

国际放射防护委员会第58号出版物

必然性效应的相对生物效能

原子能出版社

(京)新登字 077 号

内 容 简 介

本书全面地阐述了必然性效应的相对生物效能(RBE)问题,介绍了人工培养细胞和组织反应以及肺内沉积的发射 α 和 β 的放射性核素的RBE值,给出了LQ模式的数学描述,讨论了必然性效应的RBE值与 Q 值的关系,论述了 Q 因数对于确定必然性效应的ALI的适用性。

本书可供辐射防护、放射治疗、放射医学和放射生物学等领域的科研人员以及大专院校有关专业的师生参考。

ICRP Publication 58

RBE for Deterministic Effects

ICRP, Pergamon Press, 1989

国际放射防护委员会第 58 号出版物

必然性效应的相对生物效能

田志恒 译

龚德荫 校

原子能出版社出版

(北京 2108 信箱)

原子能出版社印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行·新华书店经售

☆

开本 787×1092 1/32·印张 3.375 字数 75 千字

1992 年 11 月北京第一版·1992 年 11 月北京第一次印刷

印数 1—600

ISBN7-5022-0702-3

TL·433 定价:2.50 元

目 录

前言	(1)
1. 引言	(3)
1.1 背景知识	(3)
1.2 本报告的目的	(5)
1.3 小剂量和低剂量率下的 RBE	(5)
1.4 必然性效应的基本概念	(7)
1.5 本报告的范围	(9)
2. 相对生物效能	(12)
2.1 定义	(12)
2.2 辐射品质的定量化	(13)
2.3 影响高 LET 辐射必然性效应 RBE 的因素	(25)
2.4 必然性效应参考辐射的选择	(26)
2.5 大、小剂量和高、低剂量率下必然性效应 RBE 值的重要性	(27)
3. 人工培养的细胞中效应的 RBE 值	(28)
3.1 哺乳动物细胞存活曲线及其特征参数	(28)
3.2 不同类型人工培养细胞的 RBE 数据	(36)
3.3 组织反应的 RBE 值与关键细胞生殖终止的 RBE 值的比较	(38)
4. 组织反应的 RBE 值	(40)
4.1 组织损伤概述	(40)
4.1.1 受照组织损伤的早期和晚期表现	(40)
4.1.2 在组织中效应研究所用的辐射类型	(42)
4.1.3 有关各种动物与人的数据的对比	(44)
4.2 各种组织中效应的 RBE 值	(44)
4.2.1 皮肤和粘膜	(46)
4.2.2 胃肠道	(47)
4.2.3 软骨和骨	(48)
4.2.4 造血系统	(50)

4.2.5	血管系统	(51)
4.2.6	呼吸系统	(52)
4.2.7	神经系统	(54)
4.2.8	眼	(57)
4.2.9	生殖系统	(58)
4.2.10	泌尿系统	(61)
4.2.11	内分泌系统	(63)
4.3	快中子必然性效应的 RBE	(65)
4.4	在低剂量率下 ²⁵² Gf 中子必然性效应的 RBE	(65)
4.5	重离子必然性效应的 RBE	(66)
5.	吸入肺组织中的发射 α 和 β 的 放射性核素的效应	(66)
5.1	肺组织中放射性核素的剂量分布概况	(66)
5.2	事故照射	(68)
5.3	事故情况下吸入放射性核素的效应	(70)
5.4	吸入放射性核素造成的死亡率	(71)
5.5	吸入放射性核素引起的发病率	(76)
5.6	吸入放射性核素产生肺损伤资料的总结	(78)
6.	必然性效应 RBE 值及其与 Q 值的关系的讨论	(80)
6.1	不同剂量和剂量率 RBE 值的比较	(80)
6.2	不同辐射 RBE 值的比较	(81)
6.3	高 LET 和低 LET 混合辐射的 RBE 值	(82)
6.4	RBE 值与 Q 值的关系	(85)
6.4.1	辐射防护	(85)
6.4.2	事故情况	(86)
7.	关于必然性效应 RBE 值的结论	(86)
	参考文献	(87)

