

# 大气压低温等离子体与胸腺嘧啶脱氧核苷的作用

杨思泽, 杨周斌, 周仁武, 张先徽

(厦门大学物理与机电工程学院, 电子科学系, 电磁声学研究院,

福建省等离子体与磁共振研究重点实验室, 厦门 361000)

**摘要:** 胸腺嘧啶(Thymine)是遗传物质的组成成分之一, 为了研究等离子体对遗传胸腺嘧啶(Thymine)的作用过程, 利用大气压等离子体对作为遗传物质的胸腺嘧啶(Thymine)及对应的胸腺嘧啶脱氧核苷(Thymidine)进行处理, 为了避免空气对遗传物质的影响, 采用水中放电装置进行了相关研究。研究结果表明: 不同气体等离子体处理后, 胸腺嘧啶脱氧核苷会分解为胸腺嘧啶, 且氮气等离子体处理时分解速率快于氩气等离子体处理; 另外, 空气等离子体与氧气等离子体处理后, 胸腺嘧啶脱氧核苷会分解产生两种新产物, 分别为胸腺嘧啶+OH 和胸腺嘧啶脱氧核苷+OH。该研究对了解大气压等离子体对细菌失活的机制具有一定指导作用, 同时对等离子体与生物体作用有着积极的指导意义。

**关键词:** 大气压冷等离子体; 含氧自由基; 胸腺嘧啶(Thymine); 胸腺嘧啶脱氧核苷(Thymidine); pH 值; 色谱; 质谱

## Atmospheric-pressure Plasma Interaction with Thymidine in Aqueous Solution

YANG Size, YANG Zhoubin, ZHOU Renwu, ZHANG Xianhui

(Fujian Provincial Key Laboratory of Plasma and Magnetic Resonance, Institute of Electromagnetics and Acoustics,

Department of Electronic Science, School of Physical and Mechanical & Electrical Engineering,

Xiamen University, Xiamen 361000, China)

**Abstract:** The cold atmospheric-pressure plasmas have great application prospects in the fields of biomedicine, such as killing virus, sterilization, cancer cells ablation, and surface treatment of organism tissue, etc. Some reports have indicated that the cold atmospheric-pressure plasmas will modify the genetic material (RNA and DNA) in organism tissue. Thymine is one of the components of genetic material. In this paper, in order to study the effect of plasma on genetic Thymine process, Thymine and Thymidine in the aqueous solution were treated by plasma. In order to avoid the effect of air on experiments, a new discharge device was designed to generate large-area plasma in aqueous media. The results show that, after different gas plasma processing, Thymidine decomposes for thymine; After air plasma and oxygen plasma treatment, Thymidine can produce two new decomposition products: Thymine +OH and Thymidine +OH. The study of DNA degradation caused by plasma has certain instruction function in biomedicine.

**Key words:** atmospheric-pressure plasma; reactive oxygen species; Thymine; Thymidine; pH value; liquid chromatography; mass spectroscopy

## 0 引言

大气压等离子体有许多优点, 例如不需要昂贵的真空设备, 装置简单, 易操作等, 这使得大气压等离子体在生物领域有广泛的应用<sup>[1-3]</sup>, 处理对象从止血<sup>[4]</sup>, 美容<sup>[5]</sup>, 癌细胞的消融<sup>[6]</sup>, 杀菌<sup>[7-9]</sup>, 到修改遗传物质 RNA 和 DNA<sup>[10]</sup>。众所周知, 胸腺嘧啶

脱氧核苷(Thymidine)是由尿嘧啶(Uracil)在 RNA 转录过程中甲基化得到, 然后与脱氧核糖结合形成了腺嘧啶脱氧核苷(Thymidine), 其为基本的核糖核苷中的一种, 酸化后是 RNA 链上的一个基本单元, 脱氧后变成 DNA 的组成部分。在等离子体生物学领域中目前的一个研究重点是等离子体对生物体的影响, 其中对生物体内遗传物质的影响显得尤为重要。

大气等离子体最初广泛应用得益于 2002 年荷兰科学家 Stoffels E 小组, 他们利用自制的射频等离子体枪能够在较短时间内的效率杀灭大肠杆菌, 口

基金资助项目: 福建省自然科学基金(2014J01025), 国家自然科学基金(11275261)。

Project supported by Natural Science Foundation of Fujian Province of China (2014J01025), National Natural Science Foundation of China (11275261).

