某滨海核电厂冷源取水口生物调查及风险分析

郑碧琪[1,2,3]，刘 刚[3,4]，刘 炜[1,2,3]，程 宏[1,2,3]，单柳絮[1,2]，
黄 文[1,2,3]，刘怡君[1,2]，郑腾飞[3,4]，王庆业[1,2,3]，姜 倩[5]

（1.自然资源部宁德海洋中心，福建 宁德 352000；2.自然资源部海洋生态监测与修复技术重点实验室，上海 201206；3.滨海电厂海洋生态联合研究中心，福建 宁德 352000；4.福建宁德核电有限公司，福建 福鼎 355200；5.国家海洋环境监测中心，辽宁 大连 116023）

摘 要：近年来由海洋生物入侵造成的滨海核电冷源安全事件频发，为了解某核电厂取水口海域的生物概况，本研究于 2022 年 9 月至 2023 年 8 月进行了生物调查。共获得海洋生物 10 类 211 种，优势种以脊索动物和甲壳动物为主，5 月、7 月下旬至 8 月上旬出现 2 个生物量高峰期。风险生物有中国毛虾（*Acetes chinensis*）、中华假磷虾（*Pseudeuphausia sinica*）、日本鳀（*Engraulis japonicus*）、球型侧腕水母（*Pleurobrachia globosa*）等，并初步分析了日本鳀和中国毛虾在取水口海域激增的原因。本文明确了某核电冷源的生物风险期为 4—9 月，研究成果将有助于优化核电厂生物灾害的预警和防控工作。

关键词：风险生物；滨海核电厂；冷源安全
中图分类号：X835 **文献标识码：**A **文章编号：**1007-6336(2025)02-0257-09

Biological investigation and risk analysis around cooling water intake of a coastal nuclear power plant

ZHENG Biqi[1,2,3], LIU Gang[3,4], LIU Wei[1,2,3], CHENG Hong[1,2,3],
SHAN Liuxu[1,2], HUANG Wen[1,2,3], LIU Yijun[1,2], ZHENG Tengfei[3,4],
WANG Qingye[1,2,3], JIANG Qian[5]

(1.Ningde Marine Center, Ministry of Natural Resources, Ningde 352000, China; 2.Key Laboratory of Marine Ecological Monitoring and Restoration Technologies, Ministry of Natural Resources, Shanghai 201206, China; 3.Joint Research Center for Marine Ecology of Coastal NPP, Ningde 352000, China; 4.Fujian Ningde Nuclear Power Co., Ltd., Fuding 355200, China; 5.National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China)

Abstract: In recent years, incidents of marine bio-invasions have increasingly threatened the safety of cooling water system at coastal nuclear power plants (NPPs). In order to assess the biological profile of the sea area around a NPP, survey was conducted from September 2022 to August 2023. We identified a total of 211 species belonging to 10 classes of marine organisms, with chordates and crustaceans emerging as dominant species. Biomass exhibited two peaks, notably in May and late July to early August. Risky species included *Acetes chinensis*, *Pseudeuphausia sinica*, *Engraulis japonicus*, and *Pleurobrachia globosa*, etc. Here, we also analyzed the factors contributing to the surges of *Engraulis japonicus* and *Acetes chinensis* around cooling water intake.

收稿日期：2024-05-07，**修订日期：**2024-08-27
基金项目：自然资源部海洋生态监测与修复技术重点实验室开放研究基金课题（MEMRT202206）；自然资源部东海局青年海洋科学基金（2023180502，2024190303）
作者简介：郑碧琪（1989—），女，福建宁德人，工程师，硕士，主要从事海洋生物生态研究，E-mail：zhengbiqi@ecs.mnr.gov.cn
通信作者：刘 炜，男，高级工程师，主要从事海洋环境监测评价，E-mail：liuwei@ecs.mnr.gov.cn
姜 倩，女，高级工程师，主要从事海洋环境监测评价，E-mail：jiangqian@nmemc.org.cn

It was determined that the biological risk period for the cooling water system spans from April to September. These findings are instrumental in refining early warning and prevention systems against biological disasters at NPPs.

Key words: risky species; coastal nuclear power plant; cooling water safety

核能作为清洁低碳安全高效的能源, 在保障国家能源安全、推动能源转型、助力“碳达峰”“碳中和”等目标的实现中发挥着重要作用。目前国内的核电厂均沿海而建, 利用海水作为冷却水来带走机组运行产生的多余热量。而近年来, 滨海核电厂多次发生因海洋生物堵塞冷源取水系统, 导致核电机组降功率、停机、停堆的事件, 造成巨大经济损失和安全隐患[1-2]。