前 言

一种特定类型辐射在一定剂量下的相对生物效能(RBE)与剂量的时间分布、受照细胞或组织以及所研究损伤的类型有关。曾经报道对于随机性效应,即癌症和遗传疾病,在小剂量时高 LET 辐射的 RBE 和低 LET 辐射的来比有一个变化范围,即从接近于 1 到 50 以上。通常假设 RBE 值随剂量的增加而达到最大值,在 ICRP 和 ICRU 的报告中用 RBE_M 表示该最大值。这些 RBE_M 值是确定辐射防护所用品质因数(Q 值)的基础。通常只有在剂量超过 1Gy 的单次或长期照射后,才会发生非随机性效应[此后称必然性效应(deterministic effect)]。这里有一个问题:对于必然性效应在确定高 LET 辐射的剂量当量时 Q 值是否可用,或者是否应该用不同的 RBE 值。

对实验室动物和人的研究提供了分次剂量超过 1Gy 的必然性效应的资料,这些资料将构成本报告提出的一些见解的基础。通常,对于各种组织的必然性效应,未观察到 RBE 值超过 10 的情况。向远小于 1Gy 的剂量外推需要应用放射生物学模式。根据这种外推,可给出对不同组织特定反应的各种高 LET 辐射小剂量照射的 RBE 值。这些 RBE 值可用于估算高 LET 辐射照射的可能后果,并用于判断:为了达到适当的防护,对于特定的个别组织,是否应当考虑超过 Q 值的 RBE 值。

应第 1 专门委员会的要求,ICRP 主委员会于 1985 年 11

月批准成立研究“非随机性效应 RBE”的工作组,其职权范围是:

调研该课题已有的文献资料,编写一份关于非随机(必然)性效应的报告。报告应论述事故照射和长期照射问题,还应包括肺内发射 α 和 β 的放射性核素必然性效应的 RBE 问题,特别是与事故情况下所关心的核素和照射时间有关的问题。报告应研究在剂量限值水平下长期照射的必然性效应的 RBE,以便判断在建立由非随机性效应确定的 ALI 时所用品质因数 Q 的适当性。

工作组成员是:

G. W. Barendsen(主席)	J. W. Stather
J. I. Fabrikant	F. F. Hahn(通讯成员)
S. B. Field	S. B. Curtis(通讯成员)
A. M. Kellerer	

1985—1989 年期间第 1 专门委员会成员如下:

W. K. Sinclair(主席)	J. Lafuma
S. Abrahamson	C. E. Land
G. W. Barendsen	B. Modan
J. I. Fabrikant	K. Sankaranarayanan
S. B. Field	W. J. Schull
R. J. M. Fry	I. Shigematsu
L. E. Holm	A. C. Upton
A. M. Kellerer	吴德昌

1. 引 言

1.1 背景知识

(1) 电离辐射的生物效应是带电粒子向活细胞中的分子转移能量的结果。给定辐射剂量产生某一特定效应的效能与一系列因素有关,其中包括剂量率、剂量分配、所用的辐射类型、受照细胞或组织的种类和所考虑的终点等。剂量率和剂量分配的影响在于损伤的累积、亚损伤的修复和细胞再繁殖。辐射品质的影响是由于在亚细胞级上能量沿径迹沉积分布上的差异,这与电离粒子的电荷和速度有关。

(2) 带电粒子的传能线密度(LET)通常是按照辐射在细胞中能量沉积型式来区别不同类型辐射的量。轻带电粒子如电子和通过次级电子把能量传给组织的光子,归入“低 LET 辐射”。重带电粒子(如原子核)和通过与组织中原子作用而产生这些粒子的辐射(如快中子)通常归入“高 LET 辐射”(ICRU, 1970, 1986)。

(3) 对于在细胞和组织中产生的多种生物效应,单位吸收剂量的高 LET 辐射比低 LET 辐射更有效。这种效能的差异用相对生物效应(RBE)定量地表示。RBE 定义为低 LET 参考辐射的剂量与在数量和性质上产生同样生物反应的辐射的剂量的比值。因为低 LET 辐射被选作参考辐射,所以高 LET 辐射的高效能意味着其相对生物效应(RBE)大于 1(ICRP, 1977, 1984a, b)。对于某些分子(如蛋白质)和某些细胞结构(如细胞膜)的损伤,曾观察到高 LET 辐射的 RBE 值小于 1(Henglein

and Schnabel, 1966)。RBE 值依赖于高 LET 辐射的类型、照射参数、受照组织和所观察的效应而有很宽的取值范围。RBE 值总是与特定剂量和照射条件以及特定终点有关(ICRP, 1984a)。RBE 值还可能受诸如细胞状态、增殖动力学以及有无保护剂或敏化剂等其它因素的影响(Barendsen, 1968)。

