

王普泽, 宋聃, 张尹哲, 等. 博斯腾湖鱼类密度季节变化及其环境影响因素[J]. 华中农业大学学报, 2023, 42(5): 215-220.
DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2023.05.024

博斯腾湖鱼类密度季节变化及其环境影响因素

王普泽^{1,2}, 宋聃^{1,3}, 张尹哲¹, 李俊锋¹, 刘家寿¹, 叶少文¹

1. 中国科学院水生生物研究所/淡水生态与生物技术国家重点实验室, 武汉 430072;
2. 云南大学生态与环境学院/高原湖泊生态与治理研究院, 昆明 650504;
3. 中国水产科学研究院黑龙江水产研究所, 哈尔滨 150070

摘要 为了解博斯腾湖鱼类资源现状及其与环境因素的关系, 于2019年5月(春季)、7—8月(夏季)、10月(秋季), 采用分裂波束回声探测器(Simrad EY60, 120 kHz)开展全湖水声学探测, 并对水环境指标进行现场测量。结果显示, 博斯腾湖鱼类密度在夏季最高, 平均值为 $(8\,783 \pm 2\,611)$ ind./hm²; 春季和秋季间无显著性差异, 平均值分别为 (709 ± 141) 、 (743 ± 499) ind./hm²。根据目标强度与体长关系经验公式推算, 春季、夏季和秋季鱼类的平均体长分别为8.8、4.0和5.1 cm。相关分析结果显示, 博斯腾湖鱼类密度与水温呈极显著正相关($P < 0.01$), 而与透明度呈显著负相关($P < 0.05$)。随机森林模型的特征重要性排序结果显示, 电导率是鱼类密度最重要的预测因子, 其次为溶解氧、盐度和水温等。推测鱼类密度的季节变化与环境变化、食物来源、繁殖习性等因素密切相关, 环境因子可能通过直接或间接的方式影响鱼类的生态环境需求。

关键词 博斯腾湖; 渔业声学; 鱼类群落; 鱼类丰度; 环境因子

中图分类号 S932 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2023)05-0215-06

博斯腾湖位于新疆天山东段焉耆盆地东南部, 由天山山间构造在盆地最低洼处形成, 是干旱和半干旱地区的代表性湖泊^[1]。湖区的自然资源丰富, 不仅是我国四大芦苇产地之一, 也是新疆的主要渔业基地, 对于当地经济发展和粮食供应具有重要意义。气候变化与人类活动是博斯腾湖生态状况变化的主要驱动因素^[2], 光照、降雨、水位波动和冬季结冰对博斯腾湖的生态环境和水生生物均能产生重要影响。自1960年以来, 上游工农业用水量逐渐增加, 导致水体矿化度上升, 营养水平转为中营养状态。此外, 人为引种和过度捕捞等活动使鱼类群落和生态系统发生了持续变化。博斯腾湖历史上仅有4种土著鱼类, 目前鱼类共17种, 其中优势种为池沼公鱼、鲫和鳊^[3], 鱼类小型化和湖泊富营养化问题明显, 因此, 有必要对博斯腾湖鱼类资源动态及其与环境关系进行深入研究, 为湖泊生态保护和自然资源管理提供科学依据。

鱼类是湖泊生态系统的重要组成部分, 其种群变化对整个生态系统和其他生物群落的结构与动态产生深远影响^[4]。为确保湖泊生态保护和渔业管理

的有效性, 了解鱼类与环境因子关系至关重要, 温度、盐度和栖息地质量等对鱼类的分布、行为和繁殖具有决定性作用。目前, 博斯腾湖鱼类资源的研究已取得一定进展, 但有关该湖鱼类时空动态及与环境关系研究仍十分匮乏^[3, 5-6]。传统的渔具和渔法因为耗时和费力, 限制了深入研究的可能性。水声学探测技术为此类研究提供了新的方法论。该技术具有高效、快捷、不损伤调查对象等优点, 已在众多大型水域中得到应用^[7]。利用水声学探测, 研究者能更准确地获取鱼类密度和分布信息, 进而补充或替代传统评估方法^[8]。鉴于此, 本研究于2019年对博斯腾湖进行了全面的水声学探测, 同时结合水环境调查, 探究鱼类分布与环境因子的关系, 以期深入评估博斯腾湖鱼类密度的时空变化特征, 为博斯腾湖鱼类资源保护及渔业可持续发展提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 研究地点概况

