



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

全国高等学校教材

放射防护学

主 编 谢 凯

副主编 张丽红

二、弹性散射	26
三、韧致散射	26
四、射程和吸收	27
第五节 非带电粒子与物质的相互作用	27
一、X射线和 γ 射线与物质的相互作用	27
二、中子与物质的相互作用	28
第三章 辐射量及法定单位	30
第一节 电离辐射常用的辐射量和单位	30
一、电离辐射场的相关量	30
二、与辐射物质相关的基本剂量	31
第二节 辐射防护中常用的辐射量和单位	32
一、权重因子	32
二、当量剂量和有效剂量	33
第三节 辐射防护辅助剂量学量	34
一、待积剂量	34
二、集体剂量	35
第四章 电离辐射对机体作用的机制	36
第一节 电离辐射对机体作用的原理	36
一、原发作用	36
二、继发作用	36
三、直接作用	36
四、间接作用	37
五、氧效应与氧增强比(OER)	37
六、自由基	38
第二节 电离辐射对机体作用的过程	38
第三节 辐射类型和方式	39
一、辐射类型	39
二、电离辐射的作用方式	39
第四节 影响辐射对机体作用的因素	40
一、与辐射有关的因素	40
二、与机体有关的因素	42
三、与环境有关的因素	43

第三篇 电离辐射的生物效应

第一章 辐射生物效应的分类	45
第一节 辐射生物效应的类别	45
一、躯体效应和遗传效应	45
二、近期效应和远期效应	45
三、随机性效应和确定性效应	46
第二节 不同组织和器官的确定性效应	46
第二章 电离辐射的分子生物效应	49
第一节 DNA辐射损伤及生物学意义	49
一、DNA结构辐射损伤的特点	49
二、DNA生物学功能辐射损伤的特点	50

一、超声波的特性	270
二、超声波对人体的作用	271
第二节 超声对人体的损害及安全防护	272
第四章 磁共振	274
第一节 磁共振损伤机制	274
一、磁共振磁体	274
二、投射效应	274
三、非磁性效应	275
四、射频效应	275
五、生物效应	275
第二节 磁共振的安全机制	275

第八篇 中华人民共和国国家职业卫生标准

第一部 放射工作人员的健康标准	277
第二部 医疗照射放射防护基本要求	282
第三部 放射工作人员职业健康管理办法	297
第四部 放射性同位素与射线装置安全和防护条例	321
第五部 卫生部关于印发放射诊疗许可证发放管理程序的通知	329
第六部 放射诊疗管理规定	338
第七部 中华人民共和国职业病防治法	345
主要参考文献	354

第二篇 电离辐射防护的基础知识

第一章

作用于人体的电离辐射源

自古以来人类就受到天然存在的各种电离辐射源的照射,随着科学的进步和工业技术的发展,人类不仅逐步认识到各种辐射源对人类的影响,而且还研究到一些古人所接受不到的人工辐射源对人类的影响。因此我们把作用于人体的辐射源分为天然辐射源和人工辐射源两大类。天然辐射源存在于宇宙空间和地壳物质中,而人工辐射源则来源于人类的实践活动或加工过的天然辐射源。

第一节 天然辐射源

根据电离辐射来源我们把天然辐射源分为来自大气层体的宇宙辐射源和来自地壳物质中存在的天然放射性核素的陆地辐射源;根据电离辐射对人体的影响可分为天然本底辐射源和由于工业技术发展所变更的天然变更辐射源两种。由于地壳地质结构和表面土壤岩石的特征以及海拔高度地磁纬度的差异,世界各地甚至一个国家的不同地区其天然本底辐射水平各有不同,所以我们要判断人类所接受的辐射剂量多少要以天然本地辐射剂量水平作为基础。例如居住在高原地区的居民及高空飞行人员所接受的宇宙辐射剂量相对居住平原的居民接受的剂量有所增高,居住在公寓楼内的居民受氡的照射要比在露天作业的人们有所增高。天然的放射性核素所释放出的辐射具有无色、无味、超距、人工无法消除而又随时随地都有可能受到它们辐射的特点。

根据辐射对人体的照射途径分为外照射和内照射两类。外照射就是地球外的宇宙射线和地球本身的天然放射性核素在体外对人体进行的辐射;内照射就是指放射性核素通过食入、吸入进入人体内从体内对人体产生的辐射。

一、宇宙辐射源

宇宙空间存在着许多高能粒子,这些高能粒子在从宇宙空间移向地球大气层时释放出高能线称为初级宇宙射线。初级宇宙射线进入大气层中与大气层中固有的原子核互相作用产生级联效应或次级反应,产生的次级粒子包括质子、中子、 π 介子和一些低原子序数的原子核而形成次级宇宙射线。

(一) 初级宇宙线

初级宇宙线来自何处,其本身能量来自何处,目前仍不清楚。但是据推测,大部分初级宇宙线起源于银河系,少部分来自太阳的太阳宇宙层。通过宇宙飞船上的仪器测量证实,超新星爆炸时所产生的冲击波能为宇宙线的高能量粒子提供加速能量。

1. 初级银河宇宙线 初级银河宇宙线主要成分是高能质子,在进入地球大气层顶部时,其组成成分是核子(98%)和电子(2%)。其中核子成分中,质子占88%,粒子占11%,以及少量的更重的原子核。用装在气球和宇宙飞船上的仪器测得的初级宇宙线中的质子能谱很宽,约为 $10^8\sim 10^{20}$ 电子伏(eV)。但是能达到地面

的主要是次级宇宙线,在地平面测到的宇宙线能量最大为 $3.2 \times 10^{20} \text{eV}$ 。

2. 初级太阳宇宙线 初级太阳宇宙线来源于太阳粒子。太阳表面的大气层因受太阳磁场的扰动而产生太阳粒子辐射,大部分是能量不足 100eV 质子辐射,只有极少部分质子能量大于 10^9eV ,太阳粒子辐射持续的时间极短,只有几个小时,在极高的海拔高度处,太阳粒子辐射产生的剂量率很高,在地平面处只有少数高能质子辐射才对剂量有贡献。但是,在每平均为 11 年的太阳活动峰年期间(太阳黑子事件),太阳磁场处于最高水平,可释放大量的可见光、紫外线、X 线和大量的以质子及粒子为主的带电粒子,其辐射可使地球上层大气层中的吸收剂量指数率在短时间内增加 100 倍左右。

3. 范爱伦带 赤道上空高度在 1.2~8 个地球半径(地球的平均半径为 6371.2km)范围之间存在着辐射带,通常称为范爱伦(van Allen)带。该带分为内带和外带两部分,许多高能带电粒子被地球磁场捕集在这些带中。由于地球磁场在极区两端增加的收敛作用而使得这些粒子沿着磁力线作螺旋状的前后运动。内带主要由高能质子及能量较低电子所组成,发生在赤道上空约 1.5 个地球半径的高度上;外带内存在着高能电子和少量 α 粒子,还有一些能量较低的质子。辐射带内被地球磁场捕集的高能带电粒子注量率受 11 年太阳活动周期的影响。

