

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2017.01.003

核电人工核素气溶胶迁移研究进展

谢东, 丁伟, 廖买利, 田伶, 刘金芝, 李铨俊

(南华大学 土木工程学院, 湖南 衡阳 421001)

摘要: 核电工业中的人工核素气溶胶对公众的健康存在潜在危害。人工核素气溶胶的产生主要源于核电各环节, 包括铀矿冶阶段、核燃料元件生产阶段、核电运行和退役及事故阶段等。核素气溶胶在大气中的输运迁移过程十分复杂, 主要受大气风场及气候特征、地形地貌特征、污染物源项特性等因素的影响。国内外已有人工核素气溶胶的迁移扩散研究主要集中在铀矿井和铀尾矿库核素气溶胶迁移、核电事故核素气溶胶迁移和核素气溶胶大气弥散迁移模式3个方面。且可预见核素气溶胶微小空间小尺度迁移和迁移控制是今后核电人工核素气溶胶迁移研究的重要方向。

关键词: 核电; 人工核素; 气溶胶迁移

中图分类号: TU93; P315.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-9833(2017)02-0015-08

Progress Research on Artificial Nuclide Aerosol Migration in Nuclear Power Industries

XIE Dong, DING Wei, LIAO Maili, TIAN Ling, LIU Jinzhi, LI Chengjun

(College of Civil Engineering, University of South China, Hengyang Hunan 421001, China)

Abstract: There exists in nuclear power industries potential hazards of artificial nuclide aerosols harmful to the public health. The generation of artificial nuclide aerosol mainly comes from nuclear power, including the stage of uranium mining and metallurgy, as well as the nuclear fuel production, the operation and decommissioning of nuclear power, and different accident phases, etc. The transport and migration of nuclide aerosols in the atmosphere normally undergo a very complex process, which is mainly affected by such factors as the atmospheric wind field and climate characteristics, topography and geomorphology characteristics, the source of pollutants, etc. Studies on the migration and diffusion of artificial nuclide aerosols at home and abroad mainly focus on three aspects: the migration of nuclides in uranium mines and uranium tailings pools, the migration of nuclide aerosols in nuclear accidents and the atmospheric dispersion of nuclide aerosols. It can be predicted that the future research of nuclear artificial nuclide aerosol migration will be mainly focused on the micro-space small-scale migration and migration control of nuclide aerosols.

Keywords: nuclear power; artificial nuclide; aerosol migration

0 引言

小质点的核素固态或液态微粒悬浮在空气或气

体介质中形成的胶体分散体系, 称为核素气溶胶, 其微粒聚集态分固态分散相和液态分散相两种, 且其形成方式有分散性和凝集性两种。

收稿日期: 2017-02-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11475081), 湖南省自然科学基金资助项目(14JJ3100)

作者简介: 谢东(1978-), 男, 湖北荆州人, 南华大学教授, 博士, 主要从事气载污染物(含放射性核素)大气扩散方面的教学与研究, E-mail: nhxiedong@126.com

据 1994 年国际放射防护委员会 (International Commission on Radiological Protection, ICRP) 提出的新肺模型可知, 对人体造成最大危害的肺区沉积粒子为粒径低于 $10\ \mu\text{m}$ 的气溶胶粒子^[1]。因气溶胶粒度直接决定被吸入粒子在呼吸道中的沉积份额, 放射性气溶胶对吸入者的危害程度不仅取决于气溶胶的毒性、浓度、吸入时间及其化学形式, 且与气溶胶的分散度有关。人工核素气溶胶以空气为载体, 在大气作用下输送和弥散, 可扩散到远离源项的区域, 不仅会对人体造成直接外照射, 也会通过吸入和食入两条途径进入人体, 造成内照射^[2-3]。因此, 准确获悉人工核素气溶胶在大气中的物质形态、迁移机理、迁移方式与途径, 为核电工业安全评价提供理论基础, 有效降低公众辐射剂量, 成为当前十分迫切的研究课题。

1 人工核素气溶胶的来源

人工核素气溶胶产生源主要有两个: 一为战术核武器和核战备设施, 二是核电工业运行和退役的核电设施^[4-5]。由于核武器的使用特殊性, 其可能产生的人工核素气溶胶相对要少, 因而对公众的潜在辐射影响相对要小; 反而是核电各环节产生的人工核素气溶胶对公众造成的潜在辐射影响相对更广。

1.1 铀矿冶阶段

在铀矿开采、粉碎、筛分、碾磨和选矿过程中, 产生的主要是矿石粉尘核素气溶胶。铀矿开采中, 放射性气溶胶以大粒径为主, 电耙作业场所是放射性气溶胶的主要产生场所。铀矿石加工涉及到湿法处理与化工操作, 粒度分布也以大粒径为主, 该场所中的放射性气溶胶浓度一般都较低。铀精制过程中, 氢化还原工艺生产 UO_2 的场所、氢氟化工艺生产 UF_6 场所及氟化工艺生产 UF_6 场所, 是核素气溶胶产生的主要场所, 而浓缩铀生产工作场所放射性气溶胶的浓度值非常低。核工业中铀矿冶阶段各生产环节气溶胶粒度分布详情见表 1^[6]。

