

## 不同类型烟草原料加热卷烟烟气香味成分差异性分析

付秋娟<sup>1</sup>,赵文涛<sup>2</sup>,杨菁<sup>2</sup>,刘天择<sup>1</sup>,王彤<sup>1</sup>,孙婷婷<sup>1</sup>,张玮<sup>3</sup>,窦玉青<sup>1\*</sup>,王超<sup>2\*</sup>

1. 中国农业科学院烟草研究所,山东 青岛 266101

2. 上海新型烟草制品研究院有限公司,上海 201315

3. 上海烟草集团有限责任公司技术中心,上海 201315

**摘要:**为探究不同类型烟草原料加热卷烟烟气香味特征差异,选取6大烟草类型55份烟叶样品,分别制作成加热卷烟。通过吸烟机和气质联用仪(GC-MS)对其烟气香味成分进行差异比较,并分析了烟气香味成分与感官评价指标间的关系。结果表明,(1)不同类型烟草原料加热卷烟烟气香味特征存在显著差异。对于绝大多数呋喃、吡喃及内酯类香味成分,烤烟和晒黄烟含量较高,其次为晒红烟和香料烟,雪茄烟和白肋烟含量最低,三组间差异显著;酮类和酸类香味成分在烤烟和晒黄烟中的含量仅次于香料烟;酚类香味成分以晒黄烟、烤烟、晒红烟和白肋烟含量较高,香料烟含量最低;含氮类香味成分则表现为白肋烟和晒红烟含量最高,烤烟和晒黄烟含量最低,两组间差异显著;其他类香味成分的含量,雪茄烟、晒红烟和白肋烟含量相对较高,而烤烟、香料烟和晒黄烟含量较低。(2)相关分析显示,绝大多数呋喃、吡喃、内酯类、酚类、酸类和酮类香味成分与感官评价指标(刺激性、干燥感、苦涩感、残留和评吸总分)呈正相关;而含氮类和其他类香味成分则呈相反趋势。综合方差分析和相关分析结果,初步认为:烤烟和晒黄烟烟气香味成分含量较高且种类丰富,其次是晒红烟和香料烟,雪茄烟和白肋烟含量最低。因此,烤烟和晒黄烟可能是烟气香味成分含量较高,种类更丰富的加热卷烟烟草原料类型,具有较高的应用潜力。

**关键词:**烟草类型;加热卷烟;香味成分;感官质量;差异性

中图法分类号: S572

文献标识码: A

文章编号: 1000-2324(2026)01-0092-13

## Difference Analysis in Aroma Components of Heated Tobacco Products from Different Tobacco Types

FU Qiu-juan<sup>1</sup>, ZHAO Wen-tao<sup>2</sup>, YANG Jing<sup>2</sup>, LIU Tian-ze<sup>1</sup>, WANG Tong<sup>1</sup>, SUN Ting-ting<sup>1</sup>, ZHANG Wei<sup>3</sup>, DOU Yu-qing<sup>1\*</sup>, WANG Chao<sup>2\*</sup>

1. Tobacco Research Institute of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Qingdao 266101, China

2. Shanghai New Tobacco Product Research Institute Co., Ltd., Shanghai 201315, China

3. Technical Center of Shanghai Tobacco Group Co., Ltd., Shanghai 201315, China

**Abstract:** To explore the differences in the aroma characteristics of heated tobacco products (HTPs) from different types of tobacco materials, this study selects 55 tobacco leaf samples from six major tobacco types and processes them into HTPs. Using a smoking machine and gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), this study compares the differences in aroma components in the smoke, and analyzes the relationship between the smoke aroma components and sensory evaluation indicators. The results show that: (1) There are significant differences in the aroma characteristics of HTP smoke from different types of tobacco materials. For most aroma components of furan, pyran, and lactone, flue-cured tobacco and sun-cured yellow tobacco exhibit the highest contents, followed by sun-cured red tobacco and oriental tobacco, while cigar tobacco and burley tobacco have the lowest levels, with significant differences among the three groups; the contents of ketone and acid aroma components in flue-cured tobacco and sun-cured yellow tobacco are second only to those in oriental tobacco; among phenolic aroma compounds, sun-cured yellow tobacco, flue-cured tobacco, sun-cured red tobacco, and burley tobacco show relatively higher contents, whereas oriental tobacco has the lowest; for nitrogen-containing aroma compounds, burley tobacco and sun-cured red tobacco have the highest contents, and flue-cured tobacco and sun-cured yellow tobacco have the lowest, with significant differences between the two groups; as for other types of aroma components, cigar tobacco, sun-cured red tobacco, and burley tobacco contain relatively higher amounts, while flue-cured

收稿日期: 2025-02-19

修回日期: 2025-12-27

基金项目: 上海新型烟草制品研究院有限公司科技项目(Z2024-001Z);上海烟草集团有限责任公司科技项目(K2024-1-024P);中国烟草总公司科技重大专项项目(110202402024)

第1作者简介: 付秋娟(1974-),女,硕士,高级农艺师,研究方向:烟草化学及烟叶原料研究。E-mail: fuqiujuan@caas.cn

\*通讯作者: Author for correspondence. E-mail: douyuqing@caas.cn; wangchao1@sh.tobacco.com.cn

tobacco, oriental tobacco, and sun-cured yellow tobacco have lower levels. (2) Correlation analysis shows that most aroma components of furan, pyran, lactones, phenols, acids and ketones are positively correlated with sensory evaluation indicators (irritation, dryness, bitterness, aftertaste and total smoking score). In contrast, nitrogen-containing aroma compounds and other types of aroma components exhibit the opposite trend. Based on the comprehensive results of variance analysis and correlation analysis, it is preliminarily concluded that flue-cured tobacco and sun-cured yellow tobacco have higher contents and richer varieties of smoke aroma components, followed by sun-cured red tobacco and oriental tobacco, while cigar tobacco and burley tobacco have the lowest contents. Therefore, flue-cured tobacco and sun-cured yellow tobacco may be the appropriate materials for HTPs, characterized by their higher contents and wider variety of smoke aroma components, with greater application potential.

**Keywords:** Tobacco types; heated tobacco products; aroma components; sensory quality; differences

烟气香味成分是衡量烟草品质的关键指标,直接影响烟草的风味、感官体验和市场价值,它们不仅赋予烟草独特的香气风格,满足不同消费者的口味偏好,还在烟草燃烧过程中参与复杂的化学反应,影响烟气的化学组成和安全性<sup>[1]</sup>。烟草原料的类型是决定烟气成分的关键基础因素之一,不同类型烟草原料由于其遗传背景、生长环境、加工方式等的差异,其化学成分含量和组成存在显著不同<sup>[2-5]</sup>,这些差异直接导致卷烟烟气香味成分的不同。加热卷烟作为一种新型烟草制品,其低温加热方式使得烟气香味成分的生成和释放与传统卷烟有所不同<sup>[6,7]</sup>,因此深入研究加热卷烟烟气香味成分的种类、形成机制及其相互作用,对于提升烟草品质以及推动烟草行业可持续发展具有重要意义。

近年来,关于加热卷烟烟气香味成分的研究已取得一定进展,窦玉青等<sup>[8]</sup>分析了不同类型烟草原料低温热裂解气溶胶中的香气成分种类及释放量差异,认为晒黄烟可能是香气种类丰富且含量较高的烟草类型;霍现宽等<sup>[6]</sup>研究发现,不同加热温度下烟气香味成分的释放规律各不相同,且不同类型烟叶原料加热状态下的香味成分释放特征也存在明显差异;王超等<sup>[9]</sup>探讨了低温热裂解香气成分与加热卷烟感官质量的相关性,指出烟碱和呋喃酮含量适中的烟叶感官质量更优。刘天择等<sup>[10]</sup>分析了不同部位加热卷烟烤烟原料热解产物的含量差异及其与感官质量的关系,发现热解气溶胶中生物碱类物质以上部叶含量较高,而呋喃、醛酮和酸类成分以中部叶含量较高。此外,赵璐等<sup>[11]</sup>通过感官质量、化学成分及香味物质筛选出适合加热卷烟原料品种;张书铭等<sup>[12]</sup>对烤烟和晒晾烟两类烟草类型的加热卷烟内在质量进行了评价;刘钻福等<sup>[13]</sup>分析了烘烤

