

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20181101002

纪建达, 于涛.<sup>137</sup>Cs 在我国滨海核电周边海洋生物的富集及生态风险研究[J]. 生态毒理学报, 2019, 14(1): 67-74

Ji J D, Yu T. Enrichment and ecological risk of cesium-137 in marine organisms in the waters adjacent to coastal nuclear power stations in China [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2019, 14(1): 67-74 (in Chinese)

# <sup>137</sup> Cs 在我国滨海核电周边海洋生物的富集及生态风险研究

纪建达,于涛\*

自然资源部第三海洋研究所海洋放射性技术与环境安全评估实验室,厦门 361005 收稿日期:2018-11-01 录用日期:2019-02-14

摘要: 铯-137(<sup>137</sup>Cs)是滨海核电站液态流出物中主要人工放射性核素和重要监控指标之一,易被水生生物累积,有关核电周边 海域内海洋生物的核素富集状况备受关注。通过分析海洋生物富集放射性<sup>137</sup>Cs的方式、生物富集系数的种群特征、人工放射 性核素在生物体内的辐射剂量率状况,结果显示:1)滨海核电周边海域内<sup>137</sup>Cs的放射性水平较低;2)海洋生物对于<sup>137</sup>Cs的富 集未呈现显著的种群规律;3)目前对放射性铯的富集能力较高的生物主要是底栖生物;4)核电厂周边海域内海洋生物通常未 达到可导致电离辐射损伤的辐射剂量率水平。随着滨海核电在我国的大力发展,对能够快速反映环境放射性状况的指示生 物的筛选、生物放射性质量安全及其生态健康风险需进一步关注。

关键词:<sup>137</sup>Cs;海洋生物;富集;生态风险

文章编号: 1673-5897(2019)1-067-08 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

## Enrichment and Ecological Risk of Cesium-137 in Marine Organisms in the Waters Adjacent to Coastal Nuclear Power Stations in China

Ji Jianda, Yu Tao<sup>\*</sup> Laboratory of Marine Isotopic Technology & Environmental Risk Assessment, Third Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Xiamen 361005, China **Received** 1 November 2018 **accepted** 14 February 2019

**Abstract**: <sup>137</sup>Cs is one of the main artificial radionuclides and important indicators in the monitoring of radioactive liquid effluent of the coastal nuclear power plants. It is easily accumulated by marine organisms, and the enrichment status of radioactive cesium by marine biota in the surrounding sea areas of nuclear power plants has attracted much attention. After analysis of the manners of radioactive <sup>137</sup>Cs enrichment by marine organisms, the population characteristics of bioconcentration coefficient and the radiation dose rate of artificial radionuclides in marine organisms, the results show that 1) the radioactivity level of <sup>137</sup>Cs in seawater near the coastal nuclear power plant is rather low; 2) the population characteristics is not significant in bioconcentration coefficient; 3) the organisms with higher enrichment level of radioactive cesium mainly belong to benthic species; 4) the enrichment levels of marine organisms near the coastal nuclear power plants are usually lower than the threshold of radiation dose rate that can

基金项目:自然资源部第三海洋研究所基本科研业务费专项资金资助项目(海三科 2017017);科技部海洋公益性行业科研专项资助项目(201505005)

作者简介:纪建达(1984-),男,助理研究员,研究方向为海洋放射生态学、环境科学,E-mail: jijianda@tio.org.cn;

<sup>\*</sup> 通讯作者(Corresponding author), E-mail: yutao@tio.org.cn

cause ionizing radiation damage. With the great development of coastal nuclear power plants in China, it is necessary to pay more attention to the indicator organism selection, biological quality safety in radioactivity monitoring and ecological health risks assessment of environmental radioactivity.

Keywords: <sup>137</sup>Cs; marine organisms; enrichment; ecological risk

铯-137(<sup>137</sup>Cs),半衰期可达 30.1 年,属于中毒性 核素,是我国现有核电站排放的放射性液态流出物 中主要的人工放射性核素和重要监控指标之一[1], 也是海洋学研究中应用最多的人工放射性核素[2]: 在众多放射性排放污染物中,放射性铯对人类居民 的有效剂量当量贡献>1%<sup>3</sup>;它易于被生物体摄取, 可对生物机体产生的辐射损伤包括β辐射和γ辐 射。作为核电站事故特征性核素,<sup>137</sup>Cs 在福岛核事 故后据初步估计有 3.6~27 PBq 直接排入核电站周 边海域,该事故造成迄今最为严重的海洋放射性污 染事故[4-5]。通常,排放至海洋环境中的放射性核 素,可在一定范围内对生物体在生长、繁殖、遗传等 产生辐射损伤,进而直接或间接对生物种群甚至整 个海洋生态系统造成影响。此外,累积于海洋生物 体内的放射性核素可经由食物链传递,威胁到环境 生态系统中的其他物种包括人类本身间。开展海洋 生物辐射安全影响有关的放射生态学研究正成为国 外内研究热点之一。

