

室内氡对人体健康影响的研究现状

张辉, 卓维海

摘要: 随着人们对居住环境质量要求的不断提高, 室内氡(Rn)对人体健康影响也已成为公众关注的公共卫生问题。本文首先简要介绍 Rn 的特性及其对人体的暴露途径, 然后全面综述国内、外关于室内 Rn 影响人体健康的人群流行病学和分子流行病学的研究结果, 并提出今后开展室内 Rn 暴露控制的研究工作展望。

关键词: 室内氡; 肺癌; 白血症; 流行病学研究

Current Status of Epidemiological Studies on Health Effects of Indoor Radon ZHANG Hui, ZHUO Wei-hai (Institute of Radiation Medicine, Fudan University, Shanghai 200032, China). Address correspondence to ZHUO Wei-hai, E-mail: whzhuo@fudan.edu.cn

Abstract: As the increasing requirements for quality improvements of living environment, the issue on the health effects due to indoor radon has also become a public concern. This paper briefly described the characteristics of radon and its exposure pathways onto human, comprehensively reviewed both the domestic and international research results on the health effects of indoor radon from the population and molecular epidemiological studies. Furthermore, several further studies were proposed for the reasonable control of indoor radon exposure.

Key Words: indoor radon; lung cancer; leukaemia; epidemiological study

氡(Rn)是世界卫生组织(World Health Organization, WHO)公布的 19 种主要致癌物质之一。根据 WHO 最新的估算数据: 室内 Rn 是目前仅次于吸烟引起人类肺癌的第 2 大要因; 室内 Rn 导致肺癌的比例约占总肺癌发病率的 3%~14%, 其发病率高低主要与各个国家的平均室内 Rn 浓度有关^[1]。由于其普遍存在于人类的生活和工作环境, 因此, 室内 Rn 对人体健康的影响问题很早就已引起众多专业人士的关注。20 世纪 80 年代以来, 已有 30 余个国家或国际组织颁布了关于室内 Rn 浓度水平的控制标准。随着人类社会的不断进步和人们对生活质量要求的提高, 当前, 室内 Rn 对人体健康影响也已成为公众关注的公共卫生问题。本文拟就 Rn 的特性及对人体的暴露途径、室内 Rn 影响人体健康的人群流行病学和分子流行病学的研究结果进行综述, 并提出合理开展室内氡控制的研究工作展望。

1 Rn 的特性和暴露途径

Rn 是元素周期表第 6 周期中的最后一个元素, 是一种无色无味的惰性气体。在自然界普遍存在的 Rn 有 3 个放射性同位素, 即 ²²²Rn、²²⁰Rn 和 ²¹⁹Rn; 它们分别是三大天然放射系 U 系、Th 系和 Ac 系中镭的同位素衰变产物。但由于 ²²⁰Rn 和 ²¹⁹Rn 的半衰期较短(分别为 55.6 s 和 3.9 s), 且其母体在地壳中的丰度又很低, 因此, 在研究 Rn 对人体健康影响时, 主要指的是环

境中含量高且半衰期长(3.82 d)的 ²²²Rn。

²²²Rn 自然衰变可产生 ²¹⁸Po、²¹⁴Pb、²¹⁴Bi 和 ²¹⁴Po 等短寿命子体, ²²²Rn 及其子体衰变所产生的 α 、 β 、 γ 射线对人体健康可能产生危害。²²²Rn 经 α 衰变后产生的子体有 90% 以上被空气中的气溶胶粒子吸附, 能在空气中存留较长时间。被气溶胶吸附的 Rn 子体经人体呼吸进入体内后难以排出体外。沉积于呼吸道上 Rn 子体的自发衰变所产生的 α 、 β 、 γ 射线直接照射呼吸道区域, 对放射性敏感的细胞, 如胸腔外区的上皮基底细胞、支气管区的基底细胞和分泌细胞等, 使生物活性物质特别是生物大分子产生电离或者激发而受到损伤, 其中最重要的是对细胞核中的遗传物质脱氧核糖核酸(DNA)的电离破坏, 诱致肺癌的发生。此外, 由于 Rn 具有较强的水溶性和脂溶性, 被吸入人体后易通过呼吸道黏膜和气血屏障而经血液扩散至全身, 并长期蓄积于脂肪细胞中, Rn 及其子体不断衰变所产生的电离辐射对周围骨髓及造血细胞造成持续性照射, 可引起造血细胞的放射损伤等^[2]。

