

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2018.17324

## 基于水声学的北江石角水库鱼类资源季节变动及行为特征研究

武智, 李捷, 朱书礼, 李新辉

中国水产科学研究院珠江水产研究所, 农业部珠江中下游渔业资源环境科学观测实验站, 广东 广州 510380

**摘要:** 石角水库位于广东省北江清远水利枢纽和飞来峡水利枢纽之间, 是北江干流第一座梯级电站河道型水库。由于水坝阻隔及其他人类涉水活动影响, 库区渔业资源呈严重衰竭趋势。为了解其鱼类资源现状, 采用分裂波束渔探仪 EY60 (120 kHz, 200 W) 于 2015—2016 年对库区鱼类资源及种群行为特征进行调查评估。结果显示, 鱼类密度、鱼类行为及垂直分布均存在明显的时空差异, 且鱼类个体呈现小型化。2015 年 12 月、2016 年 3 月和 2016 年 6 月鱼类平均密度分别为  $(0.008 \pm 0.0125)$  ind/m<sup>3</sup>、 $(0.1601 \pm 0.1123)$  ind/m<sup>3</sup> 和  $(0.0405 \pm 0.0449)$  ind/m<sup>3</sup>。不同季节鱼类密度存在显著差异 ( $P < 0.05$ ), 冬春季节 (12 月、3 月) 鱼类主要集中于库首区域, 夏季 (6 月) 库尾为高密度区域。从垂直分布来看, 鱼类主要分布于 4~12 m 水层, 且不同区域间存在显著差异 ( $P < 0.01$ )。不同季节鱼类洄游行为差异明显, 具体表现为夏季鱼类主要从库首向库尾水平洄游, 垂直方向为向下洄游, 而冬季则相反。本研究初步探明石角水库鱼类资源分布及其行为特征, 也表明声学方法在研究较大空间尺度鱼类行为方面的适用性, 研究结果可为北江渔业资源管理与保护提供参考依据。

**关键词:** 水声学; 石角水库; 鱼类资源; 时空分布; 行为特征

中图分类号: S932

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2018)03-0674-08

在自然环境中, 鱼类会根据环境因子进行栖息、索饵、繁殖、洄游等行为<sup>[1-2]</sup>。随着时间变化, 鱼类会产生垂直和水平迁移行为, 如何把握大尺度水体内的鱼类时空分布变化是传统鱼类调查的一大难题。声学技术在渔业资源调查中的应用不断成熟, 为解决该难题提供了一种有效途径<sup>[3]</sup>。Mello 等<sup>[2]</sup>通过几年的研究表明, 随着不同群体的水平迁移, 研究区域内鱼类资源量在不同季节存在显著差异, 夏季的鱼类密度比春季高达 4 倍; Appenzeller<sup>[4]</sup>曾对康士坦茨湖进行探测, 发现冬季至春季鱼类目标强度有向单峰分布的变化趋势, 而资源量则是由夏至秋呈双峰分布; Loures 等<sup>[5]</sup>对水电站尾水区研究表明, 鱼类密度雨季显著高于旱季。

北江是珠江流域第二大水系, 上游浈江、武江在韶关汇合后合称北江, 其支流有滙江、潞江、

连江、滨江和绥江, 河长 468 km (韶关至河口), 至山水与西江合流, 汇成珠江河网<sup>[6]</sup>。年平均水温为 18~22.5℃, 属于亚热带气候, 鱼类资源丰富, 历史资料记载北江共有鱼类 137 种<sup>[7-9]</sup>。北江出飞来峡后进入广东省的清远平原, 此段两岸地势平坦开阔, 河床多属沙泥底质。在清远市白庙洲心广东鲂、黄尾密鲮产卵场位于此, 该江段水面宽阔, 江中央有沙洲分布, 水文条件独特, 是广东鲂等鱼类理想的繁殖场所<sup>[7]</sup>。清远水利枢纽 2012 年建成后形成石角水库, 水坝阻隔了鱼类洄游通道, 库区形成后, 库区水位上升, 水流减缓, 鱼类群落结构发生巨大变化<sup>[10-11]</sup>。与建坝前比较, 库区江段鱼类种类数大大减少, 多种河口洄游性鱼类 [三线舌鲮 (*Cynoglossus trigrammus*)、日本鳗鲡 (*Anguilla japonica*)、七丝鲚 (*Coilia grayi*)、花鲢 (*Clupanodon thrissa*) 等]、半洄游性鱼类 [广东鲂 (*Megalobrama*

收稿日期: 2017-09-08; 修订日期: 2018-01-09.

基金项目: 中国水产科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费项目 (2017HY-ZC0705, 2017HY-ZC0704).