近年来,核技术应用和核工业特别是滨海核电 的快速发展,使得人们对放射性物质向环境排放的 污染管理越来越关注,迫切需要了解放射性废物进 入海洋后对其生态环境的辐射安全风险。我国进入 2000年以来,核电事业发展迅速且都位于滨海地 区,截止2018-10-22,新建成投入运行的核电机组已 达到 45 台,正在建设的核电机组仍有 12 台(https:// www.iaea.org/PRIS/)。根据十三五规划,我国将继续 推进非化石能源规模化发展,预计到 2020 年,核电 机组数量将跃居世界第二位,这势必将增加近海海 洋环境的放射性污染压力。目前,作为重金属的铯 在我国不同区域土壤的分布情况、背景参数等已有 广泛报道[7-8];在沿岸海洋环境中,据悉每升海水中 稳定铯的浓度为0.2~1.3 µg<sup>[9]</sup>。然而随着核电事业 发展特别是近十多年来大量核电机组的运行,使得 有关<sup>137</sup>Cs的放射性影响研究除了集中于核设施运 行期间、核事故发生后的放射性水平监测,对于可富 集核素的海洋生物及生态系统的辐射影响更引起人 们的普遍关注。

因此,了解具有生物学意义且对人类居民的有

效剂量当量贡献较大的人工放射性核素的生物辐射 安全影响就显得意义重大。本文将从我国海洋环境 中人工放射性核素<sup>137</sup>Cs的来源及其分布、海洋生物 富集<sup>137</sup>Cs的方式、生物富集系数的种群特征、辐射 剂量率水平等对我国核电周边海域内海洋生物的辐 射安全状况进行阐述,这可为我国在海洋管理中有 关生物放射性质量安全及其生态健康风险提供一定 参考。

### 1 我国海洋环境中人工放射性核素<sup>137</sup>Cs 的来源及 其分布(Sources and distribution of artificial radionuclide <sup>137</sup>Cs in China's marine environment)

<sup>137</sup>Cs,主要来源于核爆试验、核反应堆、核燃料 后处理以及少部分的核事故灾害;自 20 世纪 50 年 代,核试验产生的放射性物质对海洋的影响就开始 引起人们的关注。<sup>137</sup>Cs 由于半衰期长,已成为国际 上环境长周期监测中重要的放射性核素之一。据报 道,<sup>137</sup>Cs 在海水中的扩散主要取决于水团运动以及 共晶作用的吸附;其在海水中约有 70% 以离子态形 式存在。一般,在沿岸海洋环境中<sup>137</sup>Cs 的分布规律 呈现出从河口向外海逐渐升高的变化,这主要与其 易被悬浮物吸附有关,据了解,其吸附系数可达 1 000<sup>[10]</sup>。由于海洋环境中<sup>137</sup>Cs 浓度(比活度)小且 准确测量的过程繁琐、所需样品量大,通常采取的主 要测量方法是磷钼酸铵(AMP)富集法和亚铁氰化物 富集法<sup>[2]</sup>。

有关放射性物质在海洋中的迁移、分布,随着各 国海上实际观测数据的累积,以及数值模型的运用, 国际上在21世纪初已逐步建立并形成了具有区域 性甚至全球性属性的海洋放射性物质数据库,获得 包括北太平洋、日本近海、印度洋表层放射性物质长 期变化特征。如日本建立了包括<sup>90</sup>Sr、<sup>137</sup>Cs 和<sup>239,240</sup>Pu3种放射性物质在北太平洋、日本近海的 数据集<sup>[11]</sup>。相较于国外,我国开展沿海放射性常规 监测始于1964年的首次核爆试验,接着先后在20 世纪80年代、90年代实施了全国海洋污染基线调 查,这一举措使得人们基本掌握了未全面发展滨海 核电事业前我国沿海海域的放射性水平。据了解, 有研究者通过模型预测了<sup>137</sup>Cs在中国近海及其邻 近海域的历史分布状况,显示我国近海<sup>137</sup>Cs浓度在 20世纪50年代中期是最大的,其中吕宋海峡海域 的海水高达 80.99 Bq·m<sup>-3[12]</sup>;然而,随着<sup>137</sup>Cs 自身衰 变及海洋水团的稀释作用,环境中的人工放射性核 素浓度逐渐减少。表1列举了文献报道的我国近海 海水中<sup>137</sup>Cs浓度(比活度)变化。可以看出,相较于 开阔大洋,我国近海海域中的137Cs放射性水平较 低,这一情况与全球人工放射性核素主要来源于核 爆试验、核反应堆及少部分的核事故灾害及我国各 大海域周边在 20 世纪 90 年代以前未有核电运行的 报道类似。当然,2013 年东海海域<sup>137</sup>Cs 浓度数值较 高,很大程度上是与福岛核事故对于该区域的影响 有关<sup>[4]</sup>。此外,有研究者基于 1988—2000 年大亚湾 核电站周边海水中<sup>137</sup>Cs浓度与放射性液态流出物 <sup>137</sup>Cs 排放量的历年关系,发现海水中<sup>137</sup>Cs 浓度的变 化趋势与核电年排放废液中<sup>137</sup>Cs的排放量呈一定 线性正相关<sup>[13]</sup>。可以说,核能技术的开发、放射性核 素的多方面应用,在一定程度上成为海洋人工放射 性污染的来源之一。

