

DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2021.01.012

· 辐射安全/论著 ·

核事故辐射环境航空监测实例及思考

房江奇, 杨金政, 安政伟, 王永军

核工业航测遥感中心, 河北 石家庄 050002

摘要: 辐射环境航空监测具有快速、高效、覆盖面大的特点, 是核事故应急监测中不可替代的重要技术手段。本文重点介绍了前苏联切尔诺贝利核电站核事故、美国三哩岛核电站核事故及日本福岛核电站核事故后开展的辐射环境航空监测行动。辐射环境航空监测技术在确定辐射污染范围、辐射环境调查及为国家相关部门快速提供技术支持方面发挥重要作用, 是核事故应急响应行动中重要组成部分。建议有序开展核应急航空监测新型装备技术研究、核事故应急航空监测分析研判研究; 有效应对核事故, 开展全国核设施周围详细辐射环境水平摸底的航空监测研究。

关键词: 辐射环境航空监测; 核事故; 核应急; 核设施

中图分类号: TL75 文献标识码: A 文章编号: 1004-714X(2021)01-0053-06

Example and consideration on airborne monitoring of radiation environment in nuclear accidents

FANG Jiangqi, YANG Jinzheng, AN Zhengwei, WANG Yongjun

Airborne Survey and Remote Sensing Center of Nuclear Industry, Shijiazhuang 050002 China

Abstract: Being fast, efficient and widely-covered, airborne monitoring of radiation environment is an irreplaceable technical means in nuclear accident emergency monitoring. To introduce radiation monitoring actions in nuclear accidents at Chernobyl in the Soviet Union in 1986, Three Mile Island in America in 1979 and Fukushima in Japan in 2011. Airborne monitoring of radiation environment plays an important role in radiation contamination area confirmation, radiation environment survey and technical supply to related national department. Therefore, it is an important part of nuclear emergency response. It is suggested to carry out research on new equipment technology for airborne monitoring of nuclear emergency in an orderly manner; to study the analysis and decision of airborne monitoring for nuclear accident emergency; effectively respond to nuclear accidents, to carry out the detailed survey of radiation environment around nuclear facilities throughout the country.

Keywords: Airborne Monitoring of Radiation Environment; Nuclear Accident; Nuclear Emergency; Nuclear Facility

核能是清洁、安全、高效、经济的能源, 当前我国核电快速发展, 截至 2019 年 12 月 31 日, 在运核电机组 47 台, 在建核电机组 11 台。同时, 在核能开发利用过程中有可能发生突发性的范围环境污染。

随着核能核技术的开发利用, 要求对核设施加强监督管理, 提高核事故应急反应能力已经不是一个单纯的技术问题, 而是一个公众共同关注的社会问题。核电站的发展历史证明了它是安全可靠的, 但也存在着发生严重事故的可能性。自从 1951 年 12 月 20 日美国试验增殖反应堆首次利用核能发电以来, 直至今日人类历史上发生了多次令人恐怖的核事故, 其中重大核电事故有 3 次。1979 年 03 月 28 日发生于美国宾夕法尼亚州的三哩岛核泄漏事故; 1986 年 04 月 26

日发生于前苏联(乌克兰境内)的切尔诺贝利核电站事故; 2011 年 03 月 11 日发生于日本福岛县的福岛第一核电站事故^[1-2]。特别是前苏联切尔诺贝利核电站事故, 在经济上和生态环境上都造成了重大损失和严重影响。这 3 起核事故均动用了航空监测力量开展辐射污染的评价。

1 实例

1.1 三哩岛核电站核事故辐射环境航空监测 早在 1976 年, 由美国遥感实验室为美国能源部(DOE)在三哩岛核电站(Three Mile Island Nuclear Station)及周边 2 000 km² 范围内就已开展了辐射环境航空监测。1979 年, 三哩岛核电站事故后, DOE 立即采用 DOE

作者简介: 房江奇(1966—), 男, 河北石家庄人, 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

