

北海狮水下声信号类型分析

姜莹^{1,2}, 吕连港^{1,2}, 刘宗伟^{1,2}, 黄龙飞^{1,2}, 杨志国^{3*}, 杨春梅^{1,2}

(1. 自然资源部第一海洋研究所, 山东青岛 266061;

2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 区域海洋动力学与数值模拟功能实验室, 山东青岛 266237;

3. 自然资源部国家深海基地管理中心, 山东青岛 266237)

摘要:以水族馆内圈养的北海狮为研究对象,利用长达 29 h 的连续被动声学观测数据,对北海狮水下声信号类型进行了研究。共检测到 22 689 个水下声信号,对时长、最小频率、最大频率和峰值频率这 4 个声学参数采用聚类分析方法将信号分为 10 种类型:单脉冲(SP)、哨声(WS)、咕咕声(GG)、咚咚声(DS)、狗吠声(BK)、吼叫声(WY)、嗡嗡声(BZ)、撞击声(BG)、单频声(SF)以及咩咩声(BT)。该分类方式涵盖了北海狮 92.6% 的水下发声。北海狮水下声信号时长的均值为 5~1 244 ms,峰值频率一般小于 10 kHz。10 种类型信号的占比各有不同,BK,BT 和 BG 信号的比例较高;SP,WS 和 BZ 信号的比例次之;DS,WY,SF 和 GG 信号的比例较低。对北海狮水下声信号类型的分析能帮助了解北海狮的声行为特征,对野外北海狮的声学观测具有重要的指导价值。

关键词:北海狮;水下声信号;信号类型;信号特征;信号占比

中图分类号:Q62

文献标识码:A

文章编号:1671-6647(2020)01-0182-07

doi:10.3969/j.issn.1671-6647.2020.01.019

引用格式:JIANG Y, LÜ L G, LIU Z W, et al. Classification of underwater vocalizations produced by the captive Steller Sea Lions (*Eumetopias jubatus*)[J]. Advances in Marine Science, 2020, 38(1): 182-188. 姜莹, 吕连港, 刘宗伟, 等. 北海狮水下声信号特征分析[J]. 海洋科学进展, 2020, 38(1): 182-188.

北海狮(*Eumetopias jubatus*)属于海狮科(Otariidae)、北海狮属(*Eumetopias*),别称为北太平洋海狮、斯氏海狮、海驴等,因在颈部生有鬃状的长毛,叫声也很像狮吼而得此名。北海狮是海狮科中体型最大的一种,体型瘦长;头顶略凹;颈长;面部短宽,眼大;具有外耳廓,外耳廓相对较短并紧贴着头侧;前后肢均呈桨状,前肢长于后肢;全身主要为黄褐色,胸部至腹部颜色较深。北海狮是我国二级保护动物,被列入《世界自然保护联盟》(IUCN)2016 年濒危物种红色名录中易危物种^[1]。北海狮一般栖息于寒温带沿岸水域,其主要分布于太平洋(白令海、鄂霍次克海、阿拉斯加、堪察加、阿留申群岛和北千岛等)海域,在我国江苏启东的黄海海域和辽宁大洼的渤海海域亦可见。北海狮白天一般在水中捕食或活动,夜间则回到岸上睡觉。

北海狮属于鳍足类哺乳动物。据研究^[2],鳍足类哺乳动物虽然视觉较差,但拥有强大的生物声呐系统,能够通过发射声信号来检测和识别目标的大小以及形状,因此,研究者可以通过研究北海狮的水下声信号特征来了解其生活特性。目前,已有研究者通过被动声学观测方法,开展了同属于鳍足类哺乳动物的海豹水下声信号特征的研究,包括环纹海豹^[3]、格陵兰海豹^[4]、威德尔海豹^[5]等。近年来,北海狮科动物水下声信号特性方面的研究逐渐增多。Schusterman 等研究了同属于北海狮科的加利福尼亚海狮的水下声信号,认为加利福尼亚海狮的水下声信号可以分为 5 种类型:clicks, barks, whinnies, buzzing 以及 bang(或者 crack sounds)^[6],并指出 click 信号是其最常见的水下声信号类型^[7]。尽管如此,迄今关于北海狮的相关报道却仍

