

辐射环境监测技术发展的观察、展望与建议

Observations and prospects of the development of radiation environmental monitoring technologies and the relevant recommendations

■文 / 赵顺平

辐射环境监测是核与辐射安全监管、应急处置的基础支撑,是生态环境监测工作的重要组成部分。加快建立与我国核事业发展相适应、与核安全监管相互协同的现代化辐射环境监测体系,是安全发展核能与核技术利用产业的重要保障,是以高水平保护支撑高质量发展、建设美丽中国与核强国的重要支撑。

一、在国家核安全观的指引下取得历史性成绩

2014年3月24日,习近平主席在荷兰海牙举行的第三届核安全峰会上首次提出“理性、协调、并进”的核安全观。核安全是国家安全的重要组成部分,也是生态安全的重要内容,事关人民健康、社会稳定、经济发展。辐射环境监测体系作为核安全、生态环境保护的重要支撑,在国家核安全观的指引下逐渐走向成熟。党的十八大以来,我国在完善辐射环境监测法律法规等顶层设计的基础上,建立了国家、省和市“三级辐射环境监测体系”,建成全国辐射环境质量监测、重点核设施周围辐射环境监督性监测和核与辐射应急监测“三张网”,辐射环境监测事业取得历史性成绩。

(一) 顶层设计不断优化

1. **监管法规体系日益成熟。**辐射环境监测法律法规不断完善,建立了一套接轨国际、符合国情、相对完善的辐射环境监测监管法规体系。《中华人民共和国环境保护法》明确放射性物质是污染物,应当加强防治;《中华人民共和国放射性污染防治法》进一

步明确环境保护主管部门制定监测规范,组织监测网络,统一规划环境监测站(点),建立监测数据共享机制。2017年出台的《中华人民共和国核安全法》进一步明确了辐射环境监测的职责,对辐射环境监测数据信息公开进行规范。这些法律对“依法治核”以及完善我国辐射环境监测法律体系具有里程碑意义。同时,我国相继出台《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》《核电厂核事故应急管理条例》《放射性物品运输安全管理条例》和《放射性废物安全管理条例》等多部法规,使辐射环境监测工作开展实现有法可依、有规可循。

2. **技术标准体系更为严密。**我国一直高度重视辐射环境监测的标准化工作。截至目前,制定并发布辐射环境监测标准、技术规范135项,覆盖核与辐射应急监测、环境监测、流出物监测、电磁辐射和质量保证等诸多领域,成为助推辐射环境监测能力快速提升的重要保障。

(二) 软硬件实力大幅提升

1. **人才队伍快速成长。**通过多途径引进、高层次培育,已初步打造了一支结构合理、素质优良、能力突出的辐射环境监测生态环境保护铁军队伍,并朝着“专、精、特、新”的方向不断迈进。截至2022年,全国省级辐射环境监测机构中硕士以上学位的人员占比从“十一五”末期的22.5%提升至38.5%,正高级职称人员占比从“十一五”末期的2.4%提升至4.1%,副高级职称人员占比从“十一五”末期的24.4%提升至31.2%。

2. **硬件设施配备齐全。**在国家和地方

财政的支持下,全国辐射环境监测机构监测仪器配备较为齐全, γ 能谱仪、低本底计数器、液体闪烁计数器等硬件设备基本能够满足辐射环境监测需求,各省级辐射环境监测机构共配备仪器设备1 957套,为保障环境安全发挥了基础保障作用。

(三) 监测数据质量逐年提高

辐射环境监测以我国核安全观为指导,坚持精准、科学、依法的工作方针,以监测先行、监测灵敏、监测准确为导向,以更高标准保证监测数据“真、准、全、快、新”为根本,构建完善的监测质量管理体系,实现辐射环境监测从数量规模型向质量效能型的跨越。加强监测技术人员资格管理和技术培训,自“十三五”时期以来,完成上岗考核8 000余人次,组织全国技术培训和交流2 400余人次。全力推进量值溯源体系建设,配发了覆盖国家辐射环境监测网(以下简称国控网)主要监测项目的87种标准物质。推行质量考核、监测样品外检和实验室间比对等外部质量管理措施。国控网手工监测有效数据获取率逐年稳步提升,由2016年的86%提升至2023年的98%。8家省级辐射环境监测机构通过国际原子能机构组织的能力验证,切实发挥了支撑生态环境管理决策的“顶梁柱”作用。

