

人为噪音对鱼类影响的研究进展

宋红桥,王振华,单建军,吴凡

(中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所,上海 200092)

摘要:随着全球水产养殖业快速发展,鱼类福利问题愈发受到关注。其中,噪音是鱼类福利研究中一个新兴的研究方向。随着人类水上工业活动的扩张,人们逐渐认识到人为噪音对鱼类的胁迫作用。笔者阐述鱼类听觉原理,以及人为噪音对鱼类听力、信息掩蔽、行为和生理生化等方面的研究进展,并展望了噪音研究应该向更多鱼种扩展,并加快相应研究设备的开发。

关键词:人为噪音;鱼;听觉

中图分类号:S917.4

文献标志码:A

论文编号:cjas17060001

Advances in the Effects of Man-made Noise on Fish

Song Hongqiao, Wang Zhenhua, Shan Jianjun, Wu Fan

(Fishery Machinery and Instrument Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200092, China)

Abstract: With the rapid development of global aquaculture, fish welfare has received increasing attention. Man-made noise is one of the rising research objects. With the expansion of industrial activities, people have gradually realized the stress effect of man-made noise on fishes. We described the principle of fish hearing as well as research advances in effects of man-made noise on fish hearing, information masking, behavior, physiology and biochemistry. Finally, we suggested that noise research should be expanded to more species, and the development of corresponding equipment should be accelerated.

Key words: Man-made Noise; Fish; Auditory Sense

0 引言

近年来,全球水产养殖业产量继续保持快速增长,并有超越捕捞业成为今后渔业生产主力军的趋势(FAO, 2016)。与此同时,人们也日益重视水产品质量品质的优劣,而与之直接相关的鱼类福利问题正成为许多国家的研究焦点和热点^[1-4]。其中,噪音是鱼类福利研究中一个新兴的研究方向。过去人们甚至不清楚鱼类是否具有听力,直到20世纪60年代中期及70年代早期,才有人在鱼类声学领域展开研究^[5]。时至今日,随着船运规模的增加以及水上工业活动的扩张,人们逐渐认识到人为噪音对于鱼类来说也是一种胁迫,并开始关注其对于鱼类生存状态的影响^[6]。

环境中的人为噪音会对包括人类在内的许多动物产生显著影响。离开噪音源是避免有害噪音最有效的方

法,但对动物而言很多情况下它们的移动范围有限^[7-8],无法有效避开噪音源,因此研究动物在不可避免的噪音环境中的行为反应显得尤为重要^[9]。近年来,人为噪音的扩张速度非常迅猛,不仅遍及沿海的高密度居住区域,甚至殃及公海水域^[10-12]。人为噪音对于包括鱼类在内的水生生物所产生的负面影响,已经引起了人们的广泛关注。许多研究表明,人为噪音会造成鱼类暂时性听力损伤^[13-15]、暂时性分析能力降低^[16]、内耳感觉上皮细胞损伤^[17-18],并引发内分泌压力反应等^[19-20]。有些噪音,尽管发生的周期很短,但强度很高,甚至可以杀死鱼类^[21]。

对于水产养殖业而言,如果鱼类不能在身心良好的情况下生长,其产量和品质都会受到极大影响,因此,研究噪音对于鱼类的影响非常必要,可以在养殖过

基金项目:国家现代农业产业技术体系建设专项“鲆鲽类产业技术体系”(CARS-50);中国水产科学研究院基本科研业务费专项课题“陆上舱养模拟实验平台设计与实验研究”(2016ZD1303)。

第一作者简介:宋红桥,男,1982年出生,上海人,工程师,本科,主要研究方向为水产养殖工程。通信地址:200092 上海市杨浦区赤峰路63号 中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所, Tel: 021-65977260, E-mail: songhongqiao@fmiri.ac.cn。

收稿日期:2017-06-01, **修回日期:**2017-07-28。

程中为鱼类提供更舒适和健康的养殖环境、提升养殖品质和产量提供理论指导和依据。

1 鱼类听觉

声音是由物体振动所产生,声源振动引起周围弹性介质分子振动,振动的分子又会引起其周围的分子产生振动,声音由此得以传播^[22]。高频的声压和低频的粒子运动或者位移波动组成了声音。在水中,声音可以以流体粒子位移的形式进行传播。

