

## 辐射生物学模型研究的进展

张纯祥

(中山大学物理系 广州 510275)

**摘 要** 根据 1992 年 Catlinburg 第 11 届微剂量学会议特点,本文简要介绍了放射生物学模型研究的进展。

**关键词** 微剂量学, 放射生物学模型。

电离辐射生物效应的研究,对辐射应用和辐射防护都有重要意义. 电离辐射与物质相互作用的主要特点,是初始能量传递事件过程的量子化,即能量吸收的不连续性和随机性. 辐射生物物理研究所面临的最关键问题,是如何解释对不同辐射在相同吸收剂量下所出现的不同生物效应. 当然,这与电离辐射在吸收物质中能量沉积的更精确物理描述有关,即径迹结构模型与计算<sup>[1]</sup>. 就是在暂不考虑辐射作用的生物模型的情况下,要找出能很好描述辐射本质的物理量. 同时,也与生物学系统的机制有关. 因此,针对所研究的生物学系统,提出一些简化的假定,从而建立生物物理模型解释和预言放射生物学的实验. 但是,由于生物学系统及过程的复杂性,目前存在的放射生物学模型<sup>[2]</sup>,都有一定的局限性. 所以,对放射生物物理模型的研究仍是十分重要的. 在第 11 届微剂量学会议上,关于放射生物学模型的报告和进展<sup>[3]</sup>主要有下列方面.

### 1 复合二元作用理论

微剂量学创始人之一,美国哥伦比亚大学的 Rossi<sup>[2]</sup> 在他的“细胞放射生物学作用的几何范畴”报告中认为,电离辐射的生物效应与被照射物质中的能量沉积点的空间分布有密切的关系. 这意味着多于一个分子的变化. 当考虑时间分布时,效应必需多于一个微剂量学的事件才能产生一个效应. 这就要求两

个相互作用事件的距离在几百个毫微米. “二元作用理论”(Theory of Dual Radiation Action 简称为 DRA)是对较高等生物体的辐射损伤提出的,在 1 微米大小直径的位点内,与比能( $Z$ )有关的两个分子的变化(称亚损伤 sublesions)的相互作用产生一个损伤. 测定两个亚损伤初始距离相互作用的实验发现,存在两种与亚损伤有关的距离,它们之间的差别大于一个数量级. 距离小的称单边损伤(cislesions),而距离较大的叫对边损伤(translesions). 此外,还发现亚损伤的产生与辐射品质有关,这就是说亚损伤也必需至少包含了两个分子的变化. 因此,可提出一个在较高等的生物体内细胞中的 DNA 特性相一致的机制. 这称为“复合二元作用理论”(Compound Dual Radiation Action 简称为 CDRA),它包括了解释由于与辐射品质有关的单个事件产生的双链断裂的简单二元辐射作用理论(SDRA). 用这一理论,得到细胞奇变的 RBE 比细胞死亡的 RBE 高.

### 2 细胞径迹结构模型的应用

Katz 和 Cucinotta<sup>[2]</sup> 介绍了应用 Katz 的径迹结构和细胞存活模型,研究太空中宇宙飞船所受宇宙射线和裂变核所致的辐射生物效应. 首先用细胞径迹结构模型,分析  $\gamma$  射线和原子序数 1~57 的离子照射生物样品所得到的放射灵敏参数 ( $E_0 = 68\text{Gy}$ ,  $\sigma_0 = 2.5 \times 10^{-9}\text{cm}^2$ ,  $k = 750$ ,  $m = 2$ ) 和 C3HT101/2 细胞

癌变的灵敏参数 ( $180\text{Gy}$ ,  $1.15 \times 10^{-9}\text{cm}^2$ ,  $750, 2$ ), 用于计算宇宙飞船 STS-42 飞行搭载的生物样品 *C. elegans* 太空放射生物效应. 其结果表明, 宇宙射线的辐射损伤水平不会因宇宙飞船的屏蔽增加而减小, 单个粒子产生的辐射损伤是主要原因. 然而, 质子和  $\alpha$  粒子的靶核碎片引起的辐射生物效应也是重要的. 计算还表明, 细胞诱变和细胞失活的 RBE 是相当的, 失活的细胞数是诱变细胞数的千分之一. 在存活的细胞中, 发现细胞诱变的几率是  $(1\sim 2)/10$  万. 以动物的组织为例, 每立方厘米的细胞数为  $10^9$ , 如果上述的灵敏参数可用于体内的话, 则在非太阳的活动期, 宇宙射线辐射所导致的每立方厘米的诱变细胞数为  $10^4$ . 如果认为辐射引起的 1 至 2 个细胞诱变会导致细胞癌变的话, 如白血病等, 则人体中能承受细胞诱变的几率不应超过  $10^{-9}$ .

