

中文引用格式:林武辉,杜金秋,拓飞,等. 新形势下海洋核安全演进及评估技术[J]. 中国安全科学学报,2025,35(5):82-90.

英文引用格式:LIN Wuhui, DU Jinqiu, TUO Fei, et al. Evolution and assessment techniques of marine nuclear safety under new situation[J]. China Safety Science Journal, 2025,35(5):82-90.

新形势下海洋核安全演进及评估技术^{*}

林武辉¹教授,杜金秋²副研究员,拓飞^{**3}研究员,
曹少飞⁴副研究员,王一潼⁵,胡王江⁶讲师

(1 集美大学 港口与海岸工程学院,福建 厦门 361021;2 国家海洋环境监测中心,辽宁 大连 116023;
3 中国疾病预防控制中心 辐射防护与核安全医学所,北京 100088;4 中国辐射防护研究院,
山西 太原 030006;5 广西大学 海洋学院,广西 南宁 530004;6 国防科技大学
气象海洋学院,湖南 长沙 410073)

中图分类号:X945;X837

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.05.0463

基金项目:国家自然科学基金资助(42276044);广西自然科学基金资助(2024GXNSFAA010449);中国辐射防护研究院平台开放基金资助(ZFYHHJMN-2024003);福建省环保科技计划项目(2025R004)。

【摘要】 为保护人类健康、海洋环境及生物的辐射安全、维护海洋生物多样性和生态服务功能,通过系统梳理安全、海洋安全、核安全到海洋核安全的概念演进及内涵范畴;提出不同人为源项的放射性核素泄漏入海后本底基线法、活度限值法、剂量限值法和辐射风险法等4种评估方法的优缺点和适用条件,以构建适用于我国管理需求的海洋核安全评估技术体系;从“大食物观”视野下海产品中核素溯源-富集-传递及核安全评估、海洋生物辐射剂量评估与保护、生态系统视角下放射性核素驱动多种污染物协同效应3个关键领域出发,探讨未来海洋核安全评估保障技术的发展和建设。总之,系统考究并提出海洋核安全概念与内涵范畴及目的,探索4种评估方法的优势与适用场景以满足核安全管理体系的多层次综合需求,在未来气候变化和人类活动背景下提炼3个关键领域有望保障海洋核安全评估技术高质量发展。

【关键词】 海洋核安全; 评估技术; 放射性核素; 福岛核污染水; 海产品; 核电站

Evolution and assessment techniques of marine nuclear safety under new situation

LIN Wuhui¹, DU Jinqiu², TUO Fei³, CAO Shaofei⁴, WANG Yitong⁵, HU Wangjiang⁶

(1 College of Harbour and Coastal Engineering, Jimei University, Xiamen Fujian 361021, China;

2 National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian Liaoning 116023, China;

3 National Institute for Radiological Protection, Chinese Center for Disease Control and Prevention, Beijing 100088, China; 4 China Institute for Radiation Protection, Taiyuan Shanxi 030006, China; 5 School of Marine Sciences, Guangxi University, Nanning Guangxi 530004, China; 6 School of Meteorology and Oceanography, National

University of Defense Technology, Changsha Hunan 410073, China)

^{*} 文章编号:1003-3033(2025)05-0082-09; 收稿日期:2025-01-11; 修稿日期:2025-03-14

^{**} 通信作者:拓飞(1980—),男,甘肃庆阳人,博士,研究员,主要从事 γ 能谱分析、食品和环境放射性监测等应用方面的研究。E-mail: flytuo@163.com。

Abstract: In order to constrain the definition and scope of marine nuclear safety and to ultimately support the comprehensive objectives of protecting human health, guaranteeing radiation safety for the marine environment and organisms, and maintaining marine biodiversity and ecological service functions, the evolving concepts from safety, marine safety, and nuclear safety, to marine nuclear safety were comprehensively tracked. Assessing techniques of marine nuclear safety including background baseline method, activity limit method, dose limit method, and radiation risk method were established to evaluate the discharging of artificial radionuclides into the ocean. To protect human health and ecological and environmental safety, priority directions including source identification, bioconcentration, and transfer of radionuclides and their associated nuclear safety assessment in seafood based on "Big Food Concept", assessment of radiation dose on marine biotas and protection, and radionuclides-driven synergistic effects of multiple pollutants were proposed and suggested for the future development of marine nuclear safety. In summary, this study systematically examines the conceptual framework and scope of marine nuclear safety, evaluates the advantages and applicability of four assessment methodologies to address multi-level nuclear safety management needs, and identifies three key research directions to advance the high-quality development of marine nuclear safety assessment technologies in the context of climate change and human activity.

Keywords: marine nuclear safety; assessment techniques; radionuclide; Fukushima-contaminated water; seafood; nuclear power plant

0 引言

自20世纪40年代以来,人类在利用核能过程中产生大量人工放射性核素,并通过有意排放和无意泄漏进入环境^[1-2]。超过400多次的大气核试验产生69%的人工放射性核素¹³⁷Cs(780 PBq)直接沉降进入海洋^[3],部分沉降进入陆地环境中的人工放射性核素通过河流和地下水持续不断输入海洋^[4-5];过去60多年来,英国和法国的乏燃料后处理厂也一直向北大西洋和北冰洋排放¹³⁷Cs、¹²⁹I、²³⁶U等人工放射性核素^[6];福岛核事故泄漏的放射性核素总量的80%最终进入太平洋^[7]。

