

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*

石妮, 李英文

(重庆师范大学 生命科学学院 重庆市高校动物生物学重点实验室 重庆市高校生物活性物质工程研究中心, 重庆 401331)

摘要:【目的】评估云南省渔洞水库鱼类的空间分布状况和现存资源量。【方法】于2017年7月在研究区域内使用SIMRAD EY60回声探测仪进行了水声学调查。【结果】渔洞水库中鱼类的密度垂直分布不均匀,大多数鱼类集中在水体上层,水库上游的上层鱼类密度高达 447.1×10^{-3} 尾 \cdot m $^{-3}$ 。探测到的水库全航段目标强度范围为-37~-70 dB,换算得到相应的鱼类体长范围为1.25~55.59 cm。根据公式换算得到水库上游、中游和下游的鱼类生物量分别为 0.17×10^{-3} , 0.06×10^{-3} 和 0.03×10^{-3} kg \cdot m $^{-3}$,水库全航段生物量为 0.07×10^{-3} kg \cdot m $^{-3}$ 。初步估算出全航段的渔业资源量为12 697 kg,可捕规格鱼类的数量为2 847 823尾。【结论】渔洞水库的渔业资源空间分布不均匀,主要集中在水体上层,这与捕食压力、鱼类自身习性、水温和溶氧等因素有关。

关键词:云南省渔洞水库;回声探测仪;空间分布;渔业资源

中图分类号:Q178.1⁺1

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2018)04-0037-05

近些年来,随着计算机技术的飞速发展,与水声学相关的仪器设备的性能也得到很大提高,已在国内外得到广泛应用。在国内,1993年唐启升等人使用SIMRAD EK400科研用探鱼仪对北太平洋的鱼类资源进行了调查^[1]。1996年,赵宪勇等人对南海北部海域渔业资源进行评估后,得到目标强度(Target strength)与鱼类体长的换算关系式^[2-5]。水声学调查方法也广泛应用于内陆湖泊及河流中,例如陶江平等人在2007年春季对三峡水库鱼类资源分布进行了研究^[6]。

渔洞水库位于云南省昭通市昭阳区,于1998年建成蓄水,是一座集农业浇灌、养殖、城市用水、旅游、防汛和发电等为一体的大型水利工程^[7]。近些年来,随着水库周边的经济快速发展,相关生态环境问题也随之出现,其中农业面源污染是一个主要因素。1997年以来,渔洞水库的水质从最初的V类水质慢慢转变为目前的III类水质,并保持在中营养状态,但偶尔会由于环境变化达到IV类水质。并且,在2008年5月,当地还曾发生蓝藻水华,严重影响了水库水质及当地的正常供水^[8]。由于渔洞水库每年向昭通市昭阳区的供水量占城市供水总量的75%以上,因此该水库水质情况一直以来都受到昭通市相关部门和当地广大人民群众的高度重视和广泛关注。为改善渔洞水库水体生态环境,相关工作人员于2016年12月向水库采用不投饵料的增殖放流,主要种类为鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)和鳙(*Aristichthys nobilis*),并实施长达3年的全湖禁渔政策。为了向渔洞水库渔业资源监测提供科学依据,并鉴于水声学调查方法有着快速方便、不伤害鱼类等优点^[9],本研究利用SIMRAD EY60回声探测仪对渔洞水库进行了两次走航式调查,并对所探测到的数据进行了分析,从而得到了该水库的渔业资源状况。

1 材料与方法

1.1 研究区域和方法

渔洞水库所在地为特有的高原地形,山岭险峻,河谷深切^[10]。根据水库地形特征,本研究将水库分为上游、中游和下游。于2017年7月13日白天从渔洞水库下游出发进行水声学探测。在调查航线方面,主要采用“之”字形航线(封二彩图1)。由于水库所处地夏季持续高温天气,导致水库水温在20℃左右,达到全年最高。同时,由于夏季汛期大量的面源污染进入水体,也导致水体透明度为全年最低,在100 cm左右^[11]。