作者简介: 武智 (1988-), 男, 助理研究员. 研究方向为渔业资源及渔业声学. E-mail: wz@prfri.ac.cn

通信作者: 李新辉, 研究员. E-mail: lxhui01@aliyun.com

*terminalis*)、草鱼(*Mylopharyngodon piceus*)等]在库区消失, 或种群数量大大减少, 根据 2015—2016 年库区渔业资源调查结果表明, 目前库区的主要渔业对象为鲤(*Cyprinus carpio*)、鲮(*Cirrhina moitorella*)、麦瑞加拉鲮(*Cirrhina mrigola*)、赤眼鲮(*Squaliobarbus curriculus*)、海南红鲮(*Erythroculter recurviceps*)、广东鲂、鲫(*Carassius auratus*)、鳊(*Hemiculter leucisxulus*)等, 常见种类 20 余种。

石角水库是北江干流第一个梯级电站河道型水库, 自清远水利枢纽建成以来, 未有对该区域渔业资源相关的研究, 目前库区渔业资源状况不明。基于此, 该研究首次利用水声学技术对北江鱼类资源及其行为特征进行研究, 旨在掌握鱼类资源分布及其行为特征, 为北江渔业资源的合理开发利用、渔业可持续发展提供技术支持, 也为研究较大空间尺度范围内鱼类自然状态下行为提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 调查区域概况

调查区域为北江石角水库(23.80°N~23.59°N, 113.26°E~112.96°E), 北起飞来峡水库坝址下游约

3 km, 南至清远水利枢纽附近, 覆盖整个石角水库(图 1)。调查区域长约 30 km, 平均水深为 7.69 m, 最大水深为 14.63 m。将调查区域分为 3 个区域, I 区为石角水库库首区域, 几乎为静水, II 区为清远城区江段, III 区为库尾区域, 有缓慢水流。

### 1.2 声学调查

于 2015 年 12 月、2016 年 3 月和 2016 年 6 月使用 Simrad EY60 对研究区域进行了走航式调查。根据调查区域狭长的地理形状, 航线采用“之”字形路线, 考虑到调查水域的行船、礁石等影响, 具体路线根据实际情况进行实时调整。

调查船为渔政执法船, 长约 30 m, 换能器放置于流线型导流罩内, 使用钢管悬挂固定于船弦右侧, 垂直向下, 吃水约 0.5 m。船速约为 9 km/h, 方向从上游至下游。

探测系统: 分裂式波束渔探仪, 工作频率 120 kHz, 功率 200 W, -3dB 波束宽(beam width) 7.0°, 脉冲宽度(pulse duration)256 μs; Garmin 公司的 GPS 72H; 数据采集软件 ER60。

### 1.3 声学数据处理与分析

数据处理使用声学数据处理软件 Echoview 4.9。通过对回波图的观察, 发现调查区域鱼类密

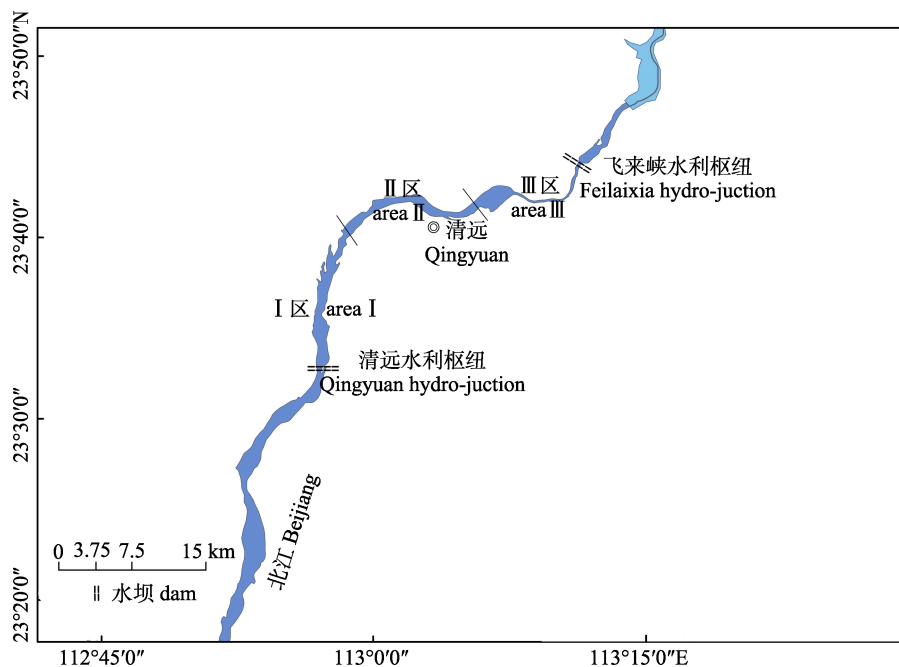


图 1 本研究调查区域

Fig. 1 Survey area in the study

度较低且单体回波多数无重叠,因此采用回波计数法<sup>[12]</sup>。目标阈值设置为-60 dB,其他参数参照文献[13-14]。体长与目标强度的关系使用 Love<sup>[15]</sup>单体鱼背向目标强度经验公式计算:

$$TS = 19.1 \log(L) - 0.9 \log(F) - 62.0 \quad (1)$$

式中,  $L$  为体长(cm),  $F$  为换能器频率(kHz)。

将调查区域分为一定长度的调查单元(EDSU),结合调查区域的形状,此次以 150 m 为 1 个 EDSU。对于每次调查数据,分为 200~250 个 EDSU,单独评估鱼类密度、个体分布和行为等<sup>[16]</sup>。

