

离子束辐照下微生物、植物组织 存活模型的研究*

邵春林 余增亮

(中国科学院等离子体物理研究所 合肥 230031)

摘要 从低能离子辐照的能量沉积、质量沉积和电荷交换三要素出发,认为质、荷效应对 DNA 具有间接的辐射保护作用,推导出了一个描述低能离子辐照下生物体的存活率公式,给出了典型曲线,并运用该公式对一些实验资料进行了很好的数据拟合。通过反证法,对质量沉积产物对 DNA 具有损伤作用的假设提出质疑,进一步证明了所建模型之立论基础的可靠性。

关键词 离子束, 辐照, 存活模型

从低能离子生物学于 80 年代中期建立以来的绝大多数实验研究表明,低能离子辐照下微生物、植物细胞、组织及其种子的存活率剂量效应曲线均呈特殊的“马鞍型”,即随着辐照剂量的增大,存活率呈先减小后增大再减小的趋势。已有的细胞生物学存活模型,包括各种生物物理模型和修复模型^[1-4]所给出的存活率都是随剂量 D 的增加而递减,且只具有线性或肩型的存活曲线,无法解释“马鞍型”存活曲线。

低能离子辐照的这种特殊的生物效应与辐射的本质特性有关。虽然低能离子的射程较短,但干燥生物组织内存大着许多对离子来说完全“透明”的微孔,大量注入离子通过溅射等作用使原来闭塞的孔隙连通,使后来的离子可在生物体内穿越较长的距离,达到与遗传物质发生相互作用的目的^[5]。一方面,一定剂量的注入离子所具有的能量效应将引起 DNA 链的断裂^[6],导致生物体的损伤和细胞的死亡;另一方面,注入离子的质量和电荷将沉积在生物体内,并可与其中的分子、离子发生反应。实验发现,注入 N^+ 能够与生物碱基^[7]、氨基酸^[8]、以及植物种子中的某些成分^[9]发生反应,产生新的含氮化合物,如形成新的氨基^[10]、产生含氮杂环化合物等;同时, N^+ 注入生物分子、 Ar^+ 注入植物细胞可分别引起它们负电性的显著变化^[11,12]。因此,低能离子辐照具有能量沉积、质量沉积和电荷交换三方面的效应。

能量效应是所有辐射所共有的,那么质、荷效应应与上述低能离子生物效应的特殊性有关。我们在综合考虑低能离子辐照的能量传输、质量沉积和电荷交换三种因素协同作用的基础上,建立了关于离子束辐照下生物体的存活模型——能量、质量、电荷协同效应模型(简称为 EMC 模型),并以此对现有的实验资料进行了分析。

1 EMC 模型的基础

低能离子辐照具有能量、质量、电荷三重作用,可产生多种生物效应。我们的 EMC 模型建立在以下假设之上。

* 国家自然科学基金资助项目

收稿日期: 1996-06-10, 修回日期: 1996-11-08

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

(1) 荷能离子的能量沉积可引起生物体内 DNA 链的籽裂, 且 DNA 双链断裂是辐射引起的各种生物效就中最基本的损伤, 它受到辐射当时所处细胞环境的影响, 细胞内环境对这种损伤具有一定的生化修复作用, 如光修复、切除修复和重组修复等, 这一点与双链断裂学说相一至致

(2) 注入离子慢化后以一定的几率与生物分子发生反应, 并键合成新的物质沉积在生物体内, 影响 DNA 的辐射损伤。如果质量沉积产物具有与 DNA 竞争 OH 等自由基的能力, 将起到保护 DNA 的作用。另外, 注入氮、氩等离子还可通等自身的键合形成气体分子, 充斥于生物体细胞内, 使其含氧量大大减少, 从而减小辐射时可能存在的氧效应, 提高存活率