博 斯 腾 湖 ($86^{\circ}42'E \sim 87^{\circ}26'E$, $41^{\circ}49'N \sim$

收稿日期: 2023-05-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(32072983); 国家重点研发计划项目(2019YFD0900603)

王普泽, E-mail: wangpuze@mail.ynu.edu.cn

通信作者: 叶少文, E-mail: yeshw@ihb.ac.cn

42°09'N, 图1) 地处欧亚大陆腹地, 海拔1 045 m, 水域面积1 210.5 km², 南北宽25 km, 东西长55 km。光照充足, 雨量稀少, 多年平均降水量68.2 mm, 为内陆荒漠型气候^[1]。

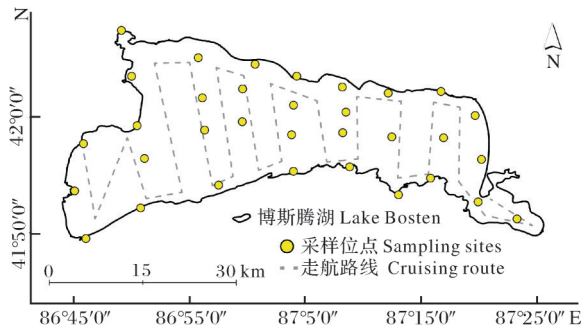


图1 博斯腾湖的轮廓图、水环境采样点和水声学走航路线分布

Fig. 1 Contour map of Lake Bosten, distribution of sampling sites for aquatic environment investigation and cruising route for hydroacoustic detection

1.2 水声学探测和环境调查

水声学全湖探测时间为2019年5月(春季)、7—8月(夏季)、10月(秋季), 冬季因湖面结冰, 未能开展调查。每个季节在湖区调查持续7 d左右, 探测时间为采样当天的08:00—18:00, 采用平行走航断面, 走航路线如图1所示, 覆盖了博斯腾湖整个大湖区水面。

水声学设备为Simrad EY60型分裂波束回声探测仪, 换能器频率120 kHz, -3 dB波束宽7°。在调查之前采用直径23 mm标准铜球对换能器进行实地校准, 步骤按标准方法进行^[9]。换能器通过不锈钢制换能器支臂固定在调查船的右侧, 距离船首1/3船体长度, 入水深度0.5 m。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 (Garmin 60CSx) 实时确定探测位置。调查时回声探测仪的功率设定为100 W, 脉冲宽度选择128 μs, 发射频率10 pings/s。水声学探测时航速为8~10 km/h。

环境调查与水声学探测同期开展。在全湖设置33个固定采样点(图1), 在此基础上, 于各季节增设采样点并记录经纬度, 用以和探鱼仪调查数据相匹配。水环境指标中的溶解氧、水温、电导率和pH值通过Sonar EXO3多参数水质仪现场测量获取, 叶绿素a通过现场采集500 mL水样带回实验室测得, 透明度通过塞氏盘测量, 水深通过SM-5手持式测深仪测量, 盐度通过HORIBA盐度计B-721现场测得。

1.3 水声学数据处理

使用Echoview软件处理ER60程序采集的水声学原始数据, 采用回波积分法计算鱼类密度。根据声学映像中信号目标强度(target strength, TS, 单位dB)的分布情况, 将背景噪声阈值设置为-66 dB。鉴于回声映像中鱼体信号分散和噪声较多, 经测试后采用分裂波束单体目标判别方法2 (split-beam method 2)对鱼体信号进行轨迹追踪和判别, 根据轨迹追踪计数并计算水体鱼类密度。参数设定如下: 脉冲宽度决定水平=6 dB, 最小标准脉宽=0.4, 最大标准脉宽=1.5, 最大波束补偿=6 dB, 短轴角度最大标准偏差=0.6, 长轴角度最大标准偏差=0.6。为评估博斯腾湖鱼类的水平分布特征, 将水声学探测得到的声学映像以200 m为单位划分为单元, 并分别计算各单元的鱼类密度。

1.4 统计分析

采用PCA (principle component analysis)分析方法对博斯腾湖水环境因子特征进行排序。鱼类密度(density, ind./hm²)的季节差异采用单因素方差分析检验, 结果以“平均值±标准误”(mean±SE)表示, 显著性水平设为0.05。鱼类密度与环境因子关系采用相关分析(correlation analysis)和随机森林(random forest, RF)模型, 鱼类密度来自于采样点最近的水声学探测单元。统计分析制图通过Excel、R 4.3.1和ArcGIS Pro 3.1软件完成, R包“ggord”“linkET”“rfPermute”和“A3”分别用于PCA分析、相关分析和随机森林模型。

