DOI: 10.11883/1001-1455(2017)04-0734-07

影响大黄鱼的水中声指标*

周在明,杨燕明,牛富强,黄跃坤
(国家海洋局第三海洋研究所海洋声学与遥感实验室,福建 厦门 361005)

摘要: 为了明确有效地评价声波对大黄鱼影响的指标,以水下爆破和滨海山体爆破两种作业方式产生的水中声波数据为基础,进行声波信号的声压峰值和声暴露级分析,并结合现场大黄鱼的行为响应进行研究。结果表明:水下爆破产生的水中声波瞬态声压幅值较高,能量在瞬间累积到最大值并影响大黄鱼的行为和安全;而滨海山体爆破水中声波的声压幅值小,声暴露时间长,能量的连续累积造成了大黄鱼行为的改变。由于两种爆破方式作用下的水中声波在不同的声暴露时间内的声暴露级较接近,且超过 150 dB 会造成大黄鱼的行为异常,因此认为声暴露级是评价水中声波对大黄鱼影响的一个重要指标。

关键词: 工程爆破;水中声波;大黄鱼;声暴露级;指标
中图分类号: O383 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

工程爆破为人类获取资源、向海洋拓展空间创造了可能,但由此产生的水下噪声对水生环境和水生生物的影响,尤其是对听觉敏感的珍稀海洋哺乳动物和珍贵鱼类的潜在不良影响引起了广泛关注[1-4]。大黄鱼隶属鲈形目石首科,在我国近海渔业中占有重要地位[5]。大黄鱼具有明显的行为声学特征,能够在一定的时间和环境条件下发声,其耳石结构又使其具备灵敏的声学响应特性,因此大黄鱼易受外界噪声影响,特定声信号刺激能使其行为发生改变,甚至死亡[6-7]。对鱼类影响指标的相关研究表明,不同鱼类对水中声波强度的承受能力显著不同,其中石首科鱼类尤以大黄鱼所能承受的水中冲击波超压能力较弱,石首科鱼类的水中冲击波超压安全控制标准约为50 kPa,非石首科鱼类为 200～300 kPa,声压峰值 1～4 kPa 会造成大黄鱼快速逃离和跳离水面,峰值声压级超过 190 dB(转换为峰值声压为 3 162.3 Pa)会导致大黄鱼死亡[7-11]。GB 6722—2011 首次将水中声波对鱼类影响的安全控制指标进行了说明,其中高敏感石首科鱼类在自然状态下所承受的水中冲击波超压峰值为 100 kPa,网箱养殖状态下所承受的超压峰值为 50 kPa[12];GB 6722—2014 对声波影响下的鱼类指标做了进一步修订,认为高敏感石首科鱼类在自然状态下所承受的超压峰值为 10 kPa,网箱养殖状态下所承受的超压峰值为 5 kPa[13]。尽管相关的研究和规程对水中声波影响鱼类的安全指标进行了定量表达,但在实际的工程应用中发现这些指标并不能完全反映水中声波对鱼类的影响程度。本文中通过分析水中声波对大黄鱼影响,给出全面反映声波对大黄鱼影响的评价指标,以期为工程爆破标准制定和海洋生态环境保护提供参考。

1 实验方法

本研究的工程爆破包括水下爆破和滨海陆地爆破作业两种方式,工程地点位于福建省东北部三沙湾和罗源湾海域(图 1),海域水深 15～30 m,平均约 22.3 m,是网箱养殖大黄鱼的主要分布区。其中三沙湾工程作业区位于宁德漳湾小岁屿附近,以水下炸礁作业为主,罗源湾工程作业区位于罗源县碧里乡,以滨海山体爆破作业为主。

为了快速、实时获取影响大黄鱼的有效爆破声波数据,对大黄鱼网箱养殖区进行定点监测,监测点距离工程爆破点 1.1～1.5 km。水听器位于大黄鱼养殖网箱中水下 3.5 m,是大黄鱼的主要活动水层,

* **收稿日期**: 2015-09-17; **修回日期**: 2016-01-05
基金项目: 国家海洋局第三海洋研究所基本科研业务费专项项目(海三科 2013020;2012022)
第一作者: 周在明(1980—),男,博士,助理研究员,zhouzaiming@tio.org.cn。

