

国内外近岸海域放射性监测比较及发展建议

钱锐, 孙国金, 黄仁杰, 曹龙生, 刘弓冶, 倪士英

(浙江省辐射环境监测站, 浙江省辐射环境安全监测重点实验室, 杭州 310012)

摘要: 由于海洋洋流流动和生物迁徙, 导致海洋放射性污染日趋扩散。许多国家经过长期探索和实践, 建立了较为完整的海洋放射性监测网络与监测机制。从海洋放射性分布的特点与影响因素出发, 分析国外近岸海域放射性监测情况, 比较国内外监测方法、监测方案的差异, 指出我国与先进国家在近岸海域放射性监测方面的差距, 提出加强我国近岸海域放射性监测的建议。

关键词: 近岸海域; 放射性监测; 发展建议

DOI: 10.14068/j. ceia. 2016. 05. 013

中图分类号: X837

文献标识码: A

文章编号: 2095-6444(2016)05-0051-04

海洋放射性污染主要源于人为因素, 包括核武器试验、核事故的落下灰和泄漏废水等, 此外还包括核电站、核动力舰船、原子能工业以及铀矿、化石燃料等开发利用所造成的放射性废物排放。1946年至1958年期间, 美国在马绍尔群岛核试验场进行了多达67次的核试验, 附近岛屿及周边海水至今仍残留着放射性污染物。2011年日本福岛核电站事故后, 产生的大量放射性废水也被证实流入大海, 对其领土周边海洋生态环境造成了一定污染。

由于海洋洋流流动和生物迁徙, 导致海洋放射性污染日趋扩散。许多国家经过长期探索和实践, 建立了较为完整的海洋放射性监测网络与监测机制。随着我国及周边国家核电发展的加速, 以及部分邻国核事故的发生, 导致我国近岸海域遭受放射性污染的可能性越来越大。我国大陆海岸线长达1.84万km, 现阶段虽然已经开展了一些零散、局部的近岸海域放射性监测, 但尚未形成完善、系统的近岸海域放射性监测网络, 也没有形成符合时代发展特点、满足当前防治需要的监测方案和规范的监测标准方法, 因此有必要加强相关研究, 从而有效监测和预防我国近岸海域的放射性污染。

1 国内外近岸海域放射性监测现状

1.1 国外近岸海域放射性监测状况

国外近岸海域放射性监测开展较早, 也已发展得较为成熟, 尤其是近20年来, 国外近岸海域监测方法、监测项目日益完善, 监测方案也更趋合理。国外近岸海域放射性监测情况如表1所示。

由表1可见, 国外近岸海域放射性监测方法主要有两种: 在线连续监测和实验室分析测量。海水中放射性核素在线连续监测一般是固定点位实时监测, 而实验室分析测量则是根据预先制订的监测方案定期在指定监测点位采集样品进行放射性核素测量分析。两种方法互为补充, 都能表征某一地区的放射性核素浓度水平、变化情况以及与其他区域的差异, 两种方法所监测的特征核素也都具有被监测区域放射性核素的代表性。此外, 核素的选择是放射性监测的关键。国外根据监测目的的不同选择了许多核素作为监测特征核素, 经常选用的有 ^{137}Cs 、 ^{99}Tc 、 ^{210}Po 、 $^{239+240}\text{Pu}$ 、 ^{237}Np 、 ^{90}Sr 、 ^{14}C 、 ^3H 、 Th 、 Ra 、 ^{40}K 等。它们的共同之处为半衰期长、放射性活度浓度较大、较易测量、具有区域表征性等。其中, ^{137}Cs 、 ^{90}Sr 对生物和人体危害较大, 成为各国长期监测的典型人工放射性核素。