2 室内 Rn 与肺癌关系的病例-对照研究

在流行病学研究的基本方法中, 由于生态学研究(ecological study)方法简便且成本最低, 在早期的室内 Rn 与肺癌的流行病学研究中也有一些学者采用此方法, 但得到的结论相差甚远, 甚至完全相反^[3]。考虑到生态学研究方法很难考虑影响肺癌发病的其他因素(如吸烟、生活习惯等的不同)而带来的偏差, 后来的研究者都基本使用病例-对照研究方法(case-control study)开展室内 Rn 与肺癌的人群流行病学调查。关于室内 Rn 暴露与肺癌的病例-对照研究, 表 1 列出了近 20 年来的主要研究地区、对

[基金项目] 教育部新世纪优秀人才支持计划(编号: NCET-07-0213)

[作者简介] 张辉(1985—), 男, 博士生; 研究方向: 辐射防护与剂量学;

E-mail: 081114312@fudan.edu.cn

[通信作者] 卓维海教授, E-mail: whzhuo@fudan.edu.cn

[作者单位] 复旦大学放射医学研究所, 上海 200032

象和结果^[4]。从表 1 可看出,同样是在室内环境,尽管 Rn 浓度水平和研究人群规模不尽相同,在 20 项研究中,得到超额比数比(excess odds rate, EOR)大于 0 的有 17 个研究,仅有 3 个研究结果略小于 0。但是,我们同时也注意到的是:即便 EOR 都大于 0,不同研究所给出的 EOR 相差仍很大(0.04~1.48);部分研究得到了有统计学差异的结果,Rn 浓度水平与肺癌发病率线性关系较好,但也有部分研究发现它们之间的线性关系很弱(或没有),没得到有统计学差异的结论。分析上述不同病例-对照研究得到不尽相同结论的主要原因,是由于调查对象的样本数有限,从而导致分析所得的结果不确定度很大。

表 1 室内 Rn 暴露与肺癌关系的病例-对照研究

Table 1 Main case-control studies on indoor radon and lung cancer

国家或地区	样本数		平均氡浓度 (Bq/m ³)	每 100 Bq/m ³ 的 EOR(95%CI)	文献及年份
	病例	对照			
中国沈阳	308	356	85	-0.04(-0.23, 0.19)	[4], 1990
美国新泽西州	433	402	26	0.28(-0.28, 0.97)*	[5], 1990
瑞典斯德哥尔摩	210	209	127.7	0.52(-0.05, 1.54)*	[6], 1992
美国	538	1183	67	0.05(-0.13, 0.24)	[7], 1994
瑞典全国	1360	2847	106.5	0.10(0.01, 0.22)	[8], 1994
加拿大	738	738	120(卧室); 200(浴室)	-0.06(-0.14, 0.05)	[9], 1994
芬兰全国	517	517	103(病例); 96(对照)	0.11(-0.06, 0.31)	[10], 1996
芬兰南部	164	331	207(病例); 223(对照)	0.57(0.27, 0.99)	[11], 1996
英国西南部	982	3185	58(病例); 56(对照)	0.08(-0.03, 0.20)	[12], 1998
美国密苏里州	372	471	66(病例); 63.5(对照)	0.63(0.07, 1.93)*	[13], 1999
美国爱荷华州	413	614	70(病例); 78(对照)	0.16(-0.03, 0.61)*	[14], 2000
德国西部	1449	2297	49(病例); 50(对照)	-0.02(-0.18, 0.17)	[15], 2001
瑞典全国	258	287	87(病例); 80(对照)	0.28(-0.05, 1.05)	[16], 2001
意大利东北部	138	291	132	0.40(-0.70, 5.60)	[17], 2001
中国甘肃	768	1659	230(病例); 222(对照)	0.16(0.03, 0.40)*	[18], 2002
西班牙西北部	163	141	141(病例); 114(对照)	1.48(0.12, 4.48)	[19], 2002
德国东部	1192	1640	76(病例); 74(对照)	0.08(-0.03, 0.20)	[20], 2003
法国	486	984	144(病例); 138(对照)	0.04(-0.01, 0.11)	[21], 2004
地中海地区	384	404	107	0.14(-0.11, 0.46)	[22], 2005
美国新泽西州	651	740	46(病例); 46.4(对照)	0.05(-0.14, 0.56)	[23], 2008

