

滨海核电冷源取水区风险生物的分类及特征分析

沈萍萍¹, 于先波², 孟不凡¹, 武存超¹

(1. 烟台大学海洋学院, 山东 烟台 264005; 2. 山东核电有限公司, 山东 烟台 265116)

摘要: 近年来由海洋生物入侵造成的核电冷源安全事件频发, 表明冷源安全已成为核电安全与可靠的重要影响因素, 受到社会高度关注。本文对国内外发生的主要冷源安全事件进行统计分析, 归纳总结冷源致灾生物的分类特征及其致灾机制, 探讨致灾生物的筛选及分级预警标准, 解析相关的探测技术、预警手段及处置方法, 提出致灾生物研究中亟待解决的关键科学与技术问题, 以期为更好应对解决滨海核电冷源安全问题提供参考与理论依据。

关键词: 滨海核电; 取水区; 风险生物; 冷源安全

中图分类号: P735 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2023)9-0131-10
DOI: 10.11759/hyxx20221116003

核电作为优质绿色清洁能源, 在促进社会经济发展和环境保护中具有不可比拟的优势, 各国将核电作为控制温室气体排放的最重要措施之一, 核电因此得到快速发展。我国从 1984 年第一座滨海核电站——秦山核电站开工建设, 至 2017 年 9 月, 大陆地区共有商业运行机组 37 个, 在建机组 19 个^[1]。随着核电的飞速发展, 核电运行安全变得更为重要, 而冷源系统安全是重中之重。近年来, 随着越来越多的核电机组投入运行, 国内滨海核电发生了数起由海洋生物[如水母(Medusozoa)、海地瓜(*Acaudina molpadioidea*)、棕囊藻(*Phaeocystis* spp.)等]或者异物(秸秆、漂浮物等)入侵造成的冷源取水口滤网堵塞、影响核电正常运行的安全事件, 导致核电机组降低功率、跳机甚至紧急停堆, 造成巨大的经济损失及安全隐患, 引起了社会高度关注^[2]。类似的事件在法国、日本、美国、英国、瑞典等多个国家滨海核电站都有发生, 据世界运行重要事件反馈报告统计显示, 2004—2015 年十余年间, 世界各地发生了 100 余起核电站取水口堵塞事件^[3], 核电冷源安全问题成为“世界性难题”。

尽管核电行业已认识到事件的严重性, 并采取了预防措施, 但该类事件的发生率不降反升, 如北方某核电厂自机组运行以来, 2014—2017 年先后发生了 4 起较为严重的冷源取水堵塞事件, 每年 1 次^[4-5]; 而 2020 年 3 月 24 日—25 日, 阳江核电厂连续 2 d 发生了 2 起毛虾(*Acetes chinensis*)群入侵事件, 导致大范围机组反应堆接连紧急保护停堆, 造成了极大的安全隐

患。冷源事件的频发, 表明冷源安全已成为影响核电厂安全与可靠的重要因素。冷源安全属于多领域、跨学科的技术难题, 涉及核电工程、海洋环境监测、海洋生物的分析预警及其生物学特性研究等多个领域。同时由于各个电厂所处的海洋地理环境独特, 国内外没有能够完全参照的治理成功案例, 因此需要综合分析已经发生的冷源事件的缘由, 结合自身海洋环境及入侵生物特点, 制定针对性强的冷源保障措施, 切实维护电站的安全运行。2016 年国家领导人高度重视并针对广西防城港核电站大量球形棕囊藻入侵事件做出重要批示, 建议开展相关研究、攻克关键技术^[6]。本文将专门针对海洋生物入侵对近海核电冷源安全的影响进行深入总结与探讨, 追溯其发生原因与机制, 总结关键科学与技术问题, 提出相关建议与对策, 为防控近海生态灾害、保障近海核电冷源安全提供科学依据与技术支持。

1 冷源安全事件的统计与分析

近年来, 国内外由海洋生物或异物入侵导致的核电厂冷却水取水安全事件频繁发生^[6-8]。如 2004—

收稿日期: 2022-11-16; 修回日期: 2023-01-04

基金项目: 国家自然科学基金(41976114); 国家环境保护近岸海域生态环境重点实验室开放课题(202311); 烟台市校地融合发展项目

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41976114; State Environmental Protection Key Laboratory of Coastal Ecosystem (202311) Yantai City School and Local Integration Development Project]

作者简介: 沈萍萍(1975—), 山东青岛人, 女, 教授, 主要研究方向为海洋生物与生态学, E-mail: pshen@ytu.edu.cn

2008 年间全球共记录取水口堵塞事件 61 起, 其中 80% 导致机组降功率运行或停堆, 20% 对核电厂安全系统造成直接影响^[9]。表 1 对国内外发生的主要核电

冷源安全事件进行了统计, 分析事件发生后果及其相关原因, 以便更好地应对由海洋生物暴发或者入侵导致的滨海核电运行安全问题。

表 1 国内外主要核电冷源事件的统计分析

Tab. 1 Summary of nuclear power plant cooling water system-related safety events at the national and international level

