

## 国际放射防护委员会第30号出版物：工作人员 摄入放射性核素的限值

Vennart J: Health Phys 40(4), 477~484, 1981 (英文)

### 引 言

国际放射防护委员会(ICRP)第30号出版物(该出版物分三部份,每一部份都有一个附录),将取代1959年采用的第2号出版物。由于这段时间内,委员会基本建议书的改变、有关人体摄入和滞留放射性物质以及放射性衰变图新资料的积累,均要求出版这篇新的报告。1979年发表的第一部份描述了剂量学模型,给出了21种元素的187种放射性同位素的摄入限值。这187种放射性核素包括了在放射防护中被认为是最重要的那些核素。该部份的附录给出了用来推导限值的计算机打印的计算结果,也已于1979年发表。第二和第三部份涉及所有剩余元素的放射性同位素,正在准备过程中。

第2号出版物提出了大约240种放射性核素(1962年又增加30余种)的空气、水中的最大容许浓度(MPC)及最大容许体负荷(MPBB)的建议值。尽管它强调只要放射性核素在一年的任何一个季度内的摄入量不大于自连续13周暴露于MPC导致的摄入量,则其摄入的速率可允许有变化,但MPC的概念常被误解为一个永远不应超过的浓度。同样,受到MPC连续照射50年后在体内导致的放射性,即MPBB,也被误解为在任一时刻体内放射性的限值。由于这些和其他原因,在新的报告中未使用MPC和MPBB这两个概念。现在,使用由于食入和吸入而导致的年摄入限值(ALI),做为限制工作人员受到放射性核素暴露的次级标准。

### 基本概念

自从1954年以来,ICRP一直持有这样一个观点,即任何大于天然本底的辐射都认为是不安全的。在第2和第30号出版物中都强调,应把所有电离辐射剂量保持在可以合理做到的最低水平。因而,两个出

出版物中有关放射性物质摄入的限值,应看作是防止工作人员个人受到不能接受的照射的永久不能超过的终止点(Long-stops)。

对于大多数放射性核素而言,都没有关于它们在人体内效应的直接资料,因此,不得不利用其他有关资料来确定它们摄入体内的限值。在第30和第2号出版物中,把任何一年中的摄入量限制到其对身体所产生的剂量(现称为约定剂量当量)不超过委员会建议的年剂量当量限值。这些限值主要是按照体外电离辐射源对人体效应的资料而确定的。在第2号出版物中,由于摄入导致的对各组织的任何一年的剂量当量限值列于表1。那时使用的单位是雷姆。表中亦列出了按现在用作剂量当量单位的希沃特表示的数值(1希沃特=100雷姆)。

实际上,某一放射性物质的年摄入量限值,是按照使其在50年间对一个器官(紧要器官)导致的剂量为相应的剂量限值这一原则确定的,对其他也受到照射的器官接受的剂量未加以特殊限制,只是那些器官接受比它们相应的剂量限值要少的剂量而已。就该体系不能对所有组织的剂量,因而亦不能对总的危险度加以控制这一点而言,可以证明该体系缺乏逻辑性。对全身和性腺给予相同照射限值现在也是不合逻辑的,因为这意味着用同一剂量照射全身的危险度并不大

表1 ICRP第2号出版物中的剂量当量限值

器官或组织	由于摄入而致的任何一年剂量当量限值	
	雷姆	希沃特
全身、性腺	5	0.05
皮肤、甲状腺、骨骼	30	0.3
其他器官	15	0.15

于照射它的一个部份的危险度。事实上,在1959年几

乎没有关于电离辐射危险的定量资料。除了骨骼的限值外,大多数剂量限值都是从人体急性效应的经验(出于对遗传效应、白血病和寿命缩短可能性的考虑),以及从外辐射源的剂量在体内分布的实际考虑而在数年中建立的。自0.1微克 $^{226}\text{Ra}$ 的MPBB推导出来的骨骼剂量限值,是根据体内含有镭多年的人中发生骨肉瘤的经验而制定的。