(四) 监测应急体系发挥效用

近年来,国家每年组织约6个省份开展由政府主导的核与辐射事故综合应急演练,以点带面、以演代训,实现了全国31个省(区、市)全覆盖。各省份以此为契机,持续强化应急能力建设,建立了比较专业的核与辐射事故应急处置队伍,可有效应对辖区内各类辐射事故。通过建设惰性气体监测系统、移动式监测方舱和长白山实验室等项目,应急监测能力得到大幅提升。全国应急监测能力经受住了日本福岛核事故、境外核试验等实战检验。辐射环境监测应急体系在保障全国各项大型活动中也发挥了重大作用。

二、在新发展格局下助推我国经济高质量发展

习近平总书记在党的二十大报告中提出,要“以新安全格局保障新发展格局”。辐射环境监测作为确保核安全与环境安全的关键技术支撑,对推动涉核产业安全发展、促进经济高质量发展起着重大作用,辐射环境监测工作责任重大、使命光荣。

(一) 保障辐射环境安全

为及时、客观地掌握我国辐射环境质量现状及变

化趋势,在生态环境部指导下,生态环境部辐射环境监测技术中心每年制定监测方案和质保方案,编制监测报告,牵头组织全国31个省份开展全国辐射环境监测工作。近年来的监测结果表明,我国1 835个环境质量监测点位处于本底水平,人工放射性核素活度浓度未见异常;近岸海域海洋生物中天然放射性核素活度浓度处于本底水平,人工放射性核素活度浓度未见异常。

(二) 支持核电产业稳进提质

核能作为一种安全、清洁、经济、可靠的能源,是我国构建清洁低碳、安全高效能源体系的重要组成部分。在核电研发与应用领域,中国一直走在世界前列。核安全是核电发展的生命线,辐射环境监测是核安全监管的基础,也是诠释国家核安全观的具体行动。我国对核电基地的辐射环境监测遵循“严、慎、细、实”的原则,实施独立、审慎、专业、高效的监管。从每年的监测结果来看,核电基地周边海域海水、沉积物、海洋生物等环境介质中与设施活动相关的放射性核素活度浓度总体稳定在历年范围内。评估结果显示,各核电厂运行对公众造成的辐射剂量均远低于国家规定的剂量限值,未对环境安全和公众健康造成影响。

(三) 推动核技术利用产业快速发展

在2023年核技术应用产业国际大会上,中国核能行业协会发布的首份《中国核技术应用产业发展报告(2023)》显示,我国核技术应用经济规模持续扩大,产业进入快速扩张期。辐射环境监测作为防护手段、技术手段,有效支撑保障了核技术利用产业的快速、安全发展。辐射环境监测在民用核燃料循环设施制造、核废物处置、铀矿冶开采等方面都发挥了至关重要的作用。从监测结果来看,各涉核利用单位的环境辐射剂量都在国家规定的剂量范围内。

(四) 强化特高压、5G行业环境保护

电网、移动通信是国家重要的基础设施。电磁辐射环境监测在国家电网、通信网络等基础设施建设过程中发挥了重要的支撑保障作用,高效助力新技术的推广和应用。从监测结果来看,电力工程、通信网络等的电磁辐射水平均在国家规定限值内。

三、新征程下辐射环境监测面临的新挑战和新机遇

(一) 辐射环境监测面临的新挑战

按照核电中长期发展规划,“十四五”期间,我国

自主三代核电核准节奏稳步推进,核电装机数量快速增长,这对辐射环境监测提出更高要求。“华龙一号”“国和一号”“玲龙一号”等各种新核电机组高效推进,核技术利用产业不断拓展,辐射环境监测任务将更加繁重,对我国核与辐射环境监测、应急保障能力提出更大挑战。

(二) 辐射环境监测面临的新机遇

2020年,我国提出碳达峰碳中和目标,能源电力系统清洁低碳化转型加快。核能作为低碳能源,其规划布局迅速推进,发展的绿色底色愈发鲜明。生态文明建设和改革加快推进,顶层设计不断完善,这对于辐射环境监测领域而言将释放巨大的政策红利。同时,随着“一带一路”倡议及核电“走出去”战略不断深入,我国核事业的开放合作拥有了更大舞台,核安全国际交流合作日趋频繁、领域更加广阔,将为辐射环境监测工作提供强大的外部动力。