初级银河宇宙线、初级太阳宇宙线和辐射带是三种对人类具有潜在危险的主要太空辐射。生活在地球上的人类和生物由于受到大气层、电离层和磁层的保护而得以免受上述初级宇宙线的直接作用。但是,当人类进入太空进行高空旅行时就有可能受到初级宇宙线的直接作用。

(二) 次级宇宙线

初级宇宙线入射地球大气层后与大气中的氮、氧等原子核相互作用发生级联效应或次级反应而产生带电的和不带电的次级粒子。如果初级宇宙线粒子的能量不很大,可以引起核反应而释放出次级质子和中子。这些质子通过电离作用而损失能量或再引起核反应;中子则通过碰撞损失能量,也可能再引起核反应。初级宇宙线中能量低于 10^3MeV 的质子在水平面上 10^4m 处可全部被吸收。 10^2MeV 以上的初级宇宙线粒子同原子核碰撞时会产生级联簇射而生成很多次级高能粒子,其中含有介子(π 介子和 k 介子)、重子(核子和超子)等高能粒子。中性 π 介子(π^0)的寿命很短,很快衰变为高能 γ 光子;高能光子在原子核附近形成电子偶,高能电子在所遇到的原子核附近又能产生韧致辐射,如此交替作用而形成电子光子簇射。带电 π 介子(π^+)一部分可能再与原子核作用产生核簇射,一部分则衰变成为 μ 介子。 μ 介子贯穿本领强,能达到地面或穿入地下。 μ 介子衰变为电子,后者与原子核作用能产生韧致辐射。在核簇射中的核子(质子和中子),如果能量不很大,可引起核反应;如果能量足够大,则能再产生核簇射。核簇射形成的 K 介子和超子衰变为其他粒子(K 介子衰变为各种 π 介子,超子衰变为质子、中子和各种 π 介子)也可能再与核子起反应产生新的粒子或核簇射或核级联。通过一系列核簇射或核级联反应,粒子数迅速增加,所产生的高能电子和光子又引起一系列的电子光子簇射。这样,一个高能初级宇宙线粒子在几百万分之一秒内发展到地面既已形成了含有电子、光子、中子、 π 介子等几百万个粒子同时落到很大面积的地面上,成为广延空气簇射现象。其中包括 ^3H 、 ^7Be 、 ^{10}Be 、 ^{14}C 、 ^{22}Na 、 ^{24}Na 等宇生放射性核素。

在离地面较近的大气层中,核子注量率较上层大气层中明显地减少,到达海平面时核子提供的吸收剂量仅为上层大气层的百分之几。在中等海拔高度处,电子和正电子是宇宙线中带电粒子能量注量率较高的主要非核子成分,在靠近地面高度处的空气中,宇宙线射场的主要源项是 μ 介子。大气层中的电离作用随着高度和纬度的增加而增加,电离作用还随着太阳活动周期而变化,太阳活动峰年电离作用最弱。

二、陆地辐射源

陆地上到处都存在着天然放射性核素,它们在衰变时释放出 α 、 β 或 γ 射线。这些天然放射性核素分为宇生和原生两类。宇生放射性核素主要是由于宇宙线和大气层中的原子核相互作用而产生,小部分是宇生和地球表层原子核相互作用所形成。引起辐射的主要宇生放射性核素是 ^3H 、 ^7Be 、 ^{22}Na 、 ^{14}C ,但它们对地表外照射的剂量贡献甚微。原生放射性核素是自从有地球以来就存在于地壳里的天然放射性核素,存留至今引起辐射的主要原生放射性核素有 ^{238}U 系、 ^{232}Th 系的放射性核素及 ^{40}K 。它们的

三、开采磷酸盐岩引起的照射

磷酸盐岩是磷肥中磷的主要来源。沉积磷酸盐矿物含铀量高。岩浆矿物如磷灰石铀含量较低。磷酸盐岩的开采和加工主要用来生产磷酸。用湿法生产磷酸时,镭与石膏共沉淀,铀、钍随磷进入酸中。热加工通常是磷酸盐岩与焦炭和硅石(二氧化硅)置于电炉中在高温下反应生成元素磷,此时,磷酸盐岩中的放射性物质大部分转入硅酸钙渣中,熔矿时有 ^{210}Po 和其他挥发性放射性物质逸出。

在大量施用磷肥的地里生长的粮食作物中, ^{238}U 系天然放射性核素的浓度可能有轻微增加。如将磷肥以液态施予土壤表面或用磷酸盐产品喂养动物,可使有关的食物受到较大程度的污染。

湿法生产磷酸的主要副产品是磷石膏。热加工生产磷酸的主要副产品是硅酸钙渣。磷石膏中 ^{228}Ra 比活度约为 $900\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$,硅酸钙渣 ^{238}U 系核素浓度与磷酸盐矿物中的大致相同。磷石膏可代替天然石膏用作隔墙板或制作水泥,以降低建筑物的造价、保护自然资源,但另一方面却增加了居民的辐射。硅酸钙渣压碎后可作为铁路的道渣、路基、跑道、屋顶等材料以及沥青混合料、混凝土、地基填料的成分。

四、增加的室内照射

当土壤逸出氡量高、室内应用含氡浓度高的水或天然气和用含镭量高的材料作建材时,均可增加室内的照射。

五、增加的宇宙线照射

飞行时旅客受到的剂量率随高度、纬度和太阳活动周期而变化,高度是主要因素之一,表 2-1-2-1 列出了 4~12km 高度间银河宇宙线剂量率的变化。假定平均飞行高度为 8km,则平均吸收剂量率为 $0.84\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$,平均剂量当量率为 $1.35\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ 。在太阳耀斑时,造成的附加吸收剂量指数率平均为;12km 高度为 $4\times 10^{-8}\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$,20km 高度为 $9\times 10^{-7}\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ 。虽然这种影响很小,但偶发的强烈太阳耀斑却可以在短时间内使辐射水平增加几个数量级。巨大的太阳耀斑在每个太阳活动周期可发生数次,每次持续时间仅数小时,因此如飞机装备了剂量仪,遇此情况降低飞行高度可避免剂量照射。

表 2-1-2-1 随高度而变化的银河宇宙线吸收剂量率和剂量当量率

高度(km)	吸收剂量率($\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$)	剂量当量率($\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$)	高度(km)	吸收剂量率($\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$)	剂量当量率($\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$)
4	0.14	0.20	14	4.62	7.56
6	0.33	0.51	16	5.92	9.70
8	0.84	1.35	18	7.09	11.64
10	1.75	2.88	20	7.72	12.75
12	3.01	4.93			

表内数据为两个地磁纬度(43 和 55)、两个太阳活动时期(最大和最小)的平均值。

宇航员在执行空间飞行任务时可受到初级宇宙线的高能粒子、太阳耀斑的照射。在厚度为 $0.7\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的屏蔽层内测得的最大吸收剂量率在穿越内带时为 $0.22\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$,穿越外带时为 $0.054\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ 。表 2-1-2-2 和表 2-1-2-3 为宇航员在执行空间飞行任务时受到的吸收剂量。