2 结果与分析

2.1 鱼类密度和大小的季节变化

水声学调查结果显示, 博斯腾湖鱼类密度季节间差异显著($P < 0.001$, 图2), 全湖夏季鱼类密度最高, 平均值为 $(8\,783 \pm 2\,611)$ ind./hm², 密度范围为1 351~8 310 ind./hm²。鱼类密度在春季和秋季间无显著性差异(图2), 这2个季节鱼类平均密度分别为 (709 ± 141) 、 (743 ± 499) ind./hm², 密度范围分别为1~11 790、2~116 934 ind./hm²。春季、夏季和秋季鱼类的平均目标强度(TS)分别为-52.95、-59.91和-57.73 dB, 根据目标强度与体长关系经验公式推算, 对应的平均体长分别为8.8、4.0和5.1 cm。博斯腾湖鱼类密度和个体大小季节变化的主要原因在于夏季调查时存在较多的繁殖后的小个体幼鱼, 夏季

至秋季湖区开展了捕捞作业,加之鱼类早期阶段的自然死亡率较高,秋季调查时湖区鱼类数量减少。

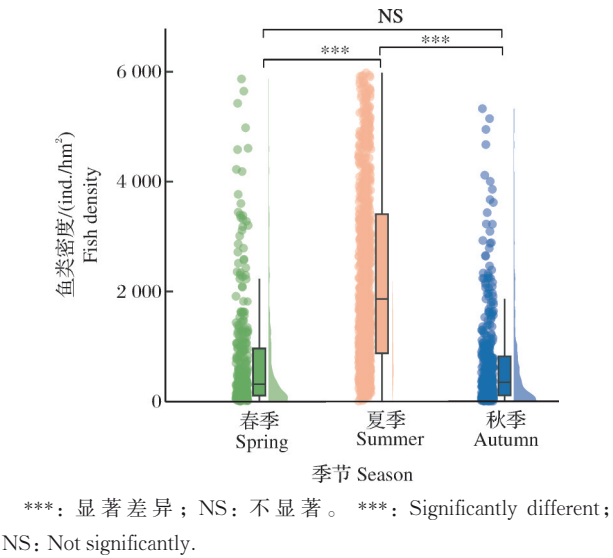


图2 博斯腾湖全湖鱼类密度的季节变化
Fig.2 Seasonal variation in the overall fish density of Lake Bosten

2.2 环境因子的季节变化

博斯腾湖属中生代断陷构造湖泊,湖盆呈深碟形,中间底平,靠近湖岸水深急剧变浅。水声学探测结果显示博斯腾湖春季平均水深6.9 m,最深处15.8 m。博斯腾湖春季等深线如图3所示。采样点调查结果显示全湖3个季节水深无明显差异(表1)。

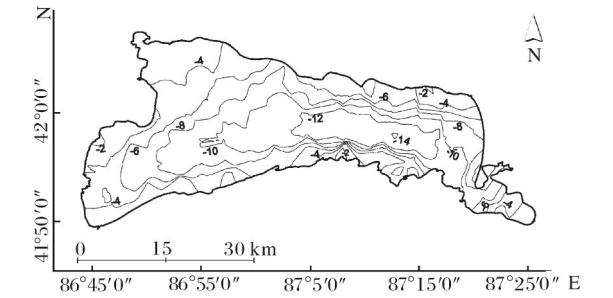


图3 博斯腾湖等深线分布图(2019年5月)
Fig.3 Bathymetric distribution map of Lake Bosten (May 2019)

调查期间,博斯腾湖的水环境指标值见表1。春季、夏季和秋季的平均水温分别为16.0℃(15.1~17.0℃,范围,下同)、25.6℃(25.0~26.2℃)和14.3℃(13.7~14.9℃)。湖水的透明度受太阳辐射、水体理化性质、悬浮物含量及气象状况等多因素影响,其中夏季透明度最低,平均为2.0 m(1.5~2.6 m)。夏季溶解氧为8.1 mg/L(7.7~8.6 mg/L),低于春季和秋季,通常与夏季浮游植物大量繁殖、光合作用增强,但同时由于死亡浮游植物降解消耗氧气,以及温

