三峡水库成库期间鱼类空间分布的水声学研究

陶江平[1,3],陈永柏[2],乔 晔[1],谭细畅[3,4],常剑波[1]

(1.水利部中国科学院水工程生态研究所,武汉 430079;2.中国长江三峡工程开发总公司,宜昌 443002;
3.中国科学院水生生物研究所,武汉 430072;4.中国水产科学院珠江水产研究所,广州 510380)

摘要:2007年4月18日~5月1日,利用SIMRAD EY60回声探测仪(又称鱼探仪)对三峡水库坝前到丰都干流以及9条主要支流进行了水声学探测。采用垂直探测结合"之"字形路线的方法对库区整个水体鱼类的分布状况进行了研究。调查水域长度约有600 km,回波数据分成1 232个片段进行分析。结果表明:在5m以下水层,体长大于6cm的鱼类在该区域平均密度为567.68尾/dam^3,且鱼类分布不均匀。在巫山至奉节江段鱼类的密度最低,密度的平均值和标准误(mean ± S.E)为(8.1 ± 0.47)尾/dam^3;在忠县到丰都江段密度最高,平均值和标准误(mean ± S.E)为(2 597.06 ± 154.08)尾/dam^3。从坝前到丰都,干流鱼类资源量总体上呈现逐步增加的趋势。支流资源量要比干流高。目标强度在-60~-50 dB的鱼体大小差异不显著,大于-50dB鱼体的平均目标强度在巴东-巫山江段最高,巫山-奉节江段及抱龙河次之。小型鱼体的大小在各江段没有统计学差异,中型和大型鱼体在巴东-巫山江段鱼体个体相对最大,万州-忠县江段以及小江、长滩河等水域鱼类个体相对较小。

关键词:三峡水库;水声学;目标强度;生物量

中图分类号:Q-9,S973.1+2 **文献标志码**:A **文章编号**:1674-3075(2008)01-0025-09

0 引言

早在1929年水声学就应用于鱼类的探测。利用水声学在海洋渔业捕捞中可定位鱼群位置及评估鱼群数量,考察鱼类的分布、迁移等行为;在内陆湖泊等水体可进行鱼类的种类、数目、大小等资源量研究,对鱼类资源量进行监测与管理(K A Johannesson and R B Mitson,1983)。利用水声学探测鱼类资源快捷、直接、经济,有着广阔的前景。经过70多年的发展,水声学硬件和软件研发都取得了很大的成就。硬件方面:裂波束式鱼探仪问世以后,可通过确认目标在声波的水平波阵面上由于其偏离轨道而产生的声强损失给予正确的增益(Ehrenberg J E,1983);随后又通过对单一鱼体目标的跟踪从而连续获得该鱼体的几个目标强度值,并对其所有获得值进行平均,增加单目标回波强度的精度(Zhao X,1996);通过确认鱼体在声波束中的位置,裂波束目标追踪技术也能估计鱼的游泳速度及确认其运行的轨迹(T Torgersen and S Kaartvedt,2001)。软件方面:Helg Balk等(2001)提出了CFT滤波技术,有效解决了通常情况下小型河流中因回波信号信噪比低、杂波多而导致提取目标信号困难的问题,对底层鱼体和地质进行比较准确的界定;该技术已经整合于SONAR-5分析软件中,使之成为非常适用于对鱼探仪在淡水水域及河流中获得数据进行处理的软件。

在国外,鱼探仪已经普遍地利用于鱼类种群规模的评估以及时空分布研究,并开始把目标跟踪技术应用于鱼类行为学研究。Ehrenberg和Torkelsen 1996年运用目标追踪来研究野生青鱼不进食的越冬行为以及监测鲑在江河中的洄游情况,Arrhenius等2000年利用裂波束鱼探仪来做各种淡水鱼在围网养殖和天然条件下行为学研究(T Torgersen and S Kaartvedt,2001)。但是此方法在行为学研究中还有待进一步完善。1999~2005年McQuinn和Nelli利用声学并结合拖网方法对太平洋鲟产卵场进行调查,通过模拟不同地形的变化与太平洋鲟时空分布的变化关系确定地形改变对太平洋鲟的影响,从而确定太平洋鲟对环境与地形要求的程度,以此确定对太平洋鲟是否要列为易危种作出初步判断(McQuinn I H and Pierre Nellis,2007)。

在国内,利用水声学探测鱼类资源的研究正在发展之中。张海明等(1983)使用67-3型探鱼仪对水库中鱼群进行探测,初步评估了水体中鱼类种群的数量大小。立川贤一(Tatsukawa)等(1986)使用200kHz的鱼探仪对武汉东湖的鱼类个体数目及资源量进行了评估。谭细畅等(2002)利用日本FU-

收稿日期:2008-08-12

基金项目:中国长江三峡工程开发总公司生态与环境保护项目及国家自然科学基金重大项目(NSFC30490234)联合资助.

