

doi: 10.11720/wtyht.2024.1060

刘俊峰, 彭文彪, 陶峰, 等. 利用地面 γ 总量转换为空气吸收剂量率进行环境辐射水平评价——以桂阳县潘家村和永兴县土桥村实测数据为例[J]. 物探与化探, 2024, 48(3): 868–875. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.1060>

Liu J F, Peng W B, Tao F, et al. Assessing radiation levels in the environment by converting total natural gamma radiation into the absorbed dose rate in air: A case study of measured data from Panjia Village, Guiyang County and Tuqiao Village, Yongxing County[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2024, 48(3): 868–875. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.1060>

利用地面 γ 总量转换为空气吸收剂量率 进行环境辐射水平评价 ——以桂阳县潘家村和永兴县土桥村实测数据为例

刘俊峰¹, 彭文彪¹, 陶峰¹, 孟繁星¹, 韦光景¹, 刘虹¹, 邓居智², 陈辉², 付宸², 王培建³

(1. 湖南省核地质调查所, 湖南 长沙 410008; 2. 东华理工大学 地球物理与测控学院, 江西 南昌 330013; 3. 核工业航测遥感中心, 河北 石家庄 050000)

摘 要: 在长期的铀矿普查中, 我国积累了海量的 γ 总量数据资料, 但应用这些数据进行放射性环境评价的研究极少。本文从 γ 总量和空气吸收剂量率的测量原理出发, 通过梳理 γ 总量、放射性核素含量与空气吸收剂量率之间的关系, 建立起地面 γ 总量与空气吸收剂量率之间的联系, 分析了仪器参数对测量误差的影响, 认为 γ 总量仪器 $b_K/b_U = 2.287$, $b_{Th}/b_U = 0.430$ 时, 测量的 γ 总量与空气吸收剂量率满足严格线性关系, 因此 γ 总量仪器的 b_K/b_U 、 b_{Th}/b_U 值越接近这两个数值, 测得的 γ 总量转换为空气吸收剂量率越准确; 利用湖南省电离辐射计量站模型进行了 γ 总量转换为空气吸收剂量率的系数求解, 并分析了误差, 推测了仪器参数中钾的铀当量值、钍的铀当量值的大致范围; 在郴州市桂阳县潘家村岩体和郴州市永兴县土桥村灰岩地区进行了 γ 总量、 γ 能谱、空气吸收剂量率的同点位实测, 结果显示, 当核素含量比 C_K/C_U 均值小于 1, C_{Th}/C_U 均值小于 3 时, 利用 γ 总量 (FD3013 仪器测得) 估算的空气吸收剂量率与利用 Beck 公式根据能谱估算的空气吸收剂量率的误差基本处于同等水平, 均方根误差均小于 15%。根据国内核素的 C_K/C_U 、 C_{Th}/C_U 均值, 认为国内大部分地区可以利用由 FD3013 仪器 (或类似性能仪器) 测得的 γ 总量数据估算空气吸收剂量率。利用已有铀矿普查资料中的 γ 总量数据转换计算有效空气吸收剂量率, 为快速大面积评估环境天然放射性外照射水平提供了方法参考。

关键词: γ 总量; γ 能谱; 核素 (铀、钍、钾) 含量; 空气吸收剂量率

中图分类号: TL751

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2024)03-0868-08

0 引言

在放射性环境评价中, 空气吸收剂量率是评价外照射最常用的指标, 它能直接有效地表示 γ 辐射可能对人体的影响。空气吸收剂量率可以通过实测得出, 也可以通过铀矿勘查数据转换 (估算) 得出。国内外积累了大量的铀矿普查资料, 如能利用已有铀矿普查资料转换空气吸收剂量率, 可快速实现大面积放射性环境评价工作, 大大节约环境调查成本。常用的转换方式有利用实测地面 γ 能谱和航

空 γ 能谱估算空气吸收剂量率, 这种方式以利用 Beck 公式转换最为有名: 20 世纪 70 年代, Beck 采用实测地面 γ 能谱得出地面 γ 放射性核素浓度, 并估算地表 1 m 高度的空气吸收剂量率^[1]。此后, 该方法在国际原子能机构 (IAEA) 等机构的出版物中均有涉及^[2-4]。美国 and 苏联等国家先后利用 γ 能谱 (航空或地面) 资料编制了 γ 空气吸收剂量率图。2000 年开始, 我国核工业航测遥感中心先后在甘肃省、河北省石家庄市及秦山核电站等地利用航空 γ 能谱估算了地面 1 m 高度处空气吸收剂量率, 结果表明该估算方法有效^[5-6]。中国地质大学 (北京) 王

收稿日期: 2023-02-13; 修回日期: 2023-09-19

基金项目: 湖南省地质院科研基金项目“铀矿区调资料在评价环境天然放射性水平中的应用研究” (HNGSTP202207)

第一作者: 刘俊峰 (1986-), 男, 高级工程师, 主要从事地质科研、生产工作。Email: 563315851@qq.com

南萍等^[7] 则利用广东珠海地面 γ 能谱测量对空气吸收剂量率进行了估算,并和实测数据值进行了对比,相对误差为 11.74%,表明方法整体可行。此外,成都理工大学、核工业北京地质研究院、福建省地质调查院等也利用放射性化探(核素)数据进行了估算空气吸收剂量率的有关研究和应用^[8-12]。

