

如果公式(29a)中 $Tg=0$,

$K_1=K_2=K$,

$DPF_1=DPF_2=DPF$

$F_1+F_2=F$ 时,则公式(29a)还原成公式(23)。再加入面积——体积和RBE因数,成为:

$RD=F^{0.6357} \times DPF \times K^{-0.11}$

$\times \left\{ k(D50^{-1} + \frac{P}{A})M \right\}^{0.33} \times RBE$

如果将 $F_1 \times DPF_1 = D_1$, $F_2 \times DPF_2 = D_2$,

$K_1 = T_1 \times F_1^{-1.13}$, $K_2 = T_2 \times F_2^{-1.13}$

代入公式(29a),得出:

$$RD = \left\{ (D_1 \times F_1^{-0.24} \times T_1^{-0.11})^{1.573} \times \left(\frac{T_1}{T_1 + Tg} \right)^{0.11} + (D_2 \times F_2^{-0.24} \times T_2^{-0.11})^{1.573} \right\}^{0.6357} \times \left\{ k(D50 + \frac{P}{A})M \right\}^{0.33} \times RBE \quad (30)$$

公式(30)为一般习惯用的计算公式。

后 记

剂量归一公式(29a, 29b, 30)前半部来自

Ellis原始公式和部分耐受剂量概念,原始公式没有考虑面积——体积因数,RBE因数。公式后半部的面积——体积因数,RBE因数取自Schwartz的面积——体积公式。

公式(29a, 29b)是Dixon推导出来的。

耐受剂量,部分耐受剂量,剩余耐受剂量是Ellis公式的关键概念,也是使用Ellis公式必须遵循的原则。

参 考 资 料

Eads DL, Application of Ret-Dose Slide Rule Relating Dose, Time, Area-Volume, Quality and Anatomic Factors, In: Frontiers of Radiation Therapy and Oncology. Vol. 6, Ed by J. M. Vaeth, pp. 108~142, 1972

Ellis F: Clinical Radiology 20: 1~7, 1969

Dixon R L: Acta Radiol Ther Phys Biol: 11: 305~311, 1972

Schwartz E E, ed, The Biological Basis of Raddiation Therapy, 1966

(徐海超综述 吴加金 杨世魁 史元明 朱壬葆审阅)

估计活性骨髓射线损伤的CHORD方法

人体紧要器官射线剂量计算(简称CHORD 概念的介绍)

处在辐射环境中的生物体一个紧要器官或最容易损伤区域的尺寸较大,或者器官在生物体内的深度不大于入射粒子平均自由程的长度时,则紧要器官或容易损伤区域所受的射线照射是不均匀的。射线损伤的具体分析一般是以细胞、一个器官(例如,下颌骨)内小靶区或细胞簇、神经中枢,或活性

骨髓系统所受剂量为依据。对于某些效应,由于射线能量损失事件的离散,细胞或细胞内敏感区没有受到均匀照射,就需要从微量学范围来研究。

人体射线损伤是个不能直接计算或测量的现象。可以用实验直接模拟这种损伤过程,但所有可计算的模拟都是间接模拟。在顺向可计算的模拟中都应用基本的传输方法;由于伴随方法能够增进计算效率,可以

得到广泛地使用。辐射防护有它本身的有名的“倒数定理”的伴随计算技术，它的真实性不如以下简式明确。

(统计加权 $Wt \times Pr$ 发生率) 无偏倚

= (统计加权 $Wt \times Pr$ 发生率) 偏倚

以上式为各种伴随方法的基础。扼要地讲所有传输计算是实际事件的“顺向”或“逆向”的间接模拟。

如果能够为人体模拟和一个放射线场建立其损伤对人体深度的曲线，就可以利用射线穿透深度 (1) 的密度函数 (CHORD) 模拟活性骨髓的照射。假如在活性骨髓的一个微分单位质量中随机地，均匀地选择一个点。则可以从 $D(1)$ 曲线上估计出这个点上的剂量。CHORDS 计算方法 (一个简单的计算技术) 完全依赖射线反应或损伤对距离建立起来的相互关系。

假设紧要器官是一个密度不变的体积，再用蒙特卡罗方法选定每个微分单位质量 dm ，将其沿最近的空气组织射线照射交接面上法向矢量的最短距离 l 定出来，则可得出任何具体的 CHORD 或 $p\{l\}$ 的分布。连续使用这样方法直至得到满意的 $p\{l\}$ 分布为止。由于这种方法是“模拟工具”，必须调整到已知的损伤对距离的关系。一般 Chord (弦) 是通过表面 (皮肤) 上两点间的直线，但我们应用的 CHORD 是 Critical Human Organ Radiation Dosimetry 的缩写，只含“真弦”部分的意义。CHORD 或 $p\{l\}$ 分布曲线是一个具体物体所占区域的“加权因数”，用以积分某一放射源所照射的几何条件下，“多重碰撞”深度剂量曲线对这一具体物体的损伤。

