

## 气溶胶粒径分布对肺模型评价 氡子体有效剂量的影响

张 磊, 郭秋菊

(北京大学技术物理系, 北京 10086)

**摘要:**剂量学近似方法常用于评估氡子体有效剂量。在回顾 ICRP66 号肺模型的基础上, 计算分析了气溶胶粒径对肺部区域沉积份额的影响。在此基础上, 计算讨论了气溶胶粒径分布对氡子体有效剂量转换系数的影响, 结合粒径分布实验测量值, 综述了典型环境下氡子体有效剂量转换系数同未结合态份额及结合态粒径分布的关系。

**关键词:**肺模型, 氡子体, 放射性气溶胶, 粒径分布, 剂量转换系数

**中图分类号:** TL72 **文献标识码:** A **文章编号:** 0258-0934(2008)06-1203-06

1994 年, 国际放射防护委员会(ICRP)在第 66 号出版物中公布了新的人类呼吸道模型<sup>[1]</sup>(简称新肺模型), 其主要的用途在于评估当前和可能情况下空气中放射性物质所致剂量, 以及通过对活体或者排泄物中的放射性活度进行测量来判定个体吸入放射性物质的量。

ICRP 后续的 68、71、72 号出版物给出了利用该新肺模型计算出来的职业工人和公众吸入放射性物质的剂量转换系数、组织器官待积剂量当量和待积有效剂量<sup>[2-4]</sup>。在计算上述数值的过程中呼吸方式、呼吸速率和吸入气溶胶粒子分布等参数都是采用默认值。

2002 年, ICRP 在其 Supporting Guidance 3 中给出了新肺模型在实际应用中的导则<sup>[5]</sup>。它明确指出不同参数条件下剂量转换系数同上面给出的默认条件下的剂量转换系数之间有着较大的差别。例如, 气溶胶的粒径分布, 物质吸

收入血的速率等参数都对剂量转换系数会有较大影响。

英国国家放射防护局(NRPB)基于新肺模型开发了计算软件 LUDEP<sup>[6]</sup>, 能够计算气溶胶粒子在肺部的沉积、吸入物质的转移等过程以及吸入放射性物质造成的有效剂量等。

吸入短寿命的氡子体(<sup>218</sup>Po、<sup>214</sup>Pb、<sup>214</sup>Bi/<sup>214</sup>Po)所致肺剂量在人均所受天然辐射中占有相当大的比重<sup>[7]</sup>。为了描述氡子体暴露量和剂量之间的关系, 我们定义了剂量转换系数( $DCF = \text{Dose}/C_p t$ )。其中,  $C_p$  是短寿命氡子体  $\alpha$  潜能浓度, 而  $t$  是暴露时间。影响剂量转换系数大小的关键因素是放射性气溶胶的粒径分布, 其直接决定了氡子体在肺部的沉积区域和沉积份额。

本文目的是讨论使用新肺模型计算氡子体有效剂量过程中气溶胶粒径分布的影响。主要分为两个部分。第一部分对新肺模型进行了归纳, 重点计算了不同粒径气溶胶粒子在肺部不同区域中的沉积份额。第二部分首先介绍了如何用该肺模型计算氡子体有效剂量转换系数, 并对单分散度的氡子体放射性气溶胶粒径对肺部区域有效剂量的影响进行了讨论。最后结合归纳出来的气溶胶粒径分布实验测量值, 重点

收稿日期: 2007-11-29

基金项目: 国家自然科学基金(10475006)