时至今日,核污染最严重的福岛第一核电站港口区仍然持续泄漏人工放射性核素进入海洋^[8]。2023年8月24号,日本政府启动福岛核污染水排海计划,福岛来源的人工放射性核素通过海洋水动力过程迁移扩散至全球海域,同时,将被海洋生物富集吸收后通过食物链传递,对人类健康构成一定威胁,引起全球公众对海洋生态环境健康的担忧^[9]。我国政府和公众高度关注福岛核污染水排海计划。福岛核污染相关网络词条频繁冲上热搜,对国内外海产品行业造成一定影响^[10-12]。

海洋占地球表面积70.8%,是人工放射性核素的重要归宿。在福岛核污染水排海导致涉核舆情更加敏感而脆弱的背景下,海洋核安全评估与管理引起政府和公众的广泛关注。然而,海洋核安全的定

义和内涵范畴仍然较为模糊,相关评估技术也缺乏系统探索。

鉴于此,笔者拟系统梳理安全、海洋安全、核安全到海洋核安全概念的演进,探讨海洋核安全的定义、内涵、范畴、目的,从保护人类健康与海洋生态环境安全目标出发,聚焦核反应失控或其他涉核活动导致放射性物质泄漏入海后的海洋核安全评估技术体系,提出“大食物观”视野下海产品中核素溯源-富集-传递及核安全评估、海洋生物辐射剂量评估与保护、生态系统视角下放射性核素驱动多种污染物协同效应等发展建议,以夯实海洋核安全保障技术根基,丰富和完善现代化核安全监管体系,保障核事业高质量发展。

1 海洋核安全的演进及内涵特征

1.1 安全、海洋安全及核安全的定义辨析

“安全”概念至今未形成一个普遍统一的准确定义^[13]。“安全”的对立状态为“危险”,可通过间接定义为“没有危险和没有损害”,包含客观状态下的安全性与主观感受上的安全感^[14],体现客观性和主观性的双重特征。《职业健康安全管理体系》(GB/T28001)中将安全定义为“免除了不可接受的损害风险的状态”;国际民航组织给出安全定义为“安全是一种状态,即通过持续的危险识别和风险管理过程,将人员伤害和财产损失的风险降低并保

持在可接受的水平或其以下”^[15]。从上述不同行业的实际操作过程中的定义可以看出,安全是相对概念,需要在一定的风险条件下考虑安全问题,不存在绝对安全,具有相对性的特征。特别注意,安全程度非必要性的过度拔高可能导致生产成本上升和经济效益下降。因此,现实中需要平衡安全性和经济性,如“合理、可行、尽量低”的核安全目标^[16],呈现出合理性的特征。

“安全”需要依附于一定的主体,并反映客观状态与存在。当主体为“国家”,便产生“国家安全”概念;当主体为“海洋”,便产生“海洋安全”概念;当主体为“核能与核技术利用”,便产生“核安全”概念。“安全”需要放在具体的客观环境中进行比较,孤立地讨论其安全与否无法得到有意义的结论;“安全”的维护包含一系列过程行为和相关要素,具备系统性的特征,并在特定的时空维度中演进、延伸及发展,呈现时空性的特征,以服务可持续、持久的安全需求。综上,安全具有客观性、主观性、相对性、合理性、系统性、时空性等重要特征。

海洋是地球气候的重要调节器,为人类生存和发展提供重要的资源和生态服务功能^[17]。海洋安全是指国家的海洋权益不受侵害或遭遇风险的状态^[18],涉及历史、政治、经济、外交、军事、国际法、海洋法等多个领域,其内涵随着时代发展而不断补充完善,从传统的军事安全、主权安全、航运安全、治安安全等,进一步丰富和发展延伸至海洋经济安全、海洋政治安全、海洋社会安全、海洋文化安全、海洋生态安全、海洋科技安全、海洋国防安全等更为全面综合、系统且可持续的现代海洋安全体系^[13,19]。

我国海洋管辖面积超过 300 万 km²,大陆海岸线超过 1.8 万 km²。同时,与我国共享海洋的相邻和相向国家较多,除渤海的内海外,黄海、东海、南海均存在不同程度的海洋划界纷争、岛屿争端、海洋资源(渔业资源、油气资源、矿产资源等)开发、利用、管理等纠纷。在新时代加快建设海洋强国战略背景下,海洋安全作为国家安全的重要组成,其重要性不言而喻。

核安全是指核能和核技术利用这一主体和领域所涉及的安全问题。国际原子能机构(International Atomic Energy Agency, IAEA)2011 版的《核法律手册》提出“N3S”概念作为该手册的指导方针,即包含核安全(Nuclear Safety)、核安保(Nuclear Security)、核保障(Nuclear Safeguard)。广义的核安全包含“N3S”;而狭义的核安全主要指 Nuclear Safety^[15]。

三者之间在涉核内涵范畴上既有所差异,在核威胁后果上又相互联动。

由此可见:广义的核安全还包含核安保和核保障。核安保是指防止、侦查和应对涉及核材料和其他放射性物质或相关设施的偷窃、蓄意破坏、未经授权的接触、非法转让或其他恶意行为,主要是人为引起的涉核恐怖活动^[20];核保障指通过核材料的有效控制,确保其不用于非和平目的,主要是防止核武器扩散为基本目的^[15]。