的直升机和固定翼飞机搭载放射性航空监测系统 (AMS) 启动了辐射环境航空监测, 1979 年 03 月 28 日开始监测, 05 月 30 日结束测量, 共计飞行 167 个架次, 监测内容包括核素识别、放射性烟羽方向确定、烟羽区最大剂量水平等, 在 91.4 m 测量离地高度上, 监测到最大照射量率达 15 mR/h, 发现并确定了 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 人工核素及其分布范围, 这些航空监测结果及时向美国核管理委员会 (NRC) 提供, 为 NRC 的决策提供了技术支持。搭载到飞机平台上的设备包括 3 台 NaI(Tl) 谱仪、1 台 HPGe 探测器及 GM 计数管等。1982 年 10 月 26 日至 30 日, 在三哩岛核电站及周边较小的区域内开展了更详尽的辐射环境航空监测^[3]。该调查覆盖了以核电站为中心的 82 km² 的区域, 包括宾夕法尼亚州的米德尔敦、约克港、戈德斯伯勒和罗伊尔顿等社区。最高辐射照射量率达 200 $\mu\text{R/h}$, 监测到人工核素 ^{58}Co 、 ^{60}Co 、 ^{137}Cs , 这与核电站的正常开堆运行产生的核素是一致的。在其余的监测区域, 辐射照射量率在 6 ~ 14 $\mu\text{R/h}$ 之间变化, 其中宇宙射线贡献约为 3.7 $\mu\text{R/h}$ 。在航空监测期间, 进行了空地对比测量。沿着上游和下游的河岸调查区域选取了几个测点, 以及在 1976 年进行航空调查的地面地点进行了高压电离室测量和一组土壤样本测量, 这些测量结果与航空监测照射量率数据一致。除了三哩岛核电厂内, 地面监测数据和航空监测数据均没有发现由于三哩岛 2 号机组事故造成的其它放射性污染^[4]。

1.2 切尔诺贝利核电站核事故辐射环境航空监测

1986 年, 原苏联切尔诺贝利核电站发生严重事故以后, 在西方国家中, 第一批警报是由瑞典发出的。瑞典辐射防护研究所请求瑞典地质公司出动航空伽玛能谱仪系统进行调查, 飞机在 1 d 内改装完毕, 并立即投入到全面测量放射性沉降物分布的工作。5 月底, 完成全国放射性污染区的剂量率图和 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs 核素的活度分布图。1986 年秋天, 向瑞典的每个家庭提供了完整的 ^{137}Cs 核素放射性污染分布图^[5]。2019 年 4 月, 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在切尔诺贝利核电站及周边地区开展了为期 2 周的辐射监测工作。团队在无人机上安装了轻型的辐射探测器 (包括 γ 能谱仪、GPS、Lidar 系统), 通过这种方法绘制该区域的 3D 辐射剂量图。研究者共启用了 50 架无人机, 无人机的飞行时速约为 65 km/h, 飞机的监测高度在 45 ~ 60 m, 监测区域达 15 km², 发现了以前未被监测到的辐射“热点”, 其中就包括“红森林”南侧几英里外用

于事故后处理核污染的区域。因此, 对一个大区域开展详细的辐射环境评价, 辐射环境航空监测是不可替代的技术手段^[6-7]。

1.3 福岛核电站核事故辐射环境航空监测 日本福岛核事故后, 为了监测辐射污染随时间的变化及污染区范围的变化情况, 在福岛核电站及周边地区进行了大量的辐射环境航空监测, 日本原子能机构网站公布了直升机和无人机辐射环境航空监测结果 (见图 1、图 2), 这些数据的采集是在日本教育文化体育科技部、美国 DOE、核管理当局的指导协作下完成的。在 2011—2017 年间, 在福岛核电站及周边地区采用直升机进行了 12 次监测, 以判定和分析辐射污染随时间的变化情况, 向公众给出了出事故厂区空中监测的周围剂量当量的详图及其随时间的变化信息。从监测结果可以看出, 福岛第一核电站西南 50 km 以外, 仍然受到了核事故的影响。在 2012—2016 年间, 采用无人机进行了 10 次辐射监测。无人机测量采用 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 探测器, 尺寸 $\varnothing 1.5" \times 1.5" \times 3 \text{ pcs}$, 飞行离地高度 50 ~ 80 m, 飞行速度 28.8 km/h, 采样每秒 1 次^[8]。早期的航空监测为确定紧急情况下的撤离准备区和计划撤离区的范围以及农牧业方面的应对措施提供了决策支持信息。

