

- [8] Straume, T., Transactions of the ANS, 46, 12(1984).  
 [9] Thomson, J.F. et al., Radiat. Res., 86, 559(1981); Radiat. Res., 86, 573(1981).  
 [10] NCRP, Radiology, 135, 746(1980).  
 [11] Lindell, B., Recent Development in Radiation Protection Policy, In: Radiation-Risk-Protection, Verlay TUV Rheinland, 1984.  
 [12] NRPB, Radiol. Prot. Bull., (48), 3(1982).  
 [13] Dennis, J.A., Radiat. Prot. Dosim., 10, 1(1985).  
 [14] Bartlett, D.T., Radiot. Prot. Bull., (61), 19(1984).  
 [15] ICRP, Statement from the 1985 Paris Meeting of the ICRP.

## PROBLEMS ON QUANTITY FACTOR FOR NEUTRON RADIATION

CHEN DI

(Institute of Radiation Medicine, Beijing)

### ABSTRACT

Quantity factor  $Q$  is an important parameter for use in radiation protection.

The origin of the existing  $Q$  values and the debate about its validity are briefly reviewed. It is suggested that the existing  $Q$  values can still be used in radiation protection regulations. But it would be better that, when performing optimization analysis involving neutron protection, the ICRP 1985 recommendation for increasing neutron  $Q$  value be considered.

**Key words** Quantity Factor, Neutron Protection, Neutron  $RBE$

## 与年龄有关的放射性核素在体内的代谢模型

叶 常 青

(北京放射医学研究所)

本文扼要介绍了近几年发表的与年龄有关的核素在体内的代谢模型,它是制订不同年龄公众成员内照射剂量次级标准所必需的资料。胃肠道模型显示出,未成年人员胃肠道各段质量及内容物通过速率的不同均可影响难溶性物质对胃肠道本身的剂量,只有对1周岁以下婴儿才考虑月龄对核素经胃肠道吸收分数的影响。肺模型表明,微粒在呼吸系统各部位的沉积和廓清均与年龄有一定关系。对吸入 $^{222}\text{Rn}$ 、 $^{220}\text{Rn}$ 子体所致气管、支气管和肺部 $\alpha$ 剂量的估算表明,以6岁儿童为最高,约为成人的3倍。已报道了氡、碘-131、铯-137、放射性铊、镭和钷等核素与年龄有关的在体内器官的代谢模型。在慢性照射条件下,可用线性方程由同一元素在成人某器官的沉积分数和生物半排期求得给定年龄人员相应的数值。可获得此类数据的元素有21个。

**关键词** 核素, 代谢模型, 年龄依赖关系。

近年来由于制定不同年龄公众成员内照射剂量标准(次级的或导出的)的需要<sup>[1,2]</sup>,以及放射性药物在儿科中的应用<sup>[3,4]</sup>,分年龄组建立放射性核素在人体内的代谢模型已日益

引起人们的注意。

本文目的在于扼要地介绍国外资料中对此问题的报道,以便参照这些已有的知识去解决我们所面临的问题。参照 ICRP 第 30 号出版物(ICRP-30)<sup>[5]</sup>的内容,本文分胃肠道模型,肺模型和体内器官代谢模型三方面作介绍。

## 一、与年龄有关的胃肠道模型

成人的胃肠道模型包括区段划分,各区段壁和内容物质量,内容物在各区段停留时间和转移常数<sup>[5]</sup>。

25 岁以下不同年龄组的胃肠道质量已由 ICRP-23<sup>[6]</sup>给出。与年龄有关的胃肠道模型报道于 1983 年<sup>[7]</sup>。模型仍分四个区段。婴儿时期(1 岁以内),内容物通过胃及小肠的时间较成人的长;相反,通过大肠的时间较短,4—5 岁以后始达成人的数值。