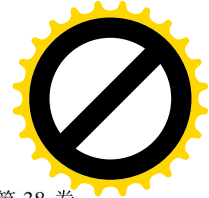
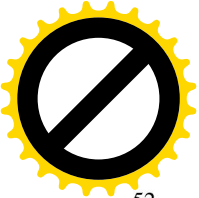
(1) 海水中放射性核素在线连续监测。在线连续监测的特点是可以实时监控, 数据获取与传输都非常快捷, 具备预警功能, 适用于核设施周围。这种监测方法主要是通过测量放射性核素的特征谱线来确

收稿日期: 2015-12-09

基金项目: 国家自然科学基金专项项目(L1422037); 2014年浙江省环保科研计划项目(2014A017)

作者简介: 钱锐(1977—), 男, 浙江人, 工程师, 硕士, 主要从事辐射环境监测研究, E-mail: qr@rmte.org.cn

通讯作者: 倪士英(1963—), 男, 浙江人, 教授级高级工程师, 学士, 长期从事辐射环境监测研究, E-mail: 1143562054@qq.com



定放射性核素的种类与含量。国外的海水中放射性核素在线连接监测已发展得较为成熟。希腊海洋研究中心在监测爱琴海水域放射性时使用了水下 γ 放射性核素的连续性监测装置^[1]。该装置的探测器为 NaI 水下探测器 (RADAM), 被安放在水下 3 m 的流动测量系统中, 其特点是高探测效率 (100%)、低工作

能耗 (2 W), 监测数据由 POSEIDON 网络获取, 数据传输周期为 3 ~ 6 h, 数据分析由 SPECTRG 程序完成。此外, 德国联邦海洋水文机构 (BSH) 在监测波罗的海水域放射性时的时候也使用了水下 γ 放射性核素的连续监测^[4], 所用的是另外一套 NaI 水下探测器, 测量位置视情况而定, 一般从海平面向下 2 ~ 6 m。

表 1 国外近岸海域放射性监测情况统计

Table 1 Abroad radioactive monitoring situation of coastal waters

时间	国家	海域	监测对象	监测项目	监测单位	采用方法	目的	备注
1999—2005 ^[1]	希腊	爱琴海	海水 (γ 能谱)	^{137}Cs 、 ^{222}Rn 、 ^{214}Pb 、 ^{214}Bi 、 ^{40}K	希腊海洋研究中心	固定能谱仪测量与流动测量系统相结合	监测降雨对海洋放射性的影响	考虑降水、风相等的影响
2004.06—07 ^[2]	美国	阿留申群岛 (北太平洋和白令海)	海藻	^{241}Am 、 ^{239}Pu 、 ^{240}Pu 、 ^{234}U 、 ^{235}U 、 ^{236}U 、 ^{238}U	利益相关者参与的风险评估协会 (CRESP)	以 Kiska 岛作为参考来研究 Amchitka 岛的放射性核素	监测 Amchitka 岛和 Kiska 岛 8 种海藻放射性核素含量	假设两岛间核素含量相同
1997—2002 ^[3]	巴西	巴西东南沿岸	海水、鱼、沉积物	^{137}Cs	IRD 和 IEAPM	采集海水、鱼、沉积物样品并分析其中 ^{137}Cs 的含量	确定海洋中人工放射性元素的含量	海水的采集是在水面下 1 m 处; 鱼样品从渔民处购得; 沉积物样品用抓斗采样器采集
1997 ^[4]	德国	西波罗的海、德国湾	海水 (γ 能谱)	^{134}Cs 、 ^{136}Cs 、 ^{137}Cs 、 ^{90}Sr 、 ^3H 、 ^{60}Co 、 ^{58}Co 、 ^{99}Mo 、 ^{131}I 等	联邦海洋水文机构 (BSH)	在线与实验室两种探测方法相结合: 测总 γ 计数; 以 900 keV 为界测量两边的计数率	描述监测海洋放射性污染的 γ 能谱测量方法	探测器放入水下的距离为 2 ~ 6 m, 因地制宜

