

核事故场外应急新需求与风险评估新技术

路红星^{1,2,3}, 余文彬^{4*}, 刘衍波², 袁淦锋², 胡金星¹, 林权益²

¹中国科学院深圳先进技术研究院, 广东 深圳

²深圳市城市公共安全技术有限公司, 广东 深圳

³深圳技术大学中德智能制造学院, 广东 深圳

⁴联勤保障部队解放军第九六〇医院, 山东 济南

收稿日期: 2025年5月26日; 录用日期: 2025年6月9日; 发布日期: 2025年7月11日

摘要

随着我国核电厂周边地区城镇化进程加速, 传统静态风险评估方法难以应对动态应急场景下的复杂需求。本文针对修订后的标准《核动力厂环境辐射防护规定(GB 6249-2025)》中核事故场外应急能力面临的新挑战和新需求进行了分析, 提出动态辐射场与人员疏散协同模型, 旨在量化应急干预措施对公众剂量风险的消减效能。通过集成高分辨率模拟气象场(WRF-CALMET耦合)、放射性核素大气扩散模拟(CALPUFF动态建模)及疏散路径动态优化(时空克里金插值结合A*算法), 突破传统三级概率安全分析(PSA)中静态人口与气象参数的局限性。本研究对我国核事故场外公众剂量风险评估、应急响应管理能力的提升具有重要实践意义。

关键词

核事故应急, 公众剂量风险, 辐射场 - 路径规划

New Demands and Risk Assessment Technologies for Nuclear Accident Off-Site Emergency

Hongxing Lu^{1,2,3}, Wenbin Yu^{4*}, Yanbo Liu², Ganfeng Yuan², Jinxing Hu¹, Quanyi Lin²

¹Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen Guangdong

²Shenzhen Technology Institute of Urban Public Safety, Shenzhen Guangdong

³Sino-German College of Intelligent Manufacturing, Shenzhen Technology University, Shenzhen Guangdong

⁴Joint Logistics Force PLA Hospital No. 960, Jinan Shandong

*通讯作者。

文章引用: 路红星, 余文彬, 刘衍波, 袁淦锋, 胡金星, 林权益. 核事故场外应急新需求与风险评估新技术[J]. 核科学与技术, 2025, 13(3): 146-153. DOI: 10.12677/nst.2025.133015

Received: May 26th, 2025; accepted: Jun. 9th, 2025; published: Jul. 11th, 2025

Abstract

With the acceleration of urbanization around nuclear power plants in China, traditional static risk assessment methods have become inadequate in addressing the complex demands of dynamic emergency scenarios. This paper analyzes the new challenges and demands for off-site nuclear emergency capabilities following the policy adjustments in the “Regulations for Environmental Radiation Protection of Nuclear Power Plants (GB 6249-2025)”. It proposes a collaborative model integrating dynamic radiation field and population evacuation, aiming to quantify the effectiveness of emergency interventions in reducing public dose risks. By combining high-resolution meteorological field (WRF-CALMET coupling), atmospheric dispersion modeling of radionuclides (dynamic CALPUFF simulation), and dynamic evacuation path optimization (spatiotemporal Kriging interpolation with A* algorithm), the study overcomes the limitations of static population and meteorological parameters in traditional three-level probabilistic safety assessment (PSA). This research holds significant practical value for enhancing nuclear accident off-site public dose risk assessment and emergency response management in China.

Keywords

Nuclear Accident Emergency Response, Public Dose Risk, Path Planning under Radiation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

核能作为清洁高效的能源形式，在全球能源结构转型中占据重要地位。然而，可能导致核事故发生的潜在风险始终是制约核电大规模应用的关键因素。随着我国核电厂周边地区的经济快速发展，核电厂周边城镇化进程加速，人口规模显著增长，传统核安全管控模式面临着严峻挑战。为平衡国土空间利用与核安全需求，生态环境部于 2025 年开启《核动力厂环境辐射防护规定(GB 6249-2025)》[1]的修订工作，取消了 GB 6249-2011 版本[2]中厂址周边“不超过 10 万人”的硬性限制，转向“人口集中地区”的动态管理。这一政策调整在释放国土空间潜力的同时，对核事故场外应急能力提出了更高要求：亟需通过技术革新实现风险评估与应急响应的动态耦合，以科学量化应急干预措施对群体剂量风险的消减效能。

