

室内氡子体有效剂量转换系数的影响因素分析

赵超¹, 张磊¹, 郭秋菊¹, 卓维海²

(1. 北京大学物理学院技术物理系, 北京 100871; 2. 复旦大学放射医学研究所, 上海 200032)

摘要 室内氡子体有效剂量转换系数受室内环境参数的影响。为了理解和评价室内氡子体有效剂量转换系数随换气率、气溶胶浓度和气溶胶粒径分布的变化关系, 从室内氡子体模型出发, 结合前人实测的室内环境参数, 计算了典型室内环境氡子体剂量转换系数值, 并重点分析了室内环境参数中换气率、气溶胶浓度、气溶胶粒径分布对室内氡子体剂量转换系数的影响。在换气率为 0.55 h^{-1} , 气溶胶浓度 $1.0 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$, $AMTD$ 为 1.0 nm , $AMAD$ 为 200 nm 的典型室内环境, 氡子体有效剂量转换系数为 $28.4 \text{ nSv} \cdot (\text{Bq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$, 考虑到室内环境参数的变化范围, 该值可以在 $19.9 \sim 33.9 \text{ nSv} \cdot (\text{Bq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$ 范围内变化。

关键词 室内氡; 有效剂量转换系数; 换气率; 气溶胶; 粒径分布

中图分类号 R144

文献标识码 A

氡(^{222}Rn)及其短寿命子体(^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi)所致人类呼吸道内照射剂量约占人类受到的天然辐射的一半以上^[1]。其中, 氡子体的剂量贡献占绝大部分。在描述氡子体所致剂量时, 人们引入有效剂量转换系数 (Dose Conversion Factor, DCF)的概念, 其定义为单位氡子体暴露量所致有效剂量。

联合国原子辐射效应科学委员会在2000年报告中给出的氡子体有效剂量转换系数推荐值为 $9 \text{ nSv} \cdot (\text{Bq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$ 。但实际上, 针对具体氡暴露环境, 氡子体有效剂量转换系数与诸多因素有关。不同环境、不同活动状况下, 氡子体有效剂量转换系数会有很大的不同^[2]。早在1994年, Birchall等人在新人类呼吸道模型的基础上, 开发了氡子体剂量估算软件RADEP (Radon Dose Evaluation Program), 并系统地讨

论了环境参数、呼吸道模型参数及其它假设对氡子体有效剂量转换系数的影响^[3]。后来的研究更加侧重于环境参数中的气溶胶参数对有效剂量转换系数的影响, 研究表明^[4-7], 氡子体放射性气溶胶粒径分布和未结合态份额是影响氡子体有效剂量转换系数的关键因素。

氡气从建材、土壤和水体等介质析出后进入室内环境, 在空气中衰变形成短寿命氡子体, 氡子体在室内空气中将附着气溶胶、附壁沉降和换气损失。1972年, W. Jacobi最早提出了室内氡子体模型, 分析了环境参数(换气率、气溶胶浓度、粒径分布)对氡子体特征参数(平衡因子和未结合态份额)的影响^[8]。J. Porstendörfer等人首次对模型进行了实验验证研究^[9]。在此基础上, 后来的研究细致讨论了解析系数、气溶胶参数对未结合态份额和结合态粒径分布的影

收稿日期 2009-04-14

基金项目 国家自然科学基金资助项目(编号:10775007) 国家基础科学人才培养基金(北京大学核物理基地)资助(理科基地基金号 J0730316)。

作者简介 赵超(1987—), 男, 2009年毕业于北京大学物理学院粒子物理与核物理专业, 现为复旦大学放射医学研究所读硕士研究生。

通讯作者 郭秋菊。E-mail:qjguo@pku.edu.cn

响^[10-12]。前述研究表明,室内换气率和气溶胶参数(浓度、粒径分布)是影响氡子体放射性气溶胶粒径分布和未结合态份额最主要的因素,进而会对室内氡子体剂量转换系数影响较大。

为了分析室内环境参数(换气率、气溶胶浓度、气溶胶粒径分布)对室内氡子体剂量转换系数的影响,本文从室内氡子体模型出发,结合前人实测的室内环境参数,计算了典型室内环境下氡子体剂量转换系数值,并重点分析了室内环境参数中换气率、气溶胶浓度、气溶胶粒径分布对室内氡子体剂量转换系数的影响。

