

我国居民室内钍射气(²²⁰Rn)的水平

雷淑洁, 李小亮, 张守志, 孙全富

中国疾病预防控制中心辐射防护与核安全医学所, 辐射防护与核应急中国疾病预防控制中心重点实验室, 北京 100088

摘要: 居室内钍射气(²²⁰Rn)及其子体照射对健康影响越来越受到关注,我国土壤中²³²Th 含量明显高于世界平均水平,使得我国传统建材中²³²Th 含量偏高,我国还有相当数量居民房屋材料是砖和泥土,导致我国居民住房内²²⁰Rn 水平高于²²²Rn。从国内外发表的有关²²⁰Rn 及其子体的报道,其产生的剂量可能比现在估算的世界平均值高。ICRP 50 号出版物推算²²²Rn 和²²⁰Rn 的平衡当量浓度分别为 15 Bq/m³ 和 0.5 Bq/m³,所导致的肺癌增加分别为每 100 万人年 32 人和 3.6 人。我国不同区域的地质构造和地质断裂构造不尽相同,西北黄土高原、西南地区的个旧市以及华南地区的阳江市是有代表性的钍射气高水平地区,这三个地区室内²²⁰Rn 浓度水平都高于²²²Rn,其中以黄土高原的窑洞内²²⁰Rn 浓度水平最高,²²⁰Rn 浓度最高可达²²²Rn 的 9 倍,窑洞中²²⁰Rn 及其子体所致有效剂量远高于²²²Rn 及其子体所产生的剂量。

关键词: 室内氡;钍射气;浓度;肺癌

中图分类号:X591 文献标识码:A 文章编号:1004-714X(2017)06-0740-05

Levels of indoor thoron (²²⁰Rn) concentrations in China

LEI Shujie, LI Xiaoliang, ZHANG ShouZhi, SUN Quanfu

Key Laboratory of Radiological Protection and Nuclear Emergency, China CDC, National Institute for Radiological Protection, Chinese Center for Disease Control and Prevention, Beijing 100088 China.

Abstract: The health effects of thoron (²²⁰Rn) and its daughters have attracted more and more attentions. The content of ²³²Th in soil in China is obviously higher than that of the world, which leads to high content of ²³²Th in building materials. In our country the materials of a considerable number of residential houses are brick and soil. So the level of ²²⁰Rn in the house is higher than that of ²²²Rn. Based on the papers of ²²⁰Rn and its daughters published at home and abroad, the actual radiation doses might be higher than the estimated average of the world. The balance equivalent concentrations of ²²²Rn and ²²⁰Rn calculated by ICRP 50 publication were 15 Bq/m³ and 0.5 Bq/m³. The increasing numbers of lung cancer were 32 and 3.6 per 1,000,000 person-years, respectively. The geological structure and geological fracture are different in different regions in China. The loess plateau in northwest region, the Gejiu city in southwest region and Yangjiang city in south China are typical high level of thoron areas. The levels of indoor ²²⁰Rn in the three areas are higher than that of ²²²Rn. The concentration of ²²⁰Rn in cave dwelling in loess plateau was higher than the other two areas. ²²⁰Rn concentration was up to 9 times of ²²²Rn in cave dwelling. The effective dose of ²²⁰Rn and its daughters in cave dwelling was much higher than that of ²²²Rn and its daughters.

Key words: Indoor ²²²Rn; ²²⁰Rn; Concentration; Lung Cancer

氡是世界卫生组织(WHO)公布的 19 种环境致癌物之一,国际癌症机构(IARC)将氡及其子体列为 I 类致癌因素。文献中的氡通常是指²²²Rn,有时也指²²⁰Rn 和²²⁰Rn,²²⁰Rn 即为钍射气。以前人们只注意到²²²Rn 及其子体对人体健康的危害,从人群的流行病学调查、细胞水平和分子水平进行了大量多方面的研究^[1]。近年来,钍射气(²²⁰Rn)及其子体的研究逐渐受到人们的关注,居室内²²⁰Rn 的照射是影响居民健康不可忽视