(4)在辐射防护实践中通常要区分两类效应：“随机性”效应和“必然性”效应。在确定剂量限值上最重要的效应——随机性效应被假定是由单细胞损伤引起的。随机性效应的严重程度不是剂量相关的，其产生频率随剂量的增加而加大，且不存在阈值。随机性效应包括致癌和遗传效应(ICRP, 1977)。另一类效应以前称之为非随机性效应，现在改称为“必然性”效应。必然性效应对一个组织或一个机体的有害效应，这种效应只有受到大剂量照射后才发生，其严重程度和频率都与剂量大小有关。各种器官(如肺、肾和皮肤)的功能损伤属于必然性效应。

(5)作为制定剂量限值基础的辐射照射健康危害的评价主要是由低 LET 辐射效应的资料推导出来的。为了在高 LET 辐射(除辐射类型外其他条件均相当)照射下也达到同样程度的防护，引入了品质因素 Q ，它反映了与放射防护有关的随机性效应的 RBE 值。品质因素 Q 用来从吸收剂量 D ^①。推导出剂量当量 H ，如下式所示：

$$H = Q \cdot D$$

(6) Q 值与电离粒子的 LET 有关，它是利用各种反应的 RBE 值范围的资料以及关于照射条件影响的资料选定的。不同类型辐射 Q 值的选择是个判断问题，这里要考虑适当的

① 此后本报告中用到的术语剂量均代表吸收剂量。

RBE 值。在 ICRU 40 号报告 (ICRU, 1986) 中给出了有关问题的最新讨论。重要的是承认 Q 值与所研究的组织或效应的类型无关。 Q 值适用于辐射防护实践中所遇到的照射条件, 它只是辐射品质的函数 (ICRP, 1984b)。不打算将 Q 值用于超过剂量限值的照射水平, 也不能用于评价高 LET 辐射照射在特定组织中所产生的必然性效应的概率或严重性。

1.2 本报告的目的

(7) 由选择 Q 值的特定目的可知, 显然 Q 值并不代表那个被认为可用于一切组织中所有效应的 RBE 的最大值。因此, 对于众多类型的随机性或 2 必然性效应中的某些效应而言, 所研究的高 LET 辐射在特定照射条件下的 RBE 值可能大于 Q 值。对于选择性受照的某一组织 (例如, 摄入一种专门滞留在该组织中的放射性核素之后所受到的照射), 如果该组织中的一种效应是由极高 RBE 值的照射产生的, 则基于 Q 值的剂量限值或摄入量限值可能不足以防止高 LET 辐射产生必然性效应。于是有必要对文献中个别组织必然性效应的 RBE 值进行分析, 以便判断在长期受照或事故照射条件下特定的高 RBE 值是否适于估算可能的健康后果。本报告将对实验动物和人组织中效应的 RBE 值数据进行分析, 以评定根据 Q 值制定的现行剂量限值或年摄入量限值是否足以防止特定组织的必然性效应。

1.3 小剂量和低剂量率下的 RBE

(8) 为了给出小剂量和低剂量率下 RBE 的外推值, 需要

对诸多因素进行研究,其中包括效应类型、所研究组织的类型和产生辐射效应的机制。已经推导出多种类型辐射在细胞或组织中产生的不同效应的 RBE 值。利用这些数据已经确立了一些发展趋势。但是,有关 RBE 与辐射品质依赖关系的普遍适用理论尚未形成,而 RBE 对效应类型的依赖关系也仍然有待解释(ICRU,1986)。

(9)对于随机性和必然性效应的一个重要观察结果是,与高 LET 辐射相比,低 LET 参考辐射的绝对效能更强烈地依赖于剂量、剂量分配、剂量率和细胞状态等众多的因素。按单位剂量而言,在高剂量率下接受大剂量的条件下低 LET 辐射更有效。因此,在这种照射条件下高 LET 辐射的 RBE 值相对地小一些,即在 1—5 的范围内。随着剂量和剂量率的减小,单位剂量的低 LET 辐射的效能比高 LET 辐射的降低更快。于是,高 LET 辐射的 RBE 值随剂量和剂量率的减小而增大。高 LET 辐射对某些细胞响应的剂量—效应关系可能是非线性的,其效能随剂量的增大反而降低。这一现象可能也是 RBE 值随剂量和剂量率的减小而加大的原因之一。

(10)微剂量学数据及实验数据为以下假设提供了论据:在小剂量和低剂量率下 RBE 值达到最大值,该值与辐射类型及所评价的终点有关。对小剂量辐射防护特别重要的效应主要是致癌和致畸等随机性效应,这时该最大值记作 RBE_M 。而在本报告中对必然性效应的最大值则记作 RBE_m ,以示区别。

