

动态声呐在辽东湾近岸海域水母监测中的应用

王涛¹, 关春江², 代贤军², 寇金鑫³, 滕文良²,
王宪法², 杨璐², 张警方², 康君峰¹, 姜倩²

(1.辽宁红沿河核电有限公司, 辽宁 大连 116001; 2.国家海洋环境监测中心, 辽宁 大连 116023; 3.大连华信理化检测中心有限公司, 辽宁 大连 116620)

摘要:为研究动态声呐在核电冷源取水海域水母监测中的应用,2023年7月23日至8月5日,在辽东湾东部核电站冷源取水口监测站位(JFQSK)使用动态声呐对水母生物量进行监测,并同步使用网具法进行比较。研究表明:动态声呐法测得的水母生物量与网具法变化趋势一致;声呐法水母生物量可依据声呐视频显示的水母个数、水深、海流流速及水母单体重量四个要素计算得出;在辽东湾东部近岸海域核电冷源保障监测预警中,动态声呐法水母监测黄色风险预警值为 $350\text{ kg}/10^4\text{ m}^3$,红色风险预警值为 $550\text{ kg}/10^4\text{ m}^3$ 。

关键词:动态声呐;水母监测;风险预警;冷源取水

中图分类号:X835 文献标识码:A 文章编号:1007-6336(2025)01-0075-05

The application of dynamic sonar in jellyfish monitoring in the nearshore waters of Liaodong Bay

WANG Tao¹, GUAN Chunjiang², DAI Xianjun², KOU Jinxin³, TENG Wenliang²,
WANG Xianfa², YANG Lu², ZHANG Jingfang², KANG Junfeng¹, JIANG Qian²

(1.Liaoning Hongyanhe Nuclear Power Company Limited, Dalian 116001, China; 2.National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China; 3.Dalian Huaxin Physical and Chemical Testing Center Company Limited, Dalian 116620, China)

Abstract: To study the application of dynamic sonar in jellyfish monitoring in the intake areas of nuclear power cooling sources, from July 23 to August 5, 2023, the biomass of jellyfish was monitored using dynamic sonar at the monitoring station (JFQSK) at the cooling water intake of the nuclear power plant in the eastern Liaodong Bay. Simultaneously, the netting method was used for comparison. The results showed that the jellyfish biomass measured by the dynamic sonar method was consistent with the trends observed using the netting method. The biomass of jellyfish using the sonar method can be calculated based on four factors: the number of jellyfish shown in the sonar video, water depth, current speed, and the individual weight of jellyfish. According to the research, in the monitoring and early warning system for the protection of nuclear power cooling sources in the eastern coastal waters of Liaodong Bay, the yellow risk warning threshold for jellyfish monitoring using the dynamic sonar method is $350\text{ kg}/10^4\text{ m}^3$, and the red risk warning threshold is $550\text{ kg}/10^4\text{ m}^3$.

Key words: dynamic sonar; jellyfish monitoring; risk warning; cold water intake

收稿日期:2024-02-29, 修订日期:2024-05-19

作者简介:王涛(1985-),男,吉林吉林人,工程师,主要研究核电冷源系统安全保障, E-mail: xiangfei-wt1985@163.com

通信作者:关春江(1965-),男,辽宁大连人,锡伯族,正高级工程师,主要研究海洋生物监测与评价, E-mail: cjguan@nmemc.org.cn

姜倩,女,高级工程师, E-mail: jiangqian@nmemc.org.cn

近年来,国内外滨海核电站冷源取水口发生多起因水母暴发而导致堵塞的事件,冷源取水安全受到严重威胁。2011年,南非库贝赫核电站因水母流入冷源取水口,导致1号机组循环水系统2号泵停泵,迫使1号机组降低功率^[1];2012年,大量水母流入美国代阿布洛峡谷核电站,使其迫于风险而停堆^[2];2013年,瑞典奥斯卡港核电站因大量海月水母(*Aurelia aurita*)堵塞冷源取水管道,3号反应堆被迫停堆^[3]。近年来的夏季,我国渤海、黄海等多个海域水母暴发,对沿岸核电冷源取水安全造成重大威胁^[4]。2014—2016年辽东湾东部核电站多次大量海月水母堵塞循环水过滤系统,导致1、2号核反应堆运行功率降低甚至停堆^[5-8]。通过上述核电冷源安全事件可知,水母是影响核电站冷源系统的一种重要风险生物。

