

# 光电离质谱技术在线监测 不同部位烟草裂解产物

王 健<sup>1</sup>, 葛少林<sup>1</sup>, 谢映松<sup>1</sup>, 张 朝<sup>1</sup>, 黄 兰<sup>1</sup>,  
汪 华<sup>1</sup>, 袁 龙<sup>1</sup>, 贾良元<sup>2</sup>, 仰 科<sup>2</sup>, 雷 振<sup>1</sup>

(1. 安徽中烟工业有限责任公司, 烟草行业燃烧热解重点实验室, 安徽 合肥 230088;

2. 合肥工业大学化学与化工学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:**为了实时、在线研究烟草原料烟丝的热裂解产物, 本工作搭建了一套热裂解光电离质谱装置。利用真空紫外光电离飞行时间质谱装置研究烤烟烟丝不同部位(上-B2F、中-C3F 和下-X2F)分别在 300、400、500、600 和 700 °C 热裂解时的产物, 在线获得 3 个部位烟丝一系列热解产物的光电离质谱图, 比较不同裂解温度下热解产物的变化规律。实验进一步分析了 500 °C 下热解产物, 如乙烯胺( $m/z$  43)、异戊二烯( $m/z$  68)和二甲基咪唑( $m/z$  96)等信号强度随时间的动态变化曲线, 掌握裂解反应的动态变化过程。通过主成分分析(PCA)法对裂解产物质谱图进行统计分析, 得到不同部位烟丝化学成分的差异。其中,  $m/z$  58、96、110 组分为下部烟(X2F)热解的标志性产物,  $m/z$  43、126 组分为中部烟(C3F)的代表性产物, 上部烟(B2F)的主要代表性产物为  $m/z$  84 组分。结果表明, 光电离质谱技术是一种研究烟草热解产物动态变化的重要手段, 可通过评估裂解产物中主要成分及相对含量快速区分不同部位烟草样品。

**关键词:**光电离质谱; 烟草; 热裂解; 实时研究; 动态变化; 主成分分析(PCA)

中图分类号: O657.63

文献标志码: A

文章编号: 1004-2997(2023)01-0078-09

doi: 10.7538/zpxb.2022.0051

## On-line Monitoring of Tobacco Pyrolysis Products in Different Parts by Photoionization Mass Spectrometry

WANG Jian<sup>1</sup>, GE Shao-lin<sup>1</sup>, XIE Ying-song<sup>1</sup>, ZHANG Zhao<sup>1</sup>, HUANG Lan<sup>1</sup>,  
WANG Hua<sup>1</sup>, YUAN Long<sup>1</sup>, JIA Liang-yuan<sup>2</sup>, YANG Ke<sup>2</sup>, LEI Zhen<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Combustion and Pyrolysis, China Tobacco Anhui Industrial Co., Ltd.,

Hefei 230088, China; 2. School of Chemistry and Chemical Engineering,

Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** An on-line pyrolysis-vacuum ultraviolet photoionization mass spectrometer was built for the analysis of pyrolysis products of tobacco. Vacuum ultraviolet photoionization is a "soft" ionization method producing few or no fragments of molecular ions, and identifying the complex pyrolysis products in real time. In this work, the pyrolysis of

tobacco leaves from various stalk positions (B2F, C3F and X2F) at 300, 400, 500, 600 and 700 °C, and the effects of reaction temperature on the pyrolysis products intensity were studied. A series of mass spectra of pyrolysis products were obtained, and the changes of products at different pyrolysis temperatures were compared. The analysis results of products at different pyrolysis temperatures were helpful to reveal the formation mechanism of compounds in different parts of cut tobacco during pyrolysis/combustion. The dynamic curves of pyrolysis products such as vinylamine ( $m/z$  43), isoprene ( $m/z$  68) and dimethylfuran ( $m/z$  96) with time were further observed at 500 °C, so as to master the dynamic change process of pyrolysis reaction. It was found that the increase of temperature can dramatically shorten the reaction time. Generally, the primary products will be formed at the medium cracking temperature, and gradually pyrolyzed into secondary products with the increase of temperature, the secondary products will be accompanied by higher temperature cracking and thermal synthesis to form tertiary products. In order to quickly screen and identify different parts of tobacco, principal component analysis (PCA) was used to analyze the mass spectra of pyrolysis products, and the differences of chemical components in different parts of tobacco were identified. Then, the components with  $m/z$  58, 96, 110 were the typical products of X2F, the components with  $m/z$  43, 126 were the representative products of C3F, and the main representative product of B2F was the component with  $m/z$  84. Based on the above results, photoionization mass spectrometry was important to study the dynamic changes of tobacco pyrolysis products, the pyrolysis products of different parts of tobacco were quickly identified at 300-700 °C, and the main pyrolysis products were summarized. By comprehensively evaluating the main components and relative content of pyrolysis products, tobacco samples from different parts can be quickly distinguished.