根据国家核安全局的网页公开信息以及有关的研究报道, 核电取水系统主要的致灾生物类群为水母、海藻/海草、虾群、鱼群等。国内的致灾物种有海月水母(*Aurelia aurita*)、球型棕囊藻(*Phaeocystis globosa*)、石莼(*Ulva* sp.)、海带(*Laminaria japonica*)、中国毛虾(*Acetes chinensis*)、花鲈(*Lateolabrax japonicus*)、尖笔帽螺(*Creseise acicula*)等[3-7], 国外的致灾物种有海月水母、加拿大伊乐藻(*Elodea canadensis*)、刚毛藻(*Cladophora* sp.)、太平洋磷虾(*Euphausia pacifica*)、梭形纽鳃樽(*Salpa fusiformis*)等[1-3]。本研究所在的核电厂也曾在 2015 年 8 月经历过海地瓜(*Acaudina molpadioides*)大规模进入取水系统, 最终导致三号机组反应堆停堆事件[8-9]。

目前有关核电冷源安全事件及致灾生物、致灾原因等已受到社会及业界高度关注, 一些学者也进行了风险生物相关研究[10-16], 然而各滨海核电厂的地理位置不同, 所处的海洋环境和周边的海洋生物有明显的地域性特点, 随即形成了不同的风险生物种类和风险期, 因此研究本海域海洋生物对核电冷源的风险具有重要意义。

本研究首次在核电取水口海域开展为期一年每周一次的生物调查, 旨在摸清取水口海域的生物组成、优势种类、一年的生物量变化等, 筛选出主要的风险生物, 并确定冷源风险期, 研究结果将有助于优化核电厂冷源生物灾害的预警和防控工作, 保障冷源安全。

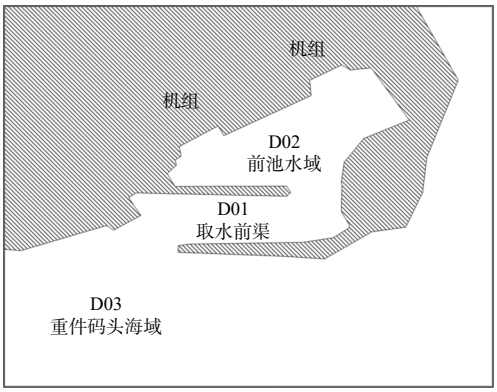
1 材料与方法

1.1 调查时间

2022 年 9 月至 2023 年 8 月, 在核电厂取水口海域开展海洋生物调查, 每周开展 1 次, 平均每月 4 次, 共开展了 48 次调查。

1.2 采样方法

在取水口海域设置了 3 个点位采集海洋生物, 即 D01、D02、D03(图 1)。D01: 在取水前渠布设一个固定的张网(网口面积 20 m^2, 网目前半部 1 cm、后半部 2 mm, 网衣长 12 m)用以收集生物, 单次收集时间 6 h; D02、D03: 分别在前池水域和重件码头海域采用单船拖网(网口面积 30 m^2, 网目前端至末端分别为 2 cm、1 cm、2 mm, 网衣长 15 m)采集水体中的生物, 拖网时间 0.5 h, 挑取网中生物。将三份样品分别标记冷藏送至实验室分析。



注: 空白部分为海水

图 1 调查站位

Fig. 1 Survey stations

1.3 分析方法

每批次样品首先进行分拣, 然后进行物种鉴定(主要为形态学物种鉴定)、称重、计数、长度测量等, 进一步分析种类组成、优势种, 并用 Excel 软件统计一年中的生物量变化等。

(1)称重: 用滤纸吸干生物表面水分后, 用电子天平称量湿重。

（2）长度测量：参考《海洋调查规范 第 6 部分：海洋生物调查》（GB/T 12763.6—2007）“游泳动物调查”章节中的相关测定方法[17]。鱼类——吻端至尾椎骨末端的长度（体长），第一背鳍基部至腹缘的垂直距离（体高）；虾类——眼窝后缘至尾节末端的长度（体长），头胸甲最高处背缘至腹缘的垂直距离（体高）；蟹类——头胸甲两侧刺之间的距离（头胸甲宽），头胸甲中央刺前端至头胸甲后缘的垂直距离（头胸甲长）；其他生物——充分伸展后测量最长/最宽/最高处。

（3）优势种的优势度（Y）计算公式如下：

$$Y=\frac{n_i}{N}\times f_i$$

式中：n_i 为每月样品中第 i 个种的个体数量；N 为每月样品中所有种的个体数量总和；f_i 为第 i 个种在当月各周样品中的出现频率；Y 大于 0.02 则为优势种[18]。

2　结果与讨论

2.1　种类组成

核电厂取水口海域一年中 3 个点位的调查共获得生物 211 种（表 1）。生物类群涵盖 10 个，分别为脊索动物、甲壳动物、软体动物、刺胞动物、栉水母动物、棘皮动物、环节动物、苔藓动物、纽形动物和藻类。其中脊索动物种类最为丰富，共 96 种，占种类组成的 45.50%；其次为甲壳动物 75 种，占比 35.55%；软体动物 25 种，占比 11.85%；其他类群种类较少。可见取水口海域的生物以脊索动物和甲壳动物为主。

表 1　种类组成

Tab.1　Species composition

类群	种类数	百分比/(%)
脊索动物	96	45.50
甲壳动物	75	35.55
软体动物	25	11.85
刺胞动物	4	1.90
棘皮动物	3	1.42
藻类	3	1.42
环节动物	2	0.95
栉水母动物	1	0.47
苔藓动物	1	0.47
纽形动物	1	0.47
合计	211	100.00

