

• 辐射防护评价 •

基于 Taurus 软件的氡暴露剂量转换系数评估研究

朱邦勤¹, 张 磊², 郭秋菊¹

(1. 北京大学物理学院技术物理系, 北京 100871; 2. 中国人民解放军军事科学院防化研究院, 北京 102205)

摘 要: 以英国卫生安全局发布的最新内照射软件 Taurus 为研究对象, 探讨并验证了该软件在计算氡暴露剂量转换系数上的适用性。通过计算比较 Taurus 与之前被国内外广泛应用的内照射软件 LUDEP 和 IMBA 在计算氡子体呼吸系统沉积份额的差异, 主要原因是各软件采用了不同呼吸道模型; 采用 Taurus 软件计算了²²²Rn+²²⁰Rn 共 5 个子体各单个子体在不同粒径分布等条件下的剂量转换系数, 结果表明, ²²⁰Rn 子体剂量转换系数最高约为²²²Rn 子体的 6 倍, 未结合态氡子体对剂量转换系数贡献大于结合态氡子体; 最后使用 Taurus 软件计算了典型室内室外环境中的氡剂量转换系数, 验证了该软件在氡暴露剂量转换系数估算中的准确性和实用性。与国际放射防护委员会(ICRP) 137 号报告中氡剂量转换系数高度吻合的计算结果表明, Taurus 软件不仅功能全面, 输入参数选择自由度高, 而且在呼吸道模型、消化道模型和相关生物动力学参数上均与 ICRP 最新数据库同步。

关键词: 氡暴露; 剂量转换系数; 剂量学模型; Taurus 软件; 典型环境

中图分类号: TL72

文献标志码: A

铀系天然衰变链中的氡(²²²Rn) 是惰性气体, 广泛存在于人类生存环境中。氡及其子体可经呼吸进入体内, 氡子体可附着在呼吸系统不同部位, 其衰变产生 α 粒子, 导致以呼吸器官为主的内照射发生。氡暴露所致剂量占人类所受天然本底辐射照射总剂量的一半以上^[1], 同时, 流行病学调查证实, 室内氡暴露是导致肺癌高发的第二大诱因^[2]。故开展建筑物内氡浓度水平测量以及氡暴露剂量评价与辐射安全密切相关, 是辐射防护领域重要的组成部分, 具有学术意义和实际应用价值。

氡暴露有效剂量转换系数(dose conversion factor, DCF), 即单位氡子体暴露量所致有效剂量 [$\text{nSv} \cdot (\text{Bq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$] 是氡暴露剂量估算的核心参数之一, 剂量估算中一般使用联合国原子辐射效应科学委员会(UNSCEAR) 在 1993 年报告中给出的 $9 \text{ nSv} \cdot (\text{Bq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$ 。世界卫生组织(WHO) 于 2009 年颁布了流行病学研究新的综述结果^[3], 国际放射防护委员会(ICRP) 同年在第 115 号出版物中指出“氡的有效剂量转换系数应该与其他放射

性核素一样, 采用剂量学模式进行估算”。同时还指出如果有条件, 应对典型场所开展氡子体相关物理参数测量, 以计算典型场所的 DCF, 达到准确估算氡暴露剂量的最终目的。

所谓 DCF 的剂量学模型估算, 与其他所有放射性核素一样, 是以呼吸道模型、消化道模型和生物动力学参数为基础, 构建内照射计算软件来实现的, 英国卫生安全局(UK Health Security Agency) 早年编制的 LUDEP 和 IMBA 两个软件在内照射剂量估算和氡剂量转换系数估算领域被广泛应用^[3-5]。ICRP 最新的消化道模型于 2006 年在 ICRP 100 号报告中公布(并在 ICRP 130 号报告中沿用), 其生物动力学参数发生了多方面的更新, 基于此, 2024 年英国卫生安全局颁布了最新版本的内照射软件 Taurus。为理解和掌握 Taurus 软件采用的模型和参数状况, 了解其结构和功能, 比较 Taurus 和前两代内照射剂量计算软件 IMBA 和 LUDEP 在功能和计算结果上的差异, 进而达到准确估算氡暴露剂量的研究目的, 本文在介绍 Taurus 软件的基本框架结构的基础上, 使用 ICRP

收稿日期: 2025-09-24

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(12275008)。

作者简介: 朱邦勤(2001—), 男, 2023 年毕业于北京大学物理学院物理学专业, 现为北京大学物理学院技术物理系在读硕士研究生。

E-mail: 2301110147@stu.pku.edu.cn

通信作者: 张磊。E-mail: swofely@pku.edu.cn

130 号报告中推荐的人类呼吸道物理参数^[7], 比较了不同软件在呼吸道区域的子体沉积份额, 计算了钋子体(^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi) 和钍子体(^{212}Pb , ^{212}Bi) 单个核素剂量转换系数以及氡钍子体暴露有效剂量转换系数, 讨论分析了呼吸道模型和参数的更替导致计算结果的不同, 最后利用 Taurus 软件计算了文献中典型室内环境场所的 DCF, 并对计算结果进行了验证。