(3) 荷能离子在注入生物体时, 其正电荷将通过电中和反应和电荷转移反应而影响到 DNA 的损伤、断裂情况。如辐照能量可在 DNA 的 G、T 碱基上产生 G 和 T 自由基, 通过电子传递, 其中约有 35%~40% 的这种损伤可转化为 DNA 链的断裂 [13], 如果注入离子的电荷吸收 G 和 T 间所传递的电子, 或将自身的正电荷转移给 T 自由基, 使之成这中性的, 无疑将会减少 DNA 链的断裂数。另一方面, 注入离子的正电荷还可吸收辐照产生的 δ 电子。由于 δ 电子不仅可促使辐照产生的激发态的水分子分解为 OH 和 H 自由基, 而且还能引起水分子的再次电离激发, 引发更多的 OH 自由基^[14]。因此, 一旦 δ 电子被注入离子的正电荷吸收, 将大减少 OH 自由基的产生数, 从而减小辐照对 DNA 的损伤。

(4) 质量沉积效应和电荷交换效应的大小与发生上述反应的几率成正比。

以上第二、第三两点的实质是指: 注入离子的质、荷因素对因其能量作用产生的辐射损伤具有物理化学阶段的修复作用。这是其它模型所未曾考虑的。如靶学说及在其基础上建立起来的模型, 有这样一个先决条件: 即必须保证在电离辐射产生的活泼基团发生进一步的反应之前, 不发生重新俘获电子的回复反应, 也就是说不发生化学过程的修复。

另外, 注入离子的质、荷效应应该局限在一个辐射敏感靶体积内。由于辐射产生的 OH 等活性自由基的扩散距离很短, 仅 1.0~3.0 nm, 只有产生于 DNA 上或其附近的某一敏感靶体积 (其直径小于 6 nm) 内的 OH 自由基能引起 DNA 链的断裂。因此, 只有发生于敏感靶体积内的质量沉积效应和电荷交换效应才能通过改变 OH 自由基的量而发挥其生物效应。

2 EMC 模型的存活公式

2.1 荷能离子作用下 DNA 的双链断裂数

根据双链断裂学说, 在剂量 D 的注入离子能量作用下, 细胞中 DNA 双链断裂数 N_0 为

$$N_0 = \alpha D + \beta D^2 \quad (1)$$

式中, α 为单位剂量下一次电离辐射事件所引起的 dsb (双链断裂) 数, β 则为单位剂量下由两个相互独立的 ssb (单链断裂) 引起的 dsb 数。

由于低能离子辐射具有质量沉积效应和电荷交换效应, DNA dsb 的实际数目 N 将比 N_0 小。根据 EMC 模型的理论基础, 质、荷效应对 DNA 的作用是间接的, 因而不能同时作用于两条 DNA 单链, 只能通过减少 ssb 数目来减少 dsb 的数目, 即只能使 (1) 式中的 βD^2 项减小。

首先考虑质量沉积效应对 βD^2 项的影响。质量沉积效应的大小与质量沉积产物分子数, 尤其是与能有效地保护 DNA 的产物分子数成正比。由于敏感靶体积内的靶分子如碱基、氨基酸

等的数量是有限的, 能与注入离子反应并主生质量沉积产物的分子数就更有限。并且, 质量沉积产生在形成后还有一定的几率受到后续注入离子的损伤, 这就意味着质量沉积产物分子数应有一最大值, 在一定剂量后, 产物分子数还可能减少。下面进行的定量分析亦说明了这一结果。