网箱入水深度 6～8 m。测量系统主要有 2 种：第 1 种为丹麦 B&K Pulse3560 和 8104 标准水听器构建的水下爆破冲击波监测系统，水听器频率响应为 0.1 Hz～120 kHz，接收灵敏度为（－205±2）dB re 1 V/μPa；第 2 种监测设备是美国 Loggerhead Instruments DSG 自容式水下声音记录仪，其水听器灵敏度为－180 dB re 1 V/μPa，频率响应为 0.02～30 kHz，最高采样率为 80 kHz。水下声波数据采集时间为 2013 年 3 月和 7 月。监测过程同步记录了大黄鱼的行为反应。

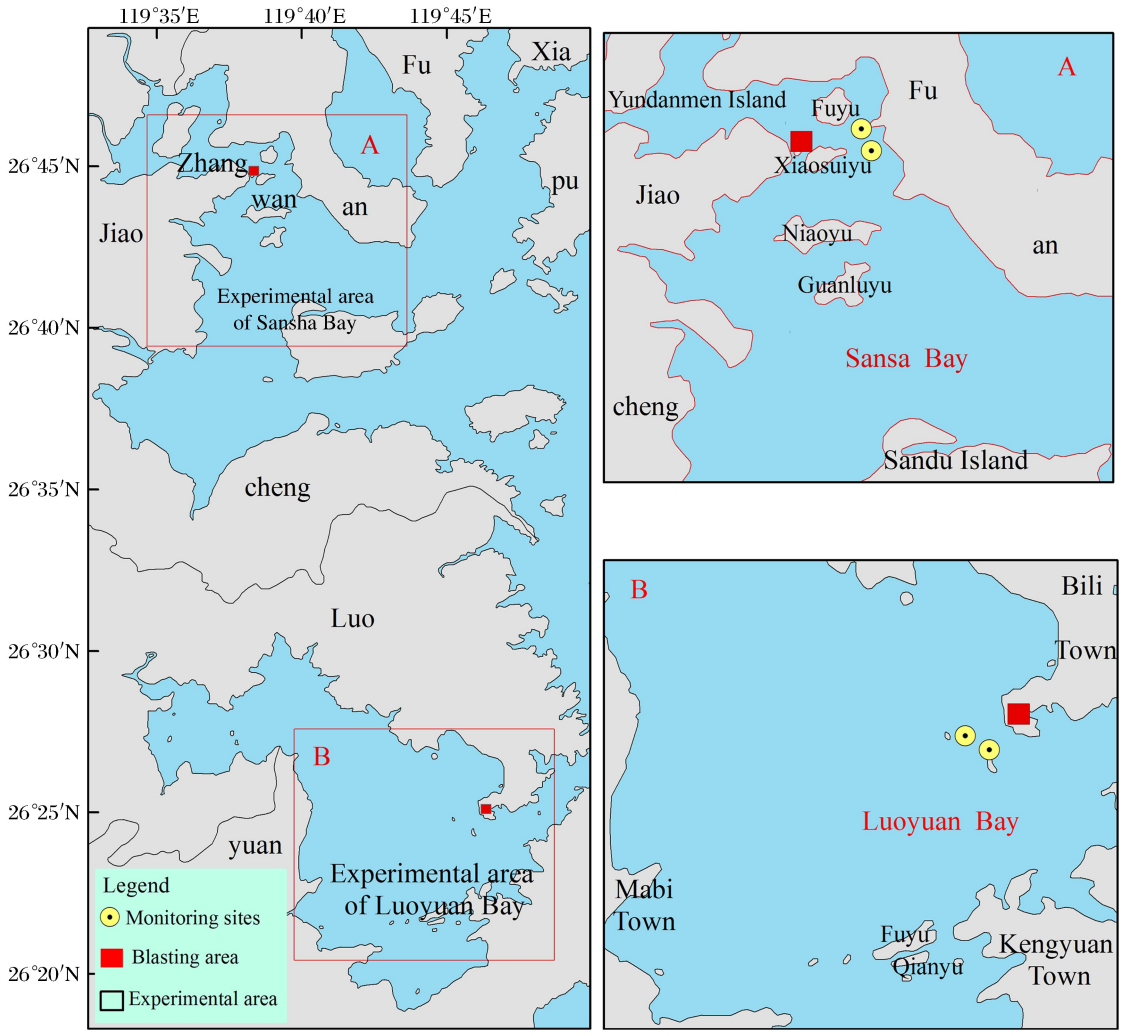

图 1　工程试验区域示意图

Fig. 1　Diagram of engineering experimental regions

2　水中声波特征

水下爆破过程大体分为 3 个阶段：炸药的爆轰、冲击波的形成和传播以及气泡的振荡和上浮，在距离爆炸点一定的距离其主要特征为冲击波[14]。