当前，核事故场外风险评估的核心技术——三级概率安全分析(Probabilistic Safety Assessment, PSA)已形成涵盖放射性物质扩散建模、剂量风险量化与社会影响评估的标准化框架。然而，传统三级 PSA 大多基于静态人口分布模型与离散气象参数抽样，未能有效整合场外应急响应中动态人员疏散、隐蔽等主动干预措施。现有评估体系对应急撤离路径优化与辐射场之间动态交互的量化分析存在显著缺位，导致风险评估结果与真实应急场景脱节。国际原子能机构(IAEA)虽在三级 PSA 技术导则中强调动态耦合的重要性，但其方法论仍聚焦于事故后果的静态模拟，未能突破“被动防护”的固有范式。

针对上述问题，本论文聚焦核事故场外应急新需求与风险评估技术革新，提出以下研究目标：

(1) 解析政策导向下的研究方向。结合我国核事故应急管理和风险评估的现状，分析 GB 6249-2025

标准修订后,核事故场外应急风险评估新的研究方向;

(2) 构建动态辐射场与人员疏散协同模型。突破传统静态人口与气象建模约束,集成实时辐射场演化数据与疏散路径耦合算法,为量化应急干预对公众剂量风险的降低提供研究基础。

2. 核事故场外应急与风险评估研究现状

2.1. 三级 PSA 技术发展现状

核事故场外应急对三级 PSA 中的健康效应(剂量风险)评估的影响是政策导向下的必然的技术发展目标。传统的三级 PSA 针对放射性物质的大气扩散模拟及静态人口分布下的剂量评估开展了很多的研究工作。

国际上许多国家和组织对三级 PSA 已开展了较为深入的研究和实践。三哩岛核事故后,1986 年美国核管会(NRC) [3]提出了两个“千分之一”作为定量度量风险的准则,即核电厂附近个人因反应堆事故导致立即死亡的风险不应超过因其他事故导致的立即死亡风险总和的千分之一,核电厂附近公众群体因核电厂运行可能导致的癌症死亡风险不应超过因其他原因导致的癌症死亡风险总和的千分之一。1996 年 IAEA《核电厂三级 PSA 执行程序》(No.50-P-12) [4]提出了核电厂三级 PSA 工作指南,梳理了三级 PSA 的执行步骤,为三级 PSA 提供了一套完整的标准化框架。2007 年美国核管会在 NUREG-1860 报告[5]中将单一事故类的频率后果曲线作为风险可接受性准则,为各工况设置了剂量限值和频率限值,用于判定核电厂的设计是否可以接受。英国在核设施安全评估原则[6]。以及核安全技术评估指南[7]。给出了个人风险、事故总频率-剂量目标、社会风险等期望值。日本、加拿大也给出了核电厂个人风险的目标值[8]。

2.2. 放射性扩散建模和风险量化研究现状

国内外学者对于三级 PSA 的研究在放射性扩散建模、风险量化方法及国际标准适配性方面也取得了重要进展。Lee 等[9]针对韩国高人口密度特点分析了核电站三级 PSA 场外风险分析关键问题,通过 WINMACCS 代码开展关键参数敏感性研究,揭示扩散模型选择与地表粗糙度设定对风险分布的显著影响,提出需结合本土地理特征优化气象与建筑屏蔽因子输入体系。M. Schwaiger 等[10]对核事故发生后的土地污染及摄入剂量风险开展了相关研究,分析了几种在减少人口剂量方面起作用。Olsson 等[11]主导北欧三级 PSA 方法论研究,整合健康、环境与经济多维风险指标,构建跨学科评估框架,并参与制定 IAEA 三级 PSA 技术导则,推动形成适配北欧地理与社会特征的核事故后果分析标准。Kim 等[12]开发了基于累积释放分数斜率的羽流分段优化方法,通过强化快速释放阶段的高精度建模与平缓阶段简化分析,将三级 PSA 后果分析时间降低,解决了多源项场景下三级 PSA 计算效率与精度的矛盾问题。王琪等[13]采用 PC CO-SYMA 工具构建了通用厂址条件下的三级 PSA 全范围分析方法,整合一级/二级 PSA 释放类并开展敏感性分析,量化了华龙一号剂量-频率分布及社会风险,揭示干式燃料储存设计改进可显著降低风险,实现了事故谱风险动态优化与 ALARA 原则的工程实践衔接。王梦溪等[14]开发了基于 CALPUFF 烟团模式的自主三级 PSA 程序 PSAL3DPP V1.0,结合多厂址源项、气象及地形数据,动态模拟放射性物质扩散与剂量分布,验证了华龙一号公众辐射风险符合国际标准,同时为我国定量化风险准则制定提供数据基础。

