

CN9500703

CNIC-00851

ASIPP-0042

# 中国核科技报告

CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT

氮离子注入生物分子的质能效应研究

STUDIES ON MASS DEPOSITION EFFECT AND  
ENERGY EFFECT OF BIOMOLECULES  
IMPLANTED BY  $N^+$  ION BEAM

*(In Chinese)*



原子能出版社

中国核情报中心

China Nuclear Information Centre



邵春林：中国科学院等离子体物理研究所博士研究生，1989年毕业于四川大学核物理专业。

Shao Chunlin; Doctoral postgraduate of Institute of Plasma Physics, Academia Sinica. Graduated from Sichuan University in 1989, majoring in nuclear physics.

CNIC-00851

ASIPP-0042

# 氮离子注入生物分子的质能效应研究<sup>\*</sup>

邵春林 余增亮

(中国科学院等离子体物理研究所, 合肥)

## 摘 要

通过对氮离子注入酪氨酸 (Tyr) 样品的多种光谱及质谱分析得知, 慢化  $N^+$  离子能与 Tyr 分子中苯环的  $=C_5H-$  基团发生取代反应, 形成杂环化合物。该化合物对 Tyr 样品的残余紫外活性  $S$  有着显著的影响, 使得  $S$  的剂量效应遵循一特殊规律。并且具有紫外活性的产物分子数占 Tyr 分子总损伤数的百分比大于它们消光系数之比的倒数。通过对不同核苷酸在离子注入下无机磷释放量的比较, 发现它们具有如下顺序的辐射敏感性:  $5'-dTMP > 5'-CMP > 5'-GMP > 5'-AMP$ 。对辐照后核苷酸样品进行碱处理和热处理都可增加无机磷的释放量, 且离子束作用下即时释放的无机磷量占总的可释放之无机磷量的 60% 左右。另外, 碱处理可使辐照时核苷酸所释放的游离碱基受到损伤而裂解, 而热处理却可能使碱基的损伤得到修复。上述结果验证了离子注入生物分子的质能双重效应。

**STUDIES ON MASS DEPOSITION EFFECT AND  
ENERGY EFFECT OF BIOMOLECULES  
IMPLANTED BY N<sup>+</sup> ION BEAM\***

*(In Chinese)*

Shao Chunlin    Yu Zengliang

(INSTITUTE OF PLASMA PHYSICS, ACADEMIA SINICA, HEFEI)

**ABSTRACT**

By analyzing some spectrum of tyrosine sample implanted by N<sup>+</sup> ion beam, it is deduced that the implantation N<sup>+</sup> could react with the tyrosine molecule and substitute =C<sub>5</sub>H— group of benzene ring to produce a N-heterocyclic compound. This compound would notably affect the residual activity of the sample. Moreover, the percentage of the product molecules to the damaged tyrosine molecules is larger than the reciprocal of the proportion of their extinction coefficients. On the other hand, by comparing the release of inorganic phosphate, it is found that the radiation sensibility for four basic nucleotides is 5'-dTMP > 5'-CMP > 5'-GMP > 5'-AMP. To implanted nucleotides, alkali treatment and heat treatment could increase the amount of inorganic phosphate. The amount of inorganic phosphate in the nucleotide samples directly implanted by ions beam is about 60 % of the total amount of inorganic phosphate that could be released from the implanted samples heated at 90°C for 1.75 hours. Alkali treatment could damage and split the free bases released from the implanted nucleotides, but heat treatment might repair those damaged bases. Above results prove that ions implantation to biomolecules has the mass deposition effects and energy effects.

---

\* The Subject Supported by National Natural Science Foundation of China

# 引 言

作为一门新的交叉学科,低能离子生物学自1986年建立以来,已取得了迅速的发展<sup>[1-3]</sup>。低能离子诱变具有与 $\gamma$ 射线等电离辐射诱变不同的特点,如生物体存活率的剂量效应不遵循指数失活规律,而是表现为随着剂量的增大,先减小后变大再减小的变化趋势<sup>[4]</sup>。这可能是由于氮离子注入生物体时不仅具有能量效应,而且还具有质量沉积效应的缘故<sup>[5,6]</sup>。因此,离子束辐照具有比 $\gamma$ 射线辐射更为复杂的机理,尤其是质量沉积效应已引起了人们广泛的重视。但由于生物体的复杂性和多样性,直接以生物体为对象研究该效应是非常困难的。简化模型,研究生物分子对离子束辐照的质量沉积效应和能量效应,在原理上、实践上都是必要的、可行的。