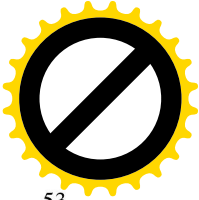
(2) 近岸海域样品实验室分析测量。实验室分析测量较为传统, 即时性不强, 但具有数据准确可靠、效果明显、探测限低等优点, 因此国内外许多监测方案采用该方法。国外近岸海域放射性测量的实验室分析样品介质主要是海水、海洋生物、沉积物。核素进入海洋一般以海水为媒介, 因此海水是放射性核素的最直接载体。海洋生物是海洋放射性核素富集的重要载体, 也与人类生活联系最为紧密。海藻在环境放射性水平很低的时候就开始积累放射性核素, 可以提供海洋环境潜在泄漏的放射性核素早期预警信号, 所以国外很多机构都选择海藻作为代表性样品。人类生产、生活资源大量取材于海洋动物, 因此海洋动物的放射性核素含量受到最多关注。海洋沉积物也是放射性核素的主要载体, 进入海洋的放射性核素大部分沉积于海底。

1.2 国内近岸海域放射性监测情况

我国辐射环境监测起步较晚, 环保部门自 20 世纪 80 年代开始进行了全国环境天然放射性水平调查, 但主要限于陆域。1976 年 12 月至 1979 年 10 月, 卫生部组织了对渤海、黄海、东海和南海海产品的放

射性调查; 1980 年至 1982 年, 对渤海、黄海沿海放射性污染源和沿岸放射性水平进行了调查; 20 世纪 80 年代和 90 年代, 进行了全国海洋污染基线调查^[5]; 出于核电发展需要, 1988 年至 2007 年, 环保部辐射环境监测技术中心等监测机构陆续对秦山核电基地、三门核电站等核电厂周边海域进行了放射性本底调查和监督性监测。通过各项调查, 初步掌握了当时我国近岸海域的放射性水平, 以及放射性物质的动态变化和可能的照射剂量。但是由于我国海洋系统的海洋环境放射性监测数据基本未公开发布, 因此我国近岸海域的放射性监测数据仍十分缺乏。

此外, 我国陆续在有核设施的沿海局部地区开展了一些零散的近岸海域放射性监测, 如国家海洋局第三海洋研究所在 1988—1990 年 (大亚湾核设施运行前) 对大亚湾海域的海水、海洋生物和沉积物进行了放射性监测; 海军南海舰队防化技术室在 1993—1995 年对湛江、北海、汕头、三亚等地的海水、海洋生物和沉积物进行了放射性监测。到目前为止, 我国近岸海域放射性监测采用的是单一的实验室分析测量。



2 国内外近岸海域放射性监测情况对比

通过国内外近岸海域放射性监测情况的研究与比较,可以总结出国内外近岸海域放射性监测存在的差距。

^{137}Cs 是国内外近岸海域放射性监测普遍选择的特征核素,表 2 是我国与其他国家在近岸海域生物与底泥中通过实验室分析测量方式得到的 ^{137}Cs 浓度水平对比。由表 2 可知,我国近岸海域底泥的 ^{137}Cs 监测结果比巴西的要低两个数量级;海藻的 ^{137}Cs 监测结

果比英国的要低约一个数量级;鱼类和软体动物的 ^{137}Cs 监测结果处于同一数量级;甲壳动物的 ^{137}Cs 监测结果比巴西的高 3 倍。这可能跟不同的监测年代、监测海域、监测方法等有关,也跟核爆的沉降区域以及监测区域周围的核设施排放等情况有关。

表 3 为国外海水中放射性核素的在线连续监测与国内实验室分析测量比较,由表 3 可知,对于同一特征核素,国外海水中放射性在线连续监测与国内实验室分析测量结果较为接近,说明在线连续监测系统能达到实验室的分析水平。

表 2 国内外近岸海域生物、底泥 ^{137}Cs 浓度水平实验室测量对比

Table 2 The laboratory measurements comparison between ^{137}Cs concentrations in biological and sediment of coastal waters from home and abroad

