

引用格式:

郑晓云, 郑思盈, 饶先立, 高鑫, 王嘉奇, 梁淼, 张峻松, 谢寄清. 甘油对不同类型烟草颗粒热解及香味释放特性的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2026, 52(1): 44–55.

ZHENG X Y, ZHENG S Y, RAO X L, GAO X, WANG J Q, LIANG M, ZHANG J S, XIE J Q. Effects of glycerol on the pyrolysis and aroma release characteristics of different types of tobacco particles[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2026, 52(1): 44–55.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



甘油对不同类型烟草颗粒热解及香味释放特性的影响

郑晓云¹, 郑思盈², 饶先立¹, 高鑫³, 王嘉奇², 梁淼², 张峻松², 谢寄清^{1*}

(1. 江苏中烟工业有限责任公司技术中心, 江苏 南京 210019;

2. 郑州轻工业大学烟草科学与工程学院, 河南 郑州 450000; 3. 南通烟滤嘴有限责任公司, 江苏 南通 226014)

摘要: 分别采用热重分析方法和自建程序控温加热平台耦联烟气捕集装置研究甘油对不同类型烟草颗粒的热解特性及各类香味成分释放行为的影响。结果表明: 1) 4种不同类型烟草颗粒的热失重过程均可分为3个阶段, 即脱水阶段(阶段I)、脱挥发分阶段(阶段II)、半纤维素和纤维素热解阶段(阶段III); 甘油在不同程度上提高了烟草颗粒在阶段II的失重率以及最大失重速率, 其中, 甘油对雪茄烟颗粒的影响最显著, 同时, 甘油降低了阶段III的失重率及最大失重速率, 表明甘油与不同类型烟草颗粒间的相互作用存在差异。2) 不同类型烟草颗粒的中性、酸性和酚类及碱性香味成分释放总量存在差异, 未施加甘油的烤烟、香料烟、白肋烟、雪茄烟的中性香味成分释放总量依次降低, 香料烟、雪茄烟、烤烟、白肋烟的酸性香味成分和酚类物质释放总量依次降低, 白肋烟、雪茄烟、烤烟、香料烟的碱性香味成分释放总量依次降低。3) 甘油在不同程度上提高了烟草颗粒各类香味成分的释放总量, 中性香味成分释放总量提升幅度为44.07%~77.70%, 酸性香味成分和酚类物质释放总量提升幅度为29.34%~53.32%, 碱性香味成分释放总量提升幅度为7.49%~84.60%。甘油对不同类型烟草颗粒的热失重和香味释放特性影响程度不一, 但整体均能够提升各类香味成分在加热状态下的释放总量。

关键词: 加热卷烟; 烟草颗粒; 甘油; 热解; 香味成分; 释放特性

中图分类号: TS411

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2026)01-0044-12

Effects of glycerol on the pyrolysis and aroma release characteristics of different types of tobacco particles

ZHENG Xiaoyun¹, ZHENG Siying², RAO Xianli¹, GAO Xin³, WANG Jiaqi², LIANG Miao², ZHANG Junsong², XIE Jiqing^{1*}

(1. Technology Center, China Tobacco Jiangsu Industrial Co. Ltd., Nanjing, Jiangsu 210019, China;

2. College of Tobacco Science and Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou, Henan 450000, China; 3. Nantong Cigarette Filter Co. Ltd., Nantong, Jiangsu 226014, China)

Abstract: To investigate the effects of glycerol on the pyrolysis characteristics and the release behavior of aroma components from different types of tobacco particles under heating conditions, thermogravimetric analysis and a self-built temperature-programmed heating platform coupled with a flue gas capture device were employed. The results were shown as follows. 1) The thermogravimetric process of four different types of tobacco particles could be divided into three stages, i.e., dehydration stage(stage I), devolatilization stage(stage II) and hemicellulose and cellulose pyrolysis stage(stage III). Glycerol increased the weight loss rate and the maximum weight loss rate of tobacco particles in stage II to varying degrees, with the most significant effect observed in cigar tobacco particles. Meanwhile, glycerol reduced the weight loss rate and the maximum weight loss rate in stage III, indicating differences in the interaction between glycerol and different types of tobacco particles. 2) There were differences in the total release amounts of neutral, acidic, phenolic, and alkaline aroma

收稿日期: 2025-04-21

修回日期: 2026-02-15

基金项目: 江苏中烟工业有限责任公司科研项目(H202425); 中国烟草总公司重点研发项目(110202402037)

作者简介: 郑晓云(1972—), 男, 安徽芜湖人, 硕士, 高级工程师, 主要从事烟用香精香料开发与应用研究, zhengxy0501@163.com;

*通信作者, 谢寄清, 硕士, 工程师, 主要从事卷烟调香、卷烟产品设计开发研究, xiejq@jszygs.com

components among different types of tobacco particles. For tobacco particles without glycerol, the total release amounts of neutral aroma components decreased in the order: flue-cured tobacco, oriental tobacco, burley tobacco, and cigar tobacco; the total release amounts of acidic aroma components and phenolic substances decreased in the order: oriental tobacco, cigar tobacco, flue-cured tobacco, and burley tobacco; the total release amounts of alkaline aroma components decreased in the order: burley tobacco, cigar tobacco, flue-cured tobacco, and oriental tobacco. 3) Glycerol increased the total release amounts of various aroma components from tobacco particles to varying degrees. The increase in the release amount of neutral aroma components ranged from 44.07% to 77.70%, the total release amount of acidic aroma components and phenolic substances increased by 29.34% to 53.32%, and the release amount of alkaline aroma components increased by 7.49% to 84.60%. The effects of glycerol on the thermogravimetric and aroma release characteristics of different types of tobacco particles varied, but overall, glycerol enhanced the total release amounts of various aroma components under heating conditions.

