



肿瘤放射生物学

主 编 沈 瑜 糜福顺

中国医药科技出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

肿瘤放射生物学

主编 沈瑜 糜福顺

中国医药科技出版社

登记证号：(京) 075 号

内 容 提 要

本书简要地介绍一些与放射物理和辐射化学的有关基本知识，并以较大的篇幅分别介绍在肿瘤放射治疗中涉及肿瘤和正常组织的放射生物学基本概念，如电离辐射对从分子直至实体瘤和各种正常组织的效应，含肿瘤本身诸因素对放射效应的影响。此外还从放射生物学的角度叙述了放射治疗中的时间、剂量和分次、新的放射治疗方式、近年来较有希望的一些改善放疗效果及保护正常组织的各种措施、方法和药物。除在各章节中对所涉及到的方法学作相应的介绍外，对本领域独特的、国际通用的各种实验技术，如离体细胞实验则结合实践体会专设章节作具体介绍。此外，还有相当篇幅介绍电离辐射对人体、胚胎和一些组织的远期效应，以及近年来我国有一定特色的低剂量照射对机体影响的有关研究。

本书可作为培养临床放射生物研究人员、中青年放射肿瘤医师的教学参考及肿瘤放射治疗专业硕士、博士研究生的指导教材，同时还可作为放射肿瘤医师、放射医学和核医学工作者及有关医学教育工作者的参考书和教学参考材料。

图书在版编目 (CIP) 数据

肿瘤放射生物学/沈瑜，糜福顺主编. —北京：中国医药科技出版社，2001.9

ISBN 7-5067-2435-9

I. 肿… II. ①沈…②糜… III. 肿瘤-放射医学：放射生物学 IV. R730.55

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 057753 号

中国医药科技出版社 出版
(北京市海淀区文慧园北路甲 22 号)
(邮政编码 100088)

北京昌平精工印刷厂 印刷
全国各地新华书店 经销

*

开本 A4 印张 28 $\frac{3}{4}$
字数 874 千字 印数 1—4000
2002 年 1 月第 1 版 2002 年 1 月第 1 次印刷

定价：58.00 元

本社图书如存在印装质量问题，请与本社联系调换 (电话：62244206)

编写人员名单

主编 沈 瑜 糜福顺

作者 按姓氏笔画为序

于 洪 辽宁省肿瘤医院

王顺宝 中国医学科学院肿瘤医院

沈 瑜 中国医学科学院肿瘤医院

苏燎原 苏州大学核医学院

杨伟志 中国医学科学院肿瘤医院

梁 克 中国医学科学院肿瘤医院

糜福顺 中国医学科学院肿瘤医院

董秀玥 中国医学科学院肿瘤医院

序

肿瘤放射治疗目前仍是肿瘤治疗的主要手段之一。多年来国内外无论在放射治疗、放射物理或临床放射生物方面都有很多进展。近年来，国内开展与放射治疗有关的临床放射生物的实验研究也较前增多，然而，作为临床肿瘤放射治疗四大支柱之一的临床放射生物学方面，在国外有关的书籍就较少，我国尚未有与放射治疗密切有关的放射生物学专著。

《肿瘤放射生物学》的出版符合国内广大放射肿瘤学界的需要和我国国情，成为既介绍放射治疗中生物效应的基本概念，又具体介绍符合临床放射生物特点、与国际通用的各项实验技术的书籍。

书中在重点简要地介绍一些放射物理和辐射化学的有关基本知识后，根据肿瘤放射治疗的需要，从肿瘤放射生物学的基本知识、结合在放射治疗中的应用以及放射生物独特的、国际通用的具体实验技术，多年的实践体会，从各方面做了简述。此外，还介绍了电离辐射对人体、胚胎和一些组织的远期效应，以及近年来我国有一定特色的低剂量照射对机体影响的有关研究。

此书不仅可作为从事放射肿瘤的临床和实验研究人士的参考书和肿瘤放射治疗专业硕士、博士研究生的指导教材，又可以作为放射肿瘤医师的专业参考书。对放射医学和核医学工作者也具有一定的参考价值。能作为有关的专业工作者的参考书，和为相应有关专业提供教学参考材料。