时间	国家	海域	监测对象	浓度水平 / (Bq/kg)
1991—1995 ^[6]	古巴	西恩富戈斯湾	鱼 (<i>Albula vulpes</i>)	0.25 ± 0.02 (鲜重)
			软体动物 (<i>Bulla striata</i>)	1.10 ± 0.12 (鲜重)
			甲壳类动物 (<i>Penaeus schmitti</i>)	0.08 ± 0.01 (鲜重)
1997—2002 ^[3]	巴西	巴西东南沿海	鱼	0.33 ± 0.38
			沉积物	3.1 ± 2.1 (干重)
1988.05—11 ^[7]	英国	苏格兰西北海岸到 苏格兰东北海岸	可食用海藻 (<i>Saccharina</i>)	7.7 ± 1.2
1977—1978 ^[5]	中国	渤海、黄海、东海、南海	藻类	0.08 ~ 0.56, 算术平均 0.29, 几何平均 0.22
			软体动物	0.08 ~ 0.56, 算术平均 0.25, 几何平均 0.16
			甲壳动物	0.08 ~ 0.56, 算术平均 0.30, 几何平均 0.24
			鱼类	0.08 ~ 0.56, 算术平均 0.63, 几何平均 0.53
1993—1995 ^[8]	中国	南海四港口 (湛江、 北海、汕头、三亚) 及其附近海域	沉积物 (三亚)	0.061 (干重)

注:由于我国海洋放射性监测数据公开发布较少,未检索到 20 世纪 90 年代末以后的数据。

表 3 国外海水中放射性核素的在线连续监测与国内实验室分析测量比较

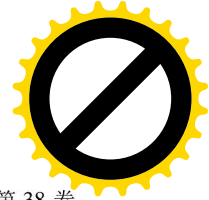
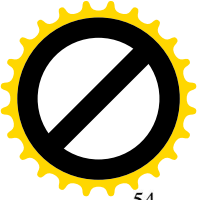
Table 3 The comparison between the abroad on-line continuous monitoring of radionuclides in coastal waters and the domestic laboratory analysis measurements

特征核素	时间	国家	海域	监测手段	监测对象	浓度水平 / (Bq/m ³)
^{40}K	2000.11.27 ^[1]	希腊	爱琴海	海水中放射性核素的 在线连续监测	海水	12 045 ± 120
	1993—1995 ^[8]	中国	南海三亚	实验室分析测量	海水	7 300
^{137}Cs	2000.11.27 ^[1]	希腊	爱琴海	海水中放射性核素的 在线连续监测	海水	18 ± 2
	1993—1995 ^[8]	中国	南海三亚	实验室分析测量	海水	< 17.4

通过对国内外监测方案和监测结果进行对比分析,国内近岸海域放射性监测与国外尚存在一定差距,我国存在的不足主要表现在以下几个方面:

(1) 监测手段相对单一。国内仅依靠单一的实验室分析测量已无法适应新形势的需要:首先,即时性不强。实验室分析测量的采样频率一般是半年或

更长时间一次,而在线连续监测则是实时监测。因此,仅靠实验室分析测量无法得到实时数据,无法及时发现和应对核事故或核污染等突发事件。其次,实验室分析测量包含的海域范围过大,无法精确到具体位置,而在线连续监测的探测范围可以精确到以探测器位置为中心的一个较小范围,且相对固定,数据可



分辨性较高,更利于数据处理与分析。再次,实验室分析测量存在环节繁多、周期较长等问题,会对监测结果造成一定影响。例如,样品采集时间间隔较长会导致放射性活度测量结果误差较大。所以,单一的实验室分析测量已无法适应新形势需要,应发展两者互为补充的监测手段。

(2) 采样范围较狭小,因素考虑不全面。从监测范围来看,我国的监测区域采样点偏少,大多只局限于某一海域,仅为某一核设施建设需要而开展监测,而国外监测范围基本遍布整条海岸沿线,监测区域更为广泛全面。此外,影响放射性分布的条件有很多,包括气候、季节等综合因素。国内在进行监测时,往往没有考虑这些条件范围因素,难免会以偏概全。