收稿日期:2018-08-27

资助项目:国家自然科学基金项目——南极普里兹湾和麦克默多湾虎鲸声信号特征研究(41906170);国家自然科学基金项目——黄海冷水团消衰期天气尺度变化及机制研究(41576027);国家海洋局海洋生态环境科学与工程重点实验室开放基金项目——便携式海洋哺乳动物声学实时检测系统研究(MESE-2016-05);中国-东盟海上合作基金

作者简介:姜莹(1984-),女,助理研究员,博士,主要从事海洋声学方面研究。E-mail: jiangying@fio.org.cn

* **通讯作者:**杨志国(1982-),男,副研究员,博士,主要从事海洋声学方面研究。E-mail: yzg@ndsc.org.cn

(王燕 编辑)

然很少,只有 clicks 和 growls 两种类型的水下声信号被报道过^[8-11],研究指出,北海狮可以通过降低 growls 声信号的发声频率来产生 click 信号串^[8]。

为了研究北海狮水下声信号的特征,本文使用一套便携的自容式水下声学记录设备连续记录水族馆内的北海狮水下声信号,通过分析记录信号的时频谱,对信号的声学特性参数进行了统计,并将北海狮的水下声信号进行分类,以期为掌握北海狮的水下发声情况奠定基础,为北海狮的声行为研究提供数据支撑,并为进一步的野外被动声学监测提供科学依据。

1 数据采集与处理方法

1.1 数据采集

2015-11 在青岛极地海洋世界的北海狮饲养池中进行了水下声信号观测。池中水深约为 6 m,直径约为 3 m,池壁为普通水泥材料。池中驯养了 3 头北海狮,一雄两雌,雄海狮约 6 岁,两头雌海狮略小,分别为 5 岁和 4 岁。数据记录时间为 2015-11-19T09:55—20T15:15,共计约 29 h。采用一套自制的自容式数据采集设备 LoPAS-H(图 1)记录水下声信号。该设备由记录器和水听器两部分组成,其中记录器包含 16 bit 分辨率的低噪数模转换模块、能供电 38 h 的电源模块和容量可达 1 028 GB 的数据存储模块。它具有 5 个采样频率可供选择,分别为 49,96,128,260 和 524 kHz。为了保证对北海狮声信号在频率上的全覆盖,本次记录选用的采样频率为 524 kHz。配用的水听器灵敏度为 (-198 ± 3) dB($0 \text{ dB} \triangleq 1 \text{ V}/\mu\text{Pa}$),平坦的频率响应区间为 50 Hz~120 kHz。采集系统被固定在一钢架上,吊放于水下 1 m 处,钢架外面用一层铁丝网罩住,防止动物触碰。

1.2 处理方法

首先利用 adobe audition CS5.5(Adobe Systems Incorporated, San Jose CA)对数据进行初始的时频谱分析,选取在视觉和听觉两方面均具有良好质量的数据用于进一步的分析^[12]。数据质量的判断标准有 2 个:1)清晰的轮廓(对应高信噪比);2)没有与其他信号发生混叠。

采用 MATLAB(The Mathworks Incorporated, Natick, MA, USA)对选取的信号进行进一步的时频分析,并计算特征参数。时频分析时,对数据加 hann 窗进行平滑,窗长和傅里叶变换的点数均为 4 096,且重叠率为 50%。获得的特征参数包括时长、最小频率、最大频率以及峰值频率。时长为包含 95%能量的窗长对应的时间^[13],峰值频率是指频谱图中幅度最大点对应的频率值,而最小频率和最大频率分别对应着信号时频图上频率轮廓中的最低点和最高点。

利用聚类分析法分析信号特征参数,通过计算每个样本信号欧几里德距离的平方确定层次关联,采用组间全连接方法对信号进行分类。最后对信号的时频谱进行视觉和听觉两方面的人工检验,评估分类结果的有效性。每个信号类型应该具有的特征^[14-15]包括:1)一个类型中的相似度应 $> 90\%$;2)该信号形式出现的次数超过 10 次;3)该类型所有信号之间的差异较小;4)该类型信号的轮廓是千篇一律的,具有显著的、可识别的特征。



图 1 自容式数据采集设备 LoPAS-H

Fig.1 The self-contained data acquisition module (LoPAS-H)

