

原位大气压光电离质谱在线分析雪茄烟叶热解中的重质气态产物

章存勇¹, 朱孜涵², 时雅琪¹, 邹鹏¹, 丁乃红¹, 纵坤¹,
贾良元², 郭东锋¹

(1. 安徽中烟工业有限责任公司, 安徽省气溶胶解析调控及生物效应重点实验室, 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: 烟叶热解产生的重质气态组分因具有分子质量大、沸点高、结构易碎等特性, 使传统方法对这类组分开展原位在线分析存在挑战。本研究采用原位大气压光电离高分辨质谱(APPI-HRMS)技术, 结合孔口取样, 对多米尼加雪茄烟叶热解生成的重质气态组分进行在线分析。通过与单光子电离质谱原位在线检测结果对比, 证实了原位 APPI-HRMS 在探测重质气态组分($m/z > 200$)时具有显著优势。以此为基础, 通过原位、实时监测不同温度下烟叶热解过程中重质气态产物组分及相对含量的动态变化趋势, 揭示了热解温度对重质气态产物形成及释放规律的影响机制。结果表明, 原位 APPI-HRMS 是一种在线分析烟叶热解产物中重质气态组分的重要手段, 可为雪茄烟叶风味研究提供方法参考。

关键词: 原位大气压光电离源; 高分辨率质谱(HRMS); 雪茄烟叶; 重质气态产物

中图分类号: O657.63 文献标志码: A 文章编号: 1004-2997(2026)02-0219-09

DOI: 10.7538/zpxb.2025.0103

CSTR: 32365.14.zpxb.2025.0103

Online Analysis of Heavy Volatile Products from Cigar Leaves Pyrolysis Using *In-Situ* Atmospheric Pressure Photoionization Mass Spectrometry

ZHANG Cun-yong¹, ZHU Zi-han², SHI Ya-qi¹, ZOU Peng¹, DING Nai-hong¹, ZONG Kun¹,
JIA Liang-yuan², GUO Dong-feng¹

(1. Anhui Provincial Key Laboratory of Aerosol Analysis, Regulation and Biological Effect, China Tobacco Anhui Industrial CO., LTD., Hefei 230088, China;

2. School of Chemistry and Chemical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: This study presented a novel analytical strategy employing *in-situ* atmospheric pressure photoionization high-resolution mass spectrometry (*in-situ* APPI-HRMS) coupled with direct orifice sampling for the online and real-time analysis of heavy gaseous components ($m/z > 200$) generated during the pyrolysis of Dominican cigar leaves. Traditional methods, for example, single photoionization mass spectrometry (SPI-MS), face significant challenges in detecting these heavy components due to their large molecular weight, high boiling point and unstable chemical structure. Offline methods involving condensation risk induce secondary reactions, which compromise the

integrity of the initial pyrolysis products. In the present work, the experimental setup featured a pyrolysis reactor directly interfaced with an Orbitrap mass spectrometer equipped with an *in-situ* APPI source. Sampling was performed through a small orifice (0.5 mm in diameter) on the reactor, which was maintained at the pyrolysis temperature to minimize condensation. Pyrolysis products were immediately photoionized upon escape by a 117 nm vacuum ultraviolet (VUV) light emitted from a lamp positioned within 5 mm of the orifice and the ion transfer tube. A counter-flow of high-purity nitrogen gas prevented atmospheric interference, avoided VUV light absorption, suppressed sample oxidation, and diluted gaseous products to avert secondary oligomerization. A critical comparison between *in-situ* APPI-HRMS and SPI-MS for the analysis of pyrolysis products at 650 °C revealed the distinct superiority of APPI-HRMS in detecting heavy components. Leveraging its real-time monitoring capability, this study investigated the dynamic release profiles of heavy gaseous products at different pyrolysis temperatures (450 °C and 650 °C), revealing that the peak release times of all products were advanced by approximately 15 s at elevated temperatures, with nicotine ($C_{10}H_{14}N_2$) being the earliest released compound. These findings provide insights into the analysis of flavor profile dynamics in cigars. Furthermore, the effect of pyrolysis temperature on the gaseous products from cigar leaf pyrolysis was systematically analyzed and discussed. The results demonstrated that pyrolysis at 650 °C promotes secondary reactions such as dehydrogenation and condensation, leading to the formation of compounds with higher carbon numbers ($C>18$) and higher double bond equivalents ($DBE>10$), particularly N_1 - and O_3 -class species. In contrast, pyrolysis at 450 °C primarily generates low-molecular-weight compounds with lower DBE values. In conclusion, the *in-situ* APPI-HRMS coupled with an orifice sampling strategy was demonstrated to be highly effective for the sensitive, real-time, and online analysis of heavy gaseous pyrolysis products from Dominican cigar leaves, thus providing a novel technical foundation for in-depth investigation in the chemical composition of heavy gaseous products during cigar leaf pyrolysis.