(3) 缺乏统一评价标准。由于各地监测的评价标准不同,因此所获得的数据无法保证兼容,其监测数据就更没有可比性,加上各部门之间缺乏监测数据的交流,这就使得近岸海域放射性监测事业无法真正协调发展,更无法互相促进。

(4) 监测方案不够全面。国内一些海洋放射性监测方案没有提出明确的监测意义、目的和方法等,得出的数据仅能起到指示性作用或作为数据资料保存,且基本未对监测结果进行全面统计分析。同时,还有些监测方案内容不明确,测量内容、测量对象较为笼统。例如,《全国辐射环境监测方案(暂行)》中对于近岸海域放射性监测的一些监测项目,概念较为模糊,只是大概地提出“在核电厂周围应测 γ 核素”,而并没有指出具体该监测哪些核素,根据什么因素去选择核素等。

(5) 近岸海域监测资料有限。受国家对近岸海域环境放射性监测的重视程度以及海洋样品采集的复杂性等的限制,我国近岸海域环境放射性监测资料远少于陆域。

3 加强国内近岸海域放射性监测的建议

针对目前国内近岸海域放射性监测存在的不足,提出以下建议:

(1) 在进行监测时,要实现海水中放射性核素在线连续监测和实验室分析测量相结合。对于有核设施及后处理厂的海域,要以海水中放射性核素的在线连续监测为主,实验室分析测量为辅,两种方法相互比较、相互补充,以实现最好的监测效果;而对于其他

海域,可继续采用实验室分析测量,必要时(应急监测)可采用连续性监测。

(2) 根据所测对象选择合适的测量仪器,借鉴国外成功的近岸海域放射性测量方法来弥补国内监测方法的不足。同时要有相应的质量保证,即技术人员监测技能的保证、管理人员制度认知的保证、测量方法正确性的保证、测量仪器准确性的保证以及测量标准规范性的保证。

(3) 充分考虑各种条件对放射性分布的影响,在采样时根据气候、季节、潮汐等因素分别进行测量,然后再进行综合分析。尽可能对整条海岸线进行监测,从而得到更为准确、更有意义的测量结果。

(4) 建立统一的评价标准,使各地区、各部门的测量数据实现共享,从而建立起覆盖全国近岸海域的放射性监测网络,并与世界同类监测工作标准接轨,使近岸海域放射性监测事业协调发展。

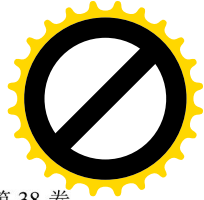
(5) 在拟订监测方案时要充分考虑监测目标、意义和方法等,尽量使监测方案有针对性,例如首先明确监测目的,即需要测什么、为什么测。同时,将监测项目具体化,尽量提出带有具体监测核素的方案。

(6) 大力发展近岸海域环境放射性监测,搜集较为全面细致的资料,同时做好与国外监测资料的深层次比较,及时发现自身存在的弱势与不足之处,不断加以改进和提高。

参考文献(References):

- [1] Tsabaris C. Monitoring natural and artificial radioactivity enhancement in the Aegean Sea using floating measuring systems [J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2008 (11): 1 599-1 603.
- [2] Burger J, Gochfeld M, Kosson D, *et al.* Radionuclides in marine macroalgae from Amchitka and Kiska Islands in the Aleutians: establishing a baseline for future biomonitoring [J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2006, 91: 27-40.
- [3] Godoy J, Carvalho Z, Fernandes F, *et al.* ^{137}Cs in marine samples from the Brazilian southeastern coastal region [J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2003, 70 (3): 193-198.
- [4] Wedekind C, Schilling G, Grützmüller M, *et al.* Gamma-radiation monitoring network at sea [J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 1999, 50 (4): 733-741.
- [5] 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.
- [6] Alonso-Hernandez C, Diaz-Asencio M, Munos-Caravaca A, *et al.* ^{137}Cs and ^{210}Po dose assessment from marine food in Cienfuegos Bay (Cuba) [J]. *Journal of environmental radioactivity*, 2002, 61 (2): 203-211.

