

湖南辐照中心 ^{60}Co 辐照装置辐射监测与预测分析

宋辉 张勇 郭峰 邓超 李文革

(湖南省农业科学院 湖南省核农学与航天育种研究所 长沙 410125)

摘要 开展辐射监测是保障核技术利用装置安全稳定可靠运行的重要手段。本研究对湖南辐照中心 ^{60}Co 辐照装置近 5 a 运行期间的工作场所、个人职业照射和贮源水井的辐射水平状况开展了监测与分析。结果表明: 各场所及人员接受的辐射水平远低于国家的规定限值, 贮源水井各项指标符合要求, 未出现放射性活度超标的情况。引入用灰色 GM(1,1) 预测模型以 5 a 历史辐射监测数据为基础开展预测分析, 结果显示, 未来 3 a 的辐射水平变化较为稳定, 且远低于规定限值, 不会对周边环境与人员身体造成辐射危害。

关键词 辐照装置, 辐射监测, 辐射水平, GM(1,1) 模型

中图分类号 TL75⁺2.2

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0080

引用该文:

宋辉, 张勇, 郭峰, 等. 湖南辐照中心 ^{60}Co 辐照装置辐射监测与预测分析[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2024, 42(1): 010602. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0080.

SONG Hui, ZHANG Yong, GUO Feng, *et al.* Radiation monitoring and prediction analysis of ^{60}Co irradiation device at the Hunan irradiation center[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2024, 42(1): 010602. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0080.



Radiation monitoring and prediction analysis of

^{60}Co irradiation device at the Hunan irradiation center

SONG Hui ZHANG Yong GUO Feng DENG Chao LI Wenge

(Hunan Institute of Nuclear Agricultural Science and Space Mutation Breeding,
Hunan Academy of Agricultural Sciences, Changsha 410125, China)

ABSTRACT Radiation monitoring is crucial to ensure safe, stable, and reliable operation of nuclear technology utilization equipment. The radiation levels at workplaces, in water storage wells, and due to individuals' occupational exposure during the operation of ^{60}Co irradiation equipment over the past five years at the Hunan irradiation center have been monitored and analyzed. The results reveal that the radiation levels received by personnel and at various sites are remarkably lower than the national limits. All the source water quality indexes meet the requirements, and the radioactivity does not exceed the standard limits. The grey GM(1,1) prediction model was introduced to perform the prediction analysis based on 5 years of historical radiation monitoring data. The results show negligible change in the radiation level over the next 3 years, and it is considerably below the prescribed limit; hence, no radiation harm to the surrounding environment and human health would be observed.

第一作者: 宋辉, 男, 1991 年出生, 2016 年于海军工程大学核科学与技术学院获硕士学位, 助理研究员, E-mail: song4530419@126.com

通信作者: 张勇, 助理研究员, E-mail: 445986393@qq.com

收稿日期: 初稿 2023-09-20; 修回 2023-11-30

First author: SONG Hui (male) was born in 1991, and obtained a master's degree from the School of Nuclear Science and Technology, Naval University of Engineering in 2016, assistant professor, Email: song4530419@126.com

Corresponding author: ZHANG Yong, assistant professor, E-mail: 445986393@qq.com

Received 20 September 2023; accepted 30 November 2023

KEYWORDS Irradiation facility, Radiation monitoring, Radiation level, GM(1,1) model

CLC TL75*2.2

大型⁶⁰Co辐照装置一般装有数千亿至数万亿Bq活度的放射源,作为核技术在工业上应用的一种大型装置,由于其内部含有放射性核素而具有一定的特殊性,辐射安全问题备受社会关注。一般的辐照装置主要由辐照室、控制室、升降源装置、人员货物通道、PLC控制系统及相应的安全连锁系统等构成。为了充分包容放射性危害,通过有效的迷宫屏蔽设计与冗余性的安全防御思想,可以确保装置运行期间大部分射线屏蔽在辐照室内,不会对环境与人体健康构成危害。⁶⁰Co放射源衰变过程会不断地释放出 γ 射线,利用射线与物质的相互作用产生的物理化学变化,可以广泛应用于食品的贮藏保鲜、医疗器械的灭菌消毒、材料的改性、辐射诱变育种等研究,具有重要的经济与社会价值。

对于核技术利用装置的辐射监测要求,国家现行法律法规、核安全导则、行业标准都有明确的规定,要求定期开展辐照装置工作场所、周边环境、贮源水井等辐射水平的监测;同时加强对放射性工作人员的安全与防护管理,定期开展个

