

DOI: 10.5846/stxb201401010001

孙明波, 谷孝鸿, 曾庆飞, 王银平, 毛志刚, 谷先坤. 基于水声学方法的天目湖鱼类季节和昼夜空间分布探讨. 生态学报, 2015, 35(17): - .
Sun M B, Gu X H, Zeng Q F, Wang Y P, Mao Z G, Gu X K. Seasonal and daily spatial distribution of fish in Lake Tianmu based on the hydroacoustic method. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(17): - .

基于水声学方法的天目湖鱼类季节和昼夜空间分布探讨

孙明波^{1,2}, 谷孝鸿^{1,*}, 曾庆飞¹, 王银平^{1,2}, 毛志刚¹, 谷先坤^{1,2}

1 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要:本文采用水声学方法系统地对天目湖春夏秋冬四季鱼类水平和垂直空间分布进行了调查研究,同时对昼夜探测的差异性进行了比较,并对不同季节间鱼类聚群形态进行了探讨。研究表明,天目湖鱼类在不同季节间存在规律性水平迁移,从全湖角度分析,天目湖鱼类资源昼夜间的水平空间分布无明显差异特征,但在春末和夏季的局部区域里,昼夜间鱼类存在一定近岸—远岸的水平迁移;不同季节和昼夜间,鱼类垂直分布差异明显,且在存在温跃层的夏季 7 月昼间,鱼类密度垂直分布与水温的垂直分布关系密切,温跃层以下的鱼类密度基本为 0;天目湖鱼类在四个季节都属于成群分布类型,但季节间鱼类聚群形态不同,在冬季的 1 月呈现出典型的聚集,相对于昼间,春夏季鱼类在夜间分布更为均匀、分散,且水平探测表明在夜间水体表层存在大量鱼类分布。

关键词:水声学; 鱼类; 空间分布; 季节; 昼夜

Seasonal and daily spatial distribution of fish in Lake Tianmu based on the hydroacoustic method

SUN Mingbo^{1,2}, GU Xiaohong^{1,*}, ZENG Qingfei¹, WANG Yinping^{1,2}, MAO Zhigang¹, GU Xiankun^{1,2}

1 State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The seasonal and diurnal changes of horizontal and vertical spatial distribution of fish were studied by applying the hydroacoustic method in Lake Tianmu. The results showed that there was regular horizontal migration of fish between different seasons and no significant difference in horizontal distribution between day and night in Lake Tianmu. However, there existed a slight diurnal change in the inshore—offshore horizontal migration in some parts of the lake area during the late spring and in the summer. Significant differences in vertical distribution were found between seasons and between day and night. The vertical distribution of fish density was significantly affected by the water temperature stratification in July when there was a thermocline, and the fish density in hypolimnion was almost zero. The fish in Lake Tianmu was distributed in groups in the four seasons, but the typical cluster form occurred only in January. Relative to the daytime, the fish distribution at night was more uniform and scattered. Moreover, horizontal survey showed that a large number of fish was spread in the upper water layer at night.

Key Words: hydroacoustic; fish; spatial distribution; seasons; day and night

基金项目:国家自然科学基金(31270506);“十二五”国家科技计划(2012BAD25B06/07);江苏省自然科学基金(BK20131059)

收稿日期:2014-01-01; **网络出版日期:**2014-11-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xhgu@niglas.ac.cn

在自然条件下,鱼类并不是均匀随机的分布在水体中。在水体中不同的时空会形成特定的生境,鱼类也会根据生境因子进行索饵、洄游、栖息、聚群、繁殖等行为,且随鱼类种群不同而各有特点。季节变化和昼夜变化都会引起鱼类的各种垂直和水平迁移行为,如何在湖泊等大尺度水体对鱼类这种季节和昼夜空间分布变化进行研究是传统鱼类调查方法面临的一大难题,随着计算机技术和硬件性能的提高,水声学技术为相关研究提供了一种有效途径。

水声学方法具有快速高效、调查区域广、不损害生物资源、提供连续数据、自然状态下定位鱼类空间分布、准确估算鱼类密度和资源量等优势^[1],该方法在国外有广泛应用^[2-6],国内也有了初步的发展^[7-11],而近年来采用水声学方法对鱼类在水体中的季节和昼夜空间分布的研究也得到了一些进展,如在对维多利亚湖的调查中,Albert 等^[12]发现不同季节中鱼类时空分布有明显的差异,在中心湖区 8 月份测得的鱼类密度要显著高于 2 月份。Axenrot 和 Guillard 等^[13-15]在研究中则对鱼类昼夜分布特性进行了探讨,认为夜间鱼类个体较为均匀分散在水体中,测得的单体目标强度更为准确。Kubecka 和 Wolter 等^[16, 17]的研究表明鱼类昼夜间在远岸区和近岸区有明显的水平迁移行为,并且不同种群体现出不同的行为。Frank 和 Kubecka 等^[16, 18]的昼夜调查研究中也发现鱼类分布在夜间要比日间更分散。虽然国外分别进行了部分不同季节和昼夜的鱼类资源水声学调查研究,但在我国湖泊中仍缺乏春夏秋冬四个季节昼夜间的调查,对这方面进行系统研究非常必要,是鱼类行为生态学研究的基础、对水体渔业生产具有现实指导意义。