表 1 铀矿冶阶段各生产环节气溶胶粒度分布

Table 1 Distribution of aerosol particles in the production stages of uranium mining and metallurgy

生产环节	AMAD 范围 / μm		$C/10^{-1} (\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3})$	
	AMAD 范围 / μm	σ 范围	平均值	标准差
铀矿石开采	3.7~21.0	2.0~3.4	0.58	0.46
铀矿石加工	7.5~18.0	2.4~4.5	1.31	1.54
氢还原	4.1~7.8	1.9~2.9	6.4	11.1
氢氟化	7.8~15.8	1.5~2.5	88.2	1.6.2
氟化	0.5~6.2	1.5~2.5	488	1 115
铀浓缩检修	8.5~12.5	2.0~3.5	13.4	5.0

注: AMAD 表示空气动力学直径, σ 为几何标准偏差, C 表示 α 放射性浓度。

铀矿山开采过程中造成核素气溶胶污染的主要源头为氡及其子体, 据相关资料统计显示^[7], 一个中型的铀矿井, 每天会析出氡 $2.2 \times 10^{11} \sim 7.6 \times 10^{11} \text{ Bq}$, 矿井排出废气量可高达 $2 \times 10^5 \sim 6 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{h}$ 。潘自强等^[8]对中国核工业 30 a 的 α 辐射环境质量进行了研究与评价, 所得结果表明, 铀矿开采过程中对公众产生的核素辐射剂量占整个核燃料工艺过程总剂量的 86.2%。

1.2 核燃料元件生产阶段

核燃料元件制造将精制后的天然金属铀或浓缩金属铀制成标准化的金属元件, 这个生产环节主要以机加工开放性操作为主, 因而生产场所的气溶胶浓度值相当高^[6]。核燃料元件生产线产生放射性气溶胶的工序主要是化工转化、芯块制备及燃料棒制造^[9], 燃料元件生产工艺流程如图 1 所示^[10]。

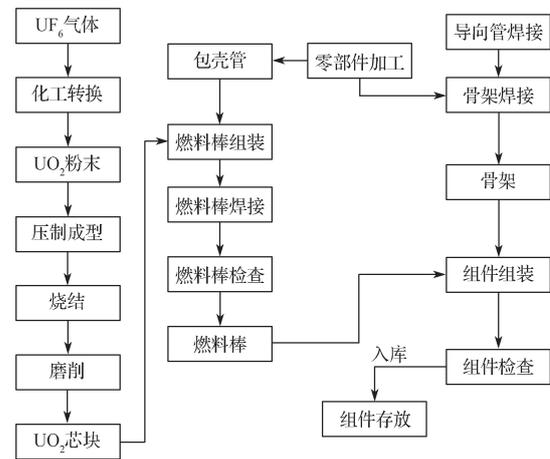


图 1 燃料元件生产工艺流程

Fig. 1 A flow chart of the production process of nuclear fuel components

核燃料芯块制备生产线物料是 UO_2 粉末、 U_3O_8 粉末, 压制、烧结和磨削等生产阶段产生的放射性核素气溶胶是生产场所中核素气溶胶的一个重要来源; 另外, 芯块制备过程中, 当生产线异常运行时, 如烧结炉内部发生爆炸或微尘过滤器失效, 会诱使 UO_2 粉尘大量泄漏, 这是生产场所另一个潜在的核素气溶胶来源^[10]。此外, 元件厂放射性核素废气主要是工艺废气和厂房的通排风, 其应经过净化处理后, 经由烟囱排放到外界大气环境中^[11], 但是受限于净化技术和通风设备的正常运行及设备管理人员的误操作, 会将微量放射性核素气溶胶排放到外界大气环境, 这也成为大气环境人工核素气溶胶的一个来源。

1.3 核电运行和退役及事故阶段

核电站运行的主要工艺流程可以人为分为 3 个回路, 其中一回路是核岛部分热力系统, 当核电站一回路承压边界完整性被破坏出现泄漏时, 将导致人

工放射性气溶胶迅速释放到核电站内部环境大气中,造成大气环境中的放射性气溶胶浓度升高^[12]。大气是核电站向环境排放放射性物质的主要途径,作为核电站主要堆型的轻水堆,其排出废气中的主要成份为氙(¹³³Xe、¹³⁵Xe、¹³⁸Xe),氪(⁸⁵Kr、⁸⁸Kr)等惰性气体和一定数量的碳-14、碘-131及其它气溶胶^[13]。反应堆退役过程中,常需进行去污、拆除解体作业以及废物管理,涉及多种放射性核素,如⁹⁰Sr、¹³⁷Cs等裂变产物,以及⁶⁰Co、⁶³Ni、⁵⁵Fe和¹⁵²Eu等中子活化产物。这些核素可能形成放射性气溶胶,并通过气载途径进入大气环境中^[14]。放射性材料通常储存于专用库房中,当放射性材料操作不当、放射性材料储存容器密封失效或通排风系统高效过滤器故障时,则可能造成排风口放射性气溶胶的急剧增多,若核级高效过滤器正常工作,则只有部分微小的放射性气溶胶颗粒进入大气^[15]。

