

# 环境氡污染与人体健康及防护

江西省劳动卫生职业病防治研究所 万玉松综述

中国医学科学院放射医学研究所 刘国范审

**摘 要:** 本文就生活环境中氡的污染情况、人体吸入氡及子体后其在呼吸道内的沉积转移规律、对机体的损伤机理、人体受照剂量及危害程度等进行了综述,并对氡的防护原则、防护标准以及防护方法和措施作了介绍。

地球上到处都存在天然放射性核素。它们衰变时释放出 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 射线,使人类健康受到不同程度的影响。在天然系列放射性元素中,放射性气体氡及其子体对人体辐射剂量约占环境辐射总剂量的一半<sup>[1]</sup>。因此,氡及其子体对人体健康的危害及其防护应引起重视。

## 一、氡的来源

室外空气中的氡大都来自土壤中的镭,此外,海洋、植物、地下水、天然气、煤、建筑材料等都会向大气释放一定量的氡。由于地区差异,各地大气中的氡浓度也不尽相同,一般在 $0.2 \sim 9.6 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ 浓度之间<sup>[2]</sup>。

室内空气中氡的来源除由室外空气带入外,主要来自建筑物下面的土壤、建筑材料、生活用水、天然气和煤。一般情况下,建筑物下面的土壤发射氡是室内氡的主要来源<sup>[3]</sup>。当建材中镭含量超过 $500 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,则来自建材中的氡就成为室内氡的主要来源。由于室内空间小,空气流通受阻,易积累氡,因此,室内氡普遍要比室外氡浓度高1~2个数量级<sup>[4]</sup>。

## 二、氡对环境的污染

由于氡是惰性气体,因此它易从物体表面逸出而进入大气,并通过扩散、迁移而污染空气。其浓度易受气温、气压等气象因素的影响。特别是在一定的固定空间,受通风

条件影响甚大,一般可波动几倍到一个数量级<sup>[5]</sup>。造成氡气污染环境主要有以下几种情况。

1. 由于氡由铀、钍衰变而来,所以,一般来说凡铀钍含量高的环境其氡浓度就高。毋庸置疑,铀钍厂矿以及其它伴生放射性核素的金属、非金属矿山是受氡气污染最严重的地方。

2. 局部地区地壳中岩石、土壤,水体中的放射性较一般地区高,即所谓高本底地区,易受氡的污染。如美国佛罗里达磷酸盐矿地面上的住房,其室内氡平均浓度高达 $160 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ <sup>[6]</sup>,在高氡水地区,芬兰赫尔辛基室内氡浓度为 $360 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ ,加拿大室内平衡当量氡浓度为 $70 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ <sup>[2]</sup>。瑞典室内氡调查结果为 $120 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ ,为其它国家和地区的2~3倍。

3. 当前一些国家为了节省能源而努力使房屋密闭,并减少通风率。已经表明,这些行动导致室内氡浓度增高。1977年,瑞典全国范围内氡调查发现,由于节能及其它原因,全国平均室内氡水平比1956年升高4倍<sup>[2]</sup>。

4. 随着工业的发展,利用工业废渣做建筑材料已逐渐增多,而这些废渣中往往含有比较高的镭。如铀矿开采的废石、燃煤电厂的飞灰和煤碴,炼铝厂的赤泥以及磷肥厂的磷石膏等被利用做建筑材料,都会使室内环境氡浓度增高。美国科罗拉多利用铀工业

生产的某些废品作为一些房屋下面的填料,致使室内氡增至 $200\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上<sup>[6]</sup>。我国某地用铀矿废石做地基的住房室内氡为 $79\sim 273\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ,用石煤渣砖建房的室内氡浓度为 $169\sim 300\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ <sup>[7]</sup>。

5. 地下建筑,如旅游区的溶洞,备战用的人防工程。由于地下场所一般氡析出量多,加之通风不良,易导致环境氡浓度上升,一般比地面建筑室内高 $5\sim 10$ 倍<sup>[8]</sup>。而天然溶洞一般可高出 $2\sim 3$ 个数量级,如匈牙利为 $3\,330\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ 、日本为 $5920\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ 、美国为 $2\,220\sim 7\,400\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ <sup>[9]</sup>。在我国,随着经济的发展,利用人防工程兴办商店、旅社、工厂及用做餐厅、办公室、图书馆和娱乐场所的日益增多。因此,将有越来越多的工作人员受其影响,而溶洞则主要是导游和维修人员。

