



国际放射防护委员会第10A出版物

原子能出版社

反复或持续吸收放射性核素后体内沾染量的估算

反复或持续吸收放射性核素后 体内沾染量的估算

叶长青译 徐海超 果 行校

原子能出版社

**The Assessment of Internal Contamination
Resulting from Recurrent or Prolonged Uptakes**

1971

**反复或持续吸收放射性核素后
体内沾染量的估算**

叶长青译 徐海超 果 行校

原子能出版社出版

中国青年出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

(只限国内发行)

☆

开本 850 × 1168 $1/32$ · 印张 1 $1/2$ · 字数 35 千字
1975年1月北京第一版 · 1975年1月北京第一次印刷

印数 001—3000 · 定价: 0.23 元

统一书号: 15175 · 023

11111

内 容 简 介

本书介绍了放射性核素进入体内的滞留和排出情况，并用通用的公式对体内沾染量进行了估算。附录中还介绍了基本方程推导等内容。

本书译自国际放射防护委员会（ICRP）第10 A号出版物，此出版物于1969年4月被该委员会采纳应用。

本书可供从事放射医学、放射生物学、辐射剂量学等专业的科研和工作人员参考。

目 录

1. 引言	(1)
2. 通用的公式	(4)
3. 一次照射后在无限时间内的递减性吸收	(5)
A. 引言	(5)
B. 非转移性放射性核素在肺内的滞留	(6)
C. 肺沾染引起的肺淋巴结内的沉积	(6)
D. 肺沾染的随尿排出	(8)
E. 肺沾染引起的骨骼内的沉积	(10)
F. 伤口沾染后核素在骨骼内的沉积和排出	(13)
4. 在短期内多次吸收	(13)
A. 引言	(13)
B. 亲骨性放射性核素的代谢与其他核素的差别	(20)
C. 图 5~10 的一般的说明	(20)
5. 参考文献	(31)
6. 附录	(33)
A. 基本方程的推导	(33)
B. 国际放射防护委员会第 10 号出版物中 10 种放射性核素的滞留和排出曲线	(36)
C. 进入细胞外体液的元素随尿 (F_u) 和粪 (F_f) 排出占总排出量的分数	(37)
D. 采样间隔期内的恒定吸收所致的排出量的导出调查水平	(37)
译者附记	(42)

反复或持续吸收放射性核素后 体内沾染量的估算

1. 引 言

(1) 当人们企图用公式表示人员体内沾染时, 首先想到的是下面两种截然不同的摄入模式。

(2) 慢性照射这种照射是指当每年绝大多数日子里以相当恒定的速度摄入放射性核素, 从而使其在体内的沉积和损失达到平衡的时候出现的照射。它对关键器官造成恒定的照射, 并成为国际放射防护委员会第2号和第6号出版物^[1,2]中采用的对辐射防护详细探讨的基础(在这些出版物中建议以最后的剂量率作为限制值)。饮食沾染食品和水的居民中某些人员可能是以这种方式摄入, 而对放射性工作人员来说, 除非是接触象氧化氙那样几种放射性物质, 通常是很少遇到重复摄入的。

(3) 单次照射这是持续时间不超过几小时的单次摄入所致的照射。它引起体内一次暂时性负荷, 此时, 辐射总剂量(或者在其剩余的工作年限中的剂量负担*) 要比剂量率更为重要。当核装置意外释放的放射性烟云通过时, 对部分居民造成这种方式的摄入是可能的, 但其可能性极小。然而, 对放射性工作人员来说受到单次照射的可能性较大。

(4) 1963年国际放射防护委员会第4专门委员会成立了一个工作组, 负责研究和提出关于《职业性照射下的体内沾染对组织产生的辐射剂量的评价》的报告。在国际放射防护委员会第10号出版物里报告了这个小组的工作^[3]。这个工作组计算辐射剂量时采用的模式是上面提到的第二种模式, 即单次照射。

