

安庆西江长江江豚饵料鱼资源评估^{*1}

连玉喜 杨晓鸽 万安 陈敏敏 张晓可 于道平*

(安庆师范大学水生生物保护与水生态修复安徽省高校工程技术研究中心, 安徽安庆 246133)

【摘要】: 安庆西江是长江江豚(*Neophocaena asiaeorientalis asiaeorientalis*)迁地保护的重要基地, 为评估西江长江江豚饵料资源的供给能力, 于2016年8月和2017年1月采用水声学探测与电捕取样相结合的方法, 评估了西江水域鱼类群落结构和长江江豚可持续利用的鱼类资源。共采集到鱼类5目8科34种, 夏季鱼类密度为 $1.4 \sim 5662.3 \text{ ind./1000m}^3$, 均值为 $253.3 \text{ ind./1000m}^3$; 冬季鱼类密度为 $0.8 \sim 2338.1 \text{ ind./1000m}^3$, 均值为 $127.5 \text{ ind./1000m}^3$ 。基于平均生物量和P/琿B系数估算了西江鱼类生产力, 并根据 $Y=0.5P$ 对江豚可持续利用的饵料鱼产量进行了估算, 西江可持续供长江江豚摄食的鱼类资源量约为 $3050 \sim 40800 \text{ kg/a}$ 。为防止凶猛性鱼类种群过度发展与长江江豚争夺饵料资源, 建议加强对西江鱼类群落的持续监测, 并在必要时进行人工合理调控。

【关键词】: 西江; 水声学; 长江江豚; 现存量; 最大持续产量

【中图分类号】: S932.4 **【文献标识码】**: A **【文章编号】**: 1004-8227(2018)05-1051-10

DOI:10.11870/cjlyzyyhj201805012

长江江豚(*Neophocaena asiaeorientalis asiaeorientalis*)是窄脊江豚的长江亚种, 主要分布于长江中下游干流及洞庭湖和鄱阳湖两个大型通江湖泊^[1~3], 可能是目前长江仅存的淡水鲸类。然而由于食物资源减少、渔业捕捞伤害、航运干扰、水体污染和水工建设等因素的影响, 长江江豚生存现状日益恶化^[3, 4], 其种群数量已由1984年的2500头下降至2012年的1040头, 种群规模在急剧下降, 如果不及时采取合理的保护措施, 未来数十年内该物种或将走向灭绝^[5~7]。因此加强长江江豚的保护已经刻不容缓, 而其中重要的保护措施之一就是迁地保护^[8, 9]。

目前已建立的长江江豚迁地保护区主要有长江天鹅洲白鱔豚国家级自然保护区、铜陵淡水豚国家级自然保护区和何王庙/集成皖长江江豚省级自然保护区, 这些迁地保护区在长江江豚种群保护与研究等方面起到了很大作用, 但同时也面临着近亲繁殖和环境容纳量有限等问题, 因此, 在合适水域迅速建立新的保护区显得非常紧迫。位于安庆吉阳矾水道的西江长江故道即在筹建之列, 安庆西江($30.44^\circ \sim 30.478^\circ \text{ N}$, $116.87^\circ \sim 116.92^\circ \text{ E}$)系长江下游典型的鹅头型河道, 由长江改道形成, 上游入口处封阻, 下游出口通过节制闸和拦网与长江干流相通。全长8.7km, 丰水期平均宽度350m, 面积 300 hm^2 , 平均水深8.7m(图1), 水域环境非常接近长江江豚的自然栖息地环境。安庆西江于2007年成立了长江江豚救护中心, 2014年4月成功救护了5头长江江豚, 并顺利繁殖一头幼豚。2016年11月10日, 6头来自长江干流和2头来自天鹅洲白鱔豚国家级自然保护区的江豚一同迁入西江。

¹ 收稿日期:2017-06-26; 修回日期:2017-09-27

基金项目: 安庆师范大学博士科研启动经费; 安徽省教育厅自然科学研究重点项目(KJ2018A0377; KJ2018A0376; KJ2017A370)。

作者简介: 连玉喜(1986~), 博士, 研究方向为渔业生态学。E-mail: lianyx177@163.com

***通讯作者** E-mail: ahyudp@126.com

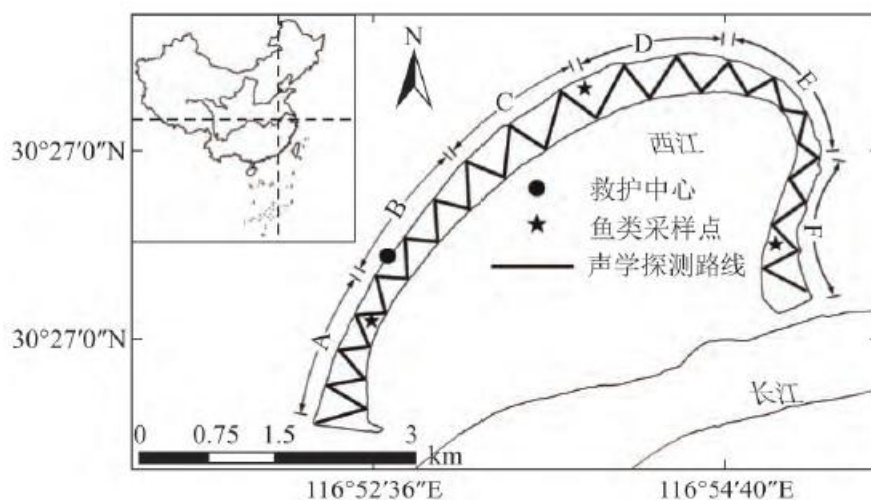


图 1 西江水声学探测路径及鱼类取样点

Fig. 1 Acoustic route and fish sampling sites
in Xijiang Oxbow

在迁地保护区中，动物受人类活动影响较小，食物是限制其生存和发展的关键因素之一。长江江豚在自然水域主要捕食鱼类和虾类^[8]。西江在成立江豚救护中心之前为渔业水面，在救护中心成立之后不再开展渔业生产。因此，采用可靠手段对西江长江江豚救护中心的鱼类资源和时空动态进行评估，了解其资源现状和生产潜力，可以为救护基地的合理规划和管理提供科学依据，有利于维持救护基地的稳定运行和江豚种群的健康发展。