2 人工核素气溶胶迁移的影响因素

气溶胶是放射性核素裂变产物释放时的主要载体,其主要有碰撞、聚合、凝结、蒸发、沉积、破碎、均相成核等自然行为^[16]。核素气溶胶在大气中的运输迁移过程十分复杂,主要受到大气风场以及气候特征、运输区域的地形地貌特征、污染物源项特性等因素的影响。

2.1 大气风场及气候特征的影响

核素气溶胶作为一种气载污染物,其迁移运输活动离不开大气风场和气候因素的作用。大气风场及气候特征因素主要包括:风速、风向和大气稳定度。刘振昊等^[17]对铀尾矿库下风向氡扩散和浓度分布进行了分析,并且考虑风频风速的影响,得出了低风速下现行标准中铀尾矿库防护距离的规定值偏小的结论。谢东等^[18]以铀矿排风井为研究对象,综合考虑不同下垫面粗糙度与不同风速对矿井所排气载核素氡浓度时空分布的影响,研究结果表明,当大气风速大于2.0 m/s时,大气风速对核素氡的迁移扩散起着主导作用。詹静等^[19]从气溶胶源的强度、当地气候、地形等方面,研究了铀尾矿库主要风频下风向区域的氡浓度分布规律,验证了高斯模式理论研究核素氡扩散的可行性。

2.2 地形地貌特征的影响

运输区域的地形地貌特征可以分为:平坦地势、山区地势、植被地势。不同的地形地貌特征会对大气风场形成阻碍和扰动作用,进而会影响核素气溶胶在大气环境中的迁移^[20]。谢清芳等^[21]以平地型铀尾矿

库为研究对象,对核素氡的大气扩散进行数值模拟,探讨了滩面植被覆盖与下风向氡气的迁移规律和浓度分布的关系。其研究结果表明,随着植被覆盖面积的增加,下风向的氡浓度不断下降。张欣等^[22]探讨了弧形、棱形和锥形等滩面对运行期间尾矿库滩面核素颗粒物的大气迁移和环境污染的作用,通过所得结果的对比分析发现,在抑尘标准质量浓度为 1 mg/m^{-3} 时,弧形滩面的抑尘效果明显,而棱形和锥形滩面的抑尘效果相对较差。

2.3 污染物源项特性的影响

核素气溶胶污染物源项特性主要包括种类、数量和浓度、干湿沉降特性及排放参数(排放高度和几何形状等)。莫顺权^[20]对比分析了铀矿区不同排放高度下的地面氡浓度分布,研究发现,在距离排风口100 m范围之内,氡浓度随着排放高度的增加而降低;距排风口200~250 m区域范围内,氡浓度随着排放高度的升高而增大,同时排放高度的增加会使污染区域的宽度增加。李航等^[23]采用WRF-CALPUFF数值模式和NCEP Reanalysis资料,对2011年3月11日日本福岛核电站核素泄漏事故进行了数值模拟研究以及源项评估,模拟结果较好地反映了核物质扩散情况。2011年3月23日,我国东北的黑龙江佳木斯和双鸭山于福岛核事故后,首次从采集的空气悬浮微粒中监测到人工放射性核素碘-131,并在2011年4月4日和9日左右检测到其峰值,这一结果反映了大气环流和排放速率变化对核素气溶胶迁移的综合影响^[24]。

3 人工核素气溶胶迁移研究现状

人工核素气溶胶的迁移扩散研究方法主要为3个:野外观测试验调查研究、数值模拟研究、实验物理模拟研究。已有研究侧重于核电站或核装置泄漏及铀矿井、铀尾矿核素气溶胶对环境及人类的影响和核事故后果评价等方面。

3.1 铀矿井和铀尾矿库核素气溶胶迁移研究

随着全球能源结构的优化和调整,促使核电的不断发展,从铀矿开采、水冶、运输各个环节中产生大量的人工放射性“三废”有害物,其中“废气”主要由铀矿尘、氡气及其子体等人工核素气溶胶等组成。铀矿井和铀尾矿库中放射性核素主要通过气态和固态两种形式进行迁移,其中,在大气中的传播主要是经由风和气流的作用来完成的。O. Molchanov等^[25]为评估不活跃的老旧铀尾矿对当地人群的影响,调研了尾矿库大气中的氡水平。I. Kovalets等^[26]对俄罗斯某铀尾矿库大气环境中的氡分布进行了数值模拟。

其模拟结果表明,与测量值相比,空气中计算的氡浓度的低估不能由铀尾矿的氡排放速率和/或气象参数的不确定性来解释。B. K. Sahoo 等^[27]利用现场实验测得的3个季节的氡流量使用扩散模型预测了印度某铀尾源项氡的析出量。P. Kazymbet 等^[28]对铀尾矿区的放射性核素迁移的卫生防护区进行了研究。张学礼等^[29]对某铀尾矿库附近环境空气中的²²²Rn浓度时间序列数据,应用重标极差分析法,研究了其变化趋势及分形特征。彭小勇率领科研组人员对铀尾矿进行了较为全面的研究,他们利用CFD软件对铀尾矿库建模,模拟分析了铀尾矿库下风向的氡扩散和浓度分布,并预测了该地区常年主导风向氡对公众所致的年有效剂量;且采用多孔介质模型,分析了植被分布对尾矿砂大气迁移的影响,及植被覆盖对铀尾矿库下风向氡气的迁移规律和浓度分布的影响^[17, 30-31, 22]。谢东^[32]采用缩比模型水槽实验方法,并且应用PIV技术、DIPT技术、流场显示技术和数值模拟对比的方式,研究揭示了铀矿通风尾气中核素的大气迁移扩散和浓度分布规律。

