

# 放射生物学基础

Z. M. 巴克 P. 阿历山德尔

科学出版社

# 放射生物学基础

Z. M. 巴克 P. 阿历山德尔 著

沈淑敏 刘 永 吴 蔚 湯仲明  
刘 蓉 李元敏 陈去恶 程 违 譯

科学出版社

1965

Z. M. Bacq and P. Alexander  
Fundamentals of Radiobiology  
Second Edition  
Pergamon Press, 1961

### 內 容 簡 介

本书对放射生物学在近代的进展状况，作了系统的综合的介绍。作者从物理化学和医学的角度，对于放射生物学中正在迅速发展的某些重要领域，在基础理论和实验成果方面进行了详细的讨论。

全书除前言后记外，共分二十一章，对于辐射损伤的阶梯式发展、电离辐射与物质的相互作用以及对有机体的物理化学性状的影响、电离辐射导致有机体的细胞学与遗传学上的变化，以及生理病理上的生化活动、有机体对辐射的敏感性、辐射所引起的辐射病及治疗、对于各种辐射的化学防护与物理防护等，均作了扼要的叙述。

本书可供生物学、生物物理学、生物化学、生理学及医学工作者参考。

### 放 射 生 物 学 基 础

[比] Z. M. 巴克 [英] P. 阿历山德尔著

沈淑敏等译

\*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街117号

北京市书刊出版业营业许可证出字第061号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1965年1月第一版 开本：787×1092 1/18

1965年1月第一次印刷 印张：22 1/3

精装：0001—2,400 插页：3

平装：0001—2,000 字数：513,000

统一书号：13031·2012

本社书号：3092·13-4

定价：「科七」 精装本 3.80 元  
平装本 3.20 元

## 前 言

放射生物学具有如此众多方面的兴趣，以致可以将它比作一只昆虫的眼睛，整个图象的构成是由各个小眼面综合而成的。目前已由熟識各种技术并善于自不同的观点来考察辐射效应的科学家，从核物理学家直到负责保护接触辐射的人们或治疗受到照射的患者的医生，組成了一支庞大的队伍。相互間的了解比以前更普遍了：遗传学家在今天与生物学家紧密地联系起来；解剖学家与生理学家之間再也不隔着高墙；放射化学家所工作的领域常和微生物学家或病毒学家相同。辐射的研究已把原来沒有机会接触的科学家集合在一起，因而避免了他們由于过分专门的兴趣和技术而产生的弊害。

本书系两个受到两种絕然不同的训练的人——一个物理化学家和一个有些医学知識的生物学家——第二次企图提出一个放射生物学的完整图象的尝试。我們的理由是：(1)尽管在1955年的初版书中有很多缺点，但似乎它已滿足了很大的需求(它被翻譯成三种其它文字)，并已帮助了很多青年人进入放射生物学的领域；(2)自1953年以来我們的愉快合作从未中断过，而且我們的兴趣也已越发稳固而紧密地結合了起来。

在本书中我們已把第一版完全改写，并由很多方面(除第一章之外)来看，这全然是一本与前不同的新书。已添加了若干新的篇章，并将一些材料做了不同的区分。然而总起来看，表现的方法基本上仍与在第一版中所总结的目的相同，这就是：

“我們不打算給各个問題的专家提供一篇評論，而是想完整而互相連貫地叙述这个問題。我們希望这一尝试也对放射治疗学家有用。他們很多年来在缺乏适当的化学和生物学基础的情况下，于治疗癌肿方面成功地使用了电离辐射这一强有力的工具。目前这一情况已得到改善，可能不久将来放射治疗将較少地只凭經驗而已。

“本书系一概括性的叙述而不是一种专刊。我們由大量已发表的材料中挑选出一些研究資料，而不打算提出一个文献的詳細評論。我們也曾慎重地挑选了放射生物学的某些方面加以特別的強調，因为我們感觉到在这些领域中的发展最有可能推动放射生物学的发展。任何一种挑选都不可能是公平的；但如果我們不适当地扩大了我們自己的研究和我們熟知的題材范围的話，我們已經盡量詳盡地提供了相反的观点。我們毫不犹豫地指出根据我們的意見哪些是目前最易于被接受的假說；这样做是为了引入相联系的观念，而不是意味着对某一观点所持的頑固态度。同时我們也完全理解，新的实验資料可能会改变已有的解释。”

在第一版問世以后的过去五年中，放射生物学领域中发表文献的速度有了大大的增高。例如在1955—1960年間所发表的文章約和1945—1955年所发表的相等，这可能已是一个打折扣的估計；因而我們必須在所包括的題材中进一步加以挑选。为了避免材料过于庞大，不得不删掉某些題材的討論（例如关于应激现象），讀者可在第一版中找到詳細的叙述。其它方面（例如水体系的輻射化学）討論得比以前更为扼要些，因为关于該問題的矛盾和混乱認識已得到了解决和澄清。同事們和朋友們給予了宝贵的帮助，謹致以最大的謝意\*。