人剂量监测及健康评估,以此来保障人员身体健康,保护公众,保护环境。以位于湖南辐照中心约 2.59×10^{16} Bq的大型⁶⁰Co辐照装置为研究对象,对近5 a的辐射状况水平数据开展监测统计,同时开展辐射变化的预测研究,以评估辐照装置的整体辐射水平及变化趋势,可为相关辐照装置的辐射监测与评价以及防护措施的采取提供借鉴。

1 辐射监测

辐射防护是 γ 射线装置安全应用的重要前提,辐射安全防护主要包括射线屏蔽设计与辐射防护监测^[1]。本研究主要对辐射监测的内容进行分析,由于辐照装置有别于一般的大型工业设施,为确保核与辐射的安全,需要建立相应的辐射监测措施,始终确保辐射水平处于可控且安全的状态。为此,制定了辐射监测计划如表1所示,按照定期监测的方式进行辐照装置周边辐射状况的评估,并将结果及时向监管部门报告,同时根据监测情况确定下一步的辐射防护措施。

表1 辐射监测计划
Table 1 Radiation monitoring program

监测项目 Monitoring items	监测点位 Monitoring quantities	监测频次 Monitoring frequency
工作场所 Work-place	47	每半年 Semiannual
贮源水井水质 Water quality of well	3	每半年 Semiannual
人员外照射 Personnel external exposure	佩戴监测 Wear monitoring	每季度 Quarter

1.1 工作场所辐射监测

开展辐射监测的主要目的是要确保工作场所及周围工作人员与公众的辐射安全,保证人员所受剂量不超过国家法规所规定的限值。对于工作场所的辐射监测主要对辐照装置运行期间环境中的 γ 辐射水平开展监测分析,为保证监测的全面性与数据的准确性,以辐照室为核心,环绕辐射监督区,对工作场所及周边布控了47个辐射监测点,涉及辐照室、迷宫、防护门、辐照大厅、控制台、会议室、办公室、维修房、水处理间等区域。监测点位示意图如图1~3所示。

γ 辐射剂量率的监测严格按照《 γ 射线和电子束辐照装置防护监测规范》^[2]、《环境 γ 辐射剂量率

测定规范》^[3]、《辐射环境监测技术规范》^[4]等国家标准规范的要求开展,主要采用FH40G型X- γ 闪烁体探测器按照每年2次的频率开展辐射监测。各监测点的监测结果需低于《 γ 射线和电子束辐照装置防护监测规范》规定的 γ 剂量率限值 $2.5 \mu\text{Sv/h}$ 。为了对比源处于工作位置与贮存位置两种情况下的辐射状况水平,对相同的点位进行剂量监测,结果如图4、5所示。由图4、5可知,降源、升源过程的不同测点辐射剂量监测结果表明,源从井下贮存位提升至工作位的过程,周围环境的 γ 辐射剂量率与降源时基本一致,工作场所的环境辐射水平满足《电离辐射防护与辐射源基本标准》^[5]规定的要求。

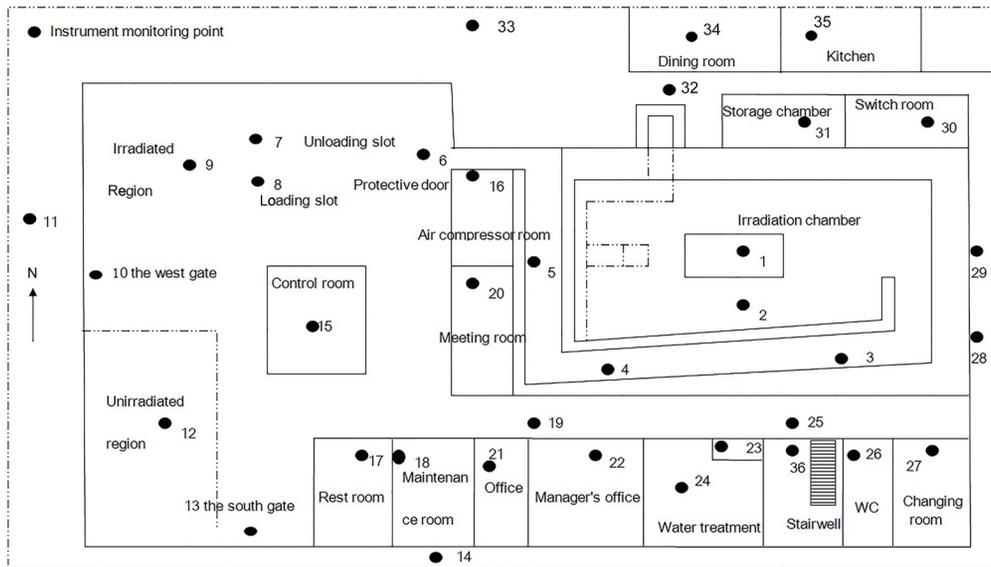


图1 辐照室外围辐射水平检测一层平面布点图

Fig.1 Irradiated outdoor circumferential radiation level detection first layer of plane layout map

