

海洋核污染的应急监测与评估技术展望

陈立奇^{1,2}, 何建华^{1,2,3}, 林武辉^{1,2,4}, 余雯^{1,2}, 门武^{1,2}

(1. 国家海洋局海洋—大气化学与全球变化重点实验室, 福建厦门 361005; 2. 国家海洋局第三海洋研究所, 福建厦门 361005; 3. 厦门大学海洋与环境学院, 福建厦门 361005; 4. 清华大学工程物理系, 北京 100084)

[摘要] 介绍了海洋放射性核素的来源和组成, 综述了国内外在海洋放射性核素检测方法和海洋放射性实时监测网络技术的进展, 讨论了开展海洋非人类物种辐射防护评价研究的迫切性和可能性, 以及相关的海洋放射性污染评价方法。最后, 针对我国目前海洋放射性监测发展提出了几点建议。

[关键词] 核污染; 监测网和技术; 评估; 海洋

[中图分类号] X591 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2011)10-0034-06

1 前言

核技术是把双刃剑, 它是一种被大力提倡的新清洁能源, 其安全运行有利于社会、经济发展, 是一种低碳工程技术, 然而一旦出现问题又会酿成巨大的灾难。前苏联切尔诺贝利重大核事故、美国三岛事件以及最近的日本福岛核事故都对海洋环境造成了严重的污染, 这为我国海洋核安全的监督和管理提出了更严格的要求。核电站在正常运行和事故条件下, 都会不同程度地向环境释放含有放射性物质的气体或液体, 并对周边环境安全造成影响。因此, 监测核电站周围环境中的放射性核素浓度变化是评估核污染的关键问题之一^[1-3]。

目前, 我国正积极优化能源结构、推进核电发展^[4], 海洋核安全所面临的压力也持续加大, 与此密切相关的海洋放射监测预警技术研究及放射生态学的研究也更显迫切。但是, 目前我国核电站周围放射性监测以陆地监测为主, 对海洋放射性的监测则关注不够。我国在放射性核素对海洋环境的影响方面的研究相对薄弱, 所采用的海洋放射性检测方法还是 20 世纪 90 年代的方法^[3], 技术标准相对滞

后, 与目前的技术发展趋势和应急情况的需求不适应。

文章综述了海洋核污染监测中关键核素的分析方法和现场监测技术, 探讨了有关海洋核污染的监测技术发展趋势以及海洋核污染的评估方法。

2 海洋放射性核素检测技术

2.1 海洋中的放射性核素

海洋中的放射性核素包括天然放射性核素和人工放射性核素两大类。天然放射性核素主要包括铀系、钍—铀系和钍系 3 个天然放射系核素、宇宙射线及其产生的宇生放射性核素和与地球同时形成并保存至今的长寿命独立放射性核素。这些核素散布在地球环境中, 其半衰期的变化幅度很大, 从几秒钟到几十亿年不等。

海洋中的人工放射性核素是指由于人类利用核能, 如核反应堆、核武器和核动力舰艇等而进入海洋的放射性核素。海洋中的人工放射性核素主要有裂变产物 (^{89}Sr 、 ^{90}Sr 、 ^{95}Zr 、 ^{106}Ru 、 ^{131}I 、 ^{137}Cs 、 ^{141}Ce 、 ^{144}Ce 、 ^{147}Pm 等) 和活化产物 (^3H 、 ^{14}C 、 ^{51}Cr 、 ^{54}Mn 、 ^{59}Fe 、 ^{58}Co 、 ^{60}Co 、 ^{65}Zn 、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 、 ^{124}Sb 、 ^{134}Cs 、 ^{239}Pu 、 ^{240}Pu 、

[收稿日期] 2011-08-22

[基金项目] 海水放射性实时监测系统支撑技术研究(海三科 2011); 海洋公益性行业科研专项经费项目(201205013); 国家社会公益专项(2004DIB5J178)

[作者简介] 陈立奇(1945—), 男, 福建晋江市人, 国家海洋局第三海洋研究所研究员、博士生导师, 主要研究方向为海洋大气化学; E-mail: Lqchen@soa.gov.cn

