

中国室内氡行动水平的研究

尚兵 贺青华 王作元 朱昌寿

【摘要】 目的 通过研究我国各类房屋中氡浓度的水平和分布,探讨适合我国国情的室内氡浓度的行动水平。方法 应用累积测量技术进行室内氡浓度的测量。结果 我国 18 个城市普通房屋 ($n = 2117$) 中氡浓度的算术平均值为 $44.1 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$, 其中超过 $100 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $200 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $400 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ 的房屋分别占测量总数的 6.5%、1.0% 和 0.1%。煤渣砖建筑物、窑洞和地下建筑物分别有 14.1%、16.7%、27.3% 和 2.3%、3.0%、4.0% 的房间中氡浓度超过 $200 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $400 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ 。我国 20 个省市实测的平衡因子均值为 0.49。结论 建议氡行动水平的单位由平衡等效浓度改为氡的实测浓度,取消新建住房和已有住房的划分,在未进行国家氡水平调查前,我国室内氡的行动水平可继续沿用 GB/T 16146-1995 给出的已有住房 $400 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ 的控制水平。

【关键词】 室内; 氡浓度; 行动水平

Studies of indoor action level of radon in China SHANG Bing, HE Qinghua, WANG Zuoyuan, et al. National Institute for Radiological Protection and Nuclear Safety, China CDC, Beijing 100088, China

【Abstract】 Objective To research the national indoor radon action level by studying level and distribution of radon in different type of dwellings. **Methods** Integral detection technology was used to measure indoor radon concentration. **Results** Arithmetic mean of indoor radon concentration was $44.1 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ ($n = 2117$) in 18 cities. The percentages of rooms in which radon concentration was above $100 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$, $200 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ and $400 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$, were 6.5%, 1.0% and 0.1%, respectively. In coal ash brick buildings, cave dwellings and underground buildings, the percentages of room radon concentrations above $200 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$, $400 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ were 14.1%, 16.7%, 27.3% and 2.3%, 3.0%, 4.0%, respectively. The equilibrium factor was 0.49 averagely from 20 provinces and cities. **Conclusion** For the unit of indoor radon action level, radon concentration should be used instead of EEQ (equilibrium equivalence radon concentration), and the distinction between the existing dwellings and newly built dwellings is to be abolished. Before a nationwide survey of radon level, the control value for indoor radon action level of $400 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ for existing houses of our country given by GB/T 16146-1995 can be used continuously.

【Key words】 Indoor; Radon concentration; Action level

在评价室内空气质量时,建筑物内氡的浓度是一项重要的指标。经过 60 多年的研究,特别是近 20 年对人类生活环境氡的调查及流行病学的研究,高水平氡暴露的危害已得到确认。ICRP (International Commission Radiological Protection, 国际放射防护委员会) 1987 年第 50 号出版物《室内氡子体暴露的肺癌危险》对室内氡可以诱发肺癌做了专门讨论^[1]。1993 年第 65 号出版物又对住宅和工作场所氡照射的控制提出了具体的建议^[2],即住宅内氡浓度的行动水平为 $200 \sim 600 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ 。若年停留时间取 7 000 h,平衡因子取 0.4,在这样的水平下居室内的连续照射可能产生的有效剂量为 $3 \sim 10 \text{ mSv} \cdot \text{a}^{-1}$ 。每个国家可根据自己的实际情况在此范围内选定行动水平的具体数值。此外,ICRP 还进行了两项改进:取消了新建住房和已建住房的区别,用氡的实测浓度取代了平衡当量浓度,并说明这里的氡仅指²²²Rn。ICRP 的报告已得到各国

的普遍认同,其原则已成为制定氡的辐射防护标准的主要依据。

一、各国室内氡浓度的行动水平

迄今为止,氡是 ICRP 对慢性照射给出行动水平具体数值范围的唯一核素。由于室内氡带有很大的普遍性,各国家都很重视。表 1 列出了 ICRP、IAEA、WHO 等国际权威机构和一些国家制定的室内氡浓度的行动水平。