若质量沉积产物分子是由注入离子慢化后与某靶分子的一击作用而形成的, κ 为每个注入离子一次击中该靶分子的几率, 则根据泊松分布, 剂量 D 的离子注入下一次击中该靶分子的几率 f 为

$$f = \kappa D \exp(-\kappa D) \quad (2)$$

设敏感靶体积内的靶子数为 n , 且发生在各个靶分子上的质量沉积反应事件、电荷交换事件是相互独立的。如果注入离子击中该靶分子后发生质量沉积反应的几率为 f_1 , 则在剂量 D 的离子辐照下, 在敏感靶体积内所能产生的质量沉积物分子数 M 为

$$M = f f_1 n = n f_1 \kappa D \exp(-\kappa D) \quad (3)$$

若质量沉积产物中能对 DNA 起保护作用的有效分子份额为 r , 平均每个这样的有效分子能减少 r_1 个活性 OH 自由基, 假设每个 OH 自由基引起的 dsb 数占总的二次电离辐射事件引起的 dsb 数即 βD^2 的平均份额为 r_2 , 则由质量沉积效应引起的 dsb 减少数 N_m 为

$$N_m = r m r_1 r_2 U D^2 = r n \kappa f_1 r_1 r_2 U D^3 \exp(-\kappa D) = m D^3 \exp(-\kappa D) \quad (4)$$

式中, $m = r n \kappa f_1 r_1 r_2 U$ 反映了质量沉积效应对 dsb 的影响。

类似地, 电荷交换生物效应也只影响到 N_0 中的 $U D^2$ 项。若 f_2 是注入离子击中靶分子后与其发生电荷交换反应的平均几率, 则在剂量 D 的离子注入下发生电荷交换反应数 j 为

$$j = f_2 f n = n f_2 \kappa D \exp(-\kappa D) \quad (5)$$

如果每个电荷交换反应能减少 j_1 个能引起 OH 自由基的基团, 而每个该种基团平均能产生 j_2 个 OH 自由基, 则由于电荷交换反应而减少的 dsb 数目 N_e 为

$$N_e = j j_1 j_2 r_2 U D^2 = n \kappa f_2 j_1 j_2 r_2 U D^3 \exp(-\kappa D) = e D^3 \exp(-\kappa D) \quad (6)$$

式中, $e = n \kappa f_2 j_1 j_2 r_2 \beta$, 反映了电荷交换效应对 dsb 的影响。

由此可知, 因注入离子的质、荷效应而引起的 DNA dsb 减少数 N_1 为

$$N_1 = N_m + N_e = (m + e) D^3 \exp(-\kappa D) = \gamma D^3 \exp(-\kappa D) \quad (7)$$

式中, $\gamma = m + e$, 反映了质、荷效应对 dsb 的影响。因此, 综合考虑低能离子辐照的能量效应、质量沉积效应和电荷交换效应后, 在剂量 D 的荷能离子辐照后, 生物体细胞中实际的 DNA dsb 数 N 为

$$N = N_0 - N_1 = a D + U D^2 - \gamma D^3 \exp(-\kappa D) \quad (8)$$

(8) 式即是低能离子辐照存活模型的最基本公式, 但荷能离子辐照所引起的这些 DNA 双链断裂还将受到细胞修复系统的部分修复。

2.2 生物体存活率与 DNA 双链断裂的关系

生物体细胞自身增殖力的丧失与 DNA 双链断裂数直接相关。设 f_p 为 DNA 双链断裂中未修复部分的比例, p_0 为未修复的 DNA 双链断裂引起生物体细胞增殖死亡的几率, 则根据泊松分布, 生物体存活率 S 为

$$S = \exp(-p_0 f_p N) = \exp\{-P [a D + U D^2 - \gamma D^3 \exp(-\kappa D)]\} \quad (9)$$

式中, $P = P_0 f_0$, 意味每一个诱发的 DNA 双链断裂引起细胞增殖死亡的平均几率。

(9) 式即是所求的表达低能离子辐照下生物体存活率与离子注入剂量之间关系的定量方程式

2.3 EMC模型存活曲线分析

考虑了注入离子的能量、质量和电荷三要素的 EMC 模型具有不同于其它模型的存活曲线。(9) 式指数项中前两项是双链断裂学说所具有的，它给出的曲线是线性的或肩型的，但立方项的存在将改变这种曲线形状。图 1 给出了 T、U 不变的情况下，不同 V、κ 值所对应的曲线，其中包括了肩型曲线和“马鞍型”曲线。由图 1 可以看出，κ 值越小 (pT、pU、pV 一定)，pV 值越大 (pT、pU、κ 一定)，即 pVκ 值越大，曲线的“马鞍型”效应就越明显。由此可见，V 与 κ 在立方项中的作用是协同的。特别是当 V 值趋向于零，或 κ 值足够大时，存活曲线方程中的立方项的作用将减小，此时 (9) 式所给曲线将变成双链断裂模型的肩型曲线，如图 1 (a)、(b) 中最左面的几条曲线。

