

氚的内照射剂量转换系数研究

郑平辉¹, 张磊^{1,2}, 郭秋菊¹

(1. 北京大学 物理学院 核物理与核技术国家重点实验室, 北京 100871;

2. 防化研究院, 北京 102205)

摘要:不同的生物动力学模型给出的氚的摄入量滞留函数和剂量转换系数存在明显的差别。Crawford-Brown 模型在氚化学形态转化描述和年龄段剂量转换系数分析上具有独特优势, 本文在比较不同模型研究进展的基础上, 重点对 Crawford-Brown 模型进行计算, 给出不同年龄段的氚滞留函数和剂量转换系数, 并同其他模型计算结果进行了详细的比较。结果显示, 除了成人摄入氚水情况, Crawford-Brown 模型计算给出的不同年龄段人群摄入氚水和有机氚的剂量转换系数都会比 ICRP 模型的高。随着年龄的减小, 氚水和有机氚的相互转换愈发明显, 剂量转换系数上的差别愈发明显。成人氚水摄入量滞留函数的比较表明, 几种模型在 100 d 内的滞留函数曲线几乎完全相同, 只在长期滞留项上存在显著差别。

关键词:氚; 内照射; 生物动力学模型; 剂量转换系数; 摄入量滞留函数

中图分类号: TL72 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-6931(2012)S0--

Study on Internal Dose Coefficient of Tritium

ZHENG Ping-hui¹, ZHANG Lei^{1,2}, GUO Qiu-ju¹

(1. *State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China;*

2. *Research Institute of Chemical Defense, Beijing 102205, China)*

Abstract: Retention functions and dose coefficients derived from some biokinetic models vary a lot. Crawford-Brown model has the unique advantage of describing chemical forms transfer of tritium and analyzing dose coefficients of different age groups. In this article, several important biokinetic models of tritium were introduced. Crawford-Brown model was especially analyzed, age-specific dose coefficients were calculated and the results were discussed. The results show that HTO and OBT dose coefficients derived from Crawford-Brown model are larger than that from the ICRP model in all age groups except for the adult group. As the age is smaller, the difference of the two models is more obvious because of the transfer of HTO and OBT. The comparison in adult retention functions of HTO ingestion shows that retention functions in the first 100 d are almost exactly the same, while the long retention terms are significantly different.

Key words: tritium; internal exposure; biokinetic model; dose coefficient; intake retention function

氚是最重要的天然和人工放射性核素之一,其来源主要有核试验、反应堆、核动力设施释放以及宇宙射线与大气相互作用产生等。氚作为氢的同位素,广泛分布于环境中,对公众和涉氚的工作人员容易产生内照射危害,受到了大家广泛的关注。

国际放射防护委员会 ICRP 很早就开始关注氚对人体的危害,提出采用模型方法估算不同化学形态的氚在人体内滞留情况和造成的内照射剂量大小。ICRP 在总结大量工作成果的基础上在第 30 号(1979)、56 号(1990)、88 号(2001)出版物中提出了氚的生物动力学模型和剂量学模型,对氚水(HTO)和有机结合氚(OBT)的生物动力学模型进行了分别讨论,同时补充了其他化学形态的氚的模型,上述模型已经成为了国际上广泛使用的氚致内照射剂量计算模型^[1-3]。

随着生物动力学和辐射剂量学的发展,许多学者采用实验方法和模型分析方法,对氚的内照射剂量模型进行了进一步的研究,从不同方面提出了针对 ICRP 模型的修正和改进。Trivedi 等^[4]对长期慢性摄入氚化水的工作人员的检测结果进行分析,验证了来自 OBT 的剂量贡献约为 10% 的假设。Crawford-Brown^[5-6]提出了包含 HTO 和 OBT 这两个隔室之间相互转移的模型,Hamby 等^[7]对 Crawford-Brown 模型进行了细致分析。Taylor^[8]将 OBT 成分的滞留项分成了短期和长期两个隔室,使得较长时间之后的滞留更符合实际情况。我国也开展过食物和环境氚水平及所致居民剂