人类是依靠感知空气中传播的声压获取声音的,而鱼类却可以探测到水中流体粒子的加速度。对于有鱼鳔的鱼,如果内耳与鱼鳔相连,其整个结构相当于一个声压探测器,可以将声压转变成内耳能够探测到的粒子加速度^[23]。

一直以来人们并不了解鱼类探测声音的能力,直到1903年Parker^[24]首次通过试验证明鱼类可以感觉到声音,时至今日鱼类声学已成为涵盖生物学、物理学、心理学和生物学的交叉性学科。在已知的31900种鱼类中,人们虽对其中一小部分品种做过探测声压能力的研究,但对于鱼类的听觉机制、其行为与声音的关联性仍然不甚清晰^[25]。不过可以明确的是,所有硬骨鱼均具有用于感受粒子移动的内耳,鱼类用于提高声压感受灵敏性的特殊结构在不同种群中是同步进化的^[26]。此外,鱼类还可以通过侧线系统接受声音的刺激,侧线系统能帮助鱼类获取大部分的环境信息,而水流是侧线系统有效的刺激源之一^[27]。

一般而言,鱼类只能探测到高于背景噪声声压级20~30 dB的声音,当背景噪音或者环境噪音信号增强,鱼类就必须缩短与声源的距离才能探测到有用的信号^[28]。目标信号与环境声音混合形成了一种“听觉场景”,为了能从听觉场景中分辨出目标信号,鱼类不得不进化自己的听觉能力^[29]。

2 听觉对于鱼类的重要性

声音对于鱼类来说可以分为两大类:其自身发出的声音和环境噪音。

鱼类对同类或者其他种群的鱼发出的声音是非常敏感的。大多数的鱼都可以发声^[30],主要通过摩擦、敲击等方式^[31]。分辨猎物、捕食者、同类的声音可以帮助鱼类搜寻猎物、躲避猎食者,在交配季节寻找配偶^[32]等等,已有研究表明鱼类对上述声音有明显反应^[30,33-34]。

环境噪音包括风暴、海浪等非生命声源,以及鲸类、枪虾等生命声源。一方面环境噪音会干扰鱼类获取目标信号,但另一方面它也可以给鱼类提供某些环境线索。例如许多珊瑚礁鱼类产卵后,鱼卵会随水流到远离珊瑚礁的地方,但是孵化出的幼鱼必须回到珊

瑚礁中才能存活,珊瑚礁系统因为寄居了各种鱼类和无脊椎动物而充满了噪音,这种噪音对于想要回归的珊瑚鱼幼鱼是非常重要的环境线索^[35-38]。此外,鱼类还可以通过声音反馈来定位礁石,判断水流和风浪的大小以及海岸线的远近等等^[39-40]。在自然界中,声音对于鱼类的生存具有重要的意义。经过长时间的演化发展,鱼类可以依靠听觉适应所处的水域环境,并以此为基础进行生长繁衍。

3 人为噪音对鱼类的影响

人为噪音不同于普通的环境噪音,是鱼类所不熟悉和适应的一种声音。人类的出现打破了常规的生态系统,并且随着工业文明的不断发展,这种对于自然环境的干预愈加明显。捕鱼作业、水上娱乐活动、水上运输、海上石油和天然气的开采、疏浚、建造桥梁、港口、石油、天然气平台以及风电场和其他可持续能源设施等等,这一系列水上以及沿岸的生产、作业活动所产生的噪音足以干扰鱼类接收重要的声音信息,对其行为和生理造成直接或间接的影响^[6]。

3.1 噪音对于鱼类听力的影响

噪音对于鱼类听力的影响分为两种:永久性听阈位移(permanent threshold shift, PTS)和暂时性听阈位移(temporary threshold shift, TTS)^[41]。和人类一样,鱼类在突然受到噪音刺激时其听觉敏感度会有一定程度的损失,但当离开噪音源或者噪音消失以后,经过一段时间听力能够恢复,这种现象称之为暂时性听阈位移^[42]。暂时性听阈位移的恢复时间决定于噪音的种类、不用品种的鱼对噪音的敏感性,以及听阈位移的严重程度。如果在经历下一次噪音刺激之前,听力损失还有没完全恢复,有些损失就可能转变成永久性的,即永久性听阈位移^[42]。