Key words: *in-situ* atmospheric pressure photoionization source; high-resolution mass spectrometry (HRMS); cigar leaf; large mass gaseous products

雪茄作为一类受欢迎的烟草制品,因其复杂的原料配方与独特的加工工艺,形成了独一无二的风味特色。近年来,国产雪茄发展态势较为迅速^[1],但国际品牌仍凭借成熟的工艺与浓厚的历史积淀占据高端市场主导权。长期以来,高端手工雪茄原料几乎完全依赖进口,国产雪茄原料的品质已成为制约其在国内外中高端雪茄市场竞争力的直接因素^[2]。烟气作为雪茄烟风格特征和感官品质形成的物质基础^[3],是构筑雪茄烟产品核心技术的关键因素之一^[4]。因此,深入分析雪茄烟气的化学组成及释放特性,对提升国产雪茄烟的感官质量具有重要意义^[5]。目前,与雪茄烟气相关的研究均以雪茄成品烟为研究对象。与常规卷烟相比,雪茄成品烟(尤其是手工卷制烟)存在产品规格差异大、燃烧过程中烟气成分不

稳定等问题,导致仪器分析结果的重现性较差。烟叶品质决定了雪茄烟的风味特征及抽吸过程中的香气层次^[6],而直接分析雪茄烟叶热解形成的气态产物可有效避免上述问题^[7]。

鉴于雪茄烟气组分复杂且多变的特性,选取适合的分析技术对雪茄烟叶热解过程中形成的气态产物进行原位在线分析至关重要。常用的气相色谱(GC)和红外光谱法等分析技术^[8-9],或是无法提供初始产物的实时动态信息,或是只能提供少数官能团的结构信息^[10]。传统的质谱在线分析技术往往采用 70 eV 电子电离源(EI),该电离方式会产生大量的碎片离子,给热解产物谱图解析带来较大困难^[10]。此前,单光子电离质谱(SPI-MS)技术已被证明在原位在线监测成品烟燃烧或热解产物中具有独特优势^[11],但其更适用

于原位分析沸点较低的低质量气态产物($m/z < 200$), 而缺失的重质气态产物组分(即 $m/z > 200$, 沸点较高的可凝蒸气相组分)中可能包含重要的风味物质成分信息。分析这类重质热解产物组分的传统方法往往采用“先低温冷凝, 再离线分析”的技术路线^[12], 但重质组分在冷凝或溶液中很可能发生二次反应。因此, 选取更先进的原位在线分析方法直接监测雪茄烟叶热解中的重质气态产物组分及释放规律的信息具有重要意义。

大气压光电离(APPI)是一种电离效率高、碎片离子少、对待测物没有电离极性歧视的“软电离”技术, 适用于复杂基质样品的直接分析^[13]。近年来, APPI 技术在石油组分鉴定^[14]、环境监测^[15]等领域已展现出显著优势, 证明了其在分析沸点较高、分子质量较大化合物的巨大潜力。然而, 目前尚未见将该技术应用于雪茄烟叶热解过程, 特别是针对重质气态热解产物的原位在线分析报道。

基于此, 本工作将原位大气压光电离高分辨质谱(APPI-HRMS)技术与孔口直接取样方法相

结合, 旨在实时、在线分析不同热解温度下雪茄烟叶的重质气态产物组成及其动态变化过程。

1 实验部分

1.1 仪器和材料

Orbitrap 质谱仪: 美国赛默飞科技公司产品; 单光子电离质谱仪、热解反应器: 实验室自制; 电热恒温鼓风干燥箱: 上海三发科学仪器有限公司产品。

多米尼加烟叶(茄芯, Criollo98): 作为优质雪茄烟叶的代表, 由安徽中烟工业有限责任公司提供。实验前, 去除烟叶主烟梗, 置于 35 °C 电热恒温鼓风干燥箱中干燥 12 h 后粉碎, 过 60 目(250 μm)筛, 将所得烟叶粉末密封保存, 确保其干燥状态, 避免吸湿。随后转移至 2 °C 冷藏设备, 避光储存。

1.2 实验装置和方法

热解反应器与原位 APPI 高分辨质谱通过孔口直接取样的方法相结合, 示于图 1^[16]。本工作中, “原位 APPI”指热解产物在被采样的位置及时被原位电离。

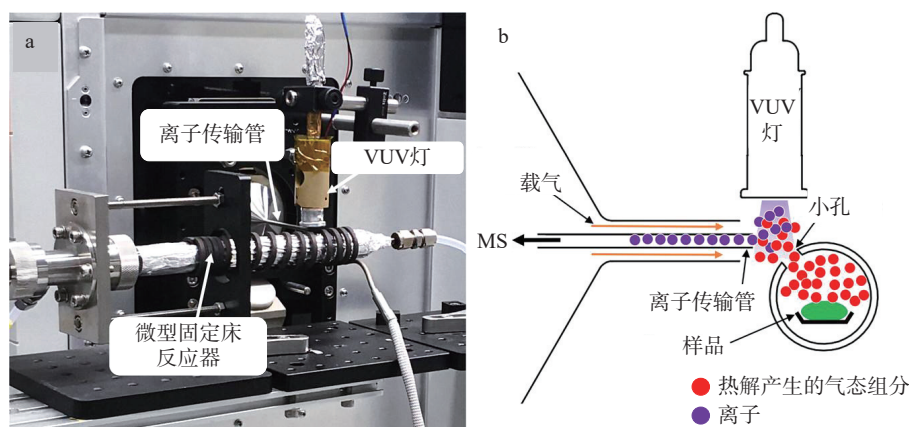


图 1 热解反应器通过孔口取样连接配备原位 APPI 源的高分辨率质谱仪的照片(a)和示意图(b)^[16]

Fig. 1 Photograph (a) and schematic diagram (b) of the pyrolysis reactor connected to a high-resolution mass spectrometer equipped with *in-situ* APPI via the direct orifice-sampling^[16]

从图 1 可见, 热解产物通过位于反应器上的小孔(内径约 0.5 mm)直接取样。石英反应器厚度为 1 mm, 孔口温度与热解温度一致, 有利于减少取样过程中的冷凝。孔口、真空紫外(VUV)灯(功率~0.75 W)及离子传输管三者中任意两者之间的距离保持在 5 mm 以内。在反应器孔口外, 从反应器中逃逸出的气态产物会立即被

