一种电离輻射致死的純死亡过程

王 宝 翰

(中国科学院微生物研究所，北京)

按照放射生物学中流行的“靶”的学說[1]，电离輻射的生物学效应是由于某些生物的特定分子內部产生了电离，或电离粒子經过某些特定的結构而产生的。但是靶的学說应用是有范围的，显然它不可能用来解释一切因輻射引起的生物学效应，这点在 Lea 的著作[1]中已講得很淸楚，能够运用靶的学說的一类效应是基于一次电离作用，用之来解释病毒鈍化，基因突变的产生和細菌的致死得到成功，但是运用这个学說决定于下述三个条件：

1. 受輻射影响的机体(或細胞)随輻射剂量增加的方式，当研究致死作用时，即要求存活曲綫为指数曲綫。

2. 一定剂量的效应与作用时的剂量强度，或与剂量的分散方式无关。

3. 基于一次电离型的效应与所用射綫波长或类型无关。

但是如果从随机过程中的純死亡过程理論[2,3]看来，亦能說明条件 1、2 的确切性，且能得到更强的結果，主要是机体致死数量的概率函数，期望値以及方差，所得結果与已有的实驗資料相比較，得出滿意的解释。

假設有一細胞羣体，实驗开始时处于不含氮物质或蒸餾水中，沒有分裂状态，自然的死亡因为很小而略而不計，又設用电离輻射綫照射該細胞羣体，由于种种因子的影响，經过某个固定剂量 D 后，重复試驗时可发現存活的机体数 $X(D)$ 是不同的。故 $X(D)$ 是依賴参数 D 的随机变量，輻射致死就可用随机过程来描述。

又我們認为下述条件成立：(1) 平稳性，即对任意 $K>0$、$S>0$ 在剂量区間 $(D、D+S)$ 內，因剂量 S 而杀死的細胞数 $X(D)-X(D+S)=K$ 的概率只与 S 有关，而与 D 无关，这个条件反映概率規律与剂量 D 的关系。(2) 当用一定剂量照射机体时，由于只是射綫对机体作用，可認为机体之間是无相互影响的，这即是說在 $(D、D+S)$ 內，K 个細胞死亡的概率与剂量 D 以前細胞死亡的情况无关，也表明在这 $(O、D)$、$(D、D+S)$ 內机体死亡的进程是互不影响而相互独立的。(3) 設在任一剂量区間內，細胞中的每一个在 ΔD 內死亡的概率为：

$$\mu\Delta D+O(\Delta D) \qquad (1)$$

式中 μ 是一个常数，其意义以后討論。又上式可解释为 ΔD 充分小时，一个机体死亡的概率与 ΔD 成正比例，只相差較 ΔD 为高阶的无穷小，显然，ΔD 愈小就愈正确。

本文 1963 年 3 月 7 日收到。

于是仿文献[2,3]类似的推理，令 $P_n(D)$ 表示剂量 D 时有 n 个細胞存活的概率，可得出下列微分差分方程：

$$\frac{dP_n(D)}{dD}=-n\mu P_n(D)+(n+1)\mu P_{n+1}(D) \qquad (2)$$

初始条件应为：

$$P_n(0)=\begin{cases}0 & 当\ n \neq n_0\ 时\\ 1 & 当\ n=n_0\ 时\end{cases} \qquad (3)$$

n_0 是无剂量照射时細胞羣体数，(3)式的生物学意义是显然的。

利用熟知的"母函数"法解方程(2)，求得概率函数 $P_n(D)$ 为：

$$P_n(D)=\binom{n_0}{n}(e^{\mu D}-1)^{n_0-n}e^{-n_0\mu D} \qquad (4)$$

期望値

$$E\{X(D)\}=n=n_0e^{-\mu D} \qquad (5)$$

以及方程

$$\mathrm{Var}\{X(D)\}=n_0e^{-\mu D}(1-e^{-\mu D}) \qquad (6)$$

由于"至少死亡一个細胞的概率"(即机体死亡出現的概率)为： $1-P_{n_0}(D)=1-e^{-n_0\mu D}=n_0\mu D+0(D)$ (当 D 很小时)从而可得：

