

doi: 10.7690/bgzdh.2024.05.011

放射性核素大气扩散模型研究综述

叶镛溪, 牛德青, 李林珊, 侯鑫

(中国兵器装备集团自动化研究所有限公司智能测控事业部, 四川 绵阳 621000)

摘要: 为提高放射性核素大气扩散的预测准确性, 探讨传统模拟模型和人工智能技术在核安全与环境保护方面的应用。研究考察高斯、欧拉、拉格朗日等传统模型在不同情境下的有效性, 以及人工智能(特别是神经网络)在快速准确反演核事故源项信息中的角色。结果表明: 该研究为核事故应急管理和环境监测提供关键支持, 并对提升核安全和环境保护策略具有较为重要的意义。

关键词: 核素扩散; 欧拉模型; 高斯烟羽模型; 拉格朗日模型; 人工智能

中图分类号: TP18; TM623 **文献标志码:** A

Review of Atmospheric Dispersion Models for Radioactive Nuclides

Ye Rongxi, Niu Deqing, Li Linshan, Hou Xin

(Department of Intelligent Measurement and Control, Automation Research Institute Co., Ltd. of
China South Industries Group Corporation, Mianyang 621000, China)

Abstract: In order to improve the prediction accuracy of atmospheric diffusion of radionuclides, the application of traditional simulation model and artificial intelligence technology in nuclear safety and environmental protection is discussed. This paper examines the effectiveness of traditional models such as Gaussian, Eulerian and Lagrangian models in different scenarios, and the role of artificial intelligence (especially neural networks) in the rapid and accurate retrieval of nuclear accident source term information. The results show that the study provides key support for nuclear accident emergency management and environmental monitoring, and is of great significance for improving nuclear safety and environmental protection strategies.

Keywords: nuclide diffusion; Eulerian model; Gaussian plume model; Lagrangian model; artificial intelligence

0 引言

在放射性核素大气扩散研究中, 准确预测核素在环境中的扩散对核安全和环境保护至关重要。随着科技发展, 多种模拟模型和软件被开发以提高预测准确性。传统模型如高斯、欧拉和拉格朗日模型, 以及人工智能技术如机器学习和深度学习, 都被应用于这一领域, 各自在不同情境下提供支持。笔者对这些技术进行了综合评估和比较, 目的是深化对它们在核素扩散预测中作用与潜力的理解, 为未来研究与应用指明方向。

1 传统模拟模型研究现状

传统模型主要基于扩散方程^[1]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\mathbf{v} \cdot \text{grad}C + \text{div}(\mathbf{K} \cdot \text{grad}C) + Q + \varepsilon. \quad (1)$$

式中: C 为浓度场; t 为时间; \mathbf{v} 为风场向量; \mathbf{K} 为湍流扩散矩阵; Q 为时间 t 污染源释放的物质质量; ε 为沉积与衰变的物质质量变化。

湍流扩散方程描述了污染物根据天气传输与扩散的现象, 而方程的初始条件与边界条件分别包含

了源信息和地形信息。该方程通常使用解析法、数值法或随机方式求解。基于这 3 种求解法, 又分别产生了高斯烟羽模型、欧拉网格模型和拉格朗日粒子模型。

1.1 高斯烟羽模型

在局部尺度(1~10 km)上, 气象场通常被视作时空均匀, 使相关的扩散方程可以简化并解析求解。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = v_x \frac{\partial C}{\partial x} + v_y \frac{\partial C}{\partial y} + v_z \frac{\partial C}{\partial z} + K_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + Q + \varepsilon. \quad (2)$$

式中 v_x 、 v_y 、 v_z 均为常数, 方程求解后可以得到一个遵循正态分布的浓度场。

高斯扩散模型通过横向和垂直湍流强度参数来定义污染物的分布形态, 其中横向湍流增强导致地面浓度峰值降低且影响区域扩大, 垂直湍流增强则可能提高或降低地面浓度, 依据其混合或稀释作用。这些参数通常基于稳定性类别的经验估算, 复杂方法还会考虑行星边界层特性, 如混合层深度等^[1]。

高斯模型的优势在于其快速处理能力和低数据需求,允许在缺少详细气象数据的情况下运行,但在较大空间尺度或复杂环境中的准确性有限。

1.2 欧拉网格模型

欧拉网格模型将研究区域细分为 3 维网格系统,模拟大气污染物扩散。在此模型中,假设每个网格单元的污染物浓度均匀,并用二阶偏微分方程描述其时空变化,考虑到风速和湍流变异,通过数值方法如线法进行求解,将方程简化为常微分方程求解数值解。

使用欧拉模型时,需先划分网格并收集污染、地形、气象数据作为模型输入。模型通过迭代计算展现污染物随时间的动态变化,实现了污染物空间分布和时间变化的精确模拟,为大气污染研究和管理提供强有力的分析工具。