时间	地点	事件后果及造成原因	参考文献
国内			
2020 年 8 月	红沿河核电站	水母入侵	[10]
2020 年 6—7 月	深圳大亚湾核电站	该海域首次出现尖笔帽螺(<i>Creseis acicula</i>)大规模暴发浮游聚集的现象, 影响了大亚湾核电的安全运行	[10-11]
2020 年 3 月	广东阳江核电厂	连续 2 d, 毛虾群进入海水循环过滤系统导致滤网压差过大、水泵跳闸机组停堆	[12]
2018 年 5 月	国内某核电厂	3 号机组 B 列鼓网因海带(<i>Laminaria japonica</i>)等杂物堵塞导致电机间地面液位快速上升, 造成出口封闭堵塞	[11, 13]
2018 年 4 月	南方某核电站	石莼(<i>Ulva lactuca</i>)涌入取水口堵塞鼓网系统导致跳机、跳堆事件	[12, 14]
2016 年 8 月	大连红沿河核电	海月水母(<i>Aurelia aurita</i>)将取水口堵住, 使得 1 号、2 号机组在短时间内降低运行功率	[13, 15]
2016 年	北方某核电站	鲈鱼(<i>Lateolabrax japonicus</i>)大量涌入取水涵洞, 对压差造成影响, 启动应急打捞作业	[12, 14]
2016 年 1、8 月	深圳大亚湾岭澳核电厂	2 号机组因大量毛虾涌入取水口, 造成鼓形滤网压差高引发 2 台循环水泵跳闸, 导致反应堆紧急停堆运行	[14, 16]
2015 年 8 月 7 日	福建宁德核电厂	大量海地瓜涌入 3 号机组取水口, 并聚集在鼓网内, 进一步导致跳闸, 反应堆停堆	[7]
2015 年 7 月	大连红沿河核电	大量海月水母将取水口堵住, 使得 1 号、2 号机组在短时间内降低运行功率	[13, 15]
2015 年 1 月	深圳大亚湾岭澳核电站	大量虾群集中涌入核电泵站内部, 造成该电站的 1 号、2 号机组运行功率短时间降低	[14, 16]
2014 年 12 月— 2015 年 2 月	广西防城港核电厂	机组多次受到球形棕囊藻赤潮的入侵, 冷却水系统堵塞, 造成跳机、停堆。主要原因在于棕囊藻异常繁殖及形态特异性, 拦截设施无法应对	[6]
2014 年 7 月 21 日	大连红沿河核电厂	大量水母涌入循环水过滤系统取水口导致 1 号、2 号机组停堆运行	[14, 16]
2011 年 6 月 20 日	秦山第二核电站	上游水库放水导致大量杂物进入取水口, 循环水鼓网附着大量水草杂物, 导致鼓网因销子断裂停止转动, 3 号机组降功率运行	[9]
2007 年 7 月 9 日	江苏连云港田湾核电厂	取水口发生麦秸秆堵塞运行, 供给汽轮机冷凝器的海水冷却水水量下降, 导致凝汽器真空下降, 2 台机组降功率运行	[7]
国外			
2015 年	俄罗列宁格勒核电站	受风暴潮影响, 海湾底部沉积物和大量海藻堵塞冷却系统进水口, 导致反应堆停堆	[3]
2013 年	英国爱托尼斯核电站	受极端天气和不良海洋状况影响, 海藻水平异常升高, 导致其冷却系统被堵塞, 2 号机组停止运转, 2 个核反应堆全被关闭	[3]
2013 年	瑞典奥斯卡港核电站	海月水母堵塞取水口管道, 3 号反应堆被迫关闭	[3]
2012 年	美国代阿布洛峡谷核电站	水母生物入侵, 使其迫于压力而关闭	[3]

续表

时间	地点	事件后果及造成原因	参考文献
国外			
2011年7月5日	以色列哈奥洛特·拉宾核电站	水母进入冷却水取水口, 致使该核电站被迫关闭	[3]
2011年6月28日	英国托尼斯核电站	大量水母堵塞取水口, 两个核反应堆被迫停运	[3]
2011年6月23日	日本岛根核电站	大量水母入侵堵塞冷却管, 导致核电站的发电量减少	[3]
2010年1月	美国塞勒姆核电站	受恶劣天气、海草、海藻和海冰的影响, 取水口堵塞, 导致反应堆降功率运行	[3]
2009年12月	法国 CRUAS 核电厂	4 号机组受到大量加拿大伊乐藻(<i>Elodea canadensis</i>)入侵, 导致部分机组热阱丧失, 机组熔堆风险增加	[15, 17]
2006年5月	韩国 Ulchin 核电厂	虾群大规模进入核电取水口, 导致机组停机、停堆	[13]
2005年8月	美国 Oyster Creek 核电	大量海草涌入导致用水系统停止工作, 导致应急响应	[9]
2005年	瑞典奥斯卡港核电站	大量水母暴发性涌入, 核电站第一个反应堆被暂时性关停	[3]
2004、2005年	法国 Paluel 核电厂	海藻堵塞鼓形滤网	[7]
1997年2、4、12月	韩国 Ulchin 核电厂	3次虾群大规模进入核电取水口, 导致机组停机、停堆	[13]
1997年1月	法国 Chooz B 核电厂	取水口被水草和浮冰堵塞, 丧失 SEC/R RI 热交换器	[7]

此外, 2015年防城港、岭澳、福清、昌江等核电厂在调试、运行期间, 也发生过因海生物的影响造成冷源丧失或安全异常, 甚至触发自动停堆的事件^[17]。据不完全统计, 我国绝大部分沿海核电站都发生过生物入侵导致的冷源安全事件, 发生频率不降反升。