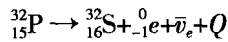
表 2-1-2-2 宇航员在执行空间飞行任务时受到的吸收剂量

飞行任务	发射年月	飞行持续时间(h)	轨道类型	吸收剂量(10^{-5}Gy)
Apollo VI	1968.8	260	地球轨道	120
Apollo VII	1968.12	147	绕月	185
Apollo IX	1969.2	241	地球轨道	210
Apollo X	1969.5	192	绕月	470
Apollo XI	1969.7	182	登月	200
Apollo XII	1969.11	236	登月	~200

核的电荷数比母核增加 1, 质量数不变, 子核在周期表中的位置比母核后移一位, 这就是 β^- 衰变的位移定则。其一般过程为



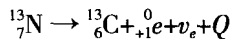
式(1-4)中, $\bar{\nu}_e$ 是反中微子, 它不带电, 其静止质量基本为 0。子核与母核是相邻的同量异位素, 例如



2) β^+ 衰变: 核内放出 β^+ 粒子(正电子 ${}^0_{+1}e$) 的衰变过程。衰变时, 母核 X 放出一个正电子而转变成子核 Y, 子核的电荷数比母核减少 1, 而质量数相同, 子核在周期表中的位置比母核向前移动一位, 这就是 β^+ 衰变的位移定则, 其一般过程为



式(1-5)中, ν_e 是中微子, 它不带电, 其静止质量基本为零。子核和母核也是相邻的同量异位素, 例如



3) 电子俘获: 能发生 β 衰变的原子核俘获一个核外电子, 同时放出一个中微子, 使核内一个质子转变为中子, 这个过程称为电子俘获 (electron capture, EC)。其过程为



例如: ${}^0_{-1}e + {}^{55}_{26}Fe \rightarrow {}^{55}_{25}Mn + \nu_e + Q$ 子核和母核也是相邻的同量异位素。

一个内层电子被原子俘获后, 核外会缺少一个电子, 原子的外层电子会立即将这一空位填充, 这个能量以特征 X 射线的形式放出, 也可使另一外层电子电离, 成为自由电子, 这种被电离出的电子称为俄歇电子 (Auger electron)

(3) γ 衰变和内转换: 处于高能态的原子核跃迁到低能态或基态时放出 γ 光子的过程称为 γ 衰变, 又叫 γ 跃迁。 γ 射线是一种电磁辐射。在放出 γ 射线过程中, 原子核的质量数和电荷数都不改变, 只是核的能量状态发生变化, 故 γ 跃迁是属于同质异能跃迁。处于同质异能态的核素称为同质异能素。如果用 ${}^A_ZX^*$ 表示 A_ZX 的同质异能素, γ 跃迁可用下式表示



γ 衰变是通常伴随着 α 或 β 衰变而出现的。有些原子核从激发态向较低能态或基态跃迁时, 并不辐射 γ 光子, 而是将多余的能量直接传递给核外内层电子, 使其成为自由电子, 这种现象称为内转换 (internal conversion, IC)。所放出的电子叫内转换电子 (internal conversion electron)。核素发射内转换电子时也会辐射特征 X 射线。

3. 衰变纲图 放射性核素的衰变过程可用衰变纲图 (decay scheme) 来表示。图中最下面的横线表示原子核的基态, 上面的各横线分别表示子核的激发态。相应的衰变类型、能量和半衰期等分别标在能级的两侧, 两能级之间的能量差表示衰变能。斜线上标示衰变类型、粒子的动能和衰变百分比。发生 α 衰变、 β^+ 衰变和轨道电子俘获, 箭头向左倾斜; 发生 β^- 衰变, 箭头向右倾斜; 向下的垂线表示 γ 跃迁。图 2-2-1-1 给出了 ${}^{32}_{15}P$ 和 ${}^{60}_{27}Co$ 的衰变纲图。 ${}^{32}_{15}P$ 通过 β^- 衰变成 ${}^{32}_{16}S$, 在此过程中放出 1.71MeV 的能量。 ${}^{60}_{27}Co$ 在 β^- 衰变过程中所产生的 γ 射线, 其衰变过程为, ${}^{60}_{27}Co$ 可以发生 β^- 衰变到 ${}^{60}_{28}Ni$ 的 2.50MeV 的激发态, 释放出能量为 1.17MeV 的 γ 射线, 再跃迁到 ${}^{60}_{28}Ni$ 的 1.33MeV 的较低激发态, 释放出能量为 1.33MeV 的 γ 射线。

4. 放射性核素的衰变规律

(1) 衰变规律: 放射现象是原子核从不稳定状态趋于稳定状态的过程, 对于某一个原子核, 我们无法预知它什么时候衰变, 但对于由大量原子核组成的放射性物质, 其衰变符合统计性规律。

如在 t 时刻原子核数目为 N , 经 dt 时间后, 因衰变而减少的原子核为 $-dN$ 。实验和理论都证明, $-dN$ 与时间间隔 dt 以及 t 时刻未衰变的原子核数目 N 成

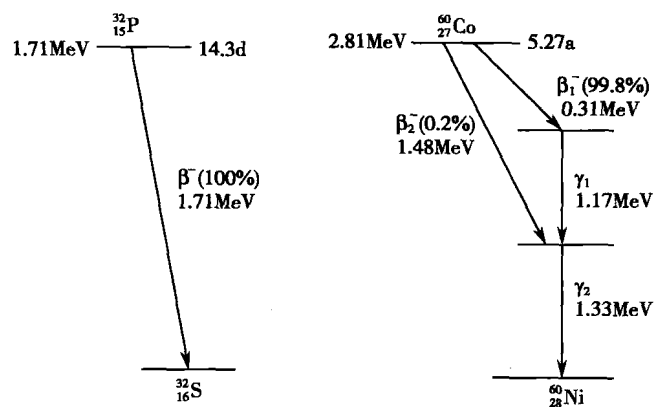


图 2-2-1-1 ${}^{32}_{15}P$ 和 ${}^{60}_{27}Co$ 的 β^- 衰变纲图

正比,即

$$-dN = \lambda N dt \quad (1-8)$$

式(1-8)中,负号表示放射性核数 N 随时间 t 增加而减少, λ 是比例常数,称为衰变常数(decay constant)。它是表示放射性核素衰变快慢的物理量,单位为 s^{-1} 。其值越大,核素随时间增加而减少的就越快。把式(1-8)改写成

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt$$

对上式积分,可得到在 t 时刻的原子核数目 N 与 $t=0$ 时刻的原子核数目 N_0 之间的关系,这就是放射性核素衰变的指数衰减规律,称为衰变定律。

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1-9)$$

(2) 半衰期:放射性核素因衰变而减少到原来的一半所需的时间,称为半衰期(half life),用 $T_{1/2}$ 表示,见表 2-2-1-1。

表 2-2-1-1 几种放射性核素半衰期 ($T_{1/2}$)