1.3 拉格朗日模型

拉格朗日模型通过追踪粒子在空间和时间上的运动,详细模拟污染物的动态扩散。它依据粒子在 3 维空间的分布描述污染分布,其中粒子的变化由局部风速和湍流随机运动影响。通过在网格上计算粒子总质量或活度,可精确构建浓度场,同时模型能独立计算每个粒子轨迹上的质量或活度变化,如沉积、衰变或化学变化。

拉格朗日模型特别适用于复杂环境和小尺度的精细模拟,虽计算要求高,但适应性强。相比之下,高斯模型适用于简单条件下的短距离预测,而欧拉模型更适合大尺度、长期的模拟,要求数据和边界条件的高精度。

2 模拟软件开发与应用现状

为满足实际科研和应用需求,基于高斯模型、欧拉模型和拉格朗日模型的多种大气扩散模拟软件得到了开发和广泛使用。

高斯模型的关键软件 AERMOD^[2]和 ADMS^[3]分别由美国气象学会与环保署和 Sigma Research Corporation 开发,用于评估城市与工业区的污染物浓度。AERMOD 关注于复杂地形下的污染扩散,ADMS 则针对变化的气象和地形提供灵活模拟,两者都支持包括放射性核素在内的多污染源。Ghaemi 等^[4]使用 AERMOD 模拟布什尔核电站事故时放射性物质的扩散,考察风速风向和地形的影响,结合 CONTAIN 代码,提升了对事故影响的精准评估。

基于欧拉模型的主要软件如 CMAQ^[5]、

WRF-Chem^[6]、CAMS^[7]和 MATCH^[8]等,分别应用于大气污染物的模拟和预测。CMAQ 由美国环保署开发,专门模拟空气污染物的扩散、化学转化、沉降和消散,覆盖区域到城市尺度。WRF-Chem 融合气象和大气化学模块,适用于研究气象对空气质量的影响。Tang 等^[6]利用 WRF-Chem 模拟福岛核事故期间 I-131 的大气扩散,验证了模型的准确性。CAMS 集成了卫星和地面数据,提供全球或区域放射性核素扩散路径和浓度的实时监测。MATCH 由英国气象局开发,利用气候和环境数据模拟核素在不同条件下的扩散,Kovalets 等^[8]利用 MATCH 评估福岛事故后 Cs-137 的远程扩散,显示了与实测数据相符的预测结果。

拉格朗日模型软件如 CALPUFF^[9]、FLEXPART^[10]、HYSPLIT^[11]、NAME^[12]和 WSPEEDI^[13]等。CALPUFF,支持由 Sigma Research Corporation 开发并得到 USEPA 支持,适用于超过 50 km 长距离污染物传输,能有效处理静小风和复杂地形影响。Huang 等^[14]使用 CALPUFF 模型分析了海上浮动核电站事故后 I-131 的扩散情况,突出了风向和风速在放射性核素扩散中的重要性。FLEXPART 则侧重于追踪大气中污染物的长程和中程输送、扩散及沉降。Nabivi 等^[10]探讨了假想核事故放射性核素在特定区域的分布,强调气象条件、排放时间和粒子特性对模拟结果的影响。HYSPLIT 则用于紧急情况下的污染物释放评估,结合多数据源模拟污染物轨迹,Pirouzmand 等^[15]利用 HYSPLIT 评估核电站事故放射性物质浓度,证明了模型在实时应急响应中的应用价值。NAME 模型,由英国气象局开发,结合拉格朗日和欧拉模型优势,适用于各种规模的大气扩散模拟。Leadbetter 等^[12]通过比较不同气象数据和湿润清除系数对 2011 年福岛铯-137 沉积预测的影响,强调了数据选择对模型准确性的重要性。WSPEEDI 模型专为核事故应急响应设计,能快速预测放射性物质的大气扩散路径和浓度。Hidaka 等^[16]利用 WSPEEDI 评估福岛事故后期 I-131 和 Cs-137 的释放率,并通过环境监测数据分析放射性核素比率,以深入理解事故期间的核素行为。

上述模型为大气污染物扩散预测提供了广泛选择。选择合适模型需考虑研究需求、空间尺度、模拟精度和计算复杂度,以达到最佳的分析预测效果。

3 人工智能预测模型研究现状

近年来,人工智能技术在大气扩散预测领域显

示了巨大潜力。Pereira 等^[17]研究利用人工神经网络 (artificial neural network, ANN) 等先进技术预测核电站事故放射性物质释放后的辐射剂量, 证明了核事故下剂量预测模型的有效性, 并成功将模型集成到移动应用中提供现场决策支持。Desterro 等^[18]通过使用基于 GPU 的深度循环神经网络, 解决了 ANN 处理大规模数据集的挑战, 实现了快速准确的事故场景模拟。Yue 等^[19]结合遗传算法和模拟退火优化的神经网络, 在短期监测数据上预测排放类别, 展示了即使在数据不完整的情况下也能保持高准确率。Ling 等^[20]采用 TCN 和 2D-CNN 结合的模型进行多核素源项反演, 并使用粒子群算法优化, 实现了源项的高精度反演。