²⁴¹Pu 等)。

2.2 核电站正常运行及事故状态下释放的放射性核素种类

核电站正常运行的情况下,会向环境排放人工放射性核素。就我国的核电站类型来讲,目前主要有中国改进型压水堆核电技术(Chinese pressurized water reactor technology, CPR1000)、改进型被动压水堆(advanced passive PWR, AP1000)和欧洲压水式反应堆(European pressurized reactor, EPR)等核电机组类型,其中, CPR1000 主要排放¹³⁷Cs、⁵¹Cr、⁵⁴Mn、^{110m}Ag 和¹²⁴Sb 等液态放射性核素, AP1000 主要排放⁵⁵Fe、⁵⁸Co、⁶⁰Co、⁶³Ni 和¹⁰³Ru 等液态放射性核素, EPR 主要排放¹³¹I、^{110m}Ag、⁵⁸Co 和⁶⁰Co 等液态放射性核素。

核电站在事故情况下,除了常规释放的液体放射性核素外,还会向环境排放其他的放射性核素,如本次的日本核事故就向环境中排放了¹³⁴Cs、⁹⁰Sr、²³⁹Pu 和¹³¹I 等。可见,监测核事故释放的核素种类和总量是监测核污染情况的关键。总体来说,在不同的核事故中释放的放射性核素通常有⁹⁰Sr、^{110m}Ag、¹³¹I、¹³⁴Cs、¹³⁷Cs、²³⁹Pu、⁵⁸Co、⁶⁰Co、⁵⁴Mn 等^[5]。因此,在核事故情况下如何快速地监测这些核素活度的变化显得尤为重要。

2.3 放射性核素分析方法

通常情况下,海洋环境中的放射性核素活度都处于极低的水平,一般为 $1 \sim 10^4$ Bq/kg 或 $1 \sim 10^4$ Bq/L。在常规环境样品的放射性活度分析中,大量样品的浓缩、分离和提纯是不可避免的^[6,7]。下面简单介绍几种核安全事故下关键核素的分析方法。

2.3.1 大气中放射性核素的分析

核事故过程中往往会向大气环境排放放射性核素,通常被大气颗粒物吸附形成气溶胶放射性核素。由于放射性核素在空气中的扩散速度相当快,因此,对气溶胶中放射性核素的监测能及时反映环境中的辐射变化情况。一般来讲,空气中的放射性核素主要包括¹³¹I、¹³⁴Cs、¹³⁷Cs 等,因此监测的方法主要是用大体积的气体采样器采集样品后,采用高纯锗 γ 能谱仪对气溶胶样品中的放射性核素进行测量,以分析监测区域空气中放射性核素活度变化的情况,评估核事故源排放放射性核素在大气中的迁移变化情况。

2.3.2 海水中⁹⁰Sr 的分析

⁹⁰Sr 是铀的裂变产物,由于其能与钙一起参与

人和生物的新陈代谢,易蓄积在骨骼内,对人体危害较大,所以对它的研究也较多。有关海水中⁹⁰Sr 的分析方法报道很多,概括起来有沉淀法-共沉淀法、离子交换法、溶剂萃取法等^[8]。其中溶解萃取法是目前应用最广泛的方法。

溶剂萃取法具有简便、快速、高效和成本低等优点。在⁹⁰Sr 的分析中,可以分为直接萃取法和间接萃取法。前者能直接获得铯组分,不仅便于⁸⁹Sr 和⁹⁰Sr 的同时测定,而且也能直接测量铯产额。但后者则操作简便,萃取剂的种类也较多,且已在海水⁹⁰Sr 的测定中得到了应用。但间接萃取法的缺点是难以确定铯产额,同时,使用这一方法时,需要保持⁹⁰Sr-⁹⁰Y 的平衡不被破坏,也不能有⁹⁰Y 的干扰。萃取法中常用的萃取剂有 HDEHP(二-(2-乙基己基)磷酸)、TTA(噻吩甲酰三氟丙酮)和 TBP(磷酸三酯)等,其中 HDEHP 是使用最多的萃取剂。实际上,在没有新的核试验或核污染的情况下,采用间接萃取法相对简便且灵敏度较高。间接萃取法也适用于海洋地质沉积物和海洋生物样品中⁹⁰Sr 的测定。