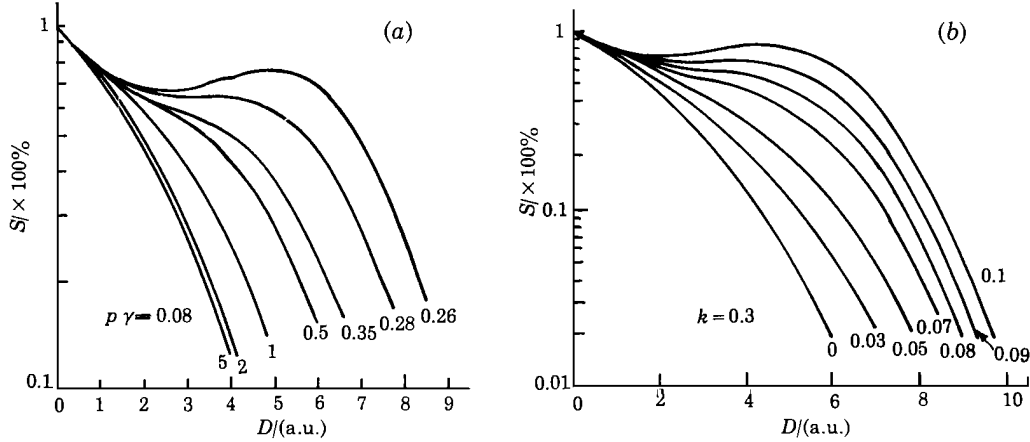


图 1 $p\alpha=0.25$ 及 $p\beta=0.07$ 情况下由方程式 (9) 表示的存活曲线
(a) 不同的 κ , (b) 不同的 $p\gamma$

Fig. 1 The special curves of equation (9) with $p\alpha=0.25$ and $p\beta=0.07$
(a) For different κ values, (b) For different $p\gamma$ values

另外，(9) 式的初始斜率为 $-T\alpha$ ，但没有固定的末端斜率，这与双链断裂学说的情形相一致。在一定的参数下，(9) 式所给出的存活曲线在达到峰值后迅速减小，在高剂量段时立方项的影响很小，曲线又是二次型的了。可见，低能离子注入的质、荷效应在使生物体失活的中等剂量段最为明显。

以往的存活模型中与 EMC 模型数学形式上最相近似的是“立方”模型^[3]，它给出如下的存活方程

$$S = \exp(-T D - U D^2 + V D^3) \tag{10}$$

(10) 式虽亦能给出“马鞍型”存活曲线，但它是一个非收敛函数，当 $D \rightarrow \infty$ 时，存活率 $S \rightarrow \infty$ ，这显然是不正确的，体现出了“立方”模型的局限性。除此而外的许多辐射生物学模型，如使用较多的二元作用理论模型、双链断裂模型以及多种修复模型所给出的存活曲线，包括非同步化细胞的存活曲线，都是随剂量增大而递减的，最多只能给出肩型的存活曲线。

3 实验资料的数据拟合

为了验证 (9) 式的可靠性，我们自编了一套计算程序，对大量低能离子辐照存活率的数

据以最小二乘法进行了曲线拟合, 在此给出部分拟合结果 除特别注明外, 拟合参数 $p\alpha$ 、 κ 的单位是 D_0^{-1} , $p\beta$ 、 $p\gamma$ 的单位分别是 D_0^{-2} 、 D_0^{-3} , 其中 $D_0=10^{19}m^{-2}$ 。