文中数据分析与作图均使用 SPSS 22 及 Origin 8.6。鱼类行为特征采用四分位距(interquartile range, IQR)来构建箱形图。分位数是将总体的全部数据按大小顺序排列,处于各等分位置的变量值。如果分成四等分,就是四分位数,即第一四分位数(Q1),第二四分位数(Q2, 又称“中位数”)和第三四分位数(Q3);四分位距,是第三四分位数和第一四分位数之差,用以统计变量的离散情况。

## 2 结果与分析

### 2.1 鱼类密度分布

2015 年 12 月、2016 年 3 月和 2016 年 6 月鱼类平均密度分别为(0.008±0.0125) ind/m<sup>3</sup>、(0.1601±0.1123) ind/m<sup>3</sup> 和(0.0405±0.0449) ind/m<sup>3</sup>,不同区域鱼类密度分布见表 1。对不同调查时间的鱼类密度进行方差齐性检验的  $P$  值小于 0.05,说明在显著性水平 0.05 下鱼类密度不服从正态分布。使

用非参数检验进行分析, Kruskal-Wallis 结果显示,不同调查时间鱼类密度存在显著差异( $P < 0.05$ )。整体来看,不同调查区域鱼类密度存在差异(2015 年 12 月:  $P < 0.005$ ; 2016 年 3 月:  $P < 0.01$ ; 2016 年 6 月:  $P < 0.01$ ),多重结果显示冬季(2015 年 12 月)和春季(2016 年 3 月)库首鱼类密度均显著高于其他区域( $P < 0.05$ ),而夏季(2016 年 6 月)库尾鱼类密度显著高于其他两个区域( $P < 0.05$ ),即不同时间鱼类有明显水平迁移行为,冬春季节鱼类主要分布于库首区域,夏季则洄游至库尾区域。从变异系数来看,鱼类多呈均匀分布(图 2a),库首区域变异系数大于 1,呈集群分布(图 2b)。

### 2.2 鱼类垂直分布

调查水域平均水深为 7.69 m,鱼类所处平均水深为 6.3 m,鱼类所处深度与水深呈显著正相关( $R = 0.87, P < 0.01$ )。鱼类主要分布在 4~12 m 水层(图 3),不同季节鱼类所处水深差异显著( $P < 0.05$ );不同区域目标所处水深存在显著差异( $P < 0.01$ ),I 区鱼类平均水深为 8.0 m,II 区鱼类平均水深为 5.2 m,III 区鱼类平均水深为 5.8 m。

### 2.3 目标强度分布

不同调查时间鱼类目标强度差异显著( $P < 0.01$ ),2015 年 12 月鱼类平均目标强度为(-48.77±8.03) dB,转换为体长约为 6 cm。其中>-45 dB (10 cm)的鱼体信号占总数的 38%;鱼类 TS 从库首至库尾有减小趋势,其中 I 区 TS 95%置信区间为-48.31~-46.04 dB,II 区 TS 95%置信区间为(-56.36~-49.37) dB,III 区 TS 95%置信区间为

表 1 北江石角水库不同时间不同区域鱼类密度分布

Tab. 1 Fish density distribution in different periods in Shijiao reservoir, Beijiang River

调查时间 survey period	调查区域 survey area	极小值 min	极大值 max	均值±标准差/(ind/m <sup>3</sup> ) $\bar{x} \pm SD$	95%置信区间/(ind/m <sup>3</sup> ) 95% confidence interval	变异系数 coefficient of variance
2015 年 12 月 December 2015	I 区 I area	0.000660	0.081074	0.0140±0.0174	0.0079~0.019	1.2438
	II 区 II area	0.000379	0.012167	0.0044±0.0034	0.0026~0.0063	0.7611
	III 区 III area	0.000613	0.012907	0.0049±0.0034	0.0036~0.0062	0.6977
2016 年 3 月 March 2016	I 区 I area	0.123168	0.467749	0.2502±0.0691	0.2304~0.2701	0.2761
	II 区 II area	0.000000	0.501308	0.1031±0.0982	0.0784~0.1279	0.5302
	III 区 III area	0.013440	0.140359	0.0770±0.0408	0.0478~0.1062	0.9524
2016 年 6 月 June 2016	I 区 I area	0.001118	0.089989	0.0190±0.0207	0.01312~0.0249	1.0851
	II 区 II area	0.004061	0.180326	0.0432±0.0338	0.0373~0.04912	1.0849
	III 区 III area	0.026956	0.446772	0.1045±0.1189	0.0246~0.1843	0.7809