水下爆破冲击波的波形特征主要表现在压力幅值的瞬间跳跃式陡峭上升，然后迅速按指数规律下降，在深海中整个作用过程一般只有几毫秒，在浅海中，由于海面和海底的反射，其持续时间稍有变长[15]。根据监测到的水中波形信号（图 2(a)），可以发现水下爆破产生的冲击波的波头具有突跃的特点，声压值从最小跃升至峰值所用时间仅为 0.2 ms，虽然爆破药量和爆破方式不同波形幅值有所差异，但峰值声压波形尖锐，压力幅值迅速增大和衰减的规律一致（图 3(a)）。图 2(a)中声压峰值为 1 294.3 Pa，峰值声压级为 182.2 dB，波形信号持续时间为 120 ms。

对于滨海山体爆破地震波经过山体基岩传播进入海岸时，爆破地震波由海岸及海底辐射声能进入海水并通过海水传播声波，此外，地震波也会继续通过海床基底传播。由于基岩介质对声波的天然低通

滤波作用和海水良好的声传播特征，因此，地震波在海床基底传播过程中声能衰减严重，水中声能主要来源于爆破地震波在海水中的传播[16-18]。滨海山体爆破和水下爆破水中声波波形有明显差别：其声波声压峰值较小，峰值声压波形较圆滑（图 3(b)），信号持续时间长，图 2(b)中声压峰值为 368.9 Pa，峰值声压级为 171.3 dB，信号持续时间约 4.1 s。