1 材料与方法

1.1 水声学探测

水声学探测时间为2016年8月20~21日18:00~21:00，2017年1月16~17日18:00~21:00，夜晚探测是为了减小鱼类昼夜迁移行为可能对评估结果产生的影响^[10~12]。回声探测仪采用BioSonics公司生产的BioSonicsDT-X，200kHz分裂波束回声探测仪。换能器-3dB波束为 $6.8^{\circ} \times 6.8^{\circ}$ ，通过不锈钢制换能器支臂固定在探测船只右舷，距离船首1/3船体长度，入水深度0.3m，波束垂直向下发射。回声探测仪与笔记本电脑相连，实时显示和存储数据。采用GPS(Garmin60CSx)来实时确定探测位置。探测之前采用标准校正球对换能器进行校正，步骤按标准方法进行^[13]。调查时脉冲宽度设置为0.2ms，脉冲发射频率为10pings/s。探测船只长4.68m、宽度1.72m，功率20HP，探测时航速保持5.5~6.5km/h，沿“Z”字形路线进行探测。为便于进行描述，将西江按长度平均划分成A、B、C、D、E、F6段水域(图1)。

1.2 鱼类群落结构调查

在水声学探测期间，进行鱼类群落取样，取样方法为电捕，采集工具为背式电鱼器(CWB-2000P，输入电压12V，输出电压500V)，每个样点电击0.5h，电击距离约200m，收集所有捕获鱼类。采集后的标本在新鲜状态下进行鉴定、测量和统计。种类鉴定、空间生态位和营养生态位划分参照《中国动物志》^[14, 15]、《太湖鱼类志》^[16]、《江苏鱼类志》^[17]。测量长度精确到1mm，重量精确到0.1g。

1.3 水声学数据分析及处理

水声学数据采用 Echoview(ver. 5.2) 分析。表层设定一条深度为 1m 的线排除来自表层的噪音, 底线通过 Echoview 软件的最优候选算法自动绘出, 并根据需要进行人工修正, 表层线以上和底线以下的区域被排除分析。此外, 一些明显的噪音, 譬如由其他船只螺旋桨或声呐所引起的噪音被定义为坏数据不予分析。清理除噪后的回声映像通过回声积分法分析, 水层厚度设定为 3m, 以 400pings 为一个积分单元, 长度约为 50m, 根据船速稍有变化。为了计算鱼类密度, 首先创建一个新的单体回波的回声映像, 用以产生计算平均目标强度(Target Strength, TS)所需的单体回波。我们采用“singletargetdetectionsplitbeammetho2”来作单体回波检测, 用来判定单体回波检测(SED)的参数如下:TS 阈值=-66dB; 脉冲宽度决定水平=6dB; 最小标准脉宽=0.4; 最大标准脉宽=1.5; 最大波束补偿(2ways)=6dB; 短轴角度最大标准偏差=0.6; 长轴角度最大标准偏差=0.6。

鱼类 TS 值和鱼体全长(Total Length, TL)的换算公式采用鲤的 TS-TL 换算公式: $TS=23.971\lg TL-103.9$ [18]。鱼体全长和重量之间的换算, 采用根据电捕渔获物建立的多种鱼类混合的回归关系式: $W=a*TL^b$ 。

以 400pings 为一个积分单元, 采用回声积分法估算各探测单元的鱼体密度, 取各探测单元中心的 GPS 位点信息, 基于反距离插值法运用 ArcGIS 绘制西江鱼类水平分布图。

1.4 江豚潜在饵料鱼

根据研究, 大多数捕食者对猎物种类、大小存在着一定的选择性 [19]。江豚是长江中的顶级捕食者, 其在自然水域主要捕食鱼类和虾类 [8]。尽管目前有关江豚食性的系统性研究较少, 然而, 根据已有的研究, 一些鱼类所具有的特征: 有毒的硬棘, 如鳊; 较大的体高, 如鳊、团头鲂等; 迅捷的速度, 如鳊等, 使得其不适合作为江豚的食物, 因而在江豚食物中的所占比例较低 [8, 20]。

此外, 由于江豚只能整个吞咽食物, 因此其对饵料鱼大小具有一定的选择性, 通常捕食个体较小的饵料鱼 [21]。研究发现, 能否被白鱈豚吞下取决于饵料鱼的体高, 体长 1.45m, 与成年江豚体长相近的白鱈豚可摄食饵料鱼的最大体高为 5.4~7.1cm, 最大体重为 110~225g [22]。由此类比, 对于口裂与白鱈豚类似的江豚来说, 是否可被其摄食同样取决于饵料鱼的体高。根据鲤体长-体高回归关系 ($H=0.2521*TL-0.3772$, $n=52$, $R^2=0.9858$, 单位 mm, 未发表数据) 进行计算, 6cm 体高对应的鲤体全长约为 25.2cm; 根据鲤的体长-体重关系式: $W=0.0149*TL^{2.966}$ (cm, g, $R^2=0.987$) [23], 25.2cm 鲤的体重为 216g, 而人工投喂江豚的饵料鱼通常不超过 300g [20, 21]。因此, 本文在计算时, 将体高不超过 6cm 或体长不超过 25cm 作为江豚适口性饵料鱼选择的标准。

1.5 西江持续供饵料能力评估

评估西江持续为长江江豚供给饵料鱼的能力, 首先需要计算出西江长江江豚潜在饵料鱼的生产力, 然后再根据饵料鱼的生产力, 对饵料鱼的最大持续鱼产量作出估算。

鱼类生产力估算通常需要调查鱼类种群规模、增长率和死亡率等参数, 过程比较繁琐耗时。有学者提出通过 P/B 系数和平均生物量来估算鱼类生产力, 尽管较为粗略, 但不失为一条捷径 [24, 25], 本文暂以此法对西江鱼类生产力进行估算, 在计算时以夏季和冬季水声学探测的平均鱼类资源现存量代表平均生物量。根据研究, 河流中一些鱼类的 P/B 系数约为 1.0~1.5 [24], 而湖泊中大多小型鱼类的 P/B 系数为 1.0~2.5 [26, 27]。西江的水文环境介于河流与湖泊之间, 因此, 我们在估算西江鱼类生产力时 P/B 系数取 1.5~2.0。最大持续产量(Maximum Sustainable Yield, MSY)估算采用公式: $Y=0.5P$ [28], Y —最大持续产量; P —鱼类生产力。

2 结果

2.1 鱼类种类组成及比例

两次调查发现鱼类 34 种，共计 588 尾，隶属 5 目 8 科(表 1)。其中，鲤科种类最多，26 种，占总种数的 76.5%；沙塘鳢科 2 种，占总种数的 5.9%；鲢科、银鱼科、鲮科、鮰科、吻虾虎鱼科、月鳢科各 1 种，分别占总种数的 2.9%。