2.2　全年优势种

取水口海域每月优势种见表 2。全年脊索动物优势种有日本鳀（*Engraulis japonicus*）、拉氏狼牙虾虎鱼（*Odontamblyopus lacepedii*）、孔虾虎鱼（*Trypanuchen uagina*）、康氏小公鱼（*Stolephorus commersonii*）、棘头梅童鱼（*Collichthys lucidus*）、矛尾虾虎鱼（*Chaeturichthys stigmatias*）、白姑鱼（*Argyrosomus argentatus*）、黄鳍东方鲀（*Takifugu xanthopterus*）、青鳞小沙丁鱼（*Sardinella zunasi*）、鲻鱼（*Mugil cephalus*）等；甲壳动物优势种有中国毛虾、中华假磷虾（*Pseudeuphausia sinica*）、口虾蛄（*Oratosquilla oratoria*）、日本鼓虾（*Alpheus japonicus*）、细螯虾（*Leptochela*

表 2　2022 年 9 月至 2023 年 8 月生物优势种

Tab.2　Dominant species from September 2022 to August 2023

调查时间	D01（取水前渠张网）	D02（前池水域拖网）	D03（重建码头海域拖网）
2022年9月	口虾蛄、日本鼓虾	口虾蛄、日本蟳、纤手梭子蟹、细巧仿对虾、拉氏狼牙虾虎鱼、孔虾虎鱼、周氏新对虾	口虾蛄、日本蟳、纤手梭子蟹、拉氏狼牙虾虎鱼、孔虾虎鱼、白姑鱼、皮氏叫姑鱼、龙头鱼、中华管鞭虾
2022年10月	细巧仿对虾、日本鼓虾	哈氏仿对虾、中华管鞭虾、纤手梭子蟹、日本蟳、矛尾虾虎鱼、孔虾虎鱼、口虾蛄	日本蟳、口虾蛄、拉氏狼牙虾虎鱼、哈氏仿对虾、龙头鱼
2022年11月	康氏小公鱼、细巧仿对虾、绒毛细足蟹、细螯虾、龙头鱼	日本蟳、矛尾虾虎鱼、孔虾虎鱼、拉氏狼牙虾虎鱼、哈氏仿对虾、细巧仿对虾、葛氏长臂虾	日本蟳、拉氏狼牙虾虎鱼、矛尾虾虎鱼
2022年12月	细螯虾、细巧仿对虾、日本鼓虾、双凹鼓虾、绒毛细足蟹、康氏小公鱼、拉氏狼牙虾虎鱼	细巧仿对虾、孔虾虎鱼	拉氏狼牙虾虎鱼、孔虾虎鱼、日本蟳
2023年1月	日本鼓虾、绒毛细足蟹、康氏小公鱼、细巧仿对虾、拉氏狼牙虾虎鱼、中颌棱鳀	日本鼓虾	日本鼓虾、日本蟳
2023年2月	日本鼓虾、鞭腕虾、铲形宽额虾	日本蟳、脊尾白虾、日本鼓虾、孔虾虎鱼	皮氏叫姑鱼、日本蟳、日本鼓虾、矛尾虾虎鱼、拉氏狼牙虾虎鱼

续表

调查时间	D01(取水前渠张网)	D02(前池水域拖网)	D03(重建码头海域拖网)
2023年3月	棘头梅童鱼(稚鱼)、拉氏狼牙虾虎鱼、花鲈(稚鱼)、绒毛细足蟹	棘头梅童鱼(稚鱼)、孔虾虎鱼、日本蟳、皮氏叫姑鱼、日本鼓虾	棘头梅童鱼(稚鱼)、日本蟳、拉氏狼牙虾虎鱼、孔虾虎鱼、日本鼓虾、矛尾虾虎鱼
2023年4月	中华假磷虾、球型侧腕水母、中国毛虾、鳙鱼(稚鱼)、虾虎鱼(稚鱼)、日本鳀(稚鱼)、花鲈(稚鱼)、细螯虾、麦杆虫、日本鼓虾	球型侧腕水母、中华假磷虾、日本鳀(稚鱼)、虾虎鱼(稚鱼)、日本鼓虾、细巧仿对虾	球型侧腕水母、日本鳀(稚鱼)、虾虎鱼(稚鱼)、青鳞小沙丁鱼、中颌棱鳀、鲀科(稚鱼)
2023年5月	日本鳀(稚鱼/幼鱼)、球型侧腕水母、中华假磷虾、中国毛虾、麦杆虫、口虾蛄(幼体)、黄鳍东方鲀(稚鱼)、细螯虾、矛尾虾虎鱼(稚鱼)	日本鳀(稚鱼/幼鱼)、中华假磷虾、中国毛虾、球型侧腕水母、麦杆虫、口虾蛄(幼体)、黄鳍东方鲀(稚鱼)、矛尾虾虎鱼(稚鱼)、中华须鳗(幼鱼)、三疣梭子蟹(幼蟹)	日本鳀(稚鱼/幼鱼)、球型侧腕水母、中国毛虾、中华假磷虾、口虾蛄(幼体)、青鳞小沙丁鱼、黄鳍东方鲀(稚鱼)、银鲳(幼鱼)、矛尾虾虎鱼(幼鱼)、三疣梭子蟹(幼蟹)
2023年6月	麦杆虫、口虾蛄(幼体)、中国毛虾、中华假磷虾、绒毛近方蟹、黄鳍东方鲀(幼鱼)、矛尾虾虎鱼(幼鱼)、鳙鱼(幼鱼)、三疣梭子蟹(幼蟹)、青鳞小沙丁鱼	矛尾虾虎鱼(幼鱼)、白姑鱼(幼鱼)、哈氏仿对虾、口虾蛄、日本鼓虾、孔虾虎鱼	三疣梭子蟹、矛尾虾虎鱼(幼鱼)、白姑鱼(幼鱼)、口虾蛄、孔虾虎鱼、隆线强蟹
2023年7月	中国毛虾	中国毛虾、白姑鱼(幼鱼)、鞭腕虾、口虾蛄、纤手梭子蟹	中国毛虾、口虾蛄、白姑鱼(幼鱼)、哈氏仿对虾、三疣梭子蟹、纤手梭子蟹
2023年8月	中国毛虾	中国毛虾、白姑鱼、矛尾虾虎鱼、口虾蛄、哈氏仿对虾、鼓虾	中国毛虾、白姑鱼、口虾蛄、日本蟳、哈氏仿对虾、孔虾虎鱼