通讯作者:常剑波。E-mail:jbchang@mail.ihe.ac.cn

作者简介:陶江平,男,1981年生,安徽宿松人,硕士研究生,研究方向为:鱼类生态与资源保护学。

SO－405 型鱼探仪逐月对东湖中鱼类资源量的动态变化、不同水层鱼类不同季节的时空分布状态进行研究 。乔晔(Y Qiao)等(2006)利用自行改制的数字化鱼探仪对葛洲坝下中华鲟繁殖群体进行水声学评估,并结合伊藤嘉昭、村井实等样线法(line transect)估算出了近 5 年内中华鲟繁殖种群的数量及变动趋势。

1　材料与方法

1.1　研究区域概况

三峡水库位于 106.10°～111.50°E 、29.16°～31.25°N,距离下游已建的葛洲坝水利枢纽工程约 40 km,最终正常蓄水位 175 m,总库容 393 亿 m^3,水库水面面积 1 084 km^2,回水长度 660 km。2003 年,三峡电站第一批机组建成投产,水库正常蓄水位到达 139 m,长江涪陵以下的天然河道变成了水库(黄真理,2003)。到 2007 年 5 月,水库蓄水位为 156 m。三峡水库蓄水后,水位、水质、流速等水文情势均发生了变化,使得整个水库的生物种类组成、群落结构和数量的时空状态也发生改变,其结果是必然对鱼类的数量和空间分布产生影响。本文通过声学调查方法研究三峡水库中鱼类资源状况及区域空间分布特征。

1.2　设备

水声学数据采集利用挪威 Simrad AS 公司生产的 Simrad EY60 回声探测仪,并配以频率为 200 kHz、3dB 束宽为 7°的裂波束换能器。采样过程中,换能器安装在监测船的机械吊臂上,横向离开船体 50 cm,入水约 55 cm,探测的方向垂直向下。监测船为长江水环境监测中心的水环监 2000 号监测船,船长 37.5 m,船宽 5.6 m, 吃水 1.2 m,发动机型号 CCFJ.2 40kW,最大航速 29.9 km/h 。导航设备为 Garmin 公司生产的 GPS60CS。

1.3　探测方法

本研究从 2006 年 4 月 18 日到 2006 年 5 月 1 日,历时 13 d,每天具体探测时间为 8～18 时。监测船基本保持平稳行驶,平均速度约 3.9 m/s,最大航速为 5.0m/s。在支流的速度略低,平均约为 2.6 m/s。

探测位置从三峡大坝前警戒线处开始,到丰都结束。探测区域有长江干流坝前到丰都县城及香溪河、抱龙河、大宁河、大溪河、草堂河、梅溪河、长滩河、小江等部分大型支流(图 1)。干流直线航程约 360 km,支流航程约 200 km,总长度约 560 km。

在三峡大坝前到归州码头,总长度大约为 15 km,探测路线为“之”字形。大约每隔 500m 取一次断面探测。其它的大部分路线是沿着航道行使,大约每隔 25 km 作若干个“之”字形断面探测。

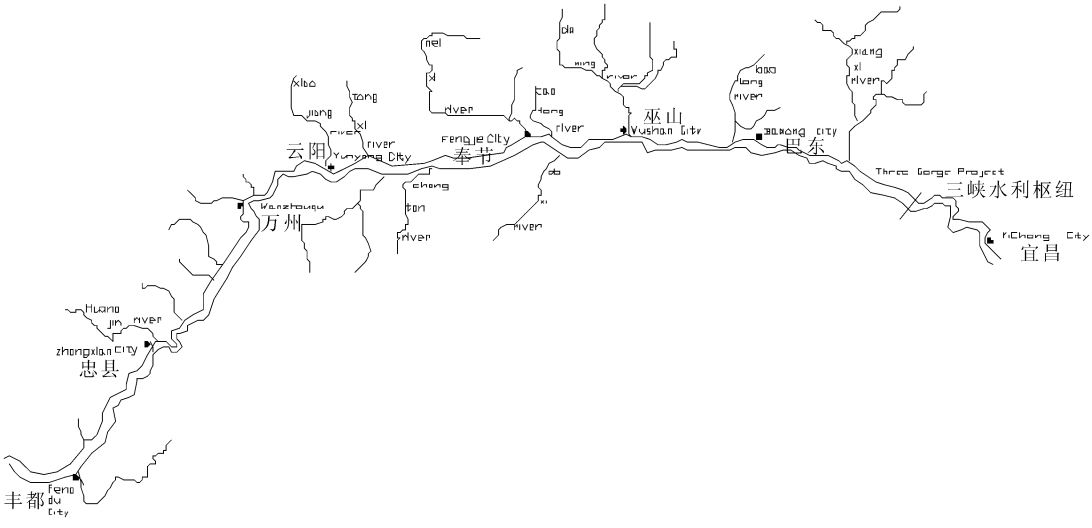


图 1　研究区域示意

Fig. 1　Map of study area in the Three Gorge reservoir

1.4　数据录入及分析

1.4.1　数据录入　利用 HP nc6000 便捷式电脑进行 Simrad EK60 程序运行以及水声学数据和 GPS 数据的导入。数据导入过程中,采样程序主要参数设置以在数据采集过程中既可最大程度过滤掉噪音干扰又可得到最优的单目标信号回波记录为标准(P

Pomare,2000),并随时调整探测量程使其最大探测距离能够达到水的底层(McQuinn I H and Pierre Nellis,2007)。采样功率 P = 300W;脉冲持续时间 PD = 64 μs 或 128 μs;Amp 回波记录的阀值 MVAMP = −100 dB,SED 的回波记录的阀值 MVSED = −60 dB。每次探测之前都用标定铜球(直径:13.7 mm, TS: −45.0dB)进行标定,设置参数使其 TS(目标强度)值在不同水层均趋于基本稳定,求出稳定的实测值和理论值(−45.0 dB)之误差,为在后面数据分析时进行 TS 值的校正,操作严格执行操作程序说明进行(Ste′phane G et al,2006)。