2 结果与分析

从采集到的北海狮水下发声数据中,共检测出 22 689 个信号。根据聚类分析方法将其中的 21 010 个信号(其中的 1 679 个为无法分类的剩余信号)分成 10 种信号类型,分别为单脉冲(SP)、哨声(WS)、咕咕声(GG)、咚咚声(DS)、狗吠声(BK)、吼叫声(WY)、嗡嗡声(BZ)、撞击声(BG)、单频声(SF)以及咩咩声(BT)。信号类型的命名参照 Schusterman 等^[6]。各类型信号的特征参数结果见表 1。可以看出:信号时长方面,DS 的最长,而 SP 的最短;最小频率方面,WS 和 SF 的较高,而 GG, BK 和 WY 的则较低;最大频率方面,WS, SP, WY, GG 和 BT 的较高,而 SF 和 DS 的则较低;峰值频率上,WS 和 GG 的较高,而 BZ 的最低。

表 1 10 种声信号类型的特征参数结果

Table 1 Physical characteristics of the 10 categories of signals used by captive Steller Sea Lions

信号类型	信号数量/个	时长/ms		最小频率/kHz		最大频率/kHz		峰值频率/kHz	
		均值	方差	均值	方差	均值	方差	均值	方差
SP	1 288	5	8	0.2	0.110	14.7	2.102	2.8	1.913
WS	1 247	322	426	3.2	1.401	15.4	3.711	8.7	3.511
GG	514	874	743	0.1	0.004	12.7	4.921	7.4	1.303
DS	987	1 244	685	0.8	0.511	5.4	1.223	2.6	0.824
BK	4 777	81	79	0.1	0.020	8.7	2.314	1.3	0.623
WY	1 079	997	462	0.1	0.050	13.6	3.212	3.9	1.712
BZ	1 323	263	176	0.2	0.081	7.9	2.402	0.7	0.506
BG	4 400	145	119	0.2	0.040	8.1	2.113	1.5	0.616
SF	825	67	37	2.1	0.602	5.9	1.504	3.4	0.424
BT	4 570	749	324	0.5	0.212	10.3	2.401	3.6	2.910

每种信号类型的时域信号和时频谱的分布如图 2 和图 3 所示,可见:SP 信号(图 2a 和图 3a)表现为宽带、短时的脉冲信号,持续时间约 2~20 ms,频率分布在 15 kHz 以下,主要能量集中在 5 kHz 以下,峰值频率为 3 kHz 处;WS 信号(图 2b 和图 3b)类似于鲸豚类动物发出的哨声信号,具有调频的音调特性,持续时间较宽,频率分布较散,范围通常为 100~500 ms 和 3~16 kHz;GG 和 DS 信号都属于嘀嗒声脉冲串的形式,表现为短时、宽带的脉冲信号组合,持续时间一般为 0.5~3 s,脉冲重复率(1 s 内出现的脉冲个数)最低为 5,最高可达 100。GG(图 2c 和图 3c)的频谱范围在 15 kHz 以下,能量分布较均匀,脉冲重复率通常较高,持续时间较短;DS(图 2d 和图 3d)的频谱范围为 0.5~6 kHz,能量主要集中在 3 kHz 附近,脉冲重复率一般不超过 50,持续时间相对较长。BK 信号(图 2e 和图 3e)听起来像是狗叫的声音,频谱范围在 10 kHz 以下,主要能量集中在 5 kHz 以下,单个 BK 信号的持续时间为 60~200 ms,但通常会多个信号连续出现;WY 信号(图 2f 和图 3f)听起来像是吼叫的声音,持续时间约 0.3~1.3 s,频谱分布在 15 kHz 以下,通常该信号被认为是海狮科动物在遇到挑衅时发出的声音^[6];BZ 信号(图 2g 和图 3g)表现为密集出现的脉冲信号的组合,听起来像是“嗡嗡”的声音,多与 BK 信号伴随出现,持续时间约 0.3 s,能量分布在 8 kHz 以下,集中于 0.5~4 kHz;BG 信号(图 2h 和图 3h)的频谱范围在 10 kHz 以下,但主要能量分布于 0.5~2 kHz,持续时间较短,约 150 ms;SF 信号(图 2i 和图 3i)跟 WS 信号类似,听起来也像哨声,属于调制较弱的窄带调频信号,频率范围为 2~5 kHz,多集中在 3 kHz 附近,持续时间通常为 0.05~0.10 s;BT 信号(图 2j 和图 3j)听起来像是羊叫的声音,持续时间一般在 0.5~1.5 s,频谱分布于 0.5~10 kHz。