1 Taurus 软件及氡暴露剂量转换系数估算

1.1 Taurus 软件

第一代内照射剂量计算软件 LUDEP (lung dose evaluation program) 1997 年由英国学者开发^[8]。随后为了应对英国批准的剂量测定服务, 提供新一代软件以解释 ICRP 推荐的新生物动力学模型的监测数据和剂量计算需求, 2004 年, 英国卫生安全局又开发了 IMBA Professional 内照射软件^[6,9]。为了使用 ICRP 的“放射性核素的职业摄入(OIR)”系列出版物中方法进行内照射剂量评估, 英国卫生安全局开发了名为“Taurus”的新软件, 2024 年升级为 Taurus Advanced。

Taurus 在 IMBA 生物测定分析集成模块代码基础上, 扩充了伤口模型的测定功能并完善了核

素摄入方式细节, 可以实现通过吸入(颗粒或气体/蒸汽)、食入或直接注射的方式处理 20 多种不同的摄入情景, 同时可以通过测量生物体、生物样本(如血液、尿液)或体外生物系统(如细胞)中的放射性活度来准确评估体内所关注的放射性核素的摄入量以及内照射剂量(Taurus 能够处理高达 2 000 种由摄入核素和摄入方式共同决定的案例)。在输入核素进入呼吸道气溶胶粒径参数、摄入方式、消化道参数和吸收入血参数后, Taurus 能够给出人类呼吸道内各区域的沉积份额, 每一个核素在不同肺部区域的当量剂量和在整个肺部器官或者其他人体器官的当量剂量, 最终给出评估人体全身的有效剂量。

Taurus 软件操作界面如图 1 所示, 分为输入、摄入方式、生物测定、计算、结果和导出报告六个模块。将 Taurus 应用于氡暴露评估时, 在输入模块里的沉积参数区域能够选择活动状态(对应相关的呼吸率)以及调节气溶胶粒径参数, 包括粒径大小、密度、形状因子和标准差。在吸收参数区域能够调节核素的快速吸收入血份额、快速慢速吸收入血速率和设置组织中间态。软件的系统生物动力学模型和消化道模型均是默认参数不可改动, 呼吸道模型区域可以调整肺内部廓清速率大小。



图 1 Taurus 主屏幕示意图

Fig.1 Taurus main screen diagram

在摄入方式模块中, 可以选择摄入类型以及摄入量, 通过计算模块调动计算类型, 最后在结果模块中得到想要的的结果。

相较于过去的内照射软件 LUDEP 和 IMBA, Taurus 在呼吸道模型、消化道模型和系统生物动力学模型上均有更新, 主要的差别列于表 1。三代

软件所使用的核素数据库同样也进行了更新: LUDEP 和 IMBA 参考的是 ICRP 38 号报告, 而 Taurus 使用了 ICRP OIR 系列的 134、137、141、151 号报告。

表 1 内照射软件内置模型

Tab.1 Internal exposure software built-in model

	LUDEP [4, 5]	IMBA [6, 8]	Taurus [7]
呼吸道模型	ICRP 66	ICRP 66	ICRP 66, 130
生物动力学模型	ICRP 30	ICRP 67, 68	ICRP 130
消化道模型	ICRP 30	ICRP 30	ICRP 130

1.2 有效剂量转换系数估算

对于吸入的短寿命子体, 结合态氡子体和未结合态氡子体在肺部不同区域的沉积规律不同以及对人体器官所致当量剂量不同, 氡暴露有效剂量转换系数计算公式为:

$$DCF = \sum_{i=1}^3 A_i \cdot D_i / (EEC \cdot T) = R \left(\sum_{i=1}^3 C_i \cdot D_i \right) / EEC \quad (1)$$