* 见译者附记。

(5) 虽然该报告适用于估算一年内几次的吸收量，但国际放射防护委员会第4专门委员会要求将此报告推广应用于更广泛的情况。专门委员会决定还应当考虑本报告目录中所列的各种实际情况，并对所有这些情况应当计算出下列几个数值：

- 对关键器官的辐射剂量，
- 摄入后不同时刻的排出量，
- 导出调查水平（见文献〔3〕）*。

(6) 在下一章中将见到，体内或器官内放射性核素的含量通常用一个含有吸收或沉积函数和滞留函数的折合积分表达式来描述，

$$q(t) = \int_0^t I(\zeta) \cdot r_s(t-\zeta) d\zeta,$$

式中 $q(t)$ = 体内或器官内核素含量，

$I(\zeta)$ = 吸收或沉积的时间函数，

$r_s(t-\zeta)$ = 滞留的时间函数，

t = 计算含量的指定时间，

ζ = 在0到 t 范围内积分的时间变量，也可以把它看作是在累计过程中各次吸收的时刻。

本报告主要是讨论上述公式的应用。用曲线来表示各种不同的吸收模式，以及由此引起的器官内核素含量随时间的变化，对某些读者来说是有帮助的。这些曲线见图1~4。

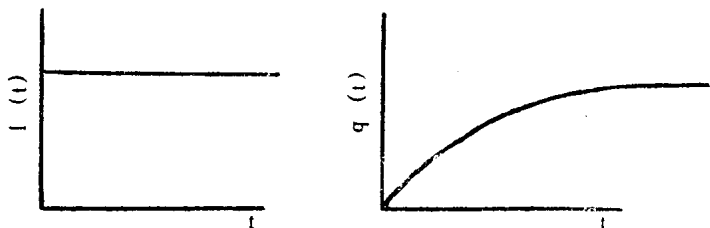


图1 慢性吸收（国际放射防护委员会第2号出版物的模式）

* 见译者附记。

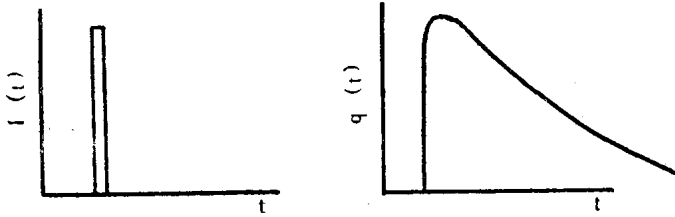


图 2 单次吸收 (国际放射防护委员会第 10 号出版物的模式)

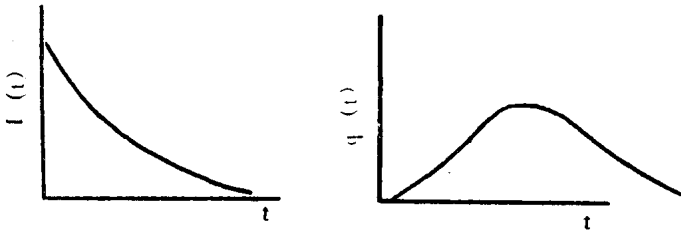


图 3 肺或伤口受到初始沾染后引起的递减性吸收

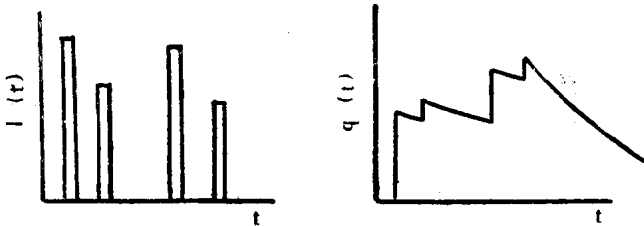


图 4 短期内数次吸收

2. 通用的公式

(7) 描述放射性物质在体内蓄积过程的公式已由 Taper^[4]、Defares^[5] 等人用归纳方法推导出来了。Norris^[6]、Simpson^[7]、Sanders^[8]、国际放射防护委员会第 2 号出版物^[1]、Bernard^[9]、Marshall^[10] 以及 Rundo^[11] 等用分析方法也导出这些公式。这些公式的内容很不一致，其中有些公式难以用于本文所关心的问题。因此，必须象国际放射防护委员会第 10 号出版物^[3]已做过的那样，从最根本的一些原则导出基本的方程式。

