

文章编号: 1007-4627(2007)01-0048-07

重离子照射细胞存活率计算的局部效应模型的缺陷*

温小琼, 刘瑞娟, 尹利勇

(大连理工大学三束材料表面改性国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 概略介绍了重离子照射细胞存活率计算的局部效应模型, 讨论了该模型在理论假设和计算方法上存在的问题, 指出了其中的任意参数, 并通过计算检验了这些任意参数的取值变化对细胞存活率计算结果的影响。结果表明, 细胞存活率计算结果严重依赖于这些任意参数的取值。

关键词: 细胞存活率; 径迹构造; 局部剂量

中图分类号: Q691 **文献标识码:** A

1 引言

在临床肿瘤放射治疗中, 在病人接受放射治疗之前必须制定一个合理的放射治疗计划, 即针对不同肿瘤位置、大小、重离子种类和能量等因素确定所需要的剂量值以及照射方式。制定放射治疗计划的首要前提是必须知道肿瘤细胞以及周围正常细胞的剂量存活率关系曲线。尽管重离子在生物学效应和物理特性上相对于 X 射线或 γ 射线具有明显优势, 但是有关重离子照射细胞存活的基础实验数据的积累还远远不能满足临床的需要。与重离子的这种现状相比, 利用传统的 X 射线或 γ 射线放疗方法已经积累了丰富的基础实验数据和大量的临床治疗数据。如果知道重离子相对于 X 射线或 γ 射线的相对生物学效应(RBE), 那么就可以根据 X 射线或 γ 射线的辐射生物学效应求出重离子的生物学效应, 从而有效地利用传统的 X 射线或 γ 射线放疗中的基础实验数据和临床经验。出于这种考虑, 研究如何根据 X 射线或 γ 射线的细胞存活率来计算重离子的 RBE 显得十分必要。

Scholz 等人基于重离子径迹构造提出了一种重离子照射细胞存活率计算的局部效应模型(Local Effect Model, 简称 LEM)^[1-4], 并认为这种模型没有待定参数, 可以适用于所有细胞存活曲线类型的计算。他们应用这种模型计算了重离子照射的细胞存活率、细胞失活截面以及 RBE 等。但是我们经过仔细的研究发现, Scholz 等人的 LEM 在理论框架

和计算方法上都存在严重的问题, 模型中存在任意的参数。通过计算检验我们发现该模型的计算结果对这些参数有严重的依赖性。

本文首先概略介绍 LEM, 指出其符号标注上的问题, 为了清晰起见对其进行了重新标注。然后从能量守恒定律和剂量定义出发分析 LEM 在理论框架上的问题, 最后分析 LEM 在计算方法上存在的问题, 指出其中的任意参数, 并通过计算检验了这些任意参数的取值变化对计算结果的影响。

2 LEM 概要^[2]

从靶学说出发, X 射线照射下细胞的存活率可以描述为

$$S(D) = e^{-N(D)}, \quad (1)$$

D 为细胞的吸收剂量, $N(D)$ 为剂量 D 时细胞体积内的平均致死事件数。于是有

$$N(D) = -\ln S(D)。 \quad (2)$$

在线性平方模型的框架下, (1)式具体地表述为

$$S(D) = e^{-(\alpha D + \beta D^2)}, \quad (3)$$

其中 α 和 β 分别是辐射敏感性参数。相应地, (2)式表述为

$$N(D) = \alpha D + \beta D^2。 \quad (4)$$

假设细胞核中的辐射敏感性位点是均匀分布

* 收稿日期: 2006 - 04 - 03; 修改日期: 2007 - 01 - 15

作者简介: 温小琼 (1968-), 男(汉族), 江西宁都人, 副研究员, 从事辐射生物学和低温等离子体应用研究;

E-mail: wenzxq@dlut.edu.cn

的, 且致死事件随机地出现在细胞核的任何部位, 那么细胞核内单位体积中的平均致死事件(致死事件密度)可以写成

$$\nu(D) = \frac{N(D)}{V} = \frac{-\ln S(D)}{V}, \quad (5)$$

其中 V 为细胞核体积。

重离子照射时, 由于重离子径迹中剂量分布的不均匀以及径迹的相互重叠使得细胞核体积内剂量分布不均匀。Scholz 等人假设: 重离子和 X 射线在生物效应上的差异是由这种能量沉积方式的差异造成的, 无论重离子还是 X 射线只要某个局部沉积的剂量相同, 那么在该局部发生的致死事件数就相同。基于这个假设, 由(5)式求得的 X 射线照射时的致死事件密度就是重离子沉积同样剂量时的致死事件密度, 这样就可以利用 X 射线照射的细胞存活率数据计算重离子照射的细胞存活率。在重离子照射下, 如果微小体积 ΔV 内沉积的剂量为 D , 那么 ΔV 内的平均致死事件数可以表示为