2.3. 现有研究不足

在三级 PSA 的国内外相关研究中,重点突破了源项分组优化、气象耦合扩散模拟、动态剂量-风险转换等关键技术,显著提升了核事故场外后果评估的精度与效率,但均未完全突破传统三级 PSA 中“静态社会场景”的框架约束,缺乏对建动态辐射场与疏散行为的精细化动态交互机制研究。在我国核事故应急能力的评估工作中,大部分工作依托法律和标准的要求,通过专家评判和检查项打分的方式开展,场外应急预案中制定的撤离规划基本是通过现有的交通路线情况划定,疏散路径规划以静态辐射场为输

入, 缺乏对时空辐射场与人员分流行为的精细化交互分析, 缺少在动态应急撤离行动中的辐射剂量评估和应急策略研究。

3. 核事故场外应急新需求分析

3.1. 我国现有的应急管理 with 风险评估体系

我国现行核应急管理体系采用“国家-核电厂所在省(市、区)-核电厂营运单位”的三级响应机制, 具体工作场景则分为场内应急和场外应急两个部分。根据《中华人民共和国核安全法》[15]场内应急由核设施营运单位主要负责, 国家核安全局负责监管, 省级政府负责协助, 场外应急由核设施所属地方政府主要负责, 国家核应急协调委员会(国家核应急办)负责协调支持。但目前无论是对应场内应急风险评估的一、二级 PSA 工作还是对应场外应急风险评估的三级 PSA 工作都是由核设施营运单位独立承担实施。

3.2. 应急管理新需求与最新政策导向

随着我国核电场周边地区的经济快速发展, 核电厂周边城镇化进程加速, 人口规模显著增长。例如, 大亚湾核电站周边半径 10 公里范围内的人口已远超大亚湾建设选址时设定的人口阈值, 传统以“静态人口密度限制”为核心的事故风险评估方法面临严峻挑战。

《核动力厂环境辐射防护规定(GB6249-2025)》已经于 2025 年 1 月 21 日正式发布。该标准首次发布于 1986 年, 在 2011 年进行了第一次修订(2011 版本标准), 本次为第二次修订。标准规定了陆上固定式核动力厂在场址选择、设计、建造、运行、退役和修改等活动中所应遵循的环境辐射防护要求。发布的新版本的标准中, 进一步放宽了对国土空间发展的限制的条件: 2011 版本标准中的“核动力厂规划限制区范围内不应有 1 万人以上的乡镇, 厂址半径 10 公里范围内不应有 10 万人以上的城镇。”的刚性要求已经在最新版本的标准中删除。同时, 标准要求应急计划区范围内开展“人口集中地区”的管理, 并突出了核事故应急工作的重要性, 这一政策的调整对核事故风险评估提出了新的指导方向: 应将核事故场外应急工作的影响纳入到应急风险评估的体系架构中。

在核事故场外应急工作中, 撤离疏散环节公众收到的剂量风险是事故风险评估的一个重要因素。因此, 如何有效评估公众在核事故撤离疏散过程中公众受到的动态剂量风险成为研究的重点问题。

4. 动态辐射场与人员疏散耦合研究

为了有效评估公众在核事故撤离疏散过程中收到的剂量风险, 首要任务是构建核事故场外的辐射场, 作为公众撤离中的动态剂量计算的基础条件。其次, 要经过算法耦合撤离规划与动态辐射场的时空效应, 精细化的评估撤离疏散过程中公众受到的剂量水平。

4.1. 高分辨率气象场构建

首先基于中尺度气象预报模型 WRF (Weather Research and Forecasting Model) 四维变分数据同化(4D-VAR), 通过构建目标函数(泛函)最小化观测与模式预测在时间窗内的整体差异, 将气象站观测数据、卫星辐射数据引入到气象场模拟中实现动态修正从而优化初始场。