[注]*: $P < 0.05$ 。

近 10 年来,为了提高 Rn 与肺癌关系的病例-对照研究中统计学的检出能力和精度,研究者通过广泛合作,将多项独立的病例-对照研究的原始资料进行汇总,开展合并分析(pooled analysis),并将居室的合并研究结果同对矿工的研究结果进行比较,具体针对居室的病例-对照合并分析结果和对矿工的队列研究结果见表 2。表中可见,不论是在欧洲^[24-25],还是在北美^[26-27]或中国^[28],合并分析结果都表明室内氡浓度水平与居民的肺癌发病率均存在有统计学意义的正相关,且在不同地域得到的超额相对危险度(excessive relative risk, ERR)数值也基本一致。另外,与对矿工的队列研究结果^[29-32]比较也表明,环境中 Rn 浓度每增加 100 Bq/m³,居民或矿工的肺癌发病率均增

加约 10%~20%;同时还有研究发现 Rn 浓度水平与肺癌发病率之间还存在有逆剂量率效应的关系,即在相同的累积暴露量情况下,氡浓度越低肺癌发病率越高^[29]。

表 2 氡与居民或矿工肺癌关系研究的合并分析结果

Table 2 Results of pooled analyses from different epidemiology studies on radon and lung cancer

研究类型	研究 个数	观察例数		暴露 时间 (年)	每增加 100 Bq/m ³ ERR(%)(95%CI)	
		病例	对照		短期氡实测值	长期氡估算值
室内氡 (病例 - 对照研究)						
欧洲地区 ^[24-25]	13	7148	14208	5~35	8(3, 16)	16(5, 31)
北美地区 ^[26-27]	7	3662	4966	5~30	11(0, 28)	— ^a
中国 ^[28]	2	1050	1995	5~30	13(1, 36)	— ^a
加权均值 ^[1]	— ^a	— ^a	— ^a	— ^a	10	20
矿工氡 (队列研究)						
BEIR VI ^[29-30]	11	2787	—	5~35	5 ^b ; 14 ^c ; 30 ^d	
德国 ^[31]	1	2388	—	5~35	3 ^b ; 18 ^d	
法国捷克 ^[32]	2	574	—	5~35	32 ^e	

[注]^a: 无原始数据(No data); ^b: 全部矿工(All miners); ^c: 氡暴露量 < 50 WLM(工作水平月)的矿工(Miners exposure less than 50 WLM); ^d: 氡暴露量 < 50 WLM 且 < 0.5 WL(工作水平)(Miners exposure less than 50 WLM at a rate less than 0.5 WL); ^e: 平均年暴露量 4.5 WLM/a(Mean exposure rate of 4.5 WLM/a)。

3 室内 Rn 与白血病关系的人群流行病学研究

从 Rn 对人体的暴露途径上看, Rn 及其子体的吸入也可能导致白血病的发生。为此,先后也有不少研究者开展了室内 Rn 浓度与白血病的流行病学研究^[33]。其中,研究人群对象较多的病例-对照研究的主要情况和结果^[34-41]汇总于表 3。表中可见,在所列 8 个研究中,病例与对照组发生白血病的比数比(odds rate, OR)超过 1 的有 5 个,但小于 1 的也有 3 个;另外,在这些研究中,发现室内 Rn 浓度水平与白血病发病率有统计学意义相关的仅有 2 个。LAURIER 等^[42]对已发表的 19 个生态学研究、6 个矿工队列研究及 8 个病例-对照研究结果进行了综合分析,虽然分析结果表明生态学研究得到了 Rn 与白血病之间的关联性,但作者认为该研究方法不够严谨,而队列研究和病例-对照研究的综合分析结果却显示氡与白血病之间没有相关性。RAASCHOU-NIELSEN^[43]也在总结了室内氡与儿童白血病关系的 12 个生态学研究 7 个病例-对照研究资料的基础上,指出室内氡与儿童白血病之间可能存在相关性,但相关度较低,仍需要更多的病例-对照调查研究来证实。