$$\bar{N}_{\text{lethal}} = \frac{\ln S(D)}{V} \Delta V, \quad (6)$$

相应地, 在重离子照射下整个细胞核内的平均致死事件数可表示为

$$\bar{N}_{\text{lethal}} = \iiint_V \frac{\ln S(D)}{V} dV. \quad (7)$$

由此, 重离子照射时的细胞存活率可按下式算出:

$$S = e^{-\bar{N}_{\text{lethal}}}. \quad (8)$$

以上对 LEM 的理论框架的叙述完全遵从了文献[2]的表述。由于涉及 X 射线和重离子两种辐射, 同时又涉及细胞核整体和局部, 这 8 个式子的标注, 特别是作为这个模型核心的(6)–(8)式的标注很不清晰。按原文逻辑, (1)–(5)式中的剂量 D 是 X 射线均匀照射条件下的宏观剂量, (6)和(7)式中右边的剂量 D 是重离子照射下的剂量沉积不均匀导致的局部剂量(本文改注为 D_L)。 (6)和(7)式中原文用了同一记号 \bar{N}_{lethal} , 但是(6)式的 \bar{N}_{lethal} 应在重离子照射下局部微小体积 ΔV 内沉积局部剂量 D_L 时, ΔV 内局部的平均致死事件数(本文改注为 $\Delta \bar{N}_L(D_L)$), (7)式的 \bar{N}_{lethal} 应为细胞核整体体积内在重离子照射下发生的平均致死事件数(本文改注为 $\Delta \bar{N}_{\text{ion}}$)。 (7)式是 LEM 中最关键的式子, Scholz 等

人在文献[1–4]中对(7)式左边的 \bar{N}_{lethal} 均未标注相应的宏观剂量, (8)式的左右两边也均未标注相应的宏观剂量。换言之, 就是没有说明是什么样的宏观剂量下细胞核整体体积内发生的平均致死事件数。

为了避免混乱, 对以上 8 个式子中的各个量按以下规则进行重新标注: (1)凡是与 X 射线照射相关的加下标 X, 与重离子照射相关的加下标 ion; (2)宏观剂量用 D 、局部剂量用 D_L 区分表示。(1)–(8)式重新标注如下, 其中(7a)和(8a)式左边加注的剂量将在 3.1 节进行说明:

$$S_X(D) = e^{-N_X(D)}, \quad (1a)$$

$$N_X(D) = -\ln S_X(D), \quad (2a)$$

$$S_X(D) = e^{-(\alpha_X D + \beta_X D^2)}, \quad (3a)$$

$$N_X(D) = \alpha_X D + \beta_X D^2, \quad (4a)$$

$$\nu_X(D) = \frac{N_X(D)}{V} = \frac{-\ln S_X(D)}{V}, \quad (5a)$$

$$\Delta \bar{N}_L(D_L) = \frac{\ln S_X(D_L)}{V} \Delta V, \quad (6a)$$

$$\bar{N}_{\text{ion}}(D) = \iiint_V \frac{\ln S_X(D_L)}{V} dV. \quad (7a)$$

$$S_{\text{ion}}(D) = e^{-\bar{N}_{\text{ion}}(D)}. \quad (8a)$$

3 LEM 理论框架上的问题

3.1 宏观剂量与局部剂量的关系

众所周知, 在细胞致死实验中, 测量的是一系列宏观剂量照射下细胞的存活率, 细胞存活曲线是细胞存活率对宏观剂量的变化关系曲线, 在不指明相应的宏观剂量的情形下谈论细胞存活率是没有意义的。从 LEM 中可以很明显地看出 LEM 是从 nm 尺度的局部剂量的不均匀性出发, 按照第 2 节所述的理论框架利用蒙特卡罗方法计算与一系列的宏观剂量相对应的细胞存活曲线。(7a)式是 LEM 理论框架的核心, 但是 Scholz 等人在文献[1–4]中对(7)式左边的 \bar{N}_{lethal} 却未标注相应的宏观剂量。我们将对应的宏观剂量记为 D , 为了明晰, 将(7a)式写成

$$\bar{N}_{\text{ion}}(D) = \iiint_V \frac{\ln S_X(D_L(x, y, z))}{V} dx dy dz, \quad (9)$$

