

偏振海洋激光雷达探测黄海水母特性

王晓彬¹, 赵泓楷¹, 周雨迪¹, 张芳^{2,3}, 徐沛拓¹, 刘群¹, 刘崇¹, 刘东^{1*}

(1. 浙江大学宁波研究院光电科学与工程学院, 浙江杭州 310027;
2. 中国科学院海洋研究所海洋生态与环境科学重点实验室, 山东青岛 266071;
3. 中国科学院海洋大科学研究中心, 山东青岛 266071)

摘要: 近年的研究表明: 全球的许多海湾和海区出现水母数量增加甚至暴发的现象, 对海洋生态环境、海洋渔业、滨海旅游业、核电安全等产生了负面影响。2017 年 8 月, 自主研制的船载偏振海洋激光雷达在黄海海域开展了实验测量, 观测到丰富的强散射个体信号, 结合视频监控信息, 判断信号来源于水母(沙海蛰), 证明偏振海洋激光雷达能够实现水母个体的遥感探测。研究结果表明, 同一水域水母的光学特性表现出聚类的特点; 不同水域的水母信号对比度相近、退偏率不同, 说明水母的光学特性与其生存水域环境密切相关。因此, 偏振海洋激光雷达可以高效、经济、精确监测水母分布和数量变动状况, 其未来的推广可以完善我国海域水母动态监测手段。

关键词: 偏振海洋激光雷达; 强散射个体; 水母探测

中图分类号: P715.7 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20211038

Characteristics of jellyfish in the Yellow Sea detected by polarized oceanic lidar

Wang Xiaobin¹, Zhao Hongkai¹, Zhou Yudi¹, Zhang Fang^{2,3}, Xu Peituo¹, Liu Qun¹, Liu Chong¹, Liu Dong^{1*}

(1. Ningbo Research Institute, College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
2. Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences, Institute of Oceanology,
Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China;
3. Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

Abstract: Recent studies have shown an increase or even outbreaks of jellyfish in many bays and seas around the world, which has a negative impact on the marine ecological environment, marine fisheries, coastal tourism, nuclear safety and so on. In August 2017, the self-developed shipborne polarized oceanic lidar carried out experimental measurements in the Yellow Sea. Rich strongly scattered individual signals were observed. Combined with the video monitor information, the signals were determined to come from the jellyfish (*Nemopilema nomurai*), demonstrating the polarized oceanic lidar is available to realize the remote sensing detection of jellyfish. The results show that the optical properties of jellyfish in the same waters show clustering. The signal contrast distribution of jellyfish in different waters was similar, and the distribution of depolarization

收稿日期: 2021-04-27; 修订日期: 2021-05-17

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC1400900); 国家自然科学基金(41775023); 浙江省自然科学基金杰出青年项目(LR19D050001); 中央高校基础科研项目(2019FZJD011); 现代光学仪器国家重点实验室创新项目; 浙江大学宁波校区人才引进启动基金项目(20201203Z0175); 杭州市生态环境科学研究院项目(703204C20201117); 中国博士后科学基金(2018M640554)

作者简介: 王晓彬, 女, 硕士生, 主要研究方向为海洋遥感。

导师(通讯作者)简介: 刘东, 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电检测与遥感等方面的研究。

rate was different, indicating that the optical properties of jellyfish were closely related to the water environment where they lived. As a result, the polarized oceanic lidar can monitor the distribution and population changes of jellyfish efficiently, economically and accurately and its future promotion can improve the dynamic monitoring methods of jellyfish in Chinese waters.

Key words: polarized oceanic lidar; strongly scattered individuals; jellyfish detection

0 引言

水母是胶质浮游动物的一大类群,是海洋浮游生物群落的重要组成部分,具有生长速度快、蔓延迅速、种类多、分布范围广的特点^[1]。20世纪末以来,我国近海海域环境持续恶化,生态灾害问题频发,其中水母暴发是最典型的灾害之一,对海洋生态系统、海洋渔业、滨海旅游业、沿岸工业、核电安全和人身安全等造成了巨大的威胁^[2-4]。研发水母灾害防控应对技术体系是提升我国海洋水母灾害应对能力和保障海洋环境安全的必然需求^[5]。