1 理论模型

1.1 室内氡子体模型

²²²Rn气从建材或土壤等介质表面析出后进入室内空间,衰变后产生带正电或中性的²¹⁸Po原子。²¹⁸Po原子很快同空气中水分子结合,形成团簇。团簇粒子扩散系数较大,能够同空气中气溶胶粒子结合,产生结合态放射性气溶胶。该“结合过程”受团簇大小和室内气溶胶粒子粒径分布的影响。结合态²¹⁸Po粒子衰变放出α粒子,其产生的反冲核²¹⁴Pb粒子能量约为117 keV,如此高的能量使得其以一定的几率脱离气溶胶粒子的吸附,成为未结合态²¹⁴Pb粒子。除了未结合态氡子体同气溶胶粒子的结合过程之外,未结合态和结合态氡子体在空气中还会通过衰变、附壁、换气等过程损失。

室内气溶胶粒径分布为单峰对数正态分布来描述时,室内氡子体模型如下所示^[6]:

$$f_i^u = \frac{\lambda_i (f_{i-1}^u + p_{i-1} f_{i-1}^a)}{\lambda_i + \lambda_v + \lambda_d^u + \lambda_a} \quad (1)$$

$$f_i^a = \frac{\lambda_a f_{i-1}^u + \lambda_i (1 - p_{i-1}) f_{i-1}^a}{\lambda_i + \lambda_v + \lambda_d^a} \quad (2)$$

式中, f_i^u 、 f_i^a 分别表示第*i*代未结合态、结合态氡子体活度浓度同氡气体浓度的比[$i=1, 2, 3$ 分别表示²¹⁸Po、²¹⁴Pb、²¹⁴Bi(包括了其后续子体²¹⁴Po等子体的影响)](无量纲); p_{i-1} 为子体衰变时的平均解析系数(无量纲); λ_i 为第*i*代氡子体的衰变常数(s^{-1}); λ_a 为氡子体与气溶胶的结合常数(s^{-1}); λ_v 为房间换气率(s^{-1}); λ_d 为气溶胶沉积速率(s^{-1})。

1.2 有效剂量转换系数

根据有效剂量转换系数的定义,其计算公式如下:

$$DCF = \frac{\sum_i A_i \cdot D_i}{(EEC \cdot T)} = \frac{R(\sum_i C_i \cdot D_i)}{(C_{Rn-222} \cdot F)} \quad (3)$$

式中 A_i 为第*i*种子体的活度, Bq ; $i(=1, 2, 3)$ 分别表示²¹⁸Po、²¹⁴Pb、²¹⁴Bi三种子体; D_i 为第*i*种子体单位活度所致有效剂量($Sv \cdot Bq^{-1}$); EEC 为平衡等效氡浓度($Bq \cdot m^{-3}$); T 为暴露时间(s); C_i 为第*i*种子体的活度浓度($Bq \cdot m^{-3}$); R 为呼吸率($m^3 \cdot h^{-1}$); C_{Rn-222} 为²²²Rn浓度($Bq \cdot m^{-3}$); F 为平衡因子。有效剂量转换系数的常用单位为 $nSv \cdot (Bq \cdot h \cdot m^{-3})^{-1}$ 及 $mSv \cdot WLM^{-1}$ ($1 WLM = 6.29 \times 10^5 Bq \cdot h \cdot m^{-3}$)。

氡子体一般有结合态和未结合态两种形态,它们在肺部区域沉积份额不同,其单位活度所致有效剂量也有较大不同。分别考虑结合态和未结合态氡子体有效剂量转换系数计算公式如下:

$$DCF^u = R(\sum_i C_i^u \cdot D_i^u) / EEC^u \quad (4)$$

$$DCF^a = R(\sum_i C_i^a \cdot D_i^a) / EEC^a \quad (5)$$

则氡子体总的有效剂量转换系数为:

$$DCF = DCF^u \cdot f_p + DCF^a \cdot (1 - f_p) \quad (6)$$

式中,上标 u 、 a 分别代表未结合态和结合态; f_p 为潜能未结合态份额。

从前述公式推导可以看出,有效剂量转换系数有4个决定因素:1)未结合态/结合态氡子体单位活度所致有效剂量;2)潜能未结合态份额 f_p ;3)未结合态/结合态氡子体活度比;4)呼吸率 R 。其中前3个因素都受室内环境参数的影响,第2)、3)两个因素参数可由室内氡子体模型,公式(1)、(2)估算。