117 nm(光子能量 10.6 eV)VUV 光电离, 产生的离子通过离子传输管导入 Orbitrap 质谱仪进行分析, 该质谱仪在 m/z 200 处的质量分辨率为 500 000。同时, 使用高纯辅助氮气(流速 1.0 L/min)从温度 300 °C 的离子传输管内对电离区实施反吹, 可有效防止中性分子进入质谱仪, 同时创造惰性气体环境以避免样品氧化及大气对 VUV 光

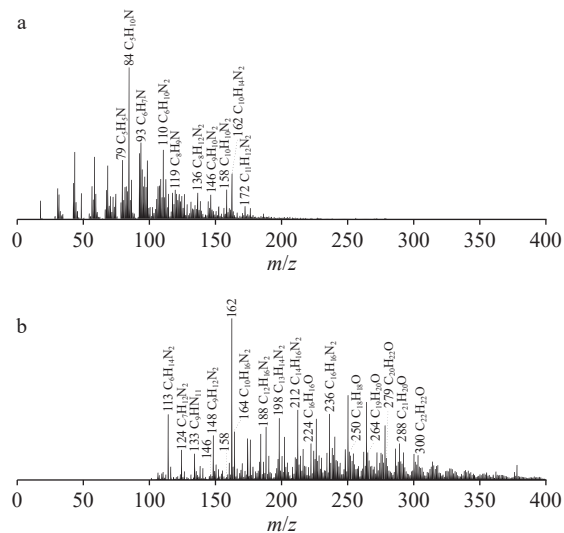
的吸收,还能即时稀释逃逸出的气态热解产物,从而避免二次低聚反应的发生。

实验中使用的 SPI-MS 通过传输线与热解反应器相连,传输线温度维持在 290 °C。电离源为光子能量 10.6 eV 的 VUV,电离产生的离子进入质谱室,经加速、自由飞行、反射和再次自由飞行后到达检测器进行检测。SPI-MS 在 m/z 200 处的质量分辨率约为 4 000。具体使用方法参见文献[7]。

2 结果与讨论

2.1 原位 APPI-HRMS 和 SPI-MS 方法对比

原位 APPI-HRMS 分析方法具有分析速度快、样品消耗少、灵敏度高优势,适用于复杂样品气态组分的直接分析。为体现原位 APPI-HRMS 在分析烟叶热解重质气态产物方面的优势,本研究采用该方法分析多米尼加烟叶在 650 °C 热解温度下的产物组分信息,并与 SPI-MS 在线方法进行对比,结果示于图 2。值得注意的是,APPI-HRMS 检测到的离子信号可能来源于多种途径:多环芳烃(PAHs)等非极性或弱极性化合物主要经由直接光电离产生分子离子峰(M^+);含氧、氮等极性杂原子的化合物由于较高的质子亲和力(PA),主要通过试剂离子发生质子转移反应,生成质子化分子离子峰 $[M+H]^+$ [17]。



注: a. 单光子电离质谱; b. 原位大气压光电离高分辨质谱

图 2 多米尼加雪茄烟叶在 650 °C 下的气态热解产物在线分析质谱图

Fig. 2 Mass spectra of products from Dominican cigar leaves pyrolysis at 650 °C obtained with different online analysis methods

因此,在解析质谱图时,需综合考虑化合物的极性及其可能的电离路径。

对比质谱图发现, SPI-MS 检测到的气相产物信号主要分布在相对较低的质荷比范围内($m/z < 200$),而 APPI-HRMS 检测到的气态产物信号则显著集中于高质荷比区域(m/z 100~400)。在 $m/z < 200$ 范围内, SPI-MS 和 APPI-HRMS 均可检测到麦司明(m/z 146)、二烯烟碱(m/z 158)、烟碱(m/z 162)等产物。 SPI-MS 在检测 C_5H_5N (m/z 79)、 $C_5H_{10}N$ (m/z 84)、 C_6H_7N (m/z 93)、 $C_6H_{10}N_2$ (m/z 110)、 C_8H_9N (m/z 119)等低质量分子物质信号时具有明显优势,而原位 APPI-HRMS 则对此类物质没有响应或响应灵敏度很低。值得注意的是,在 m/z 200~400 范围内,原位 APPI-HRMS 获得了种类繁多的热解产物组成信息,而 SPI-MS 几乎未检测到显著的物质信号。

综上,相较于 SPI-MS,本研究采用的原位 APPI-HRMS 结合孔口直接采样方法,显著提升了对烟叶热解重质气态产物($m/z > 200$)的检测灵敏度,表明该方法能够提供更丰富的雪茄烟叶气态热解产物信息,尤其是气态重质组分。

2.2 烟叶热解过程中气态产物的原位实时监测

雪茄烟的感官特征在抽吸过程中展现出显著的层次差异,这种差异与热解产物在时间分辨上的释放规律密切相关。为深入探究温度对烟叶热解行为及产物释放规律的影响,本研究基于热重分析结果与实际燃烧环境确定了 2 个关键温度点。吴东川等[18]发现,多米尼加烟叶在 400 °C 后的质量分数显著降低且趋于稳定,失重速率曲线趋近于 0,表明其热解过程已基本完成。因此,本研究选取 450 °C 作为代表热解完成的关键温度。同时,为更好地模拟实际燃烧条件,参考刘雪萍等[19]关于雪茄燃烧温度的研究,抽吸时燃烧锥中心高温区可达 600 °C 以上。因此,选择 650 °C 作为高温热解条件,旨在模拟烟叶在实际燃烧高温条件下锥心区可能发生的热裂解及二次反应。在此基础上,采用原位 APPI-HRMS 实时监测待测物随时间变化的情况,以捕捉热解产物的动态变化过程,从而揭示不同温度下热解产物的动态演化规律。