度升高导致氧饱和度降低有关。叶绿素a含量在夏季达到最高值8.03 μg/L(范围为0.20~33.37 μg/L)。

本调查结果显示,博斯腾湖的盐度在夏季较高(0.14‰~0.30‰),春季和秋季较低,与电导率(1 155~1 538 μS/cm)的变化特征相吻合,明显高于长江中下游的常见湖泊。

表1 2019年博斯腾湖水环境指标的季节变化
(平均值±标准误)

参数 Parameter	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn
水深/m Depth	7.0±4.5	7.1±4.4	7.2±4.4
水温/℃ WT	16.0±1.3	25.6±0.9	14.3±1.0
透明度/m SD	4.2±1.5	2.0±0.9	4.1±0.9
溶解氧/(mg/L) DO	8.9±0.11	8.1±1.0	9.1±0.4
电导率/(μS/cm) Cond	1 273±79	1 538±179	1 155±59
pH	8.40±0.12	8.45±0.09	8.80±0.07
盐度/‰ Sal	0.14±0.04	0.30±0.06	0.16±0.02
叶绿素 a/(μg/L) Chl a	3.14±0.28	8.03±1.1	5.16±0.21

注 Note: WT: Water temperature; SD: Secchi depth DO: Dissolved oxygen; Cond: Conductivity; Sal: Salinity. 下同。The same as below.

博斯腾湖水环境因子的PCA分析结果显示前2个主成分轴分别解释了55.3%和15.2%的环境差异,累积解释了总变量的70.5%。夏季水环境总体特征为高温、高盐度和高电导率,春季和秋季则表现出较高的透明度、溶解氧和pH值。因此,夏季与其他季节区分得较为明显,而春季和秋季在PCA图中的距离较近且有部分重叠,表明这2个季节的环境因子相似度较高(图4)。

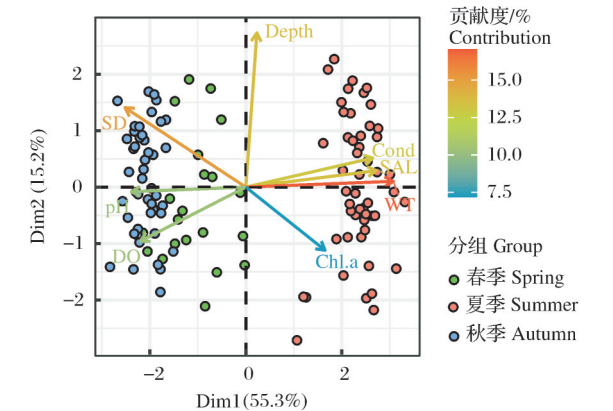


图4 博斯腾湖水环境因子时空变化的主成分分析
Fig.4 Principal component analysis of spatial and temporal variations of environmental factors in Lake Bosten

2.3 鱼类密度与环境因子相关性

相关分析结果显示, 博斯腾湖鱼类密度与透明度 (−0.23, 相关系数) 呈显著负相关 ($P<0.05$), 而与电导率 (0.34) 和水温 (0.30) 呈显著正相关 ($P<0.01$)。此外, 环境因子之间也存在不同程度的相关性, 例如水温与电导率 (0.84)、叶绿素 a (0.47) 和水深 (0.26) 呈显著正相关 ($P<0.05$), 与 pH (−0.75)、透明度 (−0.74) 和溶解氧 (−0.65) 呈显著负相关 ($P<0.05$) (图 5)。

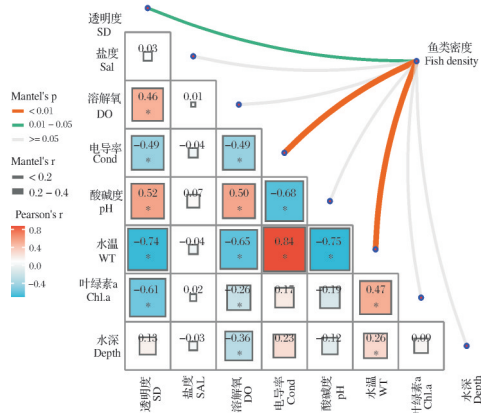


图 5 博斯腾湖鱼类密度与环境因子相关系数矩阵

Fig. 5 Correlation coefficient matrix between fish density and environmental factors in Lake Bosten