水母监测可以获得水母的种类、数量、分布等信息,是水母防控的重要环节。传统的水母分布及资源变动等研究主要依靠拖船网具^[6-8],可以直观地反映出水母的种类组成和数量分布,但人力物力耗费量大,且容易造成生物量低估。水下摄影方法^[9]的优点在于分辨率高,能够记录水母的运动行为,但仅适用于清澈水体中小范围的水母监测。航空影像方法^[10]不需要接触水体就可以调查大范围水域的近表层水母的分布状况和运动过程,但垂直探测深度有限,容易受到水质和外界环境光的影响。水声技术^[11-13]具有监测范围广,可同时监测水母的水平和垂直分布,在浑浊或昏暗的水体中也能监测的优点。然而,由于水母含水量较高(95%),反射率较低,声学目标强度较弱,难以被探测到^[13]。此外,声纳的空间分辨率较低,难以对水母^[14]、鱼虾^[15]等微小目标进行精确识别,往往需要网具、水下摄影等方法辅助调查。综上所述,当前的水母监测手段在探测效率、探测精度、垂直分布信息等方面仍存在局限。

偏振海洋激光雷达作为一种主动式光学遥感设备,具有高探测效率、高探测精度、高垂直分辨率、昼夜连续观测、全球尺度测量、搭载平台多样化等优势^[16],已在上层海洋的退偏光学产品获取^[17]、浮游植物层探测^[18]、鱼群探测^[19]、水母聚群探测^[20]等领域取

得成功应用。该研究使用偏振海洋激光雷达实现了水母个体的遥感探测,并计算统计了水母的退偏率、信号对比度以及分布深度,比较分析了不同水域水母的光学特性和深度分布特征,为推广偏振海洋激光雷达作为新型水母监测手段奠定了基础。

1 方法

1.1 实验与仪器

研制的偏振海洋激光雷达系统主要由发射系统、接收系统以及数据采集和控制系统三大部分组成,系统结构示意图如图 1 所示^[21]。发射系统主要为一台倍频调 Q 的 Nd:YAG 激光器,产生的激光波长为 532 nm,脉冲能量为 5 mJ,脉宽约为 10 ns,重复频率为 10 Hz。激光由激光器出射并经准直扩束后,通过起偏器获得高消光比的线偏振光。接收系统包含平行和正交偏振两个通道,由望远镜、线偏振片、光阑、干涉滤光片、准直透镜、光电探测器等组成,分别用于收集平行和垂直于出射激光偏振方向的后向散射光。正交与平行偏振通道信号的强度比值被称为退偏比,退偏比与散射物质的表面形状、粒径大小、折射率等密切相关,可用于散射物质的识别与分类^[16]。此外,还设置了视频监控通道用于实时监控激光入射点周围的海况,如海浪大小、环境光变化、海面垃圾、

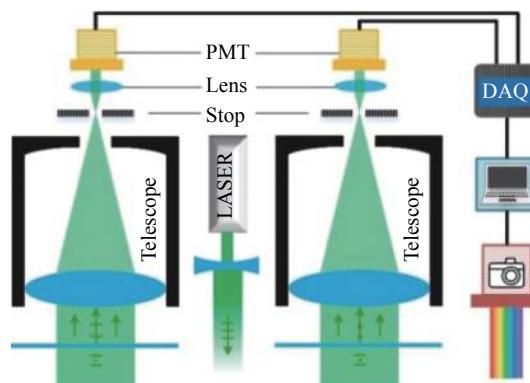


图 1 偏振海洋激光雷达系统简图

Fig.1 Schematic diagram of polarized oceanic lidar system

近表层海洋生物等。数据采集和控制系统由高速采集卡和计算机组成。

研制的偏振海洋激光雷达系统,于 2017 年 8 月搭载于“海力”号科考船在黄海海域开展了为期 20 多天的海试实验,图 2 为海试航线图。所研究的海域主要包括近岸的平山岛水域(缩写为 PSD, 图 2 中红色),远岸的冷水团水域(缩写为 LST, 图 2 中黄色),以及靠近渤海的威海水域(缩写为 WH, 图 2 中蓝色)。