450 °C 条件下,4 类典型雪茄烟叶热解产物(C_xH_yN 、 C_xH_yO 、 C_xH_yNO 、 $C_xH_yN_2$)相对丰度随时间的动态变化过程示于图 3。可以看出,所有热

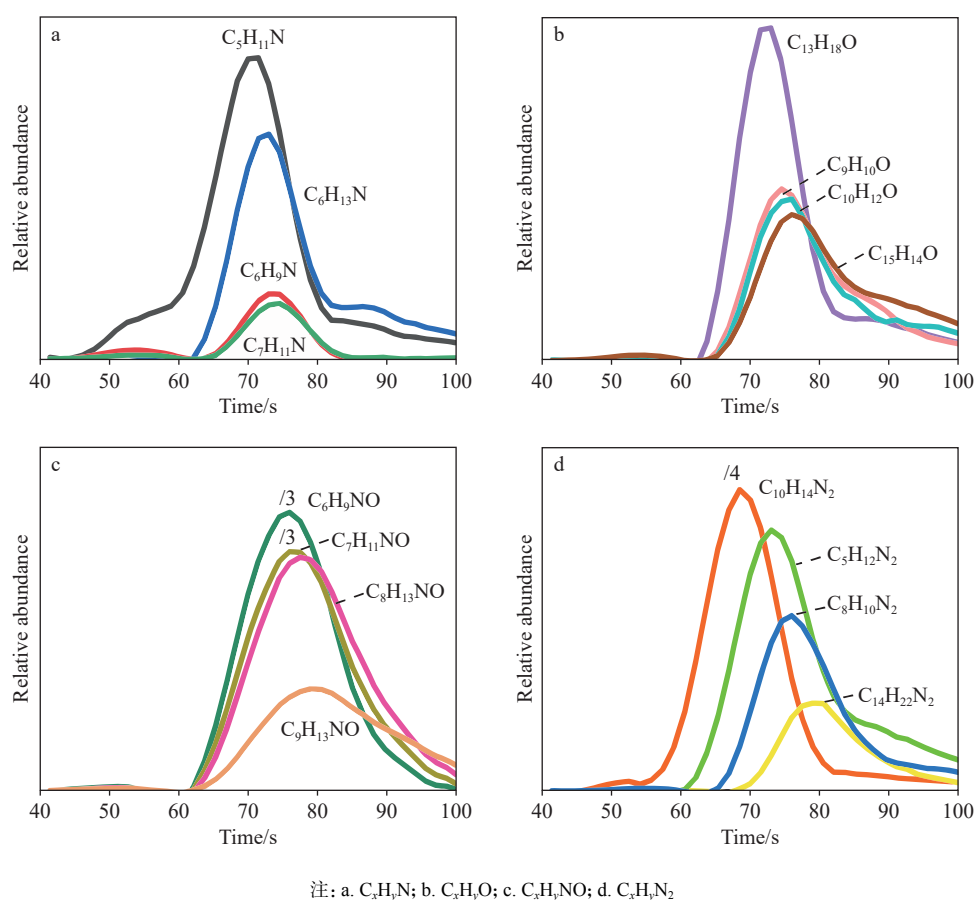


图3 450 °C 下4类典型雪茄烟叶热解产物相对含量的实时变化曲线

Fig. 3 Time-evolved profiles of relative abundance of four typical types of pyrolysis products from cigar pyrolysis at 450 °C

解产物的相对丰度均随时间呈先升后降的趋势。 C_xH_yN 类化合物出现的时间均相对较早,其达到最大释放量的时间均在75 s之前,示于图3a;而 C_xH_yO (除 $C_{13}H_{18}O$ 外)、 C_xH_yNO 这2类化合物达到最大释放量的时间均在75 s之后,示于图3b、3c; $C_xH_yN_2$ 化合物的变化规律与其他3类存在差异,示于图3d, $C_{10}H_{14}N_2$ 、 $C_5H_{12}N_2$ 、 $C_8H_{10}N_2$ 、 $C_{14}H_{22}N_2$ 的相对丰度也分别在约65、72、76、80 s时达到峰值,其中, $C_{10}H_{14}N_2$ (烟碱)不仅达到峰值的时间最早,且其相对丰度也显著高于其他3种化合物。这一方面归因于烟碱在多米尼加雪茄烟叶中的含量较高;另一方面是由于烟碱分子中吡啶环和叔胺基团都是强质子受体,具有较强的质子亲和力^[20],使其能够从试剂离子中夺取质子,从而生成稳定的 $[M+H]^+$ 离子^[21]。

650 °C 下部分热解产物相对丰度的实时变化曲线示于图4。可见,热解产物的相对丰度随时间呈先升后降的趋势,然而,不同类型化合物

达到最大释放量的时间存在差异。其中, $C_{10}H_{14}N_2$ 在热解约46 s时率先达到峰值;而 $C_xH_yN_2$ 类化合物($C_{18}H_{24}N_2$ 和 $C_{21}H_{26}N_2$)在约57~58 s时达到最大释放量; C_xH_yN 类化合物在约59~60 s时达

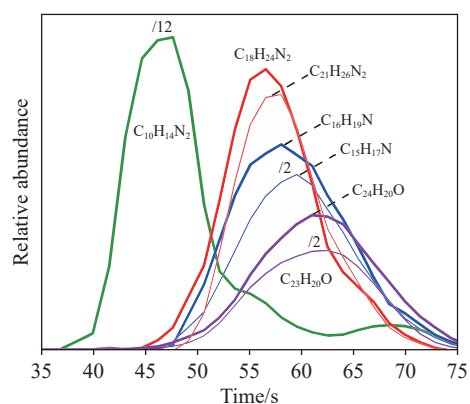


图4 650 °C 下部分热解产物相对丰度的实时变化曲线

Fig. 4 Real-time variation curve of relative abundance of partial pyrolysis products at 650 °C

