

On the method, challenge and development trend of radiation environmental impact assessment

Zhonghua Liu Wei Xiong

Sichuan Radiation Environment Evaluation and Management Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 610041, China

Abstract

With the deep application of nuclear energy and nuclear technology in energy, medical, industrial and other fields, radiation environmental impact assessment has become the core link to ensure public health and ecological security. This paper systematically summarizes the theoretical framework and technical system of radiation environment evaluation, mainly expounds the four core methods of environmental monitoring, radiation dose model, biological indicator species and epidemiological investigation; deeply analyzes the four major challenges: the uncertainty of low dose radiation effect, the simulation estimation error of radiation behavior in complex environmental media, the quantification problem of multi-source radiation and mixed pollutants, and the uncertainty of monitoring data and the sensitivity of model parameters. At the same time, the outlook for the future development trend, through the fine evaluation technology, multidisciplinary integration, artificial intelligence and big data technology application and international standard unification, can effectively improve the evaluation of the scientific and reliability of the radiation environment, for the sustainable development of nuclear energy and nuclear technology industry and radiation safety management.

Keywords

radiation environmental impact assessment; radiation dose; environmental monitoring; risk assessment; model simulation

浅谈辐射环境影响评价的方法、挑战与发展趋势

刘忠华 熊伟

四川省辐射环境评价治理有限责任公司, 中国·四川成都 610041

摘要

随着核能与核技术在能源、医疗、工业等领域的深度应用, 辐射环境影响评价已成为保障公众健康与生态安全的核心环节。本文系统梳理了辐射环境影响评价的理论框架与技术体系, 重点阐述了环境监测、辐射剂量模型、生物指示物种及流行病学调查等四大核心方法; 深入分析了当前面临的四大挑战: 低剂量辐射效应的不确定性、复杂环境介质中的辐射行为模拟估算误差、多源辐射与混合污染物的协同效应量化难题, 以及监测数据不确定性与模型参数敏感性问题。同时, 对未来发展趋势进行了展望, 通过精细化评价技术、多学科交叉融合、人工智能与大数据技术应用以及国际标准统一化, 可有效提升辐射环境影响评价的科学性与可靠性, 为核能及核技术产业可持续发展和辐射安全管理提供支撑。

关键词

辐射环境影响评价; 辐射剂量; 环境监测; 风险评估; 模型模拟

1 引言

在当今科技飞速发展的时代, 辐射环境问题愈发受到社会各界的广泛关注。辐射环境影响评价作为环境影响评价体系中至关重要的一环, 在保障公众健康与生态环境安全方面发挥着不可替代的作用。

辐射环境影响评价是指对规划和建设项目实施后可能造成的辐射环境影响进行分析、预测和评估, 提出切实可行的预防或减轻对策与措施, 并建立完善的跟踪监测方法与制度。它是环境影响评价的一个重要分支领域, 主要聚焦于辐射相关的环境因素。辐射环境影响评价的核心, 是对辐射源周边环境中的辐射水平、剂量分布以及潜在的环境影响进行系统评估的过程。其主要目的在于确保人类活动所涉及的辐射暴露处于安全可控范围, 预防潜在的辐射危害, 为辐射防

护决策、环境管理以及公众沟通提供科学依据。

近年来, 随着核技术应用领域的不断拓展和核能产业的蓬勃发展, 辐射环境影响评价的重要性日益凸显。在核电站的建设与运营过程中, 从选址、设计到运行、退役的每一个阶段, 辐射环境影响评价都发挥着关键的指导作用。在医学领域, 放射性同位素广泛应用于诊断与治疗, 辐射环境影响评价能够保障医护人员和患者的安全。在工业领域, 射线探伤技术的应用也离不开辐射环境评价的支持, 以确保工作人员和周边环境免受辐射危害。此外, 在科研实验中, 各类辐射装置的使用同样需要严格的环境评价, 以保障科研活动的顺利进行和科研人员的健康安全。

2 辐射环境评价的重要性

辐射环境评价在核能与核技术应用的全生命周期中发

挥着不可或缺的作用。在核设施的选址阶段,通过全面的环境评价可以确定适宜的建设地点,避开人口密集区和生态敏感区域,从源头上降低潜在风险。在设施建设与运营过程中,持续的评价能够及时发现辐射泄漏或异常排放情况,确保辐射防护措施的有效性,保障工作人员和周边居民的健康。核设施退役以及放射性废物处置,辐射环境评价可为决策提供关键数据支持,确保退役过程安全有序,废物处置符合环保要求,避免对后代产生长期不利影响^[1]。在发生核事故或辐射突发事件时,准确的环境评价能够为应急响应提供科学依据,指导人员疏散、救援行动以及环境修复工作,最大限度地减少事故损失。