狭义的核安全至今仍有争论^[16]。在《国际原子能机构安全术语》中,核安全定义为“实现正常的运行工况,防止事故发生或减轻事故后果,从而保护工作人员、公众和环境免受不正当的辐射危害”。IAEA 将核安全分为核动力设施安全、辐射防护和核废物安全 3 大类。在法国《核信息透明与安全法》中,核安全指所有为了预防事故或限制其后果所采取的与基本核设施设计、建造、运行、关闭、退役和放射性物质运输有关的技术安排和组织措施。在《中华人民共和国核安全法》中,定义核安全法范围为“对核设施、核材料及相关放射性废物采取的预防、保护、缓解和监管等安全措施,防止由于技术原因、人为原因、或自然灾害造成核事故,最大限度减轻核事故情况下的放射性后果的活动”。综合来看,笔者认为狭义的核安全是指采取适当措施确保核设施、核活动、核材料和放射性物质的安全,保护人类和环境免受电离辐射危害,包含核设施安全、核材料安全、辐射安全、放射性废物管理安全和放射性物质运输安全等涉及的所有科学理论、技术和管理措施的总和。这些措施应包含预防、监测、保护、缓解、应急等全方位、多层次的整体过程^[21]。

核安全是核能发展与核技术利用的生命线。核安全的学科发展也伴随着核电发展和几次重大核事故的发生,具体分为全球核电发展初期、美国三哩岛核事故后、切尔诺贝利核事故后、福岛核事故后 4 个阶段^[21]。在核安全发展的关键历程中,1986 年切尔诺贝利核事故后 IAEA 首次提出“安全文化”的概念,在 1991 年发表名为《安全文化》的报告(INSAG-4)中进一步完善,逐步演化延伸至其他高风险的关键行业领域^[21];IAEA 在 1994 年通过《核安全公约》,缔约国超过 70 多个,包含拥有运行核电机组的所有国家;IAEA 在福岛核事故后的 2011 年 9 月进一步通过《核安全行动计划》。

我国高度重视核安全。早在我国发展核与辐射事业的初期,就提出“安全第一、质量第一”的方

针^[22]。自1982年我国开始研究核安全法规的编制,1984年成立国家核安全局,我国已经构建法律、法令条例、部门规章、标准规范、技术导则等不同层次的核安全制度体系^[23],以保护人类和环境免受电离辐射危害。特别是我国在2003年颁布实施《中华人民共和国放射性污染防治法》,2014年习近平总书记在荷兰海牙的第三届核安全峰会上提出坚持“理性、协调、并进”的中国核安全观,2017年颁布并在2018年开始实施《中华人民共和国核安全法》,2019年9月发布《中国的核安全》白皮书等重大的标志性事件。中国自第一座核电站建造开始,持续开展核安全文化的建设与评估工作,发布《核安全文化政策声明》《核安全文化特征》《卓越核安全文化基本原则》等文件,已经建立中国核安全与环境文化促进会,不断推进编制核安全文化相关程序性文件;以中国核能电力股份有限公司为代表,出版《中国核电核安全文化建设历程》专著^[24],总结中国核电核安全文化特色实践和经验,推动核安全文化的发展,为世界范围内的核安全文化贡献中国方案。

1.2 海洋核安全的演进

核安全和深海安全是总体国家安全观的有机组成,“二十大”报告中也明确指出“强化……核、太空、海洋等安全保障体系建设”。在加快建设海洋强国战略背景下,海洋核安全也应该是国家安全保障体系的重要环节。

截至2024年12月31日,我国(不含中国台湾地区)运行核电机组共57台,均为滨海核电站,分布于渤海、黄海、东海、南海的海岸带。在正常运行状态下,核电站将排放一定量的人工放射性核素(如 ^3H 、 ^{14}C 、 ^{137}Cs 等)进入海洋^[25-26]。在核事故状态下,日本福岛核事故以来产生的大量人工放射性核素持续不断地进入太平洋^[9,27],并已经在2014年前后通过海洋环流进入我国东海和南海的部分海域^[28]。

福岛核污染水排海预计持续30年^[29-30],海洋数值模拟显示,福岛核污染水将通过海洋环流逐步迁移扩散至全球海域,未来也将进入我国海域^[31-32]。此外,2021年美国“康涅狄格”号核潜艇在南海发生碰撞事件^[33];2021年美、英、澳成立三边安全伙伴关系,澳将借助美英力量拥有核潜艇^[34];2022年佩洛西窜访中国台湾期间,美国“里根”号核动力航母长时间在南海航行^[35-36](图1);2023年12月的第28届联合国气候大会上,美英法等22国发起《三倍核能宣言》,拟推进实现到2050年将

全球核能装机容量较2020年增加2倍的目标,滨海核电产生的液态流出物及其人工放射性核素排放入海的总量和类型也将进一步增加;国际上海洋核动力平台研究也正紧锣密鼓地开展^[37-38],以俄罗斯为代表的世界上首座海上漂浮型核电站“罗蒙诺索夫号”也已经投入北冰洋海域使用^[16,38]。在变乱交织的国际新形势下,我国周边海域日益频繁的核动力航母和核潜艇活动也有可能增加海洋核污染风险(图1)。

海洋是放射性核素的重要归宿。2023年《中华人民共和国海洋环境保护法》中首次新增“加强海洋辐射环境监测”。2023年12月发布的《中共中央国务院关于全面推进美丽中国建设的意见》再次强调加强我国管辖海域海洋辐射环境监测和研究,把核安全等作为国家基础研究和科技创新的重点领域。因此,在我国滨海核电积极安全有序发展与海洋核动力平台研发日益兴起的内部环境和日本福岛核污染水排海、“康涅狄格”号核潜艇南海碰撞事件等日益复杂的外部国际新形势下,海洋核安全具有重要的研究意义和强烈的国家需求。