统计分析 10 类水下声信号所占比例(图 4)可以看出,BK, BT 和 BG 信号的发声频率较高,占比分别为 23%, 22% 和 21%;SP, WS 和 BZ 信号次之,占比均为 6%;而 GG 发声频率最低,占比仅为 2%。

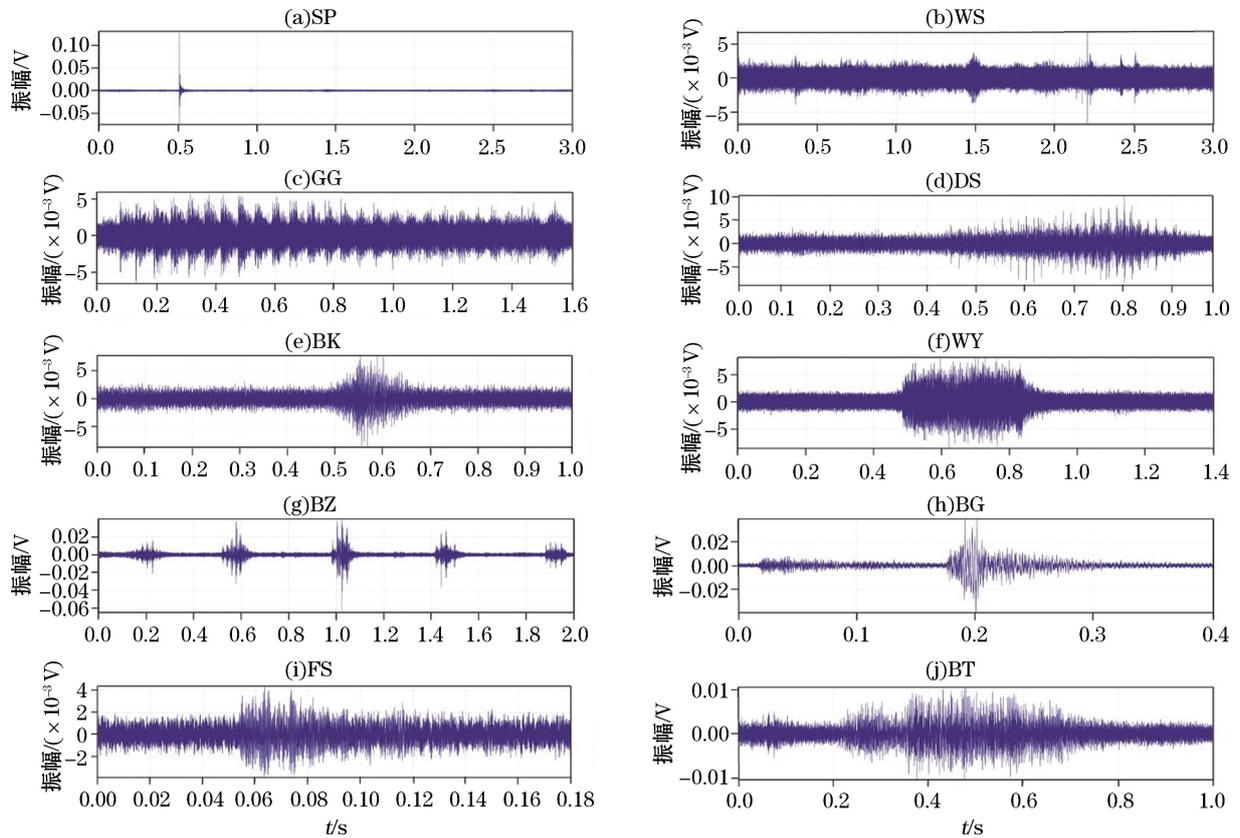


图 2 10 种类型信号时域波形及时间分布

Fig.2 Temporal waveform and time representations of the 10 categories of signals

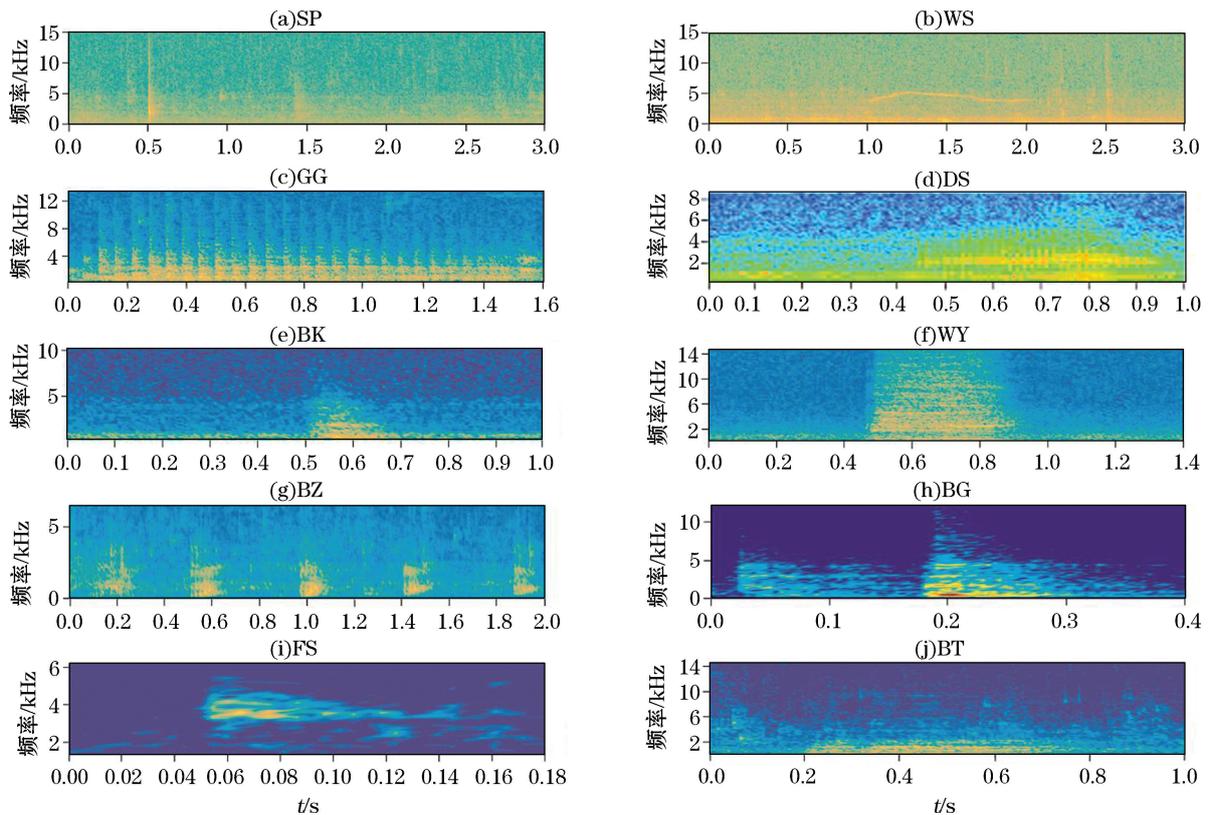


图 3 10 种类型信号时域波形及频率分布

Fig.3 Temporal waveform and frequency representations of the 10 categories of signals