**Key words:** photoionization mass spectrometry; tobacco; pyrolysis; real-time analysis; dynamic behavior; principal component analysis (PCA)

卷烟烟气是一种动态变化的复杂混合物,已测定的化学成分近数千种,其中一部分来自烟草本身,其余主要通过烟叶原料燃烧、裂解等反应产生<sup>[1]</sup>。烟草裂解是接近于卷烟燃烧过程的一种实验方法,使研究烟气成分与烟草产品之间的关系成为可能<sup>[2]</sup>。通常,裂解产物的分析方法主要有气相色谱法、红外光谱法和质谱法等<sup>[3-5]</sup>,可有效检测燃烧产物。近年来,有文献采用热重分析法(TG)、热重-红外联用(TG-FTIR)技术以及热裂解-色谱/质谱联用(PY-GC/MS)技术等<sup>[6-10]</sup>研究烟叶热裂解过程。其中,虽然气相色谱法成熟可靠,但属于离线方法,无法实现热解产物的实时分析;由于复杂烟气体系的谱峰间存在干扰,红外光谱法通常只能分析少数挥发性物质;传统的质谱技术采用 70 eV 轰击电离会产生

大量的碎片离子,使烟草裂解产物谱图的解析存在困难。

为了获取裂解产物的初始信息,建立实时、在线的分析方法十分必要。光电离适用于极性和非极性分子,且很少产生碎片离子,适合燃烧/热解产物的实时、在线研究。目前,已有文献<sup>[11-14]</sup>使用光电离技术研究包括烟草在内的生物质样品等的裂解/燃烧产物,但对烟草裂解产物的在线研究主要集中于气相组分,对裂解过程中产物的动态变化关注较少。

本工作利用自制的热裂解装置结合光电离质谱技术实时、在线研究不同部位烟草样品的热解全组分产物,观察烟草热解产物的动态变化,找寻上、中、下 3 个部位烟草样品之间的共性和差异,旨在卷烟叶组配方的设计提供指导。

## 1 实验部分

### 1.1 仪器和材料

自制的微型流化床热解装置(microfluidized-bed reactor, MFBR)、自制的光电离-垂直引入飞行时间质谱仪;质量流量计:中国七星华创电子股份有限公司产品;高纯氮气(纯度99.999%);南京特种气体有限公司产品。

实验所用烟草样品为云87某烤烟原料烟丝(上-B2F、中-C3F、下-X2F)。实验前将烟丝研磨成烟末,并于相对湿度60%、温度22℃的环境下保存48h,每次热解实验样品用量均为40mg。

### 1.2 实验装置和方法

热裂解-在线真空紫外光电离质谱装置在生物质和烟草热解领域得到了广泛应用。Jia等<sup>[15]</sup>证实了微型流化床热裂解-在线真空紫外光电离质谱装置在生物质热解中具有良好的信号稳定性。同时,影响主成分分析(principal component analysis, PCA)法结果的只有谱图中不同质量数质谱峰的相对丰度,在多次进样时或不同进样次数下质量数的绝对丰度几乎不会对分析结果造成影响。因此,PCA分析前采用乘法散射校正/扩展乘性散射校正(MSC/EMSC)

法对不同次进样下的谱图进行归一化预处理,以处理不同谱图中信号绝对丰度不一致的问题。

烤烟原料烟丝热裂解-光电离质谱装置示于图1。该装置主要由1台微型流化床热解装置(MFBR)、产物传输管道以及1套光电离-垂直引入飞行时间质谱仪组成<sup>[16]</sup>。MFBR具有优异的传热、传质性能,能够最大程度保留热解初级产物在MFBR内的化学成分及相对含量。MFBR采用石英玻璃制成,内径为20mm、高度约为15cm,用粒径150 $\mu\text{m}$ 高纯石英砂制成厚5mm石英砂芯,并将其作为MFBR的气体分布器。惰性床层材料由粒径150~300 $\mu\text{m}$ 高纯石英砂颗粒组成,以确保床层材料在热解过程中具有合适的悬浮运动状态。MFBR整体被放置在自制的电加热炉中,电加热炉外是由石英管制成的外壳,可以实时观察反应器内的热解反应过程。MFBR的气体传输管路被设计成2路:一路是流态化气体(从底部向上),流量为600mL/min;另一路是吹扫气(从顶部侧面通气,防止进样时空气进入),流量为50mL/min。产物传输管道是1根内径200 $\mu\text{m}$ 的熔融石英毛细管,末端导入飞行时间质谱仪光电离室。为防止热解产物冷凝,整个传输管道