它已被确认和先期出版的《肿瘤放射治疗学》、《肿瘤放射治疗技术》和《肿瘤放射物理学》一起组成放射肿瘤专业系列书。是放射肿瘤专业人员的专业培训、临床科研、职称晋升考试、考硕考博及上岗考核必读的教材。是一本重要的肿瘤学的参考书。

谷镜之

前 言

肿瘤放射治疗目前仍是肿瘤治疗的主要手段之一。并且多年来国内外无论在放疗临床、放射物理或临床放射生物方面都有很多进展。近年来，国内开展与放疗有关的临床放射生物实验研究也较前增多，然而，与这方面有关的书籍在国外相对较少，分散在国内各地的广大放射肿瘤工作者，由于条件限制，很不容易读到有关书籍。而国内除曾有过两本译著以及在放射肿瘤的著作内有过部分阐述外，尚未有与放射治疗密切相关的放射生物学专著。

写这本书的目的是力图填补我国在肿瘤放射生物学书籍方面的空白，推出一本符合国内广大放射肿瘤学界需要、适合我国国情的好书，既介绍放射治疗中生物效应的基本概念，又具体介绍符合临床放射生物学特点的、与国际通用的各项实验技术。在参照国内外有关材料并结合本实验室多年的实践体会及国内现状和条件的基础上，编著成书。希望通过本书能对放射治疗学者和肿瘤放射生物学者在研究及改进治疗措施、扩大治疗病种、提高肿瘤治愈率与生存率、减少正常组织损伤和改善病人生活质量等方面有所帮助。

本书在重点简要地介绍一些放射物理和放射化学的有关基本知识后，以较大的篇幅分别介绍在肿瘤放射治疗中涉及肿瘤和正常组织的放射生物学基本概念，以及改善肿瘤放射治疗疗效及保护正常组织的几大措施。在各个相应的章节及时将有关的方法学做较详细的介绍，而对检测肿瘤和正常组织所受的辐射影响，以及目前正在日益发展的分子生物学有关技术，则均有专设的章节进行介绍。此外，还用了相当的篇幅介绍电离辐射对人体、胚胎和一些组织的远期效应，以及近年来我国有一定特色的低剂量照射对机体影响的有关研究。

希望本书既能对从事放射肿瘤的临床和实验研究的有关人士有所帮助，还能对放射医学和核医学工作者有一定的参考价值，并能作为有关专业工作者的参考书，和为相应专业提供教学参考材料。本书编著者以本室的科技人员为主，并特邀苏州医学院放射医学系苏燎原教授执笔有关人体远后效应以及低剂量照射等部分。

鉴于本书内所涉及的有关基础学科发展极快、作者水平有限，书中的错误和不足之处，恳请读者批评指正，以利于今后再版时修正。

本书的有关章节，分别承谷铎之教授、殷蔚伯教授、李申德教授、周际昌教授、唐谨教授和胡逸民教授等的审阅和指正。本书得以顺利的完成，还有赖于本院图书馆全体工作人员在整个写作过程中在诸多方面所给予的协助、支持和理解，谨此表示感谢。