1 研究区域和研究方法

1.1 研究区域概况

天目湖(119.419747°E, 31.291017°N, 图 1)位于江苏省溧阳市南部丘陵地区,集水域面积 148.5 km²,湖泊面积 9.8 km²,最大水深 16 m,平均水深 6—8 m,南部有平桥河、中田河、下宋河流入。天目湖以放养的鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)和鳙(*Aristichthys nobilis*)为主要优势种^[19]。2011—2012 年冬季由于鱼类活动能力下降,天目湖采用机动船只拖曳白板树枝的方式将上下游鱼类驱赶至布置在中游的集鱼网箱,然后在赶鱼结束后的冬末春初陆续进行渔业捕捞与放流。2012 年春季、夏季和秋季的 4 月—11 月则采用在湖区上中下游布置 9 个网簖的方式进行捕捞。放流鱼类主要是规格在 0.4 kg/尾的鲢和鳙以及规格约 0.2 kg/尾的长春鳊(*Parabramis pekinensis*)。

1.2 水声学调查方法

本研究从 2011 年冬季到 2012 年秋季共对天目湖进行 6 次鱼类资源水声学调查(表 1),水声学探测仪器为 Biosonics DT-X 型回声探测仪(半功率波束角 6.5°的分裂波束换能器,工作频率为 208 kHz)。采用 Garmin GPS 17x HVS 对位置数据同步采集存储,使用 BioSonics Acquisition 6.0 软件进行水声学数据采集,脉冲收发周期为 0.125 s,脉冲宽度为 0.5 ms,目标强度信号数据收集阈值为 -130 dB。使用快艇进行走航调查,并利用 Garmin Oregon450 导航仪进行航线导航,采取“之”字形航线走航调查,先进行垂直探测,将换能器用铁架固定于船舷,吃水 0.4 m,数据收集距离为 0.5—20 m,考虑垂直探测受近场和表层鱼类回避行为的影响,本文探索在返航时进行水平探测,并将其与垂直探测拟合计算单位面积鱼类密度^[18, 20],水平探测时同样将换能器用铁



图 1 天目湖区域图

Fig.1 The map of Lake Tianmu

架固定于船舷,吃水 1 m,并给予 3°向下的倾角,垂直于船体走航方向探测,数据收集距离为 1—30 m。调查航速约为 10 km/h。在调查前使用厂家原配的直径 36 mm 的碳化钨标准球对仪器进行实地校准。

按照 Aglen^[21]覆盖率公式计算三次水声学调查的覆盖率:

$$Dc = \frac{L}{\sqrt{A}}$$

(1)

式中, $L(m)$ 为水声学调查走航航程, $A(m^2)$ 为湖泊水面面积, Dc 为水声学调查覆盖率。调查信息如下表 1,其中 2011 年 12 月,天目湖正在上游进行冬季捕捞赶鱼作业,2012 年 1 月是在捕捞赶鱼作业结束后(鱼类资源调查为不包括集鱼网箱的湖区鱼类资源),2012 年 3 月是在捕捞与放流结束后。

表 1 六次鱼类资源水声学调查基本信息
Table 1 The basic information of six fish resource survey basing hydroacoustic method

调查月份 Survey month	昼夜 Day/Night	走航航程/km Length	覆盖/% Coverage rate	平均水深/m Average depth	表层水温/℃ Surface water temperature	天气 Weather
2011-12	昼/Day	20.3	6.15	6.36	11.5	晴转阴,无风
	夜/Night	—	—	—	—	—
2012-1	昼/Day	21.1	6.35	6.28	4.1	多云,微风
	夜/Night	—	—	—	—	—
2012-3 月	昼/Day	20.1	6.09	7.59	14.8	阴,微风
	夜/Night	22.4	6.78	7.81	13.2	阴,微风
2012-5	昼/Day	18.2	5.51	8.60	21.4	晴,无风
	夜/Night	17.7	5.36	8.05	20.9	晴,无风
2012-7	昼/Day	19.4	5.88	7.32	31.6	晴,无风
	夜/Night	18.9	5.73	8.05	31.4	晴,无风
2012-10	昼/Day	15.1	4.57	7.53	18.7	阴,微风
	夜/Night	19.1	5.79	7.28	18.3	阴,无风

1.3 水声学数据处理和 GIS 建模

对采集到的水声学数据用 BioSonics Visual Analyzer 4.1 进行分析,其中单体回声检测识别的设定参数: Echo Threshold(回波阈值)-60 dB,Correlation Factor(相关系数) 0.9,Min Pulse Width Factor 0.75(最小脉冲宽度系数),Max Pulse Width Factor 3(最大脉冲宽度系数),End Point Criteria(回波时间计算点)-12 dB,TVG(Time-Varied Gain,时变增益)为 40lgR。以从下游至上游每 300 个脉冲发射时间所航行的距离(约 110m)作为一个回波数据分析单元。垂直探测波束数据分析范围 1—20 m,分析结果包括湖区单位面积鱼类个体数量 FPUA(Fish Per Unit Area, ind/m²)、单位体积鱼类个体数量 FPCM(Fish Per Cubic Meter, ind/m³)、单元起始坐标、单体识别结果、单元平均水深等,另记下每个单元的中心脉冲坐标。水平探测数据分析波束从 5 m 开始,终止距离根据接近湖岸、船只摆动、水底凸起、水面回波、水底回波等实际情况人工划定,有效分析结果为 FPCM,代表上层水体(0—4m)的鱼类密度(FPCM)。

