

放射綫生物学作用原理

徐 曉 利 等 譯

人民衛生出版社

放射綫生物学作用原理

Б. Н. 塔魯索夫 著

徐 曉 利 等 譯

华 光 校

內 容 提 要

本書着重地講述了放射綫的生物學作用原理。全書分三章，第一章是：放射綫的原發作用機制；第二章是：潛伏期的繼發反應；第三章是：進入體內的放射性物質的生物學作用特性。這是在放射綫生物學作用方面的一本比較好的參考書。

Б. Н. ТАРУСОВ

ОСНОВЫ
БИОЛОГИЧЕСКОГО
ДЕЙСТВИЯ
РАДИОАКТИВНЫХ
ИЗЛУЧЕНИЙ

МЕДГИЗ—1955—МОСКВА

放射綫生物學作用原理

開本：787×1092/32 印張：4 字數：85 千字

徐 曉 利 等 譯

人 民 衛 生 出 版 社 出 版

(北京書刊出版業營業許可證出字第〇四六號)

• 北京崇文區錢子胡同三十六號 •

人民衛生出版社
長春印刷廠 印刷 • 新華書店發行

統一書號：14048·1540

定 價：(9) 0.48 元

1958 年 6 月第 1 版—第 1 次印刷

(長春版) 印數：1—2,000

目 錄

緒言	1
放射綫和物質相互作用的某些特性	1
电离作用产生的次級射綫	10
生物学作用与射綫剂量的关系	12
第一章 放射綫的原发作用机制	22
靶的学說	22
射綫的間接作用	27
射綫的直接作用	41
第二章 潜伏期的繼发反应	47
損伤的規律性	47
原生質中的物理化学变化	67
原发性“毒素”的假說	73
第三章 进入体内的放射性物質的生物学作用特性	84
放射性物質进入机体的途徑	84
生物学作用最强的各种放射性同位素在体内的分配及其影响	98
結論	114
文献	119

緒 言

放射綫和物質相互作用的某些特性

放射綫(α -粒子、 β -粒子、 γ -射綫)穿过物质时产生电离作用,即使电子从原子脫出。 α -粒子和 β -粒子能直接引起电离,而 γ -射綫的电离作用是由于次級过程所引起。原子失去电子后成为帶正电荷的阳离子;由原子脫出来的电子被其他中性原子所捕获,就得到帶負电荷的阴离子。这样,每个电离动作都产生一离子偶。在不同物质中形成一离子偶所需的能量是不同的,平均是几十个电子伏特(эВ),例如,在空气中約需33电子伏特,在氫气中約需25电子伏特。一般說来,其中一半的能量直接消耗于使电子脫离原子,即是用來克服电子在原子中的結合力,其余的能量是用于激发原子,此时电子就由內层跳到外层去;以后当被激发的原子回复到不激发状态时,它就会放出一个或几个光子,通常是放出紫外綫的光子。

因为如此放出的紫外綫的能量小于电离所需的能量,所以紫外綫在与物质相互作用的过程中就只能引起原子和分子的激发。因此放射綫与物质相互作用时被激发的原子要比离子化的原子多兩三倍。

离子或含有离子化原子的分子都具有很高的化学活性;它們可以跟任何能被氧化或还原的分子起反应。激发了的原子和分子也具有高度化学活性,但是要比离子低些。

在任何受照射的物质中,除了电离过程外,还有可逆的复合过程,即是使离子再結合为中性原子。离子的寿命非常短,約为 10^{-6} 秒。如果在受照射的介质中没有化学活性的分子,

則由于照射所形成的离子全部都会再結合起来，在物質中也就不会发生任何的化学变化；若是其中含有化学活性的分子，則在射綫作用下就会发生化学变化。

例如，純粹的二氧化碳在放射綫作用下不起变化，如果在二氧化碳中加入少許的水銀蒸气，水銀就会与照射时形成的氧离子起反应，使二氧化碳分解，产生氧化亚汞与一氧化碳。

生物基質中存在着大量的化学活性化合物，因此在射綫作用下就发生重大的化学变化。

由于射綫的作用使复分子中发生化学鍵的断裂。使鍵断裂所需的能量常常比形成一离子偶所需的能量小得多，所以一个电离动作就有几个鍵发生断裂。通常用一个电离动作所断裂的鍵数来判断放射綫引起的化学反应的产量。平均每一个电离动作有 1.2 个化学鍵断裂；但在許多情况下这个数值可以增加到 10。