的辐射来源。

1 我国土壤中²³²Th 含量和室外²²⁰Rn 及其子体浓度

²²⁰Rn 是由地球中天然放射性核素²³²Th 衰变,即钍系产生。在土壤中²³²Th 含量较高的地方,²²⁰Rn 及其子体产生的有效剂量可能占很大的份额。在 UNSCEAR 2000 年的报告中^[2],²²⁰Rn 及其子体所致有效剂量占氡及其子体剂量的比例由 UNSCEAR 1993 年报告的 6% 提高到 9%。我国土壤和建材中²³²Th 含量偏高,许多房屋是砖木、砖混和泥土结构,一些矿物中²³²Th 含量也较高,所以²²⁰Rn 及其子体产生的剂量

作者简介:雷淑洁(1964-),女,北京人,副主任技师,从事放射流行病学研究与职业健康管理。
通讯作者:孙全富,E-mail sunquanfu@nirp.chinacdc.cn

可能比现在估算的世界平均值高。根据现有的数据估计, ^{220}Rn 及其子体对居民产生的剂量约为 ^{222}Rn 的 20%。中国和世界土壤中 ^{232}Th 的平均含量分别为 49 (1.0 ~ 438) Bq/kg 和 30 (11 ~ 64) Bq/kg^[3], 美国土壤中 ^{232}Th 的含量也仅仅是 35 Bq/kg。我国土壤中 ^{232}Th 的含量明显高于世界平均值, 最高可达 438 Bq/kg, 由此导致我国室内外 ^{220}Rn 浓度偏高, 表 1 列出我国 10 省市土壤 ^{232}Th 和室外 ^{220}Rn 及其子体水平,

这些省市土壤 ^{232}Th 含量为 (31.79 ~ 102.59) Bq/kg, 上海和广东省室外 ^{220}Rn 平均浓度分别为 (8.1 ± 1.89) 和 (22.1 ± 10.7) Bq/m³, ^{220}Rn 子体平均浓度为 (0.19 ~ 0.83) Bq/m³^[4-13]。表 2 列出了我国部分地区居民室内 ^{220}Rn 浓度及其子体平衡当量浓度^[14], 世界 ^{220}Rn 子体平衡当量浓度平均为 0.3 Bq/m³, 而表中所列的我国 7 个省市的测量值均高于世界平均值。其中平凉市的 ^{220}Rn 子体平衡当量浓度为世界平均值的 92 倍。

表 1 中国部分省市土壤 ^{232}Th 和室外 ^{220}Rn 及其子体水平

省市	发表年	土壤 ^{232}Th 含量 (Bq/kg)	^{220}Rn 浓度 (Bq/m ³)	^{220}Rn 子体浓度 (Bq/m ³)
南宁市 ^[4]	1982	56.94		0.83 ± 0.32 (0.15 ~ 3.52)
上海市 ^[5]	1986	49.62	8.1 ± 1.89 (5.9 ~ 13.6)	
武汉市 ^[6]	1987	52.20		0.06 (0.001 ~ 0.52)
广东省 ^[7]	1989	65.51	22.1 ± 10.7	0.51 ± 0.30
成都市 ^[8]	1992	52.05		0.29
陕西省 ^[9]	1992	47.90		0.50 ± 0.40 (LLD ~ 2.3)
抚州市 ^[10]	1999	102.59	18.11	0.59 (0 ~ 0.21)
湖北省 ^[11]	1989	51.23		0.19 (0.03 ~ 0.82)
北京市 ^[12]	2000	31.79		0.36 (0.04 ~ 1.1)
珠海市 ^[13]	2004			0.6 ± 0.2 (0.12 ~ 0.79)

表 2 中国部分地区居室内钍射气及其子体浓度^[3]

省市	发表年	取样方法	取样点数	^{220}Rn 浓度 (Bq/m ³)	^{220}Rn 子体平衡当量浓度 (Bq/m ³)	平衡因子
湖北	1989		37		0.25 (0.03 ~ 0.6)	
广东	1989	抓取样品	220	48.1	1.13	0.02
包头	1988	抓取样品	8		0.65	
陕西	1992	抓取样品	895		1.07	
北京	2000	累积取样	10	56.4 (< LLD ~ 106.5)	0.8 (< LLD ~ 1.7)	0.01
北京	2000	累积取样			1.41 (0.4 ~ 3.08)	
珠海	2000	累积取样	54	127.9 (25 ~ 827)	2.7 (0.03 ~ 4.7)	0.02
平凉	2000	累积取样	24	493.5 (5.6 ~ 1326.4)	27.7 (3.6 ~ 65.7)	0.056
香港					0.75	
世界					0.3	