### 3 DNA 断裂的间接作用模型

英国 St. Andrews 大学的 Watt<sup>[2]</sup>, 提出了一个电离辐射间接损伤产生 DNA 双链断裂的经验模型. 他认为: 在环境辐射水平的辐射场中, 产生的平衡谱沿单个带电粒子径迹引起的辐射效应, 必需区分直接效应和间接效应. 要确定哺乳动物细胞 DNA 损伤的间接贡献, 就必需研究不同浓度靶 (即单靶一次击中失活的运动学) 中, 从固态到液相的损伤转变, 这样便可分开直接和间接作用. 模型成功地得到浓度、自由基清除、剂量率和 LET 等失活的影响. 由于水自由基是哺乳动物细胞间接损伤的主要原因, 基于 Poission 分布几率和相同作用的基本假定, 可从酶的结果导出 DNA 的单链和双链断裂的几率.

### 4 改进的径迹结构模型

德国 GSI 实验室的 Scholz 和 Kraft<sup>[2]</sup> 提出了改进的径迹结构模型, 可用于计算重离子的失活截面. 该模型与 Katz 的细胞径迹结构模型<sup>[4]</sup> 有许多相似之处, 亦有本质的区别.

首先, 该模型是基于局部能量沉积来计算局部失活事件的几率, 在  $10\sim 1500\text{keV}/\mu\text{m}$  的 LET 范围内, 只用一个机制便可计算重离子的失活截面. 而 Katz 模型则考虑靶内的总能量沉积, 同时还引进了两种细胞的失活方式, 即离子失活和  $\gamma$  失活, 它们分别在低 LET 和高 LET 时起作用. 其次, Katz 模型中引入了一参数, 表示失活截面  $\sigma$  从低 LET 增至高 LET 值时有一坪区. 最后, Katz 模型中离子失活方式被认为是在细胞核内的一个亚结构内发生的, 因此, 计算得到的哺乳动物细胞的离子失活截面与实验值相差 9 倍.

该模型所需的基本数据是: (1) 在重离子径迹内, 径向剂量分布为  $D(r) \sim 1/r^2$ ; (2) X 射线辐照的存活曲线, 在高剂量时为指数下降, 低剂量时为肩型曲线; (3) 失活作用的灵敏靶的大小等于整个细胞核, 在细胞核内灵敏度是均匀的. 由 X 射线的存活曲线可给出总剂量  $D$  时的每个细胞核致死事件的平均数, 局部剂量  $D(r)$  产生一个致死事件的几率密度是上述平均数和细胞核总体积的比值. 该几率密度对径迹和细胞核重叠部分积分, 得到总失活几率. 模型可用实验测定的参数, 来描述重离子照射的如下结果:

1) 失活截面与 LET 的关系, 低 LET 粒子超线性增加,  $200\sim 1000\text{keV}/\mu\text{m}$  出现一个坪区, 在较高 LET 时出现  $\sigma$ -LET-hooks, 不同的生物体  $\sigma$ -LET-hooks 形状有差异; 2) 指数存活曲线到肩型曲线的过渡区, 与原子序数和 LET 有关; 3) 随着原子序数增加, RBE 最大值由  $50\sim 300\text{keV}/\mu\text{m}$  移动; 4) 在 X 射线和重离子的混合辐射场中, 重离子的辐射效应有所增强.

### 参 考 文 献

- 1 张纯祥. 核物理动态, 1993, 10(1)
- 2 Kiefer J. Quantitative Mathematical Models in Radiation Biology, Proceeding of the Symposium at Schloss Rauish-Hozhausen, FRG, July 1987

(下转 49 页)

## Theoretical calculation of Inelastic Neutron Scattering on $^{10}\text{B}$

Xie Wenfang

(Department of Physics, Zhongshan University, Guangdong Institute of Technology, Guangzhou 510275)

**Abstract** In this paper, we analysed the experimental data of reaction cross sections induced by fast neutron on  $^{10}\text{B}$  by using the direct nuclear reaction theory and the DWBA method. We obtained the results in agreement with experimental data and reported a set of parameters. Furthermore, by using the set of parameters we have calculated systematically the inelastic integrated cross sections and angular distribution of  $^{10}\text{B}(n, n')^{10}\text{B}^* 0.717 \text{ MeV}$  excited state for incident neutron energies from 7.54 MeV to 20.0 MeV. The calculation values are given for absent experimental data.

**Key Words** direct nuclear reaction model, DWBA method, parameter, integrated cross section, angular distribution.

(上接 51 页)

Abstract

4 Katz R. Nucl. Track. Det., 1978, 2: 1~28

3 The 11th Symposium on Microdosimetry 13 ~ 18  
September 1992, Gatlinburg, Tennessee(USA), Book of

## Progress in Radiobiological Models

Zhang Chunxiang

(Department of Physics, Zhongshan University, Guangzhou 510275)

**Abstract** This paper gives a report on progresses of radiobiological models according to the Eleventh Symposium on Microdosimetry held in Gatlinburg, Tennessee 1992.

**Key Words** microdosimetry, radiobiological models.