图 2给出了棉花花粉母细胞在 30keV、15mA Ar^+ 离子束辐照后的存活率^[13]及枯草杆菌在 30keV、20mA N^+ 离子束辐照下的存活率 [15], 它们在剂量 1.5 D_0 左右时有明显的峰区, 两者都可由离子束辐照的 EMC模型以 (9) 式很好地进行拟合。

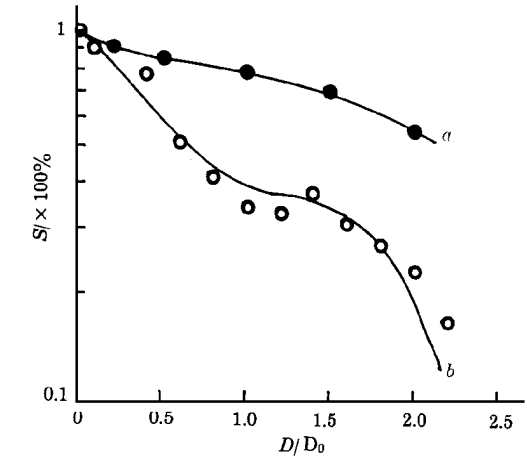


图 2 30keV Ar^+ 离子束辐照下棉花花粉母细胞 (a) 及 30keV N^+ 离子束辐照下枯草杆菌 (b) 的存活率及其拟合曲线
a. $pT=0.459$, $pU=3.25\times10^{-5}$, $pV=1.348$, $k=1.76$ b. $pT=1.21\times10^{-2}$, $pU=4.01$, $pV=5.264$, $k=0.534$

Fig. 2 Survival rates of the cotton pollen mother cells irradiated by 30keV Ar^+ ion beam (a) and those of the bacillus subtilis irradiated by 30keV N^+ ion beam (b)

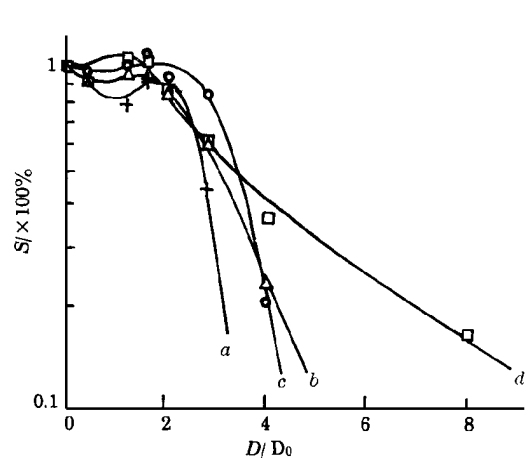


图 2 N^+ 离子束辐照后棉花组织下胚轴 (a)、茎尖 (b)、花药 (c)、子叶 (d) 的存活率及其拟合曲线
a. $p\alpha=2.1\times10^{-3}$, $pU=1.132$, $pV=1.546$, $\kappa=0.513$; b. $pT=0.315$, $pU=0.038$, $pV=1.013$, $\kappa=1.284$; c. $pT=1.46\times10^{-4}$, $pU=0.247$, $pV=0.413$, $\kappa=0.593$; d. $pT=0.227$, $pU=2.4\times10^{-5}$, $pV=3.206$, $\kappa=2.243$

Fig. 3 Survival rates of the cotton organs, including plumular axis (a), stem top (b), anther (c) and leaf (d), irradiated by N^+ ion beam

不仅单细胞、微生物等较简单生物体在离子束辐照下具有特殊的“马鞍型”存活曲线, 一些较复杂的生物体亦具有此类存活曲线。如一些棉花组织, 包括子叶、下胚轴、茎尖和花药等^[16], 在 30keV N^+ 离子束辐照后的存活率同样可由 (9) 式进行拟合 (如图 3), 它们的峰值多在 1.5-2.0 D_0 , 当剂量大于 2 D_0 后存活率迅速下降。