# 2 海洋生物中人工放射性核素<sup>137</sup>Cs 的富集(Enrichment of artificial radionuclide <sup>137</sup>Cs in marine species)

2.1 富集方式

海洋生物对放射性物质的吸收是一个复杂的代谢过程,通常放射性物质可通过生物体表的吸附、摄 食等形式被生物吸收。铯,属于生物体非必需元素, 从 20 世纪 40 年代起,受美国和前苏联核武器试验 的放射性落下灰影响,均有在全球海洋中的生物体 内检测出来放射性铯。一般,放射性<sup>137</sup>Cs 进入海洋 生物体内主要通过 2 种方式<sup>[9]</sup>,一种是<sup>137</sup>Cs 吸附于 海洋生物个体的表面,比如一些体表面积大的浮游 生物、藻类;一种是<sup>137</sup>Cs 经由海水被如鱼类的鳃和 体表吸入或者由摄取带有<sup>137</sup>Cs 的饵料,经消化吸收 后逐渐在个体体内富集。其中,放射性铯经海洋生 物的食物链传递,又可累积到其他生物个体。据报 道,水体中<sup>137</sup>Cs 易被生物吸收、累积特别是水生生 物<sup>[3,19]</sup>;同时,不同组织器官的富集能力也各不相同, 以鱼类为例,组织器官中浓集水平由大到小基本是内 脏>鳃>性腺>皮(鳞)>骨(包括头和尾)>肌肉<sup>[3,10]</sup>。

2.2 海洋生物对于<sup>137</sup>Cs的富集行为及影响因素

由于铯易于被水生生物吸收,近年来国内外有 关日本福岛核事故中铯对海洋生物的影响报道最为 集中。自核电站发生爆炸至今,不断有大量放射性 物质释放到环境中,导致超过80%放射性物质进入 太平洋[20];事故发生3个月后,在距离福岛30~600 km 的海域的海洋生物体内发现了放射性 Cs,且其 含量是事故前的10~1000倍<sup>[21]</sup>。据了解,海洋生 物可快速富集放射性核素 Cs,但其排出体外的生态 半衰期(ecological half-life)较长,平均可达386 d<sup>[22]</sup>。 同样地,对美国加利福尼亚州沿海捕获的蓝鳍金枪 鱼在日本福岛核事故前后做了监测对比,结果显示 事故后鱼体内放射性铯浓度增加包括<sup>134</sup>Cs 含量达 到(4.0±1.4) Bq·kg<sup>-1</sup>、<sup>137</sup>Cs 为(6.3±1.5) Bq·kg<sup>-1</sup>,这从 侧面反映了蓝鳍金枪鱼体内放射性 Cs 含量的快速 增加应是源自日本福岛核事故泄露造成的[23]。此 前,我国有关放射性铯的生物富集研究,更多的是集 中于核素在水体环境的迁移、分布以及小部分在食 物链的传递等方面。如蔡福龙等<sup>[9-10]</sup>研究者开展了 大量海洋生物物种对于放射性铯的富集研究,其涉

表1	我国近海海域 <sup>137</sup> Cs 浓度(Bq·m <sup>-3</sup> )	
----	--	--

Table 1	<sup>137</sup> Cs concentration	in	offshore	waters	of	China	$(Bq \cdot m^{-3})$	)
---------	---------------------------------	----	----------	--------	----	-------	---------------------	---

区域	类别		参考文献		
Area	Туре	(	Concentration/(Bq $\cdot$ m <sup>-3</sup> )		References
渤海 Bohai Sea	表层海水 Surface seawater	7.40(1980年)	-	0.05(2014 年)	[14-15]
东海 the East China Sea	表层海水 Surface seawater	6.66(1978—1984年)	1.07(2011 年)	0.63(2013年)	[12, 15-16]
南黄海 South Huanghai Sea	表层海水 Surface seawater	-	1.27(2011年)	0.46(2014 年)	[12, 15]
南海 South Sea	表层海水 Surface seawater	4.1(1988—1990年)	1.53(2011年)	-	[12, 17]
大亚湾 Daya Bay	表层海水 Surface seawater	2.39(1991—1992年)	1.74(2012 年)	-	[18]*
北太平洋 North Pacific Sea	表层海水 Surface seawater	-	-	1~6(2013年)	[15]

注:\*大亚湾表层海水中2012年<sup>137</sup>Cs浓度取自与大亚湾核电站相距1km的岭澳核电站周边海水监测资料——岭东核电有限公司2009年《岭 澳核电站3、4号机组竣工环境保护验收监测报告》。

Note: \* The concentration of <sup>137</sup>Cs in the surface water of Daya Bay in 2012 was taken from the seawater monitoring data of the LANS, which is 1 km away from the GNPS-Lingdong Nuclear Power Co., Ltd. 2009 "LANS Units 3 and 4 Completion Environmental Protection Acceptance Monitoring Report".