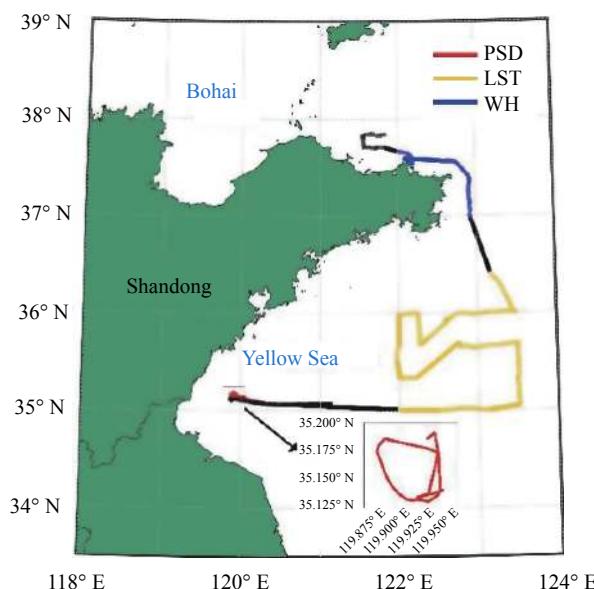


图 2 海试航线图

Fig.2 Sea trial route map

1.2 激光雷达算法

1.2.1 数据预处理

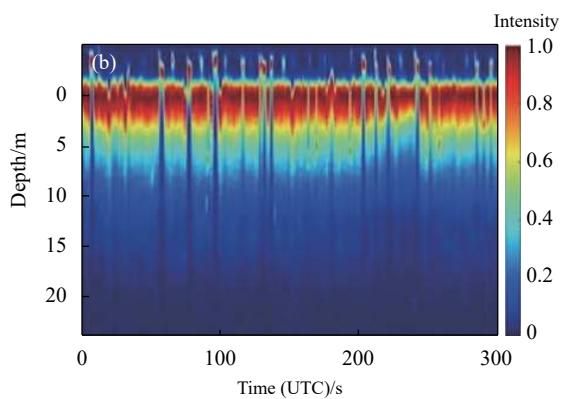
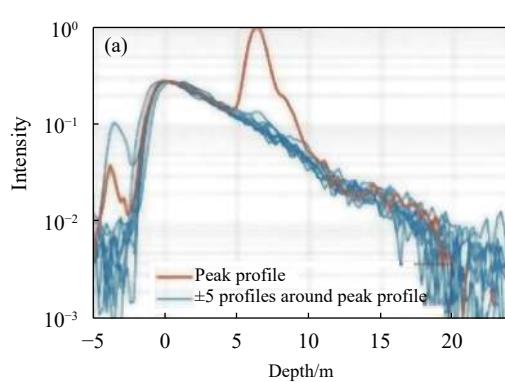
数据预处理主要包括降噪和对齐海面。降噪指对激光雷达信号廓线进行平均和去除背景噪声。由于检测目标是在水中运动的水母,属于强散射个体,区别于反演水体光学特性或检测浮游植物层次常选

择 100 条甚至更多廓线进行平均以得到较为平滑的廓线^[22],这里平均次数降到了 10,即每 1 s 统计一条廓线。计算背景噪声的方法为对每一条廓线最大探测深度以下的采样点信号强度进行平均。

对齐海面的关键是找到各条廓线的海面位置。正交偏振通道信号更容易受到海面附近水雾的影响而导致检测到错误的海面,利用平行偏振通道信号检测海面位置更为准确。对于每一条廓线,海面峰前都存在一个大气峰,这两个峰的位置在不同廓线中都比较稳定,仅在小范围内波动,为了避免大气峰的干扰,检测海面位置的方法是在一个固定的范围内找到信号最强点。在一些特殊情况下,譬如海面以上存在海鸟、飞虫、水花、泡沫等,会出现海面错检。因此在完成海面检测后还需对突变较大的海面进行校正,最后将所有廓线的海面位置对齐。