编者
2001年8月

目录

第1章 电离辐射的初始物理效应	(1)
1.1 带电粒子的慢衰减	(2)
1.1.1 电离和激发	(2)
1.1.2 运动带电粒子和介质电子间相互作用的一般机制	(2)
1.1.3 带电粒子的慢衰减	(3)
1.1.4 碰撞对介质的影响	(4)
1.2 吸收剂量	(5)
1.3 放射线束的剂量分布	(6)
1.3.1 带电重粒子束	(6)
1.3.2 电子束	(7)
1.3.3 光子束 (X 和 γ 射线)	(7)
1.3.4 快中子	(8)
1.3.5 负 π 介子	(8)
1.4 微观标度的剂量分布	(8)
1.4.1 微观水平上剂量意义的限制	(8)
1.4.2 剂量分布与 LET 的关系	(8)
1.4.3 微剂量测量	(11)
第2章 辐射化学	(14)
2.1 初始物理事件	(14)
2.2 水的射解	(14)
2.2.1 自由基的形成	(14)
2.2.2 自由基的归宿和水分子的分解	(15)
2.3 辐射对水溶液的作用	(16)
2.3.1 直接作用	(17)
2.3.2 间接作用	(17)
2.3.3 辐射化学产额 G 值	(18)
2.4 放射敏感性化学修饰剂的作用机制	(19)
2.4.1 氧效应	(19)
2.4.2 其他种类的放射增敏剂和放射防护剂	(20)
2.4.3 化学修饰剂的反应动力学	(20)
第3章 电离辐射对 DNA 及染色体的作用	(22)
3.1 DNA 及其与染色体的关系	(22)
3.1.1 DNA 的结构	(22)
3.1.2 复制和转录	(24)
3.1.3 细胞增殖周期	(28)

3.2 电离辐射对 DNA 的损伤	(29)
3.2.1 电离辐射引起的损伤	(29)
3.2.2 紫外线辐射引起的损伤	(30)
3.2.3 DNA 损伤分类	(32)
3.3 DNA 损伤的修复	(33)
3.3.1 引言	(33)
3.3.2 修复系统	(33)
3.3.3 DNA 修复机制和人类疾病	(36)
3.4 电离辐射对染色体的损伤	(38)
3.4.1 引言	(38)
3.4.2 染色体分析方法	(39)
3.4.3 染色体畸变的种类和分类法	(41)
3.4.4 畸变数和照射剂量之间的关系	(43)
3.4.5 染色体畸变和生物剂量计	(45)
3.5 DNA 损伤和细胞死亡	(46)
3.5.1 细胞核和细胞质的相对重要性	(46)
3.5.2 染色体的作用	(47)
3.5.3 DNA: 细胞致死性“靶”结构	(47)
第 4 章 电离辐射的细胞效应	(52)
4.1 细胞死亡	(52)
4.1.1 照射所致细胞死亡的定义	(52)
4.1.2 细胞杀灭机制	(53)
4.1.3 交换型染色体畸变和细胞致死性	(54)
4.2 离体培养细胞实验	(54)
4.2.1 离体细胞存活实验的方法	(54)
4.2.2 离体细胞的乏氧照射技术	(57)
4.2.3 细胞存活曲线实验过程的质量控制	(58)
4.2.4 对离体细胞存活曲线的评价	(62)
4.2.5 细胞存活曲线的数学模型	(62)
4.2.6 用于多分次方案有效的存活曲线	(66)
4.2.7 计算肿瘤细胞的杀灭	(66)
4.3 细胞内在的放射敏感性	(67)
4.3.1 不同类型哺乳动物细胞的放射敏感性	(68)
4.3.2 放射敏感性和细胞周期时相	(68)
4.3.3 分子关卡基因	(70)
4.3.4 氧对处于细胞周期不同时相细胞的作用	(71)
4.3.5 在体组织中细胞的时相效应作用	(71)
4.3.6 细胞时相对中子敏感性的变化	(72)
4.3.7 细胞时相辐射反应差异的机制	(72)
4.3.8 细胞时相的辐射反应差异在放射治疗中应用的可能性	(72)
4.3.9 癌基因和放射抗拒性	(72)
4.4 细胞存活与修复	(73)
4.4.1 放射损伤的分类	(73)