（李元敏譯，吳蔚校）

---

\* 下面略去感謝具体人的叙述——譯者。

# 目 录

前言 .....	iii
引言 輻射損伤的阶梯式发展 .....	1
代謝在损伤的发展中所起的主要作用 .....	3
参考文献 .....	4
第一章 电离輻射与物质的相互作用 .....	5
各种輻射的比較 .....	5
X輻射和 $\gamma$ 輻射能量丢失的机制 .....	9
粒子輻射的能量丢失 .....	14
輻射剂量和放射性的单位 .....	15
剂量的測量 .....	17
电离密度 .....	20
电离輻射所造成的激发 .....	30
参考文献 .....	32
第二章 生物学体系中的直接和間接作用 .....	34
鉴别直接和間接作用的方法 .....	35
离体照射直接和間接作用的相对效率 .....	41
細胞中直接和間接作用的相对效率 .....	43
参考文献 .....	44
第三章 化学和生物学体系中的剂量关系曲綫 .....	46
$D_{37}$ 剂量和“单击”的概念 .....	46
“多击”效应 .....	48
閾值——哺乳类动物的放射生物学問題之一 .....	50
参考文献 .....	52
第四章 細胞放射生物学中原初化学損伤的本质 .....	53
靶学說 .....	54
靶学說在体内輻射效应中的应用 .....	57
不同电离輻射的相对生物学效应 .....	62
毒素学說 .....	66
結論 .....	67
参考文献 .....	68
第五章 輻射化学概論 .....	69
激发的作用 .....	70
在气相中的反应与在液相及固相中反应的差別 .....	74
防护与能量传递 .....	76

产生自由基的经历 .....	79
参考文献 .....	83
<b>第六章 水溶液体系的辐射化学 .....</b>	<b>85</b>
绪论 .....	85
发展史 .....	85
水射解的初级产物 .....	86
定量的关系 .....	92
自由基的反应 .....	95
水中溶解有机物质的反应 .....	102
参考文献 .....	107
<b>第七章 辐射对大分子的影响 .....</b>	<b>110</b>
合成聚合物中由间接作用引起的辐射效应 .....	112
合成聚合物中由直接作用引起的辐射效应 .....	116
聚合物的防护 .....	124
蛋白质中由于直接作用产生的物理和化学变化 .....	127
蛋白质中由于间接作用产生的物理和化学变化 .....	132
去氧核糖核酸的交联和降解 .....	137
活体照射后 DNA 发生的变化 .....	147
多糖类发生的变化 .....	147
辐射作为分析工具的用途 .....	148
参考文献 .....	151
<b>第八章 摹拟电离辐射生物学效应的化合物 .....</b>	<b>155</b>
生物烷化剂的化学性质 .....	157
辐射和烷化剂所引起的生物学效应的比较研究 .....	159
烷化剂的作用机制 .....	164
过氧化物和高浓度氧的拟辐射性质 .....	168
参考文献 .....	169
<b>第九章 在细胞水平上的效应 .....</b>	<b>172</b>
绪论 .....	172
有丝分裂 .....	173
减数分裂 .....	174
复杂有机体中的有丝分裂 .....	175
可逆的细胞损伤和有丝分裂的延缓 .....	176
细胞死亡 .....	178
染色体的“断裂” .....	182
电离辐射的遗传效应 .....	186
参考文献 .....	190
<b>第十章 细胞效应的生物化学机制——酶释放的假说 .....</b>	<b>192</b>
细胞核与细胞质 .....	192

染色体的“断裂”	196
能量供应的间断	198
酶释放的假说	199
参考文献	203
第十一章 放射生物学中的氧效应	206
当氧作用的时候	207
所需的氧浓度	208
哺乳类动物中的氧效应	210
氧效应在辐射治疗中的应用	212
作用机制	214
参考文献	217
第十二章 活有机体的比辐射敏感性	219
参考文献	226
第十三章 受照射的活有机体的病理生物化学	228
氧消耗	228
照射后碳水化合物的代谢	229
脂肪代谢的失调	232
蛋白质代谢	236
电解质浓度的改变	240
氢硫基酶和蛋白质	241
照射后酶活性和合成活性的增高	243
分离酶体系在活体内受到的抑制	253
核酸的生物合成	254
引起去氧核糖核酸和核糖核酸生物合成减弱的机制	257
核酸酶	260
总结	262
参考文献	263
第十四章 照射后的恢复过程	271
遗传性损伤及生殖能力的恢复	272
生理性损伤的恢复	275
哺乳类动物的修复	276
参考文献	280
第十五章 辐射病中的神经内分泌反应	283
应激反应和适应症候群	283
电离辐射的作用相同于“应激反应”吗?	284
在事实与解释上的困难	287
第一次和第二次反应	288
参考文献	293
第十六章 哺乳类动物辐射病的病理生理学	296