表 3 室内氡与白血病关系的病例-对照研究

Table 3 Case-control studies on indoor radon and leukaemia

国家	发表 年份	样本数		OR(95%CI)	文献
		病例	对照		
丹麦	2008	2400	6697	1.21(0.98~1.49)	[34]
英国	2002	2226	3773	0.91(0.47~1.75)	[35]
英国	2000	578	983	0.90(0.31~2.62)	[36]
埃及	2000	50	110	5.42(1.30~21.1)	[37]
美国	1999	173	254	1.10(0.60~2.00)	[38]
德国	1999	505	443	1.30(0.32~5.33)	[39]
美国	1998	281	281	1.02(0.5~4.87)	[40]
意大利	1998	44	211	0.56(0.20~1.40)	[41]

4 Rn 对健康影响的分子流行病学研究

近 30 年来,有不少学者从细胞和分子水平研究了 Rn 对人体的健康影响。其中,被认为比较切合实际的几项研究的对象和 Rn 暴露量等情况概述如下:(1)YNGVESON 等^[44]对瑞典 Rn 流行病调查的肺癌病例进行了 *p53* 突变和室内 Rn 暴露的关系研究,研究对象包括了 83 个非吸烟肺癌和 250 个吸烟肺癌病例,他们的时间加权平均 Rn 暴露量分别为 140 Bq/m³ 和 50 Bq/m³; (2)夏英等^[45]通过 PCR 扩增、PCR-SSCP 电泳和序列分析等方法检测了 7 名高 Rn 暴露(200~350 Bq/m³)居民肺癌中的 *p53* 和 *k-ras* 基因的突变情况; (3)BILBAN 等^[46]比较了某学校接受高 Rn 暴露(900~3 200 Bq/m³)的 85 名学生与 25 名对照学生(480 Bq/m³)的外周血淋巴细胞微核率的变化; (4)HELLMAN 等^[47]采用单核细胞凝胶电泳技术检测了 125 名室内 Rn 浓度水平为 35~1 025 Bq/m³ 居民的外周血淋巴细胞 DNA 的损伤情况; (5)吕慧敏等^[48]采用单核细胞凝胶电泳和微核检测两种方法观察了窑洞(200~350 Bq/m³)居民以及普通住房(37.5~77.1 Bq/m³)居民的外周血淋巴细胞 DNA 损伤及微核细胞发生率。他们的主要研究结果汇总于表 4。从已有研究结果可看出, Rn 照射可能会引起抑癌因子 *p53* 基因的突变发生率的升高、外周血淋巴细胞微核率及外周血淋巴细胞 DNA 损伤的增加,但没有发现 *k-ras* 基因突变; 这些结果与针对高氡暴露矿工的研究结果一致^[49]。

表 4 室内 Rn 暴露的细胞和分子生物学研究的主要结果
Table 4 Main results of studies on indoor radon at cell and molecular biology levels

项目	主要结果	来源
<i>p53</i> 基因	高氡组 <i>p53</i> 基因突变率略高, OR: 1.4(0.7~2.6)	文献[44]
	7 名肺癌病例中有 5 例发现 <i>p53</i> 基因突变	文献[45]
<i>k-ras</i> 基因	7 名肺癌病例中未发现 <i>k-ras</i> 基因突变	文献[45]
外周血淋巴细 胞微核率	高氡组微核率(2.03%)明显高于对照组(1.21%)	文献[46]
	窑洞居民微核细胞发生率高于普通房居民	文献[48]
外周血淋巴细 胞 DNA 损伤	在氡浓度 > 200 Bq/m ³ 时, DNA 损伤与低浓度组差别较明显, 且剂量-效应有正相关关系	文献[47]
	窑洞居民 DNA 损伤略高于普通房居民	文献[48]