表 1 西江渔获物种类组成及生态类型

科	种	空间生态位	营养生态位	全长 (mm)	数量比例 (%)		重量比例 (%)	
					夏季	冬季	夏季	冬季
鲢科 Engraulidae	刀鲚 <i>Coilia nasus</i>	中、下层	杂食性	159-260	1.5	1	0.2	0.1
银鱼科 Salangidae	陈氏新银鱼 <i>Neosalanx tangkahkeii</i>	上层	浮游动物食性	53-78	2.1	0	0	0
	草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>	中、下层	草食性	194-379	1	0.8	7.3	3.3
	鳊 <i>Elopichthys bambusa</i>	中、上层	肉食性	142-327	0.9	0.8	6.2	5.3
	鳊鱼 <i>Pseudolaubuca sinensis</i>	上层	杂食性	101-331	1.9	0	4.8	0
	鳊 <i>Hemiculter leucisculus</i>	上层	杂食性	69-175	5.5	5.6	0.5	1.1
	贝氏鳊 <i>Hemiculter bleekeri</i>	上层	杂食性	68-147	2.3	8.2	0.2	0.7
	似鳊 <i>Toxabramis swinhonis</i>	中、上层	杂食性	72-118	13.3	11.7	6.4	7.6
	翘嘴鲌 <i>Culter alburnus</i>	上层	肉食性	40-331	4.4	4.4	1.5	3
	蒙古鲌 <i>Culter mongolicus</i>	上层	肉食性	76-245	2.8	10.3	3.8	7.8
	达氏鲌 <i>Culter dabryi</i>	上层	肉食性	79 ~ 164	2.3	0.8	1.1	0.4
鲤科 Cyprinidae	红鳍原鲌 <i>Cultrichthys erythropterus</i>	中、上层	杂食性	48-117	10.4	6.6	1.1	3.2
	鳊 <i>Parabramis pekinensis</i>	中、下层	草食性	109-365	3.3	2.2	17.3	17.2
	团头鲂 <i>Megalobrama amblycephala</i>	中、下层	草食性	165-456	2	1.2	3.1	3.8
	黄尾鲮 <i>Xenocypris davidi</i>	中、下层	杂食性	140-255	1.8	4.5	2.7	5.9
	银鲮 <i>Xenocypris argentea</i>	底层	杂食性	114-247	0.6	4.9	0.2	0.5
	似鳊 <i>Pseudobrama simoni</i>	中、上层	杂食性	78-130	0.8	1.4	0.1	0
	鳊 <i>Aristichthys nobilis</i>	中、上层	滤食性	368-542	1.5	1.5	8.6	9

	鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	中、上层	滤食性	345-543	2.5	1.3	25	17.8
	花鲢 <i>Hemibarbus maculatus</i>	底层	杂食性	115-220	1.3	1.3	1.1	0.6
	麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i>	中、下层	杂食性	37-102	3.4	3.4	0.1	0.1
	银鮡 <i>Squalidus argentatus</i>	中下层	杂食性	51-138	5.2	3.9	0.6	1.2
	棒花鱼 <i>Abbottina rivularis</i>	底层	杂食性	43-95	3.1	1.2	0.1	0
	大鳍鲮 <i>Acheilognathus macropterus</i>	中、下层	碎屑食性	69-94	3.5	2.3	0.2	0.2
	兴凯鲮 <i>Acheilognathus chankaensis</i>	中、下层	碎屑食性	32-94	2.2	2.2	0.1	0.1
	中华鲮 <i>Rhodeus sinensis</i>	中、下层	碎屑食性	33-68	4.7	4.7	0.3	0.7
	鲤 <i>Cyprinus carpio</i>	下层	杂食性	102-250	1.4	0.4	0.4	0.1
	鲫 <i>Carassius auratus</i>	中、下层	杂食性	55-240	6.3	9	1	4.3
鲮科 Bagridae	长须黄颡鱼 <i>Pelteobagrus eupogon</i>	底层	肉食性	27-216	1.6	0.4	1.2	0.2
鲈科 Serranidae	鳊 <i>Siniperca chuatsi</i>	下层	肉食性	175-398	0.6	1.2	4	5.9
沙塘鳢科	河川沙塘鳢 <i>Odontobutis potamophila</i>	底层	杂食性	26-160	0.3	0	0.1	0
Odontobutidae	小黄鲮鱼 <i>Micropercops swinhonis</i>	底层	杂食性	32 ~45	2.3	1.2	0	0
吻虾虎鱼科 Gobiidae	子陵吻虾虎鱼 <i>Rhinogobius giurinus</i>	底层	肉食性	35-63	2.9	1.6	0	0
月鳢科 Channidae	乌鳢 <i>Channa argus</i>	底层	肉食性	237-308	0.3	0	0.8	0

根据各物种在鱼类群落中的数量比例对其在群落中的地位和作用进行划分，将数量比例按大于10%、5%~10%、1%~5%、低于1%依次定义为优势种、亚优势种、常见种和偶见种。以此为标准，则西江鱼类群落中，似鲮、红鳍原鲈和蒙古鲈为群落优势种；鲫、、贝氏、红鳍原鲈和银鮡为亚优势种；鳊、银鲌、鳊、河川沙塘鳢、乌鳢为偶见种；其余种类皆为常见种(表1)。西江在迁入长江江豚之前为渔业养殖水面，其主要放养种类为鲢、鳊和草鱼，尽管在江豚迁入西江之前进行了养殖清退，但仍有相当一部分个体残留；江豚迁入西江后，为保证有足够的饵料资源，也进行了增殖放流，其主要放流种类也为鲢、鳊和草鱼。因此，西江鱼类群落中鲢、鳊和草鱼在鱼类群落中的比例主要受之前养殖残留及江豚饵料鱼增殖放流影响。

所有渔获体长范围为3.3~56.7cm(图2)，均值为12.1±9.1cm；体重范围为0.4~1850.0g，均值为54.5±182.5g。所有渔获的体长-体重关系式： $W=0.0094 \times TL^{2.9446}$ (cm, g, $R^2=0.9409$, $n=588$)。