蛋白质和核酸及其组分是目前研究较多的两类生物分子,通过对氮离子注入胸腺嘧啶的研究得知,离子注入后样品中的氮元素含量增加了33%<sup>[7]</sup>,该结果初步说明了注入离子质量沉积现象的存在,但质量沉积的本质及其对生物体的影响还不得而知。

另一方面,离子注入与其它电离辐射一样具有能量效应,Foti等应用100~300 keV氮离子束,得知氨基酸在该束的辐照下将分解产生 $\text{NH}_3$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ 等多种气体分子<sup>[8]</sup>。而在辐射诱变中,最主要的因素是DNA的辐射损伤,为此,人们已对离子束作用下离体DNA的辐照损伤进行了一定的研究<sup>[9]</sup>。

DNA的损伤基于其基本组成单位——核苷酸中碱基的损伤和磷酸戊糖键的断裂这一本质问题,碱基的损伤能导致DNA遗传密码的改变,而磷酸戊糖键的断裂则直接引起DNA链的断裂<sup>[10]</sup>,两者都对基因突变起重要作用。核苷酸在电离辐射作用下分解释放出碱基和无机磷<sup>[11]</sup>,并能产生不稳定磷酸酯,该酯经碱处理<sup>[12]</sup>或热处理后<sup>[13]</sup>将迅速分解并释放出无机磷和未损伤的碱基。通过90℃热处理1~2小时后,该酯将充分分解。

本文将以酪氨酸(Tyr)和核苷酸为对象,研究注入氮离子在Tyr中的质量沉积方式及其对Tyr样品残余紫外活性的影响;比较四种核苷酸对离子束的辐照敏感性,分析不同方式的辐照后处理对核苷酸辐照损伤及其分解产物的影响。

## 1 材料与方 法

**材料:** 酪氨酸(Tyr)、5'-AMP·Na<sub>2</sub>、5'-CMP·Na<sub>2</sub>、5'-GMP·Na<sub>2</sub>样品均为上海生化所的层析纯产品,5'-dTMP·Na<sub>2</sub>为Sigma公司产品,实验使用时没有进一步纯化,其余分析试剂均为国产分析纯试剂。

**制样:** 将一定质量的Tyr样品用水调成糊状及将一定质量的核苷酸溶于蒸馏水中后,分别铺Tyr样品于载玻片上和置核苷酸样品于平皿中,在50℃以下蒸发干燥,使样品成薄膜状。

**辐照源:** 氮离子束由本所离子束育种机产生,其能量选为30 keV,采用脉冲式辐照,每次脉冲时间10 s,束流为30 mA,每次脉冲剂量 $D_0$ 为 $10^{15}$  ions/cm<sup>2</sup>。育种机靶室真空度高于 $1.33 \times 10^{-3}$  Pa。

### 实验方法

(1)对氮离子束辐照后的Tyr样品进行定性和定量两方面的分析测试。在定性测试中,

取一定剂量辐照后的样品若干, 在 KYKY-QP 1000A 型 GC/MS 联用仪上进行质谱测试; 另取该样品若干, 经 KBr 压片后, 分别在 PE-1731 型富里叶红外光谱仪上作 FT-IR 测试和在 SPEX-1401 型激光喇曼谱仪上作喇曼光谱测试。在定量分析中, 用蒸馏水将不同剂量辐照后的样品从载玻片上小心洗下, 收集洗液, 然后将洗液稀释至适当浓度, 在 753WB 型紫外可见分光光度计上作紫外吸收测试。

(2) 将不同剂量离子束辐照后的核酸样品作多方面的处理: ①溶于水中; ②溶于 0.1 mol/L NaOH 中; ③溶于水后在 90℃ 水浴加热 1.5~2 h, 用钼钼酸法<sup>[16]</sup>测各洗液中的无机磷含量, 并作各样品的特征紫外吸收测量与分析。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 氮离子束辐照的质量沉积方式

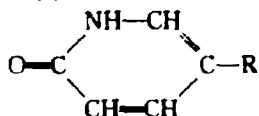
紫外测试表明, 离子束辐照前后的 Tyr 样品的紫外吸收光谱谱形几乎不变, 最大特征波长均在 274 nm (如图 1)。但在不同剂量辐照下, 同质量样品的特征吸收强度发生变化, 在一定剂量时, 吸收增强(见后)。一般说来, 样品中 Tyr 分子数随辐照剂量的增大呈指数规律减少, 从而样品的紫外吸收值也应随剂量的增大而减小。因此, 该实验结果说明氮离子辐照后的 Tyr 样品中产生了新的物质, 其特征紫外吸收波长亦在 274 nm 左右, 且该物质的消光系数大于 Tyr 的消光系数。