Keywords: heated tobacco products; tobacco particle; glycerol; pyrolysis; aroma components; releasing characteristics

加热卷烟是一种利用外界热源控制烟芯原料受热状态,从而释放含有烟碱和香味物质的烟气的新型烟草制品^[1-4],其中烟芯是生成烟气的基本物质单元,对加热卷烟感官品质具有重要影响。目前,加热卷烟的烟芯形式主要有天然烟丝、再造烟叶及烟草颗粒3种,各种形式的烟芯均以烟草原料为主体,辅以发烟剂、外源性香料等制备而成^[5-7]。因此,研究烟芯的原料组成和结构形式等因素对其低温热解特性、关键成分释放特征及感官质量的影响,对于烟芯配方设计具有重要意义。

国内外学者围绕甘油等发烟剂对烟草原料热解特性的影响开展了大量研究。例如,DAI等^[8]利用热重红外联用技术考察甘油施加量对烟叶原料热解产物释放的影响,发现甘油能够促进挥发性香味成分释放,并可抑制高温下芳烃化合物生成。张贾宝等^[9]利用热重分析技术研究了烤烟、白肋烟、香料烟、雪茄烟的低温热解特性,发现甘油施加量显著影响各烟叶原料在不同失重阶段的热解特性,但对不同类型烟叶原料的影响程度存在差异。在甘油对烟草原料香味成分释放的影响方面,赵国豪等^[10]利用自行设计装置对比了烤烟、白肋烟、香料烟等不同类型原料在线性升温至370 °C时烟气香味成分释放量的差异,发现不同类型原料释放的醛酮类、低级脂肪酸、高级脂肪酸、呋喃吡喃类香味成分含量差异显著,而不同部位烤烟香味释放量差异较小;刘梦梦等^[11]采用GC-MS方法,对稠浆法加热卷烟薄片179种挥发/半挥发性香味成分释放量进行分析,发现烟气中羧酸类、醛酮类、氮杂环类、酯类等香味成分释放量随甘油添加量增加呈先升后降的二次函数关系。

上述研究多聚焦于甘油对烟叶原料或加热卷烟薄片的热解及香味成分释放的影响,而烟草颗粒

作为加热卷烟烟芯材料,具备全烟草配方、负载能力强、均质化程度高等优势^[12-14],具有广阔的应用潜力。在烟草颗粒的低温热解及成分释放研究方面,曹芸等^[15-16]利用热重和锥形量热仪研究了甘油对配方烟丝颗粒热解和释烟特性的影响,发现甘油能提升起始释烟速率,并降低CO释放量;不同烟叶原料制备的烟草颗粒的气相产物类别基本一致,但释放温区范围略有差异。由此可见,受不同类型烟草原料的内在成分与结构特征影响,甘油对不同类型烟草制备颗粒在加热状态下的热释放香味成分及热解特征的影响存在差异,但相关研究较少。

本文以雪茄烟、白肋烟、烤烟、香料烟为原料制成的不同类型烟草颗粒为研究对象,利用热重分析技术和自行设计的程序控温加热平台耦联烟气捕集装置,结合气相色谱-质谱联用(GC-MS)分析方法对比分析甘油对其低温热解特性以及中性、酸性和酚类、碱性香味成分释放量的影响,以期对颗粒型加热卷烟烟芯的配方原料选择和设计提供参考。

1 材料与方法

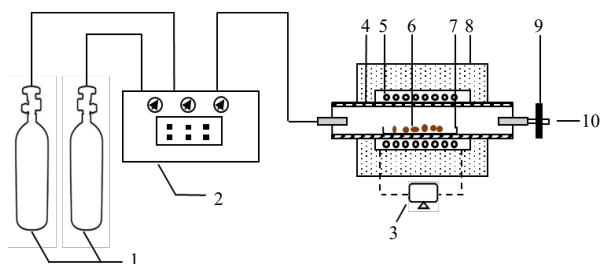
1.1 材料、试剂与仪器

材料: 云南德宏Fi-C-1雪茄烟、湖北恩施C1F白肋烟、云南红大C2F烤烟、云南保山A1香料烟烟叶,烟叶原料均由江苏中烟工业有限责任公司提供。

试剂: 甘油(分析纯);乙酸苯酯、反-2-己烯酸(纯度>98%);氢氧化钠、氯化钠、无水硫酸钠(分析纯);二氯甲烷(色谱纯);盐酸(质量分数为37%);羧甲基纤维素。

仪器: ME104E电子天平、YK60摇摆式颗粒机、XL-20B扣压摇摆式小型粉碎机、STA 449 F5 Jupiter®型同步热分析仪、8890/5977B气相色谱/质

谱联用仪、自制程序控温加热平台耦联烟气捕集装置(结构示意图如图1所示)。



1—气体钢瓶; 2—混合气体控制系统; 3—温控系统; 4—石英管;
5—红外灯丝; 6—烟草样品; 7—石英舟; 8—保温材料; 9—剑桥滤片
捕集器; 10—气体出口。

图1 程序控温加热平台耦联烟气捕集装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of programmed temperature control heating platform coupled flue gas capture device

1.2 实验方法

1.2.1 样品制备

利用粉碎机将不同类型烟叶粉碎30 s后过筛, 获得粒径为0.150 mm的烟粉备用。分别称取一定质量的不同类型烟粉, 将其与质量分数为4%的羧甲基纤维素(CMC)及20%的甘油混合均匀, 然后放入摇摆颗粒机中挤出成型。成型颗粒在50 °C烘箱中干燥2 h, 将干燥后的颗粒依次通过孔径为0.425 mm和0.850 mm的筛网, 选取粒径为0.425~0.850 mm的烟草颗粒作为后续试验样品, 采用相同方法制备不含甘油的样品作为对照。样品命名形式为烟叶类型-X, 其中X为样品中甘油质量分数(例如, 雪茄烟-20表示甘油质量分数为20%的雪茄烟颗粒)。将烟草颗粒置于温度为(22±1) °C、相对湿度为(60±3)%的标准环境中平衡48 h后密封备用^[17]。

1.2.2 烟草颗粒热重实验

称取10 mg左右的颗粒样品置于热重坩埚中, 采用同步热分析仪对其热解特性进行分析。热重测试条件如下: 载气为N₂, 流量为30 mL/min, 升温速率为20 °C/min, 加热温度范围为室温至400 °C。根据热重(TG)曲线及热重微分(DTG)曲线确定最大失重速率温度(T_{max})、最大失重速率($v_{DTG, max}$)及失重率等热解特征参数。

1.2.3 样品香味成分分析

称取0.4 g颗粒样品置于程序控温加热平台耦联烟气捕集装置的石英管内, 将氮气以0.2 L/min的

流速通入石英管, 以20 °C/s的升温速率从室温升至360 °C, 并保持5 min, 利用石英管出口的剑桥滤片捕集烟气气相物; 加热完成后, 打开升温炉盖继续通入氮气, 冷却5 min后取下剑桥滤片。