式中左边的 $D_L(x, y, z)$ 是点 (x, y, z) 处的局部剂量, 右边 D 是整个细胞核对应的宏观剂量。很明显在这个式子中隐含有宏观剂量 D 与局部剂量 D_L 的关系, 是计算中不可缺的约束条件。但是 Scholz 等人在文献[1—4]中没有给出宏观剂量 D 与局部剂量 D_L 的关系, 通过对(7)式左边的 \bar{N}_{lethal} 不标注相应的宏观剂量掩盖了这一重要问题。

以下根据能量守恒定律和剂量的定义导出宏观剂量 D 与局部剂量 D_L 的关系。将一个体积为 V 的细胞核分成若干个 nm 量级的微小部分, 其中第 i 个微小部分的体积 ΔV_i 、局部剂量为 $D_L(x, y, z)$ (Gy)。设细胞核内物质均匀且密度为 ρ (kg/m³), 根据剂量的定义第 i 个微小部分内沉积的能量为

$$\Delta E = \rho \Delta V_i D_L(x_i, y_i, z_i)。 \quad (10)$$

根据能量守恒定律, 整个细胞核内沉积的总能量为

$$E = \sum \Delta E = \sum \rho \Delta V D_L(x_i, y_i, z_i)。 \quad (11)$$

根据剂量定义, 则整个细胞核对应的宏观剂量可以表示为

$$\begin{aligned} D &= \frac{\sum \rho \Delta V_i D_L(x_i, y_i, z_i)}{\rho V} \\ &= \frac{\sum \Delta V_i D_L(x_i, y_i, z_i)}{V}, \end{aligned} \quad (12)$$

写成积分形式:

$$D = \iiint_V \frac{D_L(x, y, z)}{V} dx dy dz, \quad (13)$$

这是宏观剂量 D 与局部剂量 D_L 必须满足的关系, 是能量守恒定律的必然要求。

以下从宏观剂量 D 与局部剂量 D_L 的基本关系出发, 导出 LEM 理论框架的谬误。

3.1.1 直线型细胞存活曲线的情形

对于直线型 X 射线照射细胞存活曲线的情形:

$$S_X = e^{-\alpha_X D}, \quad (14)$$

由 LEM 的(6a)式, 任一微小区域 ΔV_i 内的致死事件数为

$$\Delta N_{L_i}(D_{L_i}) = \frac{\alpha_X D_{L_i}}{V} \Delta V_i, \quad (15)$$

由(7a)式, 细胞整体的致死事件数为

$$N_{\text{ion}} = \sum \frac{\alpha_X D_{L_i}}{V} \Delta V_i, \quad (16)$$

根据宏观剂量 D 与局部剂量 D_L 的基本关系(12)式有:

$$N_{\text{ion}} = \alpha_X D, \quad (17)$$

代入 LEM 的(8a)式有:

$$S_{\text{ion}}(D) = S_X(D), \quad (18)$$

即在相同的宏观剂量 D 下, 重离子照射的细胞存活率与 X 射线照射的细胞存活率相同, 这显然与实验事实相背。

3.1.2 “肩”型细胞存活曲线的情形

线性平方模型是描述“肩”型细胞存活曲线的一种常用模型。按照 LEM 的假设细胞核内 nm 量级的局部区域上线性平方模型也适用, 那么将整个细胞核分成 n 个 nm 量级的微小等分, 不论是 X 射线还是重离子照射, 只要局部剂量不均匀, 由 LEM 的(4a)—(6a)式, 第 i 个微小区域 ΔV_i 内的平均致死事件数表示为

$$\Delta N_{L_i}(D_{L_i}) = \frac{\alpha D_{L_i} + \beta D_{L_i}^2}{V} \Delta V_i。 \quad (19)$$

由 LEM 的(7a)式并考虑宏观剂量 D 与局部剂量 D_L 的基本关系(12)式, 整个细胞核内的平均致死事件数为

$$\begin{aligned} \bar{N}(D) &= \sum_{i=1}^n \Delta N_{L_i}(D_{L_i}) = \alpha \sum_{i=1}^n \frac{D_{L_i}}{n} + \\ &\quad \beta \sum \frac{D_{L_i}^2}{n} \neq \alpha D + \beta D^2。 \end{aligned} \quad (20)$$