工艺对加热卷烟烤烟原料香气成分及感官质量的影响;何红梅等<sup>[14]</sup>对传统卷烟和加热卷烟单料烟的香气成分释放量差异进行了分析。

尽管已有研究取得了一定成果,但目前关于加热卷烟原料的研究主要集中在低温热裂解气溶胶中香气成分的差异<sup>[6,8]</sup>、化学成分与感官质量<sup>[9-13]</sup>的关系等方面。针对不同类型烟草原料加热卷烟烟气香味成分的差异缺乏较为系统的研究,缺乏对不同烟草类型烟气香味成分差异的全面分析。基于以上分析,本文系统分析了加热条件下不同烟草类型烟气香味成分的种类及含量差异,并研究其与加热卷烟感官质量的关系,综合评价不同类型加热卷烟原料的烟气香味特征,为加热卷烟烟叶原料选择及产品配方优化提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验材料为2020-2021年采集云南、辽宁、吉林、湖南、湖北、山东、四川、贵州、广东、广西10个省份的中上部烟叶,其中烤烟18份、晒红烟19份、晒黄烟8份、白肋烟2份、香料烟3份、雪茄烟5份,共55份试验样品(详见表1)。

### 1.2 试验仪器及试剂

7890B/5977A 气质联用仪、DB-5MS 色谱柱(30 m×0.32 mm id×0.25 μm<sub>df</sub>)、DB-WAX 色谱柱(60 m×0.32 mm id×0.25 μm<sub>df</sub>)(美国 Agilent 公司)、转盘式电子烟吸烟机(X500E,帕夫曼)。

甲基叔丁基醚(99.8%,美国 Anaqua 公司);戊酸甲酯(98%)、庚酸甲酯(98.2%)、壬酸甲酯(98%)、十三酸甲酯(98.1%)、十五酸甲酯(98%)(美国 ChemService 公司)。

表 1 烟叶样品信息  
Table 1 Information of tobacco leaf samples

类型 Tobacco types	产地(部位) Producing areas(Part)	数量/份 Quantity
烤烟 Flue-cured tobacco	云南曲靖(B、C)、文山(B、C)、吉林延边(B、C)、辽宁丹东(B、C)、湖南郴州(B、C)、山东潍坊(B、C)、四川凉山(B、C)、贵州毕节(B、C)、遵义(B、C)	18
晒红烟 Sun-cured red tobacco	湖北(B、C和中上部)、辽宁(B、C和中上部)、山东(中上部)、云南(B、C和中上部)、四川(B、C和中上部)、湖南(B、C)各2份、吉林(B、C)	19
晒黄烟 Sun-cured yellow tobacco	广西(B、C)各2份、广东(B、C)各2份	8
白肋烟 Burley tobacco	湖北(B、C)	2
香料烟 Oriental tobacco	云南德宏(中上部)、保山(B、C)	3
雪茄烟 Cigar tobacco	四川(B、C)各2份、湖北(B)	5

### 1.3 试验方法

1.3.1 加热卷烟样品制作 参考刘天择<sup>[10]</sup>的方法,用辊压法制作成加热卷烟烟支。

1.3.2 加热卷烟烟气香味成分检测方法 参考李俊杰等<sup>[15]</sup>的方法,对烟气粒相物中的酚类、含氮化合物、酮类、酸类、呋喃类、吡喃类、内酯类等多种成分进行了鉴定和内标法相对定量。

采用转盘式电子烟吸烟机对加热卷烟进行抽吸,抽吸容量 55 mL,抽吸时间 2 s,抽吸间隔 30 s,用 92 mm 剑桥滤片捕集烟气。加热装置采用 Firavo 加热器具,每张剑桥滤片捕集 4 支加热卷烟烟气的粒相物,每平行的 2 张滤片置于锥形瓶中,加入 10 mL 甲基叔丁基醚溶剂和 100  $\mu$ L 混标溶液,密封,室温下超声萃取 30 min,静置 5 min,取上层清液过 0.22  $\mu$ m 微孔滤膜过滤,取 1 mL 至色谱瓶作为烟气香味成分 GC-MS 试样。

色谱方法采用中心切割二维气相色谱-质谱法。分析条件为:

一维柱:DB-5MS 色谱柱,恒流速 1.9 mL/min;二维柱:DB-WAX 色谱柱,恒流速 1.9 mL/min;进样口温度:250  $^{\circ}$ C;进样量:3  $\mu$ L;进样模式:采用不分流进样模式;不分流时间:1 min;吹扫流量:50 mL/min;中心切割时间:切割 1(5.1~10.0 min),切割 2(10.0~16.6 min),切割 3(16.6~23.5 min),切割 4(23.5~30.5 min)。一维升温程序:4 段切割初始温度皆为 45  $^{\circ}$ C(保持 2 min),并以 6  $^{\circ}$ C/min 的速率升温,切割 1 L 至 93  $^{\circ}$ C,切割

2 L 至 132.6  $^{\circ}$ C,切割 3 L 至 174  $^{\circ}$ C,切割 4 L 至 216  $^{\circ}$ C,升温完成后,快速降温至 60  $^{\circ}$ C(切割 1、切割 2)或 80  $^{\circ}$ C(切割 3、切割 4)。二维升温程序:切割 1 以 4  $^{\circ}$ C/min 的速率升至 180  $^{\circ}$ C,随后以 10  $^{\circ}$ C/min 的速率升至 230  $^{\circ}$ C(保持 20 min);切割 2 和切割 3 均以 4  $^{\circ}$ C/min 的速率升至 230  $^{\circ}$ C(保持 20 min);切割 4 以 4  $^{\circ}$ C/min 的速率升至 230  $^{\circ}$ C(保持 30 min)。GC/MS 接口温度:240  $^{\circ}$ C;电子能量:70 eV;EI 源温度:230  $^{\circ}$ C;四极杆温度:150  $^{\circ}$ C;质量扫描范围:33~400 amu;采用提取离子法积分峰面积。每个样品均进行 2 次重复测定,以两次测定值的算数平均值作为测定值。

1.3.3 感官质量评价 加热卷烟感官质量评价参考刘艳华等<sup>[3]</sup>的方法,由上海新型烟草制品研究院有限公司组织 5 家单位 10 位加热卷烟评吸专家集中进行感官质量评价,评价指标包括香气质、香气量、杂气、劲头、刺激性、干燥感、苦涩感、残留、稳定性,感官质量总分为除劲头和稳定性外其余 7 项之和。

### 1.4 数据分析

采用 EXCEL2013、DPS 19.5、Origin2021 软件对试验数据进行统计分析并作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同类型烟草原料加热卷烟烟气香味成分组成和含量及感官质量差异

#### 2.1.1 香味成分 不同类型烟草原料加热卷烟经

抽吸后的烟气共鉴定出55种烟气香味成分,参考传统卷烟烟气香味成分的分类方式,依据官能团将其分为5大类:呋喃、吡喃和内酯类(9种)、酚类物质(10种)、酮类和酸类(16种)、含氮化合物(17种)以及其他类(3种)。由图1可以看出,尽管不同类型烟草原料加热卷烟烟气成分具有一定的共性,但其组成存在一定的差异,具体而言,含氮化合物在白肋烟中的占比最高(达92.93%),这主要归因于其特殊的遗传背景、生长环境及晾制工艺,这些条件共同促进了植株体内含氮化合物的合成和积累,从而使含量显著高于