1.3 人类呼吸道剂量计算

单位活度氡子体所致人类呼吸道内照射有效剂量计算采用LUDEP(Lung Dose Evaluation Program)V2.01软件来完成^[13]。LUDEP是由英国国家放射防护委员会NRPB(National Radiological Protection Board)基于新人类呼吸

道模型开发的肺剂量估算软件。该软件能够方便用户在自定义环境参数和生理参数基础上进行吸入核素内照射剂量估算。

在使用LUDEP计算氡子体的单位活度所致剂量时采用的主要输入参数如表1所列^[14,15]。其他参数采用LUDEP默认参数。

表1 LUDEP计算呼吸道剂量中的主要输入参数
Tab.1 Major input parameters used for dose calculation using LUDEP V2.01

参数名称	输入值	
	未结合态	结合态
吸入活度(Bq)	1	
呼吸率(m ³ ·h ⁻¹)	0.78 ^[14]	
单一吸入血速率(d ⁻¹)	16.6 ^[15]	1.6 ^[15]
核素	²¹⁸ Po/ ²¹⁴ Pb/ ²¹⁴ Bi ¹⁾	
生物动力学模型	PO<D>/PB<D>S/BI<D>	

1)计算时考虑了核素后代子体的剂量贡献。

1.4 典型室内环境参数

室内换气率、气溶胶浓度和气溶胶粒径会影响室内氡子体平衡比、未结合态份额和结合态粒径分布,从而间接影响室内氡子体有效剂量转换系数。早期对换气率、气溶胶浓度和气溶胶粒径分布开展了大量的理论和实测研究^[16-18]。综合前人的结果,我们总结出的典型室内环境参数列于表2。

表2 典型室内环境参数
Tab.2 Environment parameter values in typical indoor conditions

参数名称	参数值 ²⁾	
	未结合态	结合态
AMTD/AMAD(nm) ¹⁾	1.0(0.8~1.4)	200(150~400)
几何标准差	1.5(1.2~2.0)	2.2(1.5~3.5)
气溶胶密度(g·cm ⁻³)	1	1.4
形状因子	1	1.1
吸湿系数	1	1.5
换气率(h ⁻¹)	0.55(0.3~1.0)	
气溶胶浓度(cm ⁻³)	10×10 ³ (5×10 ³ ~15×10 ³)	

1)AMTD:未结合态氡子体活度中值空气热力学直径;AMAD:结合态氡子体活度中值空气动力学直径;2)括号前面的是典型值,括号中是变化范围。

基于典型室内环境参数中的典型值,使用室内氡子体模型对典型室内环境中的氡子体

潜能未结合态份额和未结合态/结合态子体活度比进行计算,结果如下:

$$f_p=0.07;$$

$$C_{Po-218}^u : C_{Pb-214}^u = 1 : 0.087;$$

$$C_{Po-218}^a : C_{Pb-214}^a : C_{Bi-214}^a = 1 : 0.63 : 0.48$$

可以看出,潜能未结合态份额最主要贡献来源于²¹⁸Po,未结合态²¹⁴Pb的贡献相对而言可以忽略。此结合态氡子体活度比与NRC 1991年报告给出的推荐值(1:0.65:0.4)很接近^[19]。

2 计算结果与讨论

2.1 典型室内环境氡子体有效剂量转换系数

结合典型室内环境中氡子体放射性气溶胶粒径分布的典型值和典型室内环境参数计算出来的未结合态份额、结合态和未结合态子体活度比值,计算得到了典型室内环境氡子体有效剂量转换系数值。本文计算结果同其它文献中结果比较列于表3。

表3 典型室内环境氡子体有效剂量转换系数比较
Tab.3 Comparison of different values of DCF in typical indoor conditions

比较组	f_p	DCF(mSv·WLM ⁻¹)		
		DCF ^u	DCF ^a	DCF
Wasiolek ^[6]	-	24.0	3.8	-
Marsh ^[6]	0.08	52.7	11.2	15
Portendörfer ^[7]	0.05	38.0	6.4	8.0
Ishikawa ^[20]	0.08	49.7	11.2	14.3
本文	0.07	69.7	13.9	17.8