腔链球菌等<sup>[11-12]</sup>。随后该小组在开展杀灭哺乳动物细胞和大肠杆菌的混合样品过程中发现细胞变异的<sup>[13]</sup>，最初认为是射频放电过程中紫外线、电场和含氧自由基等引起的细胞变异。于是许多研究小组均研制出各种放电装置开展相关研究，首先用相同辐照强度和波长的紫外光实验<sup>[14]</sup>，进而是改变放电频率从几百 Hz 到微波，观察相同时间电场对生物体的影响<sup>[1]</sup>，最后人们逐渐认识到是放电过程中产生的粒子与空气中的氧气和水分子碰撞，以及等离子体内的电场离化空气中氧气和水分子而产生的含氧自由基起决定作用<sup>[15]</sup>。从而人们开始了对等离子体内含氧自由基的研究，由于大气等离子体在杀菌过程中，首先是等离子体与溶液表面蒸发的水分子作用，穿过溶液表面的界面层后才能进入溶液，而大多数粒子的寿命较短无法进入溶液中，这使得人们开始关注能够长时间存在于水中的粒子，能够进入并较长时间存在的粒子主要包含  $H^+(H_2O)_n$ 、 $OH(H_2O)_n$ 、 $O_3$ 、 $H_2O_2$ 、 $NO_x$ 、 $HNO_x$  等<sup>[16]</sup>，这些粒子与生物学中的含氧自由基有相似之处(OH 等与生物体作用过程)，但效率较后者高，而且该过程主要以物理过程为主，所以引起的化学污染低，从而成为国内外的研究热点。由于大气等离子体在处理生物体过程中效率较高，其副作用的研究就显得尤为重要，而对细胞遗传物质的影响更是不可忽视，人们在研究过程中发现放电过程中环境对等离子体内含氧自由基的量影响较大(主要是空气中水分子的含量)<sup>[17]</sup>，这也是实验不可重复的主要原因，本实验组也重复了文献<sup>[18]</sup>中的部分实验，由于试验的结果重复性差，很难得出相似的结果，因此如何避免空气对等离子体放电过程中含氧自由基的影响是本研究的重点。为了解决上述问题，我们首先将样品溶解在水中，分成 4 份，然后利用放电装置处理不同时间，再利用质谱和色谱分析成分和含量，这样既可以知道成分和相对含量，又可以看出实验的重复性。本文将利用水中放电等离子体对胸腺嘧啶(Thymine)和胸腺嘧啶脱氧核苷(Thymidine)溶液直接处理，然后利用质谱和色谱对作用过程进行分析，并给出结果。

## 1 实验过程

装置如原理图 1(a)所示，36 根放电管置于容器底部，气体经过放电管从溶液底部输入。每根放电管由 3 部分组成：①内电极，②内电极石英管套；

③外层石英管，外层石英管与内层石英管套间距约为 80  $\mu m$ ，气体从间距通过时，放电在高压电极附近的气泡内产生<sup>[19]</sup>。放电照片如图 1(b)所示。内电极石英管套和外层石英管长度分别为 70 和 30 mm。放电过程中，我们发现等离子体首先在两层石英管间隙产生，随着电压的增大，逐渐由两石英管间隙转移为内电极与水溶液之间，通过内电极石英介质阻挡放电。实验中发现放电参数为：功率 20 W(峰值电压  $U_{pp}=4\ 800\ V$ )，气体体积流量 3 L/min，较为稳定，不同气体放电曲线详见参考文献[20]，以下实验均在此参数条件下开展。

实验中配制溶液用的超纯水来源于 Milli-Q TOC SP 系统的净水器。胸腺嘧啶(Thymine)和胸腺嘧啶脱氧核苷(Thymidine)从生工生物工程(上海)股份有限公司购得。先将 2 mmol 的胸腺嘧啶和胸腺嘧啶脱氧核苷分别溶解在 200 mL 水中配成溶液，分别倒入等离子体装置中，再分别通入不同气体(Ar, N<sub>2</sub>, Air, O<sub>2</sub>)进行处理<sup>[21-22]</sup>，处理时间为 0~30 min，处理后取 1  $\mu L$  样品稀释 1 000 倍后，经高性能质谱(Esquire 3000 Plus, Bruker Daltonic Inc., Billerica, MA, USA)分析后，再经过阳离子柱后给出色谱图<sup>[23-24]</sup>。

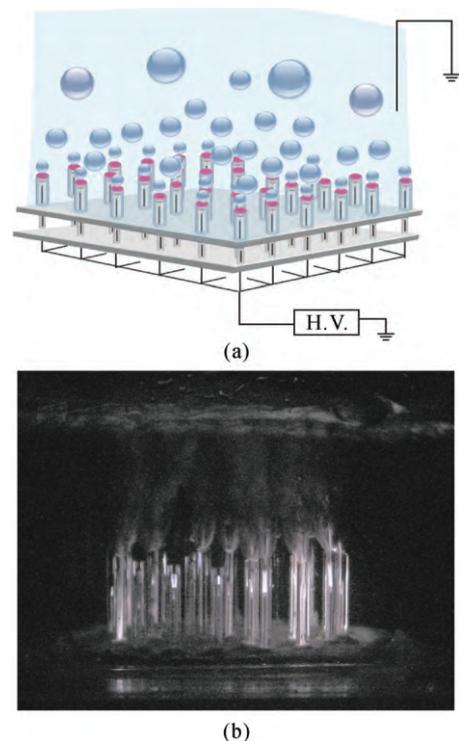


图 1 水中放电装置原理图及放电照片

Fig.1 Schematic diagram of microplasma jet array device  
Photo of electric discharge