2.3.3 海水中¹³⁷Cs、¹³⁴Cs 的分析

¹³⁷Cs 是核爆炸的主要产物之一,核反应堆的废物中也含有¹³⁷Cs,同时也有伴生核素¹³⁴Cs。由于¹³⁴Cs 和¹³⁷Cs 是同位素,两者的物理化学性质相近,在分析¹³⁷Cs 的同时也可以分析¹³⁴Cs。

通常情况下,¹³⁷Cs 在海水中的含量甚微,在测定前必须进行浓集。目前,在海洋研究中常用来浓缩分离铯的方法有六硝基二苯胺钾法、硅钨酸盐法、磷钨酸盐法、亚铁氰化物法、磷钼酸铵法(AMP)、四苯硼酸盐法、碘铯酸铯法、氯铂酸铯法、高氯酸盐法、磷钼酸三聚氰酰胺法等。其中常用的有磷钼酸铵法和亚铁氰化物法,我国的《海洋监测规范》中推荐的方法就是这两种方法。

磷钼酸铵法的原理是利用其在酸性介质中与 Cs⁺ 离子发生交换作用将海水中的铯富集下来,然后通过碘铯酸铯或氯铂酸铯分离纯化铯后制成 β 源进行测量。采用 β 计数法的缺点是分析流程较长,因此,随着测量技术的进步,目前已很少使用 β 计数法来进行测量,通常是使用 AMP 富集后,用高纯锗 γ 谱仪来测量,这样可极大地提高分析效率。

何建华等^[9]利用¹³⁷Cs 的特点,利用 CuFC 的胶体性质^[10]制备出可以快速富集海水中¹³⁷Cs 的富集材料,同时采用湿样制源的方法制备测量源,可以在

数小时内完成对未知海水样品中 ^{137}Cs 比活度的分析工作,提高了样品分析效率,同时也可对其他核素的分析提供参考。

2.3.4 海水中 ^{58}Co 、 ^{60}Co 、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 、 ^{54}Mn 等的分析

由于分析技术的进步, ^{58}Co 、 ^{60}Co 、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 、 ^{54}Mn 等核素的分析多采用 γ 核素的联合分析,其分析步骤通常是使用AMP富集 ^{137}Cs 后,再采用相应的沉淀剂富集样品中的 ^{58}Co 、 ^{60}Co 、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 和 ^{54}Mn 等,最后置于高纯锗 γ 谱仪上进行测量。

总体来说,在海水样品的分析上,为了达到快速的目的,通常采用沉积分离法或现场快速富集法进行。如文献[11,12]中提到用氢氧化物共沉淀法对核设施附近海水中的 ^{51}Cr 、 ^{54}Mn 、 ^{59}Fe 、 ^{58}Co 、 ^{60}Co 、 ^{65}Zn 、 ^{95}Zr 、 ^{95}Nb 、 ^{140}La 等放射性同位素进行捕集,用 MnO_2 对海水中的 ^{54}Mn 、 ^{55}Fe 、 ^{59}Fe 、 ^{60}Co 、 ^{65}Zn 、 ^{95}Zr 、 ^{95}Nb 、 ^{106}Ru 和 ^{144}Ce 进行了捕集,以及用铁屑捕集海水中的 ^{60}Co 等。

2.3.5 海水中其他核素的分析

对于海水中的 ^{131}I ,通常是经富集分离后采用 CCl_4 萃取后采用 β 计数法进行测量,对 ^{239}Pu 则采用电沉积制源后用 α 能谱法进行测量。

3 海洋放射性监测网的建设

采用现场样品采集、样品保存和富集,然后在实验室样品分析的方法来进行海洋放射性监测,虽然可提高海水监测灵敏度和精确度,但是一项需要投入大量人力物力的工作,同时存在效率低和应急性差等缺点。如何及时有效地在核事故情况下对事故海域的放射性活度进行监测成了国际上研究的热点问题之一^[13~16]。

3.1 监测系统

在海洋放射性监测网系统中,探测器的选择是至关重要的。碘化钠(NaI)晶体探测器是目前选用最多的一种,欧美等发达国家和地区于20世纪就建立了以 NaI 探测器为核心的海洋放射性监测系统^[7,17~21],如美国开发了用于北极地区放射性核素监测站原型系统,比利时开发了海水放射性活度连续自动监测系统和监测网,希腊开发了无人值守自动水中放射性活度浓度连续测量的原型系统,德国则应用 NaI 谱仪进行海水放射性活度测量的船载走航和浮标定点测量系统。此外,日本和韩国在核电站附近水域均装备水下放射性监测系统,进行常年实时连续监测。一般来说,国外的海洋放射性探测