位于意大利里雅思特(Trieste)的米拉马雷(Miramare)世界自然基金海洋保护区,坐落于亚得里亚海一个主要的工业和度假区内,船只发出的噪音对于当地鱼类的生活不可避免。Codarin等^[43]研究发现,保护区内游艇发出的噪音对于当地3种主要鱼类的听阈有极大的影响,尤其对于鱼类用于交流的听力频段影响尤为显著,船只的噪音可能因此对当地鱼类的交流产生干扰。在另一项研究中Wysocki等^[44]得出了同样的结论:无论鱼类先天听力条件优劣,其听觉灵敏度均因暴露于船只噪音中而出现显著降低,且鱼类用于水下交流的频段受到显著影响,Wysocki等还指出持续存在的船只噪音会成为鱼类潜在的压力应激源。

在鱼类漫长的听力进化历史中,人为噪音对鱼类来说是陌生的,它有别于自然界中的声音,也不能提供

有用的生存信息,更多的是一种外界刺激,对鱼类的听阈和听力敏感度构成不可小觑的影响。

3.2 噪音对于鱼类信号识别的掩蔽作用

水体中存在许多生物声音信号,鱼类的很多行为都与声音有关,例如交配、猎食、定位等等。以猎食为例,这个过程涵盖了一系列形态学适应和行为学技巧,鱼类需要进行不断地抉择,比如什么时候开始,在什么地方进行,捕食什么猎物,以及如何配合其他行为(交配或者躲避猎食者等)从而优化猎食时间等等^[44]。而噪音会掩蔽重要的听觉信号,干扰鱼类对正确信息的接收,做出错误的抉择,导致猎食活动失败。长此以往鱼类会因摄食不足而影响健康状况。

Voellmy等^[45]研究发现,暴露于船只噪音之下的三刺鱼(*Gasterosteus aculeatus*)和米诺鱼(*Phoxinus phoxinus*)摄食大水蚤(*Daphnia magna*)的数量明显减少,并表现出更多的惊吓反应,其中三刺鱼的捕食失误率明显增加,而米诺鱼的静止时间增加,摄食积极性下降。Purser等^[46]的研究也指出尽管三刺鱼暴露于噪音之下其摄食总量没有发生明显变化,但随着噪音暴露时间增加,试验鱼摄食错误次数增加,对于食物及非食物的辨别能力下降。Bracciali等^[47]则发现地中海雀鲷(*Chromis chromis*)的摄食频率随着船运噪音的增大而显著降低。

在水下由于受到水体条件(浊度、水色、能见度等)的限制,鱼类依靠视力获得的信息比较有限,相比之下,听觉就发挥了更大的作用。鱼类可以依靠听觉分析周围的环境,极大地扩展了其生存和活动范围。然而这个过程如果受到外来噪音的干扰,鱼类就不能很好地获取和利用听觉信息,其结果就是生存和活动受到严重影响。

3.3 噪音对鱼类行为及生理指标的影响

噪音使鱼分心,将其有限的注意力从其主要任务转移到环境中的噪音刺激上;此外,面对突如其来的噪音,鱼会受到一定程度的惊吓,改变其行为常态,并伴随着一定的生理生化反应。

Jacobsen等^[48]研究了人们进行户外水上活动时,船只噪音等对于当地鱼类行为的影响,结果显示:斜齿鲃(*Rutilus rutilus*)在船只马达启动的同时显著提高了游泳速度;河鲈(*Perca fluviatilis*)在船只噪音出现后增加了游动次数,但噪音持续1 h之后河鲈的游泳次数又恢复正常;白斑狗鱼(*Esox Lucius*)的游泳活动则未受到船只噪音的显著影响。

Nedelec等^[49]在茉莉雅岛进行实地试验,研究摩托艇的噪音对珊瑚礁鱼三斑圆雀鲷(*Dascyllus*

trimaculatus)的影响,结果发现:重复噪音暴露试验2天后,幼年三斑圆雀鲷的躲避行为增加,但试验持续1、2周后,试验鱼的躲避行为不再增加;噪音暴露试验开始时,试验鱼的呼吸速率上升,但这种现象在试验持续1、2周后逐渐减少。研究者还指出,该试验条件下,对试验鱼重复播放摩托艇的噪音3周后,并未造成试验鱼血液皮质醇指标、生长情况或者身体组成发生显著变化。