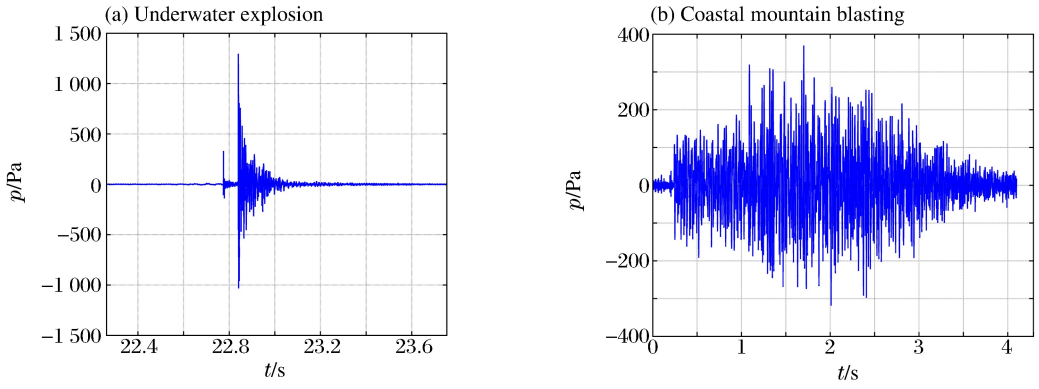

图 2 工程爆破水中波形图

Fig. 2 Explosion acoustic waveforms

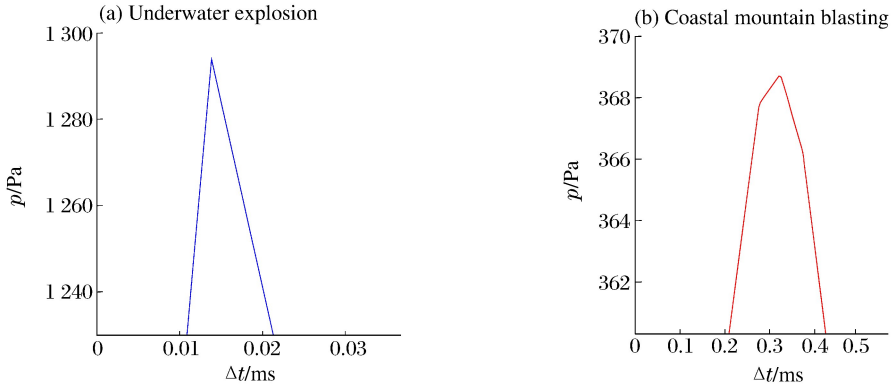

图 3 工程爆破水中声波峰值波形

Fig. 3 Peak shape of acoustic waveforms

因此，从时域波形上看，水下爆破和滨海山体爆破水中声波信号存在较为显著的差异。水下爆破声波的压力幅值突跃至最大后迅速衰减，波峰陡峭尖锐，声压峰值或峰值声压级较大，且受爆破药量的影响声压峰值或峰值声压级变化幅度较大，根据监测到的水中声波信号的统计结果，声压峰值或峰值声压级分别为(2 803.61±2 126.44) Pa 和(186.95±6.25) dB，信号持续时间约为(0.12±0.05) s。而滨海山体爆破水中声波信号压力幅值突跃并不明显，波峰圆滑，声压峰值或峰值声压级相对较小，监测到的声波信号的声压峰值或峰值声压级分别为(261.72±79.34) Pa 和(167.99±2.49) dB，信号幅度平缓持续时间较长，(3.96±0.68) s。

3 水中声波对大黄鱼的影响

3.1 声压峰值的影响

水下爆破对水中生物，特别是对鱼类的伤害事故时有发生[8-11]。究其主要原因，炸药在水下爆破，特别是在水中爆破时，将在瞬间产生高温高压气体，形成水中冲击波，且水下爆破产生的冲击波压力强度较大[9]。如图 2(a)声压峰值迅速达到 1 294.3 Pa，用时仅为 0.28×10^{-3} s，在此大的声压作用下造成了网箱大黄鱼(8～12 个月)的逃窜和跳动，这与已有的研究较一致[5]。

但滨海山体爆破水中声波的声压幅值较小，如图 2(b)所示，声压峰值仅为 368.9 Pa。从声压峰值

看，本研究所测到的滨海山体爆破水中声波信号远低于相关的研究和 GB 6722—2011、GB 6722—2014 中声压峰值对网箱养殖石首科鱼类的安全控制标准 50 和 5 kPa，也低于相关的研究中提到的使大黄鱼产生快速逃离和跳离水面行为反应的声压值 1～4 kPa[7-13]。然而，在监测站位现场却观测到了大黄鱼的快速游动和跳动，这说明滨海山体爆破一定程度上对大黄鱼的正常活动构成了威胁，如图 4 所示。因此，仅以声压峰值作为评价水中声波对大黄鱼影响的指标不能解释大黄鱼的异常活动现象。