将完成捕集的剑桥滤片折起放入盛有60 mL二氯甲烷的锥形瓶中, 常温超声30 min, 得到烟气香味成分萃取液; 参照文献[18]中的方法, 使用盐酸、氢氧化钠对萃取液进行酸洗、碱洗, 分别得到中性、酸性、碱性香味成分萃取液; 将无水硫酸钠加入萃取液中, 对其进行干燥处理, 过夜后分别在萃取液中加入2种内标(0.250 g/L乙酸苯酯-二氯甲烷溶液、0.100 g/L反-2-己烯酸-二氯甲烷溶液)各1 mL, 分别将中性、酸性、碱性萃取液浓缩至1 mL后, 经孔径为0.45 μm的有机膜过滤至色谱瓶中进行GC-MS分析。

GC分析条件: 色谱柱型号为安捷伦HP-5(60.00 m×250.00 μm×0.25 μm), 载气为高纯氦气; 进样口温度为280 °C; 载气流速为15 mL/min; 分流比为15:1; 进样量为1 μL; 升温程序为柱初温50 °C, 保持2 min, 以8 °C/min的速率升温至280 °C, 保持25 min。

MS分析条件: 电离方式为电子轰击源(EI); 电离能量为70 eV; 传输线温度为280 °C; 离子源温度为230 °C; 四极杆温度为150 °C; 质谱扫描方式为全扫描; 质量扫描范围为30~550 m/z 。

仪器校准与数据验证: 各样品数据平行测定3次, 取平均值, 色谱峰面积阈值在5%以下。

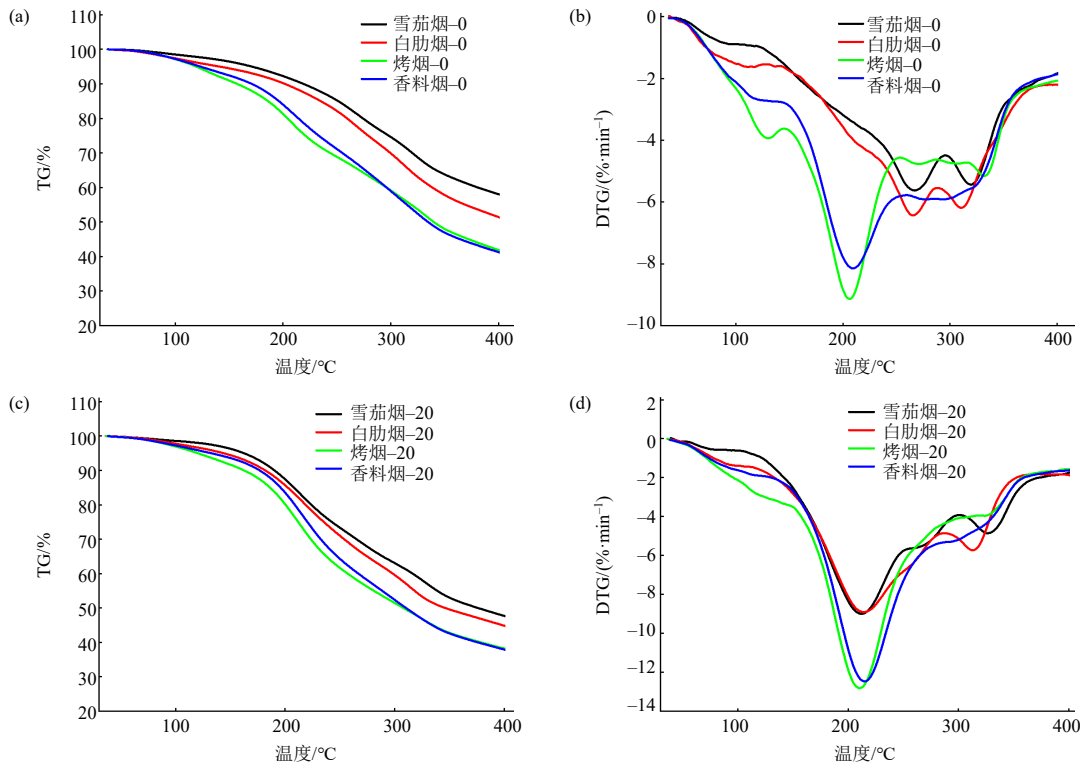
1.3 数据处理与分析

采用Excel处理数据, 采用One-way ANOVA和Duncan法进行方差分析和多重比较分析。

2 结果与分析

2.1 甘油对不同类型烟草颗粒热失重行为的影响

图2所示为施加甘油前后不同类型(雪茄烟、白肋烟、烤烟、香料烟)烟草颗粒的TG和DTG曲线。由于不同类型烟草原料微观结构和内在化学成分存在差异, 不同类型烟草颗粒的热失重曲线也存在明显差异。由图2可见: 根据DTG曲线失重峰可将不同类型烟草颗粒的热失重过程分为3个阶段, 分别为脱水阶段(阶段I)、脱挥发分阶段(阶段II)、半纤维素和纤维素热分解阶段(阶段III)。



(a) 未施加甘油样品的TG曲线; (b) 未施加甘油样品的DTG曲线; (c) 施加20%甘油样品的TG曲线; (d) 施加20%甘油样品的DTG曲线

图2 样品的TG和DTG曲线

Fig. 2 TG and DTG curves of samples

为进一步明确甘油对不同类型烟草颗粒热失重特性的影响, 对不同样品在各段的最大失重速率温度 T_{max} 、最大失重速率 $v_{DTG, max}$ 及失重率等特征参数进行分析, 结果见表1。由表1可知, 各烟草样品在脱水阶段的 T_{max1} 范围为93.2~139.5 °C, $v_{DTG, max1}$ 范围为0.55~3.93 %/min, 失重率范围为1.63%~8.34%。阶段I主要为烟草中自由水和结合水的脱除过程, 对于未施加甘油的烟草颗粒, 烤烟在该阶段的 T_{max1} 和