放射性核素	符号	$T_{1/2}$	放射性核素	符号	$T_{1/2}$
镓 -68	$^{68}_{31}\text{Ga}$	68.3min	汞 -203	$^{203}_{80}\text{Hg}$	46.9d
锝 -99	$^{99}_{43}\text{Tc}$	6.1h	钴 -60	$^{60}_{27}\text{Co}$	5.27a
金 -198	$^{198}_{79}\text{Au}$	2.7d	锶 -90	$^{90}_{38}\text{Sr}$	28a
碘 -131	$^{131}_{53}\text{I}$	8.04d	铯 -137	$^{137}_{55}\text{Cs}$	30a
磷 -32	$^{32}_{15}\text{P}$	14.3d	碘 -125	$^{125}_{53}\text{I}$	60d

当 $t=T_{1/2}$ 时, $N = \frac{N_0}{2}$, 代入(1-9)式得

$$\frac{1}{2} N_0 = N_0 e^{-\lambda T}$$

两边取对数,得

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (1-10)$$

由式(1-10)可知半衰期 $T_{1/2}$ 与衰变常量 λ 成反比,显然 λ 大, $T_{1/2}$ 就短,衰变就快。将式(1-10)代入式(1-9),可得到用半衰期表示的衰变定律为

$$N = N_0 \left(\frac{1}{2} \right)^{t/T} \quad (1-11)$$

当放射性核素进入生物体时,其原子核的数目除按自身的衰变规律减少外,还会由于生物体的代谢而使原子核的数目减少。假定因代谢而减少的原子核数目也按指数规律衰减,并引入生物衰变常数(biological decay constant) λ_b 和生物半衰期(biological half life) T_b 。据此,放射性核素在生物体内实际所表现的衰变常数和半衰期分别用有效衰变常数(effective decay constant) λ_e 和有效半衰期(effective half life) T_e 表示。对应的三者之间有如下关系,即:

$$\lambda_e = \lambda + \lambda_b, \quad \frac{1}{T_e} = \frac{1}{T} + \frac{1}{T_b} \quad (1-12)$$

(3) 平均寿命:原子核总数一定的放射源,原子核在衰变前平均存在的时间称为放射性核素的平均寿命(mean life),以 τ 表示。它是一个反映放射性核素衰变快慢的物理量。假设某放射性核素在 $t=0$ 时有 N_0 个原子核,在 t 到 $t+dt$ 的间隔内发生衰变的原子核为 dN , 这些的寿命为 t , 它们寿命的和就是 $-tdN$, N_0 个核它们总的寿命就是 $-tdN$ 的积分,即平均寿命

$$\tau = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} -tdN = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} \lambda N t dt = -\frac{\lambda}{N_0} \int_0^{\infty} N_0 e^{-\lambda t} t dt = \frac{1}{\lambda} \quad (1-13)$$

由此可见,平均寿命等于衰变常数的倒数。据此还可推导出平均寿命和半衰期的关系:

均衡;由于 N_1 和 A_1 是按 λ_1 衰减,则达到暂时平衡时, N_2 和 A_2 也按 λ_1 衰减。

图 2-2-1-2 表示 $\lambda_1 < \lambda_2$ 时,子体的生长和衰减情况,其中曲线 a 表示子体的活度 A_2 随时间的变化;曲线 b 表示母体的活度 A_1 的变化;曲线 c 表示子、母体的总活度 ($A_1 + A_2$) 随时间的变化;曲线 d 表示子体单独存在时活度的变化,由曲线 a 看到,子体的活度最初随时间而增长,达到某一极大值后,按母体的衰变常数而减少。

医学上,半衰期短的放射性核素很有应用价值,但是,由于它们衰变很快,从生产到使用的时间长了,剩下的也就不多了。利用串连衰变的平衡可以解决这个矛盾。先生产长半衰期的母体,使用时,根据母体和子体物理化学性质的不同,用特定的淋洗剂把短半衰期的子体提取出来。当子体被洗脱后,经过一定时间,子体和母体又达到平衡,可再次进行淋洗。这样,每隔一定时间,就可以从母体中分离出具有一定活度的子体,随时供我们使用。这种装置称为放射性核素发生器 [(radioactive nuclide generator), 俗称“母牛”。目前,供医用的放射性核素发生器还不多,其中以 $^{99m}\text{Tc} (^{99}\text{Mo} \rightarrow ^{99m}\text{Tc})$ 发生器和 $^{113m}\text{In} (^{113}\text{Sn} \rightarrow ^{113m}\text{In})$ 发生器使用得最普遍。

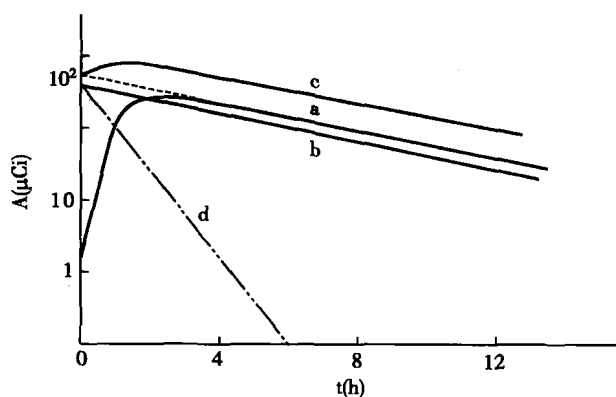


图 2-2-1-2 暂时平衡

第二节 电离辐射和非电离辐射

辐射是指一束微观粒子的发射(释放)过程,它是可以传递能量的。广义的辐射包括任何不需要介质参与而以波或运动粒子的形式向周围空间或物质发射并在其中传播的能量的一种现象。如声波、热波、电磁波、 α 射线、 β 射线、中子射线辐射。狭义的辐射限于电离辐射,包括能产生电离效应的高能电磁辐射(如 X 射线、 γ 射线)和粒子辐射。一般按与物质作用的方式把辐射分为两类:电离辐射和非电离辐射。

一、电离辐射

电离辐射(ionizing radiation)是一切能引起物质电离的辐射总称,其种类很多,在放射防护领域内,能在物质内产生离子对的辐射统称为电离辐射。包括直接或间接电离粒子或由两者混合组成的任何辐射。直接电离粒子具有足够大的动能,以致通过与物质碰撞就能直接引起被穿透的物质发生电离,一般像 α 粒子、 β 粒子、质子这样的高速带电粒子均属于此类;像 X 射线、 γ 射线、中子等光子,在与物质相互作用时能够释放出直接电离粒子或次级带电粒子或次级光子时传递能量而引起物质的电离,激发的非带电粒子属间接电离粒子。因此可见电离辐射又可分为粒子辐射与电磁辐射两大类。

粒子辐射一般是带有一定能量并有一定静止质量的高速运动粒子(如电子、质子、 α 粒子、 β 射线、中子、负介子和带电重粒子等)。在高速运动下,这些粒子消耗自己的能量,将能量传递给其他物质。