由于声呐探测技术不受光照、水域浑浊度等的限制且高效快捷,近年来在国内外逐渐成为水母监测与风险预警的一种技术手段^[9]。Mutlu^[10]利用双频鱼探仪对黑海的海月水母进行了目标强度测定,建立了海月水母(120 kHz及200 kHz)的目标强度与伞径或湿重之间的关系模型;Hirose等^[11]对沙海蜇(*Nemopilema nomurai*)的单体声学散射特征进行了研究,建立了沙海蜇目标强度与生物学特征之间的关系模型。王梓等^[12]在红沿河核电站冷源取水口附近海域利用EK-60鱼探仪对水母进行了监测,获得了水母的密度;付媛媛等^[13]在红沿河核电站附近海域利用EK-60鱼探仪进行垂直断面走航水母声学调查,并结合海流数据计算了水母通过调查断面的通量。陈晟等^[14]利用EK-80鱼探仪获取了不同频率下海月水母的声学特征。综上所述,国内外对于水母声呐探测的研究主要集中于对其声学特征和通量评估的研究,对其生物量的定量方法研究相对较少。但是,在冷源取水海域水母生物量是核电进行水母风险预警,以及制定应急方案的重要依据之一。因此利用动态声呐法对水母生物量进行定量和监测,对于核电冷源取水安全保障具有重要的现实意义。

本研究在辽东湾东部核电站冷源取水口原有网具法水母监测的基础上,使用GARMIN LiveScope34动态声呐对核电冷源取水口海域进

行水母生物量监测,建立了水母生物量计算公式;同步开展网具法监测获得水母生物量数据,并将两种方法所得结果进行比较,进而确定了动态声呐法水母监测的黄色及红色风险预警值。动态声呐法水母监测具有便捷、自动化程度高的特点,是核电冷源取水区水母监测的一种新方法,在核电冷源保障工作中具有广阔的应用前景。

1 材料与方法

1.1 监测海域及站位布设

本研究在辽东湾东部核电站冷源取水口JFQSK监测站位(39°48'40"N、121°27'55"E)进行,站位水深约20 m,如图1所示。



审图号: GS(2016)2556号

图1 JFQSK监测站位

Fig. 1 JFQSK monitoring station location

1.2 采样方法

2023年7月23日至8月5日在辽东湾东部核电站冷源取水口JFQSK监测站位使用GARMIN LiveScope34动态声呐进行了水母生物量监测工作。声呐频率为530~1100 kHz,发射波束为6束,变速器光束夹角为20°×135°,最大有效监测水深可达61 m。相较于EK-60^[12-13]、EK-80^[14]及DIDSON^[15]等声呐,其频率更高、波束更密集、变速器光束夹角更大,在复杂海况下也能够呈现较清晰的视频影像。动态声呐法水母监测在定点监测船上进行,每次监测时长为0.5 h。每次水母生物量计算随机截取其中2段5 min视频并分别对其显示水母数量进行计数,根据同步使用网具法打捞所得水母的平均单体重量,可计算每段视频中显示水母的总重量。水母总重量与水母所在水体体积的比值即为水母生物量,分别计算2段视频水母生物量后取平均值,即作

为本次动态声呐法水母监测的结果, 监测结果用生物量 $\text{kg}/10^4 \text{ m}^3$ 表示, 即每万立方米海水中的水母重量。

为验证动态声呐法水母监测的准确性, 在进行动态声呐法监测的同时, 在同一监测船上同步使用网具法(定置网)进行采样。将定置网(长 50 m、高 8 m)垂直于潮流方向逆流下网, 进行水母采样作业, 下网时间为 0.5 h, 监测结果用相对生物量 $\text{kg}/(\text{net} \cdot \text{h})$ 表示, 即每网每小时捕捞的水母重量。

1.3 声呐探测法水母生物量的计算

GARMIN LiveScope34 动态声呐向下探测时扫过的水体呈四棱锥体, 长底边对应的角度为 135° , 短底边对应的角度为 20° , 其探测水体体积随水深变化而改变, 如图 2 所示。

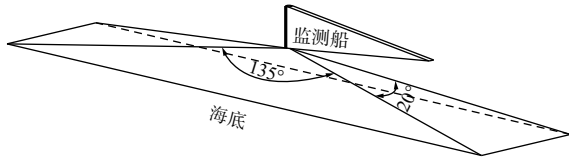


图 2 声呐探测水体示意图

Fig. 2 Schematic diagram of sonar detection of water bodies

由棱锥体积计算公式和三角函数公式计算可得:

$$V = \frac{1}{3}Sh = \frac{4}{3} \tan 10^\circ \tan 67.5^\circ h^3 = 0.566h^3 \quad (1)$$