Celi等^[50]的研究则指出人为噪音对鱼的多项生化指标有消极影响:试验以大西洋鲷(*Sparus aurata*)为研究对象,测定船只噪音对试验鱼促肾上腺皮质激素(ACTH)、皮质醇、血糖、乳酸、血细胞比容、热休克70 kDa蛋白等10个血液指标的影响。10天的噪音暴露试验结果显示,噪音几乎对所有评估的血液指标都有巨大的影响,各指标出现显著升高。

受到外界刺激时,鱼类行为是最直观的反映,而血液生化指标则从生理学上对压力刺激的程度进行量化。从现有的研究结果来看,在人为噪音出现的瞬间,鱼类会立刻表现出应激反应,伴随着皮质醇、血糖等应激指标的上升,但当噪音持续一段较长的时间后,某些鱼类的应激反应逐渐消失,表现出对于噪音的适应性。

4 展望

综上所述,人为噪音对鱼类的生理、听觉、行为都会造成不同程度的影响,根据鱼类品种的不同以及噪音暴露时间的长短等,这种影响可以是永久的,也可以因为个体的适应而自行消除。

不过目前人们对人为噪音对鱼类构成的影响还有很大的认识缺失^[51-54],原因之一是鱼类种群之间差异比较大,且每个品种不同的生长阶段也有所不同,这无疑增加了研究的难度。此外,尽管人们对于鱼类如何利用声音及其对人造声音反馈的研究兴趣很强烈,但试验数据相当少,研究仍处于发展阶段^[55]。有效的听力敏感图谱只适用于有限的鱼种,许多研究在不合适的听力条件下展开,由此测定的数据值得怀疑。现在还没有一套专业的设备,可以向鱼类发出不同的人造声音信号^[6],以此开展更深入更细致的研究,这也许是今后需要突破的方向之一。无论是处于环境保护还是提高鱼类福利的目的,研究人为噪音对鱼类的影响都有其必要性,未来仍需要进行大量基础性的研究工作。

参考文献

- [1] Kiessling A, Hans van de Vis, Flik G, et al. Welfare of farmed fish in present and future production systems[J]. Fish Physiology and Biochemistry, 2012, 38(1): 1-3.

