

辐射监测数据驱动的风险识别模型体系与环评决策支持方法

徐玲

南京泰坤环境检测有限公司，中国·江苏 南京 210000

摘要：随着核技术在能源、工业与医疗等领域的广泛应用，辐射环境的动态监管需求持续增长。为应对辐射类环评中对数据精度与响应效率的双重要求，本文构建了以长期监测数据为基础的三类核心评估模型：区域本底值定量提取模型、施工扰动动态识别模型与敏感目标年剂量预测模型，分别对应辐射背景识别、工程扰动追踪与人群暴露量化等关键环节。模型设计融合空间差值、时序分析与修正因子等方法，提取剂量趋势斜率、扰动强度阈值与剂量超限概率等核心指标。结果输出包括等剂量分布图、风险警示图谱与目标剂量排序清单，能够支撑对风险等级动态判定、控制措施降效验证及项目可行性量化分析的全过程闭环评估。研究构建的模型体系为提升辐射类项目环境影响评价的定量化、智能化与响应性管理水平提供了技术路径。

关键词：辐射监测；环境影响评价；本底值；风险判定

A Risk Identification Model System Driven by Radiation Monitoring Data and Environmental Impact Assessment Decision Support Method

Xu Ling

Nanjing Taikun Environmental Testing Co., Ltd. China Jiangsu Nanjing 210000

Abstract: With the extensive application of nuclear technology in energy, industry, and healthcare, the demand for dynamic supervision of radiation environments has been continuously increasing. To address the dual requirements of data accuracy and response efficiency in radiation-related environmental impact assessments (EIAs), this paper constructs three core assessment models based on long-term monitoring data: a quantitative extraction model for regional background values, a dynamic identification model for construction disturbances, and an annual dose prediction model for sensitive targets. These models correspond to key aspects such as radiation background identification, engineering disturbance tracking, and quantification of human exposure. The model design integrates methods such as spatial interpolation, time series analysis, and correction factors to extract core indicators such as dose trend slopes, disturbance intensity thresholds, and dose exceedance probabilities. The output results include isodose distribution maps, risk warning maps, and target dose ranking lists, which can support the entire closed-loop assessment process, including dynamic risk level determination, validation of control measure effectiveness, and quantitative analysis of project feasibility. The model system developed in this study provides a technical path for enhancing the quantitative, intelligent, and responsive management level of radiation-related project EIAs.

Keywords: Radiation monitoring; Environmental impact assessment; Background value; Risk determination

0 引言

随着核设施运行密度提升以及辐射技术在工业、能源与医疗等领域的持续渗透，环境影响评价中对辐射监测数据的依赖逐渐增强，尤其在评估建设活动扰动强度与公众暴露风险时，数据支撑的重要性日益突出。现阶段评估实践中仍普遍存在本底扰动难以界定、监测数据缺乏连续性与动态响应能力不足等问题，限制了风险识别的精度与时效性。国外研究如 DOE-RAPID 项目与 EURDEP 平台提

出以多源长期数据库构建辐射趋势反演机制，为评估建模提供新思路，而我国在动态监测模型构建与应用集成方面尚处于探索阶段。针对这一差距，本文提出构建基于时空特征识别的本底提取模型、施工期扰动动态判别模型与敏感目标年剂量预测模型，整合空间插值、时序分析与修正因子建模方法，解决当前监测数据利用率不高、模型体系割裂、指标缺乏统一标准等技术瓶颈，推动环评评价体系由定性描述向定量决策转型，为提升辐射类建设项目环境

管理的智能化与精细化水平提供路径支持。

1 辐射环境长期监测数据特征分析

1.1 辐射监测点位的空间布设策略

辐射环境长期监测点的布设需结合项目区域内外的地形地貌、主导风向、地表功能与敏感目标分布进行系统设计^[1]。常规布点以源项为中心,按照 1km、3km、5km 等半径构建同心监测圈,布设方向覆盖主导风向、次风向与背风区,综合考虑风力频率形成空间代表性系数。复杂地形区域优先选取低洼区、谷口、局部收缩断面等可能形成放射性富集的微地貌单元。为评估点位布设完整性与合理性,引入监测点密度指数(单位面积内有效布点数),用于量化监测网络覆盖水平。在人群聚集区如学校、医院、居民区,应于下风侧布设多重冗余点,增强区域响应能力。所有监测点需满足供电、通信、防护等运行条件,以保障数据时效性与横向可比性。

1.2 数据时序分布特性

长期监测数据在日变化尺度上呈现出与光照强度耦合的 γ 剂量率波动特征,主要受宇宙射线入射强度与电离层变化影响^[2]。季节尺度上,降雪反射、地表屏蔽与风力扰动构成主要影响因子,不同季节数据表现出明显波动差异。为揭示数据中的周期成分与异常变化趋势,采用快速傅里叶变换(FFT)与经验模态分解(EMD)等周期性分析方法,对日均值序列进行频域特征提取。在年尺度分析中,引入拟合优度指标(如 R^2 与 RMSE)评估趋势模型性能,并构建异常点识别机制,以 2σ 波动区间判定短期突变现象。