Table 2

及的物种有扁藻、三角褐指藻、对虾、毛蚶、珍珠贝、 梭子蟹、黑鲷、扇贝、悦目大眼蟹等藻类、鱼类、甲壳 类和软体动物 4 种类型的海洋生物。由于<sup>137</sup>Cs 和<sup>134</sup>Cs 互为金属铯的同位素,其在同一生物如鱼 类、甲壳类、大型藻、软体动物等类群的富集状况及 生物富集因子数值上几乎是一致的,这一情况已运 用在非人类物种辐射剂量/率估算软件 ERICA(Environmental Risk from Ionizing Contaminants: Assessment and Management)的实际计算中<sup>[24]</sup>。因此,表2 归纳总结了文献记录的我国海洋生物物种对于主要 的人工放射性铯的吸收及有效数据重新整理获得的 富集系数。总体而言,海洋生物对于放射性核 素<sup>137</sup>Cs、<sup>134</sup>Cs的富集没有显著差异,但不同生物种 类间的富集差异性较大。当然,由于环境因素、核素 浓度的不同,同一种类如扁藻的富集状况(1.01~ 13.17,均值6.95)也呈现明显的差异。在这四类生物 中,尽管收集的文献中有效的数据资料和生物种类 较少,但是甲壳类对放射性铯的总体富集能力相较 其他三类强(P<0.05)。这一结果与福岛核事故发生 后部分研究者关于日本海域海洋生物富集铯的状况 类似,即在调查福岛事故后(2011年7月—2013年8 月)核电周边海域内10个纲46个属的底栖生物中,

甲壳类的软甲纲 *Malacostraca* 和环节动物的多毛纲 *Polychaeta* 是受<sup>137</sup>Cs 影响最为重要的 2 个门类,分 别达到 33.19、35.40 Bq·kg<sup>-1</sup>-wet,而全部种类的<sup>137</sup>Cs 均值为 28.93 Bq·kg<sup>-1</sup>-wet<sup>[25]</sup>。

随着我国滨海核电站建成并商运的机组数量日 益增多,人工放射性核素的持续排放可能引发人们 对于近海海洋生物及其生态系统放射性水平升高进 而产生健康危害的担忧。对于具有富集能力的海洋 生物,海水中轻微的核素水平变化,可能造成不同程 度的影响。影响海洋生物富集<sup>137</sup>Cs的因素很多,包 括环境和生物因素的双重影响。环境因素如悬浮 物、核素浓度、温度、盐度、光照、pH 值及理化性质 等。据报道,栖息在多黏土质和细砂质水体的鱼类, 其对于<sup>137</sup>Cs 的富集能力较一般水域中的鱼类小得 多,主要是因为已吸附于黏土和细沙的<sup>137</sup>Cs 不易被 生物摄取<sup>[9]</sup>。生物因素如年龄、个体大小、生活习 性、种群结构等,对于生物富集能力的影响也各不相 同<sup>26]</sup>,如前面描述的四类海洋生物对于<sup>137</sup>Cs 的富集 能力不同。

然而,在正常工况下,滨海核电周边海域内环境 的放射性核素浓度(比活度)一般很低(如表1所示), 加上海水理化性质复杂等因素影响,这就造成从水

	核素	海洋生物	富集系数	富集系数范围	参考文献
Туре	Nuclide	Marine species	Concentration coefficient	Range	References
	<sup>134</sup> Cs	大弹涂鱼 Boleophthalmus pecfinirostris	0.45		[30]
鱼类	<sup>134</sup> Cs	梭鱼 Liza haematocheila	9.7		[31]
Fish	<sup>134</sup> Cs	青石斑鱼 Epinephelus awoara	4.6	$0.45 \sim 9.7$	[31]
	<sup>134</sup> Cs	梭鲻 Mugil cephalus	3.4		[31]
	<sup>134</sup> Cs	矛尾复虾虎鱼 Synechogobias hasta	2		[31]
田主坐	<sup>137</sup> Cs	对虾 Penaeus japonicus	16.67		[32]
甲壳类 Crustaceans	<sup>134</sup> Cs	中国对虾 Penaeus chinensis	32.6	$25 \sim 32.6$	[31]
	<sup>134</sup> Cs	厚蟹 Helice tientsinensis	25		[31]
	<sup>137</sup> Cs	泥蚶 Tegillarca granosas	5.2		[33]
软体动物	<sup>134</sup> Cs	毛蚶 Scapharca subcrenata	12.8	5 2 2 2 2	[31]
Mollusk	<sup>134</sup> Cs	菲律宾蛤仔 Ruditapes philippinarum	F Ruditapes philippinarum23.3		[31]
	<sup>134</sup> Cs	缢蛏 Sinonovacula constricta	21		[31]
	<sup>137</sup> Cs	扁藻 Platymonas helgolandica	6.95		[34-35]
藻类	<sup>137</sup> Cs	海带 Laminaria japonica	16.6		[31]
	<sup>134</sup> Cs	坛紫菜 Porphyra haitanensis	6.4	1.01 ~13.17	[31]
Algae	<sup>134</sup> Cs	石莼 Ulva lactuca	13.4		[31]
	<sup>134</sup> Cs	浒苔 Enteromorpha prolifera	3.5		[31]

表 2 文献收集的我国海洋生物对于放射性铯的吸收及富集系数

Absorption and concentration coefficient of radioactive cesium in marine species in China in publications

体直接检测放射性污染水平常常比较困难<sup>[2]</sup>,而生物对于核素的富集在一定程度上可快速且简便地反映出环境可能的污染状况,具有环境污染的指示作用。如贻贝常作为监测放射性核素<sup>60</sup>Co的指示生物<sup>[9]</sup>。不过,王海军等<sup>[27]</sup>在分析刘广山等<sup>[28]</sup>测量的大亚湾海域不同生物浓集放射性核素状况时获悉, 贻贝并不能对<sup>137</sup>Cs产生较高富集(富集系数不到20 L·kg<sup>-1</sup>),其他底栖生物如牡蛎富集能力较强,可达442 L·kg<sup>-1</sup>。因此,结合福岛核事故的生物监测结果、表 2 文献数据及部分模型计算结果等<sup>[29]</sup>发现,对于放射性 铯,甲壳类或底栖生物类的富集能力表现较强,可选 取其作为日常监测的对象之一,用于反映滨海核电周 边海域内放射性铯的放射性水平状况。