本文给出的典型室内环境氡子体有效剂量转换系数推荐值为17.8 mSv·WLM⁻¹ [28.4 nSv (Bq·h·m⁻³)⁻¹]。不同文献中给出的未结合态和结合态氡子体有效剂量转换系数有较大差异,本文计算结果比其它文献中的结果略大。其主要原因在于,未结合态氡子体粒径分布的几何标准差取值(1.5)比其它文献中取值(1.3)略大,而结合态粒径分布AMAD(200 nm)比其它文献中取值(~220 nm)略小。

2.2 室内氡子体有效剂量转换系数的影响因素

室内环境参数中换气率、气溶胶浓度和气溶胶粒径分布影响室内氡子体未结合态份额、未结合态/结合态氡子体比及结合态粒径分布,

进而影响室内氡子体有效剂量转换系数。为了分析室内环境典型氡子体有效剂量转换系数的实用范围,同时讨论室内环境参数(换气率、气溶胶浓度和气溶胶粒径分布)对室内氡子体有效剂量转换系数的影响,我们对其逐一进行了单因素分析。

2.2.1 换气率

室内换气率典型值为 0.55 h^{-1} 。若密闭门窗,换气率可降低至 $<0.3 \text{ h}^{-1}$;若门窗都打开(无换气设备),换气率可至 1 h^{-1} 。为了囊括通常室内环境,室内换气率取值范围为 $0.1 \sim 1 \text{ h}^{-1}$ 。结合室内氡子体模型和人类呼吸道模型,计算出的室内氡子体有效剂量转换系数随室内换气率的变化关系如图1所示,该图还给出了未结合态份额随换气率的变化曲线。

在稳态室内氡子体模型下,换气率只影响氡子体放射性气溶胶的浓度、氡子体未结合态份额和子体比,不改变氡子体放射性气溶胶的粒径分布。且随着换气率的增加,未结合态份额在 $0.1 \sim 1 \text{ h}^{-1}$ 范围内近似线性增加,而子体比近似保持不变。因此,DCF随着换气率的增加而近似线性增加。

2.2.2 气溶胶浓度

室内气溶胶浓度典型值为 $10\,000 \text{ cm}^{-3}$ 。在门窗关闭、长时间静止的室内环境中,气溶胶浓度有可能降到 $<3\,000 \text{ cm}^{-3}$;而有抽烟、做饭等人为活动的室内环境,气溶胶浓度有可能 $>30\,000 \text{ cm}^{-3}$ 。因此,室内气溶胶浓度变化范围

取值为 $1\,000 \sim 100\,000 \text{ cm}^{-3}$ 。计算出的室内氡子体有效剂量转换系数随室内气溶胶浓度的变化关系如图2所示,同时该图中给出了未结合态份额随气溶胶浓度的变化曲线。

气溶胶浓度主要影响氡子体未结合态份额,随着气溶胶浓度的增加,未结合态份额近似成反比例下降,同前人的研究结果相吻合^[2]。而气溶胶浓度对非结合态/结合态子体比影响不大。最终导致剂量转换系数随气溶胶浓度的增大而减小,且近似成反比关系。

2.2.3 气溶胶粒径分布

室内结合态氡子体气溶胶活度中值空气动力学直径(AMAD)典型值为 200 nm 。考虑到室内不同气溶胶来源和室内气溶胶不同的模式,室内结合态氡子体气溶胶AMAD变化范围取 $20 \sim 500 \text{ nm}$,几何标准差统一取 2.2 。计算出的室内氡子体有效剂量转换系数随结合态氡子体AMAD的变化关系如图3所示,同时该图中给出了未结合态份额随结合态氡子体AMAD的变化曲线。

从计算结果我们可以发现,DCF随结合态氡子体AMAD的增大而迅速减小,此后趋于稳定。且DCF与未结合态份额之间再无线性关系。分析其原因,气溶胶粒径分布对剂量转换系数的影响不止体现在其对未结合态份额的影响上,同时由于不同粒径气溶胶粒子在肺部区域沉积份额不同,直接导致结合态氡子体剂量转换系数DCF^a随气溶胶粒径分布的变化而变化,