由表 1 可见,大多数国家采取的标准基本相同,所不同在于有的国家区分了已建住房和新建住房。我国 1995 年制定的住房内氡浓度控制标准也做了类似的划分^[6]。另一个不同就是取值的差异。美国和卢森堡的氡行动水平是 $150 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$,低于 ICRP 和 IAEA 的推荐范围。加拿大和瑞士的氡行动水平高于推荐范围,分别为 $800 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $1\ 000 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ 。应该注意的是 ICRP 推荐范围为 $200 \sim 600 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$,本身的差异为 3 倍。在各国的实际应用中又增加了这种差异 $150 \sim 1\ 000 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$,最大值与最小值相差了 6.7 倍。但也有学者通过代价利益分析认为,行动水平的起点在 $296 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$

作者单位:100088 北京,中国疾病预防控制中心辐射防护核安全医学所(尚兵、王作元、朱昌寿);卫生部卫生法规与监督司(贺青华)

比较合适^[6]。考虑到上述因素,德国、挪威、俄罗斯等国规定了 2 个建议水平,即 200~400 Bq·m⁻³采取简单降低措施;>400 Bq·m⁻³采取正当的较高费用的降低措施^[5]。捷克则规定了 4 个建议水平,200~400 EEC Bq·m⁻³采取简单降低措施,300~600 EEC Bq·m⁻³采取较高费用的措施,600~2 000 EEC Bq·m⁻³采取进一步复杂的降低措施;>2 000 EEC Bq·m⁻³不允许居住。

表 1 室内氡浓度的行动水平(Bq·m⁻³)

国家或机构 (发布时间)	已建住房 (Bq·m ⁻³)	新建住房 (Bq·m ⁻³)	备注	参考文献
ICRF(国际放射防护委员会 1993)	200~600	未设	年均浓度	[2]
IAEA(国际原子能机构 1994)	200~600	未设	年均浓度	[3]
WHO(世界卫生组织 1988)	200	未设	年均浓度	[4]
CEC(欧洲共同体委员会 1990)	400	200	行动水平	[5]
美国 EPA(1986)	150	150	行动水平	
澳大利亚(1995)	200	200	长期平均浓度	
加拿大(1989)	800	800	正常生活下的 年均浓度	
俄罗斯	400	200		
英国(NRPB 1990)	200	200	附加 6 个建议	
比利时(1995)	400	未设		
希腊(1994)	400	200		
卢森堡(1992)	150	150		
挪威(1988)	200	200		
奥地利(1992)	400	200		
芬兰(1992)	400	200		
捷克	600	300	年均 EEC 浓度	
德国 SSK(1994)	250~1000	250	简单行动水平	[6]
瑞典(1988)	400	200	管理水平	
瑞士(1994)	1000	400	有效补救措施	
中国(1995)	200	100	年均 EEC 浓度	[7]

各国在制定标准前通常要进行大规模调查,根据高氡房屋的比率决定其具体取值。日本早在上世纪 80 年代初就开展了氡的研究,进行了两次全国范围的调查,仍认为条件不成熟尚未制定氡的国家标准。另外法国、意大利、荷兰等也没有制定氡的国家标准。由于环境中氡浓度本身有很大差异,加之各国的地质状况、气象条件、生活习惯、房屋结构、经济水平、文化背景、教育程度和公众的承受能力等诸多方面有很大的不同,增加了氡行动水平取值和执行的难度。以美国为例,对一地区 314 所房屋进行筛选测量后发现,有 55 所氡浓度超过 EPA 的行动水平。在这些超标住户中仅有 9 户(占 16%)表示愿意采取降低氡措施^[6]。与其他辐射防护标准不同的是,室内氡的控制标准是推荐性标准,氡的行动水平是建立在自愿执行基础上的。因此,在制定我国氡的控制标准时,注意研究我国的具体情况是非常有必要的。

二、我国有关室内氡的控制标准和在实际实施中遇到的问题

1995 年我国颁布的住房内氡浓度控制标准,提出了室内氡浓度 100 EEC Bq·m⁻³和 200 EEC Bq·m⁻³的行动水平。另外 GB 16356-1996 地下建筑氡及其子体控制标准^[8]和 GB 16367-1996 地热水应用中的放射性防护标准^[9]也给出了一些特定场所室内氡浓度 200~400 EEC Bq·m⁻³的控制值。这些标准是等效采用 ICRP 有关建议,根据我国的实际调查结果和国情制定的,但在执行过程中也发现了一些问题。