而利用 γ 总量估算空气吸收剂量率,国内少有实际应用案例和公开文献发表。因为一般认为只有使用特定参数仪器, γ 总量与空气吸收剂量率才具有严格正比关系^[13]。

本文通过 γ 总量公式与 Beck 公式对比求系数、标准放射性计量站模型测试、野外数据采集,分析了利用铀矿勘查中应用较广的 FD3013 仪器测得的 γ 总量转换为空气吸收剂量率的误差,证明了以往铀矿普查取得的 γ 总量大部分可以用来估算空气吸收剂量率,可以在放射性环境调查中有效应用。

1 γ 总量与空气吸收剂量率估算

1.1 γ 总量与天然 K、U、Th 含量关系

在仪器的 γ 射线的线性响应范围内, γ 总计数率 N_{TC} 与土壤中 K、U、Th 含量 C 的关系为^[2]:

$$N_{TC} = b_K \times C_K + b_U \times C_U + b_{Th} \times C_{Th} \quad , \quad (1)$$

式中: b_K 、 b_U 、 b_{Th} 为 γ 辐射探测器对 K、U、Th 含量的响应系数,其值取决于探测器的性质和能量阈值。

式(1)可进一步变形为:

$$N_{TC} = b_U [(b_K/b_U) C_K + C_U + (b_{Th}/b_U) C_{Th}] \quad , \quad (2)$$

式中: b_K/b_U 是钾的铀当量; b_{Th}/b_U 是钍的铀当量;这里的铀当量是指在总计数测量中, 10^{-2} 含量的 K 或 10^{-6} 含量的 Th 测得的计数率与对应含量的铀测得的计算率相同时的铀含量。利用不同大小和阈值的 NaI(Tl)晶体基于半无限大体源测得的 K、Th 的铀当量值列于表 1。NaI(Tl)晶体闪烁体是一种广泛应用的无机晶体,被广泛应用于辐射探测器。

总计数率 N_{TC} 与当量铀 Q_{eU} 成正比,其转换公

表 1 不同体积的 NaI(Tl)晶体探测器 K、Th 的铀当量^[2]

Table 1 Uranium equivalent of K and Th of different instruments^[2]

仪器	NaI(Tl) 晶体体积/cm ³	能量阈值/ KeV	b_K/b_U	b_{Th}/b_U
A	29	30	1.57	0.37
B	82	50	1.56	0.38
C	348	400	2.37	0.41
D	348	500	2.67	0.41

式见式(3),其中 k_1 为仪器标定系数,该系数可在标准计量模型上测试得出。

$$Q_{eU} = k_1 \times N_{TC} \quad . \quad (3)$$

1.2 空气吸收剂量率与天然 U、Th、K 含量的关系

虽然许多自然界存在的元素都有放射性同位素,但只有 K、U、Th 衰变系列的放射性同位素能产生较大的 γ 射线^[14],因此引起剂量的主要天然放射性核素有 K、U、Th,以及 U 和 Th 衰变的子体^[15]。

土壤中天然核素活度浓度与 1 m 处 γ 辐射空气吸收剂量率 ($D_{估}$) 的关系可以用 Beck 公式表示^[16-17]:

$$D_{估} = 0.043a_K + 0.427a_U + 0.626a_{Th} \quad , \quad (4)$$

式中: $D_{估}$ 为估算的 γ 辐射空气吸收剂量率,nGy/h; a_K 、 a_U 、 a_{Th} 分别为土壤中⁴⁰K、²³⁸U 和²³²Th 的核素比活度,Bq/kg。该公式假定条件为:土壤中天然放射性核素 K、U、Th 的活度浓度随深度均呈均匀分布;土壤密度及组分均匀,含水量假设为 10%,密度 1.6 g/cm³;U 系、Th 系所有子体处于放射性平衡,Rn 子体不溢出地面;土壤为一个 2 π 无穷大体源。

Beck 公式在其他文献中有不同的系数,其系数可以根据大量数据拟合得到,本文采用国际辐射单位与测量委员会 1994 年 53 号报告书推荐值^[18]:

$$D_{估} = 0.0417a_K + 0.462a_U + 0.604a_{Th} \quad , \quad (5)$$

当含量采用⁴⁰K、²³⁸U 和²³²Th 的质量单位计算时,式(5)可以表示为:

$$D_{估} = 13.052C_K + 5.706C_U + 2.452C_{Th} \quad , \quad (6)$$

式中: C_K 、 C_U 、 C_{Th} 分别为土壤中⁴⁰K、²³⁸U 和²³²Th 的含量,单位分别为 10^{-2} 、 10^{-6} 、 10^{-6} 。