gracilis)、细巧仿对虾(*Parapenaeopsis tenella*)、哈氏仿对虾(*Parapenaeopsis hardwickii*)、日本蟳(*Charybdis japonica*)、绒毛细足蟹(*Raphidopus ciliatus*)、三疣梭子蟹(*Portunus trituberculatus*)、麦杆虫(Caprellidea und.)等;其他类优势种有球型侧腕水母(*Pleurobrachia globosa*)等(图 2)。

2.3 生物量变化

2022 年 9 月至 2023 年 8 月取水口生物重量和数量统计结果分别如图 3、图 4 所示,取水口海域全年大多数时候的生物捕获量平稳,通常在 1000 g/网、1000 ind/网以下,生物量不高;但 5 月、7 月下旬至 8 月上旬出现两个生物量

注: a.小型鱼类混杂; b.鱼虾蟹混杂; c.小型鱼虾混杂; d.主要为日本鳀(稚鱼/幼鱼); e.主要为中华假磷虾、中国毛虾、口虾蛄(幼体)混杂; f.主要为球型侧腕水母

图 2 样品照片

Fig. 2 Photos of samples

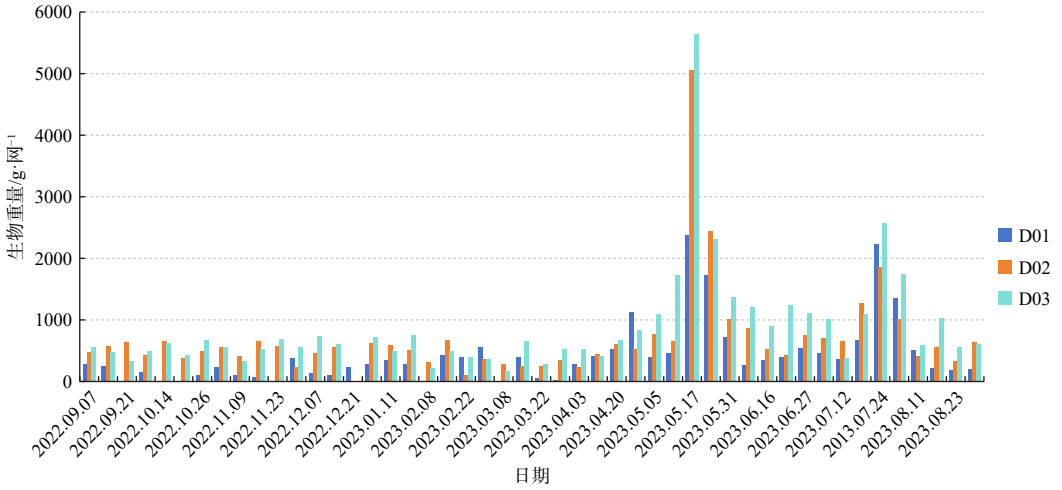


图 3　2022 年 9 月至 2023 年 8 月生物重量变化

Fig. 3　Annual variation in weight of Marine organisms from September 2022 to August 2023