4.4.2 潜在致死损伤与修复	(73)
4.4.3 亚致死损伤修复	(74)
4.4.4 损伤修复和射线的能量	(77)
第5章 正常组织的放射损伤	(79)
5.1 从细胞效应到组织损伤	(79)
5.1.1 细胞耗减	(79)
5.1.2 组织的增殖动力学	(80)
5.1.3 细胞分裂延迟	(80)
5.1.4 慢修复	(81)
5.1.5 再群体化	(82)
5.1.6 组织结构的层次	(82)
5.1.7 组织效应的模式	(83)
5.2 晚期效应	(84)
5.2.1 晚期反应的发病机制	(84)
5.2.2 放射治疗中耐受性的概念	(86)
5.3 组织损伤举例	(87)
5.3.1 小肠粘膜	(87)
5.3.2 皮肤	(88)
5.3.3 粘膜反应	(90)
5.3.4 膀胱表皮	(91)
5.3.5 造血组织	(91)
5.3.6 有免疫能力的组织和淋巴免疫系统	(95)
5.3.7 肝	(97)
5.3.8 甲状腺	(98)
5.3.9 睾丸	(98)
5.3.10 卵巢	(100)
5.3.11 神经系统	(100)
5.3.12 肺	(101)
5.3.13 心脏	(103)
5.3.14 肾	(103)
5.3.15 血管和血管系统	(104)
5.3.16 骨和软骨	(104)
第6章 正常组织的剂量效应关系	(106)
6.1 以克隆形成为指标的方法	(106)
6.1.1 原位再生长克隆	(106)
6.1.2 细胞异位移植的克隆技术	(113)
6.1.3 正常组织克隆源性细胞分析的剂量 - 效应关系的概述	(115)
6.2 功能指标	(116)
6.2.1 猪皮肤的反应	(116)
6.2.2 啮齿动物的皮肤反应	(117)
6.2.3 肺早期和晚期放射反应的测定	(120)
6.2.4 脊髓	(121)

6.3 以 LD_{50} 为基础的观察指标	(121)
6.3.1 肺	(121)
6.3.2 食管	(121)
6.3.3 肾	(122)
6.4 用非克隆分析系统的分次照射实验推算组织的 α/β 比值	(122)
6.5 正常组织的功能性亚单位	(123)
6.6 放射治疗中的体积效应	(123)
6.7 组织的放射病理学	(124)
6.8 与 X 射线相应的热疗效应	(125)
6.9 组织放射敏感性的 Casaret's 分类	(125)
6.10 实质细胞和结缔组织	(126)
第 7 章 细胞、组织和肿瘤动力学	(128)
7.1 细胞增殖周期	(128)
7.1.1 细胞周期组成部分的定量评估	(128)
7.1.2 潜在倍增时间	(132)
7.2 生长比例	(133)
7.3 细胞丢失	(133)
7.3.1 细胞丢失的途径	(134)
7.3.2 在实验肿瘤内测定细胞丢失	(134)
7.4 肿瘤生长的全貌	(135)
7.4.1 人体肿瘤的生长动力学	(135)
7.4.2 实体瘤和其对应正常组织细胞周期时间的比较	(137)
第 8 章 放射线对肿瘤的作用	(139)
8.1 局部控制肿瘤的理论基础	(140)
8.1.1 剂量效应关系	(140)
8.1.2 肿瘤体积和治愈可能性之间的关系	(142)
8.1.3 肿瘤消退和存活细胞数之间的关系	(143)
8.2 人体肿瘤的增殖动力学对射线照射的反应	(143)
8.2.1 人体肿瘤的生长速度	(143)
8.2.2 肿瘤细胞的增殖动力学	(144)
8.2.3 照射后肿瘤体积的改变	(145)
8.2.4 肿瘤的再群体化和部分同步化	(148)
8.3 影响人体肿瘤放射敏感性的因素	(150)
8.3.1 增殖动力学的差异	(151)
8.3.2 克隆源性细胞比例的变化	(151)
8.3.3 细胞内在放射敏感性	(152)
8.3.4 宿主和肿瘤之间的关系	(153)
第 9 章 乏氧细胞及其在放射治疗中的重要性	(155)
9.1 氧效应	(155)
9.1.1 氧作用的时间和氧效应的作用机制	(156)
9.1.2 需要的氧浓度	(157)