式中: V 为声呐探测四棱锥水体体积(单位: m^3); S 为四棱锥底面积; h 为四棱锥的高。

$$l = 2 \tan 67.5^\circ h = 4.828h \quad (2)$$

式中: l 为四棱锥长底边长度(单位: m)。

水母总重量与水母所在水体体积的比值即为水母生物量:

$$p = \frac{ng}{V \frac{vt}{l}} \quad (3)$$

式中: p 为水母生物量(单位: $\text{kg}/10^4 \text{ m}^3$); n 为监测时间内声呐视频上显示的水母个数(单位: 个); g 为网具法同步打捞所得水母的平均单体重量(单位: kg); V 为声呐探测四棱锥水体体积(单位: m^3); v 为海流流速(单位: m/s); t 为监测时间(单位: s)。

此处 n 取 5 min 内声呐视频上显示的水母个数, t 取 300。将(1)(2)(3)式联立得:

$$p = \frac{ng}{0.566h^3 \frac{v300}{4.828h}} \times 10^4 = \frac{284.33ng}{h^2 v} \quad (4)$$

由动态声呐法水母生物量计算公式可知, 水母生物量由声呐视频显示水母个数、水深、海流流速及水母单体重量四个要素决定。

2 结果与讨论

2.1 动态声呐法与网具法监测水母生物量对比

根据网具法监测水母相对生物量、网口面积及海流流速等条件, 可计算网具法监测水母生物量, 结果用 $\text{kg}/10^4 \text{ m}^3$ 表示。2023 年 7 月 23 日至 8 月 5 日动态声呐法与网具法监测水母生物量对比, 如图 3 所示。该结果中有 2 个异常数据已被剔除。

由图 3 可知, 动态声呐法监测所得水母生物量总体高于网具法, 但在某些日期两种监测方法监测所得水母生物量基本一致。总体而言, 动态声

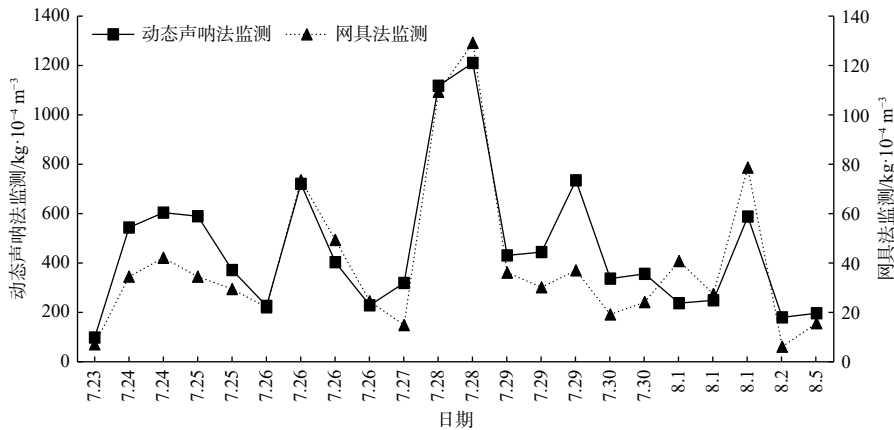


图 3 动态声呐法与网具法监测水母生物量对比

Fig. 3 Comparison of jellyfish biomass monitoring using sonar and net methods

呐法监测所得水母生物量与网具法变化趋势一致,可准确反映监测海域水母生物量变化,因此该方法可作为水母生物量监测、调查的一种新方法。

2.2 动态声呐法水母监测风险预警值的确定

2.2.1 黄色风险预警值的确定

网具法水母监测相对生物量达 $300 \text{ kg}/(\text{net}\cdot\text{h})$ 时为黄色风险预警^[16],因此从所有网具法水母监测数据中筛选出水母相对生物量最接近 $300 \text{ kg}/(\text{net}\cdot\text{h})$ 的五组数据,并计算其占网具法监

测黄色风险预警值的百分比。使用该站位同步动态声呐法水母生物量,并根据网具法的百分比推算出动态声呐法水母监测黄色风险预警值,结果见表1。

将表1中五组动态声呐法水母监测黄色风险预警值取平均值,即 $371.8 \text{ kg}/10^4 \text{ m}^3$,为方便核电站进行动态声呐法水母监测风险预警工作,此处将动态声呐法水母监测黄色风险预警值取整为 $350 \text{ kg}/10^4 \text{ m}^3$ 。