四、新时代辐射环境监测技术发展的新趋势和新建议

从技术角度来看,辐射环境污染看不见、摸不着,难以被人类感知,因此,辐射环境监管在很大程度上更依赖于环境监测。同时,“核恐惧”在全世界范围内依然存在,核辐射污染具有高度敏感性,备受人民群众关注。

辐射环境监测是一门多学科交融的应用技术,融合了辐射探测、现代仪器、核工程、核技术利用、辐射防护、辐射剂量学、环境生态学、气象、水文、地理、社会心理学等内容。其中,辐射防护、辐射剂量学、环境生态学、气象、水文、地理、核工程、核技术利用等经典基础学科,构成辐射环境监测的基本理论。辐射探测技术起步于放射性现象的发现,如今已发展到较高水平,核仪器仪表制造技术与现代仪器制造技术基本同步,现有的辐射探测技术能力足以满足辐射监测需要,传统的辐射监测仪器,如 γ 谱仪、 β 液闪谱仪、低本底 α/β 计数器三大件在主要技术指标(如本底、效率)上进一步提升的空间有限。

但是,越来越多的生态环境应用需求对监测仪器提出了更高要求,例如,在仪器制造中,对重量、体积、特殊形状、恶劣环境适应性、长续航等非核心指标的不断优化,就能满足辐射环境监测越来越多的应用场景需求。

国产辐射监测仪器近年来虽有进步,但相比进口辐射监测仪器差距仍较大,存在关键空白,未来国产替代发展空间很大,如高纯锗HPGe探测器、高分辨电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)、加速器质谱仪(AMS)、 α 谱仪等国产仪器的市场份额很小,而有些国家对我国部分企业的产品实施禁售,国产原研核仪器的发展任重道远。

(一) 辐射环境监测技术的新发展

近年来,国内发展相对较快的是一些辅助技术在辐射环境监测中的应用,如网络信息技术、软件(包括AI数据分析)。正是这些技术使辐射环境监测在网络化、自动化、数智化方面达到了一个新高度。监测搭载工具快速发展,出现了无人机、机器人、无人潜水器等,提高了自动监测和应急监测的能力。采样制样技术看似简单,实则有很大提升空间,在自动化、批量化方面存在需求,如水样现场采集、生物样品大批量自动制样等,国际先进的辐射监测机构往往将技术创新的重点放在该领域。

国际上的辐射监测技术发展更快,不少实现了“硬”突破,在传统的三种辐射环境监测类型——现场监测、实验室测量、自动在线监测的基础上,又发展了新类型——智能引导监测(Intelligent guidance monitoring)。其运用AI实时反馈技术,能够在达到同样监测目的的情况下大幅节省监测资源,可用于对复杂事故的应急监测。辐射环境最常见的现场监测类型中,以前被认为先进的二维 γ 相机已升级到三维辐射成像,甚至动态成像,可应用于复杂地形或室内立体空间环境污染监测。最近,一些新材料被用于辐射探测器,如由钙钛矿制造的辐射探测器,响应时间可达到纳秒级,可用来探测脉冲式辐射,如一些大科学装置的辐射监测。一些超导材料可用作能量累积型辐射剂量探测器,可提升环境监测的效率,降低环境监测成本。

辐射探测灵敏度是仪器探测技术能力水平高低的核心指标。高分辨电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)、加速器质谱仪(AMS)是该指标探测技术能力的佼佼者,可实现多种痕量或超痕量核素的分析测量,灵敏度超高且测量速度极快,可用于超铀核素、钨-99等难测核素的检测;高分辨电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)可在多种核素的分析中替代 γ 能谱仪、 β 液闪谱仪和低本底 α/β 计数器三

