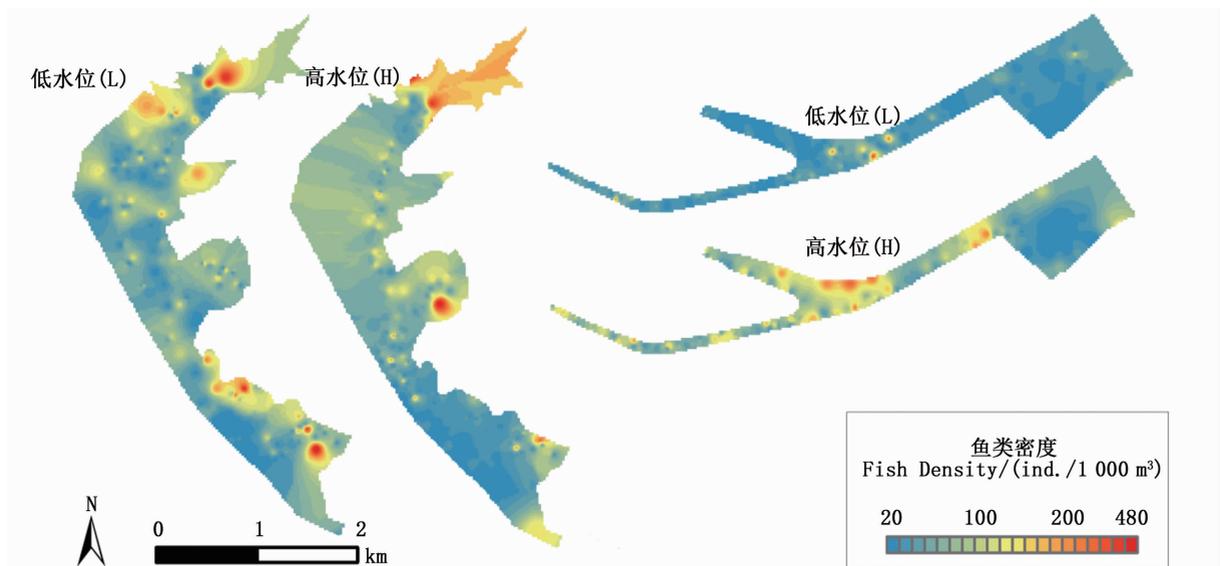


图 4 调查区域在不同水位期的鱼类密度变化

Fig. 4 Variation in fish density in survey areas at different water levels

层水体。区域Ⅲ鱼类在高、低水位期的垂直分布差异极显著($P < 0.01$),高水位期集中于6

m以上水层(55.84%),低水位期则集中分布8 m 以下的中下层水体(80.66%),见图5。

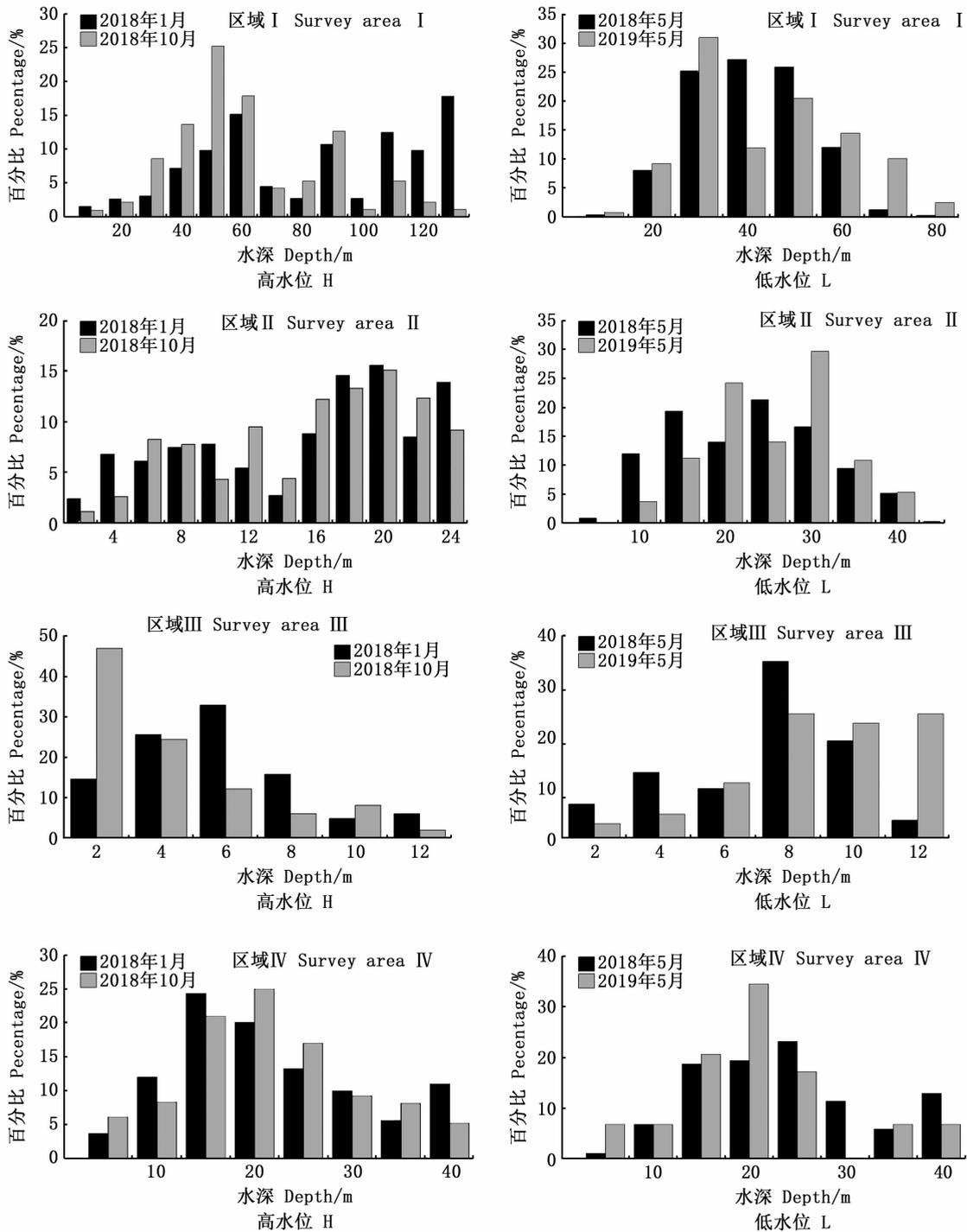


图5 不同时期各调查区域的鱼类垂直分布

Fig.5 Vertical distributions of fishes in survey areas at different periods

2.4 渔获物组成

坝上水域7月共采集鱼类55种,隶属7目11科,9月共采集鱼类29种,隶属4目7科;坝下

水域7月共采集鱼类16种,隶属3目3科,9月共采集鱼类29种,隶属6目9科。各区域不同时期的优势种见表2。分别对库区水位与渔获物的

日捕获量、种类进行 Pearson 相关性分析,结果显示坝上水域日捕获量、种类与库区水位呈弱负相关关系 ($P < 0.05$, $r_{\text{日捕获量}} = -0.102$, $r_{\text{种类}} = -0.115$), 坝下水域日捕获量、种类与库区水位

呈弱正相关关系 ($P < 0.05$, $r_{\text{日捕获量}} = 0.241$, $r_{\text{种类}} = 0.134$), 即随着库区水位升高, 坝上水域的捕捞产量和种类出现下降趋势, 但坝下水域却表现出增加趋势。

表 2 不同时期大坝上下游水域的优势种类及其空间生态位
Tab. 2 Species and spatial niche of dominant fishes in upstream and downstream of the Three Gorges Dam in different periods