其他烟草类型。其次是雪茄烟和晒红烟,而香料烟的含氮化合物占比最低,为61.41%。呋喃、吡喃和内酯类在烤烟含量最高,为17.64%,而白肋烟中含量最低,仅为1.59%。酮类和酸类化合物及酚类化合物在香料烟中含量最高,分别为22.85%和4.35%,其次为烤烟和晒黄烟,而白肋烟中含量最低,分别为2.00%和1.74%。此外,雪茄烟中其他类化合物含量较高,为2.65%。由此可见,不同类型烟草原料加热卷烟烟气香味成分存在明显差异,这可能与各烟草类型的遗传背景、生长条件和调制工艺密切相关。

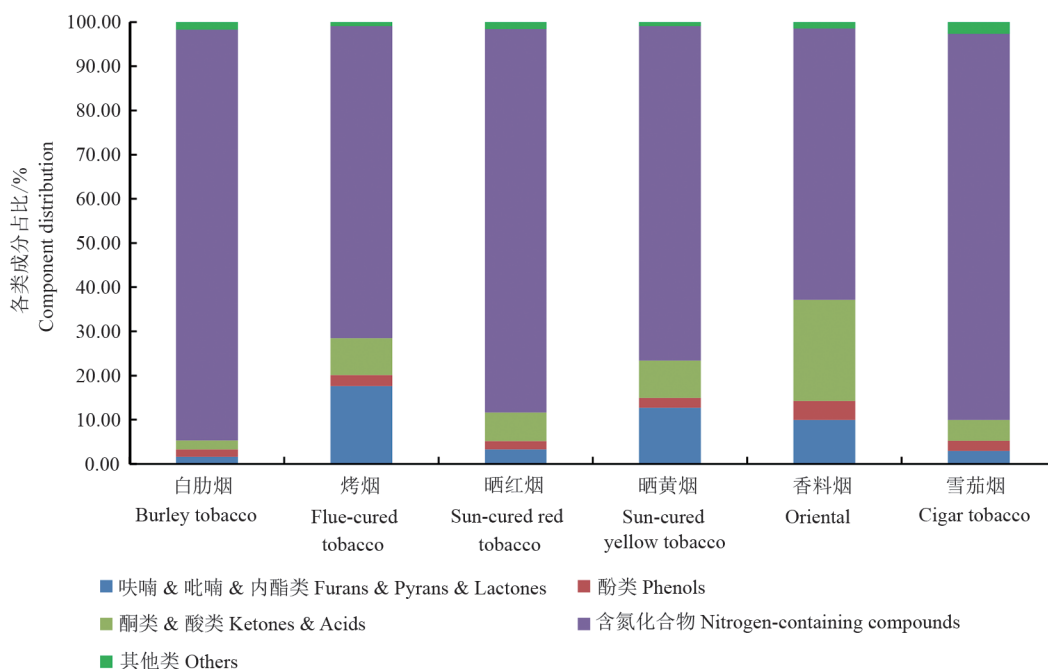


图1 不同类型烟草原料加热卷烟烟气成分分类和组成

Fig. 1 Classification and composition of smoke components in HTPs from different types of tobacco materials

2.1.2 感官质量 不同类型烟草原料感官质量差异分析结果如表2所示。除稳定性外,其他感官评吸指标均达显著水平。具体而言,香气质、刺激性、干燥感、苦涩感、残留得分方面,烤烟表现最优,而白肋烟统计局分最低;劲头得分方面,香料烟表现最弱,显著低于其他烟草类型。稳定性指标在各类型烟草原料中得分无显著差异。从评吸总分来看,烤烟、晒黄烟和香料烟显著高于雪茄烟、晒红烟和白肋烟,而烤烟、晒黄烟和香料烟之间的总分差异不显著。

## 2.2 不同类型烟草原料加热卷烟烟气香味成分差异分析

2.2.1 呋喃、吡喃和内酯类化合物 由表3可知,

加热卷烟烟气中共检测到9种呋喃、吡喃和内酯类化合物,除白肋烟中未检测到DDMP外,其他各类型原料中均含有这9种香味成分,且不同类型原料之间香味成分含量差异显著。烤烟中糠醛、5-甲基糠醛、菠萝呋喃酮和DDMP含量显著高于其他类型原料。在糠醇、麦芽酚、 $\gamma$ -巴豆酰内酯和 $\gamma$ -丁内酯含量方面,烤烟和晒黄烟之间无显著差异,但显著高于晒红烟、香料烟、雪茄烟和白肋烟,其中香料烟中 $\gamma$ -丁内酯含量最低。白肋烟在糠醛、5-甲基糠醛、麦芽酚、菠萝呋喃酮、DDMP、 $\gamma$ -巴豆酰内酯这6种成分的含量均为6种类型原料中含量最低。此外,雪茄烟和晒红烟中二氢猕猴桃内酯含量显著较高,其次为白肋

表 2 不同类型烟草感官质量差异(分数)  
Table 2 Differences in sensory quality among HTPs from different types of tobacco

类型/指标 Tobacco types/Index	香气质 Aroma quality	香气量 Aroma intensity	杂气 Off-odor	劲头 Smoke strength	刺激性 Irritation	干燥感 Dryness	苦涩感 Bitterness	残留 Aftertaste	稳定性 Stability	总分 Total score
白肋烟 Burley tobacco	5.35±0.35b	5.85±0.35b	5.50±0.57b	6.95±0.49a	4.95±0.35d	5.60±0.00c	5.40±0.57d	5.30±0.14c	6.55±0.21a	38.15±2.19d
烤烟 Flue-cured tobacco	6.56±0.41a	6.27±0.39ab	6.40±0.58a	6.47±0.77a	6.87±0.48a	6.78±0.40a	6.79±0.36a	7.04±0.44a	6.87±0.28a	46.46±1.72a
晒红烟 Sun-cured red tobacco	6.27±0.33a	6.43±0.28a	6.20±0.31ab	6.31±0.53a	6.20±0.59bc	6.26±0.41b	6.13±0.53c	6.14±0.48b	6.83±0.15a	43.52±2.42c
晒黄烟 Sun-cured yellow tobacco	6.39±0.20a	6.60±0.52a	6.52±0.32a	6.24±0.86a	6.44±0.57ab	6.56±0.49ab	6.54±0.40ab	6.44±0.43b	6.89±0.10a	45.29±1.78ab
香料烟 Oriental tobacco	6.12±0.32a	5.94±0.15b	6.46±0.21a	4.60±0.06b	6.62±0.04ab	6.75±0.11ab	6.67±0.11ab	6.57±0.26ab	6.83±0.15a	45.13±0.88abc
雪茄烟 Cigar tobacco	6.29±0.45a	6.60±0.42a	6.21±0.31ab	6.18±0.41a	5.82±0.26c	6.44±0.23ab	6.23±0.22bc	6.10±0.28b	6.73±0.19a	43.58±1.82bc

注:不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ );“-”表示未检出或低于检出限。下同。  
Note: Different lowercase letters indicate significant differences ( $P<0.05$ ); "-" indicates that the detection is not detected or below the detection limit. The same as below.