由于鱼类在秋冬季倾向于深水越冬和反应减缓,根据水声学调查结果进行鱼类密度的统计分析,若上层水体垂直探测(1—4m)和水平探测的鱼类密度无显著性差异($P>0.05$),只采取垂直探测(1—20m)的分析作为调查结果。若两者差异性显著,采取以下方式进行拟合计算各单元调查结果。

$$FPUA = FPCM_h \times h \quad (h \leq 4)$$

(2)

$$FPUA = FPUA_v + FPCM_h \times 4 \quad (h > 4)$$

(3)

$$FPCM = FPUA/h$$

(4)

式中, $FPUA_v(ind/m^2)$ 为分析单元垂直探测(4—20m)的单位面积鱼类尾数, $FPCM_h(ind/m^3)$ 为分析单元水平探测单位体积鱼类尾数, $h(m)$ 为分析单元的平均水深。

采用 ArcGIS10.0 软件进行鱼类资源分布的建模^[9],将分析计算出的 FPUA、单元中心坐标 GPS 数据导入 ArcGIS 平台,采用 IDW 方法进行栅格插值运算^[22, 23]。设定栅格大小为 0.0001° ,大小约为 $11.5\text{ m}\times 9.5\text{ m}$,设定幂值 $p=2$,做出鱼类分布模型图。

另在天目湖下游大坝处的深水区设置监测区域 P(图 1),该区域为 1000 个脉冲的航行距离(约 360m),采用垂直探测的数据研究该区域鱼类垂直密度变化,由于上下层水体升温和降温不一致,在深水水体中水温和溶解氧都会在垂直空间呈现一定的变化,本研究在 1 月、5 月、7 月对 1 号点的垂直温度和溶解氧采用水质分析仪 YSI 进行实时监测,12 月、3 月、10 月采用天目湖同期监测资料,以期探讨鱼类密度垂直分布与温度、溶解氧的关系。

1.4 使用的经验公式和分析软件

所进行的数据描述性统计、正态性检验、非参数检验、相关性分析均采用 SPSS 17.0。鱼类水平分布建模采用 ArcGIS10.0。

2 结果与分析

2.1 天目湖鱼类水平分布

本研究对天目湖进行了春夏秋冬四个季节的鱼类资源水声学调查,鱼类资源在水平空间的分布随季节变化明显,采用 GIS 对其建立分布模型如图 2。鱼类水平分布在一定程度上受到不同季节的渔业活动影响,2011 年的冬季 12 月份天目湖进行赶鱼作业,受其影响鱼类呈现逃逸到中上游趋势,导致下游接近大坝处的鱼类资源量较低;而 2012 年的冬季 1 月份赶鱼结束后鱼类资源量在下游处的分布明显较高,应是鱼类返回下游的深水区越冬;2012 年的春季初 3 月份鱼类仍较集中分布在下游的深水区;2012 年春末 5 月份和夏季 7 月份鱼类则明显向中上游扩散,较为均匀的分散在湖区中,上游鱼类密度偏高;2012 年秋季 10 月份鱼类在湖区仍分散分布,但相对 7 月份鱼类资源量在下游深水区分布偏高。

由此可得出,天目湖鱼类在春夏秋冬四个季节存在一定规律的水平迁移,春季鱼类由下游深水区向上游迁移,夏季鱼类较为均匀的分布在湖区中,秋季鱼类向下游深水区迁移,冬季鱼类在下游深水区越冬。

在 3 月、5 月、7 月、10 月的鱼类资源水平分布图(图 2)中,鱼类资源昼夜分布在全湖水平空间上无明显差异特征,而在天目湖发电站的取水口处发现昼间鱼类资源量高于夜间。对近岸区(距岸 5 m 以内的区域)的鱼类密度(FPCM)进行分析,5 月和 7 月夜间近岸区单位体积计的鱼类密度显著($P<0.05$)低于昼间,而在其他月份无显著性($P>0.05$)差异,这表明在春末和夏季天目湖鱼类在昼夜间存在一定的近岸—远岸水平迁移。

2.2 天目湖鱼类垂直分布

比较水体上层(0—4 m)鱼类密度与中下层(4 m 以下)鱼类密度如图 3,在冬季的 12 月和 1 月昼间,中下层鱼类密度显著($P<0.05$)高于上层;春季 3 月的昼夜探测结果都为中下层鱼类密度与上层鱼类密度无显著差异($P>0.05$);春季 5 月和夏季 7 月的昼间中下层鱼类密度显著($P<0.05$)高于上层,但夜间则相反;秋季的 10 月昼夜探测都为中下层鱼类密度显著($P<0.05$)高于上层。

