

ICS 13.080.20
CCS Z 33

团 体 标 准

T/ACEF 047—2022

土壤污染风险评估指南 天然放射性

Guidelines for soil pollution risk assessment-Natural radioactivity

2022-12-01 发布

2022-12-05 实施

中华环保联合会 发布



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	2
6 辐射危害评价	4
附录 A（资料性）辐射危害评价举例	8
参考文献	11

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、中国医学科学院放射医学研究所、四川省辐射环境管理监测中心站、北京协和医学院、兰州大学、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、陕西省核与辐射安全监督站、谱尼测试集团股份有限公司、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、翟贺争、谭方琴、乔宝军、邓磊、王艳、李玉文、张伟军、兰长林、陆芳潇、郝述霞、李梦雪、张丹、宋薇、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

1 范围

本文件规定了土壤环境中天然放射性辐射危害评价的总体要求，以及源项调查、采样分析及人群辐射危害评价的技术内容。

本文件适用于土壤及放射性伴生矿中天然放射性物质（镭-226、钍-232、钾-40）辐射危害评价。

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/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
GB 18871-2002	电离辐射防护与辐射源安全基本标准
GBZ 98	放射工作人员健康要求及监护规范
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
HJ 61	辐射环境监测技术规范

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

含有镭、钍、钾等天然放射性核素或含有其衰变子体的物质。

注：来源于 ICRP Publication 142。

3.2

镭当量 radium equivalent

指 370Bq/kg 的镭-226 或 260Bq/kg 的钍-232 或 4200Bq/kg 的钾-40 可以产生的等同 γ 辐射剂量率。

3.3

超额终生致癌风险度 excess lifetime cancer risk

人体暴露于天然放射性物质产生的射线照射下，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。

注：来源于 ICRP Publication 103。

4 总体要求

4.1 辐射危害评价遵循科学性、规范性及可行性原则。

4.2 天然放射性的辐射包括公众照射和职业照射，危害评价流程见图 1，并应满足以下要求：

- a) 公众照射不应超过 0.25mSv/a;
- b) 天然放射性的调查水平宜设为职业照射附加剂量值 0.25mSv/a;
- c) 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；
- 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。职业人员个人监测宜参考 GBZ 128、GBZ 129 执行，职业人员健康监护宜参考 GBZ 188、GBZ 98 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。