红骨髓应用的 CHORD

骨髓损伤一般是全身照射造成死亡或急性放射病的主要机制，因为它出现的剂量水平低于肠粘膜损伤致死或中枢神经损伤而失能的剂量水平，但是在强调以活性骨髓系统

损伤为依据估计射线危害时，不能将其重要性加以夸大。辐射防护一般认为睾丸是主要紧要器官，一方面因为它的部位浅，另一方面因为估计骨髓损伤困难。但是如果一个人的照射水平的危害相当大或某一个人生殖能力钝化，估计他们的活性骨髓系统的损伤是更有用处。

常常采用射线穿入深度 4~5 厘米处的剂量表示红骨髓的损伤，但光子照射的“5 厘米法则”引起的误差会大一倍多，至于用于中子照射误差更大，因为照射的粒子平均作用距离很短。由于大部分红骨髓分布在骨骼之中，所以上述方法是不准确的，尽管如此，鉴于它的流行很广，还是予以保留。

内照射剂量特别是骨骼附近沉着的放射性核素内照射剂量，其活性骨髓系统可精密的计算模拟骨骼中骨髓空腔尺寸的变化和骨骼中空腔的分布。多数由外照射情况可以假设活性骨髓均匀地沉积在骨骼中某些区域。这样的简化是可行的，因此由外照射源距离对损伤 (剂量) 变化的影响小于内照射放射性核素沉着的距离对损伤 (剂量) 变化的影响，内照射放射性核素沉着地方的损伤 (剂量) 一般比距离平方的变化大得多。还有两个影响骨髓光子吸收剂量相反的效应。其一是骨结构屏壁光子使吸收剂量降低，另一个是骨结构的高原子序数物质使吸收剂量增加。以后会看到，两种相反效应的总效应对外照射一般是不大的，但内照射放射源常常不是这样。

CHORD 分布和骨髓剂量

参考人 A-P, P-A, 双侧, 旋转, 各向同性照射 CHORD 密度函数。由于参考人体模一般是凸圆柱, 2π 和 4π CHORD 分布没有区别; 不同的照射几何条件反应在深度量曲线之中。

骨盆区和胸椎对 CHORD 的影响很大, 它们各自占全部活性骨髓的 36% 和 28%。各向

同性照射的1距离变化到10厘米,不超过躯干厚度的一半。双侧照射的CHORD值用A-P和P-A的P {1} dl平均值和平行射线束的深度量数据。文献中没有查到旋转照射的深度量表,这种照射情况只好用宽束深深度量数据。所以旋转照射的1变化到40厘米。

按照下列公式进行红骨髓剂量计算全部CHORD分布已经归一到1。

$$D_{\text{红骨髓}} = \sum \frac{D(1) \cdot P \{1\}}{1} \cdot \Delta l$$

表1第4栏列出各种能量光子胸部A-P向照射,活性骨髓剂量和胸前剂量比值的CHORD方法计算的结果,第五栏是蒙特卡罗程序计算结果。第五栏数值是在引用参考文献时计算的,但文献中没有用这样的形式发表。蒙特卡罗方法计算结果在光电效应区符合得很好,但在康姆顿区蒙特卡罗计算结果的不准确性变大。这样出乎意料的蒙特卡罗计算结果的特性目前还无法解释,但对它的效果将进行研究。

表1 活性骨髓剂量和胸前剂量

γ射线能量	\bar{D} (骨髓)	D^* (胸)	$\frac{\bar{D}}{D^*}$ CHORD	$\frac{\bar{D}}{D^*}$ 蒙特卡罗
50 KeV	0.26	0.48	0.54	0.54
100	0.42	0.57	0.74	0.68
250	1.1	1.47	0.75	0.47
660	2.7	3.61	0.75	0.50
1.25 MeV	5.3	6.14	0.86	0.55

• 10^{-1} /光子流量

Spiers和Overton (1962) 测量射线在人体模型中的衰减因数,用25个相同放射源照射,放射源放置在一个空室内,每面墙上有五个放射源,天花板上有五个放射源。放射源排列方法是中间一个,四角各放一个。每个放射源对室中心放射线曝射率的贡献大致相等。在大于 3π 立体角范围内入射射线相当均匀。他们绘出了以接近放射源的皮肤下深度为函数的衰减因数曲线,计算出0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0百万电子伏光子照射骨髓的加权平均透射率。

进行了各向同性照射因数和上述“近乎全向γ射线”的透射因数的比较。Spiers和Overton的测量结果比CHORD方法计算结果一致地高20%。虽然两者的放射源几何位置不同,还是认为它们相符合得很好,以及特别令人鼓舞的事实是CHORD结果比较低,而与旋转照射相比较,CHORD结果比较高。