据《中国环境天然放射性水平调查》统计,Beck 公式估算结果总体准确,比直接测量略高 5%^[19]。

1.3 γ 总量估算空气吸收剂量率

上文分别给出了核素含量与 γ 总量、核素含量与空气吸收剂量的关系,若假设仪器测量的 γ 总量(总计数率 N_{TC} 或当量铀 Q_{eU}) 正比于空气吸收剂量率,则 $D_{估} = k_2 Q_{eU} = k_2 k_1 N_{TC}$ $D_{估} = k_2 Q_{eU} = k_2 k_1 N_{TC}$,其中, k_2 为系数(k_2 是当量铀转换为空气吸收剂量率的系数),由式(2)和式(6)可得:

$$D_{估} = 13.052C_K + 5.706C_U + 2.452C_{Th} = k_2 \times k_1 \times b_U [(b_K/b_U) C_K + C_U + (b_{Th}/b_U) C_{Th}] \quad , \quad (7)$$

等式两边除以 5.706,得到:

$$2.287C_K + C_U + 0.430C_{Th} = 0.175k_2 \times$$
$$k_1 \times b_U [(b_K/b_U) C_K + C_U + (b_{Th}/b_U) C_{Th}] \quad ,$$
$$(8)$$

式(8)中,当 $b_K/b_U = 2.287$ 、 $b_{Th}/b_U = 0.430$ 时,即当仪器探测 K、Th 的铀当量值为 2.287、0.430 时, γ 总量结果可以准确换算为空气吸收剂量率。

1.4 仪器 b_K/b_U 、 b_{Th}/b_U 参数以及放射性核素含量对 γ 总量估算空气吸收剂量率的影响

在 1.3 节中假定仪器测量的 γ 总量正比于空气吸收剂量情况下,进行了 b_K/b_U 、 b_{Th}/b_U 值推导,推导结果与前人实验结果接近:如图 1、图 2 由实验测试得出,分别展示了 b_K/b_U 、 b_{Th}/b_U 随 C_K/C_U 、 C_{Th}/C_U 变化时,经 γ 总量转换的空气吸收剂量率相对标准值的误差变化(相对误差采用实验值与真实值的差值除以真实值,以下同)^[2]。表 1 中具有 NaI(Tl) 晶体体积 348 cm³、能量阈值 400 KeV 的 C 仪器,其 b_K/b_U 、 b_{Th}/b_U 分别为 0.37、0.41,最接近理论值 2.287、0.430,此仪器测得的 γ 总量数据转换为空气吸收剂量率的值最准确,其他仪器测得的 γ 总量通过系数转换为空气吸收剂量率的误差跟土壤 C_K/C_U 、 C_{Th}/C_U 含量密切相关。

由图 1 和图 2 可见,总计数率仪器测量的 γ 总量转换为空气吸收剂量率的误差随 C_K/C_U 和 C_{Th}/C_U 的增大而增大,特别是 C_K/C_U 增加导致的误差大于 C_{Th}/C_U 增加导致的误差。因此,当仪器的 b_K/b_U 、 b_{Th}/b_U 值不是 2.287、0.430 时, C_K/C_U 和 C_{Th}/C_U 越小, γ 总量数据转换为空气吸收剂量率的误差越小。

值得注意的是,图 1 是在 C_{Th} 为 0 时测得,图 2 是在 C_K 为 0 时测得,当它们都不为 0 时,相对误差减小。

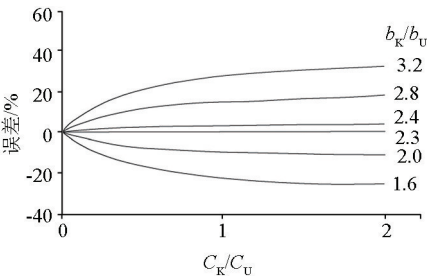


图 1 仪器 b_K/b_U 值与核素 C_K/C_U 比对 γ 总量转换为空气吸收剂量率的误差影响^[2]

Fig. 1 Effect of b_K/b_U ratio and C_K/C_U ratio on conversion error of total gamma into air absorbed dose rate

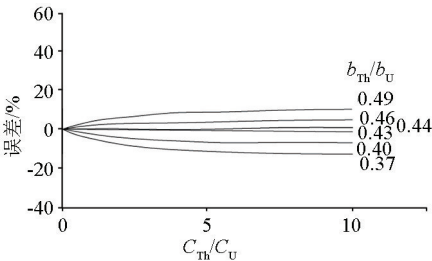


图 2 仪器 b_{Th}/b_U 值与核素 C_{Th}/C_U 比对 γ 总量转换为空气吸收剂量率的误差影响^[2]

Fig. 2 Effect of b_{Th}/b_U ratio and C_{Th}/C_U ratio on conversion error of total gamma into air absorbed dose rate

2 γ 总量估算空气吸收剂量率的系数求解及误差分析

当已知仪器型号下, γ 总量转换空气剂量率的方法步骤为:通过仪器在标准模型测试判断仪器 b_K/b_U 、 b_{Th}/b_U 的大致区间,并估计 γ 总量转换为空气吸收剂量的系数。

本文测试的标准模型为湖南省电离辐射计量站的模型,该站为湖南省专项计量授权检定机构,也是湖南省国防区域计量站。该计量站的标准模型由本底模型(YB-II-ZN)、K 模型(YK-II-ZN)、U 模型(YU2-II-ZN、YU1-II-ZN)、Th 模型(YTh-II-ZN)、混合模型(YM-II-ZN)组成,单个模型直径 2.2 m,高 0.6 m,模型中心距离 12 m。核素含量标称值由更高级别计量站量值传递测量得到,标称数据如表 2 所示。