电磁辐射实质上是一种带有能量的电磁波,是以互相垂直的电场和磁场随时间变化而交替振荡,形成向前运动的电磁波;它既有波动性又具有粒子性,但仅有能量而无静止质量。电磁辐射按其频率和波长,又可分为 X 射线、 γ 射线等。

无论电磁辐射或粒子辐射,能量各有所不同。能量高时,冲击物质时可以使物质的核或外围的电子脱离原有位置,形成自由电子,或跃迁到能量较高的能级,产生物质的电离或激发。而能量较低的电磁波或粒子,能量还不足以引起物质电离,只能引起原子或分子的振动、转动或电子在轨道上能级的改变的过程则称之为非电离辐射,如紫外线。

α 射线是一种带电粒子流,由于带电,它所到之处很容易引起电离。 α 射线由于其质量较大,故有很强的电离本领,但穿透能力差,在空气中的射程只有几厘米。

β 射线也是一种高速带电粒子,其电离本领比 α 射线小得多,但穿透本领比 α 射线大,很容易被铝箔、有机玻璃等材料吸收。

辐射量及法定单位

历史上,把度量电离辐射的“多少”所需的量称为辐射剂量。这个量是自 X 射线被发现以后在实际应用中常遇到的问题。长期以来,剂量的单位和名称经过长期变革,最终由国际计量委员会将辐射剂量划入计量科学的分支,采用了国际单位制(SI)单位。

电离辐射剂量是基于在确定情况下的电离事件的总数,或根据在确定质量物质中沉积的总能量。虽然,计量这些总量忽略了电离过程不连续的特性,但根据观察,从经验上来讲,这些总量与电离辐射所产生的生物学效应有着密切关系,也就是说,计量电离辐射的基础是电离辐射与物质的相互作用。

第一节 电离辐射常用的辐射量和单位

电离辐射场是辐射源作为的空间,在这个空间里电离辐射利用自己本身所固有的物理特性进入物质内,与物质相互作用时发生能量转换而导致了物质的变化。在射线与物质相互作用的过程中我们需要定量地了解、分析射线在辐射场中的分布。粒子类型、粒子数目、粒子能量和辐射方向可以直接来描述辐射场的性质;而照射量可间接表示辐射场的性质。

一、电离辐射场的相关量

(一) 粒子注量和粒子注量率 (particle fluence, Φ and particle fluence rate, ϕ)

我们在辐射场中以某一点 P 为中心划出一个球形区域,粒子从不同方向进入球内;那么进入小球内的粒子数和到达球内中心 P 点截面积的粒子数之比就是辐射场内 P 点处的粒子注量。但应注意,粒子注量是指在单向平行辐射场的情况下,到达与辐射方向相垂直的单位截面积的粒子数。粒子注量的 SI 是米⁻²(m⁻²)。

在辐射防护中,常用粒子注量率表示单位时间内进入单位面积的粒子数。

(二) 能量注量和能量注量率 (energy fluence, Ψ and energy fluence rate, ψ)

除了粒子数量和粒子运动方向,能表述辐射场性质的另一个因子就是粒子通过辐射场中某点 P 所在的截面积时所携带的能量,即为能量注量。能量注量必须是指进入球体内与粒子运动方向相垂直的以球心 P 点为截面积的粒子能量的总和与其截面积之比。SI 单位是焦耳·米⁻²(J·m⁻²)。

能量注量可间接计算电离辐射在物质中的能量转换和对射线的吸收。

同样,单位时间内的能量注量为能量注量率;SI 单位是 W·m⁻²。

(三) 传能线密度 (linear energy transfer, LET)

传能线密度是早期最接近微剂量学概念的物理量,是描述特定能量的带电粒子在介质中(微观空间 10⁻⁶~10⁻⁹m)穿行时能量的转移和分布的物理量。它是表示电离辐射产生生物效应时,带电粒子在介质中的行迹方向上每单位长度路程转移的能量要小于某一特定值 Δ 的历次碰撞所造成的能量损失。 Δ 是能量截止值,凡由能量转移大于 Δ 的碰撞所致的带电粒子的能量损失,不认为是辐射局部授予介质的。但要明确,能量转移小于 Δ 的历次碰撞所造成的能量损失总和与带电粒子在介质中穿行的距离之比是传能线密度 (LET)。SI 单位是焦耳·米⁻¹(J·m⁻¹)。

(四) 截面

电离辐射在与物质相互作用时,带电粒子与不带电粒子有着明显的差别。带电粒子主要受原子核和电子的电磁作用,虽然,它穿过物质时,与每个原子发生作用,但能量损失不多。而不带电粒子在与物质相互作用时,虽然次数不多,但每一次能量损失都较大。所以,在定量描述电离辐射与物质相互作用的程度时,对不带电粒子采用概率描述,对带电粒子则采用单位路径上的平均能量损失多少来描述。

通常,把入射粒子与其相互作用的物质称为“靶”,与“靶”相互作用的概率依入射粒子的类型和能量以及物质的性质相关,不是所有粒子都会与靶发生相互作用。我们把将单位入射粒子注量能够作用于特定靶面的概率称为截面,这个截面是描述入射粒子与物质相互作用程度的物理量。截面的 SI 单位是米²(m²)。专用单位为“靶恩,b”,其相互关系为

$$1b=1 \times 10^{-28}m^2$$

一般情况下,截面用来描述中子与原子核发生相互作用的概率。

(五) 授予能(energy imparted, ϵ)

当电离辐射穿过某一体积物质时,入射粒子以电离、激发方式将能量传递(或沉积)给该体积物质;这个能量就是授予能,包括进入该体积内的电离粒子的能量的总和和发生于该体积内的任何核变化及粒子静止质量能的总和,但它不包括离开该体积内的电离粒子的能量的总和。

二、与辐射物质相关的基本剂量

(一) 照射量和照射量率(exposure, X and exposure rate \dot{X})

我们知道,X 射线或 γ 射线的光子不带电,它们在与空气发生相互作用时产生次级电子,次级电子使空气电离产生大量的正负离子,这种离子数量愈多,说明 X 射线或 γ 射线在空气中产生的电离程度愈强。照射量就是能够反映 X 射线或 γ 射线对空气的电离本领的一个量度,它不是“辐射剂量”,是度量辐射源的输出量的一个辐射量。

照射量的定义为:X 射线或 γ 射线的光子在单位质量空气中释放出的全部电子完全被空气阻止时,在空气中产生同一种符号离子的总电荷的绝对值。照射量是 X 射线沿用最早的量,它只是说明 X 射线和 γ 射线在空气中电离的性质,不能用于其他类型的辐射,也不能用于其他的物质。并且它仅对光子能量介于 10keV~3MeV 范围内的 X 射线和 γ 射线。