作者简介: 张磊(1983-), 男, 湖北人, 硕士研究生, 防化研究院第二研究所实习研究员, 从事辐射防护与环境保护方面的研究。

讨论了未结合态份额和结合态粒径分布的对有效剂量转换系数的影响。

1 人类呼吸道模型

ICRP66 号人类呼吸道剂量学模型由形态学模型,生理学参数,辐射生物学考虑,沉积模型,廓清模型,剂量计算模型六个部分组成。

1.1 新肺模型的区域划分

基于辐射生物学考虑和沉积廓清过程,新肺模型中将呼吸道分成了四个基本区域,见图 1。其中胸腔外区(ET)又被分成 ET<sub>1</sub> 区(主要是前鼻通道)和 ET<sub>2</sub> 区(包括后鼻通道、口腔、咽、喉)。支气管区(BB)、细支气管区(bb)和肺泡区(AI)构成了胸腔内区。

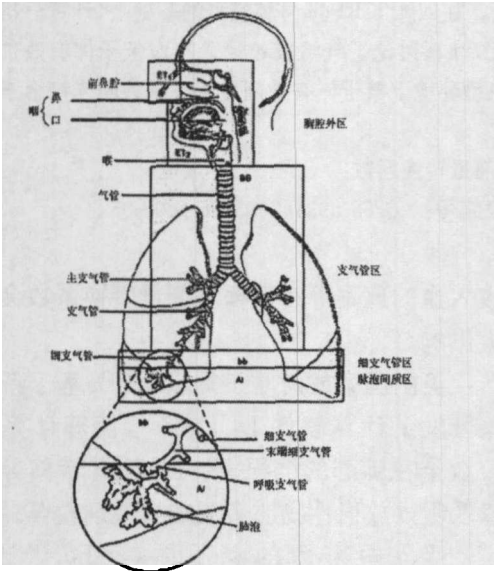


图 1 新呼吸道模型中的呼吸道分区

各区域中的靶细胞是不同的,分别为:ET 区域中上皮组织中的基细胞;支气管区上皮组织中的基细胞和分泌细胞;细支气管区上皮组织中的一种分泌细胞(Clara cells);肺泡区中“均匀分布”的内皮细胞。其在组织中的分布情况见表 1。

| 组织   | 区域               | 靶细胞  | 靶细胞核深度/ $\mu\text{m}$ | 危险分配比 |
|------|------------------|------|-----------------------|-------|
| 胸腔外区 | ET <sub>1</sub>  | 基细胞  | 40—50                 | 0.001 |
|      | ET <sub>2</sub>  | 基细胞  | 40—50                 | 0.998 |
|      | LN <sub>ET</sub> | *    | *                     | 0.001 |
| 胸腔区  | BB               | 分泌细胞 | 10—40                 | 0.333 |
|      |                  | 基细胞  | 35—50                 |       |
|      | bb               | 分泌细胞 | 4—12                  | 0.333 |
|      | AI               | *    | *                     | 0.333 |
|      | LN <sub>TH</sub> | *    | *                     | 0.001 |

\* 假设靶细胞在该区域内平均分布,对该区域内剂量求

平均

1.2 新肺模型的沉积与廓清

新肺模型不仅能计算核素摄入量的有效剂量,同时能计算单位暴露量的有效剂量。在计算暴露量对应的有效剂量过程中需要输入两个关键生理学参数:吸入方式和呼吸速率。ICRP66 号报告书给出了不同年龄组人员在不同活动状态下一些生理参数。这些生理参数不仅决定了摄入量,同时也直接决定了气溶胶粒子在呼吸道区域中的沉积情况。

在描述气溶胶的沉积过程中,根据不同分区对气溶胶的采集特性将呼吸道模型化为一组采集效率不一样的过滤器。采集效率由气溶胶的空气动力学行为(引力沉降、惯性作用)和热力学行为(扩散作用)共同决定。ICRP66 号报告中直接给出了单一粒径气溶胶在不同的肺区域的沉积份额,即过滤效率  $\eta$  随粒径分布的函数。对单分散度气溶胶可以直接使用这些关系式,而对于多分散度的气溶胶,需要将气溶胶粒径区域分解为多组单分散度气溶胶的分布,然后计算沉积份额。LUDEP 对单分散度气溶胶沉积计算直接使用 ICRP66 报告书中给出的关系式,而将多分散度的气溶胶分解为一组由 100 个粒径大小合适的单粒径气溶胶组成的气溶胶组,这过程中采用了一些附加的数学技术方法<sup>[8]</sup>。