3.2 核事故核素气溶胶迁移研究

2011年3月11日,日本发生福岛核电站事故,造成了放射性核素的大量泄漏,气载放射性核素气溶胶受大气环流作用进行大范围运输弥散。针对福岛核电站导致的¹³¹I和¹³⁷Cs在全球大气环流的传输,引起了全球学者的高度重视^[33]。北美的美国^[34]、加拿大^[35-36]、欧洲的希腊^[37]、德国^[38],以及亚洲的俄罗

斯^[39]、韩国^[40]和中国等国家均先后关注并报道了泄漏到大气中放射性人工核素在本国的迁移扩散情况。鉴于我国与日本地理位置临近,国内学者们开展了一系列针对福岛核事故对不同地区的放射性核素污染检测和模拟分析。如邬家龙等^[41]对兰州、周程等^[42]对南京的大气气溶胶进行了监测,且均检测到来自福岛核电站泄漏的放射性核素,但是其浓度不会对公众健康造成影响。刘龙波等^[43]对西安、万恩源等^[33]对贵阳地区的大气放射性核素进行了监测,并分析了福岛核事故放射性核素迁移到两地的影响因素和可能的路径。王鹏飞等^[44]基于空气质量模式Models-3/CMAQ和数值天气预报模式WRF(weather research forecasting),对福岛核电站的核泄漏放射性粒子在大气中的扩散传输情况进行了数值模拟,其研究结果表明,放射性粒子受气旋气流的影响较为明显,该核泄漏事故对我国的短期影响很小。

3.3 核素气溶胶大气弥散迁移模式研究

放射性核素在不同尺度下的大气输送与扩散的正常工况和事故工况模拟,一般通过放射性核素大气弥散模式实现。根据数值模拟研究中描述方法和应用尺度的不同,放射性核素的大气弥散模式可以分为高斯模式、拉格朗日模式、欧拉模式、CFD湍流模式和嵌套模式5种。其中,高斯模式可以高斯烟羽假定分为标准高斯烟羽模型、烟团轨迹模型、分段烟羽轨迹模型3种。3种高斯大气弥散迁移模式的特性比较如表2所示^[45]。

表2 3种高斯大气弥散迁移模式的特性比较

Table 2 Comparison between the characteristics of three kind Gauss' s atmospheric dispersion

弥散模式类型	原理依据	输入参数要求及使用条件	优缺点
标准高斯烟羽模型	湍流扩散系数K为常数,平均风场不变,核素浓度在水平和垂直方向上都符合高斯分布	输入参数少,输出结果与输入参数有明显的对应关系,计算便捷;适用范围一般小于10~20 km	1) 模型结构简单,对气象条件数据要求不严,所需计算时间少; 2) 只适合下垫面平坦开阔、性质均匀、大气条件恒定、不受浮力和建筑物影响等场合,在应用时通常需要进行修正和改进
烟团轨迹模型	模拟烟团在非稳定、非均匀的大气条件下随时间变化的弥散情况		烟团内部风变化很小、烟团大小仅受湍流扩散的影响,烟团内部浓度呈高斯分布
分段烟羽轨迹模型	所有的污染物都是沿着一个即定的轨迹进行输送		使用十分简化而快速,考虑了气象条件尤其是风向的变化

关于核素气溶胶大气弥散迁移模式方面的研究也较多,如胡二邦等^[46]利用SF₆野外示踪实验,验证了高斯烟羽模式在滨海复杂地形核电厂环境影响评价中的有效性。高化超等^[47]对事故发生后较短时间内的核素弥散情况,采用高斯分段烟羽模型和Matlab编程模拟了烟羽扩散形式,所得研究结果可为核救援方案提供参考。邵和松等^[48]对小型核设施气载放射性核素大气扩散计算模式进行了研究,并采用简化的高斯烟羽模式进行了尝试,研究结果表明,

简化的烟羽模式能够反映下风向各处地面空气核素浓度的分布情况。李华等^[49]对离地面高100 m的放射性点源瞬时释放的放射性核素云团采用蒙特卡罗方法和高斯公式法进行了模拟计算,得到了放射性核素云团在地面上的相对浓度分布及其等值线分布图等。池兵等^[50]利用自行开发的随机游走大气扩散模型与拉格朗日烟团模型进行比较验证,发现随机游走大气扩散模型能够较好地模拟核事故发生条件下的大气扩散过程。