此模型与 ICRP-30 的略有不同,在放射性物质由内容物被吸收入血的过程中,增加了小肠上皮细胞这一环节。沉积在此处的放射性物质或随同脱落的上皮细胞一起进入大肠;或由此吸收入血。放射性物质由小肠内容物转移到肠壁上皮细胞的速率常数与年龄无关。小肠壁上皮细胞脱落而进入大肠的速率与年龄有关,生后最初 2—3 月随月龄增大脱落速率缓慢增加,6 月龄开始明显增加,至 1 岁时由于饮食成分已同成人的,脱落速率也开始维持在成人的数值—— $0.20 \text{ d}^{-1}$ 。

放射性核素经胃肠道吸收入血的分数  $f_1$  亦可由此模型的动力学参数推导而得。根据大鼠实验的结果,分析了  $f_1$ (新生仔鼠)/ $f_1$ (成年鼠)的比值(用  $R$  表示)与模型各参数的关系;发现  $R$  值与  $f_1$ (成年鼠)有关,亦即与元素的化学属性有关。而且,  $R$  值又是内容物 → 小肠上皮细胞 → 血流这两阶段的转移常数的函数。由此动力学模型,根据某一元素在成人胃肠道内的  $f_1$  值,就可估算出该元素在不同年龄个体中的  $f_1$  值。结果表明,只有小于 1 岁的婴儿  $f_1$  值才需作校正,月龄越小,此校正倍数( $R$  值)越大;大于 1 岁的儿童,其  $f_1$  值取成人的数值。

有人指出<sup>[4]</sup>,对  $f_1$ (成人)  $\geq 0.05$  的放射性核素来说,为求新生儿的  $f_1$  值,其  $R = 1.5$ ;  $f_1$ (成人)为  $0.001 - 0.01$  者,  $R = 5$ ;  $f_1$ (成人)  $< 0.001$  者,  $R = 100$ 。以碘的  $f_1$  值为例,0—0.2 岁为 0.5,0.2—0.6 岁为 0.4,大于 0.6 岁为 0.35。

## 二、与年龄有关的肺模型

儿童的呼吸道与成人的相比有很大差别。1979 年由 Hofmann 提出的与年龄有关的肺解剖学模型<sup>[8]</sup>是由 Landhahl 模型(1950)发展而来。它假设:(1)上呼吸道(气管—亚节段支气管)各级气道数出生后保持不变;给定年龄各级通道的体积或长度分别由该年龄全肺体积或该通道成人时的长度乘以该级通道所在肺叶的体积分数(成人的某肺叶体积占全肺体积的分数)而求得;在此基础上按圆柱体求出各级通道直径。(2)下呼吸道(终末支气管—肺泡囊)各级的通道数随年龄而增加,10 岁前增加较快,而后逐渐达成人的数值;设通道为圆柱形,其长度与直径的比值取成人的数值,则按所在肺叶的体积而求得各级通道不同年龄时的长度和直径。以后, Hofmann 又按 Weibel-A 模型计算了气管(0 级)至终末支气管(16 级)的不同年龄人员各级通道的长度和直径;此处,设通道数不变,通道的直径和长度是肺体积三次方根的函数<sup>[9]</sup>。Crawford 设计的与年龄有关的肺模型<sup>[10]</sup>采用了

Weibel 的对称分支模型,但增加了鼻咽部。上呼吸道各级通道数保持不变,其体积按不同年龄人员与成人的呼吸道死腔比而求得;肺部的空气通道数在 8 岁前随年龄而增加,直径保持不变,长度按 Weibel 模型成比例地缩小。

不同年龄人员的呼吸生理参数,包括肺总容量、功能性残留容量以及不同状态下呼吸量,已由 ICRP-23 给出<sup>[6]</sup>。有人用一个与体重有关的肺模型来估算某些呼吸生理参数,如潮气量和平均呼吸周期<sup>[11]</sup>。