(8) 在分析放射性核素在单一分区（关键器官）内的增加、滞留和减少时采用以下一些记号：

$R_s(t)$ = 放射性核素一次沉积后的滞留函数（不考虑放射性衰变），

$$r_s(t) = R_s(t) \cdot e^{-\lambda t}, \text{ 这里 } \lambda = \text{放射性衰变常数,}$$

$$Y(t) = -e^{-\lambda t} \cdot R_s'(t) = -e^{-\lambda t} \cdot \frac{d}{dt} R_s(t)$$

= 一次沉积后由于排泄过程而引起的每天失去的分数，

$I(t)$ = 在 t 时刻放射性核素在分区内的沉积速度，

$$r'_s(t) = \frac{d}{dt} r_s(t) = -R_s(t)e^{-\lambda t} \lambda + R'_s(t)e^{-\lambda t},$$

$q(t)$ = 在 t 时刻放射性核素在分区内的含量，

$$q'(t) = \frac{d}{dt} q(t),$$

$Q(t) = \int_0^t q(\zeta) d\zeta$ = 由最初沉积量为 q_0 微居里放射性核素引起的以微居里·天计算的照射量。

(9) 在 t 时刻放射性核素留存在分区或关键器官内的量是

$$q(t) = \int_0^t I(\zeta) r_s(t-\zeta) d\zeta \quad (1)^*$$

* 在第 16 和第 40 段以及在附录 A 中采用方程式 (1)。

(引自附录 A 的方程式 A1)。

(10) 由这个含量引起的照射量是

$$Q(v) = \int_0^v I(\zeta) \left[\int_0^{v-\zeta} r_s(u) du \right] d\zeta \quad (2)^*$$

(引自附录 A 的方程式 A9)。

(11) 关键器官内 $q(t)$ 所致的排出量是

$$E(t) = - \int_0^t I(\zeta) R'_s(t-\zeta) e^{-\lambda(t-\zeta)} d\zeta \quad (3)$$

(引自附录 A 的方程式 A5)。

对所有我们已遇到过的滞留函数，均能求出方程式 (3) 中的积分。假如 $R(t)$ 是单项指数式，或几项指数式之和，那么 $R'(t)$ 也是如此，所以这个积分是存在的 [当然假设 $I(\zeta)$ 是可积的]。

(12) 然而，假如 $R(t)$ 以幂函数来描述，即 At^{-B} ，此处 $0 < B < 1$ ，则 At^{-B} 不能描述接近于零天的滞留，因而 $R'(t)$ 不能加以积分。有两个办法来克服这种困难：

(i) 建立一个二次式 $P(x) = ax^2 + bx + c$ ，使得 $P(0) = 1$ ， $P(1) = R(1)$ ， $P'(1) = R'(1)$ 。那么

$$\begin{aligned} R(t) &= P(t) & 0 \leq t \leq 1 \\ &= At^{-B} & t > 1. \end{aligned}$$

(ii) 让 $R(t) = Z^B(t+Z)^{-B}$ ，此式是对所有 t 值的一个连续函数，此处 Z 是一个正值常数，量纲为时间。

3. 一次照射后在无限时间内的递减性吸收

A. 引言

(13) 常常遇到这样的情况，放射性物质在一个器官内一次沉积后，由于此沉积的放射性核素或其子体而引起对此器官或别的器官持续的照射。我们考虑一些有实际意义的例子如下：