以上研究表明, 神经网络方法比传统研究在获取相同信息的情况下, 能够更有效且迅速地反演核事故的源项信息, 显著提高了核事故应急管理和环境监测的效率和准确性。

4 结束语

在放射性核素大气扩散研究中, 传统模拟模型与人工智能模型各具优势。传统模型凭借其在多样化场景下的广泛应用, 为模拟和预测提供了可靠保障, 而神经网络则在快速处理短期监测数据和提供紧急分析方面表现优异。未来研究应融合这 2 种技术, 提升模型在复杂环境下的鲁棒性和准确性, 优化处理效率, 有效应对核事故应急与环境监测挑战, 增强核与环境安全。

参考文献:

- [1] KOZHEVNIKOVA M F, LEVENETS V V. Modeling the Distribution of Radionuclides in the Air and on the Soil Surface[J]. East European Journal of Physics, 2023(2): 191-200.
- [2] CIMORELLI A J, PERRY S G, VENKATRAM A, et al. AERMOD: A Dispersion Model for Industrial Source Applications. Part I: General Model Formulation and Boundary Layer Characterization[J]. Journal of Applied Meteorology, 2005, 44(5): 682-693.
- [3] CARRUTHERS D J, HOLROYD R J, HUNT J C R, et al. UK-ADMS: A new approach to modelling dispersion in the earth's atmospheric boundary layer[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1994, 52: 139-153.
- [4] GHAEMI F S, AGHAIE M, MINUCHEHR A, et al. Evaluation of atmospheric dispersion of radioactive materials in a severe accident of the BNPP based on Gaussian model[J]. Progress in Nuclear Energy, 2019, 113: 114-127.
- [5] BINKOWSKI F S, ROSELLE S J. Models - 3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) model aerosol component 1. Model description[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2003, 108(D6): 4183.
- [6] TANG Z, CAI J, LI Q, et al. The regional scale atmospheric dispersion of radionuclide 131I: A simulation method based on WRF-Chemmodel[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2019, 156: 81-93.
- [7] INNESS A, ADES M, AGUSTÍ-PANAREDA A, et al. The CAMS reanalysis of atmospheric composition[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, 19(6): 3515-3556.
- [8] KOVALETS I V, ROBERTSON L, PERSSON C, et al. Calculation of the far range atmospheric transport of radionuclides after the Fukushima accident with the atmospheric dispersion model MATCH of the JRODOS system[J]. International Journal of Environment and Pollution 15, 2014, 54(2-4): 101-109.
- [9] 伯鑫, 丁峰, 徐鹤, 等. 大气扩散 CALPUFF 模型技术综述[J]. 环境监测管理与技术, 2009(3): 9-13.
- [10] NABAVI S O, CHRISTOUDIAS T, PROESTOS Y, et al. Spatiotemporal variation of radionuclide dispersion from nuclear power plant accidents using FLEXPART mini-ensemble modeling[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2023, 23(13): 7719-7739.
- [11] ROLPH G D, NGAN F, DRAXLER R R. Modeling the fallout from stabilized nuclear clouds using the HYSPLIT atmospheric dispersion model[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2014, 136: 41-55.
- [12] LEADBETTER S J, HORT M C, JONES A R, et al. Sensitivity of the modelled deposition of Caesium-137 from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant to the wet deposition parameterisation in NAME[J]. Journal of environmental radioactivity, 2015, 139: 200-211.
- [13] TERADA H, FURUNO A, CHINO M. Improvement of Worldwide Version of System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information(WSPEDI), (I)[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2004, 41(5): 632-640.
- [14] HUANG Y, SONG X, ZOU S, et al. Study on the Atmospheric Diffusion of Airborne Radionuclide under LOCA of Offshore Floating Nuclear Power Plants Based on CALPUFF[J]. Sustainability, 2023, 15(3): 2572.
- [15] PIROUZMAND A, KOWSAR Z, DEGHANI P. Atmospheric dispersion assessment of radioactive materials during severe accident conditions for Bushehr nuclear power plant using HYSPLIT code[J]. Progress in Nuclear Energy, 2018, 108: 169-178.
- [16] HIDAKA A, YOKOYAMA H. Examination of 131I and 137Cs releases during late phase of Fukushima Daiichi NPP accident by using 131I/137Cs ratio of source terms evaluated reversely by WSPEDI code with environmental monitoring data[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2017, 54(8): 819-829.