潘自强根据近年来我国室内空气 ^{220}Rn 浓度实测结果^[3], 提出了我国室内 ^{220}Rn 浓度及其子体平衡当量浓度。平均值分别为 263 Bq/m³ 和 4.73 Bq/m³。 ^{220}Rn 的 263 Bq/m³ 浓度水平高于表 3 中美国等几个国家的浓度水平, 更远高于世界平均值。根据 UNSCEAR2000 报告, 在天然辐射对公众的年有效剂量中, 氡及其子体约占总有效剂量的 50%, ^{220}Rn 及其子体产生的有效剂量占氡及其子体剂量的比例为 9%。从国内外发表的有关 ^{220}Rn 及其子体的数据看, ^{220}Rn 及其子体产生的剂量要比现在估算的世界平均值高。从表 4 可见, 中国 ^{220}Rn 所致年有效剂量为 0.25 ~ 0.342, 所占氡剂量比例 22% ~ 27%, 远高于世界平均值 (7.7%) 和美国等国家。由此说明, 在我国开展氡

的危害研究中, 不仅要重视 ^{222}Rn , 也要关注 ^{220}Rn 危害和监测的研究。

2 不同地质结构地区民居室内的 ^{220}Rn 浓度

除了土壤中 ^{232}Th 的含量影响室内外 ^{220}Rn 的水平, 建筑材料类别与特征、建筑物的通风条件、季节、地表 γ 辐射水平等因素也影响 ^{220}Rn 的水平, 居室下的土壤可能是引起室内 ^{220}Rn 水平更高的原因之一。同时, 大气环境中 ^{220}Rn 和 ^{222}Rn 放射性活度浓度与地质构造年代、区域地质构造和地质断裂构造等有关。本文选择了西北黄土高原、云南锡都个旧市和广东省阳江辐射高本底地区, 比较这三个地区民居内 ^{220}Rn 和 ^{222}Rn 浓度水平。

表 3 世界部分国家室内²²⁰Rn 浓度^[14]

国家	样品数	测量方法	²²⁰ Rn 浓度(Bq/m ³)	Th/Rn
美国	25 房间	双滤膜法	0 ~ 30	0.23 ± 0.37
前西德	5 地下室 1 车库		7.6 0.7	
日本广岛	21 土壤房屋(距墙 20 cm)	被动累积测量杯	84.7 ± 15.6	3.3
日本中部地区	12 土壤房屋(距墙 20 cm) 8 钢筋水泥 7 其他建材	被动累积测量杯	159.7 ± 12.4 41.9 ± 3.3 22.9 ± 3.0	8.3 1.7 1.3
世界均值			3(2 ~ 20)	

表 4 世界部分国家²²⁰Rn 子体浓度与剂量^[15]

国家	²²⁰ Rn 子体浓度		年有效剂量 (mSv)	占氡剂量比例 (%)
	(Bq/m ³)			
	室内	室外		
世界	0.3	0.1	0.09	7.7
中国	0.84	0.4	0.25	22
中国	1.05	0.40	0.342	27
日本	0.72		0.6 ~ 2.2	12 ~ 78
韩国	0.99			15
美国	0.3			13
瑞典	0.5		0.1	4.8
希腊	0.9		0.29	13
希腊	1.38		0.39	27
罗马尼亚	1.0	0.2	0.26	16

2.1 西北黄土高原窑洞民居的²²⁰Rn 浓度 黄土高原分布于我国北方,即北纬 33 ~ 47°之间。黄土的矿物质成分有 60 多种,以石英构成的粉砂为主,占总重量的 50% 左右,因而黄土地层构造质地均匀,抗压与抗剪强度较高,在挖掘窑洞之后,仍能保护土体自身的稳定,为居民挖掘窑洞形成了天然的条件。黄土高原上的窑洞又称为黄土窑洞,由于受到所在地的自然环境、地貌特征和地方风俗的影响,窑洞有许多不同的类型。窑洞因为是生土建筑,氡析出率较高,受建筑特点的制约,通风一般不好,因此,窑洞民居内²²⁰Rn 和²²²Rn 的研究受到重视。