海洋核安全应该是建立在海洋安全和核安全的双重基础之上,由于海洋跨界流动且连通的巨大空间环境,拥有独特的海洋核安全特征、技术、管理等属性。除滨海核电站和滨海乏燃料后处理厂外,海上核设施还包含核动力航母、核潜艇、核动力舰船、漂浮型核电站等带来的海洋核安全问题^[38]。此外,海洋核安全还涉及核材料与放射性废物的海上运输;历史遗留的核废物海底填埋、历史上的太平洋/北冰洋/印度洋等海岛核试验场、核事故后海洋核污染、航天航空核动力装置坠海、日本福岛核污染水排海、滨海核电/乏燃料后处理厂运行和退役过程中异常工况下人工放射性核素泄漏入海、医用人工放射性核素泄漏入海、海洋油气和矿产资源开发过程中伴生的天然放射性物质(Naturally Occurring Radioactive Material, NORM)引发天然照射等范畴。

为此,海洋核安全是指采取系列措施保障滨海核设施和海上涉核活动安全,其目的是保护人类和海洋环境免受电离辐射危害。滨海核设施和海上涉核活动类型多样^[38],导致放射性核素源项千差万别^[39],海洋核安全需要重点关注核反应失控或其他涉核活动导致的放射性物质泄漏后果,构建不同事件/事故状态下放射性物质泄漏入海后的海洋核污染评估技术体系。相比陆地,海洋核污染所导致的人类直接暴露风险(包含暴露人群、暴露途径、暴露时间等)总体相对较小;为此,除保障人类健康,保

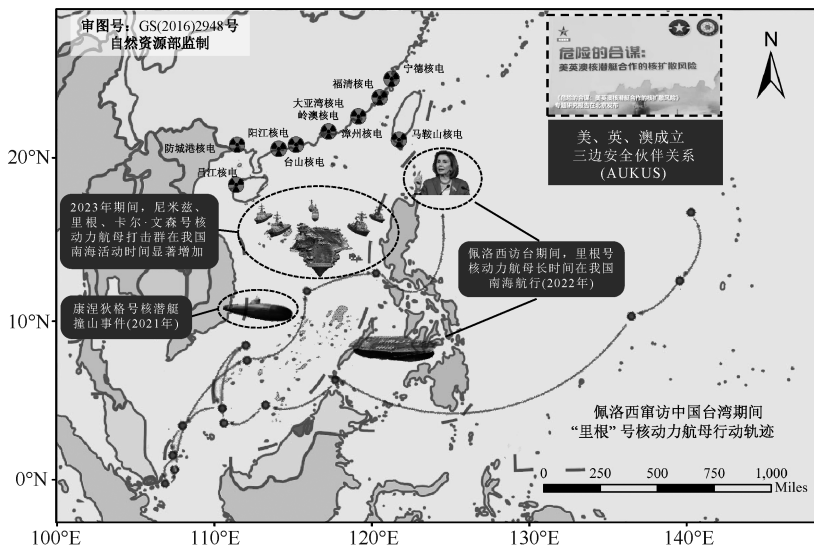


图1 我国周边海域的核动力航母和核潜艇活动^[33-36],以及部分滨海核电分布

Fig. 1 Footprints of nuclear-powered aircraft carriers and nuclear submarines in the China seas and adjacent ocean, and some coastal nuclear power plants in China

护海洋环境及其生物的辐射安全、维护海洋生物多样性和生态服务功能应是海洋核安全相对于传统核安全亟需加强和完善的领域。

2 海洋核安全评估技术体系构建

从保护人类健康和海洋生态环境安全的目标出发,放射性核素泄漏入海后的海洋核安全评估技术是海洋核安全的关键环节。不同于元素和同位素的常见表征方式,活度与剂量是定量表征放射性核素的独特物理量。在海洋核安全评估中,活度浓度和剂量率是重要的定量参数,对应常见单位为 Bq/m^3 (或 Bq/kg) 和 Gy/h (或 Sv/h)。放射性核素衰变产生电离辐射所致癌症风险也是利益相关方和政府管理者关注的重要参数。为此,提出本底基线法、活度限值法、剂量限值法和辐射风险法开展海洋核安全评估,并讨论各自优点和适用场景。

2.1 本底基线法

自 20 世纪中叶以来,人类在核能发展与核技术利用的进程中已经产生大量的人工放射性核素^[1]。其释放进入地球环境中的长半衰期人工放射性核素 (如 $^{239,240}\text{Pu}$ 、 ^{137}Cs 等) 甚至被视为定义“人类世”(继全新世后,人类活动作为重要地质营力所主导的地质新时代) 的重要代用指标^[1-2]。全面构建海洋中放射性核素本底的时空演化体系,准确掌握海洋中人工放射性核素的历史本底基线水平,是进一步精准甄别溯源人为新增放射性核素和开展海洋核安全评估的前提。

短半衰期的人工放射性核素 (如 ^{131}I 、 ^{134}Cs 、 ^{106}Ru 、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 等) 通常不存在于天然环境本底之中,其定性或定量的异常检出可直接指示短期内人为新增的海洋核污染源 (如核事故、核潜艇活动、核医学排放等)。中长半衰期的人工放射性核素 (如 ^{90}Sr 、 ^{137}Cs 、 $^{239,240}\text{Pu}$ 、 ^{129}I 等) 则需要考虑人类核活动的历史排放而残留的本底基线的时空演化特征后,借鉴人为新增信号与本底噪声处理技术,开展人为新增海洋核污染源的定量甄别。此外,核素活度比值 (如 $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 、 $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$ 等)、原子比值 (如 $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 、 $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 等)、三角图解 (如 ^{238}U - ^{232}Th - $^{40}\text{K}/10$) 等也常作为核素特征指纹,指示判别不同类型的人类核活动源项。该方法的优点是海洋中所有人工放射性核素评估理论均可采用本底基线法,前提是需要建立特定海区中目标核素的历史本底基线。但是实际操作过程中,本底基线法在巨大海洋时空环境中往往受限于目标核素数据时空分辨率不足,甚至数据缺失。未来实时-在线-长期连续的多场景 (如远洋、深海等极端环境) 辐射观测技术、基于有限观测数据的超级计算机模拟预报技术、海洋数字孪生技术、人工智能算法等新技术应用可能,可弥补时空分辨率不足和数据缺失等问题。