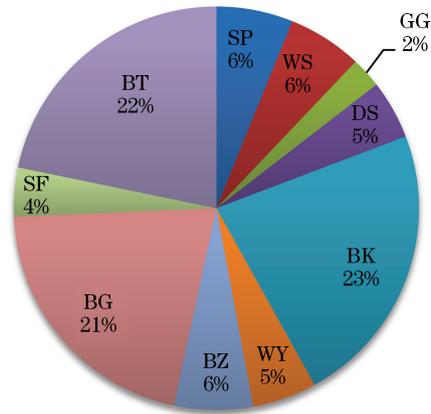


图4 21 010 个信号中不同类型水下声信号使用比例

Fig.4 Proportions of each category of signals among all 21 010 calls

3 讨 论

关于北海狮种和其亚种的水下声信号的研究报道十分稀少^[2]。有研究报道^[8,10],北海狮、南美、澳洲以及新西兰海狮可以发出 growl, snort, bleat 以及嗒嗒声信号,北部皮毛海狮也能够发出 bleat 信号。但目前,尚未见关于北海狮水下声信号类型的报道。本文通过对水族馆内北海狮观测数据的分析,对北海狮水下声信号进行了分类,并分析了各类型声信号的特征参数和使用比例。这些结果能够提高人们对北海狮声信号的认识水平,为进一步研究北海狮的声行为奠定基础。