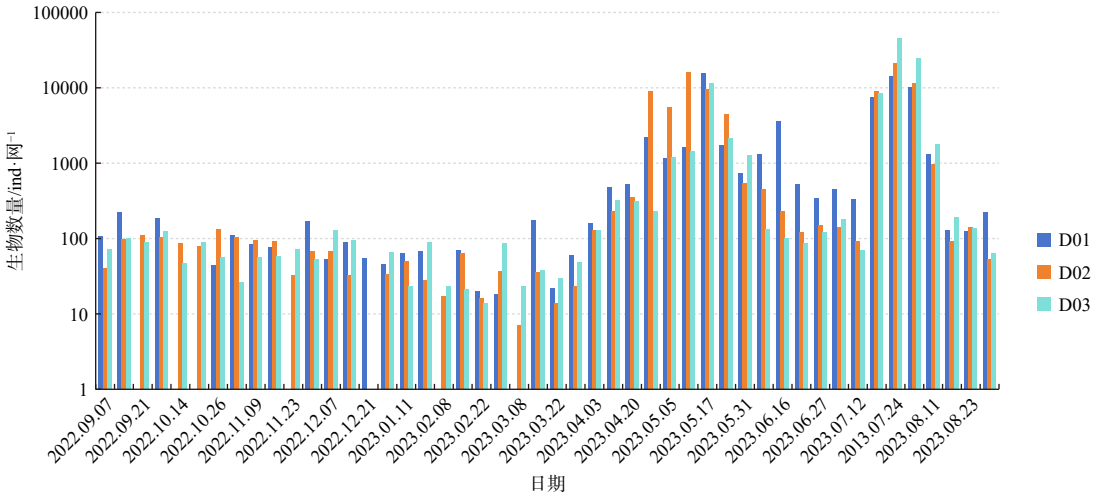


图 4　2022 年 9 月至 2023 年 8 月生物数量变化

Fig. 4　Annual variation in quantity of Marine organisms from September 2022 to August 2023

高峰期，最高时重量超过 5 kg/网、数量超过 1 万 ind/网。

2.4　生物量高峰期优势种

根据表 2 的取水口海域生物优势种分析结果，5 月生物量高峰期优势种主要为日本鳀（稚鱼/幼鱼）、球型侧腕水母、中国毛虾、中华假磷虾、口虾蛄（幼体）、青鳞小沙丁鱼、黄鳍东方鲀（稚鱼）、麦杆虫等，其中数量占比最高的生物为前 4 种，平均数量占比均超过 10%，平均体长均不足 40 mm，平均体高均小于 10 mm（表 3）；7 月

表 3　2023 年 5 月主要生物优势种数据

Tab.3　Data of the main dominant species in May 2023

物种	平均重量占比/(%)	平均数量占比/(%)	平均体长/mm	平均体高/mm
日本鳀(稚鱼/幼鱼)	53.4	43.9	33	6
球型侧腕水母	12.2	10.1	8(体宽)	9
中国毛虾	8.9	11.2	32	5
中华假磷虾	4.1	10.7	14	2

注：表中统计值包含D01、D02、D03点位的样品

下旬至 8 月上旬生物量高峰期的优势种为中国毛虾。

毛虾曾多次进入广东省核电站冷源取水系统，影响机组正常运行[3]，因此对中国毛虾进行重点分析。2023 年 4—8 月中国毛虾在核电取水口海域均有检出，高峰期有两个时间段，即 4 月下旬到 5 月中旬（春）、7 月下旬至 8 月上旬（夏），且后者数量明显多于前者（图 5）。D01 点位样品中，毛虾春季高峰期数量占比约 30%，夏季高峰期数量占比达 90%。4—5 月取水口毛虾群体平均体长 32 mm（范围 24 ~ 45 mm），平均体重 0.28 g（范围 0.21 ~ 0.59 g）；7—8 月毛虾个体较小，平均体长 15 mm（范围 12 ~ 32 mm），平均体重 0.03 g（范围 0.02 ~ 0.32 g）（表 4）。

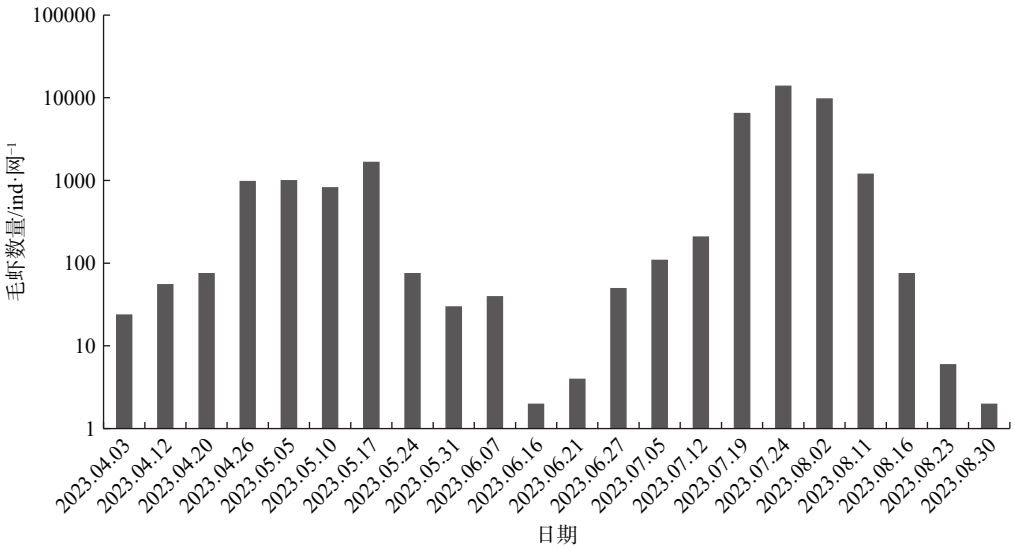


图 5 2023 年 4—8 月 D01 点位的中国毛虾数量变化

Fig. 5 Changes in the number of *Acetes chinensis* at D01 site from April to August 2023