超急性症候群	296
輻射病的第一阶段	296
透性的改变	302
血液改变	304
急性輻射病的第二期	307
参考文献	313
<b>第十七章 延緩效应</b>	<b>318</b>
寿命的縮短	318
癌和白血病的誘发	322
对胚胎的损伤	325
其他的晚期效应	326
参考文献	327
<b>第十八章 照射后細胞和組織間的相互作用</b>	<b>329</b>
参考文献	332
<b>第十九章 抵抗X射綫和<math>\gamma</math>射綫的化学防护作用</b>	<b>333</b>
技术	333
防护物质	334
輻射防护的作用机制	339
半胱胺和氢硫基防护剂	344
組胺、腎上腺素、5-羥基色胺	349
某些加强X射綫效应的物质	350
参考文献	351
<b>第二十章 骨髓和脾細胞疗法</b>	<b>355</b>
脾、肝、骨及其他器官的物理防护	355
照射后注射脾勻浆或骨髓	356
受照射动物体内的細胞移植	357
参考文献	361
<b>第二十一章 人类的經驗</b>	<b>363</b>
世界人群的輻射来源及其重要性	363
天然及人为本底輻射所能造成的生物学效应	369
人类的急性輻射症候群	371
治疗方面的应用	374
参考文献	375
<b>后記 放射生物学在世界上的任务</b>	<b>377</b>
<b>索引</b>	<b>379</b>

# 引言 輻射損傷的階梯式發展

由于人們企圖了解從吸收能量開始到死亡或最終損傷的每一步驟，使得放射生物學已成為一門極為龐雜的科學。所附的圖解(圖1)總結了目前我們所知道各種變化發生的順序，本書中材料的組織也基本上按照圖解中所示的分類。每一類型的電離輻射(不管是來自內照射源或外照射源)都是一種能的形式；它必須被生物或非生物體系吸收後才能發生作用。故而各種類型電離輻射被吸收的途徑是起作用的第 一步。這個原初物理過程所依據的法則已得到極精確的闡明。在這一領域中的知識對放射生物學來講是已極為足夠了，輻射物理學的進一步發展不會對我們討論的題