* 收稿日期:2017-09-11 修回日期:2018-06-05 网络出版时间:2018-07-26 16:50

第一作者简介:石妮,女,研究方向为水生生态环境保护与资源利用,E-mail:shiniaini13@qq.com;通信作者:李英文,男,教授,博士,E-mail:377683289@qq.com

网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20180726.1649.012.html

1.2 水声学探测方法

将 SIMRAD EY60 回声探测仪与分裂波束式换能器(发射功率为 105 W, 脉冲宽度为 128 μs)连接, 换能器由于阻力较大, 前端和后端需要使用绳索斜拉固定于船体左侧, 探头伸入水体 50 cm 以下, 最大探测距离能达到水下 500 m。将 Garmin 公司生产的 60CSxGPS 接 PC 卡 RS232 端口供软件 EY60 显示坐标。在仪器运行过程前, 应在 CF-31SEUAXFR 便携式电脑上用软件 Simrad EK60 设置相关参数如水深、温度等, 设定好后进行声学数据记录。检测船为渔洞水库渔政船, 船速控制在 1.17~2.18 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

1.3 数据录入及分析方法

Sonar-5pro 软件是一个综合多种方法及工具的操作平台。采用该软件对数据进行格式转换, 即由 *.dt4 转为 *.uuu。文件格式的转换可以将源文件中的声纳数据、声纳图片、航行记录、转换设定、参数设置等通过转换器实现内容整合, 便于进一步分析。将转换后的文件从数据库中分离出鱼类回声, 用于追踪或者资源量估计、移除噪音、检测水底底线和浮沉校正等操作。另外, 通过交叉过滤器改善单回波检测、追踪和移除类似于浮游生物等的非期望目标, 从而达到改善噪音级检测目的。

在数据分析上, 本文参考有鳔鱼类的目标强度-体长换算公式^[12-13], 即:

$$S_T = 20 \log_{10} L_T - 71.9. \quad (1)$$

其中 S_T, L_T 分别为目标强度和体长。鱼类体长和体质量之间的换算, 采用鲢的体质量-体长经验公式^[14], 即:

$$W = 0.0052 \times L_T^{3.162}. \quad (2)$$

其中 W 为体质量。各水域内鱼类的生物量, 采用对东海头足类资源量估算的公式^[15]进行换算, 即:

$$B = \rho \times \bar{w}. \quad (3)$$

其中: B 为生物量, 单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; ρ 为鱼类密度, 单位为尾 $\cdot \text{m}^{-3}$; \bar{w} 为鱼类个体的平均体质量, 单位为 kg 。

2 结果

2.1 探测结果

使用水声学方法在渔洞水库调查中的回波图像清晰, 根据图像可知调查区域水下地形复杂, 最大水深为 52.63 m, 最小水深为 0.51 m, 平均水深为 17.18 m。鱼类大多数分布在水深为 0~10 m 的水体上层(封二彩图 2)。

2.2 鱼类分布状况

渔洞水库中鱼类的密度垂直分布不均匀, 大多数鱼类集中在水体的上层。水库上游区域的鱼类分布更为密集, 整体密度达 41.2×10^{-3} 尾 $\cdot \text{m}^{-3}$ (表 1)。用 Sonar-5pro 软件分析得出渔洞水库全航段目标强度范围为 -37~-70 dB, 在 -70 dB 处鱼类个体比例最大(图 3)。将目标强度处于 -37~-70 dB 的信号代入(1)式换算, 得出相应的鱼类体长范围为 1.25~55.59 cm。