表 4 2023 年中国毛虾的测量数据

Tab.4 Measured data of *Acetes chinensis* in 2023

要素	4、5月毛虾	7、8月毛虾
平均体长/mm	32	15
体长范围/mm	24 ~ 45	12 ~ 32
平均体重/g	0.28	0.03
体重范围/g	0.21 ~ 0.59	0.02 ~ 0.32

2.5 讨 论

2.5.1 主要优势种

2023 年核电厂取水口海域两个生物量高峰期的主要优势种为球型侧腕水母、中华假磷虾、日本鳀和中国毛虾。

（1）球型侧腕水母

球型侧腕水母在 5 月持续高丰度出现在取水口海域，平均重量占比 12.2%、平均数量占比 10.1%（表 3），并且在 4 月已是优势种。球型侧腕水母是我国东南近岸海域常见的一种栉水母，呈球型，胶质较厚，营浮游生活，数量多，分布广，尤其近海河口水域更为常见，是近岸浅海性种类[19]。

（2）中华假磷虾

2023 年 5 月 10 日出现“中华假磷虾”穿过机组泵房鼓网后进入辅助冷却水（SEN）过滤器堵塞网孔导致压差上涨的紧急情况，对冷源取水安全造成威胁。当日，中华假磷虾在前池（D02 点位）样品中的重量占比达 54.8%，数量占比高达 87.2%；而整个 5 月中华假磷虾平均重量

占比 4.1%，平均数量占比 10.7%（表 3）。可见，5 月 10 日中华假磷虾出现短时的高丰度期，可能与其有一定的聚集特性有关[20]。中华假磷虾属于海洋浮游动物，主要分布于东海和南黄海的我国近海海域，是沿岸低盐水域的优势种，近岸暖温种，是许多中上层鱼类，尤其是幼鱼的重要饵料[21]。

（3）日本鳀

日本鳀（稚鱼/幼鱼）为 5 月取水口海域生物量最高的物种，平均重量占比 53.4%、平均数量占比 43.9%（表 3），最高时单日重量占比达 81%、数量占比达 65%。

日本鳀为福建沿海常见的经济鱼类，闽东渔场产量较多。根据日本鳀的生活习性，春季随着水温回升，福建外海的日本鳀相继进入沿岸岛礁区附近产卵，4—6 月日本鳀稚鱼/幼鱼成群在沿海内湾和浅滩一带索饵，7—8 月在 40 m 等深线以浅海域索饵，秋后日本鳀洄游至外海越冬场，第二年再相继进入沿岸浅水区产卵[22-23]。2022 年 5 月和 2023 年 5 月连续两年在取水口海域捕获大量日本鳀，时间点与上述情况吻合，可见取水口的日本鳀资源密度变化与其习性息息相关。

（4）中国毛虾

中国毛虾在取水口海域有春、夏 2 个高峰期，即 4 月下旬到 5 月中旬、7 月下旬至 8 月上旬，夏季毛虾种群数量明显多于春季群体，但个体较小（图 5，表 4）。

根据陈立婧等和施仁德等对中国毛虾生活史和洄游习性的研究结果[24-25]，推测 4 月、5 月核电取水口的毛虾群为“越冬虾”洄游至沿岸海域繁殖产卵，随水流进入取水口，而 7、8 月毛虾群为春季毛虾产下的“第一世代毛虾”经过 2 ~ 3 个月的生长而形成的小毛虾群体，随浪流进入取水口海域。2023 年 9 月 11 日前后，在距核电站约 40 km 的外海（水深约 30 m）渔民捕获了大量毛虾。同期该核电站半径 10 km 海域范围内，调查结果显示毛虾生物量较少。可知秋季毛虾群向外海迁移，之后进入越冬场。

由此可见，取水口海域某些生物的资源密度变化与其生殖、洄游等习性息息相关，因此了解该海域优势种的习性、生活史等信息，有助于掌握生物的种群密度变化，对于冷源生物风险的预警和防控有指导意义。

2.5.2　冷源风险生物

近年来国内外滨海核电厂发生过多起因海洋生物引起的冷源安全事件[1-3]，根据这些事件及在核电厂的实际工作经验，本文总结冷源风险生物的特征。其一，个体大小，核电取水系统设有多道不同孔径的拦网和滤网，用以拦截生物或杂物，取水前渠的拦网最小网目为 10 mm，冷源泵房过滤系统孔径最小处为 2 mm，因此，小于 2 mm 的生物可通过整个取水系统，而 2 ~ 10 mm 大小的生物易进入泵房，形成潜在堵塞风险；其二，种群丰度，冷源过滤系统的滤网面积较大，必须有足够量的生物同时进入才可能造成堵塞，因而该海域生物的优势种类有潜在风险；其三，游泳能力，在取水口持续的定向水流作用下，游泳能力强的生物可自主回避拦网，而浮游动物、小型虾蟹、稚鱼幼鱼等生物游泳能力弱，易随水流进入取水系统。当某种生物同时满足以上三个条件时，极有可能造成冷源安全事件，即为“冷源风险生物”。