## 2 结果与讨论

实验中我们首先用氩气对腺嘧啶脱氧核苷溶液进行了处理, 发现经过气体放电处理后, 首先变成胸腺嘧啶和脱氧核糖(Deoxyribose), 如图 2 所示, 而脱氧核糖溶于水后分解成分子量较小的化合物<sup>[24]</sup>, 无法用质谱直接测量。

图 2 中(a)、(b)图的横纵坐标分别为出峰时间和紫外吸收强度(Intensity), 通过图 2(a)、(b)我们可以确定有几种物质成分。图 2(c)、(d)的横纵坐标表示质荷比( $m/z$ )和紫外吸收强度, 其中质量数  $m$  以原子质量(au)为单位, 电荷数  $z$  以质子电荷(e)为单位, 因此  $m/z$  是一个无量纲数。通过图 2(c)、(d), 可以确定这几种物质的质荷比, 进而估计出有机物的结构式。通过上图可以直接看出, 氩气等离子体处理 30 min 后, 能够将胸腺嘧啶脱氧核苷分解, 如图 3 所示。

进一步实验中我们还利用高效液相色谱质谱法对产物进行了分析, 发现 3 min 内胸腺嘧啶脱氧核苷基本没有分解, 4 min 后逐渐分解, 随着处理时间增加, 胸腺嘧啶摩尔分数逐渐增加, 如图 4 所示, 两种成分含量随着处理时间变化如表 1 所示。从表 1 可以看出随着处理时间的增加, 胸腺嘧啶含量逐渐增加, 而胸腺嘧啶脱氧核苷的含量在逐渐减少, 5~15 min 内呈线性递减, 原因是胸腺嘧啶脱氧核苷浓度降低, 分解减弱。我们还对溶液的 pH 值进行了测量, 发现 30 min 后溶液 pH 值略有降低, 产物分别为氢合胸腺嘧啶和氢合脱氧核糖, 而脱氧核糖会进一步分解。溶液 pH 值略有降低的原因可能是由于溶液中溶解的空气在等离子体的作用下生成了  $\text{NO}_x$  溶于水后致使溶液 pH 降低, 也有可能是脱氧核糖水解过程导致溶液 pH 值降低<sup>[25]</sup>, 由于分解过程中产生的  $\text{H}^+$  较少后者可能性较低。为了验证试验结果, 我们将胸腺嘧啶配成相同浓度的溶液,

表 1 氩气等离子体处理胸腺嘧啶脱氧核苷过程中, 各成分摩尔分数随时间变化

Table 1 Changes of the contents of thymidine in solution treated by Ar plasma for different time

处理时间/min	5	10	15	30	
摩尔分数	胸腺嘧啶	21.76	24.71	27.65	35.88
/%	胸腺嘧啶脱氧核苷	78.24	75.29	72.35	64.12

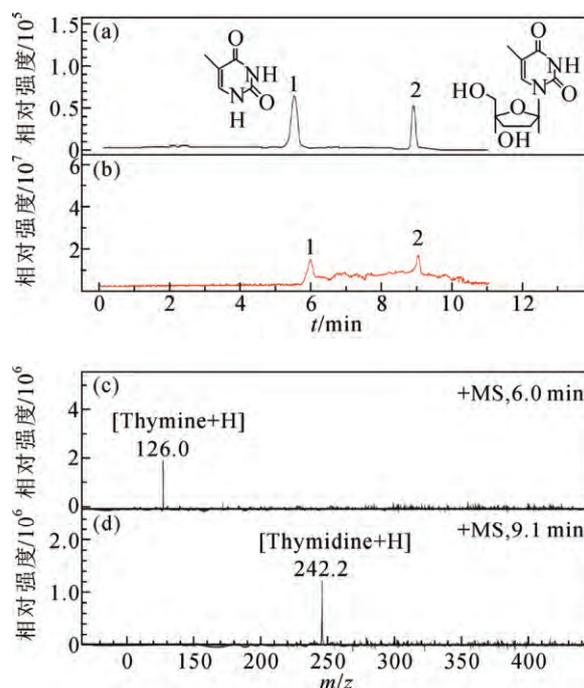


图 2 胸腺嘧啶脱氧核苷经过氩气等离子体处理后的质谱图  
Fig.2 LC-ESI-MS spectra of Thymine treated by Ar plasma