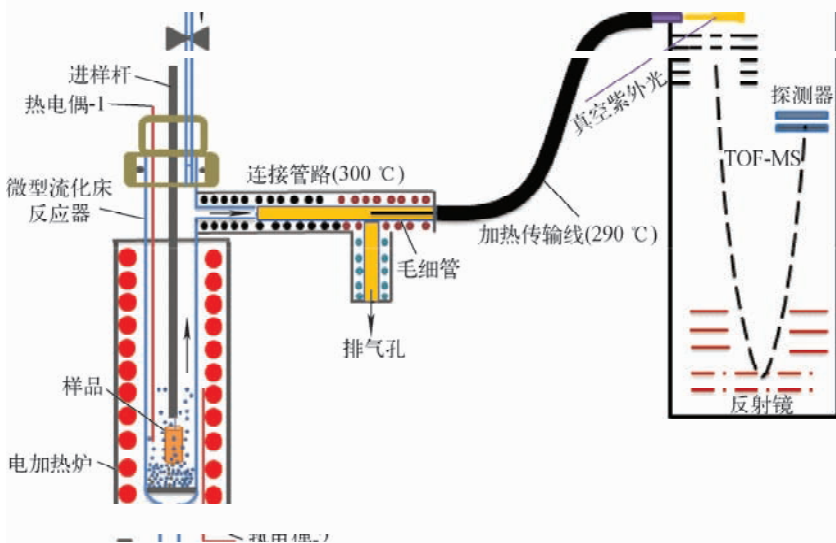


图1 原料烟丝热裂解-光电离质谱装置

Fig. 1 Pyrolysis photoionization mass spectrometer device for tobacco

被加热至 290 °C。

热解产物探测使用自制的光电离飞行时间质谱仪,飞行时间质谱仪采用反射式结构,质量分辨率约 2 000。电离源采用 1 个能量为 10.6 eV 的商用直流放电氙灯。中性分子在加速区域的排斥电极(16.0 V)和聚焦电极(-50 V)之间发生电离后,在电场作用下加速,经过漂移管、反射镜后,最终被微通道板探测器接收,离子信号被 1 套超快数据采集卡采集记录。

### 1.3 主成分分析法

主成分分析是数据处理中常用的降维分析法,其可将多个相关的变量降维转换成几个不相关的变量,即用较少变量替代多变量分析实验数据,同时保留实验数据的原始信息,适合处理和分析多变量下的复杂质谱图。烟草热解产物的光电质谱图中包含数以百计的谱峰,多变量(如温度、烟丝种类、产地等)条件下难以综合比较谱图差异。PCA 分析有利于找寻不同条件下复杂谱图中的主要差异,并给出产生此差异的变量信息。

本工作获得的光电离质谱图源数据均采用

MSC/EMSC 法预处理,并开展统计学分析。PCA 将质谱图源数据中的变化信息转化为新的变量(即 PC1、PC2 等)。在 PCA 主成分得分图(scores)中,PC1、PC2 分别代表影响质谱图差异的最大和第二大变量。在 PCA 点图(loadings)中,带有数字的点对应质谱图中的质量数,位于谱图中心的点对应的质量数是所有谱图共有的,即不影响 PC 变量;距离谱图中心越远的点代表此质量数是影响 PC 变量的标志性产物。

## 2 结果与讨论

### 2.1 热裂解-光电质谱图

本实验选取 B2F、C3F 和 X2F 3 种烟丝在相同条件下裂解,由于裂解产物的化学成分基本一致,仅对中部烟丝 C3F 在不同温度下的裂解变化进行说明,B2F 和 X2F 裂解产物质谱图示于附图 1(请登录《质谱学报》网站 <http://www.jcmss.com.cn> 下载)。C3F 原料烟丝在 300、400、500、600、700 °C 热解后,获得的光电离质谱图示于图 2。真空紫外光电离属于“软