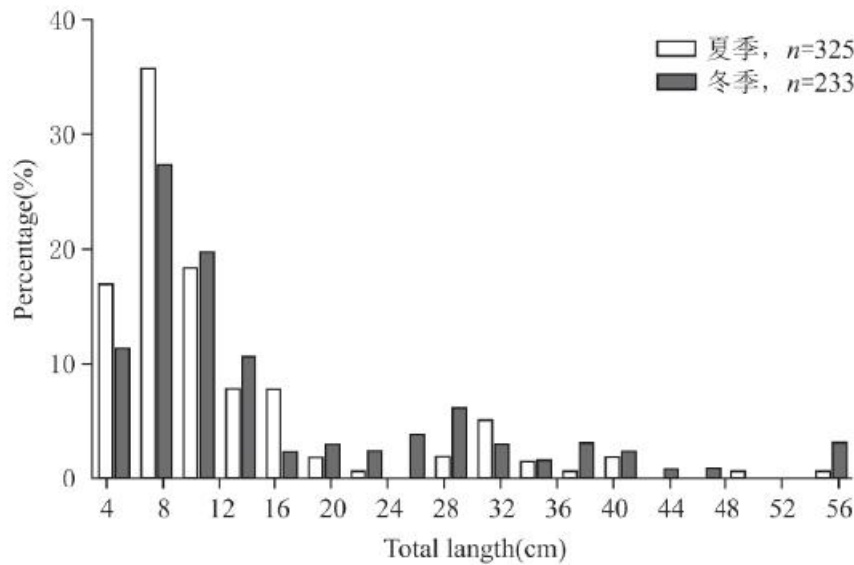


图2 渔获物鱼体全长分布

Fig. 2 Total length distribution of the fishing harvest

2.2 鱼类资源及空间分布

根据水声学探测的结果, 西江鱼类 ($-66\text{dB} \leq \text{TS} \leq -30\text{dB}$) 的空间格局呈不均匀分布。夏季探测鱼体平均密度范围为 $1.4 \sim 5662.3 \text{ ind.} / 1000\text{m}^3$, 平均密度为 $253.3 \text{ ind.} / 1000\text{m}^3$ (图 3); 平均目标强度为 -52.8dB 。冬季探测的鱼体密度范围为 $0.8 \sim 2338.1 \text{ ind.} / 1000\text{m}^3$, 平均密度为 $127.5 \text{ ind.} / 1000\text{m}^3$; 平均目标强度为 -51.9dB 。总体来看, 冬季鱼类密度较夏季有所降低, 但平均目标强度有所升高。冬季鱼类密度之所以低于夏季, 一是冬季水温低, 鱼类贴近水底栖息, 水底是水声学探测的盲区, 不利于探测; 二是部分小型鱼类完成生活史后自然死亡造成种群数量降低; 三是冬季水位较夏季水位降低 1.8m , 导致有效探测水体所占比例降低。此外, 江豚迁入后也会消耗一部分鱼类资源。冬季探测的目标强度高于夏季, 主要原因是鱼类夏季和秋季的个体生长; 其次, 江豚主要捕食较小的鱼类个体^[20, 21], 这种选择性捕食也会导致鱼类的平均个体增大。

在水平方向上, 夏季西江鱼类密度较高的水域分别为 C、D 水域, 以及 A 和 F 水域的南端, 即曾经的入水口和出水口附近水域。冬季鱼类主要分布于 C、D 水域, 以及 F 水域的南端, 与夏季鱼类分布较为相似; 但夏季鱼类密度较高的 A 水域南端, 冬季鱼类密度则呈较低水平。其主要原因可能在于这些水域具有更高的生境异质性, 沿岸有大量水生植物生长, D 水域的敞水区还有大量废弃的养殖网箱 (已在长江江豚迁入之前清理), 这些水生植物和网箱有利于饵料资源聚集, 并且可为鱼类提供隐蔽场所。而长江江豚救护中心附近的 B 和大部分 A 水域, 以及 E 和 F 北端水域的鱼体密度则较低, 这可能与人为干扰以及生境异质性较低有关。此外, 鱼类的水平分布似乎与水深呈负相关的关系, 水深较浅的水域具有较高的鱼类密度, 反之亦然 (图 3)。