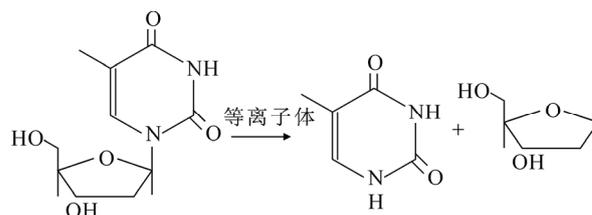


图 3 胸腺嘧啶脱氧核苷分解反应

Fig.3 Reaction process diagram of Thymidine

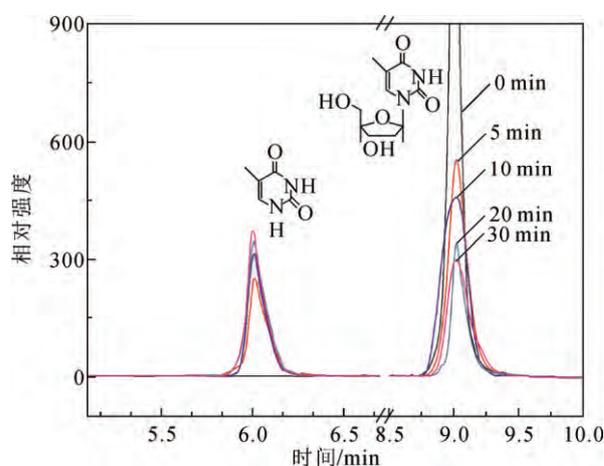


图 4 氩气等离子体不同处理时间处理色谱曲线图

Fig.4 Chromatographic curve after treatment with Ar plasma for different time

经氦气等离子体处理不同时间进行验证,发现处理前后质荷比( $m/z$ )=126.0的峰值没有变化,说明没有其他产物生产,与图3所示相同。

随后我们用氮气等离子体处理对胸腺嘧啶脱氧核苷进行了处理,产物与氦气等离子体处理结果相同,同样也发现开始反应速率较大,后来15 min后速率明显变缓,如图5所示。图中横纵坐标分别为时间和220 nm紫外吸收强度,吸收强度峰值越高表明含量越多,通常用峰值下的面积表示该种物质占的摩尔分数,横轴时间指的是出峰时间,通常不同荷质比物质出峰时间也不同。氮气等离子体处理过程中,胸腺嘧啶脱氧核苷分解速率明显增加,前10 min速率变化最为明显。两种物质的摩尔分数分别如表2所示。

与表1相比,氮气处理过程中原料降速明显快于氦气,可能的原因是氮气放电击穿电压较高,氮离子和电子与水作用过程中,产生的OH和H离子较多,随着时间的增加原料的分解率也较高。另外,我们看到15 min后胸腺嘧啶脱氧核苷和胸腺嘧啶的比例基本不随时间变化,随后对处理后溶液的pH值进行了测量,30 min后pH值同样也降低0.1,可能的原因是氮气不纯及溶液中溶解的空气,在放电过程中生成 $\text{NO}_x$ 溶于溶液中导致溶液pH值降低。同样我们用胸腺嘧啶溶液进行处理,发现 $m/z$ =126.0为氢合胸腺嘧啶(Hydrothymine),始终没有其他产物生产。

随后我们用空气等离子体对溶液进行处理,从图6中可以看出除了 $m/z$ =126.1和242.2外,还发现了两种新的产物,一种是 $m/z$ =144.1为胸腺嘧啶+OH,另一种是 $m/z$ =260.2为胸腺嘧啶+OH。胸腺嘧啶+OH可能有两种结构,分别为:5-羟基-6-氢合胸腺嘧啶和6-羟基-5-氢合胸腺嘧啶<sup>[26-27]</sup>。两种化合物来源分别是:胸腺嘧啶脱氧核苷在OH作用下

表2 氮气等离子体处理胸腺嘧啶脱氧核苷过程中,各成分含量随时间变化

处理时间/min	5	10	15	30
摩尔分数/%				
胸腺嘧啶	22.94	34.71	41.18	41.76
胸腺嘧啶脱氧核苷	77.06	65.29	58.82	58.24

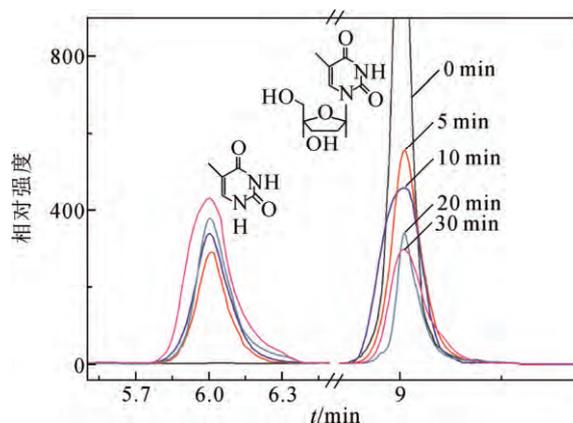
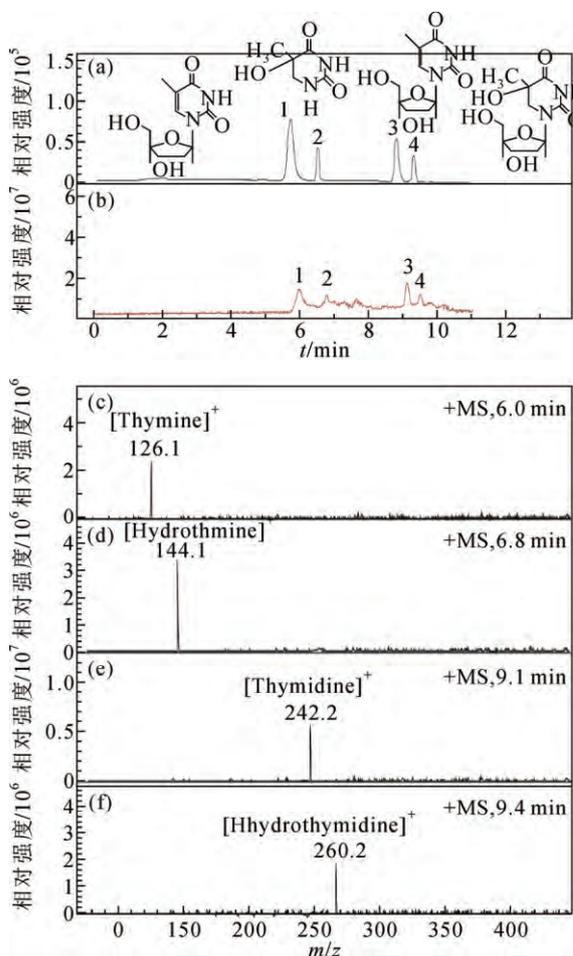