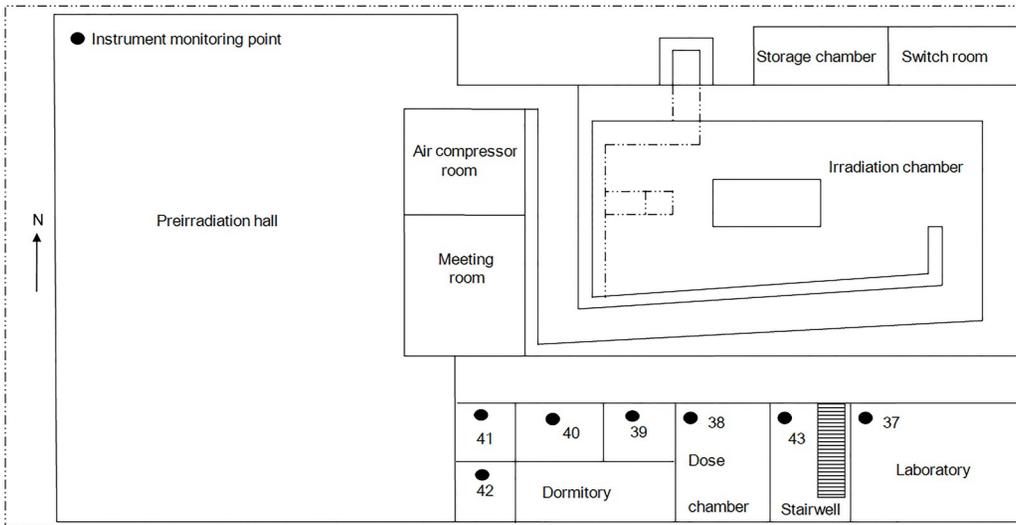


图2 辐照室外围辐射水平检测二层平面布点图

Fig.2 Irradiated outdoor circumferential radiation level detection second layer of plane layout map

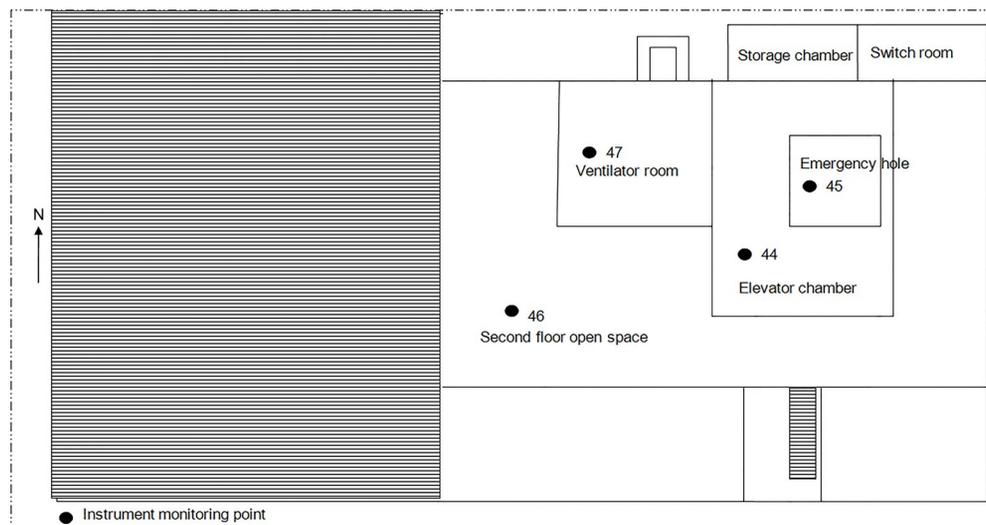


图3 辐照室外围辐射水平检测三层平面布点图

Fig.3 Irradiated outdoor circumferential radiation level detection third layer of plane layout map