- [2] Jones R C. Science, sentience, and animal welfare[J].Biology and Philosophy,2013,28(1):1-30.
- [3] Polten B. Status of law-making on animal welfare[J].Dtw Deutsche Tierärztliche Wochenschrift,2007,114(3):98-103.
- [4] 李贤,刘鹰.水产养殖中鱼类福利学研究进展[J].渔业现代化,2014,41(1):40-45.
- [5] 张博.海上人为噪声及其对海洋鱼类影响的初步探究[D].上海:上海海洋大学,2015.
- [6] Hawkins A D, Pembroke A E, Popper A N. Information gaps in understanding the effects of noise on fishes and invertebrates[J].Reviews in Fish Biology and Fisheries,2015,25(1):39-64.
- [7] Barber J R, Crooks K R, Fristrup K M. The costs of chronic noise exposure for terrestrial organisms[J].Trends in Ecology & Evolution,2010,25(3):180-189.
- [8] Slabbekoorn H, Bouton N, van Opzeeland I, et al. A noisy spring: the impact of globally rising underwater sound levels on fish[J].Trends in Ecology & Evolution,2010,25(7):419-427.
- [9] Slabbekoorn H, Bouton N, van Opzeeland I, et al. A noisy spring: the impact of globally rising underwater sound levels on fish[J].Trends Ecol Evol,2010,25:419-427.
- [10] Andrew R K, Howe B M, Mercer J A, et al. Ocean ambient sound: comparing the 1960s with the 1990s for a receiver off the California coast[J].Acoustics Research Letters Online,2002,3(2):65-70.
- [11] Ross D. Ship sources of ambient noise[J].IEEE Journal of Oceanic Engineering,2005,30(2):257-261.
- [12] Tyack P L. Implication for marine mammals of large-scale changes in the marine acoustic environment[J].Journal of Mammalogy,2008,89(3):549-558.
- [13] Amoser S, Ladich F. Diversity in noise-induced temporary hearing loss in otophysine fishes[J].J. Acoust Soc Am,2003,113:2170-2179.
- [14] Scholik A R, Yan H Y. Effects of underwater noise on auditory sensitivity of a cyprinid fish[J].Hearing Research,2001,152(1-2):17-24.
- [15] Smith M E, Kane A S, Popper A N. Noise-induced stress response and hearing loss in goldfish (*Carassius auratus*) [J].Journal of Experimental Biology, 2004,207(Pt 3):427-435.
- [16] Wysocki L E, Ladich F. Effects of noise exposure on click detection and the temporal resolution ability of the goldfish auditory system [J].Hearing Research,2005,201(1 - 2):27-36.
- [17] Hastings M C, Popper A N, Finneran J J, et al. Effects of low-frequency underwater sound on hair cells of the inner ear and lateral line of the teleost fish *Astronotus ocellatus*[J].Journal of the Acoustical Society of America, 1996 , 99 (3) :1759-1766.
- [18] McCauley R D, Fewtrell J, Popper A N. High intensity anthropogenic sound damages fish ears[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2003,113: 638 - 642.
- [19] Santulli A, Modica A, Messina C, et al. Biochemical response of European Sea Bass (*Dichentrarchus labrax* L.) to the stress induced by off-shore experimental seismic prospecting[J].Mar Pollut Bull, 1999,38(2):1105-1114.
- [20] Sverdrup A, Kjellsby E, Krüger P G, et al. Effects of experimental seismic shock on vasoactivity of arteries, integrity of the vascular endothelium and on primary stress hormones of the Atlantic salmon [J].Journal of Fish Biology,2010,45(6):973-995.
- [21] Stadler J H, Woodbury D P. Assessing the effects to fishes from pile driving: application of new hydroacoustic criteria[J].유체기계저널 제12권 제3호 2009,12(3):282-286.
- [22] 杜功焕,朱哲民,龚秀芬.声学基础(第二版)[M].南京:南京大学出版社,2001:2.
- [23] 赵传綱,唐小曼,陈思行. 鱼类的行动[M].北京:农业出版社,1979:117.
- [24] Parker G H. The Sense of Hearing in Fishes[J].American Naturalist, 1903,37(4):185-204.
- [25] Popper A N, Fay R R. Rethinking sound detection by fishes[J].Harnng Rarh,2011,273(1-2):25-36.
- [26] Ladich F, Popper A N. Parallel Evolution in Fish Hearing Organs[J].Springer Handbook of Auditory Research,2004,22:95-127.
- [27] Montgomery J C, Baker C F, Carton A G. The lateral line can mediate rheotaxis in fish[J].Nature,1997,389(6654):960-963.
- [28] Lugli M, Fine M L. Acoustic communication in two freshwater gobies: ambient noise and short- range propagation in shallow streams[J].Journal of the Acoustical Society of America,2003,114(1):512-521.
- [29] Popper A N, Fay R. Evolution of the ear and hearing: issues and questions[J].Brain Behavior & Evolution,1997,50(4):213-221.
- [30] Arthur A, Myrberg Jr. Underwater sound: Its relevance to behavioral functions among fishes and marine mammals[J].Marine & Freshwater Behaviour & Physiology,2009,29(1):3-21.
- [31] Ladich F, Yan H Y. Correlation between auditory sensitivity and vocalization in anabantoid fishes[J].Journal of Comparative Physiology A, 1998,182(6):737-746.
- [32] Bass A H, Ladich F. Vocal-acoustic communication: from neurons to behavior[M].Springer handbook of auditory research,2008(32): 253-278.
- [33] Mann D A, Lobel P S. Propagation of damselfish (Pomacentridae) courtship sounds[J].Journal of the Acoustical Society of America, 1997, 101(6):3783-3791.
- [34] Mann D A, Lu Z, Hastings M C, et al. Detection of ultrasonic tones and simulated dolphin echolocation clicks by a teleost fish, the American shad (*Alosa sapidissima*) [J].Journal of the Acoustical Society of America,1998,104(1):562-568.
- [35] Cato D H. Marine biological choruses observed in tropical waters near Australia[J].Journal of the Acoustical Society of America,1978, 64(3):736-743.
- [36] Leis J, Carson-Ewart B, Cato D. Sound detection in situ by the larvae of a coral- reef damselfish (Pomacentridae) [J].Marine Ecology Progress,2002,232(1):259-268.
- [37] Tolimieri N, Haine O, Jeffs J C M, et al. Ambient sound as a navigational cue for larval reef fish[J].Bioacoustics the International Journal of Animal Sound & Its Recording,2012,12(2-3):214-217.
- [38] Leis J, Carson B. Orientation of pelagic larvae of coral-reef fishes in the ocean[J].Marine Ecology Progress,2003,252(1):239-253.
- [39] Lagardère J P, Bégout M L, Lafaye J Y, et al. Influence of Wind-