图5 氮气等离子体不同处理时间处理色谱曲线图

Fig.5 Chromatographic curve after treatment with  $\text{N}_2$  plasma for different time



(a) 总离子流(TIC)色谱曲线; (b) 220 nm 的色谱曲线; (c)胸腺嘧啶的峰; (d) 氢合胸腺嘧啶的峰; (e) 胸腺嘧啶脱氧核苷的峰; (f) 氢合胸腺嘧啶脱氧核苷的峰

图6 胸腺嘧啶脱氧核苷经过空气等离子体处理后的质谱图

Fig.6 LC-ESI-MS spectra of thymine treated by air plasma

部分分解为胸腺嘧啶后, 胸腺嘧啶再与 OH 作用生成二氢胸腺嘧啶(dihydrothymine), 二氢胸腺嘧啶不稳定, 继续与 OH 作用生成两种产物 5-羟基-6-氢合胸腺嘧啶和 6-羟基-5-氢合胸腺嘧啶。两种产物的摩尔分数分别约为 60% 和 40%<sup>[28]</sup>, 另外还可能是腺嘧啶脱氧核苷在 OH 的作用下与水发生反应, 生成氢合胸腺嘧啶脱氧核苷, 氢合胸腺嘧啶脱氧核苷有两种结构, 分别是 5-羟基-6-氢合胸腺嘧啶脱氧核苷和 6-羟基-5-氢合胸腺嘧啶脱氧核苷, 其中部分物质在 OH 的作用下脱糖, 变成 5-羟基-6-氢合胸腺嘧啶和 6-羟基-5-氢合胸腺嘧啶。而 OH 的来源是由于空气放电过程中, 产生的臭氧、O<sub>2</sub> 及 O 等粒子, 这些粒子与水作用后生产的 OH(H<sub>2</sub>O+O→2OH)。同样 OH 在与腺嘧啶脱氧核苷作用过程中能够取代 6 圆环中在碳原子上的 H, 生成 5-羟基-6-氢合胸腺嘧啶脱氧核苷或者 6-羟基-5-氢合胸腺嘧啶脱氧核苷, 然而生成 5-羟基-6-氢合胸腺嘧啶脱氧核苷的机会要大<sup>[29]</sup>, 反应过程如图 7 所示。随着处理时间的延长, 空气处理后的溶液 pH 值从处理前的 7.000 降低到了 30 min 后的 5.274, pH 值变化的主要原因是空气放电过程中产生的 NO<sub>x</sub> 与水作用使溶液呈现酸性, 而酸性条件有利于上述反应的进行<sup>[30]</sup>。

随后用空气等离子体对腺嘧啶脱氧核苷进行了处理, 发现除了原料的  $m/z=126.0$ , 还出现了  $m/z=144.1$ , 与图 6(d) 相同, 证明了胸腺嘧啶再与 OH 作用生成氢合胸腺嘧啶脱氧核苷。我们还利用 Esquire 3000 Plus 色谱仪给出色谱曲线, 如图 8 所示。各个峰值下的面积如表 3 所示: 可以看出表 3 中胸腺嘧啶的摩尔分数在 N<sub>2</sub> 等离子体处理过程中 15 min 基本不变, 约为 58%, 然而空气等离子体处理过程中摩尔分数进一步下降为约 39%, 说明随着含氧自由基浓度的增加胸腺嘧啶能够被进一步氧化。此外, 氢合胸腺嘧啶脱氧核苷处理过程中, 随着胸腺嘧啶的增加其比例迅速增加, 说明氢合胸腺嘧啶脱氧核苷主要来源于胸腺嘧啶。

进而用氧气等离子体对胸腺嘧啶溶液进行了处理, 发现产物峰的位置与空气等离子体处理后峰的位置一致, 只是峰的强度不同, 如图 9 所示, 峰的面积如表 4 所示。处理过程中溶液的 pH 值基本没有变化。