1. 我国现行国家标准氡浓度的单位采用的是年平衡当量氡浓度(EEC Bq·m⁻³)。这是早期氡浓度限值常用的单位。1993 年 ICRP 第 65 号报告中用氡的年平均实测浓度取代了平衡当量浓度^[2]。其原因可能是直接测量氡气的方法比较成熟且操作简单,易于普及,而氡子体在连续测量方面受到一定的限制。另外这项标准是面向公众的,平衡当量氡浓度在概念的理解和解释上也有一定的难度。目前我国绝大多数的测量也是直接测量氡气的浓度,因此在氡浓度选用的单位上应尽快与国际接轨。

2. 如何区别已建和新建住房,以往的标准都没有再做进一步的说明。而实际执行过程中,需要进行监测和评价的建筑物都是修好以后的已建房屋。另外我国已制定了新建低层住宅建筑设计与施工中氡控制导则(GB/T17785-1999)和民用建设工程室内环境污染控制规定(GB/50325-2001)等相关标准,从选址、设计、施工和验收上对新建筑物进行严格的规定。基于上述原因在我国室内氡标准中取消新建住房和已建住房的划分已势在必行。

3. 如果取消新建住房和已建住房的划分,我国所采用的行动水平如何取值?是沿用原来的标准,还是需要进行调整?如果沿用原来的标准,从 EEC 浓度过渡到氡气的浓度平衡因子(F)如何选用?这些也是迫切需要解决的问题。

三、室内氡行动水平的研究

1. 室内氡浓度的调查及其水平分布

在制定室内氡的控制标准时,国家氡水平的调查是最直接最重要的依据。用累积氡探测器对我国一些城市(1991~2002 年)2117 间普通住房和部分地区煤渣砖建筑物、地下建筑物和窑洞中的氡浓度进行为期 3~6 个月的测量。各类房屋的测量结果和水平分布列入表 2、表 3。

由表 2 可见,18 个城市普通房屋中氡浓度的算术平均值为 44.1Bq·m⁻³,其中氡浓度超过 100 Bq·m⁻³、200 Bq·m⁻³和 400 Bq·m⁻³房间数分别为 139 间、20 间和 2 间,占测量总数的 6.5%、1.0%和 0.1%。

表 3 列出了我国部分煤渣砖建筑物、地下建筑和窑洞中的氡浓度的测量结果。我国南方 6 个地区 433 间煤渣砖建筑物中氡浓度的均值为 127 Bq·m⁻³,是普通建筑物的 2.9 倍。其中有 14.1%和 2.3%的房间中的氡浓度超过 200 Bq·m⁻³和 400 Bq·m⁻³。甘肃窑洞中氡浓度的均值为 142 Bq·m⁻³,与 Wiegand^[11]在延安 32 所窑洞中测量的 141 Bq·m⁻³的均值相吻合。窑洞和地下建筑物均有相当数量的房间中氡浓度超过 200 Bq·m⁻³和 400 Bq·m⁻³。

从初步测量结果可以看出普通住房氡浓度超过 400、200

和 $100 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ 的百分比呈对数增长,如果将室内氡浓度的行动水平定在 $400 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$,约有 30 万所房屋需用采取行动水平。降低 50%即选择 $200 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$,需要采取行动水平的房屋会增加 10 倍。

表 2 我国部分地区室内氡浓度($\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$)

地点	房间数	平均值	最大值	$> 100 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$		$> 200 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$	
				N	F (%)	N	F (%)
北京	229	44.2	249	17	7.8	1	0.5
青岛	98	44.8	205	5	5.1	2	2.0
太原	119	28.3	87.4	—	—	—	—
蚌埠	320	21.3	122	1	0.3	0	—
拉萨	44	44.6	125	1	2.3	0	—
武汉	56	25.7	170	1	1.8	0	—
上饶	150	82.1	596	38	25.3	6	4.0
黄山	12	49.5	96.6	—	—	—	—
海口	65	15.9	47.2	—	—	—	—
广州	250	73.6	248	40	16.0	6	2.4
深圳	189	35.3	332	2	1.1	1	0.5
珠海	221	63.4	771	27	12.2	3	1.3
汕头	10	59.5	87.8	—	—	—	—
郑州	285	28.5	133	2	0.7	0	—
平凉	31	61.5	149	2	6.5	0	—
贵阳	12	36.8	82.9	—	—	—	—
上海	13	20.6	58.5	—	—	—	—
乌鲁木齐	13	63.4	278	2	15.4	1	7.7
全国	2117	44.1	596	138	6.5	20	0.9