1.4.2　单目标回波探测分析　水声学数据采用 Sonar 5 − Pro 软件进行分析处理。预分析结果表明参数设置(见表 1)在进行数据格式转换过程中可以有效得到目标回波信号同时排除非目标的回波信号,适合单目标回波探测分析(Helg Balk and Torfinn Lindem,2000)。单个鱼体信号的识别和提取采用 CFT 方法(Cross − filter tracking)分析。其中 CFT 滤波的参数设置为: Filter1 = Mean 3, 5;Filter2 = Mean 51, 1;Perimeter filter = [50..600]。与传统的 STM 方法和 SED − detcctor 方法相比,CFT 方法可以对信噪比很低的目标信号进行有效的提取,同时通过对目标信号运行轨迹的分析可以对鱼体信号和水中其它非目标信号尤其是漂浮物作出更加准确的判断, Helge Balk(2001)通过实验指出该方法非常适用于小型河流鱼体的单目标回波分析,其分析资料的准确率可高达 97%。

表 1　单目标探测的声纳参数设置

Tab. 1　Value setting of Sonar parameters for single − target detection

声纳参数 Sonar parameter	参数设置 Setting Value
Amp 回波阀值/ dB Threshold of Amp	−100
SED 回波阀值 dB Threshold of SED	−60
时变增益 TVG	20 logR (R 为目标信号水深)
最小回波长度 Min. echo length	0.8
最大回波长度 Max. echo length	1.2
最大相差 Max. ph. s. d.	1.2
(截面)最大增益补偿/dB Max. gain comp.	3

1.4.3　资源量估算　采用 Bodholt H (1990)提出的 *Sv/ts* 回声整合平均法,计算公式:

$$Pv = \frac{Sv}{\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{k} n_k ts_k} \tag{1}$$

式中,$Pv = f/m^3$,代表每 1 000 m^3 水体中所有种类鱼体的数目,即单位体积水体中鱼体平均密度(尾/1 000 m^3);N 为鱼体的资源总量;k 为分类级别,即探测水体内鱼体的种类数;n_k 为第 k 种鱼体的个数;ts_k 为第 k 种鱼的平均目标强度; Sv 为波阵反射体积(Volume reverberat)。

波阵反射体积计算公式(Helg Balk and Torfinn Lindem,2005):

$$Sv = \frac{1}{m}\sum_{i=p_1}^{p_2}\sum_{j=R_{1,i}}^{R_{2,i}} 10^{\frac{Sv_{i,j}}{10}} \tag{2}$$

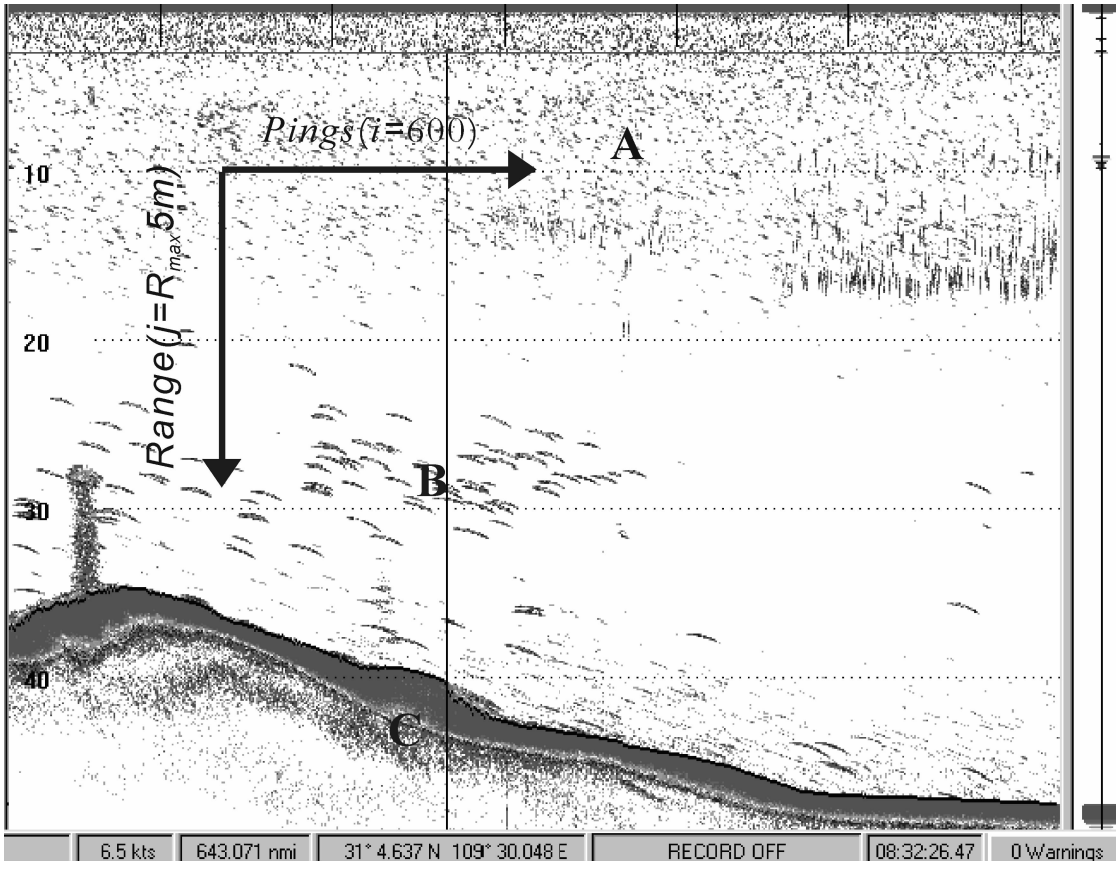
$$M = \sum_{i=p_1}^{p_2}\left(\frac{R_{2i} - R_{1i}}{\triangle R}\right) - Erased_i \tag{3}$$