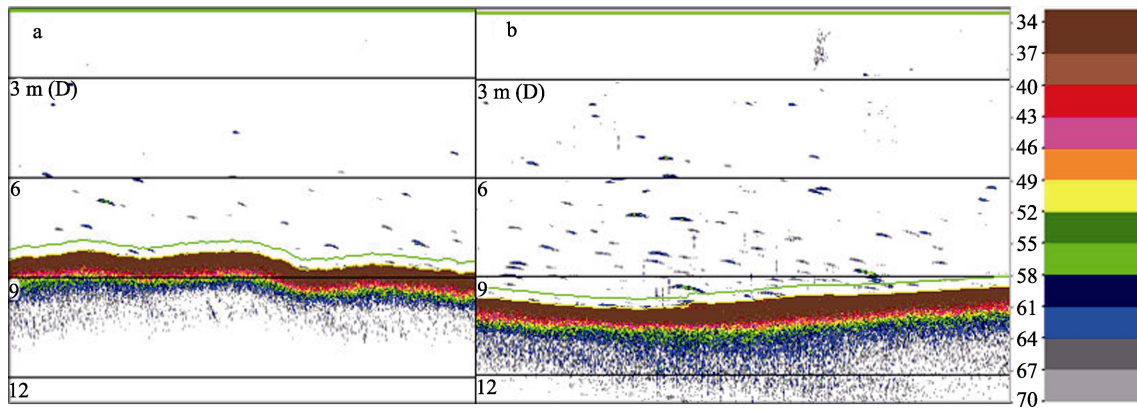


图 2 北江石角水库不同分布特征鱼类的回波图

a. 鱼类分散分布, b. 鱼类聚群分布, 两图采用相同的图例(最小阈值为-70 dB).

Fig. 2 Different features of fish in the echogram in Shijiao Reservoir, Beijiang River

a. Dispersed fish; b. Assembled fish. The two diagrams use the same legend (minimum threshold is -70 dB).

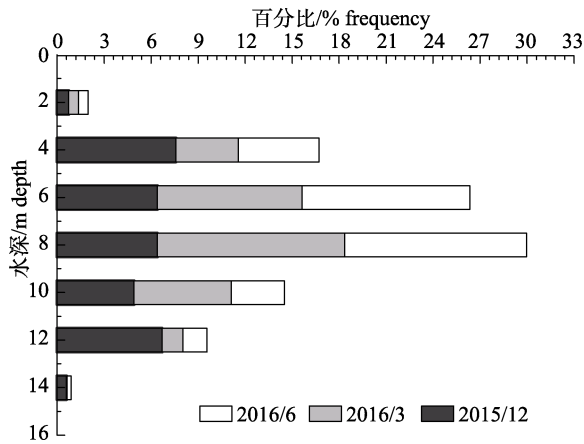


图 3 北江石角水库不同时间鱼类垂直分布

Fig. 3 Vertical distribution of the fishes in different periods in Shijiao Reservoir, Beijiang River

-56.81~ -51.60 dB; 2016年3月鱼类平均目标强度为(-54.14±3.88) dB(3.23 cm), 其中>-45 dB(10 cm)鱼体信号约占总数的 2.97%, TS 在不同区域无明显差异; 2016年6月鱼类平均目标强度为(-54.86±4.52) dB(2.96 cm), 其中大于-45 dB(10 cm)的鱼体信号约占总数的 5.94%。

### 2.4 鱼类行为特征

通过对鱼类相对游泳速度、所处水层深度、洄游方向(垂直方向和水平方向变化)的研究来体现石角水库调查期间鱼类行为。如图 4 所示, I 区和 II 区 50%鱼类相对游泳速度在 1.6~3.0 m/s, 而 III 区 50%鱼类相对游泳速度在 2.8~3.5m/s, 表明库尾鱼类游泳速度大于其他区域; 鱼类所处水深在不同区域亦存在差异, I 区鱼类处在较深水层,

且 2016 年 6 月鱼类所处水深变化范围(IQR)较 2015 年 12 月小; 鱼类洄游方向可以根据目标与换能器之间的角度(水平方向角度变化范围 0°~360°, 垂直方向为-90°~90°)描述其迁移方向。从图中可以看出, 冬季目标水平方向范围(IQR)主要位于 280°~340°之间, 即鱼类游泳方向与调查船方向一致, 夏季目标水平方向范围(IQR)主要位于 160°~180°之间, 说明鱼类游泳方向与调查船方向相反, 即从库首区域(I 区)向库尾区域(III 区)游动, 这一结果与鱼类密度分布情况相互佐证; 不同调查时间鱼类垂直变化差异明显, 体现在鱼类垂直洄游方向上。冬季调查区域鱼类垂直变化范围(IQR)为正数, 其主要表现为鱼类向上洄游, 而夏季鱼类垂直变化(IQR)为负值, 主要表现为鱼类向下洄游。

### 3 讨论

鱼类的分布特征与其生态习性、栖息地、环境因素等密切相关<sup>[17-19]</sup>。研究结果初步掌握了石角水库鱼类水平分布及季节变动特征, 主要表现为在冬春季节, 鱼类主要分布在库首区域(I 区), 夏季则洄游至库尾区域(III 区), 相关研究也有类似结果<sup>[16, 20-21]</sup>, 上述结果中鱼类行为特征(水平洄游方向)亦支撑了这一结果。冬季和春季随水温降低鱼类逐步进入越冬场, 深水区不仅可提供不同规格个体喜好的环境, 同时也可提供更多的容纳空间<sup>[22]</sup>; 在夏季, 库尾流水区域营养比较丰富