2.3 鱼类资源量估算

根据(2),(3)式计算出渔洞水库的鱼类生物量, 其中上游、中游和下游的鱼类生物量分别为 0.17×10^{-3} , 0.06×10^{-3} , $0.03 \times 10^{-3} \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 全航段鱼类生物量为 $0.07 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。根据渔洞水库管理局监测得知, 调查日当日的水位为 1971.87 m, 水库库容约为 $1.8 \times 10^8 \text{m}^3$ 。根据资源密度面积法^[16]估算鱼类资源量, 结果显示: 水库上游的鱼类资源量最多, 约为 10279 kg; 水库下

表 1 渔洞水库鱼类密度

调查区域	水体上层	水体中层	水体下层	水体整体
上游	447.1×10^{-3}	0.7×10^{-3}	0.3×10^{-3}	41.2×10^{-3}
中游	333.6×10^{-3}	0.1×10^{-3}	0.1×10^{-3}	22.8×10^{-3}
下游	112.5×10^{-3}	0.2×10^{-3}	0.1×10^{-3}	14.9×10^{-3}
全航段	144.2×10^{-3}	0.3×10^{-3}	0.2×10^{-3}	15.7×10^{-3}

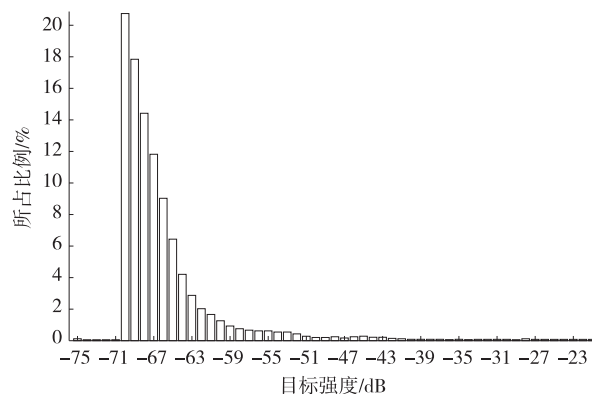


图 3 渔洞水库所探测到的目标强度值分布

Fig. 3 The distribution of target intensity detected in the Yudong reservoir

游的鱼类资源量最少,约为 1 814 kg。初步估算出水库全航段的鱼类资源量为 12 697 kg,总数量为 2 847 823 尾(表 2)。

表 2 渔洞水库鱼类资源量状况

Tab.2 Status of fish resources in the Yudong reservoir

调查区域	目标强度/dB	体长/cm	平均体质量/g	生物量/(kg·m ⁻³)	资源量/kg	数量/尾
上游	-37~-70	1.25~55.59	4.22	0.17×10 ⁻³	10 279	2 491 088
中游	-40~-70	1.25~39.36	2.44	0.06×10 ⁻³	3 628	1 378 563
下游	-42~-70	1.25~31.26	1.70	0.03×10 ⁻³	1 814	900 903
全航段	-37~-70	1.25~55.59	4.22	0.07×10 ⁻³	12 697	2 847 823

3 讨论

应用 SIMRAD EY60 回声探测仪对渔洞水库渔业资源评估的主要优势在于该水库鱼类品种少,从而在评估时不用考虑鱼类个体种类,探测到的结果准确性高,而且相对于其他调查方法如刺网采样、电捕等更加环保^[17]。为了改善渔洞水库水质状况,2016 年 12 月相关工作人员向水库共增殖放流 44 尾·kg⁻¹的鲢鱼 440 000 余尾以及 5.38 尾·kg⁻¹的鲢鱼近 11 000 尾。然而,人工放养的鱼类在放流后死亡率较高^[18],死亡原因主要有人工繁殖鱼类本身的身体机能不完善、疾病的发生、在自然水体中摄食能力和反捕食能力较低^[19]、与野生个体相比竞争力不足等。同时,放流鱼类体质、规格和放流地点的选择也可能对放流鱼类的存活率造成相应影响^[20-21]。虽然水库水体中还有其他鱼类物种,但由于在禁渔期前存在过度捕捞行为,因而资源量较少。总的来说,渔洞水库渔业资源量状况与 SIMRAD EY60 回声探测仪探测到的结果基本一致。