9.1.3 急、慢性乏氧	(158)
9.2 乏氧细胞	(160)
9.2.1 证实肿瘤内有乏氧细胞的第一个实验	(160)
9.2.2 不同动物肿瘤内乏氧细胞的比例	(160)
9.2.3 人体肿瘤内乏氧的事实	(162)
9.2.4 人体肿瘤内氧合状态的预测	(162)
9.3 肿瘤内乏氧细胞的再氧合	(166)
9.3.1 肿瘤受照射后乏氧细胞的命运	(166)
9.3.2 再氧合的机制	(168)
9.3.3 再氧合在放射治疗中的重要性	(168)
9.4 改变肿瘤内乏氧状态的方法	(168)
9.4.1 改变肿瘤内的氧含量	(168)
9.4.2 改善微循环	(173)
9.4.3 利用对乏氧细胞有更大杀伤力的射线或其他物理手段	(174)
9.4.4 利用有针对性的药物修饰肿瘤内乏氧细胞的放射反应性	(174)
第10章 实验肿瘤模型及其分析方法	(176)
10.1 实体肿瘤	(176)
10.1.1 实验肿瘤模型的选择	(176)
10.1.2 动物肿瘤和人体肿瘤的可比性	(177)
10.1.3 实验用瘤源的制备	(178)
10.1.4 实体瘤接种部位	(178)
10.1.5 实体瘤接种方法	(178)
10.1.6 实验用实体瘤的选择和实验要求	(179)
10.1.7 实体瘤的整体实验方法与评价指标	(179)
10.1.8 实验性实体肿瘤的保存和传代	(192)
10.1.9 肿瘤一宿主致免疫性的检测	(193)
10.2 肿瘤的离体模型	(193)
10.2.1 多细胞球体实验方法	(194)
10.2.2 多细胞球体一些生物学特性的观察	(196)
第11章 放射治疗中的时间、剂量和分次	(198)
11.1 标准分次照射及其在实践中的变迁	(198)
11.2 分次和时间效应的历史发展	(199)
11.2.1 等效剂量和治疗方案的关系	(199)
11.2.2 一个有区别的效应的示范	(199)
11.2.3 分次和总治疗时间参数的分离	(200)
11.3 分次照射不同效应的实验资料和放射生物学解说	(200)
11.4 总治疗时间的效应	(207)
11.5 多分次照射	(209)
11.5.1 超分次治疗	(209)
11.5.2 加速超分次	(209)
11.6 线性二次模式在临床放射治疗中的应用	(210)
11.6.1 各种组织 α/β 值的测定方法	(210)

11.6.2	LQ 公式的临床应用	(212)
11.7	剂量率效应及有关治疗方法	(219)
11.7.1	剂量率效应概述	(219)
11.7.2	非常低剂量率效应	(222)
11.7.3	近距离治疗	(223)
11.7.4	靶性放射治疗	(233)
11.8	再照射	(236)
第 12 章	加热治疗	(238)
12.1	加热的方法	(238)
12.2	热疗的作用机制	(238)
12.2.1	热对细胞的作用	(238)
12.2.2	pH 和营养缺乏对细胞热敏感性的作用	(239)
12.2.3	乏氧和热疗	(240)
12.3	热对组织的效应	(240)
12.3.1	热耐受	(240)
12.3.2	热休克蛋白	(241)
12.3.3	热和肿瘤血管	(242)
12.4	热的剂量学	(243)
12.4.1	温度的测量	(243)
12.4.2	热剂量或热剂量当量	(243)
12.4.3	温度和生物效应的相关性	(243)
12.4.4	递增和递减加热	(244)
12.5	热疗的综合应用	(244)
12.5.1	热和射线的相互作用	(244)
12.5.2	热和化学治疗剂	(246)
12.5.3	热和致癌	(248)
12.5.4	家畜中自发肿瘤的实验研究	(249)
12.6	热疗的临床应用	(249)
12.6.1	单用热疗	(249)
12.6.2	热疗加放疗	(250)
12.6.3	热疗和化疗的合用	(252)
第 13 章	放射效应的化学修饰剂	(254)
13.1	放射增敏剂	(256)
13.1.1	放射增敏剂研究简介	(256)
13.1.2	放射增敏剂的要求	(257)
13.1.3	放射增敏剂的临床试验	(257)
13.1.4	有临床潜在应用价值且至少已有临床试验的放射增敏剂	(258)
13.2	放射防护剂在放射治疗中的应用	(271)
13.2.1	放射防护剂的发现及作用机制	(271)
13.2.2	放射防护剂在放射治疗中的应用	(272)
13.2.3	低氧放射治疗的防护作用	(273)
13.3	对放、化疗所致正常组织晚期损伤有防与治双重作用的药物	(274)