可見在放射綫作用下生物基質中发生的化学变化和生物学效应，首先决定于形成的离子偶的数目，即是决定于被吸收射綫能量的大小。因此，用表示电离效应的单位来測量射綫最为方便。測量倫琴射綫和 γ -射綫的单位就是倫琴(r)。倫琴的定义是在 1 大气压及 0°C 时，倫琴射綫或 γ -射綫使在 1 立方厘米空气 (0.001293 克) 中产生的阳离子 (或阴离子) 的总电荷等于 1 个静电单位的电量。也就是說 1 倫琴的剂量在 1cm^3 空气中形成 2.08×10^9 对离子偶，因此当射綫剂量为 1 倫琴时，每 1cm^3 空气所吸收的能量等于 0.11 尔格，而每 1 克空气吸收的能量等于 83 尔格。

軟組織的有效原子序数与空气的有效原子序数相接近，所以 1 克組織吸收的射綫能量大約是 85 尔格 (在 1cm^3 組織中形成 1.6×10^{12} 对离子偶)。

倫琴作為射線的劑量單位原來是用于倫琴射線和 γ -射線的；但是後來也把它用在 α -射線和 β -射線。如果 α -射線或 β -射線在 1cm^3 空氣中形成 2.08×10^9 對離子偶時，就認為它們的劑量等於1倫琴。

已經肯定，生物效應不僅與被吸收的能的量有關。如所周知，當用同樣劑量的 α -、 β -和 γ -射線來照射時，它們所引起的生物學作用， α -射線要比 β -和 γ -射線強10—20倍。 β -射線和 γ -射線的生物學效應則大致相等。生物學效應的差異決定於電離密度，即決定於單位路程上形成離子偶的數目。

α -粒 子

α -粒子是氦核。它有2個單位正電荷；它的质量大約是電子的7000倍。 α -粒子的射程在空氣中可以达到11厘米；在組織中大約是几十个微米①。

表1列出了某些放射性元素的 α -粒子的能量以及它們在空氣和組織中的射程。

表1 α -粒子在空氣和組織中的射程

元 素	半 衰 期	粒子的能量 (MeV 百万电子 伏特)	空氣中的射程 (cm)	組織中的射程 (μ)
鈾 ²¹⁰	138 日	5.3	4.6	60
鐳 ²²⁶	1622 年	4.8	4.0	52
氡 ²²²	3.8 日	5.5	4.8	62.5
釷 ²³²	$1.4 \cdot 10^{10}$ 年	3.9	3	41.5
錒 ²³⁰	$4.5 \cdot 10^9$ 年	4.15	3.5	45.5
釷 ²³⁰	$2.4 \cdot 10^4$ 年	5.15	4.4	57

① 从某一种放射性元素的核放射出來的 α -粒子，大多數具有相同的能量。

α -粒子在穿过物质时，沿途都引起电离作用。电离密度（比电离度）——即单位路程上所形成的离子偶的数目——是很大的；并且粒子的能量越小，电离密度就越大。 α -粒子穿过物质前进时，它的能量逐渐地减少，因而沿着 α -粒子射程上的电离密度也就逐渐地增大。图1是沿 α -粒子射程上电离密度的变化。

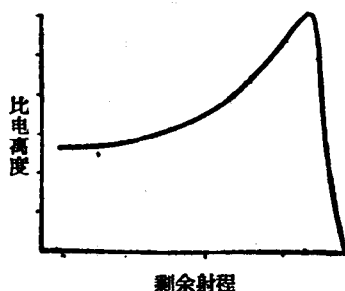


图1 沿 α -粒子射程的比电离度(单位路程中形成的离子偶数)的变化

表2是能量不同的 α -粒子的电离密度。

表2 各种能量的 α -粒子的电离密度

元 素	粒 子 的 能 量 (MeV)	每 1mm 路程 损 失 的 能 量 (keV)	空气中的电离密度， 即在1mm路程中 形成的离子偶数目
钋 ²¹⁰	5.3	90	2510
氦 ²²²	5.5	88	2500
镭A	5.99	82	2350