我们用 LUDEP 计算出来了单分散度气溶胶在呼吸道区域的沉积份额,如图 2 所示。

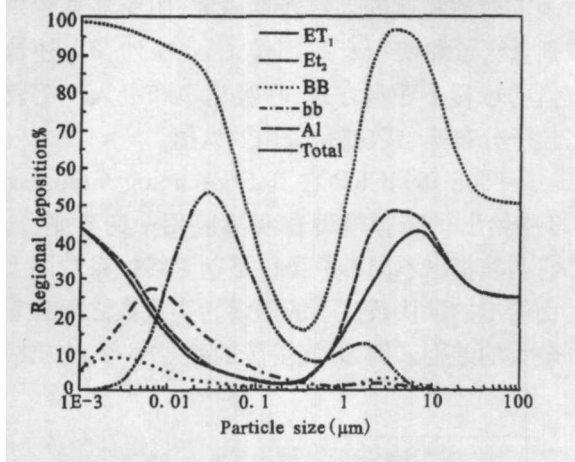


图 2 单分散度气溶胶在呼吸道区域中的沉积份额(成人,轻微活动,鼻呼吸)

从图中可以看出,粒径最小的气溶胶主要通过扩散作用沉积在 ET 区。随着粒子尺度的增加,扩散作用逐渐减弱,更多的粒子穿过 ET

区,沉积在 BB、bb 和 AI 区。但是由于惯性作用和重力沉降作用增大的速率较慢,总的沉积作用减弱,总的采集效率减小。粒子尺度大于 200nm 时,ET 部分的重力沉积和惯性沉积开始占主导,总的沉积份额增加。

沉积在 ET<sub>1</sub> 区域中的物质主要通过机械方式廓清。沉积在呼吸道其它区域中的物质主要通过三个途径进行廓清:直接吸收入血,通过吞咽进入肠道,通过淋巴管进入血液。ICRP66 报告中给出了廓清的库室模型<sup>[1]</sup>,而其主要的假设在 ICRP Supporting Guidance 3 中有了详细的描述<sup>[5]</sup>。

其中吸收入血的过程是一个两阶段过程:第一阶段,粒子离解;第二阶段,离解物质的吸收。这两个阶段具有时间相关性。根据初始态的溶解速率、转移速率和转移态的溶解速率,可以将化合物分为快廓清 F,中等廓清 M 和慢廓清 S 三类。ICRP66 报告书中给了三类化合物廓清速率的推荐值。

### 1.3 新肺模型剂量计算

剂量模型中采用 ICRP60 号报告书中的建议<sup>[9]</sup>,先计算呼吸道各个区域辐射敏感组织的当量剂量  $H_T$ ,然后由表 1 中给出的危险分配比加权,分别得到胸腔区的当量剂量  $H_T$ (TH)和胸腔外区的当量剂量  $H_T$ (ET)。最后通过组织权重因子加权平均得到全身有效剂量。

## 2 氡子体有效剂量

氡子体单位暴露量所致有效剂量用剂量转换系数(DCF)来表示。要计算有效剂量,首先需要知道吸入放射性气溶胶粒子在肺部不同区域的沉积份额,而这个过程直接决定了后续的核素转移等过程。计算沉积过程中主要的输入参数是呼吸方式、呼吸速率和气溶胶粒径分布。前两个与个体的行为方式有关,气溶胶粒径分布与进行剂量评估的环境有关。

氡从土壤或者墙壁等析出后,在空气中发生衰变,“初生的”子体带正电,它迅速同空气中的水蒸气分子反应结合形成带电的或中性的分子团。然后同气溶胶粒子结合,形成结合态的氡子体放射性气溶胶粒子。