在水平方向上,渔洞水库上游水域的鱼类密度最大,下游水域的鱼类密度最小。水库中浮游生物生长不仅与水体环境中的温度、无机盐^[22]、溶氧、光线^[23]、其他生物^[24]等生态因子息息相关,而且还与水体的流速、滞留时间以及水域分布特征有很大联系^[25]。渔洞水库中鱼类呈现此种分布格局的主要原因在于捕食压力——由于水库构造特殊,上游水体流速比下游大,导致上游浮游生物密度大;而水库中的鲢和鳙的主要食物是浮游生物,对改进水库水生态环境有利^[26]。

在垂直方向上,由于饵料生物在水体上层居多,因此水库中的主要鱼类鲢和鳙绝大多数时间在水体上层觅食。随着水体深度的增加,鱼类个体密度呈降低的趋势,这符合鱼类资源量和水体深度之间存在的负相关关系^[27-28]。除了鱼类个体的习性外,影响鱼类垂直分布的原因还有食物、温度、溶氧等因素^[29-31]。

由于渔洞水库地理位置独特,水域深浅不一,故而即使正常行驶在水库中央,也会有损坏船只及仪器的风险。因此,本研究未对水库边缘水深相对较浅的位置进行探测,这可能导致估算的渔业资源量偏少。同时,在使用公式对资源量进行换算过程中,由于目前没有渔洞水库鱼类群落的相关计算公式,本研究仅采用了优势鱼类鲢的体质量-体长经验公式以及资源密度面积法进行估算,但这种评估资源量的方法是否客观准确,还有待于今后对该水库鱼类目标强度值特征的进一步详细研究后才可加以验证。

参考文献:

- [1] 唐启升,王为祥,陈毓楨,等. 北太平洋狭鳕资源声学评估调查研究[J]. 水产学报,1995,19(1):8-20.
TANG Q S,WANG W X,CHEN Y Z,et al. Stock assessment of walleye pollock in the north Pacific ocean by acoustic survey[J]. Journal of Fisheries of China,1995,19(1):8-20.
- [2] 赵宪勇,陈毓楨. 狭鳕 (*Theragra chalcogramma* Pallas) 目标强度的现场测定[J]. 中国水产科学,1996,3(4):19-27.
ZHAO X Y,CHEN Y Z. *In situ* target strength measurements on walleye Pollock (*Theragra chalcogramma* Pallas)[J]. Journal of Fishery Sciences of China,1996,3(4):19-27.
- [3] 李永振,陈国宝,孙典荣,等. 南海区多鱼种声学评估工作程序[J]. 广东海洋大学学报,2003,23(1):35-40.
LI Y Z,CHEN G B,SUN D R,et al. Work programme of acoustic assessment of multi-species fish stock in the South China sea [J]. Journal of Guangdong Ocean University,2003,23(1):35-40.
- [4] 李永振,陈国宝,赵宪勇,等. 南海北部海域小型非经济鱼类资源声学评估[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版),2005,35(2):206-212.
LI Y Z,CHEN G B,ZHAO X Y,et al. Acoustic assessment