表 2 湖南省电离辐射计量站模型标称数据

Table 2 Model nominal data of ionizing radiation measuring station in Hunan Province

模型类别	当量铀含量	空气吸收剂量率(1 m 高)	含量		
	Q_{eU}/Ur	(nGy · h ⁻¹)	$Q_K/10^{-2}$	$Q_U/10^{-6}$	$Q_{Th}/10^{-6}$
YB-II-ZN	10.72	34.94	0.40	2.50	5.11
YK-II-ZN	20.04	98.65	5.36	3.23	8.66
YU2-II-ZN	48.57	211.56	0.34	38.57	5.82
YU1-II-ZN	158.25	706.40	0.31	140.61	8.79
YTh-II-ZN	85.21	433.04	0.32	4.16	187.13
YM-II-ZN	128.72	635.51	3.67	60.60	139.64

2.1 理论计算不同性能仪器探测到的 γ 总量及误差

当式(2)中 $b_U = 1$ 时,表 1 中 A、B、C、D 仪器在表 2 模型上利用公式(2)计算得到的计数率如表 3 所示(本底模型 γ 射线能量较小,容易受到周围模型射线干扰,在下文计算中不考虑本底模型)。

表 3 利用标准模型 K、U、Th 含量计算的总计数率

Table 3 The total number rate calculated by the standard model K, U, Th content

模型类别	贴近模型表面计算的总计数率/cps			
	仪器 A	仪器 B	仪器 C	仪器 D
YK-II-ZN	14. 74	14. 88	19. 48	21. 09
YU2-II-ZN	41. 25	41. 31	41. 76	41. 86
YU1-II-ZN	144. 34	144. 43	144. 95	145. 04
YTh-II-ZN	73. 89	75. 77	81. 64	81. 74
YM-II-ZN	117. 96	119. 39	126. 55	127. 65

假设仪器探测的铀当量基本正比于标称铀当量,则可通过 $Q_{eU}=k_1\times N_{TC}$ 求校正系数 k_1 。通过采用标称当量铀除以仪器测得的总计数率,可以得到每个模型对应的系数,并取均值,得到 4 种仪器的 k_1 值分别为 1. 18、1. 16、1. 07、1. 05。利用系数 k_1 将表 3 中的 γ 总量计数率校正,得到当量铀及误差如表 4 所示。

表 4 利用标准模型 K、U、Th 含量计算的当量铀及误差

Table 4 Equivalent uranium and error calculated by standard model K, U, Th content

模型类别	贴近模型表面计算得到的当量铀含量/相对误差				标称当量铀/Ur
	仪器 A	仪器 B	仪器 C	仪器 D	
YK-II-ZN	17. 33/-13. 52	17. 32/-13. 57	20. 82/3. 89	22. 15/10. 529	20. 04
YU2-II-ZN	48. 49/-0. 16	48. 09/-0. 99	44. 64/-8. 09	43. 97/-9. 47	48. 57
YU1-II-ZN	169. 68/7. 22	168. 14/6. 25	154. 94/-2. 09	152. 36/-3. 72	158. 25
YTh-II-ZN	86. 86/1. 94	88. 21/3. 52	87. 26/2. 41	85. 87/0. 77	85. 21
YM-II-ZN	138. 67/7. 73	138. 99/7. 98	135. 27/5. 09	134. 09/4. 17	128. 72
均方根误差/%	5. 46	4. 99	3. 12	4. 40	

注:当量铀含量单位为 Ur;相对误差单位为%。

表 5 根据系数将当量铀估算为空气吸收剂量率及误差

Table 5 According to the coefficient, the equivalent uranium is estimated as the absorbed dose rate of air and the error

模型类别	当量铀估算离模型 1m 高的吸收剂量率/相对误差				标称空气吸收剂量率/(nGy·h ⁻¹)
	仪器 A	仪器 B	仪器 C	仪器 D	
YK-II-ZN	82. 44/-16. 43	82. 38/-16. 49	98. 68/0. 035	104. 94/6. 38	98. 65
YU2-II-ZN	230. 7/9. 05	228. 69/8. 1	211. 55/-0. 028	208. 28/-1. 55	211. 56
YU1-II-ZN	807. 25/14. 28	799. 57/13. 19	734. 31/3. 95	721. 67/2. 16	706. 4
YTh-II-ZN	413. 24/-4. 57	419. 46/-3. 14	413. 58/-4. 49	406. 71/-6. 08	433. 04
YM-II-ZN	659. 72/3. 81	660. 95/4. 00	641. 1/0. 88	635. 14/-0. 058	635. 51
均方根误差/%	7. 68	7. 33	1. 91	2. 91	

注:吸收剂量率单位为 nGy·h⁻¹;相对误差单位为%。表 7 同。

表 5 可见,接近 $b_K/b_U=2. 287$ 、 $b_{Th}/b_U=0. 430$ 的仪器测得的总量基本正比于空气吸收剂量。其他仪器偏离这些值越远,误差越大。