表 3 我国部分煤渣砖建筑物、地下建筑和窑洞中的氡浓度($\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$)

类型	地区	样品数	均值	最大值	> 200		> 400	
					N	F (%)	N	F (%)
煤渣砖建筑物	江西、安徽等 6 地区	433	127	1075	61	14.1	10	2.3
窑洞	甘肃	66	142	676	11	16.7	2	3.0
地下建筑	北京	64	72.1	590	5	7.8	4	6.3
	沈阳 ^[10]	113	105.6	498	30	27.3	8	11.2
	重庆 ^[10]	51	57.6	616	2	7.9	1	4.0

另外值得注意的是一些土木结构的传统建筑物中高氡浓度的房屋也占有相当比例。以陇东为例,该地区约有 410 万人口,其中 30%居住窑洞中。如按 3%的房屋超过 $400 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ 计算,约有 3.7 万人居住的房屋需用采取行动水平。另外,我国陕西、山西、宁夏和新疆等地区都有一定数量的窑洞和土房,而这些地区的经济又相对落后。如何对居住环境,采用简单易行的方法,降低这类房室中的氡浓度也是今后需要研究的课题。

以上的调查仅仅是初步的。通常认为,国家氡水平调查的抽样率应 \geq 万分之一。据文献 [6] 报道,1997 年我国房屋的总数超过 300 百万所。而笔者调查的房屋数占我国房屋的总数不到十万分之一。近几年,随着住房制度的改革和房地产业的迅速发展,我国居民住宅的数目还在大幅度提高,因此在我国开展国家氡水平的调查十分必要。

2. 我国部分住宅中的平衡因子(F)

表 4 列出了我国的 20 个省(包括台湾在内)市平衡因子的实测结果。根据文献报道的 5 489 间房间实测的 F 值计算得到的全国均值为 0.49,与文献 [5] 报道的 $0.47^{[12]}$ 接近,但比 ICRP 给出的 0.40 的世界平均值要高。其原因可能与我国房间中的通风率、气溶胶浓度以及选用的测量方法等因素有关。如果我国室内氡的平衡因子取 0.5,按 GB/16146-1995 已建住房氡的行动水平 200 EEC 计算,氡的浓度为 $400 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

表 4 我国不同地区平衡因子的实测结果

地区	样品数	平衡因子	文献	地区	样品数	平衡因子	文献
黑龙江	413	0.44	[6]	江苏	486	0.42	[6]
辽宁	397	0.49		江西	343	0.54	
吉林	51	0.67		广东	220	0.54	
山西	204	0.50		浙江	209	0.44	
内蒙	277	0.31		福建	338	0.49	
甘肃	369	0.38		四川	162	0.43	
陕西	837	0.60		湖南	78	0.51	
宁夏	149	0.48		湖北	380	0.53	
山东	46	0.47		西藏	160	0.57	
上海	120	0.50		台湾	250	0.49	[13]
全国	9967	0.47	[12]	总计	5489	0.49 ± 0.08	本文

四、建议

1. 氡行动水平的取值

根据我国室内氡浓度现有的调查资料,高氡浓度建筑物的数量分布以及国民经济状况,我们认为目前我国室内氡浓度的行动水平可继续沿用 GB/T16146-1995 给出的已建住房的水平,单位应改为氡的实测浓度,即 $400 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ 。其理由:(1)该值为 ICRP 建议的中值,与发达国家制定的控制标准基本接近。(2)我国尚未开展国家氡水平的调查,更改行动水平限值缺乏直接的科学依据。(3)从初步调查结果看,我国室内氡浓度超过 $200 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $400 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ 的房间数相差 10 倍。如果将室内氡浓度的行动水平定得太低,需要付出的经济代价和涉及的人口数可能会过高。(4)目前我国对于降低高氡建筑物的技术方法研究甚少,特别是对于那些不易通风的建筑物,如何降低里面的氡浓度缺乏相应的技术措施。

综上所述,我们认为现阶段我国氡治理的重点应放在那些由于人为活动造成室内氡浓度增高的建筑物上,如煤渣砖房屋、地下建筑物等。同时也要努力降低生活在较高天然辐射本底地区和窑洞类建筑物中居民的受照剂量。要尽快开展降氡技术研究,借鉴国外的先进经验,探讨出一条符合我国国情的氡控制与治理的道路。

