

无人机核应急航空监测技术体系构建与思考

房江奇^{1,2}, 杨金政^{1,2}, 安政伟^{1,2}, 汪哲^{1,2}, 李怀渊^{1,2}

1. 核工业航测遥感中心, 河北 石家庄 050002; 2. 中核核应急航空监测工程技术研究中心, 河北 石家庄 050002

摘要: 随着核能的开发利用, 核设施的安全运行已成为公众共同关注的社会问题之一, 国家高度重视核应急的预案和法制、体制和机制建设。其中, 核应急航空监测的应急准备与响应是国家核应急体系的重要组成部分之一, 核应急航空监测技术体系中正在建设有人机和无人机航空监测优势互补的技术体系。近几年来, 不同载荷、不同类型的无人机应运而生, 搭载的探测器尺寸、种类也趋于多样化, 无人机用于核事故应急航空监测的技术研究不断取得深入和提高, 核事故应急航空监测技术体系同时得到发展。针对无人机核事故应急航空监测, 本文从监测装备与技术、应急预案、应急监测与评价、监测标准、应急人员、应急保障、培训与演练几个方面的视角, 对无人机核事故应急航空监测技术体系的构建进行探讨。无人机是一个正在飞速发展的航空器, 随着其性能的不断改进和核应急航空监测新技术的不断革新和发展, 无人机核应急航空监测技术体系将会不断得到完善和发展, 逐步走向网络化、智能化、标准化。

关键词: 无人机; 核应急航空监测; 技术体系

中图分类号: TL75 文献标识码: A 文章编号: 1004-714X(2023)04-0456-05

Construction and reflections on UAV airborne monitoring technology system for nuclear emergency

FANG Jiangqi^{1,2}, YANG Jinzheng^{1,2}, AN Zhengwei^{1,2}, WANG Zhe^{1,2}, LI Huaiyuan^{1,2}

1. Airborne Survey and Remote Sensing Center of Nuclear Industry, Shijiazhuang 050002 China; 2. CNNC Engineering Technology Research Center of Airborne Monitoring for Nuclear Emergency, Shijiazhuang 050002 China

Abstract: With the development and utilization of nuclear energy, the safe operation of nuclear facilities has become a social issue of great concern. China attaches great importance to nuclear emergency plan and the construction of legal, institutional, and mechanism systems. Among them, the emergency preparedness and response of airborne monitoring for nuclear emergency is one of the important components of the national nuclear emergency system. The technology system of airborne monitoring for nuclear emergency is being developed and combines the advantages of manned aircraft and unmanned aerial vehicle (UAV) airborne monitoring. In recent years, UAVs with different loads and types have been developed, with diversified sizes and types of detectors carried by UAVs. The research on UAV airborne monitoring techniques for nuclear emergency has been continuously deepened and improved, and the technical system of airborne monitoring for nuclear emergency has been developed at the same time. The construction of UAV airborne monitoring technology system for nuclear emergency is discussed from the perspectives of monitoring equipment and technology, emergency response plan, emergency monitoring and evaluation, monitoring standards, emergency personnel, emergency support, and training and exercise. The UAV is a rapidly developing aircraft. With the continuous improvement in UAV performance and the continuous innovation and development of nuclear emergency airborne monitoring technology, the UAV airborne monitoring technology system for nuclear emergency will be constantly improved and developed towards networking, intelligence, and standardization.

Keywords: UAV; Airborne monitoring for nuclear emergency; Technology system

Corresponding author: YANG Jinzheng, Email: 149120592@qq.com

核应急航空监测技术起源于早期铀矿勘探, 是在素识别仪或大气采样和分析仪安装在航空器上, 对核就地测量技术的基础上逐渐发展成用于核事故应急应急区域的放射性污染状况进行快速、有效监测, 进的高新技术, 即是把航空伽玛能谱仪、剂量率仪、核而确定放射性核素种类, 实时圈定放射性污染的范围

作者简介: 房江奇 (1966—), 男, 河北人, 正高级工程师, 从事核事故应急航空监测及辐射环境航空监测工作。E-mail: jiangqifangzi@163.com
通信作者: 杨金政, E-mail: 149120592@qq.com