本文通过水下声信号特征参数的聚类分析方法,将北海狮的水下声信号分成 10 种类型,该种分类方式共分析了 21 010 个信号,占全部检测信号的 92.6%,基本覆盖全部检测信号,说明这 10 种声信号类型基本涵盖北海狮的全部水下声信号形式。文中获得的分类结果与前期的研究有一定的相似之处^[9-11]。获得的新的信号类型可能是由不同的分类方法引起的,不一定是新的信号。比如,GG 和 DS 信号非常相似,只有峰值频率这一参数决定了它们属于不同的类别。如果使用条件更宽泛的分类方法,它们可能就会被归为一类。同样倘若使用更多的声信号特征参数,例如声压级、起始频率和结束频率,或许有助于剩余 7.4% 信号的分类,这一点有待进一步研究。

加利福尼亚海狮(*Zalophus californianus*)分布从阿拉斯加东南部到墨西哥中部,包括加利福尼亚湾,与北海狮的分布范围基本重合。有研究报道过水族馆内加利福尼亚海狮的水下声信号^[6,16]。通过与本文结果比较发现,这 2 个物种有 5 种同样名称的发声类型,分别是 click, bark, whinny, buzzing 以及 bang, 相同名称的声信号类型具有相似的时频分布形式,可以认为是同种声信号。这 2 个物种同名称信号的峰值频率范围接近,但加利福尼亚海狮的时长较长,频率范围较窄,而北海狮的时长更短,频率范围更宽,这种不同点可能反映了 2 个物种在水下声信号上的种群差异性。

北海狮水下声信号的社会功能决定了其使用比例。BK, BT 和 BG 信号使用频率较高,3 种信号的使用频率占全体信号的 66%,说明这 3 种信号是北海狮水下声信号的基本构成。本文研究结果发现 WY 信号的使用频率较低,仅为 5%。对于熟悉的环境和固定的同伴,海狮很少受到挑衅,进而 WY 信号的使用频率较少。通常鲸豚类哺乳动物以嗒嗒信号作为回声定位信号,用于导航、觅食、探测等行为活动中^[2]。根据分类结果,GG 和 DS 信号都属于嗒嗒信号的形式,这两类信号的使用频率占有所有信号的 7%,整体较少,说明在熟悉的环境下,海狮不需要频繁地进行探测或导航等行为,GG 和 DS 信号的使用频率就较低。

本文研究结果表明,北海狮水下声信号的频率分布基本低于 15 kHz。Schusterman 和 Moore 对北部皮毛海狮(*Callorhinus ursinus*)水下听觉进行了研究,发现这个物种的最佳听觉频率范围为 2~33 kHz,高于本文中发声频率结果^[17]。假设同亚种的动物具有相近的听力阈值的话,推测北海狮相对更高的听觉频率是

为了发现其天敌如虎鲸和大白鲨的声音,而较低的发声频率则更有利于种群间的长距离通讯。

4 结 语

基于青岛海昌极地海洋世界北海狮的水下声观测数据,提出了 10 种类型的分类方式,该分类方式可以基本覆盖北海狮全部的水下发声信号,有利于北海狮的被动声学观测。结合北海狮的行为反应本文讨论了对不同类型声信号的社会功能,发现 WY 是应对挑衅时的信号,而 GG 和 DS 具有探测、导航的功能。由于本文采用的实测数据比较有限,还需要进一步选取野外的声观测数据来进行完善,进一步提高分类形式的完备性。

致谢:青岛海昌极地海洋世界为数据观测提供了大力支持;自然资源部第一海洋研究所的杨光兵、陈钊和张超等为数据获取提供了帮助。

参考文献(References):

