ICS13.030
CCS Z 33

团　体　标　准

T/ACEF □□—20□□

土壤污染风险评估指南
—天然放射性的辐射危害评价

Guidelines for soil pollution risk assessment
—radiation hazard assessment method of natural radioactivity

（征求意见稿）

20□□-□□-□□发布　　20□□-□□-□□实施

中华环保联合会发 布

ACEF

目 次

前　言 II
1　范围 1
2　规范性引用文件 1
3　术语和定义 1
4　总体要求 2
5　源项调查与采样分析 3
6　辐射危害评价 4
7　风险评估（辐射危害评价）报告框架内容 6
附录 A（资料性）辐射危害评价案例 7

前　言

本文件按照 GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国疾病预防控制中心辐射防护与核安全医学所提出。

本文件由中华环保联合会归口。

本文件起草单位：中国疾病预防控制中心辐射防护与核安全医学所、北京市职业病防治研究院、湖北省疾病预防控制中心、四川省辐射环境管理监测中心站、国家卫生健康委职业安全卫生研究中心、辽宁省疾病预防控制中心、江西省职业病防治研究院、复旦大学、中华环保联合会固危废及土壤污染治理专业委员会。

本文件主要起草人：邓君、曹磊、周文珊、范胜男、乔宝军、谭方琴、邓磊、王艳、李玉文、张伟军、郝述霞、李梦雪、张子扬、易艳玲、高原、梁巧英

土壤污染风险评估指南

—天然放射性的辐射危害评价

1 范围

本文件规定了因人为活动导致天然放射性（镭-226、钍-232、钾-40）进入土壤环境，而可能引起的职业人群及公众辐射危害的控制要求，以及源项调查、采样分析及人群辐射危害评价的技术内容。

本文件适用于土壤环境污染中天然放射性（镭-226、钍-232、钾-40），可能引起的职业人群和公众照射的辐射危害风险评估。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB 18871-2002 电离辐射防护与辐射源安全基本标准

GB/T 11743 土壤中放射性核素的γ能谱分析方法

GB/T 16141 放射性核素的α能谱分析方法

GBZ 128 职业性外照射个人监测规范

GBZ 129 职业性内照射个人监测规范

GBZ 188 职业健康监护技术规范

HJ 25.1 建设用地土壤污染状况调查技术导则

HJ 25.3 建设用地土壤污染风险评估技术导则

HJ 53-2000 拟开放场址土壤中剩余放射性可接受水平规定（暂行）

HJ 61 辐射环境监测技术规范

伴生放射性矿辐射环境保护管理办法（试行）

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

天然放射性物质 naturally occurring radioactive material

本文件所指天然放射性物质是含有镭、钍、钾等天然放射性核素或含有其衰变子体的物质。

3.2

镭当量 radium equivalent

含有放射性核素镭、钍、钾的材料的危险评价指数，指 370 Bq/kg 的镭-226 或 259 Bq/kg 的钍-232 或 4810 Bq/kg 的钾-40 可以产生等同 γ 辐射剂量率。

3.3

超额终身致癌风险度 excess lifetime cancer risk

人体暴露于射线照射下，照射组与非照射组相比在相对尺度（或绝对尺度）上的癌症增加率。

4 总体要求

4.1 天然放射性的辐射危害评价及分级控制管理应以控制环境中放射性污染，合理减少和降低职业人群、公众辐射危害为目标，应使得环境辐射处于可接受水平且不应对后代产生额外辐射剂量负担为原则。

4.2 土壤环境中放射性管理应符合 GB18871-2002 的要求，且宜遵循下列规定：

a）被豁免的实践或源应使得任一公众成员所受有效剂量预计为 10μSv/a 或更小；

b）土壤及相关介质含天然放射性比活度≥7×104Bq/kg 时，应视为放射性污染处理；处理放射性污染物所造成的公众中任意成员年有效剂量当量不应超过 0.25mSv；

c）辐射实践中，公众关键人群组成员所受辐射剂量限值为审管部门确定的 1mSv/a；职业照射控制限值为 20mSv/a。根据国际放射防护委员会的建议，宜取职业照射和公众照射（关键人群组成员）管理目标值为限值的 1/10~1/4，即职业照射≤5mSv/a；公众照射≤0.25mSv/a；

d）任何开采矿山中铀系或钍系放射性核素数量充足、符合开采品位要求的矿石加工及其衍生人为活动，易引起天然放射性危害的，均应采取必要的辐射防护措施，符合《伴生放射性矿辐射环境保护管理办法（试行）》的相关要求。