### 三、氡对人体健康的影响

#### 1. 氡及其子体在呼吸道内的沉积和转移

氡及其子体被人体吸入后,在呼吸道内的沉积率受颗粒大小、肺活量、呼吸频率、鼻腔阻留等因素的影响。Altshuler的实验表明,吸入离子型子体主要沉积在叶支气管、细段支气管和终末支气管;结合型子体主要沉积于终末支气管和肺泡。其过程是一个动态过程,由于肺组织的清除力及气管、支气管各部纤毛运动的作用,使氡及子体由原始沉积部位逐渐转移。氡的前期子体均为短寿命,在短期内即衰变完毕。但长寿命的子体 $^{210}\text{Pb}$ 和 $^{210}\text{Po}$ 则可在器官组织内积累,并主要沉积在肺和骨骼及网状内皮系统。Haleyman RB 检查铀矿工人的骨标本发现,骨中 $^{210}\text{Pb}$ 的来源43%是吸入大气中的短寿命子体。

#### 2. 对机体的损伤

氡对机体的危害主要是它的短寿命子体,根据Torrey的资料,当氡与其子体达

到平衡后、作用于机体的辐射剂量99.9%来自子体。氡及其子体为 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 混合辐射源,其中 $\alpha$ 粒子为主,因此,它们对机体的损伤主要是 $\alpha$ 粒子的作用。一般认为,支气管上皮细胞的癌变始于基底细胞。因为当气管和支气管上皮细胞厚度与粘液厚度之和小于 $\alpha$ 粒子的射程时,基底细胞将受到 $\alpha$ 粒子的电离辐射作用。叶支气管上皮约有 $2/3$ 的部份是在 $^{214}\text{Po}$ (RaC')发出的 $\alpha$ 粒子射程内,大约有 $1/5$ 的部份是在 $^{218}\text{Po}$ (RaA)发出的 $\alpha$ 粒子射程内。氡及其子体的远期效应主要是肺癌。一些学者对铀矿工人进行大量的流行病学调查及死因统计分析,发现肺脏原发性癌的发病率较高,多属未分化的小细胞型癌,并以支气管肺癌最为常见。

#### 3. 氡及子体进入人体后人体所致剂量

人体吸入氡气后在体内分布比较均匀,由于惰性气体在体内溶解度极低,因此吸入氡所产生的剂量与子体相比通常很小。但吸入氡子体会使呼吸系统受到不均匀照射,非结合态子体主要在气管,支气管等上呼吸道沉积,致使其表皮中的基底细胞受到最大剂量;结合态氡子体大部份则沉积在肺区。根据UNSCEAR1982年报告给出的建议值:吸入1焦耳氡子体释放的 $\alpha$ 潜能,使呼吸系统受到的剂量当量,室内、室外和矿井分别是 $2.0$ 、 $3.0$ 、和 $2.5\text{Sv}\cdot\text{J}^{-1}$ 。但也可因年龄、性别、体重、活动量不同,其所受辐射剂量有所不同。如吸入等量的氡子体,6岁儿童受到的辐射剂量大约是30岁成年人的2.5倍<sup>[10]</sup>。按ICRP50号出版物的建议:氡子体的照射量定义为吸入空气中氡子体浓度的时间积分<sup>[11]</sup>。那么,当氡子体产生的照射量为1WLM或 $1\text{Bq}\cdot\text{a}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,肺部可能受到的剂量当量职业人员为 $3.5\times 10^{-5}\text{Sv}$ ,公众成员室内、室外分别为 $6.1\times 10^{-6}\text{Sv}$ 、 $3.1\times 10^{-6}\text{Sv}$ 。但根据最近几年对室内外气溶胶粒子分散度(AMD)的研究发现:室外AMD比1982年假定的 $0.1\mu\text{m}$ 要大。西德报

道为 $0.39\mu\text{m}$ , 美国为 $0.09\sim 0.37\mu\text{m}$ , 平均 $0.16\mu\text{m}$ 。因此, UNSCEAR1988年报告中对室内外气溶胶的AMD均采用 $0.2\mu\text{m}$ , 这就导致了室内外氡子体有相同的剂量转换因子, 即室内外每单位平衡当量浓度(EEC)对支气管的吸收剂量率相同, 为 $7\text{nGy}/(\text{Bq}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3})$ , 有效剂量当量率则为 $10\text{nSv}/(\text{Bq}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3})$ 。

#### 4. 辐射危险度

大量研究结果表明, 吸入过量氡子体会使肺癌发病率升高。Josef报道了对铀矿、铁矿和页岩粘土矿矿工的流行病学调查结果, 氡子体暴露量低于50WLM时, 肺癌的发病率明显增加<sup>[12]</sup>。美国报告, 暴露量为120~359WLM时, 肺癌发病率为期望值的4.7倍。捷克自1948年开始对铀矿工随访26年, 发现在低暴露量人群中氡子体致肺癌危险度为 $3\times 10^{-4}\text{WLM}^{-1}$ ; 累积暴露量为100~199WLM时, 每1000名铀矿工平均增加46.6名肺癌。我国云锡矿老厂矿工井下暴露量为800~1600WLM, 肺癌增加28.2倍, 发病工龄为24年。