4 问题和展望

1) 目前,人工核素气溶胶的迁移研究主要集中在大尺度大气环境中核电站、核装置泄漏,铀矿井、铀尾矿及核事故等中核素气溶胶迁移等方面,人工核素气溶胶迁移模式和模型的匹配研究也集中于核电、铀尾矿库等大型核设施和场地核素弥散模式等方面,而对小空间、微小尺度人工核素气溶胶的迁移机理的研究很少见到相关文献报道。因此,随着核工业的进一步发展和公众对人工核素气溶胶的关注,小型核设施设备所产生的人工核素气溶胶在小空间、微小尺度中的研究将日益迫切。

2) 核工业生产涉及铀矿开采和冶炼、铀元件生产及运输和储藏、核电运行及铀矿井和核电设备设施的退役,各个生产环节都不可避免地产生核素气溶胶。人工核素气溶胶作为一种气载污染物,不仅会对核素气溶胶源项附近的人员造成辐射危害,而且可以通过气流作用输送到远离源项的区域,对公众健康造成危害。目前,相关研究人员多侧重于对安全防护距离的研究,对人工核素气溶胶迁移的控制研究较少且不全面。因此,核素气溶胶迁移的控制研究是个有价值的研究方向。

参考文献:

- [1] 孟志鹏,王淑兰,丁信伟.可爆性气体泄漏扩散时均湍流场的数值模拟[J].安全与环境学报,2003,3(3):25-28.
MENG Zhipeng, WANG Shulan, DING Xinwei. Numerical Simulation of Homo-Turbulent Field of Explosible Gas Dispersion[J]. Journal of Safety and Environment, 2003, 3(3): 25-28.
- [2] 于水.放射性气溶胶粒度的测定及ICRP假定值的代表性[J].辐射防护通讯,1997(5):18-23.
YU Shui. Determination of Radioactive Aerosol Particle Size and Representation of ICRP[J]. Radiation Protection Bulletin, 1997(5): 18-23.
- [3] ELHUSSEIN A. A Study on Natural Radiation Exposure in Different Realistic Living Rooms[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2005, 79(3): 355-367.
- [4] 姚咏明,张莹,盛志勇.重视贫铀武器对人与环境危害及其防护的研究[J].中国急救复苏与灾害医学杂志,2006,1(6):195-198.
YAO Yongming, ZHANG Ying, SHENG Zhiyong. Studies on the Depleted Uranium Weapons on Human and Environmental Hazards and Its Protection[J]. China Journal of Emergency Resuscitation and Disaster Medicine, 2006, 1(6): 195-198.
- [5] 张永兴,岳清宇,王红艳,等.核爆后气溶胶浓度快速测量方法研究[J].中国原子能科学研究院年报,2005(1):228-229.
ZHANG Yongxing, YUE Qingyu, WANG Hongyan, et al. Study on Rapid Measurement of Aerosol Concentration After Nuclear Explosion[J]. Annual Report for China Institute of Atomic Energy, 2005(1): 228-229.
- [6] 卢正永,傅木森,梁鸿富,等.核工业部分生产场所的放射性气溶胶粒度分布[J].辐射防护,1991(3):193-200.
LU Zhengyong, FU Musen, LIANG Hongfu, et al. Particle Size Distribution of Radioactive aerosols in Some Workplace of Nuclear Industry[J]. Radialization Protection, 1991(3): 193-200.
- [7] 张展适,李满根,杨亚新,等.赣、粤、湘地区部分硬岩型铀矿山辐射环境污染及治理现状[J].铀矿冶,2007,26(4):191-192.
ZHANG Zhanshi, LI Mangen, YANG Yaxin, et al. Radiation Contamination and Treatment of Some Hard-Rock-Type Uranium Mines in Gan, Yue and Xiang Areas[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2007, 26(4): 191-192.
- [8] 潘自强,陈竹舟,王志波,等.中国核工业三十年辐射环境质量评价[J].辐射防护,1989(4):3-9.
PAN Ziqiang, CHEN Zhuzhou, WANG Zhipo, et al. The Radiological Environment Impact in China Nuclear Industry Over Past 30 Years[J]. Radialization Protection, 1989(4): 3-9.
- [9] 古晓娜,武晓燕,战景明,等.某核燃料元件生产线放射性职业病危害因素水平调查[J].中国辐射卫生,2016,25(1):95-98.
GU Xiaona, WU Xiaoyan, ZHAN Jingming, et al. A Survey About the Level of Radioactive Occupational Hazards Existing in a Product Line of Nucleus Fuel-Element[J]. Chinese Journal of Radiological Health, 2016, 25(1): 95-98.
- [10] 王茜.核燃料芯块制备场所辐射防护及对作业人员辐射影响研究[D].成都:成都理工大学,2011.
WANG Qian. Radiation Protection of the Place of Nuclear Fuel Pellets Production and Research of the Radiation Effects[D]. Chengdou: Chengdou University of Technology, 2011.
- [11] 蒋婧,汪世军,何玮,等.核燃料元件制造厂流出物放射性监测现状和建议[J].核科学与工程,2015,35(3):555-559.
JIANG Jing, WANG Shijun, HE Wei, et al. Current Situation and Recommendations on Radioactive Monitoring of Effluents from Nuclear Fuel Plant[J]. Nuclear Science and Engineering, 2015, 35(3): 555-559.