照射量的 SI 单位是库仑·千克⁻¹(C·kg⁻¹),专用单位是伦琴(R)。

$$1 \text{ 伦琴(R)} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ 库仑} \cdot \text{千克}^{-1} (\text{C} \cdot \text{kg}^{-1})$$

$$1 \text{ 库仑} \cdot \text{千克}^{-1} (\text{C} \cdot \text{kg}^{-1}) = 3.877 \times 10^3 (\text{R})$$

$$1 \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1} = 10^3 \text{ mC} \cdot \text{kg}^{-1} = 10^6 \mu\text{C} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$1 \text{ R} = 10^3 \text{ mR} = 10^6 \mu\text{R} = 10^{-3} \text{ kR} (\text{千伦琴})$$

照射量率是指单位时间内的照射量。照射量率 SI 单位为库仑·千克⁻¹·秒⁻¹(C·kg⁻¹·s⁻¹);其专用单位是伦琴·秒⁻¹(R·s⁻¹)、伦琴·分⁻¹(R·min⁻¹)、毫伦琴·小时⁻¹(mR·h⁻¹)。

(二) 比释动能和比释动能率(kerma, K and kerma rate, \dot{K})

电离辐射是由直接带电粒子和间接带电粒子所组成的,直接带电粒子具有足够的动能以至通过碰撞就能直接引起被穿透的物质电离。而间接带电粒子是在与物质相互作用时能够释放出直接电离粒子或次级带电粒子,由这些带电粒子引起物质的电离和激发。不带电的间接电离粒子在与物质相互作用时第一阶段的结果可用比释动能来表示,第二阶段的结果可用吸收剂量来表示。

比释动能是指间接带电粒子在与物质相互作用时,电离辐射授予特定单位质量物质的体积元内所产生的所有带电粒子的初始动能的总和。比释动能适合于任何不带电的电离辐射场,它反映了不带电的间接带电粒子形成带电的电离粒子的能量的多少。

比释动能的 SI 单位是焦耳·千克⁻¹(J·kg⁻¹),专用名是“戈瑞”(Gray),简称 Gy。

比释动能率是指在间接电离辐射作用的单位时间内,在物质中产生的比释动能。比释动能率 SI 单位是戈瑞·秒⁻¹(Gy·s⁻¹)、毫戈·时⁻¹(mGy·h⁻¹)。

六、自由基

自由基 (free radical) 是指独立存在的、核最外层轨道上带有一个或多个未配对电子的分子、原子、离子或基团,可带或不带电荷。自由基的表示是在原有原子或分子符号的右上角加一个小圆点“·”标记,以显示为配对的电子特征。它的理化性质特征:

1. 高反应性 自由基由于有未共享的电子,具有强烈的夺取或丧失电子以成为配对电子的趋势,因此,自由基的化学性质异常活泼。有时通过反应生成新的自由基,后者又继续与原反应物作用,形成连锁反应。

高反应性还表现在很容易与生物靶分子发生加成、抽氢和电子转移等反应。双自由基氧极易与生物靶分子自由基反应而发生氧固定,造成不易修复的损伤。

2. 不稳定性 绝大多数自由基是不稳定的,寿命很短,约 $10^5 \sim 10^{10}$ s。羟自由基 (OH^\cdot) 的半寿期只有 $10^{-10} \sim 10^{-9}$ s;水合电子在中性水中的半寿期为 2.3×10^{-4} s;并且浓度低,难测定。

3. 顺磁性 自由基具有未配对电子,自旋产生了磁矩。单电子的磁矩取向顺应于外加磁场的作用而采取与外加磁场相平行或反平行的方向。这种顺磁性是自由基独特的物理性质。

第二节 电离辐射对机体作用的过程

无论是原发作用还是继发作用,两者之间是没有明显分界线的,有时时间相差为 2~3 个数量级,有时又存在着相互交叉的重叠现象。这里借鉴英国 Adams 报道的作用时间表我们可以观察到这种现象。见表 2-4-2-1。

表 2-4-2-1 电离辐射作用时间表

时间 (s)	发生过程	时间 (s)	发生过程
物理阶段		10^{-7}	自由基扩散和均匀分布
10^{-18}	快速粒子通过原子	10^{-3}	e_{aq}^- , OH^\cdot , H^\cdot 与低浓度活性溶质反应
$10^{-16} \sim 10^{-17}$	电离作用 $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O}^+ + e^-$	1	自由基反应大部分完成
10^{-15}	电子激发 $\text{H}_2\text{O}^+ \rightarrow \text{H}_2\text{O}^*$	$1 \sim 10^3$	生物化学阶段
10^{-14}	离子-分子反应 $\text{H}_2\text{O}^+ + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{OH}^\cdot + \text{H}_3\text{O}^+$	生物学阶段	
10^{-14}	分子振动导致激发态解离 $\text{H}_2\text{O}^* \rightarrow \text{H}^\cdot + \text{OH}^\cdot$	数小时	原核和真核细胞分裂受抑制
10^{-12}	转动弛豫,离子水合作用 $e^- \rightarrow e_{aq}^-$	数日	中枢神经系统和胃肠道损伤显现
化学阶段		约一个月	造血障碍性死亡
$< 10^{-12}$	e^- 在水合作用前与高浓度的活性溶质反应	数月	晚期肾损伤、肺纤维样变性
10^{-10}	e_{aq}^- , OH^\cdot , H^\cdot 及其他基团与活性溶质反应	若干年	癌症和遗传变化
$< 10^{-7}$	刺团 * (spur) 内自由基相互作用		

* 刺团指自由基发生反应的小体积

引自 Adams GE. Time effects in molecular radiation biology. Radiat Environ Biophys, 1980; 17:95-113

电离辐射引起的生物效应,是一个非常复杂的过程。电离辐射作用于生物体后,与机体细胞、组织、体液等物质相互作用,引起物质的原子或分子电离,导致分子水平的变化,特别是生物大分子的损伤。这其中既有辐射对这些大分子的直接作用,又有辐射对细胞内水分子作用的分解产物所引起的间接作用。上述分子水平效应发生于辐射作用的瞬间,而机体的可见损伤和放射病临床症状的出现,则需要经过相当一段时间。在放射损伤效应中间接机制约占 2/3,直接机制约占 1/3。

在电离辐射所致分子变化的基础上,发生细胞代谢、功能和结构的改变,经一系列的继发作用,最终导致器官水平的障碍乃至整体水平的变化,在临床上便可出现放射损伤的体征和症状。对人体细胞的损伤,只限于个体本身,引起躯体效应;而对生殖细胞的损伤,则影响受照个体的后代而产生遗传效应;单个或小量细胞受到辐射损伤(主要是染色体畸变,基因突变等),可出现随机性效应;辐射使大量细胞或组织受到破坏即可导致确定性效应。由于各种细胞的放射敏感性不同,在相同的辐射剂量作用下,不同细胞所出现

空气中的液体或固体悬浮物进入肺部后,一部分再呼出,另外一部分则沉积在鼻咽、气管及支气管以及肺部等区域内,沉积的份额与悬浮物的颗粒大小有关。沉积在鼻腔部放射性核素将有大部分通过纤毛运动进入胃肠道,而较少的一部分则进入细胞外体液。