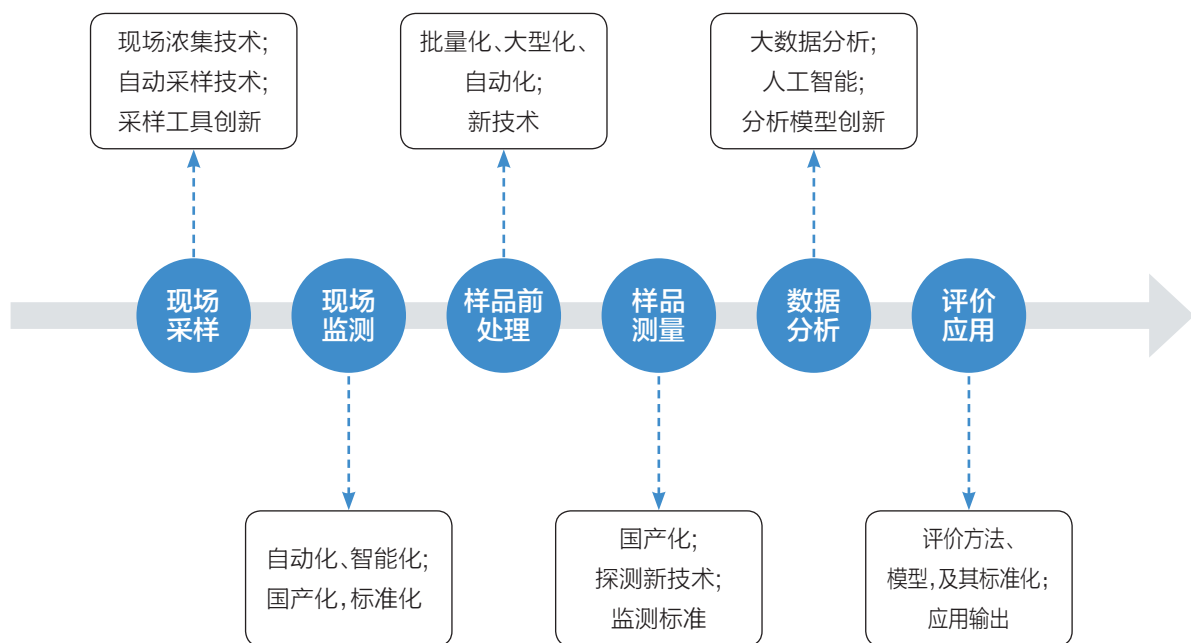


图1 辐射环境监测全过程中的技术需求

件套,并在探测限、测量时间等指标上实现完全超越。加速器质谱仪AMS可应用于碘-129、碳-14等核素检测,其中碘-129/碘-127比值的探测限可达10—15,可用于痕量放射性核素在生态环境中迁移规律的科学研究。原子阱痕量分析(ATTA)技术则是另一种超灵敏核素分析技术,基于激光共振猝灭—俘获方法,能实现稳定同位素单原子计数,探测限可达到10—17水平,具有超高灵敏度、高选择性、零背景的优点,可应用于环境科学领域,分析环境样品中的氦-81和氦-85,氩-39和钙-41。

全自动放射化学分析处理系统/机器人逐渐被用于复杂的化学样品前处理操作,如应用于锶-90等前处理复杂的化学分析工作,可替代繁重的人工重复劳动,还可提高检测稳定性;也可应用于放射性水平较高的流出物监测,有利于辐射防护,减少工作人员的辐射照射剂量。

(二) 辐射环境监测技术的发展建议

对辐射环境监测全过程中的技术需求进行系统分析(见图1),从中可以看到,辐射环境监测的许多领域有待我们去创新,去开拓新质生产力。

1. 聚焦自动化、智能化,加强监测设备的研制和应用。紧盯监测技术提升和国产装备开发应用需求,汇聚全国相关单位的力量,锻造产、学、研、用一体化的辐射环境监测创新链,积极研究监测新方法,开发应用监测新装备,填补辐射监测仪器的关键空白,加快科技成果转化和示范应用,推进监测装备国产化。努力实现量的有效增长和质的快速跃升,依靠国产仪器形成“硬核监测实力”,构建我国现代化辐射环境监测体系。

2. 聚焦国际化、前沿化,加强与国际先进辐射监测机构的对标与交流。对标国际先进,列出能力提升清单,积极参加国际原子能机构等国际组织及其下属全球网络实验室成员的技术交流和协作。创造条件开展国际比对,与国际组织建立常态化沟通渠道,紧跟最新监测技术发展前沿,开展最新监测技术研究。着力弥补在监测数据的分析评价与公众交流方面的短板差距,不断提升我国在国际辐射环境监测领域的地位,增强影响力、公信力和话语权。

作者简介:浙江省生态环境厅首席专家,第三届大比武活动专家委员会委员