$$\lim_{D\to 0}\frac{1-P_{n_0}(D)}{D}=n_0\mu \qquad (7)$$

这說明因微剂量而至少致死一个細胞的概率为 $n_0\mu$，特别当 $n=n_0=1$ 时，(7)式为：

$$\lim_{D\to 0}\frac{1-P_1(D)}{D}=\mu \qquad (8)$$

(8)式說明一个机体因微剂量而致死的概率为 μ，这就是 μ 的生物学含义。

最近薛禹谷、刘心明[4]对酵母菌 *Saccharomyces. Cerevisiae* 用 γ 射綫照射，研究其生理影响时，发現这种酵母菌在 γ 射綫下的存活率如图 1：

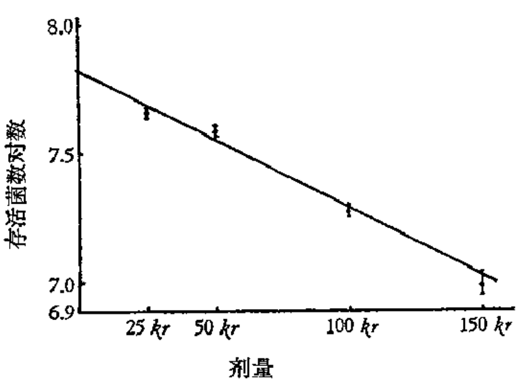

图 1

这很明显符合于公式 $n=n_0e^{-\mu D}$，又他們測定式中的 μ 值为 1/83.3。

又庄增煇、錢稼蓀[5]用 γ 射綫处理酵母 *Candida utilis* 时，得存活率与剂量的关系如图 2：

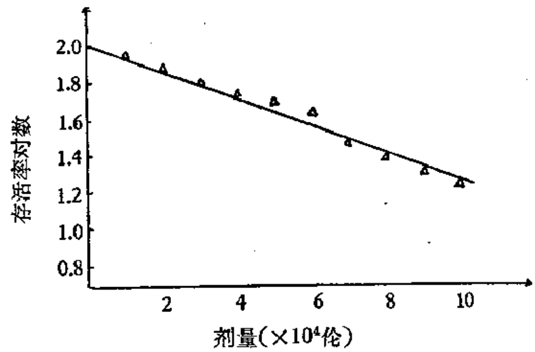

图 2

当采用公式 $n=n_0e^{-\mu D}$ 时，把 $\frac{n}{n_0}$ 看做存活率，取其对数，它对剂量关系就为上述曲綫，特别有趣的是在剂量 4×10^4—6×10^4 伦間有两点較为明显偏离曲綫，由于曲綫相应随机变量的期望值，点相应于随机变量，令 $\frac{d}{dD}\mathrm{Var}\{X(D)\}=0$ 得 $\bar{D}=\frac{\ln 2}{\mu}$，又因有 $\frac{d^2}{dD^2}\mathrm{Var}\{X(D)\}|_{D=\bar{D}}<0$，故知 $\bar{D}=\frac{\ln 2}{\mu}=D_0\ln 2$ 为方差的极大値，但我們知庄、錢两人对 *C. utilis* 所求出的半致死剂量 $D_0\ln 2$ 为52.200伦，实驗曲綫上两个較明显偏离的点恰在半致死剂量附近，而这时方差最大，故有明显的偏离。

由此可見，把随机过程中的純死亡过程的結果用于电离輻射致死过程在一次击中的条件下是适合的。

参　考　文　献

[1] Lea, D. E.: *Action of Radiation on Living Cells*, 2d, ed Cambridge University Press, New York, 1955 (或徐浩、韓仪合譯："輻射对活細胞的作用"，科学出版社，1962 年)。

[2] Feller, W.: *An Introduction to Probability Theory and its Appli cation*, Vol. 1, 2d, ed. John Wiley and Sons, New York, 1957.

[3] Bharucha-Reid, A. T.: *Elements of the Theory of Markov Process and their Application*, pp. 361, McGraw-Hill book co. any, Inc., New York, 1960.

[4] 薛禹谷、刘心明：微生物学报，8 (4)：429—436, 1962。

[5] 庄增輝、錢稼蓀：微生物学报 8 (4)：437—444, 1962。