2.2 活度限值法

不同种类的放射性核素存在不同程度的放射毒性,如极毒组的 ^{239}Pu 、高毒组的 ^{90}Sr 、中毒组的 ^{137}Cs 、低毒组的 ^3H 等。在海洋核安全评估过程中,法律法规和标准规程等对海洋中不同毒性的放射性核素活

度限值做出了一些规定^[40-41]。如福岛核事故后日本规定海产品中¹³⁴⁺¹³⁷Cs和²³⁹Pu的活度限值分别为100和10 Bq/kg^[9]。

《海水水质标准》(GB3097—1997)和《食品中放射性物质限制浓度标准》(GB14882—1994)分别规定了海水和海产品中部分放射性核素的活度限值。我国海洋沉积物尚没有相应放射性核素标准限值规定。鉴于部分地区经常采用海砂作为建筑材料,可参考《建筑材料放射性核素限量》(GB6566—2010)的部分放射性核素的活度限值标准,评估海洋沉积物中的放射性核素。值得指出,国际上不同组织机构(国际原子能机构、世界卫生组织、国际粮农组织)和国家地区(中国、美国、欧盟、日本等)基于科学认识、国情现状和社会需求等综合因素,对相同介质中的同种放射性核素活度限值的规定经常存在一定差异^[41-42]。该方法的优点是评估有据可依,管理方便;缺点是相较于超过3 000多种的人工放射性核素,现行标准中规定的核素种类较少,并且不同标准中活度限值规定可能存在差异,同时缺乏以海洋生物作为评估受体的活度限值的相关标准。

2.3 剂量限值法

处于不稳定状态的放射性核素发生衰变并发射不同能量的 α 、 β 、 γ 粒子。活度可衡量单位时间内放射性核素衰变发射的粒子数,剂量则更精细刻画不同类型的粒子所产生的能量沉积和危害。如《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871—2002)中规定,公众的年有效剂量为1 mSv。针对海洋生物,欧盟开发的ERICA软件推荐10 μ Gy/h的剂量率限值作为筛选阈值^[43]。IAEA、国际放射防护委员会、美国 and 加拿大等也推荐不同的剂量率限值(40~400 μ Gy/h),用以评估放射性核素对海洋生物的影响^[44]。该方法的优点是不同核素之间均可进行量化、对比和评估,但需要获得针对特定人群和代表性海洋生物中目标核素的剂量活度转换系数。特别指出,我国法规标准尚未涉及放射性核素对海洋生物的剂量限值规定。

2.4 辐射风险法

放射性核素衰变所致的电离辐射剂量最终对人类产生一定的辐射效应和辐射风险。辐射效应根据剂量阈值(250~500 mSv)分为随机性效应(<阈值)和确定性效应(>阈值)^[45]。超过剂量阈值的确定性效应主要针对个体而言,剂量超过1 Sv将引发个

体急性放射病,达到4和10 Sv将导致50%和100%死亡概率^[45]。低于剂量阈值的随机性效应以群体为研究对象,低剂量(<100 mSv)辐射产生的随机性效应,通常采用癌症风险进行定量。一般每增加1 mSv将导致癌症风险和致死性癌症风险分别增加0.01%和0.005%^[46]。美国国家环境保护局报告也详细给出吸入、食入、外照射情况下每个核素单位活度的癌症风险系数^[47]。美国核管会文件中曾规定,核电运行导致的癌症死亡风险不应超过其他原因所致癌症死亡风险总和的千分之一,定量给出辐射风险限值。该方法的优点是可定量获得风险水平,便于开展核工业和其他行业之间的风险比较,为跨行业的利益相关方和政府管理决策提供参考。缺点是该方法的评估对象为人类,无法获得海洋生物的辐射风险水平。值得指出,在活度测量到剂量和风险的系数转换过程中,都将引入更多的不确定度,同时也依赖于海洋生物的放射生态试验或人类流行病学试验所建立的剂量/效应评估数据库,以及样本数理统计过程中引入的不确定度。未来标准中辐射风险阈值的制定,需要保守性考虑各评估环节引入的不确定度传递和放大。

3 海洋核安全评估保障技术建议

3.1 海产品中核素溯源-富集-传递及核安全评估

海洋历来为人类提供重要的食物来源,被誉为“蓝色粮仓”,是“大食物观”的有机组成。截至2024年,中国所有核电站均位于滨海地带,且多处核电厂临近海洋养殖区。滨海核电正常运行状态下排放的液态流出物中人工放射性核素(如^{110m}Ag)可能被海洋生物吸收和富集^[25,48],并通过海产品食用途径对人类增加一定的电离辐射风险。此外,IAEA在日本福岛核污染水排海的评估报告中指出,食用海产品所导致的人类辐射剂量率占总剂量率的86.5%^[49],是核安全评估中最主要的暴露途径。可见:海产品核安全评估与人类健康所面临的辐射风险紧密相关。

中国是海产品的生产和食用大国,联合国粮农组织的报告指出,2020年中国海水养殖产量占世界的58%,海水养殖和海洋捕捞总量均为世界第一^[50]。在“碳达峰、碳中和”国家战略背景下,我国在建核电机组数量连续18年位居全球首位(截至2025年1月),我国在运和核准在建核电机组规模已升至世界第一。因此,在空间上高度毗邻的滨海核电和海水养殖两大产业协同发展的背景下,人类