式中:P = ping,i 代表所分析 ping 的数目;$\triangle R$ 为在垂直方向上每 2 条鱼之间能够辨认的最小距离,本次实验中 $\triangle R = 4.75$ cm,数据的计算过程中令 $i = [600..800]$,具体根据取样过程中船只速度的快慢来适当选择;$Erased_i$ 为 i 个 pings 内对回波记录进行 low − pass 滤波的矩阵,该矩阵的结果在每一次进行 CFT 分析后便确定,其计算方法为 sonar5 − pro 内置,无需额外计算,其计算方法见 Helge Balk (1986)。$R_1 = 5$ m, $R_2 = R_{max}$、为探测到的最大水深;$j = R_1 - R_2$,表示本次试验中从第 5m 的水层到底部的深度(分析的资料如图 2),另外从 5 m 深水层到表层的资料没有作分析,具体原因将在讨论中给出。

分类级别 K 与 等值的计算:因为计算数据的目标强度值均在 −60 ~ −18dB 之间,采用每隔 −3dB 数据作为一组,令 $n_1 = [-60, -57)$; $n_2 = [-57, -54)$…… $n_{14} = [-21, -18)$,把所有探测到明确鱼体的目标强度人为分为 14 个区间,再以唱票的形式对 STM 探测到的鱼体数目(fish in the fish − basket)进行对应的分组,计算出各组内的个数和组间平均值,$\overline{ts_k}$随后求出整体鱼类 TS 的加权平均值$\overline{ts}$,把该值纳入公式(1)进行计算即得:

$$f/m^3 = \frac{Sv}{\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{14} n_k \overline{ts_k}} \tag{4}$$

式(4)中:N 为每一分析断面(例如每 600pings 或者每 800pings 的数据)中通过 CFT 方法探测到鱼体总的数目;n_k 为每 k 组别内鱼体的数目;$\overline{ts_k}$表示第 k 组内的得到的平均目标强度,$\overline{ts_k} = 62 - 3k$。最后采用 SPSS13.0 进行统计分析,Excel 作图。



A:表层气泡回波信号;B:鱼体回波信号;C:河床底质回波信号

图2 基于Sv/ts方法对鱼类资源量估算示意

A: signal of the air bladder ;B:signal of the fish; C:signal of the bottom

Fig. 2 Sketch map of fish biomass estimation based on Sv/ts methods

2 结果与分析

2.1 探测区域水深

在分析资料时将每隔600~800个ping的回波图像长度作为一个片段来分析处理,最后获得1 232个片段的数据(其中干流数为767个,支流为465个)。随后对这些获得数据进行再分析时,又把数据分为干流和支流2大组,干流中每2个县区间江段又分为1个小组,每条支流单独作为1个小组。由于三峡大坝前到秭归港这段距离调查得比较密集,所以在分析资料时也单独作为1个组。

干流中每个江段平均调查的长度约为39 km,平均水深66.25 m,最大水深在巴东-巫山江段,约135 m。每条支流的调查长度约为19 km,由于黄金河、东溪河等调查的长度不够,不能够代表整条河流的情况,无法将它们同其它河流的情况比较,因此最后只分析了在获得数据上具有可比性的9条支流。9条支流平均水深约为44 m,其中最深的支流为抱龙河,平均水深为73.6 m、最大水深约为110 m。从整体上来看支流要比干流浅。具体见表2。

2.2 库区中鱼类整体分布特征

2007年4~5月,三峡水库从坝前至丰都段鱼类的平均密度为567.68尾/dam^3,其95%置信区间为545.01~616.80尾/dam^3(包括干流和支流)。而所调查的干流鱼类的平均密度为513.17尾/dam^3,95%的置信区间是482.86~543.49尾/dam^3;所有调查支流鱼类密度平均为608.39尾/dam^3,95%的置信区间是574.47~642.31尾/dam^3。t检验结果($P<0.01$)表明干流和支流的鱼类资源量之间存在极显著的统计学差异,支流中鱼类密度极显著高于干流。干流各江段以及各支流的鱼类密度详情见表3和表4。

表 2　调查水体水深探测结果

Tab. 2　Results of suvery distance and depth of every segment in Three Gorge reservoir

区域	区段名称 Segments	探测距离/km Survey dist.	平均水深/m Av. depth	最大水深/m Max. depth	最小水深/m Min. depth
干流 Mainstream	坝前	19.5	91.5	130	26.1
	秭归－香溪	33.7	100.3	141.5	61.0
	香溪－巴东	23.6	86.8	130	34.3
	巴东－巫山	27.7	66.4	135	31.4
	巫山－奉节	22.5	73.5	90	52.2
	奉节－云阳	68.8	60.0	100.0	35.9
	云阳－万州	34.1	50.3	76.1	18.3
	万州－忠县	83.8	40.7	79.3	17.0
	忠县－丰都	44.0	26.8	48.8	15.1
支流 Anabranch	香溪河	26.5	37.2	80	9.9
	抱龙河	24.5	73.6	110	31.5
	大宁河	41.8	41.4	80	7.9
	大溪河	7.0	46.8	70	22.7
	草堂河	8.9	35.8	60	12.1
	梅溪河	13.8	40.5	61	19.8
	长滩河	6.8	43.1	48.1	30.0
	汤溪河	12.5	40.5	65	20.1
	小江	32.2	37.1	50	16.2