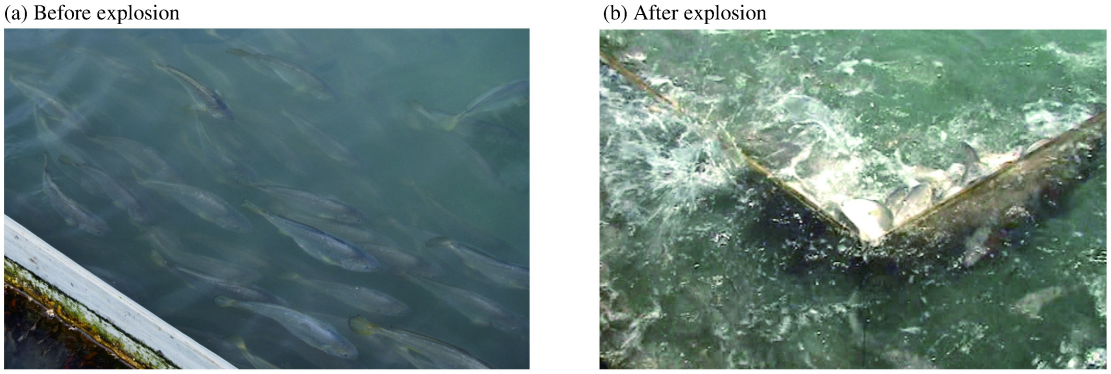

图 4　滨海山体爆破监测点大黄鱼的行为反应

Fig. 4　Behavior response of large yellow croakers to coastal mountain blasting

可见，水中声波信号的最大瞬时声压（声压峰值）可用于评价水下爆破产生的高强度短时信号对大黄鱼的影响，然而对于滨海山体爆破产生的水中声波则难以用声压峰值作为指标对大黄鱼的行为反应进行有效评价。

3.2　声暴露级的影响

人对噪声的容忍程度不仅与最大声压级（声压峰值）有关还与持续时间（声暴露时间）有关，暴露于一定强度的声源中会造成暂时性的听力损失，若暴露持续一段时间则会导致永久性的听力减弱[19]。水下噪声对鱼类和其他海洋生物的损伤同样受声压和持续时间的共同影响[20-21]。因此，在评价水中声波对大黄的影响时需要同时考虑声信号的声压和持续时间。

声暴露级 L_{se} 是一个独立声音事件的总能量并考虑了信号强度和持续时间，声暴露级的测算是将声信号能量归一化到 1 s 的时间内，因此声暴露级可进行不同声暴露条件下的能量比较[22]。引入声暴露级作为水中声波对大黄鱼影响的评价量，其计算公式为：

$$L_{se}=10\lg\left[\int_T p^2(t)\mathrm{d}t\right]=10\lg\left[\frac{1}{t_0}\int_{t_1}^{t_2}\frac{p_a(t)}{p_0^2}\mathrm{d}t\right] \tag{1}$$

式中：$p_a(t)$ 为声压；p_0 为参考声压；t_1-t_2 为声波信号持续时间；t_0 为参考时间，通常取 1 s[23-24]。声暴露级计算的能量通常为信号中心 90%的能量值，其开始时间和结束时间分别为 5%和 95%的信号持续时间[25-26]。

依据上述分析，本研究对水下爆破和滨海山体爆破产生的水中声波信号 90%的持续时间进行声暴露级能量计算，对应图 2 的声暴露过程其能量累积分布如图 5 所示。可以看出，水下爆破水中声波（图 2(a)）的声暴露级为 165.34 dB re 1 μPa^2 · s，滨海山体爆破水中声波（见图 2(b)）的声暴露级为 158.55 dB re 1 μPa^2 · s，其值较接近。从能量的累积时间看，水下爆破声波的声暴露级在短时间内声能迅速累积，在 90%的能量累积时间内，声暴露级增加 30 dB（$\delta_{30\,\mathrm{dB}}$）所用时间为 3 ms，增加 60 dB 的时间为 9 ms，能量稳定时间为 80 ms（图 5(a)）；对于滨海山体爆破水中声波能量累积时间较长，声暴露级增加 30 dB 和 60 dB 所用时间分别为 350 和 510 ms，能量稳定时间约为 2.4 s（图 5(b)）。从能量值看，两者在不同时间内累积的声暴露级能量基本相似。对水下爆破和滨海山体爆破水中声波的声暴露级计算结果如表 2 所示：其能量累积增加 30 dB 的时间相差较小，约为 33 ms；而声暴露级增加 60 dB 所用时间具有较大的差别，时间差约为 1.312 s。在不同的声暴露时间内 2 种爆破方式产生的水中声波的声暴露级超过 150 dB re 1 μPa^2 · s 时对大黄鱼的行为活动都产生了一定的影响，如大幅度的跳跃和逃逸等

异常行为(图 6)。因此,由于水下爆破和滨海山体爆破水中声波的传播路径不同,导致水下爆破和滨海山体爆破水中声波能量累积过程不同。水下爆破在短时间内能量迅速累积,声暴露级达到峰值,能量作用时间短;而滨海山体爆破声暴露级并没有迅速达到峰值,而需要经历一段时间的累积,声暴露时间较长,能量作用时间较长。