采样区域 Sampling area	采样时间 Sampling period	优势种 Dominant species	相对重要性指数 IRI	空间生态位 Spatial niche
坝上 Upstream	7 月 July	短颌鲚 <i>Coilia brachygnathus</i>	7 496.1	中上层
		鳊 <i>Hypophthalmichthys nobilis</i>	2 156.4	中上层
		草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>	1 460.1	中下层
	9 月 September	贝氏鲮 <i>Hemiculter bleekeri</i>	3 458.9	中上层
		蛇鮈 <i>Saurogobio dabryi</i>	1 816.3	中下层
		鲤 <i>Cyprinus carpio</i>	1 611.8	底层
		赤眼鳟 <i>Squaliobarbus curriculus</i>	1 551.2	中层
		草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>	1 128.3	中下层
坝下 Downstream	7 月 July	银鮈 <i>Xenocypris argentea</i>	1 057.4	中下层
		鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	9 695.7	上层
		鳊 <i>Siniperca chuatsi</i>	1 793.1	中下层
	9 月 September	瓦氏黄颡鱼 <i>Pelteobagrus vachelli</i>	1 289.1	底层
		贝氏鲮 <i>Hemiculter bleekeri</i>	6 727.5	中上层
		蛇鮈 <i>Saurogobio dabryi</i>	3 023.4	中下层

3 讨论

3.1 上下引航道鱼类个体差异

根据调查结果, 上引航道及其邻近水域(靖江溪)体长小于 10 cm 的鱼类比例为 99.13% 和 99.85%, 与历史资料^[4-5, 8]基本一致。三峡水库已连续 11 年开展 175 m 试验性蓄水, 库区水位已形成季节性变动, 可能更有利于小型鱼类的生存。JENNINGS 等^[21]指出, 当环境发生变化时, 体型较小的鱼类具有更强的繁殖和快速生长能力, 进而成为区域内的优势种。董纯等^[22]在比较三峡库区 2013—2015 年渔获物数据后指出, 三峡库区某些对流速等水文条件要求低的小型鱼类可能会更快适应库区环境, 从而使种群得以恢复甚至增长。坝上水域的渔获物调查结果显示, 短颌鲚和贝氏鲮的优势度明显高于其他种类, 两者均为典型的小型鱼类。前者原分布于鄱阳湖、洞庭湖等通江湖泊^[23], 三峡大坝蓄水后形成了适合短颌鲚栖息的湖泊/水库生境, 该种群扩散至三峡库区后得以快速增长; 后者在活动空间急剧扩张和水流减缓等条件下可以迅速成为所在水域的优势种^[24]。双线五级船闸闸室水体主要经由

主廊道向大江排泄, 下引航道水位变动较小, 水深常年保持 10 ~ 11 m, 水体扰动远低于靖江溪、上引航道和三斗坪, 相对稳定的水体环境可以满足鱼类索饵和生长需求, 为鱼类的充分生长提供保障, 因此, 下引航道的鱼类规格较坝上区域和三斗坪江段大。

3.2 通航船舶对鱼类空间分布的影响

周加飞等^[25]对葛洲坝近坝区鱼类栖息及聚群行为进行调查后认为, 通航船舶数量对鱼类密度分布有较大影响。三峡船闸上引航道与靖江溪水域的鱼类平均密度分别为 57.37 ind./1 000 m³ 和 99.53 ind./1 000 m³, 与孙立元^[5]、王珂等^[26]的调查结果基本一致, 但上引航道鱼类密度低于靖江溪, 与 TAN 等^[8]于 2007 年在坝前水域的调查结果相反, 这种差异可能由区域内通航船舶数量变动引起。2007 年靖江溪湾区内有多个大型滚装码头, 区域内船舶数量远高于同期仍处于一线通航期的上引航道水域^[27]; 随着三峡船闸通航能力逐步提升, 靖江溪水域陆续开展环境整治, 码头全部拆除, 靖江溪水域环境转好, 区域内鱼类明显增加。资料显示, 三峡双线五级船闸上游水位低于 156 m 时采用后四级补水/不补水运