还需要指出的是行动水平不是一个绝对安全与不安全的界限,也不是辐射防护的最终目的。辐射防护最优化原则是将任何不必要的照射降低到可合理达到的尽可能低水平。减少室内氡的照射仍是我国辐射防护的一项长期的任务。经济发达的地区可视本地区的具体情况制定相关的规

定,以最大限度的保护居民的健康。

2. 开展代价利益分析

在制定辐射防护的标准中,需要考虑辐射防护最优化的原则。基本方法是进行代价利益分析,找出辐射防护的代价(protection cost)和辐射危害的代价(detriment cost)之和为最小的方案。一些发达国家和地区在公众氡补救行动方面所用花费的研究表明:每人每降低 1 Sv 剂量的费用美国为 5.1 万美元^[14],英国为 1 万英镑^[15],香港为 12 万港币^[16]。氡补救行动的花费与需要采取补救行动房屋的数量和居住人数有关。我国建筑物的数量居世界首位,人口基数巨大,而且地域广阔,天然辐射本底的差异相当大,如果将氡的行动水平控制的过严,可能会花费相当大的精力和财力才能达要求,从辐射防护最优化原则考虑,这样做是不合算的。因此建议我国开展公众氡补救行动花费方面的研究,制定合理的、符合我国国情的对策。

3. 测量方法和结果评价的规范化

室内氡的照射已引起社会广泛关注。室内氡浓度的测量和评价在我国有着很大的潜在市场。目前许多实验室和研究所开展了此项服务,一些商业性的测氡公司也应运而生。特别需要说明的是氡是天然放射性气体,其来源、迁移和变化等与其他挥发性气体不同。环境中氡气的浓度很不稳定,受到很多因素的影响。氡本身也会自发地衰变并产生一系列短半衰期的放射性子体。由于其特有的规律,对选点、采样、测量以及结果评价等有着特殊的要求。不同的测量仪器和测量方法有不同的要求和局限性。如果使用不当,得到的结果会与实际情况有很大出入。用这样的结果评价房屋中的氡水平会导致严重的偏离,甚至会在社会上引起恐慌。建议尽快制定我国室内氡测量和结果评价的标准化程序,建立资格认定体系,确保测量、评价结果的科学性和可靠

性。

参 考 文 献

- 1 ICRP 50 号出版物. 室内氡子体暴露的肺癌危险. 1987.
- 2 ICRP 65 号出版物. 住宅和工作场所氡-222 的防护. 北京:原子能出版社,1997. 21-24.
- 3 IAEA BSS. 国际电离辐射防护和辐射源安全的基本安全标准. 1997.
- 4 World Health Organization. Air quality guidelines for Europe. Copenhagen :WHO, 1998. 23.
- 5 Gustav A kerblom. Radon Legislation and National Guidelines SSI report No. 99 :18 July 1999. ISSN 0282-4434.
- 6 潘自强. 辐射防护的现状与未来. 北京:原子能出版社,1997.
- 7 GB/T16146-1995. 住房内氡浓度控制标准.
- 8 GB16356-1996. 地下建筑氡及其子体控制标准.
- 9 GB16367-1996. 地热水应用中的放射性防护标准.
- 10 王功鹏. 地下建筑中氡的水平. 第二次地下氡标准研讨会交流资料, 1988.
- 11 Jen Wiegand, Sebastuan Feige, Xie Qiuling et al. Radon and thoron in cave dwellings(Yan 'an, China.) Health Phys 2000, 78 438-444.
- 12 任天山. 室内氡的来源水平和控制. 辐射防护 2000 20 291-298.
- 13 Chen CJ. Islandwide survey of radon and γ radiation levels in Taiwanese homes. The 1992 international symposium on radon and radon reduction technology. 1992. 22-25.
- 14 Baum JW. NUREG-CR-6216 BNL-NUREG-52413. 1994.
- 15 Robb JD, Wrixon AD. Revised estimates of the monetary value of collection dose. Chilton :NRPB :NRPB-57 :1988.
- 16 Leung KC, Tso MYW, Ho CW. Radon action level for high-rise buildings. Health Phys, 1999, 76 537-543.

(收稿日期 2002-11-18)