氧气等离子体与水作用过程中, 主要是  $O+H_2O\rightarrow 2OH$ , 所以水中的 OH 摩尔分数较其他气

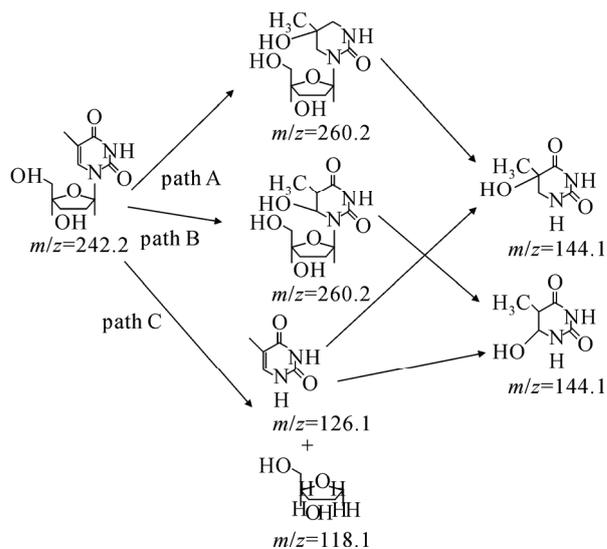


图 7 反应流程示意图

Fig.7 Reaction process diagram

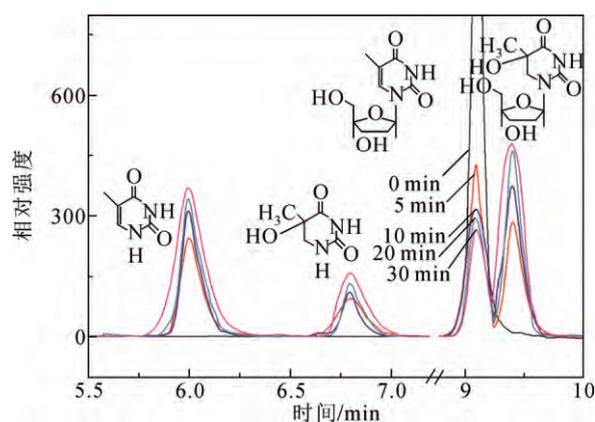


图 8 空气等离子体不同处理时间处理色谱曲线图

Fig.8 Chromatographic curve after treatment with Air plasma for different time

表 3 空气等离子体处理胸腺嘧啶脱氧核苷过程中, 各成分含量随时间变化

Table 3 Changes of the contents of Thymidine in solution treated by Air plasma for different time

处理时间 /min	摩尔分数/%			
	胸腺嘧啶	氢合胸腺嘧啶	胸腺嘧啶脱氧核苷	氢合胸腺嘧啶脱氧核苷
5	32.78	4.04	56.47	6.71
10	37.03	4.54	51.18	7.25
15	42.70	5.59	43.53	8.18
30	45.20	6.33	39.41	9.06

体等离子体与水反应后生产的 OH 多, 进而反应后胸腺嘧啶和氢合胸腺嘧啶和氢合胸腺嘧啶脱氧核苷

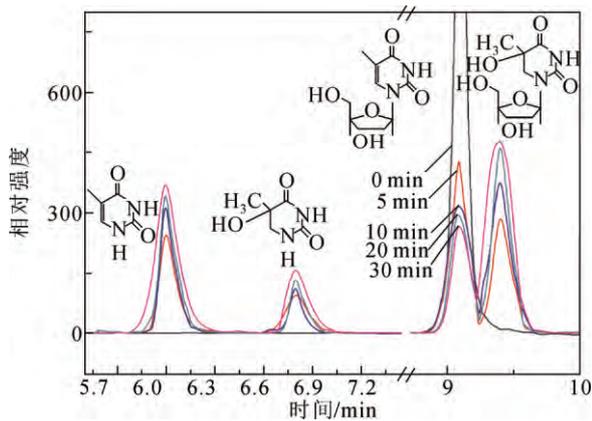


图9 O<sub>2</sub>等离子体不同处理时间处理色谱曲线图

Fig.9 Chromatographic curve after treatment with O<sub>2</sub> plasma for different time

表4 氧气等离子体处理胸腺嘧啶脱氧核苷, 各成分摩尔分数随时间变化

Table 4 Changes of the contents of Thymidine in solution treated by O<sub>2</sub> plasma for different time

处理时间 /min	摩尔分数/%			
	胸腺嘧啶	氢合胸腺嘧啶	胸腺嘧啶脱氧核苷	氢合胸腺嘧啶脱氧核苷
5	37.96	5.97	46.48	9.59
10	41.18	6.32	42.35	10.15
15	43.72	8.54	34.71	13.03
30	46.50	9.63	28.97	14.90