喇曼光谱测试表明, 氮离子束辐照后样品的喇曼光谱在 2334  $\text{cm}^{-1}$ 、2460  $\text{cm}^{-1}$  等处产生一些新的弱吸收峰(如图 2), 这些峰应属于氮杂环中的  $V_{\text{NH}}$  振动<sup>[17]</sup>, 但 Tyr 分子中不含有此结构, 因此它必由注入氮离子与 Tyr 中苯环反应所致。而经富里叶红外光谱测试发现氮离子注入后样品的谱图中在 1728  $\text{cm}^{-1}$  处产生新的中强峰(如图 3), 该峰应属于  $\text{C}=\text{O}$  基团所有<sup>[18]</sup>。另外, 对氮离子辐照后样品作质谱(EI)测试, 发现新的质谱图中不仅有反映 Tyr 分子量的  $m/e = 181$  的峰, 而且还产生了  $m/e$  为 182 等的一些新峰(如图 4), 这些峰可能反映了新物质的分子量。

由此可以推断, 氮离子注入 Tyr 分子可以产生具有新的羰基的氮杂环化合物, 其分子量为 182。从而, 可根据量子生物学的计算结果分析该化合物的结构。

量子计算表明, Tyr 的共轭结构中,  $\text{C}_1-\text{C}_2$  或  $\text{C}_3-\text{C}_4$  键的键级最小<sup>[19]</sup>, 因而当该共轭结构受到能量作用时, 因能量传递,  $\text{C}_1-\text{C}_2$  (或  $\text{C}_3-\text{C}_4$ ) 键将首先断裂, 此时慢化下来的、具有较大电负性的氮离子将有一定几率与破裂的苯环中  $\text{C}_2$  (或  $\text{C}_3$ ) 发生取代反应, 形成新的产物。另外, 因能量作用, Tyr 中的酚基氢较易失去, 产生氧自由基<sup>[20]</sup>, 这样, 当  $\text{C}_1-\text{C}_2$  键断裂时, 通过电子传递, 可形成新的  $\text{C}=\text{O}$  基团, 这正是红外光谱的测试结果。

据以上分析, 可认为注入氮离子与 Tyr 反应形成具有如下结构的质量沉积产物:



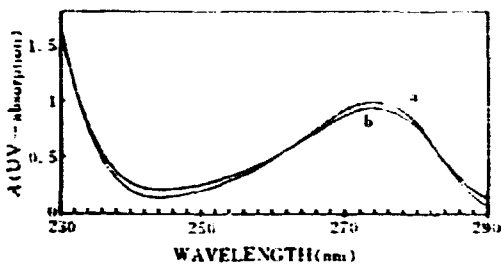


图1 离子注入前后 Tyr 样品的紫外吸收光谱

谱

(a) 注入  $N^-$  的样品; (b) 参照样。

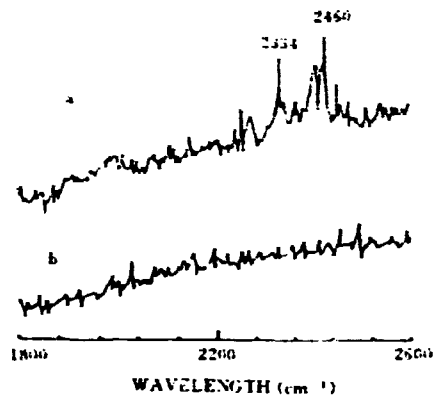


图2 离子注入前后 Tyr 样品的激光喇曼光谱

(a) 注入  $N^-$  的样品; (b) 参照样。

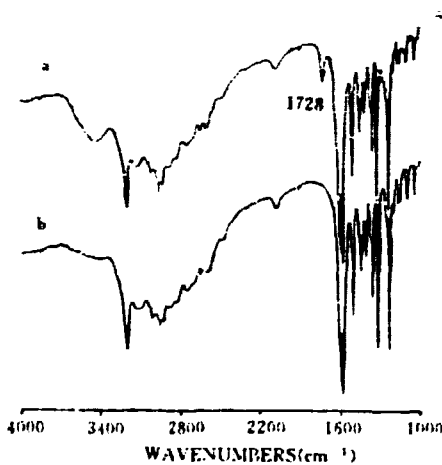


图3 离子注入前后 Tyr 样品的富里叶红外

光谱

(a) 注入  $N^-$  的样品; (b) 参照样。

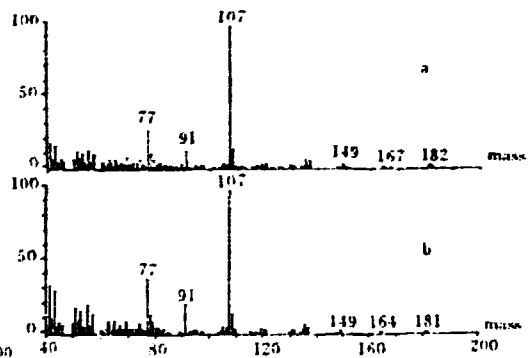


图4 离子注入前后 Tyr 样品的质量谱

(a) 注入  $N^-$  的样品; (b) 参照样。

过去的研究已经指出,苯环被氮杂环化后,样品的紫外吸收将有较大的增加,但特征波长变化不大<sup>[21]</sup>。这与我们的实验结果是相一致的。虽然质量沉积产物的产生,能使样品的紫外吸收有所增强,但该产物也受到进一步而来的注入离子的损伤,当该物质的损伤率大于其产生率时,样品的紫外吸收又会减小,这就呈现出以下实验结果所示的剂量效应曲线。

## 2.2 质量沉积产物对样品残余紫外活性的影响

紫外测试表明,受离子束辐照后 Tyr 样品的相对残余紫外活性  $S$  随离子剂量的增大而呈先小后大再变小的变化趋势,并遵循下列方程<sup>[22]</sup>:

$$S = 1 - a + ae^{-\lambda D} + a\beta k_1 D e^{-\lambda D} + a\gamma k_2^2 D^2 e^{-\lambda D} \quad (1)$$

实质上,  $S$  分为  $S_1$  和  $S_2$  两部分, 其中  $S_1 = 1 - a + ae^{-\lambda D}$ ,  $S_2 = a\beta k_1 D e^{-\lambda D} + a\gamma k_2^2 D^2 e^{-\lambda D}$  (如图 5)。  $S_1$  反映了离子束辐照对 Tyr 分子的能量损伤, 遵循指数损伤规律;  $S_2$  则随离子剂量的增大而逐渐增大至某一极大值后开始减小。它体现了质量沉积产物分子数的变化规律。由此可见, 方程 (1) 反映了离子束辐照的本质。

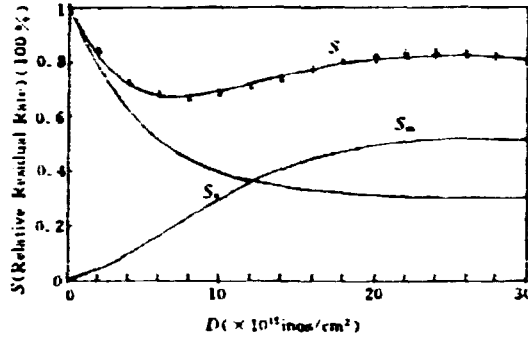


图 5 氦离子束辐照后 Tyr 样品 ( $m = 6.0 \text{ mg}$ ) 相对残余紫外活性的剂量效应  $S$  由  $S_1$  和  $S_2$  两部分组成。

值得注意的是, 对不同质量的样品,  $S$  亦不一样, 并且质量小的样品, 其相对残余活性反而大 (如图 6)。通过以下分析可知, 这也是由于质量沉积效应的缘故。

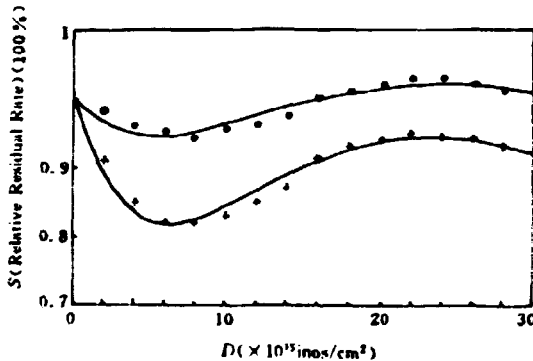


图 6 氦离子束辐照后不同质量 Tyr 样品相对残余紫外活性的剂量效应  
.....,  $m = 2.0 \text{ mg}$ ; + + +,  $m = 4.0 \text{ mg}$ 。

将含 Tyr 分子数为  $N$ ,  $nN$  ( $n > 1$ ) 的样品受辐照后, 分别溶于体积为  $V$ ,  $nV$  的水中, 则未受辐照时, 两者具有相同的紫外吸收值  $A_0$ 。由于离子束的射程不变, 单位剂量离子束辐照时所能损伤的样品分子数相同, 设为  $N_1$ , 其中形成质量沉积产物的分子数为  $N_2$ 。设 Tyr 与新分子的消光系数分别为  $\epsilon$ ,  $\epsilon_2$ , 根据 Lambert-Beer 定律, 辐照后样品的紫外吸收分别为:

$$A = \frac{\epsilon(N - N_1)L + \epsilon_2 N_2 L}{V} \quad A_2 = \frac{\epsilon(nN - N_1)L + \epsilon_2 N_2 L}{nV}$$