对天目湖最深处大坝前 P 号点监测可得,如图 4,夏季(2012 年 7 月)和春末(2012 年 5 月)时,在天目湖的深水区存在明显的温跃层,温跃层下温度和溶解氧都较低,而其他月份这种现象不明显,冬季各水层水温和溶解氧变化不大。对温跃层明显的夏季 7 月份进行鱼类垂直分布与水温的关系研究,如图 5 所示,鱼类密度垂直分布与水温、溶解氧密切相关,水深 7m 以下鱼类密度基本为 0,而这部分水层也完全处于温跃层之下。

2.3 天目湖鱼类聚群形态

六次调查探测到的鱼类密度变异系数都大于 1,根据孙儒泳^[24]种群分布型的标准划分,各调查阶段鱼类都属于成群分布类型。2011 年 12 月昼、2012 年 1 月昼、2012 年 3 月昼(夜)、2012 年 5 月昼(夜)、2012 年 7 月昼(夜)、2012 年 10 月昼(夜)调查实测水温为 11.5°C 、 4.1°C 、 14.8°C (13.2°C)、 21.4°C (20.9°C)、 31.6°C (31.4°C)、 18.7°C (18.3°C),对相应月份的的回波图像分析,鱼类随着温度变化在空间上展现出不同的聚群行