- [1] GELATT T, SWEENEY K. *Eumetopias jubatus*. The IUCN red list of threatened species, Report No. e.T8239A45225749, 2016[EB/OL]. (2016-02-04)[2018-09-26]. <https://www.iucnredlist.org/species/8239/45225749>.
- [2] AU W W L, HASTINGS M C. Principles of marine bioacoustics[M]. New York: Springer-Verlag, 2008: 476-480.
- [3] STIRLING I. Vocalization in the ringed seal (*Phoca hispida*)[J]. Journal De L'office Des Recherches Sur Les Pêcheries Du Canada, 1973, 30(10): 1592-1594.
- [4] WATKINS W A, SCHEVILL W E. Distinctive characteristics of underwater calls of the harp seal, *Phoca groenlandica*, during the breeding season[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1979, 66(4): 983-988.
- [5] THOMAS J A, KUECHLE V B. Quantitative analysis of Weddell seal (*Leptonychotes weddelli*) underwater vocalizations at Mcmurdo Sound, Antarctica[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1982, 72(6): 1730-1738.
- [6] SCHUSTERMAN R J, GENTRY R, SCHMOOK J. Underwater sound production by captive California Sea Lions, *Zalophus californianus*[J]. Zoologica New York, 1967, 52(1): 21-24.
- [7] SCHUSTERMAN R J. Perception and determinants of underwater vocalizations in the California Sea Lion[C]//BUSNEL R G. Les systemes sonars animaux: biologie et biunique. Frascati, Italy. 1967.
- [8] POULTER T C. Underwater vocalization and behavior of pinnipeds[C]//HARRISON R J, HUBBARD R, PETERSON C E, et al. The behavior and physiology of pinnipeds. New York: Appleton-Century-Crofts, 1968: 84.
- [9] ORR R T, POULTER T C. Some observations on reproduction, growth, and social behavior in the Steller Sea Lion[J]. The California Academy of Sciences, 1967, 35(2): 193-225.
- [10] SCHUSTERMAN R J, BALLIET R F, JOHN S S. Vocal displays under water by the gray seal, the harbor seal, and the Stellar Sea Lion[J]. Psychonomic Science, 1970, 18(5): 303-305.
- [11] POULTER T C, DEL CARLO D G. Echo ranging signals: sonar of the Steller Sea Lion[J]. Journal of Auditory Research, 1971, 11: 43-52.
- [12] RENDELL L E, MATTHEWS J N. Quantitative analysis of tonal calls from five odontocete species, examining interspecific and intraspecific variation[J]. Journal of Zoology, 2010, 249(4): 403-410.
- [13] VILLADSGAARD A, WAHLBERG M, TOUGAARD J. Echolocation signals of wild harbour porpoises, *Phocoena phocoena*[J]. Journal of Experimental Biology, 2007, 210(1): 56-64.
- [14] SERRANO A. New underwater and aerial vocalizations of captive harp seals (*Pagophilus groenlandicus*)[J]. Canadian Journal of Zoology, 2011, 79(1): 75-81.
- [15] YANG L, XU X, ZHANG P, et al. Classification of underwater vocalizations of wild spotted seals (*Phoca largha*) in Liaodong Bay, China[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2017, 141(3): 2256-2262.
- [16] SCHUSTERMAN R J, GENTRY R, SCHMOOK J. Underwater vocalization by sea lions: social and mirror stimuli[J]. Science, 1966, 154(3748): 540-542.
- [17] SCHUSTERMAN R J, MOORE P W B. Underwater audiogram of the northern fur seal (*Callorhinus ursinus*)[J]. Journal of the

Acoustical Society of America, 2005, 64(1): 15-18.

Classification of Underwater Vocalizations Produced by the Captive Steller Sea Lions (*Eumetopias jubatus*)

JIANG Ying^{1,2}, LÜ Lian-gang^{1,2}, LIU Zong-wei^{1,2}, HUANG Long-fei^{1,2},
YANG Zhi-guo³, YANG Chun-mei^{1,2}

(1. *First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China;*

2. *Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China;*

3. *China National Deep Sea Center, MNR, Qingdao 266237, China)*

Abstract: Underwater vocalizations of three captive Steller sea lions (*Eumetopias jubatus*) were recorded with the passive acoustic monitoring system over a period of 29 hours in an aquarium. This paper studies the acoustic signal classification of Steller sea lions with these data. A total number of 22 689 underwater acoustic signals were detected. Ten categories of underwater vocalizations were identified according to statistical analyses of time duration, minimum frequency, maximum frequency and peak frequency. That includes single pulse (SP), whistle (WS), gurgle grunt (GG), drums (DS), bark (BK), whinny (WY), buzzing (BZ), bang (BG), single frequency (SF) and bleat (BT). 92.6% of acoustic signals were covered with this classification. The average time duration of acoustic signals of Steller sea lions is 5~1 244 ms, and the peak frequency is generally less than 10 kHz. The proportions of the 10 categories of signals are different. The proportions of the BK, BT and BG signals are the highest, with those of SP, WS and BZ followed, and DS, WY, SF and GG the lowest. Characterizing the underwater vocalizations of Steller Sea Lions can help us to understand the behavior of this species and it will facilitate future wild acoustics surveys.

Key words: Steller Sea Lions; underwater vocalization; signal category; acoustic characteristics; signal proportion

Received: August 27, 2018