2 我国辐射环境航空监测与核应急技术储备

经过近几年的建设, 核应急航空监测装备建设有航空辐射监测装备、中继通讯装备、地面实时接收与处理分析装备及指挥通信装备 (表 1)。

曾于 1994 年、2010 年和 2013 年分别在秦山核电站、三门核电站和海阳核电站及周围地区开展了辐射环境航空监测, 测量面积分别为 2 209 km²、7 192 km² 和 5 570 km², 查明了核电站及周围地区当时的辐射环境水平现状, 建立了当时情况下辐射环境基准数据。采用航空监测技术手段, 曾发现以往未知的石家庄原计划用于制砖的煤灰渣辐射异常、房山散落于乡间路旁未知的 ^{152}Eu 辐射热点、未知的海盐陶瓷厂高岭土辐射异常、青村化肥厂磷肥原料辐射异常、安西一带 ^{137}Cs 高值区, 为相关部门开展辐射环境保护、材料的使用及环境的治理提供了技术依据^[9-12]。

核应急航空监测曾参加我国第一次核应急航空监测响应行动、“神盾—2009”首次国家核应急联合演习、“神盾—2015”国家核应急联合演习及 ConvEx-3 (2017) IAEA 三级公约演习, 积累了应急响应行动的经验。

针对大体积 NaI(Tl) 探测器 (50L) 的航空监测系

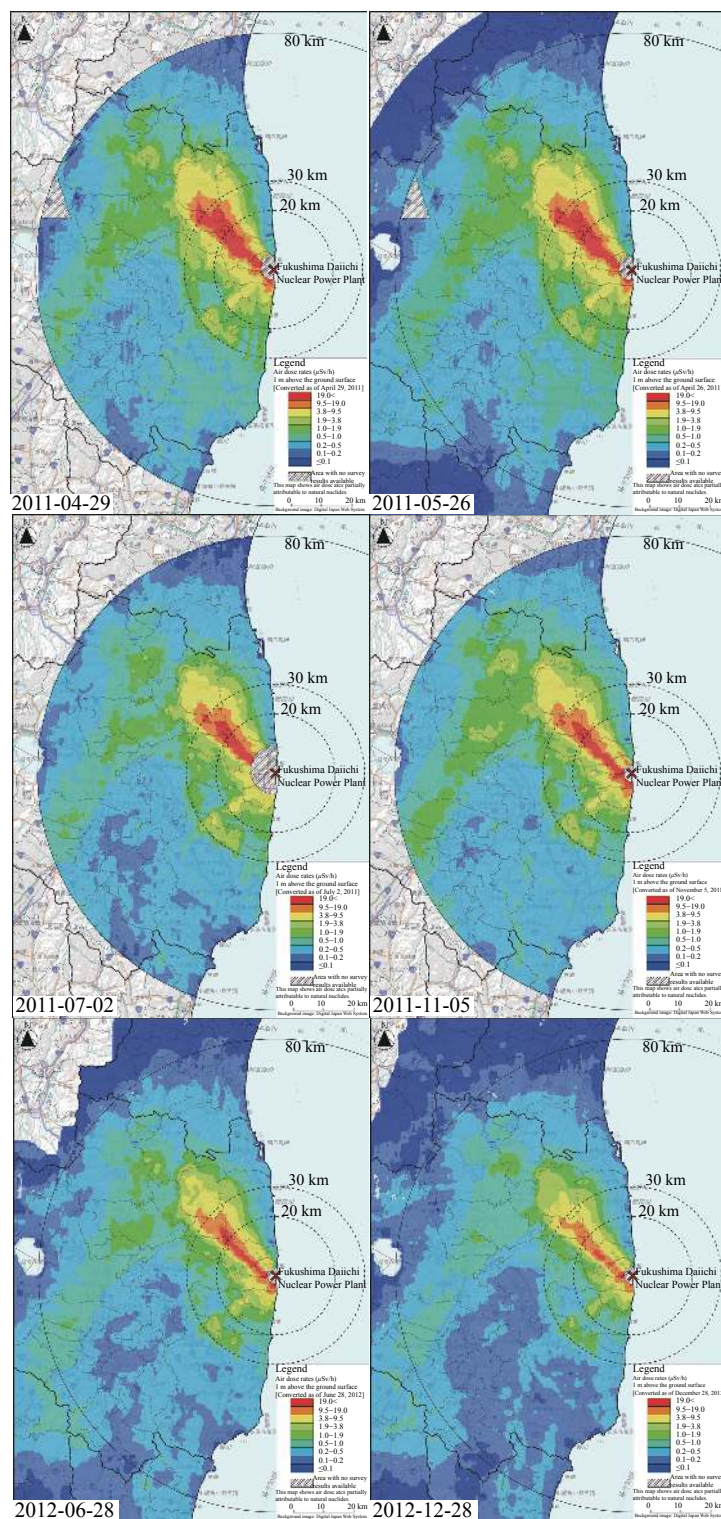


图 1 福岛核电站周围有人直升机航空监测部分剂量当量率图