表 3　干流各区段鱼类平均密度　　尾/dam^3

Tab. 3　Estimates of fish density in the mainstream

95% 置信区间 95% CL	干流区段名称 Segments of maintream								
	坝前	秭归－香溪	香溪－巴东	巴东－巫山	巫山－奉节	奉节－云阳	云阳－万州	万州－忠县	忠县－丰都
低限 Lower	104.9	36.0	138.9	28.6	7.2	189.3	766.4	698.4	2 294.9
高限 Upper	127.1	43.1	174.4	43.1	9.0	218.0	931.3	813.0	2 899.2

* Case weighted by depth

表 4　各支流鱼类平均密度　　尾/dam^3

Tab. 4　Estimates of fish density in the anabranch

95% 置信区间 95% CL	支流名称 Segments of anabranch								
	香溪河	抱龙河	大宁河	大溪河	草堂河	梅溪河	长滩河	汤溪河	小江
低限 Lower	621.7	106.2	140.9	150.9	533.5	398.4	1 793	516.9	1 332.2
高限 Upper	650.3	115.5	146.7	160.7	555.9	416.0	1 897	553.5	1 402.0

* Case weighted by depth

采用 Footel(1987)提出体长体重与目标强度的关系计算式并结合 Bodholt H 鱼体水面密度的计算公式,可得到坝前到丰都鱼类的生物量为 137.46 kg/hm^2(95% CL:103.38～171.54 kg/hm^2);干流鱼类的生物量为 70.46 kg/ hm^2(95% CL:65.86～75.06 kg/hm^2),9 条支流鱼类生物量为 276.19 kg/hm^2(95% CL:258.65～293.74 kg/hm^2)。从该结果可以看出支流的鱼类生物量要比干流高很多。

从整体上来看,从坝前到巫山－奉节江段,鱼类的平均密度都非常低,波动范围不大,相差不到 0.1 尾/m^3;但是巫山－奉节到忠县－丰都江段,鱼类密度增加非常快,平均密度从 8.12 尾/dam^3 增加到 2 597.06 尾/dam^3,变化趋势很明显。因此从三峡水库的库首到库尾,鱼类密度总体上呈现不断上升的趋势(图 3)。支流中小江和长滩河密度相对较高,香溪河次之,抱龙河和大溪河密度最低。

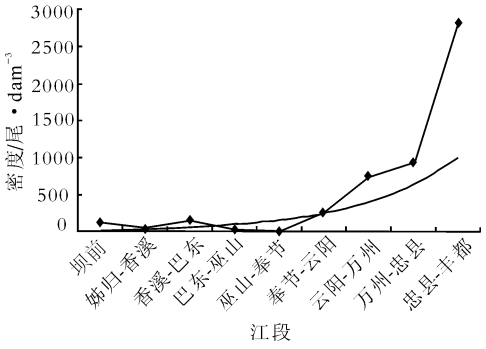


图 3　三峡水库从库首到库尾干流鱼类密度的变化

Fig. 3　Relationship between volume density of fish and distance away from the Dam in the Three Gorge reservoir

2.3 鱼类局部空间分布特征

从局部来看,水库中鱼类不是均匀分布,不同水域密度分布的波动性非常大。有些水域分布的非常密集,例如在忠县到丰都江段,GPS 为 30.0829°N、108.8340°E 到 30.0829°N、108.0007°E,总长度约 368 m,鱼类的平均密度高达 46 356.63 尾/dam^3,换算成水面密度为 70.81 尾/m^2。其中分布较为密集的几个大的区域有丰都-忠县江段和小江,密度的平均值(mean ± S.E)分别为 2 597.06 ± 154.08 尾/dam^3 和(1367.08 ± 17.80)尾/dam^3。但是也有很多水域没有探测到鱼,其密度值为几乎为 0。例如在干流中的巴东-巫山江段,在探测的水域中,大约有 75% 的水体中鱼的平均密度接近为 0,为本次调查的最大无鱼的水域。另外,即使在小江和丰都-忠县等拥有高密度鱼群的江段,密度为 0 的水体也要占整个探测水体体积的 22.7% 和 47.7%;密度大于 1 000 尾/dam^3 占整个水体的 21.1% 和 29.2%。

局部范围内鱼类的分布既有随机的又有聚群的,但是从现有数据并结合采集数据时得到的回波图像来推断,香溪河、丰都-忠县江段中成群分布鱼类占有的比例比较大;而小江、奉节-云阳江段等水域鱼类随机分布的比例可能要大一些。有待进一步研究。

2.4 不同区域鱼体大小的分布特征

整个库区探测到的鱼类个体大小呈现偏态分布,小型鱼体占绝大多数,中大型鱼体很少,特大型鱼体极少(图4)。

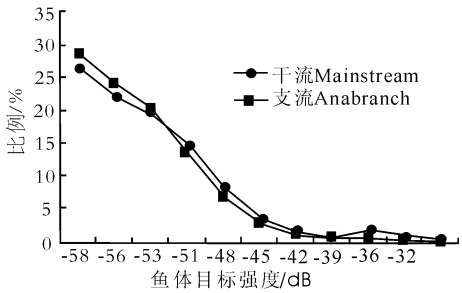


图4 鱼体目标强度分布

Fig.4 Frequency distributions of Target-Strength in the Three Gorge

目标强度为 -60 ~ -50dB 的鱼体(小型鱼体)在各水域均占 73% 以上,其中在支流和干流各占 73.2% 和 73.3%。支流鱼体目标强度的平均值为 -55.36 dB,干流的平均值为 -55.10dB。不同江段鱼体的目标强度差异不显著,即干流和支流的鱼体大小没有统计学差异。