1.2.2 峰凸起检测

数据预处理后,对正交偏振通道的信号廓线从海面至最大探测深度进行峰凸起检测。在对数坐标系下,理论上信号是线性下降的,当其中存在一个明显的峰凸起时,说明此处存在强散射信号,可能来源于强散射个体或群体。假如峰凸起持续廓线数量很少,如图 3(a) 中峰凸起廓线前后 5 条廓线都是理想的线性下降,说明该峰凸起来源于强散射个体,对应图 3(b) 存在零散个体信号。倘若峰凸起持续廓线数量多且深度几乎相同,如图 3(c) 中峰凸起前后 20 条廓线(甚至可能成百上千条廓线)在同一深度处都存在峰凸起,则该峰凸起来源于强散射群体,对应图 3(d) 中的强散射层次。检测峰凸起的方法是差分遍历廓线中的所有数据,依次找到所有峰凸起,并保存峰值及深度、上升沿及下降沿等特征信息。



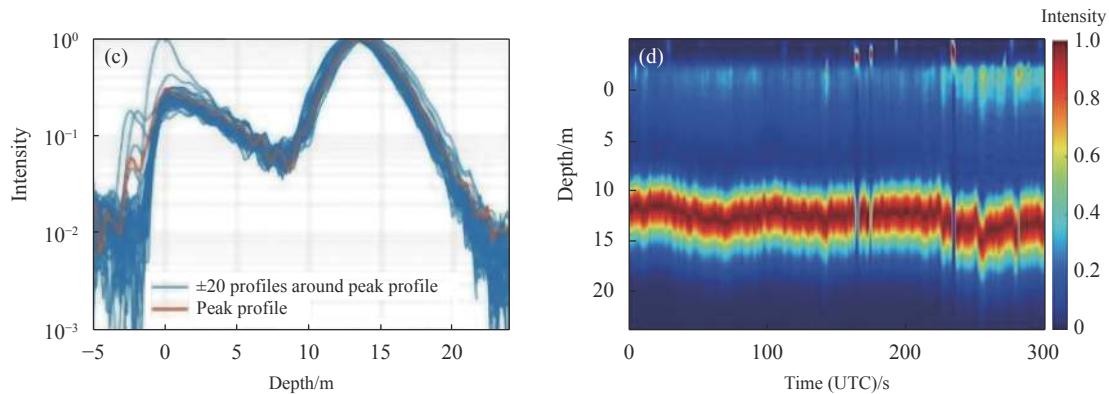


图 3 强散射个体和强散射群体的信号区别。(a) 峰凸起持续廓线少; (b) 存在强散射个体; (c) 峰凸起持续廓线多; (d) 存在强散射层次

Fig.3 Signal difference between strongly scattered individual and strongly scattered population. (a) Few continuous profiles with peak bulge; (b) Exist strongly scattered individual; (c) Many continuous profiles with peak bulge; (d) Exist strongly scattered layer

1.2.3 峰凸起筛选

由于数据预处理中只进行了 10 次廓线平均, 平均后的廓线仍不够平滑, 峰凸起检测结果既包含强散射个体, 即明显且持续时间短的峰凸起, 又存在许多干扰峰凸起, 譬如噪声引起的信号波动峰、强散射层次(如浮游植物层)引起的持续时间长的峰凸起等, 因此需要对所有峰凸起进行筛选工作。筛选依据为以下三个指标: 峰凸起形状、峰凸起强度、峰凸起对比度。

峰凸起形状筛选通过设置上升沿和下降沿包含的最少数数据点, 可以剔除绝大部分噪声引起的锯齿峰。峰凸起强度的筛选规则为设置峰凸起强度阈值, 从而剔除噪声导致的信号波动峰。峰凸起强度的定义为峰值强度与上升沿起始点强度之差。由于信号波动较为剧烈, 上升沿起始点可能位于上一个峰凸起的谷值而导致低估, 解决方法是用周围连续一段廓线在该上升沿起始点的强度平均值替代。此外, 由于廓线信号强度随深度指数衰减, 峰凸起强度的阈值不能简单设置为一个常数, 而应达到自适应的效果, 解决方法是基于周围连续一段廓线在此处的峰凸起强度设置合适的阈值。

峰凸起对比度定义为峰凸起信号分量与背景信号分量的比值。背景信号分量近似用周围连续一段廓线的信号平均值表示。类似峰凸起强度, 设置峰凸起对比度的自适应阈值。若峰凸起来源于强散射个体, 则背景信号为水体, 得到的峰凸起对比度大于 1; 若凸起来源于以强散射层次为代表的强散射群体, 则背景信号仍为该强散射群体, 峰凸起对比度约为 1。