4.3 土壤环境中的放射性管理流程见图 1，分级控制应符合 HJ53-2000 并满足以下要求：

a）天然放射性的调查阈值宜设为公众照射或职业照射附加剂量值 0.25mSv/a;

b）经初步调查后，附加剂量处于 0.25mSv/a~1.0mSv/a 范围内，应开展辐射危害评价。对于职业照射，应开展详细调查。

c）对于公众照射，附加剂量 0.25mSv/a 为管理阈值下限，超过即应采取恰当的辐射防护干预措施。

d） 对于职业照射，附加剂量处于 1.0mSv/a~5.0mSv/a 范围内，应在详细调查结果基础上，进一步开展风险评估，对所有可能接受职业照射的人员均应进行职业照射管理和职业健康监护。职业性个人监测宜参考 GBZ128、GBZ129 执行，职业性健康监护宜参考 GBZ188 执行;

e）职业照射附加剂量超过 5.0mSv/a，应采取恰当的辐射防护干预措施。

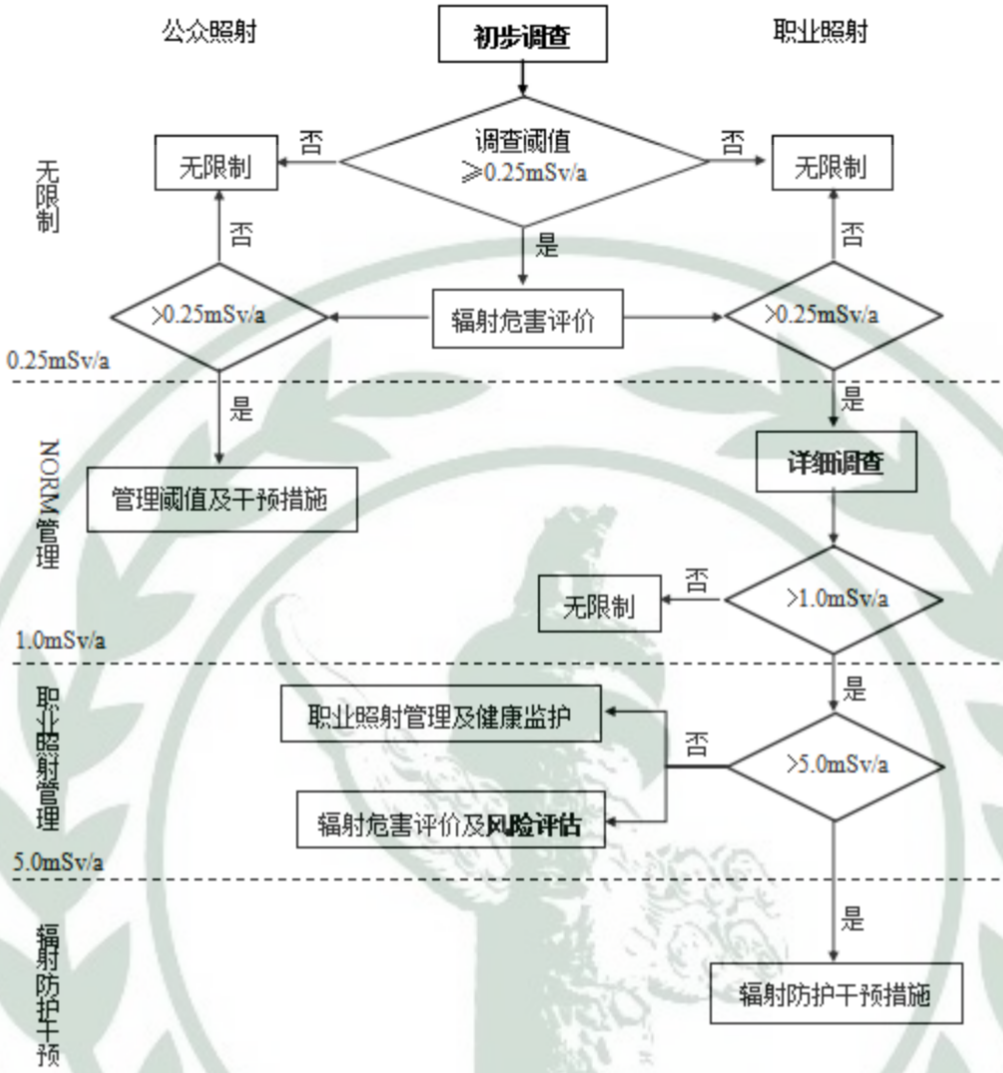

图 1 土壤环境的放射性危害管理流程

5 源项调查与采样分析

5.1 源项调查应符合 HJ25.1 的要求，放射性污染状况的调查亦可按图 1 所示分为三阶段调查，包括：

——第一阶段土壤放射性污染状况调查，也称为初步调查；

——第二阶段土壤放射性污染状况调查，也称为详细调查；

——第三阶段土壤放射性污染状况调查，也称为风险评估。

5.2 源项调查内容还应包括但不限于：

a）通过人员访谈、历史资料调研和现场踏勘等信息采集、分析过程，结合既往经验和蒙特卡洛计算等方法，初步估计土壤放射性污染状况；

b）收集放射性核素种类、活度、毒性及其理化性质，摸清核素迁移、扩散规律及水文地质条件，了

解土壤和水体、大气、岩圈等媒介相互影响因素，确定放射性污染区域；

c)必要时应对关注区域天然放射性水平及垂直分布进行采样及分析。

5.3 详细调查应依据辐射源的情况制定调查目标，根据对关注区放射性分布初始认知（初步调查结果）和调查区域土壤放射性核素及污染的分布特征，选择概率或定向采样方法。

5.4 采样方法应确保采集样品具有典型代表性，并考虑包括但不限于下列影响因素：

——污染场区的可介入性，人员的可接近性；

——污染场区的表层、浅层状况和表面污染分布的不均匀性影响；

——人工污染核素类别、活度及可能存在的人工辐射干扰；

——测量α发射体和低能纯β发射体的技术局限性；

——宇生射线及其影响的排除等。

5.5 土壤样品的采样分析包括但不限于：

——土壤样品的放射性活度浓度测量应符合 GB 11743 的相关要求，宜采用逆矩阵法通过实验室γ能谱仪分析土壤样品中天然放射性核素的活度浓度。

——样品中含有释放α粒子的放射性核素，应参照 GB/T 16141 执行。溶解土壤样品，依次选择分离放射性核素，制备薄固体源，使用半导体α谱仪测定。