为了分别考虑, 对公式中加入上标 u 和 a (分别表示未结合态和结合态) [9-11]。

对于 ^{222}Rn 有:

$$DCF^u(^{222}\text{Rn}) = R \left(\sum_{i=1}^3 C_i^u \cdot D_i^u \right) / EEC^u = R \frac{D_{\text{Po}-218}^u C_{\text{Po}-218}^u + D_{\text{Pb}-214}^u C_{\text{Pb}-214}^u + D_{\text{Bi}-214}^u C_{\text{Bi}-214}^u}{0.105 C_{\text{Po}-218}^u + 0.518 C_{\text{Pb}-214}^u + 0.380 C_{\text{Bi}-214}^u} \quad (2)$$

$$DCF^a(^{222}\text{Rn}) = R \left(\sum_{i=1}^3 C_i^a \cdot D_i^a \right) / EEC^a = R \frac{D_{\text{Po}-218}^a C_{\text{Po}-218}^a + D_{\text{Pb}-214}^a C_{\text{Pb}-214}^a + D_{\text{Bi}-214}^a C_{\text{Bi}-214}^a}{0.105 C_{\text{Po}-218}^a + 0.518 C_{\text{Pb}-214}^a + 0.380 C_{\text{Bi}-214}^a} \quad (3)$$

对于 ^{220}Rn 有:

$$DCF^u(^{220}\text{Rn}) = R \left(\sum_{i=1}^2 C_i^u \cdot D_i^u \right) / EEC^u = R \frac{D_{\text{Pb}-212}^u C_{\text{Pb}-212}^u + D_{\text{Bi}-212}^u C_{\text{Bi}-212}^u}{0.913 C_{\text{Pb}-212}^u + 0.087 C_{\text{Bi}-212}^u} \quad (4)$$

$$DCF^a(^{220}\text{Rn}) = R \left(\sum_{i=1}^2 C_i^a \cdot D_i^a \right) / EEC^a = R \frac{D_{\text{Pb}-212}^a C_{\text{Pb}-212}^a + D_{\text{Bi}-212}^a C_{\text{Bi}-212}^a}{0.913 C_{\text{Pb}-212}^a + 0.087 C_{\text{Bi}-212}^a} \quad (5)$$

氡子体总有效剂量转换系数可以表示为:

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

在上述表达式中, A_i 为 i 个子体的活度, Bq;

D_i 为第 i 个子体单位活度所致有效剂量, Sv/Bq, 讨论 ^{222}Rn 时, $i=1, 2, 3$, 分别表示 ^{218}Po 、 ^{214}Pb 、 ^{214}Bi 三个子体, 讨论 ^{220}Rn 时, $i=1, 2$, 分别表示 ^{212}Pb 、 ^{212}Bi 两个子体; C_i 为氡子体活度浓度, Bq/m³; EEC 是平衡等效 ^{222}Rn 或 ^{220}Rn 浓度, Bq/m³; T 是暴露时间, s; R 是呼吸率, m³/h; f_p 是氡子体未结合态份额。

在不同暴露环境中, 氡子体活度浓度 C_i 的比值是不同的 [11], 因此根据室内环境的活度浓度的测量结果 [12-13], 我们假定氡子体的活度比值如下:

$$\text{未结合态 } ^{218}\text{Po} : ^{214}\text{Pb} : ^{214}\text{Bi} = 1 : 0.1 : 0$$

$$\text{结合态 } ^{218}\text{Po} : ^{214}\text{Pb} : ^{214}\text{Bi} = 1 : 0.75 : 0.6$$

对于钍子体, 根据美国国家研究委员会 [14] 的研究结果, 我们给出了假定活度比例:

$$\text{未结合态 } ^{212}\text{Pb} : ^{212}\text{Bi} = 1.0 : 0$$

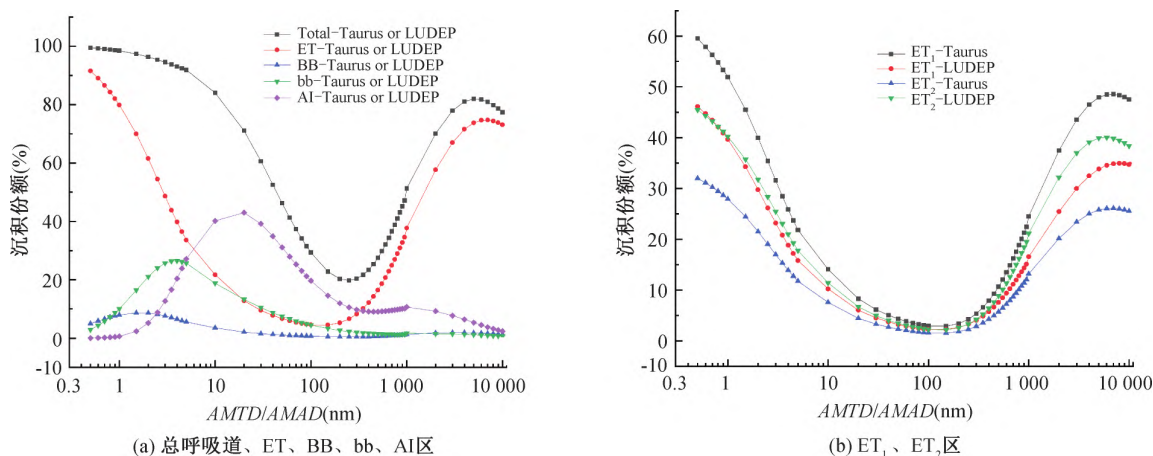
$$\text{结合态 } ^{212}\text{Pb} : ^{212}\text{Bi} = 1.0 : 0.25$$