核电取水口海域一年中共获得生物 211 种，种类丰富，优势种以脊索动物和甲壳动物为主。

脊索动物优势种普遍个体较小（体高多在 40 mm 以下），特别是在 3—6 月取水口海域稚鱼/幼鱼（体高/体宽小于 10 mm）的种类和数量均较多（表 2），5 月更是出现大量日本鳀稚鱼/幼鱼（平均体长 33 mm、体高 6 mm）（表 3），并且在机组泵房也有截获。稚鱼幼鱼游泳能力有限，且个体小、数量多，易引发冷源系统异常。

甲壳动物优势种如中华假磷虾、中国毛虾、口虾蛄幼体、麦杆虫等，体长仅 10 ~ 30 mm、体高不足 6 mm。中华假磷虾在 2023 年 5 月 10 日进入本核电机组泵房过滤器，导致冷源异常；毛虾曾是造成我国南方滨海核电厂冷源安全事件的主要生物[3]；口虾蛄幼体个体透明，不易被发现；麦杆虫喜附着于拦网上，易造成水流不畅。它们都属于浮游动物，游泳能力差，个体小，极易堵塞取水系统。

水母曾多次入侵过我国北方某滨海核电站

及国外多个核电站[1-3]，是国内外公认的主要冷源风险生物类群之一。本核电站也曾发生过球型侧腕水母引起泵房过滤器压差上涨的情况。2023 年 4—5 月取水口海域持续捕获较多球型侧腕水母，平均体宽 8 mm、体高 9 mm(表 3)，浮游生活，易堵塞网孔。

海地瓜曾在 2015 年 8 月大量进入本核电取水系统[9]，自风险事件后，持续多年开展了海地瓜防治工作，已取得一定成效。一年中的调查结果显示，取水口海域的海地瓜种群密度已较低，并且 2016 年以来未再发生由海地瓜引起的冷源安全事件，因此本文认为当前海地瓜对冷源的风险较小。

综上，本研究核电厂的冷源风险生物有日本鳀稚鱼(幼鱼)、中华假磷虾、中国毛虾、球型侧腕水母、口虾蛄幼体、麦杆虫等。而中华假磷虾、中国毛虾、球型侧腕水母曾引发本核电或其他核电冷源系统工作异常，因此认为是“冷源高风险生物”。

2.5.3 冷源风险期

根据取水口海域一年中生物量监测结果及冷源高风险生物等因素，分析核电站冷源 12 个月的风险情况。本文将冷源风险等级划分为“高、中、低”三级，“高风险月份”为取水口海域生物优势种出现冷源高风险生物(中华假磷虾、中国毛虾、球型侧腕水母)，并且生物总量高的月份；“中风险月份”为取水口海域生物优势种出现“冷源高风险生物”，或者浮游动物总量较高的月份；“低风险月份”为取水口海域生物优势种无“冷源高风险生物”，且生物总量较低的月份。

5 月全月、7 月下旬至 8 月上旬是取水口海域全年的生物量高峰期，5 月优势种出现 3 种高风险生物，多种生物风险叠加，7、8 月主要优势种为中国毛虾，因此 5 月、7 月、8 月为“高风险月份”；4 月优势种也出现 3 种高风险生物，并且随着水温的回升(4 月取水口海域平均水温约为 18 ℃)，生物的生长繁殖加快，水体中的生物量呈上升趋势，因此 4 月为“中风险月份”；6 月优势种中有 2 种高风险生物(中国毛虾、中华假磷虾)，因此 6 月也为“中风险月份”；9 月核电周边海域平均水温约为 27 ℃，根据该海域历史数据，浮游动物总量依然较高，另外 9 月仍是台风期，台风过程中特殊的水文、水动力等情况可能引起生物的异常[26]，因此 9 月为“中风险月份”；1—3 月、10—12 月取水口海域优势种无高风险生物，生物总量也较少，并且水温较低不利于生物的生长繁殖，冷源风险较小，为“低风险月份”(表 5、表 6)。此外，5—8 月为该海域的禁渔期，期间海洋生物资源受人类干扰减小，生物丰度在一定程度上增长加快，因而进入取水口海域的生物量可能增加。综上所述，核电的冷源风险期为 4—9 月，此期间取水口应加强风险生物的预警和防控措施。

表 5 核电冷源系统的月风险等级

Tab.5 Monthly risk level of the cooling water system at NPP

月份	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
风险等级	低	低	低	中	高	中	高	高	中	低	低	低

表 6 4—9 月主要的冷源风险生物

Tab.6 Major risky species of the cooling water system from April to September

月份	主要的冷源风险生物
4月	球型侧腕水母、中华假磷虾、中国毛虾、多种稚鱼
5月	中华假磷虾、中国毛虾、球型侧腕水母、日本鳀(稚鱼/幼鱼)、麦杆虫、口虾蛄(幼体)、其他稚鱼幼鱼
6月	麦杆虫、口虾蛄(幼体)、中国毛虾、中华假磷虾
7月	中国毛虾
8月	中国毛虾
9月	浮游动物