5 总结与展望

诸多关于室内 Rn 对人体健康影响的流行病学研究表明,在去除了吸烟这一最大因素的影响后,一般住宅环境中的 Rn 也会引起肺癌, Rn 浓度水平越高肺癌发病率亦越高。同时,居室环境中的 Rn 可诱发癌症在人体的细胞和分子水平研究中也得到了部分的佐证。另一方面,大量研究也表明,吸烟和 Rn 的吸入对诱发肺癌还具有联合作用。因此,在肺癌发病率普遍增高的当今社会,非常有必要关注肺癌的预防与控制问题,在大力提倡禁烟的同时,需加强对室内 Rn 暴露的控制。

但是,我们也认识到 Rn 是天然存在的放射性物质,难以避免人类与氡的接触,只能加以合理的控制。另一方面,室内氡暴露对人体健康影响属于低剂量的电离辐射效应,通常需要对数万人以上的人群进行长期调查才能得出有统计学意义的结果。特别是,目前的绝大多数研究中对 Rn 的长期累积暴露量评价还仅是基于各种假定进行追溯和估算,所得到的相对危险度仍存在着较大的不确定度。因此,为合理开展室内 Rn 的控制,

进一步加强室内 Rn 浓度的长期累积测量或估算方法、改善 Rn 致人体剂量学的评价精度、开展室内 Rn 暴露控制的代价与利益分析等研究,都是将来值得开展的公共与环境卫生课题。

参考文献:

[1] World Health Organization. WHO handbook on indoor radon: A public health perspective[M]. Geneva: World Health Organization, 2009: 3-20.

[2] 陈涛, 黄红, 田英. 室内、外环境因素与儿童白血病关系的研究进展[J]. 环境与职业医学, 2009, 26(1): 89-92.

[3] NEUBERGER J S. Residential radon exposure and lung-cancer: an overview of published studies[J]. Cancer Detect Prev, 1991, 15(6): 435-443.

[4] BLOT W J, XU Z Y, BOICE J D Jr, et al. Indoor radon and lung cancer in China[J]. J Natl Cancer Inst, 1990, 82(12): 1025-1030.

[5] SCHOENBERG J B, KLOTZ J B, WILCOX H B, et al. Case-control study of residential radon and lung cancer among New Jersey women[J]. Cancer Res, 1990, 50(20): 6520-6524.

[6] PERSHAGEN G, LIANG Z H, HRUBEC Z, et al. Residential radon exposure and lung cancer in Swedish women[J]. Health Phys, 1992, 63(2): 179-186.

[7] ALAVANJA M C, BROWNSON R C, LUBIN J H, et al. Residential radon exposure and lung cancer among nonsmoking women[J]. J Natl Cancer Inst, 1994, 86(24): 1829-1837.

[8] PERSHAGEN G, AKERBLOM G, AXELSON O, et al. Residential radon exposure and lung cancer in Sweden[J]. N Engl J Med, 1994, 330(3): 159-164.

[9] LÉTOURNEAU E G, KREWSKI D, CHOI N W, et al. Case-control study of residential radon and lung-cancer in Winnipeg, Manitoba, Canada[J]. Am J Epidemiol, 1994, 140(4): 310-322.

[10] AUVINEN A, MÄKELÄINEN I, HAKAMA M, et al. Indoor radon exposure and risk of lung cancer: a nested case-control study in Finland[J]. J Natl Cancer Inst, 1996, 88(14): 966-972.

[11] RUOSTEENOJA E, MÄKELÄINEN I, RYTÖMAA T, et al. Radon and lung cancer in Finland[J]. Health Phys, 1996, 71(2): 185-189.

[12] DARBY S, WHITLEY E, SILCOCKS P, et al. Risk of lung cancer associated with residential radon exposure in south-west England: a case-control study[J]. Br J Cancer, 1998, 78(3): 394-408.