### 3 <sup>137</sup>Cs 在海洋生物体内的毒理学研究(Toxicological study of <sup>137</sup>Cs in marine species)

由于<sup>137</sup>Cs与钾(K)的性质相似<sup>[36]</sup>,具有同 K 类 似的金属属性;可竞争性抑制生物的光合产氧等生 理活动<sup>[37]</sup>、作为细胞膜上钾离子通道的抑制剂等<sup>[38]</sup>。 国际上,有关放射性核素<sup>137</sup>Cs 经海洋生物的吸收、 累积的文献报道最多,涉及的水生生物种类众 多<sup>[10,39]</sup>。有关<sup>134</sup>Cs、<sup>137</sup>Cs、锶-90(<sup>90</sup>Sr)等中毒性、半衰 期较长核素对生物体的辐射影响在此前也有广泛的 研究,包括对核爆、核电站事故状况的表征和对人类 健康的辐射危害<sup>[20,40]</sup>。比如,在非人类物种方面,分 析采集自福岛核事故后受到<sup>137</sup>Cs严重污染地区 (1 000 kBq·m<sup>-2</sup>)的布什莺鸟(Bush Warblers, *Cettia diphone*),发现其羽毛富集了大量的<sup>134</sup>Cs和<sup>137</sup>Cs,且 相对其他无放射性铯影响的区域,该地区的布什莺 鸟在泄殖腔附近出现了明显的损伤,类似出现了痘病毒病变<sup>[41]</sup>。

在我国,虽说放射性同位素在环境中的行为研 究始于20世纪50年代,但至今有关<sup>137</sup>Cs对于海洋 生物辐射效应的研究数据累积较少,仅有少数的关 于急性照射下水生生物如红鲫鱼辐射影响研究<sup>[42]</sup>。 据了解,一种大型溞(Daphnia magna)在23 d的0.38 mGy·h<sup>-1137</sup>Cs γ 射线的照射下减少了产卵量<sup>[43]</sup>;一 种多毛纲在连续超过 7 代的 3.2 mGy・h<sup>-1137</sup>Cs γ 射 线的照射下,卵和卵囊产量下降[44],贻贝组织体内辐 射剂量率达到 0.61 μGy・h<sup>-1</sup>就导致 DNA 双链的断 裂[45],这一辐射剂量水平还显著低于国际上推荐的 10 μGy·h<sup>-1</sup>无效应最低辐射剂量率值<sup>[29]</sup>。不过,急 性辐照方式显然与环境放射性水平状况不符<sup>[28]</sup>。总 之, 铯作为兼具重金属和中毒性放射性属性的核电 主要排放物,使得有关包括放射性铯在内的人工放 射性核素对于海洋生物及其生态环境的辐射安全问 题日益突出。

4 我国滨海核电周边海域内部分海洋生物体内由 包括<sup>137</sup>Cs 等引发的辐射剂量率风险评估(Risk assessment of radiation dose rates caused by radionuclides including <sup>137</sup>Cs in some marine species surrounding coastal nuclear power plants in China)

关于海洋生物对放射性核素的富集行为及其辐射剂量率的风险评估,国外如美国、欧盟等很早就从 事环境辐射防护的要求和导则等相关工作,开展了 电离辐射污染物的环境效应研究,其目标是对电离 辐射污染物的环境效应如生物和生态效应,提供科学

表 3 义
-------

Table 3 Estimation of radiation dose rates of marine species around three coastal

nuclear power plants in literatures

		辐射	讨剂量率/(μGy		
滨海核电	类型	Radiati	参考文献		
Coastal nuclear power station	Туре	海藻类	甲壳类	海鱼类	Reference
		Algae	Crustaceans	Fish	
阳江核电站 Yangjiang Nuclear Power Plant	正常工况 Normal working condition	1.83×10 <sup>-3</sup>	7.47×10 <sup>-3</sup>	4.54×10 <sup>-4</sup>	[29]
大亚湾核电站 Daya Bay Nuclear Power Plant	正常工况 Normal working condition	0.3×10 <sup>-3</sup>	6.57×10 <sup>-1</sup>	1.26×10 <sup>-2</sup>	[49]
南方某核电站 A southern nuclear power plant	正常工况 Normal working condition			1.40×10 <sup>-5</sup>	[50]

注:大亚湾核电站中  $\alpha$  粒子和  $\beta$  射线采用点源剂量分布公式,  $\gamma$  射线采用 MCNP V.3a/PC MONTE-Carlo 程序。阳江核电站和南方某滨海核电站均采用 ERICA 程序。

Note: \* Daya Bay Nuclear Power Station,  $\alpha$ -particle and  $\beta$ -ray adopt the point source dose distribution formula, and  $\gamma$ -ray adopts MCNP V.3a/PC MONTE-Carlo program. The Yangjiang and one nuclear power plant in the southern both use the ERICA program.