总结发现, 目前不管国内国外, 除碎冰及漂浮杂物外, 绝大多数事件是由海洋生物的大量暴发及入侵造成, 但也存在明显不同。在国外, 造成入侵危害的海洋生物种类较少, 主要是水母类(占大多数), 其次是大型海藻(海草), 剩余为海冰、杂草等, 如日本 1996—2000 年的 5 年间, 108 个火电厂中有 43 个电厂受到水母的影响^[1]。而国内电站致灾的海洋生物种类多样, 个体大小差别较大, 包括浮游植物(棕囊藻)、浮游动物(毛虾、尖笔帽螺、水母等)、游泳生物(鲈鱼等)、底栖动物(海地瓜、贝类、海葵(*Actiniaria*)等)、大型海藻(浒苔、石莼、海带等)、水草(伊乐藻、水葫芦(*Eichhornia crassipes*))等(表 1)。相比而言, 国内的冷源致灾生物个体偏小(如微藻、毛虾)、种类更多且不断出现新型灾害生物(如大亚湾核电站新近出现尖笔帽螺入侵), 因此其现场监测、预警及防控更加困难, 后期打捞与治理亦更加艰巨, 对相应的拦截和过滤防护能力要求极高, 因此必须对这些致灾生物进行风险分类, 建立核电冷源取水区的风险生

物目录及日历, 进而进行科学监控与预警, 提高风险应对能力。

2 冷源致灾生物分类及其特征

2.1 致灾生物分类

冷源致灾生物是指暴发性涌入核电站循环水过滤系统取水口, 堵塞取水口拦截网、格栅或鼓网等设施, 造成核电站冷却水水量低而导致机组反应堆跳机、停堆运行安全事件的一类海洋生物统称, 仅针对于核电冷源安全而言, 因为有些入侵生物本身也是渔业资源, 比如毛虾群、鱼类等。冷源入侵致灾生物种类较多, 根据其不同的形态特征及生长特性, 主要分为浮游植物、浮游动物、游泳生物、大型藻类及大型底栖动物等五大类别(表 2)。各类别生物致灾的原因也不尽相同, 例如浮游植物类致灾生物虽然个体微小, 但是能够形成粒径较大的群体(成囊、成链、成团), 且繁殖速度快, 因此短时间内即能够形成高密度、高生物量的群体, 如棕囊藻; 浮游动物类致灾生物通常为游动能力弱、易漂浮聚集的种类, 其繁殖及生长速度都非常快, 如水母、中国毛虾、尖笔帽螺等; 而底栖生物类致灾生物一般个体较大、生物密度不一定很高但集中分布, 受恶劣天气、风浪搅动等易漂浮并聚集, 如海地瓜、贝壳类、大型海藻(海草)等。

2.2 致灾生物特征

尽管目前有关核电冷源安全事件及致灾生物、致灾原因受到社会及业界高度关注,但是专门针对冷源致灾生物的调查与评价还比较少见^[3, 18],比如海地瓜等生物,

绝大部分研究集中在其营养价值,而对于其生长繁殖、生活习性及分布等特征鲜有报道,缺乏相应的调查标准与评价体系,导致核电站现有的环境生物调查结果与实际冷源事件的致灾生物并不一致,且存在较大偏差^[16, 19]。

表 2 核电冷源致灾生物的种类及特征

Tab. 2 Characteristics and species of marine organisms that cause disasters at nuclear power plant cooling water system

种类特征	浮游植物	浮游动物	底栖动物	游泳生物	大型藻类(海草)
大小	<20 μm	>50 μm	>0.5 mm	体型较大	体型较大
形态特征	单细胞或群体(形成链状、囊状、团块状)	种类繁多,结构复杂,一般都缺乏发达运动器官、运动能力弱、被动漂浮于水层中	生活于海洋基底表面或沉积物中	具发达运动器官、游泳能力强	体型较大至巨大,呈带状、片状、叶状、丝状等;营漂浮或底栖附着生活
生物内因	繁殖迅速,形成胶质囊体或群体、暴发高密度赤潮	繁殖迅速、生存能力强;游动能力弱、易随海流聚集	分布区域性强、栖息地改变、易悬浮并随海流聚集	趋向性;集成群、周期性洄游	易脱落、并随水流聚集
环境因素	水体富营养化引发生物暴发或赤潮	全球气候变暖、极端天气、过度捕捞导致食物链破坏	极端天气、风浪搅动	拦截网围栏效应、食物丰富	富营养化导致生物暴发、恶劣天气、风浪搅动、人为活动排放
致灾原因	堵塞鼓形滤网	堵塞鼓形滤网	堵塞拦截网或鼓形滤网	堵塞拦截网	铺开成膜状堵塞拦截网
集中分布水层	表层	中下层	下层	中下层	中下层
高发期	每年9月至次年3月	水母6—9月;毛虾全年	春季、夏季、秋季	春、秋两季,每年的10—11月份为盛渔期	海藻5—8月;海草的7—12月;水草5—10月
高发海域	福建、广东、广西、海南沿海、渤海海域	中国沿海	中国沿海	中国沿海	渤海、黄海海域
代表性种类	棕囊藻	海月水母、中国毛虾、尖笔帽螺	海地瓜、海葵、贝壳类	鲈鱼	海带、浒苔、石莼
潜在风险种类	夜光藻(<i>Noctiluca scintillans</i>)、束毛藻(<i>Trichodesmium</i> spp.)、海链藻(<i>Thalassiosira</i> spp.)、骨条藻(<i>Skeletonema</i> spp.)等	球形侧腕水母(<i>Pleurobrachia globosa</i>)、沙海蜇、毛虾(<i>Rhopilema esculenta</i>)等	牡蛎(<i>Crassostrea</i> spp.)、贻贝(<i>Mytilidae</i> spp.)、藤壶(<i>Balanus</i> spp.)、泥螺(<i>Bullacta exarata</i>)、海葵(<i>Actiniaria</i> spp.)、中国鲎(<i>Tachypleus tridentatus</i>)等	鳀鱼(<i>Engraulis japonicus</i>)、玉筋鱼(<i>Ammodytes personatus</i>)、乌贼(<i>Sepiella maindroni</i>)等	马尾藻(<i>Sargassum</i> spp.)、孔石莼、海草、水葫芦等