Figure 1 Manned helicopter dose-equivalent rate chart for airborne monitoring around the Fukushima nuclear power plant

统,陆地上使用 Y-12 飞机航空监测对人工放射性核素 ^{137}Cs 的探测下限,当航测高度为 100~120 m 时,为 1.1~1.9 $\text{kBq} \cdot \text{m}^{-2}$;当航测高度为 50 m 时,为 0.8~1.5 $\text{kBq} \cdot \text{m}^{-2}$ 。使用 Y-5 飞机,航测高度为 80 m 时,对人工放射性核素 ^{137}Cs 的探测下限为 1.1~1.3 $\text{kBq} \cdot \text{m}^{-2}$;对于高辐射背景区(航测高度为 100 m),对人工放射性核素 ^{137}Cs 的探测下限为 2.5~3.8 $\text{kBq} \cdot \text{m}^{-2}$ [17]。

航空监测数据实时传输系统,经过实际测试,可以将航空监测数据实时传输到 30~50 km 外近距离的地面站,乃至数千千米外远距离的卫星接收地面站,进行实时接收与数据处理与分析。通过实际测试,在可视条件 300 m 飞行高度时,数据传输距离为 38.6 km。通过地面静态测试和飞行测试,航空监测系统到数据实时传输终端传输延迟 < 0.04 s,接口通道