2. 经消化道进入人体 食入放射性物质时,其中一部分将随粪便排出,不参与体内的代谢作用,对多数人来讲,它们在胃、小肠和大肠中的停留时间分别为 1 小时、4 小时和 30 多小时。另一部分则在小肠区时被吸收入血,参与人体的代谢过程。

3. 经皮肤进入人体 一般的放射性物质很难穿过完好的皮肤进入体内,然而液态或蒸气态的氧化氟、碘蒸气、碘溶液和碘化物溶液等能穿透皮肤进入体液。如果皮肤有伤口,则放射性物质很容易进入皮下组织而被吸收到细胞体液。放射性物质经眼黏膜也能吸收。

进入人体的放射性物质,其在体内的分布与排出取决于它的理化性质和机体的功能状态。某些核素主要聚集在某一器官和组织,例如:放射性碘(¹³¹I)通常主要聚集在甲状腺,镭(²²⁶Ra)、锶(⁹⁰Sr)、磷(³²P)则主要聚集在骨骼;而另一些核素则比较均匀地分布于整个机体,例如:铌(⁹⁵Nb)、钠(²⁴Na)等。

(三) 混合照射

内照射和外照射同时作用于人体称为混合照射。

第四节 影响辐射对机体作用的因素

电离辐射作用于机体产生生物效应,不仅取决于电离辐射对机体的作用还取决于机体对辐射的反应。影响辐射损伤的因素有许多种,主要有三个方面,一是与辐射有关的因素,二是与机体有关的因素,三是与环境有关的因素。

一、与辐射有关的因素

(一) 电离辐射的种类

射线种类不同,其产生损伤效应也各不相同,其决定损伤效应的主要是射线本身的电离密度和穿透能力。一般来讲,密度越大,生物效应越显著。由表 2-4-4-1 可知,α 射线电离本领最大,射程最短,在机体组织中只有 0.03~0.07mm 的射程。在空气中的射程仅有几个厘米,可其电离密度每行程 1mm,即产生 6000 对离子,因此其外照射危害较小,几厘米的空气,一张纸即可完全阻挡它,而内照射可引起严重的生物效应。

表 2-4-4-1 三种射线在空气中的射程及电离密度

具有 2MeV 能量的射线	在空气中的射程(m)	每毫米行程上的离子对	具有 2MeV 能量的射线	在空气中的射程(m)	每毫米行程上的离子对
α 射线	0.01	6000	γ (或 X) 射线	100.00	0.6
β 射线	1.00	60			

β 射线与 α 射线相比,具有电离能力较小,穿透能力较大的特点,但多数也只能穿透组织 1~2mm。外照射只能引起皮肤表层的损伤,内照射时可引起明显的生物效应。

γ 和 X 线都是电磁波,具有穿透能力很强,电离能力很弱的特点,外照射时可引起深层组织的损伤,此特点正好用于机体深在组织病变的检查及治疗。

一般放射线、可见光、红外线、紫外线、X 射线、γ 射线都属于电磁波,通过物质时,沿途使物质间接或直接地发生电离作用,使物质结构发生变化。其中紫外线、X 射线、γ 射线由于光子能量大,能使物质产生电离和电离辐射;而微波、红外线、可见光,由于光子能量小,不能引起物质电离,属非电离辐射范畴。

(二) 照射剂量

通常剂量越大,生物体的损伤越重,生存率越低,死亡率越高。当然不同剂量的射线,一次作用于机体时,会产生不同的效应。表 2-4-4-2 为不同剂量的放射线作用于人体引起的损伤。

表 2-4-4-2 不同剂量的放射线作用于人体引起的损伤

剂量 (Gy)	病理变化	剂量 (Gy)	病理变化
0~0.25	不明显和不易察觉的病变	2.0~3.5	中度急性放射病
0.25~0.5	可逆(机能性)变化,可有血象变化	3.5~5.5	重度急性放射病
0.5~1.0	机能的和血象的改变,但不伴有临床症状	5.5~8.0	极重度急性放射病
1.0~2.0	轻度急性放射病		

(三) 剂量率

剂量率是指单位时间内,机体吸收的照射剂量。在一般情况下,总剂量相同时,剂量率越大,生物效应越显著,这是由于受照射机体随着剂量时间分布越集中,对辐射损伤的修复作用就越小;但剂量率达到一定程度时,生物效应与剂量率之间则失去比例关系。从图 2-4-4-1 人的剂量死亡曲线可以看出,S 形曲线的斜度两端钝,中间锐,在 50% 死亡率处,线有急剧变化。斜率越大,剂量稍有变化,死亡率明显增加(表 2-4-4-3)。

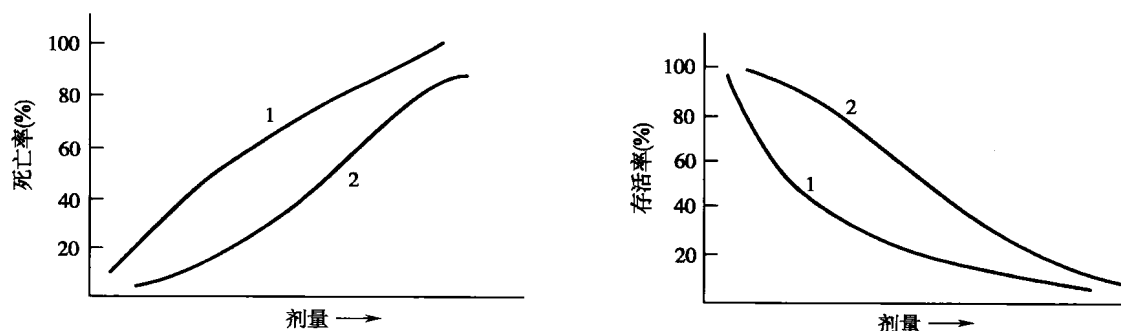


图 2-4-4-1 电离辐射引起的典型死亡曲线及存活曲线

1. 指数曲线 2. S 型曲线

表 2-4-4-3 不同剂量与生物效应(435 只)狗

照射剂量 (R)	剂量率 2.2~7R/分 死亡率 (%)	剂量率 11~16R/分 死亡率 (%)	照射剂量 (R)	剂量率 2.2~7R/分 死亡率 (%)	剂量率 11~16R/分 死亡率 (%)
500	14.3	83.3	400	0	57.7

如果每日 0.005~0.05Gy 的剂量,即使长期大剂量累积也不会产生急性放射病,只能导致慢性放射病,因为累积剂量在足够引起细胞损伤直至死亡前,机体有修复的机会。当剂量率达到 0.05~0.1Gy/min 时,有可能引起急性放射病。

(四) 分次照射

分次重复照射的情况下,其效应低于一次全剂量照射的效应,分次越多,各次间隔时越久,则生物效应越小。这显然是与机体的修复过程有关。如:大白鼠一次全身照射 1000R,其死亡率为 10%,若将 1000R 分 10 次给予,每次 1R,则死亡率可降低至 9%。如同样的照射量分 20 次给予,则每次 50R,死亡率可降低至 3%。