现在,已掌握有关电离辐射危险的更多数据,特别是有关电离辐射致癌和遗传效应的数据。在ICRP第26号出版物中,这些效应发生的几率被看作是剂量的函数,没有阈值,称为随机效应。通过放射性工作人员中致死性癌及其第二、三代中出现严重遗传疾患的危险度与其他工业死亡危险度的比较证明,对于身体均匀照射,现在采用以前的相同的限值,即任何一年不超过0.05希沃特是正当的。已经给出了身体各组织的这些随机效应危险度的数据,并可推导出其危险度与全身受到0.05希沃特照射相同的每一组织的剂量值(L)。表2给出了各组织的L值。

对由于摄入某一放射性物质而引起的非均匀照射,采取了一个符合逻辑的观点,即在任何一年实践中,所有受照组织的危险度不应超过全身受照0.05希沃特的危险度。因而,在第30号出版物中,放射性核素的年摄入限值(ALI)是这样确定的:若D为50年间在某一组织中给出的约定剂量当量,L为表2中给出的相应值,则使所有受照组织D/L比值之和等于1。

表2 给出的危险度与全身受到0.05希沃特照射相同的组织剂量当量(L)

器官或组织	L	
	希沃特	雷姆
性腺	0.20	20
乳腺	0.33	33
红骨髓、肺	0.42	42
甲状腺、骨(内膜)	1.67	167
其余接受最大剂量的5个组织	0.83	83

虽然委员会把表2中的剂量L称为单独受照各组织的年剂量当量限值,但不应把它们直接与列于表1中第2号出版物使用的限值进行比较。正像刚才描述的,在第30号出版物中是限制摄入的放射性物质对所有组织的照射剂量,而在第2号出版物中则仅限制对重要器官的剂量,尽管许多其他组织也可能受到照射,有些甚至接近它们的限值。换言之,与第2号出版物建议的摄入限值相联系的危险度要比现在表1中的限值预示的危险度要大些。

在第30号出版物中,为防止阈效应(非随机效应)的发生,也给出了对眼晶体0.3希沃特(30雷姆)和对所有其他组织0.5希沃特(50雷姆)的附加年限值。当对辐射诱发致死性癌敏感性低的组织,如甲状腺、骨或某一其余组织照射的程度比身体任何其他组织都大得多时,如甲状腺受 $^{131}\text{I}$ 的照射,这一附加限制是重要的。在后一种情况下,可从表2看出,自ALI(按非随机剂量限值50雷姆确定的)导致的致死性甲状腺癌的危险度,将是由全身0.05希沃特限值引起的总随机危险度的50/167。

虽然上面描述的基本原理的改变对于这一课题的逻辑发展是重要的,事实上,这些改变引起的在这两个出版物中推导的ALI值的变化相当小。下面将要讨论那些用于确定摄入放射性物质约定剂量当量各种因素的新的数据所引起的变化却要大得多。

### 约定剂量当量

现在称为剂量当量的量,在第2号出版物中称为相对生物学效应剂量。它是某一组织中平均吸收剂量、辐射的相对生物学效应(RBE)及相对危害因子(n)的乘积。后一因子(n)用于骨中某些放射性核素非均匀分布的情况下。任一器官或组织内的剂量是按那个器官或组织内含有的放射性核素计算出来的,而对于远离的器官或组织中放射性的贡献并未予考虑。

组织中某一点的剂量当量现在定义为吸收剂量(D)、品质因子(Q)和所有其他修正因子之积(N)的乘积。现在使用的品质因子有两点不同于第2号出版物中使用的RBE值,一是氚 $\beta$ 粒子的Q值取1而不是1.7;二是 $\alpha$ 粒子的Q值取20而不是10。这样一来,对氚的暴露限值增加了,而对所有发射 $\alpha$ 粒子的放射性核素的限值却降低约2倍。