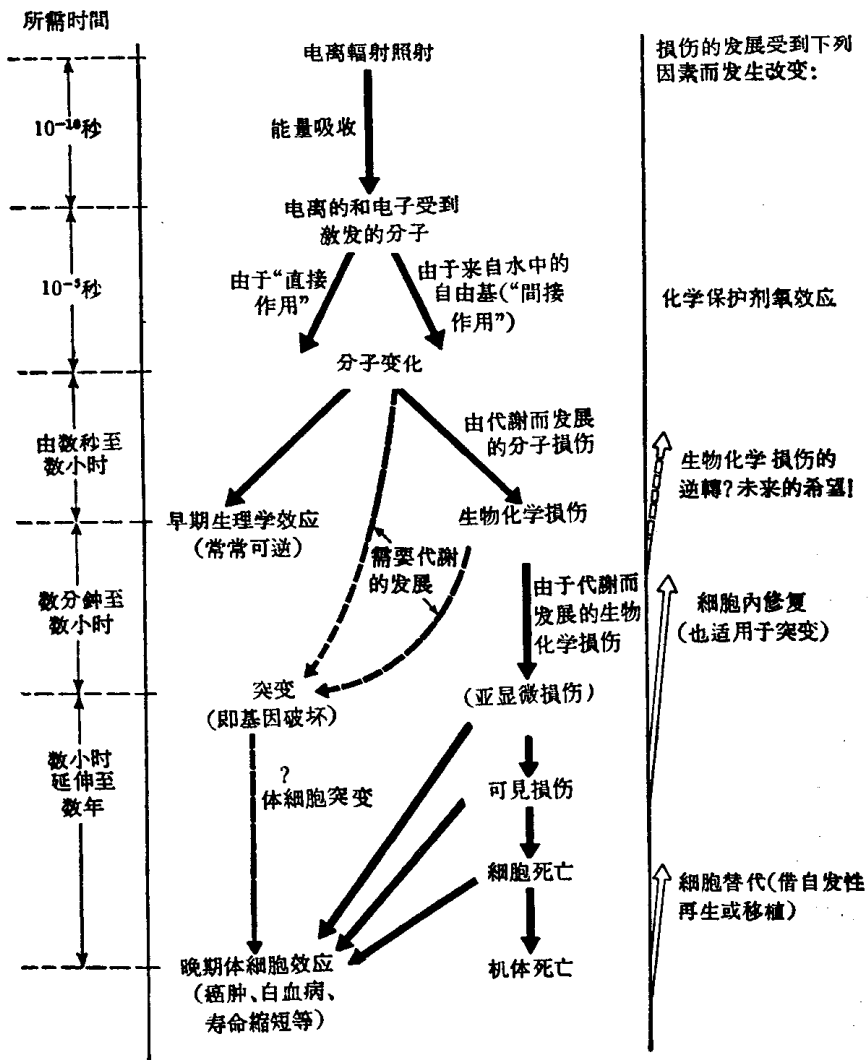


圖 1

目有很大的影响。

被吸收的能量引起分子水平的变化。大多数细胞的组成成分，包括大分子(例如去氧核糖核酸或酶)和小分子(象 ATP 或辅酶)在内都被辐射所改变。研究干燥的有机分子，水分子，和小分子及大分子的水溶液(在存在或不存在氧时)的辐射效应，在了解最早期的变化方面是必需的。放射化学家曾叙述过在活有机体内不能截然分开的两个机制：(1)直接作用(在吸收能量的分子中所发生的破坏)；(2)间接作用(在水中形成的具有高度反应性的自由基与细胞组成成分发生反应)。在 1940 年以前曾被忽略的化学环境的重要性目前已被每个放射生物学家所承认，虽然把用非生物的模式(例如聚合物的水溶液)所得到的结果外推到生活机体时仍是冒险性的。氧与化学防护剂参与这个分子阶段的变化。这些因素必须在照射的当时存在，因为主要的化学变化发生在辐射照射时的数微秒之内。

于最近五年中在辐射化学方面有了很大的进展，且正在建立一门关于有机物质受到照射时所发生的化学变化的学科。此种知识虽然有用，然而它本身并不能帮助我们了解引发一系列生物学改变的重要分子损伤的本质。我们几乎不知道所发生的很多反应中哪些是重要的而哪些是无关紧要的，这是放射生物学研究中最重要的一领域之一。

读者将发现很多在照射时所发生的效应(例如对生长、对电活性和对透性的效应)常常会很快地恢复。这些效应可称为生理性的，因为它们不造成永久性的损伤。然而当观察一个受到致死辐射剂量照射的细胞时，在照射的数分钟内不论用生物化学、组织学或细胞学的方法都不能发现有损伤。一只受到数千伦琴 X 射线照射的小鼠即使将于 4 日内死亡，亦不能在照射后的即刻找到可察觉出来的损伤。但生物化学损伤(采用 Sir Rudolph Peter 的概念)在照射后不久即已产生；它们将或迟或早地首先表现为在显微镜下解剖学可见的损伤，以后又表现为肉眼可见的损伤(临床效应)；它们常与生理学的障碍(神经内分泌的改变、腹泻、烧伤、感染、不育等)自然地相吻合。代谢(即能量消耗)旺盛时则损伤发生得较早。

多细胞机体的死亡常是由于细胞停止生长(造血组织、肠上皮)、代谢障碍(水和离子交换)、呼吸道的机械损伤或微生物的入侵所造成的一种或数种重要功能的急性衰竭所致。若损伤的细胞能得到恢复，或细胞再生开始得较早，或在某些情况下，从其类似的机体移植正常细胞时，则机体可免于死亡。

因而在哺乳动物放射生物学中，存在着很多必须在细胞水平加以解决的问题；用单细胞生物象细菌、酵母细胞或在组织培养中用哺乳类动物离体细胞所进行的研究，已提供了大量帮助我们了解在多细胞机体内所发生的变化们的知识。差示离心分离、放射自显影和电子显微镜等现代技术还远没有充分加以利用，不久将来可望得到很多惊人的精确知识来弥补分子变化和细胞变化之间的空白。

突变(基因突变或体细胞突变)必须被认为是一种特殊类型的生物化学损伤，在本质上它仅能表现在机体的后代或分裂后的子细胞中；有人提出某些染色体内的改

變也與一定的基因改變相符合。因而遺傳學和現代細胞學在放射生物學中起着重要的作用。\*

### 代謝在損伤的發展中所起的主要作用

我們的知識大都是關於各種損傷的本質的，而幾乎完全忽略了導致由損傷的一個水平發展到另一個水平的過程。正常的代謝過程似乎決定着由分子水平向解剖學水平的發展。

當代的研究工作者易於忘却 P. Ancel 和 P. Vintemberger 早在 1925 年關於代謝的作用所做的卓越敘述<sup>[1]</sup>。他們把一只未孵化的雞卵放在冰箱中 24 小時，使之受到 X 射線的照射，然後再放入冰箱中；三天後沒有看到損傷。然而，若一只受照射的卵於照射後三天孵化時則發現有很多損傷。把照射所引起的損傷顯示出來的因素是細胞活性。Ancel 和 Vintenberg 懷疑用直接的組織學檢查來探查細胞的輻射敏感性差別的价值。他們做出了至今仍有意义的預言性結論：“必須明確地區別三個主要之點：(1)輻射損傷；(2)使損傷表現出來的因素；(3)治療因素。不要忘記，顯微鏡所揭示的損傷乃是這些因素的綜合，有時甚至是它們之間互相拮抗的結果。”用生物化學方法描述損傷的唯一必要性是把这些三十五年前已做出的結論用現代的觀念來加以述說。