(五) 照射面积

当照射的其他条件相同时,受照射的面积越大,生物效应越显著。例如:600R 全身照射人体时,即刻死亡,若只作用于几个平方厘米的皮肤时,只引起暂时性的皮肤发红。若增至几十平方厘米的面积时,会出现恶心、头痛等,但不久即消失。若增加至全身的 1/3,会引起急性放射病。如全身的 1/2,就有死亡的可能性。

(六) 照射部位

腹部照射引起的效果最为严重,依次为盆腔,头颈,胸部及四肢。例如:以 2000R (剂量率相同)分次照射不同部位,机体的反应不同。腹部受照射动物全部在 3~5 天内死亡,盆腔受照射后部分动物死亡,头或胸部受照射后不发生死亡。当然损伤的程度还与受照部位的面积和质量有关。

(七) 照射方式

分为三类:外照射、内照射、混合照射。

外照射时,其产生的效应除受剂量、剂量率及受照部位、受照面积的影响外,多向照射效应要重于单向照射,如给狗多向照射时,其绝对致死量为 5000R,而单向照射的绝对致死量为 8000R。

内照射的生物效应主要受有效放射性核素的物理化学特性、侵入机体的途径、分布和排出的特点、数量、物理半衰期等因素的影响。

另外,各种不同的辐射对人体的生物效应不同,按其生物效应轻重进行排序,外照射时依次为中子 > γ 辐射 > X 射线 > β 辐射 > α 辐射。内照射时 α 辐射、质子 > γ 辐射、 β 辐射和 X 射线。

二、与机体有关的因素

当一切照射条件完全严格一致时,机体或其他组织、器官对辐射作用的反应强弱或速度快慢不同。这主要与种系、个体及组织、细胞对射线的敏感性有关。

(一) 种系的放射敏感性

一般种系演化越高,机体组织结构越复杂,敏感性越高。在同一类动物中,不同品系之间的放射敏感性有较明显的差异,一般对其他有害因子的抵抗力较强的品系,其放射性抵抗力也较高。

生物放射敏感性的一般规律是动物比植物、微生物敏感,温血动物比冷血动物敏感,高等动物比低等动物敏感。

(二) 个体的放射敏感性

个体的放射敏感性变动范围是相当大的。这种差异主要与受照机体本身的生理特征、年龄、性别、生理状况、遗传特征、营养状况、新陈代谢强度有关。

一般在哺乳动物中,胎儿及幼年老年动物较成年者敏感,因为老年机体由于功能的衰退其耐受能力低于成年者。雄性较雌性敏感(约相差 50rad)。

另外个体敏感性也不是一成不变的,机体内部环境与外界因素都可以改变其敏感性。如缺氧、高空锻炼、注射雌激素、低温环境可使耐受性升高,而营养不良、蛋白质和维生素缺乏、饥饿、剧烈运动和过劳、噪声、妊娠或月经期可使耐受性降低。此外个体的健康状况、免疫力、医疗措施也能影响放射敏感性。个体敏感性的差异,一般在低剂量时表现比较明显,而大剂量照射时,这种差异就比较小了。

在胚胎植入前期照射母体时,较少的剂量即可引起胚胎的大量死亡,而不死的胚胎可继续发育,但畸形较少,因为细胞更新能力较强。人的这一阶段为妊娠第 0~9 日。在器官形成期受照,虽然胚胎死亡率在相同条件(剂量)下较前一段降低,却出现大量畸形,为妊娠的 9~42 天。在胎儿发育的随后时期,照射后发生的解剖学缺陷的几率下降,此时只有分化较晚的脑、眼和性腺出现畸形,如小头症和智力低下。

关于电离辐射对个体发育的影响,对临床医学和卫生防护有着重要的意义。因此有人提出“10 日法”,建议除必需的医疗指征外,对妇女下腹部的 X 射线检查应与在月经周期第一天算起的 10 日内进行。这样就避免对妊娠子宫的照射,即使是低剂量的照射也应完全避免。

胚胎及胎儿期受照射发生某些类型的癌症和白血病的危险度增高。

(三) 不同器官、组织和细胞的放射敏感性

一种组织的放射敏感性与其细胞的分裂活动成正比而与其分化的程度成反比。有丝分裂活动旺盛的细胞比未分化的细胞敏感,分化程度越低,对射线越敏感,细胞核比胞浆敏感。见表 2-4-4-4。

表 2-4-4-4 机体各组织对射线的敏感性

高度敏感组织	中度敏感组织	轻度敏感组织	不敏感组织
淋巴组织(淋巴细胞、幼稚淋巴细胞)	感觉器官(角膜、结膜、晶状体)	中枢神经系统	肌肉组织
胸腺(胸腺细胞)	内皮细胞(血管、血窦、淋巴管内皮细胞)	内分泌腺(包括性腺分泌细胞)	软骨和骨组织
骨髓(幼稚红细胞、白细胞、巨核细胞)	皮肤上皮(毛囊上皮细胞)	心脏	结缔组织
胃肠上皮(小肠隐窝上皮细胞)	唾液腺		
性腺(睾丸和卵巢生殖细胞)			
肝脏和肺脏组织的上皮细胞			

三、与环境有关的因素

(一) 温度

实验研究表明,机体受照射时,其内外环境中温度的变化可直接影响辐射生物学效应,称为温度效应。如在进行放射治疗之前,先提高肿瘤组织局部温度,其疗效得以明显提高。若在零度条件下,照射新生小鼠,即使用致死量(800R)X线照射,存活率仍可达到70%。温度的变动影响损伤程度的原因认为有几种可能:

1. 由于造成动物体内氧状态的改变。
2. 由于新陈代谢水平的改变。
3. 在低温或冰冻状况下,溶液中自由基的扩散受阻。

(二) 氧效应

受照射的组织、细胞或溶液系统,其辐射效应随周围介质中氧浓度的增加而增加,这种现象称为氧效应。实验发现大(小)鼠在人工缺氧或予以吸入低氧空气时进行照射,其死亡率显著降低。目前为提高肿瘤组织对辐射的敏感性,在肿瘤局部注射血管扩张剂或给患者吸入3~4个大气压的氧气,以消除肿瘤组织中的“缺氧中心”,就是利用辐射“氧效应”这一特性提高放射治疗效果。

(三) 化学物质

在溶液体系中,由于其他物质的存在而使一定剂量的辐射对溶质的损伤效应降低,称为防护效应。也就是说其他物质对该溶质起到保护作用。这些物质亦称自由基清除剂。如某些激素和化学制剂对机体起保护作用,可降低机体的辐射敏感性,这对研究提高机体对辐射耐受性的“抗放药物”有着重要的现实意义。如银耳多糖等,具有一定的抗辐射效果。另有一些化学物质,它们与射线合并应用能增加细胞的致死效应,称之为放射增敏剂。当前对放射增敏剂的研究十分活跃,但在肿瘤治疗的临床应用尚不成熟,还有许多细节问题有待解决,不少人对其发展抱有希望。

(张淑丽 谢凯)