环境中氡子体放射性气溶胶粒径分布的测量值通常采用以下三个特征量来概括:非结合态粒径分布(粒径小于 5nm)、结合态粒径分布

(粒径大于 5nm)和非结合态份额  $f_p$ 。这些量的大小取决于氡子体在空气中同气溶胶结合、成长、吸附及沉降等行为,而这些行为过程又受空气中气溶胶的浓度、粒径分布、空气湿度和空气流动等因素影响。因此,不同环境下的氡子体放射性气溶胶粒径分布会有较大的不同。

实验测量得到的气溶胶粒径分布,利用沉积模型可以计算该粒径分布下核素在肺部区域的沉积份额。然后采用新肺模型中生物动力学库室之间的转移模型,我们可以构建一阶微分方程组,计算核素在每个库室中的衰变数。假设库室中核素均匀分布,把靶细胞剂量—深度分布作为权值对吸收能加权积分,得到库室吸收剂量。最后,考虑到不同肺部区域的剂量贡献的差别,加权得到单位氡子体暴露量所致有效剂量,即剂量转换系数。

### 2.1 单粒度气溶胶粒子的剂量转换系数

C. Zock 等人计算了单一粒径的气溶胶粒子的肺部区域的剂量转换系数<sup>[10]</sup>。在选取肺组织权重因子和辐射权重因子分别为 0.12 和 20 的情况下,对于氡衰变产物  $^{218}\text{Po}$ 、 $^{214}\text{Pb}$ 、 $^{214}\text{Bi}$ / $^{214}\text{Po}$ ,分别计算了正常鼻呼吸情况下不同粒径处的单位月工作水平下的子体的有效剂量。见图 3 所示。

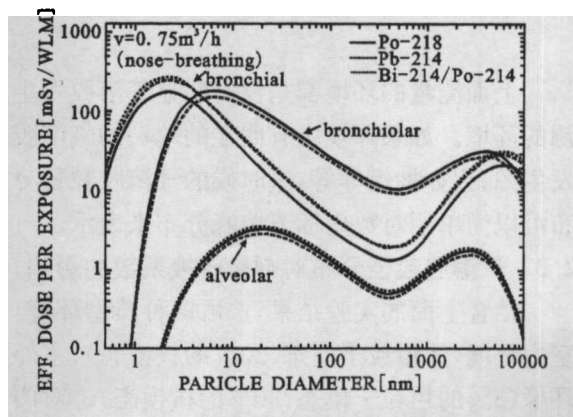


图3 气管、支气管和肺泡区的  
剂量转换系数同气溶胶粒径的关系

( $\omega_{TL}=0.12, \omega_R=20$ )

从图中我们可以看出,肺部区域的剂量分布受气溶胶粒径的影响较大,不同短寿命的子体之间的差别并不大。未结合态粒度范围内( $<5\text{nm}$ )的气溶胶粒子对气管区(BB)的有效剂量贡献最大。结合上两图来看,对于粒径范围在 10 到 100nm 范围内的气溶胶粒子,尽管在肺泡区(AI)的沉积要比在支气管区(bb)的沉积要多,但是导致的有效剂量却前者比后者

要小很多,主要原因在于靶细胞在两个分区内的分布不同。

2.2 实际环境测量的气溶胶粒径分布

理论上认为,影响未结合态份额的主要因素是氡子体同气溶胶粒子的结合速率,而该结合速率同空气中气溶胶粒子的数密度有关。其实验拟合公式<sup>[11]</sup>为: $f_{p,Rn} = \frac{414}{Z[\text{cm}^{-3}]}$ 。其中,Z为空气中气溶胶数密度。

由于空气中的气溶胶粒子数密度通常大于 $4 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ 。因此,空气中的气溶胶粒子未结合态份额通常小于0.01。只有在非常干净的室内环境中,未结合态份额才会高于0.01。只有在高氡浓度、低气溶胶数密度的氡室中我们才能得到未结合态高于0.1的情况。A.