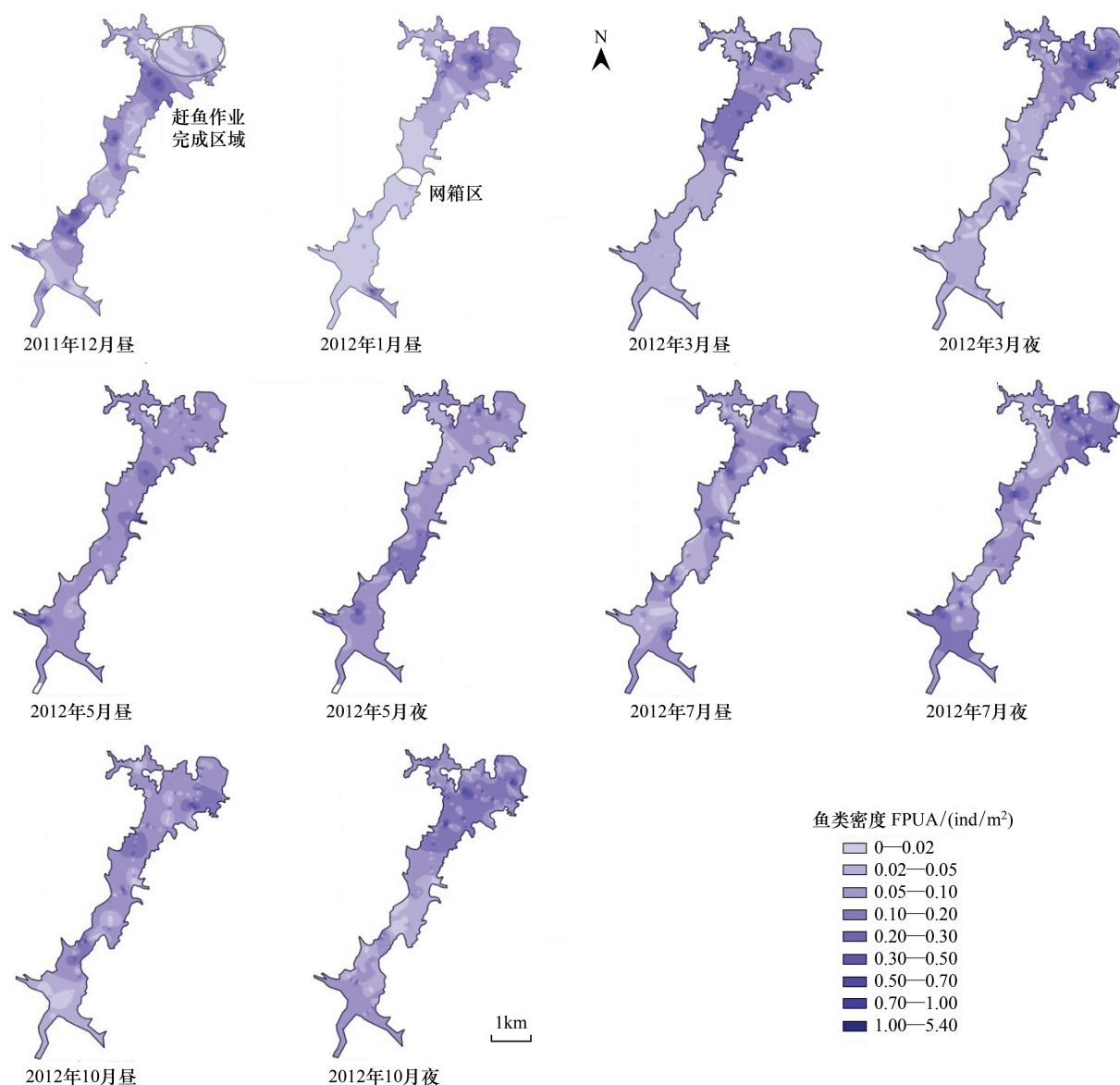


图 2 天目湖鱼类资源水平分布

Fig.2 The horizontal distribution of fish resource in Lake Tianmu

为,在温度较低的冬季 12 月鱼类有少量聚群现象(图 6A),而在温度最低的冬季 1 月出现了鱼群的典型团聚(图 6B),主要出现在 4—7m 的中下层,并且在 1 月鱼类密度的变异系数也最大,而后的春季 3 月和 5 月、夏季 7 月和秋季 10 月随着温度上升鱼类无较多成群团聚出现,仅有少量如图 6C 的聚群存在,在 5 月和 7 月鱼类相对均匀的分散在水体中(如图 6D)。在 2012 年的春夏季的调查中,对昼夜探测得到回波图像分析,鱼类在夜间时更为均匀地分散在水体中,在敞水区分布较多(图 6E),且水平探测表明在夜间存在大量鱼类分散在表层水体中(图 6F),鱼类在夜间更为活跃。

3 讨论

3.1 天目湖鱼类水平分布变化及影响因素

天目湖鱼类在春夏秋冬四个季节呈现出的上中下游水平分布及其迁移规律与天目湖鱼类的生态习性和天目湖渔业活动关系密切,天目湖鱼类以鲢鳙为主,其具有冬季在深水区越冬的生态习性^[25, 26],研究结果表

明这种趋势在春初的3月份仍然存在,但自5月开始至夏季7月,天目湖鱼类索饵行为活跃,加之上游茶园和三条河流输入较多的外源性营养盐^[27],使上游水质肥沃,浮游生物饵料丰富,天目湖鱼类自然呈现向上游迁移的规律;冬季初的赶鱼作业则显著的体现了人类渔业活动对天目湖鱼类水平分布产生的影响,另外在4月至11月,天目湖网簖捕鱼也削弱了天目湖鱼类的这种水平迁移规律。根据对天目湖鱼类水平分布的分析,天目湖可在各季节鱼类资源量分布都较高的下游近大坝处布置网簖,可提高渔业捕捞效率;而在春秋季节鱼类有向上下游迁移的趋势,这一阶段在中游迁移通道上布置的网簖将有较高的捕捞产量。在局部区域水平分布上,蓄

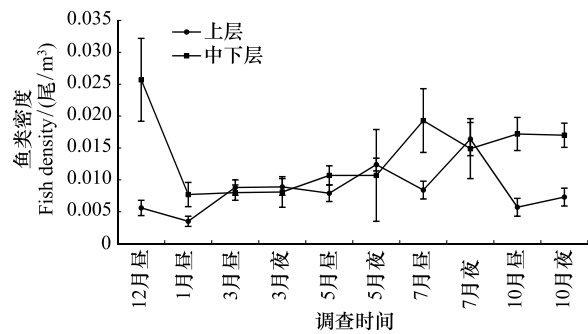


图3 天目湖鱼类在不同水层的垂直分布比较

Fig. 3 The comparison of fish vertical distribution between different water layers in Lake Tianmu