装置大都设计为浮标式投放海中测量的工作方式,采用的也都是 NaI 探测器。其大致结构如图1所示。

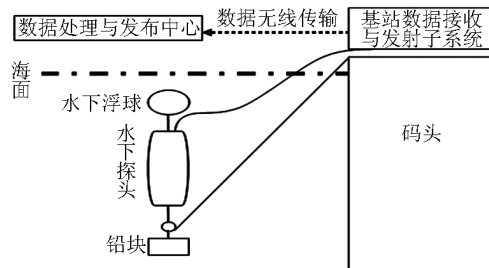


图1 国外常用海洋放射性探测装置构造示意图

Fig. 1 Diagram of the marine radiation detecting devices commonly used abroad

用 NaI 探测器进行海水中放射性核素的测量是一种非常方便的测量方式,但它无法对来自海水以外的本底进行屏蔽,且 NaI 探测器的分辨率很低,无法对能量相近的核素进行剥离,导致分析的误差较大。笔者研究团队2007年所承担的海洋公益性项目“核电海域放射性检测新技术与辐射防护评价研究”其中取得的重要突破性成果是研制了一套海洋放射性实时监测系统。该装置以高纯锗 γ 谱仪为探测器,能快速有效监测到监测船行驶海域的海水放射性超标事件并给出报警信号,同时在核素浓度较高时,也可以很好地分辨出海水中的放射性核素,解决了现有监测方法中采集水样送回实验室分析造成大量时间消耗的问题。该报警装置测量耗时短,监测频率高,实时性强,能为及时发现事故、启动应急预案争取宝贵的时间,将为我国核电海域的放射性监测发挥重要作用。该报警装置以“报警”为核心,摆脱了以“探测”为中心的传统观念,对报警概率、误报率与测量时间、报警阈值一并进行调整和权衡,提出了一套行之有效的报警参数设计方法,是对辐射监测装置设计思想的革新。这套方法对于今后其他需要在短时间内报警的探测装置的设计都可以提供借鉴。

3.2 监测网体系的建设

发达国家较早就根据自身特点建立了一套实时监测网体系,而目前我国的海洋放射性监测网仍然处于规划阶段。

3.2.1 德国的放射性监测体系

德国“联邦海事水文局”(Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, BSH)在北海和波罗的海有一个海洋环境监测网,用于对北海和波罗的海

进行日常放射性监测,主要是通过德国联邦环境署的环境放射性监测综合测量和信息系统(integrated measuring and information system for environmental radioactivity monitoring, IMIS)系统来实现的。IMIS 是德国对其境内环境介质进行放射性连续监测的扩展测量系统,由超过 2 000 个永久监测站组成,它对于海水的常规放射性监测包括 3 个方面:

1) 用放射性监测网络直接监测海水中与事故相关的高放射性浓度;

2) 在日常监测环节中通过额外的采样和分析(包括示踪分析)判别海水、悬浮物和海泥中的特定放射性核素;

3) 对事故后放射性迁移做出预测。

当前,IMIS 对海水的监测包括 7 个离岸监测站、6 个岸基监测站和 3 艘移动测量船,用 NaI 探测器进行直接测量海水总的 γ 辐射。监测测量的探测限是 1 Bq/L(相对于⁴⁰K 的 γ 射线)。这些数据通过卫星或调制解调器,直接传输到 BSH 监测中心网络计算机上。

BSH 控制站计算机手机监测网络传输过来的数据,然后自动评估数据。当数据超过预先设定的警告线时,将会触发室内警铃,之后就要通过取样进行调查确认。当通过取样确认了触发报警装置的样品放射性活度后,将会向负责 IMIS 系统的官员发送紧急信息。所有接收到的监测数据每天都要由 IMIS 进行例行检查和评估。