则:



$$S - S_0 = \frac{A}{A_0} - \frac{A_0}{A_0} = \frac{L(m-1)(\epsilon_1 N_1 - \epsilon_2 N_2)}{nVA_0}$$

因  $S > S_0$ , 则  $\epsilon_1 N_1 > \epsilon_2 N_2$ ,  $N_1/N_2 > \epsilon/\epsilon_1$ , 即质量沉积产物的分子数占总损伤分子数的比例大于它们消光系数之比的倒数。这就是说, 足够大的  $N_1/N_2$ , 使得  $S > S_0$ 。

总之, 氮离子注入时的质量沉积效应对 Tyr 样品的残余活性具有重要影响, 使得本应产气指数失活规律的紫外活性表示出复合曲线的规律。

### 2.3 离子束辐照对核苷酸的能量效应

#### (1) 核苷酸对离子束的辐照敏感性

离子束对 5'-AMP、5'-CMP、5'-dTMP、5'-GMP 四种核苷酸进行辐照后, 测得各样品中无机磷摩尔数占样品总磷摩尔数的百分比不同 (如图 7)。这说明对离子束辐照, 这些核苷酸具有如下的辐照敏感性顺序: 5'-dTMP > 5'-CMP > 5'-GMP > 5'-AMP。这与它们对  $\gamma$  辐射的敏感性不同<sup>[23,24]</sup>。

#### (2) 碱处理对辐照损伤的影响

离子束辐照后的 5'-dTMP 样品经 0.1 mol/L NaOH 处理后, 无机磷的释放量大大增加。碱处理后立刻测量, 此时无机磷含量均增至受辐照样品的水溶液中无机磷含量的 1.7 倍 (如图 8), 则离子束辐照产生的无机磷占经 0.1mol/L NaOH 碱即时处理后无机磷量的 60% 左右。碱处理后无机磷的增加也不是无限制的, 它受到一定剂量下离子束辐照所能产生的碱不稳定性磷酸酯量及总磷量的限制, 碱处理一定的时间后, 无机磷的释放量将达到一极大值。

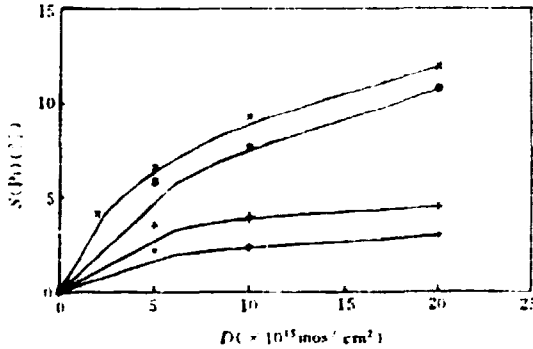


图 7 不同质量 ( $m$ ) 核苷酸样品在离子束辐照下产生的无机磷占样品总磷量的摩尔百分数  $S(\text{Pi})$

× — 5'-dTMP,  $m = 0.67 \text{ mg}$ ;      ● — 5'-CMP,  $m = 1.92 \text{ mg}$ ;  
+ — 5'-GMP,  $m = 2.24 \text{ mg}$ ;      ○ — 5'-AMP,  $m = 1.92 \text{ mg}$ .

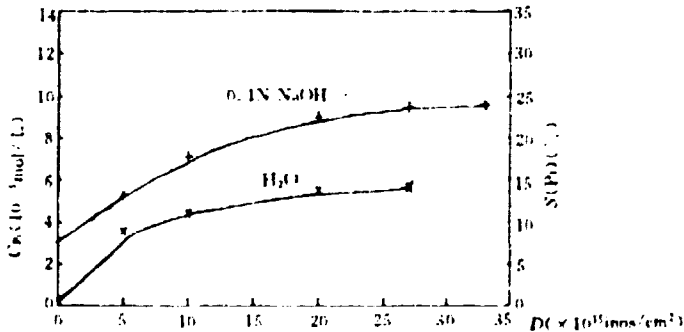


图 8 无机磷浓度  $C(\text{Pi})$  及其占总磷量的摩尔百分比  $S(\text{Pi})$

5'-dTMP 的质量为 0.64 mg, 磷酸浓度为  $4.0 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$

表 1 离子束辐照后 5'-dTMP 样品在不同溶液中的特征紫外吸收值

OD 值		剂量, $\times 10^{19} \text{ ions/cm}^2$				
		0	5.0	20.0	27.0	33.0
水 液	OD <sub>269</sub>	1.194	1.097	0.910	0.893	—
	OD <sub>264.5</sub>	1.167	1.076	0.90	0.883	—
碱 液	OD <sub>267</sub>	0.879	0.777	0.754	0.578	0.487
	OD <sub>291</sub>	0.097	0.179	0.183	0.182	0.174