5 源项调查与采样分析

5.1 一般规定

5.1.1 放射性污染状况的调查亦可按图 1 所示分为初步调查、详细调查和风险评估三个阶段。

5.1.2 源项调查包括但不限于：

- 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。

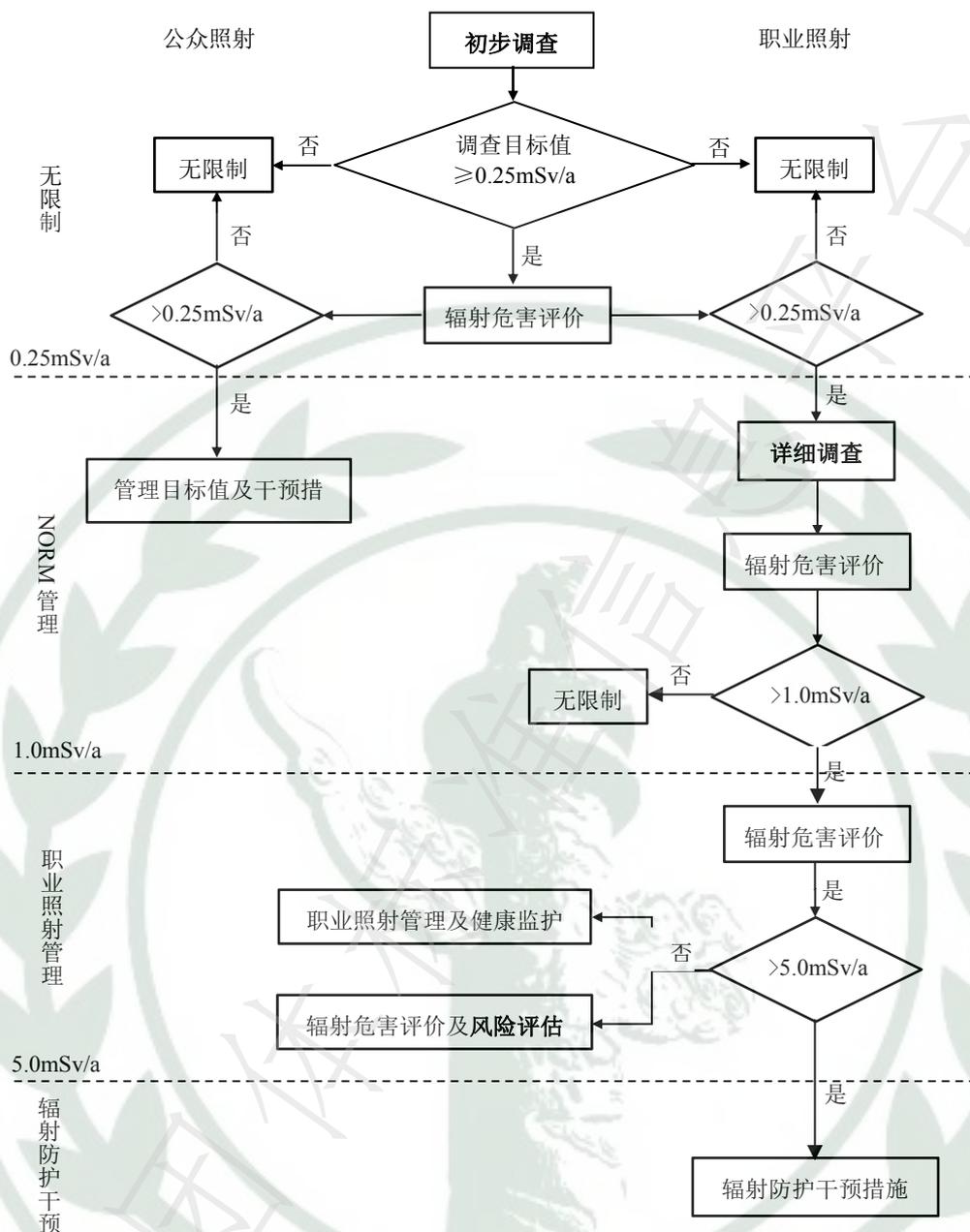


图1 辐射危害评价

5.1.3 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物的分布特征,确定重点调查区域,选择概率采样或定向采样方法。

5.2 采样要求

5.2.1 采样点位布设宜符合以下规定:

- a) 代表性。布设的采样点应具有代表性,样品的放射性能够反映调查区域土壤中的放射性核素分布特征;
- b) 均匀性。采样点与采样点之间应保持基本固定的距离,使采样点大致均匀分布;

c) 有利性。采样点布设应有利于反映重点关注区域土壤放射性污染情况；

d) 多点组合。为提高土壤样品的代表性，在每个采样单元内采集多个不同点位的样品进行混合，形成混合样。

5.2.2 样品采集宜符合以下规定：

a) 采样物质应是反映土壤放射性污染状况的地表或某一深度范围内的土壤，并去除石块、树皮、杂草等；

b) 采样层位宜符合以下规定：

1) 对原状土，采集垂直深度范围为 0cm 至 10cm 的土壤；

2) 对农田，采集垂直深度范围为 0cm 至耕作深度或根层深度下行 5cm 的土壤；

3) 对受人为改造或人类活动干扰后的土壤区域，应综合考虑土壤被改造或干扰的深度和被调查放射性核素的垂向迁移能力，确定最深采样深度，采集垂直深度范围为 0cm 至最深采集深度的土壤。

4) 特殊情况下，根据具体调查目的和要求确定采样层位。

c) 采样单元划分宜采用“系统分割法”和“分区分割法”，并宜符合以下规定：

1) 对调查区内土壤放射性污染特征不明确或原始状况严重破坏等情况，推荐采用“系统分割法”划分采样单元。将调查区域划分成面积相等的若干正方形采样网格单元，网格单元大小由调查区域面积和预估污染程度共同确定；