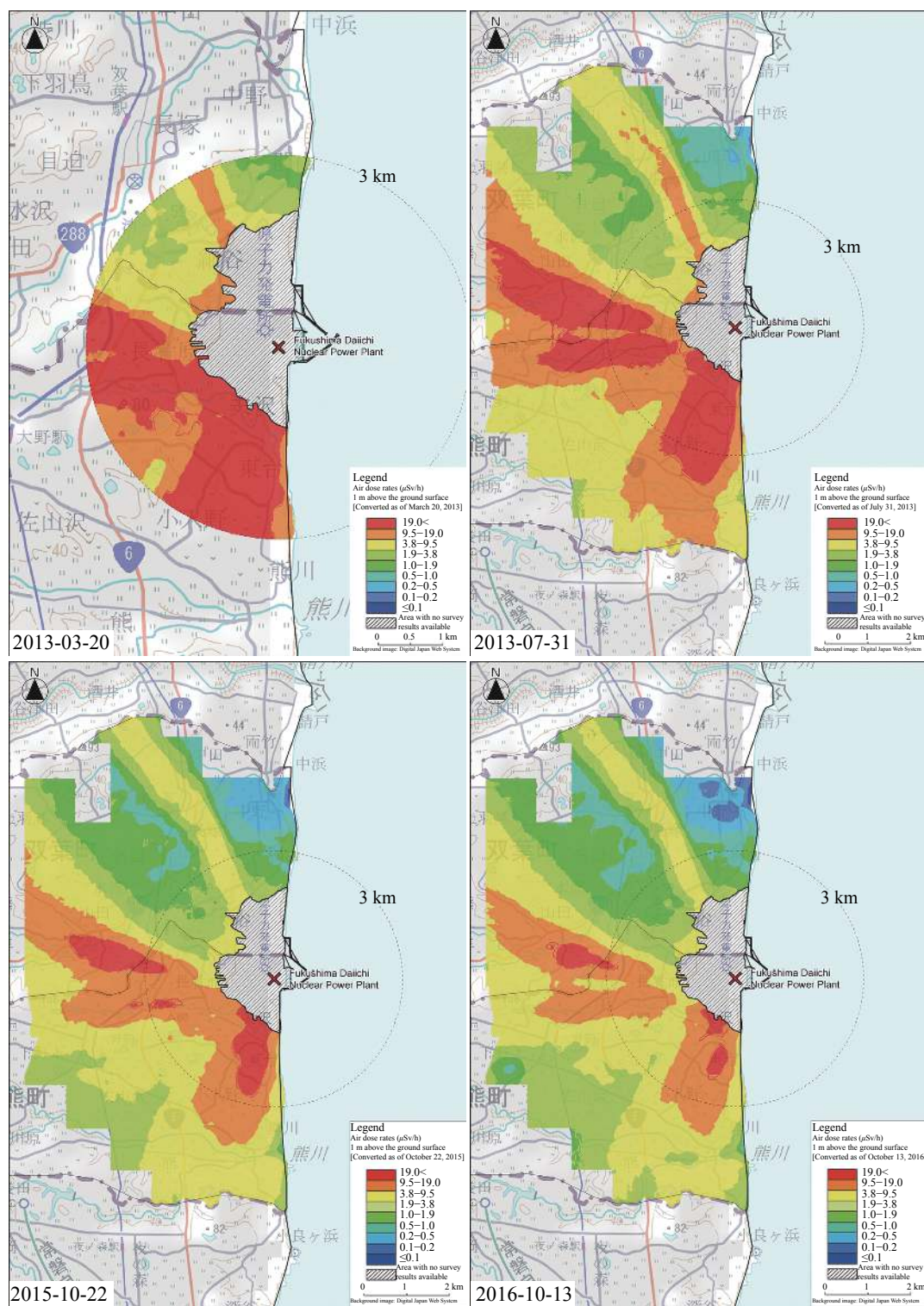


图2 福岛核电站周围无人机航空监测剂量当量率图

Figure 2 UAV airborne monitoring dose equivalent rate map around Fukushima nuclear power plant

数据流量大于 1 MKbps/s, 数据传输误码率 < 1%, 空中到地面的实时数据和图像传输成为可能。

未来需逐步提升辐射监测设备小型化、轻量化水平, 提升无人机辐射监测能力, 完善空中辐射监测技术手段, 提升快速输送手段, 不断完善应急冗余技术储备, 缩短应急准备时间, 加强国产应急装备建设, 适应新形势要求。核应急航空监测装备未来的发展趋势: 1) 飞行器向无人机化发展;

2) 装备向高度集成化、小型化、轻型化、智能化、多功能化、安装便捷化、操作简便化方向发展;

3) 具有数据实时传输与远程接收能力;

4) 监测具有自动识别危险源与预警报警能力;

5) 具有航空辐射监测结果与地理信息叠加、自动图形显示能力;