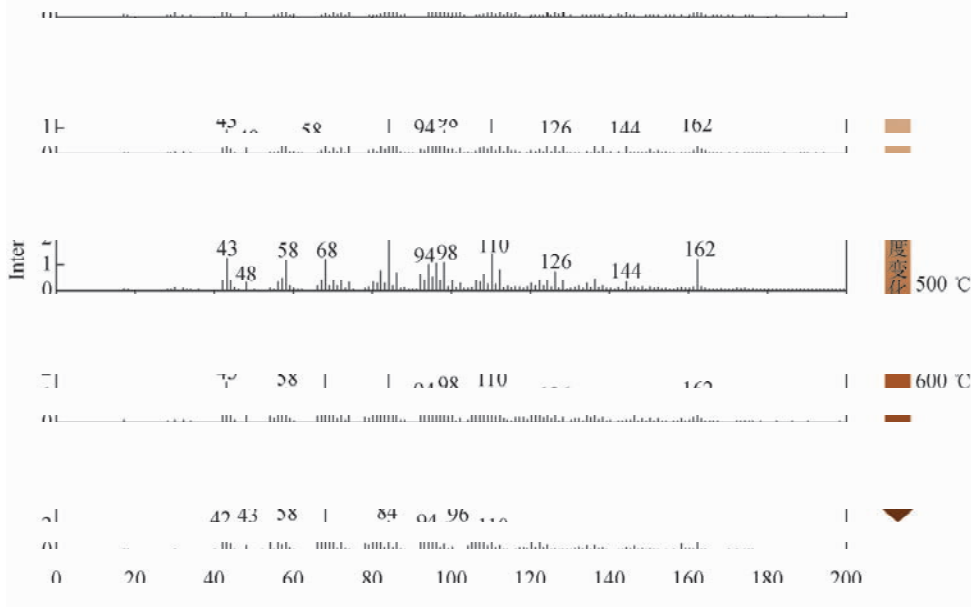


图 2 原料烟丝 C3F 在 300(a)、400(b)、500(c)、600(d)、700(e) °C 热解后的光电质谱图

Fig. 2 Photoionization mass spectra of tobacco C3F pyrolysis at 300 (a), 400 (b), 500 (c), 600 (d) and 700 (e) °C

电离”,只产生热解产物的母离子,质谱峰分别对应烟草内源性物质以及裂解产物。由于只有电离能小于 10.6 eV 的物质才能被电离,因而电离能较高的热解产物,包括 CO(14.01 eV)和 N<sub>2</sub>(15.58 eV)等无法被检测。

由图 2 可知,烟草裂解时产生了大量的产物( $m/z$  17~162)。除一些熟知的烟草标识性

组分外,还存在许多烟草生物质,包括木质素、纤维素以及果胶等裂解产物。由于烟草热解时会生成大量的产物,且产物形成过程中可能发生复杂的化学反应,因此确定所有热解产物的来源是非常困难的。根据文献<sup>[17-18]</sup>,利用光电离技术对烟草热解/燃烧产物进行的研究总结,得到烟丝的主要热解产物列于表 1。

表 1 原料烟丝的主要热解产物  
Table 1 Major pyrolysis products of tobacco

质荷比 ( $m/z$ )	化合物 Compound	质荷比 ( $m/z$ )	化合物 Compound	质荷比 ( $m/z$ )	化合物 Compound
17	氢气	68	呋喃/异戊二烯/环戊烯	98	呋喃甲醇/甲基-2-戊烯醛/1,3-环戊二酮
28	乙烯	69	吡咯啉	106	乙基苯/二甲苯
42	丙烯	72	2-甲基丙烯醛/2-丁酮/2-丁醛	110	甲基糠醛/苯二酚
43	乙烯胺	82	甲基呋喃/甲基环戊烯/环己烯/2-环戊烯-1-酮	122	乙基苯酚/苯甲酸
44	乙醛	84	3-甲基-2-丁烯醛/2-己烯	124	愈创木酚
48	甲硫醇	86	甲基丁醛/3-甲基-2-丁酮/戊酮/2,3-丁二酮	126	5-羟甲基糠醛
54	1,3-丁二烯/1-丁烯	92	甲苯	132	2,3-二氢-1-茛酮/2,5-二甲基苯乙烯
56	2-丙烯/丁烯/2-甲基丙烯	94	苯酚/2-乙烯基呋喃	136	2-乙基-5-甲酚/甲氧基苯甲醛/柠檬烯
58	丙酮/丙醛	95	吡啶醇/乙基吡咯/二甲基吡咯	144	1-萘酚
67	吡咯	96	二甲基呋喃/糠醛	162	尼古丁

热解产物的产生在很大程度上取决于热解温度的变化。从图 2 可见,当热解温度从 300 °C 升至 700 °C 时,多数低质量热解产物的质谱峰会明显增强,而大质量热解产物的质谱峰会降低。Evans 等<sup>[19]</sup>指出,烟草裂解产物特性与裂解强度存在显著的关联。通常,中等裂解温度会形成初级产物;随着温度升高,初级产物逐渐热裂解成次级产物;次级产物则会伴随更高的温度裂解以及热合成形成三级产物。在 300~700 °C 时,3 个部位原料烟丝的部分裂解产物强度变化示于图 3。3 种原料烟丝的裂解产物随温度变化呈基本一致的变化规律,区别在于信号强度不同。由结果可知,丙酮/丙醛( $m/z$  58)、呋喃/异戊二烯/环戊烯( $m/z$  68)和苯酚/2-乙烯基呋喃( $m/z$  94)等强度随温度升高而持续增加,其中,丙酮/丙醛和苯酚/2-乙烯基呋喃在 3 种原料烟丝中随温度变化裂解的含量大致相同,而呋喃/异戊二烯/环戊烯在 B2F 中随温度变化裂解的含量明显高于 C3F 和 X2F;