和水平,对辐射危害程度和水平及时提供准确的信息,为国家和地方应急决策提供技术支持。此技术是突发核事故后对广大区域的辐射状况进行快速监测唯一有效的技术手段^[1]。

近年来,我国已初步形成了核应急专业力量建设格局。核应急航空监测的应急准备与响应同样也是国家核应急体系的重要组成部分之一,核应急航空监测技术体系中正在建设有人机和无人机优势互补的技术体系。

1 无人机辐射环境航空监测进展

无人驾驶航空器(简称“无人机”)是一种由遥控设备或自备程序控制装置操控,机上无人驾驶的航空器。20 世纪末,无人机核辐射监测技术逐渐开始发展起来,最早的无人机核辐射监测系统将一些核辐射监测的传感器安装在小型无人机上,进行核事故环境方面的监测^[2-4]。随后,在国外,无人机核辐射监测技术得到迅速发展,针对不同载荷的无人机,可以搭载不同尺寸、不同类型的探测器开展辐射监测^[5-6]。

以美国为例,目前已建成比较完整的核事故应急装备体系,其主要特点是种类齐全、功能完备、装备手段多样,专业化、信息化、集成化、智能化、网络化程度高。在装备性能上,具备了便携性好、功能全、性能可靠等明显优势,总体发展是一机多能、高可靠、宽量程以及平台综合集成^[7]。在 2012—2016 年间,日本采用无人机进行了 10 次辐射监测,测量采用 LaBr₃(Ce) 探测器^[8-9]。在 2014 年 5 月举行的“全球闪电”核战略军事演习中,航空无人机核辐射系统就被应用于涉核装备跨区机动运输系列保障任务^[7]。2019 年,由英国国家核工业机器人研究中心(NCNR)及布里斯托大学带领的专家团队于 4 月在切尔诺贝利核电站及周边地区开展了为期两周的辐射监测工作。他们在无人机上安装了定制的辐射探测器,通过这种方法绘制了该地区的 3D 辐射剂量图。这是世界上首次在较宽阔地区将固定翼无人机用于辐射剂量率图的快速绘制,结果发现了几处之前未检测出的辐射“热点”^[10]。

在国内,2020 年,采用 Z-3 型无人机搭载大体积 NaI(Tl)晶体探测器航空监测系统参加区域辐射事故演习行动,发现辐射异常区域,定位辐射异常位置^[11]。2017 年,国家在《国家突发事件应急体系建设“十三五”规划》中就将无人机纳入应急救援体系专业装备。在国内,无人机核辐射监测技术正在得到不断

发展。国家核应急救援航空辐射监测分队装备有专门用于核事故应急的大体积 NaI(Tl) γ 能谱仪系统(4 条 2" \times 4" \times 16" 晶体)、4 组 GM 计数管组成的剂量率仪系统及 4 组中子管组成的探测器系统,同时装载数字录像系统。

国内、国外无人机搭载的监测装备呈现多样化,如可搭载不同体积的 NaI(Tl)晶体探测器、BGO(锗酸铋)晶体闪烁体、CZT(碲锌镉)半导体探测器、LaBr₃(Ce)晶体探测器、CeBr₃(Ce)探测器、CsI(Tl)探测器、GM 计数管剂量率仪等。

2016 年 2 月,国家核事故应急协调委员会发布了国家核应急救援航空辐射监测分队建设规范^[12],2016 年 12 月 14 日,国家国防科技工业局颁布了核应急航空监测要求(EJ/T 20144—2016);2020 年 5 月 1 日,国家市场监督管理总局和中国国家标准化管理委员会发布了无人驾驶航空器系统术语(GB/T 38152—2019)国家标准;2020 年 6 月 3 日,国家国防科技工业局颁布了无人机航空伽玛能谱测量要求(EJ/T 20238—2020);2023 年 6 月 28 日,国务院和中央军委联合发布《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》,这些均为无人机用于核事故应急监测奠定了技术基础。

无人机上没有驾驶员、对导航系统和通信系统的依赖性强,同时,由于通信传输距离、抗风能力、续航时间、载荷受限和辐射探测器受限的特点,造成使用无人机平台搭载辐射探测器开展航空监测,具有和有人机不同的航空监测技术体系。