到最大释放量。相较之下, C_xH_yO 类化合物的释放趋势较为缓慢, 达到峰值的时间最晚(约 61~62 s)。这与图 3 中产物的释放规律存在一定差异, 其原因是不同热解温度对烟叶裂解产物组成及生成动力学有显著影响, 尤其在 650 °C 热解温度下, 更多大质量、高沸点的产物会释放出来, 进而改变雪茄烟气的香气特性; 同时, 高温下也更易发生聚合、缩合等一系列复杂反应^[22], 导致产物组分及释放规律发生改变。

综上, 应用 APPI-HRMS 进行原位在线分析, 不仅可高灵敏度地检测大质量烟叶气态热解产物, 更能直观、实时地监测热解过程中重质气态产物的动态变化过程。

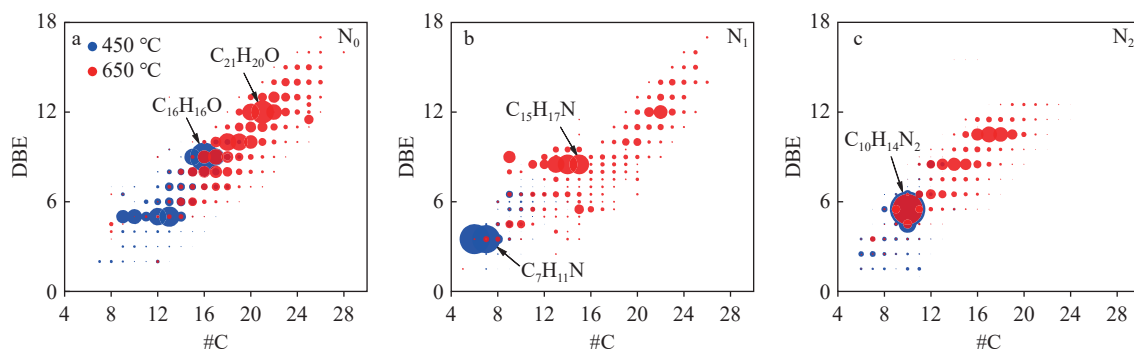
2.3 不同热解温度下气态产物差异性分析

雪茄烟叶热解产物组分的差异与热解温度密切相关, 而烟叶气态热解产物中含氮和含氧化合物的组成及相对含量对烟气风味起着决定性作用。不同含氮化合物($C_xH_yO_zN_{0-2}$)和含氧化合物($C_xH_yO_{0-3}N_z$)的碳数和双键当量值(double bond equivalent, DBE)的分布关系分别示于图 5、6, 以此分析 2 个热解温度对多米尼加烟叶热解产物的组成差异。

由图 5 可见, 2 个热解温度下含氮热解产物的 C 原子数主要分布在 4~30 范围内, DBE 值则主要集中在 0~18 之间, 且随着 C 数的增加, 含氮热解产物的 DBE 值逐渐增大。值得注意的是, $N_0\sim N_2$ 类化合物的数目和相对丰度在 2 个热解温度间存在显著差异: 1) 在 N_0 类化合物中, 450 °C 下含氮热解产物主要分布在低碳数(<18)、低 DBE 值(<10)范围内, 主要成分为 $C_{16}H_{16}O$;

而 650 °C 下则产生更多高碳数(>18)、高 DBE 值(>10)的化合物, 主要成分为 $C_{21}H_{20}O$ 。2) 与 450 °C 相比, 650 °C 下含氮热解产物的 N_1 类化合物具有更高的碳数(>18)和 DBE 值(>10)。3) 在 N_2 类化合物中, 450 °C 下含氮热解产物数量明显少于 650 °C, 且其产物仍集中于低碳数(<12)、低 DBE 值(<7)范围内。然而, 2 个温度下 N_2 类化合物的主要成分相同, 均为 $C_{10}H_{14}N_2$ 。此外, 对比 2 个热解温度下的含氮热解产物, 可以发现 450 °C 下的产物主要分布在 DBE 值为 0~6 范围内, 其产物的碳数相对集中; 而 650 °C 下的产物在碳数分布上较为分散, 热解产生的不饱和化合物增多, 且高碳数含氮热解产物较多。这一现象是因为随着热解温度的升高, 更多分子内部发生化学键断裂^[23], 从而生成更多自由基; 生成的自由基在高温条件下进一步发生重组, 最终趋向于形成更高碳数、高 DBE 值的稠环类化合物等^[24]。