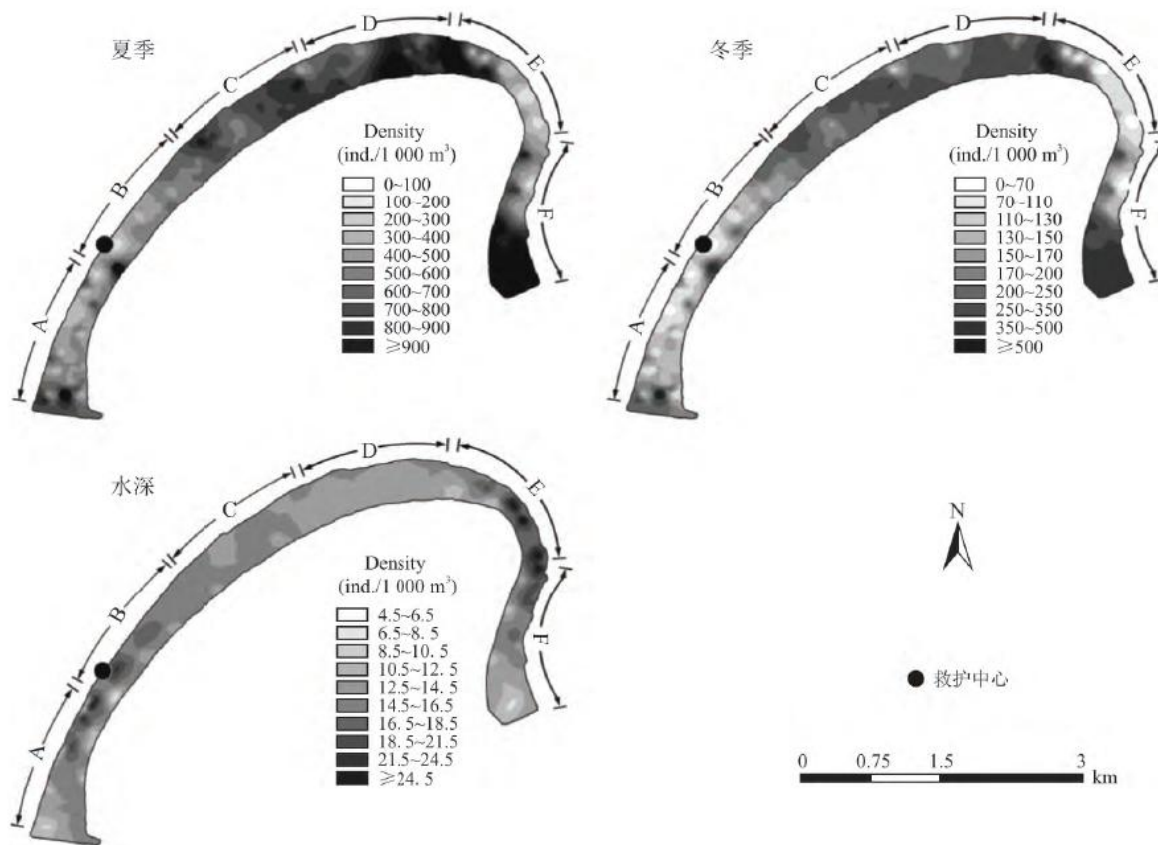


图3 西江水深及鱼类资源空间分布

Fig. 3 Depth and spatial distribution of fish in Xijiang

在垂直方向上，以3m为一个水层，分别计算各水层的鱼类密度。夏季鱼类在垂直方向的分布趋势是：从表层到水底，鱼类密度呈逐渐降低的趋势(图4)。1~6m水层往往具有较高的鱼类密度，而当水层深度超过6m，鱼类密度迅速降低，基本都低于400ind./1000m³。

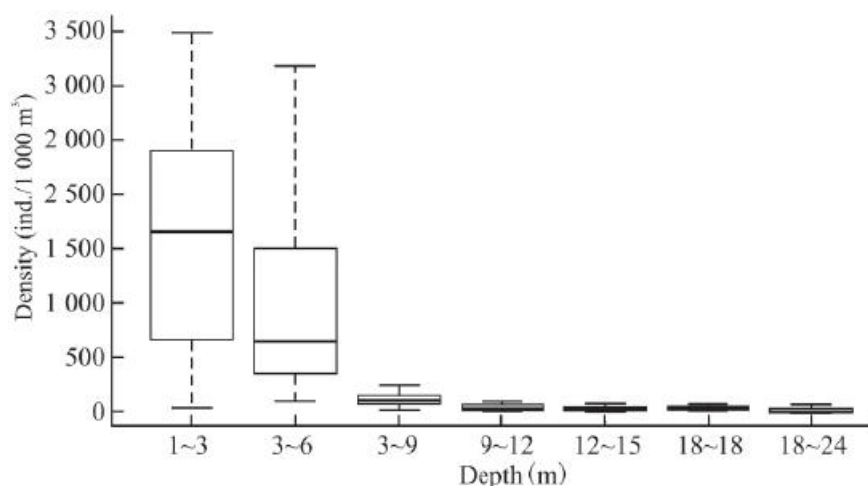


图 4 夏季西江鱼类资源垂直分布

Fig. 4 Vertical distribution of fish in Xijiang in Summer

2.3 西江持续供饵能力估算

根据鱼类的空间生态位和形态特征, 以及人工投喂的经验^[20], 西江中适宜被江豚捕食的鱼类约为 22 种, 分别为刀鲚、陈氏新银鱼、草鱼、飘鱼、贝氏、似鱖、翘嘴鲌、蒙古鲌、达氏鲌、红鳍原鲌、黄尾鲮、银鲮、似鲮、花、麦穗鱼、银鲮、棒花鱼、鲤、鲫、长须黄颡鱼、乌鳢。根据夏季和冬季的电捕取样, 这些鱼类在渔获物中的重量比例分别为 27.8%和 36.7%, 平均比例为 32.3%。

水声学评估过程中, 在将声学信号进行转换时得到的是鱼体长度, 在本研究中, 江豚适口性饵料鱼选择的标准是体长不超过 25.2cm。运用鲤 TS-TL 的换算公式对鱼体目标强度进行转换, 西江中全长不超过 25.2cm 的鱼类个体数量所占比例为 98.5%(图 5), 夏季和冬季电捕渔获物中全长不超过 25.2cm 的鱼类所占比例为 88.6%(图 2), 由目标强度推算和渔获物实际测量的鱼体全长在 4~25.2cm 范围的分布吻合度较好。因此, 从个体大小来讲, 西江中鱼类中, 约 98.5%的个体具有较好的适口性。

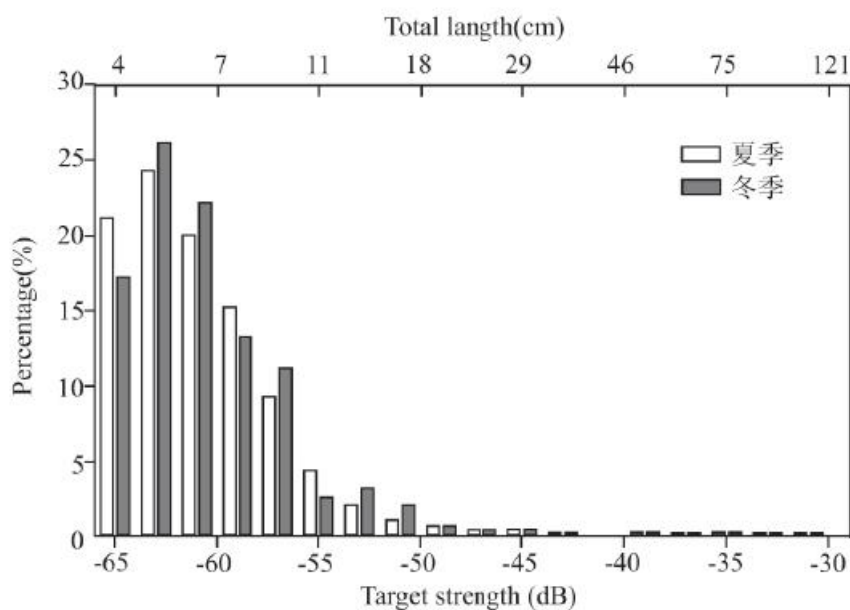


图5 水声学探测鱼体目标强度分布和根据
 $TS = 23.97 \lg L - 103.9$ 的推算体长

Fig. 5 Frequency distribution of target strength and total length convert from target strength by $TS = 23.97 \lg TL - 103.9$

2.4 西江持续供饵能力

本文通过 P/珙 B 系数和平均生物量对西江鱼类生产力进行估算。经公式 $TS = 23.97 \lg TL - 103.9$ 和 $W = 0.0094 \times TL^{2.9446}$ 对水声学探测的结果进行转换,推算出西江夏季和冬季鱼类资源现存量约为 102000~155000kg。取夏季和冬季的平均鱼类现存量作为西江的年平均生物量,为 128000kg。