很显然, 细胞核内局部区域的效应满足线性平方模型时, 由 LEM 的(6a)式不能将细胞核整体效应回归为线性平方模型, 即 LEM 的(4a)和(6a)式是不能自洽的。

3.2 关于敏感位点的假设

尽管对高能辐射下细胞致死的敏感位点的具体结构尚没有明确的认识, 大量的实验结果显示 DNA 分子是最主要的辐射敏感性靶物质。DNA 双链、单链断裂的实验结果表明, 细胞致死是 DNA 分子上少数几个敏感位点造成的。事实上, LEM 是在假定细胞核内只有一个敏感位点且在细胞核中(空间位置上)均匀分布的前提下, 由(1a)—(8a)式构建起来的。但是, 根据靶学说思想, LEM 的(8a)式所表述的意义与 LEM 自身的假设以及实验事实是相反的。

将细胞核分成 n 个 nm 量级的微小部分 ΔV_i , 设第 i 个微小部分的局部剂量为 D_{Li} , 由 LEM 的 (7a) 式, 写成数值计算的形式

$$\bar{N}_{\text{ion}}(D) = \sum_{i=1}^n \ln S_X(D_{Li}) \frac{\Delta V_i}{V} = \sum_{i=1}^n \Delta N_{Li}, \quad (21)$$

将 (21) 式代入 (8a) 式, 得

$$\begin{aligned} S_{\text{ion}}(D) &= e^{-\bar{N}_{\text{ion}}(D)} = \prod_{i=1}^n e^{-\ln S_X(D_{Li}) \frac{\Delta V_i}{V}} \\ &= \prod_{i=1}^n e^{-\Delta N_{Li}}. \end{aligned} \quad (22)$$

根据靶学说思想, 此处的 $e^{-\Delta N_{Li}}$ 的意思是第 i 个微小部分为敏感靶点, 在第 i 个敏感位点上不发生致死事件的概率为 $e^{-\Delta N_{Li}}$ 。那么 $\prod_{i=1}^n e^{-\Delta N_{Li}}$ 表示, 以上分割的 n 个微小部分的每一个都是敏感位点, 细胞存活概率是这 n 个微小部分的任何一个都不发生致死事件的概率。(8a) 式实质上认为细胞核中的每一点均为敏感位点, 这与实验事实是完全不符的。

4 计算方法上的问题

4.1 关于 X 射线照射下的细胞存活曲线

LEM 假定除了局部剂量分布的差异之外重离子与 X 射线照射没有任何机制上的差别, 利用已知的 X 射线照射下的细胞存活数据计算未知的重离子照射下的细胞存活率。已知的 X 射线存活数据是计算的基准数据, 对同种细胞而言, X 射线照射存活数据是同一的。如果这个基准数据的可靠性和同一性得不到保证, 那么计算结果毫无意义。

LEM 在引入 $D=D_i$ 的分割点后, 将 X 射线存活曲线的数学模型处理为

$$S = \begin{cases} e^{-(aD+bD^2)}, & D \leq D_i \\ S_i e^{-s(D-D_i)}, & D > D_i \end{cases} \quad (23)$$

的分段函数。其中 a 和 b 为通过拟合 X 射线存活曲线的实验数据得到的参数, D_i 为线性平方曲线与尾部直线的分割点, s 为 $D=D_i$ 点处曲线 $\ln S = -aD - bD^2$ 的切线斜率, S_i 为 $D=D_i$ 时细胞存活率。这个分割点是对 LEM 特有的处理, 这样的处理存在两个致命的问题: (1) 根据什么来确定这个分割点; (2) 分割点以后的尾部直线还是已知的 X

射线存活数据吗? 然而, Scholz 等人在文献 [1—4] 中都没有对 D_i 意义和取值依据作任何的说明。

我们注意到: Scholz 等 [2] 在计算 0.76 MeV 质子照射 V79 细胞存活曲线时采用的是 Folkard 等 [5] 实验测定的 X 射线照射细胞存活曲线, $D_i=17$ Gy; 而在计算 0.88 MeV 质子照射 V79 细胞存活曲线时采用了 Belli 等 [6] 实验测定的 X 射线照射细胞存活曲线, $D_i=12$ Gy。即: 计算同种粒子照射同种细胞的存活曲线时采用了两条不同的 X 射线照射细胞存活曲线作为基准; 同时两条 X 射线照射细胞存活曲线中的分割点 D_i 的取值相差 5 Gy, 并且都超过了实验的最大剂量 (Folkard 等人的实验最大剂量为 8 Gy, Belli 等人的实验最大剂量为 6 Gy)。这表明: Scholz 等人选择 X 射线照射细胞存活曲线及其分割点 D_i 时是随意的。