α -粒子在物质中的弹道是直线的。所生成的离子分布在以 α -粒子的行踪为轴心的狭窄圆柱内，圆柱的直径大约是

0.1 微米。許多情況下脫出的電子也能在圓柱外引起電離，但是它的電離密度要比圓柱內的小得多。由此可見，主要的化學變化是在沿着 α -粒子的行踪而造成電離密度較大的圓柱內發生的。因為 α -粒子所造成的電離密度比 β -與 γ -射綫的大得多，所以 α -粒子與相同劑量的 β -和 γ -射綫比起來，它所引起的化學變化更加顯著，每一離子偶所斷裂的化學鍵也要多得多。例如用 α -粒子照射蒸餾水時，水會分解為氧和氫；這時每吸收 100 電子伏特的能量就形成 2 個分子的氫。而在吸收 β -與 γ -射綫同樣劑量的能量時，實際上氫不能被檢查出來。

前面說過， α -粒子射程的末段電離密度會增加，所以被 α -粒子穿過的細胞的損傷率通常在射程末段要比射程起點大兩倍。

由於 α -粒子的射程不長，同時很大的電離密度僅僅集中

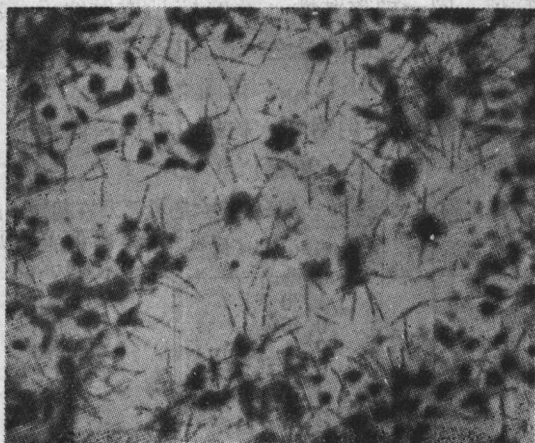


圖 2 接受鈾²¹⁰的 α -粒子照射的腎組織的組織自動放射攝影。在照片上明顯地看到許多短的 α -粒子的行踪

在粒子的行踪上，所以即使在致死剂量下，产生电离的范围（直接受损害的范围）也是很小的。

这一点可以从肾组织切片的组织自动放射摄影（图2）看出来。必须注意照片中显示的 α -粒子射程的行踪仅是 α -粒子在组织中射程的一半，因为感光乳胶的密度约比组织的大一倍。不过在 α -粒子造成电离的小范围中形成的化学分解产物，也可以由扩散而透入其余的区域中去。

β -粒子

β -粒子是电子流或正电子流[9]。 β -蜕变与 α -蜕变不同，在 α -蜕变时放射性元素发射出的 α -粒子具有相等的能量，而在 β -蜕变时同一种元素的各个原子所发射出的 β -粒子的能量却有从零起到某一最大值的一切可能性。 β -粒子十分固定的最大能量值(E_{max})是每一种放射性元素的 β -射线谱的特征。同一种放射性元素的核所发射的 β -粒子的平均能量等于最大能量的三分之一，而各种同位素的平均能量是在 $0.25 E_{\text{max}} - 0.45 E_{\text{max}}$ 范围之内。

在物体中 β -粒子的射程大约比具有同样能量的 α -粒子的射程大100—200倍。（表3）

表3 某些放射性元素的 β -粒子的最大能量值及在组织中的射程

元 素	E最大值百万电子伏	组织中的最大射程 (mm)
磷 ³²	1.70	8.0
铁 ⁵⁹	0.46	1.5
磷 ³⁰	0.61	2.0
碳 ¹⁴	0.155	0.24
硫 ³⁵	0.167	0.28
钇 ⁹⁰	2.18	11.0
铯 ⁸⁹	1.50	7.0
铯 ⁹⁰	0.61	2.0
铯 ¹³⁷	0.55	1.7