Reineking 等人在氡室中通过测量未结合态粒子的扩散系数测量了未结合态的粒径分布<sup>[12]</sup>。对于正常室内外条件而言,并没有多少借鉴意义。因此,我们在计算氡子体有效剂量转换系数中不再详细讨论未结合态分布的影响,只考虑氡子体未结合态份额对有效剂量的影响。

对于结合态气溶胶,我们采用 Whitby1978年提出的一种三模态描述方法<sup>[13]</sup>,即核模态( $0.005 \sim 0.1 \mu\text{m}$ )、积聚模态( $0.1 \sim 2 \mu\text{m}$ )和粗粒子模态( $>2 \mu\text{m}$ )。实验上我们可以用扩散组(diffusion battery)和低压撞击器(low-pressure impactor)来测量结合态气溶胶粒子的粒径分布。一些典型环境下的实验值<sup>[14-16]</sup>见下表2所示。

表2 一些典型环境结合态气溶胶粒径分布测量值

| 环境 Z/<br>$10^3 \text{ cm}^{-2}$ | 氡子体结合态气溶胶            |               |           |                      |               |           |                      |               |          |
|---------------------------------|----------------------|---------------|-----------|----------------------|---------------|-----------|----------------------|---------------|----------|
|                                 | 核模态                  |               |           | 积聚模态                 |               |           | 粗粒子模态                |               |          |
|                                 | AMD <sub>g</sub> /nm | $\alpha_{gn}$ | $f_{pn}$  | AMD <sub>g</sub> /nm | $\alpha_{gp}$ | $f_{pp}$  | AMD <sub>g</sub> /nm | $\alpha_{gr}$ | $f_{pr}$ |
| 室外环境                            | 30~40                | 1.9~2.2       | 0.3       | 310                  | 2.1           | 0.67      | 3000                 | 1.7           | 0.03     |
| 10~70                           |                      |               | (0.2~0.4) | (250~450)            | (1.8~3.0)     | (0.4~0.8) | (2000~6000)          | (1.8~3.0)     | (0~0.10) |
| 室内环境                            | 20~40                | 1.7~2.1       | 0.3       | 210                  | 2.2           | 0.7       |                      |               |          |
| 2~500                           |                      |               | (0~0.4)   | (120~350)            | (1.6~3.0)     | (0.6~1)   |                      |               |          |
| 工作环境                            | 15~40                | 1.6~2.2       | 0.3       | 300                  | 2.5           | 0.6       | 5000                 | 1.8           | 0.10     |
| 10~500                          |                      |               | (0.2~0.5) | (150~450)            | (1.8~4.0)     | (0.3~0.8) | (3000~8000)          | (1.1~2.8)     | (0~0.3)  |

说明:表中除了给出测量平均值外,还给出了测量值的估计范围。

上面测量的环境都是没有明显气溶胶发生源的环境。如果环境中明显的单一的气溶胶发生源,比如抽烟等等,这时候的气溶胶粒径分布可以简单用对数坐标下单峰分布来表示。

2.3 气溶胶粒径分布对剂量转换系数的影响

结合上面的实验结果,选取两种典型环境:室内环境(无粗粒子模态,30%的核模态);室外环境(3%的粗粒子模态,30%的核模态)。对两种典型环境可以计算有效剂量同未结合态份额之间的关系。结合胸腔内区癌症敏感性相对分布,对胸腔内区肺组织取组织权重因子 $w_{TB}$ : $w_{TB}:w_A=0.80:0.15:0.05$ 。J. Porstendorfer 计算得到结果如下式<sup>[17]</sup>:

$DCF_{outdoors} = 9.1 + 64f_p$  室外环境  
(3%的粗粒子模态,30%的核模态) (1)

$DCF_{indoors} = 6.1 + 42f_p$  室内环境  
(无粗粒子模态,30%的核模态) (2)