量的研究工作,获得了重要的实验数据^[9-10]。由于 Crawford-Brown 模型在氚化学形态转化描述和年龄别剂量转换系数分析上的独特优势,本文将在比较不同模型研究进展的基础上,重点对 Crawford-Brown 模型进行计算,给出不同年龄段的氚滞留函数和剂量转换系数,并同其他模型计算结果进行详细比较。

1 氚的生物动力学模型

ICRP 总结了不同出版物中的大量实验结果,针对摄入 HTO,提出了简化的单隔室(HTO 隔室)模型及更常见的包含了两个隔室(HTO 隔室和 OBT 隔室)的生物动力学模型(图 1a)。它们提供了快速估算由于摄入氚水引起内照射剂量的方法。针对摄入 OBT,ICRP 给出了类似的双隔室模型。Taylor 在 ICRP 双隔室模型基础上将 OBT 在体内的滞留用了 1 个短期和 1 个长期两个隔室来描述,提出了包含 3 个隔室的氚水生物动力学模型,使得氚的长期滞留情形更符合实际情况,如图 1b 所示。然而,上述模型中氚在不同隔室之间是没有相互转移的,得到的氚剂量系数也是基于摄入 HTO 或 OBT 单独计算的。实际情况中,这两种化学形态通常是一起摄入的。为此,Crawford-Brown 模型考虑了摄入时两种化学形态的比例和两隔室间的相互转移过程,即两种化学形态之间的相互转化过程,如图 1c 所示。

Crawford-Brown 模型假定 OBT 除衰变外仅通过转变为氚水这一途径减少。图 1 中,

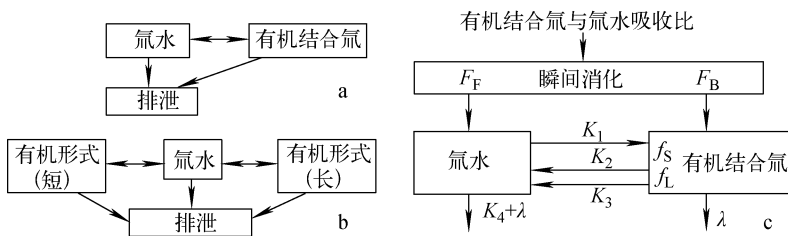


图 1 几种模型示意图

Fig. 1 Schematic of three models

a——ICRP 模型;b——Taylor 模型;c——Crawford-Brown 模型

K_1, K_2, K_3, K_4 分别为隔室之间的不同转移常数,它们是随年龄变化的参数。 F_B, F_F, f_S, f_L 分别为各个转移途径的份额。据此,可列出关于氚水和 OBT 活度随时间变化的一阶线性方程组,而首先需用到的数据是 OBT 与氚水的摄入比例 R_1 ,它作为 1 个参量出现在方程中。

2 氚的剂量转换系数

为计算氚的剂量转换系数,需在生物动力学模型基础上,首先计算核素摄入量滞留函数。再考虑氚核素在体内的均匀分布,利用剂量学模型计算给出氚的剂量转换系数。这里重点采用 Crawford-Brown 模型对氚的剂量转换系数进行计算。Crawford-Brown 模型计算中需要的各参数列于表 1^[7]。

表 1 Crawford-Brown 模型中用到的参数值

Table 1 Parameter values used in Crawford-Brown model

参数	数值
CF	0.5
F_F	$CF/(1+R_1)$
F_B	$1-F_F$
f_S	0.9
f_L	0.1
K_1/d^{-1}	$0.693/(99.7+63.6A-0.981A^2)$
K_2/d^{-1}	$0.693/(15.0+1.33A-0.0225A^2)$
K_3/d^{-1}	$0.693/(26.3+5.38A-0.0869A^2)$
K_4/d^{-1}	$0.693/(4.93+0.392A-0.00704A^2)$
λ/d^{-1}	0.000158