现在使用N,这特别是为了把不同剂量率产生效应的程度不同这一情况考虑进去。在第30号出版物中,取N为1,因为在第26号出版物中给出的各组织每单位剂量当量的危险度,是打算对在委员会建议的剂量当量限值以下的剂量导致的效应做现实的估计。

由源器官S中放射出的辐射导致某一靶组织T中的约定剂量当量 $H_{50T}$ ,是两个因数的乘积,1.放射性核素摄入后50年间在S中发生的放射性核素衰变总数;2.在S中每一衰变放射出的每一辐射,经过对其品质因子进行适当修正,在T中每单位质量吸收的能

• 眼晶体限值在委员会的1980年3月布赖顿会议之后已减为0.15希沃特/年。

量。由于通常会有几个源器官，所以，由于摄入某一放射性核素而在任一靶组织中的 $H50_T$ 总值，通过把来自所有源器官中的衰变对 $H50_T$ 的全部贡献按下式加合求得：

$$H50_T = \sum_s U_s \times SEE(T \leftarrow S) \quad \text{希沃特 (1)}$$

式中， $U_s$ 为放射性核素在每一源器官中的衰变数， $SEE(T \leftarrow S)$ （单位为焦耳/千克）是 $S$ 中每一衰变在 $T$ 中被吸收的比有效能。当不止一种放射性核素被摄入体内时，或当某一放射性核素摄入后在体内形成子体放射性核素时，可把式（1）改成如下式那样，把来自所有放射性核素 $i$ 的贡献都包括进去。

$$H50_T = \sum_j \sum_s [U_s \sum_i SEE(T \leftarrow S)_i] \quad \text{希沃特 (2)}$$

在第2号出版物中对放射性子体的累积做了类似的处理。

$U_s$ 为 $S$ 中放射性核素滞留函数的50年时间积分。在下面的代谢和剂量学模型部份，要讨论为推导 $U_s$ 量值而在第2和第30号出版物中使用的不同处理方法。

$SEE(T \leftarrow S)$ 由下式给出，即：

$$SEE(T \leftarrow S) = \sum_i \frac{Y_i E_i Q_i AF(T \leftarrow S)_i}{M_T} \quad \text{焦耳/千克 (3)}$$

式中， $Y_i$ 为放射性核素每一衰变中放射每一类型辐射 $i$ 的产额； $E_i$ 为辐射 $i$ 的能量（焦耳）； $Q_i$ 为品质因子， $AF(T \leftarrow S)_i$ 为 $S$ 中每次放射的辐射 $i$ 在 $T$ 中被吸收的能量分数； $M_T$ 为靶器官 $T$ 的质量（千克）。 $Y_i$ 和 $E_i$ 可像下述进一步讨论的那样，由放射性衰变图推导出来。

对于 $\alpha$ 和 $\beta$ 粒子、裂变碎片和反冲原子， $AF(T \leftarrow S)_i$ 值一般或者为零（当靶器官在源器官辐射射程之外），或者为1（当靶器官和源器官为同一组织）。一个重要的例外是骨骼中的放射性核素。已经建立了一个有关骨中放射性核素新的剂量学模型，来取代第2号出版物中使用的相对危害因子。

对于胃肠道中的 $\beta$ 放射体，假定胃肠道壁上的靶细胞接受与胃肠道内容物表面相同的剂量当量。对于 $\alpha$ 粒子和裂变碎片，假定仅有1%的内容物表面的剂量当量是有效的。来自反冲原子的剂量当量则忽略不计。在第2号出版物中也做了同样的假设，特别是对于 $\alpha$ 粒子，这就留下一个有疑问的、值得进一步研究的问题。对于在第2号出版物中未予考虑的其他壁器官，如膀胱，在第30号出版物中使用类似的方法处理。