行^[28],即只使用四级闸室通航,此种工况下船闸通航量明显增加。在下引航道水环境相对稳定的情况下,船舶干扰成为影响鱼类分布的主要因素:库区水位较低时,船闸通航量增加,鱼类在船舶驱赶下向下游开阔水域活动,西陵长江大桥下方(下引航道最宽处,宽度 250 ~ 500 m)出现鱼类集中分布;库区水位上升后,船闸恢复 5 级闸室通航,上下行船舶数量减少、活动空间增大及鱼类索饵需求加大等因素促使下引航道鱼类的聚集范围和密度出现较大增长。

3.3 库区水位变动对鱼类空间分布的影响

在自然条件下,鱼类空间分布受饵料资源及水温分布的影响^[29]。春、夏季浮游生物在表层聚集,吸引鱼类向上层活动,秋、冬季表层水温下降,鱼类倾向于底层越冬。靖江溪和上引航道的鱼类在库区高水位期(秋、冬季)均表现出向下层活动的趋势,不同的是,前者中、下层的鱼类比例相近,而后者下层鱼类比例明显高于中层。可能的原因是,高水位期上引航道最大水深可达 42 ~ 44 m,其下层水体的深度范围与靖江溪的中、下层存在部分重叠,在没有物理隔离的情况下,上引航道的鱼类较易在出闸船只驱使下与靖江溪鱼类产生被动交流。相较而言,下引航道鱼类的垂直分布主要受通航船舶的影响。在库区水位低、船闸通航量大时,鱼类受过闸船只驱赶向中下层水体活动,随着库区水位上升,双线五级船闸恢复五级运行,船舶等候过闸时间增加,鱼类受船只倾泻生活废水、食物残渣引诱,向上层聚集。三峡库区达到 175 m 蓄水位后,大坝下泄流量较少,隔流堤末端会形成回流、缓流等水文条件,在一定程度上也会吸引鱼类向下引航道聚集。鱼类密度分布 GIS 模型结果显示,库区低水位期时,上引航道鱼类在一闸首外侧近岸水域大量聚集,部分区域的鱼类密度接近甚至超过靖江溪水域,可能的原因是,低水位期大坝下泄流量相对较小,随之而来的营养物质在坝前汇集后经闸室或泄洪孔排入下游,这些物质可以吸引短颌鲚、鳊、草鱼等库区优势鱼种向坝前水域活动。

3.4 后续工作建议

根据声学探测结果和渔获物调查结果,大坝上下游鱼类组成以小型鱼类为主,短颌鲚、鲢、贝氏鲮等中上层小型鱼类在不同水位时期均为区域优势种,这些鱼类有较大机会在过闸船只驱

赶、下泄水流吸引等因素共同作用下进入闸室内^[30],进而产生上下游交流。目前,葛洲坝船闸的过鱼能力研究相对较多,但针对三峡船闸过鱼效果评估的研究资料严重缺乏,研究人员尚无法对三峡船闸过鱼效果进行准确评估。建议针对三峡引航道及闸室的鱼类分布及行为特征开展专门研究,补充相关基础数据,以便后续探讨利用三峡船闸促进鱼类上下行交流的可行性。

参考文献:

- [1] 郑丙辉,张远,富国,等. 三峡水库营养状态评价标准研究[J]. 环境科学学报, 2006, 26(6): 1022-1030.
ZHENG B H, ZHANG Y, FU G, et al. On the assessment standards for nutrition status in the Three Gorge Reservoir [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2006, 26(6): 1022-1030.
- [2] 毛熹. 鱼道进口研究综述[J]. 土木工程, 2017, 6(4): 393-398.
MAO X. Review of fishway inlet research[J]. Hans Journal of Civil Engineering, 2017, 6(4): 393-398.
- [3] 高勇. 三峡及葛洲坝船闸鱼类组成调查[R]. 宜昌: 中华鲟研究所, 2012.
GAO Y. Investigation on fish of shiplocks in the Three Gorges and Gezhouba [R]. Yichang: Chinese Sturgeon Research Institute, 2012.
- [4] 姜伟,唐锡良,高勇. 三峡及葛洲坝船闸对鱼类的上下行交流作用研究[C]//中国海洋湖沼学会、中国动物学会鱼类学分会 2012 年学术研讨会论文集. 兰州: 中国海洋湖沼学会, 中国动物学会, 2012: 181-182.
JIANG W, TANG X L, GAO Y. Study on the interaction of shiplock on fishes between the Three Gorges Dam and Gezhouba Dam [C]//Chinese Society of Fisheries and Fisheries, China Society of Fisheries, China Animal Society. Lanzhou: Chinese Society of Marine Limnology, Chinese Zoological Society, 2012: 181-182.
- [5] 孙立元. 筑坝对河流鱼类空间分布影响的水声学研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2013: 37-39.
SUN L Y. Effects of damming on spatial distribution of river fishes: revealed by fisheries acoustic method[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2013: 37-39.
- [6] 陶江平,陈永柏,乔晔,等. 三峡水库成库期间鱼类空间分布的水声学研究[J]. 水生态学杂志, 2008, 29(1): 25-33.
TAO J P, CHEN Y B, QIAO Y, et al. Hydroacoustic surveys on spatial distribution of fishes in the Three Gorges reservoir during the first impoundment [J]. Journal of Hydroecology, 2008, 29(1): 25-33.
- [7] 王珂,李翀,段辛斌,等. 三峡水库 175 m 蓄水位前鱼类分布特征研究[J]. 淡水渔业, 2012, 42(3): 23-27.
WANG K, LI C, DUAN X B, et al. Study on the fish

