

# 中华人民共和国国家生态环境标准

HJ ××××-2023

## 固定式碘化钠 $\gamma$ 谱仪连续监测技术规范

Technical specification for continuous monitoring of fixed  
NaI (TI) Gamma spectrometer

(征求意见稿)

××××-××-××发布

××××-××-××实 施

生 态 环 境 部 发布

## 目 次

前 言.....	II
1 适用范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 测量系统.....	2
5 空气吸收剂量率测量.....	3
6 放射性核素测量.....	3
7 测量要求.....	4
8 数据报送.....	4
9 质量控制.....	5
附录 A 常用 $\gamma$ 放射性核素数据表.....	7
附录 B 天然核素的剥离.....	8
附录 C 碘化钠 $\gamma$ 能谱数据报送格式.....	10
参考文献.....	11

## 前 言

为贯彻《中华人民共和国环境保护法》和《中华人民共和国放射性污染防治法》，规范全国辐射环境空气自动监测站碘化钠谱仪数据获取和报送、运行维护和质量保证工作，制定本标准。

本标准规定了碘化钠 $\gamma$ 谱仪的组成和功能、运行维护、能谱数据分析、测量要求、数据报送、质量保证和资料归档等技术要求。

本标准由生态环境部核设施安全监管司、法规与标准司组织制订。

本标准起草单位：浙江省辐射环境监测站（生态环境部辐射环境监测技术中心）。

本标准生态环境部2023年 月 日批准。

本标准自 2024年 月 日起实施。

本标准由生态环境部负责解释。

# 固定式碘化钠 $\gamma$ 谱仪连续监测技术规范

## 1 适用范围

本标准规定了辐射环境空气自动监测站碘化钠 $\gamma$ 谱仪的组成和功能、运行维护、能谱数据分析、测量要求、数据报送、质量保证和资料归档等技术要求。

本标准适用于辐射环境质量监测和核设施周围空气自动监测站碘化钠谱仪的分析测量。

## 2 规范性引用文件

以下标准和规范所含条文，在本标准中被引用即构成本标准的条文，与本标准同效。凡是不注明日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

GB 8999 电离辐射监测质量保证通用要求

HJ 61 辐射环境监测技术规范

HJ 1009 辐射环境空气自动监测站运行技术规范

EJ/T 984 环境监测用X、 $\gamma$ 辐射测量仪——第一部分剂量率仪型

JJF 1687 用于探测与识别放射性核素的手持式辐射监测仪校准规范

JJG（军工）40 轻便窗式 $\gamma$ 能谱仪

IAEA-TECDOC-1363 利用伽玛射线光谱仪数据绘制放射性元素分布图的指南（Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data）

ISO 18589-7 环境放射性的测量-土壤-第7部分： $\gamma$ 核素的就地测量（Measurement of radioactivity in the environment-Soil-Part 7: In situ measurement of gamma-emitting radionuclides）

JAERI-1209 A New Method of Dose Evaluation by Spectrum-dose Conversion Operator and Determination of the Operator

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

### 3.1 碘化钠 $\gamma$ 谱仪 NaI（TI） gamma spectrometer

设备利用 $\gamma$ 射线与碘化钠晶体相互作用产生荧光，荧光在光电倍增管的光阴极上轰击出光电子，光电子的数量在光电倍增管内被放大后到达阳极，阳极收集这些电子后形成电流，再产生一定幅度的脉冲信号，最后通过多道脉冲幅度分析器转换成包含射线能量和强度信息的 $\gamma$ 能谱。

### 3.2 稳定性 stability

设备在运行期间工作的稳定状况，即碘化钠 $\gamma$ 谱仪保持其计量特性随时间恒定的能力；一般用计量特性变化到某个规定的量所经过的时间间隔表示，或用特性在规定时间间隔内发生的变化表示，包括能量-道址稳定性、计数响应稳定性等。