2.4 鱼类密度预测模型

为了解驱动鱼类分布的潜在机制, 本研究通过随机森林分析确定了驱动鱼类分布的环境预测因子, 模型整体具有显著性 ($P<0.001$), 方差累计解释率为 24.9% (图 6)。驱动鱼类分布的首要因子是电导率 ($P<0.05$), 其次为溶解氧、盐度和水温等。

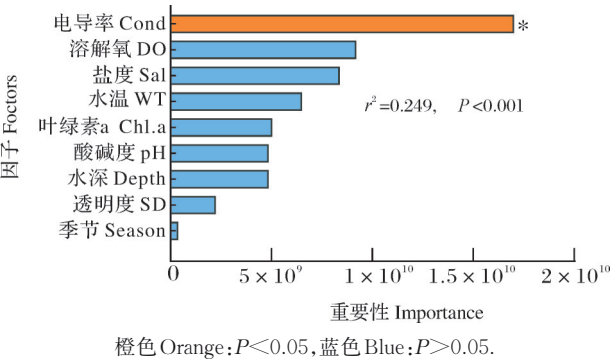


图 6 随机森林模型的特征重要性排序

Fig. 6 Ranking of feature importance in random forest model

3 讨论

本研究对博斯腾湖鱼类群落季节性变化及其

与环境因子的关系进行了初步探讨。研究结果表明, 博斯腾湖鱼类群落受到环境季节差异和人类活动的共同影响。这与多数生态学研究的发现相吻合, 反映了鱼类资源的季节动态与环境变化、食物来源、繁殖习性等关键因素密切相关^[9]。探鱼仪数据显示, 博斯腾湖夏季鱼类密度显著高于其他季节, 且目标强度最小, 主要原因在于夏季存在大量新繁殖的小个体幼鱼, 而夏季至秋季的高强度渔业捕捞活动和鱼类早期阶段的自然死亡率导致秋季鱼类数量减少。这种捕捞行为加速了鱼类小型化趋势, 并对 r 对策种群的扩展产生了正反馈作用^[10-11]。越冬后的鱼类在春季繁殖产卵, 随后大部分的池沼公鱼个体死亡, 剩余更多的为大个体鱼类, 导致春季的目标强度大于秋季。夏季是鱼类生长和繁殖的高峰期, 湖泊生态系统的食物链此时更为活跃, 浮游植物、浮游动物和底栖动物等水生生物大量增加, 为鱼类提供了丰富的食物资源, 而水温的升高加快了鱼类生长速度, 并有利于卵的孵化和幼鱼的生长^[12]。

湖泊的物理、化学和生物过程受到湖盆形态和深度的显著影响, 这些特性决定了湖水的流动模式, 如垂直混合和水平循环, 进而影响营养物、溶解氧和其他溶解物质在湖中的分布, 并对水生生物的生长和生存产生重要作用^[13]。湖泊的水深和底部形态为水生生物提供了丰富和多样的生境, 支撑了各种生态位的水生生物。本研究调查期间, 博斯腾湖的水位相对稳定, 这主要是因为入湖和出湖河流都设置了闸坝进行人工调控。湖岸附近的浅水区域受到更强烈的阳光辐射, 有助于水生植被和藻类生长, 这些初级生产者加速了湖中氮、磷等营养物质的循环, 为鱼类提供了重要的栖息地^[14]。此外, 当地渔民也证实, 湖岸的水生植被和湿地是博斯腾湖鱼类的主要产卵场所。

本研究揭示了鱼类密度与湖泊透明度之间的负相关关系, 以及与水温之间的正相关关系。进一步分析发现, 透明度与叶绿素 a 之间存在显著的负相关, 而温度与叶绿素 a 之间则呈显著正相关。湖泊的透明度受浑浊度和悬浮物的影响, 可以直接作用于鱼类的捕食行为, 具体而言, 低透明度可能意味着湖中存在更多的饵料生物和较低的被捕食率^[15]。此外, 本研究发现电导率是博斯腾湖鱼类分布的一个重要预测因子, 其次是盐度。电导率反映了水体传递电子的能力, 它与盐度、溶解性固体、温度等因素有关^[16]。本研究调查表明, 博斯腾湖电导率与水温