研究表明有效剂量转换系数受到氡子体的粒径分布、未结合态份额、呼吸率、未结合态与结合态氡子体活度浓度比这几个物理量的共同影响 [9, 13]。在 Taurus 软件的操作界面中, 能够设置默认呼吸率 1.2 m³/h (或 0.78 m³/h), 在输入关键的氡子体粒径参数、摄入方式、吸收入血类型和摄入量之后, 软件能够给出在某一粒径处第 i 个子体单位活度所致有效剂量 D_i , 并根据子体活度浓度比以及氡子体的未结合态份额, 即可计算得到氡子体总的有效剂量转换系数 DCF 。

2 结果与讨论

2.1 不同软件肺部区域沉积份额比较

氡暴露导致人体内照射有效剂量最大的器官是肺, 研究肺部区域氡子体的沉积份额对于氡致有效剂量的理解与计算至关重要。鉴于内照射软件 IMBA 与 LUDEP 使用的呼吸道模型完全一样, 我们使用软件 LUDEP 和 Taurus, 分别计算了不同粒径处氡子体在呼吸道总的沉积份额, 以及在胸腔外区 (ET=ET₁+ET₂) 和胸腔区 (BB, bb, AI) 的沉积份额 (三个区组成了肺部 Lungs 区, 根据 ICRP 66 号报告“平均肺”定义的 BB、bb、AI 组织权重因子分别是 0.333、0.333、0.333) [14], 如图 2 所示, 由于未结合态氡子体粒径范围一般在 0~10 nm, 使用活度中值空气热力学直径 (AMTD) 表示; 结合态氡子体粒径范围大于 10 nm, 使用活度中值空气动力学直径 (AMAD) 表示。



注: 图中横坐标 10 nm 以下为 AMTD, 大于 10 nm 为 AMAD。

图 2 氡子体沉积份额与粒径关系

Fig.2 Relationship between radon progeny deposition fraction and particle size

图 2(a) 中呼吸道总的沉积份额用黑色曲线表征, 总的沉积份额(Total) 随着进入呼吸道的气溶胶粒径的增大先减小后增大, 另外 4 条曲线分别表征 ET、BB、bb、AI 区的沉积份额与气溶胶粒径的变化关系。Taurus、LUDEP 两个软件在图中的呼吸道区域计算结果完全一致, 这是由于他们在沉积计算过程中均使用的是 ICRP 66 号报告中的肺模型。

仔细观察 ET 区, 即图 2(a) 中的红色曲线, 小粒径的氡子体由扩散作用沉积在 ET 区, 大粒径处的氡子体由于重力沉降和惯性作用沉积在 ET 区, 然而沉积在 ET₁ 的气溶胶主要通过机械方式廓清, 沉积在 ET₂ 的气溶胶主要通过吸收入血、吞咽入肠道和经过淋巴管进入血液三种途径廓清^[7]。图 2(b) 中表征 ET₁、ET₂ 区沉积份额的 4 条曲线显示了两个软件在不同气溶胶粒径下计算的沉积份额均有差别, 说明实际上 Taurus 和 LUDEP 两个软件所使用的肺模型内部具体参数是有一定差异的, 尽管在两者的说明书中都提到软件使用了 ICRP 66 号报告中的肺模型, 但在软件实际运行过程中, 它们所设置的有关胸腔外区的廓清行为和速率参数不同, 例如 Taurus 中 ET₁ 对外部环境的廓清速率为 0.6 d⁻¹, 而在 LUDEP 中 ET₁ 对外部环境的廓清速率为 1 d⁻¹, 最终导致了沉积份额的差别。