### 3.3 能量分辨力 energy resolution

对于某一给定的能量，能分辨的两个粒子能量之间的最小相对差值的量度。在规定的 $\gamma$ 射线全吸收峰最大值一半处以百分数或keV表示的整个宽度。

### 3.4 剥谱 spectral stripping

从混合核素 $\gamma$ 射线能谱全谱中先找出几种容易识别的已知核素，根据其谱形结构再从全谱中进行干扰计数扣除得到感兴趣目标核素 $\gamma$ 射线的能峰计数。

## 4 测量系统

### 4.1 组成

自动站碘化钠 $\gamma$ 谱仪测量系统一般由闪烁体探测器、光电倍增管（或硅光电倍增管（SiPM））、多道脉冲幅度分析器、高压电源及数据处理系统等构成。碘化钠探测器一般采用直径和高度相同的正圆柱结构，常用的晶体尺寸为 $\Phi 7.6\text{cm} \times 7.6\text{cm}$ ，可选配其他晶体或GM管作为高量程 $\gamma$ 辐射剂量率探头。测量系统宜选用低钾NaI（TI）晶体和低噪音光电倍增管。

### 4.2 功能

设备除给出空气吸收剂量率和核素识别测量结果外，特定条件下可计算地面沉积活度和空气放射性浓度。由于碘化钠探测器晶体受温度变化影响较大，因此碘化钠 $\gamma$ 谱仪还需具有稳谱的功能，可采用天然核素、人工源、LED、温漂曲线等自动稳谱。碘化钠 $\gamma$ 谱仪测量系统一般内置剂量率计算方法， $\gamma$ 核素识别采用寻找 $\gamma$ 射线特征峰是否存在或进行人工判断。

### 4.3 技术要求

4.3.1 温度 $-20^{\circ}\text{C} \sim 35^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度 $\leq 80\%$ 。

4.3.2 对 $^{137}\text{Cs}$ 的 $661.7\text{keV}$ 光子的能量分辨力小于 $8\%$ 。

- 4.3.3 使用 512 或 1024 道的多道电子学系统。
- 4.3.4 短期稳定性：以  $^{137}\text{Cs}$  点源间隔 24 小时测量，661.7 keV 全能峰中心道址漂移不超过 1.5%。或者天然环境下测量的  $^{40}\text{K}$  的能峰 1460.8keV 中心道址在 24 小时内漂移不超过 1%。
- 4.3.5 能量测量范围为 40keV~3000keV；设备在此能量范围内的响应与对  $^{137}\text{Cs}$  参考源辐射的响应差别不应超过 $\pm 30\%$ 。
- 4.3.6 全谱计数率 $<100\text{k cps}$ 时可正常测量。
- 4.3.7 设备自带软件核素库一般应包括附录 A 所列核素，标准试验条件下的核素识别正确率不低于 90%（参见 JJF 1687）。
- 4.3.8 测量 $\gamma$ 辐射空气吸收剂量率时，设备相对固有误差 $<15\%$ 。
- 4.3.9 安装好的设备应配有专用操作软件，软件应具有谱采集、自动寻峰、核素识别、参数设置等功能；输出数据格式中应包含N42、SPC或ASCII等格式，能谱原始数据应包含测量时间、仪器状态、温度、每道计数、剂量（率）等信息；可具备报警预警功能设置和远程控制等。

## 5 空气吸收剂量率测量

- 5.1 辐射空气自动监测站配置的碘化钠  $\gamma$  谱仪功能主要为空气吸收剂量率测量、核素识别和半定量计算。 $\gamma$ 辐射空气吸收剂量率测量值可由仪器内置算法进行转换计算，设备性能符合 EJ/T 984 中 5.2 节的要求。
- 5.2 当设备测量的 $\gamma$ 辐射空气吸收剂量率用于辐射水平评估时，需扣除宇宙射线响应值，宇宙射线响应测量方法参见标准 HJ 61。
- 5.3  $\gamma$ 辐射空气吸收剂量率测量值的最短更新速率一般应小于 1 分钟。
- 5.4  $\gamma$ 辐射空气吸收剂量率测量数据若采用全谱  $G(E)$ 函数法进行转换计算，可参考 JAERI-1209。