表 3 烟气香味成分中呋喃&吡喃&内酯类化合物含量差异( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )  
Table 3 Differences in the contents of furan, pyran and lactone compounds in smoke aroma components of HTPs

类型/化合物 Tobacco types/Compound	糠醛 Furfural	糠醇 Furfuryl alcohol	5-甲基糠醛 5-methylfurfuryl alcohol	菠萝呋喃酮 Bromelifuranone	麦芽酚 Maltol
白肋烟 Burley tobacco	7.00±2.83c	94.50±43.13b	7.00±7.07b	5.00±1.41c	14.50±3.54b
烤烟 Flue-cured tobacco	200.61±44.27a	671.67±151.01a	139.44±29.65a	95.72±21.60a	43.44±7.62a
晒红烟 Sun-cured red tobacco	42.89±52.63c	127.42±145.97b	45.84±55.40b	22.37±15.50c	25.32±13.61b
晒黄烟 Sun-cured yellow tobacco	141.75±54.19b	636.63±270.98a	67.00±45.71b	73.75±18.59b	44.63±12.37a
香料烟 Oriental tobacco	38.67±25.15c	104.33±84.39b	50.33±23.63b	43.00±26.06bc	16.00±7.21b
雪茄烟 Cigar tobacco	18.80±2.39c	67.00±45.21b	24.00±7.58b	9.40±3.36c	22.60±10.31b

类型/化合物 Tobacco types/Compound	DDMP	$\gamma$ -巴豆酰内酯 $\gamma$ -crotonolactone	二氢猕猴桃内酯 Dihydroactinidiolide	$\gamma$ -丁内酯 $\gamma$ -butyrolactone
白肋烟 Burley tobacco	-	5.50±0.71c	6.00±1.41b	5.00±4.24ab
烤烟 Flue-cured tobacco	95.44±19.54a	27.83±3.88a	3.17±0.51c	8.06±3.33a
晒红烟 Sun-cured red tobacco	7.32±15.28c	19.63±14.20abc	6.84±2.22a	6.47±4.51ab
晒黄烟 Sun-cured yellow tobacco	43.63±18.45b	23.25±15.32ab	5.38±1.30b	8.88±6.42a
香料烟 Oriental tobacco	11.33±14.57c	10.00±3.00bc	5.33±0.58b	1.33±1.15b
雪茄烟 Cigar tobacco	1.20±1.30c	15.60±4.39abc	8.20±1.48a	4.80±6.14ab

烟、香料烟和晒黄烟,烤烟中该成分含量较低。总体而言,烤烟和晒黄烟烟气中呋喃、吡喃和内酯类成分释放量较高,但二氢猕猴桃内酯在烤烟中含量相对较低。

2.2.2 酚类化合物 由表 4 可知,加热卷烟原料烟气中检测到 10 种酚类化合物。其中白肋烟和香料烟中未检出丁香酚。苯酚是所有酚类化合物中含量最高的成分,且在六种烟草类型中含量

差异不显著。在愈创木酚、邻甲酚、间甲酚含量方面,白肋烟显著高于其他类型烟草,而香料烟含量较低,两者之间存在显著差异。对于对甲酚,晒黄烟、烤烟和白肋烟的含量显著高于雪茄烟、晒红烟和香料烟。此外,烤烟中 4-乙基愈创木酚含量显著高于其他类型烟草。在除 2,6-二甲基苯酚之外的其他酚类成分含量上,烤烟和晒黄烟相近,而香料烟中异丁香酚的含量显著低

表 4 烟气香味成分中酚类化合物含量差异( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )  
Table 4 Differences of phenolic compounds in smoke aroma components of HTPs

类型/化合物 Tobacco types/ Compound	苯酚 Phenol	愈创木酚 Guaiacol	邻甲酚 O-cresol	间甲酚 M-cresol	对甲酚 P-cresol	4-乙烯基 愈创木酚 4-vinyl guaiacol	2,6-二甲 基苯酚 2,6- xylenol	2,6-二甲氧基 苯酚 2,6- dimethoxyphenol	丁香酚 Eugenol	异丁香 酚 Eugenin
白肋烟 Burley tobacco	97.50± 12.02a	27.50± 6.36a	6.00± 2.83a	7.50± 3.54a	5.50± 3.54ab	5.00± 1.41c	1.00± 0.00b	5.00± 1.41ab	-	1.50± 0.71a
烤烟 Flue-cured tobacco	118.56± 25.81a	22.22± 6.86abc	4.17± 1.10ab	6.83± 2.20ab	5.94± 1.86ab	12.89± 2.87a	1.78± 1.40b	5.72± 2.95ab	0.17± 0.38a	2.06± 1.00a
晒红烟 Sun-cured red tobacco	111.95± 38.60a	21.74± 8.10abc	3.74± 1.37b	6.05± 1.61ab	4.53± 1.68b	7.95± 3.63bc	7.84± 6.47a	4.74± 2.16ab	0.26± 0.45a	1.79± 0.85a
晒黄烟 Sun-cured yellow tobacco	121.50± 20.61a	25.13± 5.87ab	4.38± 0.74ab	7.50± 2.00a	6.88± 1.55a	10.00± 3.02ab	3.00± 2.07ab	6.75± 3.99a	0.25± 0.46a	1.75± 0.71ab
香料烟 Oriental tobacco	83.67± 18.50a	11.33± 3.79c	2.67± 0.58b	4.67± 1.53b	4.00± 1.00b	9.67± 1.15ab	3.67± 1.15ab	2.33± 1.15b	-	0.67± 0.58b
雪茄烟 Cigar tobacco	79.80± 48.87a	14.60± 13.09bc	4.40± 3.13ab	5.60± 2.51ab	4.60± 1.52b	8.80± 3.56abc	3.80± 2.59ab	4.00± 2.92ab	0.20± 0.45a	1.60± 1.34ab

于其他类型烟草。总体而言,晒黄烟和烤烟烟气中酚类成分释放量显著高于雪茄烟和香料烟,但与晒红烟和白肋烟之间无显著差异。

2.2.3 酮类和酸类化合物 由表 5 可知,加热卷烟原料烟气中共检测到 10 种酮类和 5 种酸类化合物。酮类化合物是烟气中数量较多且重要的香味成分来源。烤烟烟气中 2,3-二甲基-2-环戊烯酮含量显著高于其他类型烟草。此外,烤烟和晒黄烟中 3-甲基-2-环戊烯酮、甲基环戊烯醇酮、巨豆三烯酮含量也显著高于其他类型,而白肋烟中这些成分含量较低,两组间存在显著差异。3-羟基- $\beta$ -二氢大马酮是一种重要的类胡萝卜素降解产物,白肋烟和晒黄烟中该成分含量较高,显著高于香料烟。在 3-氧代- $\alpha$ -紫罗兰醇含量上,晒红烟、雪茄烟、香料烟、晒黄烟和烤烟之间无显著差异,但均显著高于白肋烟。酸类化合物主要源于加热卷烟中糖类物质的热裂解以及还原糖与含氨基物质的美拉德反应。在酸类成分中,烤烟和晒黄烟中的乙酸含量以及烤烟中的丙酸含量显著高于其他类型,而白肋烟中这些成分含量较低,丁酸和异戊酸在六种烟草类型中的含量无显著差异。相比之下,香料烟、晒红烟和晒黄烟中的 3-甲基戊酸含量较高,而雪茄烟、烤烟、白肋烟含量较低,两组存在显著差异。综上所述,烤烟和晒黄烟在酮类和酸类化合物的含量上表现出较高水平,而白肋烟在这些成分上的含量普遍较低。