之间存在显著的正相关关系。在夏季,随着水温的上升,溶质与水的溶解交换反应速度加快,从而导致电导率升高。值得注意的是,在开都河入湖区域,夏季电导率最高。高电导率的区域往往伴随着较高的营养物质循环速率,进而促进了藻类等初级生产者的增长。溶解氧在水体生化反应中起到了关键作用,叶绿素与水温溶解氧饱和度呈显著的正相关。通常,溶解氧的变化与浮游植物的光合作用增加氧气的模式一致^[17]。虽然鱼类密度与叶绿素a之间的正相关性不显著($r=0.12$),但氮、磷等营养物质通过其上行效应增加了浮游生物等饵料资源的丰度,从而吸引鱼类进行摄食,进一步影响了鱼类的空间分布。

博斯腾湖位于气候敏感区域,在过去的几十年中,由于人类活动如灌溉、水坝建设和土地荒漠化的影响,湖泊的水位、盐度和成分都发生了显著变化。气候变化,特别是温度上升和降水模式的改变,也对湖泊的水成分和平衡产生了深远的影响^[18]。为了确保湖泊渔业的可持续发展与其他生态价值,加强湖泊生态系统的保护显得尤为重要。鱼类密度的季节变化表明,有必要根据不同的季节制定相应的保护策略。例如,在鱼类繁殖的高峰期,应增强保护措施,限制捕捞等人为活动,以确保护鱼类种群的稳定。此外,鱼类与多种环境因子的关系提示,不仅需要关注鱼类自身,还要密切关注其生存环境的变化,这包括监测水质的变化,控制水体的污染,以及确保水体生态环境的稳定性,从而保持鱼类资源的稳定和持续。最后,鱼类与其他生物如浮游植物、浮游动物和底栖动物之间的相互作用也不容忽视。这些生物的生存状态直接影响鱼类的生存和繁衍,因此,对这些生物的研究和保护也是维护整个生态系统完整性和平衡性的关键。

参考文献 References

- [1] 中国科学院南京地理与湖泊研究所. 中国湖泊调查报告[M]. 北京: 科学出版社, 2019. Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences. Investigation report on lakes in China [M]. Beijing: Science Press, 2019 (in Chinese).
- [2] YAO J Q, CHEN Y N, ZHAO Y, et al. Hydroclimatic changes of Lake Bosten in Northwest China during the last decades [J/OL]. Scientific reports, 2018, 8: 9118 [2023-05-16]. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-27466-2>.
- [3] 王普泽, 宋聃, 张尹哲, 等. 博斯腾湖鱼类资源组成、体长与体重关系及生长状况[J]. 生物资源, 2020, 42(2): 181-187. WANG P Z, SONG D, ZHANG Y Z, et al. Resource composition, length-weight relationship and condition factor of fishes [J]. Biotic resources, 2020, 42(2): 181-187 (in Chinese with English abstract).
- [4] SU H J, CHEN J F, LI Y, et al. Carp stocking and climate change are potentially more important factors than nutrient enrichment driving water quality deterioration in subtropical freshwater lakes in China [J]. Limnology and oceanography, 2023, 68(S1): S131-S143.
- [5] 陈朋, 马燕武, 谢春刚, 等. 博斯腾湖鱼类群落结构的初步研究[J]. 淡水渔业, 2014, 44(2): 36-42. CHEN P, MA Y W, XIE C G, et al. Preliminary study on community structure of fishes in Bositeng Lake [J]. Freshwater fisheries, 2014, 44(2): 36-42 (in Chinese with English abstract).
- [6] SONG D, ZHANG Y Z, LI J F, et al. Thermal preference may facilitate spatial coexistence of two invasive fish species in Lake Bosten, China [J/OL]. Sustainability, 2023, 15(9): 7592 [2023-05-16]. <https://doi.org/10.3390/su15097592>.
- [7] POLLOM R A, ROSE G A. A global review of the spatial, taxonomic, and temporal scope of freshwater fisheries hydroacoustics research [J]. Environmental reviews, 2016, 24(3): 333-347.
- [8] KUBEČKA J, GODØ O R, HICKLEY P, et al. Fish sampling with active methods [J]. Fisheries research, 2012, 123/124: 1-3.
- [9] PÖRTNER H O, PECK M A. Climate change effects on fishes and fisheries: towards a cause-and-effect understanding [J]. Journal of fish biology, 2010, 77(8): 1745-1779.
- [10] FIDLER R Y, MAYPA A, APISTAR D, et al. Body size shifts in philippine reef fishes: interfamilial variation in responses to protection [J]. Biology, 2014, 3(2): 264-280.
- [11] HOWETH J G, GANTZ C A, ANGERMEIER P L, et al. Predicting invasiveness of species in trade: climate match, trophic guild and fecundity influence establishment and impact of non-native freshwater fishes [J]. Diversity and distributions, 2016, 22(2): 148-160.
- [12] ZHAO Q Y, LIU S T, NIU X L. Effect of water temperature on the dynamic behavior of phytoplankton-zooplankton model [J/OL]. Applied mathematics and computation, 2020, 378: 125211 [2023-05-16]. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2020.125211>.
- [13] DOWNING J A, PRAIRIE Y T, COLE J J, et al. The global abundance and size distribution of lakes, ponds, and impoundments [J]. Limnology and oceanography, 2006, 51(5): 2388-2397.
- [14] QIN B Q, ZHOU J A, ELSER J J, et al. Water depth underpins the relative roles and fates of nitrogen and phosphorus in lakes [J]. Environmental science & technology, 2020, 54(6): 3191-3198.
- [15] 周礼斌, 陈非洲. 沉积物再悬浮对食浮游动物鱼类捕食浮游