剥去外壳的棉花种子和小麦种子的低能 N^+ 离子束辐照下分别具有如图 4所示的存活率^[17-18], 它们都不符合指数失活规律。图 4给出了以 (9) 式进行拟合的结果。

Yang^[19]用 7MeV/u的 Ar^+ 离子束辐照玉米种子, 并给出了图 5所示的存活率数据, 很明显, 30Gy时的存活率大于 20FGy时的存活率, 这似乎是不可思议的。但如果认为 Ar^+ 离子束辐照时与玉米种子胚部细胞内的遗传物质发生了电荷交换反应, 就可用 EMC模型对此存活率作出较好的曲线拟合 (见图 5)。

从以上实验资料及拟合结果可以看到, 不同种类、不同能量、不同剂量率的离子束辐照下的生物体, 从简单到复杂、从细胞到植物种子, 其存活率剂量效应或多或少具有“马鞍型”特征, 这是低能离子辐照的一个特殊现象。我们建立的 EMC模型, 对上述实验结果作出

了较好的解释和数据拟合，说明将 EMC模型应用于低能离子生物学是合适的、可行的。

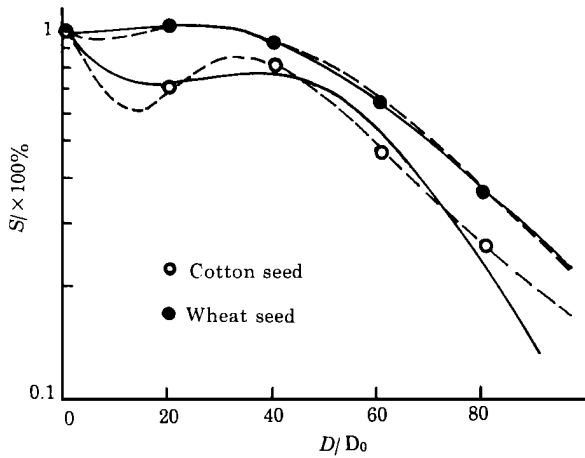


图 4 N^+ 离子束辐照后棉花、小麦种子的存活率及其拟合曲线
 $\bigcirc pT=0.035, pU=1.18\times 10^{-8}, pV=1.18\times 10^{-4}, \kappa=0.047$; $\bullet pT=3.13\times 10^{-3}, pU=1.36\times 10^{-4}, pV=7.43\times 10^{-5}, \kappa=0.071$;
—由方程 (13) 拟合所得曲线
Fig. 4 Survival rates of the cotton seeds and the wheat seeds irradiated by N^+ ion beam
—Curves fitted by Equation (13)

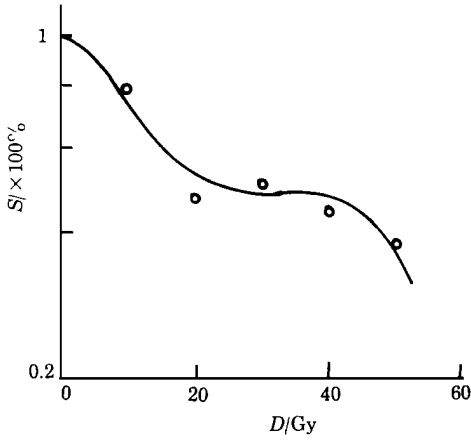


图 5 7MeV /u Ar^+ 辐照玉米种子的存活率及其拟合曲线
 $pT=2.5\times 10^{-4} Gy^{-1}, pU=5.0\times 10^{-4} Gy^{-2}, pV=2.6\times 10^{-4}, Gy^{-3}, \kappa=2.2\times 10^{-3} Gy^{-1}$
Fig. 5 Survival rates of corn seeds irradiated by 7MeV /u Ar^+ ion beam