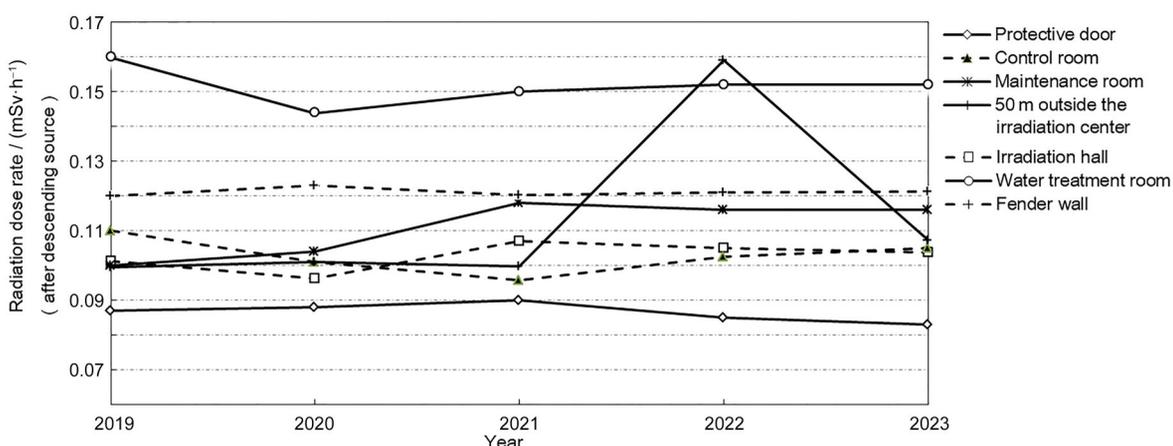


图4 降源后不同监测点的X-γ辐射剂量率
Fig.4 X-ray gamma radiation dose rate at different monitoring points after low-sourcing

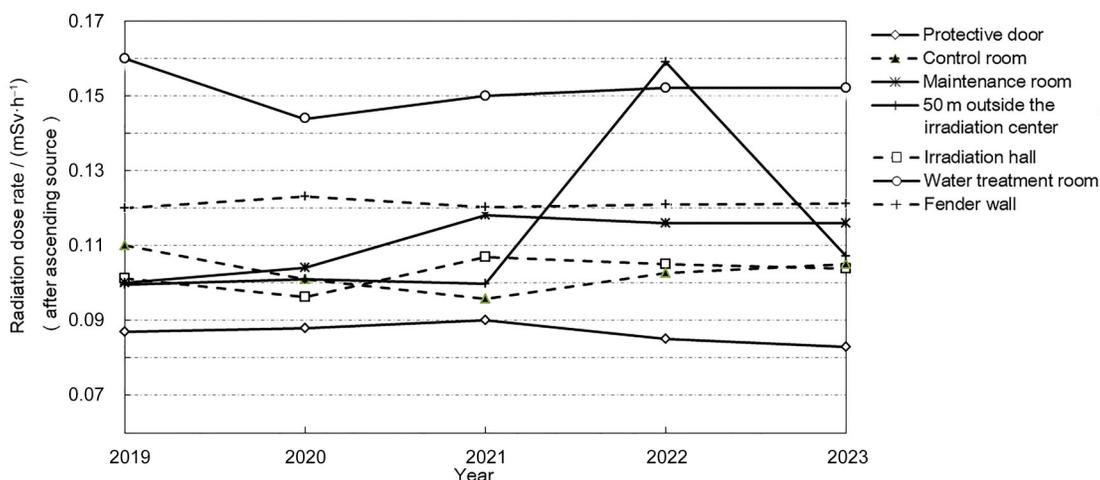


图5 升源后不同监测点的X-γ辐射剂量率
Fig.5 X-ray gamma radiation dose rate at different monitoring points after up-sourcing

1.2 个人剂量监测与健康管理

按照有关法律法规以及国家环境保护和职业卫生标准，对直接从事辐照生产加工的工作人员需定期开展个人剂量监测，并安排专人负责工作人员个人剂量的监测管理，对个人佩戴的热释光剂量仪计数进行统计，建立辐射工作人员个人剂量档案，并将辐射工作人员的剂量仪每季度进行送检。依据《职业性外照射个人监测规范》^[6]开展了工作人员个人外照射剂量监测，所有人员的剂量监测结果均低于国家规定的职业照射个人剂量限值。目前，辐照中心现有20名授权的辐射工作人员，每人均配发了个人热释光剂量仪，人员进入辐射控制区工作时必须在辐射服胸口口袋内佩戴该剂量计，不进入该区域无需佩戴，每季度收集个人剂量计进行累计受照剂量的统计，近5 a辐