注:CF 为摄入有机结合氚后迅速代谢成氚水的比例;A 为年龄,且 $A \leq 21$; λ 为氚的衰变常量

根据图 1c 所示的氚的生物动力学模型,列出氚的转移微分方程组如下:

$$\frac{dHTO(t)}{dt} = -(K_4 + \lambda)HTO(t) - K_1HTO(t) + (f_S K_2 + f_L K_3)OBT(t) + F_F Q(t) \quad (1)$$

$$\frac{dOBT(t)}{dt} = -\lambda OBT(t) + K_1HTO(t) - (f_S K_2 + f_L K_3)OBT(t) + F_B Q(t) \quad (2)$$

其中, $Q(t)$ 表示摄入氚的放射性活度随时间的关系,定义为:

$$Q(t) = Q_0 \delta(t) \quad (3)$$

即源项代表的情形是 $t=0$ 时刻的单次摄入。

为便于比较,取成年组数据 ($A=21$) 进行摄入量滞留函数的计算。

当摄入的全部是 HTO 时, $R_1 = 0$, 解式 (1)、(2) 可得氚滞留函数为:

$$R(t) = HTO(t) + OBT(t) = 0.981e^{-0.693t/9.9} + 0.019e^{-0.693t/35.6} \quad (4)$$

当摄入的全部是 OBT 时, $R_1 = \infty$, 解式 (1)、(2) 可得氚滞留函数为:

$$R(t) = HTO(t) + OBT(t) = 0.299e^{-0.693t/9.9} + 0.701e^{-0.693t/35.6} \quad (5)$$

结合氚的比有效能和有效剂量计算方法,得到氚水的有效剂量系数是 1.8×10^{-11} Sv/Bq, OBT 的有效剂量系数是 4.8×10^{-11} Sv/Bq。

采样上述类似方法,就不同年龄别剂量转换系数进行计算。将上述计算所得氚的剂量转换系数与 ICRP 模型以及 Taylor 模型的计算结果列于表 2 进行比较。

从剂量转换系数的计算结果可看出, Crawford-Brown 模型和 ICRP 模型以及 Taylor 模型在计算成人摄入 HTO 的剂量转换系数时差别不明显。对于其他年龄段人群, Crawford-Brown 模型给出的摄入 HTO 的剂量转换系数会高很多,随着年龄的减小,差别愈发明显。而对于摄入 OBT 的剂量转换系数, Crawford-Brown 模型给出的计算结果普遍比 ICRP 模型

表 2 不同模型氚的剂量转换系数

Table 2 Dose coefficients of different models of tritium

模型	化学形态	不同年龄剂量系数/(Sv · Bq ⁻¹)					
		3 个月	1 岁	5 岁	10 岁	15 岁	成年人
ICRP 模型	HTO	6.4×10^{-11}	4.8×10^{-11}	3.1×10^{-11}	2.3×10^{-11}	1.8×10^{-11}	1.8×10^{-11}
	OBT	12×10^{-11}	12×10^{-11}	7.3×10^{-11}	5.7×10^{-11}	4.2×10^{-11}	4.2×10^{-11}
Crawford-Brown 模型	HTO	15.8×10^{-11}	5.9×10^{-11}	3.9×10^{-11}	2.8×10^{-11}	1.9×10^{-11}	1.8×10^{-11}
	OBT	37.6×10^{-11}	15.3×10^{-11}	10.6×10^{-11}	7.7×10^{-11}	5.2×10^{-11}	4.8×10^{-11}
Taylor 模型	HTO						1.7×10^{-11}

给出的计算结果高,差别的大小也与年龄段有关,随着年龄的减小,差别愈发明显。主要原因在于,不同年龄段人群,氚水和有机氚的转换系数不同,年龄越小,相互之间的转换越明显。