4 质量沉积产物具有 DNA 保护作用的反证

虽然已知离子注入生物材料时具有质量沉积和电荷交换作用，但到目前为止，还没有得到这些作用对体内 DNA 具有损伤保护作用的直接实验证据。这此我们不妨采用反证法。我们先假设注入离子的质量沉积和电荷交换对体内 DNA 具有损伤作用，如同 DNA 损伤剂。这样，低能离子辐照对 DNA 的损伤效应便是能量作用与质量沉积产物损伤作用的协同，相当于在电离辐射的同时给细胞加上了化学损伤剂。这种情况下，Chadwick 等^[2]认为细胞存活率可由下式描述

$$S= \exp [-P (TD+ UD^2+ ZXD+ WX+ XX^2)] \tag{11}$$

式中，X 为损伤剂的剂量；W、X 的意义类似于 T、U，只是对于 DNA 损伤剂而已；η 为辐射剂量与损伤剂剂量的协同损伤系数。

离子注入时，X 代表了质量沉积产物的量，是离子注入剂量 D 的函数。设 b 为质量沉积产物中能对 DNA 产生损伤的分子数比例，则根据 (2) 式有

$$X= bM= bnkf_1kaD\exp (-kD) = hD\exp (-kD) \tag{12}$$

式中， $h= bnkf_1$ 。将 X 代入 (11) 式并整理得

$$S= \exp \{-p [TD+ UD^2+ (VD+ \lambda D^2) \exp (-\kappa D) + dD^2 \exp (-\kappa D)]\} \tag{13}$$

式中， $\gamma= \partial h, \lambda= \eta h, \rho= \epsilon h^2$ 。这便是假设离子注入的质量沉积产物具有 DNA 损伤作用时所推得的生物体存活率公式。

我们以式 (13) 对上一节中给出的实验资料进行数据拟合，发现该式能对这些实验数据

作出较好的数学拟合。这里, 我们仅给出对棉花、小麦种子存活率的拟合结果 (见图 4 中虚线)。拟合参数如下: 小麦种子: $pT=3.27 \times 10^{-4}$, $pU=2.06 \times 10^{-4}$, $pV=8.5$, $p\lambda=-0.39$, $p_d=1.55 \times 10^{-2}$; 棉花种子: $pT=2.2 \times 10^{-3}$, $pU=1.48 \times 10^{-4}$, $pV=0.021$, $p\lambda=-2.04 \times 10^{-3}$, $p_d=-5.05 \times 10^{-5}$ 。所有拟合有一个共同现象, 即拟合参数 V 、 λ 、 d 中有负值, 如小麦种子存活曲线拟合中的 λ , 棉花种子存活曲线拟合中的 λ 、 d 均为负数。这意味着质量沉积产物具有与假设相反的作用, 即具有对 DNA 的保护作用, 与 EMC 模型的假设相一致。这就从反面进一步支持了 EMC 模型的立论基础。

5 讨 论

我们所建立的低能离子生物学模型属生物物理模型, 它以双链断裂学说为基础, 但又明显地不同于该学说。主要不同点在于: 双链断裂学说虽考虑了生物系统的修复作用, 但这种生化修复是在 DNA 损伤后的修复, 并没有考虑辐射因子可能具有的物理化学修复——它是在 DNA 损伤前对可能进一步引起 DNA 损伤的物化因子的修复。上述注入离子的质、荷效应即是一捉物理化学修复, 它在辐射能引起的部分直接因素发挥生物效应之前, 就将它们消除。在时间历程上, 经典辐射生物学模型所考虑的生化修复要比 EMC 模型的物化修复落后几个数量级。

细胞对辐射损伤的生化修复是由于细胞内存在修复酶的缘故^[4]。随着剂量的增大, 酶分子本身亦因受到损伤而逐渐枯竭, 修复作用将因此而逐渐达到饱和。而 EMC 模型的物化修复则是由注入离子引起的, 是外来因素在细胞内生物效应的体现。它与注入离子的能量、质量数、电荷数等有关, 且只有当质、荷等因素发生于细胞的敏感体积内时, 物化修复效应才能得到充分的发挥。