2000 年以来已有数篇关于黄土高原窑洞民居内²²⁰Rn 和²²²Rn 水平的调查报告(表 5),虽然这些报告的作者来自德国、日本和中国,采用的探测器也不尽相同,测量结果却非常相似^[16-21]。甘肃省平凉市和庆阳市、陕西省延安市和山西省吕梁市都地处黄土高原上,测量均采用被动累积氦-钍鉴别式探测器,在各种类型的居室内都测出了较高水平的²²⁰Rn,说明在黄土高原的窑洞和普通平房中既存在较高浓度的²²²Rn,也存在相当高浓度的²²⁰Rn。而且室内的²²⁰Rn 浓度均高于²²²Rn 浓度,²²⁰Rn 与²²²Rn 之比达 2 ~ 9 倍之多。

尚兵等^[16]采用 Rn - Tn 固体径迹探测器测量了平凉市窑洞内²²⁰Rn 和²²²Rn 浓度,发现室内²²⁰Rn 浓度是²²²Rn 的 7 倍,窑洞内²²⁰Rn 最高浓度达 1326 Bq/m³,与雷淑洁等^[21]报告的庆阳市窑洞内最高²²⁰Rn 浓度 1471 Bq/m³ 非常接近(表 3)。Wiegand 等^[17]在延安市采用瞬时主动探测器测量了土窑洞内的氡浓度,报告的瞬时²²⁰Rn 浓度(中位数)为 215 Bq/m³,²²²Rn 浓度为 92 Bq/m³。吕梁市和延安市^[18-20]的土窑洞、石窑洞和砖窑洞等几类窑洞内的²²⁰Rn 及其子体浓度大多高于²²²Rn,其中以土窑洞中²²⁰Rn 和²²²Rn 及其子体浓度最高,吕梁市土窑洞内²²⁰Rn 和²²²Rn 浓度分别为(145 ± 1.7) Bq/m³ 和(73 ± 1.5) Bq/m³。延安市土窑洞内²²⁰Rn 和²²²Rn 浓度分别为(185 ± 1.6) Bq/m³ 和(72 ± 1.5) Bq/m³。在各类窑洞中²²⁰Rn 的浓度为²²²Rn 的 2 ~ 4 倍。

在庆阳市基本保持原来的生土结构的地坑窑、半明半暗窑和明窑内²²⁰Rn 的平均浓度为²²²Rn 的 2 倍,地面上用砖盖的平房和用泥箍成的箍窑内²²⁰Rn 与²²²Rn 之比却高得多,平均浓度分别为后者的 9 倍和 4 倍^[20]。这可能与不同类型住宅中悬挂的探测器与墙壁之间距离不同有关,普通平房墙壁垂直,探测器距墙壁的距离很小为(0.008 ± 0.06) m,而窑洞的上部与顶部呈拱形,探测器距墙壁的距离要大得多,这三种窑洞的探测器与墙壁的距离为(0.14 ± 0.07) m。箍窑为(0.09 ± 0.03) m。²²⁰Rn 的半衰期仅有 56 s,其浓度分布在室内极不均匀,在近地面和墙面附近的浓度高,随着离发射源距离的增加而急剧下降。

2.2 云南个旧市郊居民居室内²²⁰Rn 和²²²Rn 及其子体浓度 个旧市位于东经 102°54' ~ 103°25',北纬 23°09' ~ 23°36',海拔 150 ~ 2740 m,属高山丘陵地带。个旧锡矿是一个以铜锡为主的超大型多金属矿床,既具有火山沉积成矿的特征,也具有花岗岩热液成矿的特征。雷淑洁等^[21]从个旧市郊区选取 50 户住宅的主卧室,采用氦-钍射气鉴别探测器,测量²²²Rn 和²²⁰Rn 浓

度,用沉积率装置测量²²⁰Rn 子体浓度.在长期被动测量的 49 间卧室的测量结果如图 1(a)~(c)所示.图 1(a)显示 49 间卧室室内²²²Rn 浓度的分布,其波动范围为 32~498 Bq/m³,算术平均值为 136 Bq/m³.图 1(b)显示 49 间卧室²²⁰Rn 浓度的分布,其波动范围为 39~7908 Bq/m³,算术平均值为 3297 Bq/m³.图 1(c)显示用沉积率探测器测量 29 间卧室的 EEC_{Tn} 的数据分布,其范围值为 2.0~23.9 Bq/m³,算术平均值