西江中长江江豚潜在饵料鱼在渔获物中的重量比例为 32.3%,体高低于 6cm 鱼类在水声学评估中占比为 98.5%,结合江豚对饵料鱼种类和个体大小的选择,推算出西江可供长江江豚利用的潜在饵料资源现存量约为 40800kg。西江小型鱼类的 P/珙 B 系数取 1.5~2.0,由此估算西江长江江豚潜在饵料鱼生产力约为 61000~82000kg。根据 $Y = 0.5P$ 推算出西江长江江豚潜在饵料鱼最大持续产量为 30500~40800kg/a。

3 讨论

3.1 资源量评估的可靠性

在本研究中,我们基于鱼类资源现存量和鱼类生产力,从饵料资源的供给能力方面对西江长江江豚饵料鱼的供给能力进行了评估。评估的可靠性很大程度上取决于对鱼类资源现存量和生产力的估算。

本研究对鱼类资源现存量的评估主要基于水声学探测,水声学作为一种高效的评估手段,在国内外的鱼类资源评估和行为

研究中得到广泛的应用^[29~32]。但其评估的可靠性受到很多因素的影响,将声学能量转换为鱼体生物量就是其中的一个关键环节。在转换之前,我们首先需要建立不同鱼类的 TS-TL 回归关系式,根据该回归关系式将目标强度转换为鱼体长度,再根据不同鱼类的 TL-W 回归关系将其转换为鱼体生物量。不同种类的鱼体存在体型和内部结构的差异,因而具有不同的声学反射特性^[33]。由于我们没有针对西江的鱼类群落建立各种鱼类的 TS-TL 回归关系式,而是采用了 Frouzova 等建立的鲤全长和目标强度的回归关系式,因此可能会引入一定的误差。但是根据本研究所作的调查,鲤科鱼类在西江鱼类群落中所占比例极大,种类比例达到 76.5%,数量比例超过 92.0%(表 1)。这些鱼类体型大多为与鲤相似的纺锤形,且分类地位较为接近,因此,尽管存在差异,但总体上其声学反射特性与鲤较为类似。因此,本研究采用鲤的 TS-TL 回归关系对西江鱼类资源现存量进行评估,其结果应该是较为可靠的。

一般来讲,鱼类生物量最高的时期分别是夏季和冬季。夏季是鱼类繁殖生长的高峰季节,冬季则正好相反。此外,江豚迁入西江后会消耗鱼类资源,江豚的日摄食量约占其体重的 10%^[20],则从 2016 年 11 月 10 日江豚迁入西江至冬季水声学探测,约消耗饵料鱼 3000kg,这是不可忽视的。在没有江豚捕食的情况下,冬季西江鱼类现存量将会高于本次冬季的评估结果。因此,本文采用夏季和冬季的平均鱼类现存量代表一年中的平均生物量,可较为真实地反映西江鱼类的生物量水平。

生产力采用平均生物量和 P/珞 B 系数进行估算,根据张堂林和 Downing 等对不同水域鱼类 P/珞 B 系数的测定^[26, 27],推测西江中鱼类的 P/珞 B 系数为 1.5~2.0。最大持续产量取鱼类生产力的 1/2^[28]。关于鱼类生产力和最大持续产量的评估,所采用的算法都较为粗略,不可避免地会引入一些偏差。但是,在卢振彬等^[34]的研究中,采用简便模式计算的最大持续产量与采用 Gulland 模型、以及 Schaefer 剩余产量模型估算的结果具有较好的一致性。

本文估算西江长江江豚潜在饵料鱼最大持续产量为 30500~40800kg/a,这应该是一个比较保守的数字,因为在计算的过程中,由于渔获物数量有限,无法统计体高低于 6cm 的鲢、鳙在其种群中所占比例,而直接将这些大型鱼类排除在长江江豚的潜在饵料鱼之外,但事实上,江豚是可以捕食这些大型鱼类的小型个体的。

3.2 长江江豚对饵料资源的选择

目前鲜有关于江豚捕食对象的研究,因此我们并不清楚江豚具体的摄食种类。囿于研究手段,有关长江江豚摄食规律的研究结果主要来源于间接推测,有学者根据江豚潜水深度和游泳速度的变化推测其主要摄食底层鱼类^[35],而另外一些研究根据长江江豚与不同水层鱼类出现的一致性及其同位素手段推测其可能更偏爱捕食中上层鱼类^[8, 36~39]。

对于水生生态系统中的捕食者来说,其捕食行为通常以实现能量收益的最大化为准绳^[40, 41]。因此,捕食者对猎物的种类和个体大小都存在一定的选择性。一些猎物在长期的进化过程中,发展出一些反捕食特征以避免被捕食,如鳊、黄颡鱼的硬棘和毒刺,猎物的棘刺不仅延长了捕食者的操纵时间,还增加了捕食者在吞咽猎物时受伤害的可能性^[42];迅捷的速度也是逃避捕食的重要手段,捕食者在追击此类猎物的过程中会消耗更多的能量。长江江豚位于淡水生态系统食物链的顶端,其行为同样遵循这一理论,我们对西江中长江江豚潜在饵料鱼的筛选也基于此。

在个体大小上,猎物最重要的反捕食参数是体高,随着猎物体高的增加,捕食者操纵猎物的时间逐渐延长,当猎物体高大于捕食者的口裂时,将不会被捕食^[43]。但目前并没有关于江豚对饵料大小选择性的确切统计数据,在计算的过程中,主要的参考标准是白暨豚对饵料鱼大小的选择标准,以及饲养江豚的投喂经验^[20~22]。此外,在将鱼类体高和鱼体全长进行对应时的依据是鲤体长一体高回归关系,尽管鲤的体高/体长范围在西江鱼类群落中具有较好的代表性,然而由于不同鱼类的体高/体长差异较大,这也不可避免地给我们的估算结果引入一些误差。

3.3 渔业养殖和增殖放流的影响

西江在成立长江江豚救护中心之前其主要功能为渔业养殖，主要养殖对象为鲢、鳙和草鱼，2016 年江豚迁入西江之前进行了养殖清退，但仍有相当一部分个体残留；江豚迁入西江后，为补充饵料资源增殖放流了鲢、鳙和草鱼。鲢、鳙和草鱼属于江湖洄游性鱼类，在静态水体无法自然繁殖，因此，西江鱼类群落中鲢、鳙和草鱼在鱼类群落中的比例主要受之前养殖残留及江豚饵料鱼增殖放流影响。但由于之前养殖残留个体较大，远超过江豚所能摄食的规格，因此，养殖残留个体不会影响对江豚潜在饵料资源的评估。为补充江豚饵料资源进行的增殖放流，鱼苗规格为 10cm 左右。由于这部分鱼类之前主要为人工养殖，其反捕食能力较弱，并且大小适口，将首先成为江豚的捕食对象。并且由于放流数量有限，随着时间推移，其在水江鱼类群落中所占的比例将会逐渐降低。当未被摄食个体生长至超过江豚所能摄食的最大规格时，将不会再被江豚捕食。