肺模型的重要内容是气溶胶在呼吸系统内的沉积和廓清<sup>[6]</sup>。Crawford 曾计算了气溶胶在不同年龄人员呼吸系统三个部位(鼻咽部 NP,气管支气管部 TB,肺部 P)的沉积分数。对单分散相粒子,考虑的因素有年龄(0—36 岁)、机体状态(休息、轻度劳动)和粒子大小(0.01—10  $\mu\text{m}$ )。结果表明,粒径在 0.01—0.1  $\mu\text{m}$  范围内,在上述三个部位的沉积分数对年龄的反应不敏感,尤其是 4 岁以后。在 NP 部,大于 1  $\mu\text{m}$  的粒子随粒径增大沉积分数亦增加;在年龄分布上,2—3 岁时出现峰值。在 TB 部,小于 1  $\mu\text{m}$  的粒子在儿童时期随年龄增大其沉积分数减小,7—8 岁后基本上在同一水平;大于 2  $\mu\text{m}$  的粒子,儿童时期的沉积分数反而减少,谷值见于 2—4 岁。P 部亦有类似现象<sup>[10]</sup>。

对几何标准差( $\sigma_g$ )为 4.4 的多分散相粒子,Crawford 给出了 0, 4, 8, 16 岁及成人五个年龄组的沉积分数<sup>[12]</sup>。以 0 岁(新生儿)的数值与成人的相比(其它 3 组的数值一般介于两者之间),在 NP 部,当  $AMAD < 0.2 \mu\text{m}$  时,新生儿的沉积分数明显大于成人的;大于 1  $\mu\text{m}$  则两者已很接近。在 TB 部, <1  $\mu\text{m}$  的粒子在新生儿的沉积分数可达成人的 2 倍;当粒子 >1  $\mu\text{m}$  时,两者相差不大。在 P 部,当粒子在 0.01—100  $\mu\text{m}$  范围内,它们在此两个年龄组的沉积分数均较接近。

气溶胶在口腔内的沉积是 Crawford 模型对 ICRP 模型的补充之处。以沉积分数为纵坐标,粒子的直径平方( $d_p^2$ ,  $\text{cm}^2$ )与流量率( $F$ ,  $\text{l min}^{-1}$ )的乘积为横坐标,两者呈 S 形关系曲线;随年龄的增大,此曲线右移<sup>[12]</sup>。

Hofmann 按他设计的模型计算了长期吸入完全结合在天然气溶胶(半径众数为 0.02—0.04  $\mu\text{m}$ )上的  $^{222}\text{Rn}$  子体 RaC 和  $^{220}\text{Rn}$  子体 ThC 在 TB 及 P 部位的滞留分数<sup>[8]</sup>。结果表明,此分数是年龄和机体状态的函数。除出生后头几年外,滞留分数并不随年龄而有明显的改变。在劳动时 TB 部的滞留分数小于休息时的,而 P 部则相反。考虑到节段和亚节段支气管是发生肺癌的紧要部位,Hofmann 又进一步分析了自由原子或结合在  $AMAD = 0.08 \mu\text{m}$  粒子上的原子在不同年龄人员第 6 级支气管表面上的沉积率,证明除出生后头几年高于其它年龄外,7—8 岁后的沉积率几乎保持恒定。他还给出了上述两种状态的原子在 0—16 各级支气管表面的沉积率,6 岁的数值约为成人的 2 倍,但自由原子吸入后在低位(> 10 级)支气管表面的沉积率成人的大于 6 岁儿童的<sup>[9]</sup>。

年龄对气溶胶自 NP 及 P 部位排除的影响,实验材料很少,亦无合适的理论模型;仅承认粒子大小、肺泡壁厚度、表面活化剂产量、血流通过的利用率或巨噬细胞的密度可影响廓清率。因为,与 ICRP 肺模型 a, b, e, f, g, h, i 和 j 通道有关的参数值与年龄无关。主要分析 c 和 d 通道与年龄的依赖关系<sup>[12]</sup>。

Yeates 认为气溶胶由 TB 部吸收入血(c 途径)的动力学过程与年龄无关。但 Crawford 认为可能间接有关,因为即使 c 途径的速率常数不随年龄而改变,对给定溶解度的放射性核素来说,随着个体年龄小而 d 途径(TB 部→胃肠道)的速率快,则两个途径竞争的结果,