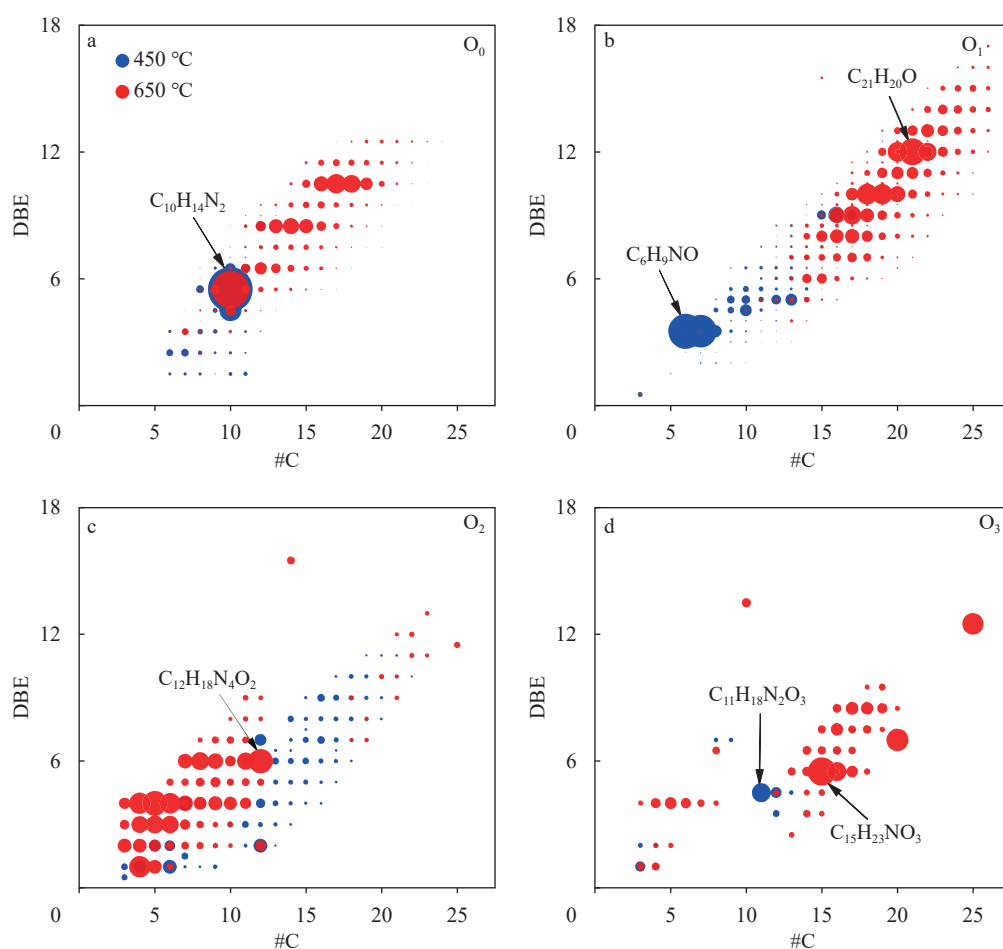
由图 6 可见, 2 个热解温度下的含氧热解产物数量均随氧原子数目的增加呈先增后减的趋势, 且 450 °C 条件下生成的含氧热解产物数量显著少于 650 °C 条件下的产物; 含氧热解产物的含碳数均集中在 0~30 之间, 且产物 DBE 值主要在 0~18 范围内。当氧原子数从 0 增加到 1 时, 高 DBE 值(>13)的含氧化合物数量也相应增加; 而当氧原子数从 1 增加到 2 时, 高 DBE 值(>13)的含氧化合物数量降低, 低 DBE 值(0~3)的含氧化合物数量增加。在 O_0 和 O_1 类化合物中, 高不饱和度产物主要由 650 °C 下的热解产物组成, 而 450 °C 下的含氧热解产物主要位于



注: a. N_0 ; b. N_1 ; c. N_2 ; 图中圆圈面积代表热解产物的相对丰度

图 5 450、650 °C 下多米尼加雪茄烟叶气态热解产物中不同含 N 数的化合物 DBE 值与 C 数的分布图

Fig. 5 Distribution of DBE values of compounds with different N numbers in the products of Dominican cigar leaves at 450 °C and 650 °C with respect to C number



注: a. O_0 ; b. O_1 ; c. O_2 ; d. O_3 ; 图中圆圈面积代表热解产物的相对丰度

图6 450、650 °C 下多米尼加雪茄烟叶气态热解产物中不同含O数化合物的DBE值与含C数的分布图

Fig. 6 Distribution of DBE values of compounds with different O numbers in the products of Dominican cigar leaves at 450 °C and 650 °C with respect to C number

DBE 值为 0~6 的范围内。同时, 在 O_2 和 O_3 类化合物中, 含氧热解产物数量减少; 在 O_3 类化合物中, 其热解产物主要来源于 650 °C 下的反应, 450 °C 下仅产生极少量的含氧热解产物。这一现象可以解释为: 650 °C 高温环境下, 热解产生的含氧自由基发生重聚反应^[25], 形成结构更复杂的高氧官能团化合物。值得注意的是, 部分 O_3 类化合物可能是由较低含氧类物质(如 O_1 类化合物)通过三聚等特定重聚机制形成的三聚体结构, 这类聚合产物通常具有更高的分子复杂性和热稳定性, 从而在高温条件下显著富集。此外, 对比图 5 和图 6 可以发现, 450 °C 下的气态产物含碳数主要集中在 5~16 范围内; 相比之下, 650 °C 下的气态热解产物具有更高的碳数, 且当碳数大于 22 后, 仅有该温度下的热解产物存在。

综上所述, 热解温度是调控烟叶热解产物组成的关键因素。相较于 450 °C, 650 °C 下热解可显著提高产物的分子复杂度(高碳数、高 DBE 值)、拓宽分布范围, 并选择性地富集高不饱和度的含氮化合物(如 N_1 类)和多氧化合物(如 O_3 类)。低温热解则倾向于生成低碳数、低不饱和度的物质。

3 结论

本文提出了一种分析雪茄烟叶重质气态热解产物的新方法——孔口取样结合大气压光电质谱高分辨质谱的原位在线分析方法。该方法具有灵敏度高、检测范围广($m/z > 200$)等特点, 显著提升了获取复杂气态热解产物(尤其是重质组分)化学信息的能力。通过原位 APPI-HRMS 和 SPI-MS 谱图数据的对比分析, 证实了本方法在