3 辐射环境评价的基本概念

辐射环境评价需系统考量不同类型辐射源,主要包括电离辐射(α 粒子、 β 粒子、 γ 射线及X射线等)与非电离辐射(射频辐射、微波辐射等)两大类。评价体系覆盖辐射源影响范围内的大气、水体、土壤以及潜在受照生物体。核心评价参数包括辐射剂量率、累积剂量、放射性核素浓度等。辐射剂量率反映了单位时间内的辐射剂量,是衡量辐射场强度的重要参数;累积剂量则用于评估在一定时间周期内生物体所接受的总辐射剂量;放射性核素浓度则直接关系到环境介质中的放射性污染程度,这些指标相互关联,共同构成了辐射环境评价的核心要素^[2]。

4 辐射环境评价的方法

4.1 环境监测方法

环境监测是辐射环境评价的基础手段,通过对空气、水、土壤等介质中的放射性核素进行直接测量来获取数据。空气监测常采用气溶胶采样器、 γ 谱仪等设备,测定空气中放射性气溶胶的浓度、 γ 辐射剂量率等参数;水监测利用液体闪烁计数器、电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)等检测水中放射性核素浓度;土壤监测采用 γ 能谱仪、 α 、 β 计数器等对土壤中的放射性核素进行分析。

4.2 辐射剂量评估模型

辐射剂量评估模型基于数学算法和物理原理,对辐射在环境中的传输、扩散以及人体吸收剂量进行估算。常见的模型包括大气扩散模型(如高斯烟羽模型、CALPUFF模型等)用于预测放射性气体或气溶胶在大气中的扩散路径和浓度分布^[3];水体扩散模型(如二维或三维水动力模型与放射性核素迁移模型耦合)用于分析放射性物质在水体中的迁移转化;剂量计算模型(如MCNP、GEANT4等蒙特卡罗模拟软件),根据辐射场分布和人体模型计算不同器官或组织的吸收剂量。模型评估能够在一定程度上弥补监测数据的局限性,进行不同场景的预测和分析,但模型的准确性依赖于参数的选取和模型假设的合理性,需要与实际监测数据进行对比验证。

4.3 生物监测与指示物种

生物监测利用生物个体或生物群落对辐射的响应来评估环境辐射水平。某些植物、动物对辐射较为敏感,其生理指标、遗传变异或种群数量变化可作为辐射环境的指示信号。例如,某些松树品种在受到辐射后会出现针叶变色、生长异常等现象;一些昆虫的繁殖能力和基因突变频率也会因辐射而改变。生物监测能够综合反映辐射对生态系统的影响,但生物响应存在复杂性和滞后性,需要长期观察和深入研究生物与辐射的相互作用机制,建立可靠的生物指标体系。

4.4 流行病学调查

流行病学调查通过对特定人群的健康状况进行统计分析,研究辐射暴露与疾病发生之间的关联。在核事故或高辐射区域周边,对居民的癌症发病率、遗传疾病发生率等进行长期跟踪调查,结合辐射剂量估算数据,评估辐射对人群健康的潜在影响。流行病学调查能够直接反映辐射对人类健康的实际后果,但由于疾病发生受多种因素影响(如生活方式、遗传背景、其他环境污染物等),难以精确归因于辐射暴露,且需要大样本量和长时间跨度的数据积累。

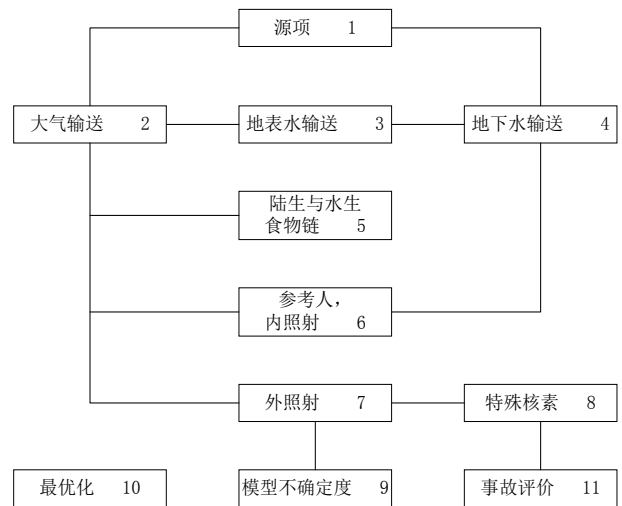


图1 辐射环境影响评价框图^[2]

5 辐射环境评价面临的挑战

5.1 低剂量辐射效应的不确定性

在辐射环境评价中,低剂量辐射(通常指低于100mSv的剂量)的健康效应一直是研究的难点和争议焦点。传统的辐射防护理论基于线性无阈值模型(LNT模型),认为任何剂量的辐射都存在一定风险,但近年来一些实验和观察研究对该模型提出了质疑,认为低剂量辐射可能存在适应性反应或阈值效应。这种不确定性使得在评价低剂量辐射环境风险时面临困难,辐射防护标准的制定和应用也面临挑战,如何更精准地确定低剂量辐射的实际危害,是当前辐射环境评价领域亟待解决的科学问题。