6) 具备与国家信息与情报部门间信息实时共享能力。

表 1 目前核应急救援装备主要组成

Table 1 List of the main nuclear emergency rescue equipment at present

类别	装备组成
航空辐射监测装备	航空辐射监测用固定翼飞机或直升飞机
	核应急航空NaI(Tl)谱仪系统(辅助设备包括航空型导航定位系统、雷达高度计、气压高度计、机外温度湿度计、快速安装装置)。
	核应急航空监测数据实时传输系统(机载端部分)
中继通讯装备	核应急航空监测数据实时传输系统(中继部分)
地面实时接收与处理分析装备	核应急航空监测数据实时传输系统(地面接收部分)
	核应急航空监测数据实时处理与分析软件
	打印机
指挥通信装备	指挥通信车
	手持GPS
	海事卫星便携终端
	集群手持对讲机
	车载通讯系统(含短波电台、车载超短波电台、异频转接系统)

表 2 核应急救援航空监测设备的应用情况表

Table 2 List of applications of airborne monitoring equipment for nuclear emergency rescue

序号	核应急救援航空监测设备的应用
1)	1983年1月上旬,前苏联海军装有核反应堆的间谍卫星1402号失控下坠。根据国防科委指示,原北京七〇三航测队派出17人,以装载GR—800型航空 γ 能谱仪的贝尔飞机一架,在天津张贵庄机场待命,首次承担核应急航空监测值守任务 ^[1] 。
2)	1988年,对石家庄市进行了环境辐射航空监测,在市区东北部滹沱河低背景场上,显示为空气吸收剂量率大于110 nGy/h的辐射污染区,通过实地检查,该污染区是由石家庄市发电厂储灰池及其散布于周围的煤灰污染造成 ^[3] 。
3)	1994年,在上海奉贤县青村镇化肥厂上空,航空监测设备记录到铀窗和总计数窗的计数率明显高出附近一般地区,分别约为附近地区均值的1.53倍和3.92倍,后查明由该厂从摩洛哥进口的磷矿粉所致,辐射热区面积约0.0016 km ² ^[9] 。
4)	1994年,在秦山测区的海盐县耐火材料厂(电瓷瓶厂)上空,航测发现总计数窗计数率明显高于周围地区,地面查明离地1m高度的空气吸收剂量率为441 nGy/h,由陶瓷原料和产品所致 ^[9] 。
5)	2001年在,在某核设施周围地区,对排放放射性 ⁴¹ Ar的烟羽云进行了航空监测,得到了放射性 ⁴¹ Ar烟羽云平面图 ^[13] 。
6)	2001年,北方某地进行天然辐射水平扫描监测,离地107 m高度,国内首次采用航空监测技术意外发现人工核素 ¹⁵² Eu辐射热点,估算总活度约在(11.5~20.4) mCi之间 ^[12] 。
7)	2002年,在安西实验带进行辐射环境航空监测时,发现测量区域存在 ¹³⁷ Cs,在空地测量对比区域, ¹³⁷ Cs浓度达4984~5526 Bq/m ² ,与地面测量结果相对误差在19.9%~43.5%之间 ^[14] 。
8)	2014年航空 γ 能谱测量发现佳木斯市东部附近,由一造纸厂排出的废液所致一个辐射热点,该辐射热点由人类活动引起的,空气吸收剂量率为150.3 nGy/h,佳木斯市居民所受地球 γ 辐射所致室外空气吸收剂量率为81.7 nGy/h ^[15] 。
9)	2009年11月,成功参加了“神盾—2009”首次国家核应急联合演习,核应急航空监测数据实时传输系统第一次参加实战演练,成功地将田湾核电站上空监测的数据和图像实时传输到地面接收端。
10)	2015年06月26日,动用航空监测力量,中心和分队采用“异地同步、全程拉动”的演习方式,全程参与了“神盾—2015”国家核应急联合演习 ^[16] 。
11)	2017年06月21日世界时间00:00(北京时间08:00),中心参加了ConvEx-3(2017) IAEA三级公约演习,演习假设事故核电站为匈牙利PAKS核电站,目的是熟悉IAEA三级公约演习和以互联网为载体的网络演习模式,检验应对严重核事故下通过网络信息沟通情况及时做出研判的能力和制定应急救援支持方案的能力。