2.2.4 含氮化合物含量 由表 6 可知,加热卷烟原料烟气中共检测到 17 种含氮化合物。在加热卷烟主流烟气中,含氮化合物(即碱性香味成分)以烟碱为主,同时还包含少量吡啶类和吡嗪类化合物。除香料烟中未检出吡咯外,其他类型烟草原料中均含有这些成分。在含氮化合物的含量方面,白肋烟中吡咯、乙酰基吡咯、2-吡咯烷酮含量较高,显著高于烤烟和晒黄烟。吡啶的含量在烤烟、晒黄烟和白肋烟中较高,而晒红烟、雪茄烟和香料烟中含量较低,两组间存在显著差异。此外,烤烟 2-甲基吡啶和 3-乙基吡啶的含量较高。尼古丁、麦司明和 2,3'-联吡啶是含氮类化合物中重要的生物碱,且含量较高。其中晒红烟、白肋烟和晒黄烟中的尼古丁含量显著高于烤烟、雪茄烟和香料烟。麦司明和 2,3'-联吡啶在白肋烟中的含量最高,显著高于其他类型烟草,而香料烟这三种化合物均的含量最低,2-甲基吡嗪也是一种含量较高的化合物,其在雪茄烟中的含量最高,其次为白肋烟,晒黄烟中含量最低。基于以上分析,根据不同类型烟草原料加热卷烟烟气中含氮化合物释放量,可将烟叶分为两类:释放量较高的白肋烟、雪茄烟和晒红烟,以及释放量较低的烤烟、晒黄烟和香料烟。此外,烤烟烟气中吡啶的释放量显著高于其他类型烟草。

2.2.5 其他类化合物 由表 7 可知,加热卷烟原料烟气中检测到 3 种其他类香味成分,主要包括

表 5 烟气香味成分中酮类酸类化合物含量差异( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )  
Table 5 Differences of ketones and acids compounds content in smoke aroma components of HTPs

类型/化合物 Tobacco types/ Compound	2-环戊烯酮 2-cyclopentene	3-甲基-2-环戊烯酮 3-methyl-2-cyclopentene	2,3-二甲基-2-环戊烯酮 2,3-dimethyl-2-cyclopentene	3-乙基-2-环戊烯酮 3-ethyl-2-cyclopentene	甲基环戊烯醇酮 Methylcyclopentenolone	乙基环戊烯醇酮 Ethylcyclopentenolone	1-茛酮 1-indanone	巨豆三烯酮 Megastigmenone
白肋烟 Burley tobacco	5.00±1.41c	3.50±2.12b	2.50±0.71b	1.00±0.00b	12.00±4.24b	2.00±1.41c	2.50±0.71a	6.00±0.00b
烤烟 Flue-cured tobacco	32.33±6.02a	8.61±1.94a	139.11±29.89a	1.28±0.46ab	53.72±10.22a	10.67±3.34b	1.17±0.38b	23.50±7.13a
晒红烟 Sun-cured red tobacco	20.79±10.99ab	5.21±2.12ab	34.79±60.25b	1.00±0.47b	26.21±15.59b	4.37±3.52c	1.74±0.65ab	13.26±6.70b
晒黄烟 Sun-cured yellow tobacco	20.63±15.86ab	6.13±4.26ab	53.75±35.68b	1.75±0.46a	66.88±13.78a	16.00±5.98a	1.50±0.53ab	25.25±12.08a
香料烟 Oriental tobacco	15.67±5.13bc	3.67±1.53b	50.67±27.30b	0.67±0.58b	26.67±12.58b	4.33±3.51c	1.67±0.58ab	10.33±0.58b
雪茄烟 Cigar tobacco	20.60±13.74ab	5.20±3.27ab	15.80±12.13b	0.80±0.84b	18.40±9.13b	2.40±2.61c	1.80±0.84ab	16.40±6.58ab

类型/化合物 Tobacco types/ Compound	3-羟基-β-二氢大马酮 3-hydroxy-β-dihydrodamalone	3-氧代-α-紫罗兰醇 3-oxo-α-ionol	乙酸 Acetic acid	丙酸 Propionic acid	丁酸 Butyric acid	异戊酸 Isovaleric acid	3-甲基戊酸 3-methylvaleric acid
白肋烟 Burley tobacco	7.50±2.12a	5.00±1.41b	26.50±7.78b	12.50±10.61c	37.50±23.33a	50.00±5.66a	7.50±0.71b
烤烟 Flue-cured tobacco	5.06±1.86ab	20.78±7.21ab	206.44±38.63a	55.78±9.35a	21.06±11.67a	20.11±11.11a	7.78±13.20b
晒红烟 Sun-cured red tobacco	4.79±1.62ab	54.11±38.85a	97.32±65.54b	26.32±11.93c	46.00±72.85a	49.79±75.75a	202.89±148.42ab
晒黄烟 Sun-cured yellow tobacco	6.13±1.96a	27.00±8.54ab	157.00±125.69ab	41.75±13.87b	39.38±28.50a	44.50±24.43a	189.50±47.88ab
香料烟 Oriental tobacco	2.67±0.58b	32.00±9.64ab	42.67±1.53b	19.00±10.00c	62.33±33.95a	62.33±33.95a	308.67±155.26a
雪茄烟 Cigar tobacco	6.00±1.58ab	50.00±22.07a	33.40±33.96b	16.00±11.87c	23.60±7.02a	27.40±6.80a	33.80±55.45b

新植二烯、苯甲醇和苯乙醇。其中,新植二烯一种是重要的烟气香味成分,其含量在不同烟草原料的烟气中表现出显著差异。以白肋烟和雪茄烟为原料的烟气中,新植二烯含量较高;而以晒红烟、烤烟和晒黄烟为原料的烟气中,新植二烯含量次之;香料烟烟气中该成分含量较低。苯甲醇和苯乙醇是烟草中含量较为丰富的醇类化合物,分别具有柔和的花香和玫瑰花香特征,在不同类型烟草原料的烟气中,晒红烟和雪茄烟的烟气中苯甲醇和苯乙醇的释放量较高,而香料烟和

烤烟烟气中这两种醇类的释放量较低。综上所述,不同类型烟草原料的烟气中其他类香味成分的释放量存在明显差异,这可能与各烟草类型的化学成分和调制工艺密切相关。

### 2.3 加热卷烟原料烟气香味成分组成与感官质量的相关性

图 2 为加热卷烟原料烟气香味成分与感官质量的简单相关关系,可以看出,呋喃、吡喃和内酯类化合物中糠醛、糠醇、5-甲基糠醛、菠萝呋喃

表 6 烟香气味成分中含氮化合物含量差异( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )  
Table 6 Differences of nitrogen compounds in smoke aroma components of HTPs