- distribution characteristic of the Three Gorges reservoir before 175 m[J]. *Freshwater Fisheries*, 2012, 42(3): 23-27.
- [8] TAN X C, CHANG J B, TAO J P, et al. Survey on fish distribution in the forequarter of the Three Gorge reservoir Using EY60 Split-beam Echosounder [J]. *Ecological Science*, 2008, 27(5): 329-334.
- [9] 刘春池, 高欣, 林鹏程, 等. 葛洲坝水库鱼类群落结构特征研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2012, 21(7): 843-849.
- LIU C C, GAO X, LIN P C, et al. Fish community structure in Gezhouba reservoir[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, 21(7): 843-849.
- [10] 王军红, 姜伟, 唐锡良, 等. 长江三峡大坝-葛洲坝江段经济鱼类增殖放流效果初步评价[J]. *淡水渔业*, 2014, 44(6): 100-103.
- WANG J H, JIANG W, TANG X L, et al. The preliminary evaluation of economic fisheries resource enhancement and releasing effect in the Gezhouba reservoir [J]. *Freshwater Fisheries*, 2014, 44(6): 100-103.
- [11] 张翔, 沈蔚, 童剑锋, 等. 基于 DIDSON 双频识别声纳技术的青草沙水库鱼类资源量评估[J]. *上海海洋大学学报*, 2017, 26(4): 561-569.
- ZHANG X, SHEN W, TONG J F, et al. Evaluation of fish resources in Qingcaosha reservoir based on dual-frequency identification sonar technology [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2017, 26(4): 561-569.
- [12] 万树杰, 黄开, 杨洋, 等. 2018 年夏季南奥克尼群岛南极磷虾集群特征[J]. *水产学报*, 2020, 44(10): 1707-1717.
- WAN S J, HUANG K, YANG Y, et al. Aggregation characteristics of Antarctic krill (*Euphausia superba*) in the South Orkney Islands in summer 2018 [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2020, 44(10): 1707-1717.
- [13] 石妮, 李英文. 基于水声学探测的云南省渔洞水库鱼类空间分布和资源量评估[J]. *重庆师范大学学报(自然科学版)*, 2018, 35(4): 37-41.
- SHI N, LI Y W. Fish spatial distribution and biomass assessment in Yudong Reservoir of Yunnan Province based on Hydroacoustic research [J]. *Journal of Chongqing Normal University (Natural Science Edition)*, 2018, 35(4): 37-41.
- [14] 李斌, 汤勇, 孙建富, 等. 基于声学方法的黄河三门峡水库渔业资源空间分布研究[J]. *大连海洋大学学报*, 2016, 31(5): 563-571.
- LI B, TANG Y, SUN J F, et al. Spatial distribution of fisheries resources in Sanmenxia Reservoir in the Yellow River based on an acoustic method[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2016, 31(5): 563-571.
- [15] 林鹏程, 高欣, 刘春池, 等. 葛洲坝上下游江段鱼类时空分布特征研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2011, 20(9): 1047-1053.
- LIN P C, GAO X, LIU C C, et al. Hydroacoustic surveys on temporal and spatial distribution of fishes in the upper and lower reaches of the Gezhouba dam [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, 20(9): 1047-1053.
- [16] QU L L, XIAO H Y, ZHENG N J, et al. Comparison of four methods for spatial interpolation of estimated atmospheric nitrogen deposition in South China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(3): 2578-2588.
- [17] 陶江平, 艾为明, 龚昱田, 等. 采用渔业声学方法和 GIS 模型对楠溪江鱼类资源量及空间分布的评估[J]. *生态学报*, 2010, 30(11): 2992-3000.
- TAO J P, AI W M, GONG Y T, et al. Assessment of fish abundance and distribution using fisheries acoustics and GIS modeling in the Nanxi River of Wenzhou City [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(11): 2992-3000.
- [18] 孙明波, 谷孝鸿, 曾庆飞, 等. 基于水声学方法的太湖鱼类空间分布和资源量评估[J]. *湖泊科学*, 2013, 25(1): 99-107.
- SUN M B, GU X H, ZENG Q F, et al. Assessment of fish spatial distribution and biomass in Lake Taihu using hydroacoustic method[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2013, 25(1): 99-107.
- [19] 连玉喜, 叶少文, 黄耿, 等. 三峡库区香溪河鱼类资源水声学探测效果的昼夜差异研究[J]. *水生生物学报*, 2015, 39(5): 1041-1045.
- LIAN Y X, YE S W, HUANG G, et al. Diurnal variation of fish resource estimated by hydroacoustical method of Xiangxi River in the Three Gorges reservoir[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2015, 39(5): 1041-1045.
- [20] FOOTE K G. Fish target strengths for use in echo integrator surveys[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1998, 82(3): 981-987.
- [21] JENNINGS S, REYNOLDS J D, MILLS S C. Life history correlates of responses to fisheries exploitation [J]. *Proceedings of the Royal Society of London Series B: Biological Sciences*, 1998, 265(1393): 333-339.
- [22] 董纯, 杨志, 龚云, 等. 三峡库区干流鱼类资源现状与物种多样性保护[J]. *水生态学杂志*, 2019, 40(1): 15-21.
- DONG C, YANG Z, GONG Y, et al. Fish resource status and biodiversity conservation in the main channel of Three Gorges reservoir [J]. *Journal of Hydroecology*, 2019, 40(1): 15-21.
- [23] 程方圆, 陶紫玉, 李晨虹. 应用单核苷酸多态性(SNP)标记鉴定短颌鲚、湖鲚和刀鲚[J]. *上海海洋大学学报*, 2019, 28(1): 10-19.
- CHENG F Y, TAO Z Y, LI C H. Species identification of *Coilia brachygnathus*, *C. nasus* and *C. nasus taihuensis* with SNP markers [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2019, 28(1): 10-19.
- [24] 邵晓阳, 黎道丰, 蔡庆华. 香溪河鱼类群落组成及资源评价[J]. *水生生物学报*, 2006, 30(1): 70-74.
- SHAO X Y, LI D F, CAI Q H. The composition of the fish community in Xiangxi bay and resources evaluation[J]. *Acta*