乙烯胺( $m/z$  43)、5-羟甲基糠醛( $m/z$  126)和尼古丁( $m/z$  162)等强度在 300~600 °C 随温度升高逐渐增加,700 °C 时表现为下降趋势,这与文献<sup>[20]</sup>结果吻合,其中,尼古丁( $m/z$  162)在 3 种原料烟丝中随温度变化裂解的信号强度差异比较明显,依次为 B2F>C3F>X2F,且在 C3F 中 600 °C 时表现为下降趋势。通过分析不同裂解温度下的产物,有助于揭示不同部位烟丝在热解/燃烧过程中化合物的形成机制。

## 2.2 烟丝热解产物的动态变化

光电离质谱是一种在线检测方法,可实时获得待测物随时间变化的情况,适合观测热解反应的动态变化过程。本实验中,不同部位原料烟丝(B2F、C3F 和 X2F)的热解产物随温度变化呈现一定的规律性。3 个不同部位烟丝在 500 °C 时部分热解产物( $m/z$  43、58、68、84、94、96、110、126 和 162)强度的动态变化过程示于图 4。

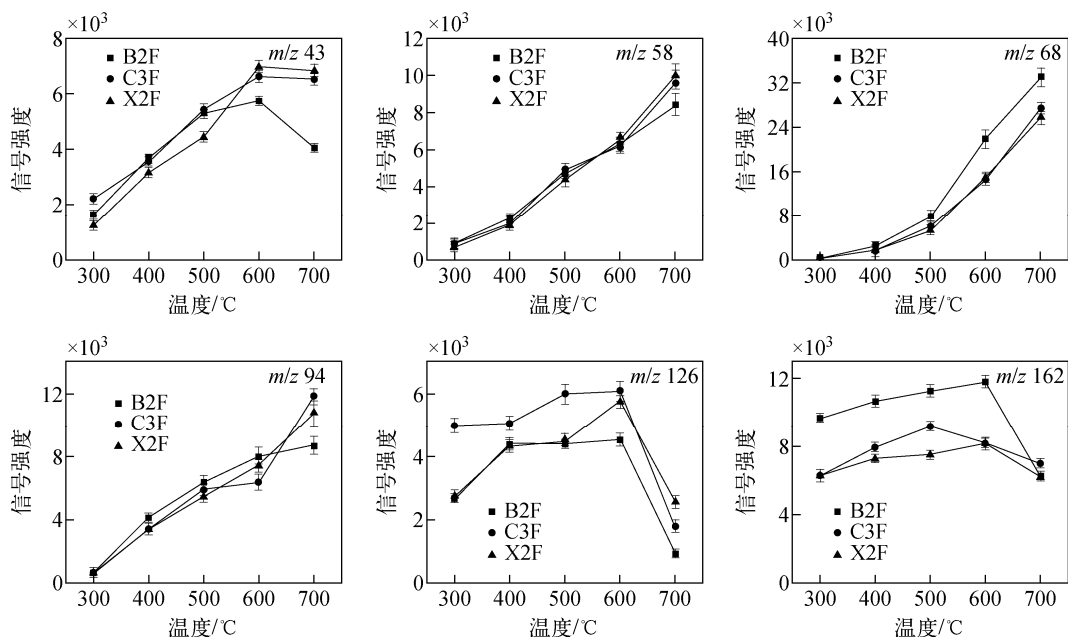


图 3 在 300~700 °C, 原料烟丝 B2F、C3F 和 X2F 部分热解产物的变化规律

Fig. 3 Variation of partial pyrolysis products of tobacco B2F, C3F and X2F at 300-700 °C