类型/化合物	吡咯 Pyrrole	乙酰吡咯 Acetyl pyrrole	2-吡咯烷酮 2-pyrrolidone	吡啶 Pyridine	2-吡啶 2-pyridine	3-甲基吡啶 3-methylpyridine	3-羟基-6-甲基吡啶 3-hydroxy-6-methylpyridine	2,3'-联吡啶 2,3'-bipyridine	尼古丁 Nicotine	麦司明 Messmin	尼古他因 Nicotinel	2-甲基吡嗪 2-methylpyrazine	吡嗪 Benzopyrone	3-甲基吡嗪 3-methylindole	喹啉 Quinoline	异戊酰胺 Isovaleramide
白肋烟	14.50±	23.00±	46.50±	31.00±	2.00±	9.50±	11.00±	263.00±	7 259.00±	569.00±	8.00±	101.00±	46.00±	5.50±	7.00±	16.50±
Burley tobacco	19.09a	1.41a	7.78a	42.43ab	2.83b	9.19a	2.83a	12.73a	2 117.08ab	205.06a	5.66ab	115.97ab	1.41a	0.71a	2.83a	0.71a
烤烟Flue-cured tobacco	1.39±	10.89±	6.61±	58.39±	4.61±	9.06±	4.33±	31.11±	4 985.11±	10.17±	3.83±	8.11±	2.67±	1.11±	3.83±	1.44±
晒红烟	1.04b	2.35b	2.43c	11.90a	1.04a	2.36a	1.81c	14.90c	1 515.19b	4.62c	0.62b	3.98c	1.37c	0.58bc	0.71b	0.51d
Sun-cured red tobacco	12.16±	16.37±	14.74±	28.26±	2.32±	7.21±	6.95±	98.16±	7 531.21±	58.84±	9.47±	90.74±	16.05±	2.16±	5.37±	4.63±
晒黄烟	10.79a	4.49a	9.57b	27.17b	2.47b	4.91a	2.50ab	57.69b	1 833.19a	24.21b	4.86a	46.92b	8.40b	1.17bc	1.89a	2.29b
Sun-cured yellow tobacco	0.88±	9.88±	7.50±	36.13±	2.63±	7.38±	4.13±	34.50±	6 090.25±	13.13±	4.38±	5.38±	3.00±	1.38±	3.13±	1.75±
香料烟 Oriental tobacco	0.64b	2.17b	4.21bc	31.38ab	2.56ab	3.29a	1.89c	17.82c	1 570.18ab	7.34bc	0.74b	4.98c	1.69c	0.52bc	1.13b	0.46d
雪茄烟 Cigar tobacco	14.60±	16.40±	10.20±	11.80±	1.40±	4.20±	7.40±	71.20±	4 620.80±	37.00±	5.40±	178.20±	17.00±	2.40±	4.80±	4.60±
	15.69a	6.50a	7.26bc	12.15b	0.55b	3.35a	0.89ab	38.25bc	2 086.20bc	25.06bc	2.70ab	35.89a	8.94b	1.34b	0.84ab	1.14bc

表 7 烟气香味成分中其他类化合物含量( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )  
Table 7 Differences of other compounds in smoke aroma components of HTPs

类型/化合物 Tobacco types/Compound	新植二烯 Neophytadiene	苯甲醇 Benzyl alcohol	苯乙醇 Phenethyl alcohol
白肋烟 Burley tobacco	131.00±25.46a	10.50±0.71ab	16.00±5.66b
烤烟 Flue-cured tobacco	51.83±16.24bc	8.22±2.58b	7.83±3.05b
晒红烟 Sun-cured red tobacco	72.26±21.17b	16.95±6.21a	53.00±37.85a
晒黄烟 Sun-cured yellow tobacco	49.63±33.20bc	11.75±1.75ab	12.50±3.21b
香料烟 Oriental tobacco	23.67±4.73c	6.67±1.53b	10.67±3.06b
雪茄烟 Cigar tobacco	114.00±38.09a	16.60±12.20ab	21.00±3.16b

酮、麦芽酚及 DDMP 均与香气质、刺激性、干燥感、苦涩感、残留以及评吸总分呈显著或极显著正相关关系。其中糠醛和 5-甲基糠醛与评吸总分的相关性分别达 0.616 和 0.617, 表明这些化合物整体感官质量的贡献显著。相反, 二氢猕猴桃内酯则与上述感官指标呈负相关关系。酚类香味成分中 4-乙炔基愈创木酚与香气质、刺激性、干燥感、苦涩感、残留和评吸总分呈极显著正相关, 表明其对烟气的感官品质有重要贡献。而 2,6-二甲基苯酚则与刺激性、干燥感、苦涩感、残留和评吸总分呈极显著负相关关系, 说明其可能对感官质量产生负向影响。酮类香味成分中 2-环戊烯酮、3-甲基-2-环戊烯酮、2,3-二甲基-2-环戊烯酮、3-乙基-2-环戊烯酮、甲基环戊烯醇酮、乙基环戊烯醇酮、巨豆三烯酮以及酸类化合物中丙酸和乙酸均与刺激性、干燥性、苦涩感、残留和评吸总分呈显著或极显著正相关关系。相比之下, 1-萘酮与刺激性、残留和评吸总分呈显著或极显著负相关。绝大多数含氮类和其他类香味成分与香气质、杂气、刺激性、干燥感、苦涩感、残留和评吸总分呈负相关关系, 但与劲头呈正相关关系。其中, 吡啶、2-甲基吡啶和 3-乙基吡啶与刺激性、干燥感、苦涩感、残留和评吸总分呈极显著正相关关系, 表明这些化合物对烟气感官特性有显著影响。综上所述, 不同类型的烟气香味成分对加热卷烟的感官质量具有显著的正相关或负相关影响, 这为优化烟草原料和产品配方提供了重要的科学依据。

### 3 讨论

本研究以国内 10 个省份 55 份烟叶样品, 研究了 6 大烟草类型加热卷烟烟气香味成分含量的差异性, 并分析了烟气香味成分与感官评价指

标的相关性。

糠醛、DDMP (2,3-二氢-3,5-二羟基-6-甲基-4(H)-吡喃-4-酮) 等呋喃、吡喃类物质主要来源于加热卷烟中糖类物质低温阶段 (300 °C~600 °C) 的热裂解以及还原糖与含氨基物质的美拉德反应<sup>[16,17]</sup>。由于烤烟和晒黄烟的糖含量较高<sup>[18]</sup>, 其呋喃类和吡喃类物质含量显著高于其他类型烟草, 这与糖类物质的热裂解反应密切相关。通常情况下, 不同类型烟草烟气中呋喃、吡喃类物质的释放量与其糖含量的大小排序保持一致。然而, 在本研究中, 二氢猕猴桃内酯的释放量与糖含量的排序出现了显著差异: 糖含量较高的烤烟、晒黄烟和香料烟中, 二氢猕猴桃内酯的释放量反而较低; 而糖含量较低的雪茄烟、晒红烟和白肋烟中, 二氢猕猴桃内酯的释放量相对较高。这种现象表明, 二氢猕猴桃内酯的生成机制可能与其他呋喃类或吡喃类物质不同, 其形成过程可能受到其他因素的影响, 这有待进一步深入研究愈创木酚是木质素在 300 °C~400 °C 热解温度下的代表性酚类产物, 其在卷烟烟熏香韵中贡献显著, 且在加热卷烟气溶胶粒相物中的转移率存在较大差异<sup>[19]</sup>。此外, 邻甲酚和对甲酚等取代酚被描述为具有甜香草味、焦糖和药味; 而甲基苯酚和苯酚等简单酚则表现为甜味、药味及涩口。丁香酚和异丁香酚及其衍生化合物是卷烟烟气中的关键辛香成分, 也是常用的加香成分<sup>[20]</sup>。本研究结果显示, 晒黄烟和烤烟烟气中酚类成分含量较高且接近, 显著高于雪茄烟和香料烟, 分析原因可能是酚类物质的形成主要来源于烟草中复杂的前体物质, 如小分子糖、纤维素、半纤维素、果胶、木质素等, 这些前体物质通过自由基反应、脱甲基反应和环状结构的转化<sup>[6,14]</sup>, 更容易生成多种