2 无人机核事故应急航空监测技术体系构建

实施应急航空监测其目的在于:1)为事故分级提供信息;2)及时搜集有关公众和周围地区可能产生的危害大小情况,为应急决策部门制定应急决策和防护措施提供必要的基础依据;3)为应急人员的防护提供信息;4)确定辐射危险的范围^[13]。1986 年切尔诺贝利核事故之后,我国的核应急工作正式起步。国家核应急预案(2013 年 6 月 30 日修订)中要求,国家核应急协调委委托成员单位要健全完善航空监测核应急专业技术支持体系。航空监测力量包括有人机核事故应急航空监测和无人机核事故应急航空监测。在核事故早期启动无人机航空监测可以避免人员遭受不必要的可能造成的辐射照射。有人机核事故应急航空监测技术体系已经形成,近几年来随着无人机核辐射监测技术的不断发展,无人机用于核事故应急的技

术研究不断取得深入,用于核事故应急的技术体系同时得到发展。本文从监测装备与技术、应急预案、应急监测与评价、监测标准、应急人员、应急保障、培训与演练几个方面的视角,就无人机核事故应急航空监测技术体系的构建展开论述和讨论。

2.1 监测装备和技术 核事故应急航空监测采集信息多元化,监测装备构建多类型的辐射探测器类型。例如,探测效率高的薄碘化钠晶体探测器、厚碘化钠晶体探测器,可探测 γ 射线并获取高的探测效率、获取污染物的活度浓度;高分辨率的 HPGe 探测器、LaBr₃ 探测器、CeBr₃ 探测器,可利于核素识别;构建监测空气中 α 气溶胶浓度及 ¹³¹I 等大气采样装备,可进行空中采样和分析;构建 GM 计数管剂量率设备,利于强辐射区剂量率的测量。

构建信息交换技术体系。信息交换方式走向网络化、多样化。采用专用的通信系统、互联网络通信、卫星通信、中继通信、媒体介质等多种通信技术手段,应对不同通信条件下的信息交换能力。信息交换包括了空中无人机机载平台和地面控制接收端的信息的实时传输和指令的发送与接收控制;地面监测人员之间、监测人员向上级部门的信息发送与接收、监测分队与其他救援力量之间的信息交换等。统一信息交换标准、规范信息传递流程,达到各个应急力量之间可以互联互通,共享数据。构建分队与洗消分队日常信息交换机制,明确分队的需求,同时分队也可以应对分队装备遭受辐射污染,采取洗消行动。构建信息时代军地联动应急指挥技术体系,日常信息交换机制,建立完善信息共享、情报对接、行动监控与效果评估等互操作机制,保障在执行任务期间,相互配合,高效完成应急监测遂行任务。

构建无人机核应急航空监测数据实时处理分析报告装备。通过应急监测数据处理分析软件对监测数据进行分析,基于多源数据集成和深度融合可视化应用系统,实现对监测数据的及时分析报告。

构建核应急航空监测综合信息分析研判平台装备。能够动态模拟分析放射性污染态势、分布范围、影响程度,设计核事故应急航空监测应急任务区,制定及优化核事故应急航空监测方案。

应急监测装备保障充足化。按照国家核应急预案要求,在应急监测装备、人员辐射防护、后勤保障、通信保障等方面数量充足,且具有一定的冗余能力。

无人机核应急航空监测逐步实现装备种类齐全、功能完备、装备手段多样,实现专业化、信息化、集成化、智能化和网络化。构建便携性好、功能全、性能可靠的装备,达到一机多能、高可靠、宽量程以及实现平台的综合集成。

2.2 应急预案(计划) 应急预案可分为:航空辐射监测分队核应急预案、各个核设施的核应急航空监测预案、无人机飞行应急预案。

航空辐射监测分队(简称“分队”)核应急预案是整个分队的应急预案,是为建立健全核应急救援航空辐射监测机制,规范核应急事态下核应急救援航空监测准备与响应,提高在突发核事故应急事态下的核应急救援航空辐射监测的快速响应和现场应急辐射监测能力,结合实际制定。应急预案包括分队的组织体系和职责、应急准备、应急响应、辐射防护、应急值班、应急装备、通信联络、应急输送、运行维护、队员培训、应急演练(演练)、资金保障等。