10.2 Bq/m³.此结果远远高于在其他国家的测量结果.依据所得结果,EECRn 平均值为 25.0 Bq/m³,EECTh 平均值为 10.2 Bq/m³,采用联合国原子辐射效应科学委员会推荐的剂量转换系数,估算了²²²Rn 和²²⁰Rn 及其子体导致的年剂量,分别为 1.6 和 2.9 mSv,²²⁰Rn 及其子体致居民平均有效剂量大于²²²Rn 及其子体的平均年有效剂量.由此可见,在当地开展氡致肺癌危险研究时,必须考虑²²⁰Rn 子体的剂量贡献.

表 5 我国西北农村民居室内²²²Rn 与²²⁰Rn 浓度(Bq/m³)

研究地点	发表年	居室类型	²²⁰ Rn 浓度	²²² Rn 浓度
平凉市 ^[16]	2000	窑洞	493.5(5.6~1326.4)	71.6(18.9~148.6)
延安市 ^[17]	2000	窑洞	215(中位数)	92(中位数)
吕梁市和延安市 ^[18]	2004	窑洞平房	153±1.9(10~865)	57±1.7(19~195)
延安市 ^[19]	2005	窑洞平房	171±1.8(24~760)	67±1.7(17~179)
吕梁市 ^[19]	2005	窑洞平房	128±2.0(10~665)	45±1.5(18~162)
咸阳市 ^[20]	2007	窑洞平房	264±2.1(30~1471)	82±1.7(21~300)

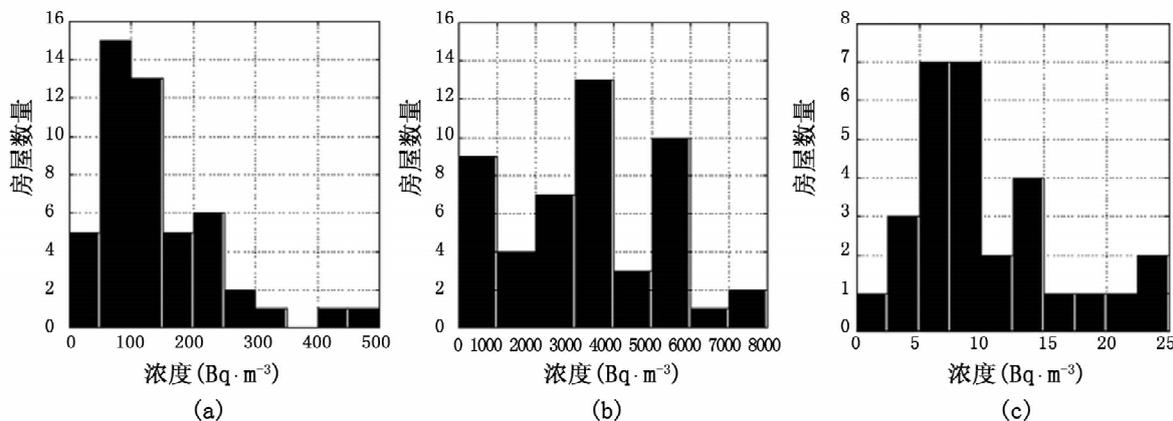


图 1 长期测量得到的²²²Rn(a)²²⁰Rn(b)及 EEC_{Tn}(c)的浓度分布^[22]

2.3 广东阳江辐射高本底地区室内外²²⁰Rn 和²²²Rn 及其子体浓度 阳江辐射高本底地区地处北纬21°47'~22°10',东经 111°30'~112°10'。高本底地区地质属侵入岩(火成岩),岩性为花岗岩,花岗岩中铀、钍和镭含量较高,特别是其富含独居石,使天然钍含量更高.由表 6 可见^[22],高本底地区室内平均²²⁰Rn 和²²²Rn 浓度分别是 95.16 Bq/m³ 和 49.61 Bq/m³,²²⁰Rn 浓度是²²²Rn 的 2 倍.对照地区室内空气平均²²²Rn 和²²⁰Rn 浓度分别为 18.1 和 12.4 Bq/m³,²²⁰Rn 浓度略低于²²²Rn 的浓度.室外²²⁰Rn 平均浓度略低于²²²Rn.两地区居民由于吸入²²²Rn 和²²⁰Rn 及其子体所致有效剂量,按 2000 年 UNSCEAR 报告推荐的单位时间吸入²²²Rn 和²²⁰Rn 及其子体有效剂量转换系数^[2],计算²²²Rn 和²²⁰Rn 及其子体所致高本底地区和对照地区居民的平均有效剂量分别是 3.28 mSv/a 和 1.03 mSv/a,进一步计算出高本底地区居民支气管上皮组织和肺的吸收剂量分别是 5.40 和 1.08 mGy/a,²²⁰Rn 及其子体致居