3.2.2 日本关于放射性核素的监测

为了收集人群接受天然放射性和人工放射性的暴露量数据,摸清人工放射源对环境的影响,日本环境省、文部省组织相关的省、厅、固定试验研究单位和 47 个都道府县,开展了由于放射性沉降导致的环境放射性水平调查。各都道府县负责采集、分析试样,每年大约有 1 500 个试样送至日本分析中心,进行⁹⁰Sr、¹³⁷Cs 的放射化学分析,分析结果汇集于日本放射性监测数据库。此外,由放射线医学综合研究所、防卫厅技术研究本部、气象厅、气象研究所、农业环境技术研究所、水产综合研究中心及海上保安厅水路部等部门对放射性核素的分布和迁移转化行为进行研究。

除上述调查研究外,日本还对核设施周边的环境放射性进行常规监视调查,并对基础数据进行登录。至 2002 年 3 月底,登录数据已达 209 万个,这些环境放射性基础数据对掌握日本的环境状况以及

与人们生活相关的食品等的放射线和放射能量水平起到了重要作用。

3.2.3 美国关于放射性核素的监测

美国环境保护署(Environment Protection Agency, EPA)的放射性监测系统由美国国家空气辐射环境研究所(National Air and Radiation Environmental Laboratory, NAREL)负责。各州分散采样,通过邮政部门寄送到 NAREL 集中分析。每季度出版环境辐射数据报告。开始 NAREL 监测重点放在大气层核试验落下灰上,1986 年切尔诺贝利核事故之后,重点转移到其国内外核反应堆事故或放射性物质运输的监测。

美国的放射性监测网络体系采用实时监测与实验室分析相结合。该检测系统从样品采集、接受、追踪、保管、处理、分析到监测结果发布都有一套完善的质量控制系统。

其他一些发达国家如加拿大的 CRMN、英国的 RIM-NET 等辐射环境监测网络体系都已经达到相当高的技术水平,实现了全面或部分自动化监测。

4 非人类物种的辐射防护研究

海洋生物对核素的富集会对海洋生态系统造成直接或间接的影响,使海洋生物由于受到内照射或外照射的影响从而引发患病、死亡、繁殖率下降等辐射效应,也可能导致海洋生物发生基因变异。同时,海洋生物富集的放射性核素可能通过食物链逐级传递,最终威胁人类的健康。因此,开展海洋辐射生态研究也具有重大的现实意义^[22-25]。

我国 20 世纪 60 年代开展的海洋生物放射性核素浓集(包括放射性核素在水体和沉积物中的分配)的检测和研究,为我国建立完善的海洋辐射环境评价系统提供了一些基础数据和实践经验。但应该认识到,过去辐射环境监测的目的与现在的要求不一样。国际辐射防护委员会(International Commission on Radiological Protection, ICRP)最近提出人类辐射防护应该同时使非人类物种得到保护。现在的辐射防护不仅考虑人类,而且要保护非人类物种,保护与我们息息相关的生态系统,这需要在放射生态学研究扩大物种的范围,有意识地将研究内容集中在具有全局保护意义的参考物种上。通过参考物种的浓集因子与辐射效应研究,了解种群、群落以及生态系统与辐射效应之间的关系,评价电离辐射对环境中生物群落和生态系统的影响。

我国幅员辽阔,具有漫长的海岸线及丰富的生物多样性,各气候带上的生态系统各具特点,选定适合于中国各近海海域使用的参考动物和植物需要大量的基础工作,包括理论分析以及室内外实验,涉及海洋非人类物种个体的敏感程度、受损机理、辐射剂量效应、放射性核素在食物链中的转移和吸附、种群与相关群落在生态系统中的作用及其重要性程度的评价等。

5 海洋放射性污染评价方法

海洋放射性污染评价方法包括两方面的内容:一是根据海洋环境中放射性污染物的分布情况确定海洋环境质量等级;二是通过辐射剂量计算和辐射效应甄别来评价放射性污染物对海洋生物造成的影响。

海洋环境是一个多介质、多环境胁迫因子的复杂体系,要建立辐射剂量—效应评估标准,必须区分其他因子造成的影响。其他环境胁迫因子包括化学因子(营养盐、重金属、有机农药、内分泌干扰物、藻类分泌的生物毒素、放射性核素等)、物理因子(温度、光照、pH值、氧化还原状态、紫外线、盐度)和生物因子(物种免疫调节机制、年龄、个体重量、生活习性、种类组成、生物的生理状态、生长状态等,同时也要考虑物种的年纪变化、季节变化)。