因此, 通过峰凸起对比度条件筛选能够有效避免强散射层次的干扰, 只保留来自强散射个体的峰凸起, 如图 4 所示。

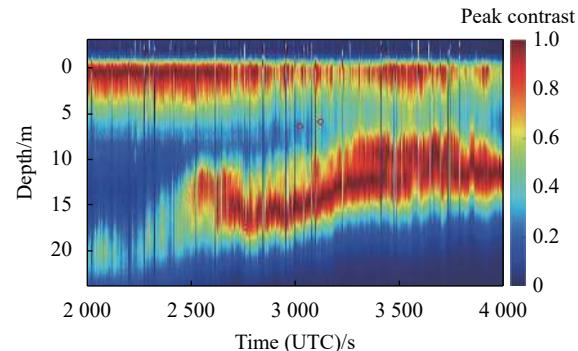


图 4 峰凸起对比度筛选可有效避免强散射层次的干扰

Fig.4 Peak contrast screening can effectively avoid the interference of strongly scattered layer

1.2.4 光学特性计算

为了定量描述检测到的强散射个体的光学特性, 以水母为例, 定义了退偏率和信号对比度两个光学参数。

水母退偏率 dep_{oj} 的计算见公式 (1), 其中 S_x 、 S_p 分别为数据预处理后的正交和平行偏振通道信号在峰凸起峰值位置的信号强度, 下标 j , w 分别表示信号中的水母分量和背景水体分量, 如图 5 所示。关键问题是分离水母信号和背景水体信号, 解决方法是在对数坐标下选取合适的范围进行线性拟合。

$$dep_{oj} = \frac{S_{xj}}{S_{pj}} = \frac{S_x - S_{xw}}{S_p - S_{pw}} \quad (1)$$

信号对比度 $Contrast$ 的定义为后向散射信号中

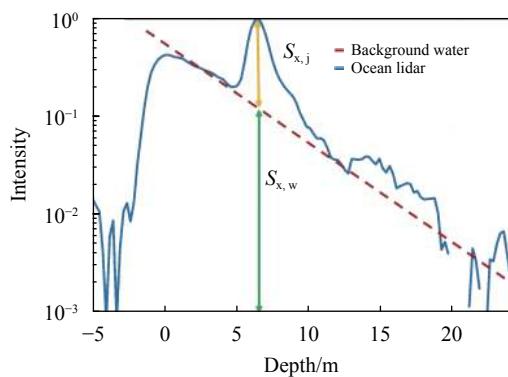


图 5 线性拟合法分离背景水体信号和水母信号

Fig.5 Separate the jellyfish signal and the background water signal by linear fitting method

的水母分量与背景水体分量的比值,见公式(2),它反映了在激光雷达后向散射回波信号中水母与海水的对比度,Contrast 数值越大,说明越容易观察到海水中

的水母。

$$\text{Contrast} = \frac{S_{x,j} + S_{p,j}}{S_{x,w} + S_{p,w}} \quad (2)$$

2 结果与分析

2.1 水母监测

图 6 为视频监控拍到的水母图像和对一段时间内激光雷达信号的强散射个体检测结果。根据左边的视频监控图像可以判断该种水母是沙海蛰。沙海蛰属钵水母纲、根口水母目、口冠水母属,成体伞径 25~60 cm,最大近 1 m,外伞表面光滑,中胶层厚而硬,质量及经济价值较海蜇略有逊色^[23]。沙海蛰广泛分布于西北太平洋沿岸海域,在我国主要分布于渤海、黄海及东海北部海域,8~9 月达到生物量高峰期,对海洋环境和渔业生产等产生了巨大的危害^[24]。