(i) 不溶性铀、钍或钷的氧化物在肺内的沉积，而

* 在第 29 和第 44 段中采用方程式 (2)。

后这些放射性核素转移到肺淋巴结、骨骼或排泄物中。

(ii) 非转移性亲骨性放射性核素在伤口的沉积，随后向骨骼或排泄物中转移。

B. 非转移性放射性核素在肺内的滞留

(14) 在以下提到的头三个例子中由于原始的放射性污染源是肺，所以必须有描述非转移性放射性核素在肺内长期滞留和排除的方程。在总结肺滞留问题的文献中，曾给出不溶性物质在肺内的单一的半减期^[1,12,13]，但个别的报告给出多于一项的滞留方程^[14~17]。从下表列出的文献中选出5~100天内肺滞留的单一的半减期：

表 1 *

肺 沾 染 物	T_b	参 考 文 献
U_3O_8	150	[13], [14], [15]
UO_2	360	[13], [17]
PuO_2	550	[13], [16], [18], [19]
ThO_2	550	[13]

* 表中 T_b 指生物半减期，天。——译者注

(15) 为了本文的目的，用一个单一的时间指数函数来描述非转移性核素在肺的深部的长期滞留，就目前知识来说，已是足够精确的了。核素自肺的排除速度就是这个函数的微商（改变正负号），将此速率乘以一个小于1的系数，就能表示转移到某些其他分区（淋巴结、骨或血液）的速率。

C. 肺沾染引起的肺淋巴结内的沉积

(16) 假如将方程（1）作如下的修改，就能用来计算这种传递，令

$N(t)$ = 在 t 时刻淋巴结内放射性核素的含量，

$I(\zeta)$ = 每天进入淋巴结的微居里数，

= $-f_{LL}L'(t)$ ，这里 $L'(t)$ 为每天从肺部排除的微居里

数, f_{LL} 为进入淋巴结的分数。

$r_s(t-\zeta)$ 对铀、钍²³²和钷²³⁹来说等于 1。这些放射性核素的放射性衰变可忽略不计, 而且按文献 [13] 所述, “Y 类化合物* (铜族元素的氧化物) 在淋巴结内的廓清表明, 其中有 10% 的区域性部分按 360 天生物半减期排除, 其余 90% 可以假定为持久地停留在淋巴结内, 仅因放射性衰变而递减”。因此, $R_s(t) \simeq 1$ 。

$$\text{由此} \quad N(t) = -f_{LL} \int_0^t L'(\zeta) d\zeta \quad (4)$$

$$\begin{aligned} &= -f_{LL}[L(t) - L(0)] \\ &= f_{LL}[L(0) - L(t)] \\ &= f_{LL}[1 - L(t)]. \end{aligned} \quad (5)**$$

(17) 文献[13]的表 4 指出, Y 类化合物的 f_{LL} = 总沉积量的 0.15 或长期沉积量的 $0.25 = 0.15/0.6$ 。从文献[17]和[20]亦能计算得类似的 f_{LL} 值。Bair^[21] 报告了氧化钷在狗体内具有代表性的 f_{LL} 值, 等于 0.4。所有这些数值的平均值约为 0.3。在文献[20]中随时间变化的 $\frac{\text{每克淋巴结的微居里数}}{\text{每克肺的微居里数}}$ 的数值以时间为横座标画成曲线。这个分数的分子是 $\frac{N(t)}{15}$, 而分母为 $\frac{L(t)}{400}$ 。肺淋巴结以及肺实质的重量取自文献[22]。

(18) 在文献[20]中, 长期肺滞留的公式必须包括一个第二指数项, 如

$$L(t) = 0.9e^{-\frac{0.693t}{T_1}} + 0.1e^{-\frac{0.693t}{10000}}. \quad (6)$$

没有第二指数项, 淋巴结浓度/肺浓度的比值在较长的时间时将成为无穷大, 如此计算的比值不符合文献[20]图 1 列出的材料。

(19) 为了计算淋巴结的终生 (50 年) 照射量, 可将公式

* 在文献[13]中, 化合物的生物半减期不超过 10 天的称为 D 类化合物, 10 天以上至 100 天的称为 W 类化合物, 超过 100 天的称为 Y 类化合物 (符号 D, W 和 Y 分别代表“天”, “周”和“年”)。——校者注