3种模型给出的成年人摄入HTO后,体内的滞留函数曲线比较如图2所示。

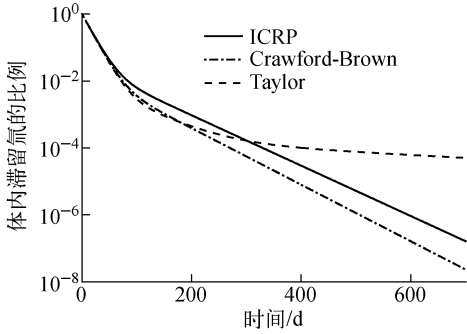


图2 不同模型下成人摄入氚水后体内氚的滞留函数比较

Fig. 2 Comparison of retention of ^3H

from HTO ingestion predicted by different models

3条滞留函数曲线在100 d以前几乎完全重合,在100 d之后出现了不同。其中两隔室的Crawford-Brown模型和三隔室的Taylor模型在100~200 d之间下降的趋势都较ICRP模型快;而200 d以后Crawford-Brown模型仍以超过ICRP模型的下降趋势排出,而Taylor模型的下降趋势明显开始变缓,300 d之后下降最慢。这是因为Taylor模型中以350 d为半排期的项在较长时间后成为剩余滞留氚的重要组成部分。

实际上,绝大部分的氚已在100 d内排出人体外,剩下的主要是结合到体内有机物上的长期滞留项。这一部分滞留项在低剂量受照条件下表现并不明显,但若出现大量摄入,它们就变得非常重要。

3 小结

氚在环境中对人体造成内照射的主要化学形态是氚水和OBT,本文总结了近年来在氚水和OBT的生物动力学模型研究方面的一些新进展,重点计算了Crawford-Brown模型的滞留函数和剂量转换系数,并比较了它与ICRP

模型和Taylor模型的区别。

参考文献:

- [1] ICRP. Limits for intakes of radionuclides by workers, ICRP Publication 30 (Part 1), Ann ICRP 2 (3-4)[R]. Oxford: Pergamon Press, 1979.
- [2] ICRP. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides, ICRP Publication 56 (Part 1), Ann ICRP 20 (2) [R]. Oxford: Pergamon Press, 1990.
- [3] ICRP. Doses to the embryo and fetus from intakes of radionuclides by the mother, ICRP Publication 88, Ann ICRP 31 (1-3) [R]. Oxford: Pergamon Press, 2001.
- [4] TRIVEDI A. Dose contribution from metabolized organically bound tritium after chronic tritiated water intakes in humans[J]. Health Phys, 2000, 78(1): 2-7.
- [5] CRAWFORD-BROWN D J. An age-dependent model of tritium metabolism following mixed (organic/inorganic) intakes[J]. Health Phys, 1984, 46: 924-928.
- [6] CRAWFORD-BROWN D J. A unified approach to age-dependent metabolic modeling[J]. Health Phys, 1984, 46: 809-822.
- [7] HAMBY D M, PALMER T S. Analysis of an internal kinetic model for free and bound tritium [J]. Health Phys, 2001, 81(4): 426-437.
- [8] TAYLOR D M. A biokinetic model for predicting the retention of ^3H in the human body after intakes of tritiated water[J]. Radiat Prot Dosim, 2003, 105: 225-228.
- [9] 任天山,赵秋芬,陈炳如,等. 中国环境水氚浓度及其变化[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2001 (5): 381-387.
REN Tianshan, ZHAO Qiufen, CHEN Bingru, et al. Tritium concentration and variation in environmental waters of China [J]. Chin J Radiol Med Prot, 2001(5): 381-387(in Chinese).
- [10] 任天山,赵秋芬,陈炳如,等. 我国食物和环境氚所致居民剂量[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2001(6): 463-468.
REN Tianshan, ZHAO Qiufen, CHEN Bingru, et al. Committed effective dose to Chinese residents caused by tritium in food and environmental water[J]. Chin J Radiol Med Prot, 2001(6): 463-468(in Chinese).