2 多源监测数据支撑下的辐射干扰识别机制

2.1 区域辐射本底值建模

区域辐射本底值模型采用分区-加权-拟合三步法。首先基于 DEM 高程数据、土地利用数据与风频风向矩阵对监测区进行空间分区^[3]。各分区内采用三年以上的监测历史数据,剔除超过 1.96σ 的异常点后进行归一化处理,选取中位数为代表值,构建各分区剂量分布函数。

年尺度本底值的确定使用滑动窗口加权方法对监测数据进行平滑处理,权重系数按数据时间距离倒数设定。各时序点分别计算平滑值后,生成年剂量趋势曲线,并结合 95% 置信区间提取稳定区域作为基础背景区间。

空间插值采用克里金法,半变异函数拟合模型选择高斯函数模型,模型残差要求均值趋近于零且标准差控制在 10% 以内。插值结果用于构建等剂量分布图,作为工程影响扩散边界判断依据。模型中加入区域干扰因子权重调节项,针对邻近工业设施、历史医疗站点、矿冶区等引入人

工背景参数扰动校正系数 δ ,修正原始拟合函数:

$$D_{adj}(x,y)=D_{interp}+\delta(x,y)$$

其中 D_{adj} 为校正后剂量值, D_{interp} 为插值函数值, δ 由场址调查中获得的人为背景干预程度定量评价得出。

2.2 施工期辐射扰动识别模型

施工阶段对地表和浅层结构的扰动易引发局部 γ 剂量率的非正常波动,若缺乏科学识别机制,难以区分环境自然变异与人为施工影响^[4]。为提高识别的准确性与灵敏性,模型基于长期背景数据构建动态扰动判定方法,引入阈值自适应机制,依据本底波动特征调整识别门限,避免固定阈值带来的误判风险。针对施工过程中扰动持续时间不一的特点,构建扰动响应曲线,对波动强度与持续性进行综合评估,并识别出干预期内的关键变化窗口。

在算法选择上,模型集成鲁棒滑动窗口处理方式用于平滑噪声干扰,提高数据稳定性;同时引入断点检测算法(如 BOCPD)识别时间序列中结构性突变信号,实现对扰动事件的实时跟踪。模型输出包括扰动强度趋势图、预警时段与施工日志的对应关系表,可有效支持布点策略优化、高风险作业限制与扰动半径动态调整等管理措施。该模型具备良好的工程适配性,既可服务于建设期动态监控,也可用于运维阶段的异常回溯与风险演化分析。

2.3 敏感目标暴露剂量预测模型

敏感目标年剂量预测采用暴露剂量核算模型。模型核心结构为:

$$E=R \times T \times F_s$$

其中为年有效剂量(mSv),为 γ 剂量率($\mu Sv/h$),为年暴露时间(h),为修正系数,包含风频影响、建筑遮挡效应与活动路径折减。剂量率 R 由对应监测点年平均值提供,暴露时间 T 基于特定人群日常活动调查数据设定^[5]。修正系数表达式为:

$$F_s=(1-\alpha W_f)(1-\beta S_b)$$

其中 W_f 为主风向占比, S_b 为遮挡系数, α , β 为经验参数。模型校验采用蒙特卡洛方法,对参数区间随机取值进行剂量结果不确定性分析,提取 P95 剂量用于风险等级评估。输出结果包括敏感目标剂量排序表、超限概率图与剂量热力图三项内容。对年剂量大于 $0.5 mSv$ 目标点,模型自动提出布点优化建议及滚动复测周期设定。

3 评估模型在辐射类环评结论形成中的应用机制

3.1 长期数据对辐射风险等级判定的支撑

辐射风险等级的科学判定依赖于对 γ 剂量率时间序

列变化趋势的长期监测与定量解析。通过构建月尺度的剂量序列，结合滑动平均滤波与变异强度分析，可有效剔除短时噪声并提取趋势斜率，用于表征区域暴露水平的演变速度^[6]。判定机制中引入动态阈值回溯机制，基于历史波动上下限实时调整识别区间，提高对缓变风险的响应能力。当监测点持续偏离本底稳定区间，且呈递增趋势时，模型将其标记为潜在风险增长区域，启动超阈趋势跟踪与风险等级预判模块。

在剂量总量维度上，采用日累积法估算年暴露剂量，并与 ICRP 推荐值对比，识别区域超标趋势。对出现季节性波动的点位，结合风频、气温、降水等多因子数据建模，辨析自然富集与工程扰动之间的差异。为提升预测性能，模型可拓展集成基于 LSTM 的神经网络趋势拟合算法，挖掘复杂非线性变化中的长期风险演化特征。该方法在未来研究中有望应用于区域辐射动态预警系统的构建，实现从静态判定向智能预测的转型。