失重率最高, 分别为130.3 °C和8.34%, 雪茄烟在阶段I的 T_{max1} 和失重率最低, 分别为93.2 °C和2.25%。施加甘油后, 各样品对应的失重率和 $v_{DTG, max1}$ 均有不同程度的降低, T_{max1} 整体呈现升高趋势, 但白肋烟的略有下降。施加甘油缩小了阶段I的温度区间, 其中白肋烟的变化最明显, 其温度区间由白肋烟-0的30.0~128.7 °C收窄至白肋烟-20的30.0~110.3 °C。

表1 样品热解特征参数

Table 1 Sample pyrolysis characteristic parameters

样品	阶段I				阶段II				阶段III			
	温度区间/ °C	$T_{max1}/$ °C	$v_{DTG, max1}/$ (%·min ⁻¹)	失重率/%	温度区间/ °C	$T_{max2}/$ °C	$v_{DTG, max2}/$ (%·min ⁻¹)	失重率/%	温度区间/ °C	$T_{max3}/$ °C	$v_{DTG, max3}/$ (%·min ⁻¹)	失重率/%
雪茄烟-0	30.0~121.2	93.2	0.89	2.25	121.2~234.1	234.1	4.07	9.90	234.1~400.0	320.2	5.43	29.84
雪茄烟-20	30.0~108.3	104.2	0.55	1.63	108.3~299.3	213.2	8.99	35.87	299.3~400.0	324.2	4.84	15.04
白肋烟-0	30.0~128.7	116.7	1.62	4.17	128.7~240.7	240.7	4.74	11.27	240.7~400.0	311.7	6.19	32.74
白肋烟-20	30.0~110.3	110.3	1.47	2.81	110.3~288.3	216.3	8.89	35.16	288.3~400.0	314.3	5.72	17.75
烤烟-0	30.0~144.3	130.3	3.93	8.34	144.3~254.3	205.3	9.13	23.70	254.3~400.0	332.3	5.15	26.25
烤烟-20	30.0~139.5	139.5	3.30	7.13	139.5~294.5	210.5	12.81	40.60	294.5~400.0	324.5	4.16	13.82
香料烟-0	30.0~137.5	117.5	2.64	6.38	137.5~260.6	207.5	8.14	23.10	260.6~400.0	293.5	5.91	27.65
香料烟-20	30.0~135.3	135.3	2.30	5.22	135.3~284.1	217.3	12.46	38.14	281.3~400.0	289.3	5.36	18.13

阶段II主要为烟叶中低沸点小分子物质及糖类、果胶等部分大分子物质的分解释放过程^[19]。各烟草样品在该阶段的 T_{max2} 范围为205.3~240.7 °C,

$v_{DTG, max2}$ 范围为4.07~12.81 %/min, 失重率范围为9.90%~40.60%。对于未施加甘油的烟草颗粒, 白肋烟的 T_{max2} 最高(240.7 °C), 雪茄烟和香料烟的次之,

而烤烟的最低(205.3 °C),表明烤烟中挥发性物质释放所需温度最低;烤烟的失重率最高(23.70%),香料烟和白肋烟的次之,雪茄烟的最低(9.90%),这可能与样品的含糖量及挥发性成分存在状态有关^[20-22]。

施加甘油后,各样品对应的失重率均明显增加,其中雪茄烟的增幅最明显,由雪茄烟-0的9.90%增加至雪茄烟-20的35.87%。甘油的释放温度区间一般为150~250 °C,与阶段II的温度区间重叠,因此,阶段II样品失重率增加可能主要源于甘油的蒸发释放。另外,甘油对烟草样品中低挥发性小分子物质的释放也有促进作用。同时,样品的 $v_{DTG, max2}$ 均有不同程度的升高;烤烟和香料烟的 T_{max2} 稍有升高,白肋烟和雪茄烟的 T_{max2} 明显降低。

阶段III主要为高分子化合物半纤维素和纤维素的热解过程^[23]。各烟草样品在该阶段的最大失重温度 T_{max3} 范围为289.3~332.3 °C,最大失重速率 $v_{DTG, max3}$ 范围为4.16~6.19 %/min,失重率范围为13.82%~32.74%。对于未施加甘油的烟草颗粒,烤烟的 T_{max3} 最高(332.3 °C),雪茄烟和白肋烟的次之,香料烟的最低(293.5 °C);白肋烟的失重率最高(32.74%),雪茄烟和香料烟的次之,烤烟的最低(26.25%),但整体差异不大;施加甘油后,各样品对应的 $v_{DTG, max3}$ 和失重率均有不同程度的降低,这可能是因为甘油提升了纤维素类物质的分解活性,使其在阶段II部分分解。

为进一步对比甘油对不同类型烟草颗粒在阶段II和阶段III热失重行为的影响程度,计算施加甘油后各类型烟草颗粒热失重特征参数变化率(以未施加甘油的同类型烟草颗粒样品为对照组),结果见表2。由表2可见:施加甘油对不同类型烟草颗粒在不同阶段的热失重特征参数的影响趋势和程度存在差异。在阶段II中,施加甘油明显提升了烟草颗粒的 $v_{DTG, max2}$ 和失重率,雪茄烟 $v_{DTG, max2}$ 受甘油影响较大(提升了120.88%),而烤烟 $v_{DTG, max2}$ 受甘油影响较小(仅提升40.31%);雪茄烟失重率受甘油影响较大(提升了262.32%),而香料烟失重率受甘油影响较小(仅提升65.11%)。在阶段III中,甘油在不同程度上降低了烟草颗粒的 $v_{DTG, max3}$ 和失重率,其中,烤烟-20的 $v_{DTG, max3}$ 变化率最大(-19.22%),白肋烟的 $v_{DTG, max3}$ 变化率最小(-7.59%);不同样品的失重率变化率为-34.43%~-49.60%。这一现象表明甘油与不同类型

烟草组分之间的结合状态或相互作用存在差异,从而对相应组分的热释放活性的影响程度不同。

表2 施加甘油后烟草样品失重特征参数变化率

Table 2 Change rate of weight loss characteristic parameters of tobacco samples after glycerol application

样品	阶段II变化率/%		阶段III变化率/%	
	$v_{DTG, max2}$	失重率	$v_{DTG, max3}$	失重率
雪茄烟-20	120.88	262.32	-10.87	-49.60
白肋烟-20	87.55	211.98	-7.59	-45.78
烤烟-20	40.31	71.31	-19.22	-47.35
香料烟-20	53.07	65.11	-9.31	-34.43