直接摄食海产品的核安全评估保障技术是海洋核安全领域亟需深入研究的重要方向,特别是海产品中关键放射性核素溯源与富集特征和海洋食物链中传递规律,及其对人类健康的长期辐射效应和风险评估。

3.2 海洋生物辐射剂量评估与保护

除人类健康外,海洋环境及其生物的辐射安全同样面临巨大挑战。保护海洋生物多样性是联合国推动国家管辖海域外生物多样性的养护和可持续利用中的重要国际议题^[51]。过去30年来,辐射防护逐步从人类延伸至海洋生物^[44,52]。然而,海洋生物种类繁多,不同海区的海洋生物差异巨大,为海洋生物的辐射剂量评估和保护带来更大的困难和挑战。欧盟、美国、加拿大等开发了海洋生物辐射剂量的计算和评估模型,而我国暂未开发出一套适用于我国海域和海洋生物特性和需求的海洋生物辐射剂量评估模型^[44]。

固液分配常数、生物富集因子、生物放大系数、生物辐射剂量率和活度的法定限值海洋生物辐射剂量评估与保护研究中的核心问题。国际原子能机构的全球报告中,固液分配常数和生物富集因子具有显著的物种差异性和海区特异性^[53],而中国海区至今缺乏放射性核素的固液分配常数和生物富集因子的系统研究。放射性核素在海洋食物链传递过程中是否存在放大效应,更是国际上一直存在的争议^[54]。放射性核素对代表性海洋生物的剂量率和活度的法定限值规定也需要加快研究制定。

3.3 放射性核素驱动多种污染物协同效应

生态系统是众多生物和环境之间相互作用的集合。海洋环境中放射性核素将在生态系统中传递和动态循环,并对生态系统产生一定辐射影响。然而,目前放射生态学研究更多关注单个核素对单个生物物种在毒理上的剂量-效应研究,缺乏整体视角综合评估核素对生态系统的影响。

值得指出,真实的海洋环境中同时共存重金属、有机污染物、新兴污染物、放射性核素等多种污染物集合^[55]。IAEA作为核安全评估的专业机构,在日本福岛核污染水排海评估审核过程中重点考虑福岛来源的人工放射性核素对海洋生态环境影响^[49],缺乏真实海洋环境中多种污染物共存情况下的综合评估。在人类活动和全球变化背景下的现实海洋中(全球变暖、海水倒灌、海洋酸化、富营养化、海洋脱

氧、生物入侵、物候变迁等),放射性核素驱动下,多种污染物的协同效应对生态系统健康的综合影响是当前研究非常缺乏且重要的前沿领域,特别是对于环境容量有限且人为干扰压力大的港湾内滨海核电排水口附近海域的人工放射性核素(^3H 、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 等)、余氯、温排水等多种因子共同胁迫的典型现实应用场景。

滨海核电通过取水口和排水口与区域海洋发生密切的物质和能量交换。滨海核电排水口多胁迫因子耦合引发海洋生态安全问题,可能改变区域海洋的赤潮、致灾水母及其他冷源致灾生物的异常增殖或聚集的频次和强度;滨海核电排水所致海洋生态安全问题反馈带来的取水口冷源安全问题也将对滨海核电设施的工程安全运行构成一定的威胁和挑战。在气候变化和我国滨海核电快速发展的背景下,取/排水口高水平安全的耦合、响应、反馈机制及其缓解和修复技术也将是未来滨海核电高质量发展的重要保障。

4 结 论

1) 从安全、海洋安全、核安全到海洋核安全的演化视角,尝试理清海洋核安全的概念、内涵、范畴、目的,服务新形势下海洋核安全的评估、管理及技术保障需求。

2) 从保护人类健康与海洋生态环境安全的基本目标出发,强调海洋核安全需要重点关注核反应失控或其他涉核活动等不同人为源项导致放射性核素泄漏入海后的海洋核安全评估技术体系,梳理提出本底基线法、活度限值法、剂量限值法、辐射风险法等4种评估方法,并探讨各个方法的优缺点和适用情况。

3) 立足海洋核安全的基本目标,从生物-生态-人类耦合的综合视角,重点探讨“大食物观”视野下海产品中核素溯源-富集-传递及核安全评估、海洋生物辐射剂量评估与保护、生态系统视角下放射性核素驱动多种污染物协同效应等关键领域,提出未来气候变化和人类活动背景下的海洋核安全评估保障技术及关键应用领域的发展建议。

4) 在更加明晰海洋核安全概念和内涵范畴的基础上,未来需要进一步系统梳理海洋核安全-事故-应急-救援体系,增强风险意识,强化底线思维,守牢中国海洋核安全防线,维护国家安全。