受照射細胞的能量貯備限制早已為 Vintenberg 在 1903 年提到過<sup>[2]</sup>。他寫道：“一個受照射細胞的成活期限與其照射後的活性成反比。”在照射過的肌肉一直未受到刺激時，或把照射過的兩栖類動物或卵保持在低溫時，是觀察不到什麼變化的。只有在肌肉受到刺激、蛙或卵所處環境溫度升高後，換言之即必須使代謝和氧消耗增加才能使特征性的損傷出現。Gray 的結論<sup>[3]</sup>：“代謝在所研究的細胞核結構成分之損傷的發展中起着主要的作用。”這與 R. A. Peters 關於生物化學損傷所下的定義以及我們在放射生物學範圍內所發展的看法完全一致。Duryee<sup>[4]</sup>所得到的結果不僅與由最近關於抗輻射防護劑的工作所得出的一般概念相符合，而且與細胞生理學家不能僅僅用輻射對細胞核和染色體的作用來解釋細胞核的損傷的事實相符合。

代謝率越高，則異常代謝物的形成也越快<sup>[4]</sup>，少量貯存的化學能也散逸得越快。

生物化學損傷的觀念能夠解釋一系列與在橫紋肌中所觀察到的延遲效應（見 198 頁）相類似的實驗。若將在 23°C 受到 3000—6000 倫琴照射的蛙冷卻至 5°C<sup>[5,6]</sup>，則 80—90% 的動物將在照射後活存 3—4 個月以上；而保持在 23°C 的對照動物則在 3—6 周內死亡。在受到冷卻的動物中損傷是潛在的，若於 60—130 日後將它們置於溫暖環境中時便會死亡。如果將兩栖類動物保持在 5°C，在動物受到 3000—5000 倫琴全身照射後 12 天，由卵巢取出的卵看不到有何損傷；但若在照射 3000 倫琴後將動物保持在 22°C 時，則所有卵都要受到影響。如果把降溫並照射過的卵置於溫暖環境中的話，損傷便出現得很快。

\* 下面略去兩段——校者注。

Lamarque 和 Gros<sup>[7]</sup> 照射家蚕 (*Bombyx mori*) 的卵并将其保持在低温, 当六个月后将其置于温暖的环境中时发现仅有极少数的损伤得到了修复。

相似地, 冬眠的哺乳类动物如松鼠或土拨鼠于受到照射并保持在冬眠状态时是辐射敏感性极小的。若在照射后 2—4 周置于温暖的环境中时, 则动物表现出与非冬眠的动物受到 X 射线照射时相同的反应, 而约在以致死剂量照射后十日中死亡<sup>[8,9]</sup>。

保持在各种温度(25—3°C 之间)的鲫鱼 (*Carassius carassius*) 在受到 1800 伦琴 (= LD<sub>50</sub>, 35 天, 在 18°C) 照射后, 在低温时成活期限较长, 似乎与氧消耗的减少有关<sup>[10]</sup>(即成活期限与代谢率成反比)。

豆苗可在 1—2°C 保存数周后回复到 19°C 时大致均以正常的速度生长<sup>[11]</sup>。照射过的并保存在 1—2°C 的豆苗于回复到 19°C 时所表现的生长速度的减低与正常的辐射效应相差无几<sup>[11]</sup>。潜在辐射损伤仍存在, 处在低温时并无减少(亦见参考文献<sup>[5]</sup>)。

(李元敏译, 吴蔚校)

### 参 考 文 献

- [1] Ancel, P. and Vintemberger, P., *C. R. Soc. Biol., Paris*, 1925, **92**, 517.
- [2] Vintemberger, P., *Arch. Anat., Strasbourg*, 1930-31, **12**, 299-464.
- [3] Gray, L. H., in *Progress in Biophysics* (Edited by J. A. V. Butler and J. T. Randall), 1951, **2**, 240, Pergamon Press, London and New York.
- [4] Duryee, W. R., *J. Natl. Cancer Inst.*, 1949, **10**, 735.
- [5] Patt, H. M. and Swift, M. N., *Am. J. Physiol.*, 1948, **155**, 388.
- [6] Patt, H. M., Swift, M. N. and Tyree, E. B., *Federation Proc.*, 1948, **7**, 90.
- [7] Lamarque, J. P. and Gros, C., *Brit. J. Radiol.*, 1945, **18**, 293 and *Seventh International Congress of Radiology*, Copenhagen, 1953.
- [8] Smith, F. and Grenan, M. M., *Science*, 1951, **113**, 686.
- [9] Doull, J., Petersen, D. F. and Dubois, K. P., *Federation Proc.*, 1952, **11**, 340.
- [10] Keiling, R., Bloch, J. and Vilain, J. P., *Annales Radiol.*, 1958, **1**, 381.
- [11] Neary, G. J., *Nature*, 1957, **180**, 248.