冷源安全属于多领域、跨学科的技术范畴,涉及核电工程、海洋环境监测、海洋生物预警及其生物学特性研究等多个领域。如何依据致灾生物的形态特征及生活习性将生物的监测预警与核电工程设计,尤其是取水口拦截滤网的优化布置等科学地结合起来,才是有效防控冷源取水口生物入侵与堵塞的关键。如浮游植物需要光照进行光合作用,主要分布在

水体上层;浮游动物能够垂直迁移,主要生活在上下层,如大亚湾海域中国毛虾主要集群分布于水深5.2~7.2 m的中下层水域^[11];而有些底栖生物则栖居在下层水域及表层沉积物中并且呈明显区域性分布特征,如海地瓜的不平衡式分布易造成常规监测的疏漏^[3]。因此,拦截网需要根据不同生物的体型大小及空间分布特征进行优化调整,以拦截不同大小、不同水层

的入侵生物。同时,不同水层的透光性、能见度等条件不同,对于相应的探测设备和探测技术也有不同的要求^[15]。可见,不同类别致灾生物的生物特性及生活史策略差异较大,必须首先厘清它们的分类特征,了解各类生物致灾的生物及环境机制,才能制定出有针对性的防控对策。

3 致灾生物筛选标准及分级预警

水母是我国和世界多国核电首要的致灾生物,

2020年12月31日,中国能源研究会^[20]首次发布了针对水母灾害的核电厂冷源安全分级预警规范(T/CERS 0009-2020 核电厂冷源安全分级预警规范 水母灾害),确定水母灾害预警等级及阈值,规定了水母灾害的4个等级及其确定依据(表3)。此标准的制定对于保障沿海核电站在水母暴发期间的冷源安全,提高水母灾害的应急响应和管理能力具有重要意义。

表3 水母灾害预警等级划分表^[20]

Tab. 3 Classification of warning grades for disasters caused by jellyfish^[20]

预警等级	水母生物量湿质量(g/m ³)	监测位点	监测方法
蓝色预警	0.000 3~0.00077	外海监测点、取水口或进水前池、鼓网取样	水母生物分子定量监测
黄色预警	0.000 77~0.1	外海监测点或取水口	水母生物分子定量监测、水母拖网监测或水母声呐监测
橙色预警	0.1~EFL	外海监测点或取水口	水母拖网监测或水母声呐监测
红色预警	>EFL	外海监测点或取水口	水母拖网监测或水母声呐监测

注: EFL——水母应急打捞极限值(单位: g/m³): 沿海核电厂处于应急状态下每天动用船只打捞水母的最大量与核电纳水量的比值。

但是除水母外,其他冷源致灾生物的筛选标准尚未成熟且无法统一,国内外均未形成指导性规范与评价体系^[16]。除了与冷源致灾生物本身复杂性有关外,各核电站所处的海域环境特殊亦是主要因素。如南方海域,福建宁德核电站运行前后水动力条件发生变化,沉积环境改变加上台风天气影响,取水口受到海地瓜、淤泥等的威胁;广东大亚湾核电站面临着海虾、尖笔帽螺、棕囊藻赤潮等威胁;广东台山核电站由于采用隧洞取水的方式,存在鱼、虾侵入的问题;广西防城港核电站受到棕囊藻赤潮的影响最为严重。中部海域如浙江秦山核电站因海域水质泥沙淤积严重,面临水葫芦和泥沙的威胁;江苏田湾核电站附近种植农作物较多,恶劣天气导致小麦或玉米秸秆入海,引发取水口堵塞的风险;而大连红沿河核电站地处寒冷的北方海域,则多次受到海月水母、浒苔和海冰等的入侵(表1)。根据历史资料和现场调研结果,张朝文等^[1]筛选出红沿河核电取水区高风险生物并提出海月水母的风险等级基准;唐娅菲^[3]运用层次分析法,建立宁德核电站致灾生物筛选标准体系,筛选出12种潜在致灾生物(表4),并提出了针对海地瓜的预警和防控措施。

而其他核电站的冷源致灾生物各具特色,因此应加快制定相关的致灾生物筛选标准及分级基准。建议各核电站结合考虑当地的水文气候条件、海洋地质及化学等环境要素,率先针对性地建立地方核电冷源取水区风险生物的目录及筛选标准,对于后