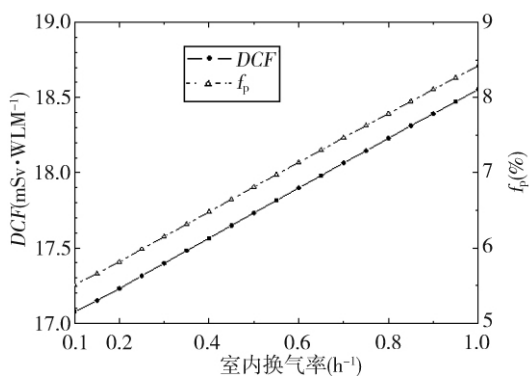


图1 剂量转换系数和未结合态份额随房间换气率变化关系

Fig.1 Relationship between DCF, unattached fraction and ventilation rates

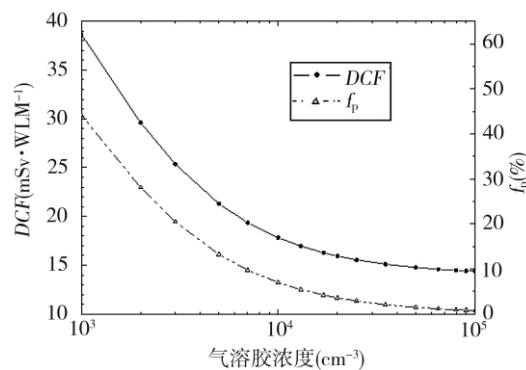


图2 剂量转换系数和未结合态份额随气溶胶浓度变化关系

Fig.2 Relationship between DCF, unattached fraction and aerosol concentration

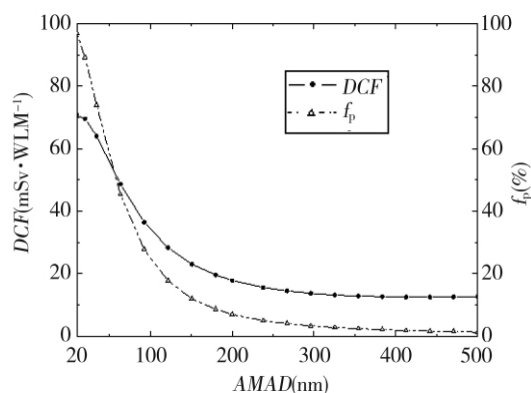


图3 剂量转换系数和未结合态份额
随气溶胶粒径分布变化关系

Fig.3 Relationship between DCF ,
unattached fraction and aerosol size distribution

且在小粒径处,该变化过程较明显。

3 结论

典型室内环境氡子体有效剂量转换系数推荐值为 $28.4 \text{ nSv} (\text{Bq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$ 。室内换气率、气溶胶浓度和气溶胶粒径分布影响室内环境氡子体有效剂量转换系数。换气率影响最小,而气溶胶粒径分布影响最大,尤其在较小粒径段上。气溶胶粒径分布不变情况下,氡子体有效剂量转换系数 DCF 和氡子体潜能未结合态份额 f_u 近似成线性关系。考虑到典型室内环境参数的变化范围,室内氡子体有效剂量转换系数可以在 $19.9 \sim 33.9 \text{ nSv} (\text{Bq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$ 范围内变化。

我国国标《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB 18871—2002)中给出的室内氡子体所致剂量转换系数为 $6.1 \text{ nSv} \cdot (\text{Bq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$,该数值采用的是ICRP第65号出版物给出的推荐值,是流行病学研究途径得出的结果,与本文的剂量学研究途径的结果有差异是可以理解的。联合国原子辐射效应科学委员会在2000年报告中给出的氡子体有效剂量转换系数推荐值为 $9 \text{ nSv} \cdot (\text{Bq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$,UNSCEAR虽然采用的是剂量学研究途径的结果,但是通过旧呼吸道模型计算的,与本文采用的新肺模型有较大差异,计算结果自然也不相同。

参考文献:

- [1] UNSCEAR. Sources and effects of ionizing radiation [M]. UNSCEAR 2000 Report. UNSCEAR New York 2000.
- [2] Porstendörfer J. Influence of physical parameters on dose from radon exposures[J]. International Congress Series, 2002, 1225: 149—160.
- [3] Birchall A, James AC. Uncertainty analysis of the effective dose per unit exposure from radon progeny and implications for ICRP risk-weighting factors [J]. Radiation Protection Dosimetry, 1994, 53(1): 133—140.
- [4] Zock C, Porstendörfer J, Reineking A. The influence of biological and aerosol parameters of inhaled short-lived radon decay products on human lung dose[J]. Radiation Protection Dosimetry, 1996, 63(3): 197—206.
- [5] Wasiolek PT, James AC. Unattached fraction measuring technique and radon lung dose [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2000, 51(1): 137—151.
- [6] Marsh JW, Birchall A. Sensitivity analysis of the weighted equivalent lung dose per unit exposure from radon progeny[J]. Radiation Protection Dosimetry, 2000, 87(3): 167—178.
- [7] Porstendörfer J. Physical parameters and dose factors of the radon and thoron decay products[J]. Radiation Protection Dosimetry, 2001, 94(4): 365—373.
- [8] Jacobi W. Activity and potential α -energy of ^{222}Rn and ^{220}Rn -daughters in different air atmospheres [J]. Health Physics, 1972, 22(5): 441—450.
- [9] Porstendörfer J. Behavior of radon daughter products indoor air[J]. Radiation Protection Dosimetry, 1984, 7(1): 107—113.
- [10] Nikezic D, Stevanovic N. Room model with three modal distributions of attached radon progeny[J]. Health Physics, 2004, 87(4): 405—409.
- [11] Stevanovic N, Nikezic D, Djordjevic A. The recoil factor of ^{214}Pb [J]. Journal of Aerosol Science, 2004, 35(8): 1041—1050.
- [12] Nikezic D, Stevanovic N. Influence of variability of ^{214}Pb recoil factor on lung dose[J]. Radiation Protection Dosimetry, 2004, 109(3): 197—200.
- [13] Jarvis NS et al. LUDEP 2.0 personal computer program for calculating internal doses using the ICRP 66 respiratory tract model[R]. NRPB-SR287.1996.

- [14] ICRP. Human respiratory tract model for radiological protection [M]. ICRP Publication 66. Oxford: Pergamon, 1994, Ann. 24(1—3).
- [15] Marsh JW, Birchall A. Determination of lung-to-blood absorption rates for lead and bismuth those are appropriate for radon progeny [J]. Radiation Protection Dosimetry, 1999, 83(4) 331—337.
- [16] Reineking A, Becker KH, Prostendörfer J. Measurements of the activity size distributions of the short-lived radon daughters in the indoor and outdoor environment [J]. Radiation Protection Dosimetry, 1988, 24(1) 245—250.
- [17] El-Hussein A, Ahmed A. Unattached fraction and size distribution of aerosol-attached radon progeny in the open air [J]. Applied Radiation and Isotopes, 1995, 46(12) 1393—1399.
- [18] Huet C, Tumen G, Boulaud D. Size distribution, equilibrium ratio and unattached fraction of radon decay products under typical indoor domestic conditions [J]. The Science of the Total Environment, 2001, 272(1—3) 97—103.
- [19] NRC. Comparative dosimetry of radon in mines and homes [S]. Washington: National Academy Press, 1991.
- [20] Ishikawa T, Tokonami S, et al. Effects of activity size distribution on dose conversion factor for radon progeny [J]. Japan J Health Phys, 2001, 36(4) : 329—338.

Study on Influence Parameters of Effective Dose Conversion Factors in Indoor Environment

Zhao Chao¹, Zhang Lei¹, Guo Qiuju¹, Zhuo Weihai²

(1. Department of Technical Physics, School of physics, Peking University, Beijing 100871 ;

2. Institutes of Biomedical Sciences; Fudan University, Shanghai 200032)

Abstract : The effective dose conversion factors (*DCF*) of indoor radon progeny exposure are affected by many parameters of indoor environments. To understand the sensitivity of the effective dose conversion factors to (i) ventilation rate, (ii) aerosol particle concentration, and (iii) relative size distribution of the aerosol-attached decay products, the influence of these parameters to *DCF* were analyzed in this paper by using indoor radon progeny model. The *DCF* in typical indoor conditions were calculated. The results show that the *DCF* in typical indoor conditions is 28.4 nSv (Bq·h·m⁻³)⁻¹, in the 19.9—33.9 nSv (Bq·h·m⁻³)⁻¹ in consideration of the variation of the parameters of indoor environments.

Key words : Indoor Environment ; *DCF* ; Ventilation Rate ; Aerosol ; Size Distribution