[13] ALAVANJA M C, LUBIN J H, MAHAFFEY J A, et al. Residential radon exposure and risk of lung cancer in Missouri[J]. Am J Public Health, 1999, 89(7): 1042-1048.

[14] FIELD R W, STECK D J, SMITH B J, et al. Residential radon gas exposure and lung cancer: the Iowa Radon Lung Cancer Study[J]. Am J Epidemiol, 2000, 151(11): 1091-1102.

[15] KREIENBROCK L, KREUZER M, GERKEN M, et al. Case-control study on lung cancer and residential radon in western Germany[J]. Am J Epidemiol, 2001, 153(1): 42-52.

[16] LAGARDE F, AXELSSON G, DAMBER L, et al. Residential radon and lung cancer among never-smokers in Sweden[J]. Epidemiology, 2001, 12(4): 396-404.

[17] PISA F E, BARBONE F, BETTA A, et al. Residential radon and risk of lung cancer in an Italian alpine area[J]. Arch Environ Health,

- 2001, 56(3): 208-215.
- [18] WANG Z, LUBIN JH, WANG L, et al. Residential radon and lung cancer risk in a high-exposure area of Gansu Province, China[J]. Am J Epidemiol, 2002, 155(6): 554-564.
- [19] BARROS-DIOS JM, BARREIRO MA, RUANO-RAVINA A, et al. Exposure to residential radon and lung cancer in Spain: a population-based case-control study[J]. Am J Epidemiol, 2002, 156(6): 548-555.
- [20] KREUZER M, HEINRICH J, WÖLKE G, et al. Residential radon and risk of lung cancer in Eastern Germany[J]. Epidemiology, 2003, 14(5): 559-568.
- [21] BAYSSON H, TIRMARCHE M, TYMEN G, et al. Indoor Radon and Lung Cancer in France[J]. Epidemiology, 2004, 15(6): 709-716.
- [22] BOCHICCHIO F, FORASTIERE F, FARCHI S, et al. Residential radon exposure, diet and lung cancer: a case-control study in a Mediterranean region[J]. Int J Cancer, 2005, 114(6): 983-991.
- [23] WILCOX HB, AL-ZOUGHLOO M, GARNER MJ, et al. Case-control study of radon and lung cancer in New Jersey[J]. Radiat Prot Dosimetry, 2008, 128(2): 169-179.
- [24] DARBY S, HILL D, AUBINEN A, et al. Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies[J]. BMJ, 2005, 330(7485): 223.
- [25] DARBY S, HILL D, DEO H, et al. Residential radon and lung cancer-detailed results of a collaborative analysis of individual data on 7148 persons with lung cancer and 14208 persons without lung cancer from 13 epidemiologic studies in Europe[J]. Scand J Work Environ Health, 2006, 32(S1): 1-83.
- [26] KREWSKI D, LUBIN JH, ZIELINSKI JM, et al. Residential radon and risk of lung cancer: a combined analysis of 7 North American case-control studies[J]. Epidemiology, 16(2): 137-145.
- [27] KREWSKI D, LUBIN JH, ZIELINSKI JM, et al. A combined analysis of North American case-control studies of residential radon and lung cancer[J]. J Toxicol Env Health Part A, 2006, 69(7-8): 533-597.
- [28] LUBIN JH, WANG ZY, BOICE JD, et al. Risk of lung cancer and residential radon in China: pooled results of two studies[J]. Int J Cancer, 2004, 109(1): 132-137.
- [29] National Research Council, Committee on Health Risks of Exposure to Radon. Health effects of exposure to radon: BEIR VI[M]. Washington, DC: National Academy Press, 1999: 15-22.
- [30] LUBIN JH, TOMÁSEK L, EDLING C, et al. Estimating lung cancer mortality from residential radon using data for low exposures of miners[J]. Radiat Res, 1997, 147(2): 126-134.
- [31] GROSCHE B, KREUZER M, KREISHEIMER M, et al. Lung cancer risk among German male uranium miners: a cohort study, 1946-1998[J]. Br J Cancer, 2006, 95(9): 1280-1287.