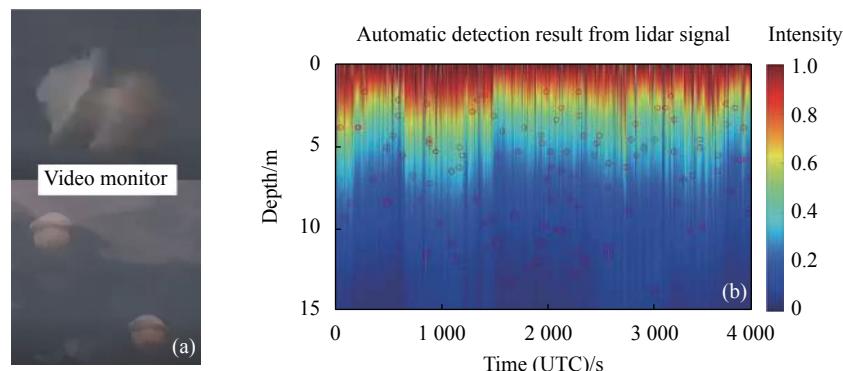


图 6 视频监控和激光雷达信号自动检测结果

Fig.6 Video monitor result and automatic detection result from lidar signal

2.2 光学特性分析

海试航线先后经过了 PSD、LST 和 WH 三个水域,对这三个水域的激光雷达数据进行处理得到水母退偏率和信号对比度的结果。在退偏率结果(图 7)中,在同一个水域内,水母退偏率呈现聚类的特点,PSD 的水母退偏率为 0.59 ± 0.14 ,LST 为 0.43 ± 0.13 ,WH 为 0.57 ± 0.19 。不同水域的水母退偏率分布不同,表现为 PSD>WH>LST,说明水母特性具有区域特征。

在信号对比度结果(图 8)中,PSD、LST、WH 的水母信号对比度分别为 1.61 ± 0.41 、 1.69 ± 0.49 、 1.63 ± 0.29 ,同一水域的水母信号对比度也呈现聚类的特点,并且不同水域的水母对比度近似相同。由于水母 95% 以上都是水,结合三个水域的水质从清澈到浑浊

排序为 LST、WH、PSD,可以推断出水母所含水从清澈到浑浊排序也是 LST、WH、PSD,如此三个水域的

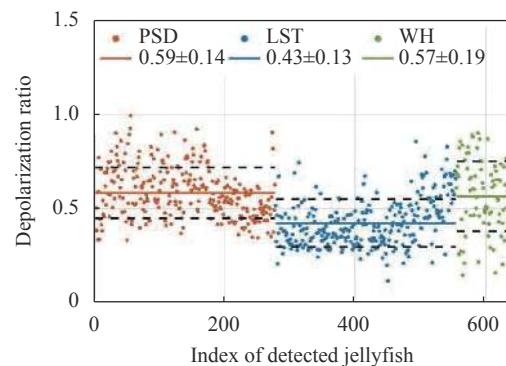


图 7 水母退偏率分布结果

Fig.7 Distribution result of depolarization ratio of jellyfish

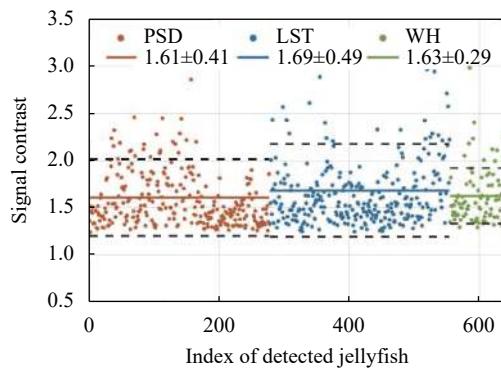


图 8 水母信号对比度分布结果

Fig.8 Distribution result of signal contrast of jellyfish

水母对比度才可能相同。于是可以得出结论：水母最主要组成成分与其生存的水体环境密切相关。结合

水质越浑浊退偏率越大的一般规律，以及水母所含水从清澈到浑浊排序为 LST、WH、PSD，可以很好地解释前面的退偏率结果 (PSD>WH>LST)。

2.3 水母深度分布

三个水域的水母深度分布直方图及高斯拟合结果如图 9 所示，PSD 水母主要分布在 2~10 m，LST 和 WH 水母主要分布在 2~18 m。同时，水母的垂直特性呈现类高斯分布，即在可探测深度的中部水母的分布最多，PSD、LST、WH 水母分布最多的深度分别为 4~6 m、8~10 m、11~13 m。相比 PSD 和 LST，WH 水母深度分布的高斯拟合结果相对较差，原因可能在于 WH 水母样本数量相对较少以及激光雷达信噪比限制了深水处水母信号的识别。