民的平均有效剂量为 1.75 mSv/a,超过了²²²Rn 和²²⁰Rn 合计剂量的 50%,由此可见,在阳江辐射高本底地区居民内照射剂量中²²⁰Rn 及其子体照射是不可忽视的重要来源。

3 小结

综上所述,我国土壤中²³²Th 含量明显高于世界平均水平,使得我国建材中²³²Th 含量偏高,加之目前我国还有相当数量传统居民住房是砖木、砖混和泥土结构,导致我国居民住房内²²⁰Rn 水平高于²²²Rn.根据 UNSCEAR 2000 报告,在天然辐射对公众的年有效剂量中,氡及其子体约占总有效剂量的 50%,²²⁰Rn 及其子体产生的有效剂量占氡及其子体剂量的比例由原来的 6% 提高到 9%。从国内外发表的有关²²⁰Rn 及其子体的数据看,其产生的剂量可能比现在的估算世界平均值高.但是过去人们却只注意到²²²Rn 对健康危害的研究,忽视了对²²⁰Rn 与人体健康关系的观察。

由于目前没有²²⁰Rn 的流行病学调查资料,只有 ICRP 50 号出版物(1986)^[23] 对于²²⁰Rn 的健康评价,应用²²⁰Rn 和²²²Rn 的浓度-剂量换算系数之比,假设²²²Rn

的危险度用于²²⁰Rn,推算²²²Rn 和²²⁰Rn 的平衡当量浓度分别为 15 和 0.5 Bq/m³ 所导致的肺癌增加分别为每 100 万人年 32 人和 3.6 人。

表 6 辐射高本底地区定点累积测量空气中²²²Rn 与²²⁰Rn 浓度(Bq/m³)^[22]

取样地点	测量次数	²²² Rn		²²⁰ Rn	
		平均值	范围	平均值	范围
高本底地区					
室内	118	49.61 ± 22.80	106 ~ 23.4	95.16 ± 57.56	674 ~ 27.3
室外	30	17.3 ± 12.4	48.3 ~ 7.4	9.3 ± 3.8	22.1 ~ 2.4
对照地区					
室内	24	18.1 ± 5.57	22.1 ~ 5.9	12.4 ± 3.3	33.4 ~ 3.0
室外	10	11.7 ± 0.63	18.9 ~ 8.1	8.1 ± 3.4	17.7 ~ 1.9

我国人口众多,地域广阔,地处东经 73°40' ~ 135°36',北纬 3°53' ~ 53°33',各地的地质构造年代、区域地质构造和地质断裂构造等又不尽相同。西北黄土高原、西南地区的个旧市以及华南地区的阳江辐射高本底地区各有一定的代表性,这三个地区²²⁰Rn 浓度水平都高于²²²Rn 的水平,其中以黄土高原的窑洞内²²⁰Rn 浓度水平最高,²²⁰Rn 浓度最高可达²²²Rn 的 9 倍。窑洞中²²⁰Rn 放射性活度浓度高是因为窑洞直接采用土壤修建,并且²²⁰Rn 在土壤的析出率明显高于砖和混凝土。一般而言,窑洞中²²⁰Rn 及其子体所致有效剂量,高于甚至远高于²²²Rn 及其子体所产生的剂量。我国窑洞民居主要分布在甘肃、山西、陕西、河南和宁夏等 5 省(区),河北省中部、西部和内蒙古中部也有少量分布。随着当地经济的发展,这些农村地区居住在窑洞中的人数逐年减少,但是现在还有很大数量的农民仍然住在各种类型的窑洞中,对²²⁰Rn 及其子体的监测方法以及²²⁰Rn 对健康的危害研究仍应给予足够的重视。

参考文献

[1] 张守志,李小亮,孙全富. 氡及其子体的健康危害效应[J]. 中国预防医学杂志,2011,12(8):724-732.