# 第一章 电离辐射与物质的相互作用

## 各种辐射的比较

在本书中我们将涉及到波长极短的电磁辐射，X射线和 $\gamma$ 射线，以及微粒辐射，特别是电子( $\beta$ 射线)、氦原子核( $\alpha$ 射线)、质子和中子。前者与紫外线或可见光的性质相同，但其波长要短得多，且其量子的能量<sup>1)</sup>比光线的量子能量大到 $10^4$ 以上的等级，因而实际上它与紫外线没有相似之处。光波(红外线、可见光与紫外线)的吸收一般地依赖于吸收体的分子结构，而仅间接地依赖于后者的原子组成。

另一方面，X射线和 $\gamma$ 射线的能量几乎全部都被它们所通过的物质中击出的电子吸收掉，并且此一过程几乎与原子结合成为分子的方式无关。再者，由 $\alpha$ 射线和 $\beta$ 射线，以及由一硬X射线或 $\gamma$ 射线束被一定重量的物质所吸收的能量甚至几乎与其元素组成无关，然对软X射线而言并非如此。

因而X射线的作用显然要比光线的选择性差得多：例如，2600 Å 的紫外线通过一个核酸与血清蛋白的等量混合液时，90%以上的能量被核酸所吸收，而被蛋白所吸收者不到10%。然用 $\gamma$ 射线照射时，蛋白与核酸吸收的能量却相等。在吸收紫外线或可见光的量子时全部的能量都被贮藏在分子中，然后进行某种反应：在许多可能发生的反应中有些引起化学改变(分子离解等)，而另一些则引起物理效应(例如发出荧光、温度升高等)。

一个原子在吸收一个X射线或 $\gamma$ 射线的量子时便丢失一个电子。除了我们将不加以讨论的最软的X射线之外，所吸收的量子能量都大大超过产生电离作用(即由一个原子击出一个电子)所需的能量，而此一部分多余的能量便赋予被击出来的电子和被电离的原子以很大的动能。于是被击出来的电子就有足够的能量在它通过的原子中产生电离。对在放射生物学中所用的X射线而言，几乎所有的电离都是由于被击出来的电子所产生的，而最初被吸收的X射线量子所产生的效应是常被忽略不计的。因而，所产生的离子在整个溶液中不是任意分布的，而是集中地沿着被击出来的电子的径迹分布着的。这一点也代表了紫外线与电离辐射之间的另一个基本区别。

若不发生化学变化，则所有的X射线以及光波的能量最后都以热量的形式出现在吸收物质之中。在放射生物学中所用的剂量和剂量率，并不会产生明显的温度变化，因而一般地可以忽略热效应，除非对极致密的电离辐射或在“热点”中(在该处能

1) 一种电磁辐射的每个量子的能量为  $12,400/\lambda$  [ $\lambda$  为波长(Å)] 电子伏(eV)。量子为辐射可被吸收的最小单位，即一个分子必须吸收一个整个的量子或完全不吸收它，直到量子的能量大到足以发生康普顿效应(见10页)时为止。

量被不成比例地消耗掉)也许发生温度改变. 在这些情况下任何热的产生都将伴有高浓度的反应性高的基团出现, 后者所产生的损伤比热量所产生者更为有害.

由发生器所产生的X射线与某些放射性元素所发射的 $\gamma$ 射线之间是没有区别的. 直到前不久为止, 在生物学实验中所用的能量最高的X射线系得自400千伏的治疗管, 可得到波长为 $0.03 \text{ \AA}$ 左右的能量谱, 其平均波长为 $0.06 \text{ \AA}$ <sup>1)</sup>; 而 $\gamma$ 射线系得自镭, 它具有 $0.01 \text{ \AA}$ 的波长, 相当于 $1.2 \times 10^6$ 伏的X射线. 在战后期间, 机械方面如范德格喇夫静电加速器、强力线性加速器、电子回旋加速器、同步加速器等都得到了迅速的发展.

## X射线

相当于数百万伏的X射线目前已可由市售的机器发生, 它们已达到并超出了 $\gamma$ 射线的波长范围. 此外, 容易由原子反应堆所得到的放射性同位素钴<sup>60</sup>, 已成为高能量(1.1—1.3兆电子伏<sup>2)</sup>)纯 $\gamma$ 射线的有效来源.