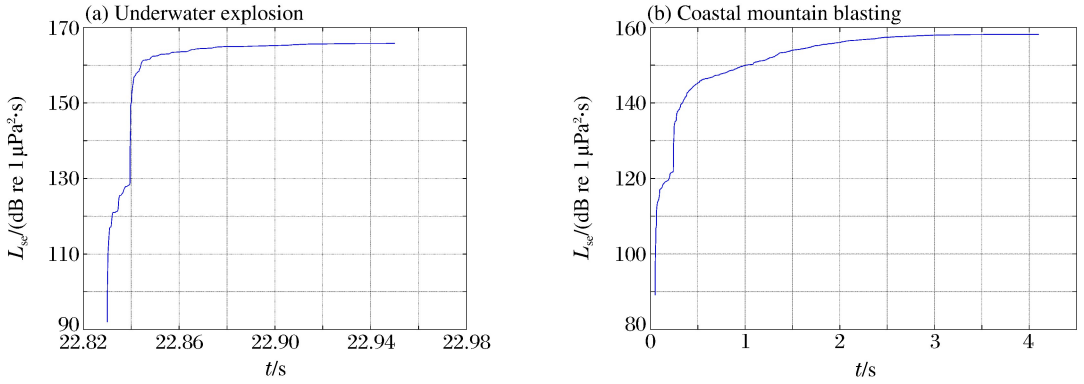

图 5 累积声暴露级变化曲线

Fig. 5 Cumulative variation of sound exposure level

表 1 工程爆破水中声波信号声暴露级统计

Table 1 Sound exposure level statistics of engineering balsting

信号来源	样本/个	$\delta_{30\ \mathrm{dB}}$/s	$\delta_{60\ \mathrm{dB}}$/s	L_{se}/(dB re 1 μPa² · s)
水下爆破	8	0.003±0.001	0.010±0.002	168.56±2.36
滨海山体爆破	22	0.036±0.012	1.322±0.034	161.33±2.06

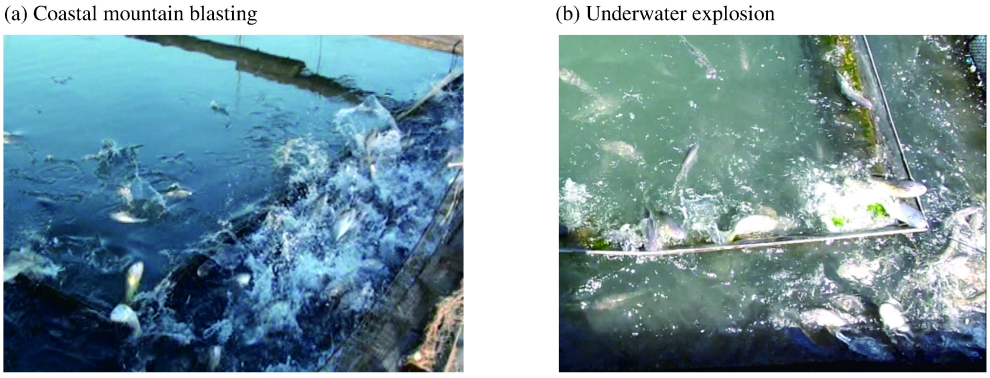

图 6 滨海山体爆破和水下爆破监测点大黄鱼的行为反应

Fig. 6 Behavior response of large yellow croakers to coastal mountain blasting and underwater explosion

综合滨海山体爆破和水下爆破的水中声信号特征可以发现,不同爆破方式下的水中声波信号存在一定的差异。由于两种声波信号对大黄鱼的行为响应产生了类似的影响,根据上述分析并结合相关研究,可以认为,水下爆破产生的水中声波瞬态声压幅值较高,能量在瞬间累积到最大值并影响大黄鱼的行为与安全,声暴露时间较短,可依据声压峰值或峰值声压级作为评价因素;而滨海山体爆破声波信号虽然声压峰值小,但声暴露时间较长,能量在相对长的时间内累积到较大值,造成大黄鱼行为的改变,是能量连续作用的结果,应以声暴露级作为评价指标。