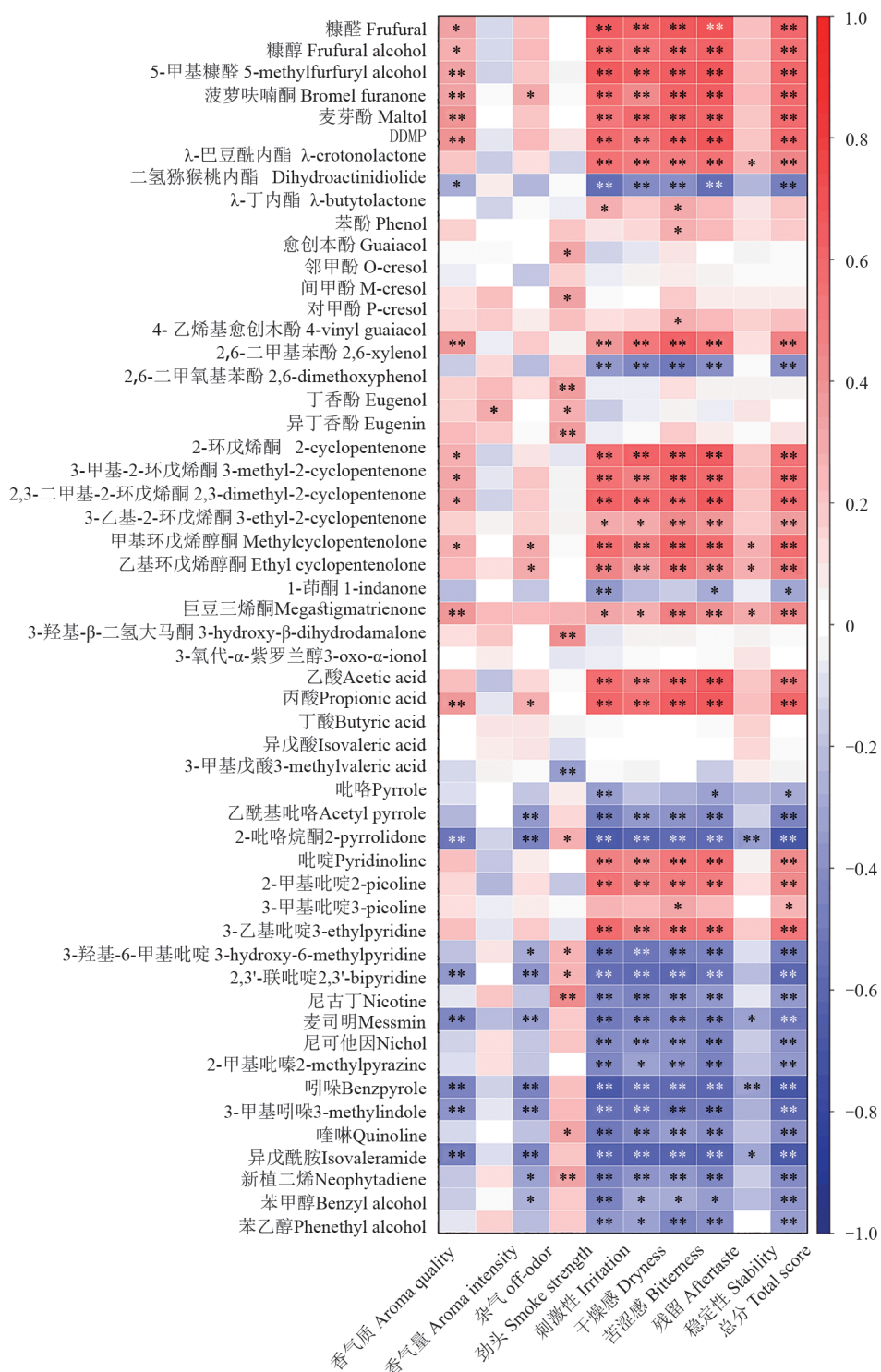


图2 烟气香味成分与感官质量的相关性

Fig. 2 Correlation between smoke aroma components and sensory quality of HTPs

酚类化合物。晒黄烟和烤烟中的前体物质含量较高,因此在热解过程中能够生成更多的酚类化合物,从而导致其烟气中酚类成分含量显著

高于其他类型烟草。

酮类物质是烟草中数量较多且重要的香味成分,主要来源于烟草生长期间及调制、发酵与

醇化过程中的生物转化和代谢积累,通过热作用迁移至烟气中;此外,还可通过烟草的热解过程形成。烟草中重要的酮类香味成分主要有巨豆三烯酮、二氢大马酮、甲基环戊烯醇酮、乙基环戊烯醇酮和紫罗兰醇等。其中巨豆三烯酮来源于胡萝卜素的降解,是烟草中重要的天然香气成分,具有类似干草的甜香,能显著提升烟香的柔和度和丰满度,掩盖杂气<sup>[21,22]</sup>;β-二氢大马酮带有类似玫瑰的青甜香,常被用作卷烟香气增效剂<sup>[23]</sup>。甲基环戊烯醇酮和乙基环戊烯醇酮具有典型的焦甜香气,带有典型的烟草风味有助于增强浓郁的香味风格<sup>[24]</sup>;紫罗兰醇则带有紫罗兰花香和柏木香气,可丰富烟草的花香特征。本研究结果表明,不同类型烟草加热卷烟烟气中酮类香味成分存在显著差异,晒黄烟和烤烟酮类含量较高,显著高于白肋烟、香料烟和雪茄烟,这一结果与赵国豪<sup>[25]</sup>在晒黄烟和烤烟方面的结论相符,然而,在香料烟方面,本研究发现了显著差异,这可能与样品来源有关。不同产地和加工工艺可能导致香料烟化学成分的差异,进而影响酮类物质的含量和种类。此外,晒红烟、雪茄烟烟气中3-氧代-α-紫罗兰醇含量显著高于其他类型烟草,这种差异反映了不同烟草类型在化学成分和调制过程中的独特性,也为烟草的差异化利用提供了科学依据。

烟气中的酸类物质主要源于烟草中糖类物质和非挥发性有机酸的热裂解,以及挥发性有机酸的转移。在加热卷烟烟气的酸类成分中,烤烟的乙酸和丙酸含量相对较高,这两种酸性成分是烤烟烟气中的主要酸类物质。与此同时,烤烟中的含氮化合物(如尼古丁、麦司明等)作为主要的碱性成分,其含量相对较低。这种酸碱成分的差异导致烤烟在加热卷烟中的烟气pH值趋向更低的方向,而烟气pH值与烟气中烟碱的形态分布密切相关<sup>[26,27]</sup>。因此,烤烟在加热卷烟中烟气的游离态烟碱含量相对其他类型处于较低水平。此外,3-甲基戊酸和异戊酸是对香料烟特征香气有重要影响的酸类物质<sup>[28]</sup>,它们不仅维持卷烟烟气的酸碱平衡,还能丰富烟香。研究表明,香料烟在加热卷烟烟气中异戊酸和3-甲基戊酸的释放量显著高于其他类型烟草。晒黄烟、晒红烟和白肋烟烟气中的异戊酸和3-甲基戊酸释放量也相对较高,仅次于香料烟。这种差异可能与不同

烟草类型中糖类物质和其他前体物质的含量及其热解特性有关。

新植二烯是一种含有20个碳原子的共轭二烯烃,是烟草中重要的中性致香物质之一。它在烟草成熟和调制过程中由叶绿素降解形成叶醇,再进一步脱水生成。新植二烯具有携带烟叶中挥发性香气物质和致香成分进入烟气的的能力,能减少刺激性,使烟气醇和<sup>[8]</sup>。有研究表明烤烟较高的新植二烯含量与干草香韵呈极显著正相关,且正向效应较大<sup>[29]</sup>。本研究中不同类型烟草加热卷烟烟气中的新植二烯含量存在显著差异。以晒红烟、雪茄烟、白肋烟等晾制类或似晾制类调制烟叶为原料的烟气中,新植二烯含量较高,烤烟、晒黄烟烟气中新植二烯含量居中,香料烟烟气含量最低。目前关于新植二烯在不同类型烟草加热卷烟烟气释放量中的研究较少,其在不同烟草类型中的含量差异可能与烟草的调制工艺<sup>[30-32]</sup>密切相关。此外,新植二烯对烟气品质的影响也受多种因素的调控。因此,未来仍需进一步研究新植二烯在不同类型烟草中的形成机制和释放规律,以更好地理解其对烟气品质的贡献。