- [12] 陈祥磊, 王益元, 熊启发, 等. 核电站放射性气溶胶探测器入射粒子模拟分析 [J]. 舰船科学技术, 2011, 33(8): 53-57.
CHEN Xianglei, WANG Yiyuan, XIONG Qifa, et al. Simulation of Radioactive Aerosol Monitoring of Nuclear Power Plant[J]. Ship Science and Technology, 2011, 33(8): 53-57.
- [13] 陈竹舟. 核电站选址中大气弥散的估算方法 [J]. 辐射防护通讯, 1982(4): 2-13.
CHEN Zhuzhou. Estimation of Atmospheric Dispersion in Nuclear Power Plant Location[J]. Radiation Protection Bulletin, 1982(4): 2-13.
- [14] 廉冰, 王文静, 顾志杰. 研究堆退役环境影响评价关键核素的筛选方法 [C]//“二十一世纪初辐射防护论坛”第十次会议: 核与辐射设施退役及放射性废物治理研讨会论文集. 绵阳: 中国核学会辐射防护分会、中国环境科学学会核安全与辐射环境安全专业委员会, 2012: 531-535.
LIAN Bing, WANG Wenjing, GU Zhijie. Screening Method of Key Nuclides for Environmental Impact Assessment for Decommissioning of Research Reactor[C]//Proceedings of the Tenth Symposium on Radiation Protection in the Early Twenty-First Century: Workshop on Decommissioning of Nuclear and Radiation Facilities and Radioactive Waste Management. Mianyang: Society of Nuclear Radiation Protection, Chinese Society for Environmental Sciences Nuclear Safety and Radiation Environment Safety Specialized Committee, 2012: 531-535.
- [15] 高正明, 雷毅平, 赵焱, 等. 事故状态放射性材料储存库周边放射性气溶胶浓度分布初探 [C]//全国危险物质与安全应急技术研讨会. 重庆: 重庆市人民政府, 中国工程物理研究院, 2011: 319-322.
GAO Zhengming, LEI Yiping, ZHAO Ye, et al. Simulation of the Radioactive Aerosol Density Around the Radioactive-Materials-Storage Vault in Accident[C]//National Conference on Hazardous Materials and Safety Emergency Technology. Chongqing: Chongqing Municipal People's Government, China Academy of Engineering Physics, 2011: 319-322.
- [16] 陈林林, 孙雪霆, 魏严淞, 等. 安全壳内气溶胶扩散泳行为的试验方法研究 [J]. 辐射防护, 2017, 37(1): 45-49.
CHEN Linlin, SUN Xueting, WEI Yansong, et al. Test Method Study on Aerosol Diffusiophoresis in the Containment[J]. Radiation Protection, 2017, 37(1): 45-49.
- [17] 刘振昊, 彭小勇, 熊军, 等. 平地型铀尾矿库氡大气扩散数值模拟及环境效应分析 [J]. 安全与环境学报, 2012(3): 95-98.
LIU Zhenhao, PENG Xiaoyong, XIONG Jun, et al. Numerical Simulation of Atmospheric Diffusion of Radon Emitted from Ground Uranium Tailings Impoundment and Its Environmental Effects[J]. Journal of Safety and Environment, 2012(3): 95-98.
- [18] 谢东, 王汉青, 刘泽华, 等. 铀矿通风尾气中气态放射性核素氡大气扩散数值模拟 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(2): 829-834.
XIE Dong, WANG Hanqing, LIU Zehua, et al. Numerical Simulation of Atmospheric Dispersion of Gas Radioactive Nuclides Radon from Uranium Ventilation Shaft Exhausts[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2013, 44(2): 829-834.
- [19] 詹静, 李向阳, 旷梅华, 等. 某铀尾矿库氡析出对安全防护距离影响分析 [J]. 工业安全与环保, 2014, 40(3): 47-50.
ZHAN Jing, LI Xiangyang, KUANG Meihua, et al. Effect of Uranium Radon Exhalation in One Uranium Tailings on Radiation Safety Protection Distance[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2014, 40(3): 47-50.
- [20] 莫顺权. 铀矿通风井尾气核素氡大气迁移数值模拟 [D]. 衡阳: 南华大学, 2015.
MO Shunquan. Numerical Modeling on Radioactive Diffusion of Uranic Well Exhaust Gas in Atmosphere[D]. Hengyang: University of South China, 2015.
- [21] 谢清芳, 彭小勇, 万芬, 等. 植被覆盖对铀尾矿库氡大气扩散影响的数值模拟 [J]. 安全与环境学报, 2013(6): 264-268.
XIE Qingfang, PENG Xiaoyong, WAN Fen, et al. Numerical Simulation of the Influence of Vegetation-Covered Area on the Atmospheric Diffusion of Radon Emanating from the Uranium Tailings Impoundment[J]. Journal of Safety and Environment, 2013(6): 264-268.
- [22] 张欣, 彭小勇, 黄帅. 铀尾矿库尾矿砂大气污染的控制研究 [J]. 环境科学学报, 2014, 34(11): 2878-2884.
ZHANG Xin, PENG Xiaoyong, HUANG Shuai. Atmospheric Pollution Control Research of Tailing Sands in a Uranium Tailings Impoundment[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34(11): 2878-2884.
- [23] 李航, 张宏升, 蔡旭晖, 等. 日本福岛核电站泄漏事故污染物扩散的数值模拟与事故释放源项评估 [J]. 安全与环境学报, 2013(5): 265-270.
LI Hang, ZHANG Hongsheng, CAI Xuhui, et al. Simulation of the Pollutant Dispersion and Evaluation on the Source Release Accidents in Japan's Fukushima Nuclear Power Plant[J]. Journal of Safety and Environment, 2013(5): 265-270.
- [24] 帅震清, 赵强, 庞荣华, 等. 日本福岛核事故对四川省辐射环境影响 [J]. 四川环境, 2016, 35(1): 92-