值得注意的是,即使是总量仪器,不同能量的射线通过晶体管后产生的电子电压也不一样,通过电压来分辨 K、U、Th 从而调整仪器 b_K/b_U 、 b_{Th}/b_U 具有可行性。仪器是否调整了 b_K/b_U 、 b_{Th}/b_U 参数,可以通过三元一次方程拟合求解(需要大量数据)证实。这里采用实用、简单的对比分析判断方法,具体步骤为:标定仪器,测量模型上的铀当量数据,计算每个模型铀当量估算为空气吸收剂量的系数 p ;根据多

其中,均方根误差采用下式计算:

$$M=\pm\sqrt{\frac{1}{2n}\sum_{i=1}^nm_i^2},\tag{9}$$

从表 4 可见,计算的当量铀与标称当量铀的均方根误差均较小,最大为 5. 46%,最小为 3. 12%。也表明只有当仪器具有合适的 b_K/b_U 、 b_{Th}/b_U 和能谱阈值时,测得的 γ 总量才是一致的。

2.2 铀当量换算空气吸收剂量及误差分析

式(7)中,当量铀与空气吸收剂量存在正比关系时,通过求解系数 $p(p=0. 175k_2\times k_1\times b_U)$ 便可根据铀当量估算空气吸收剂量。假定仪器测得的铀当量正比于空气吸收剂量,通过求倍数关系并取平均值,可得系数 p 分别为 4. 757、4. 755、4. 739、4. 737。根据系数 p 将当量铀转换为空气吸收剂量率并求误差,见表 5。

个模型取均值(在本计量站 YB-II-ZN 不参与计算),计算模型铀当量乘以系数 p 后的空气吸收剂量率与标称值求相对误差。

本文采用上海申核仪器厂生产的 FD3013 环境 γ 辐射监测仪进行测试。该型仪器主要参数指标为:探测器为 $\Phi 30\times 50$ 的 NaI(Tl) 晶体,灵敏度不小于 $5\text{ cps}/10^{-6}$,能量阈值 40 KeV,量程 $(0\sim 39\ 999)\times 10^{-6}$,精度在置信度 95%时,一次读数的均方差和非线性误差不大于 10%,有 6 位显示,以 10^{-6} 、cps、 $\mu\text{Gy}/\text{h}$ 、cpm 为单位给出测量结果^[20]。该款仪器曾经在铀矿勘查中应用广泛(曾是核工业系统铀矿普

查中 γ 总量测量的指定仪器),但仪器并没有给出 b_K/b_U 、 b_{Th}/b_U 参数。

采用的3台仪器出厂编号分别为1316、1299、1320。经标定后在标准模型上的当量铀测值见表6。

求得3台仪器系数 p 分别为4.702、4.773、4.789。根据系数 p 将当量铀估算为空气吸收剂量率并求误差,见表7。

由表7可见,3台仪器的均方根误差的均值为3.52%,对比表1及表5,推测该型仪器 b_K/b_U 值的可能区间为(1.56,2.37), b_{Th}/b_U 值区间为(0.38,0.41)。

表 6 仪器标定后在模型上的测值

Table 6 Measured values on the model after instrument calibration

模型类别	当量铀 Q_{eU}/Ur		
	仪器 1316	仪器 1299	仪器 1320
YK-II-ZN	20.33	19.97	19.66
YU2-II-ZN	47.47	47.75	46.94
YU1-II-ZN	156.62	156.71	158.67
YTh-II-ZN	88.71	87.25	84.57
YM-II-ZN	132.23	126.47	131.08

表 7 根据系数将当量铀估算为空气吸收剂量率及误差

Table 7 Estimation of equivalent uranium as air absorbed dose rate and error based on coefficients

模型类别	实测当量铀估算为离模型 1m高度的吸收剂量率/误差			标称空气吸 收剂量率/ (nGy·h ⁻¹)
	1316	1299	1320	
YK-II-ZN	95.56/-3.13	95.32/-3.38	94.16/-4.55	98.65
YU2-II-ZN	223.16/5.49	227.93/7.74	224.78/6.25	211.56
YU1-II-ZN	736.39/4.25	748.02/5.89	759.89/7.57	706.4
YTh-II-ZN	417.1/-3.68	416.49/-3.82	405.01/-6.47	433.04
YM-II-ZN	621.71/-2.17	603.67/-5.01	627.76/-1.22	635.51
均方根误差/%	2.76	3.81	4.00	

3 实例分析

在郴州市桂阳县潘家村岩体地区、郴州市永兴县土桥村灰岩地区开展数据实测对比分析,测量同点位当量铀、 γ 能谱、空气吸收剂量率。所用仪器为FD3013(测量 γ 总量与空气吸收剂量率)和FD3022-I(测量 γ 能谱)。

测量前进行了仪器标定,得到了仪器本底,并经过仪器三性检查。测量时间为2022年5~10月,该段时间工作区天气长时间晴好,避免了雨水对地表 γ 射线的测量干扰。同点位的实测数据采集工作一般在10 min内完成。其中在郴州桂阳潘家村地区的测量按路线进行,郴州永兴土桥村进行的测量为网格测线测量。测量原野、公路数值,尽量选择地形变化小的平地,同时避开建筑物30 m以上。