不同的核设施规模大小、交通、地理位置、地形地貌、电力、通信、机场、当地空域条件、气象条件各不相同,可能发生的核事故的源项也不尽相同。由于这些客观条件,针对不同的核设施构建特定的无人机核应急航空监测预案。

构建无人机飞行应急预案。应急航空监测时采用的航空器一般包括有人驾驶航空器和无人驾驶航空器(无人机)两种。无人机所属单位应构建所属无人机的飞行应急预案,预案应具有科学性、规范性和可操作性,遵循准确细致原则。应急预案内容应包括以下几个方面:1)应急救援的组织及其职责;2)危险目标的确定和潜在危险性评估;3)应急预案的启动程序;4)进行紧急处置的措施和方案;5)应急救援日常演习(演练);6)应急救援设备的器材储备;7)应急启动的经费保障。

确定紧急情况或事故灾害及其后果的预测、辨识和评价方法,明确应急各方的职责分配,构建应急救援行动的指挥与协调机制;保障应急救援时可用的人员、设备、设施、物资、经费和其他资源,包括社会和外部的援助资源等;健全在紧急情况发生时保护生命财产和环境安全的措施。

2.3 应急监测与评价 根据任务需求,搭载不同种类或组合的探测器,获取不同的辐射环境信息。应急监测程序主要包括以下几个方面:

1) 任务下达。当核设施及有关核活动已经或可

能发生核事故时,启动 I 级应急响应情况下,分队会接到核应急响应指令。

2) 应急监测方案制定。分队依据上级通报的核事故(事件)机组工况、核应急区域的气象信息,研判核事故(事件)的发展趋势,借助核应急航空监测综合信息分析研判平台,立即制定核应急航空监测区域范围,在以往核应急航空监测预案的基础上,完善此次核应急响应行动的核应急航空辐射监测行动方案。

3) 装备和人员输送。分队依据提供的核事故(事件)信息后,配备相应应急装备、人员,开展应急装备检查,监测设备测试。装备和人员可采用空中投送、铁路输送或公路运送方式到达任务监测执行集结地。我国在“十四五”应急救援力量建设规划中指出,在“十四五”末,国家级专业应急救援队伍接到指令后到达救援现场时间 $\leq 8\text{ h}$ ^[14]。

4) 设备展开。在航空监测现场展开设备,测试设备,确认设备正常。

5) 应急监测。依据核事故应急航空监测的目的不同,航空监测方法可以采取不同的穿越方式进行飞行。常用的方法包括“之”字式飞行、扫描式飞行、同心圆式飞行方式 3 种方法^[15]。

6) 数据分析。出现核事故发生污染物随大气扩散时,监测对象通常包括放射性烟羽和地面沉降核素两大部分。数据分析内容通常包括被测目标的活度浓度、空气吸收剂量率、核素的种类。

7) 结果报告。构建不同的数据表达方式,如平面剖面图、平面等值线图、立体影像图、点位图,同时叠加不同的地理信息。充分展示测量结果,为应急决策提供技术支持。

2.4 监测标准 针对无人机核应急航空监测技术手段,构建无人机核应急监测标准体系。在核应急航空监测要求的基础上,结合无人机飞行的特点,制定无人机核应急监测规范。规范应涉及应急人员、装备、监测环境、应急管理的内容。“应急人员”明确专业要求、人员的资质要求、培训要求。“装备”包括了航空器、机载监测装备、地面保障装备及个人防护装备等方面。“监测环境”包括了应急区域的空域环境、自然环境、无人机起降点环境等。“应急管理”涵盖了应急准备与响应的全过程。

2.5 应急人员 构建应急人员储备体系。无人机核应急航空监测应配备一是无人机机务人员(包括驾驶员、观测员、任务规划员、任务载荷操作员、链路操作员、外场操作员、地勤人员等),另一方面是放射性、

数学、电子仪器、通讯、软件应用与开发、管理等各方面技能的精干应急人员,做好人才梯队建设。高素质的应急人员组成的专业队伍是核应急航空监测得到有效应急的根本保障。培养一支“招之即来、来之能战、战之必胜”的应急救援队伍。