(11)为了推导出 RBE_M ,需要根据放射生物学基本假设对大剂量下的实验数据进行外推,这种外推依据一种特定的模式,并假定高 LET 辐射和低 LET 辐射产生的生物效应类型不存在本质的差别。后面将对这一模式进行详细讨论。

(12)在 ICRP 第 41 号出版物(1984)《电离辐射的非随机

性效应》中,必然性效应(非随机效应)被认为是超阈剂量照射后受影响组织中大量细胞或相当大比例的细胞集体损伤导致组织或器官功能损伤的结果。这与随机性效应不同,后者可能是由单个细胞或少量细胞损伤引起的。某些类型的效应(如在子宫内受照引起的智力迟钝)在当前还不能将之归属于上述两种类型效应中的那一类。有限的人类数据还不足以判断这类效应是否存在阈剂量。

(13)对于许多种必然性效应,特定终点的剂量-效应关系显示出剂量有阈值,低于阈剂量时效应不会发生或用现有方法检查不出。因此,剂量接近或低于阈值时的 RBE 值只能根据较大总剂量下的数据进行推断。不过,检查不出效应那样的小剂量和低剂量率水平下的 RBE 值仍是有意义的。在高 LET 和低 LET 混合辐射照射产生的损伤足以引起可观察到的必然性效应时,就要应用这些 RBE 值。后面将对此进行讨论。

(14)不同类型效应的比较表明,在小剂量或低剂量率下必然性效应的 RBE 值一般而言低于大多数随机性效应的 RBE 值。不能排除这样的可能性,即这些效应对细胞或组织内能量沉积型式的依赖关系存在着根本的差异。因此,对尽可能宽的效应范围估算必然性效应的 RBE 以判断它和 Q 值选择的关系是非常重要的。

1.4 必然性效应的基本概念

(15)ICRP 第 41 号出版物(ICRP,1984a)对必然性效应的各种性质及其剂量-效应关系进行了讨论。这些效应通常表现为组织或器官的完整性和功能的损害。已观察到这种损害

的组织有皮肤、胃肠道、软骨及骨、甲状腺、心、肺、中枢神经系统、眼、性腺、造血组织和免疫系统等。损伤的表现形式因组织而异,与组织的功能、细胞组成以及细胞增殖动力学等有关。

(16)细胞丧失生殖能力在大多数必然性效应致病中起着关键性作用(ICRP,1984a)。虽然其它机制也可能使损伤加重或减轻,但组织反应通常表现出的特性与人工培养的细胞克隆能力丧失的很多研究中所观察到的类似。这种极似性在损伤恢复、氧效应和照射后细胞增殖动力学等诸方面都被观察到,因此,尽管组织中各种类型“集体细胞损伤”的剂量—反应关系可能不同于培养介质中生长的单个细胞损伤的剂量—响应关系,但是可以预料辐射剂量效能对 LET 的依赖关系是相似的。这种相似性支持如下假设:增殖能力损伤是引起许多必然性效应的基本机制。这意味着各种必然性效应的 RBE 对 LET 的依赖关系可能类似于受作用组织中关键细胞生殖终止的 RBE—LET 关系。

(17)组织损伤的表现形式不仅依赖于诱发细胞生殖终止,还与受到致死性损伤的和存活的关键靶细胞及其后代的辐照后动力学有关。但是,用不同 LET 的辐射剂量照射各种人工培养细胞及一些组织中的细胞之后观察到,导致同样数量细胞致死率的不同 LET 的辐射剂量照射之后,存活细胞的增殖能力相似(Sinclair,1968;Westra and Barendsen,1966)。非致死性损伤(例如有丝分裂延迟或增殖能力部分损伤)的 RBE 值通常与克隆能力丧失的 RBE 值没有显著的区别(Broerse and Barendsen,1973)。

(18)必然性效应也许还部分地依赖于血管和结缔组织要素的损伤,而这些组织对所有器官的功能都是很重要的(ICRP,1984a)。这类损伤多数在照射之后数月甚至数年才表

现出来。

1.5 本报告的范围

(19)在以前几篇涉及随机性和必然性效应的报告中曾经对不同照射条件下的 RBE 值与 LET 的关系进行了评论。

(20)在 ICRP 第 18 号出版物(ICRP, 1972)中,对“诱发突变的高 LET 辐射的 RBE”进行了评价,并给出如下结论:高 LET 辐射(如裂变中子)的 RBE 值在较大剂量和急性照射条件下为 5—10,但在小剂量和低剂量率下可能会大得多。