图 1 给出了根据 Scholz 等 [2] 的数据画出的 X 射线存活曲线, 其中 $D_i=17$ Gy 是 Scholz 等人的取值。很显然, D_i 取不同值时, 尾部直线存在显著的差异, 尤其是当剂量大于 40 Gy 以后各曲线之间的差别在 2 个量级以上, 并且 $D > D_i$ 以后的部分都不是实测数据。任意地选定分割点 D_i , 将导致 $D > D_i$ 以后部分的 X 射线存活数据的任意改变。 D_i 的取值将影响重离子细胞存活率的计算结果。

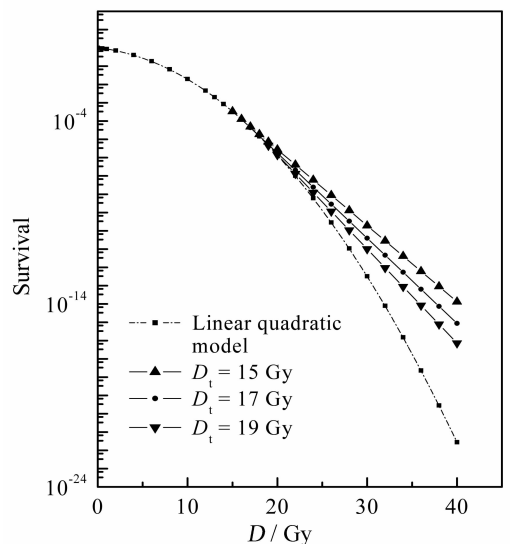


图 1 文献 [2] 中 Scholz 等人采用的 X 射线照射 V79 细胞的存活曲线
 $D_i=17$ Gy 是 Scholz 的取值。

为了估算不同的 D_i 取值得出的计算结果的差异程度, 我们在 D_i 取不同值时对 LEM 进行了计算

检验。图 2 给出了以 $D_t=12$ Gy 时的计算结果为基准, 不同的 D_t 取值所得计算结果的相对比值。从图 2 可以明显地看出, D_t 的取值越大, 计算得到的 $RBE_{80\%}$ 越大。

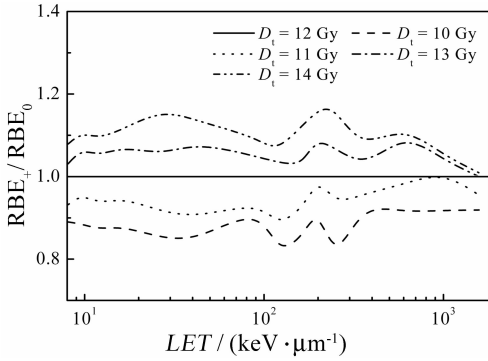


图 2 不同 D_t 时计算的 $RBE_{80\%}$ 的差异程度
 $D_t=12$ Gy 是 Scholz 的取值。

LET 不同时结果的差异程度不同, LET 在 0—800 keV/ μ m 的范围内, $RBE_{80\%}$ 的计算结果差别都在 5% 以上。 LET 在 100—300 keV/ μ m 的范围内, D_t 取值 10% 的变化相应地 $RBE_{80\%}$ 的计算结果差可达 10%, D_t 取值 20% 的变化相应地 $RBE_{80\%}$ 的计算结果差可达 20%。这表明在 LEM 中计算结果对 D_t 取值存在严重的依赖性, 不同的 D_t 取值将得出显著不同的计算结果。

4.2 重离子径迹中的剂量分布

LEM 中, 采用的重离子径迹的剂量分布函数^[2]如下:

$$D(r) = \begin{cases} \frac{\lambda LET}{r_{min}^2}, & r \leq r_{min} \\ \frac{\lambda LET}{r^2}, & r_{min} < r \leq r_{max} \\ 0, & r > r_{max} \end{cases} \quad (24)$$