分配给 c 途径的分数会因此变小。

f 和 g 两途径(P 部→TB 部)的廓清,其本身与年龄无关,但气溶胶随粘液携带通过 d 途径转移至胃肠道时,就会对 f 和 g 途径有一定影响。不同年龄个体 TB 部的粘液在某一级支气管的转移速率早由 Altshuler 进行过计算<sup>[13]</sup>,决定此速率的三个因素是该级支气管内表面积、单位面积的粘液产量以及粘液厚度,而只有粘液厚度会随年龄增大而增厚。计算结果表明,随年龄增大粘液转移率减慢,至成人时仅为婴儿时的三分之一左右。Yeates 给出了气溶胶通过整个 TB 部位的时间,新生儿为 650 min,32 岁为 2200 min。Crawford 用两项指数式表示气溶胶粒子在 TB 部位的滞留(ICRP 肺模型用单项指数式表示),并给出了 5 个年龄组(0, 4, 8, 12 岁和成人)、两种机体状态(休息、轻度劳动)和三种分散度( $\sigma_g=1.2, 2.8$  和  $4.4$ )、 $AMAD=0.2-10 \mu\text{m}$  的气溶胶滞留方程的系数值;其中, $\sigma_g=4.4$ 、 $AMAD=1.0 \mu\text{m}$  时成人的滞留方程中慢廓清成分的廓清速率相当于 ICRP 肺模型相应的数值<sup>[12]</sup>。

按给定的不同人员(年龄、职业)每日在室内外的分配时间,Hofmann 计算了吸入城市环境中参考大气由  $^{222}\text{Rn}$  或  $^{220}\text{Rn}$  的子体对 TB 和 P 部位的平均  $\alpha$  剂量率;证明 6 岁时  $\alpha$  剂量率达最大值,以后逐渐下降,6 岁的数值相当于成人的 3 倍左右;从事重体力劳动和处于不利的大气条件下, $\alpha$  剂量率可增至 30 倍,但 6 岁的数值仍高于成人;2 岁时 TB 部的  $\alpha$  剂量率最低,这与个体活动状态及 TB 质量在此以前时期迅速增加有关。在此基础上,Hofmann 提出了一个与年龄有关的剂量修正因子(ADMF);最大值见于 6 岁,为 2.4,0—2 岁阶段,TB 部和 P 部的 ADMF 有所不同<sup>[8]</sup>。氡子体对不同级支气管基底细胞所致的  $\alpha$  剂量率亦呈现与年龄有关系。当吸入平衡态氡子体时,不同年龄人员以新生儿为最高;各级支气管以第 12 级(终末支气管)为最高,与已公布的结果有矛盾;当考虑粘液在支气管内的转移速率是年龄的函数时, $\alpha$  剂量率会比设此速率为恒定时高,新生儿时期尤为显著。当吸入的空气中氡子体按参考大气组分时,则剂量率的年龄分布仍以 6 岁时为最高;级间相比,以第 6 级为最高,第 4 级次之。Hofmann 认为,从基底细胞  $\alpha$  剂量考虑,仍可取他以前推荐的 ADMF 数值<sup>[9]</sup>。Harley 按五叶肺模型和 ICRP-23 的呼吸生理参数估算了吸入环境空气中氡子体后各级支气管基底细胞所受的  $\alpha$  剂量<sup>[14]</sup>。最高剂量见于第 2 和 4 级,其它各级约为第 2 级的二分之一。取第 4 级通道的五个肺叶数值的均值,男性成人、女性成人、10 岁儿童和 1 岁婴儿的剂量转换因子依次为 5.2, 5.0, 12 和 7.7 mGy/WLM。

### 三、与年龄有关的体内器官代谢模型

ICRP 发表的元素在体内器官的一级动力学代谢模型参数值已做过介绍<sup>[15]</sup>。此模型除了 Ca, Sr, Ba, Ra 外,均以指数函数(单项或多项)表示元素自沉积部位的排出速率。近年来陆续报道了一些核素与年龄有关的代谢模型与此略有不同。

#### 1. 氟

Crawford 提出了一个包含体水(区间 1)和有机氟(区间 2)两个区间的氟代谢模型<sup>[16]</sup>。氟水摄入后,自区间 1 以较快速率排出,半排期长短与年龄有关,新生儿为 5 d,成人则增至 10 d;与此同时,亦以缓慢的速度转移至区间 2;经此途径的半排期,设与年龄无关,