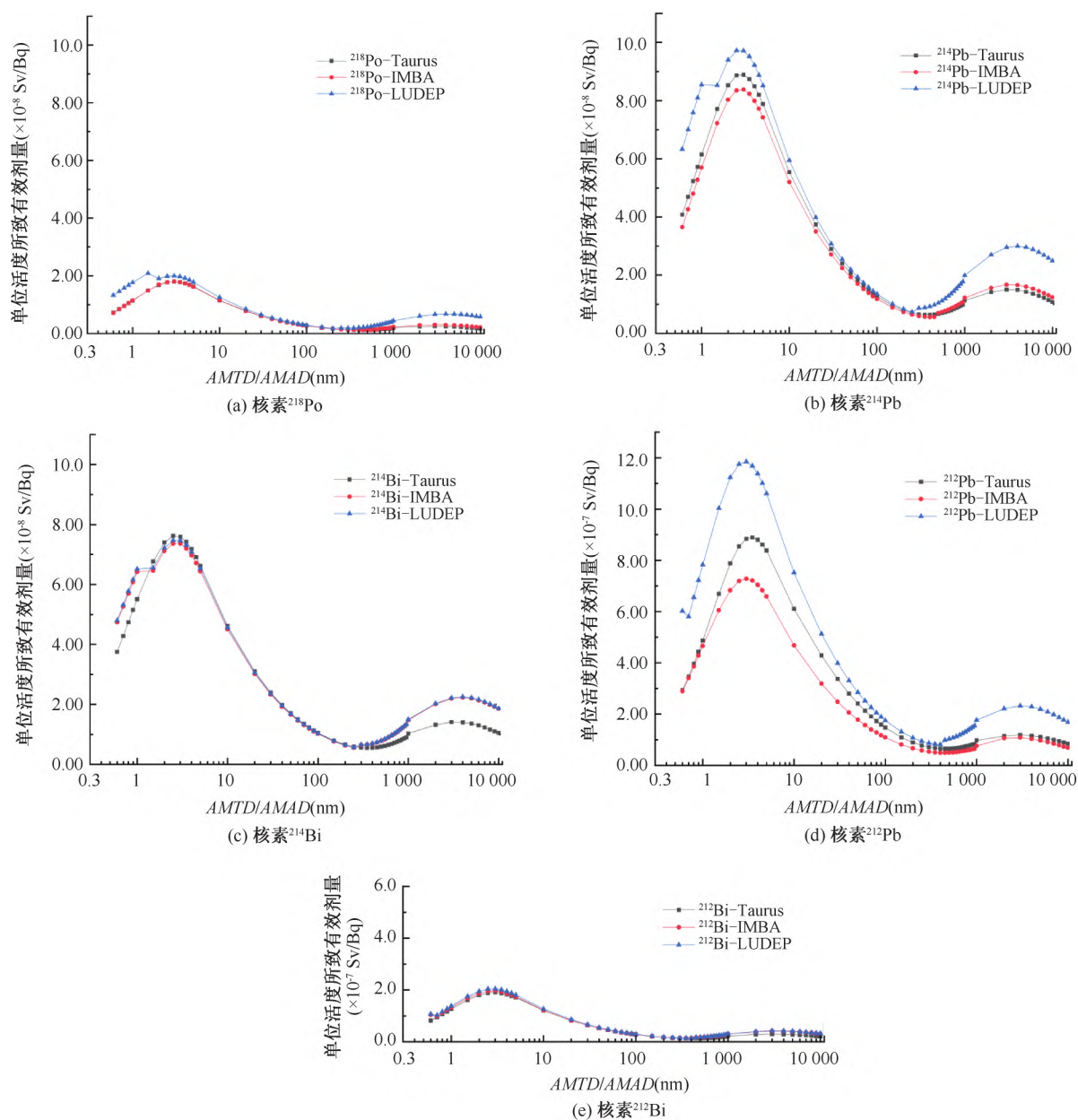
2.2 不同核素单位暴露有效剂量转换系数

将三个软件对²¹⁸Po、²¹⁴Pb、²¹⁴Bi 和²¹²Pb、²¹²Bi 5

个核素单位活度所致有效剂量的计算结果进行了对比, 结果如图 3 所示。

图中(a)、(b)、(c) 分别是 3 个氡子体(²¹⁸Po、²¹⁴Pb、²¹⁴Bi) 单个核素有效剂量转换系数随氡子体粒径变化图, 图(d)、(e) 分别是 2 个钍子体(²¹²Pb、²¹²Bi) 单个核素有效剂量转换系数随钍子体粒径变化图, 整体趋势上, 采用三个内照射软件计算的 5 种子体单位活度所致有效剂量均随子体粒径的增大先增大后减小, 再增大而后减小。单位活度的有效剂量在未结合态部分 1.5~3.5 nm 处, 出现最大值, 在结合态部分 200~450 nm 处出现最小值, 出现此结果的原因是氡子体在呼吸道中总的沉积份额也是在上述粒径区域出现最大值和最小值, 沉积量影响了有效剂量的大小。在图 3(a)、(b)、(c) 中, ²¹⁸Po 的有效剂量明显低于其他两个氡子体, ²¹⁴Pb 的最大, 在图 3(d)、(e) 中, ²¹²Pb 的有效剂量最大, 这是因为核素衰变释放的射线能量差异和半衰期不同导致的, 核素半衰期越长, 在体内的有效半排期便越长, 对人体器官所致剂量就会越大。