[2] 联合国辐射效应与科学委员会. 电离辐射与效应(UNSCEAR 2000 向联合国大会提交的报告)[M]. 太原:山西科学技术出版社,2002.

[3] 潘自强. 我国天然辐射水平和控制中一些问题的讨论[J]. 辐射防护,2001,21(5):257-268.

[4] 廖赤武,苏石,赵南翔,等. 南宁市居民室内空气²²²Rn、²²⁰Rn 子体水平[J]. 中华放射医学与防护杂志,1982,2(4):46-48.

[5] 丛树越. 呼吸中²²⁰Rn 浓度的测定[M]. ²²⁰Rn 及其子体卫生监测培训教材讲义:19-20. 上海放射医学研究所. 1986.

[6] 施锦华,陈昌华,吴坚,等. 武汉市室内、室外空气中 α 放射性气溶胶浓度测量[J]. 辐射防护,1987,7(5):371-375.

[7] 吴增汉,曾晋祥. 广东省居民室内空气氡、钍射气及其子体 α 潜能浓度水平及居民受照剂量[J]. 辐射防护,1989,9(6):454-459.

[8] 吴茂良. 室内外空气中²²⁰Rn 子体浓度测量[J]. 四川大学学报(自然科学版),1992,29(3):360-364.

[9] 范鑫,张业伟,郁惠莲,等. 陕西省氡浓度水平及内照射剂量研究[J]. 中华放射医学与防护杂志,1992,12(3):175-181.

[10] 陆玲,戴晓兰,陈敏. 环境氡平衡因子问题的探讨[J]. 华东地质学院学报,1999,22(2):147-155.

[11] 汪家兴,尚兵,熊云,等. 湖北地区室内外空气中氡及氡衰变子体浓度的调查[J]. 中华放射医学与防护杂志,1989,9(4):233-249.

[12] 尚兵,张林,陈斌,等. 中国部分地区²²⁰Rn 浓度的测量[J]. 中国预防医学杂志,2000,11(1):19-24.

[13] 郭秋菊,程建平. 珠海市环境空气中²²²Rn、²²⁰Rn 子体水平及土壤析出率测量[J]. 辐射防护,2004,24(2):110-115.

[14] 孙建永,郭秋菊. 有关室内²²⁰Rn 及其子体的几个问题[J]. 辐射防护,2001,21(2):83-88.

[15] 刘艳阳. 我国环境空气中²²⁰Rn 子体剂量水平初步估算[C]//第三次全国辐射与控制研讨会论文集.

[16] 尚兵,张林,陈斌,等. 中国部分地区²²⁰Rn 浓度的测量[J]. 中华预防医学杂志,2000,1(1):19-24.

[17] Wiegand J, Feige S, Xie QL, et al. Radon and thoron in cave dwellings (Yan'an, China)[J]. Health Phys, 2000, 78:438-444.

[18] Tokonami S, Sun QF, Akiba S, et al. Radon and thoron exposure for cave residents in Shanxi and Shaanxi provinces[J]. Radiat Res, 2004, 162(4):390-396.

[19] 孙全富,床次真司,侯长松,等. 窑洞内氡、钍射气水平及致肺癌的危险评价[J]. 中华放射医学与防护杂志,2005,25(1):1-5.

[20] 雷淑洁,床次真司,侯长松,等. 庆阳市窑洞民居内氡和钍射气水平调查分析[J]. 中华放射医学与防护杂志,2008,28(3):2731-275.

[21] 雷淑洁,床次真司,孙全富,等. 个旧市郊区室内氡、钍射气浓度和地面 γ 辐射水平初步调查[J]. 中国职业医学,2008,35(3):211-213.

[22] 袁龄龄,森岛弥重,沈泓,等. 阳江天然高本底地区空气中氡、钍射气及其子体致居民的剂量估算[J]. 中国辐射卫生,2002,11(2):65-68.

[23] ICRP. 室内氡子体的肺癌危险度 ICRP 第 50 号出版物[R]. ICRP, 1986.