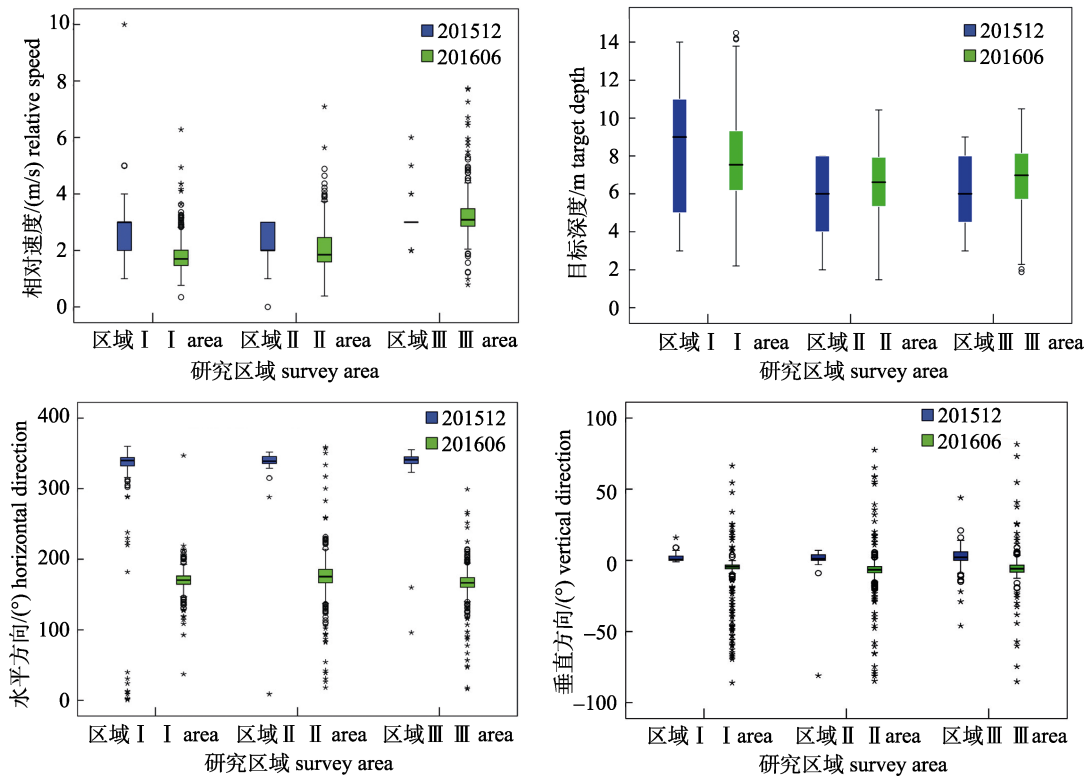


图 4 北江石角水库 2015 年 12 月和 2016 年 6 月鱼类不同行为指标的箱图

图中两端边的位置分别对应数据的上下四分位数, 箱内线为中位数, 圆圈为离群值, 五角星为异常值。

Fig. 4 Box plot of various behavioral descriptors of fish in Shijiao Reservoir, Beiji River in December 2015 and June 2016

Fifty percent of the samples (box) are within the first quartile (bottom of the box) and the third quartile (top of the box)

The minimum and maximum values (bars) are shown. The circles and stars represent mild outliers and extreme outliers respectively.

且逐渐向库首递减, 因此这一区域成为初级生产力最高的区域, 且成为鱼类繁殖的重要区域<sup>[16]</sup>。5—6 月为北江鱼类主要繁殖季节<sup>[10]</sup>, 大量鱼类洄游至上游的流水区进行产卵活动, 这也是影响鱼类分布特征的一个重要因素。

春季鱼类密度远高于其他季节, 主要原因是 3 月份采样之前北江上游下暴雨, 飞来峡水库泄洪, 调查江段水流浑浊, 含沙量高, 回波映像中噪声较大, 对调查结果造成一定影响。冬季调查期间水文特征相对稳定, 鱼类回波多呈分散分布, 更适合声学调查及资源评估。因此, 调查时间的选取, 亦会对调查结果的准确性产生影响。

渔业资源声学评估中, 种类鉴别是一个难点。通常研究人员采用声学调查结合渔获物采样来分配积分值, 以评估资源量<sup>[23-24]</sup>。此次调查过程中未进行渔获物采样, 缺乏对调查区域鱼类群落结构、组成现状的了解。鉴于目前缺乏特定种类 TS 值与鱼体大小关系的系统研究,