在图 3(b)、(d) 中, Taurus 软件与 LUDEP 相比, 后者的计算结果会高出很多, 尤其在小粒径和大粒径处, 这是它所使用的肺模型内部设置廓清行为参数不同直接导致的(例如 Taurus 中 ET₁ 对外部环境的廓清速率为 0.6 d⁻¹, 而在 LUDEP 中 ET₁ 对外部环境的廓清速率为 1 d⁻¹), 从前述沉积份额的比较就体现出来。而 Taurus 与 IMBA 比



注: 图中横坐标 10 nm 以下为 AMTD, 大于 10 nm 为 AMAD。

图3 核素单位活度所致有效剂量与粒径关系

Fig.3 Relationship between effective dose caused by unit activity of nuclides and particle size

较,IMBA 在 0 ~ 400 nm 的计算结果明显低于 Taurus,这里分析很可能是由于 IMBA 程序在对慢速吸收入血主导的核素²¹⁴Pb、²¹²Pb 的计算过程中,没有考虑组织中间态对于吸收入血过程的影响,这一部分相对于半衰期长的²¹⁴Pb、²¹²Pb 对器官的当量剂量有一定份额,所以导致了最终有效剂量的计算结果偏低。同时还有一个重要的因素,LUDEP 和 IMBA 均使用了 ICRP 68 号报告中的组织权重因子,即 ET 区对于全身的组织权重因

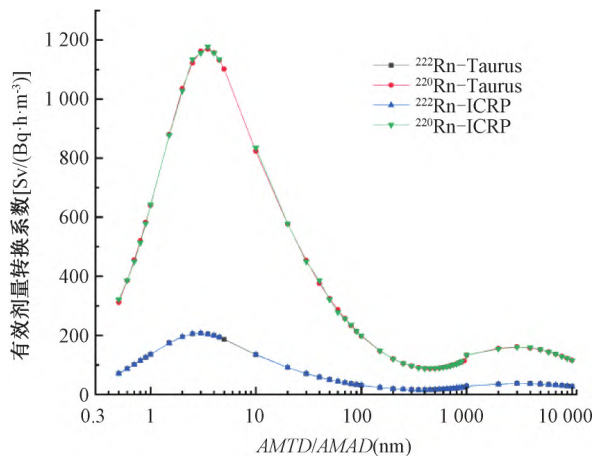
子是 0.025^[18],而 Taurus 软件使用的是更新的 ICRP 130 号报告的组织权重因子,ET 区是 0.008 6^[1](Lungs 区两个报告都是 0.12)。这也就解释 LUDEP 在小粒径和大粒径处有效剂量均会显著高于其他两个软件,因为呼吸道转移廓清参数不同导致的当量剂量偏高,还有其组织权重因子也偏大。

总体上 Taurus 与前两代内照射剂量计算软件关于核素单位活度有效剂量的结果基本吻合。具

体的数值差异是软件所参考使用的内照射模型和参数不同造成的。

2.3 氡钍子体暴露有效剂量转换系数比较

利用 Taurus 软件计算了²²²Rn 子体和²²⁰Rn 子体暴露量(即 $\text{Bq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$)的有效剂量转换系数,其随子体粒径大小的变化关系如图 4 所示,图中展示了 Taurus 软件以及 ICRP 137 号报告中的计算结果。氡钍子体暴露有效剂量转换系数随子体粒径的增大均是先增大后减小,氡钍子体的未结合态模态对于肺部所致有效剂量转换系数的贡献最大,粒径在几百纳米甚至更大时,有效剂量转换系数已经较小了,表明大粒径的氡钍子体气溶胶对于肺部所致有效剂量的贡献是较小的。



注: 图中横坐标 10 nm 以下为 AMTD, 大于 10 nm 为 AMAD。

图 4 氡钍子体有效剂量转换系数与粒径关系

Fig.4 Relationship between effective dose coefficient of radon and thoron progeny and particle size

同一粒径处,钍子体的 DCF 与氡子体的 DCF 的比值,在 60 nm 出现最大值,为 6.48;在 6 000 nm 出现最小值,为 4.25。由于钍子体的半衰期相

较于氡子体的长,放出的射线多,且释放的 α 粒子能量比氡子体大,所以钍子体暴露有效剂量转换系数明显高于氡子体。

实际上,图 4 中 Taurus 给出的氡钍两条曲线和 ICRP 提供的两条曲线它们两两重合,我们使用 Taurus 软件计算的氡钍子体暴露有效剂量转换系数的结果与 ICRP 137 号报告结果完全吻合^[19],验证了该软件计算的准确性和运行有效性。