为 1000 d, 设与年龄有关则成人 1000 d, 新生儿为 100 d。摄入的含氟有机物进入区间 2 后, 有一半降解代谢后转移至区间 1; 若设此过程与年龄有关, 则降解代谢分数在新生儿时期为 0.3。由区间 2 向区间 1 的转移, 以两种速率进行, 成人的半排期分别为 33 和 100 d, 分别占 90% 和 10%; 上述数值在新生儿时分别为 15 d 和 27 d。基于上述设定, 单位活度氟(氟水或有机氟)进入血流后在体内所致的时间累计活度, 在 15 岁前基本上成正比随年龄增加, 而后缓慢地达成人时的最高值。由区间 1 向区间 2 转移速率以及在区间 2 降解代谢分数是否与年龄有关, 对累积活度的影响不大。

## 2. 碘-131

曾报道<sup>131</sup>I 在不同年龄甲状腺中有效半排期, 0, 1, 5, 15 岁及成人时的数值分别为 5.1, 6.1, 6.3, 6.9 和 7.6 d<sup>[17]</sup>。另一报道,<sup>131</sup>I 在四个年龄组人员甲状腺内的生物半排期均值(波动范围)分别为: 新生儿 16(6-23)d, 0.5—2 岁儿童 13(4—39)d, 6—16 岁青少年 50(19—118)d, 大于 18 岁的成人 85 (21—372)d。而美国核管会的选定值依次为 20, 20, 50 和 100 d。结合甲状腺质量以及<sup>131</sup>I 在甲状腺内吸收分数的年龄差异, 四个年龄组的甲状腺剂量当量换算因子(Sv/MBq 食入活度)依次为  $6.8 \pm 5.1$ ,  $3.8 \pm 2.2$ ,  $2.3 \pm 1.3$  和  $0.37 \pm 0.24$ <sup>[18]</sup>。

## 3. 铯-137

大人组的调查已证明<sup>137</sup>Cs 在体内的生物半排期( $T_b$ , 天)取决于年龄( $x$ , 岁)。在总结已报道资料基础上, 有人建立了  $T_b = 12.8 (x^{0.5} + e^{-x})$  拟合方程, 并给出了与年龄有关的全身剂量换算因子( $\mu\text{Gy/kBq}$ ), 新生儿为 25, 16 岁最低, 为 10, 至 70 岁增至 20<sup>[19]</sup>。对 110 名(男 60, 女 50)居民体内<sup>137</sup>Cs 含量测量结果表明,<sup>137</sup>Cs 自人体内的生物半排期, 5—14 岁为 20 d; 对男性, 15—30 岁由 67 d 增至 90 d 左右, 30—50 岁维持在 93 d 上下, 大于 50 岁则逐渐降至 50 d; 对女性, 15—50 岁由 15 d 增至 50 d 左右<sup>[20]</sup>。

## 4. 碱土元素

关于碱土元素与年龄有关的代谢模型已有多篇报道, 但涉及的核素主要是锶和镭。

Papworth 根据始于六十年代对英国居民骨内和饮食内<sup>90</sup>Sr 含量的调查结果, 建立了<sup>90</sup>Sr 在人骨内的代谢模型, 并两次估算了此模型的参数值<sup>[21,22]</sup>。按此模型, 决定  $t$  时刻骨体积内<sup>90</sup>Sr 活度变化的因素有:  $t$  时刻饮食中<sup>90</sup>Sr/Ca 含量比, 摄钙率( $\dot{r}$ ), 食入的<sup>90</sup>Sr 进入到骨体积的分数( $\mu$ ),  $t$  时刻骨体积中总活度,<sup>90</sup>Sr 自骨内的排出常数( $\lambda'$ )及其物理衰变常数。其中  $\dot{r}$ ,  $\mu$  和  $\lambda'$  均为年龄的函数。