表1 动态声呐法水母监测黄色风险预警值

Tab.1 Dynamic sonar method for jellyfish monitoring: yellow risk warning threshold

日期	网具法相对生物量/ $\text{kg}\cdot(\text{net}\cdot\text{h})^{-1}$	网具法黄色风险预警值/ $\text{kg}\cdot(\text{net}\cdot\text{h})^{-1}$	百分比/(%)	动态声呐法生物量/ $\text{kg}\cdot 10^{-4} \text{ m}^{-3}$	动态声呐法黄色风险预警值/ $\text{kg}\cdot 10^{-4} \text{ m}^{-3}$
2023-07-27	214		71.33	319	447
2023-07-29	362		120.67	444	368
2023-07-30	230	300	76.67	337	440
2023-07-30	290		96.67	356	368
2023-07-31	316		105.33	249	236

2.2.2 红色风险预警值的确定

网具法水母监测相对生物量达 $500 \text{ kg}/(\text{net}\cdot\text{h})$ 时为红色风险预警^[16],采用上述动态声呐法水母

监测黄色风险预警值同样的计算方法,推算出动态声呐法水母监测红色风险预警值,结果见表2。

表2 动态声呐法水母监测红色风险预警值

Tab.2 Dynamic sonar method for jellyfish monitoring: red risk warning threshold

日期	网具法相对生物量/ $\text{kg}\cdot(\text{net}\cdot\text{h})^{-1}$	网具法红色风险预警值/ $\text{kg}\cdot(\text{net}\cdot\text{h})^{-1}$	百分比/(%)	动态声呐法生物量/ $\text{kg}\cdot 10^{-4} \text{ m}^{-3}$	动态声呐法红色风险预警值/ $\text{kg}\cdot 10^{-4} \text{ m}^{-3}$
2023-07-24	480		96.00	544	567
2023-07-24	586.4		117.28	604	515
2023-07-25	480	500	96.00	589	614
2023-07-29	462		92.40	735	795
2023-08-01	470		94.00	237	252

将上表中五组动态声呐法水母监测红色风险预警值取平均值,即 $548.6 \text{ kg}/10^4 \text{ m}^3$,为方便核电站进行动态声呐法水母监测风险预警工作,此处将动态声呐法水母监测红色风险预警值取整为 $550 \text{ kg}/10^4 \text{ m}^3$ 。

2.3 讨论

(1)在动态声呐法水母监测中发现,动态声呐难以探测到伞径小于 5 cm 的水母,因此在水母伞径小于 5 cm 的情况下,此方法不适用。在动态声呐法水母生物量计算过程中,要通过声呐视频对水母数量进行计数,不可使用声呐视频截

图进行计数,因为水母在水体中处于一种不断运动的状态,要通过动态视频对其加以识别,简单地通过静态视频截图对其进行计数易将其他生物计入水母数量中,从而造成水母生物量增大的后果,影响监测准确性。本研究为节约时间、快速计算水母生物量以进行核电水母风险预警工作,故每次水母生物量计算从 0.5 h 的声呐视频中随机选取2段 5 min 的视频进行计数。但在一般的水母生物量计算过程中应尽可能地对整段声呐视频中的水母数量进行计数,有助于进一步提高水母生物量计算结果的准确性。本研究

使用的 GARMIN LiveScope34 动态声呐, 其频率、发射波束、变速器光束夹角及有效监测水深等具有特定的参数, 因此本文动态声呐法水母生物量计算公式仅适用于 GARMIN LiveScope34 动态声呐的水母生物量计算。

(2) 在动态声呐法水母生物量数据处理过程中, 发现 7 月 25 日其中两轮次的数据异常, 水母生物量异常增大。这是由于当日第一轮和第四轮动态声呐法水母监测, 按当时的工作要求去监测水母数量较多、水深较浅的水母集聚区, 动态声呐法水母监测与网具法采样出现位置偏离, 这 2 组数据不具有代表性, 故将其剔除。因此在一般的动态声呐法水母生物量数据处理中应注意异常数据, 加以分析论证, 合理取舍。

(3) 由于动态声呐法水母监测范围为海面至海底全部水体, 而网具法监测为其中的部分水体, 受不同水体水母分布不均的影响, 本研究中动态声呐法与网具法在同一时间、同一监测站位测得的水母生物量有较大差异, 动态声呐法测得的水母生物量一般是网具法的数倍。在王彬等人对于 DIDSON 声呐沙海蜇监测的研究中也提到, 对比网具法调查沙海蜇的丰度, DIDSON 声呐监测的沙海蜇平均丰度是网具法监测的 4 倍至 5 倍^[15]。但动态声呐法与网具法监测所得水母生物量变化趋势一致, 都可较好反映监测海域水母生物量变化, 在今后核电冷源取水海域水母监测工作中, 可将动态声呐法与网具法监测结合应用。