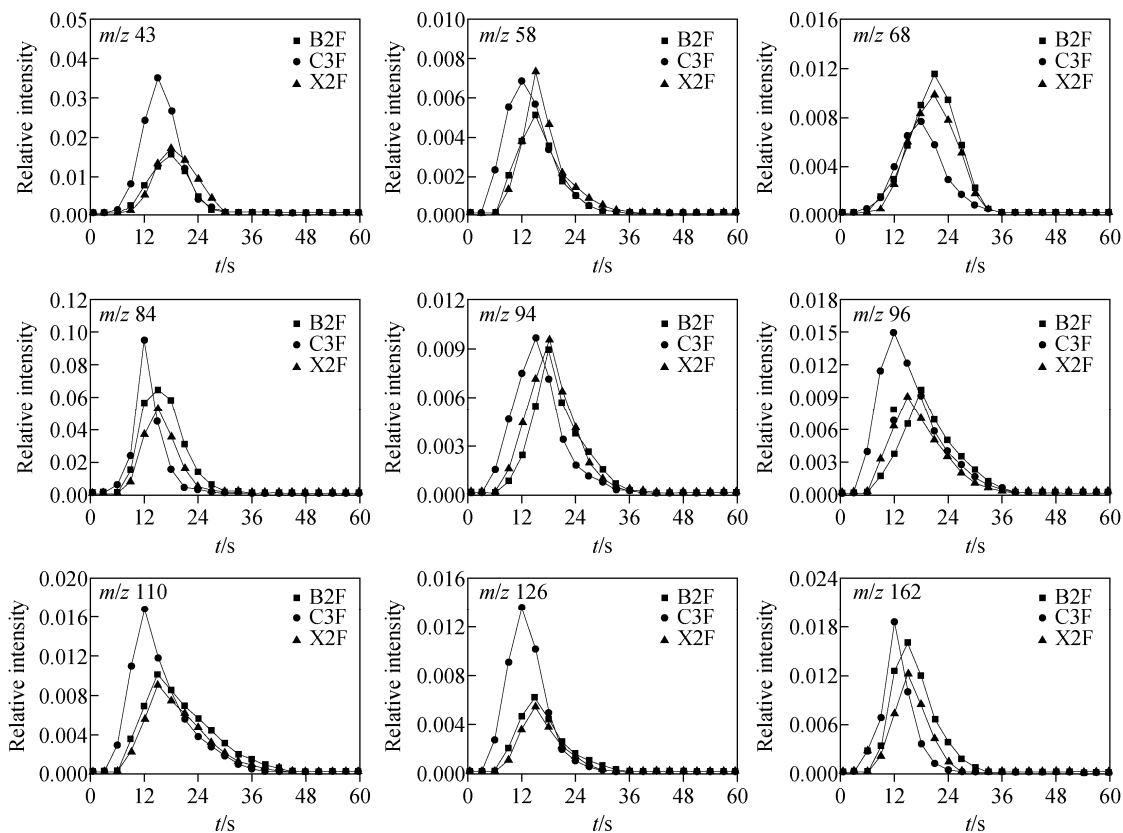


图 4 在 500 °C 时, 部分烟丝热解产物随时间的动态变化

Fig. 4 Dynamic behavior of pyrolysis products of some tobacco leaves with time at 500 °C

对比图 4 中 B2F、C3F 和 X2F 部分裂解产物可以发现,随着裂解时间的推移,所有裂解产物的强度均遵循先升后降的趋势。其中,C3F 的裂解产物在热解约 6 s 后开始出现,且  $m/z$  58、84、96、110、126、162,  $m/z$  43 和  $m/z$  68 成分浓度分别在约 12、15 和 18 s 时达到峰值; B2F 和 X2F 的裂解产物在热解约 9 s 后才开始出现,且  $m/z$  58、84、96、110、126、162,  $m/z$  43、94 和  $m/z$  68 成分浓度分别在约 15、18 和 21 s 时达到峰值。另外,从图 4 还可以看出,C3F 部位烟叶中,  $m/z$  43、94、110 和 126 组分的热

解产物强度明显高于 B2F 和 X2F。通过观测 500 °C 下裂解产物的动态变化过程,可以直观地获得 3 种不同部位烟叶裂解组分随时间的变化规律。

### 2.3 烟丝热解产物的主成分分析

为了快速筛查识别不同部位的烟丝,在 500 °C 热解条件下,对上、中、下不同部位的多批次烟丝进行热解,通过光电离子质谱检测分析,分别提取 3 个不同部位烟丝在  $m/z$  17~162 范围内的质谱信号进行 PCA 分析,结果示于图 5。

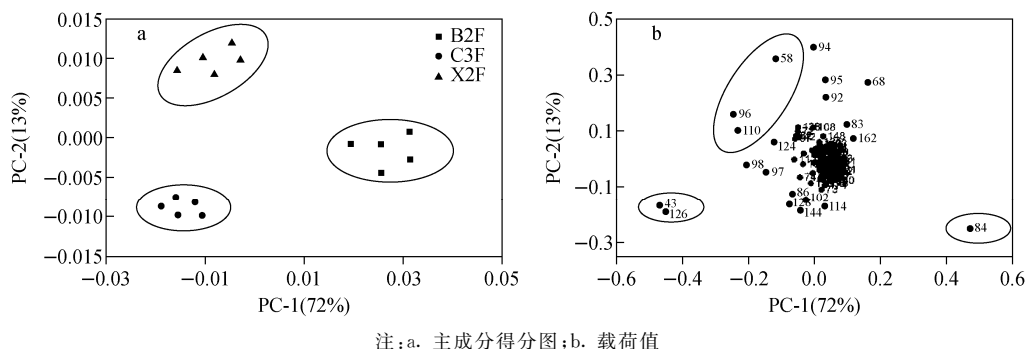


图 5 热裂解-光电离子质谱法检测 3 个部位烟丝的主成分分析结果

Fig. 5 Principal component analysis of three parts of tobacco leaves by pyrolysis photoionization mass spectrometry