## 6 放射性核素测量

- 6.1 跟踪碘化钠 $\gamma$ 能谱感兴趣区计数率目的是为了监测 $\gamma$ 辐射水平的小幅升高，将碘化钠 $\gamma$ 射线能谱全谱分成若干个不同感兴趣区，每个感兴趣区应覆盖一种或多种关注核素的主要特征 $\gamma$ 射线能量峰，按设定的时间间隔计算各感兴趣区计数率的平均值和标准偏差。对于 $\gamma$ 能谱全谱的低能端第一个能区可用于低能放射源的稳谱或自校，所有能区覆盖了要监测的空气中绝大多数放射性核素的 $\gamma$ 射线能谱范围。

6.2 当监测数据出现异常时应及时报警并进行人工分析。报警阈值可设定为本底谱各感兴趣区计数率平均值加上其  $n$  倍标准偏差， $n$  一般取 3-5。在计算本底谱感兴趣区计数率平均值时，可剔除自然因素以外因素引起的异常数据，若发生点位变更或周围环境状况显著变化，应重新计算。报警阈值可按全时段设置，或按不同季节的降水时段和非降水时段分别设置。

6.3 人工分析时，由设备自带软件核验异常数据，判断样品谱是否存在明显异于本底谱的 $\gamma$ 射线能峰。无法判断时，选取测量条件相似的样品谱和本底谱，采用专业解谱软件，将归一化后的样品谱计数逐道减去本底谱计数，得到净样品谱，查看是否存在 $\gamma$ 射线能峰计数。也可按照附录 B 所述方法剥离天然核素的影响，提高核素识别灵敏度。

6.4 若设备自带软件自动识别到异常核素，可按上述步骤 6.1-6.3 进行分析。

6.5 当分析出可能存在异常核素时，应对辐射场可能存在的 $\gamma$ 核素种类进行判断，重点关注  $^{41}\text{Ar}$ 、 $^{60}\text{Co}$ 、 $^{131}\text{I}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{241}\text{Am}$  等人工核素。

## 7 测量要求

7.1 设备安装高度应与同站址高压电离室安装高度保持一致，一般探测器晶体几何中心距离基础面高度为 1 米。

7.2 正常监测情况下，样品谱的测量时间可设置为 15-30 分钟， $\gamma$ 辐射空气吸收剂量率测量值每 5 分钟更新一次；应急监测情况下，样品谱的测量时间可设置为 5-15 分钟， $\gamma$ 辐射空气吸收剂量率测量值至少每 30 秒更新一次。

7.3 本底谱各感兴趣区计数率的平均值和标准偏差可利用全年数据剔除异常结果后进行计算，也可区分降水时段和非降水时段分别计算，以提高分析精度。

7.4 样品谱测量时间与本底谱测量时间应保持一致或归一化处理，并保证二者无相对道漂（或经修正后）。

7.5 按设备所处工作场所或环境选取相应若干核素做为站点测量核素库。

## 8 数据报送

8.1 碘化钠 $\gamma$ 能谱一般按 11 个能区计算小时均值和标准偏差，可根据积累数据做趋势图分析。按设定的 1 小时时间间隔对各能区计数进行统计上报，全年小时数据获取率应达到 90%以上。