(4) 动态声呐法水母监测黄、红色风险预警值是在网具法水母监测基础上推算而来的。网具法水母监测的黄、红色风险预警值是从辽东湾东部近岸海域近十年网具法水母监测、预警工作中得出的结果。因此, 本文动态声呐法水母监测黄色及红色风险预警值仅适用于辽东湾东部近岸海域的水母监测, 其他海域的动态声呐法水母监测风险预警值可在此基础上根据实际情况进行研究。

3 结论

(1) 在辽东湾东部近岸海域核电冷源保障中, 根据动态声呐视频显示水母个数、水深、海流流速、水母单体重量及动态声呐探测水体体

积, 确定动态声呐法监测水母生物量计算公式为:
$$p = \frac{284.33ng}{h^2v}$$
。

(2) 在辽东湾东部近岸海域核电冷源保障中, 根据网具法水母监测黄色和红色风险预警值, 通过比例法推算出动态声呐法水母监测黄色和红色风险预警值分别为 $350 \text{ kg}/10^4 \text{ m}^3$ 和 $550 \text{ kg}/10^4 \text{ m}^3$ 。

参考文献:

- [1] 吴侨军. 核电厂冷源安全的挑战及对策 [J]. 电力安全技术, 2019, 21(11): 4-9.
- [2] 沈萍萍, 于先波, 孟不凡, 等. 滨海核电冷源取水区风险生物的分类及特征分析 [J]. 海洋科学, 2023, 47(9): 131-140.
- [3] 唐娅菲. 滨海核电运行安全典型致灾生物研究: 以宁德核电为例 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2018.
- [4] 张 芳, 李超伦, 孙 松, 等. 水母灾害的形成机理、监测预测及防控技术研究进展 [J]. 海洋与湖沼, 2017, 48(6): 1187-1195.
- [5] 刘红元. 冷源在核电厂的重要性探究 [J]. 产业与科技论坛, 2019, 18(9): 69-70.
- [6] 陈光明, 许 超. 核电站冷源安全系统性保障方案 [J]. 电力安全技术, 2020, 22(10): 63-67.
- [7] 李建文, 刘笑麟, 张锦飞, 等. 提升核电厂冷源安全性的海生物探测技术研究 [J]. 电力安全技术, 2017, 19(10): 32-37.
- [8] 於 凡, 许波涛, 李 勇, 等. 海生物暴发对核电厂冷源系统的影响分析及对策探讨 [J]. 给水排水, 2018, 44(2): 61-64.
- [9] 王 彬, 房立晨, 董 婧, 等. 大型水母声学观测与评估技术研究进展 [J]. 生态学报, 2017, 37(24): 8187-8196.
- [10] MUTLU E. Target strength of the common jellyfish (*Aurelia aurita*): a preliminary experimental study with a dual-beam acoustic system [J]. ICES Journal of Marine Science, 1996, 53(2): 309-311.
- [11] HIROSE M, MUKAI T, HWANG D, et al. The acoustic characteristics of three jellyfish species: *Nemopilema nomurai*, *Cyanea nozakii*, and *Aurelia aurita* [J]. ICES Journal of Marine Science, 2009, 66(6): 1233-1237.
- [12] 王 梓, 付媛媛. 基于声学方法的核电厂取水口冷源生物量监测 [J]. 科学技术创新, 2021(36): 169-172.
- [13] 付媛媛, 汤 勇, 王 珊, 等. 基于声学技术的红沿河核电站附近海域夏季水母通量测量 [J]. 大连海洋大学学报, 2021, 36(2): 325-333.
- [14] 陈 晟, 纪建达, 于 涛, 等. 不同频率条件下海月水母目标强度测量及分析 [J]. 数字海洋与水下攻防, 2023, 6(1): 72-80.
- [15] 王 彬, 刘修泽, 王小林, 等. 基于双频识别声呐 (DIDSON) 的辽东湾近海沙海蜇监测的应用研究 [J]. 中国水产科学, 2022, 29(8): 1223-1235.
- [16] 张朝文, 关春江, 徐 鹏, 等. 辽东湾东部海域核电冷源取水区的风险生物分析 [J]. 海洋环境科学, 2019, 38(1): 41-45.

(本文编辑: 曲丽梅)