另外, 电离辐射将会使 5'-dTMP 释放出碱基 T, 利用碱基 T 所具有的特征紫外吸收可计算碱基的产生量及碱处理对它的影响。由测量可知, 5'-dTMP 标样与 T 在水溶液中的特征紫外吸收波长分别为 269 nm、264.5 nm, 在 0.1 mol/L NaOH 中的特征波长分别为 267 nm、291 nm。

将辐照前后质量为 0.64 mg 的 5'-dTMP 样品分别以 5 ml 水和 5 ml NaOH 洗脱, 取 2 ml 洗液稀释至 6 ml 作紫外吸收测量, 对样品水溶液和 NaOH 溶液分别在不同波长处测 OD 值 (见表 1)。由这些 OD 值, 根据适用于混合物的 Beerio-Lamberti 定律, 可以计算出离子束辐照后, 5'-dTMP 的相对残余活性  $S$  (dTMP) 及辐照所产生的碱基量  $C$  (T) 的剂量效应 (如图 9)。由该图可见, 碱处理对  $S$  (dTMP) 几乎没有影响, 但同离子注入 Tyr 时产物分子数变化情况一样, 辐照引起的碱基释放量随离子剂量的增大而逐渐趋于饱和。

另外, 对比图 8、图 9 可见,  $C(\text{Pi})_{\text{H}_2\text{O}} < C(\text{T})_{\text{H}_2\text{O}}$ , 即离子束辐照后 5'-dTMP 样品水溶液中的碱基浓度大于无机磷的浓度, 而单核苷酸含有相同分子的无机磷和碱基, 这说明在离子束对 5'-dTMP 的辐照损伤中, 碱基被优先释放, 然后才释放无机磷。这与  $\gamma$  射线对核苷酸的辐射损伤情况相同<sup>[25]</sup>, 而受辐照的样品经碱处理后有  $C(\text{Pi})_{\text{NaOH}} > C(\text{Pi})_{\text{H}_2\text{O}}$ ,  $C(\text{T})_{\text{NaOH}} < C(\text{T})_{\text{H}_2\text{O}}$ , 这意味着碱处理不仅能损伤那些不稳定的磷酸酯, 使之释放无机磷, 而且还能损伤游离碱基。这里, 经碱处理后样品中碱基浓度减小到原来的一半左右, 最后使得辐照后 5'-dTMP 的 NaOH 溶液中的碱基浓度小于无机磷浓度, 即  $C(\text{T})_{\text{NaOH}} < C(\text{Pi})_{\text{NaOH}}$ 。

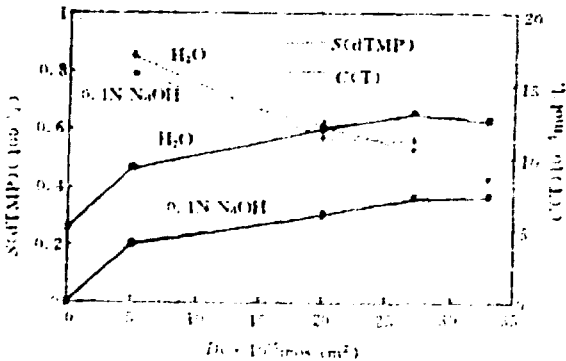


图 9 相对残余活性  $S$  (dTMP) 及碱基量的剂量效应

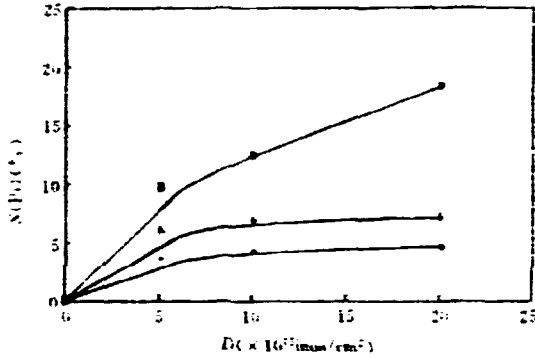


图 10 无机磷占样品总磷量的摩尔百分数

● — 5'-CMP,  $m = 1.92 \text{ mg}$ ; + — 5'-GMP,  $m = 2.24 \text{ mg}$ ; — 5'-AMP,  $m = 1.92 \text{ mg}$ .