3.1 图形相似度对比

图3展示了土桥地区 γ 能谱和铀当量估算的空气吸收剂量率及实测空气吸收剂量率。从图中可以看出,三者形态高度相似,表明在该地区转换计算有效。

3.2 数据误差分析

潘家村地区为典型的花岗岩地区,具有较高的放射性本底值,根据近年来在该区进行的1:5万能谱面积测量数据可知 C_K/C_U 均值为0.76,最大值为1.81; C_{Th}/C_U 均值为1.99,最大值为5.28。

永兴土桥地区地层以灰岩为主,其次为第四系,放射性本底较低。根据以往能谱测量数据, C_K/C_U 比均值为0.23,最大值为0.70; C_{Th}/C_U 均值为2.91,最大值为5.97。将当量铀和 γ 能谱转换为空

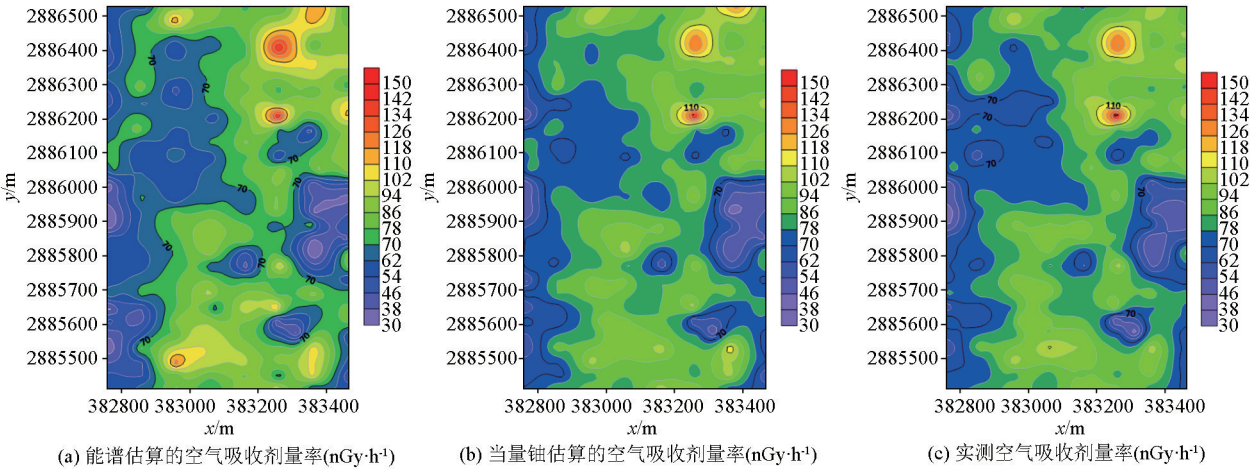


图 3 能谱、当量铀估算的空气吸收剂量率与实测空气吸收剂量率等值线

Fig. 3 Energy spectrum, equivalent uranium estimated air absorbed dose rate and measured air absorbed dose rate contour map

气吸收剂量并与同点位实测空气吸收剂量值进行误差分析,见表 8。

由表 8 可见,由能谱估算空气吸收剂量率的准确性较好,相对误差的平均值均低于 15%,与其他学者所做工作吻合。在 C_K/C_U 均值小于 1、 C_{Th}/C_U

均值小于 3 的情况下,由 γ 总量估算空气吸收剂量率的准确性也较好,基本与能谱估算空气吸收剂量率处于同一误差水平。实例表明本文研究方法取得的转换误差较小,可用于环境天然 γ 外照射水平评价。

表 8 当量铀、 γ 能谱估算的空气吸收剂量率与实测空气吸收剂量率之间的误差分析
Table 8 The error analysis between the estimated and measured air absorbed dose rates by equivalent uranium and γ energy spectra

估算方式	测量地点	测量点位数量	相对误差 / %			均方相对误差 / %
			最小值	最大值	平均值	
利用 Beck 公式将 γ 能谱估算空气吸收剂量	桂阳县潘家村	257	0.0045	46.00	9.80	9.08
	永兴县土桥村	244	0.22	45.24	12.94	9.26
利用 FD3013 测得的当量铀估算空气吸收剂量率	桂阳县潘家村	257	0.17	40.10	10.39	8.76
	永兴县土桥村	244	0.06	46.76	12.01	10.20

根据曹龙生等^[21]研究显示,中国 28 个省市土壤中放射性核素⁴⁰K、²³⁸U、²³²Th 的含量按面积加权平均值分别为 580.0、39.5、49.1 Bq/kg,则 C_K/C_U 、 C_{Th}/C_U 分别为 0.58、3.78。因此,在国内大部分地区使用 FD3013 型仪器得到的总量数据可以根据系数估算为空气吸收剂量率,估算误差与能谱估算误差处于相同级别。因此,本文的转换方法在国内大部分区域可以有效应用,为快速评价环境外照射提供了便利。

4 结论

本文通过理论梳理、公式对比求系数,建立起地面 γ 总量与空气吸收剂量率之间的联系;通过标准模型测试,给出了利用标准模型推导 γ 总量数据转换为空气吸收剂量率系数的方法,及判断仪器 b_K/b_U 、 b_{Th}/b_U 值区间的具体操作手段;通过两个地区的野外数据采集和误差分析,表明在本文所使用仪器参数和土壤放射性核素含量比值较低的情况下 γ 总量转换为空气吸收剂量率有效。主要结论有:

1)通过公式推导,总结了 γ 总量仪器 $b_K/b_U = 2.287$ 、 $b_{Th}/b_U = 0.430$ 时,测量的 γ 总量与空气吸收剂量率满足严格线性关系,因此 γ 总量仪器的 b_K/b_U 、 b_{Th}/b_U 值越接近这两个数值,测得的 γ 总量转换为空气吸收剂量率越准确。给出了利用 γ 总量在标准模型上标定,取系数并估算空气吸收剂量率和判别仪器 b_K/b_U 、 b_{Th}/b_U 大致范围的简便方法。利用 3 台 FD3013 仪器,在标准模型上,分析推测该型仪器 b_K/b_U 值的可能区间为 (1.56, 2.37), b_{Th}/b_U 值区间为 (0.38, 0.41)。

2)实例证明,在使用 FD3013 和 FD3022-I 仪器时,且 C_K/C_U 均值小于 1、 C_{Th}/C_U 小于 3 时, γ 总量、

γ 能谱估算转换的误差级别基本相同,均方根误差均小于 15%。

3)国内 C_K/C_U 、 C_{Th}/C_U 均值表明,很多地区可以利用 FD3013 仪器(或类似性能仪器)测得的 γ 总量数据估算空气吸收剂量率。该研究为利用铀矿普查数据,特别是利用 γ 总量普查数据转换为空气吸收剂量率,快速评价环境天然放射性提供了参考。

致谢:本文在成文过程中得到了湖南省电离辐射计量站宋平、上海申核仪器厂沈懿、核工业北京地质研究院杨龙泉协助,在此表示感谢!

参考文献 (References):

[1] Beck H L, DeCampo J, Gogolak C. In situ Ge (Li) and Na (Tl) gamma-ray spectrometry [R]. New York: Health and Safety Laboratory (AEC), 1972.

[2] IAEA. The use of gamma ray data to define the natural radiation environment [R]. Austria: IAEA, 1990.

[3] Grasty R L. Airborne gamma ray spectrometer surveying [R]. Vienna: IAEA, 1991.

[4] Podgorsak R B M B. Gamma-ray spectrometry in the environment [J]. Medical Physics, 1996, 23(2): 281.

[5] 沈正新, 胡明考. 航放数据用于评价天然辐射水平的可行性研究 [J]. 航测与遥感, 2002, 1(2): 43-49.

Shen Z X, Hu M K. Feasibility study on using airborne radiometric data to evaluate natural radiation levels [J]. Aerial and Remote Sensing, 2002, 1(2): 43-49.

[6] 侯振荣, 顾仁康, 胡明考, 等. 利用已有航测找铀资料和技术方法评价天然辐射水平 [J]. 辐射防护通讯, 2002, 22(3): 23-26.

Hou Z R, Gu R K, Hu M K, et al. Evaluation of natural radiation level by using existing airborne data for uranium prospecting [J]. Radiation Protection Bulletin, 2002, 22(3): 23-26.

[7] 王南萍, 黄英, 肖磊, 等. 伽马能谱测量在陆地伽马空气吸收剂量率评价中的应用 [J]. 物探与化探, 2004, 28(6): 512-514, 517.