续制定全国统一的指导性准则有重要意义。

4 探测技术与处置方式

4.1 探测技术

根据入侵生物种类的特点,有针对性地研发生物探测及预警防控技术,是核电冷源安全“卡脖子”的技术难题之一。目前常用的入侵生物探测技术主要包括:声学手段、光学手段、卫星遥感技术、雷达技术等,其优缺点及应用范围参见表5^[11]。但由于受到水体能见度低、环境条件变化剧烈等限制,加上致灾生物本身的复杂性(如浮游植物个体太小无法探测,或者水母类生物水分太多,身体呈透明状,光学手段无法探测),难以实现致灾生物的可靠探测,需要多种探测手段结合使用,优势互补。如鱼、虾及水母的探测应以声学为主,光学、水动力等为辅的综合体系,进而实现量化评估^[15]。

目前,大多数核电站取水口都布设生物监视设备进行实时观测与预警:如大亚湾核电站进水口设置水质在线监测浮标,搭载多参数水质监测仪及气象传感器,实现了连续、自动、实时、定点监测,能抵御恶劣天气的影响,有助于核电站进水口海水水质参数数据库的建立以及进行海洋赤潮的监测和预警预报;阳江核电站利用水下机器人系统对进水明渠海生物进行全面的监控,实时观测进水明渠中虾群、水母、藻类等生物的活动情况,预测发展趋势,提前做出预警机制及应对措施^[16]。但是不可否认,由于海洋生物暴

发的突然性、不确定性等因素,目前的探测设备与技术仍然不能满足监测预警的需求,冷源事件持续发生,如2020年3月,阳江核电站连续两天暴发了毛虾群入侵事件,暴露现有水下机器人监测系统的不足与缺陷,而根本原因在于缺乏应对毛虾暴发的预警技术与方法。随着全球气候及环境的变化,海洋生态系统亦发生了巨大变化,生物群落结构随之变化,这应该是越

来越多的生物能够暴发成灾的根本原因。因此只有在了解与掌握特定海域生态环境及其生物群落结构的基础上,才能有的放矢、深入开展冷源取水口生物监测与预警技术的研发,后续冷却水过滤设备配置方案的优化调整,找出之前技术上的不足并加以改进,为核电厂冷却水过滤系统的安全、可靠、稳定运行提供重要保障。

表4 中国沿海各核电冷源区风险生物及筛选标准

Tab. 4 Risk organisms and screening criteria at Chinese coastal nuclear cold source regions

核电站	风险生物	筛选标准	参考文献
红沿河核电站	长石莼(缘管浒苔)(<i>Ulva linza</i>)、孔石莼(<i>Ulva linza</i>)、海月水母、沙蜚、球型侧腕水母、中国毛虾等	海月水母: 大于或等于 500 ind./(net.h)时风险为“高”; 红色预警级别; 大于 300 而小于 500 ind./(net.h)时风险为“中”; 黄色预警级别; 大于 100 而小于 300 ind./(net.h)时风险为“低”; 蓝色预警级别	[1]
宁德核电站	半口壮丽水母(<i>Aglaura hemistoma</i>)、拟细浅室水母(<i>Lensia subtiloides</i>)、双生水母(<i>Diphyopsis chamissonis</i>)、球型侧腕水母、软拟海樽(<i>Dolioetta gegenbauri</i>)、棘刺锚参(<i>Protankyra bidentata</i>)、海葵、拉氏狼牙虾虎鱼(<i>Odontamblyopus rubicundus</i>)、紫菜和海带、海地瓜、中国鲎和鱼群等	致灾生物划分标准: 0.000~0.249 为低风险; 0.250~0.499 为中风险; 以 0.500~0.749 为高风险; 以 0.750~1.000 为极高风险, 高或极高风险的海洋生物为致灾生物	[21, 3]
秦山核电站	水葫芦	尚无标准	[9]
大亚湾核电站	中国毛虾、尖笔帽螺、棕囊藻等	尚无标准	[11]
防城港核电站	球形棕囊藻	尚无标准	
阳江核电站	中国毛虾	尚无标准	
台山核电站	鱼、虾	尚无标准	

表5 常用生物探测手段对比及应用范围(改自曾雷等^[11])

Tab. 5 Comparison of common biological detection methods and scope of application (modified from Zeng et al.^[11])

探测手段	应用设备	关键技术	优点	缺点	应用范围
水下声学	声呐	水声换能技术	水下探测距离较远	探测距离与精度难以权衡	高频主动声呐为水母类浮游动物首选; 低频声呐作为游泳动物首选
光学手段水下水面	微光摄像机	微光/红外成像技术	成像直观、清晰	有效观测距离短、维护困难	浮游动物及游泳生物的辅助监测
	高清摄像机	机器视觉技术	技术成熟	极端天气探测效果难以保证	浮游植物备选
现代遥感技术	光学 卫星遥感	多光谱遥感技术	观测尺度大, 连续性、实时性高、抗干扰强	造价昂贵、难以大规模推广	浮游植物、赤潮等首选
电磁波	雷达	数字图像处理技术			水面漂浮物首选

4.2 处置方式

据 WANO《重要运行事件报告》等^[16]资料显示,国内外核电站目前主要采取消杀驱离、拦截、降功率运行等手段应对海生物暴发及入侵事件。驱离措

施主要包括针对鱼、虾等游泳生物的电脉冲拦网、气泡幕墙法; 针对鱼类、水母、藻类等的水下声波法和光学手段; 消杀措施主要有次氯酸杀生剂及针对赤潮藻类的改型黏土法^[9, 16]。