4 小结

由于本研究未涉及西江鱼类种群的特征细节，如年龄结构、繁殖测量和种群增长规律等，在估计保护区提供的可利用饵料鱼资源总量和最大持续产量方面会存在一些偏差，基于 P/珞 B 系数和平均生物量，以及经验公式 $Y=0.5P$ 的估算结果，只能是对西江长江江豚饵料鱼最大持续产量一个粗略估计。因此，在今后应该加强对长江江豚饵料选择性和鱼类生产力的详细研究，以作出更为可靠的评估。

本研究中，大型凶猛性鱼类鳊、翘嘴鲌、鳊、乌鳢等在渔获中所占比例较低，因此在估算时没有考虑这些凶猛性鱼类的捕食作用。然而，西江成为长江江豚救护基地之后，禁止一切渔业捕捞，没有了捕捞压力，凶猛性鱼类种群有可能会得到迅速发展。一旦凶猛性鱼类形成大的种群，其对饵料鱼资源的消耗将是十分巨大的^[44]。因此，建议加强对西江鱼类群落的持续监测。为防止凶猛性鱼类种群规模过度发展与长江江豚争夺饵料资源，一方面，要根据凶猛性鱼类的繁殖规律破坏其繁殖条件；另一方面，根据鱼类群落监测的结果，在适当条件下对凶猛性鱼类进行集中捕捞。

参考文献:

- [1] 高安利, 周开亚. 1993. 关于江豚的古籍记载及现代研究 [J]. 兽类学报, 13(3): 223 ~ 234.
- GAO A L, ZHOU K Y. Notes on classical literatures and contemporary researches on the finless porpoise (Neophocaena phocaenoides) [J]. Acta Theriologica Sinica, 1993, 13 (3): 223—254.
- [2] ZHOU X, GUAN X, SUN D, et al. Population genomics of finless porpoises reveal an incipient cetacean species adapted to freshwater [J]. Nature Communications. , 2018, 9(1): 1276.
- [3] 王丁, 张先锋, 刘仁俊. 中国长江白鱀豚、江豚保护的现状及其未来, 见: 21 世纪长江大型水利工程中的生态与环境保护 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1998: 218—226.
- WANG D, ZHANG X F, LIU R J. Conservation status and its future of baiji and Yangtze finless porpoise in China. In: Hua Z L, Fu B, Yang Y, eds. Ecology and Environmental Protection of Large Irrigation Projects in Yangtze River in 21st Century [M]. Beijing: Environmental Science Press, 1998: 218—226.
- [4] WANG D. Population status, threats and conservation of the yangtze finless porpoise [J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54: 3473—3484.
- [5] 张先锋, 王克雄. 长江江豚种群生存力分析 [J]. 生态学报, 1999, 19: 529—533.

ZHANG X F, WANG K X. Population viability analysis for the yangtze finless porpoise [J]. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19: 529—533.

[6] ZHAO X J, BARLOW J, TAYLOR B L, et al. Abundance and conservation status of the yangtze finless porpoise in the Yangtze River, China [J]. Biological Conservation, 2008, 141: 3006—3018.

[7] MEI Z G, ZHANG X F, HUANG S L, et al. The Yangtze finless porpoise: on an accelerating path to extinction? [J]. Biological Conservation, 2014, 172(2) : 117—123.

[8] 陈佩薰, 刘仁俊, 王丁. 白鱀豚生物学及饲养与保护 [M]. 北京: 科学出版社, 1997, 233—233.

CHEN P X, LIU R J, WANG D. Biology of baiji, and its rearing and conservation [M]. Beijing: Science Press, 1997.

[9] CHEN PX, HUA YY. Distribution, population size and protection of lipotes vexillifer. biology and conservation of the river dolphins [C]. Switzerland: Occasional Paper of the IUCU Species Survival Commission (SSC), 1989: 81—85.

[10] KUBECKA J, DUNCAN A. Diurnal changes of fish behaviour in a lowland river monitored by a dual-beam echosounder [J]. Fisheries Research, 1998, 35(1) : 55—63.

[11] 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) : 1027—1031.

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) : 1027—1031.

[12] LIAN Y X, YE S W, GODLEWSKA M, et al. Diurnal, seasonal and inter-annual variability of fish density and distribution in the Three Gorges Reservoir (China) Assessed with Hydroacoustics [J]. Limnologica-Ecology and Management of Inland Waters, 2017, 63: 97—106.

[13] FOOTE K G, KNUDSEN H P, VESTNES G, et al. Calibration of acoustic instruments for fish density estimation: a practical guide [J]. International Council for the Exploration of the Sea, 1987, 144: 1—69.

[14] 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: 102—448.

CHEN Y Y. Fauna sinica, osteichthyes, cypriniformes II [M]. Beijing: Science Press, 1998: 102—448.

[15] 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: 391—433.

YUE P Q. Fauna sinica, osteichthyes, cypriniformes III [M]. Beijing: Science Press, 2000: 391—433.

[16] 倪勇, 朱成德. 太湖鱼类志 [M]. 上海: 上海科学技术出版社. 2005: 99—119.

NI Y, ZHU C D. Fish of the taihu lake [M]. Shanghai:Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2005: 99—119.

[17] 倪勇, 伍汉霖. 江苏鱼类志 [M]. 北京: 中国农业出版社. 2006.

NI Y, WU H L. Fishes of jiangsu province [M]. Beijing:China Agriculture Press, 2006.

[18] FROUZOVA J, KUBECKA J, BALK H, FROUZ J. Target strength of some european fish species and its dependence on fish body parameters [J]. Fisheries Research, 2005, 75(1) :86—96.

[19] MEEKAN M G, KUERTHY C V, MCCORMICK M I, et al. Behavioural mediation of the costs and benefits of fast growth in a marine fish [J]. Animal Behaviour, 2010, 79 (4) : 803 —809.

[20] 于道平, 蒋文华, 糜励. 半自然水域中长江江豚食性与摄食行为的初步观察 [J]. 兽类学报, 2003, 23(3) : 198—202.