为了确保国家航空监测力量在核事故应急能够履行职责,有必要在以下几个方面得到加强:1)开展核应急分析研判硬件和软件建设,开展假想核事故情形下核应急航空监测方案制定研究,加强核应急航空监测分析研判能力;2)开展新型核应急装备建设和技术研究,不断加强和完善航空核应急技术体系;3)开展全国核设施周围详细辐射环境水平摸底的航空监测研究,为国家核应急管理部门提供基础数据,有效应对核事故。

3 展 望

一旦发生核事故,应急工作的正确决策和快速响应是减轻事故后果的关键,正确决策不但需要知悉污染区域的数据,也需要确认未污染区域。国际上的核事故处理经验表明:核设施一旦出现严重事故,常规地面监测系统无法快速监测并完整确切地给出核辐射污染范围和污染程度,而航空伽玛能谱测量则可达此目的。另外,航空伽玛能谱测量数据可转换成天然辐射水平数据,为已测区域提供“背景值”。

历史经验表明,辐射环境航空监测在核事故发生后,为快速圈定辐射污染区域发挥了重要作用(见表2)。国家核应急救援航空辐射监测分队建设规范指出,航空监测分队是核应急救援的国家级力量,在发生核事故(事件)情况下,按照国家指令,承担核应急航空监测任务^[18]。

利益冲突声明 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 起草论文、修订论文、审核论文 杨金政 资料搜集、翻译、修订论文 安政伟 资料搜集与整理 王永军 资料审查与指导

参考文献

- [1] 王燕君,李文红,邓君,等.日本福岛核事故四年来的影响及教训[J].中国辐射卫生,2016,25(2):143-145,149. DOI: 10.