(21)在 ICRP 第 31 号出版物(ICRP, 1980)中,对“吸入放射性核素的生物效应”进行了评论。该报告的结论认为,吸入发射 α 粒子的放射性核素诱发的肺癌与吸入发射 β 粒子的放射性核素相比较,得出的“等效能比值”(“Equal Effectiveness Ratio”)约为 20—40。该比值可近似地认为等于 RBE_m 。

(22)在 IRRP 第 41 号出版物(ICRP, 1984a)《电离辐射的非随机性效应》中,讨论了各种正常组织和器官的耐受剂量,即刚超过阈值的剂量。但对于 LET 的影响仅针对哺乳动物人工培养细胞的存活曲线进行了较详细的讨论。该报告指出, RBE 随剂量、分次剂量和剂量率的减小而增大。

(23)在 UNSCEAR(1982)的报告《电离辐射:源和生物效应》中对必然性效应的许多方面进行了广泛讨论,其中包括诱发损伤的基本的细胞学特点,必然性效应对剂量、剂量率、剂量分配、再繁殖和减缓剂的依赖关系等。因为动物的辐射反应(包括 RBE 对 LET 的依赖关系)常常与人类的很相似,所以对实验动物组织的效应进行了评论。报告还评论了人体不同组织的辐射损伤,其中有关阈剂量和耐受剂量的大部分资料来

源于历年辐射治疗的经验。最后,该报告评论了高 LET 辐射(主要是能量超过 5MeV 的快中子)的 RBE 值并得出结论:对于大到足以引起必然性损伤的单次照射,和高能光子相比,中子的 RBE 值为 1—5。其实际值决定于中子能谱、所研究组织的类型和效应。

(24)UNSCEAR 1982 年报告中还讨论了放射性核素内照射的效应,包括摄入发射不同 α 粒子和 β 粒子的化合物后各种器官中发生的变化。结论指出,当发射 α 粒子、低能 β 粒子和俄歇电子的放射性核素结合进或接近细胞或组织中的放射敏感结构时,这些放射性核素可能特别有效。在此情况下需要考虑放射性核素在组织和细胞内的分布。

(25)如果给定核素的分布是不均匀的,则不能严格地运用 RBE 这一术语。在这种照射条件下,由于一些与致电离粒子的 LET 无关的原因,“相对生物效应”可能大于 10。在研究 Q 与 RBE 之间的关系时,对于组织或细胞中非均匀分布的放射性核素所观察到的高 RBE 值应该单独考虑。剂量当量原始定义中的因数 N (ICRP, 1977)可用来考虑这一复杂因素。这类照射的一个例子是从小颗粒发射的 β 辐射对组织小体积的照射,这时将在小体积内产生局部大剂量。另一个例子是俄歇电子发射体引起的小鼠未成熟卵母细胞致死,对这种情况报道的 RBE 值高达 50 (Straume and Dobson, 1983)。 ^{125}I 结合到细胞特别是通过 IUDR 结合到 DNA 分子中引起细胞生殖终止,其 RBE 值也高达 50。然而对于随机分布的俄歇电子发射体, RBE 值仅为上述的 $1/5$ (Chan et al. 1976; Pomplun et al, 1987)。

(26)鉴于有大量文献可资利用,本报告对不同组织中必然性损伤的类型及其过程将不作进一步的全面评论,而是集

中讨论必然性效应的 RBE 值对 LET、剂量、剂量分配和剂量率的依赖关系的一般特性。描述并应用由较高分次剂量向辐射防护所关心的较低分次剂量和低剂量率外推的方法,然后将针对不同类型的组织效应对有关 RBE 值与 LET 关系的现有资料进行评论。