13.3.1	防治肺及软组织晚期损伤的药物	(274)
13.3.2	防治中枢神经放射损伤的药物	(283)
第 14 章	从放射生物学角度纵观化学治疗药物	(287)
14.1	化学治疗的生物学基础	(287)
14.2	药物的分类和作用方式	(288)
14.2.1	主要的几大类化疗药物	(288)
14.2.2	其他类药物	(290)
14.3	剂量效应关系	(291)
14.4	化学治疗的生物效应	(291)
14.4.1	亚致死和潜在致死损伤修复	(291)
14.4.2	氧效应和化疗药物	(291)
14.4.3	增殖和非增殖细胞	(292)
14.4.4	抗药性	(293)
14.5	化学治疗和放射治疗的比较	(294)
14.6	化疗药物的联合应用	(296)
14.6.1	放、化疗的联合应用	(296)
14.6.2	化学治疗药物对放射治疗的修饰作用	(296)
14.6.3	化疗结合加热	(302)
14.7	个体肿瘤化疗药物敏感性的分析	(302)
14.8	继发恶性肿瘤	(302)
第 15 章	中子和其他重粒子	(305)
15.1	高 LET 射线的放射生物学特性	(305)
15.1.1	传能线密度和相对生物效应	(305)
15.1.2	LET 和细胞存活曲线的形状	(307)
15.1.3	LET 和氧效应	(308)
15.1.4	LET 和修复现象	(309)
15.1.5	LET 和细胞周期	(310)
15.2	中子在放射治疗中的应用	(311)
15.2.1	快中子	(311)
15.2.2	中子用于临床治疗的有关问题	(314)
15.2.3	硼中子俘获治疗	(316)
15.3	用于放射治疗的其他带电粒子	(317)
15.3.1	质子	(317)
15.3.2	其他带电粒子	(318)
15.3.3	负 π 介子	(319)
15.3.4	铜 - 252	(320)
第 16 章	放射生物中的分子技术	(322)
16.1	历史回顾	(322)
16.2	限制性核酸内切酶	(322)
16.3	载体	(323)
16.3.1	质粒	(324)

16.3.2	λ噬菌体	(324)
16.3.3	粘粒	(324)
16.3.4	酵母人工染色体	(324)
16.3.5	病毒	(325)
16.4	文库	(325)
16.4.1	基因组文库	(325)
16.4.2	cDNA文库	(326)
16.5	宿主	(326)
16.5.1	大肠杆菌	(326)
16.5.2	酵母	(327)
16.5.3	哺乳类细胞	(327)
16.6	琼脂糖凝胶电泳	(330)
16.7	聚合酶链式反应	(331)
16.8	基因克隆的策略	(331)
16.8.1	功能性互补	(331)
16.8.2	杂交	(332)
16.8.3	寡核苷酸探针	(332)
16.8.4	抗体探针	(332)
16.9	基因分析	(332)
16.9.1	作图或定位	(332)
16.9.2	DNA序列分析	(334)
16.9.3	多态性或突变	(336)
16.9.4	表达	(336)
16.10	分子生物学技术应用于肿瘤放射生物学举例	(336)
16.10.1	应用基因转移技术克隆的第一个哺乳动物细胞中的修复基因	(336)
16.10.2	从哺乳类细胞中分离并测序的第一个电离辐射修复基因	(337)
16.10.3	在酵母中鉴定并测序的分子关卡基因	(337)
16.10.4	在哺乳类细胞中作为关卡“分子警察”的p53基因	(339)
16.10.5	照射引起的肿瘤中ras癌基因的改变	(339)
16.10.6	铀矿工人的肺癌中,p53基因的特征性突变	(339)
16.10.7	父母的遗传易感性倾向与肺癌的发生	(339)
16.10.8	射线引起突变的分析	(340)
16.10.9	癌基因和放射抗拒性	(341)
第17章 电离辐射对人体的效应		(344)
17.1	机体效应	(344)
17.1.1	整体照射	(344)
17.1.2	慢性照射	(348)
17.1.3	危象器官	(349)
17.2	辐射对胚胎和胎儿的致畸形效应	(350)
17.2.1	胚胎发育时间和辐射效应的关系	(351)
17.2.2	死亡率	(352)
17.2.3	畸形和发育缺陷	(352)
17.2.4	子宫内照射致癌	(353)