光子的 $AF$ 值，像身体器官和组织质量值一样，

取自ICRP参考人工作组报告。在第2和第30号报告使用的方法中一个重要差别是，现在把来自远离器官中光子的贡献也包括在任一靶器官的剂量中去。

### 放射性衰变图

在第30号出版物的附录中给出了简化的衰变图。有某些数据，在ICRP的较早期报告中没有掌握。例如，在第6号出版物中，把 $^{244}\text{Am}$ 看作是半衰期26分钟的镅的一个同位素。现在认识到，它是一种亚稳态，即 $^{244m}\text{Am}$ ，而 $^{244}\text{Am}$ 被定为半衰期10小时。结果，在第30号出版物中 $^{244}\text{Am}$ 的ALI值，就要比自第6号出版物中推导出来的小得多。

### 代谢模型

对于每一种元素都给出用于推导约定剂量当量值的代谢数据，不再把元素化合物简单地分类成“可溶的”和“不可溶的”两部份。而是在食入情况下，按照自肠道进入血液的分数 $f_1$ ；在吸入情况下，按照化合物在肺区滞留的天数、周数和年数相应的 $D$ 、 $W$ 或 $Y$ 分类。有几点例外：放射性核素自身体任一区间的减少按一级动力学处理。现在，一个器官或组织可以由任何数目的区间组成；对摄入物质被转移到身体内其他部位以前，它们在胃、小肠、肺和体液中存留的有限时间，采取了现实主义的态度，进行了修正。然而在第2号出版物中，假定了这些转移是即刻发生的。因此，某些短寿命放射性核素的摄入限值增加了，例如，吸入 $^{131}\text{I}$ 的ALI，现在要比从第2号出版物中推导的数值大40倍。

在代谢模型中最值得注意的是碱土元素，对于这些元素不采用一级动力学而使用了ICRP第20号出版物中描述的模型。这一模型指出，像 $^{226}\text{Ra}$ 这类放射性核素在骨中的滞留要比以前假定的少得多。尽管在骨剂量学使用的模型中有其他重要的改变，而滞留的降低是 $^{226}\text{Ra}$ 的ALI大约增加一个数量级的主要原因。但有趣的是，即便在一个人50年间每年都接受一个ALI这一很不可能的情况下，仍能证明是正当的。模型预示最终体内 $^{226}\text{Ra}$ 含量与从前在第2号出版物中建议的MPBB0.1微克比较，或者相同，或者稍低些。

### 呼吸系统剂量学模型

计算呼吸系统剂量使用的模型基本上是肺动力学工作组所描述的模型。把呼吸系统分成鼻通道、气管支管和肺实质三个部位。为进行剂量计算，又把每一部位分成两个或更多个区间，自各区间的廓清按一级动力学处理，吸入物质在每一部位的沉积分数与气溶胶尺寸有关。尽管引用的ALI是适用于活性中值空

气动力学直径为1微米的气溶胶粒子,但在第30号出版物附录中给出了供校正其他尺寸粒子的数据。某一物质在其被转移到肺淋巴系统、血流和胃肠道之前,在某一区间的滞留由其化学形式决定,并把元素的每一种化合物划归为前述的D、W、Y三类中的某一类。相反,在第2号出版物中把肺看作为单一的区间,未对气溶胶粒子尺寸进行校正,很不严谨地仅把化合物分成“可溶的”和“不可溶的”。假定“可溶性”物质在第一个通道上不对肺产生照射,而瞬间间转移到肠道或体内其他器官;而“不溶性”物质仅照射肺和肠道,不考虑它们经体液途径向其他组织的转移。

尽管在剂量学模型中做了这些改进,但资料的缺乏,使得暴露限值只能按照由气管、支气管、肺实质和淋巴结构成的整个肺的平均剂量来确定。因此,在未来的研究中最急迫的任务是获得更多的有关呼吸系统不同组织放射敏感性的研究资料。

### 胃肠道剂量学模型

已经使用的这个剂量学模型基本上是Eve建立的模型。该模型把胃肠道分为四个部位,即胃、小肠、大肠上段和大肠下段。对假设的胃肠道内容物的质量及这些内容物在每一部位的平均滞留时间做了某些改变。但一个重要的改变是,对于物质自小肠转移到体液中去所需要的时间做了修正。可以设想,任何物质总会有一个分数 $f_1$ 到达体液,从而照射身体的其他部位。从这个意义上讲,没有可认为是真正“不溶的”物质。大多数原子序数较高的锕系元素的 $f_1$ 值都比第2号出版物中的相应值要大,结果导致在许多这类情况下,食入的ALI值要小些。