的风险评估方法。其中,美国能源部的分级方法(简 称 GRADED) 及其软件 RESRAD-BIOTA、 欧盟评价 欧洲地区生态系统环境影响的第五框架项目 Framework for Assessment of Environmental Impact (简称 FASSET)及其软件 ERCIA,是如今用于掌握非 人类物种的辐射剂量/率风险评估的主要技术手 段<sup>[46]</sup>。据报道, FASSET/ERICA 数据库中包含有> 350个海洋生物富集系数值[47]。从20个世纪70年 代起,许多国际组织和国家机构开始关注放射性物 质对环境的影响,并基于当地辐射状况制定出了一 系列辐射环境保护的原则和标准,逐步形成了辐射 环境评价系统。目前,放射性流出物对海洋生物辐 射影响评价,多基于估算放射性核素从受污染环境 介质向生物体的转移以及后续的生物辐射剂量率的 计算及比较分析。同时,各种模型在实施生物辐射 剂量率影响评价过程中,均从参考生物的选取、放射 性核素的迁移分布和富集、参考生物的辐射剂量因 子关系等角度出发。据了解,至今我国关于放射性 核素对水生生物辐射剂量计算和评价的研究工作起 步较晚、数据累积较匮乏,且多采用国际上常见的用 于评价生物辐射剂量率的标准体系和准则,如以国 际组织推荐的 400 µGy·h<sup>-1</sup>(10 mGy·d<sup>-1</sup>)的剂量率限 值为基础,进行我国滨海核电周边海域内的海洋生 物个体、种群水平等的风险评估[48]。

表 3 列出了我国大亚湾核电站、阳江核电站周 边海域等自然海区海洋生物在正常工况下接受到包 括<sup>137</sup> Cs 在内的人工放射性核素的辐射剂量率水平 以及运用的估算模型软件,可以看出与上述富集系 数的结果类似,甲壳类在核电正常工况下接受自人 工放射性核素影响的辐射剂量率最高;但其辐射剂 量水平并未高于 10 μGy·h<sup>-1</sup>。其实,海水环境中的 人工放射性核素对于海洋生物的辐射影响,同样也 受到包括前述提及的环境和生物因素的影响;但从 收集到的数据资料,目前我国相关的研究成果仍累 积不足。

#### 5 结语(Conclusion)

在我国,保障核与辐射安全,保护海洋生态安 全,是大力推进生态文明建设的重要内容之一,是建 设美丽中国的必要条件。同时,随着 2015 年国家 "生态文明建设"五年规划的颁布、社会公众有关环 境辐射安全防护等的需要,开展核电邻近海域内的 核辐射环境影响体系及相应的生态环境变化研究显 得迫在眉睫。通过分析海洋生物富集放射性<sup>137</sup>Cs 的方式、生物富集系数的种群特征、人工放射性核素 在生物体内的辐射剂量率状况,结果显示滨海核电 周边海域内<sup>137</sup>Cs的放射性水平较低,海洋生物对 于<sup>137</sup>Cs的富集未呈现显著的种群规律;目前对放射 性铯的富集能力较高的生物主要是底栖生物,但通 常未达到可导致电离辐射损伤的辐射剂量率水平。 随着滨海核电在我国的大力发展,可指示环境放射 性状况的参考生物的筛选、生物放射性质量安全数 据积累及其生态健康风险需进一步关注。

致谢:感谢蔡福龙教授在数据资料整理方面的指导。

通讯作者简介:于涛(1971—),女,海洋科学博士,研究员,主 要研究方向海洋环境科学研究,发表学术论文10余篇,编写 报告50多份。

#### 参考文献(References):

- [1] 陈立奇,何建华,林武辉,等.海洋核污染的应急监测 与评估技术展望[J]. 中国工程科学, 2011, 13(10): 34-39 Chen L Q, He J H, Lin W H, et al. Review on the marine radioactive pollution monitoring and assessment technology [J]. Engineering Sciences, 2011, 13(10): 34-39 (in Chinese)
- [2] 刘广山. 海洋放射性核素测量方法[M]. 北京: 海洋出版社, 2006: 176-265
- [3] 史建君. 放射性核素对生态环境的影响[J]. 核农学报, 2011, 25(2): 397-403
  Shi J J. Nuclear accident impact on the ecological environment [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2011, 25(2): 397-403 (in Chinese)
- [4] 林武辉, 陈立奇, 何建华, 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 W H, Chen L Q, He J H, et al. Review on monitoring marine radioactivity since the Fukushima Nuclear Accident [J]. China Environmental Science, 2015, 35(1): 269-276 (in Chinese)

- [5] Povinec P P, Aoyama M, Biddulph D, et al. Cesium, iodine and tritium in NW Pacific waters—A comparison of the Fukushima impact with global fallout [J]. Biogeosciences, 2013, 10(8): 5481-5496
- [6] Valentin J. A framework for assessing the impact of ionising radiation on non-human species: ICRP Publication 91
   [J]. Annals of the ICRP, 2003, 33(3): 201-270
- [7] 张威,潘少明,张克新,等. 中国大陆 Cs-137 背景值研究[J]. 地理学报, 2015, 70(9): 1477-1490
   Zhang W, Pan S M, Zhang K X, et al. Study of the Cesi-

um-137 reference inventory in the mainland of China [J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(9): 1477-1490 (in Chinese)