** 在第 19 和第 30 段中用到方程式 (5)。

(6) 代入公式 (5) 中的 $L(t)$, 并利用表 1 的 T_b 值。方程 (5) 的积分给出的肺内最初沉积 1 微居里的 U_3O_8 、 UO_2 或 PuO_2 而引起的肺淋巴结的照射量约为 5000 微居里·天 (与肺内的生物半减期有关)。由公式 (5) 和它的积分可以看到, 对于比 T_b 较长的时间来说, 由于肺内最初沉积 1 微居里放射性核素而对淋巴结造成的照射量可用较简单的方法获得, 即将天数乘以传递系数 $f_{LL} = 0.3$ 。此种简化的计算方法给出的结果是 5400 微居里·天, 接近上述的 5000 微居里·天。

(20) 上述方法用来计算肺内放射性核素含量要比计算肺淋巴结的辐射剂量更有实际意义。我们在这里不计算肺淋巴结的辐射剂量, 因为国际放射防护委员会已经判定, 在因吸入而受到照射时肺组织要比淋巴组织更危险。

D. 肺污染的随尿排出

(21) 此问题已由 Healy^[23]、Beach^[24]、Nelson^[25]、Wood^[18] 及 Breuer^[26] 等人进行过分析并给出了公式。通常的途径是将 $Y_u(t)$ 代进附录 A 的方程式 (A5) 中, 得到

$$E_u(t) = q_0 \int_0^t I(\zeta) Y_u(t-\zeta) d\zeta, \quad (7)^*$$

式中 $E_u(t)$ = 放射性核素每日随尿排出的微居里数,
 q_0 = 肺内长期滞留的最初放射性, 微居里数,
 $I(\zeta)$ = 吸收函数
 $= -f_{LB}L'(t)$, 此处 f_{LB} 是自肺传递到细胞外体液的系数, 而 $L(t)$ 是一次摄入 1 微居里后在 t 时刻肺内的微居里数,
 $Y_u(t)$ = 描述血液一次吸收放射性核素以后, 随尿排出放射性核素的一个函数。

将方程 (7) 中 $E_u(t)$ 改为 $E(t)$, $Y_u(t)$ 改为 $Y(t)$, 也可以用这

* 在第 23, 第 27 段和表 2 用到方程式 (7)。

个方程式描述总排出量。

(22) 对单独一次肺吸入的情况来说, 可用一个单项指数式来描述 $L(t)$, 式中 T_b 等于表 1 中给出的相应的数值。然而, 慢性照射时的 $L(t)$ 和 $L'(t)$ 和一次摄入时不同。在本报告第 4 章用方程式 (11) 和 (13) 给出它们的公式。

(23) 曾经试图利用文献中的数值代入方程式 (7) 来计算 f_{LB} 值。据文献 [3] 记载, 进入血流中的铀有四分之三在第 1 天随尿排出, 而十分之二在体内停留较长时间。从这些事实看出, 排泄公式 $Y(t)$ 的第一项可以引用一个指数表达式, 其第二项按照所选用的模型可以是一个幂函数或一个指数表达式。有的文献报道了对一些工作人员意外吸入氧化铀的研究 [14, 15, 27, 28]。在这四篇资料中给出了 $E_u(t)$ 和 $L(t)$ 的方程式, 由此能求得 $L'(t)$ 。将方程 (7) 中的 $E_u(t)$ 、 $L'(\zeta)$ 和 $Y_u(t-\zeta)$ 用这些数值代替, 求得的 f_{LB} 值波动很大, 并且没有明显的规律, 所以放弃了这个途径。

(24) 在沾染后不久, 组织内沉积相当量的铀以前, 随尿排出的铀几乎完全来自经自由肺进入到血液中的铀, 即

$$E_u(t) = \lambda_L \times L(t) \times f_{LB} \times 0.75, \quad (8)$$

这里, λ_L 是单位时间自肺排除的分数。将上述四篇参考资料中的数值代入方程式 (8), 即可获得下列 f_{LB} 值: 取自文献 [14] 为 0.7, 0.6 和 0.2; 取自文献 [15] 为 0.6; 取自文献 [27] 为 0.3 和 0.4; 取自文献 [28] 为 0.8 和 0.3。虽然这些数值仅适用于肺沾染后的不久时间, 但其平均值为 0.5, 与 Neuman [29] 的估计值 0.5 是相符合的。