按再次核算的结果,  $\mu$  值在新生儿时最高, 为 10%; 至 5 岁左右降至约 4.5%, 并维持此水平至 10 岁; 以后又升高至 15 岁时的 9.5%, 而后再渐降至成人值 4.5%。 $\dot{r}$  值( $\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$ )生后第一年约 0.4, 至 4 岁已增至 0.9, 9—18 岁保持在 1.1 水平, 后渐降, 至 70 岁时为 0.8。排出常数  $\lambda'$  在新生儿时十分小; 后迅速增大, 至 4—5 岁达最大值, 约  $0.38 \text{ a}^{-1}$ ; 接着又降低, 至 10—11 岁时又几乎接近 0; 在 11—15 岁期间又升高至  $0.12 \text{ a}^{-1}$ , 以后维持在此水平。

按此模型, 食入  $1 \text{ kBq}^{90}\text{Sr}$  对红骨髓的剂量( $\mu\text{Gy}$ )以出生时为最高 1200, 至 5 岁降至

240, 20岁前波动于140—270之间, 20—65岁由120降至90。食入 $^{89}\text{Sr}$ 后亦有类似的趋势, 但相应的数值要低得多, 新生儿为90, 5岁时为6, 20岁时为2, 以后保持此水平。骨小梁骨内膜细胞的剂量约为骨髓剂量的1.5倍, 皮质骨小腔内衬细胞的剂量约为骨髓的3倍。Leggett亦提出过类似的 $^{90}\text{Sr}$ 与年龄有关的骨剂量学模型<sup>[23]</sup>。

碱土元素在成人体内的代谢模型<sup>[24]</sup>在实际应用中有一定困难。为此Johnson提出了一个新的模型, 它的特点是进入血流的碱土元素按各自的转移常数 $\lambda_i$ 进入到*i*区间(软组织、骨表面、致密骨体积、疏松骨体积), 或者直接排出; 亦可按相反方向由*i*区间以 $\alpha_i$ 转移常数进入血流。在两类骨体积中均再分为A和B两个亚区间。用这个模型就很容易用微分式来描述元素在各区间的滞留<sup>[25]</sup>。

在给出了上述模型各转移常数的成人数值的基础上, 又专门讨论了镭的与年龄有关的代谢模型<sup>[26]</sup>。根据骨体积及其钙含量随年龄变化的资料, Johnson对镭的骨体积 $\lambda_i$ 和 $\alpha_i$ 成人值作了修正, 获得了与年龄有关的参数值, 给出了镭在四个年龄组致密骨和疏松骨内的滞留曲线。并在考虑了剂量学方面其它一些与年龄有关的修正因子后, 给出了0—70岁人员摄入单位活度 $^{226}\text{Ra}$ 后所致的有效约定剂量换算因子( $\mu\text{Sv/Bq}$ )。吸入时, 新生儿的数值最高16, 至12岁降至最低值约1.5, 至20岁增至约2.0, 以后一直保持此水平。食入时, 最高值约为0.70, 见于新生儿, 4—8岁降至最低值约为0.10, 16—20岁增至0.25左右, 后缓慢下降, 至60岁时约降至0.10。

Johnson利用此模型进一步估算了碱土核素(包括 $^{41}\text{Ca}$ ,  $^{85}\text{Sr}$ ,  $^{89}\text{Sr}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{140}\text{Ba}$ ,  $^{223}\text{Ra}$ ,  $^{224}\text{Ra}$ ,  $^{225}\text{Ra}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ 和 $^{228}\text{Ra}$ ), 在两个年龄组(1岁婴儿, 成人)的源部位(骨表面、骨小梁、皮质骨)的累积活度( $Q_{50}$ )以及靶部位(骨表面、红骨髓)的约定剂量当量( $D_{50}$ )<sup>[27]</sup>。两组 $Q$ 的比值( $Q_{1岁}/Q_{成人}$ )骨表面0.6—1.1; 骨体积,  $^{85, 89}\text{Sr}$ ,  $^{140}\text{Ba}$ ,  $^{223, 224, 225}\text{Ra}$ 为2—7、其它核素 $< 1$ 。两组 $D$ 的比值( $D_{1岁}/D_{成人}$ )均大于1, Ca为3—5, Sr为5—35, Ba为8—15, Ra为2—12。