2.2 甘油对不同类型烟草颗粒香味成分释放量的影响

2.2.1 中性香味成分释放量对比

烟草原料加热过程中释放的中性香味成分主要包括酯类、呋喃类、醇类、酮类、烯烃类化合物,这些成分是烟气香味物质的重要组成部分^[24-26]。计算不同烟草颗粒的中性香味成分释放量,并对其进行方差分析和多重比较分析,结果如表3所示。由表3可见,不同甘油施加量的各类型烟草样品的中性香味成分释放量存在显著差异,施加甘油前后不同烟草样品中性香味成分释放量范围为191.79~466.45 $\mu\text{g/g}$,甘油施加能够提升中性香味物质释放量。

由表3还可见,各样品的酯类香味物质以二氢猕猴桃内酯为主,仅在香料烟颗粒释放的中性香味成分中检测到 γ -丁内酯。对于未施加甘油的烟草颗粒而言,烤烟颗粒的酯类香味物质释放量最高(22.37 $\mu\text{g/g}$),香料烟和白肋烟次之,雪茄烟最低(9.00 $\mu\text{g/g}$)。呋喃类香味物质以糠醇和2-乙酰基呋喃为主,烤烟(15.87 $\mu\text{g/g}$)、雪茄烟(14.52 $\mu\text{g/g}$)、香料烟(8.93 $\mu\text{g/g}$)、白肋烟(7.48 $\mu\text{g/g}$)的呋喃类物质释放量依次降低。烟气中呋喃类物质的生成主要与糖类物质的热解、还原糖与含氨基化合物的美拉德反应等相关,而烤烟的水溶性糖含量较高,这可能是其烟气中呋喃类物质含量高的原因。香料烟(24.96 $\mu\text{g/g}$)、烤烟(24.87 $\mu\text{g/g}$)、雪茄烟(22.80 $\mu\text{g/g}$)、白肋烟(14.55 $\mu\text{g/g}$)的醇类香味物质释放量依次降低。烟气中酮类物质主要来自还原糖与氨基酸的美拉德反应以及糖类物质的热裂解,酮类香味物质种类较丰富,且烤烟(210.29 $\mu\text{g/g}$)、香料烟(201.76 $\mu\text{g/g}$)、白肋烟

(135.10 $\mu\text{g/g}$)、雪茄烟(88.10 $\mu\text{g/g}$)的酮类物质释放量依次降低,糖含量较高的烤烟样品中的酮类物质释放量也较高。不同类型烟草颗粒中烯炔类物质释

放量存在一定差异,白肋烟(57.67 $\mu\text{g/g}$)、雪茄烟(57.37 $\mu\text{g/g}$)、香料烟(21.31 $\mu\text{g/g}$)、烤烟(21.00 $\mu\text{g/g}$)的烯炔类香味物质释放量依次降低。

表3 甘油施加前后不同类型烟草颗粒的中性香味成分释放量

Table 3 Release of neutral aroma components from different types of tobacco particles before and after glycerol application $\mu\text{g/g}$					
类别	香味成分	雪茄烟-0	雪茄烟-20	白肋烟-0	白肋烟-20
酯类	二氢猕猴桃内酯	9.00±0.07 ^{ab}	11.68±0.14 ^{bc}	10.33±0.44 ^{ab}	12.23±0.10 ^c
	γ -丁内酯	—	—	—	—
呋喃类	糠醇	9.60±0.05 ^c	20.67±1.22 ^c	2.82±0.69 ^a	12.36±1.11 ^d
	2-乙酰基呋喃	4.92±0.29 ^b	15.12±0.27 ^c	4.66±0.12 ^b	7.83±0.45 ^c
醇类	苯乙醇	16.79±1.03 ^{ab}	33.98±1.43 ^f	14.55±1.24 ^a	22.49±1.08 ^c
	植醇	6.01±1.02 ^a	10.73±0.88 ^d	—	—
酮类	2-环戊烯-1-酮	17.15±2.18 ^b	32.76±0.50 ^e	18.36±0.04 ^b	30.89±1.33 ^c
	甲基环戊烯醇酮	6.54±1.37 ^d	16.65±0.22 ^c	1.71±0.07 ^a	3.58±0.44 ^b
	2-环己烯-1-酮	1.41±0.06 ^b	2.72±0.71 ^c	0.40±0.05 ^a	1.21±0.06 ^b
	3-甲基-2-环戊烯-1-酮	7.92±0.86 ^a	20.60±0.08 ^b	8.18±0.18 ^a	20.69±0.20 ^b
	2,3-二甲基-2-环戊烯-1-酮	8.40±0.40 ^a	26.44±1.00 ^c	6.49±0.20 ^a	15.06±0.27 ^b
	苯乙酮	10.04±1.55 ^b	11.32±1.27 ^b	19.87±1.52 ^d	33.62±0.37 ^c
	茄酮	19.32±0.89 ^a	28.50±1.39 ^b	38.50±1.02 ^c	54.39±0.05 ^c
	巨豆三烯酮	3.64±0.12 ^a	6.08±0.24 ^b	16.07±0.58 ^d	26.53±0.48 ^c
	4-(3-羟基-1-丁烯基)-3,5,5-三甲基-2-环己烯-1-酮	13.68±0.91 ^c	14.62±1.32 ^c	25.52±1.20 ^d	33.20±1.75 ^c
	1-十五烯	21.10±0.54 ^b	38.78±0.87 ^d	20.56±0.68 ^b	47.81±1.19 ^f
烯炔类	柠檬烯	33.08±2.03 ^b	41.80±0.13 ^d	35.61±1.28 ^c	46.75±1.13 ^c
	苯乙炔	3.19±0.18 ^d	8.37±0.20 ^f	1.50±0.05 ^b	3.81±0.59 ^c
总计		191.79±3.93 ^a	340.82±2.73 ^c	225.13±3.95 ^b	372.45±3.87 ^f
类别	香味成分	烤烟-0	烤烟-20	香料烟-0	香料烟-20
酯类	二氢猕猴桃内酯	22.37±0.96 ^c	29.64±0.21 ^g	15.56±1.29 ^d	25.45±1.78 ^f
	γ -丁内酯	—	—	6.09±0.04 ^a	8.33±0.17 ^b
呋喃类	糠醇	8.13±0.09 ^c	20.38±0.23 ^c	5.95±0.49 ^b	13.02±1.54 ^d
	2-乙酰基呋喃	7.74±0.61 ^c	14.41±0.79 ^c	2.98±0.84 ^a	10.93±1.05 ^d
醇类	苯乙醇	17.18±1.83 ^b	27.58±0.15 ^c	24.96±1.73 ^d	33.44±1.11 ^f
	植醇	7.69±0.12 ^b	9.40±0.09 ^c	—	—
酮类	2-环戊烯-1-酮	22.34±1.79 ^c	35.10±0.94 ^f	13.68±0.37 ^a	27.75±0.59 ^d
	甲基环戊烯醇酮	20.53±1.20 ^f	22.64±0.91 ^g	1.84±0.09 ^a	5.24±0.26 ^c
	2-环己烯-1-酮	3.18±0.16 ^c	5.45±0.13 ^d	1.00±0.01 ^b	2.62±0.48 ^c
	3-甲基-2-环戊烯-1-酮	39.15±1.59 ^d	42.82±0.77 ^e	8.89±0.43 ^a	27.09±0.54 ^c
	2,3-二甲基-2-环戊烯-1-酮	36.55±1.62 ^d	57.50±1.05 ^e	27.02±0.58 ^c	24.89±2.73 ^c
	苯乙酮	6.12±0.10 ^a	7.59±0.40 ^a	11.33±1.00 ^b	16.77±0.75 ^c
	茄酮	67.02±1.59 ^f	92.66±1.44 ^h	49.46±0.95 ^d	89.33±1.01 ^g
	巨豆三烯酮	6.94±0.18 ^b	11.23±0.77 ^c	17.66±1.14 ^d	39.88±2.45 ^f
	4-(3-羟基-1-丁烯基)-3,5,5-三甲基-2-环己烯-1-酮	8.46±0.11 ^a	10.52±0.53 ^b	70.88±0.99 ^f	95.50±0.63 ^g
	1-十五烯	16.05±0.62 ^a	30.10±0.22 ^c	20.33±1.01 ^b	44.89±0.38 ^c
烯炔类	柠檬烯	2.71±0.20 ^a	3.59±0.08 ^a	—	—
	苯乙炔	2.24±0.11 ^c	3.54±0.23 ^{dc}	0.98±0.03 ^a	1.32±0.11 ^{ab}
总计		294.40±2.73 ^d	424.15±1.05 ^g	278.61±2.79 ^c	466.45±1.34 ^h