5.6 监测采样方案应满足 HJ61-2021 现场采样和布点原则的要求。

6 辐射危害评价

6.1 镭当量是衡量人群辐射暴露的指标，宜将土壤中 Ra-226、Th-232、K-40 的放射性核素比活度换算成为镭当量，换算关系见公式（1）。

$$Ra_{eq} = C_{Ra} + 1.43C_{Th} + 0.077C_K \qquad (1)$$

式中：

Ra_{eq}— 镭当量，单位：Bq/kg；

C_{Ra}— 镭 Ra-226 的放射性比活度，单位：Bq/kg；

C_{Th}— 钍 Th-232 的放射性比活度，单位：Bq/kg；

C_K — 钾 K-40 的放射性比活度，单位：Bq/kg。

6.2 宜利用γ能谱测量的比活度数据换算距地面 1m 处γ空气吸收剂量率，见公式（2）。

$$D = 0.462C_{Ra} + 0.604C_{Th} + 0.0417C_K \qquad (2)$$

式中：

D— 空气吸收剂量率，单位为 nGy/h；

C_{Ra}— 镭 Ra-226 的放射性比活度，单位：Bq/kg；

C_{Th}— 钍 Th-232 的放射性比活度，单位：Bq/kg；

C_K — 钾 K-40 的放射性比活度，单位：Bq/kg；

0.462—Ra-226 的比活度-剂量转换因子（ICRU，1994），单位是 $nGy \cdot h^{-1}/Bq \cdot kg^{-1}$；

0.604—Th-232 的比活度-剂量转换因子（ICRU，1994），单位是 $nGy \cdot h^{-1}/Bq \cdot kg^{-1}$；

0.0417—K-40 的比活度-剂量转换因子（ICRU，1994），单位是 $nGy \cdot h^{-1}/Bq \cdot kg^{-1}$。

6.3 宜使用年有效剂量 AED 评价关键人群年有效剂量水平。年有效剂量表述见式（3）。

$$AED = D \times T \times F \times 10^{-3} \qquad (3)$$

式中：

AED— 年有效剂量，单位：μSv；

D— 空气吸收剂量率，单位为 nGy/h；

T— 室外居留时间，为 0.2×24h×365.25d=1753.2h；

F—剂量转换因子，0.7Sv/Gy。

6.4 应建立外照射和内照射危害评价指数。外照射和内照射危害指数表述见式（4）和（5）。

$$H_{ex} = \frac{C_{Ra}}{370} + \frac{C_{Th}}{259} + \frac{C_K}{4810} \le 1 \qquad (4)$$

$$H_{in} = \frac{C_{Ra}}{185} + \frac{C_{Th}}{259} + \frac{C_K}{4810} \le 1 \qquad (5)$$