93.
SHUAI Zhenqing, ZHAO Qiang, PANG Ronghua, et al. Impact of Japan's Fukushima Nuclear Accident on the Radiation Environment of Sichuan Province[J]. Sichuan Environment, 2016, 35(1): 92-93.
- [25] MOLCHANOV O, SOROKA Y, BUZINNY M, et al. Dispersion of Radon in the Atmosphere Around Old Uranium Mill Tailings[J]. Nukleonika-Original Edition-, 2010, 55(4): 535-538.
- [26] KOVALETS I, KHALCHENKOV A, UDOVENKO O, et al. Numerical Modelling of Radon Atmospheric Dispersion Around Uranium Mill Tailings [in Russian][J]. Electronic Modeling, 2010, 32(33): 67-82.
- [27] SAHOO B K, MAYYA Y S, SAPRA B K, et al. Radon Exhalation Studies in an Indian Uranium Tailings Pile[J]. Radiation Measurements, 2010, 45(2): 237-241.
- [28] KAZYMBET P, BAKHTIN M, KASHKINBAEV E, et al. The Migration of Radionuclide's for the Sanitary Protection Zone of Uranium Tailings Enterprises (LB488)[J/OL]. [2017-02-14]. http://www.fasebj.org/content/28/1_Supplement/LB488.short.
- [29] 张学礼, 徐乐昌. 某铀尾矿库附近空气²²²Rn浓度时空分布及分形特征[J]. 环境工程, 2016, 34(增刊1): 799-803, 806.
ZHANG Xueli, XU Lechang. Time and Space Fractal Features of Radon Concentration in the Surrounding Region of an Uranium Tailings Pond[J]. Environmental Engineering, 2016, 34(S1): 799-803, 806.
- [30] 黄帅, 彭小勇, 张欣, 等. 铀尾矿库滩面析出氡在覆土中运移的数值模拟[J]. 安全与环境学报, 2014(3): 176-179.
HUANG Shuai, PENG Xiaoyong, ZHANG Xin, et al. Numerical Simulation of Radon Migration from the Impoundment Beach with Uranium Tailings in the Surface Soil[J]. Journal of Safety and Environment, 2014(3): 176-179.
- [31] 张欣, 彭小勇, 黄帅. 铀尾矿库滩面植被分布对尾矿砂大气迁移影响的数值模拟[J]. 安全与环境学报, 2013(6): 269-273.
ZHANG Xin, PENG Xiaoyong, HUANG Shuai. Simulation for the Impact of Vegetation Distribution on the Migration of the Tailing Sands on the Uranium Tailings Impoundment Beach[J]. Journal of Safety and Environment, 2013(6): 269-273.
- [32] 谢东. 铀矿通风尾气放射性核素在大气中迁移的数值模拟与实验研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009.
XIE Dong. Numerical Simulation and Experiment Investigation on the Radioactive Radionuclide of Uranic Well Ventilation Exhaust Gas in Atmosphere[D]. Changsha: Zhongnan University, 2009.
- [33] 万恩源, 郑向东, 万国江, 等. 2011年春季日本福岛核泄漏污染输送: 贵阳¹³¹I和¹³⁷Cs观测示踪分析[J]. 环境科学学报, 2012, 32(9): 2182-2188.
WAN Enyuan, ZHENG Xiangdong, WAN Guojiang, et al. Transport of the Radioactivity Leakage from the Japan Fukushima Nuclear Power Plant in 2011 Spring: ¹³¹I and ¹³⁷Cs as the Tracers Observed in Guiyang, China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(9): 2182-2188.
- [34] LEON J D, JAFFE D A, KASPAR J, et al. Arrival Time and Magnitude of Airborne Fission Products from the Fukushima, Japan, Reactor Incident as Measured in Seattle, WA, USA[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2011, 102(11): 1032-1038.
- [35] SINCLAIR L E, SEYWERD H C J, FORTIN R, et al. Aerial Measurement of Radioxenon Concentration off the West Coast of Vancouver Island Following the Fukushima Reactor Accident[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2011, 102(11): 1018-1023.
- [36] ZHANG W, BEAN M, BENOTTO M, et al. Development of a New Aerosol Monitoring System and Its Application in Fukushima Nuclear Accident Related Aerosol Radioactivity Measurement at the CTBT Radionuclide Station in Sidney of Canada[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2011, 102(12): 1065-1069.
- [37] MANOLOPOULOU M, VAGENA E, STOULOS S, et al. Radioiodine and Radiocesium In Thessaloniki, Northern Greece Due to the Fukushima Nuclear Accident[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2011, 102(8): 796-797.
- [38] PITTAUEROVÁ D, HETTWIG B, FISCHER H W. Fukushima Fallout in Northwest German Environmental Media ☆ [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2011, 102(9): 877-880.
- [39] BOLSUNOVSKY A, DEMENTYEV D. Evidence of the Radioactive Fallout in the Center of Asia (Russia) Following the Fukushima Nuclear Accident[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2011, 102(11): 1062-1064.
- [40] KIM C K, BYUN J I, CHAE J S, et al. Radiological Impact in Korea Following the Fukushima Nuclear Accident[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2012, 111(5): 70-82.
- [41] 邬家龙, 孙卫, 王赞, 等. 日本福岛核事故对兰州地区所致放射性污染的监测与分析[J]. 核电子学与探测技术, 2013, 33(5): 603-605.
WU Jialong, SUN Wei, WANG Yun, et al. Monitoring and Analysis of Radioactive Contamination in Lanzhou Due to Japan Fukushima Nuclear Accident[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2013, 33(5): 603-605.