注:同行数据不同小写字母表示样品间差异有统计学意义($P<0.05$);“—”表示未检出。

施加甘油后,各类型烟草颗粒的中性香味成分释放量明显增加,释放量范围为340.82~466.45 $\mu\text{g/g}$,提升幅度为44.07%~77.70%,其中,施加甘油对雪

茄烟中性香味成分释放量的提升幅度最大(表3)。施加甘油后不同类型烟草颗粒的各类中性香味成分增幅对比见图3。由图3可见,各类中性香味成分的

释放量总体上均有不同程度的增加,整体而言,甘油对各类型烟草颗粒的呋喃类香味物质促释放效果最明显,各官能团类别的香味物质释放总量增幅为18.39%(白肋烟酯类香味成分)~169.92%(白肋烟呋喃类香味成分)。其中,对于关键香味物质而言,

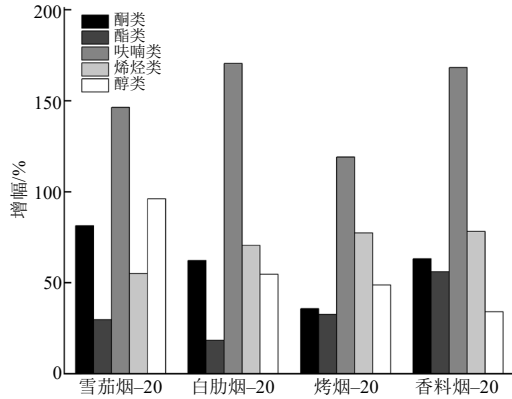


图3 施加甘油后不同样品中性香味成分增幅对比

Fig. 3 Comparison of increase amplitude of neutral aroma components in different samples after glycerol application

巨豆三烯酮具有类似干草的甜香,可增加卷烟烟草甜香,施加甘油后雪茄烟、白肋烟、烤烟、香料烟烟气中该成分释放量增幅分别为67.03%、65.09%、61.82%和125.82%;甘油施加后上述4种烟草颗粒中的二氢猕猴桃内酯释放量增幅分别为29.78%、18.39%、32.50%和63.56%。此外,甘油施加也不同程度地提升了烟气中茄酮的释放量,提升比例为38.26%~80.61%。

2.2.2 酸性香味成分和酚类物质释放量对比

计算不同烟草颗粒的酸性香味成分和酚类物质释放量,并进行多重比较分析,结果如表4所示。由表4可见:不同甘油施加量的各类型烟草样品的酸性香味成分和酚类物质释放量存在显著差异,施加甘油前后不同烟草颗粒的酸性和酚类物质释放量为193.68~1 082.74 $\mu\text{g/g}$,且甘油施加对各香味物质的释放均起到了促进作用。

表4 甘油施加前后不同类型烟草颗粒的酸性香味成分和酚类物质释放量

Table 4 Release of acidic aroma components and phenolic substances from different types of tobacco particles