4 结 论

滨海山体爆破与水下爆破的声波信号的声压和信号持续时间存在较明显的差异,以声压峰值和声

暴露级为指标进行两种声波信号分析，并结合大黄鱼的行为反应现象进行研究，主要结论为：

(1)水下爆破产生的声波压力幅值突跃，声压先增大，后迅速衰减，信号持续时间较短；而滨海山体爆破水中声波压力幅值突跃不明显，信号幅度平缓，持续时间较长。

(2)两种爆破方式作用下，在不同的声暴露时间内声暴露级较接近，且超过 150 dB re $1\mu Pa^2 \cdot s$ 会造成大黄鱼的行为异常，因此声暴露级可作为水中声波对大黄鱼影响的一个重要评价指标。

(3)爆破产生的声压峰值或峰值声压级作为大黄鱼行为与安全的单一判据难以准确地衡量其危害，在相关的研究和安全标准制定中应重视声暴露级这一指标参数。

参考文献：

[1] Popper A N, Hawkins A. The effects of noise on aquatic life[M]. New York: Springer Science and Business Media, 2012.

[2] Wahlberg M, Westerberg H. Hearing in fish and their reactions to sounds from offshore wind farms[J]. Marine Ecology Progress Series, 2005,288:295-309.

[3] Hermannsen L, Tougaard J, Beedholm K, et al. Characteristics and propagation of airgun pulses in shallow water with implications for effects on small marine mammals[J]. Plos One, 2015,10(7) :e0133436.

[4] Hidebrand J. Anthorpogenic and natural sources of ambient noise in the ocean[J]. Marine Ecology Progress, 2009, 395(10):5-20.

[5] 苏永全. 大黄鱼养殖[M]. 北京：海洋出版社，2004.

[6] 魏翀，张宇，张赛，等. 网箱养殖大黄鱼合成声信号特性研究[J]. 声学学报，2013,38(3):300-305.
Wei Chong, Zhang Yu, Zhang Sai, et al. Synthesized acoustic signal characteristics of net-cage-cultured Large Yellow Croaker, *Pesudosiaena crocea*[J]. Acta Acustica, 2013,38(3):300-305.

[7] 刘贞文，许肖梅，黄二辉，等. 大黄鱼的声刺激行为研究[J]. 应用海洋学学报，2014,33(1):105-110.
Liu Zhenwen, Xu Xiaomei, Huang Erhui, et al. Study on behavior of sound stimulation for Large Yellow Croaker (*Pseudosciaena crocea*)[J]. Journal of Applied Oceanography, 2014,33(1):105-110.

[8] 赵根，吴从清，王文辉. 爆破水中冲击波对鱼类损伤研究[J]. 工程爆破，2011,17(4):103-105.
Zhao Gen, Wu Congqing, Wang Wenhui. Research on blasting shock wave in water to damage of fish[J]. Engineering Blasting, 2011,17(4):103-105.

[9] 许鹭芬，王清池，王军，等. 水下爆破的声压测量及其对海洋生物的影响[J]. 厦门大学学报(自然科学版)，2000,39(1):58-61.
Xu Lufen, Wang Qingchi, Wang Jun, et al. Sound pressure measurement of underwater explosion and its effect on marine organism[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2000,39(1):58-61.

[10] 蒋玫，沈新强，杨红. 水下爆破对渔业生物影响的研究[J]. 海洋渔业，2005,27(2):150-153.
Jiang Jiu, Shen Xinqiang, Yang Hong. Influence of underwater explosions on fishery organism[J]. Marine Fisheries, 2005,27(2):150-153.

[11] 黄斌，黄瑞. 地震勘探爆破对鱼类生态影响的试验与分析[J]. 工程爆破，2013,19(5): 54-57.
Huang Bin, Huang Rui. Tests and analysis on impact of seismic exploration blasting on fish ecosystem[J]. Engineering Blasting, 2013,19(5): 54-57.

[12] 中华人民共和国国家标准编写组. 爆破安全规程：GB 6722—2011[S]. 北京：中国标准出版社，2011.

[13] 中华人民共和国国家标准编写组. 爆破安全规程：GB 6722—2014[S]. 北京：中国标准出版社，2015.