- [32] TOMASEK L, ROGEL A, TIRMARCHE M, et al. Lung cancer in French and Czech uranium miners: radon associated risk at low exposure rates and modifying effects of time since exposure and age at exposure[J]. Radiat Res, 2008, 169(2): 125-137.
- [33] HENSHAW DL, EATOUGH JP, RICHARDSON RB. Radon as a causative factor in induction of myeloid leukaemia and other cancers[J]. Lancet, 1990, 335(8696): 1008-1012.
- [34] RAASCHOU-NIELSEN O, ANDERSEN CE, ANDERSEN HP, et al. Domestic radon and childhood cancer in Denmark[J]. Epidemiology, 2008, 19(4): 536-543.
- [35] UK Childhood Cancer Study Investigators. The United Kingdom Childhood Cancer Study of exposure to domestic sources of ionizing radiation: I: radon gas[J]. Br J Cancer, 2002, 86(11): 1721-1726.
- [36] LAW GR, KANE EV, ROMAN E, et al. Residential radon exposure and adult acute leukaemia[J]. Lancet, 2000, 355(9218): 1888.
- [37] MAGED AF, MOKHTAR GM, EL-TOBGUI MM, et al. Domestic radon concentration and childhood cancer study in Cairo, Egypt[J]. J Environ Sci Health Pt C-Environ Carcinog Ecotoxicol Rev, 2000, 18(2): 153-170.
- [38] STEINBUCH M, WEINBERG CR, BUCKLEY JD, et al. Indoor residential radon exposure and risk of childhood acute myeloid leukaemia[J]. Br J Cancer, 1999, 81(5): 900-906.
- [39] KALETSCH U, KAATSCH P, MEINERT R, et al. Childhood cancer and residential radon exposure-results of a population-based case-control study in Lower Saxony (Germany)[J]. Radiat Environ Biophys, 1999, 38(3): 211-215.
- [40] LUBIN JH, LINET MS, BOICE JD, et al. Case-control study of childhood acute lymphoblastic leukemia and residential radon exposure[J]. J Natl Cancer Inst, 1998, 90(4): 294-300.
- [41] FORASTIERE F, SPERATI A, CHERUBINI G, et al. Adult myeloid leukaemia, geology, and domestic exposure to radon and gamma radiation: a case control study in central Italy[J]. Occup Environ Med, 1998, 55(2): 106-110.
- [42] LAURIER D, VALENTY M, TIRMARCHE M. Radon exposure and the risk of leukemia: a review of epidemiological studies[J]. Health Phys, 2001, 81(3): 272-288.
- [43] RAASCHOU-NIELSEN O. Indoor radon and childhood leukaemia[J]. Radiat Prot Dosim, 2008, 132(2): 175-181.
- [44] YNGVESON A, WILLIAMS C, HJERPE A, et al. p53 mutations in lung cancer associated with residential radon exposure[J]. Cancer Epidemiol Biomarkers Prev, 1999, 8(5): 433-437.
- [45] 夏英, 杨梅英, 吕慧敏, 等. 室内氡暴露居民肺癌 p53 和 k-ras 基因突变[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2001, 21(6): 404-406.
- [46] BILBAN M, VAUPOTI J. Chromosome aberrations study of pupils in high radon level elementary school[J]. Health Phys, 2001, 80(2): 157-163.
- [47] HELLMAN B, FRIIS L, VAGHEF H, et al. Alkaline single cell gel electrophoresis and human biomonitoring for genotoxicity: a study on subjects with residential exposure to radon[J]. Mutat Res, 1999, 442(2): 121-132.
- [48] 吕慧敏, 董金蝉, 张翠兰, 等. 室内氡暴露居民外周血淋巴细胞 DNA 损伤及微核细胞发生率[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2002, 22(5): 340-342.
- [49] VÄHÄKÄNGAS KH, SAMET JM, METCALF RA, et al. Mutations of p53 and ras genes in radon-associated lung cancer from uranium miners[J]. Lancet, 1992, 339(8793): 576-580.

(收稿日期: 2011-02-22)

(英文编审: 黄建权; 编辑: 徐新春; 校对: 洪琪)