2.6 应急保障 建立健全应急保障体系,保障核事故应对工作的需要。包括物资保障、输送保障、通讯保障、应急人员保障、资金保障等。关键装备应具有一定比例的冗余,确保装备在出现技术故障时,可以及时更换。建立健全核应急器材装备的研发、生产和储备体系。保障体系的构建是实施应急监测能力的保障,它包括体系结构、数量规模、质量特性、技术水平和运行方式等要素,从属无人机核应急航空监测装备体系。

2.7 培训与演练 构建应急人员培训体系,建立有效的新老应急人员培训机制,培训方式、培训内容、培训周期等。培训方式可包括研讨会、网络课堂、电话会议、讲座、网络新媒体以及在职培训等形式。研讨会可分为小型研讨会和专题研讨会。

构建核应急演练体系。应急演练是训练、检验、评估、改进无人机核应急监测管理能力的核心技术手段,同样也是应急准备的主要组成部分之一。应急演练可以包括桌面推演、情景模拟演练、单项演练及全面演练等。

1) 桌面推演。事先设置事故背景,桌面推演可以根据不断变化的应急情景分段进行讨论、每个情景阶段分别设置多个问题,由应急监测人员共同给出解决方案,逐个阶段解决各个问题,最终形成一个总体的应急监测方案。

2) 情景模拟演练,即虚拟环境软件平台模拟演练。借助虚拟环境软件平台,依靠三维模拟技术、数字电子地图、核事故辐射后果预测评价技术等,多个应急监测人员参与模拟演练。

3) 单项演练。分队根据需要分别组织单项演练,此演练是检验一个分队内特定的操作或某一功能的演练。演练范围通常局限在单个部门开展,演练过程均为真正使用的设备和应急队员。例如,对新的设备(包括硬件设备和软件)使用培训、实践和保持现有的技能而进行的演练。

4) 全面演练。一是参加国家级核事故应急联合演习行动,由国家核应急协调委组织实施,一般(3~5)年举行一次;其次参加由核设施营运单位组织的事故应急演习行动。

通过演练(演习)及时发现并解决预案、资源、程序、能力、协同应急等方面存在的不足,完善核应急演练体系,持续提高应急能力。

3 结 语

无人机核应急航空监测技术体系的形成和确立,会受到当前社会经济水平和能力的制约。构建中的技术体系一是建立一套完整的、针对性强的、可操作性高的无人机核应急航空监测技术体系,合理配置应急监测装备,增强其有用性和好用性,并及时做好技术体系的更新;二是持续增强信息化建设,充分利用现代化信息处理技术,实现应急信息高效快速处理;三是要加强横向、纵向联动机制构建,实现信息及时交换与共享,确保应急状态下有效协同和统一指挥。随着无人机性能的不断改进和核应急航空监测新技术的不断创新发展,无人机核应急航空监测技术体系标准化将会不断得到完善和发展。