5.2 复杂环境介质中的辐射行为模拟

实际环境介质具有高度复杂性,包括土壤的异质性、水体的流动变化、大气的湍流运动等,放射性核素在这些介质中的迁移、转化、吸附、解吸等行为受到多种物理、化学和生物过程的交互影响。例如,在土壤中,放射性核素的迁移速度不仅取决于土壤的孔隙结构和质地,还与土壤微生物活性、有机碳含量、pH值等因素密切相关;在水体中,放射性核素可能与水中的胶体物质结合,改变其迁移特性和生物可利用性。现有的辐射传输和剂量评估模型难以全面准确地描述这些复杂过程,导致对复杂环境中辐射剂量的估算存在较大误差。

5.3 多源辐射与混合污染物的综合评价

现代社会中,辐射源呈现多样化和复杂化趋势,往往存在多个辐射源同时作用的情况,如核设施周边可能既有核电厂运行产生的辐射,又有工业放射性探伤作业或医疗放射性废物处理带来的影响;同时,环境中还存在其他类型的污染物,如重金属、有机污染物等,它们与辐射可能产生协同或拮抗作用,影响辐射的毒性效应和环境行为。目前的辐射环境评价方法大多针对单一辐射源或简单环境条件,缺乏对多源辐射和混合污染物综合评价的有效手段,难以全面评估实际环境中的综合风险。

5.4 数据质量保证与不确定性分析

辐射环境评价依赖大量的监测数据、模型参数和假设条件,数据的准确性、代表性和完整性直接影响评价结果的可靠性。然而,在实际工作中,由于监测设备的误差、采样方法的局限性、模型参数的不确定性以及数据缺失等问题,导致数据质量参差不齐。此外,在评价过程中对不确定性因素的分析 and 量化不够充分,难以准确衡量评价结果的可信度。如何建立完善的数据质量保证体系,加强不确定性分析方法的研究和应用,是提高辐射环境评价质量的关键环节。

6 辐射环境评价的发展趋势

6.1 精细化与个性化评价

随着对辐射环境要求的不断提高,辐射环境评价将朝着精细化和个性化方向发展。针对不同类型的辐射源、不同环境条件和不同受照人群,建立更加精准的评价模型和指标体系。例如,在核医学领域,根据不同放射性药物的使用特点、患者个体差异(如年龄、体重、疾病类型等)以及治疗场所的布局,制定个性化的辐射环境评价方案,以优化辐射防护措施,提高治疗效果的同时保障患者和医护人员的安全。

6.2 多学科交叉融合

辐射环境评价将越来越多地与其他学科进行交叉融合,如环境科学、生态学、生物学、医学、计算机科学等。借助

环境科学和生态学的理论与方法,深入研究放射性核素在复杂生态系统中的迁移转化规律和生态效应;结合生物学和医学的最新研究成果,探索辐射对生物分子、细胞、组织和器官的作用机制,提高低剂量辐射效应评估的准确性;利用计算机科学中的大数据分析、人工智能、机器学习等技术,优化辐射环境监测网络布局,改进辐射剂量评估模型,提高数据处理和分析能力,实现对辐射环境的智能评价和预测。

6.3 大数据与人工智能技术的应用

大数据技术将在辐射环境评价中发挥重要作用。通过整合来自不同地区、不同类型辐射源、不同监测手段的大量数据,建立辐射环境大数据平台,实现数据的共享与挖掘分析。利用人工智能算法对大数据进行深度处理,自动识别辐射异常事件、预测辐射环境变化趋势、优化评价模型参数等。例如,基于深度学习的图像识别技术可用于分析辐射监测图像中的异常信号;机器学习算法可根据大量历史监测数据训练模型,预测不同气象条件下放射性核素在大气中的扩散路径和浓度分布,提高辐射环境应急响应的及时性和准确性。

6.4 国际合作与标准统一

辐射环境评价是全球性问题,国际合作将日益加强。各国将在辐射监测技术、评价方法、数据共享、应急响应等方面开展更广泛的交流与协作。同时,国际辐射防护委员会(ICRP)等国际组织将进一步推动辐射防护标准的统一和完善,促进全球辐射环境评价工作的规范化和标准化。通过国际合作,共享先进技术和经验,共同应对跨国界辐射环境问题,如核事故的跨境影响、全球放射性核素循环与迁移等,保障全球生态安全和公众健康。

7 结论

辐射环境评价作为保障辐射安全的重要手段,在核能与核技术应用的各个领域发挥着关键作用。本文全面阐述了辐射环境评价的概念、重要性、方法以及面临的挑战和发展趋势。随着科技的不断进步和社会对辐射安全要求的提高,辐射环境评价将不断创新和完善,朝着精细化、多学科融合、智能化以及国际合作的方向发展。未来,需要持续加强基础研究,攻克低剂量辐射效应、复杂环境模拟等难题;积极应用新技术,提升数据质量和评价能力;加强国际交流与合作,共同推动全球辐射环境评价事业的发展,为人类创造更加安全的辐射环境。

参考文献

- [1] 张丹枫,赵兰才.辐射防护技术与管理[M].广西,广西民族出版社,2003.
- [2] 潘自强.电离辐射环境监测与评价[M].北京,原子能出版社,2007.
- [3] 宋卫杰,侯连娇.AERMOD在核设施辐射环境影响评价中的应用研究[J].中国辐射卫生,2020,29(2):188-192.