2.4 典型环境下氡暴露剂量转换系数评估

对典型场所的环境条件计算氡钍剂量转换系数时,通过经典文献汇总了典型环境的一系列相关物理参数(包括呼吸率、未结合态份额、气溶胶粒径等),参考了 Ishikawa 2001 年研究²²²Rn 和 2007 年研究²²⁰Rn 剂量转换系数的文献^[20-21],均为室内场所(住宅)实测数据,呼吸率设置为 $0.78 \text{ m}^3/\text{h}$,还参考了 2017 年的 ICRP 137 号报告^[19]是针对室内工作区、矿山和旅游洞穴的测量,呼吸率设置为 $1.2 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

利用 Taurus 软件对上述整理的每个典型场所环境进行氡剂量转换系数计算(其中 Ishikawa 2007 年的是钍剂量转换系数计算),将计算结果整理,并一一与对应文献中提供的剂量转换系数值作对比,结果列于表 2。可以看出,Taurus 软件计算结果比 Ishikawa 的两篇文章上都偏低,是由于 Ishikawa 使用 LUDEP 进行氡钍子体剂量转换系数计算,与本文 2.2 节中图 3 所展示的结果相呼应:同一粒径处,LUDEP 计算得到的核素剂量转换系数的结果比 Taurus 偏高。从表中结果还可以看出,采用 Taurus 的计算结果与 ICRP 137 号报告中的结果吻合良好,验证了 Taurus 软件在实例应用中计算氡有效剂量转换系数的准确性与可行性。

表 2 典型场所环境 Taurus 软件计算的有效剂量转换系数

Tab.2 Effective dose conversion factor calculated by the Taurus software for typical site environments

典型场所	AMTD(nm) ¹⁾	文献报道	Taurus 计算	文献
室内家中	50,250,1 500 ²⁾	14.3 mSv/WLM	13.5 mSv/WLM	[20]
室内	40,220 ³⁾	116 nSv/($\text{Bq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$)	101.1 nSv/($\text{Bq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$)	[21]
室内	30,250 ⁴⁾	20 mSv/WLM	19.8 mSv/WLM	[19]
矿山	250	11 mSv/WLM	11.7 mSv/WLM	[19]
旅游洞穴	200	23 mSv/WLM	23.4 mSv/WLM	[19]

1) 典型场所环境中的气溶胶粒径会出现多个模态粒径值; 2) 各模态潜能浓度比: $0.26 : 0.64 : 0.02$, 几何标准差(GSD) 为: $\text{GSD}(50 \text{ nm}) = \text{GSD}(250 \text{ nm}) = 2$, $\text{GSD}(1 500 \text{ nm}) = 1.5$; 3) 各模态潜能浓度比: $0.13 : 0.85$, $\text{GSD} = 2$; 4) 各模态潜能浓度比: $0.2 : 0.8$, $\text{GSD} = 2$ 。

3 总结与展望

本文介绍了Taurus内照射剂量计算软件的构建模、参数数据背景、功能及运行操作,通过对氡暴露剂量转换系数的实例进行计算,验证了该软件在实际应用中的可行性和准确性。放射性核素导致的内照射剂量估算是辐射防护工作的重要内容,Taurus软件不仅可以应用在氡暴露剂量计

算,也可以应用在其他放射性核素的体内摄入情景下,希冀本研究工作结果能够为国内同行应用该软件开展放射性核素内照射剂量计算研究提供参考。

需要指出的是,Taurus软件的参数数据库来源于正常成人,对于患者或具有复杂结构的核医学药物等的医学应用,需要谨慎。

参考文献:

- [1] UNSCEAR. Sources of ionizing radiation [R]. UNSCEAR 2000 Report Volume I. New York: United Nations, 2000.
- [2] ICRP. Radiological protection against Radon exposure [R]. ICRP Publication 126. Ottawa: ICRP, 2014.
- [3] 李宏钊. 室内 $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$ 子体行为研究 [D]. 北京: 北京大学, 2012.
- [4] 李强. 基于LUDEP程序的放射性核素所致剂量计算 [D]. 衡阳: 南华大学, 2007.
- [5] Birchall A, Bailey M R, James A C. A lung dose evaluation program [J]. Radiation Protection Dosimetry, 1991, 38(1/3): 167-174.
- [6] Birchall A, Marsh J, Davis K, et al. Using IMBA professional plus to estimate intakes and doses [C] //Proceedings of 7th International Symposium of the Society for Radiological Protection. Cardiff [S.n], 2005: 43-48.
- [7] ICRP. Occupational intakes of radionuclides: Part 1 [R]. ICRP Publication 130. Ottawa: ICRP, 2019.
- [8] Birchall A, Puncher M, Marsh J W, et al. IMBA professional plus: A flexible approach to internal dosimetry [J]. Radiation Protection Dosimetry, 2007, 125(1/4): 194-197.
- [9] 赵超, 张磊, 郭秋菊, 等. 室内氡子体有效剂量转换系数的影响因素分析 [J]. 辐射防护, 2011, 31(4): 241-246. ZHAO Chao, ZHANG Lei, GUO Qiuju, et al. Study on influence parameters of effective dose conversion factors in indoor environment [J]. Radiation Protection, 2011, 31(4): 241-246.
- [10] 孙昌昊. 环境中未结合态氡子体测量方法及其特征参数现场调查研究 [D]. 衡阳: 南华大学, 2021.
- [11] Marsh J W, 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.
- [12] Kojima H, Abe S. Measurements of the total and unattached Radon daughters in a house [J]. Radiation Protection Dosimetry, 1988, 24(1/4): 241-244.
- [13] Reineking A, Porstendorfer J. "Unattached" fraction of short-lived Rn decay products in indoor and outdoor environments [J]. Health Physics, 1990, 58(6): 715-727.
- [14] Barber D E. Comparative dosimetry of radon in mines and homes [J]. Journal of Aerosol Science, 1992, 23. DOI: 10. 1016/0021-8502(92) 90022-N.
- [15] 赵桐可, 郑平辉, 阿不都莫明·卡地尔, 等. 氡子体比的现场测量及其对剂量转换系数的影响 [J]. 原子能科学技术, 2015, 49(9): 1705-1710. ZHAO Tongke, ZHENG Pinghui, Abdumomin K, et al. Field measurement of activity ratio of radon progeny and its influence on dose conversion factor [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2015, 49(9): 1705-1710.
- [16] ICRP. Human respiratory tract model for radiological protection [R]. ICRP Publication 66. Ottawa: ICRP, 1994.
- [17] 张磊, 郭秋菊. 气溶胶粒径分布对肺模型评价氡子体有效剂量的影响 [J]. 核电子学与探测技术, 2008, 28(6): 1203-1208. ZHANG Lei, GUO Qiuju. Influence of the aerosol size distribution on effective dose from radon progeny using lung model [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2008, 28(6): 1203-1208.
- [18] ENDO Akira, YAMAGUCHI Yasuhiro. Dose coefficients for intakes of radionuclides by workers; coefficients for radionuclides not listed in ICRP Publication 68 [R]. Tokai-mura: JAERI, 1999.
- [19] ICRP. Occupational intakes of radionuclides: Part 3 [R]. ICRP Publication 137. Ottawa: ICRP, 2017.
- [20] Ishikawa T, Tokonami S, Yonehara H, et al. Effects of activity size distribution on dose conversion factor for radon progeny

- [1] . Japanese Journal of Health Physics, 2001, 36(4) : 329–338.
- [2] Ishikawa T, Tokonami S, Nemeth C. Calculation of dose conversion factors for thoron decay products [J] . Journal of Radiological Protection, 2007, 27(4) : 447–456.

Research on assessment of dose conversion factors for radon exposure based on the Taurus software

ZHU Bangqin¹, ZHANG Lei², GUO Qiuju¹

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

2. State Key Laboratory of NBC Protection for Civilian, Beijing 102205)

Abstract: Estimation of radon exposure dose is a main component of internal radiation dose assessment, in which the dose conversion factor (*DCF*) serves as a key parameter. This study focuses on Taurus, the latest internal radiation software released by the UK Health Security Agency, and investigates and validates its application in calculating *DCF*s. First, by comparing the differences in calculating the deposition fractions of radon progeny in the respiratory system between Taurus and the previously widely used internal radiation software LUDEP and IMBA, it is found that the primary cause of these differences lies in the distinct respiratory tract models employed by each software. Second, Taurus is utilized to calculate *DCF*s for each of the five progeny of ²²²Rn and ²²⁰Rn under various conditions, such as different particle size distributions. The results indicate that the *DCF* for ²²⁰Rn progeny is approximately six times higher than that for ²²²Rn progeny, and the contribution of unattached radon progeny to the *DCF* is greater than that of attached radon progeny. Finally, Taurus is applied to calculate a series of *DCF*s in typical indoor and outdoor environments. The results, which show a high consistency with the *DCF*s in the International Commission on Radiological Protection (ICRP) Publication 137, demonstrate that Taurus not only offers comprehensive functionality and a high degree of flexibility in selecting input parameters but is also aligned with the latest ICRP database in terms of respiratory tract models, gastrointestinal tract models, and related biokinetic parameters.

Key words: radon exposure; dose conversion factor; dosimetric model; Taurus software; typical environmental conditions