3.2 数据结果对控制措施有效性的验证

控制措施在实际应用中的辐射抑制效果需依托长期监测数据进行定量验证，重点关注防护介入前后在相同环境条件下的剂量变化趋势。针对典型监测点，采用时间配对的对照分析方式，构建差值序列并引入干扰因子剔除算法，过滤风速、降雨、电离背景等非人为因素影响，确保对比结果仅反映控制措施实际效应。在差异显著性判断方面，采用配对样本 t 检验或 Mann-Whitney U 检验方法评估防护前后数据分布变化，增强统计判断的稳健性。

屏蔽类控制手段的长期性能需结合屏蔽材料老化曲线拟合进行趋势跟踪，通过对关键结构节点的剂量响应变化拟合退化函数，分析其防护能力随时间的下降幅度与速率。对于措施介入后的响应滞后现象，引入防护方案响应延迟时间统计指标，用于识别介入与显效之间的时间间隔，优化未来实施节奏与干预窗口。模型还可辅助识别因材料老化、封闭失效或人为误操作引发的措施失效区段，定位风险时点，为环评结论中的防护措施可靠性预估与维保周期设置提供数据依据。

3.3 历史数据对项目可行性结论的贡献

历史数据的可行性分析依赖于对不同类型项目在不同时段下辐射剂量水平变化的归纳与量化统计，尤其是在施工高强度作业期与运行稳定期的剂量差值特征上，体现出工程扰动强度、防护结构成效与放射性物质迁移规律的综合响应^[7]。项目背景值与运行期稳定值之间的差距大小直接关联于场地选址、屏蔽设计与运维管理水平的匹配程度。对典型项目的年剂量变化轨迹进行同尺度量纲整理，有助于在新项目可行性论证中提供基准比对模型，用以评估未来剂量变化区间是否具备预控能力。以下表 1 选取多个典型行业项目，基于连续监测成果，构建建设期与运行期各阶段年剂量水平统计数据集，以支撑不同项目在不同场景下可接受性边界判定的技术分析。

不同行业辐射类项目在建设期存在剂量值大幅升高现象，升幅与放射性物质种类、施工工艺及设备运转密度有关。在运行期，经过防护措施调控后剂量值趋于稳定，整体高于区域背景值但不超出公共剂量限值标准。医疗放射中心在建设初期剂量波动小，说明其屏蔽结构施工较早形成；铀矿冶项目则在建设中后期峰值远高于其他项目，反映出原料处理或尾渣干扰暴露明显。放射源存储库运行期仍存在较高稳态剂量，需评估储存密闭性与防护材料有效寿命。历史数据中不同项目的剂量演变曲线与建设时序密切相关，可作为环评中预测本项目可能出现剂量峰值与波动阶段的重要参考输入，提升预测曲线的参数选取准确性与风险容差边界设定科学性。

4 结语

研究构建了基于长期辐射监测数据的本底提取模型、扰动识别模型与暴露剂量预测模型，并集成至环境影响评价技术流程中，提出了分区归一化一时序加权一空间插值的本底值量化方法，形成了以 Z 值波动判据为核心的施工期扰动动态识别机制，建立了修正因子驱动的敏感目标年剂量核算公式，模型结果应用于风险等级定量判定、控制措施效能验证及项目剂量演变轨迹比对分析，具备支撑环评结论空间分布划界、时间演变趋势推导与风险阈值响应

表1 不同行业辐射类项目典型年剂量变化对比表

项目类型	工程周期（年）	初始年剂量值 （mSv）	建设期峰值（mSv）	运行期稳定值 （mSv）	背景值（mSv）
医疗放射中心	3	0.24	0.82	0.38	0.22
铀矿冶厂区	5	0.35	1.6	0.75	0.3
工业探伤站点	2	0.2	0.41	0.21	0.19
放射源存储库	4	0.28	1.1	0.42	0.26

能力评估的技术价值,有助于提升辐射类建设项目环境管理的数据驱动能力与模型决策能力。

参考文献:

[1] 石军,刘佳波. 辐射环境监测在辐射环境影响评价中的应用研究[J]. 环境与生活,2024(06):85-87.

[2] 刘明海. 辐射环境监测在辐射环境影响评价中的应用探讨[J]. 皮革制作与环保科技,2023,4(07):58-59.

[3] 马维都. 辐射环境监测在辐射环境影响评价中的应用问题思考[J]. 皮革制作与环保科技,2023,4(05):173-174.

[4] 彭峰莉. 辐射环境监测在辐射环境影响评价中的应

用分析[J]. 环境与发展,2019,31(11):130-131.

[5] 刁春娜,弓泽业. 辐射环境影响评价中的辐射环境监测分析[J]. 环境与发展,2019,31(11):132-134.

[6] 潘斌全. 新农村建设中辐射环境影响评价中的辐射环境监测探讨[J]. 农民致富之友,2019(02):219.

[7] 卞兆娥,郑婷,刘东晓. 辐射环境监测在辐射环境影响评价中的应用探讨[J]. 科技风,2019(01):124-130.

作者简介:徐玲(1987-),女,汉族,江苏南京人,硕士研究生,环境工程专业,环境保护类中级工程师,研究方向:放射性职业病危害评价。