(25) 应该指出, 在上述这些文献所报道的研究工作中, 用体外计数的方法测量到的胸部含量包括着肺、淋巴结和胸壁内的放射性核素。根据体外测量的结果获得的 $L(t)$ 值要比“真值”大, 因此由 $L(t)$ 测量值计算出来的 λ_L 就低得多。由这两方面误差引起总的后果是 $\lambda_L \times L(t)$ 太低, 故由方程式 (8) 计算出来的 f_{LB} 将有些过高。

(26) 对钷来说, Beach 和 Dolphin[24] 已给出 $Y_u(t) = 0.004e^{-0.67t} + 0.0016t^{-0.68}$ 。氧化钷的 f_{LE} 值可采用文献[13]表 1 中提出的 $0.05/0.6=0.08$, 因为 Morrow 等[16] 用狗吸入氧化钷的实验中获得的材料支持这个数值。它接近文献[32]提出的 0.15 数值。

(27) 方程(7)以及上述有关 $L(t)$, f_{LE} 和 $Y_u(t)$ 的资料已被用于计算吸入铀和钷的氧化物后不同时间的尿排出率。表 2 给出的结果仅作为考虑调查水平和采样间隔时间的一个粗略的指导。这些具体数字没有直接使用价值, 因为在实际观察中每日排出率有明显的个体差异和时间性波动。然而, 应当指出在最初 100 天内排出率是相对恒定的, 它主要取决于肺的 f_{LE} 和 T_b 。

表 2 肺内沉积 1 微居里非转移性铀和钷后的随尿排出率(微居里/天)

(天)	$E_{Uc}(t) = - \int_0^t f_{LE} \cdot U(x) Y_{Us}(t-x) dx$		
	U_3O_8 $T_b=150, f_{LE}=0.5$	UO_2 $T_b=360, f_{LE}=0.5$	PuO_2 $T_b=550, f_{LE}=0.1$
7	2.1×10^{-3}	8.8×10^{-4}	1.9×10^{-6}
14	2.1×10^{-3}	8.9×10^{-4}	2.2×10^{-6}
30	2.0×10^{-3}	8.8×10^{-4}	2.6×10^{-6}
90	1.5×10^{-3}	8.0×10^{-4}	3.1×10^{-6}
180	1.0×10^{-3}	6.7×10^{-4}	3.3×10^{-6}
360	0.44×10^{-3}	4.8×10^{-4}	2.0×10^{-6}

E. 肺沾染引起的骨骼内的沉积

(28) 在上一节中已导出非转移性铀和钷自肺向细胞外体液传递的数值。为了估计对骨的照射, 必须知道放射性核素自血液中转移至骨骼的分数 f_{Es} 。国际放射防护委员会第 6 号出版物[2] 指出, 对铀来说, $f_{Es}=0.11$, 而 Bernard[30] 给的值是 0.33, 后者将使核素自肺至骨的最大全部传递分数成为 $f_{LS}=0.15$ 。对钷来说, Snyder[31] 给的 f_{Es} 值是 0.5, 而文献[32] 给的值是 0.25。与钷的 f_{LE} 值 0.06 ~ 0.08 合并起来, 则 f_{LS} 值的范围是 0.02 ~ 0.04。在以后的计算中, 设钷的 $f_{LS}=0.03$ 。

(29) 铀经静脉注入时, $r_s(t) = 0.2t^{-0.5}$ (引自文献[30]), 因为放射性衰变可忽略不计), 肺内沉积 1 微居里铀时骨骼内的沉积量为

$$q(t) = - \int_0^t f_{LS} L'(\zeta) (t-\zeta)^{-0.5} d\zeta$$

(骨骼)

$$q(t) = - \int_0^t 0.15 L'(\zeta) (t-\zeta)^{-0.5} d\zeta。$$

(骨骼)