### 骨髓剂量学模型

在第2号出版物中,所有亲骨放射性核素的摄入限值都是通过与 $^{226}\text{Ra}$ 限值比较确定的。使得自一年摄入量导致的约定剂量当量等于0.3希沃特(30雷姆) $\sim 0.1$ 微克 $^{226}\text{Ra}$  MPBB导致的平均年骨骼剂量。考虑到放射性核素在骨中分布的差异,以及因此造成它们诱发骨肉瘤的相对效应可能有所差异,除镭的同位素外,所有 $\alpha$ 和 $\beta$ 放射体对骨的有效剂量都增加5倍(相对危害因子)。现在委员会的最新建议书给人们的印象是,覆盖骨内表面的10微米厚组织层和红骨髓的剂量限值分别与骨肉瘤和白血病诱发有关。因此,在第30号出版物中,根据Spiers等人的首创工作,为计算放射性核素在骨内的剂量,建立一个崭新的模型。把放射性核素分类成或是亲“容积”性核素,像镭;或是亲“表面”性核素,像铀。对于骨中的这些源组织

又推导出针对骨内膜和红骨髓这两靶组织的吸收份数值(AF)。亲表面性核素正好处于能照射那些可产生骨肉瘤和白血病细胞的位置。这一点反映在AF值上,并且原则上取代了以前采用的相对危害因子概念。由于假定这些沉积在表面的核素并不会随时而而被新骨生成所埋藏,因而,像 $^{239}\text{Pu}$ 这类物质的ALI值可能被低估。

### 淹没在放射性气体云情形下的模型

在第30号出版物中指出,在淹没于放射性氪等惰性气体云情况下,限制因素是身体的外照射,体内器官受到吸收气体的照射可不考虑。自这一外照射源导致的对身体所有组织的剂量,经对辐射在受照组织中的吸收进行适当的修正,做了现实的估算。相反,在第2号出版物中却做了完全不现实的假定,射程比0.1MeV  $\beta$ 射线射程大的全部辐射将均匀的照射全身。加上其他一些改变,新的模型导致空气中氪同位素浓度限值比以前的要大10倍

对于淹没在元素氪的情况下,主要危险来自肺受到器官内含有的气体的照射。虽然很清楚,氪的 $\beta$ 射线不能穿透重要的表皮基层,但在第2号出版物中却根据皮肤照射提出氪的限值。按新的模型,现在空气中元素氪浓度限值要比第2号出版物的建议值大300倍左右。可是,空气中氪水浓度限值(根据氪水要被吸收到体内水中去考虑)却要比目前建议的元素氪的限值小四个数量级之多,而且,在许多实际情况下,这将是限制受氪暴露的因素。

### 新旧限值的比较

新限值的约束性比旧限值是更严了,还是松了?要做这一比较并不那么容易,因为现在的分类法代替了原来把化合物分做“可溶的”和“不可溶的”两部份的分类法。但是当采用一些合理的转换,例如,对于食入,使最大的 $f_1$ 值与“可溶的”相等;对于吸入,使Y类与“不溶的”相等时,却发现在这今所做的250对比较中,有大约50%新的ALI值落入旧值的三倍因子以内,剩余的高于或低于旧值的约各占一半,新旧全部比值的几何均值近于1。但是,像已经注意到的,各别的放射性核素有不少重要的改变,这些改变很可能引起进一步的讨论。

对于任何体系来说,总会有讨论的余地。但从现在已把限值与电离辐射的危险定量地联系起来这个意义上讲,可以认为新的系统已有了一个逻辑基础,使将来可能需要的任何改变容易进行。

(姜会侠译 叶常青校)