2) 对调查区内土壤放射性污染特征有明显差异等情况，宜采用“分区分割法”划分采样单元。将调查区域首先划分成不同的小区，将各小区划分成面积相等的若干正方形采样网格单元，各小区的网格单元大小由小区面积和污染特征综合确定；

3) 对疑似污染较重的网格单元区域，可进一步划分子采样网格单元，子采样网格单元大小由母网格单元大小和预估污染程度共同确定。

d) 布点方式宜采用“梅花形”或“棋盘形”。每个单元内采样点总数量不少于 5 个，实际采样位置应位于采样点位置 10m×10m 范围内，若超出该范围，应在采样登记表中备注记录移点原因及新采样点的坐标位置信息。

5.3 样品分析

样品分析测试对放射性核素检出限为 Bq/kg 量级的测量分析，宜采用 γ 能谱分析，测量方法参照 GB/T 11743。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。

5.4 质量控制

5.4.1 采样器具和容器使用前应清洁并经过检验，容器壁不应吸收或吸附待测的放射性核素，容器材质不应与样品中成分发生反应。

5.4.2 实验室内分析测试的质量控制参照 HJ61 执行。

6 辐射危害评价

6.1 镭当量是衡量人群辐射暴露的指标，宜将土壤中镭-226、钍-232、钾-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）。

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

式中：

Ra_{eq} — 镭当量，单位：Bq/kg；

C_{Ra} — 镭-226 的放射性比活度，单位：Bq/kg；

C_{Th} — 钍-232 的放射性比活度，单位：Bq/kg；

C_K — 钾-40 的放射性比活度，单位：Bq/kg；

1.43, 0.077—换算系数，无量纲；

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）。

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

式中：

D — 空气吸收剂量率，单位为 nGy/h；

C_{Ra} — 镭-226 的放射性比活度，单位：Bq/kg；

C_{Th} — 钍-232 的放射性比活度，单位：Bq/kg；

C_K — 钾-40 的放射性比活度，单位：Bq/kg；

0.462—镭-226 的比活度-剂量转换因子（ICRU，1994），单位是 nGy·h⁻¹/Bq·kg⁻¹；

0.604—钍-232 的比活度-剂量转换因子（ICRU，1994），单位是 nGy·h⁻¹/Bq·kg⁻¹；

0.0417—钾-40 的比活度-剂量转换因子（ICRU，1994），单位是 nGy·h⁻¹/Bq·kg⁻¹。

6.3 宜使用附加的年有效剂量 AED 评价关键人群年有效剂量水平。附加的年有效剂量表述见公式（3）。

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

式中：

AED — 年有效剂量，单位： μ Sv/a；

D — 空气吸收剂量率，单位为 nGy/h；

T — 室外居留时间，为 $0.2 \times 24h \times 365.25d = 1753.2h$ ；

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公式（4）和（5）。

$$H_{ex} = \frac{C_{Ra}}{370} + \frac{C_{Th}}{260} + \frac{C_K}{4200} \leq 1 \dots\dots\dots(4)$$

$$H_{in} = \frac{C_{Ra}}{185} + \frac{C_{Th}}{260} + \frac{C_K}{4200} \leq 1 \dots\dots\dots(5)$$

式中：

H_{ex} —外照射危害指数；

H_{in} —内照射危害指数；

C_{Ra} — 镭-226 的放射性比活度，单位：Bq/kg；

C_{Th} — 钍-232 的放射性比活度，单位：Bq/kg；

C_K — 钾-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公式（6）。

$$I_{\gamma} = \frac{C_{Ra}}{150} + \frac{C_{Th}}{100} + \frac{C_K}{1500} \dots\dots\dots(6)$$