### (3) 热处理对辐照损伤的影响

离子束辐照后的 5'-AMP、5'-CMP 及 5'-GMP 样品的水溶液经 90°C 水浴加热 1.75 h 后，样品中的不稳定磷酸酯充分分解，使得无机磷释放量显著增加（如图 10）。对比图 7 的结果可见，离子束辐照 5'-AMP、5'-CMP、5'-GMP 等核苷酸即时产生的无机磷占总可释放之无机磷的百分比分别为 60.8%、60.1% 和 60.5%，均在 60% 左右。图 8 中无机磷的变化量与此一致，说明经 0.1 mol/L NaOH 碱的即时处理，受离子束辐照后的核苷酸样品中的不稳定磷酸酯即可充分分解。另一方面，紫外测试发现，热处理可使样品的特征紫外吸收值减小，但不同剂量处理下的样品，它们相对于参照样的紫外吸收值却随剂量的增大有所增大（如图 11）。

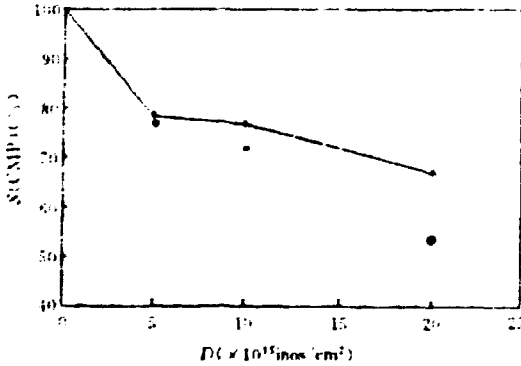


图 11 紫外吸收值随剂量的变化

... 常温; — 热处理

## 3 讨论

离子束的质量沉积效应对生物体的辐射诱变产生很大的影响。众所周知，遗传物质 DNA 并不是孤立地存在于生物体内的，而是以组蛋白为骨架，经多次折叠后才形成遗传物质的表现形式——染色体的。离子束的能量作用可使 DNA 链断裂或在 DNA 分子内产生不

稳定磷酸酯, 这些不稳定磷酸酯可受到周围环境的影响而裂解或得到修复。如果注入离子与组蛋白相互作用形成的产物能够对不稳定磷酸酯产生影响, 甚至直接对 DNA 链的断裂具有修复作用, 将改变 DNA 的损伤情况。如果注入离子与 DNA 链上碱基的杂环发生反应形成新的物质, 将对 DNA 产生不可修复的损伤, 从而改变遗传密码。所有这些都影响到生物体变异的结果。根据这一原理我们推导出了一个不同于传统理论的、能很好地适合于低能离子束辐照诱变结果的分子生物学模型<sup>[26]</sup>。

离子束辐照不仅具有质量沉积效应, 同时还具有能量效应。由于离子束具有较高的 LET, 它的能量作用应比低 LET 的  $\gamma$  射线辐射作用强。事实上, 离子束辐照 5'-dTmP 时, 无机磷产额  $G(\text{Pi})$  达 0.44 以上<sup>[27]</sup>, 大于  $\gamma$  射线辐射时的 0.12~0.22<sup>[28]</sup>。离子束辐照的 5'-dTmP 样品经 0.1 mol/L NaOH 处理后, 即刻测得的无机磷量就增至原来的 1.7 倍, 而 Ward 用 0.1 mol/L NaOH 处理受  $\gamma$  射线辐射的 3'5'-dTmP 样品 10~40 min 后, 无机磷的释放量增至原来的 1.5 倍<sup>[29]</sup>; Boop 在用 1 mol/L  $\text{NH}_4\text{OH}$  处理受照后 DNA 30 min 后, 得知链断裂数增至原来的 1.5 倍左右<sup>[30]</sup>, 则离子束辐照能产生更多的不稳定磷酸酯, 因此离子束辐照具有比  $\gamma$  射线辐射更强的损伤力。

由图 7、图 10 及图 11 可见, 离子束辐照时核苷酸的生色基团(碱基)的损伤率(1-S(CMP)) 大于其无机磷释放量的摩尔百分数  $S(\text{Pi})$ , 说明核苷酸在其碱基受到损伤时, 可通过受损碱基的释放产生不具紫外吸收的有机磷分子, 如磷酸戊糖分子等。热处理虽可使  $S(\text{Pi})$  有所增加, 但仍小于此时碱基损伤的百分数, 这意味着有机磷分子中, 有一部分是不稳定的, 受热分解产生无机磷, 但也有一部分是稳定的, 受热不分解。