表 1 核装置现场事故中可能涉及的放射性核素

族	放射性核素	预计从安全壳释放的化合物形式	肺廓清类别 ^a
卤素	¹³¹ I, ¹³² I, ¹³³ I, ¹³⁴ I, ¹³⁵ I	碘, 碘甲烷 碘化物, 碘酸盐	D
碱金属	⁸⁶ Rb, ¹³⁴ Cs, ¹³⁶ Cs, ¹³⁷ Cs	氧化物, 氢氧化物	D
碲, 铈	¹²⁷ Te, ^{127m} Te, ¹²⁹ Te, ^{129m} Te, ^{131m} Te, ¹³² Te, ¹²⁷ Sb, ¹²⁹ Sb	氧化物	W
碱土	⁸⁹ Sr, ⁹⁰ Sr, ⁹¹ Sr, ¹⁴⁰ Ba	氧化物	D
“过渡”族	¹⁰³ Ru, ¹⁰⁵ Ru, ¹⁰⁶ Ru ¹⁰⁵ Rh ⁵⁸ Co, ⁶⁰ Co ⁹⁹ Mo ^{99m} Tc	氧化物, 元素态 氧化物, 氢氧化物 钼酸盐 氧化物, 高钨酸盐	Y Y D
“镧”系	⁹⁰ Y, ⁹¹ Y, ¹⁴⁰ La ⁹⁵ Zr, ⁹⁷ Zr, ⁹⁵ Nb ¹⁴¹ Ce, ¹⁴³ Ce, ¹⁴⁴ Ce, ¹⁴³ Pr, ¹⁴⁷ Nd	氧化物 氧化物 氧化物	W Y Y
“锕”系	²³⁸ Np, ²³⁸ Pu, ²⁴⁰ Pu, ²⁴¹ Pu, ²⁴¹ Am, ²⁴² Cm, ²⁴⁴ Cm	氧化物	Y

a. 字母 D、W 和 Y 分别代表呼吸道半廓清期, 为天、周和年的量级 (USNRC, 1975)。

(27) 辐射防护特别关心的高 LET 辐射源包括中子以及

在事故情况下可能被释放出来的发射 α 的放射性核素。表 1 列举了核装置现场事故中可能涉及的放射性核素。在第 5 节将就吸入放射性核素的问题进行更为详细的讨论。可用于估算 α 粒子照射的 RBE 值的数据极其有限。这是因为剂量的时间和空间分布的差异,使得体内沉积放射性核素的 α 和 β 粒子的效应不能严格比较。因此本报告将重点放在中子照射产生的 RBE。然而有一些关于肺内 α 和 β 发射体照射后果的资料,根据这些资料可以对必然性效应的 RBE 进行初步估算。在第 5 节将对此进行较详细的讨论。其他重离子的数据将包括在这些分析中的适当的地方。

(28)最后, Q 值主要基于随机性效应并且涉及低于限值的剂量;而关于 Q 值对于各种必然性组织反应的适当性,将围绕 RBE 值作为辐射品质函数的证据进行讨论。

2. 相对生物效能

2.1 定义

(29)辐射 A 相对参考辐射 R 的相对生物效能定义为组织中的吸收剂量 D_R 与产生一种在数量上和质量上同等效应的剂量 D_A 的比值。从动物和人的组织培养物和组织反应等一系列观测中求得的 RBE 值是和一系列特定照射条件下所产生的确定的终点相对应的。由不同因素引起的 RBE 变化范围如表 2 所示。

表 2 引起细胞生殖终止的 RBE 值变化范围

引起变化的因素	范围
细胞或组织起源的不同	$\times 3$
离子电荷和能量不同	$\times 10$
中子能量不同	$\times 3$
剂量、分次剂量或剂量率	$\times 5$

(30)ICRU 第 40 号报告《辐射防护中的品质因数》(ICRU, 1986)中指出,大多数 RBE 值是针对大剂量和高剂量率求得的,用于辐射防护时需要向小剂量和低剂量率外推。为此必须充分运用放射生物学的有关见解。如前所述,这些见解可用来估算随机性效应的 RBE_M 和必然性效应的 RBE_M 。这些值仅仅依赖于辐射品质和所研究的终点。显然,在 RBE 定义中参考辐射 R 的选择对辐射防护是很重要的。该问题与必然性效应的关系将在第 2.4 节讨论。

2.2 辐射品质的定量化

(31)辐射品质基本上可以根据在所研究系统中沉积能量的不同电荷和速度的电离粒子注量谱来确定。为了定量地描述 RBE 对辐射品质的依赖关系,需要对电离辐射在细胞和组织中沉积能量的型式给以定量的量度。这可以用 LET 或线能 y 的平均值来求得。但是要认识到,为了解释放射生物学的剂量—效应关系以及分析细胞和组织中的电离分布对诱发生物效应效能影响,可能需要这些分布谱的完整的资料。ICRU 第 40 号报告(ICRU, 1986)对辐射品质详细内容进行了讨论。

(32)传能线密度 LET 被定义为带电粒子损失的平均能量 $d\bar{E}$ 与其在组织中穿行的距离 dl 的比值。在某些情况下要