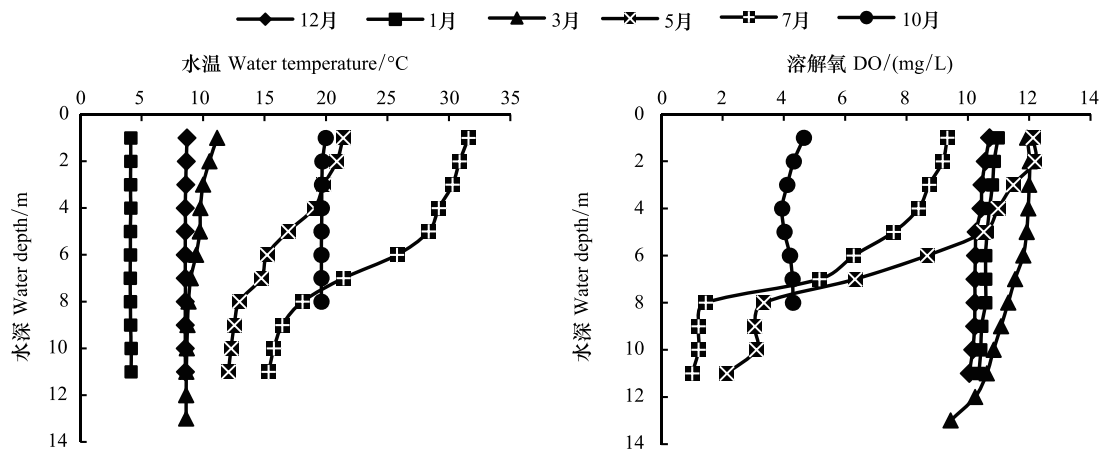


图4 水温、溶解氧与水深的关系

Fig. 4 The relationships between water depth and water temperature, DO

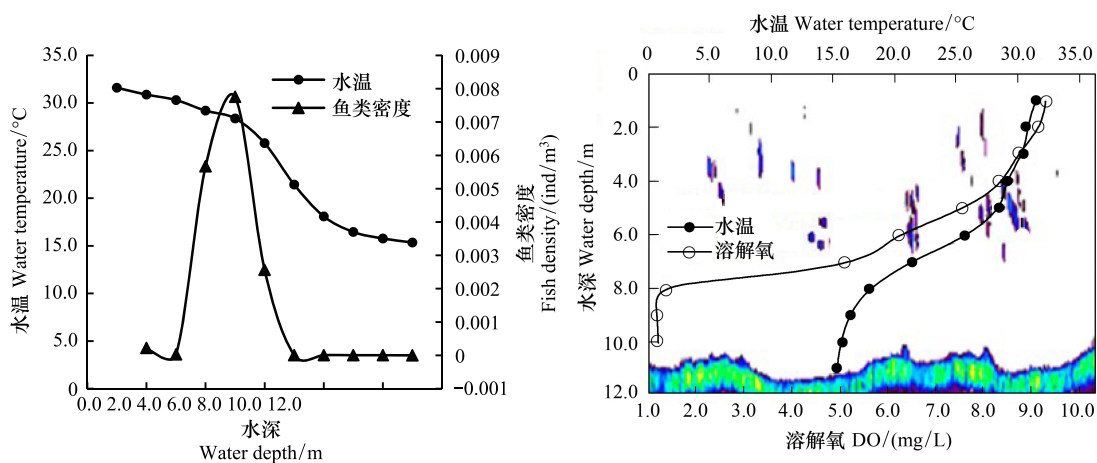


图5 7月鱼类密度与水温、溶解氧的关系

Fig. 5 The relationships between fish density and water temperature, DO in July

水电站取水口处昼间鱼类资源量高于夜间可能是昼间发电站泄水诱导鱼类逆

流习性所致;虽然 Kubečka、Wolter 和 Draštík 等^[16, 17, 28]的研究同样表明鱼类昼夜间在远岸区和近岸区有

明显的水平迁移行为,并且与不同鱼类种群的生态习性密切相关,但天目湖研究中体现出来的昼夜间鱼类远岸区和近岸区的水平迁移则应该是受鱼类生态习性和天目湖观光旅游船只的双重影响。