从方程 (2)

$$Q(t) = - \int_0^t u^{-0.5} \left[\int_0^{t-u} 0.15 L'(v) dv \right] du$$

(骨骼)

$$= 0.15 \int_0^t u^{-0.5} [1 - L(t-u)] du$$

$$= 0.15 \int_0^t u^{-0.5} du - 0.15 \int_0^t u^{-0.5} L(t-u) du$$

$$= 0.15 \times \frac{u^{0.5}}{0.5} \Big|_0^{18000} - 0.15 \int_0^{18000} u^{-0.5} L(t-u) du$$

$$= 40 - 0.15 \int_0^{18000} u^{-0.5} L(t-u) du。 \quad (9)$$

此方程的第二项是用计算机计算出来的, 当 $T_b = 150$ 天时为 0.2, $T_b = 360$ 天时为 0.4。因此 $Q(t) = 40$ 微居里·天, 它给予骨的剂量为 $40 \times 51.2 \times 245/7000 = 72$ 雷姆, 故在肺内 0.02 微居里非转移性铀²³³ 或铀²³⁴ 给予骨的剂量就相当于 D 剂量 (1.5 雷姆)。(D 剂量相当于年限剂量的二十分之一, 国际放射防护委员会第 10 号出版物中用它来确定各核素的调查水平)。

(30) 对钷²³⁹来说, $r_s(t) = 1$, 与方程(5)进行比较, 得

$$q(t) = 0.03 [1 - L(t)]$$

(骨骼)

和

$$Q(t) = 0.03 \left[t - \int_0^t L(\zeta) d\zeta \right]$$

(骨骼)

设肺内 PuO_2 $L(t) = e^{\frac{-0.693t}{550}}$, $t = 50$ 年 (T_b 值取自 B 节), 则

$$Q(t) = 520 \text{ 微居里} \cdot \text{天}.$$

(骨骼)

此时，给予骨的剂量为 $520 \times 51.2 \times 270/7000 = 1020$ 雷姆，肺内 1.5 毫微居里钚²³⁹就可使骨受到 D 剂量 (1.5 雷姆)。

(31) 在这里，值得比较一下，能使肺和骨分别受到二十分之一的年限制剂量，即 D 剂量 (引自文献[3])——所需的肺内铀或钚的氧化物的沉积量。

(32) 从表 3 可见，这些非转移性铀和钚化合物吸入后对肺所致的剂量要比对骨的剂量大。这点亦与 Bair 及其同事观察的结果[34]相符，他们发现猎犬吸入 $\text{Pu}^{239}\text{O}_2$ 后引起死亡最突出的原因是肺功能不全和肿瘤。在吸入转移性化合物后，其大部分在肺

表 3

沾 染 物	对下列器官造成 D 剂量所需的肺沉积量	
	肺	骨
氧化铀	$D=0.75$ 雷姆	$D=1.5$ 雷姆
$\text{Pu}^{239}\text{O}_2$	0.6 毫微居里	20 毫微居里
	0.4 毫微居里	1.5 毫微居里

内的停留时间较短，如果停留时间足够短，则骨将获得较大的剂量，因而可考虑骨是关键器官。对肺的剂量可由下列方程求得

$$\left[\frac{\int_0^t L(\zeta) d\zeta \times 51.2 \times 50}{400 \text{ 或 } 1000} \right]$$

令此式等于上面计算的骨的剂量，就可以估算出使骨受到较大剂量所需要的肺内滞留的生物半减期 T_b (表 4)。

表 4 能使骨剂量大于肺剂量所需的肺半减期上界值

核 素	肺重 = 400 克	肺重 = 1000 克
铀	2.5 天	6 天
钚	104 天	260 天

这就是说，非转移性铀和钚的化合物在肺内沉积时骨永远不