利益冲突 本研究由署名作者按以下贡献声明独立开展,排名无争议。文章不涉及任何利益冲突

作者贡献声明 房江奇负责起草论文、修订论文;杨金政负责修订论文、资料审查;安政伟负责资料搜集与整理;汪哲负责资料搜集、翻译;李怀渊负责审核论文

参考文献

- [1] 房江奇,杨金政,安政伟,等.核事故辐射环境航空监测实例及思考[J].中国辐射卫生,2021,30(1):53-58. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2021.01.012.
Fang JQ, Yang JZ, An ZW, et al. Example and consideration on airborne monitoring of radiation environment in nuclear accidents[J]. Chin J Radiol Health, 2021, 30(1): 53-58. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2021.01.012.
- [2] 刘国峰,唐俊,徐玉茹,等.基于无人机的辐射监测装备[J].兵工自动化,2022,41(1):23-24,47. DOI: 10.7690/bgzh.2022.01.005.
Liu GF, Tang J, Xu YR, et al. Radiation monitoring equipment based on UAV[J]. Ordnance Ind Autom, 2022, 41(1): 23-24, 47. DOI: 10.7690/bgzh.2022.01.005.
- [3] 王政,伍浩松. IAEA可为成员国提供用于辐射监测的无人机[J].国外核新闻,2021,(2):4.
Wang Z, Wu HS. The IAEA could provide member states with unmanned aerial vehicles for radiation monitoring[J]. Foreign Nucl News, 2021, (2): 4.
- [4] International Atomic Energy Agency. Using unmanned aerial vehicles for environmental monitoring[EB/OL]. (2013-05-17). <https://www.iaea.org/newscenter/news/using-unmanned-aerial-vehicles-environmental-monitoring>.
- [5] 王贤波.基于无人机的核辐射检测系统研究与实现[D].西安:西京学院,2018:1-3.
Wang XB. Research and Implementation of nuclear radiation detection system based on UAV. [D]. Xi'an: Xijing University, 2018: 1-3.
- [6] 高国林,邱崇涛,王景丹,等.无人机航放测量新技术的示范应用[J].物探与化探,2016,40(6):1131-1137. DOI: 10.11720/wtyht.2016.6.12.
Gao GL, Qiu CT, Wang JD, et al. The applied demonstration of new drone aero-radiometric technique[J]. Geophys Geochem Exp, 2016, 40(6): 1131-1137. DOI: 10.11720/wtyht.2016.6.12.
- [7] 袁伟,陈显波,左莉,等.部队核事故应急装备体系建设的思考与启示[J].中国应急救援,2017,(3):22-25. DOI: 10.19384/j.cnki.cn11-5524/p.2017.03.005.
Yuan W, Chen XB, Zuo L, et al. Thinking and enlightenment of construction of military nuclear accident emergency equipment system[J]. China Emergency Rescue, 2017, (3): 22-25. DOI: 10.19384/j.cnki.cn11-5524/p.2017.03.005.
- [8] Japan Atomic Energy Agency. Airborne monitoring [air dose rate][EB/OL][2020-08-25]. <https://emdb.jaea.go.jp/emdb/en/selects/b10103/>.
- [9] 马晓宇,孟德.无人机核辐射航测技术在日本广域辐射监测中的应用研究[J].核电子学与探测技术,2014,34(3):409-413.
Ma XY, Meng D. The study based on the application of UAV radiation monitoring technology for wide area in Japan[J]. Nucl Electron Detect Technol, 2014, 34(3): 409-413.
- [10] 环球网.一年7万游客参观切尔诺贝利 无人机绘制3D辐射剂量图[EB/OL]. [2019-05-10]. <https://www.81uav.cn/uav-news/201905/10/56152.html>.
Global Network. 7, 000 tourists visit Chernobyl a year, 3D radiation dose maps was measured by drones survey, 2019[EB/OL]. [2019-05-10]. <https://www.81uav.cn/uav-news/201905/10/56152.html>.
- [11] 房江奇,杨金政,安政伟,等.石家庄市辐射事故应急演练与思考[J].中国辐射卫生,2021,30(5):602-606. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2021.05.016.
Fang JQ, Yang JZ, An ZW, et al. Radiation accident emergency exercise and thinking in Shijiazhuang city[J]. Chin J Radiol Health, 2021, 30(5): 602-606. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2021.05.016.
- [12] 国家核事故应急协调委员会.国家核应急救援航空辐射监测分队建设规范[S].北京:国家核事故应急协调委员会,2016.
National Nuclear Emergency Coordination Committee. Code for the construction of the national airborne radiation monitoring unit for nuclear emergency rescue[S]. Beijing: National Nuclear Emergency Coordination Committee, 2016.