- Hydrobiologica Sinica, 2006, 30(1): 70-74.
- [25] 周家飞,王从锋,刘德富,等.葛洲坝下游近坝区水域鱼类资源声学调查与评估[J].长江流域资源与环境, 2014, 23(11): 1551-1557.
- ZHOU J F, WANG C F, LIU D F, et al. Hydro-acoustic investigation and assessment on fishes in the near downstream of Gezhouba Dam [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, 23(11): 1551-1557.
- [26] 王珂,李翀,段辛斌,等.三峡库区春季鱼类组成及分布特征[J].淡水渔业, 2013, 43(3): 44-48.
- WANG K, LI C, DUAN X B, et al. Composition and distribution of fish in spring in the Three Gorges Reservoir [J]. Freshwater Fisheries, 2013, 43(3): 44-48.
- [27] 计玉健,冯小检,陈冬元.三峡船闸完建期通过能力分析[J].中国水运, 2007(8): 46-47.
- Ji Y J, FENG X J, CHEN D Y. Analysis of the shiplock's passing capability during the final constructing period for Three Gorges project [J]. China Water Transport, 2007(8): 46-47.
- [28] 江耀祖,於三大,吴英卓,等.三峡船闸四级运行方式优化研究[J].人民长江, 2007, 38(11): 34-37.
- JIANG Y Z, YU S D, WU Y Z, et al. Optimization for 4 lift operation mode of TGP shiplock [J]. Yangtze River, 2007, 38(11): 34-37.
- [29] 董哲仁.水利工程对生态系统的胁迫[J].水利水电技术, 2003, 34(7): 1-5.
- DONG Z R. Stress of water projects on ecosystem [J]. Water resources and Hydropower Engineering, 2003, 34(7): 1-5.
- [30] 向经文,王从锋,刘德富,等.葛洲坝船闸过鱼时空特性研究[J].长江流域资源与环境, 2015, 24(3): 455-463.
- XIANG J W, WANG C F, LIU D F, et al. Temporal characteristics of fish passing through the Gezhouba ship lock [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(3): 455-463.

Characteristics of spatial distributions of fish community in upper and lower approach channels of the Three Gorges ship lock, Yangtze River

ZHU Jiazhil^{1,2}, GUO Wentao^{1,2}, HUANG Anyang^{1,2}, GAO Xingchen^{1,2}, JIANG Wei^{1,2}

(1. Chinese Sturgeon Research Institute, China Three Gorges Corporation, Yichang 443100, Hubei, China; 2. Hubei Key Laboratory of Three Gorges Project for Conservation of Fishes, Yichang 443100, Hubei, China)

Abstract: In order to assess the spatial distributions of fish community in upper and lower approach channels of the Three Gorges shiplock, the hydroacoustic surveys were carried out in January, May, October in 2018 and May 2019, respectively. Survey areas were set as: area I (Jingjiang River), area II (upper approach channel), area III (lower approach channel) and area IV (Sandouping section). Fish body length was estimated based on target strength and the estimates showed that fish body length in area I, area II and area IV ranged from 2.5 to 5.0 cm, while that in area III ranged from 7.0 to 20.0 cm. Average fish densities in area I, area II, area III and area IV were (99.53 ± 47.78) ind./1 000 m³, (57.37 ± 33.45) ind./1 000 m³, (61.51 ± 1.72) ind./1 000 m³ and (30.61 ± 15.75) ind./1 000 m³, respectively. The fish densities of low water levels in area I and area II were significantly higher than those of high water levels, while fish densities of lower water levels in area III were significantly lower than those of high water levels. Fishes in area I and area II were mainly distributed in middle-lower water layer at different periods, however fishes in area III tended to move to shallow water layer (less than 6 m) at high water levels, but deep water layer (more than 8 m) at low water levels. Spatial distributions of fishes in the upper and lower approach channels were greatly influenced by the water level of the Three Gorges reservoir and ships passing the lock.

Key words: spatial distribution; hydroacoustics; fish density; Three Gorges reservoir; approach channel