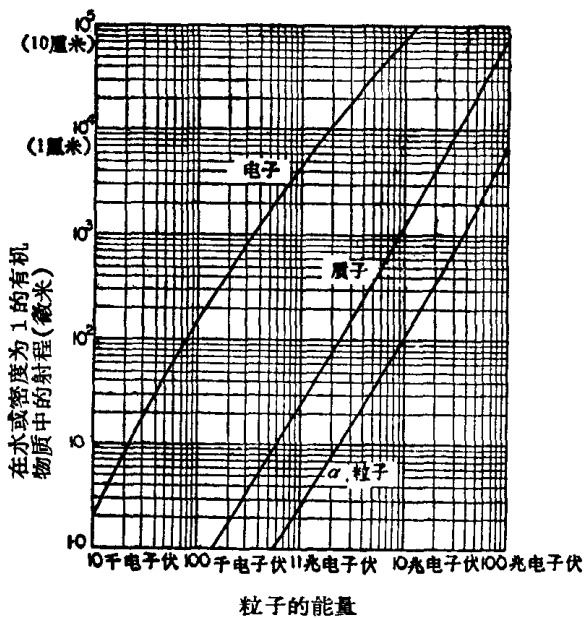


图1-1 致电离粒子在水中的射程(微米)及其能量(千电子伏)之间的关系.

## $\beta$ 射线

由于X射线和 $\gamma$ 射线的化学效应和生物学效应是由被击出来的高速电子, 而不是由原初电离所产生的, 故可借助于能量与其相当的电子的直接撞击而得到类似的结果. 此种电子束被称作 $\beta$ 射线. 它可得自特殊的加速器或放射性同位素; 后者目前已可得到大量的精制成品(见表1-1).  $\beta$ 射线的穿透距离依赖于其能量(见图1-1), 但即使是具有2兆电子伏的电子在水中(或在生物组织中)的射程也只有大约1厘米. 然而无论如何,  $\beta$ 射线射程短的缺点能够借助于将放射性同位素

溶解在溶液中或受照射的体系中(此时全部体积将受到均匀的照射)而得以克服. 在生物体系中同位素可被局限于某些部位, 因而它所造成的照射将是不均匀的

1) 在治疗型机器所发出的X射线谱中, 能量最高之辐射(即波长最短者)的能量相当于峰值电压——即波长 $\lambda = 12.4 / (\text{机器的千伏数})$ . 然而根据 Lea<sup>11</sup>的报告, 所有辐射的平均能量系此数值的一半.

2) 电子伏(eV)为一种能量单位, 相当于 $1.60 \times 10^{-12}$ 尔格. 1兆电子伏 =  $10^6$ 电子伏. 1千电子伏 =  $10^3$ 电子伏.

表 1-1 一些发射  $\beta$  射线的同位素

元素	Z	A	半衰期 (小时,日或年)	辐射	%	$E_{\text{最大}}$ (兆电子伏)	在反应堆中形成
H	1	3	11.8年	$\beta^-$	—	0.018	$H^2(n,\gamma)H^3, Li(n,\alpha)H^3$
Be	4	10	$2.5 \times 10^6$ 年	$\beta^-$	—	0.555	$Be^9(n,\gamma)Be^{10}$
C	6	14	5568年	$\beta^-$	—	0.155	$C^{13}(n,\gamma)C^{14}$
Na	11	22	2.7年	$\beta^+$	—	0.557	—
				$\gamma$	—	1.30	—
P	15	32	14.3日	$\beta^-$	—	1.701	$P^{31}(n,\gamma)P^{32}$
	15	33	25日	$\beta^-$	—	0.26	—
S	16	35	88日	$\beta^-$	—	0.167	$S^{34}(n,\gamma)S^{35}$
Cl	17	36	$4 \times 10^5$ 年	$\beta^-$	—	0.714	$Cl^{35}(n,\gamma)Cl^{36}$
K	19	40	$1.3 \times 10^9$ 年	$\beta^-$	89	1.33	天然存在
			$1.3 \times 10^9$ 年	$\gamma$	—	1.46	—
Ca	20	45	152日	$\beta^-$	—	0.255	$Ca^{44}(n,\gamma)Ca^{45}$
				$\beta^-$	50	0.46	$Fe^{59}(n,\gamma)Fe^{59}$
				$\gamma$	50	1.1	—
Fe	26	59	47日	$\beta^-$	50	0.26	—
				$\gamma$	50	1.30	—
As	33	77	40小时	$\beta^-$	—	0.80	$Ge^{76}(n,\gamma)Ge^{77} \xrightarrow{\beta^-} As^{77}$
Br	35	82	34小时	$\beta^-$	—	0.447	$Br^{81}(n,\gamma)Br^{82}$
						0.323	—
						0.181	—
				$\gamma_{\text{最大}}$	—	0.769	—
Rb	37	86	19.5日	$\beta^-$	80	1.822	$Rb^{85}(n,\gamma)Rb^{86}$
				$\beta^-$	20	0.716	—
				$\gamma$	20	1.081	—
Sr	38	89	53日	$\beta^-$	—	1.463	$Sr^{88}(n,\gamma)Sr^{89}$
Y	39	90	61小时	$\beta^-$	—	2.2	$Y^{89}(n,\gamma)Y^{90}$
Sr	38	90	19.9年	$\beta^-$	—	0.61	裂变产物衰变成 $Y^{90}$
Ag	47	110	270日	$\beta^-$	58	0.087	$Ag^{109}(n,\gamma)Ag^{110}$
					35	0.570	—
					5	2.90	—
I	53	131	8日	$\beta^-$	86	0.605	—
				$\gamma$	86	0.364等等	$Te^{130}(n,\gamma)Te^{131} \xrightarrow{\beta^-} I^{131}$
				$\beta^-$	14	0.25	—
				$\gamma$	14	0.637	—
Cs	55	134	2.3年	$\beta^-$	75	0.658	$Cs^{138}(n,\gamma)Cs^{134}$
				$\beta^-$	25	0.09	—
				$\gamma_{\text{最大}}$	—	1.36	—
Au	79	198	2.69日	$\beta^-$	—	0.96	$Au^{197}(n,\gamma)Au^{198}$
				$\gamma$	—	0.441	—
Hg	80	203	43.5日	$\beta^-$	—	0.208	$Hg^{202}(n,\gamma)Hg^{203}$
				$\gamma$	—	0.279	—
Tl	81	204	2.7年	$\beta^-$	—	0.775	$Tl^{203}(n,\gamma)Tl^{204}$
RaE(Bi)	83	210	5.02日	$\beta^-$	—	1.17	天然存在