广西防城港核电站受球形棕囊藻(*Phaeocystis globosa*)赤潮的影响最严重,机组多次受到球形棕囊藻赤潮的入侵,出现冷却水系统堵塞现象,造成跳机、停堆^[6]。其中球形棕囊藻典型特征就是具有单细胞和群体 2 种形态,单细胞非常微小($<10\ \mu\text{m}$),常规监测很容易忽略,但在条件适宜时却能够形成直径超过 1 cm 的胶质囊体,暴发高密度、高生物量的赤潮灾害。不管是单细胞还是囊体,均能穿过拦截网进入下游 CFI 粗格栅(200 mm)、细格栅(50 mm)及最后屏障——鼓形滤网(3 mm),导致格栅清污机组损坏^[4]。目前多层防护网、拦截设施等均不能有效拦截球形棕囊藻,所以针对棕囊藻的处理策略必须是在赤潮暴发高峰期及高发区域,提前进行监测预警,棕囊藻细胞密度达到一定致灾阈值时,及时喷洒改性黏土进行消杀处置^[6]。近年改性黏土技术通过国家核安全局审核,成为我国近海核电冷源取水海域赤潮应急处置的唯一技术方法,成功应用于防城港核电冷源取水海域,有效保障了我国滨海核电的冷源取水安全。

但是黏土消杀法目前只适用于棕囊藻等浮游植物或微型浮游动物,对于水母、海地瓜及大型海藻类生物尚无有效试验证据。由于水母、沙海蜇等水分太多,身体呈透明状,声呐及航拍等监测技术无法有效的进行预警预报,目前只有设置拦截网清理打捞水母。2015 年 8 月大量海地瓜受到台风搅动,涌入宁德核电 3 号机组取水口,导致跳闸、反应堆停堆,对海地瓜等底栖生物的数量及空间分布等生物特征不了解导致监测、预警及应急处置能力的缺失也是事故发生的主要原因之一。

由于海洋致灾生物种类多,暴发原因复杂,类似改性黏土法这样有针对性的防治技术仍亟待研究。在尚无法有效进行监测预警的情况下,冷源取水口的拦污网是核电厂循环水系统的第一道安全屏障^[22],增加改进拦截网过滤系统是目前最直接有效的应对措施之一。EPRI1020524 报告对美国 77 家电厂进行了取水口堵塞问题的调研和信息收集,调研包括各电厂出现的海生物种类、特点,以及各电厂取水口和泵站的配置,给出了各电厂针对取水口堵塞问题采取的成功治理经验反馈和设备改进建议^[23]。国家核安全局也要求,核电厂营运单位对取水和过滤系统可能存在的设计或建设问题加以改进,增强抵御海洋生物或异物的能力。措施包括增设不同孔径的拦污网、改进拦污网材料等,如红沿河核电站取水口原先没有设置拦污设施可后期进行增设^[7];或在取水口

改设“人”字形拦污网,海生物可随潮汐作用自动疏散,或采用新型回转式清污机提高清污效率,有效减轻鼓网负荷^[4];秦山第三核电站采用的链式旋转滤网比第二核电站的鼓网滤网故障率低且效果更好;而美国 Donald C. Cook 核电厂新型多盘式滤网在滤网压差达到 1 270 mm 的情况下持续运行,清除垃圾能力达到每小时 $115\ \text{m}^3$,对防止取水口滤网堵塞有很好效果^[9]。

5 建议与对策

核电冷源安全事件频发影响到电厂的安全与可靠性,冷源安全的重要性已成为普遍共识,而冷源生物入侵是重中之重。如何根据入侵生物种类的特点,有针对性地研发生物探测及预警技术、进行致灾生物的防控与处置,是核电冷源安全“卡脖子”的技术难题之一,多学科交叉,涉及核电工程、海洋环境监测、海洋生物预警及其生物学特性研究等多个领域。国家核安全局要求核电营运单位应高度重视海洋生物或异物对海水系统特别是安全重要厂用水系统的影响,结合有关案例,分析自身可能存在的问题;同时,多单位合作,努力掌握海洋生物或异物的产生和运动规律,建立预警和预防机制。在总结分析诸多冷源安全事件的经验基础上,我们建议:

1)结合当地海洋生态环境及生物特征,参考已有记录的冷源致灾生物,建立适用于当地的潜在风险生物目录及风险日历,针对特定致灾生物形成具体可操作的调查规范,实行“一站一策、一灾一策”;

2)目前已确定水母灾害预警等级及阈值,规定了水母灾害的 4 个等级及其确定依据并建立风险等级;针对水母外的其他冷源致灾生物,建议首先选择有条件、有能力的核电站结合自身需求,建立地方致灾生物的风险等级及行业标准,如防城港核电站可牵头建立棕囊藻灾害的风险等级及标准;大亚湾核电站和阳江核电站建立中国毛虾的风险等级及标准;秦山核电站牵头制定海地瓜等底栖生物的风险等级及行业标准等,为后续综合形成全国统一的指导规范与准则提供数据支撑与依据;