从图 5a 可以看出,这 3 个部位烟草样品通过 2 个主成分因子(PC-1 和 PC-2)明显区分,同一部位烟草样品数据在图中自成一簇,具有相似的性质,而不同部位烟草样品的数据簇之间相距较远,表明性质差异较大。图 5b 中载荷值是主成分与相应原始指标变量的相关系数,用于反映因子与各变量之间的密切程度,即各产物( $m/z$ )对应各主成分的重要方差。其中,  $m/z$  58、96、110 为下部烟(X2F)热解的标志性产物;  $m/z$  43、126 为中部烟(C3F)的代表性产物;上部烟(B2F)的主要代表性产物为  $m/z$  84。由图 5 可知,PC-1 和 PC-2 的得分总和为 85%,主成分提取比较完全,可以替代原有的样品信息,表明热裂解-光电离子质谱法能够有效地快速区分不同部位烟草样品。

### 3 结论

本工作建立了一套热裂解-在线真空紫外光电离子质谱装置,通过在不同裂解温度下获得

一系列的光电离质谱图对不同部位烟草热解产物进行实时、在线研究。该方法能够快速鉴定不同部位烟草在 300~700 °C 的热裂解产物,通过进一步分析 500 °C 时的热解产物,包括乙烯胺( $m/z$  43)、异戊二烯( $m/z$  68)和二甲基咪唑( $m/z$  96)等随时间的动态变化,得到热解反应的动态变化过程,为研究产物形成机理提供指导。采用主成分分析法对裂解产物进行统计分析,全面评估烟草不同部位的主要成分,可达到快速区分不同部位烟草样品的目的。

### 参考文献:

- [1] RICHARD R B, LOUISE J B. The pyrolysis of tobacco ingredients[J]. J Anal Appl Pyrolysis, 2004, 71(1): 223.
  - [2] 王保会,吴键,郭春生,纪鹏,朱智志,张峻松. 烟叶热裂解产物的分析研究[J]. 郑州轻工业学院学报,2013,28(2):69-73.
- WANG Baohui, WU Jian, GUO Chunsheng, JI

- Peng, ZHU Zhizhi, ZHANG Junsong. Study on pyrolysis products analysis of tobacco leaf[J]. Journal of Zhengzhou University of Light Industry, 2013, 28(2): 69-73(in Chinese).
- [3] GUO W, CHUANG T, HUANG S, LEU W, HSIAO S. Thermal degradation behaviour of aromatic poly ( ester-imide ) investigated by pyrolysis-GC/MS[J]. J Polym Res, 2007, 14 (5): 401-409.
- [4] LIU Q, WANG S R, ZHENG Y, LUO Z Y, CEN K F. Mechanism study of wood lignin pyrolysis by using TG-FTIR analysis[J]. J Anal Appl Pyrolysis, 2008, 82(1): 170-177.
- [5] SENNECA C, CIARAVOLO S, NUNZIATA A. Composition of the gaseous products of pyrolysis of tobacco under inert and oxidative conditions[J]. J Anal Appl Pyrolysis, 2007, 79(1/2): 234-243.
- [6] AYSE E P, EYLEM O, BASAK B U, NUR-GUL O. Comparison between the “slow” and “fast” pyrolysis of tobacco residue[J]. Industrial Crops and Products, 2007, 26: 307-314.
- [7] 王燕,刘志华,刘春波,陈永宽,蒋丽红,王亚明. 不同部位烟叶的热重-红外-气质联用分析研究[J]. 现代化工, 2011, 31(6): 92-96.
- WANG Yan, LIU Zhihua, LIU Chunbo, CHEN Yongkuan, JIANG Lihong, WANG Yaming. Research on thermal decomposition behavior of components in different parts of tobacco[J]. Modern Chemical Industry, 2011, 31(6): 92-96 (in Chinese).
- [8] 陈翠玲,孔浩辉,曾金,官卫东,周海云. 不同部位烟叶的热失重和热裂解行为研究[J]. 中国烟草学报, 2013, 19(6): 9-18.
- CHEN Cuiling, KONG Haohui, ZENG Jin, GUAN Weidong, ZHOU Haiyun. Research on thermogravimetry and pyrolysis behavior of tobacco leaves from various stalk positions[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2013, 19(6): 9-18 (in Chinese).
- [9] 孔浩辉,鲁虹,陈翠玲,周海云,周榕. 不同氛围下烟草的热裂解行为研究[J]. 分析测试学报, 2010, 29(6): 612-616.
- KONG Haohui, LU Hong, CHEN Cuiling, ZHOU Haiyun, ZHOU Rong. Pyrolysing study of tobaccos under inert and oxidative conditions [J]. Journal of Instrumental Analysis, 2010, 29 (6): 612-616(in Chinese).
- [10] 张亚平,宁敏,周顺,王孝峰,何庆,余世科,鲍穗,田振峰,陈开波. 国内典型烤烟烟叶的燃烧行为与动力学特性研究[J]. 安徽农业科学, 2015, 43 (3): 200-205.
- ZHANG Yaping, NING Min, ZHOU Shun, WANG Xiaofeng, HE Qing, SHE Shike, BAO Sui, TIAN Zhenfeng, CHEN Kaibo. Investigation on the combustion behaviors and kinetic characteristics of national typical flue-cured tobacco leaves[J]. Journal of Anhui Agri Sci, 2015, 43(3): 200-205(in Chinese).
- [11] 赵忠俊,贺飞耀,陈婧,代渐雄,付玉,李宏,邓辅龙,郭星,蒲娟,段忆翔. 基于膜进样的紫外光电离飞行时间质谱仪研制及其在工作场所苯系物检测中的应用[J]. 质谱学报, 2021, 42(1): 16-23.
- ZHAO Zhongjun, HE Feiyao, CHEN Qian, DAI Jianxiong, FU Yun, LI Hong, DENG Fulong, GUO Xing, PU Juan, DUAN Yixiang. Development of membrane inlet based on ultra violet ionization time of flight mass spectrometer and its application in VOCs analysis at workplace [J]. Journal of Chinese Mass Spectrometry Society, 2021, 42(1): 16-23(in Chinese).
- [12] 赵婉,王健,戚可可,胡永华,吴刘天,刘成园,潘洋. 超声雾化萃取大气压光电离质谱法快速分析烟草化学成分[J]. 质谱学报, 2021, 42(3): 271-284.
- ZHAO Wan, WANG Jian, QI Keke, HU Yonghua, WU Liutian, LIU Chengyuan, PAN Yang. Rapid analysis of chemical components of tobacco by extractive atmospheric pressure photoionization mass spectrometry[J]. Journal of Chinese Mass Spectrometry Society, 2021, 42(3): 271-284(in Chinese).
- [13] 刘成园,潘洋. 原位光电离质谱技术原理及应用[J]. 质谱学报, 2021, 42(4): 514-531.
- LIU Chengyuan, PAN Yang. Principles and applications of ambient photoionization mass spectrometry[J]. Journal of Chinese Mass Spectrometry Society, 2021, 42(4): 514-531(in Chinese).
- [14] 周忠岳,杨玖重,潘洋,齐飞. 同步辐射真空紫外光电离质谱在燃烧和催化研究中的应用进展[J]. 质谱学报, 2021, 42(5): 598-608.
- ZHOU Zhongyue, YANG Jiuzhong, PAN Yang, QI Fei. Recent applications of synchrotron vacu-