其中, λ 为待定参数; LET 为线传能密度 (keV/ μ m); r_{max} 为径迹的最大半径, 由 Scholz 选定的经验式^[2]给出; r_{min} 是为了避免 $r=0$ 处剂量趋于无穷, 引入的一个最小半径 r_{min} , 在文献[2]中取值为 10 nm。

首先, 在重离子能量较低 (<0.5 MeV/u) 的条件下, 当 Scholz 选定的经验式^[2]给出的径迹的最大半径 $r_{max} < 5$ nm 时, 由于 LET 这个概念本身的定义范围的模糊性, (24) 式的径迹剂量分布函数毫无意义。其次, r_{min} 的取值显著地影响待定参数 λ 的取

值和径迹剂量分布曲线的形状。图 3 为根据 (24) 式画出不同 r_{min} 取值的 0.76 MeV 的质子径迹剂量分布曲线。如图 3 所示, 不同的 r_{min} 取值对应的径迹剂量分布明显不同, 最小半径 r_{min} 的取值越大, 径迹中心部位的剂量越小。

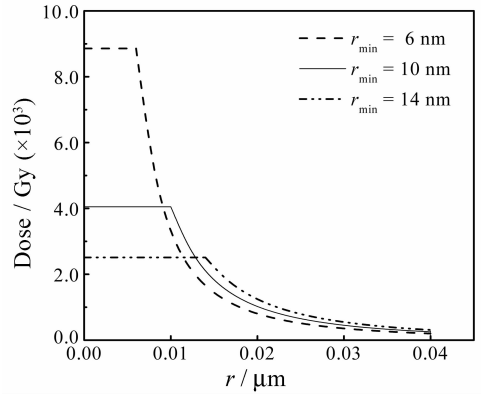


图 3 不同 r_{min} 取值的 0.76 MeV 质子径迹剂量分布
 $r_{min}=10$ nm 是 Scholz 的取值。

为了评价不同的 r_{min} 取值对计算结果的影响, 我们在 $D_t=12$ Gy (Scholz 的取值) 时, 分别对最小半径 $r_{min}=6, 10$ 和 14 nm 的情形进行了计算检验。图 4 给出了以 Scholz 等人 $D_t=12$ Gy 和 $r_{min}=10$ 时的计算结果为基准, 不同的 r_{min} 取值所得结果的相对比值。从图 4 可以看出, 最小半径的取值对计算结果存在影响。 LET 不同时最小半径的取值对计算结果的影响程度不同, 但总体上表现出最小半径

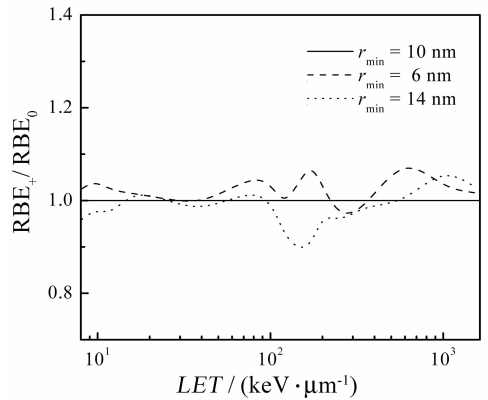


图 4 最小半径不同时 $RBE_{80\%}$ 计算结果的差异

的取值越大 RBE 越小的特征。 LET 在 100—300 keV/ μ m 的范围内差别较大, 最大可达 18%。最小半径的取值越大 RBE 越小的特征与图 3 所示的最小半径的取值越大径迹中心部位剂量越小变化的特征是一致的, 表明 LEM 中最小半径以内的径迹中

心部位的剂量对计算结果具有主导作用。

必须特别指出的是,从图 3 可以看出, $r_{\min}=10$ nm (Scholz 的取值) 时 $r=r_{\max}$ 处的剂量为 555 Gy, 这是径迹剂量分布中的最小剂量。因此, 在 LEM 的 (8a) 式中, $\ln S_X(D_L)$ 中的局部剂量或者 $D_L=0$, 或者 $D_L \geq 555$ Gy ($\gg D_i$)。结合 (23) 式的 X 射线照射细胞存活曲线考虑, 在 LEM 的计算中, 根本就不可能用到 X 射线照射细胞存活曲线的 $D \leq D_i$ 的部分, 只使用了 $D > D_i$ 的直线部分。前面已经指出: $D > D_i$ 的尾部直线部分不是实测数据, 随着选定的分割点 D_i 的不同可以随意改变。事实上, 细胞致死实验中最大照射剂量不大可能达到 10 多个 Gy 以上。因此可以说, 在 LEM 中采用 X 射线存活曲线的线性平方模型只是一个假象, 实际上没有依据实验测定的 X 射线照射下的细胞存活曲线, 而是任意选定分割点 D_i 后构造出来的直线来计算重离子照射下的细胞存活曲线。作为计算基准的 X 射线照射下的细胞存活曲线竟是一条任意确定的直线, LEM 的计算结果还能是可靠的吗?