射工作人员个人平均剂量及最值趋势如图6所示。由图6可知，辐射工作人员所受的剂量远低于职业工作人员5 mSv/a的限值要求。

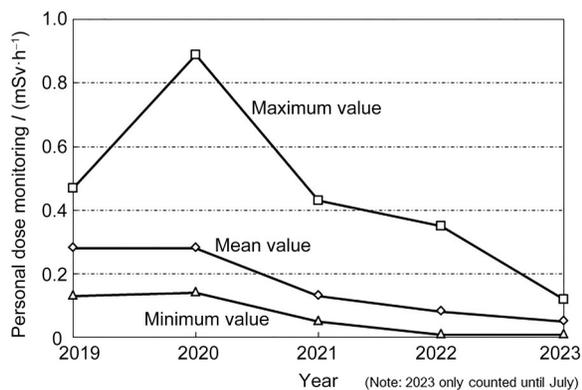


图6 辐射工作人员个人所受剂量变化趋势
Fig.6 Trends in individual doses received by radiation workers

职业健康检查不仅直接反映了放射性工作人员的身体健康状况，同时也是辐射防护效果评价与放射性职业病诊断的重要依据。为开展放射性工作人员的身体健康状况评估，每年安排1次放射性工作人员在岗职业健康检查，始终确保从事放射性工作的人员身体状况符合国家放射性工作人员健康标准的有关规定。

1.3 贮源水井监测

采用水样取样器对贮源水井中的水质情况进行评估，按照每半年1次的频度开展水样取样监测，分别从贮源水井1 m、3 m、5 m不同高度上进行取样监测。采用pH计、电导率仪、离子色谱、高纯锗 γ 能谱仪对水样中的pH、电导率、Cl⁻、 γ 活度项目进行监测，参照《水质pH值的测定-电极法》^[7]、《电导率的测定-电极法》^[8]、《水质无机阴离子的测定-离子色谱法》^[9]、《水中放射性核素的 γ 能谱分析法》^[10]中的分析方法。相关参数的监测结果如图7所示。由图7可知，每年各项监测参数变化波动较小，水质各项指标较为稳定。pH为6.0~6.9，低于限值5.5~8.5的要求范围；井水电导率处于4.9~7.9 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，低于限值1~10 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 的要求范围；Cl⁻的监测结果在0.08~0.25 mg/L，低于限值1 mg/L的要求范围；贮源水井 γ 活度数值低于探测器下限未检出，满足国家限值要求，同时也说明不存在源棒的破损情况。

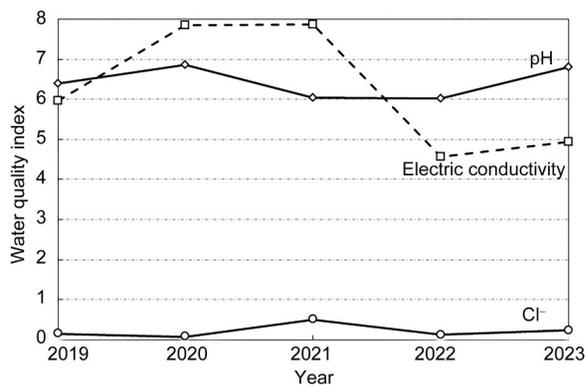


图7 贮源水井水质指标变化趋势
Fig.7 Variation trend of water quality index of source water well

2 灰色系统理论

2.1 灰色预测方法

灰色系统理论最早于1972年由华中科技大学

邓聚龙教授提出。灰色系统是指部分信息已知，部分信息未知的系统，主要用于系统在贫信息、少数据情况下的建模分析^[11]。该理论自创立以来，便得到了各领域相关专家学者的关注。该方法本身的诸多优势为相关问题的处理提供了极大的便利。该理论在已有信息的基础上，充分挖掘系统内部的不确定信息，可以在有限参考数据的基础上开展预测研究，能够取得良好的效果。灰色预测方法便是基于灰色系统理论所形成的一种建模手段，通过数学模型进一步对该理论进行定量分析。