目标强度大于 -50dB 的鱼体(中大型鱼体)约为 27%,干流目标强度平均值为 -45.04 dB;支流的平均值为 -45.94 dB。其中巴东-巫山江段鱼体目标强度相对较大,平均目标强度为 -40.52 dB;其次为巫山-奉节江段,平均目标强度为 -41.38 dB;长滩河和小江的鱼相对较小,平均目标强度分别为 -47.12 dB 和 -47.07 dB。特大型鱼体(TS > -31 dB)的数量不到 1%。

采用 Footel(1987)提出鱼体体长体重与目标强度关系式计算得到,当鱼体目标强度为 -60 ~ -50 dB,其鱼体的长度范围为 4 ~ 13 cm;目标强度为 -50 ~ -34 dB 鱼体的体长范围为 10 ~ 60 cm;目标强度大于 -31dB 鱼体的体长约为 60 cm。由于没有做相关的体长体重与目标强度关系的实验以及用实时的网捕数据作验证,因此我们只能对不同规格鱼体大小作出一个初步的判断,还不能指出其具体大小的详细范围。另外,由于我们设置的 SED 和 *Sv* 的回波图阈值为 -60 dB,即在以上分析的密度结果中计算的基本上是体长大于 6 cm 的鱼体的密度,波动范围为 4 ~ 8cm 。

3 讨论

3.1 水声学在本次研究中的问题与解决方法

3.1.1 研究水层集中在 5 m 以下到底层,但结果原则上可以代表整个水体的情况 鱼类资源的水声学探测经过 70 多年的发展,尽管在技术方法理论上已成熟 ,但是利用水声方法来研究鱼类资源量存在一些局限性。首先,换能器发射波束的张角很小,3dB 束宽仅为 7°,因此在探测过程中靠近换能器的鱼体相对于远距离的鱼体被探测到的机率要小。当船速过快时,在离换能器近的波束范围内,获得的数据不具有连续性,换能器存在一定的探测盲区:在离换能器 5 匀 m 范围内体长大于 25 cm 的鱼体探测到的机率非常小,同时小型鱼体在回波图像中很难被检出(Helg Balk and Torfinn Lindem,2005)。其次,船只的噪音干扰和换能器的脉冲会使一些离船只比较近的鱼产生一定的回避行为(谭细畅等,2002)。

由于气泡、浮游动植物、漂浮杂物等均集中在水体的表层(图2),会增加数据分析的困难同时也会对结果分析产生一定的影响。所以在分析数据时,为了避免这些因素的干扰,仅分析了库区中 5 m 水层以下鱼类的资源量情况,对 5m 水层以上的鱼类资源量情况并没有作分析原则上不影响整个调查结果的正确性。通过对历史渔获物数据进行分析得出,在三峡水库内,95% 的鱼类为铜鱼、圆口铜鱼、河

鲶、鲤、长吻鮠、草鱼、鲢、黄颡鱼(黄真理,2003),而这 8 种主要经济鱼类中只有鲢生活在水体中表层,其它 7 种鱼均为中下水层和底层鱼类。所以通过鱼探仪探测结果原则上可以反应整个水体的情况。

3.1.2　采用 *sv/ts* 方法评估资源量的原因以及结果的可信度分析　三峡库区位于重庆东部和湖北省西部,库区由丘陵、中低山和峡谷组成,东段为深嵌于巫山山脉中的三峡峡谷,西部为四川盆地的低谷丘陵区(黄真理,2003)。由于地形的复杂,在这些峡谷中接受卫星信号很困难,很多位置无法接收到 GPS 卫星信号,即使能接收信号质量也很差,误差非常大。没有精确的卫星信号无法得到船只航行的精确距离。所以本次实验资源量计算采用 *Sv/ts* 公式,因为这是不依赖于探测船的航行距离来推断资源量的公式(Bodholt H,1990)。

利用水声学方法对生物量进行评估时,决定其评估正确性的主要参数有:种类专一目标强度与体长的关系(relationship between species - specific target strength and length)和垂直方向不同水层鱼体分布的探测能力(the effect of vertical distribution on detectability)(McQuinn I H et al,2005)。但是该实验的进行时间为长江中上游的禁渔期,无法获得足够渔获物来统计该水体内鱼类的种类、组成比例和各种规格鱼体的分布情况,也没有对鱼体进行体长与 TS 值相关关系的标定,即无法确定 Bodholt H 公式中分类级别之 K 值以及相应的 $\overline{ts_k}$。在没有种类专一目标强度及体长关系的情况下,无法对不同种类鱼体的平均目标强度和体长体重关系进行换算(Ste′phane G et al,2006;Bodholt H,1990)。所以我们把所有探测到鱼体的目标强度从强到弱排序,人为的分成若干组,利用组间平均值 获得鱼体密度,这样变换求得的结果更加准确。