## 5. 钷

按Leggett提出的钷在骨内与年龄有关的滞留模型<sup>[28]</sup>, 循环于儿童血液中的钷约70%沉积于骨, 并一分为二地先分布于骨小梁和皮质骨的骨表面; 在成人, 沉积于骨的仅约50%, 其中60%分布于骨小梁骨表面, 40%在皮质骨骨表面。沉积于骨表面的钷, 或被新骨包埋而进入骨体积, 或被破骨细胞吸收而转移至骨小腔内容物。由这两种途径所致的转移率取决于个体的年龄及骨体积的类型。在发育成熟的骨中, 上述两种对立的过程不再是骨再造的主要类型。包埋在骨体积中的钷, 最终要在此处分布, 对骨小梁来说, 此转移率随年龄而异; 对皮质骨, 无论是成年或青少年, 此过程均十分缓慢。骨髓处的钷可再入血液, 对血管丰富的儿童来说, 此过程较活跃。

钷沉积于肝的分数随年龄而增加, 少年时约0.1, 成年时约0.3; 钷自肝脏排出无年龄差别。除骨和肝以外的部位, 钷的滞留和转移过程均与年龄无关。

按此模型计算的单位活度钷-239注入血流后对敏感骨组织所致的约定剂量, 由于此期间大部分钷在各器官间的再循环过程, 致使很少有年龄上差别。

## 6. 通用的与年龄有关的代谢模型

这是在美国橡树岭国家实验所(ORNL)代谢和剂量组成员多年工作基础上形成的一个

通用模型<sup>[29]</sup>。

此模型的基础是,对大多数核素来说,假设体内存在一个通用的调节机制,它在核素代谢与年龄关系上反映的特点是沉积随器官增重率的增加而增多,生物半排期随器官质量增大而延长。换言之,元素在小的快速生长的器官内沉积较多、转移较快。

元素在体内的行径用一个链式模型表示,与ICRP模型<sup>[5]</sup>的区别在于把肝或肾作为元素排出体外的必经通道。代表此模型中每一链代谢特征的参数是沉积分数( $f$ )和转移速率( $\lambda$ )。此模型仅用于慢性照射和建立次级标准。

推导表明,可用线性方程由成人(A)某器官(i)的 $f_i(A)$ 或 $\lambda_i(A)$ 求得给定年龄( $x$ )的 $f_i(x)$ 或 $\lambda_i(x)$ ,即

$$f_i(x) = f_i(A) [1 + a(dm_i(x)/\dot{N}_i(x)dt)]$$

$$\lambda_i(x) = \lambda_i(A) + b[1 - m_i(x)/m_i(A)]$$

此方程中涉及给定年龄与成年的 $i$ 器官质量比 $m_i(x)/m_i(A)$ ,该器官质量变化率 $dm_i/dt$ 以及年龄依赖的大分子(蛋白)吸收率 $\dot{N}_i$ ,是体重的函数;方程中的常数项 $a$ 和 $b$ 视元素及器官而定。但元素自肝、肾的生物半排期不遵循上述与年龄有关的线性关系。

利用此通用模型,Crawford给出了五个年龄组(0, 5, 10, 15岁及成人)、22个元素在体内有关器官的 $f_i(x)$ 和 $\lambda_i(x)$ 。其中,成人的参数值完全与ICRP模型相同的<sup>[16]</sup>有K, Cr, Mn, Fe, Co, Zn, Te, Cs, Th, U, Pu, Am和Cm;部分相同的有Tc, Ru, I和Pb;完全不同的有Sr, Ba, Ra和Pa。

#### 四、小 结

放射性核素在体内与年龄有关的代谢模型的研究已有很大进展,并逐步形成一个个体系。结合内照射剂量计算中另一重要参数——与年龄有关的比有效能量<sup>[30]</sup>,可以逐步求得某些核素与年龄有关的剂量换算因子(ADMF),供实际工作中应用,这就是内照射剂量学中这一新领域应达到的目的。