对于辐照装置运行期间的环境辐射监测主要采用 γ 探测器进行数据的采集，由于尚未建立实时的环境辐射网络监测体系，因此无法获取较多的历史监测数据，目前仍主要采用人工携带便携式监测仪器的方式进行现场监测，同时数据易受环境干扰且存在一定的波动，具有典型的大系统、少样本特征，这种情况下对环境辐射变化趋势的预测采用传统的数学建模开展数据拟合存在一定困难，灰色系统理论为本问题的解决提供了一种有效的手段。针对目前获取的辐射监测数据有限，辐射水平监测结果易受本底、电磁环境干扰的影响而产生不确定性，在不考虑总源强变化的情况下，可利用灰色系统理论在少数据情况下的优势，通过采用灰色预测的方法开展数据的监测跟踪，提前了解辐射水平变化趋势；便于提前开展相关的环境辐射评估与防护工作。

2.2 灰色预测建模

灰色GM(1,1)模型是多变量高阶灰色模型GM(r, m)模型的特殊形式， r 表示方程的阶数， m 表示微分方程中变量的个数。由于这两个未知数的取值不同，便可得到多种形式的GM模型，当然，当 r, m 越大时，意味着阶数的增大和计算量的增加，一般在应用中将 r, m 取为1，只做短期范围内的预测分析^[12]。该模型的建模方法如下。

(1)对于待分析系统的原始数据序列见式(1)。

$$x^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)) \quad (1)$$

式中： $x^{(0)}(i) \geq 0, i = 1, 2, \dots, n$ ；对其进行一次累加运算，设得到的1-AGO序列为：

$$x^{(1)} = (x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n))$$

其中：

$$x^{(1)}(i) = \sum_{k=1}^i x^{(0)}(k), i = 1, 2, \dots, n$$

由此建立灰色微分方程:

$$x^{(0)}(i) + az^{(1)}(i) = b$$

其中:

$$z^{(1)}(i) = \frac{1}{2} (x^{(1)}(k) + x^{(1)}(k-1))$$

此微分方程即为 GM(1,1)模型的均值形式, 该方程的白化微分形式为:

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = b$$

以上所构造的模型为均值 GM(1,1)模型, 微分方程中 a 为发展系数, b 为灰作用量; 构造参数向量 $\hat{a} = [a, b]^T$, 运用最小二乘法估计可得到:

$$\hat{a} = (B^T B)^{-1} B^T Y$$

其中: B, Y 分别为:

$$B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix}$$

(2) 确定模型见式 (2)。

$$\hat{x}^{(1)}(i) = \left(x^{(0)}(1) - \frac{b}{a}\right) e^{-a(i-1)} + \frac{b}{a} \quad (2)$$

灰色预测研究即通过选取适当的建模维数以及预测步数, 按照新陈代谢原理建立灰色 GM(1,1) 预测模型, 以系统历史行为为依据, 对系统未来的行为趋势进行预测该方法建模容易, 计算简单。

(3) 残差检验见式 (3)、(4)。

$$\text{残差的计算: } \varepsilon = x^{(0)}(i) - \hat{x}^{(0)}(i) \quad (3)$$

$$\text{百分数偏差为: } e(i) = \frac{x^{(0)}(i) - \hat{x}^{(0)}(i)}{x^{(0)}(i)} \quad (4)$$

(4) 预测精度检验见式 (5)、(6)、(7)。

原始数据列方差:

$$s_1^2 = \frac{1}{n} \sum_1^n [x^{(0)}(k) - \bar{x}^{(0)}]^2 \quad (5)$$

其中: $\bar{x}^{(0)} = \frac{1}{n} \sum_1^n x^{(0)}(k)$

残差方差:

$$s_2^2 = \frac{1}{n-1} [\varepsilon^{(0)}(k) - \bar{\varepsilon}^{(0)}]^2 \quad (6)$$

$$\text{方差比: } C = \frac{s_2}{s_1}$$

小概率误差:

$$P = \{ p | \varepsilon^{(0)}(k) - \bar{\varepsilon}^{(0)} | < 0.645 S_{s_1} \} \quad (7)$$

模型精度的评判等级如表 2 所示。C、P 这两个参数是衡量预测是否准确的重要标准, 其中, 指标 C 越小越好, P 越大越好^[13]。

表 2 模型精度等级表
Table 2 Model accuracy grade table

模型精度等级 Model accuracy class	P	C
1级(好) Level 1 (good)	$0.95 \leq P$	$C \leq 0.35$
2级(合格) Level 2 (pass)	$0.80 \leq P < 0.95$	$0.35 < C \leq 0.50$
3级(勉强) Level 3 (barely)	$0.70 \leq P < 0.80$	$0.50 < C \leq 0.65$
4级(不合格) Level 4 (failed)	$P < 0.70$	$0.65 < C$