由于 WRF 模型高分辨率运算稳定性不足且计算成本高等问题, 其空间网格步长往往限制在千米级空间分辨率, 不满足网格精度需求。因此, 在 WRF 产生的初始气象场基础上, 需要采用 CALMET 气象诊断模型进行动力降尺度处理, 进一步精细化网格。将 WRF 输出场作为初始猜测场插值到 CALMET 更精细尺度的网格中, 然后利用精细尺度地形效应对其进行诊断调整, 形成最终气象场。CALMET 对 WRF 输出场的地形效应处理包括: 地形运动学效应、坡面流、地形热力学阻塞效应等。

4.1.1. 地形运动学效应

首先利用整个中尺度气象场模拟域下的风场，在笛卡尔坐标系下计算出垂直速度，该速度满足大气稳定度指数衰减函数；接着将其转换为 CALMET 所需的地形跟踪坐标系下的垂直速度；然后对处理后的中尺度气象场进行散度最小化迭代计算，不断调整风场水平分量直到小于用户设定的阈值，从而实现地形对风场水平分量的运动学影响调整。笛卡尔坐标系下的垂直速度表达式为：

$$w = (V \cdot \nabla h_t) \exp(-kz)$$

其中， V 为全域平均风速， h_t 为地形高度， z 为垂直坐标， k 是大气稳定度衰减系数，其表达式为：

$$k = \frac{N}{|V|}$$

$$N = \left[\left(\frac{g}{\theta} \right) \frac{d\theta}{dz} \right]^{1/2}$$

其中， N 为维萨拉频率， θ 为位温， g 为重力加速度。

4.1.2. 坡面流

CALMET 使用经验公式估计复杂地形中坡面流的大小，并将坡面流矢量添加到风场中以调整风场。坡面流的计算基于 Mahrt 的射流参数化方案，依靠微弱动量平流传输、表面拖曳和坡面流顶部的夹卷作用平衡。Mahrt 假设水流稳定、深度恒定、地形坡度恒定、科里奥利效应和横坡分量被忽略，则坡面流速表示为：

$$S = S_e \left[1 - \exp\left(-\frac{x}{L_e}\right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$S_e = \left[\frac{hg \left(\frac{\Delta\theta}{\theta} \right) \sin \alpha}{C_D + k} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$L_e = \frac{h}{C_D + k}$$

下坡流速表示为：

$$S = \left(\frac{Q_h g x \sin \alpha}{\rho c_p T (C_D + k)} \right)^{\frac{1}{3}} \left[1 - \exp\left(-\frac{x}{L_e}\right) \right]^{\frac{1}{3}}$$

上坡流速表示为：

$$S = \left(\frac{Q_h g x \sin \alpha}{\rho c_p T (C_D + k)} \right)^{\frac{1}{3}} \cong \left(\frac{Q_h g \Delta Z}{\rho c_p T} \right)^{\frac{1}{3}}$$

其中， S_e 为坡面流平衡速度， L_e 为平衡长度尺度， x 为到山顶的距离， θ 为环境位温， C_D 为表面阻力系数， h 为坡面流的深度， α 为坡面相对于水平面的角度， k 为坡面流层顶部的夹卷系数。

地形热力学阻塞效应

地形对风的热力学阻塞效应是根据局部 Froude 数进行参数化的。

$$Fr = \frac{V}{N\Delta h_t}$$

$$\Delta h_t = (h_{\max})_{ij} - (z)_{ijk}$$

其中, V 为网格点处的风速, N 为维萨拉频率, Δh_t 为障碍物有效高度, $(h_{\max})_{ij}$ 为网格点 (i, j) 影响半径内的最高网格地形高度, $(z)_{ijk}$ 为 (i, j) 处第 k 层距离地面的高度。对于每个网格点, 若 Fr 小于临界 Froude 数(CRITFN)且风场存在上坡分量, 则将风向调整为与地形相切, 风速不变, 否则不对风场进行调整。

通过 WRF 及 WRFDA 产生高质量初始气象场, 再由 CALMET 进行网格动力降尺度和地形效应处理, 最终生成分钟级时间步长、百米级空间步长的高精度动态近地面气象场, 为满足事故应急评估需求提供核心气象驱动。

4.2. 放射性核素大气扩散模拟

CALPUFF 模型基于拉格朗日-高斯烟团模式进行放射性烟羽在大气中的扩散模拟, 该模式将烟羽浓度场视为一系列连续释放的烟团浓度场的叠加。单个烟团对浓度场的贡献表达式为:

$$C = \frac{Q}{2\pi\sigma_x\sigma_y} g \exp\left(-\frac{d_a^2}{2\sigma_x^2}\right) \exp\left(-\frac{d_c^2}{2\sigma_y^2}\right)$$

$$g = \frac{2}{(2\pi)^{\frac{1}{2}}\sigma_z} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \exp\left[-\frac{(H_e + 2nh)^2}{2\sigma_z^2}\right]$$