检测雪茄烟叶气态重质组分方面具有显著优势。应用该方法进一步研究了热解温度对重质气态产物组成及释放规律的影响。结果表明,热解温度是调控烟叶热解产物组成、影响产物释放动力学的关键因素。相较于高温热解,低温下热解反应较温和,产物释放时间延长。与 450 °C 相比,650 °C 下所有热解产物的释放时间整体提前约 15 s,且其达到最大释放量的时间提前了 15~20 s。高温下热解会促进产物发生脱氢、缩合等二次反应,产生大量高碳数、高不饱和度化合物,并选择性地富集特定杂原子化合物(如 N₁类、O₃类)。低温热解则倾向于生成低碳数、低不饱和度的物质,产物分布较为集中,多氧/单氮化合物较少。该方法为深入研究雪茄烟叶热解过程中重质气态产物的化学组成提供了技术支撑,在解析不同产地雪茄烟叶组成成分差异等方面具有重要的应用前景。

参考文献:

- [1] 黄凯. 推动国产雪茄烟叶高质量发展的思路和对策[J]. 安徽农业科学, 2023, 51(11): 243-246.
HUANG Kai. Ideas and Countermeasures for promoting the high quality development of domestic cigar tobacco[J]. Anhui Agricultural Sciences, 2023, 51(11): 243-246(in Chinese).
- [2] 刘晶, 张文军, 白晓莉, 吴丽君, 段如敏, 刘王, 卢伟, 苏丹丹. 国内外不同雪茄烟综合品质对比分析[J]. 西南农业学报, 2022, 35(1): 81-89.
LIU Jing, ZHANG Wenjun, BAI Xiaoli, WU Lijun, DUAN Rumin, LIU Wang, LU Wei, SU Dandan. Comparison and analysis on comprehensive quality of different cigar tobacco at home and abroad[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2022, 35(1): 81-89 (in Chinese).
- [3] 张玮, 吴达, 焦亮, 丁骏, 李俊杰, 戚大伟. 不同手工雪茄烟主流烟气成分差异分析[J]. 中国烟草学报, 2025, 31(1): 153-162.
ZHANG Wei, WU Da, JIAO Liang, DING Jun, LI Junjie, QI Dawei. Analyzation of differences in mainstream smoke components of different handmade cigars[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2025, 31(1): 153-162(in Chinese).
- [4] 李翔宇, 姜兴益, 张洪非, 罗彦波, 朱凤鹏, 庞永强. 雪茄烟主流烟气指标测定及稳定性分析[J]. 烟草科技, 2019, 52(10): 44-51.
LI Xiangyu, JIANG Xingyi, ZHANG Hongfei, LUO Yanbo, ZHU Fengpeng, PANG Yongqiang. Index measurement and stability analysis of mainstream cigar smoke[J]. Tobacco Science & Technology, 2019, 52(10): 44-51(in Chinese).
- [5] 徐波, 张博, 王剑, 胡希, 胡延奇, 赵瑞, 罗登山, 訾成怡, 王以慧, 潘勇, 李沁怡, 刘路路, 王兵, 乔学义. 国产雪茄烟感官质量评价方法的建立[J]. 烟草科技, 2024, 57(2): 54-60.
XU Bo, ZHANG Bo, WANG Jian, HU Xi, HU Yanqi, ZHAO Rui, LUO Dengshan, ZI Chengyi, WANG Yihui, PAN Yong, LI Qinyi, LIU Lulu, WANG Bing, QIAO Xueyi. Development of sensory quality evaluation method for domestic cigars in China[J]. Tobacco Science & Technology, 2024, 57(2): 54-60(in Chinese).
- [6] 王安然. 雪茄燃烧状态表征及烟叶热解燃烧特性研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2021.
- [7] 章存勇, 庄海锋, 时雅琪, 邹鹏, 丁乃红, 纵坤, 贾良元, 郭东锋. 国内外雪茄烟叶热解产物差异性研究[J]. 轻工学报, 2024, 39(5): 118-126.
ZHANG Cunyong, ZHUANG Haifeng, SHI Yaqi, ZOU Peng, DING Naihong, ZONG Kun, JIA Liangyuan, GUO Dongfeng. Study on the differences of pyrolysis products of domestic and foreign cigar tobaccos[J]. Journal of Light Industry, 2024, 39(5): 118-126(in Chinese).
- [8] SENNECA O, CIARAVOLO S, NUNZIATA A. Composition of the gaseous products of pyrolysis of tobacco under inert and oxidative conditions[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2007, 79(1/2): 234-243.
- [9] LIU Q, WANG S, ZHENG Y, LUO Z, CEN K. Mechanism study of wood lignin pyrolysis by using TG-FTIR analysis[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2008, 82(1): 170-177.
- [10] 王健, 葛少林, 谢映松, 张朝, 黄兰, 汪华, 袁龙, 贾良元, 仰科, 雷振. 光电离质谱技术在线监测不同部位烟草裂解产物[J]. 质谱学报, 2023, 44(1): 78-86.
WANG Jian, GE Shaolin, XIE Yingsong, ZHANG Chao, HUANG Lan, WANG Hua, YUAN Long, JIA Liangyuan, YANG Ke, LEI Zhen. On-line monitoring of tobacco pyrolysis products in different parts by photoionization mass spectrometry[J]. Journal of Chinese Mass Spectrometry Society, 2023, 44(1): 78-86(in Chinese).
- [11] 庄海锋, 杨振, 章存勇, 彭晓萌, 贾良元, 王健, 葛少林. 再造烟叶烟气中刺激性气味的关键化学组分研究[J]. 质谱学报, 2024, 45(3): 422-431.
ZHUANG Haifeng, YANG Zhen, ZHANG Cunyong, PENG Xiaomeng, JIA Liangyuan, WANG Jian, GE Shaolin. Study on the key chemical components of irritat-