- 17.3 辐射致癌····· (353)
 - 17.3.1 流行病学研究····· (354)
 - 17.3.2 致癌机制研究····· (361)
 - 17.3.3 剂量效应关系····· (364)
 - 17.3.4 低剂量照射对人体致癌危险度的评价····· (366)
- 17.4 辐射对遗传的危险度····· (367)
- 17.5 辐射防护的生物学基础····· (369)
 - 17.5.1 各种辐射类型效应的比较····· (369)
 - 17.5.2 剂量限制的概念····· (370)
 - 17.5.3 规章····· (371)
- 第 18 章 天然放射性本底和医学照射**····· (375)
 - 18.1 天然放射性本底照射····· (375)
 - 18.1.1 宇宙辐射····· (375)
 - 18.1.2 环境的天然放射性····· (375)
 - 18.1.3 内照射····· (377)
 - 18.1.4 加强的天然放射源照射····· (379)
 - 18.2 医学照射····· (380)
 - 18.2.1 放射诊断学····· (381)
 - 18.2.2 核医学····· (388)
 - 18.3 辐射与其他危险的比较····· (396)
- 第 19 章 低剂量照射的生物效应**····· (399)
 - 19.1 刺激效应····· (399)
 - 19.1.1 低剂量照射刺激效应的机制····· (400)
 - 19.1.2 低剂量辐射对淋巴细胞亚群的效应····· (401)
 - 19.1.3 低剂量照射对淋巴细胞 NK 活性及亚群间调节的影响····· (403)
 - 19.1.4 低剂量照射的淋巴细胞外液对其细胞亚群功能的影响····· (405)
 - 19.1.5 低剂量照射对荷瘤小鼠免疫功能的影响····· (406)
 - 19.1.6 低剂量照射对肿瘤免疫的影响····· (407)
 - 19.2 适应性反应····· (412)
 - 19.2.1 低剂量照射诱导 DNA 链断裂的适应性反应····· (413)
 - 19.2.2 低剂量诱导淋巴细胞 DNA 合成的适应性反应····· (414)
 - 19.2.3 低剂量照射的淋巴细胞外液对其亚群细胞的适应性反应的影响····· (414)
 - 19.2.4 低剂量照射的脾细胞外液对胸腺细胞 DNA 适应性反应的影响····· (416)
 - 19.2.5 低剂量照射诱导淋巴细胞抗染色体畸变的效应····· (417)
- 第 20 章 临床放射生物学的动态及展望**····· (420)
 - 20.1 放射治疗与细胞凋亡····· (420)
 - 20.1.1 放射治疗与凋亡的发生····· (420)
 - 20.1.2 凋亡在体内的生物学调节作用····· (422)
 - 20.2 放射敏感性的预测····· (425)
 - 20.2.1 正常组织的放射敏感性····· (425)
 - 20.2.2 肿瘤放射敏感性的预测分析····· (425)

20.2.3	“彗星”分析——一种检测实体瘤异质性的新方法	(430)
20.2.4	放射敏感性预测的临床应用	(431)
20.3	分子生物学在临床放射治疗中应用的可能性	(433)
20.3.1	普查和预防	(434)
20.3.2	预后因素	(436)
20.3.3	预测因子	(436)
20.3.4	治疗决策	(437)
20.3.5	新的治疗	(438)
20.3.6	随访	(439)