为了正确区分核设施排放和其他来源的人为干扰对生态系统造成的效应,必须加强我国海洋生物细胞、个体、种群乃至群落水平上的辐射效应研究,从群落结构和功能两个方面加深对辐射效应的了解。随着中国沿海地区核电事业发展的加快,正确评价海洋放射性污染和辐射效应在生态系统中的影响途径、程度、影响的对象,建立有效的评价系统,明确核设施运行和生态效应的因果关系,将有利于海洋环境保护和核电事业的稳定发展,对于海洋生态系统健康和沿海经济的发展关系重大^[26-29]。

对于海洋生物监测对象的选择主要通过选择环境放射性污染指示生物。海洋指示生物的选择标准一般可归纳为7条:应是该地定居性种类、应是监测区域分布广泛的种类、应是生命周期较长且周年都活动的种类、应有适当大小和数量以便有足够的样品供分析的种类、易于采集且生命力较强以便能在实验室培养下分析和实验的种类、应有较高的浓缩系数以便不必作高度浓缩即可分析的种类、体内污染物含量应与环境含量具有简单相关性的种类。

海洋指示生物研究大致包括3方面的内容:

- a. 利用海洋生物群落结构和种群的数量变化来监测环境的质量;
- b. 利用某些种类在污染环境中的形态、生化或生理变化来判断水质或地质的状况;
- c. 通过测定生物体积累的污染物的数量来判断水体受污染的程度。

部分研究表明,藻类、海带、双壳类和腹足类软体动物是海洋放射性环境污染指示生物,不同类型的藻类富集效果可能存在差异,有待于进一步研究验证。

6 建议与展望

虽然我国在海洋放射性监测、保护、核安全及应急事故研究方面起步较早,但是,由于各种原因,目前我国在海洋放射性领域的研究工作和水平与国际先进国家还有明显差距,尤其在面临海洋核泄露事故如何更快速反应、现场检测底本底和高灵敏度以及预警系统方面的立体网络建设和时空效应等方面。此次日本核事故为我国海洋放射性研究敲响了警钟,也为该学科的发展提供了一个良好契机。为此,笔者等提出了加强在海洋辐射探测器研发、预警系统研究和监测网的建设等方面研发的建议,具体包括以下4个方面。

6.1 海洋辐射探测器研发

海洋辐射探测器是实现海洋放射性实时监测的核心,目前我国还未有专门针对海洋环境使用的辐射探测器研究。针对海洋的特殊环境以及海水放射性监测的主要需求,研究重心应集中在采用闪烁体 γ 能谱测定原理的传感器技术研究上。将现有辐射探测器进行针对海洋环境的改装后,还需要进行标定、实验室测试、海试等多项工作,并在测试的基础上不断完善探测器及相关配件的性能。

6.2 海洋放射性预警系统研究

在研制探测器装置的基础上,进行现有浮标系统的改造,满足其对于电源供给、数据传输等要求。同时结合水文、气象等参数,可有效满足即时放射性预警及未来趋势预测需求。建立船载的放射性核素快速富集及测量系统,可以解决海洋核事故预警仅能定性分析而不能定量分析的问题,为了解核污染对海洋生态系统的影响等方面提供数据支持。

6.3 建立海洋放射性监测体系

通过设立固定在海上的浮标、岛屿上的陆基监测系统和巡查船上的仪器,和通过无线电远程传输、

卫星传输和互联网数据交换,组成一个实时在线连续监测系统,能够对海洋中的放射性进行连续在线测量。该系统可对我国海域周边众多核电站进行长期监测,在核泄漏发生时能够第一时间发现并及时报警。

6.4 海洋放射性核素快速富集技术研究

目前进行海水放射性监测,通常需要采集大量的样品进行核素富集,然后送至实验室进行测定。传统的海水样品核素富集方法需3~4 d时间,极大制约了海水核素分析的效率。在海洋放射性实时监测系统尚未建立的情况下,针对各核素的特性研制相应的简便的分析方法,对于提供海水放射性监测效率是十分必要的。

参考文献

[1] 张玉敏,李红,朱春来. 海洋核污染与放射性监测技术[J]. 舰船科学技术,2010,32(12):76-80.

[2] 刘广山. 海洋核污染监测问题[C]//同位素海洋学研究文集. 北京:海洋出版社,2006:276-277.

[3] 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.