参 考 文 献

- [1] WATERS C N, SYVITSKI J P M, GALUSZKA A, et al. Can nuclear weapons fallout mark the beginning of the Anthropocene Epoch? [J]. *Bulletin of the Atomic Scientists*, 2015, 71(3): 46–57.
- [2] 林武辉, 张帆, 余克服, 等. 人工放射性核素在珊瑚岛礁系统中的富集与评估[J]. *地球科学进展*, 2023, 38(3): 286–295.
- LIN Wuhui, ZHANG Fan, YU Kefu, et al. Assessment and enrichment of artificial radionuclides in coral reef ecosystems[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2023, 38(3): 286–95.
- [3] BUESSELER K O. Fukushima and ocean radioactivity[J]. *Oceanography*, 2014, 27(1): 92–105.
- [4] LIN Wuhui, MO Minting, YU Kefu, et al. Establishing historical ^{90}Sr activity in seawater of the China seas from 1963 to 2018[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2022, 176: DOI: 10.1016/j.marpolbul. 2022. 113476.
- [5] SMITH J T, WRIGHT S M, CROSS M A, et al. Global analysis of the riverine transport of ^{90}Sr and ^{137}Cs [J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, 38(3): 850–857.
- [6] CASACUBERTA N, SMITH J N. Nuclear reprocessing tracers illuminate flow features and connectivity between the Arctic and Subpolar North Atlantic oceans[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2023, 15: 203–221.
- [7] LIN Wuhui, CHEN Liqi, YU Wen, et al. Radioactive source terms for the Fukushima nuclear accident[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2016, 59(1): 214–222.
- [8] LIN Wuhui, ZHANG Yibang, DU Jinqiu, et al. Deciphering decadal observation of Fukushima-derived radiocesium in the most polluted port nearby Fukushima Daiichi nuclear power plant: from seawater to marine fish[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2024, 11: DOI: 10.3389/fmars. 2024. 1382229.
- [9] 林武辉, 余克服, 杜金秋, 等. 日本福岛核废水排海情景下海洋生态环境影响与应对[J]. *科学通报*, 2021, 66(35): 4 500–4 509.
- LIN Wuhui, YU Kefu, DU Jinqiu, et al. Consequences of marine ecological environment and our preparedness for Fukushima radioactive wastewater discharge into the ocean[J]. *Chinese Science Bulletin-Chinese*, 2021, 66(35): 4 500–4 509.
- [10] 海关总署公告 2023 年第 103 号, 关于全面暂停进口日本水产品的公告 [Z]. 2023–08–24.
- [11] WAKAMATSU H, MIYATA T. Reputational damage and the Fukushima disaster: an analysis of seafood in Japan[J]. *Fisheries Science*, 2017, 83(6): 1 049–1 057.
- [12] WANG Ming, TAN Zhijia, LIU Jiaguo, et al. Analyzing the impact of Fukushima nuclear wastewater discharge on seafood trade with gravity model [J]. *Ocean & Coastal Management*, 2022, 230: DOI: 10.1016/J. OCECOAMAN. 2022. 106302.
- [13] 朱坚真. 中国海洋安全体系研究[M]. 北京: 海洋出版社, 2015: 1–6.
- [14] 殷德健. 从核安全多重属性论促进核安全科学认知[J]. *核安全*, 2024, 23(3): 21–24.
- YIN Dejian. Promoting scientific perception of nuclear safety in light of the multiple attributes of nuclear safety[J]. *Nuclear Safety*, 2024, 23(3): 21–24.
- [15] 吴宜灿. 核安全导论[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2017: 1–4.
- [16] 中国科学院核能安全技术研究所. 中华核能安全技术发展蓝皮书[M]. 北京: 科学出版社, 2018: 8–15.
- [17] SVERDRUP K, KUDELA R. Investigating oceanography(4th Edition) [M]. New York: McGraw Hill, 2023: 4–33.
- [18] 杨金森. 中国海洋战略研究文集[M]. 北京: 海洋出版社, 2006: 321–345.
- [19] 赵青海. 可持续海洋安全问题与应对[M]. 北京: 世界知识出版社, 2013: 1–7.
- [20] 陈鹤, 刘永, 赵国海, 等. 核安保相关理论研究与实践探索[J]. *中国安全科学学报*, 2023, 33(7): 75–81.
- CHEN He, LIU Yong, ZHAO Guohai, et al. Theoretical research and practical exploration on nuclear security[J]. *China Safety Science Journal*, 2023, 33(7): 75–81.
- [21] 陈玉清, 龚军军. 核安全概论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2019: 12–13.
- [22] 潘自强. 进一步提高核与辐射事业的安全文化[J]. *辐射防护*, 2017, 37(5): 337–340.
- PAN Ziqiang. Further enhancement of safety culture in nuclear and radiation sectors[J]. *Radiation Protection*, 2017, 37(5): 337–340.
- [23] 冯一斐, 杨波, 姜慧银. 核电厂核安全文化评估实践及思考[J]. *中国核电*, 2022, 15(1): 124–127.
- FENG Yifei, YANG Bo, JIANG Huiyin. Practice and thinking on the nuclear safety culture assessment of nuclear power plant[J]. *China Nuclear Power*, 2022, 15(1): 124–127.
- [24] 中国核能电力股份有限公司. 中国核电核安全文化建设历程[M]. 北京: 中国经济出版社, 2022: 1–8.
- [25] 黄彦君, 沙向东, 祝兆文, 等. 压水堆核电厂流出物监测的关键核素研究[J]. *核安全*, 2020, 19(5): 27–34.
- HUANG Yanjun, SHA Xiangdong, ZHU Zhaowen, et al. Study on key nuclides of effluent monitoring in pressurized water reactor nuclear power plant[J]. *Nuclear Safety*, 2020, 19(5): 27–34.
- [26] 王茂杰, 郝丽娜, 徐晋, 等. 核电厂流出物监督性监测实践[J]. *核安全*, 2021, 20(3): 12–16.
- WANG Maojie, HAO Lina, XU Jin, et al. Discussion on supervision monitoring of radioactive effluents in nuclear power plant by regional supervision station[J]. *Nuclear Safety*, 2021, 20(3): 12–16.
- [27] MACHIDA M, IWATA A, YAMADA S, et al. Estimation of temporal variation of tritium inventory discharged from the port of Fukushima Daiichi nuclear power plant: analysis of the temporal variation and comparison with released tritium inventories from Japan and world major nuclear facilities[J]. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2023, 60(3): 258–276.