- um ultraviolet photoionization mass spectrometry in combustion and catalysis research[J]. Journal of Chinese Mass Spectrometry Society, 2021, 42(5): 598-608(in Chinese).
- [15] JIA L Y, LEBRECH Y, SHRESTHA B, FROWEIN M B, EHLERT S, MAUVIEL G, ZIMMERMANN R, DUFOUR A. Fast pyrolysis in a microfluidized bed reactor; effect of biomass properties and operating conditions on volatiles composition as analyzed by online single photoionization mass spectrometry[J]. Energy Fuels, 2015, 29(11): 7 364-7 374.
- [16] YANG K, WANG J H, HUANG J H, YANG J Z, PAN Y, XU M G, MA P Y, JIA L Y. Understanding the homogeneous reactions of primary tar from biomass pyrolysis by means of photoionization mass spectrometry[J]. Energy Fuels, 2020, 34(20): 12 678-12 687.
- [17] ADAM T, STREIBEL T, MITSCHKE S, MUEHLBERGER F, BAKER R R, ZIMMERMANN R. Application of time-of-flight mass spectrometry with laser-based photoionization methods for analytical pyrolysis of PVC and tobacco[J]. J Anal Appl Pyrolysis, 2005(74): 454-464.
- [18] PAN Y, HU Y H, WANG J, YE L L, LIU C Y, ZHU Z X. Online characterization of Isomeric/Isobaric components in the gas phase of mainstream cigarette smoke by tunable synchrotron radiation vacuum ultraviolet photoionization time-of-flight mass spectrometry and photoionization efficiency curve simulation[J]. Analytical Chemistry, 2013, 85(24): 11 993-12 001.
- [19] EVANS R J, MILNE T A. Molecular characterization of the pyrolysis of biomass[J]. Energy & Fuels, 1987, 1(2): 123-137.
- [20] 董宁宁. 不同温度条件下卷烟的热裂解 GC/MS 研究[J]. 质谱学报, 2003, 24(1): 283-286.
- DONG Ningning. Pyrolysis research on cigarette at different temperatures by GC/MS[J]. Journal of Chinese Mass Spectrometry Society, 2003, 24(1): 283-286(in Chinese).

(收稿日期:2022-03-16;修回日期:2022-10-19)