摩尔分数较高。与空气等离子体处理的结果不同的是胸腺嘧啶脱氧核苷摩尔分数下降较大, 导致氢合胸腺嘧啶和氢合胸腺嘧啶脱氧核苷摩尔分数大幅增加。另外, 胸腺嘧啶脱氧核苷摩尔分数下降较大, 而与氮气处理 30 min 后浓度相比胸腺嘧啶摩尔分数变化大, 摩尔分数均约为 46%。与空气等离子体处理过程相比, 溶液的 pH 值变化不大, 氧化过程主要是 H 和 OH 同时参与各种反应过程。

### 3 结论

1) 氩气等离子体处理胸腺嘧啶脱氧核苷溶液后, 能够将胸腺嘧啶脱氧核苷分子逐渐分解成胸腺嘧啶分子。随着处理时间的增加, 溶液 pH 值略有下降。

2) 氮气等离子体处理腺嘧啶脱氧核苷溶液, 产物与氩气等离子体处理结果相同。不同之处在于, 氮气等离子体处理过程中胸腺嘧啶脱氧核苷的分解

速度明显快于氩气等离子体, 可能的原因是氮气放电击穿电压较高, N 离子和电子与水作用过程中, 产生的 OH 和 H 自由基较多。

3) 空气等离子体处理胸腺嘧啶脱氧核苷溶液, 除了产生胸腺嘧啶之外, 还发现了两种新的产物, 一种是  $m/z=144$  为胸腺嘧啶+OH, 另一种是  $m/z=260.2$  为胸腺嘧啶脱氧核苷+OH; 溶液 pH 值下降至 5.274, 主要是由于 NO<sub>x</sub> 与水作用后致使溶液呈现酸性。

4) 氧气等离子体处理胸腺嘧啶脱氧核苷溶液, 产物与空气等离子体处理结果相同, 只是产物的比例不同。

### 参考文献 References

- [1] Kong M G, Kroesen G, Morfill G, *et al.* Plasma medicine: an introductory review[J]. *New Journal of Physics*, 2009, 11(11): 115012.
- [2] Babaeva N Y, Kushner M J. Reactive fluxes delivered by dielectric barrier discharge filaments to slightly wounded skin[J]. *Journal of Physics D, Applied Physics*. 2013, 46(2): 025401.
- [3] Graves D B. The emerging role of reactive oxygen and nitrogen species in redox biology and some implications for plasma applications to medicine and biology[J]. *Journal of Physics D, Applied Physics*. 2012, 45(26): 263001.
- [4] Woedtke T, Reuter S, Masur K, *et al.* Plasmas for medicine[J]. *Physics Reports*. 2013, 530: 291-320.
- [5] Song Y, Liu D P, Wang W C, *et al.* The brush-shape device to generate atmospheric and homogeneous plasmas for biomedical applications[J]. *Plasma Processes and Polymers*, 2013, 10(11): 88-93.
- [6] Zhang X, Li M, Zhou R, *et al.* Ablation of liver cancer cells in vitro by a plasma needle[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93: 02150.
- [7] Zhang X, Huang J, Liu X, *et al.* Treatment of streptococcus mutans bacteria by a plasma needle[J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 105(6): 063302.
- [8] Robinson K R. The responses of cells to electric fields: a review[J]. *The Journal of Cell Biology*, 1985, 101: 2023-7.
- [9] 李娅西, 邵先军, 彭兆裕, 等. 介质阻挡放电对橙汁灭菌及其品质的影响[J]. *高电压技术*, 2012, 38(1): 211-216. LI Yaxi, SHAO Xianjun, PENG Zhaoyu, *et al.* Effect of dielectric barrier discharge on microorganism inactivation and quality of orange juice[J]. *High Voltage Engineering*, 2012, 38(1): 211-216.
- [10] Stoffels E, Flikweert A J, Stoffels W W, *et al.* Plasma needle: a non-destructive atmospheric plasma source for fine surface treatment of (bio)materials[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2002, 11(4): 383-388.
- [11] Kieft I E, Laan E Pvd, Stoffels E. Electrical and optical characterization of the plasma needle[J]. *New Journal of Physics*, 2004, 6: 149.
- [12] Kieft I E, Broers J L V, Caubet-Hilloutou V, *et al.* Electric discharge plasmas influence attachment of cultured CHO K1 cells[J]. *Bioelectromagnetics*, 2004, 25(5): 362-368.
- [13] Sosnin E A, Stoffels E, Erofeev M V, *et al.* The effects of UV irradiation and gas plasma treatment on living mammalian cells and bacteria: a comparative approach[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science* 2004, 32(4): 1544-1550.