3 辐射水平预测分析

可靠的工作场所 γ 辐射监测是避免辐射事故发生的重要手段之一, 但若提前预判辐射水平的变化, 可以为事故的缓解争取时间^[14-16]。拟采用灰色 GM(1,1)模型对辐照装置运行期间的某测点环境辐射水平变化进行预测, 以近 5 a 的原始数据作为输入, 建立 GM(1,1)预测模型, 开展预测分析。拟以降源后的辐照大厅辐射水平为例开展分析。原始数据为(0.063, 0.073, 0.081, 0.083, 0.084), 经过 GM(1,1)模型计算得到预测方程见式 (8)。

$$\hat{x}^{(1)}(i) = 1.7168 e^{-0.0428i} - 1.6538 \quad (8)$$

根据前述公式可以计算出相应的预测值, 经过计算得到的预测数据及残差结果如表 3 所示。

根据表 3 统计的结果可知, 残差百分数最大为 3.7%, 经计算后的 C 值为 0.217, 小于 0.35, P=1, 模型的精度等级为 1 级, 说明预测效果较好, 精度满足要求。

基于上述的预测模型对未来 3 a 的辐照大厅的辐射水平走势进行预测, 2024 年、2025 年和 2026 年的辐射水平分别为 0.086 $\mu\text{Sv/h}$ 、0.093 $\mu\text{Sv/h}$ 和 0.095 $\mu\text{Sv/h}$ 。

历史数据与预测值的走势如图 8 所示。由图 8 可知, 历史值与预测值的走势基本一致, 在采取了水井屏障措施后, 辐照大厅的辐射剂量水平变化较为平稳, 维持在较低的安全水平, 辐照装置降源至贮存位置后不会对大厅的工作环境造成任何潜在危害, 不会对进入辐照大厅的人员身体健康构成伤害。

表3 GM(1,1)模型残差检验表
Table 3 Residual error test table of GM(1,1) model

序号 Serial number	实际值 Actual value	预测值 Predicted value	残差 Residual error	残差百分数 / % Residual percentage
$\hat{x}^{(0)}(2)$	0.073	0.075	0.002	-2.7
$\hat{x}^{(0)}(3)$	0.081	0.078	0.003	3.7
$\hat{x}^{(0)}(4)$	0.083	0.082	0.001	1.2
$\hat{x}^{(0)}(5)$	0.084	0.085	-0.001	-1.2

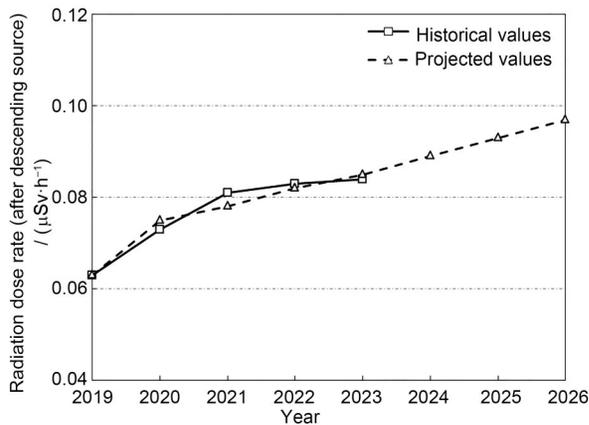


图8 实测值与预测值的走势图
Fig.8 Trend diagram of measured values and predicted values

4 结论

对近 5 a 来大型 ⁶⁰Co 辐照装置运行期间的辐射监测情况进行了统计分析，并基于灰色 GM(1,1) 模型开展了辐照大厅环境辐射的预测研究，预测结果精度较高，预测数据与历史数据相比变化不大，只有轻微波动。由于辐照装置运行过程采取了物理防护措施，因此所监测的辐射水平变化不大且远低于规定限值。本部分只是利用基本的 GM(1,1) 模型开展了辐射水平的预测分析，实际中在对规律性不强、波动性较大的参数指标进行预测分析时，可以对模型的灰色变量参数开展修正进行阶段性的预测评估，以获取较高的精度。提前开展辐射水平的预测评估可以用于辐射防护方案的设计，也可为类似大型辐照装置的辐射监测提供参考借鉴。

作者贡献声明 宋辉为主要执行人，完成了数据分析、论文初稿的写作；张勇、郭峰完成了辐射监测原始数据的收集与统计、绘图；邓超完成了灰色系统理论模型的建立；李文革指导综述的撰写与修改。全体作者都阅读并同意最终的文本。