- of non-commercial small-size fish resources in the northern waters of South China sea[J]. *Periodical of Ocean University of China (Natural Science)*, 2005, 35(2): 206-212.
- [5] 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.
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.
- [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, 1(5): 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, 1(5): 25-33.
- [7] 全勇,唐玉凤,龚声信,等. 渔洞水库农业面源污染现状及对策建议[J]. *四川环境*, 2015, 34(3): 141-145.
QUAN Y, TANG Y F, GONG S X, et al. Current status of agricultural non-point source pollution of Yudong reservoir and countermeasures[J]. *Sichuan Environment*, 34(3): 141-145.
- [8] 吴卫菊,杨凯,汪志聪,等. 云贵高原渔洞水库浮游植物群落结构及季节演替[J]. *水生态学杂志*, 2012, 33(2): 69-75.
WU W J, YANG K, WANG Z C, et al. Community structure and seasonal succession of phytoplankton in Yudong reservoir of Yungui-plateau[J]. *Journal of Hydroecology*, 2012, 33(2): 69-75.
- [9] BURWEN D, SIMMONDS J E, MACLENNAN DAVID N. Fisheries acoustics: theory and practice[J]. *Reviews in Fish Biology & Fisheries*, 2007, 17(4): 633-634.
- [10] 吴卫菊,杨凯,汪志聪,等. 云贵高原渔洞水库浮游植物群落结构及季节演替[J]. *水生态学杂志*, 2012, 33(2): 69-75.
WU W J, YANG K, WANG Z C, et al. Community structure and seasonal succession of phytoplankton in Yudong reservoir of Yungui-plateau[J]. *Journal of Hydroecology*, 2012, 33(2): 69-75.
- [11] 代堂刚. 季节变化对渔洞水库水温、水质的影响分析[J]. *水资源研究*, 2008, 29(4): 15-17.
DAI T G. Seasonal changes affecting water temperature and water quality of Yudongreservoir[J]. *Journal of Water Resources Research*, 2008, 29(4): 15-17.
- [12] FOOTE K G. Importance of the swimbladder in acoustic scattering by fish: a comparison of gadoid and mackerel target strengths[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1980, 67(6): 2084-2089.
- [13] FOOTE K G. Fish target strength for use in echointegrator surveys[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1987, 82(3): 981-987.
- [14] YE S W, LI Z J, FENG G P, et al. Length-weight relationships for thirty fish species in Lake Niushan, a shallow macrophytic Yangtze lake in China[J]. *Asian Fisheries Science*, 2007, 20(20): 217-226.
- [15] 凌建忠,严利平,李建生. 应用资源密度面积法估算东海区头足类资源量[J]. *海洋渔业*, 2008, 30(1): 56-61.
LING J Z, YAN L P, LI J S. Application of resources density/area method to estimate Cephalopod stock of the East China Sea[J]. *Marine Fisheries*, 2008, 30(1): 56-61.
- [16] 谭细畅,史建全,张宏,等. EY60 回声探测仪在青海湖鱼类资源量评估中的应用[J]. *湖泊科学*, 2009, 21(6): 865-872.
TAN X C, SHI J Q, ZHANG H, et al. Hydroacoustic assessment of fish resources in the Lake Qinghai with EY60 echosounder[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2009, 21(6): 865-872.
- [17] LAWSON G L, BARANGE M, FRÉON P. Species identification of pelagic fish schools on the South African continental shelf using acoustic descriptors and ancillary information[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2001, 58(1): 275-287.
- [18] 石小涛,陈求稳,庄平,等. 提高摄食-反捕食能力导向的鱼类野化训练方法述评[J]. *生态学杂志*, 2012, 31(12): 3235-3240.
SHI X T, CHEN Q W, ZHUANG P, et al. Life skill trainings for hatchery fish to improve its foraging and anti-predation capability in natural environment: a review[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(12): 3235-3240.
- [19] MCNEIL W J. Expansion of cultured Pacific salmon into marine ecosystems[J]. *Aquaculture*, 1991, 98(1/2/3): 173-183.
- [20] JOBLING M, BAARDVIK B M, CHRISTIANSEN J S, et al. The effects of prolonged exercise training on growth performance and production parameters in fish[J]. *Aquaculture International*, 1993, 1(2): 95-111.
- [21] 朱滨,郑海涛,乔晔,等. 长江流域淡水鱼类人工繁殖放流及其生态作用[J]. *中国渔业经济*, 2009, 27(2): 74-87.
ZHU B, ZHENG H T, QIAO Y, et al. Artificial reproduction of freshwater fish in the Yangtze river basin and its ecological effects[J]. *Chinese Fisheries Economics*, 2009, 27(2): 74-87.
- [22] 林秋奇,胡韧,韩博平. 流溪河水库水动力学对营养盐和浮游植物分布的影响[J]. *生态学报*, 2003, 23(11): 2278-2284.
LIN Q Q, HU R, HAN B P. Effect of hydrodynamics on nutrient and phytoplankton distribution in Liuxihereservoir[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(11): 2278-2284.
- [23] 方涛,李道季,余立华,等. 光照和营养盐磷对微型及微微型浮游植物生长的影响[J]. *生态学报*, 2006, 26(9): 2783-