式中：

Hex —外照射危害评价指数；

Hin —内照射危害评价指数；

CRa — 镭 Ra-226 的放射性比活度，单位：Bq/kg；

CTh — 钍 Th-232 的放射性比活度，单位：Bq/kg；

CK — 钾 K-40 的放射性比活度，单位：Bq/kg。

6.5 评价关键人群辐射危害水平宜采用 γ 辐射危害指数。γ 辐射危害指数表述见式（6）。

$$I_{\gamma r} = \frac{C_{Ra}}{200} \qquad (6)$$

式中：

C_{Ra}— 镭 Ra-226 的放射性比活度，单位：Bq/kg。

6.6 评价关键人群辐射危害水平可采用超额终身癌症风险度 ELCR。超额终身癌症风险度的表述见式（7）。

$$ELCR = AED \times DL \times RF \times 10^{-6} \qquad (7)$$

式中：

ELCR —终身癌症风险度；

AED — 年有效剂量，单位：μSv；

DL —生命持续时间（30~70a）；

RF —每接受 1Sv 的癌症风险因子，对于公众照射，随机性效应情况下，国际放射防护委员会建议取为 0.05，单位：$Sv^{-1}\cdot a^{-1}$。

7 风险评估（辐射危害评价）报告框架

7.1 前言

7.2 概况（风险评估的原则和目的、评价范围、评价依据、评价方法、评价目标）。

7.3 初步调查 （环境状况及水文地质情况、历史现状和污染来源分析、放射性污染分布特征、初步调查的总结），其中，核素和污染物扩散迁移模型应参考 HJ25.3。

7.4 辐射危害评价及详细调查 （采样策略及方案、检测与实验室分析方法、现场采样和样品分析、结果及质量保证、详细调查总结）。

7.5 人群危害指数及超额致癌风险分析（人群危害指数分析、超额致癌风险分析、风险评估总结）。

7.6 辐射防护管理及干预措施

7.7 结论和建议

附录 A
（资料性）
辐射危害评价举例

A.1 开展土壤天然放射性水平和辐射危害的评估。

从某地区共采集 13 份样本，使用实验室 NaI(Tl)γ能谱分析土壤样品中天然放射性核素的活度浓度，并使用镭当量（Ra_{eq}）、空气吸收剂量率（D）、年有效剂量（AED）、外照射危害指数(H_{ex})、外照射危害指数(H_{in})、γ辐射危害指数(I_{γ})、超额终身癌症风险度($ELCR$)进行辐射危害风险评估，结果见表 1。

表 1 某地区土壤样品天然放射性水平和辐射危害相关指数估算表

样本	坐标	比活度（Bq/kg）			Ra_{eq}	D	AED	H_{ex}	H_{in}	I_{γ}	DL	$ELCR$
		^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K	(Bq/Kg)	(nGy/h)	(μSv)					
S1		24.3	22.2	165.7	68.8	31.5	38.7	0.2	0.3	0.5	70	1.35E-04
S2		32.3	22.1	220.4	80.9	37.5	46.0	0.2	0.3	0.6	70	1.61E-04
S3		142.8	9.5	361.5	184.2	86.8	106.5	0.5	0.9	1.3	70	3.73E-04
S4		31.4	21.5	193.9	77.1	35.6	43.7	0.2	0.3	0.6	70	1.53E-04
S5		31.1	28.3	228.6	89.2	41.0	50.3	0.2	0.3	0.6	70	1.76E-04
S6		30.0	22.7	224.9	79.8	36.9	45.3	0.2	0.3	0.6	70	1.59E-04
S7		32.2	24.4	258.4	87.0	40.4	49.6	0.2	0.3	0.6	70	1.73E-04
S8		31.7	23.9	245.1	84.7	39.3	48.2	0.2	0.3	0.6	70	1.69E-04
S9		33.7	30.0	239.1	95.0	43.7	53.6	0.3	0.3	0.7	70	1.88E-04
S10		14.0	11.9	49.4	34.8	15.7	19.3	0.1	0.1	0.2	70	6.75E-05
S11		44.9	46.5	271.5	132.3	60.2	73.8	0.4	0.5	0.9	70	2.58E-04
S12		27.7	18.7	180.0	68.3	31.6	38.8	0.2	0.3	0.5	70	1.36E-04
S13		26.5	23.6	193.7	75.2	34.6	42.4	0.2	0.3	0.5	70	1.48E-04
Mean		38.66	23.48	217.86	89.02	41.13	50.48	0.24	0.34	0.64	70	1.77E-04