参考文献

- 1 吴燕. γ 辐照装置的辐射安全防护设计[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2017.
WU Yan. Radiation safety protection design of γ irradiation device[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2017.
- 2 中华人民共和国卫生部. γ 射线和电子束辐照装置防护监测规范: GBZ141—2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
Ministry of Health of the People's Republic of China. Specifications for radiological protection test of γ -rays and electron irradiation facilities: GBZ141—2002[S]. Beijing: Standards Press of China, 2002.
- 3 中华人民共和国生态环境部. 环境 γ 辐射剂量率测量技术规范: HJ 1157—2021[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2021.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Technical specification for the measurement of environmental γ radiation dose rate: HJ1157—2021[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2021.
- 4 国家环境保护局. 辐射环境监测技术规范: HJ/T 61—2001[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2001.
State Environmental Protection Administration. Technical criteria for radiation environmental monitoring: HJ/T 61—2001[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2001.
- 5 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 电离辐射防护与辐射源安全基本标准: GB 18871—2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Basic standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources: GB 18871—2002[S]. Beijing: Standards Press of China, 2003.
- 6 中华人民共和国国家卫生健康委员会. 职业性外照射

- 个人监测规范: GBZ 128—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- National Health Commission of the People's Republic of China. Specifications for individual monitoring of occupational external exposure: GBZ 128—2019[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.
- 7 中华人民共和国生态环境部. 水质 pH 值的测定 电极法: HJ 1147—2020[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2021.
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Water quality—Determination of pH—Electrode method: HJ1147—2020[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2021.
- 8 中华人民共和国自然资源部. 地下水水质分析方法 第 6 部分: 电导率的测定 电极法: DZ/T 0064.6—2021[S]. 北京: 中国地质出版社, 2021.
- Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. Methods for analysis of groundwater quality—Part 6: Determination of conductivity—Electrode method: DZ/T 0064.6—2021[S]. Beijing: China Geology Press, 2021.
- 9 中华人民共和国环境保护部. 水质 无机阴离子(F^- 、 Cl^- 、 NO_2^- 、 Br^- 、 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 、 SO_3^{2-} 、 SO_4^{2-})的测定 离子色谱法: HJ 84—2016[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2016.
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Water quality—Determination of inorganic anions(F^- 、 Cl^- 、 NO_2^- 、 Br^- 、 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 、 SO_3^{2-} 、 SO_4^{2-})—Ion chromatography: HJ84—2016[S]. Beijing: China Geology Press, 2016.
- 10 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 水中放射性核素的 γ 能谱分析方法: GB/T 16140—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Determination of radionuclides in water by Gamma spectrometry: GB/T 16140—2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.
- 11 邓聚龙. 灰理论基础[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
- DENG Julong. Basis of grey theory[M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 2002.
- 12 傅立. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1992.
- FU Li. Theory and application of grey system[M]. Beijing: Scientific and Technical Documentation Press, 1992.
- 13 张永帅, 云梁, 方志刚, 等. 基于灰色理论的城市降尘环境污染预测模型[J]. 中国农学通报, 2009, 25(6): 241-243.
- ZHANG Yongshuai, YUN Liang, FANG Zhigang, *et al.* Forecasting models of city dustfall environmental pollution based on grey theory[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(6): 241-243.
- 14 谢卫平, 赵喜寰, 陈焱, 等. 核电厂 γ 周围剂量当量率监测质量控制方法探讨[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2022, 40(4): 040601. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2021-0016.
- XIE Weiping, ZHAO Xihuan, CHEN Hao, *et al.* Exploration of quality control methods for monitoring the dose equivalent rate roundy in nuclear power plant[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2022, 40(4): 040601. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2021-0016.
- 15 李成勋, 霍志鹏, 钟国强, 等. 磁约束聚变装置辐射监测系统概况[J]. 核技术, 2023, 46(2): 020001. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.020001.
- LI Chengxun, HUO Zhipeng, ZHONG Guoqiang, *et al.* Survey of radiation monitoring system for magnetic confinement fusion device[J]. Nuclear Techniques, 2023, 46(2): 020001. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.020001.
- 16 黄章玲, 任广益, 陈裕凯, 等. 合肥光源辐射监测动态发布系统的设计及应用[J]. 核技术, 2015, 38(5): 050104. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.050104.
- HUANG Zhangling, REN Guangyi, CHEN Yukai, *et al.* Design and application of HLS radiation monitoring dynamic release system[J]. Nuclear Techniques, 2015, 38(5): 050104. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.050104.