通常情况下,标定误差和探测能力是影响数据分析的一个重要原因。鱼体目标强度的标定值和实际探测值之间往往会存在几分贝的差异,这种差异直接影响鱼体目标强度与生物量转换的计算结果正确性;其次,鱼体在水中游动行为会使探测到的鱼类的目标强度产生很大的波动。通过标定的目标强度来对鱼体进行分类鉴别同样有很大的局限性(McQuinn I H et al,2005)。通过变相的转换 K 和可有效克服标定值与实际探测值之间的差异。相对而言,利用水声学方法对鱼体密度估算的结果更加准确。但是由于没有种类专一目标强度与体长体重的相关关系,不能计算出各种鱼的反射系数,只能考虑整体的资源量状况,对整体的鱼类资源量的相对丰度进行估算,无法对不同种类分别分析(McQuinn I H et al,2005;Redwood W et al,2004)。另外,生物量是借助 footel(1987)提出的体长体重与目标强度关系式来计算的,其结果可能与实际值存在一定的差异,换算出生物量是为了方便与其他的数据进行比较。

3.1.3　鱼类空间分布特征的原因探索性分析　三峡库区鱼类资源量丰富。在成库以前有 127 种鱼,以鲤科鱼类为主,分布较广泛。在库区鱼类组成中,长江上游特有鱼类有 40 多种;其中产量较高的只有铜鱼、圆口铜鱼、河鲶、鲤、长吻鮠、草鱼、鲢、黄颡鱼等 8 种,占渔获物的 95%(黄真理,2003)。产量较高的 8 种鱼中,铜鱼、圆口铜鱼适应于流水环境,不适应于水库环境,其它 6 种鱼均适应于水库环境(中国科学院水生生生物研究所鱼类生态学与资源保护学科组,2004)。按照鱼类的生活习性来分析水库完全适应于绝大部分鱼类的生存。但是研究结果得出库区鱼类呈现的空间分布特征为:支流鱼类资源量要比干流高;从坝前到丰都,即从库首到库尾,鱼类的资源量呈现不断上升的趋势。原因有 3 个。①鱼类有季节性分布特征。本次调查时间 4 ~ 5 月为长江中上游鱼类的繁殖季节(中国科学院水生生生物研究所鱼类生态学与资源保护学科组,2004),因此,很多鱼都在找合适的繁殖环境。三峡水库库首的水文水力学条件如水流无法满足鱼类繁殖的要求,库尾相对于坝前区域和支流相对干流水的流速高,鱼类会往上到水流比较急的库尾和支流产卵繁殖。②水生态系统中营养物质数量和时空格局的变化必然会对鱼类的分布产生直接的影响。随着水库水深的提高,水文情势发生改变,水库中浮游动植物的分布必将发生改变。鱼类作为水生生物生态系统食物链中的最高层次物种,为了追求合适的索饵场、育肥场从而在空间上产生了如此的分布特征。③鱼类的资源量和水深之间存在一定的关系。水深是鱼类选择产卵、索饵、育肥等栖息场所的条件之一,其他条件有温度、溶解氧、pH、流速、地质、弯曲度、泥沙等。通过分析各江段和支流某一断面的鱼类资源量和该断面水深的相关关系,发现只有在巴东 - 巫山江段和万州 - 忠县江段鱼类资源量和水深存在低度相关($R = 0.357$, $P < 0.01$; $R = -0.300$, $P < 0.01$),总体上来说某一断面鱼类的资源量和水深之间不存在相关关系;但是把各个江段和支流的鱼类平均资源量和江段的平均水深进行相

关分析时得出,鱼类的资源量和水深之间存在极其显著的中度负相关($R = -0.629$, $P < 0.01$)。这种相关关系是说明了水深决定鱼类的分布,还是说明了由于不同区域水深的不同造成了其它生物、非生物因子的改变从而造成了鱼类特定的空间分布,有待进一步研究。

3.1.4 三峡水库鱼类资源量探索性分析 研究结果显示,三峡水库鱼类资源量整体上偏低。三峡水库从坝前至丰都段鱼类的密度为567.68尾/dam^3(95% CL:545.01~616.80尾/dam^3),换算成生物量为137.46 kg/hm^2(95% CL:103.38~171.54 kg/hm^2)。三峡水库鱼类组成中,小型鱼占70%以上,中大型鱼仅占约27%,能够达到捕捞规格、提供产量的也只是中大型鱼,即三峡水库年鱼产量大约为37 kg/ hm^2。但是根据MEI指数(Dodgeli,1989)算得三峡水库的渔业年产量约为70 kg/hm^2,约为本次调查结果的2倍。这只是现实的推断值与理论值相比较所得的一个结果,其可靠性还有待进一步验证。另外,不同地区之间和同一地区之内水库和河流在渔业产量上有相当大的变化:因为渔业产量取决于河流的长度和河流面积,对于河流的特定区域而言,还取决于沿河流连续统片段分割的位置(Donald Jackson and Gerd Marmulla ,2000)。因此也不能将三峡水库的渔业资源直接同其他水库进行比较。

3.1.5 本研究的不足和展望 由于本研究只在一个季节进行,对于不同季节鱼类的空间分布特征目前还不明确,有待进一步研究。由于实验次数的不足以及主要集中在船只航线上探测采样,进行断面探测的次数不够,而且只有1次的数据,这都可能会对结果产生一定的偏差。另外,本研究只做了垂直探测,由于条件的限制没有做水平方向上的探测,所以在5 m水层以上的数据没法分析,这虽在原则上不影响数据分析结果,但是否能真正的代表三峡水库整体情况也还有待进一步研究。

志谢:感谢长江水环境监测中心藏小平主任对本次实验的支持和帮助,感谢陈水松及水环监2000号上所有船员对具体工作的支持和帮助,同时也感谢同事郑海涛和王翔的鼎力协助。

参考文献:

黄真理. 2003. 三峡工程生态与环境监测和保护[M]. 北京:中国三峡出版社.