- [8] 齐永青,张信宝,贺秀斌,等.中国 Cs-137 本底值区域 分布研究[J]. 核技术, 2006, 29(1): 42-50
  Qi Y Q, Zhang X B, He X B, et al. <sup>137</sup>Cs reference inventories distribution pattern in China [J]. Nuclear Techniques, 2006, 29(1): 42-50 (in Chinese)
- [9] 蔡福龙. 放射性污染与海洋生物[M]. 北京:海洋出版 社, 1983: 53-90
- [10] 蔡福龙. 海洋放射生态学[M]. 北京: 原子能出版社, 1998: 65-132
- [11] Aoyama M, Hirose K. Artificial radionuclides database in the Pacific Ocean: HAM database [J]. Scientific World Journal, 2004, 4(4): 200-215
- [12] 赵昌, 乔方利, 王关锁, 等. 历次核试验进入海洋的 Cs-137 对中国近海影响的模拟研究[J]. 海洋学报, 2015, 37(3): 15-24
  Zhao C, Qiao F L, Wang G S, et al. Simulation of the in-

fluence of <sup>137</sup>Cs from nuclear experiments on China seas [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2015, 37(3): 15-24 (in Chinese)

- [13] 陈志东,林清,邓飞,等.大亚湾核电站周围海洋介质 中核素 Sr-90, Cs-137 的放射性水平[C]. 杭州:全国放 射性流出物和环境监测与评价研讨会, 2003: 110-115
- [14] 秦学祥, 王志忠. 渤海海域铯-137 的分布[J]. 海洋环境 科学, 1983, 2(2): 37-44
- [15] 刘丹彤. 福岛核事故后典型放射性核素在中国近海环 境中分布和迁移特征分析[D]. 上海: 华东师范大学, 2016: 39-57
  Liu D T. Distribution and migration characteristics of typical radionuclides in China coastal environment after the Fukushima Nuclear Power Plant Accident [D]. Shanghai:

East China Normal University, 2016: 39-57 (in Chinese) [16] 杨嘉东. 海水, 海洋生物和沉积物中 Cs-137 的测定[J]. 海洋科学, 1984, 8(3): 30-33

Yang J D. Determination of Cs-137 in seawater, marine organisms and sediments [J]. Marine Sciences, 1984, 8(3): 30-33 (in Chinese)

- [17] 陈进兴. 南海近海水中 U, Sr-90, Cs-137, H-3 和总 β 放 射性分布[J]. 海洋科学, 1993, 17(1): 69-70
- [18] 刘广山,周彩芸.核电站运行前后大亚湾海洋生物,海水和沉积物 Cs-137 含量[J].海洋环境科学,1998,17
   (4):7-10

Liu G S, Zhou C Y. Cs-137 contents in the marine organisms, seawater and sediment in Daya Bay before and after the nuclear power plant operation [J]. Marine Environmental Science, 1998, 17(4): 7-10 (in Chinese)

- [19] 徐寅良,陈凯旋,陈传群. 生物对 Cs-137 的吸收和富集
  [J]. 环境污染与防治, 2000, 22(3): 14-16
  Xu Y L, Chen K X, Chen C Q. Absorption and concentration of Cs-137 by organism [J]. Environmental Pollution & Control, 2000, 22(3): 14-16 (in Chinese)
- [20] Steinhauser G, Brandl A, Johnson T E. Comparison of the Chernobyl and Fukushima nuclear accidents: A review of the environmental impacts [J]. Science of the Total Environment, 2014, 470-471: 800-817
- [21] Buesseler K O, Jayne S R, Fisher N S, et al. Fukushimaderived radionuclides in the ocean and biota off Japan [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2012, 109(16): 5984-5988
- [22] Wada T, Nemoto Y, Shimamura S, et al. Effects of the nuclear disaster on marine products in Fukushima [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2013, 124: 246-254
- [23] Madigan D J, Baumann Z, Fisher N S. Pacific bluefin tuna transport Fukushima-derived radionuclides from Japan to California [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2012, 109(24): 9483-9486
- [24] Jordi V I B, Aono T, Brown J E, et al. The impact of the Fukushima nuclear accident on marine biota: Retrospective assessment of the first year and perspectives [J]. Science of the Total Environment, 2014, 487: 143-153
- [25] Sohtome T, Wada T, Mizuno T, et al. Radiological impact of TEPCO' s Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident on invertebrates in the coastal benthic food web [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2014, 138: 106-115
- [26] 唐森铭, 商照荣. 中国近海海域环境放射性水平调查
  [J]. 核安全, 2005(2): 21-30
  Tang S M, Shang Z R. Radiation investigation in near coast marine environment in China [J]. Nuclear Safety, 2005(2): 21-30 (in Chinese)
- [27] 王海军, 王震涛, 张凯, 等. 放射性核素在海洋中的迁 移[J]. 核电子学与探测技术, 2012, 32(10): 1224-1227
- [28] 刘广山,周彩芸.大亚湾不同介质中 Cs-137 和 Sr-90 的 含量及行为特征[J].应用海洋学学报,2000,19(3):261-268

Liu G S, Zhou C Y. Contents and behavior characteristics of Cs-137 and Sr-90 in various mediums of Daya Bay [J]. Journal of Applied of Oceanography, 2000, 19(3): 261-268 (in Chinese)