- 动物的影响[J].湖泊科学,2015,27(5):911-916.ZHOU L B, CHEN F Z. Effect of sediment resuspension on predation of planktivorous fish on zooplankton[J]. Journal of lake sciences, 2015, 27(5): 911-916 (in Chinese with English abstract).
- [16] XU W D, DUAN L Z, WEN X Y, et al. Effects of seasonal variation on water quality parameters and eutrophication in Lake Yangzong[J/OL]. Water, 2022, 14(17): 2732[2023-05-16]. <https://doi.org/10.3390/w14172732>.
- [17] 俞秀霞, 孙琳, 陈长平. 厦门港叶绿素的时空分布及其与水环境因子关系的多元分析[J]. 海洋科学, 2021, 45(6): 49-62. YU X X, SUN L, CHEN C P. Chlorophyll content in Xiamen Bay: spatiotemporal distribution and relationship with water environmental factors[J]. Marine sciences, 2021, 45(6): 49-62 (in Chinese with English abstract).
- [18] FONTANA L, SUN M J, HUANG X Z, et al. The impact of climate change and human activity on the ecological status of Bosten Lake, NW China, revealed by a diatom record for the last 2000 years[J]. The holocene, 2019, 29: 1871-1884.

Seasonal variation of fish density and its environmental impact factors in Lake Bosten, China

WANG Puze^{1,2}, SONG Dan^{1,3}, ZHANG Yinzhe¹, LI Junfeng¹, LIU Jiashou¹, YE Shaowen¹

1. State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China;

2. Institute for Ecological Research and Pollution Control of Plateau Lakes, School of Ecology and Environment, Yunnan University, Kunming 650504, China;

3. Heilongjiang River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Harbin 150070, China

Abstract To understand the current status of fish resources in Lake Bosten and their relationship with environmental factors, a lake-wide acoustic survey was conducted in May (spring), July-August (summer), and October (autumn) of 2019 using a split-beam echosounder (Simrad EY60, 120 kHz), along with on-site measurements of aquatic environmental indicators. The results showed that fish density in Lake Bosten was the highest in summer, with an average value of $(8\,783 \pm 2\,611)$ ind./hm². There was no significant difference between spring and autumn, with the average values of (709 ± 141) and (743 ± 499) ind./hm², respectively. Based on the empirical formula between target strength and body length, the average total length of fish in spring, summer, and autumn was estimated to be 8.8, 4.0, and 5.1 cm, respectively. Correlation analysis indicated that the fish density in Lake Bosten was significantly positively correlated with water temperature and electrical conductivity ($P < 0.01$), but significantly negatively correlated with transparency ($P < 0.05$). The feature importance ranking of the random forest model revealed that electrical conductivity was the most important factor influencing fish density in Lake Bosten, followed by dissolved oxygen, salinity, and water temperature. Seasonal variation in fish density is presumed to be closely related to environmental changes, food sources, and reproductive habits. Environmental factors may directly or indirectly affect the ecological and environments needs of fish.

Keywords Lake Bosten; fishery acoustics; fish community; fish abundance; environmental factors

(责任编辑:边书京)