Z为原子序数; A为原子量; n为中子(neutron).



## 重电离粒子

$\alpha$  射线系氦原子核（即具有两个正电荷，原子量为 4 的粒子）。它来自少数放射性物质，特别值得注意的是氦——它是作为镭和钋的衰变产物而得到的<sup>1)</sup>。由于其高电荷和低速度， $\alpha$  粒子易于被物质所阻止。在水或组织中一个来自镭 C' 的粒子的射程仅为 7.0 微米（见图 1-1），沿其径迹形成很多离子（即电离密度很高，见 21 页）。

质子为氢原子核，其质量为 1 并带有 1 个电荷；具有高能量的质子可由回旋加速器、质子同步加速器或范德格喇夫静电加速器人工地产生出来。它的穿透力和电离密度介于  $\alpha$  粒子（质量为 4）和电子（质量为  $5.5 \times 10^{-4}$ ）之间。

利用较新的发生器目前已可产生很多重电离粒子。当任何一个失去一个或一个以上电子的原子被加速时，都将成为致电离粒子。氘是经常被使用的；它的质量为 2，电荷为 1，因而其穿透力和电离密度介于质子和  $\alpha$  粒子之间。近年来，已制造出了一些可以用来产生带有更多的电荷并比  $\alpha$ -粒子重的加速粒子的机器。最常使用的一种多电荷重加速粒子是失去了六个电子的碳原子。由于它的质量为 12 和带有 6 个电荷，因而其性质与  $\alpha$  粒子不同，正如电子与质子的不同一样。最重的致电离粒子为当重元素（例如  $U^{235}$  或钚）的原子进行核裂变时所产生的裂变核。然而其射程很小，以致不能在放射生物学中应用。

## 中子

快中子（质量为 1，但不带电荷的粒子）常常得自回旋加速器、原子堆、或者直接由范德格喇夫静电加速器产生出来，但也可更简单地通过用  $\alpha$  粒子轰击铍而得到。一种简单的低功率来源是  $RaBeF^4$  络合盐。中子不直接地产生电离，但却由吸收物质的原子核中撞击出质子来。因而，快中子的生物学效应几乎完全是由于质子所造成的，这种方式和 X 射线的效应是由于被击出来的电子所产生者完全相同。然与其它电离辐射不同之处，是它所产生的电离数主要依赖于中子所通过的物质之元素组成的本质。这是由于在中子和质子之间的能量传递并不依赖于原子序数而依赖于其它因素的缘故，且由一定剂量的中子在 1 克水中所产生的电离数约比在 1 克空气中所产生者多 1.5 倍。这一点使得中子的剂量测定极为困难（见 17 页）。与 X 射线相同，中子能穿过大量吸收系数低的物质。在受照射的物质中，质子是按不定向地击出来的。因而，电离是在受照射物体内部沿着很短的径迹集中分布着的。

慢中子并不击出质子来，但却被其通过的原子核所俘获，由此而产生了一个可以具有放射性并发射  $\beta$  射线或  $\gamma$  射线的新原子核。在俘获中子的过程中原子核发射出  $\gamma$  射线来。表 1-1 中所列的很多放射性物质是在原子堆中用这种办法产生出来的。

1) 能量低而能产生极高离子密度的  $\alpha$  射线，可由人工用慢中子轰击硼或锂使之发生人工蜕变时得到。例如，当锂原子俘获一个中子时便很快解离出一个  $\alpha$  粒子来而剩下氚 ( $H^3$ )，氚发出  $\beta$  射线而缓慢地进行衰变。