[4] 国家发展和改革委员会. 国家核电中长期规划(2005—2020)[R]. 2007.

[5] 张华明,李兴亮,杨玉山,等. 裂变放射性核素⁹⁰Sr、¹³⁷Cs分离的研究进展[J]. 同位素,2009,22(4):237-246.

[6] Annunziata M. Handbook of Radioactivity Analysis [M]. Second Edition. Beijing: Atomic Energy Press,2006.

[7] Zvara I, Povinec P, Sykora I, et al. Determination of very low levels of radioactivity[J]. Pure & Applied Chemistry,1994,66(12):2537-2586.

[8] 李培泉,等. 海洋放射性及其污染[M]. 北京:科学出版社,1983.

[9] 何建华,陈立奇,门武,等. 海水中¹³⁷Cs的快速富集与分析[J]. 台湾海峡,2011,30(2):280-285.

[10] Evangeliou N, Florou H, Bokoros P, et al. Temporal and spatial distribution of ¹³⁷Cs in Eastern Mediterranean Sea: Horizontal and vertical dispersion in two regions[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2009,100:626-636.

[11] 樋口英雄. 环境放射性核素分析[J]. 国外铀矿地质,1987(1):70-72.

[12] 齐文启,陈光,席俊清,等. 放射性核素污染及监测[J]. 环境监测管理与技术,2003,15(4):10-12.

[13] Tsabaris C, Ballas D. Online gamma-ray spectrometry at open sea[J]. Applied Radiation and Isotopes,2005,62(1):83-89.

[14] Tsabaris C, Thanos I, Dakladas T. The development and appli-

cation of an underwater γ -spectrometer in the marine environment [J]. Radio Protection,2005,40(S1):677-683.

[15] 刘广山,腾晔洁,祖其荣,等. 地下铁室铅室组合屏蔽低本底HPGe γ 谱测量系统及其应用研究[J]. 辐射防护,1997,17(6):427-433.

[16] King S E, Aakenes U R, McCoy K, et al. Development of the arctic radionuclide monitoring station[J]. Nuclear Science,IEEE Transactions,1997,44(3):777-782.

[17] Jones D G. Development and application of offshore gamma-ray spectrometry measurement: a review[J]. Journal of Environment Radioactivity,2001,53:313-333.

[18] Povinec P P, Osvath I, Baxter M S. Underwater gamma-spectrometry with HPGe and NaI(Tl) detectors[J]. Applied Radiation Isotopes, 1997, 47:1127-1133.

[19] Osvath I, Povinec P P. Seabed γ -ray spectrometry: applications at IAEA-MEL[J]. Journal of Environment Radioactivity,2000,53:335-349.

[20] Wedekind C, Schilling G, Gruttmuller M, et al. Gamma-radiation monitoring network at sea[J]. Applied Radiation Isotopes, 1999, 50: 733-738.

[21] Tsabaris C, Thanos I, Dakladas T. The development and application of an underwater γ -spectrometer in the marine environment [J]. Radioprotection, 2005, 40:677-683.

[22] Durham J. Concepts, quantities and dose limits in radiation protection dosimetry[J]. Radiation Measurements, 2007,41:28-35.

[23] Zhang W, Wang C, Minamihisamatsu M. Dose limits below which the effect of radiation on health becomes undetectable due to background variation[J]. Mutation Research, 2008,654:96-99.

[24] Florou F, Trabidou G, Nicolaou G. An assessment of the external radiological impact in areas of Greece with elevated natural radioactivity[J]. Journal of Environment Radioactivity, 2007,93:74-83.

[25] Aleta C R. Regulatory implications of a linear non-threshold (LNT) dose-based risks[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2009,67:1290-1298.

[26] 刘鸿诗. 核医学放射性同位素应用辐射环境影响评价[J]. 原子能科学技术,2004,38(增刊):188-191.

[27] 时华蓉,赵如意,张国禹. 某企业工业废水中放射性致环境影响评价[J]. 中国辐射卫生,2005,14(4):253-255.

[28] 马稳林,曹建主,方栋. 核设施正常工况下液体放射性流出物环境影响评价模型简介及其应用举例[J]. 辐射防护,2008,28(2):90-98.

[29] 张良安. 核事故体内污染的评价方法[J]. 国外医学.放射医学核医学分册,1999,23(3):97-102.

(下转 82 页)