式中：

C_{Ra} — 镭-226 的放射性比活度，单位：Bq/kg；

C_{Th} — 钍-232 的放射性比活度，单位：Bq/kg；

C_K — 钾-40 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公式（7）。

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

式中：

$ELCR$ —终身癌症风险度；

AED — 年有效剂量，单位： $\mu\text{Sv/a}$ ；

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}/a 。

6.7 结果评价应符合以下规定：

a) 被豁免的实践或源使任何公众成员所受有效剂量预计为 $10\mu\text{Sv/a}$ 或更小；当年有效剂量处于 $0\sim 0.25\text{mSv/a}$ 范围内，即 Ra_{eq} 处于 $0\sim 440.98\text{Bq/kg}$ 范围内，均无限制；

b) 土壤及相关介质含天然放射性比活度 $\geq 7 \times 10^4 \text{Bq/kg}$ 时，应视为放射性污染处理；放射性污染物所造成的公众中任意成员年有效剂量不应超过 0.25mSv (Ra_{eq} 约为 441Bq/kg)；对于公众照射，附加剂量 0.25mSv/a 为管理目标值，超过即应采取恰当的辐射防护干预措施；

c) 辐射实践中，公众（关键人群成员）照射剂量限值为 1mSv/a (Ra_{eq} 约为 1764Bq/kg)；职业照

射剂量限值为 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（关键人群组成员）照射管理目标值为限值的 1/10~1/4，即职业照射管理目标值 $\leq 5\text{mSv/a}$ （ Ra_{eq} 约为 1764Bq/kg）；公众照射管理目标值 $\leq 0.25\text{mSv/a}$ ；

7 危害评估报告内容

危害评估报告内容应包括但不限于：

前言、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）、辐射危害初步调查（环境状况及水文地质情况、历史现状和污染源分析、放射性污染分布特征、初步调查的总结）、辐射危害详细调查（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）、辐射危害评价及风险评估（人群危害指数分析、超额致癌风险分析、风险评估总结）、辐射防护管理及干预措施以及结论和建议等。



附录 A
(资料性)
辐射危害评价举例

A.1 数据信息

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})、内照射危害指数(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 A.1。

表 A.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} (Bq/kg)	D (nGy/h)	AED (μ Sv/a)	H_{ex}	H_{in}	I_{γ}	DL	$ELCR$
		^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K								
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	0.4	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	0.25	0.35	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

镭当量的计算公式 (A.1)。

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

计算得到 $Ra_{eq} = 89.02 \text{ Bq/kg}$

b) 空气吸收剂量率

空气吸收剂量率的计算公式 (A.2)。

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

计算得到 $D=41.13 \text{ nGy/h}$

c) 年有效剂量

年有效剂量的计算公式 (A.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 $AED=50.48 \text{ } \mu\text{Sv/a}$

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公式 (A.4) 和 (A.5)。

$$H_{\text{ex}}=C_{\text{Ra}}/370+C_{\text{Th}}/260+C_{\text{K}}/4200=38.66/370+23.48/260+217.86/4200$$

计算得到 $H_{\text{ex}}=0.25$

$$H_{\text{in}}=C_{\text{Ra}}/185+C_{\text{Th}}/260+C_{\text{K}}/4200=38.66/185+23.48/260+217.86/4200$$

计算得到 $H_{\text{in}}=0.35$

e) γ 辐射危害指数

γ 辐射危害指数计算公式 (A.6)。

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

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公式 (A.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 辐射危害评价估算值见表 A.2。

表 A.2 辐射危害评价估算值

$AED(mSv/a)$	$Ra_{eq}(Bq/kg)$	$D(nGy/h)$	I_y	$ELCR$
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/a 范围内，即 Ra_{eq} 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/a，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/a 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/a 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/a，即 Ra_{eq} 大于 8820Bq/kg 时，应采取辐射防护干预措施。

参 考 文 献

[1] National Council on Radiation Protection and Measurements. NCRP REPORT No. 129: Recommended screening limits for contaminated surface soil and review of factors relevant to site-specific studies.1999.

[2] Renu Daulta¹, Vinod Kumar Garg, and Balwinder Singh. Natural Radioactivity in Soil, Associated Radiation Exposure and Cancer Risk to Population of Eastern Haryana, India[J]. JOURNAL GEOLOGICAL SOCIETY OF INDIA,2019,94:525-532.

[3] Awad A. Ibraheema, Atef El-Taherb, May H. M. Alruwailia. Assessment of natural radioactivity levels and radiation hazard indices for soil samples from Abha, Saudi Arabia[J]. Results in Physics,2018,11:325–330.

[4] 生态环境部. 伴生放射性矿辐射环境保护管理办法（试行）.

[5] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.GB 6566-2010 建筑材料放射性核素限量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.