3 结 论

（1）核电取水口海域生物种类丰富，为期一年的调查共鉴定海洋生物 211 种，优势种以脊索动物和甲壳动物为主。一年中取水口有两个生物量高峰期，即 5 月、7 月下旬至 8 月上旬，此期间日本鳀和中国毛虾在取水口海域激增与其生殖、洄游习性相关。

（2）根据生物个体大小、种群丰度、游泳能力，筛选出多种冷源风险生物，其中中国毛虾、中华假磷虾、球型侧腕水母为冷源高风险生物，它们曾引发本核电或其他核电冷源系统工作异常。

（3）将冷源风险等级划分为“高、中、低”三级，1—3 月、10—12 月为低风险月份，4 月、6 月、9 月为中风险月份，5 月、7 月、8 月为高风险月份，因此核电冷源风险期为 4—9 月，在此期间应加强风险生物的预警和监测措施，保障取水安全。

参考文献：

[1] LIN H S, ZHANG S Y, CAO R R, et al. A review on the risk, prevention and control of cooling water intake blockage in coastal nuclear power plants[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2024, 56(2): 389-401.

[2] 韩　瑞, 纪　平, 赵懿珺, 等. 滨海核电厂取水堵塞事件调研及分析 [J]. 给水排水, 2018, 54(增刊 1): 75-80.

[3] 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.

[4] 杨少锋, 阮晨杰, 徐　维, 等. 基于阳江核电厂水母暴发期间增设水母网效果的研究 [J]. 核安全, 2022, 21(3): 33-37.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 齐占会, 史荣君, 戴　明, 等. 尖笔帽螺 (*Creseis acicula*) 研究进展及其在大亚湾暴发机制初探 [J]. 热带海洋学报, 2021, 40(5): 147-152.

[8] 郑碧琪, 季　晓, 夏永健, 等. 福建海域海地瓜 (*Acaudina molpadioides*) 形态特征及系统发育的初步分析 [J]. 海洋通报, 2022, 41(4): 427-435.

[9] 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.

[10] 聂洪臣, 田新华, 杨　璐, 等. 2021 年辽东湾东部核电站冷源取水区风险生物监测 [J]. 海洋环境科学, 2022, 41(3): 430-436.

[11] 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.

[12] 张文斌, 孙　伟, 许　歆, 等. 某核电厂附近海域生态环境特征及潜在致灾生物研究 [J]. 海洋科学, 2022, 46(7): 32-43.

[13] 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.

[14] FU X C, DU F L, PU X, et al. Analysis on critical factors of marine organism impacts on water intake safety at nuclear power plants[J]. Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science, 2020, 6(4): 041101.

[15] WANG Y, CHEN X Y, LIN Y Y, et al. Potential risk from and prevention of phytoplankton outbreaks in blocking the cooling water system in a nuclear power plant on the Southeast China coast[J]. Frontiers in Marine Science, 2022, 9: 1034876.

[16] AN L N, WANG L, OU D Y, et al. The ecological mechanisms of *Acetes* blooms as a threat to the security of cooling systems in coastal nuclear power plants[J]. Journal of Coastal Conservation, 2021, 25(6): 55.

[17] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 海洋调查规范 第 6 部分: 海洋生物调查: GB/T 12763.6—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

[18] 徐兆礼, 陈亚瞿. 东黄海秋季浮游动物优势种聚集强度与鲐鲹渔场的关系 [J]. 生态学杂志, 1989(4): 13-15,19.

[19] 张金标. 我国东南近岸海域球型侧腕水母的分布和丰度 [J]. 海洋学报, 1983(增刊 1): 840-846.

[20] 徐兆礼, 陈亚瞿. 东海磷虾类优势种的生态适应 [J]. 生态学报, 2005, 25(9): 2227-2233.

[21] 陶振铖, 李超伦, 孙　松. 黄海海域中华假磷虾的种群特征和分布及其与环境因子的关系 [J]. 水产学报, 2013, 37(12): 1782-1794.

[22]《福建鱼类志》编写组. 福建鱼类志 (上卷)[M]. 福州: 福建科学技术出版社, 1984: 141–142.

[23] 周永东, 李圣法. 东海区主要经济种类三场一通道及保护区图集 [M]. 北京: 海洋出版社, 2018: 62–63.

[24] 施仁德. 浙南近海中国毛虾 *Acetes chinensis* Hansen 的洄游分布及世代交替 [J]. 东海海洋, 1986(1): 56-61.

[25] 陈立婧, 杨　帆, 仲霞铭, 等. 中国毛虾生活史研究进展 [J]. 上海海洋大学学报, 2022, 31(5): 1032-1040.

[26] 李晶晶, 史本伟, 彭　忠, 等. 台风“梅花”对潮滩大型底栖动物群落的影响研究 [J]. 海洋学报, 2024, 46(7): 29-40,

（本文编辑：曲丽梅）