最近O'Brien和Sanna (1976)发表了单能γ射线各向同性照射的骨髓吸收剂量计算结果。他们没有讨论光子各向同性照射野模拟的计算方法。

来自中子反冲离子的吸收剂量常常是以氢原子密度为特征,因为中子能量低于14百万电子伏时,吸收剂量70%来自中子和氢原子的作用。标准肌肉组织所含氢元素占总重量10%,肌肉组织比重为1,而骨组织含氢量占总重量5%,但骨组织的比重2倍于肌肉组织,所以两类生物组织中的氢原子密度有显著区别。肺组织的比重只有0.3,所以含氢原子的密度十分不同。幸好我们所研究的紧要器官不是远离肺组织,就是接近射线照射的皮肤表面,所以以克/厘米²计的表面的射线穿透距离小于射线其它部分穿过的肺部以克/厘米²计的射线穿透距离,这样的穿透距离用作剂量估计的指标。用以前计算的深度剂量曲线为依据,认为除了特别要研究心脏或肺组织体积的剂量之外,人体上多数比重不同区域对CHORD方法的应用影响不大。

表2列出用CHORD分布估计的中子俘获γ射线照射的活性骨髓剂量。A-P向照射2.5百万电子伏中子俘获γ射线, Mechali

(1965, 1967)估计的活性骨髓剂量为 3.1×10^{-10} ; Facey和Clifford测量结果是 3.7×10^{-10} ,表2中为 3.17×10^{-10} 拉德厘米²中子⁻¹。表2中A-P的2.5百万电子中子俘获γ射线照射的剂量,因为如NCRP(1971)所述,0~10厘米深度的积分剂量小于10~20厘米深度的积分剂量。

CHORD方法的其它用途

已经计算出长崎，广岛原子弹爆炸环境中圆柱体体模中的剂量分布。

表2 中子俘获 γ 射线照射的活性骨髓剂量

能量	P-A*	A-P	双侧	旋转	各向
0.025电子伏	25.8	15.8	21.5	18.3	8.2
1千电子伏	35.8	27.3	31.0	26.9	11.2
10千电子伏	34.3	26.6	29.9	26.2	9.8
100千电子伏	34.9	28.4	30.6	27.7	11.1
1百万电子伏	32.5	30.0	29.9	27.8	11.9
2.5百万电子伏	31.7	33.1	30.2	29.8	12.4
14百万电子伏	52.3	51.1	48.7	48.2	28.9

• $\times 10^{-11}$ 拉德/中子流量

与空间分布有依赖关系的中子辐射环境的剂量分布随空气-组织交接面下深度而变化，剂量分布变化是对称的，并说明“多次碰撞”过程掩盖“一次碰撞”过程。上述事实再加上 2π 各向同性 γ 射线照射环境，可以估算一个典型的日本居民房屋内原子弹受害者活性骨髓平均剂量，计算公式如下：

$$\bar{D} = \sum D(1) \cdot p\{1\} \cdot \Delta 1$$

式中 $D(1)$ 是12厘米半径体模中随深度变化的剂量。累加起来的和表示以中子的“自由空气中比释动能”为基础的活性骨髓剂量是0.26；以中子俘获 γ 射线的“自由空气中比释动能”为基础的活性骨髓剂量是0.07；以“自由空气剂量”为基础的 γ 射线活骨髓剂量是0.55。

SPiers和Overton进行单能“近全向 γ 射线照射”的射线谱加权平均，和估计裂变产生 γ 射线平均透射因数为0.67，各种几何

条件照射的平均透射因数差不多是一致的。

Mays和Rossi(1976)认为白血病发生率好像与中子剂量成线性关系，而白血病发生以 γ 射线剂量的平方而出现。所以

$$\bar{D} = \frac{\sum (D(1))^2 \cdot p\{1\} \cdot \Delta 1}{\sum D(1) \cdot p\{1\} \cdot \Delta 1}$$

式中 \bar{D} 量是个很有意义的量。“自中空气比释动能”为基础的这样剂量-平方平均的骨髓剂量为0.59，以及剂量-平方-平均的俘获 γ 射线骨髓剂量仍然是0.07。对应的均方根剂量各自为0.56和0.07。以 γ 射线危害为标准的中子危害的独立研究正在进行，其结果在不久的将来就会发表。

结 论

利用个人剂量仪测量胸部表面曝射量，所测量的曝射量不是自由空间的曝射量，也不是器官或全身剂量，辐射场剂量仪仅仅测量自由空间的曝射量。Alun Jones(1966, 1964)指出监测仪或个人剂量仪将活性骨髓剂量高估了9倍或低估了5倍。与空间分布有关的射线场或宽线束放射源照射，身体除A-P向照射还有其它变换方向照射，由于在胸部取得的不准确或受屏壁的曝射量读数的归一，难以作出射线危害的估计。结论是CHORD方法可以快速作出“紧要器官”剂量的估计，并能克服测量有关器官剂量的剂量仪或胶片剂量仪读数的一些困难问题。

(Jones TD: ORNL-5191, Dist Category -14, UC 1976 (英文) 徐海超摘译 史元明 朱壬葆审校)

核聚变物的放射毒理学进展

重水反应堆能生产核聚变物氚，在应急排放时，会有大量含氚和氘的水蒸汽释入大气，造成对空气的污染。通过呼吸道和皮肤

进入人体内。因而有必要深入了解这些核聚变物的放射毒理学特性，揭示其对机体的效应过程，估计它们对机体的损伤程度、预后