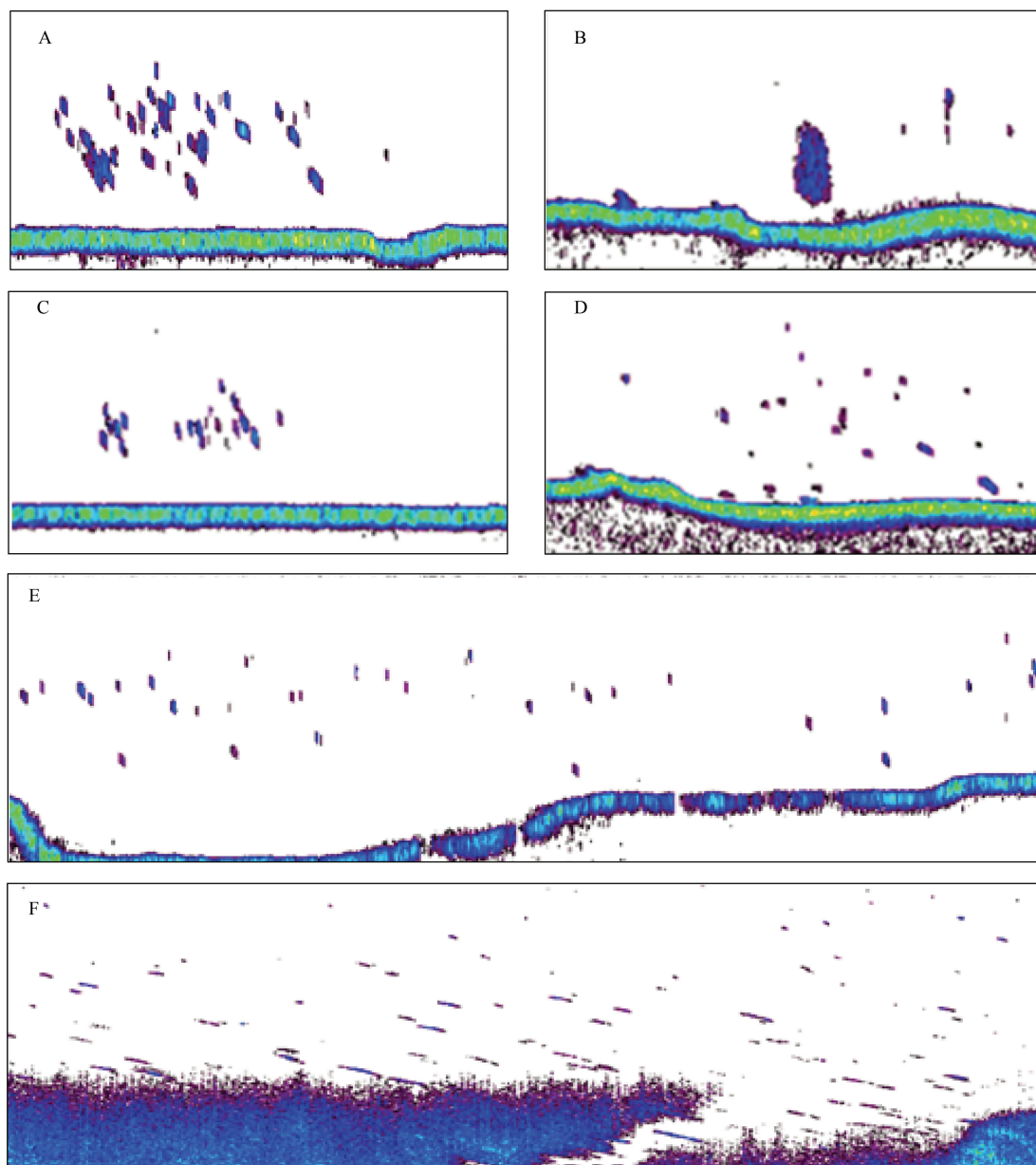


图 6 鱼类成群分布形态

Fig.6 Fish aggregations of different seasons

3.2 天目湖鱼类垂直分布变化及影响因素

在秋季 10 月和冬季 12 月、1 月,天目湖中下层鱼类密度都要显著($P < 0.05$)高于上层,这种垂直分布同样体现了鲢鳙深水越冬的生态习性;但在春夏季天目湖鱼类的垂直分布较为复杂,初春 3 月昼夜调查的结果表明鱼类密度在上层和中下层无显著差异($P > 0.05$),可能是由于 3 月份刚放养了大量幼鱼,其在垂直水层间的游动较为活跃所致;鲢鳙在春末、盛夏、秋初索饵行为非常活跃,喜集群游至水域的中上层,尤其是水质较肥的明水区^[25, 26],但本研究中春末 5 月和盛夏 7 月的昼间中下层鱼类密度却显著($P < 0.05$)高于上层,这种不一致性可能是由于天目湖属于旅游景区,昼间来往游船较多和水上娱乐项目造成的,另外调查中船只对鱼类垂直分布的干扰因素也不容忽视,这些影响因子都降低了天目湖鱼类在上层的分布,夜间的调查表明上层鱼类密

度要高于中下层则呈现出了天目湖以鲢鳙为主鱼类的生态习性^[25, 26]。已有的研究^[29]表明天目湖存在典型的温跃层现象且随季节变化明显,夏季尤为强盛,冬季基本消失。本研究中也发现了这种规律,在水层垂直水温变化明显的7月,通过对实时同地监测的鱼类密度垂直分布分析,鱼类密度垂直分布与水体垂直水温变化密切相关,温跃层以下鱼类密度基本为0,可能是鱼类对这一区域的低温和低溶解氧的回避行为,这与 Drastik^[28]的研究结果具有一致性。

3.3 天目湖鱼类聚群形态及对鱼类水声学调查方法的影响

根据变异系数划分,天目湖鱼类在空间上为成群分布,但这种区域成群可能是受多种环境因子影响的结果,并不都是鱼类主动聚群。通过春夏秋冬四个季节不同温度下的调查探测,本研究监测到了随着温度降低而出现的鱼类空间聚群的不同现象(图6),在冬季鱼类出现了明显的团聚,且在1月份团聚程度最高,这种聚群与谭细畅和 Churnside 等^[30, 31]发现的鱼类主动聚群回波图像具有相似性,应该是鱼类随着温度降低逐渐出现的鱼类聚群行为,调查的回波图像也显示随着春夏季温度升高,这种团聚逐渐消失。春夏季的昼夜调查回波图像表明鱼类在夜间更为分散,在这种状态下更适合鱼类个体水声学探测^[13-15],但春夏季在水体表层分布着大量鱼类,建议鱼类资源水声学调查同时进行垂直探测和水平探测,若只进行垂直探测则可能会因鱼类对船只的回避行为造成评估的资源量偏低^[18]。

参考文献 (References):