不同环境下,剂量转换系数随未结合态份

额的增加而迅速增加。原因在于未结合态沉积份额比较高,同时其主要沉积在癌症敏感性比较高的区域。

对于同一种环境,J. Porstendorfer 计算得到不同结合态气溶胶粒径分布的对应的剂量转换系数同未结合态份额之间的关系如图4所示<sup>[17]</sup>。

图中可以看出,不同结合态气溶胶粒径分布工作环境下,剂量转换系数有很大的不同,随着核模态和粗粒子模态的份额的增加而增加。工作场所剂量转换系数的典型值分布在5.4~10.6mSv/WLM之间。

3 结论

利用新肺模型可以计算氡子体有效剂量转换系数。在使用模型计算剂量转换系数过程中需要考虑气溶胶粒径分布的影响。不同粒径气溶胶粒子在肺部区域的沉积有很大不同,造成

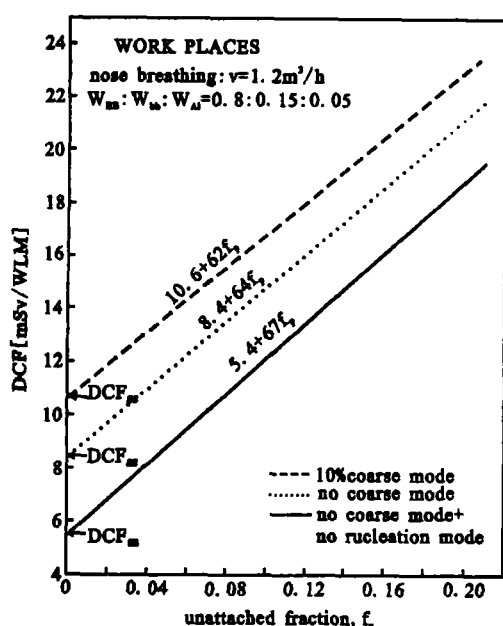


图4 不同结合态气溶胶粒径分布工作环境下  
氡子体剂量转换系数同未结合态份额的关系

的氡子体肺部区域有效剂量分布也有区别。小粒径粒子主要沉积在ET区,而主要的剂量贡献集中在BB区。随着粒径增大,气溶胶主要沉积部位转移到AI区,总的沉积效率先减小后增大,但是主要的剂量贡献还是集中在BB和bb区,主要原因是这两个区域靶细胞对氡子体放出的 $\alpha$ 粒子能量吸收效率比较高。

环境中的气溶胶粒径分布对氡子体有效剂量转换系数的影响主要集中非结合态份额和结合态分布两个参量上。剂量转换系数随未结合态份额的增加线性增加,随着核模态和粗粒子模态的增加而增加。工作场所剂量转换系数的典型值分布在5.4~10.6mSv/WLM之间。

致谢:作者在本文写作过程中,得到了上海复旦大学放射医学研究所的卓维海教授悉心指导,在此表示真诚的谢意!还要感谢防化研究院二所王善强高级工程师对本人的指导和帮助。中国辐射防护研究院的马如维老师和卢正永老师,日本明古屋大学的T. Iida教授和日本放射医学研究所的Y. Yamada教授为本人提供了一些珍贵的素材和宝贵的建议,这里一并表示由衷感谢!

#### 参考文献:

- [1] ICRP. Human respiratory tract model for radiological protection. ICRP Publication 66. Ann ICRP 24(1-3), Oxford: Pergamon Press, 1994.
- [2] ICRP. Dose coefficients for intake of radionuclides by workers. ICRP Publication 68. Ann ICRP 24

(4), Oxford: Pergamon Press, 1994.