2790.
FANG T, LI D J, YU L H, et al. Effect of irradiance and phosphate on growth of nanophytoplankton and picophytoplankton[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(9): 2783-2790.
- [24] STERNER R W. The role of grazers in phytoplankton succession[M]//Sommer U. *Plankton ecology: Succession in plankton communities*. Berlin Heidelberg: Springer, 1989: 107-170.
- [25] 林佳, 苏玉萍, 钟厚璋, 等. 一座富营养化水库: 福建山仔水库夏季热分层期间浮游植物垂向分布[J]. *湖泊科学*, 2010, 22(2): 244-250.
LIN J, SU Y P, ZHONG H Z, et al. Vertical distribution of phytoplankton in a eutrophic reservoir, Shanzi reservoir (Fujian) during summer stratification[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22(2): 244-250.
- [26] 王琳环, 赵彦波. 天然饵料生物对鱼类生长的影响[J]. *养殖技术顾问*, 2010(11): 166.
WANG L H, ZHAO Y B. Effect of natural food organisms on the growth of fish[J]. *Breeding Technology Consultant*, 2010(11): 166.
- [27] POWER M E. Predator avoidance by grazing stream fishes in temperate and tropical streams: importance of stream depth and prey size[M]//CHARLES R W, ANDREW S. *Predation: direct and indirect impacts in aquatic communities*. Hanover: University Press of New England, 1987: 333-351.
- [28] 任玉芹, 陈大庆, 刘绍平, 等. 三峡库区澎溪河鱼类时空分布特征的水声学研究[J]. *生态学报*, 2012, 32(6): 1734-1744.
REN Y Q, CHEN D Q, LIU S P, et al. Spatio-temporal distribution of fish in the Pengxi river arm of the Three Gorges reservoir[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(6): 1734-1744.
- [29] 石妮, 李英文, 刘智皓, 等. 噪声对鱼类的影响[J]. *重庆师范大学学报(自然科学版)*, 2017, 34(4): 130-133.
SHI N, LI Y W, LIU Z H, et al. Influence of noise on fish[J]. *Journal of Chongqing Normal University (Natural Science)*, 2017, 34(4): 130-133.
- [30] BRANDT S B, GERKEN M, HARTMAN K J, et al. Effects of hypoxia on food consumption and growth of juvenile striped bass (*Morone saxatilis*) [J]. *Journal of Experimental Marine Biology & Ecology*, 2009, 381(12): 143-149.
- [31] BROSSE S, LEK S, DAUBA F, et al. Predicting fish distribution in a mesotrophic lake by hydroacoustic survey and artificial neural networks[J]. *Limnology and Oceanography*, 1999, 44(5): 1293-1303.

Animal Sciences

Fish Spatial Distribution and Biomass Assessment in Yudong Reservoir of Yunnan Province Based on Hydroacoustic Research