8.2 设备运行参数包括地理位置、刻度信息、气象条件和仪器高压等。上报的数据格式可参考

附录 C。

8.3 为防止数据丢失，测量的碘化钠 $\gamma$ 能谱数据应定期报送、备份并存档。

8.4 发生数据真实异常时进行预警并分析原因，同步启动同站址气溶胶样品采集并将样品送实验室分析。

## 9 质量控制

### 9.1 校准

9.1.1 碘化钠 $\gamma$ 谱仪应由具备资质的第三方权威计量机构进行校准，通常每 3 年校准一次，主要针对空气吸收剂量率校准因子、剥离系数等相关指标

9.1.2 碘化钠 $\gamma$ 谱仪可通过量值传递的方式开展自行校准，保证量值可追溯至国家计量基准。

9.1.3 原则上设备进行性能可能受到影响的重大维修后，碘化钠谱仪须重新校准。

9.1.4 设备首次使用前可用检验源检查稳定性、能量分辨力、核素识别正确率和能量响应等主要性能技术指标。

### 9.2 期间核查

#### 9.2.1 能量刻度

碘化钠 $\gamma$ 谱仪的能量刻度是仪器可以准确定性分析的前提，主要确定能量与道址的关系，刻度范围应从 40~3000keV 之间，选择从低能到高能均匀分布至少 4 个点的单能或多能核素刻度源，如  $^{241}\text{Am}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{60}\text{Co}$ 、 $^{152}\text{Eu}$  等，刻度时可保持源至探测器前表面中心的垂直距离为 5~25cm 或合适高度。调节系统增益，使  $^{137}\text{Cs}$  的 661.7 keV $\gamma$ 射线的全吸收峰峰位大约在多道分析器满量程的三分之一处。拟合关系式如式（1），能量非线性绝对值不宜超过 5%。

$$E = a_0 + a_1Ch^1 + a_2Ch^2 \quad (1)$$

式中：E — 全能峰对应的 $\gamma$ 射线能量，keV；

$a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$  — 拟合系数；

Ch — 道址。

在设备使用期间，可定期用天然核素如  $^{40}\text{K}$ (1460.8keV)、 $^{214}\text{Pb}$ (351.9keV)的 $\gamma$ 射线能峰检查峰位变化情况，当变化超过 1.5%时，考虑重新进行能量刻度。

9.2.2 检查仪器稳定性，每年至少一次对碘化钠谱仪使用  $^{241}\text{Am}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{60}\text{Co}$  等检验源进行识别分析，检查其主要性能技术指标是否满足 4.3 节中要求。



**9.2.3 能量分辨力：**每年至少一次用  $^{137}\text{Cs}$  检验源测量分辨力（661.7keV 全能峰的半高宽除以峰位），确认不低于能量分辨力出厂指标。

**9.2.4 其它性能指标**应与出厂时指标相当如稳定性、固有误差、重复性等，可参考 GB 8999 要求进行测试。

### **9.3 其它规定**

**9.3.1** 运行维护人员应按国家相关规定，经培训合格，持证上岗。

**9.3.2** 碘化钠 $\gamma$ 谱仪连续自动测量系统运行宜按照本单位质量管理体系运行要求编制相关的作业指导书和仪器设备操作规程，实施全过程质量管理。

**9.3.3** 碘化钠 $\gamma$ 谱仪正常监测时应按照 HJ 1009 的要求做好运维记录和仪器使用记录。

**9.3.4** 测量不确定度的评估可参考 ISO 18589-7 相关内容。

附录 A 常用 $\gamma$ 放射性核素数据表(资料性)  
常用 $\gamma$ 放射性核素数据表表 A.1 常用 $\gamma$ 放射性核素数据表

核素	能量 keV	发射几率%	附录 C 中感兴趣区序号	半衰期
$^{41}\text{Ar}$	1293.6	99.17	7	1.83h
$^{85}\text{Kr}$	514	0.43	4	10.73a
$^{131}\text{I}$	364.5	81.1	3	8.04 d
$^{133}\text{I}$	529.9	86.2	4	20.83h
$^{133}\text{Xe}$	81.0	36.1	1	5.25d
$^{192}\text{Ir}$	316.51	82.85	3	74.02d
	468.07	47.84	4	
$^{60}\text{Co}$	1173.2	99.87	7	5.27a
	1332.5	99.98	7	
$^{134}\text{Cs}$	604.7	97.6	5	2.062a
	795.8	85.4	5	
$^{137}\text{Cs}$	661.7	85.0	5	30.17a
$^{241}\text{Am}$	59.54	35.7	1	432.0a
$^{210}\text{Pb}$	46.5	4.05	1	22.3a
$^{234}\text{Th}$	63.29	3.81	1	24.1d (L*)
	92.38	2.72	1	
	92.80	2.60	1	
$^{235}\text{U}$	143.8	10.5	2	$7.038 \times 10^8 \text{a}$
	185.7	54	2	
$^{226}\text{Ra}$	186.2	3.2	2	1600a
$^{208}\text{Tl}$	583.14	86	4	3.053min (L)
	2614.5	99.79	10	
$^{212}\text{Pb}$	238.6	43.6	3	10.64h (L)
$^{228}\text{Ac}$	338.7	11.9	3	6.13h (L)
	911.2	27	6	
$^{214}\text{Pb}$	351.9	37.1	3	26.8min (L)
	295.2	19.1	3	
$^{214}\text{Bi}$	609.3	46.1	5	19.9min (L)
	1764.5	15.9	8	
$^{40}\text{K}$	1460.75	10.67	8	$1.277 \times 10^9 \text{a}$