注：本节所列仅为以该地区土壤样本中 ^{226}Ra、^{232}Th 和 ^{40}K 活度浓度的平均值进行辐射危害评价作为计算举例，实践中应按实际情况进行分析估算。

A.2 计算举例

a）镭当量

镭当量的计算参考式（1）。

$$Ra_{eq} = C_{Ra} + 1.43C_{Th} + 0.077C_{K} = 38.66 + 1.43 \times 23.48 + 0.077 \times 217.86$$

计算得到 $Ra_{eq} = 89.02$ Bq/kg

b）空气吸收剂量率

空气吸收剂量率的计算参考式（2）。

$$D = 0.462C_{Ra} + 0.604C_{Th} + 0.0417C_{K} = 0.462 \times 38.66 + 0.604 \times 23.48 + 0.0417 \times 217.86$$

计算得到 D = 41.13 nGy/h

c）年有效剂量

年有效剂量的计算参考式（3）。

$$AED = D \times T \times F \times 10^{-3} = 41.13 \times 1753.2 \times 0.7 \times 10^{-3}$$

计算得到 AED=50.48 μSv

d）外照射和内照射危害指数

外照射和内照射危害指数的计算参考式（4）和（5）。

$$H_{ex} = C_{Ra}/370 + C_{Th}/259 + C_K/4810 = 38.66/370 + 23.48/260 + 217.86/4810$$

计算得到 $H_{ex} = 0.24$

$$H_{in} = C_{Ra}/185 + C_{Th}/259 + C_K/4810 = 38.66/185 + 23.48/260 + 217.86/4810$$

计算得到 $H_{in} = 0.34$

e） γ辐射危害指数

γ辐射危害指数计算参考式（6）。

$$I_\gamma = C_{Ra}/150 + C_{Th}/100 + C_K/1500 = 38.66/150 + 23.48/100 + 217.86/1500$$

计算得到 $I_\gamma = 0.64$

f） 超额终身癌症风险度

超额终身癌症风险度计算参考式（7）。

其中，DL 为剩余生命持续时间，保守取 70a，RF 为每接受 1Sv 的癌症风险因子，ICRP 建议取为 0.05：

$$ELCR = AED \times DL \times RF \times 10^{-6} = 50.44 \times 70 \times 0.05 \times 10^{-6}$$

计算得到 $ELCR = 1.77 \times 10^{-4}$

A.3 辐射危害评价框架体系（辐射危害评价参考值）见表 2。

表 2 辐射危害评价参考值

AED(mSv)	Ra_{eq} (Bq/Kg)	D(nGy/h)	$I_{\gamma r}$	ELCR
0.25	440.98	203.73	2.20	8.75E-04
1.0	1763.92	814.93	8.82	3.50E-03
5.0	8819.58	4074.65	44.10	1.75E-02
注：当 AED 处于 0~0.25mSv 范围内，即 Raeq 处于 0~440.98Bq/Kg 范围内，均无限制。对于公众照射，当 AED 大于 0.25mSv，即 Ra_{eq} 大于 441Bq/Kg 时，应采取辐射防护干预措施；对于职业照射，当 AED 处于 0.25~1.0mSv 范围内，即 Ra_{eq} 处于 441~1764Bq/kg 范围内，应开展详细调查。对于职业照射，当 AED 处于 1.0~5.0mSv 范围内，即 Ra_{eq} 处于 1764~8820Bq/Kg 范围内，应进行辐射危害评价及风险评估和职业照射管理及健康监护；当 AED 大于 5.0mSv，即 Ra_{eq} 大于 8820Bq/kg 时，应采取辐射防护干预措施。				