在估算氡子体照射的超额肺癌危险度时, 一般基于以下事实: 根据NCRP78号报告的数据, 氡子体引起肺癌的最高发病率为 $45\times 10^{-6}/(\text{WLM}\cdot\text{a})$ , 平均值为 $10\times 10^{-6}/(\text{WLM}\cdot\text{a})$ <sup>[13]</sup>, 氡子体照射后诱发癌症的潜伏期为5~7年, 由细胞异常发展到肿瘤约需5年时间。Fabrikant介绍了由BEIR IV和其它科学委员会在过去十年研究得出的终生氡子体照射超额肺癌死亡危险度的范围值 $[\times 10^{-6}/(\text{人}\cdot\text{WLM})]$ <sup>[14]</sup>; BEIR IV: 350(1988年)、ICRP: 170~230(1987)、360(1990年); EPA: 115~400(1986年~1988年)、360(1989年); NCRP: 130(1984年); BEIR III: 730(1980年); UNSCEAR: 200~450(1977年)、150~450(1988年)。

## 四、氡的防护

### 1. 防护标准

氡的辐射危害是目前辐射防护工作中的重要问题。氡及其子体不仅给广大矿工带来危害, 也影响了广大公众的健康。为了保障放射工作人员和广大公众及其后代的健康与安全, 许多国际辐射防护组织和发达国家都提出了氡及其子体的建议值, 或制定了限值标准, 其年摄入量限值是通过流行病学和剂量学两个不同途径而确定的。国际放射防护委员会(ICRP)的建议值: 职业人员受氡子体照射不能超过 $0.017\text{J}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{a}^{-1}$ ; 公众不能超过 $5.6\times 10^{-4}\text{J}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{a}^{-1}$ 。室内氡浓度限值: 对现有住房, 当室内氡的平衡当量浓度超过 $200\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ 时, 要采取适当措施以降低室内氡浓度(此为行动水平)。对待建房屋规定新建房屋室内氡的EEC浓度不能超过 $100\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ 。各国制定的限值标准见附表。

建筑材料中的放射性含量较高时, 来自建材中的氡就可能成为室内氡的主要来源。为了保证室内氡不超过标准, 苏联、中国等对建筑材料中的放射性物质制定了限值标准。我国规定成品中 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{232}\text{Th}$ 、 $^{40}\text{K}$ 比活度( $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ )必须同时满足以下二式:

$$\frac{^{226}\text{Ra}}{200} \leq 1.0 \quad (1)$$

$$\frac{^{226}\text{Ra}}{350} + \frac{^{232}\text{Th}}{260} + \frac{^{40}\text{K}}{4000} \leq 1.0 \quad (2)$$

### 2. 防护原则及措施

①原则: 在职业照射中, 对氡的防护与其它辐射防护一样, 必须遵循正当化、最优化和个人剂量限值三原则。

②措施: 对广大公众的防护措施, 主要是设法降低住房内氡浓度。一般情况下, 地基土壤是室内氡的主要来源, 因此, 瑞典最新控制氡的经验就是对住房的地面作了具体

表 一些国家采用的氡子体照射限值

国 家	职业照射 (WLM·a <sup>-1</sup> )	公众照射 WLM·a <sup>-1</sup>	室内氡浓度(Bq·m <sup>-3</sup> )	
			职 业	公 众
澳大利亚	4	0.4		
奥地利	4		370	370/30
加拿大	4	0.4		
丹麦	2.96×10 <sup>6</sup> Bq·h·m <sup>-3</sup>		1 480	
法国			1.11×10 <sup>4</sup>	370
西德	氡最大年吸入量26.7×10 <sup>6</sup> Bq			
日本			370	37
挪威	2.22×10 <sup>6</sup> Bq·h·m <sup>-3</sup>		1110	
西班牙	氡最大年吸入量27×10 <sup>6</sup> Bq		1.11×10 <sup>4</sup>	氡最大年吸入量2.7×10 <sup>6</sup> Bq
瑞典	2.22×10 <sup>6</sup> Bq·h·m <sup>-3</sup>		1 110	110
英国	4			
美国	4			