Wang N P, Huang Y, Xiao L, et al. The application of gamma-ray

- spectrometry to estimationg terrain gamma-ray dose in air[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2004, 28 (6) : 512–514, 517.
- [8] 黄元清. 城市环境天然放射性评价研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2005.
- Huang Y Q. The Research on the evaluation of urban environmental natural radioactivity [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2005.
- [9] 刘合凡, 曾兵, 侯克斌, 等. 成都市土壤天然放射性核素的外照射水平估算研究[J]. *环境监测与预警*, 2009, 1 (2) : 37–40.
- Liu H F, Zeng B, Hou K B, et al. Estimation of natural terrestrial external exposure levels of nuclides in soils in Chengdu[J]. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2009, 1 (2) : 37–40.
- [10] 葛良全, 赖万昌, 黄元清, 等. 运用 1 : 50 000 化探数据评价天然放射性水平[J]. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 2008, 35 (3) : 323–327.
- Ge L Q, Lai W C, Huang Y Q, et al. Evaluation of natural radioactivity levels using 1 : 50,000 geochemical data [J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Natural Science Edition*, 2008, 35 (3) : 323–327.
- [11] 李金凤, 刘合凡, 徐健, 等. 运用 1 : 25 万化探数据进行区域天然放射性填图评价[J]. *铀矿地质*, 2016, 32 (2) : 110–116.
- Li J F, Liu H F, Xu J, et al. Regional evaluation and mapping of natural radioactivity with 1 : 250,000 geochemical data [J]. *Uranium Geology*, 2016, 32 (2) : 110–116.
- [12] 余根铨. 福建省环境地表 γ 辐射剂量率估算与人居环境安全性评价[J]. *物探与化探*, 2021, 45 (1) : 192–199.
- Yu G X. The environmental terrestrial gamma-radiation dose rate estimation and the living environment safety evaluation in Fujian Province [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2019, 45 (1) : 192–199.
- [13] 李家俊. 利用 γ 测量数据进行环境天然放射性水平调查研究 [C] // 1995 年中国地球物理学会第十一届学术年会论文集, 1995: 458.
- Li J J. Investigation of natural radioactivity level in the environment using gamma measurement data [C] // Proceedings of the 11th Annual Conference of Geophysical Society of China, 1995: 458.
- [14] IAEA. Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data [R]. Austria: IAEA, 2013.
- [15] 田义宗, 赵锋, 李钢. Beck 公式在滨海新区辐射环境本底调查中的验证[J]. *中国辐射卫生*, 2011, 20 (3) : 336–337.
- Tian Y Z, Zhao F, Li G. Verification of Beck's formula in the background investigation of radiation environment in Binhai New Area [J]. *China Radiation Health*, 2011, 20 (3) : 336–337.
- [16] Beck H L, Adams J A S, Lowder W M, et al. Physics of environmental gamma radiation fields [J]. *Natural Radiation Environment II*, 1972, 9 (1) : 120–125.
- [17] Tanner A B. Radon migration in the ground: A supplementary review [J]. *Natural Radiation Environment*, 1978, 15 (1) : 215–221.
- [18] ICRU. Gamma-ray spectrometry in the environment [R]. Sweden: ICRU, 1994.
- [19] 罗国祯, 支仲骥, 王树明, 等. 中国环境天然放射性水平 [M]. 北京: 地质出版社, 2005.
- Luo G Z, Zhi Z J, Wang S M, et al. Investigation of environmental natural radioactivity in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005.
- [20] 程业勋, 王南萍, 侯胜利. 核辐射场与放射性勘查 [M]. 北京: 地质出版社, 2005.
- Cheng Y X, Wang N P, Hou S L. Nuclear radiation field and radioactive exploration [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005.
- [21] 曹龙生, 杨亚新, 张叶, 等. 中国大陆主要省份土壤中天然放射性核素含量分布规律研究[J]. *东华理工大学学报: 自然科学版*, 2012, 35 (2) : 167–172.
- Cao L S, Yang Y X, Zhang Y, et al. Distribution pattern of radionuclides in the soil of mainland China [J]. *Journal of East China University of Technology: Natural Science Edition*, 2012, 35 (2) : 167–172.

Assessing radiation levels in the environment by converting total natural gamma radiation into the absorbed dose rate in air: A case study of measured data from Panjia Village, Guiyang County and Tuqiao Village, Yongxing County

LIU Jun-Feng¹, PENG Wen-Biao¹, TAO Feng¹, MENG Fan-Xin¹, WEI Guang-Jing¹,
LIU Hong¹, DENG Ju-Zhi², CHEN Hui², FU Chen², WANG Pei-Jian³

(1. Nuclear Geological Survey of Hunan, Changsha 410008, China; 2. School of Geophysics and Measurement-Control Technology, East China University of Technology, Nanchang 330013, China; 3. Airborne Survey and Remote Sensing Center of Nuclear Industry, Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: China has accumulated massive data on total gamma radiation (γ) from the prolonged extensive surveys of uranium deposits. However, there is a marked lack of studies on radioactive environment assessment using these data. Based on the measurement principles of total gamma radiation and the absorbed dose rate in air, this study ascertained the relationships of the absorbed dose rate in air with the total natural gamma radiation and nuclide content and, accordingly, established the relationship between total gamma radiation and the absorbed dose rate in air. Furthermore, it analyzed the effects of instrument parameters on the measurement error, concluding that there existed a strictly linear relationship between the measured total gamma radiation and the absorbed dose rate in the air

when $b_K/b_U = 2.287$ and $b_{Th}/b_U = 0.430$. Therefore, the b_K/b_U and b_{Th}/b_U ratios closer to both values correspond to more accurate absorbed dose rates in air converted from the measured total gamma radiation. Using the model of the Hunan Ionizing Radiation Measuring Station, this study calculated the coefficient for converting total gamma radiation into the absorbed dose rate in air, analyzed the error, and deduced the approximate uranium equivalent ranges of potassium and thorium in the instrument parameters. Furthermore, for the rock mass in Panjia Village, Guiyang County, Chenzhou City and the limestone area of Tuqiao Village in Yongxing County of the city, this study measured the total gamma radiation, gamma spectra, and absorbed dose rates in the air at the same stations. The results show that when the average nuclide content ratio C_K/C_U was less than 1 and C_{Th}/C_U ratio was less than 3, the absorbed dose rates in air estimated based on the total gamma radiation (measured using the FD3013 instrument) shared roughly the same error levels with those estimated based on energy spectra using the Beck formula, both yielding root mean square errors below 15%. As inferred from the average C_K/C_U and C_{Th}/C_U ratios of nuclides in China, the absorbed dose rate in air in most areas of China can be estimated using the total gamma radiation measured using an FD3013 instrument (or an instrument with similar performance). Overall, converting the total gamma radiation data from available extensive surveys of uranium deposits into effective absorbed dose rates in the air provides a methodological reference for rapid, large-area assessment of the external exposure level of natural radioactivity in the environment.

Key words: total gamma radiation; gamma spectrum; content of nuclides (uranium, thorium, and potassium); absorbed dose rate in air

(本文编辑:蒋实)