- [28] WANG Fenfen, MEN Wu, YU Tao, et al. Intrusion of Fukushima-derived radiocesium into the east China sea and the Northeast South China sea in 2011–2015[J]. *Chemosphere*, 2022, 294: DOI: 10.1016/J. CHEMOSPHERE. 2022. 133546.
- [29] SMITH J, MARKS N, IRWIN T. The risks of radioactive wastewater release[J]. *Science*, 2023, 382(6666): 31–33.
- [30] 林武辉, 张翊邦, 余克服, 等. 2023 年日本福岛核污水站在历史的十字路口[J]. *环球财经*, 2023(2): 46–50.
- [31] ZHAO Chang, WANG Gang, ZHANG Min, et al. Transport and dispersion of tritium from the radioactive water of the Fukushima Daiichi nuclear plant[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2021, 169: DOI: 10.1016/j. marpolbul. 2021. 112515.
- [32] LIU Yi, GUO Xueqing, LI Sunwei, et al. Discharge of treated Fukushima nuclear accident contaminated water: macroscopic and microscopic simulations[J]. *National Science Review*, 2022, 9(1): DOI: 10.1093/nsr/nwab209.
- [33] 央视网. 外交部三问美方核潜艇事故: 美方有责任尽快作出详尽说明[EB/OL]. (2021–10–11). <https://m. news. cctv. com/2021/10/11/ARTI1bnVyC6FRHicjdz2lk3h211011. shtml>.
- [34] 美国驻华大使管和领事馆. 关于 AUKUS 的三国首脑联合声明[EB/OL]. (2021–09–15). <https://china. usembassy-china. org. cn/zh/joint-leaders-statement-on-aukus-cn/>.
- [35] 北京大学. 2022 年美军南海军事行动不完全报告: 南海战略态势感知计划[R], 2023.
- [36] 北京大学. 2023 年美军南海军事活动不完全报告: 南海战略态势感知计划[R], 2024.
- [37] 罗琦. 尽快开展南海核动力能源平台建设[J]. *中国核工业*, 2014(3): 43–43.
- [38] 于俊崇等. 海洋核动力平台安全研究[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2023: 1–204.
- [39] 刘新华. 核电厂一回路源项和排放源项[M]. 北京: 科学出版社, 2019: 1–30.
- [40] 杜金秋, 王震, 林武辉, 等. 放射性核素水环境质量标准研究进展[J]. *生态毒理学报*, 2018, 13(5): 27–36. DU Jinqu, WANG Zhen, LIN Wuhui, et al. Research progress of the water quality standards on radionuclides[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2018, 13(5): 27–36.
- [41] BRADLEY F J, PRATT R M. Radionuclide concentrations in food and the environment[M]. Boca Raton, US: CRC Press, 2007: 377–410.
- [42] 林武辉, 陈立奇, 马豪, 等. 日本福岛核事故后的海洋放射性监测进展[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(1): 269–276. LIN Wuhui, CHEN Liqi, MA Hao, et al. The distribution and enrichment characteristics of fluoride in geothermal active area in Tibet[J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(1): 269–276.
- [43] BROWN J, ALFONSO B, AVILA R, et al. The ERICA tool[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2008, 99(9): 1 371–1 383.
- [44] 林武辉, 陈立奇, 余雯, 等. 海洋生物辐射剂量评价方法及应用[C]. 福建省海洋学会 2014 年学术年会暨福建省科协第十四届学术年会, 2014: 326–334.
- [45] MIETELSKI J W. Anthropogenic radioactivity[M]. Chichester, UK: John Wiley, 2010: 1–34.
- [46] SINCLAIR W K. Radiation protection: recent recommendations of the ICRP and the NCRP and their biological basis[J]. *Advances in Radiation Biology*: Elsevier, 1992, 16(6): 303–324.
- [47] ECKERMAN K F, LEGGETT R W, NELSON C B, et al. Cancer risk coefficients for environmental exposure to radionuclides[R]. U. S. Environmental Protection Agency, 1999.
- [48] 林淑倩, 陈志东, 林清. 大亚湾核电基地周围海洋生物中^{110m}Ag 水平分析[J]. *环境*, 2015(增 1): 35–36.
- [49] IAEA. Comprehensive report on the safety review of the ALPS-treated water at the Fukushima daiichi nuclear power station [R], 2023.
- [50] Food and Agriculture Organization of the United Nations. The state of world fisheries and aquaculture 2022: towards blue transformation[R], 2022.
- [51] 王勇, 孟令浩. 论 BBNJ 协定中公海保护区宜采取全球管理模式[J]. *太平洋学报*, 2019, 27(5): 1–15. WANG Yong, MENG Linghao. On the rationality of adopting global management model in the high seas marine protected areas under the BBNJ agreement[J]. *Pacific Journal*, 2019, 27(5): 1–15.
- [52] LOWE D, ROY L, TABOCCHINI M A, et al. Radiation dose rate effects: what is new and what is needed? [J]. *Radiation and Environmental Biophysics*, 2022, 61(4): 507–543.
- [53] IAEA. Sediment distribution coefficients and concentration factors for biota in the marine environment[R], 2004.
- [54] CARVALHO F P. Radionuclide concentration processes in marine organisms: a comprehensive review[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2018, 186: 124–130.
- [55] RICHMOND R, BUESSELER K. The future of ocean health[J]. *Science*, 2023, 381(6661): 927–927.



作者简介: 林武辉 (1987—), 男, 福建泉州人, 博士, 教授, 主要从事海洋过程的同位素示踪、海洋/大气放射性观测技术与核安全评估、海洋核安全等研究。E-mail: linwuhui8@163.com。