其中, C 为地面浓度(Bq/m³), Q 为源强(Bq), σ_x 、 σ_y 、 σ_z 、分别为下风向、侧风向和垂直方向上的扩散系数, d_a 、 d_c 分别是烟团中心到计算受点的下风向和侧风向距离, H_e 为烟团中心的有效高度, h 为混合层高度。

对复杂地形下烟羽扩散的处理是基于复杂地形分散模型(CTDMPLUS)中使用的分流高度(H_d)理论来评估亚网格尺度山丘上的污染物是否绕山或越山扩散。 H_d 由隐式积分表示:

$$\frac{1}{2}u^2(H_d) = \int_{H_d}^H N^2(z)(H-z)dz$$

其中, N 为维萨拉频率, H 为山体高度。在实际计算中, 通过将上述积分从山顶向下逐步迭代而获得 H_d 。烟团高于 H_d 的部分能够越过山顶, 但烟团的形状分布以及扩散系数将随山体的变化而发生变换, 这一变换可以在计算处理中通过修正扩散系数和地形分布函数来实现。此时源项对接受点(y_p 、 z_p)的浓度贡献为:

$$C(t_R, y_R, 0, t_o) = \frac{qF_yF_z}{2\pi u\sigma_{ze}\sigma_{ye}}$$

其中, t_R 为源项到接受点的行进时间, t_o 为沿烟团中心线从源项到山体 H_d 高度处的行进时间, y_R 为接受点的侧风位置, q 为浓度通量(Bq/s), F_y 和 F_z 分别为垂直和水平分布函数, u 为烟团中心高度的平均风速, σ_{ze} 和 σ_{ye} 为有效扩散系数。

对于烟团中低于 H_d 的部分则采用水平二维流场形式, 该流场中的滞止流线(stagnation streamline)构成山体边界, 将烟团分割为分别沿着山体两侧绕行的两部分。仅当烟团中心恰好位于滞止流线上时, 烟团中心才会撞击山体表面。在撞击点附近的近地面浓度(GLC), 等效于无山体存在时沿滞止流线在受体高度处对烟团的采样浓度。当烟团碰撞山体时, 烟团横向分布沿滞流线被分割, 在平面 $z=0$ 和 $y=Y_d$ (滞

留线对应山体侧面)作完全反射处理。此时源项对接受点(y_r 、 z_r)的浓度贡献为:

$$C(t_R, Y_d, z_R, t_o) = \frac{qF_y F_z}{2\pi u \sigma_z \sigma_y}$$

其中, Y_d 为与山体侧面重合的横向分流流线的侧风位置, z_R 为山体表面接受点的高度, F_z 和 F_y 分别为垂直和水平分布函数, u 是烟团中心高度的平均风速, σ_z 和 σ_y 为扩散系数。

放射性核素在扩散过程的干、湿沉积, 是其从大气环境中被清除的主要方式, 从而降低其在大气环境中的浓度。CALPUFF 中的干沉积机制的基础是一种半经验模型, 该模型将干沉积速度表示为各种“阻力”之和的倒数加上重力沉降速度, “阻力”指污染物通过大气到达地表的阻力。之后, 结合剂量转换模型, 将 CALPUFF 输出的辐射场转换为剂量场。

4.3. 人员撤离疏散与辐射场动态耦合

首先基于高精度 GIS 路网与动态人口热力图数据, 构建典型人口集中区的多层级疏散路径网络, 利用 A*算法, 引入路径阻抗函数 $Cpath(t)$:

$$Cpath(t) = \alpha \cdot Tpath(t) + \beta \cdot \sum_{\tau=t+\Delta t} R(\tau) \cdot \Delta \tau$$

其中, $Tpath(t)$ 表示时段 t 路径通行时间(基于实时交通流预测); $R(\tau)$ 表示路径点辐射剂量率(由时空插值获取)。 $Cpath(t)$ 取值范围为 0~1, 阻抗越大表示通行阻力越大(通行风险越大)。