3)长远来看,亟须加强学科间科技合作与融合发展,进一步开展海域致灾生物与生态环境的调查与长期研究,分析海洋致灾生物暴发的规律及演变趋势;在此基础上,结合致灾生物的特点及环境特征,研发综合性与特异性相结合的探测技术及预警手段;开展

致灾生物的防控与处置设备和技术,才是从根本上解决核电冷源安全的生物暴发与入侵问题的关键。

参考文献:

- [1] 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.
ZHANG Chaowen, GUAN Chunjiang, XU Peng, et al. Analysis on risk organisms for the cold source water of nuclear power plant in the eastern waters of Liaodong bay[J]. Marine Environmental Science, 2019, 38(1): 41-45.
- [2] 国家核安全局.《国家核安全局关于近期海洋生物或异物影响核电厂取水安全事件的通报》(国核安发〔2016〕91号)[EB/OL]. (2016-04-27) [2016-05-03]. https://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/haq/201605/t20160505_337257.htm.
The China National safety Administration. Circular of the National Nuclear Safety Administration on recent incidents of marine organisms or foreign bodies affecting the safety of water intake of nuclear power plants (GHAF〔2016〕No. 91) [EB/OL]. (2016-04-27) [2016-05-03]. https://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/haq/201605/t20160505_337257.htm.
- [3] 唐娅菲. 滨海核电运行安全典型致灾生物研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2018.
TANG Yafei. Study on typical disaster-causing organisms of coastal nuclear power operation safety: Taking Ningde nuclear power as an Example[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2018..
- [4] 曾伟. 核电厂冷源取水防堵塞设计优化分析[C]//中国核科学技术进展报告(第五卷)——中国核学会2017年学术年会论文集第10册(核测试与分析分卷、核安全分卷). 北京: 中国核学会, 2017: 408-412.
ZENG Wei. Design optimization and analysis of the intake cooling water anti-blocking for nuclear power plants[R]// Progress Report on China Nuclear Science and Technology (Vol 5)—Chinese Nuclear Society 2017 Annual Conference Proceedings Volume 10 (Nuclear Testing and Analysis Sub-volume, Nuclear Safety Sub-volume). Beijing: China Nuclear Society, 2017: 408-412.
- [5] 张国辉, 宋和航, 穆阳阳. 北方核电厂取水口堵塞原因分析及改进措施评价[J]. 核动力工程, 2019, 40(5): 111-117.
ZHANG Guohui, SONG Hehang, MU Yangyang. Reason analysis and improvement measures evaluation for water intake blockage at northern nuclear power plants[J]. Nuclear Power Engineering, 2019, 40(5): 111-117.
- [6] 姜文斌, 俞志明, 曹西华, 等. 超声改性对不同粘土去除藻华生物效率的影响[J]. 海洋与湖沼, 2018, 49(3): 560-567.
JIANG Wenbin, YU Zhiming, CAO Xihua, et al. Effect of ultrasonic modification of different clays on algae removal efficiency[J]. Oceanologica et Limnologia Sinica, 2018, 49(3): 560-567.
- [7] 吴彦农, 王娅琦, 候秦脉, 等. 海洋异物堵塞核电厂取水系统事件的经验反馈[J]. 核安全, 2017, 16(1): 26-32.
WU Yannong, WANG Yaqi, HOU Qinmai, et al. Experience feedbacks on events of nuclear power plants cold source systems blocked by oceanic foreign matter[J]. Nuclear Safety, 2017, 16(1): 26-32.
- [8] 南卫, 罗丽娟, 马玉华, 等. 滨海核电厂冷却水过滤设备配置方案探讨[J]. 给水排水, 2018, 54(11): 57-59.
NAN Wei, LUO Lijuan, MA Yuhua, et al. Discussion on configuration scheme of cooling water filtering equipment in coastal nuclear power plants[J]. Water Supply and Drainage, 2018, 54(11): 57-59.
- [9] 阮国萍. 核电厂取水口堵塞原因分析与应对策略[J]. 核动力工程, 2015, 36(S1): 151-154.
RUAN Guoping. Reason analysis and corresponding strategy for cooling water intake blockage at nuclear power plants[J]. Nuclear Power Engineering, 2015, 36(S1): 151-154.
- [10] 国家核安全局. 红沿河核电厂4号机组因水母涌入导致循环水过滤系统鼓网压差高手动停堆运行事件[EB]. [2020-08-11]. https://nnsa.mee.gov.cn/ywdh/fyd/202304/t20230418_1027468.html.
National Nuclear Safety Administration. Circulating water filtration system drum differential master active shutdown operation event caused by influx of jellyfish from Unit 4 of the Hongyan Nuclear Power Plant[EB]. [2020-08-11]. https://nnsa.mee.gov.cn/ywdh/fyd/202304/t20230418_1027468.html.
- [11] 曾雷, 陈国宝, 王腾, 等. 大亚湾核电临近海域中国毛虾声学探测分析[J]. 中国水产科学, 2019, 26(6): 1029-1039.
ZENG Lei, CHEN Guobao, WANG Teng, et al. Acoustic detection and analysis of *Acetes chinensis* in the adjacent waters of the Daya Bay Nuclear Power Plant[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2019, 26(6): 1029-1039.
- [12] 国家核安全局. 关于通报海洋生物影响核电厂取水系统导致多机组停堆运行事件的函(国核安函〔2020〕27号)[EB/OL]. (2020-03-27) [2020-03-27]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk07/202003/t20200331_771924.html.
National Nuclear Safety Administration. Letter on Notification of an incident in which marine organisms affected the water intake system of a nuclear power plant, resulting in multiple unit shutdowns[EB/OL]. (2020-03-27) [2020-03-27]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk07/202003/t20200331_771924.html.
- [13] 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.