每一荷能离子辐照可引起多个电离事件, 但只有一次质、荷效应的机会, 因而离子束辐照的能量作用大于质、荷作用。能量作用引起的生物损伤, 仅靠注入离子的物化修复是不够的, 还需生物细胞自身修复系统的参与, 且这种损伤后的生化修复对细胞存活仍具有很重要的作用。

另一方面, 如果电离辐射 (如 γ 射线辐射) 没有质量沉积效应和电荷交换效应, (9) 式中的立方项将为零, 此时, 该方程转变为双链断裂学说的存活率方程。事实上, 我们曾对 γ 射线辐射下水稻种子的存活率以 (9) 式进行了曲线拟合, 拟合参数 γ 远小于 α 、 β , 趋近于零, 可见, EMC 模型可推广应用到一般的电离辐射所具有的肩型存活曲线。

参 考 文 献

- 1 Kellerer A M, Rossi H H. Radiat Res, 1988; **75** 471
- 2 Chadwick K H, Leenhouts H P. The molecular theory of radiation biology, New York, Berlin, Heidelberg, 1981
- 3 Tobias C A. Radiat RES, 1985; **104** S-77
- 4 Goodhesd D T, Radiat Res, 1985; **104** S-58
- 5 作增亮, 邵春林, 杨剑波. 安徽农业大学学报, 1994; **21** (3): 260
- 6 付烈振, 丘冠英, 杜海彪. 安徽农业大学学报, 1994; **21** (3): 275
- 7 邓建国. 荷能离子辐照若干机理研究, 博士论文, 中国科学院等离子体物理研究所, 1991
- 8 Yu Zengliang, Shao Chunlin. Radiat Phys Chem, 1994; **43** (4) 349
- 9 张正南, 邓建国. 安徽农业科学, 1989; **41** (3): 8
- 10 Huang Weidong, Yu Zengliang, Jian Xiangyu, et al. Radiat Phys Chem, 1996; **48** (3): 319

- 11 邵春林, 许安, 余增亮. 核技术, 1997 **20** (2): 70
- 12 Yu Zengling, Yang Jianbo, Wu Yuejin, *et al.* Nucl Instru Meth Phys Res, 1993; **B80/81** 1328
- 13 Cullis P M. Radiat Phys Chem 1986; **27** 93
- 14 夏寿萱主编. 放射分子生物学, 北京: 原子能出版社, 1992 33
- 15 邵春林, 吴跃进, 程备久, 等. 核农学报, 1995; **9** (1): 37
- 16 周立人, 程备久. 安徽农业大学学报, 1993; **21** (1): 7
- 17 程备久, 田秋元, 林毅, 等. 安徽农学院学报, 1991; **18** (2): 148
- 18 杨赞林, 甘斌杰, 金陵, 等. 安徽农学院学报, 1991; **18** (4): 282
- 19 Yang T C. The 20th Japan conference on radiation and radiostopes, Nov. 12-14, Tokyo, 1991

Studies on survial model for organism of plants and microbes irradiated by low energy ions

Shao Chunlin Yu Zengliang

(*Institute of Plasma Physics, The Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031*)

Abstract

Besides energy deposition (ED), mass deposition (MD) and charge exchange (CE) were also considered as important facors in the survival of organism undet low energy ion beam irradiation If was proposed that the MD and the CE have indirect effect of protecting DN A from damage, and then an equation of the EM C model describing the survival of organiam irradiated by low energy ion besm was deduced and some typical curves were given, With this equation, some expetimental data about survival were well fitted. In addition, the presumption that the MD product could damage DN A was questioned by the EM C model, thus further supporting the theortical basis of the EM C model.

Key words Ion besm, Irradiation, Survival model