SHI Ni, LI Yingwen

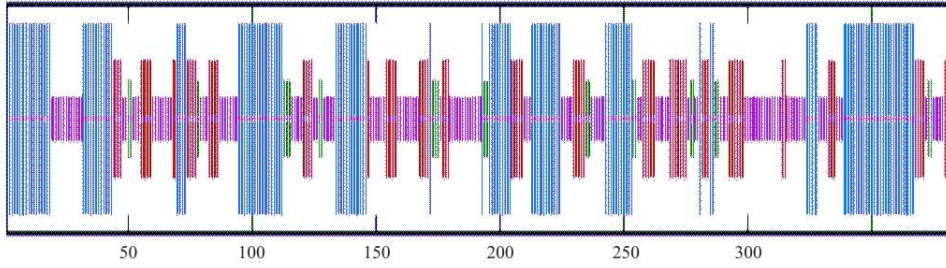
(Chongqing Engineering Research Center of Bioactive Substances, Chongqing Key Laboratory of Zoobiology, College of Life Sciences, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China)

Abstract: [Purposes] In order to understand the spatial distribution and existing resources of fish in Yudong reservoir of Yunnan province. [Methods] In July 2017, a water acoustic survey was carried out by using Simrad EY60 echo detector in the study area. [Findings] The density of fish in Yudong reservoir is unevenly distributed, and most fish are concentrated in the upper layer of water. The upstream fish density is 447.1×10^{-3} individuals $\cdot m^{-3}$. The detected target strength range of the whole section of the reservoir is $-37 \sim -70$ dB, corresponding fish body length range is 1.25 ~ 55.59 cm. According to the formula, the fish biomass in the upper, middle and lower reaches of the reservoir is 0.17×10^{-3} , 0.06×10^{-3} , and 0.03×10^{-3} kg $\cdot m^{-3}$, respectively. Preliminary estimates of the overall amount of fishery resources are 12 697 kg, The number of fish that can be caught are 2 847 823 individuals. [Conclusions] The spatial distribution of fishery resources in Yudong reservoir is not uniform, mainly concentrated in the upper layer of water body. This is related to factors such as predation pressure, fish habits, water temperature and dissolved oxygen.

Keywords: Yudong reservoir of Yunnan Province; echo sounder; spatial distribution; fishery resources

(责任编辑 方兴)

(接正文27页)



注：蓝色， α -螺旋；红色，延伸链；橙色，无规则卷曲；绿色， β -折叠

图3 蛋白质二级结构预测图

Fig. 3 Protein secondary structure prediction

(接正文28页)