- [1] Simmonds J, MacLennan D. Fisheries Acoustics: Theory and Practice. 2nd ed. Oxford: Blackwell Publishing, 2005: 1-8.
- [2] Auvinen H, Jurvelius J. Comparison of pelagic vendace (*Coregonus albula*) stock density estimation methods in a lake. Fisheries Research, 1994, 19(1/2): 31-50.
- [3] Shirakihara K, Yoshida M, Nishino M, Takao Y, Sawada K. Acoustic evaluation of the vertical distribution of dwarf ayu *Plecoglossus altivelis altivelis* in Lake Biwa. Fisheries Science, 2001, 67(3): 430-435.
- [4] Wanzenböck J, Mehner T, Schulz M, Gassner H, Winfield I J. Quality assurance of hydroacoustic surveys: the repeatability of fish-abundance and biomass estimates in lakes within and between hydroacoustic systems. ICES Journal of Marine Science, 2003, 60(3): 486-492.
- [5] Fabi G, Sala A. An assessment of biomass and diel activity of fish at an artificial reef (Adriatic sea) using a stationary hydroacoustic technique. ICES Journal of Marine Science, 2002, 59(2): 411-420.
- [6] Hughes S. A mobile horizontal hydroacoustic fisheries survey of the River Thames, United Kingdom. Fisheries Research, 1998, 35(1/2): 91-97.
- [7] 王珂, 段辛斌, 刘绍平, 李志华, 陈大庆. 三峡库区大宁河鱼类的时空分布特征. 水生生物学报, 2009, 33(3): 516-521.
- [8] 张慧杰, 杨德国, 危起伟, 杜浩, 张辉, 陈细华. 葛洲坝至古老背江段鱼类的水声学调查. 长江流域资源与环境, 2007, 16(1): 86-91.
- [9] 陶江平, 艾为明, 龚昱田, 陈志俭, 李尚鲁, 谢起浪, 陈少波, 周志明. 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. 生态学报, 2010, 30(11): 2992-3000.
- [10] 谭细畅, 史建全, 张宏, 陶江平, 杨建新, 祁洪芳, 李新辉. EY60 回声探测仪在青海湖鱼类资源量评估中的应用. 湖泊科学, 2009, 21(6): 865-872.
- [11] 陈国宝, 李永振, 赵宪勇, 陈毓桢, 金显仕. 南海北部海域重要经济鱼类资源声学评估. 中国水产科学, 2005, 12(4): 445-451.
- [12] Getabu, A, Tumwebaze R, MacLennan D N. Spatial distribution and temporal changes in the fish populations of Lake Victoria. Aquatic Living Resources, 2003, 16(3): 159-165.
- [13] Axenrot T, Didrikas T, Danielsson C, Hansson S. Diel patterns in pelagic fish behaviour and distribution observed from a stationary, bottom-mounted, and upward-facing transducer. ICES Journal of Marine Science, 2004, 61(7): 1100-1104.
- [14] Guillard J, Lebourges-Dhaussy A, Brehmer P. Simultaneous Sv and TS measurements on Young-of-the-Year (YOY) freshwater fish using three frequencies. ICES Journal of Marine Science, 2004, 61(2): 267-273.
- [15] Freon P, Gerlotto F, Soria M. Diel variability of school structure with special reference to transition periods. ICES Journal of Marine Science, 1996, 53(2): 459-464.
- [16] Kubečka J. Night inshore migration and capture of adult fish by shore seining. Aquaculture Research, 1993, 24(5): 685-689.
- [17] Wolter C, Freyhof J. Diel distribution patterns of fishes in a temperate large lowland river. Journal of Fish Biology, 2004, 64(3): 632-642.
- [18] Knudsen F R, Sægrov H. Benefits from horizontal beaming during acoustic survey: application to three Norwegian lakes. Fisheries Research, 2002, 56(2): 205-211.
- [19] 孙明波, 谷孝鸿, 曾庆飞, 王银平, 毛志刚, 谷先坤. 基于水声学方法的天目湖鱼类资源捕捞与放流的生态监测. 生态学报, 2013, 33

- (23): 7553-7562.
- [20] Kubečka J, Wittingerova M. Horizontal beaming as a crucial component of acoustic fish stock assessment in freshwater reservoirs. *Fisheries Research*, 1998, 35(1/2): 99-106.
- [21] Aglen A. Random Errors of Acoustic Fish Abundance Estimates in Relation to the Survey Grid Density Applied. Norway: Symposium on Fisheries Acoustics, 1983: 293-298.
- [22] Petitgas P. Geostatistics for fish stock assessments: a review and an acoustic application. *ICES Journal of Marine Science*, 1993, 50(3): 285-298.
- [23] Li X, Cheng G D, Lu L. Comparison of spatial interpolation methods. *Advance in Earth Sciences*, 2000, 15(3): 260-265.
- [24] 孙儒泳. 动物生态学原理 (第三版). 北京: 北京师范大学出版社, 1987: 283-295.
- [25] 李林春. 鱼类养殖生物学. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007: 251-252.
- [26] 倪勇, 朱成德. 太湖鱼类志. 上海: 上海科学技术出版社, 2005: 134-136.
- [27] 高永霞, 朱广伟, 贺冉冉, 王芳. 天目湖水质演变及富营养化状况研究. *环境科学*, 2009, 30(3): 673-679.
- [28] Draštík V, Kubečka J, Cech M, Frouzová J, Říha M, Juza T, Tušer M, Jarolím O, Prchalová M, Peterka J, Vašek M, Kratochvíl M, Matěna J, Mrkvíčka T. Hydroacoustic estimates of fish stocks in temperate reservoirs: day or night surveys? *Aquatic Living Resources*, 2009, 22(1): 69-77.
- [29] 张运林, 陈伟民, 杨顶田, 黄文钰, 江晶. 天目湖热力学状况的监测与分析. *水科学进展*, 2004, 15(1): 61-67.
- [30] 谭细畅, 李新辉, 林建志, 周东华, 高翔, 李嘉敏. 基于水声学探测的两个广东鲂产卵群体繁殖生态的差异性. *生态学报*, 2009, 29(4): 1756-1762.
- [31] Churnside J H, Demer D A, Mahmoudi B. A comparison of lidar and echosounder measurements of fish schools in the Gulf of Mexico. *ICES Journal of Marine Science*, 2003, 60(1): 147-154.