5 结束语

我们从能量守恒定律和剂量的定义出发, 分析了 LEM 理论框架和计算方法, 评价了该模型中两个主要参数 D_i 和 r_{\min} 在模型计算中所起的作用及其对计算结果的影响。

对 LEM 理论框架的分析研究表明: 该模型忽视了宏观剂量与局部剂量的关系, 导致在采用直线型 X 射线存活曲线的情形下, 相同的宏观剂量 D 下重离子照射与 X 射线照射的细胞存活率相同这样的与实验事实相背的结果。在宏观剂量与局部剂量关系的约束下, 该模型的 (4a) 和 (6a) 式是不能自洽的。该模型的 (8a) 式实质上认为细胞核中的每一点均为敏感位点, 这与实验事实是完全不符的。在计算方法上, LEM 对 X 射线照射细胞存活曲线和重离子径迹中的剂量分布的处理都存在任意性。对

X 射线照射细胞存活曲线的处理中, 引入了一个意义完全不明和取值随意的参数 D_i , 通过任意的 D_i 取值构造一条任意的直线型 X 射线细胞存活曲线, 并在计算中以这条任意的直线型 X 射线细胞存活曲线作为计算的基准。在重离子径迹中的剂量分布处理中, 引入了最小径迹半径 r_{\min} 。最小半径 r_{\min} 的取值, 直接影响到径迹径向剂量分布的具体形状和数值的大小。我们的检验计算的结果表明: RBE 的计算结果依赖于参数 D_i 的取值, D_i 取值的任意性将导致 RBE 计算结果的任意性。LET 在 100—300 keV/ μm 的范围内, D_i 取值 10% 的变化相应地 RBE 的计算结果差可达 10%, D_i 取值 20% 的变化相应地 RBE 的计算结果差可达 20%。最小半径以内的径迹中心部位的剂量对 RBE 的计算结果具有主导性影响, 总体上表现出最小半径的取值越大 RBE 值越小的特征, LET 在 100—300 keV/ μm 的范围内差别较大, 最大可达 18%。

LEM 的目的在于为重离子治疗计划的制定提供可靠的 RBE 值。但是我们的研究表明, 该模型不能提供可靠的 RBE 值, 在重离子治癌临床实验中, 采用该模型提供的 RBE 计算值来制定治疗计划将是不太妥当的。

参考文献 (References):

- [1] Scholz M, Kraft G. Radiation Protection Dosimetry, 1994, **52**: 29.
- [2] Scholz M, Kraft G. Adv Space Res, 1996, **18**(1/2): 5.
- [3] Scholz M. Neutron Radiobiology, 1996, **83**(S1): 50s.
- [4] Scholz M, Kellerer A M, Kraft-Weyrather W, et al. Radiat Environ Biophys, 1997, **36**: 59.
- [5] Foldard M, Prise K M, Vojnovic B, et al. International Journal of Radiation Biology, 1989, **56**: 221.
- [6] Belli M, Cera F, Cherubini R, et al. International Journal of Radiation Biology, 1993, **63**: 331.

Disfigurement of Scholz-Kraft's Local Effect Model for Calculation of Cell Survival After Heavy-ion Irradiation^{*}

WEN Xiao-qiong¹⁾, LIU Rui-jian, YIN Li-yong

(*State Key Laboratory of Material Modification by Laser, Ion and Electron Beams in Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China*)

Abstract: Scholz-Kraft's Local Effect Model (LEM) for the calculation of cell survival after heavy-ion irradiation was briefly introduced. Basing on the energy conservation law and the definition of the dose, the disfigurement of LEM in theoretical framework and methods was discussed. Two artificial parameters were found in LEM, and the result obtained from this model seriously depends on these two parameters.

Key words: cell survival; track structure; local dose

* Received date: 3 Apr. 2006; Revised date: 15 Jan. 2007

1) E-mail: wenxq@dlut.edu.cn