\*注：L表示该核素为三大天然放射系长寿命母体核素的衰变子体。

## 附录 B 天然核素的剥离

(资料性)  
天然核素的剥离

IAEA-TECDOC-1363 技术报告提出用于分析天然铀、天然钾、天然钍的标准 $\gamma$ 谱剥离方法。首先，将碘化钠 $\gamma$ 谱仪置于不同标准放射性体模上测量，获得天然核素高能 $\gamma$ 射线对低能窗的剥离比；其次，对于空气中可能存在的目标放射性核素，找到能量最高的特征峰，并定义其 $\gamma$ 射线能量区间范围，相应能区扣除天然核素后确定净计数情况；再次，在设定的判定条件下如全能峰净计数率高于两侧能区计数率一定比例，即可快速识别放射性核素特别是人工核素是否存在；最后，通过前述过程确定有高于本底放射性核素存在后，由目标核素特征能量净计数（率）可进一步进行浓度计算。

当仅测量地表土壤中的天然铀、天然钾、天然钍时，如果以 $^{40}\text{K}$ 的1.46MeV， $^{238}\text{U}$ 子体 $^{214}\text{Bi}$ 的1.765MeV和 $^{232}\text{Th}$ 子体 $^{208}\text{Tl}$ 的2.62MeV能量的全能峰为基准选择能量区间，分别划分钾窗，铀窗和钍窗（附表 B.1）。那么每个能窗的计数不仅来自该能窗内核素造成的计数还包括其他能窗内的核素造成的计数贡献，可以表示为以下公式：

$$N_K = N_{K,K} + N_{K,U} + N_{K,Th} \quad (\text{B.1})$$

$$N_U = N_{U,K} + N_{U,U} + N_{U,Th} \quad (\text{B.2})$$

$$N_{Th} = N_{Th,K} + N_{Th,U} + N_{Th,Th} \quad (\text{B.3})$$

$N_K$ ， $N_U$ ， $N_{Th}$ 分别为环境能谱中钾窗、铀窗、钍窗内的总计数， $N_{i,j}$ 为 $j$ 核素在 $i$ 能窗造成的计数贡献，引入剥离比（剥离系数）后上式可变为：

$$N_K = \alpha_{K,K}N_{K,K} + \alpha_{K,U}N_{U,U} + \alpha_{K,Th}N_{Th,Th} \quad (\text{B.4})$$

$$N_U = \alpha_{U,K}N_{K,K} + \alpha_{U,U}N_{U,U} + \alpha_{U,Th}N_{Th,Th} \quad (\text{B.5})$$

$$N_{Th} = \alpha_{Th,K}N_{K,K} + \alpha_{Th,U}N_{U,U} + \alpha_{Th,Th}N_{Th,Th} \quad (\text{B.6})$$