香味成分	before and after glycerol application							
	雪茄烟-0	雪茄烟-20	白肋烟-0	白肋烟-20	烤烟-0	烤烟-20	香料烟-0	香料烟-20
乙酸	—	—	—	—	—	—	20.16±1.39 ^a	24.06±0.52 ^b
丙酸	1.99±0.04 ^b	3.62±0.11 ^c	2.44±0.01 ^c	2.52±0.02 ^{cd}	2.77±0.07 ^{cd}	2.88±0.58 ^d	1.56±0.15 ^a	4.11±0.09 ^f
丁酸	1.35±0.11 ^a	2.35±0.02 ^d	2.25±0.24 ^d	2.34±0.18 ^d	1.61±0.12 ^b	1.87±0.06 ^c	1.35±0.07 ^a	3.29±0.14 ^e
戊酸	1.07±0.08 ^b	1.81±0.06 ^d	1.57±0.16 ^c	1.55±0.08 ^c	0.87±0.08 ^a	0.95±0.13 ^{ab}	1.52±0.05 ^c	2.57±0.15 ^e
壬酸	4.40±0.16 ^b	7.20±0.13 ^d	5.02±0.13 ^c	6.82±0.28 ^d	2.21±0.13 ^a	2.52±0.20 ^a	9.01±0.45 ^c	9.23±0.08 ^e
癸酸	1.63±0.30 ^c	2.04±0.13 ^d	2.14±0.17 ^{dc}	2.35±0.12 ^c	1.19±0.16 ^b	0.77±0.05 ^a	—	—
2-甲基丁酸	6.63±0.62 ^b	9.79±0.22 ^c	4.66±0.13 ^a	6.49±0.12 ^b	6.23±0.10 ^b	6.79±0.09 ^b	14.63±0.88 ^d	28.28±0.79 ^c
3-甲基丁酸	7.62±0.63 ^c	12.90±1.02 ^c	3.06±0.15 ^a	6.13±0.06 ^b	6.67±0.16 ^{bc}	9.34±0.13 ^d	17.96±1.03 ^f	34.01±0.46 ^g
3-甲基戊酸	149.77±0.44 ^d	168.89±0.96 ^f	15.32±0.33 ^a	25.87±1.54 ^b	120.15±1.72 ^c	160.76±1.31 ^c	270.57±1.88 ^g	356.23±0.50 ^h
己酸	—	—	—	—	4.80±0.43 ^a	5.16±0.07 ^b	10.08±0.23 ^c	10.33±0.07 ^c
乳酸	3.66±0.06 ^a	5.02±0.24 ^c	4.47±0.06 ^b	4.63±0.48 ^{bc}	4.58±0.37 ^{bc}	6.30±0.13 ^d	4.56±0.22 ^{bc}	7.77±0.08 ^c
苯甲酸	8.38±0.23 ^d	10.23±0.64 ^c	3.62±0.11 ^a	3.84±0.28 ^a	6.46±0.07 ^b	8.70±0.18 ^d	7.60±0.04 ^c	12.62±0.98 ^f
辛酸	3.90±0.44 ^c	2.35±0.06 ^b	2.71±0.06 ^b	2.91±0.76 ^b	1.63±0.09 ^a	1.31±0.06 ^a	4.83±0.18 ^d	3.83±0.11 ^c
苯乙酸	19.31±1.24 ^b	26.40±0.40 ^d	—	—	—	—	15.76±0.93 ^a	20.74±0.92 ^c
肉豆蔻酸	3.78±0.61 ^b	4.99±0.68 ^d	1.62±0.11 ^a	2.22±0.07 ^a	3.75±0.14 ^b	4.11±0.20 ^{bc}	4.55±0.06 ^{cd}	4.84±0.47 ^d
棕榈酸	41.52±0.81 ^b	50.81±0.53 ^c	23.73±0.75 ^a	43.93±0.22 ^c	43.85±0.68 ^c	45.76±0.89 ^d	85.00±0.83 ^f	100.82±0.98 ^g
油酸	18.77±0.36 ^d	19.13±0.60 ^d	5.95±0.10 ^a	9.25±0.11 ^b	13.02±1.20 ^c	13.40±0.66 ^c	21.00±0.33 ^c	26.22±0.79 ^f
α -亚麻酸	—	—	11.23±0.98 ^a	11.43±0.12 ^a	13.00±0.55 ^b	16.72±1.18 ^c	14.14±0.41 ^b	19.86±0.99 ^d
硬脂酸	35.88±0.95 ^{de}	36.45±0.58 ^{de}	24.78±0.55 ^a	27.05±0.18 ^b	35.35±1.02 ^d	37.22±0.79 ^e	32.64±0.79 ^c	43.30±0.99 ^f
苯酚	76.86±0.47 ^c	121.47±0.94 ^f	49.96±0.14 ^a	79.55±0.61 ^d	69.78±0.36 ^b	102.55±1.01 ^c	161.77±0.98 ^g	213.35±0.95 ^h
邻甲酚	15.67±1.09 ^c	22.70±0.81 ^f	5.09±0.22 ^a	17.57±0.20 ^d	10.54±0.46 ^b	17.91±0.29 ^d	20.74±0.99 ^c	29.61±1.00 ^g
间甲酚	4.19±0.03 ^c	10.01±0.26 ^d	1.08±0.04 ^a	3.33±0.12 ^b	12.72±0.71 ^c	16.58±0.27 ^e	15.72±0.61 ^f	22.09±0.56 ^h
对甲酚	20.08±0.51 ^c	31.46±0.59 ^c	8.97±0.12 ^a	11.16±0.51 ^b	26.64±1.20 ^d	31.14±0.90 ^c	34.68±0.79 ^f	44.93±0.98 ^g
2-乙基苯酚	5.13±0.11 ^d	8.13±0.12 ^f	2.14±0.04 ^a	3.72±0.55 ^b	3.93±0.11 ^{bc}	4.83±0.08 ^d	4.14±0.10 ^c	5.81±0.09 ^c
愈创木酚	12.34±0.85 ^b	25.71±0.32 ^d	10.60±0.62 ^a	19.94±0.21 ^c	11.56±0.97 ^{ab}	24.42±0.13 ^d	28.97±1.36 ^c	39.46±0.73 ^f
2,6-二甲基苯酚	2.42±0.11 ^b	6.68±0.29 ^c	1.27±0.14 ^a	2.35±0.22 ^b	7.21±0.06 ^f	8.97±0.07 ^e	3.55±0.07 ^c	6.10±0.19 ^d
2,5-二甲基苯酚	—	—	—	—	—	—	8.79±0.21 ^a	9.28±0.07 ^b
总计	446.35±2.95 ^d	590.14±4.51 ^f	193.68±1.18 ^a	296.95±2.81 ^b	410.52±1.17 ^c	530.96±1.86 ^c	815.28±1.42 ^g	1 082.74±0.46 ^h