- 13491/j.cnki.issn.1004-714x.2016.02.005.
- Wang YJ, Li WH, Deng J, et al. The impact lessons and lessons impact of Japan's fukushima nuclear accident in nearly four years later[J]. *Chin J Radiol Heal*, 2016, 25 (2): 143-145, 149. DOI: 10.13491/j.cnki.issn.1004-714x.2016.02.005.
- [2] 王燕君, 李文红, 邓君, 等. 切尔诺贝利和福岛核事故的今昔对比及引发世人的深思[J]. *中国辐射卫生*, 2016, 25 (4): 459-462. DOI: 10.13491/j.cnki.issn.1004-714x.2016.04.030.
- Wang YJ, Li WH, Deng J, et al. Comparison of past and present the Chernobyl and the fukushima nuclear accident and elicit thinking[J]. *Chin J Radiol Heal*, 2016, 25 (4): 459-462. DOI: 10.13491/j.cnki.issn.1004-714x.2016.04.030.
- [3] The Remote Sensing Laboratory. Airborne cloud tracking measurements during the Three Mile Island nuclear station accident[R]. Washington: The U. S Department of Energy, 1984.
- [4] Colton, D P. Aerial radiological survey of the Three Mile Island Nuclear Station and surrounding area, Middletown, Pennsylvania[EB/OL]. [2020-08-06]. <https://www.osti.gov/biblio/5349079-aerial-radiological-survey-three-mile-island-nuclear-station-surrounding-area-middletown-pennsylvania>.
- [5] IAEA. 1991. Airborne gamma ray spectrometer surveying[R]. Vienna: International Atomic Energy Agency: 57-60.
- [6] George Riley. High-Resolution Radiation Mapping to Characterize Contamination 2018[EB/OL]. [2018-07-24]. <https://southwestnuclearhub.ac.uk/2018/07/24/high-resolution-radiation-mapping/>.
- [7] 一年7万游客参观切尔诺贝利 无人机绘制3D辐射剂量, 2019[EB/OL]. [2019 - 05 - 10] <https://www.81uav.cn/uav-news/201905/10/56152.html>.
- 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>.
- [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] 顾仁康, 侯振荣, 沈恩升, 等. 泰山核电站周围及上海地区放射性水平航空检测[J]. *辐射防护*, 1997, 17 (3): 167-187.
- Gu RK, Hou ZR, Shen ES, et al. Airborne monitoring of radioactivity level in the regions surrounding Qinshan nuclear power plant and Shanghai City[J]. *Padiation Prot*, 1997, 17 (3): 167-187.
- [10] 倪卫冲, 何必胜, 高国林, 等. 三门核电站地区环境辐射本底航空测量调查[J]. *辐射防护*, 2016, 36(2): 104-111. DOI: CNKI:SUN:FSFH.0.2016-02-007.
- Ni WC, He BS, Gao GL, et al. Airborne gamma-ray spectrometric survey for investigating the environmental radiation background around Sanmen NPP[J]. *Radiat Prot*, 2016, 36(2): 104-111. DOI: CNKI:SUN:FSFH.0.2016-02-007.
- [11] 张利民, 倪卫冲, 王彩霞, 等. 山东海阳核电站环境辐射本底航空测量调查[J]. *铀矿地质*, 2016, 32 (1): 36-42. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0658.2016.01.006.
- Zhang LM, Ni WC, Wang CX, et al. Airborne gamma-ray spectrometric survey of environmental radiation background around Haiyang NPP, Shandong[J]. *Uranium Geol*, 2016, 32 (1): 36-42. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0658.2016.01.006.
- [12] 胡明考, 房江奇, 顾仁康. 航测寻找大苑南人工放射性热点 152Eu的实例[J]. *辐射防护*, 2002, 22 (5): 285-288. DOI: 10.3321/j.issn:1000-8187.2002.05.007.
- Hu MK, Fang JQ, Gu RK. An example of capturing a hotspot of man-made radioactive 152Eu[J]. *Radiat Prot*, 2002, 22 (5): 285-288. DOI: 10.3321/j.issn:1000-8187.2002.05.007.
- [13] 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.
- 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.
- [14] 房江奇, 胡明考, 倪卫冲, 等. 航空监测人工核素¹³⁷Cs数据处理方法研究. 第二次全国天然辐射照射与控制研讨会论文汇编[C]//2005, 399-403.
- Fang JQ, Hu MK, Ni WC, etc. Compilation of papers in the second national symposium on natural radiation exposure and control[C]//2005, 399-403.
- [15] 房江奇, 蔡文军, 李素岐, 等. 新型AGRSS航空伽玛能谱系统的应用效果及分析[J]. *矿产勘查*, 2016, 7 (4): 624-633. DOI: 10.3969/j.issn.1674-7801.2016.04.015.
- Fang JQ, Cai WJ, Li SQ, et al. Application effect and analysis of new AGRSS airborne gamma ray spectrometry system[J]. *Miner Explor*, 2016, 7 (4): 624-633. DOI: 10.3969/j.issn.1674-7801.2016.04.015.
- [16] 李素岐, 房江奇, 倪卫冲, 等. “神盾-2015”国家核应急联合演习中参演情况的介绍及思考[J]. *中国辐射卫生*, 2016, 25 (6): 715-719. DOI: 10.13491/j.cnki.issn.1004-714x.2016.06.028.
- Li SQ, Fang JQ, Ni WC, et al. The introduction and thinking that took part in “Aegis-2015” nuclear emergency joint exercises[J]. *Chin J Radiol Heal*, 2016, 25 (6): 715-719. DOI: 10.13491/j.cnki.issn.1004-714x.2016.06.028.
- [17] 倪卫冲, 蔡文军, 高国林. 航空γ能谱探测人工放射性核素检测限研究[J]. *核技术*, 2018, 41 (10): 20-25. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.100202.
- Ni WC, Cai WJ, Gao GL. Study of the detection limit of manmade radionuclide detected by airborne gamma ray spectrometry[J]. *NuclTech*, 2018, 41 (10): 20-25. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.100202.
- [18] 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.