$\alpha_{U,K}$ 为纯钾源测得能谱中，铀窗的计数和钾窗的计数之比，其他剥离比系数依次类推。由于这三种天然核素较低能区的核素对高能区的核素影响很小可以忽略不计，因此可以简化为：

$$N_K = \alpha_{K,K}N_{K,K} + \alpha_{K,U}N_{U,U} + \alpha_{K,Th}N_{Th,Th} \quad (\text{B.7})$$

$$N_U = \alpha_{U,U}N_{U,U} + \alpha_{U,Th}N_{Th,Th} \quad (\text{B.8})$$

$$N_{Th} = \alpha_{Th,Th}N_{Th,Th} \quad (\text{B.9})$$

参照 JJG（军工）40 通过在混凝土标准体源模型上测量计算得到剥离比，结合方程（B.7）、（B.8）和（B.9）分析环境本底的天然放射性核素。

附表 B.1 能窗信息表

能窗	编号	$\gamma$ 射线能峰	能区下边界	能区上边界
Skyshine (天空散射)	S		96 keV	213keV
Low (低能)	L		279keV	381keV
$^{40}\text{K}$	K	1461 keV	1370 keV	1570 keV
$^{235}\text{U}$	U	1765 keV	1660 keV	1860keV
$^{232}\text{Th}$	Th	2615 keV	2400keV	2800 keV

附录 C 碘化钠 $\gamma$ 能谱数据报送格式

(规范性)

碘化钠 $\gamma$ 能谱数据报送格式  
表 C.1 碘化钠 $\gamma$ 能谱数据报表（分块计数）

点位名称及编号\_\_\_\_\_ 碘化钠谱仪型号及编号\_\_\_\_\_

天气\_\_\_\_\_ 气压 (kPa) \_\_\_\_\_ 温度 (°C) \_\_\_\_\_ 相对湿度 (%) \_\_\_\_\_

风向\_\_\_\_\_ 风速\_\_\_\_\_ 仪器高压 (V) \_\_\_\_\_ 刻度证书编号及有效期\_\_\_\_\_

测量时间:

感兴趣区 序号	能量范围 (keV)	小时均值 个数	小时均值 最大值	小时均值 最大值测 得时间	小时均值 最小值	小时均值 最小值测 得时间	均值	标准偏差
1	<100(未稳 定区间)			时 分		时 分		
2	100-200							
3	200-400							
4	400-600							
5	600-800							
6	800-1000							
7	1000-1400							
8	1400-1800							
9	1800-2200							
10	2200-2800							
11	>2800							
数据异常 及分析								
刻度信息 (含剥离 比)								

注：小时均值：时间标签为测量截止时间，数据为此刻前 1 小时测量均值。

日均值：由每日内 3/4 以上的小时均值算术平均值得出。日均值的统计阶段为北京时间 00:00 至 24:00。

上报每日统计值，包括日期、日均值、标准偏差（ $\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}}$ ）、当日小时均值最大值、最大值的时间标签、当日小时均值最小值、最小值的时间标签等。

## 参 考 文 献

- [1] Grasty R L , Hovgaard J , Lamarre J R . A Fence Line Noble Gas Monitoring System for Nuclear Power Plants[J]. Radiat Prot Dosimetry, 2001(3):249-256.
- [2] Naumenko A , Rukhovich S , Kabanov V , et al. Autonomous NaI(Tl) gamma-ray spectrometer for in situ underwater measurements[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2018, 908:97-109.
- [3] Hiromi Terada, Eiji Sakai, Masaki Katagiri. Environmental Gamma-Ray Exposure Rates Measured by In-Situ Ge(Li) Spectrometer[J]. Journal of Nuclear Science And Technology, 1980,17(4):281-290.
- [4] Beck H L, et al. In Situ Ge(Li) and NaI(Tl) Gamma-ray Spectrometry. HASL-258, 1972.
- [5] 任晓娜, 胡遵素. 用 NaI (Tl) 探测器测量 $\gamma$ 辐射场剂量特性的加权积分法研究[J]. 辐射防护, 2003(3):65-73.
- [6] GB/T 16145 环境及生物样品中放射性核素的 $\gamma$ 能谱分析方法
- [7] IAEA-TECDOC-309 野外放射性测量仪器校准设施的建造和使用
- [8] GB 10263.1~10263.10 辐射探测器环境试验基本要求与方法
- [9] JJF 1744 闪烁体探测器  $\gamma$  谱仪校准规范
- [10] HJ 1157 环境  $\gamma$  辐射剂量率测量技术规范