β -粒子造成的比电离度要比 α -粒子造成的小很多。表4是不同能量的电子的比电离度及其在组织和空气中的射程。

表4 不同能量的电子的比电离度和射程

粒子的能量 千电子伏特 (KDB)	空气中1微米路程 上形成离子偶的量	组织中的射程 (μ)	空气中的射程 (cm)
0.1	1697	0.002	0.00023
0.50	420	0.020	0.0155
1.0	200	0.053	0.041
10.5	29	2.5	0.2
50	20	42.7	3.3
100	13	141	10.9
200	8.6	450	34.8
500	0.0063	1920	150
1000	0.0063	4900	380

从表4可以看出，电子和 α -粒子一样，它的比电离度也是随着能量的减少而增加(图3)。

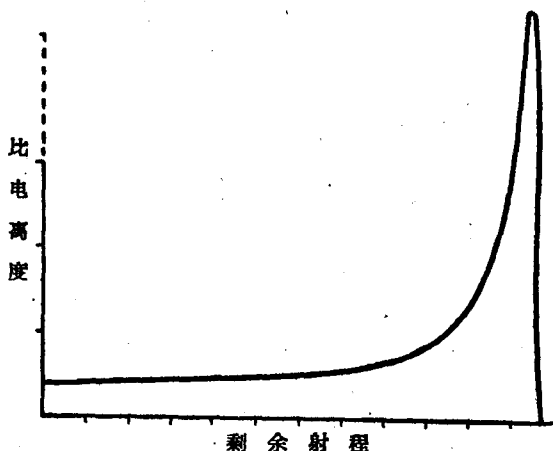


图3 β -粒子射程上比电离度(单位路程上形成离子偶的数目)的变化

β -粒子的行踪上电离密度的相对变化要比 α -粒子的大(几十倍到几百倍),因此 β -粒子射程末段的生物学效应相对地也比 α -粒子的大。

β -粒子在感光乳胶和组织中的行踪都是些断断续续的点迹,电离作用就在这些地方发生;在每一点上由于次级过程所引起的离子偶一般不是1对而是3—4对(图4)。这些离子群相互间的距离平均是1微米。因而 β -粒子引起的化学变化不象 α -粒子那样发生在全部的行踪上。由于 β -射线谱是连续的, β -粒子流的强度将随着穿过物体前进而逐渐地减低,因为能量较小的粒子被吸收得快一些,所以射线束中 β -粒子的数量将逐渐地减少,直到全部粒子完全丧失它的能量为止。

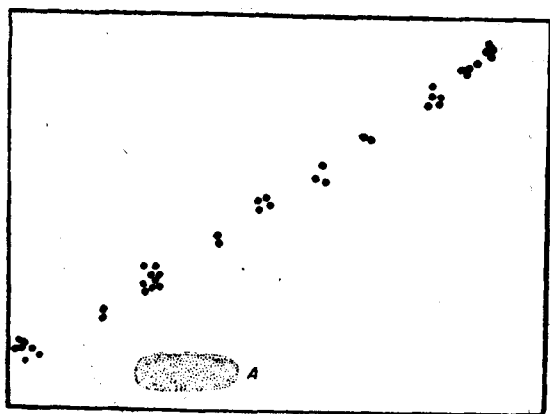


图4 能量为1百万电子伏的 β -粒子在感光乳膠中的行踪

A-大腸杆菌的大小

图5是 β -粒子流穿过物质前进中强度相对变化的定性曲线。

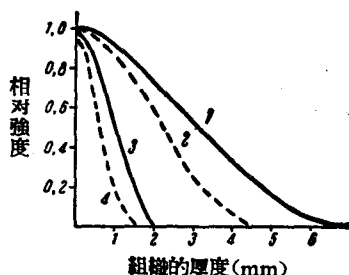


图5 经过软組織时鐳⁸⁹(曲綫1)和鐳⁹⁰(曲綫3)的 β -粒子流强度的相对变化以及经过骨組織时鐳⁸⁹(曲綫2)和鐳⁹⁰(曲綫4)的 β -粒子流强度的相对变化