- [42] 周程, 张起虹, 蒋云平, 等. 日本核泄漏期间南京地区空气中放射性气溶胶的监测和评价 [J]. 环境监测管理与技术, 2011, 23(5): 43-45.
ZHOU Cheng, ZHANG Qihong, JIANG Yunping, et al. Monitoring and Evaluation of Radioactive Aerosols in the Nanjing Air During Japan's Nuclear Leakage[J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2011, 23(5): 43-45.
- [43] 刘龙波, 武山, 曹军骥, 等. 福岛核事故泄漏的大气放射性核素监测及其对西安地区的影响 [J]. 科学通报, 2013(4): 372-378.
LIU Longbo, WU Shan, CAO Junji, et al. Monitoring of Atmospheric Radionuclides from the Fukushima Nuclear Accident and Assessing Its Impact on Xi'an[J]. Chinese Science Bulletin, 2013(4): 372-378.
- [44] 王鹏飞, 费建芳, 程小平, 等. 福岛核泄漏物质在大气中输送扩散的数值模拟 [C]// 中国气象学会年会. 厦门: 中国气象学会, 2011: 317-326.
WANG Pengfei, FEI Jianfang, CHENG Xiaoping, et al. Numerical Simulation of Transport and Diffusion of Nuclear Leakage Material in Fukushima[C]//China Meteorological Society Annual Meeting. Xiamen: China Meteorological Society, 2011: 317-326.
- [45] 刘爱华, 蒯琳萍. 放射性核素大气弥散模式研究综述 [J]. 气象与环境学报, 2011, 27(4): 59-65.
LIU Aihua, KUAI Linping. A Review on Radionuclides Atmospheric Dispersion Modes[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2011, 27(4): 59-65.
- [46] 胡二邦, 王寒, 张永义, 等. 滨海复杂地形核电厂址高斯烟羽模式有效性检验 [J]. 辐射防护, 2004, 24(5): 289-296.
HU Erbang, WANG Han, ZHANG Yongyi, et al. Examination of Validation of Gaussian Plume Model at the Coastal Nuclear Power Plant's Site with Complex Terrain[J]. Radiation Protection, 2004, 24(5): 289-296.
- [47] 高化超, 葛义军, 仲晨华. 基于高斯分段烟羽模型的海上核素弥散模型 [J]. 四川兵工学报, 2016, 37(3): 116-120.
GAO Huachao, GE Yijun, ZHONG Chenhua. Model Analysis of Nuclide Dispersion by Segmented Gaussian Plume Model on the Ocean[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2016, 37(3): 116-120.
- [48] 邵和松, 夏媛媛, 常宗民. 小型核设施气载放射性核素大气扩散计算模式 [J]. 四川环境, 2013(增刊1): 114-118.
SHAO Hesong, XIA Yuanyuan, CHANG Zongmin. Study on the Atmospheric Diffusion Model of Airborne Radioactive Nuclide for Minitype Nuclear Facilities[J]. Sichuan Environment, 2013(S1): 114-118.
- [49] 李华, 邓继勇, 王旭辉, 等. 用高斯模型计算大气中放射性核素云团的扩散 [J]. 辐射防护, 2004, 24(2): 92-99.
LI Hua, DENG Jiyong, WANG Xuhui, et al. Calculation of Diffusion of Radionuclides Cloud in Atmosphere Using the Gaussian Model[J]. Radiation Protection, 2004, 24(2): 92-99.
- [50] 池兵, 方栋, 李红. 随机游走大气扩散模型在核事故应急中的开发和应用 [J]. 核科学与工程, 2006, 26(1): 39-45.
CHI Bing, FANG Dong, LI Hong. Development and Application of Random Walk Model of Atmospheric Diffusion in Emergency Response of Nuclear Accidents[J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 2006, 26(1): 39-45.

(责任编辑: 廖友媛)