另外, 图 11 所示的结果, 可能是由于部分受损碱基在热处理中得到修复的缘故。总之, 离子束注入核苷酸时, 碱基的损伤程度大于无机磷释放的程度, 由此可以认为, DNA 的辐照损伤中, 因磷酸戊糖键断裂而引起的辐射效应固然重要, 但因碱基的损伤而引起的遗传密码的改变, 则应在生物体的辐射诱变中占有更重要的地位。

### 参 考 文 献

- [1] 余增亮. 科学, 1993, 4: 36~38
- [2] 岳忠厚. 科技导报, 1993, 4
- [3] 余增亮. 中国核科技报告, CNIC-00746. 1993
- [4] Zengliang Yu, et al. Nucl. Instru. Meth. Phys. Res., 1991, B59/60: 705~708
- [5] Zengliang Yu, et al. Nucl. Instru. Meth. Phys. Res., 1993, B80/81: 1328~1331
- [6] 宋宗森. 安徽农学院学报, 1991, 18(4): 314~316
- [7] 余增亮等. 安徽农业科学, 1989, 1: 12~16
- [8] 余增亮等. 安徽农学院学报, 1991, 4(18): 251~257
- [9] 邓建园. [博士论文]. 中国科学院等离子体研究所, 1992
- [10] Fort A M, et al. Nucl. Instru. Meth. Phys. Res., 1990, B46: 361~363
- [11] 鲁润龙. 安徽农学院学报, 1991, 18(4): 294~298
- [12] Ward J F. Int. J. Phys. Chem., 1971, 3: 239
- [13] A. VAN. DE. VORST. Int. J. Phys. Chem., 1974, 6: 143~155
- [14] Daniels M, et al. J. Chem. Soc., 1956: 3771
- [15] Deeble D J, et al. Int. J. Radiat. Biol., 1986, 49(6): 915~926
- [16] 张龙翔等. 生化实验方法和技术. 北京: 高等教育出版社, 1987
- [17] 洪山海. 光谱分析在有机化学中的应用. 北京: 科学出版社, 1980
- [18] 阎长庆. 有机分析基础. 北京: 高等教育出版社, 1991

- [19] 刘次全等. 量子生物学概论. 北京: 科学出版社, 1989
- [20] Hill D J T, et al. *Radiat. Phys. Chem.*, 1981, 17: 163~171
- [21] 黄毓治. 光谱分析及其在生物学上的应用. 合肥: 中国科技大学出版社, 1986
- [22] 邵春林等. *核技术*. 1994, 17 (1): 25~28
- [23] Raleigh J A, et al. *Radiat. Res.*, 1974, 59: 453~465
- [24] Raleigh J A, et al. *Int. J. Radiat. Biol.*, 1973, 24 (6): 595~603
- [25] Scholes G, Ward J F. *J. Mol. Biol.*, 1960, 2: 179
- [26] Shao Chunlin, et al. *Radiat. Res.*, 1994, in press
- [27] Shao Chunlin, et al. *Radiat. Phys. Chem.*, 1994, in Press
- [28] 王高栋等. *辐射研究与辐射工艺学报*. 1985, 3 (3): 14~18
- [29] Ward J F, Kuo I. *Int. J. Radiat. Biol.*, 1973, 23 (6): 545~557
- [30] Bopp A, Hagen J. *Biochem. Biophys. Acta*, 1970, 209, 320

(京) 新登字 077 号

图书在版编目 (CIP) 数据

氮离子注入生物分子的质能效应研究=STUD. ON  
MASS DEP. EFF. AND ENE. EFF. OF BICM. IMP.  
BY N<sup>-</sup> ION BEAM ; /邵春林等著. —北京: 原子能出版  
社, 1994. 5

ISBN 7-5022-1214-0

I. 氮… II. 邵… III. 氮-离子注入-生物-分子-效应-研  
究 IV. Q7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (94) 第 06061 号



原子能出版社出版发行

责任编辑: 李曼莉

社址: 北京市海淀区阜成路 43 号 邮政编码: 100037

核科学技术情报研究所印刷

开本 787×1092 1/16·印张 1/2·字数 15 千字

1994 年 6 月北京第一版·1994 年 6 月北京第一次印刷

# CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT

This report is subject to copyright. All rights are reserved. Submission of a report for publication implies the transfer of the exclusive publication right from the author(s) to the publisher. No part of this publication, except abstract, may be reproduced, stored in data banks or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior written permission of the publisher, China Nuclear Information Centre, and/or Atomic Energy Press. Violations fall under the prosecution act of the Copyright Law of China. The China Nuclear Information Centre and Atomic Energy Press do not accept any responsibility for loss or damage arising from the use of information contained in any of its reports or in any communication about its test or investigations.

ISBN 7-5022-1214-0



9 787502 212148 >

P.O.Box 2103

Beijing, China

China Nuclear Information Centre