表5 是鐳制剂发射的 β -粒子束在組織的不同深度中造成的相对剂量。

表5 鐳的 β -粒子束在組織的不同深度中造成的相对剂量

組織深度, mm	0	0.5	1	2	3	4	5	10	20
相对剂量, %	100	61	45	26	15.7	1.0	0.62	0.36	0.34

γ -射 綫

γ -射綫是光子流(或量子流)。它的本质与光綫或倫琴射綫相类似。 γ -射綫是貫穿能力最强的射綫。图6是 Co^{60} 的 γ -射綫流($E_\gamma=1.25$ 百万电子伏特, $M\alpha B$)穿过水前进而发生的强度变化曲綫。 γ -射綫流是按照指数律减弱的。

γ -射綫流强度的减弱是由于光电吸收, 不相干散射及离子偶的形成等过程。这些过程中全都有次级电子产生, 电离

作用就是由这些次级电子所引起的。

因为 γ -射线穿过物质前进时所发生的电离作用是由电子造成的, 因此当引起电离作用的剂量相等时, γ -射线与 β -粒子作用于生物体时将引起相同的生物学效应。

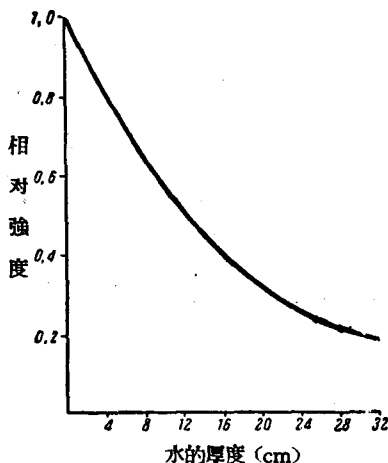


图6 穿过水时 Co^{60} 的 γ -射线强度的相对变化

电离作用产生的次级射线

当射线作用于物质时, 除了形成次级电子外, 由于原子或分子从激发状态过渡到非激发状态, 还发射出长波射线。曾经设想这应当是波长为 $1700-1800 \text{ \AA}$ 的紫外线。就生物组织进行的计算结果得出, 放射线的能量近 30% 是以短波紫外线形式放出来的。有人认为与生物学作用有关的光化学效应就是由于这种射线所引起。为了研究这个现象, Richards 曾经用钋的 α -粒子照射放在石英板上的一薄层水, 石英板下

放着盛有溴化鈉溶液、氯代乙酸溶液或硫酸亞鐵銨的小器皿(圖7)。Richards 与 Dee 兩人[44]发现这些化合物經過十一天的照射后就分解。此时的反应强度是用同样的 α -射线源直接照射这些化合物时的反应强度的 4--5 %。曾經有人企图解釋这次級射綫的光譜。当以倫琴射綫照射水和各种固体物体时,次級射綫的波长是 2300—5000 Å。并且最大强度是在可見光部分(圖8)[44]。

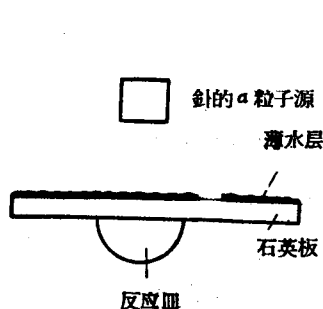


图7 Richards 实验图解

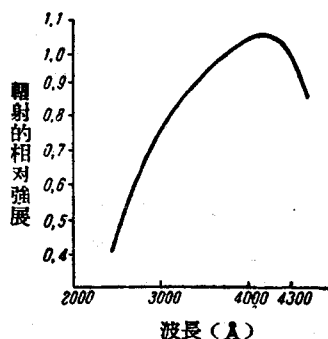


图8 被倫琴射綫照射过的水的輻射的光譜

用 α -粒子和倫琴射綫照射各种物質的薄层(包括去氧核糖核酸)时,确定次級射綫的波长等于 2300—4700 Å。根据計算所推測的短波紫外綫倒沒能发现,因为它們被强烈地吸收掉。但是放出长波輻射綫来就証明物質中能量的进一步轉換。