#### 参 考 文 献

- [1] ICRP, Statement from the 1983 Washington Meeting of the ICRP, Annals of the ICRP, 14(1), 1984.
- [2] 中华人民共和国国家标准, GB 4792-84, 放射卫生基本标准 1984年.
- [3] Kereiakes, J.K., et al., 2nd Radiopharmaceutical Dosimetry Symposium, p. 77, 1977.
- [4] Henrichs, K. et al., *Phy. Med. Biol.*, 27, 775(1982).
- [5] ICRP, Publication 30, Part I, Annals of the ICRP, 2(3/4), 1979.
- [6] ICRP, Publication 23, 1975.
- [7] Crawford-Brown, D.J., *Health Phys.*, 40, 609(1983).
- [8] Hofmann, W., et al., *Health Phys.*, 37, 517(1979).
- [9] Hofmann, W., *Health Phys.*, 43, 31(1982).
- [10] Crawford, D.J., *Phy. Med. Biol.*, 27, 539(1982).
- [11] Daschil, F., et al., PNL-SA-11049, p. 95, 1983.
- [12] Crawford, D.J. et al., *Radiation Protection Dosimetry*, 2, 209(1982).
- [13] Altshuler, B., et al., *Health Phys.*, 10, 1137.(1964).
- [14] Harley, et al., *Health Phys.*, 42, 789(1982).
- [15] 叶常青, 中华放射医学与防护杂志, 3(1), 63(1983).
- [16] Crawford-Brown, D.J., *Health Phys.*, 46, 924(1984).
- [17] Kaul, A. et al., *Radiation Environ. Biophys.*, 18, 185(1980).
- [18] Dunning, D.E. et al., *Health Phys.*, 40, 661(1981).
- [19] McCraw, T.F., *Radiol. Health Data*, 6, 711(1965).
- [20] Boni, A.L., *Nature*, 222, 1188(1969).

- [21] Papworth, D.G. et al., *Phy. Med. Biol.*, **18**, 169(1973).  
[22] Papworth, D.G. et al., *Phy. Med. Biol.*, **29**, 1045(1984).  
[23] Leggett, R.W. et al., *Health Phys.*, **43**, 307(1982).  
[24] ICRP, Publication 20, 1973.  
[25] Johnson, J.R. et al., *Radiation Protection Dosimetry*, **1**, 8(1981).  
[26] Johnson, J.R., *Health Phys.*, **44**, Suppl., 1, 91(1983).  
[27] Johnson J.R. IRPA, 6 th. Inter. Cong., p. 485, 1984.  
[28] Leggett R.W. IRPA, 6 th. Inter. Cong., p. 454, 1984.  
[29] Crawford-Brown D.J. *Health Phys.*, **46**, 809(1984).  
[30] 郑文忠, 内照射剂量计算中比有效能量的年龄依赖关系, 本期, 1986年.

## AGE-DEPENDENT METABOLIC MODEL OF RADIONUCLIDES IN HUMAN BODY

YE CHANGQING

(*Institute of Radiation Medicine, Beijing*)

### ABSTRACT

Age-dependent metabolic model of radionuclides in human body was introduced briefly. These data are necessary in setting up the secondary dose limit of internal exposure of the general public. For the gastro-intestinal tract model, it was shown that the dose of various sections of GI tract caused by insoluble radioactive materials were influenced by the mass of section and mean residence time, both of which are age-dependent, but the absorption fraction  $f_1$  through GI tract should be corrected only for the infant less than 1 year of age. For the lung model, it was indicated that the fraction of deposition or clearance of particles in the different compartments of lung were related to age. The doses of tracheobronchial and pulmonary compartment of adult for  $^{222}\text{Rn}$  or  $^{220}\text{Rn}$  with their decay products were one third of that of 6-years old child who received the maximum dose in comparison with other ages. The age-dependent metabolic models in organ and/or body of Tritium, Iodine-131, Caesium-137, radioactive Strontium, Radium and Plutonium were reported. A generalized approach for estimating the effect of age on deposition fractions and retention half-time were presented. Calculated results indicated that younger ages were characterized by increased deposition fraction and decreased half-time for retention. Representative examples were provided for 21 elements of current interest in health physics.

**Key words** Radionuclide, Metabolic model, Age-dependence.