(下转第62页)



美国在应用多孔扩散器时,一般为近岸设置且主管长度一般不超过 40 m。因此,我国在设计多孔扩散器时,不仅应从理论计算上追求稀释倍率的最大化,还应综合考虑工程实际应用经验,以达到最优化的目的。

参考文献 (References):

- [1] 张爱玲,王韶伟,赵懿珺,等. 滨海核电厂温排水环评关键问题分析 [J]. 环境影响评价, 2015, 37(3): 57-60.
- [2] 翟海波. 污水海洋处置近区初始稀释研究 [D]. 上海: 同济大
- 学, 2002.
- [3] USEPA. CORMIX USER MANUAL [Z]. 2007.
- [4] 刘永叶, 杨阳, 刘福东. 康奈尔混合区专家系统 (CORMIX) 软件简介 [J]. 辐射防护通讯, 2012, 32(1): 42-45.
- [5] PPL Bell Bend, LLC. Bell Bend Nuclear Power Plant Combined License Application Part 3: Environmental Report [R]. USA, 2012.
- [6] AmerenUE. Callaway Plant Unit 2 Combined License Application Part 3: Environmental Report [R]. USA, 2009.

Study of Porous Diffuser Scheme of Inland Nuclear Power Plant under Low Flow Condition

ZHANG Kun¹, ZHANG Ai-ling¹, QIN Chun-li², WANG Shao-wei¹

(1. Nuclear and Radiation Safety Centre, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100082, China;

2. Suzhou Nuclear Power Research Institute, China General Nuclear Power Corporation, Suzhou 215004, China)

Abstract: The requirements for the radioactive liquid effluent discharge of inland nuclear power plant are strict in China. In order to meet these relevant regulations, the porous diffuser can be used to fully dilute the effluent discharge. This paper took a porous diffuser scheme of inland nuclear power plant as the case study. CORMIX was used to compare and analyze the design scheme based on three factors, including main pipe length, flow angle, and inshore or offshore arrangement. The result suggested that the fan-shaped vents were better than the parallel ones; long main pipe was better than the short one; and long offshore arrangement was better than the short one. At the same time, by comparing the dilution situations under different environmental flow rates, such as 10^{-1} m/s, 10^{-2} m/s and 10^{-3} m/s, it was found that the optimal way of discharge was different under different environmental flow rates.

Key words: inland nuclear power plant; liquid effluent; porous diffuser; CORMIX

(上接第 54 页)

- [7] McDonald P, Cook G, Baxter M. A Radiological Assessment of Scottish Edible Seaweed Consumption [J]. Environmental
- Management and Health, 1999, 1(2): 17-25.
- [8] 梁武, 唐谋生, 冯德军, 等. 南海四港口及其附近海域环境放射性水平 [J]. 交通环保, 1998, 5(19): 16-18.

Comparison and Development Suggestions of Coastal Waters Radioactive Monitoring Between Home and Abroad

QIAN Rui, SUN Guo-jin, HUANG Ren-jie, CAO Long-sheng, LIU Gong-ye, NI Shi-ying

(Zhejiang Province Radiation Environmental Monitoring Center, Key Laboratory of Radiation Environmental Safety Monitoring in Zhejiang Province, Hangzhou, 310012, China)

Abstract: Due to the ocean currents flow and biological migration, diffusion of nearshore radioactive pollution is increasing. This paper discussed the abroad radioactive monitoring situation of coastal waters from characteristics of the ocean radioactive distribution and its influence factors. Based on the comparison in monitoring methods and programs between home and abroad, the disparities between China and developed countries in the area of coastal water radioactive monitoring were pointed out. Several development proposals were then provided to promote the coastal water radioactive monitoring in China.

Key words: coastal waters; radioactive monitoring; development suggestions