黄真理,廖文根,等. 2006. 中国环境水力学[M]. 北京:中国水利水电出版社.

立川贤一,朱志荣,等. 1986. 用浅水湖泊型鱼探仪估算东湖鱼群数量[J]. 水生生物学报,10(4):311-326.

谭细畅,立川贤一,等. 2002. 东湖放养鱼类时空分布的水声学研究[J]. 水生生物学报,26(6):585-590.

中国科学院水生生生物研究所鱼类生态学与资源保护学科组. 2004. 中国淡水鱼类原色图集[M].

Bodholt H. 1990/B. Fish density derived from echo-integration and in-situ target strength measurements[R]. Int. Coun Explor Sea CM, 11, 10 .

Donald Jackson , Gerd Marmulla . 2000. The Influence of Dams on River Fisheries[R]. Word Commission on Dams.

Ehrenberg J E. 1983. A review of in situ target strength estimation techniques[R]. FAO Fisheries Research Report, 300: 85-90.

Foote K G. 1987. Fish target strengths for use in echo integrator surveys[J]. Journal of the Acoustical Society of American, 82:981-987.

Helg Balk. 2001. Development of hydroacoustic methods for fish detection in shallow water[D]. Norway:University of Oslo.

Helg Balk,Torfinn Lindem. 2000. Improved fish detection in data from split beam transducers. Aquat. Living Resource. [J]. 13(5):297-303.

Helg Balk ,Torfinn Lindem. 2005. Sonar4, Sonar5 and Sonar6 Post processing systems Operator manual version 5.9.6 [M]. Norway.

K A Johannesson,R B Mitson. 1983. Fisheries acoustics A practical manual for aquatic biomass estimation[M]. FAO Fisheries Technical Paper.

McQuinn I H,Pierre Nellis. 2007. An Acoustic Trawl Survey of Middle St. Lawrence Estuary Demersal Fishes to Investigate the Effects of Dredged Sediment Disposal on Atlantic and Lake Sturgeon Distribution[J]. Department of Fisheries and Oceans, Maurice Lamontagne Institute,Canada.

McQuinn I HY, Simard T W F, et al. 2005. An adaptive, integrated "acoustic trawl" survey design for Atlantic cod (Gadus morhua) with estimation of the acoustic and trawl dead zones[J]. ICES Journal of Marine Science, 62:93-106.

P Pomare. 2000. An evaluation of horizontal echo sounding as a method for behavioural studies of 0+ fish in field experiments[J]. Journal of Fish Biology, 58:1512-1523.

Redwood W, Nero, Charles H, et al. 2004. In situ acoustic estimates of the swimbladder volume of Atlantic herring (Clupea harengus)[J]. ICES Journal of Marine Science,61: 323-337.

Ste′phane G, Conti,Philippe Roux , et al. 2006. Acoustical monitoring of fish density, behavior, and growth rate in a tank

[J]. Aquaculture ,251:314 – 323.

T Torgersen , S Kaartvedt. 2001. In situ swimming behaviour of individual mesopelagic fish studied by split – beam echo target tracking [J]. ICES Journal of Marine Science, 58:346 – 354.

Y Qiao, J Chang, et al. 2006. Chinese Sturgeon (Acipenser sinensis) in the Yangtze River: a hydroacoustic assessment of fish location and abundance on the last spawning ground [J] J Appl Ichthyol, 22: (Suppl 1)140 – 144.

Zhao X. 1996. Target strength of herring (Clupea harengus L) measured by the split – beam tracking method [D]. Norway: University of Bergen.

(责任编辑　张俊友)

Hydroacoustic Surveys on Spatial Distribution of Fishes in the Three Gorges Reservoir During the First Impoundment

TAO Jiang-ping[1,3], CHEN Yong-bo[2], QIAO Ye[1], TAN Xi-chang[3,4], CHANG Jian-bo[1]

(1. Insititute of hydroecology MWR & CAS, Wuhan　430079, China;
2. China Three Gorges Project Corporation, Yichang　443002, China;
3. Institute of Hydrobiology Chinese – Academy of sciences, Wuhan　430071, China;
4. Pearl River Fishery Research Institute Chinese Academic of Fishery Science, Guangzhou　510380, China)

Abstract: Hydroacoustic technology provides powerful tools for determining size, abundance, and distribution of fish. An application of a split – beam echosounder operating at 200 kHz was investigated to estimate the density of the fish stock in the Three Gorge reservoir in April and May 2007. The transducer was set vertically to get the fish echo from the depth of 5 meter to the bottom water layers. Survey has been conducted in the mainstream as well as in the nine anabranchs of the Three Gorges reservoir. All of the echogram has been divided into 1 232 units by 600 ~ 800pings per unit, each unit analysed indvidually. Results indicated that , on the area of surveyed, distribution of the fish stock is uneven and, the volume density of fish in the segment Wushan – Fengjie is rare, and the mean density merely is 8.1ind./dam^3. (SE = 0.47), but in the segment Zhongxian – Fengdu is 2 597.06 ind./dam^3 (SE = 154.08) ,which is the highest volume density area of reservoir. The results also indicated that from Three Gorge Dam to segment Zhongxian – Fengdu, the volume density of fish stock has a trend of increasing. Meanwhile, volume density of fish stock in the anabranch is higher than that in the mainstream. The spatial variations of distribution of fish densities might caused by the ascending of water level or lower of the velocity of flow, Which need a future study.

Key words: Three Gorges reservoir; Hydro – acoustic; Target – Strength; Biomass