名无争议。文章不涉及任何利益冲突

作者贡献声明 毕心粼负责提出研究方向, 撰写论文; 张普负责参与撰写论文

参考文献

- [1] Zhou LF, Xue PQ, Zhang YX, et al. Occupational health risk assessment methods in China: A scoping review[J]. *Front Public Health*, 2022, 10: 1035996. DOI: [10.3389/fpubh.2022.1035996](https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.1035996).
- [2] Jardine C, Hrudey S, Shortreed J, et al. Risk management frameworks for human health and environmental risks[J]. *J Toxicol Environ Health B Crit Rev*, 2003, 6 (6) : 569-718. DOI: [10.1080/10937400390208608](https://doi.org/10.1080/10937400390208608).
- [3] Chalak MH, Bahramiazar G, Rasaei J, et al. Occupational health risk assessment at healthcare institutions: Developing a semi-quantitative risk method[J]. *Int J Risk Saf Med*, 2021, 32 (4) : 265-278. DOI: [10.3233/JRS-200048](https://doi.org/10.3233/JRS-200048).
- [4] Zhou ZJ. Understanding the administrative regulation on occupational health and trend in China[J]. *J Occup Health*, 2018, 60 (2) : 126-131. DOI: [10.1539/joh.17-0229-RA](https://doi.org/10.1539/joh.17-0229-RA).
- [5] Ding Q, Schenk L, Hansson SO. Occupational diseases in the people's Republic of China between 2000 and 2010[J]. *Am J Ind Med*, 2013, 56 (12) : 1423-1432. DOI: [10.1002/ajim.22245](https://doi.org/10.1002/ajim.22245).
- [6] Thirunavukkarasu A, Alrawaili KAH, Al-Hazmi AH, et al. Prevalence and risk factors of occupational health hazards among health care workers of northern Saudi Arabia: A multicenter study[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2021, 18 (21) : 11489. DOI: [10.3390/ijerph182111489](https://doi.org/10.3390/ijerph182111489).
- [7] Magalhães LMCA, Silva Costa KTD, Capistrano GN, et al. A study on occupational health and safety[J]. *BMC Public Health*, 2022, 22 (1) : 2186. DOI: [10.1186/s12889-022-14584-w](https://doi.org/10.1186/s12889-022-14584-w).
- [8] Ke P, Wang GZ. Occupational disease hazard factors investigation and risk assessment in one hovercraft manufacturing enterprise[J]. *Occup Environ Med*, 2018, 75 (S2) : A311. DOI: [10.1136/oemed-2018-ICOHabstracts.891](https://doi.org/10.1136/oemed-2018-ICOHabstracts.891).
- [9] Kolstad HA, Christensen MV, Jensen LD, et al. Notification of occupational disease and the risk of work disability: a two-year follow-up study[J]. *Scand J Work Environ Health*, 2013, 39 (4) : 411-419. DOI: [10.5271/sjweh.3336](https://doi.org/10.5271/sjweh.3336).
- [10] Cao ZH, Chen T, Cao YQ. Effect of occupational health and safety training for Chinese construction workers based on the CHAID decision tree[J]. *Front Public Health*, 2021, 9: 623441. DOI: [10.3389/fpubh.2021.623441](https://doi.org/10.3389/fpubh.2021.623441).
- [11] Zhang XY, Wang ZX, Li T. The current status of occupational health in China[J]. *Environ Health Prev Med*, 2010, 15 (5) : 263-270. DOI: [10.1007/s12199-010-0145-2](https://doi.org/10.1007/s12199-010-0145-2).
- [12] Sánchez FAS, Peláez GIG, Alis JC. Occupational safety and health in construction: a review of applications and trends[J]. *Ind Health*, 2017, 55 (3) : 210-218. DOI: [10.2486/indhealth.2016-0108](https://doi.org/10.2486/indhealth.2016-0108).

(收稿日期:2023-03-13)

(上接第 460 页)

- [13] 环境保护部核与辐射安全中心, 核设施安全监管司, 清华大学. 美国辐射环境监测体系及技术[M]. 北京: 中国环境出版社, 2013.
Compiled by Nuclear and Radiation Safety Center, Division of nuclear facility safety regulation, Tsinghua University. US Radiation Environment Monitoring System and Technology [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2013.
- [14] 中华人民共和国中央人民政府. 应急管理部关于印发《“十四五”应急救援力量建设规划》的通知[EB/OL]. (2022-06-22).http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-07/01/content_5698783.htm.

[htm](http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-07/01/content_5698783.htm).

- The Central People's Government of the People's Republic of China. The Notice of the Ministry of Emergency Management on the issuance of the 14th Five-Year Plan for Emergency Rescue Force Construction[EB/OL]. (2022-06-22). http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-07/01/content_5698783.htm.
- [15] 倪卫冲, 顾仁康. 核应急航空监测方法[J]. *铀矿地质*, 2003, 19 (6) : 366-373. DOI: [10.3969/j.issn.1000-0658.2003.06.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-0658.2003.06.009).
Ni WC, Gu RK. Airborne monitoring method of nuclear emergency response[J]. *Uranium Geol*, 2003, 19 (6) : 366-373. DOI: [10.3969/j.issn.1000-0658.2003.06.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-0658.2003.06.009).

(收稿日期:2022-12-26)