[14] 库尔 R H. 水下爆破[M]. 罗耀杰等，译. 北京：国防工业出版社，1960.

[15] Hannay D E. Estimation of geoacoustic parameters of the ocean bottom by inversion of reflectionless data[D]. University of Victoria, 1995.

[16] 刘伯胜，雷家煜. 水声学原理[M]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学出版社，1997.

[17] 龙源，冯长根，徐全军，等. 爆破地震波在岩石介质中传播特性与数值计算研究[J]. 工程爆破，2000,6(3):1-7.
Long Yuan, Feng Changgen, Xu Quanjun, et al. Study on propagation characteristics of blasting seismic waves in a rock medium and numerical calculation[J]. Engineering Blasting, 2000,6(3):1-7.

[18] 刘彤,马旭青,张晓平,等.岩石声谱特征值与强度关系研究[J].西部探矿工程,2003,15(6):64-66.
Liu Tong, Ma Xuqing, Zhang Xiaoping, et al. Study on relationship between sound spectum characteristics and strength of rock[J]. West-China Exploration Engineering, 2003,15(6):64-66.

[19] Davis M L, Cornwell D A. Introduction to environmental engineering[M]. 3rd ed. 王建龙,译.环境工程导论,3版.北京:清华大学出版社,2001.

[20] Hastings M C, Popper A N. Effects of sound on fish[R]. California: Department of Transportation, 2005.

[21] Götz T, Hastie G, Hatch L T, et al. Overview of the impacts of anthropogenic underwater sound in the marine environment[M]. London: OSPAR Commission, 2009.

[22] Dahl P H, de Jong C A F, Popper A N. The underwater sound field from impact pile driving and its potential effects on marine life[J]. Acoustics Today, 2015,11(2):18-25.

[23] Erbe C. Underwater acoustics: Noise and the effects on marine mammals[M]. Brisbane: JASCO Applied Sciences, 2010.

[24] Southall B L, Bowles A E, Ellison W T, et al. Marine mammal noise exposure criteria: Initial scientific recommendation[J]. Aquatic Mammals, 2007,33(4):411-521.

[25] Singh P k, Sinha A. Rock fragmentation by blasting[M]. London: CRC Press, 2013.

[26] Erbe C. Noise and the effects on marine mammals[M]// A Pocket Handbook. 3rd ed. JASCO Applied Sciences, 2011.

Index of underwater acoustic waves impacting on large yellow croakers

Zhou Zaiming, Yang Yanming, Niu Fuqiang, Huang Yuekun

(*Ocean Acoustics and Remote Sensing Laboratory, Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Xiamen* 361005, *Fujian, China*)

Abstract: The assessment of the behavior of large yellow croakers (*Pseudosciaena crocea*) in response to underwater acoustic waves entails clear and exact indices of assessment. In this work we collected data of underwater acoustic waves of coastal mountain blasting and underwater explosion using two types of acoustic instruments (Pulse 3560 and DSG) monitored at the sea stations, recorded large yellow croakers' behavioral characteristics, and carried out the index study of two signal parameters, peak pressure and sound exposure level, in combination with comparative analysis of the croakers' in situ behaviors. The results showed that, when the pressure amplitudes of the acoustic waves resulting from underwater explosion and mountain blasting were high, the momentary maximal sound energy would reach a momentary maximum value, affecting the croakers' behavior and safety. On the other hand, when the pressure amplitudes were lower but the time of exposure to the acoustic waves were long, the continual accumulation of sound energy would also affect the large yellow croakers' behavior. As a result, the levels of the exposure to the two blasting sound waves in different exposure times were very much consistent, and the croakers' abnormal behaviors were observed at sound exposure levels higher than 150 dB. So, an important conclusion was derived, combined with large yellow croakers' behavior and related academic research, that sound exposure level can be taken as an important factor, which was the total energy received over the sound exposure time, and should be used to assess the influence of the underwater acoustic waves on the large yellow croaker in underwater explosion and coastal mountain blasting.

Keywords: engineering blasting; underwater acoustic waves; large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*); sound exposure level; index

(责任编辑 张凌云)