- ing smoke from reconstituted tobacco[J]. *Journal of Chinese Mass Spectrometry Society*, 2024, 45(3): 422-431 (in Chinese).
- [12] ZHU Z, ZHANG C, SHI Y, ZOU P, DING N, ZONG K, JIA L, GUO D. Fast pyrolysis of cigarette and cigar leaves: differential analysis of their heavy products by ultrahigh-resolution mass spectrometry[J]. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 2025, 39(10): e10011.
- [13] 刘成园, 潘洋. 原位光电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] SANTOS J, PUDENZI M, WISNIEWSKI A Jr, BREITKREITZ M, EBERLIN M. Optimization of atmospheric pressure photoionization for the crude oil analysis using ultra-high resolution mass spectrometry[J]. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 2019, 30(4): 819-829.
- [15] HUTZLER C, LUCH A, FILSER J G. Analysis of carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons in complex environmental mixtures by LC-APPI-MS/MS[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2011, 702(2): 218-224.
- [16] CHEN X, ZHU L, CUI C, ZHU Y, ZHOU Z, QI F. *In situ* atmospheric pressure photoionization mass spectrometric monitoring of initial pyrolysis products of biomass in real time[J]. *Analytical Chemistry*, 2020, 92(1): 603-606.
- [17] MIRABELLI M F, ZENOBI R. Solid-phase microextraction coupled to capillary atmospheric pressure photoionization-mass spectrometry for direct analysis of polar and nonpolar compounds[J]. *Analytical Chemistry*, 2018, 90(8): 5 015-5 022.
- [18] 吴东川, 吴键, 陈震, 赵亮, 蔡兴华, 蒋健, 王轶群, 张贾宝, 梁森, 张峻松. 甘油对雪茄烟叶加热状态下热失重及碱性香味成分释放的影响[J]. *中国烟草学报*, 2023, 29(5): 120-128.
WU Dongchuan, WU Jian, CHEN Zhen, ZHAO Liang, CAI Xinghua, JIANG Jian, WANG Yiqun, ZHANG Jiabao, LIANG Miao, ZHANG Junsong. Effects of glycerol on thermal weight loss and release of alkaline aroma components in cigar tobacco leaves under heating[J]. *Acta Tabacaria Sinica*, 2023, 29(5): 120-128(in Chinese).
- [19] 刘雪萍, 张齐, 徐波, 杨振, 李亚森, 曾祥华, 张佳巍, 高森, 蔡斌, 李晓丹, 梁森, 朱文魁, 王兵, 胡希, 王乐, 李斌. 雪茄烟燃烧锥温度分布快速检测与表征方法[J]. *烟草科技*, 2024, 57(6): 75-84.
LIU Xueping, ZHANG Qi, XU Bo, YANG Zhen, LI Yasen, ZENG Xianghua, ZHANG Jiawei, GAO Sen, CAI Bin, LI Xiaodan, LIANG Miao, ZHU Wenkui, WANG Bing, HU Xi, WANG Le, LI Bin. Rapid detection and characterization of temperature distribution in combustion cone of a cigar[J]. *Tobacco Science & Technology*, 2024, 57(6): 75-84(in Chinese).
- [20] GRATON J, BERTHELOT M, GAL J F, GIRARD S, LAURENCE C, LEBRETON J, Le QUESTEL J Y, MARIA P C, NAUS P. Site of protonation of nicotine and nornicotine in the gas phase: pyridine or pyrrolidine nitrogen?[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2002, 124(35): 10 552-10 562.
- [21] 付亚宁, 崔利利, 于捧捧, 陈欢, 韩书磊, 侯宏卫, 胡清源. 基于同位素模式峰的串联质谱鉴别天然烟碱与合成烟碱[J]. *质谱学报*, 2023, 44(5): 714-720.
FU Yaning, CUI Lili, YU Pengpeng, CHEN Huan, HAN Shulei, HOU Hongwei, HU Qingyuan. Identification of natural nicotine and synthetic nicotine by tandem mass spectrometry based on isotope pattern peaks[J]. *Journal of Chinese Mass Spectrometry Society*, 2023, 44(5): 714-720(in Chinese).
- [22] 王保会, 吴键, 郭春生, 纪朋, 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(自然科学版)*, 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 (Natural Science)*, 2013, 28(2): 69-73(in Chinese).
- [23] 周顺, 王孝峰, 宁敏, 徐迎波, 李振华, 何庆, 张亚平, 余世科, 朱栋梁, 谢映松, 陈刚, 王成名. 基于实时升温红外光谱研究烟草热解化学结构变化[J]. *烟草科技*, 2016, 49(10): 51-59.
ZHOU Shun, WANG Xiaofeng, NING Min, XU Yingbo, LI Zhenhua, HE Qing, ZHANG Yaping, SHE Shike, ZHU Dongliang, XIE Yingsong, CHEN Gang, WANG Chengming. Study on variations of chemical structure of pyrolyzed tobacco based on real-time temperature-rising infrared spectrometry[J]. *Tobacco Science & Technology*, 2016, 49(10): 51-59(in Chinese).
- [24] 李晓亮. 烟草热解产物中挥发性有机物与自由基成分形成机理研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2013.
- [25] ZHANG X, MA H, WU S. Effects of temperature and atmosphere on the formation of oligomers during the pyrolysis of lignin[J]. *Fuel*, 2020, 268: 117 328.

(收稿日期: 2025-07-29; 修回日期: 2025-09-12)