无法准确根据鱼类 TS 值计算出相应的鱼类大小, 因此借鉴国外学者的经验公式。鱼类 TS 值受脉冲发射频率、鱼类在波束中的位置、游泳行为和河环境等因素影响<sup>[25-28]</sup>, 因此估算出来鱼类尺寸大小会与实际有所偏差。但对于讨论不同季节鱼类资源的相对变化影响不大, 且能够较为准确地反映库区资源空间结构分布。本研究主要参考了常用的几种经验公式进行换算<sup>[29-31]</sup>, 结果表明, love<sup>[15]</sup>换算结果比较接近近年来实际捕捞情况, 因此选取此模型来转换目标强度与体长之间的关系。调查区域鱼类平均目标强度较小, 即小个体鱼类所占比例较大。资料记载, 由于捕捞强度过大和开捕年龄过低, 使得北江经济鱼类种群结构恶化, 从前的珍贵鱼类已非常稀少, 如唇鲮 (*Semilebeo notabilis*)、桂华鲮 (*Sinilabeo decorus*) 等, 而小型鱼类如宽鳍鱮 (*Zacco platypus*)、鲮、马口鱼 (*Opsariichthys bidens*)、银鮡 (*Squalidus argentatus*) 等成为了北江的主要经济种类<sup>[10-11]</sup>。这

也与 Jennings 等<sup>[32]</sup>的理论一致, 即当环境发生变化时, 小个体鱼类相较于大个体, 具有更强的繁殖和快速生长能力, 并且可以替代大个体鱼类成为这一区域的优势种类。

了解鱼类在河流中的行为是非常必要的, 其主要意义在于以下3点: (1)可为设计生态友好型、选择性较高的网具提供基础数据; (2)为渔业工程, 如人工鱼礁/鱼巢、过鱼通道等的设计提供参考依据<sup>[33]</sup>; (3)研究目的亦从过去的以提高捕捞效率为主转变为当前的以保护为主。如在麦克纳瑞大坝, 由于缺乏对洄游鲑行为的了解, 因此过鱼设施的效果与设计时的预期存在差距<sup>[34]</sup>; Rice 等<sup>[35]</sup>利用一些鱼类在繁殖期会发出声音的特点, 采用被动声呐对石首鱼及鳙鱼繁殖群体的时空分布进行了研究。相关研究表明在自然无干扰状态下鱼类游泳速度在 0.08~0.5 m/s 之间<sup>[36-37]</sup>, 此次结果显示鱼类相对游泳速度分布于 1.5~3.5 m/s。由于此次调查船体较大, 且航速设定, 可认为此次调查为匀速走航, 因此相对游泳速度可以用来指示不同时期鱼类游泳行为。鱼类所处水深显示出不同时间鱼类对水深的偏好, 水平及垂直变化反映了不同时期鱼类定向迁移的变化趋势。总体上, 该研究初步掌握了不同时间北江清远段鱼类水平垂直洄游规律, 及鱼类在不同季节的行为特征。当前, 梯级阻隔造成自然河流破碎化, 因此在已建电站上加建过鱼通道成为缓减水坝建设产生负面生态效应的一种方法, 北江已有成功案例<sup>[38]</sup>, 且目前已推广至北江及东江其他水电站。成功的鱼道设计需结合鱼类行为特征, 因此研究结果可为北江渔业可持续发展及渔业工程设计提供参考。

#### 参考文献:

- [1] Su W, Xue Y, Zhang C, et al. Spatio-seasonal patterns of fish diversity, Haizhou Bay, China[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2015, 33(1): 121-134.
- [2] Mello L G S, Rose G A. Seasonal variation in abundance and stock composition of Atlantic cod (*Gadus morhua* L.) in Placentia Bay, Newfoundland, in relation to fisheries[J]. Fisheries Research, 2005, 74(1-3): 142-156.
- [3] Sun M B, Gu X H, Zeng Q F, et al. Seasonal and daily spatial distribution offish in Lake Tianmu based on the hydroacoustic method[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(17): 5597-5605. [孙明波, 谷孝鸿, 曾庆飞, 等. 基于水声学方法的天目湖鱼类季节和昼夜空间分布研究[J]. 生态学报, 2015, 35(17): 5597-5605.]
- [4] Appenzeller A R. Seasonal variability patterns of acoustic estimates of fish biomass and fish size in a lake dominated by coregonids (Lake Constance)[J]. Ergebnisse Der Limnologie, 1998, 50: 227-236.
- [5] Loures R C, Pompeu P S. Seasonal and diel changes in fish distribution in a tropical hydropower plant tailrace: evidence from hydroacoustic and gillnet sampling[J]. Fisheries Management and Ecology, 2015, 22(3): 185-196.
- [6] Lara-Lopez A L, Davison P, Koslow J A. Abundance and community composition of micronekton across a front off Southern California[J]. Journal of Plankton Research, 2012, 34(9): 828-848.
- [7] Pan J H, Liu C H, Zheng W B. Studies on the fish fauna of the Beijiang River, Guangdong Province[J]. Journal of South China Normal University: Natural Science Edition, 1984(1): 27-40. [潘炯华, 刘成汉, 郑文彪. 广东北江鱼类区系研究[J]. 华南师范大学学报: 自然科学版, 1984(1): 27-40.]
- [8] Zhao J, Chen X L, Lan Z J, et al. Fish resource assessment of Beijiang River, Guangdong Province[C]//Nanchang: Chinese Ichthyological Society, 2008: 119-120. [赵俊, 陈湘舜, 蓝昭军, 等. 广东北江鱼类资源现状评估[C]//南昌: 中国鱼类学会, 2008: 119-120.]
- [9] Li J, Li X H, Jia X P, et al. Relationship between fish community diversity and environmental factors in the Lianjiang River, Guangdong, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(18): 5795-5805. [李捷, 李新辉, 贾晓平, 等. 连江鱼类群落多样性及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2012, 32(18): 5795-5805.]
- [10] LI G F. Investigation and Research on Freshwater Fish Resources of Guangdong[M]. Beijing: Science Press, 2013: 53-87. [李桂峰. 广东淡水鱼类资源调查与研究[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 53-87.]
- [11] Shuai F M, Li X H, Liu Q F, et al. Spatial patterns of fish diversity and distribution in the Pearl River[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(9): 1-11. [帅方敏, 李新辉, 刘乾甫, 等. 珠江水系鱼类群落多样性空间分布格局[J]. 生态学报, 2017, 37(9): 1-11.]
- [12] Simmonds J, MacLennan D N. Fisheries Acoustics: Theory and Practice[M]. John Wiley & Sons, 2008.
- [13] Rudstam L G, Parker-Stetter S L, Sullivan P J, et al. Towards a standard operating procedure for fishery acoustic surveys in the Laurentian Great Lakes, North America[J]. ICES Journal of Marine Science, 66(6): 1391-1397.