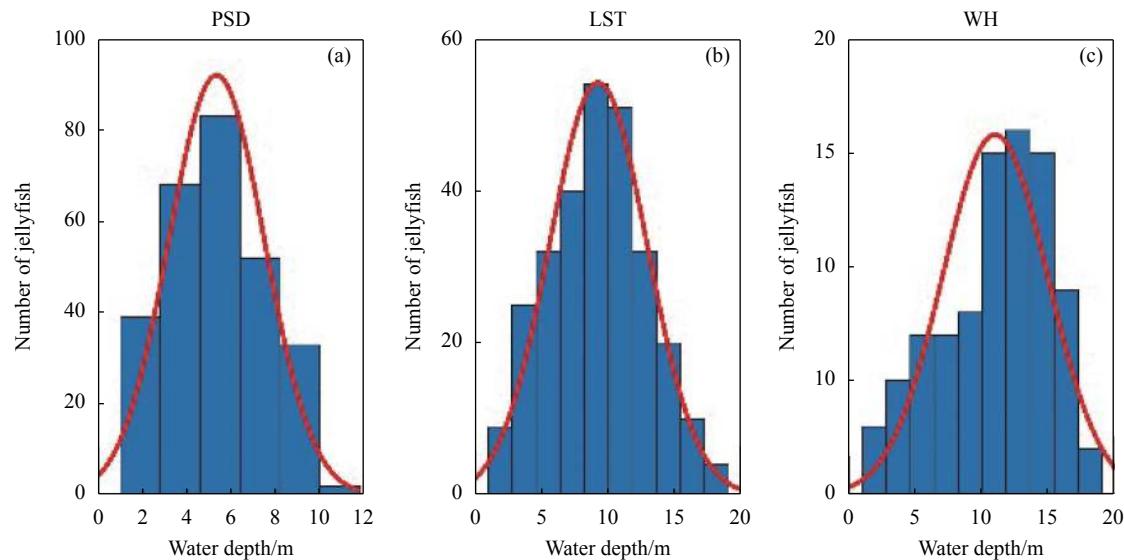


图 9 水母深度分布直方图及高斯拟合结果

Fig.9 Histogram of jellyfish depth distribution and Gaussian fitting results

3 结 论

目前，应用海洋激光雷达探测水母的报道仅见于国外且很少，国内还没有开展相关的研究。2015 年，Churnside 等人^[20]使用机载偏振海洋激光雷达观测到了水母中空聚集的现象，并得到了声纳探测结果的验证，证明了偏振海洋激光雷达可用于探测水母群体。

该研究使用偏振海洋激光雷达实现了水母个体的遥感探测，并计算了水母的退偏率和信号对比度，研究表明，同一水域内水母的退偏率和信号对比度都表现出聚类的特点，不同水域的水母信号对比度相似而退偏率不同，说明水母的特性与其生存水域环境

密切相关。此外，深度分布结果显示水母的垂直特性呈现类高斯分布。研究证明，偏振海洋激光雷达探测水母对于研究水母的光学特性和垂直分布具有重要意义。

相比现有的水母监测手段，偏振海洋激光雷达有其特有的优势。偏振海洋激光雷达的探测精度高，且探测几乎不受外界环境光的影响，此外，其搭载平台可以从船载延伸至机载，非常适用于开展大范围海域的水母监测，可大大降低探测成本和提高探测效率。然而，真正将偏振海洋激光雷达应用于水母监测领域，还有一些难题需要突破。目前，还没有成熟的分类识别算法以及信号模型可以区分水母与其他浮游

动物或鱼类,需要光学摄影、声纳等手段进行辅助探测。此外,由于光在海水中衰减很快,偏振海洋激光雷达的探测深度有限,从浑浊水域到清澈水域,目前的最大探测深度变化范围约为 10~50 m,如何进一步增大探测深度也是亟需解决的难题。

参考文献:

- [1] Doyle T K, Houghton J, Buckley S M, et al. The broad-scale distribution of five jellyfish species across a temperate coastal environment [J]. *Hydrobiologia*, 2007, 579(1): 29-39.
- [2] Brodeur R D. Increases in jellyfish biomass in the Bering Sea: implications for the ecosystem [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2002, 233(4): 89-103.
- [3] Uye S I. Blooms of the giant jellyfish *Nemopilema nomurai*: A threat to the fisheries sustainability of the East Asian Marginal Seas [J]. *Plankton Benthos Research*, 2008, 3(S): 125-131.
- [4] Dong Z, Liu D, Keesing J K. Jellyfish blooms in China: Dominant species, causes and consequences [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2010, 60(7): 954-963.
- [5] Zhang F, Li C L, Sun S, et al. Progress on studying jellyfish bloom, and the monitoring and control [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2017, 48(6): 1187-1195. (in Chinese)
- [6] Purcell J E. Predation on zooplankton by large jellyfish, *Aurelia labiata*, *Cyanea capillata* and *Aequorea aequorea*, in Prince William Sound, Alaska [J]. *Mar Ecol Prog Ser*, 2003, 246: 137-52.
- [7] Broder R D, Mills C E, Overland J E, et al. Evidence for a substantial increase in gelatinous zooplankton in the Bering Sea, with possible links to climate change [J]. *Fisheries Oceanography*, 2010, 8(4): 296-306.
- [8] Zuo T, Wang J, Wu Q, et al. Spatical distribution and biomass of large jellyfish in the Yellow Sea and northern part of the East China Sea in May 2015 [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2016, 47(1): 195-204. (in Chinese)
- [9] Graham W M, Martin D L, Martin J C. In situ quantification and analysis of large jellyfish using a novel video profiler [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2003, 254: 129-140.
- [10] Houghton J, Doyle T K, Davenport J, et al. Developing a simple, rapid method for identifying and monitoring jellyfish aggregations from the air [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2006, 314(1): 159-170.
- [11] Mano T, Guo X, Fujii N, et al. Moon jellyfish aggregations observed by a scientific echo sounder and an underwater video camera and their relation to internal waves [J]. *Journal of Oceanography*, 2019, 75(4): 359-374.
- [12] Zhang J, Zhang S, An C, et al. An effective detection method based on the biological acoustic characteristics of the outlet of nuclear power plant [J]. *IOP Conference Series Materials Science*, 2020, 780: 022034.
- [13] Wang B, Fang L C, Dong J, et al. Review of acoustic techniques in the monitoring and assessment of the giant jellyfish [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(24): 8187-8196. (in Chinese)
- [14] Shin H H, Han I, Oh W, et al. Estimation of moon jellyfish *Aurelia coerulea* using hydroacoustic methods off the coast of Tongyeong, Korea [J]. *Korean Journal of Fisheries Aquatic Sciences*, 2019, 52(6): 725-734.
- [15] Hewitt R P, Watkins J, Naganobu M, et al. Biomass of Antarctic krill in the Scotia Sea in January/February 2000 and its use in revising an estimate of precautionary yield [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2004, 51(12-13): 1215-1236.
- [16] Vasilkov A P, Goldin Y A, Gureev B A, et al. Airborne polarized lidar detection of scattering layers in the ocean [J]. *Appl Opt*, 2001, 40(24): 4353-4364.
- [17] Churnside J H. Polarization effects on oceanographic lidar [J]. *Optics Express*, 2008, 16(2): 1196-1207.
- [18] Churnside J H. Review of profiling oceanographic lidar [J]. *Opt Eng*, 2014, 53(5): 051405.
- [19] Churnside J H, Wilson J J, Tatarkii V V. Lidar profiles of fish schools [J]. *Appl Opt*, 1997, 36(24): 6011-6020.
- [20] Churnside J H, Marchbanks R D, Donaghay P L, et al. Hollow aggregations of moon jellyfish (*Aurelia* spp.) [J]. *Journal of Plankton Research*, 2016, 38(1): 122-130.
- [21] Zhou Y D, Liu D, Xu P T, et al. Detecting atmospheric-water optical property profiles with a polarized lidar [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2019, 23(1): 108-115. (in Chinese)
- [22] Xu Peituo, Tao Yuting, Liu Zhipeng, et al. Comparison of oceanic lidar experiments and simulation results [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(2): 0203007. (in Chinese)
- [23] Ding F Y, Cheng J H. Dynamic distribution of *Stomophorus meleagris* in the East China Sea Region [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2007, 14(1): 83-89. (in Chinese)
- [24] Zhang F, Sun S, Li C L. Estimation on food requirement by large jellyfish *Nemopilema nomurai* in summer [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2017, 48(6): 1355-1361. (in Chinese)