本研究中,除1-萘酮外的绝大多数酮类化合物与感官评价指标(香气质、刺激性、干燥感、苦涩感、残留和评吸总分)均呈正相关,这一结果进一步支持了前人<sup>[11,12,33]</sup>的研究,证实了酮类化合物在加热卷烟烟气中对感官品质有显著的正向贡献。值得注意的是,γ-丁内酯与刺激性和苦涩感呈显著正相关,这与赵璐等<sup>[11]</sup>的结论不完全一致。这种差异可能源于以下两个方面:一方面,加热卷烟烟气香味成分的检测方式不同,化合物分类不一致;另一方面,用于感官质量评价烟支的制作方法也不一致。此外,γ-丁内酯在不同烟草类型中的含量差异也可能是一个重要因素。某些烟草类型可能在调制或发酵过程中生成更多的γ-丁内酯,从而影响其在烟气中的感官表现。未来的研究可以进一步探讨γ-丁内酯在不同烟草类型和加工工艺中的生成机制,以及其对感官品质的具体影响,从而为加热卷烟的品质提升提供更全面的理论支持。

#### 4 结论

采用中心切割多维气相色谱-质谱联用技

术(MDGC-MS),对加热卷烟烟气中的香味成分进行了系统测定,并比较了六种烟草类型(烤烟、晒黄烟、晒红烟、香料烟、雪茄烟和白肋烟)烟气中香味成分的差异。此外,还分析了加热卷烟烟气香味成分与感官质量的关系。结果表明,不同类型加热卷烟烟气香味成分差异显著。烤烟和晒黄烟烟气香味成分含量较高且种类丰富,表现出显著的香味特征多元化的特点。其次为晒红烟和香料烟,而雪茄烟和白肋烟的香味成分含量相对较低。

综合来看,烤烟和晒黄烟凭借其高含量的挥发性香味成分及丰富的香味特征,成为加热卷烟生产的理想原料。然而,值得注意的是,烤烟和晒黄烟较高的糖含量可能导致烟气pH值较低,进而影响烟碱的释放。这一特性在加热卷烟的配方设计和品质调控中需要予以充分考虑。

#### 参考文献

- [1] 史宏志.烟草香味学[M].北京:中国农业出版社,2022.
- [2] 刘艳华,赵文涛,窦玉青,等.基于主成分分析的不同类型烟叶加热卷烟感官质量评价[J].烟草科技,2023,56(10):82-88.
- [3] 许美玲,焦芳婵,贺晓辉,等.3种类型烟草种质资源烟叶生物碱等化学成分差异性分析[J].热带作物学报,2024,45(01):97-113.
- [4] 许美玲.不同类型晾晒烟种质资源的化学成分和几种致香成分分析[J].中国烟草学报,2020,26(04):56-66.
- [5] 付秋娟,刘艳华,杜咏梅,等.我国烟草资源西柏三烯二醇含量分析[J].中国烟草学报,2019,25(05):10-14.
- [6] 霍现宽,刘珊,崔凯,等.加热状态下烟草烟气香味成分释放特征[J].烟草科技,2017,50(08):37-45.
- [7] 王颖,杨文彬,王冲,等.加热不燃烧卷烟产品主流烟气中香味成分的比较[J].食品与机械,2019,35(06):63-68.
- [8] 窦玉青,王超,赵文涛,等.基于加热卷烟的国内烟草原料低温热解香气成分差异性分析[J].甘肃农业大学学报,2024,59(01):203-210.
- [9] 王超,赵文涛,杨菁.低温热裂解香气成分与加热卷烟感官质量相关性分析[J].特产研究,2025,47(06):92-98+106.
- [10] 刘天择.基于加热卷烟的主要等级烤烟质量评价[D].北京:中国农业科学院,2023:23-42.
- [11] 赵璐,王丙开,宋中邦,等.基于感官评价的加热不燃烧卷烟原料品种(系)筛选[J].烟草科技,2020,53(01):21-28.
- [12] 张书铭.基于加热卷烟的烟叶原料内在质量评价[D].北京:中国农业科学院,2022:22-35.
- [13] 刘钻福,窦玉青,张本强,等.烘烤工艺对加热卷烟烟草原料香气成分及感官质量的影响[J].中国烟草科学,2022,43(03):57-63.
- [14] 何红梅,尤晓娟,王鸣,等.基于单料烟的加热卷烟与传统卷烟香气成分释放差异分析[J].轻工学报,2024,39(03):99-108.
- [15] 李俊杰,刘百战,张玮,等.基于滤片-吸附管串联捕集的气相色谱-质谱法分析卷烟主流烟气全成分[J].理化检验-化学分册,2025,61(09):1009-1024.
- [16] 王林,周平,贺佩,等.糖类物质对烟草香气品质的影响研究进展[J].中国烟草科学,2021,42(06):92-98.
- [17] 苏鑫,姬厚伟,刘剑,等.烟草中糖类物质分析的研究进展[J].贵州农业科学,2017,45(03):44-49.
- [18] 刘正聪,陆舍铭,高茜.PY/GC-MS法研究烟碱热解产物[J].精细化工,2009,26(05):480-485.
- [19] 史清照,范武,张启东,等.加热卷烟气溶胶烟熏香成分分析及特征调控[J].烟草科技,2024,57(04):1-7.
- [20] 范武,何峰,姬凌波,等.卷烟主流烟气辛香特征成分组群的分布特征及感官贡献[J].烟草科技,2021,54(02):36-43.
- [21] 吴彦辉,薛立新,许自成,等.烤烟巨豆三烯酮研究现状与展望[J].中国农业科技导报,2013,15(03):150-156.
- [22] 刘涛,曹建敏,郭存,等.不同烤烟品种化学成分及致香物质差异分析[J].中国烟草科学,2023,44(02):74-82.
- [23] 史清照,李河霖,王超,等.卷烟烟气内源性花香成分分析及花香特征调控[J].烟草科技,2024,56(05):56-67.
- [24] 胡安福,范武,夏倩,等.卷烟主流烟气焦甜、奶香和豆香特征成分组群的分布特征和感官贡献[J].烟草科技,2020,53(12):27-36.
- [25] 赵国豪,郭国宁,黄宁,等.自制装置加热下不同烟叶原料香味成分释放差异[J].烟草科技,2021,54(03):24-30.
- [26] 韩书磊,张浩,陈欢,等.不同形态烟碱的释放和生理效应差异研究进展[J].轻工学报,2023,38(04):69-76.
- [27] 刘梦梦,王晨辉,张媛,等.加热卷烟烟气PH值与烟碱含量的关系研究[J].中国烟草学报,2023,29(03):1-9.
- [28] 杨志晓,夏海乾,蔡凯,等.特色烟草新品种贵烟28的选育及其特征特性[J].中国烟草科学,2024,45

- (05):1-7.
- [29] 王鹏泽,来 苗,陶 陶,等.不同香型烤烟主要香味物质成分与香韵指标的关系研究[J].中国农业科技导报,2015,17(03):126-135.
- [30] 张锐新,任天宝,赵松超,等.晾制密度对雪茄烟中性致香成分的影响[J].天津农业科学,2018,24(06):45-48.
- [31] 韩翔雨,赵高坤.烟中烤过程中烘烤工艺对新植二烯含量变化规律的影响[J].安徽农业科学,2013,41(35):13729-13731.
- [32] 郭文龙,丁松爽,刘路路,等.翻堆对初次发酵过程中雪茄茄芯烟叶质量变化的影响[J].南方农业学报,2021,52(02):365-373.
- [33] 欧阳一鸣,赵文涛,付秋娟,等.不同类型烟叶原料加热卷烟化学成分和感官质量评价[J].中国烟草科学,2023,44(04):64-70,78.