- [14] Tan X, Kang M, Tao J, et al. Hydroacoustic survey of fish density, spatial distribution, and behavior upstream and downstream of the Changzhou Dam on the Pearl River, China[J]. Fisheries Science, 2011, 77(6): 891-901.
- [15] Love R H. Dorsal - aspect target strength of an individual fish[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1971, 49(3B): 816-823.
- [16] Draštik V, Kubečka J, Tušer M, et al. The effect of hydropower on fish stocks: comparison between cascade and non-cascade reservoirs[J]. Hydrobiologia, 2008, 609(1): 25-36.
- [17] Jones I D, Winfield I J, Carse F. Assessment of long-term changes in habitat availability for Arctic charr (*Salvelinus alpinus*) in a temperate lake using oxygen profiles and hydroacoustic surveys[J]. Freshwater Biology, 2008, 53(2): 393-402.
- [18] Liu Z L, Yang L L, Yan L P, et al. Fish assemblages and environmental interpretation in the northern Taiwan Strait and its adjacent waters in summer[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2016, 23(6): 1399-1416. [刘尊雷, 杨林林, 严利平, 等. 夏季台湾海峡北部及邻近海域鱼类群落结构及环境解释[J]. 中国水产科学, 2016, 23(6): 1399-1416.]
- [19] Yan T L, Xu Z L. Analysis of different spatial fish communities in a sand ridge and tidal creek system in the central North Jiangsu shoal, China[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2016, 23(6): 1389-1398. [严太亮, 徐兆礼. 苏北浅滩中部典型沙脊潮沟海域不同空间鱼类群落结构的分析[J]. 中国水产科学, 2016, 23(6): 1389-1398.]
- [20] Matthews W J, Gido K B, Gelwick F P. Fish assemblages of reservoirs, illustrated by Lake Texoma (Oklahoma-Texas, USA) as a representative system[J]. Lake and Reservoir Management, 2004, 20(3): 219-239.
- [21] Tan X, Chang J, Tao J, 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.
- [22] Chen W J, He G, Wu B, et al. Spatial distribution and biomass assessment of fish in the channel connecting the lake poyang and the Yangtze River[J]. Journal of Lake Sciences, 2017, 29(4): 923-931. [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[J]. 湖泊科学, 2017, 29(4): 923-931.]
- [23] Zhang J, Jiang Y E, Chen Z Z, et al. Preliminary study on the nautical area scattering coefficient and distribution of mesopelagic fish species in the central-southern part of the South China Sea[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2017, 24(1): 120-135. [张俊, 江艳娥, 陈作志, 等. 南海中南部中层鱼资源声学积分值及时空分布初探[J]. 中国水产科学, 2017, 24(1): 120-135.]
- [24] Chen G B, Li Y Z, Zhao X Y, et al. Acoustic assessment of commercial fish resources in the northern waters of South China Sea[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2005, 12(4): 445-451. [陈国宝, 李永振, 赵宪勇, 等. 南海北部海域重要经济鱼类资源声学评估[J]. 中国水产科学, 2005, 12(4): 445-451.]
- [25] Francis D T I, Foote K G. Depth-dependent target strengths of gadoids by the boundary-element method[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2003, 114(6): 3136-3146.
- [26] Geoffroy M, Rousseau S, Knudsen F R, et al. Target strengths and echotraces of whales and seals in the Canadian Beaufort Sea[J]. ICES Journal of Marine Science, 2016, 73(2): 451-463.
- [27] Lin D Q, Zhang H, Li J Y, et al. Target strength of four freshwater cultured fish species and avariance analysis[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2017, 24(1): 1-10. [蔺丹清, 张辉, 李君轶, 等. 4种常见淡水养殖鱼类目标强度测定与差异分析[J]. 中国水产科学, 2017, 24(1): 1-10.]
- [28] Chen G B, Li N N, Chen P M, et al. Target strength measurements of pearl-spotted spinefoot (*Siganus oramin*) in the South China Sea[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2010, 17(6): 1293-1299. [陈国宝, 李娜娜, 陈丕茂, 等. 南海黄斑蓝子鱼的目标强度测量研究[J]. 中国水产科学, 2010, 17(6): 1293-1299.]
- [29] Love R H. Target strength of an individual fish at any aspect[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1977, 62(6): 1397-1403.
- [30] Foote K G. Fish target strengths for use in echo integrator surveys[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1987, 82(3): 981-987.
- [31] Frouzova J, Kubecka J, Balk H, et al. Target strength of some European fish species and its dependence on fish body parameters[J]. Fisheries Research, 2005, 75(1-3): 86-96.
- [32] 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.
- [33] Zhou Y Q. Applied Ichthyology[M]. Beijing: Science Press, 2011: 4-10. [周应祺. 应用鱼类行为学[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 4-10.]
- [34] Kemp P S, Gessel M H, Williams J G. Response of downstream migrant juvenile Pacific salmonids to accelerating flow and overhead cover[J]. Hydrobiologia, 2008, 609: 205-217.
- [35] Rice A N, Morano J L, Hodge K B, et al. Spatial and