要求<sup>[15]</sup>。他们把住房地表土壤中氡浓度和其透气性按其高低进行分类,分别对其建筑技术作不同要求。如对含铀量高的花岗岩、伟晶石、明矾页岩、渗透性高的土壤(砂砾层)且土壤气体中氡浓度大于50kBq·m<sup>-3</sup>,需增加混凝土的厚度;含铀量、透气性一般的普通岩石、土壤且其内部气体中氡浓度在10~50kBq·m<sup>-3</sup>,地面要求没有孔洞裂缝;而对含铀量低如石灰石、砂岩,透气性极低的粘土淤泥,其氡浓度小于10kBq·m<sup>-3</sup>,则不作特别要求。这样就有效地防止氡从地表土壤中泄漏进入室内空气。

氡是放射性气体,因此,通风也是降低氡浓度的重要措施。据报道,当通风率由0.3增加到1.5时,室内氡子体浓度可下降一个数量级<sup>[16]</sup>。在建筑物下面安装通风管道,可减少土层下的氡浓度。美国环保局研究一种通风设备系统,这种系统能使地下室和室外之间的气压差反转,在氡气渗入地下室之前可把氡气从基础墙处吸掉99%,再通过嵌在基础墙中的塑料管与安置在室外的风扇连接起来,把氡排出。

NCRP报告指出对氡控制的关键是减少与土壤接触的地板敞开处<sup>[17]</sup>。由于建材也

是室内氡的重要来源,因此建造住宅时,应尽量选用放射性含量低的建材。此外,还有室内装饰如粉刷油漆、裱纸、铺塑料地板,采用化学净化空气法和静电沉淀法等都可降低室内氡及子体浓度。

## 五、结 语

近年来,医学和生物学的研究表明,一般环境中氡及其子体对人体的照射也可引起肺癌。据估算,一般居民的肺癌有20%是来自氡子体的照射<sup>[18]</sup>。美国学者强调:居民吸入的内照射剂量主要来自室内的氡。认为房屋内的氡是居民造成小剂量损伤和致肺癌的重要病因之一<sup>[19]</sup>。瑞典研究人员首先报道了肿瘤与高氡住房有关<sup>[2]</sup>,并估算,在瑞典由于受到室内氡子体照射,每年每百万人中可发生140例肺癌,而由于其它各种来源的照射,只引起40余例。

综上所述,当前氡对人类健康的影响越来越为人们所关注。因此,开展环境氡的测量,结合流行病学调查,深入进行氡与人体健康关系的研究,具有十分重要的意义。

(下转第101页)

Publication 50 (Oxford Pergamon Press)

20. Harley N, et al; Environ Health Perspect 1986, 70:17
21. Archer VE, et al; Health Phys 1973, 25 :351
22. Saccomano G; Cancer 1988, 62:1402
23. Whitte more AS, et al; J Natl Cancer Inst 1983, 71: 499
24. Pretice RL, et al; J Natl Cancer Inst 1983, 70:611
25. Radford EP; N Engl J Med 1984, 237: 1485
26. Archer VE; Carcinog Compr Surv 1985, 8:23
27. Archer VE; et al; Yale J Biol Med 1988,

61:183

28. Axelson O, et al; Scan J Work Environ Health 1978, 41:46
29. Sterlin TD; J Chronic Dis 1983, 36:669
30. Ginevan ME, et al; Health Phys 1986, 51:163
31. Hofmann W; Health Phys 1982, 43:31
32. Chameand J, et al; Experimental Lung Cancer Springer-verlog Berlin, 1974, P. 411
33. Cross FT, et al; Health Phys 1982, 42: 32
34. 孙来华, 等; 中华放射医学与防护杂志 1986, 6:177

---

(上接第105页)

### 参 考 文 献

1. UNSCEAR report, 1988
2. UNSCEAR report, 1982
3. Cohen BL; Health Phys 1985, 49:1053
4. Cohen BL; Health Phys 1986, 51:175
5. Hernandez JJ; Health Phys 1984, 46:440
6. UNSCEAR report, 1986
7. 秦士忠, 等; 辐射防护 1985, 4:448, 452
8. 林莲卿, 等; 辐射防护 1987, 7:113
9. Kobal I, et al; Health Phys 1987, 52:473
10. Hofman W, et al; CONF-780422 1980: 167

11. ICRP Publication No 50, 1987
12. Josef Sevc, et al; Health Phys 1988, 54 :27
13. NCRP repot No. 78, 1984
14. Fabrikant JJ; Health Phys 1990, 59:93
15. Suediemark GA, et al; Health Phys 1990, 58:458
16. Rodnick CN; Health Phys 1981, 41:686
17. Schroeder GL; Radiat Res 1990, 122:341
18. Harley NH, et al; Health Phys 1981, 40 :307
19. 张景源, 等; 国外医学放射医学核医学分册 1987, 1:3