- [3] ICRP. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides Part : Inhalation dose coefficients. ICRP Publication 71. Ann ICRP 25(3-4), Oxford: Pergamon Press, 1995.
- [4] ICRP. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides Part 5: Compilation of ingestion and inhalation dose coefficients. ICRP Publication 72. Ann ICRP 26(1), Oxford: Pergamon Press, 1995.
- [5] ICRP. Guide for the practical application of the ICRP Human Respiratory Tract Model. ICRP Supporting Guidance 3, Oxford: Pergamon Press, 2002.
- [6] Jarvis N S and Birchall A. LUDEP 1.0: A personal computer program to implement the new ICRP respiratory tract model[J]. Radiation Protection Dosimetry, 1994, 53: 191-193.
- [7] UNSCEAR. 电离辐射源与效应[C]. 联合国原子辐射效应科学委员会(UNSCEAR)2000年向联合国大会提交的报告及科学附件. 山西: 山西科学技术出版社, 2002.
- [8] Jarvis N S, Birchall A, et al. Personal Computer Program for Calculating Internal Doses Using the ICRP Publication 66 Respiratory Tract Model. NRPB-SR287, 1996.
- [9] ICRP. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann ICRP 21(1-3), Oxford: Pergamon Press, 1991.
- [10] Zock C, Prostendörfer J and Reineking A. The influence of biological and aerosol parameters of inhaled short-lived radion decay products on human lung dose[J]. Radiation Protection Dosimetry, 1996, 63(3): 197-206.
- [11] Prostendörfer J, Reineking A. Radon characteristics related to dose for different places of the human. Proceedings of the IRPA-10 Conference, Hiroshima, Japan, 2000.
- [12] Reineking et al. The size distribution of the Unattached short-lived radon decay products. Progress in radiation protection, ISSN-4506, 1998.
- [13] Whitby K T. The physical characteristics of sulfur aerosols[J]. Atmos. Environ. 1978, 12: 135-159.
- [14] Reineking A, Becker K H et al. Measurements of the activity size distributions of the short-lived radon daughters in the indoor and outdoor environ-

- ment[J]. Radiation Protection Dosimetry. 1998, 24,245-250.
- [15] Prostend rfer J et al. Aerosol size distribution of the radon progeny in outdoor air[J]. J. Environ. Radioact. 2005,51,37-48.
- [16] Reichelt A et al. Radon at workplace. Proceedings of IRPA-10, Hiroshima, Japan, 2000.
- [17] Prostend rfer J. Influence of physical parameters on doses from radon exposures. International Congress Series,1225(2002):149-160.

## Influence of the aerosol size distribution on effective dose from radon progeny using lung model

ZHANG Lei, GUO Qiu-ju

(Department of Technology Physics, Peking University, Beijing 100086)

**Abstract:** A dosimetric approach method is being used to calculate the dose per exposure unit of the short-lived radon progeny. This article reviewed the human respiratory tract model in ICRP Publication 66 and analyzed the influence of the aerosol size distribution on lung deposition. The influence of the aerosol size distribution on effective dose from radon progeny was discussed using the deposition result. The relationships between the dose conversion factor and the unattached fraction also between the dose conversion factor and the size distribution of attached aerosol of the representative environment were reviewed and discussed through using experiment data.

**Key words:** Lung model; Radon progeny; Radioactive aerosol; Size distribution; Dose conversion factor

---

(上接第 1061 页, Continued from page 1061)

## Design of Hand held RID's Monitoring system based on Embedded system

WANG Hong-wei, WEI Yi-xiang

(Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing, 100084)

**Abstract:** In this paper we introduce the design of monitoring system for the hand held radionuclide identification device(RID), constructed under the embedded operating system of WinCE. At first, we introduce the design of hardware and software platform, and following is the major part of technical view of the software system, including the driver development, P/Invoke mechanism to call the C/C++ subroutines, multi-thread technology. In the experimental hardware platform, we have developed a front-end monitoring system for portable device targeted nuclide identification and orientation. It's a full-featured and flexible system, with the functions of data acquisition, radioactivity locating, data import and export, etc.

**Key words:** Monitoring system of the hand held radionuclide identification device (RID), .NET Compact Framework, Embedded system, WinCE