经过 Pareto 前沿筛选构建通行效率与辐射剂量双的个体最优路径集合 $P_i = \{p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{ik}\}$ 。

其次, 通过时空克里金插值技术将分钟级辐射场数据精准映射至撤离路径轨迹点:

$$R(x, y, t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i R(x_i, y_i, t)$$

其中, λ_i 为权重系数, 满足无偏性与最小方差约束。

最后建立个体累积剂量沿路径积分的动态计算模型, 量化单一路径的时空暴露特征。

$$D_{ind} = \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} R(x(\tau), y(\tau), \tau) \cdot v^{-1}(\tau) d\tau$$

其中, $x(\tau), y(\tau)$ 表示路径轨迹函数; $v(\tau)$ 表示实时行驶速度。

5. 结论

本文研究了国家相关标准修订后核事故场外应急的动态风险评估需求, 构建了辐射场演化与人员疏散行为的协同模型, 提出通过 WRF-CALMET 耦合的高分辨率气象场动态演化、基于 CALPUFF 烟团模型的复杂地形下放射性核素扩散模拟(轨迹修正)以及基于 A*算法结合克里金插值的疏散路径时空辐射暴露评估的技术框架, 突破了传统三级 PSA 静态人口与气象参数的局限性。本文提出的动态剂量累积积分模型能够精准量化撤离过程中辐射场的时空异质性, 为“人口集中地区”管理政策下的应急响应提供了主动防护的理论基础。当前研究在实时数据驱动的计算效率与多源异构数据融合精度方面仍面临挑战, 未来需结合轻量化算法与边缘计算技术优化模型效能, 并进一步纳入社会心理因素对疏散决策的影响机制, 通过进一步增加社会心理因素导致的阻抗分量, 修正阻抗系函数的表达式, 以增强风险评估的全面性与动态适应性。

基金项目

基 20240162 核事故场外监测预警与辅助决策技术研究(项目编号: JCYJ20241202124703004)。

参考文献

- [1] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. GB 6249-2025 核动力厂环境辐射防护规定[S]. 北京: 生态环境部办公厅, 2011.
- [2] 环境保护部, 国家质量监督检验检疫总局. GB 6249-2011 核动力厂环境辐射防护规定[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011.
- [3] NRC (1986) Safety Goals for the Operation of Nuclear Power Plants: Policy Statement (Vol. 51).
- [4] IAEA (1996) Procedures for Conducting Probabilistic Safety Assessments of Nuclear Power Plants (Level 3): IAEA Safety Series No. 50-P-12.
- [5] NRC (2007) Feasibility Study for a Risk-Informed and Performance-Based Regulatory Structure for Future Plant Licensing: Main Report, NUREG-1860 (Vol. 1).
- [6] ONR (2020) Safety Assessment Principles for Nuclear Facilities.
- [7] ONR (2019) Probabilistic Safety Analysis: Nuclear Safety Technical Assessment Guide, NS-TAST-GD-030 (Revision 6).
- [8] OECD/NEA (2018) Status of Practice for Level 3 Probabilistic Safety Assessments.
- [9] Lee, Y., Lee, S. and Lee, Y. (2016) Deduction of Korea Level 3 PSA Issues and Preliminary Off-Site Risk Analysis.
- [10] Schwaiger, M., Mueck, K., Benesch, T., Feichtinger, J., Hrncsek, E. and Lovranich, E. (2004) Investigation of Food Contamination since the Chernobyl Fallout in Austria. *Applied Radiation and Isotopes*, **61**, 357-360. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2004.03.008>
- [11] Olsson, A., Caldwell, A., Nordqvist, M., et al. (2014) Addressing Off-Site Consequence Criteria Using PSA Level-3—Enhanced Scoping Study.
- [12] Kim, S. and Kim, S. (2024) Optimization Method for Offsite Consequence Analysis by Efficient Plume Segmentation. *Nuclear Engineering and Technology*, **56**, 3851-3863. <https://doi.org/10.1016/j.net.2024.04.033>
- [13] 王琪, 王晶, 王金凯, 等. “华龙一号”全范围三级概率安全分析的实践[J]. 核科学与工程, 2024, 44(6): 1403-1409.
- [14] 王梦溪, 刘新建, 蔺洪涛, 等. 华龙一号公众辐射风险评价[J]. 辐射防护, 2024, 44(4): 374-382.
- [15] 中华人民共和国核安全法[Z]. 2017-09-01.