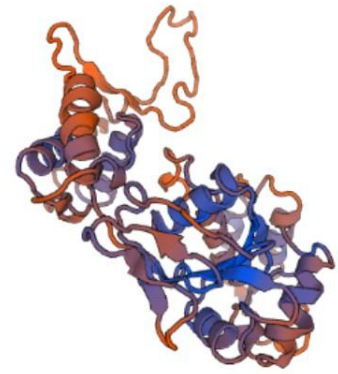
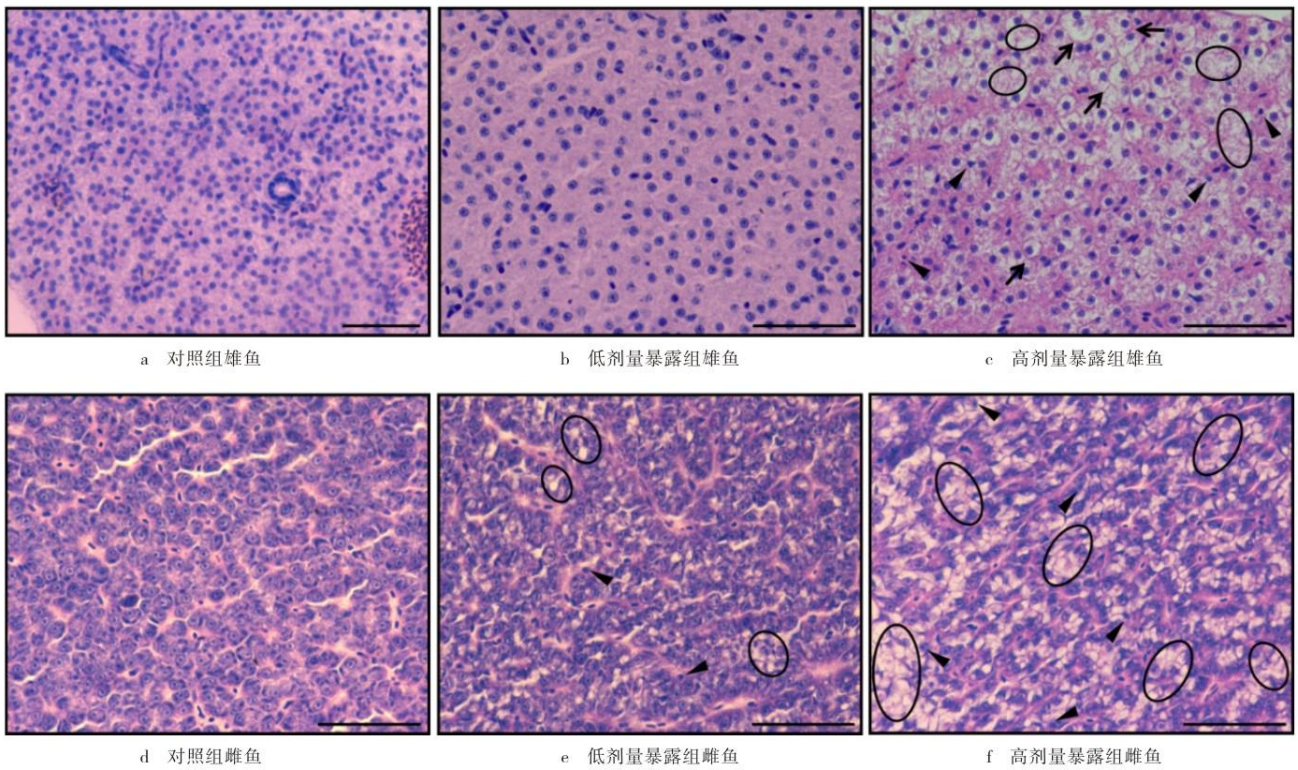


图4 SPO11蛋白质空间结构预测图

Fig. 4 SPO11 protein space structure prediction

(接正文32页)



注：箭头处为肝细胞肿大核偏离，三角处为核固缩，椭圆处为空泡化，标尺为50 μ m

图1 镉暴露对斑马鱼肝脏组织学的影响

Fig. 1 Effects of cadmium exposure on histology of liver in zebrafish

(接正文37页)



注：红色、绿色和黄色部分分别表示在水库上游、中游和下游的“之”字形调查轨迹；蓝色部分表示整个航段的探测轨迹

图1 调查轨迹示意图
Fig. 1 Schematic diagram of survey track

(接正文38页)

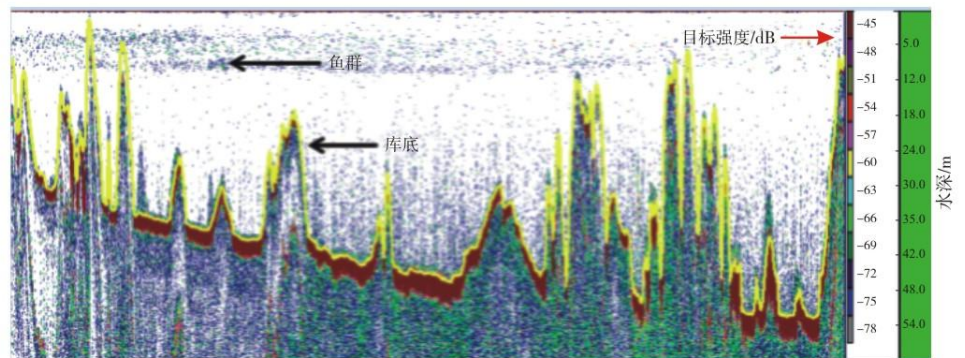


图2 全航段的水声学探测回波图像
Fig. 2 Underwater acoustic detection echo image of full segment