- temporal patterns of toadfish and black drum chorusing activity in the South Atlantic Bight[J]. *Environmental Biology of Fishes*, 2016, 99(10): 705-716.
- [36] Rose G A. A review of problems and new directions in the application of fisheries acoustics on the Canadian East Coast[J]. *Fisheries Research*, 1992, 14(2): 105-128.
- [37] Wang Z, Tian S, Yi Y, et al. Principles of river training and management[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2007, 22(4): 247-262.
- [38] Li J, Li X H, Pan F, et al. Preliminary study on the operating effect of Xiniu Fishway in Lianjiang River[J]. *Journal of Hydroecology*, 2013, 34(4): 53-57. [李捷, 李新辉, 潘峰, 等. 连江西牛鱼道运行效果的初步研究[J]. *水生态学杂志*, 2013, 34(4): 53-57.]

## Seasonal variation of fish density and behavior in Shijiao Reservoir, Beijiang River by using hydroacoustic methods

WU Zhi, LI Jie, ZHU Shuli, LI Xinhui

Pearl River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences; Experimental Station for Scientific Observation on Fishery Resources and Environment in the Middle and Lower Reaches of Pearl River, Ministry of Agriculture, Guangzhou 510380, China.

**Abstract:** Beijiang River, the second largest river of the Pearl River Basin, is an important species gene pool which has 143 species fish in datum. Shijiao reservoir is the first cascade river-type reservoir between Qingyuan hydro-junction and Feilaixia hydro-junction. Because of the blocking effect and other human activities, fishery resources had a declined tendency. Up to now, no relative research was reported in this area since the hydro-junction was built, so the actualities of fishery resource is unknown. To understand the current situation of fish resource, a split beam echosounder EY60 (120 kHz, 200 W) was used to survey the fish resource and behavior feature from 2015 to 2016 in different seasons. All the surveys were divided into a certain elementary distance sampling unit EDSU, so that for every survey, 200–250 EDSU with independent estimates of biomass, density and behavior were available. Echoview 4.9 was used to process acoustic data. The results show that there was significant difference in fish density, behavior feature in different survey periods and different survey areas. The average fish density in the survey area was  $(0.008\pm 0.0125)$  ind/m<sup>3</sup> in December 2015,  $(0.1601\pm 0.1123)$  ind/m<sup>3</sup> in March 2016 and  $(0.0405\pm 0.0449)$  ind/m<sup>3</sup> in June 2016 respectively. Fish individuals had evident seasonal variation tendency, characterized that fish mainly resided in dam area in winter and spring and migrated to upstream area in summer. According to the vertical distribution data, fish mainly distributed in 4–12 m layers and the distribution had significantly difference in different area ( $F=12.35$ ,  $P<0.01$ ). Fish's behaviors such as swimming speed, swimming direction and depth preference were significantly different in different season. Take migration direction as examples, fish mainly migrated horizontally from dam area to upstream area and swimming down in vertical direction in summer, winter has opposite situation. As a whole, this study reveals a clear pattern of fish distribution, migration and behavior feature in different season, and shows the applicability of acoustic method to study fish behaviors in large scale area. The results can provide reference for fishery resources sustainable development and fishery engineering design of Beijiang River.

**Key words:** hydroacoustic; Shijiao Reservoir; fish resource; temporal-spatial distribution; behavior feature

**Corresponding author:** LI Xinhui. E-mail: lxhui01@aliyun.com