- LIU Hongyuan. Research on the importance of cold sources in nuclear power plants[J]. Industry and Technology Forum, 2019, 18(9): 69-70.
- [14] 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.
- CHEN Guangming, XU Chao. Systematic safeguard scheme for nuclear power plant cold source safety[J]. Power Security Technology, 2020, 22(10): 63-67.
- [15] 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.
- LI Jianwen, LIU Xiaolin, ZHANG Jinfei, et al. Research on marine biological detection technology to improve the safety of nuclear power plant cold source[J]. Power Security Technology, 2017, 19(10): 32-37.
- [16] 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, 54(2): 61-64.
- YU Fan, XU Botao, LI Yong, et al. Analysis on the impact of marine organism outbreak on the cold source system of nuclear power plant and discussion on countermeasures[J]. Water Supply and Drainage, 2018, 54(2): 61-64.
- [17] 国家核安全局. 关于 2015 年度下半年核电厂建造和调试质量事件与问题的通报(国核安发[2016]34号)[EB/OL]. (2016-03-24) [2016-04-25]. https://nnsa.mee.gov.cn/ywdh/fyd/202304/t20230418_1027388.html.
- National Nuclear Safety Administration. Notification on Quality Events and Problems of Nuclear Power Plant Construction and Commissioning in the Second Half of 2015[EB/OL]. (2016-03-24) [2016-04-25]. https://nnsa.mee.gov.cn/ywdh/fyd/202304/t20230418_1027388.html.
- [18] 贺立燕, 宋秀贤, 於凡, 等. 潜在影响防城港核电冷源系统的藻类暴发特点及其监测防控技术[J]. 海洋与湖沼, 2019, 50(3): 700-706.
- HE Liyan, SONG Xiuxian, YU Fan, et al. Potential risk and prevention of phytoplankton outbreak to water-cooling system in nuclear power plant in Fangchenggang, Guangxi[J]. Oceanologica et Limnologia Sinica, 2019, 50(3): 700-706.
- [19] 於凡, 许波涛, 吴昕, 等. 基于核电冷源安全的海洋生物调查及筛选评价方法研究[J]. 海洋环境科学, 2021, 40(1): 139-143.
- YU Fan, XU Botao, WU Xin, et al. Study on the method of marine organisms investigation, screening and evaluation based on nuclear power plant cold source safety[J]. Marine Environmental Science, 2021, 40(1): 139-143.
- [20] 中国能源研究会. 核电厂冷源安全分级预警规范 水母灾害(T/CERS 0009-2020)[S/OL]. 北京: 中国能源研究会, [2020-12-31]. <http://www.safehoo.com/Standard/society/202303/5698896.shtml>.
- China Energy Research Society. Specification for classified early warning code for nuclear power plant jellyfish disaster(T/CERS 0009-2020) [S/OL]. Beijing: China Energy Research Society, [2020-12-31]. <http://www.safehoo.com/Standard/society/202303/5698896.shtml>.
- [21] 程宏. 海地瓜(*Acaudina molpadioidea*)堵塞核电冷源成因分析及防控措施研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2018.
- CHENG Hong. Research on the causes, prevention and control measures of bio-blogging on nuclear power cold source water by *Acaudina Molpadioidea*[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2018.
- [22] 吕涛. 鉴于海生物爆发问题的核电厂冷源拦污网布置优化[J]. 自动化应用, 2017(12): 91, 130.
- LV Tao. Optimization of layout of nuclear power plant cold source trash screen in view of marine biological explosion[J]. Automation Application, 2017(12): 91, 130.
- [23] 孟亚辉, 刘磊, 郭显久, 等. 核电厂冷源海生物探测预警及决策支撑系统研究[J]. 大连海洋大学学报, 2018, 33(1): 108-112.
- MENG Yahui, LIU Lei, GUO Xianjiu, et al. An early—warning and decision—support system of marine organisms in a water cooling system in a nuclear power plant[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2018, 33(1): 108-112.

Classification and characteristics of the risk organisms in cold source water intake area of coastal nuclear power plants

SHEN Ping-ping¹, YU Xian-bo², MENG Bu-fan¹, WU Cun-chao¹

(1. Ocean School, Yantai University, Yantai 26400, China 5; 2. Shandong Nuclear Power Co., Ltd, Yantai 265116, China)

Received: Nov. 16, 2022

Key words: coastal nuclear power plant; water intake area; risk organisms; cold source safety

Abstract: In recent years, there have been frequent incidents related to cold source safety at nuclear power plants caused by marine organisms, indicating that cold source safety is an important factor that affects nuclear power safety and reliability. In this paper, the main incidents at a national and international level are analyzed to summarize the classification and characteristics of organisms that cause cooling-water system disasters, discuss the screening and grading of the early warning standards of these organisms, and analyze relevant detection technologies. Finally, the key scientific and technical problems needing urgent resolution are proposed to provide a reference and theoretical basis for better dealing with the safety problems of coastal nuclear power cold sources.

(本文编辑: 赵卫红)