[29] 张晓峰, 上官志洪, 赵锋. 阳江核电厂附近海域生物辐射影响评价研究[J]. 热带海洋学报, 2009, 28(6): 35-40 Zhang X F, Shangguan Z H, Zhao F. Assessment of radiological impact on the marine organisms near Yangjiang Nuclear Power Plant [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2009, 28(6): 35-40 (in Chinese)

- [30] 蔡福龙,陈英.大弹涂鱼浓集 Cs-137, Cs-134, Zn-65, Co-60 的研究[J].海洋环境科学, 1992, 11(1): 1-8
- [31] 徐寅良,陈传群,孙志明,等. Cs-134 在模拟海洋生态 系中的行为[J]. 浙江农业大学学报, 1992, 18(2): 13-20
  Xu Y L, Chen C Q, Sun Z M, et al. Behavior of Cs-134 in the simulated marine ecosystems [J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences), 1992, 18 (2): 13-20 (in Chinese)
- [32] 蔡福龙, 陈英, 吴晋平, 等. Cs-137, Co-60 在海水及海 洋食物链网中的转移[J]. 海洋环境科学, 1982, 1(1): 75-86

Cai F L, Chen Y, Wu J P, et al. The transfer of Cs-137 and Co-60 along marine food web and water [J]. Marine Environmental Science, 1982, 1(1): 75-86 (in Chinese)

- [33] 蔡福龙,陈英,许丕安. Co-60 和 Cs-137 在泥蚶体内的 代谢[J]. 海洋学报, 1984, 5(S1): 896-898
- [34] 蔡福龙,陈英,许丕安,等.海水和海洋食物链网传递 Cs-137, Co-60 规律的研究[J].海洋学报,1984,6(1):72-80
- [35] 蔡福龙,陈英,吴晋平,等. Cs-137, Co-60 在海洋生物 体内的积累和分布[J]. 水产学报, 1983, 7(1): 55-61
  Cai F L, Chen Y, Wu J P. et al. The accumulation and distribution of Cs-137 and Co-60 in marine organism [J].
  Journal of Fisheries of China, 1983, 7(1): 55-61 (in Chinese)
- [36] Hua F D, Cheung T. Study on accumulation of Cs-137 in aquatic organisms [J]. Nuclear Science & Techniques, 1998(3): 184-185
- [37] Ono T, Rompel A, Mino H, et al. Ca<sup>2+</sup> function in photosynthetic oxygen evolution studied by alkali metal cations substitution [J]. Biophysical Journal, 2001, 81(4): 1831-1840
- [38] White P J, Broadley M R. Mechanisms of caesium uptake by plants [J]. New Phytologist, 2000, 147(2): 241-256
- [39] Howard B J, Beresford N A, Copplestone D, et al. The IAEA handbook on radionuclide transfer to wildlife [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2013, 121(4): 55-74
- [40] Kaeriyama H, Shimizu Y, Setou T, et al. Intrusion of Fukushima-derived radiocaesium into subsurface water due to formation of mode waters in the North Pacific [J].

Scientific Reports, 2016, 6: 1-10

- [41] Ishida K, Tanoi K, Nakanishi T M. Monitoring free-living Japanese Bush Warblers (*Cettia diphone*) in a most highly radiocontaminated area of Fukushima Prefecture, Japan
   [J]. Journal of Radiation Research, 2015, 56(S1): 24-28
- [42] 彭赞平,陶宏婷,廖小立,等. 实验红鲫对 Cs-137 辐射的氧化应激响应[J]. 实验动物科学, 2016, 33(2): 6-13
  Peng Z P, Tao H T, Liao X L, et al. Oxidative stress response to Cs-137 radiation in red crucian carps [J]. Laboratory Animal Science, 2016, 33(2): 6-13 (in Chinese)
- [43] Gilbin R, Alonzo F, Garnier-laplace J. Effects of chronic external gamma irradiation on growth and reproductive success of *Daphnia magna* [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2008, 99(1): 134-145
- [44] Knowles J F, Greenwood L N. The effects of chronic irradiation on the reproductive performance of *Ophryotrocha diadema* (Polychaeta, Dorvilleidae) [J]. Marine Environmental Research, 1994, 38(3): 207-224
- [45] Alamri O D, Cundy A B, Di Y, et al. Ionizing radiationinduced DNA damage response identified in marine mussels, *Mytilus* sp. [J]. Environmental Pollution, 2012, 168: 107-112
- [46] Batlle J V I, Balonov M, Beaugelin-Seiller K, et al. Intercomparison of absorbed dose rates for non-human biota
  [J]. Radiation and Environmental Biophysics, 2007, 46(4): 349-373
- [47] Hosseini A, Thørring H, Brown J E, et al. Transfer of radionuclides in aquatic ecosystems-default concentration ratios for aquatic biota in the Erica Tool [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2008, 99(9): 1408
- [48] Rose K. Effects of ionising radiation on plants and animals at levels implied by current radiation protection standards: International Atomic Energy Agency, Vienna, Technical Report Series No. 332, 74 pp. ISBN 920 100992 5. Price 280 Austrian Schillings, 1992 [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 1993, 18(2): 175-176
- [49] 唐文乔,潘自强,夏益华,等.核电站放射性液态流出 物对大亚湾海洋生物所致的辐射剂量率[J].科学通报, 1999,44(17):1846-1850
- [50] 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]. 平潭: 福建省海洋学会学术年会暨福建 省科协学术年会分会场, 2014: 326-334 ◆