- [14] Boudam M K, Moisan M, Saoudi B, *et al.* Bacterial spore inactivation by atmospheric-pressure plasmas in the presence or absence of UV photons as obtained with the same gas mixture[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2006, 39(16): 3494.
- [15] 孔刚玉, 刘定新. 气体等离子体与水溶液的相互作用研究——意义、挑战与新进展[J]. *高电压技术*, 2014, 40(10): 2956-2965.  
KONG Gangyu, LIU Dingxin. Researches on the interaction between gas plasmas and aqueous solutions: significance, challenges and new progresses[J]. *High Voltage Engineering*, 2014, 40(10): 2956-2965.
- [16] Liu D X, Bruggeman P, Iza F, *et al.* Global model of low-temperature atmospheric-pressure He+H<sub>2</sub>O plasmas[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2010, 19(2): 025018.
- [17] Eisuke Takai, Tsuyoshi Kitamura, Junpei Kuwabara, *et al.* Chemical modification of amino acids by atmospheric-pressure cold plasma in aqueous solution[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2014, 47(28): 285403.
- [18] Titushkin I, Cho M. Regulation of cell cytoskeleton and mechanics by electric field: role of linker proteins[J]. *Biophysical Journal*, 2009, 96: 717-28.
- [19] Zhang X H, Liu D P, Song Y, *et al.* Atmospheric-pressure air micro-plasma jets in aqueous media for the inactivation of pseudomonas fluorescens cells[J]. *Physics of Plasmas*, 2013, 20(8): 053501.
- [20] Malik M A, Chaffar A, Malik S A. Water purification by electricalm-discharges[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2001, 10(1): 82-91.
- [21] 罗海云, 冉俊霞, 王新新. 大气压不同惰性气体介质阻挡放电特性的比较[J]. *高电压技术*, 2012, 38(5): 1070-1077.  
LUO Haiyun, RAN Junxia, WANG Xinxin, *et al.* Comparison study of dielectric barrier discharge in inert gases at atmospheric pressure[J]. *High Voltage Engineering*, 2012, 38(5): 1070-1077.
- [22] 柳晶晶, Kong Michael G. 大气压下 He 和 N<sub>2</sub> 辉光放电等离子体对生物用薄膜表面改性的研究[J]. *高电压技术*, 2012, 38(5): 1106-1113.  
LIU Jingjing, KONG Michael G. Research on the surface modification by atmospheric He and N<sub>2</sub> glow discharge[J]. *High Voltage Engineering*, 2012, 38(5): 1106-1113.
- [23] Gao X, Liu Y, Xu P X, *et al.* Alpha-amino acid behaves differently from beta- or gamma-amino acids as treated by trimetaphosphate[J]. *Amino Acids*, 2008, 34: 47-53.
- [24] Vivekanand S, Sadflek M, Chen X, *et al.* Modeling deoxyribose radicals by neutralization-reionization mass spectrometry, part 2: preparation, dissociations, and energetics of 3-hydroxyoxolan-3-yl radical and cation[J]. *Journal of The American Society for Mass Spectrometry*, 2004, 15: 1068-1079.
- [25] Steenken Steen. Electron-transfer-induced acidity/basicity and reactivity changes of purine and pyrimidine bases. Consequences of Redox Processes for Dna Base Pairs[J]. *Free Radical Research*, 1992, 16(6) : 349-379.
- [26] Su X, Huang Q, Dang B, *et al.* Spectroscopic assessment of argon gas discharge induced radiolysis of aqueous adenine and thymine[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2011, 80: 1343-1351.
- [27] Cysewski P. Molecular perspective review of biochemical role of nucleobases modified by oxidative stress[J]. *Journal of Molecular Structure*, 1999, 467: 51-61.
- [28] Gajewski E, Rao G, Nackerdien Z, *et al.* Modification of DNA bases in mammalian chromatin by radiation-generated free radicals[J]. *Biochemistry*, 1990, 29(34): 7876-7882.
- [29] Bjelland S, Eide L, Time R W, *et al.* Oxidation of thymine to 5-formyluracil in DNA, mechanisms of structural implications, and base excision by human cell free extracts[J]. *Biochemistry*, 1995, 34: 14758-14764.
- [30] Goyal R N, Dhawan A. Oxidation chemistry of 2'-deoxyadenosine at pyrolytic graphite electrode[J]. *Bioelectrochemistry*, 2006, 69: 223-233.



YANG Size

Ph.D., Professor



YANG Zhoubin



ZHOU Renwu



ZHANG Xianhui

Ph.D.

**杨思泽**

1947—, 男, 博士, 教授, 博导  
主要从事真空弧结合空心阴极弧材料表面改性;  
高能量密度等离子体枪装置及材料处理研究管件  
内壁等离子体注入材料改性等领域的研究  
E-mail: yangsz@aphy.iphy.ac.cn

**杨周斌**

1991—, 男, 硕士生  
主要从事大气等离子体, 薄膜物理方面的工作  
E-mail: 395603989@qq.com

**周仁武**

1990—, 男, 硕士生  
主要从事大气等离子体, 等离子体生物方面的工作  
E-mail: zhounwu2008@gmail.com

**张先徽**

1976—, 男, 博士, 助理教授  
主要从事开发新的大面积大气压等离子体源及生  
物医学以及等离子体在处理废水和废气等领域研  
究  
E-mail: zhangxh@xmu.edu.cn

收稿日期 2015-02-01 修回日期 2015-04-11 编辑 曹昭君