第 1 章

电离辐射的初始物理效应

放射生物效应是辐射粒子穿过介质的过程中发生的一系列现象的最终结果。辐射初始事件是指介质的原子和分子沿电离粒子径迹产生的电离和激发。这些物理剧变导致物理-化学反应、化学反应和最终的生物效应，其阶段顺序见图 1.1。

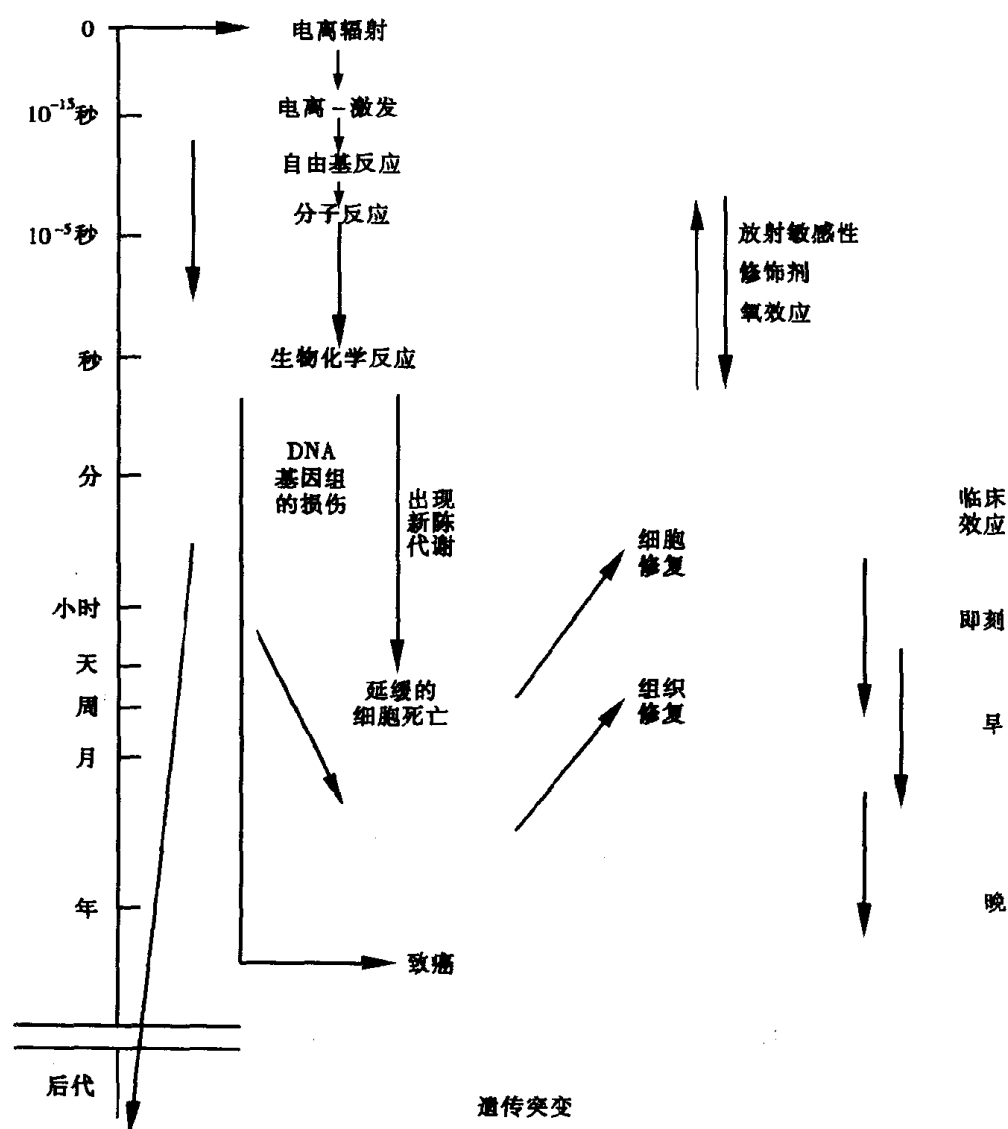


图 1.1 事件的次序及时间表

本章简要复习电离和激发时的能量变化，它们的发生机制及表示它们空间分布特性的剂量测量表示方法。