- produced Noise on Orientation in the Sole (*Solea solea*)[J].Canadian Journal of Fisheries & Aquatic Sciences,1994,51(6):1258-1264.
- [40] Tavolga W N. Sound Production and Detection[J].Fish Physiology, 1971,5:135-205.
- [41] Dooling R J, Leek M R, Popper A N. Effects of noise on fishes: What we can learn from humans and Birds[J].Integrative Zoology, 2015,10(1):29-37.
- [42] 吴祖德译.噪声[M].北京:人民卫生出版社,1985:4.
- [43] Codarin A, Wysocki L E, Ladich F, et al. Effects of ambient and boat noise on hearing and communication in three fish species living in a marine protected area (Miramare, Italy) [J].Marine Pollution Bulletin,2009,58(12):1880-1887.
- [44] Wysocki L E, Dittami J P, Ladich F. Ship noise and cortisol secretion in European freshwater fishes[J].Biological Conservation, 2006,128(4):501-508.
- [45] Voellmy I K, Purser J, Flynn D, et al. Acoustic noise reduces foraging success in two sympatric fish species via different mechanism[J].Animal Behaviour,2014,89(3):191-198.
- [46] Purser J, Radford A N. Acoustic noise induces attention shifts and reduces foraging performance in three- spined sticklebacks (*Gasterosteus aculeatus*)[J].PloS One,2012,6(2):e17478.
- [47] Bracciali C, Campobello D, Giacoma C, et al. Effects of nautical traffic and noise on foraging patterns of mediterranean damselfish (*Chromis chromis*)[J].PloS One,2012,7(7):e40582.
- [48] Jacobsen L, Baktoft H, Jepsen N, et al. Effect of boat noise and angling on lake fish behavior[J].Journal of Fish Biology,2014,84(6): 1768-1780.
- [49] Nedelec S L, Mills S C, Lecchini D, et al. Repeated exposure to noise increases tolerance in a coral reef fish[J].Environmental Pollution,2016,216:428.
- [50] Celi M, Filiciotto F, Maricchiolo G, et al. L Genovese Vessel noise pollution as a human threat to fish: assessment of the stress response in gilthead sea bream (*Sparus aurata*, Linnaeus 1758)[J]. Fish Physiology and Biochemistry,2016,42(2):631-641.
- [51] Popper A N, Hastings M C. The effects of anthropogenic sources of sound on fishes[J].Journal of Fish Biology,2009,75(3):455-489
- [52] Normandeau I. Effects of noise on fish, fisheries, and invertebrates in the US Atlantic and Arctic from energy industry sound-generating activities[R].A Workshop Report for the US Dept of the Interior, Bureau of Ocean Energy Management,2012.
- [53] Hawkins A D, Popper A N. Assessing the impacts of underwater sounds on fishes and other forms of marine life[J].Acoust Today,10 (2):30-41.
- [54] Popper A N, Hawkins A D, Fay R R, et al. Sound exposure guidelines for fishes and sea turtles: a technical report prepared by ANSI-Accredited Standards Committee S3/SC1 and registered with ANSI[J].Springer International Publishing,2014(1178):15.
- [55] McWilliam J N, Hawkins A D.A comparison of inshore marine soundscapes[J]. Journal of Experimental Marine Biology & Ecology,2013,446(6):166-176.