YU D P, JIANG W H, MI L. Preliminary observations on feeding behavior of finless porpoises in a semi-nature reserve of Yangtze River [J]. Acta Theriologica Sinica, 2003, 23(3) : 198—202.

[21] 郝玉江, 王克雄, 韩家波, 等. 中国海兽研究概述 [J]. 兽类学报, 2011, 31(1) : 20—36.

HAO Y J, WANG K X, HAN J B et al. Marine mammal researches in China [J]. Acta Theriologica Sinica, 2011, 31(1) : 20—36.

[22] 陈佩薰, 刘沛霖, 刘仁俊, 等. 白鱀豚饲养的研究 [J]. 水生生物学报, 1986, 10(2) : 121—135.

CHEN P X, LIU P L, LIU R J, et al. Studies on the bearing of Lipotes [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 1986, 10 (2) :331—337.

[23] YE S W, LI Z J, FENG G P, et al. Length-weight relationships for thirty fish species in Lake Niushan [J]. Asian Fisheries Science, 2007, 20: 217—226.

[24] MANN R H K, PENCZAK T. Fish production in rivers: a review [J]. Polskie Archiwum Hydrobiologill, 1986, 33: 233—247.

[25] WATERS T F. Annual production, production /biomass ratio, and the ecotrophic coefficient for management of trout in Streams [J]. North American Journal of Fisheries Management, 1992, 12(1) : 34—39.

[26] DOWNING J A, PLANTE C. Production of fish populations in Lakes [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2011, 50(1) : 110—120.

[27] 张堂林, 崔奕波, 方榕乐, 等. 保安湖麦穗鱼种群生物学 V [J], 生产力. 水生生物学报, 2001, 25(4) : 331—337.

ZHANG T L, CUI Y B, FANG R L, et al. Population biology of topmouth gudgeon in the Baoan Lake V. Production [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2001, 25(4) : 331—337.

[28] 詹秉义. 渔业资源评估 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1993: 266—270.

ZHAN B Y. Fish stock assessment [M]. Beijing: China Agriculture Press. 1993: 266—270.

[29] MEHNER T, SCHULZ M. Monthly variability of hydroacoustic fish stock estimates in a deep lake and its correlation to gillnet catches [J]. Journal of Fish Biology, 2002, 61: 1109—1121.

[30] SIMMONDS E J, MACLENNAN D N. Fisheries acoustics: theory and practice [M]. Oxford: Blackwell Science, 2005: 2—9.

[31] 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 applications? [J]. Fisheries Research, 2012, 123—124: 90—97.

[32] 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 [J]. 水生生物学报, 2015, 39(5) : 920—929.

LIAN Y X, HUANG G, GODLEWSKA M, et al. Hydroacoustic assessment of spatio-temporal distribution and abundance of fish resources in Xiangxi River [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2015, 39(5) : 920—929.

[33] ONA E. Physiological factors causing natural variations in acoustic target strength of fish [J]. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, 1990, 70(1) : 107—127.

[34] 卢振彬, 戴泉水, 颜尤明. 台湾海峡及其邻近海域渔业资源生产力和最大持续产量 [J]. 中国水产科学, 2002, 9(1) : 28—32.

LU Z B, DAI Q S, YAN Y M. Productivity and maximum sustainable yield of fishery resources in Taiwan strait and its adjacent waters [J]. Journal of Fishery Sciences of China. 2002, 9(1) : 28—32.

[35] AKAMASTU T, WANG D, WANG K X, et al. Diving behavior of freshwater finless porpoise (*Neophocaena phocaenoides asiaeorientalis*) in an oxbow of the Yangtze River, China [J]. ICES Journal of Marine Science, 2002, 59: 438—443.

[36] 陈佩薰, 刘沛霖, 刘仁俊, 等. 长江中游(武汉—岳阳江段)豚类的分布、生态、行为和保护 [J]. 海洋与湖沼, 1980, 11(1) : 73—84.

CHEN P X, LIU P L, LIU R J, et al. The distribution, ecology, behavior and protection of the dolphins in the middle reach of changjiang river (wuhan-yueyang) [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1980, 11(1) : 73—84.

[37] 于道平, 王江, 杨光, 等. 长江湖口至荻港段江豚春季对生境选择的初步分析 [J]. 兽类学报, 2005, 25 (3) : 302—306.

YU D P, WANG J, YANG G, et al. Primary analysis on habitat selection of Yangtze finless porpoise in spring in the section between hukou and digang [J]. Acta Theriologica Sinica, 2005, 25(3) : 302—306.

[38] 张晓可, 于道平, 王慧丽, 等. 长江安庆段江豚主要栖息地鱼类群落结构 [J]. 生态学报, 2016, 36 (7) : 1832—1839.

ZHANG X K, YU D P, WANG H L, et al. Fish community structure in main habitat of the finless porpoise, the anqing section of yangtze river [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36 (7) : 1832—1839.

[39] 鹿志创, 田甲申, 王召会, 等. 应用碳氮稳定同位素技术研究江豚 (*Neophocaena asiaeorientalis* ssp. *sunameri*) 食性 [J]. 生态学报, 2016, 36(1) : 69—76.

LU Z C, TIAN J S, WANG Z H, et al. Using stable isotope technique to study feeding habits of the finless porpoise (*Neophocaena asiaeorientalis* ssp. *sunameri*) [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(1) : 69—76.

[40] GRIFFITHS D. Prey availability and the food of predators [J]. Ecology, 1975, 56(5) : 1209—1214.

[41] PYKE G H, PULLIAM H R, CHARNOV E L. Optimal foraging: a selective review of theory and tests [J]. Quarterly Review of Biology, 1977, 52(2) : 137—154.

[42] GILLEN A L, STEIN R A, CARLINE R F. Predation by pelletreared tiger muskellunge on minnows and bluegills in experimental systems [J]. Transactions of the American Fisheries Society, 1981, 110(2) : 197—209.

[43] NILSSON P A, BRONMARK C, PETTERSSON L B. Benefits of a predator-induced morphology in crucian carp [J]. Oecologia, 1995, 104(3) : 291—296.

[44] 陈敬存, 林永泰, 伍掉田. 长江中下游水库凶猛鱼类的演替规律及种群控制途径的探讨 [J]. 海洋与湖沼, 1978, 9(1) : 49—58.

CHEN J C, LIN Y T, WU D T. Regularities of succession of predatory fish population in reservoirs of the middle and lower changjiang valley, with a discussion methods of population control [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1978, 9 (1) : 49—58.