曾經設想在生物系統中由于放射綫的作用可以产生螢光,这种設想是有根据的。

在許多情況下,由于电离动作而釋放出来的电子能够把它本身的能量(不引起电离作用)轉給介質中别的分子,即

是說，能够把能量从溶媒直接轉給巨分子的蛋白質和类脂質[3]。在實驗中可观察到这种效应。例如在电离放射作用时，水和其它的溶媒放出来的可見光不超过所吸收能量的0.01%，但是在溶液中注入一些本身不放螢光的有机化合物，可見光就增加到3% [117]。根据对各种高分子聚合物所进行的研究結果，可以設想当介質中存在巨分子的生物基質时，所吸收的放射綫能量，能从原来吸收射綫的地方轉移一些距离到化鍵的稳定性較小的地方。这种机制能够解釋在生物基質中沒有直接产生电离作用的地方所发生的生物学效应，例如在 α -粒子的圓柱以外的地方。

生物学作用与射綫剂量的关系

被机体吸收的放射綫能量在足够引起显著的生物学效应时，要比其他形式的射綫（热与可見光）少得很多。放射綫的致死剂量对哺乳动物來說，約为300—600倫琴，这相当于每克組織吸收 2.6×10^4 — 5.3×10^4 尔格的能量，这能量只能使組織的溫度总共升高 0.002°C 。如果要以热輻射作用引起机体死亡，那么所吸收的能量就应当大1万—10万倍[113]。

即使是用放射綫的致死剂量，它所引起的化学效应也是不显著的。如所周知，当射綫剂量等于1倫琴时，在1克水中产生 1.6×10^{12} 对离子偶^①，因此，在最适宜的条件下（即不考虑复合作用），化学鍵发生断裂的分子数最多也只能等于 1.6×10^{12} 。既然1克水中含有 3.35×10^{22} 个分子，那么在以100倫琴的剂量照射时，其中发生化学变化的分子大約只占 $2 \times 10^{-9}\%$ 。在射綫作用沒有展开鏈鎖反应的条件下，即使用

^① 因为水和軟組織的密度大致相等，所以在每1克組織中也产生同样数目的离子偶。

可以引起明显的生物学效应的照射剂量，也不能发现化学变化的产物，因为这些产物的数量少到无法用分析的方法来加以研究。

生物体所吸收的射线能量远不是全部都消耗在引起射线损伤的化学变化上；部分能量消耗在其它的过程上。此外，也远不是每一个电离动作都能引起分子的分解。因此，在照射时形成的产物，它的数量将会更少。可是等于致死量百分之一的剂量也能引起显著的生物学作用。根据统计材料已经确定，人类对 γ -射线每昼夜最高容许剂量是0.05伦琴，而 α -射线是0.005—0.002伦琴。

以最高容许剂量甚至以比它更大的剂量去照射无机化合物和有机化合物时，都没有发现任何化学的或物理化学的变化。通常要以几万到几百万伦琴的大剂量照射，才能得到可以察觉到的效应。

就各种有机体所进行的定量研究看来，所吸收的能量只有极小部分是具有生物学活性的。与一般的化学反应不同，作为活体的特征是吸收能量的多少与生物学作用间不存在比例关系。

在原生动物和植物中进行大量的研究证明，所吸收的各种放射线的能量与死亡率间存在着函数关系，可用指数曲线^①或S形曲线来表示(图9)[69]。文献中常常引用相反的曲线，它是用仍然活着的机体的相对数与照射剂量间的关系来表示的(图10)。图9的曲线是用各种剂量照射细菌、病毒、霉菌、原生动物和植物得到的[111, 69]。从这些曲线知道，随着射线剂量的减少，遭受损伤的机体的数目也减少；可是在最

① 图9中的曲线1并不是指数曲线；它所以叫做指数曲线，是因为与它相对应的生存率曲线是指数曲线。