注:同行数据不同小写字母表示样品间差异有统计学意义($P<0.05$);“—”表示未检出。

对于未施加甘油的烟草颗粒, 香料烟(536.92 μg/g)、雪茄烟(309.66 μg/g)、烤烟(268.14 μg/g)、白肋烟(114.57 μg/g)的酸性香味物质释放量依次减少, 其中3-甲基戊酸和棕榈酸的释放量较高, 香料烟颗粒加热状态下的3-甲基戊酸和棕榈酸的释放量分别达到了270.57 μg/g和85.00 μg/g, 而这2种物质在白肋烟颗粒加热烟气中的释放量分别为15.32 μg/g和23.73 μg/g。香料烟(278.36 μg/g)、烤烟(142.38 μg/g)、雪茄烟(136.69 μg/g)、白肋烟(79.11 μg/g)的烟气中酚类物质释放量依次减少。

施加甘油后, 不同类型烟草颗粒的酸性香味成分和酚类物质释放量均明显增加, 其中, 施加甘油对白肋烟颗粒的酸性和酚类物质释放量的提升幅度最大。施加甘油后不同类型烟草颗粒的酸性和酚类物质增幅对比见图4。由图4可见, 4种类型烟草颗粒的酸性香味成分释放量的增幅为17.54%~39.06%, 酚类物质释放量的增幅为33.14%~74.00%。结合表4可知, 施加甘油后雪茄烟、白肋烟、烤烟、香料烟烟气中3-甲基戊酸的增幅分别为12.77%、68.86%、33.80%和31.66%, 棕榈酸释放量的增幅为22.37%、85.12%、4.36%和18.61%, 愈创木酚释放量的增幅分别为108.35%、88.11%、

111.25%和36.21%。

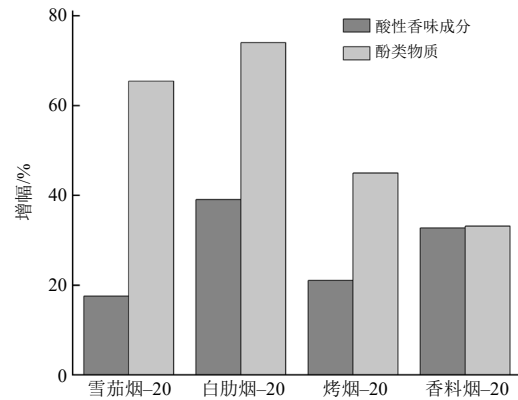


图4 施加甘油后不同样品酸性香味成分和酚类物质增幅对比

Fig. 4 Comparison of increase amplitude of acidic aroma components and phenolic substances in different samples after glycerol application

2.2.3 碱性香味成分释放量对比

计算不同烟草颗粒的碱性香味成分释放量, 并对其多重比较分析, 结果如表5所示。由表5可见, 各类型烟草样品的碱性香味成分释放量存在显著差异, 施加甘油前后的不同烟草颗粒碱性香味成分释放量范围为178.98~9 283.31 μg/g, 各样品间差异显著, 且施加甘油可促进碱性香味物质的释放。

表5 甘油施加前后不同类型烟草颗粒的碱性香味成分释放量

Table 5 Release amounts of alkaline aroma components from different types of tobacco particles before and after glycerol application μg/g								
香味成分	雪茄烟-0	雪茄烟-20	白肋烟-0	白肋烟-20	烤烟-0	烤烟-20	香料烟-0	香料烟-20
吡啶	8.88±0.10 ^e	15.08±0.64 ^f	15.55±0.57 ^f	30.67±0.52 ^e	4.99±0.21 ^c	6.39±0.11 ^d	1.99±0.21 ^a	3.98±0.16 ^b
2-甲基吡啶	4.07±0.06 ^c	5.73±0.12 ^c	16.85±0.14 ^e	35.89±0.44 ^b	5.34±0.07 ^d	8.88±0.13 ^f	1.89±0.16 ^a	3.21±0.10 ^b
3-甲基吡啶	4.98±0.13 ^a	6.76±0.09 ^b	21.45±0.57 ^f	50.25±0.09 ^e	5.14±0.04 ^a	13.45±0.96 ^c	9.40±0.03 ^c	12.31±0.13 ^d
2,6-二甲基吡啶	1.98±0.06 ^b	3.49±0.03 ^c	14.34±0.79 ^d	32.15±0.82 ^c	0.56±0.10 ^a	2.20±0.07 ^b	1.85±0.21 ^b	4.00±0.13 ^c
2-乙基吡啶	1.98±0.11 ^d	2.58±0.13 ^c	16.63±0.52 ^f	37.03±0.48 ^e	1.65±0.08 ^{bc}	2.04±0.05 ^d	0.84±0.15 ^a	1.36±0.07 ^b
2,3-二甲基吡啶	2.13±0.09 ^{ab}	3.08±0.04 ^b	15.89±0.55 ^d	33.20±1.13 ^c	1.20±0.06 ^a	2.87±0.07 ^b	4.73±0.08 ^c	2.51±0.10 ^b
3-乙基吡啶	4.56±0.08 ^d	5.58±0.09 ^c	17.25±0.41 ^f	41.03±0.83 ^e	1.95±0.10 ^b	3.47±0.06 ^c	0.44±0.02 ^a	0.64±0.13 ^a
3-乙炔基吡啶	16.46±0.56 ^c	17.35±0.87 ^d	34.87±0.37 ^e	60.88±0.34 ^f	10.88±0.09 ^a	13.43±0.23 ^b	—	—
2-乙酰基吡啶	1.72±0.19 ^{ab}	3.95±0.07 ^c	12.98±1.43 ^d	29.00±0.46 ^c	1.56±0.22 ^a	2.72±0.11 ^b	0.95±0.16 ^a	1.12±0.01 ^a
2,5-二甲基吡啶	0.71±0.14 ^a	2.16±0.02 ^b	—	—	—	—	—	—
3-苯基吡啶	9.16±0.16 ^a	11.00±0.54 ^b	22.57±1.23 ^c	24.50±0.11 ^d	—	—	—	—
2,6-二甲基吡啶	2.87±0.02 ^c	3.15±0.08 ^d	3.47±0.15 ^c	3.62±0.05 ^c	1.54±0.01 ^a	1.96±0.18 ^b	—	—
异喹啉	7.55±0.07 ^b	8.02±0.13 ^c	9.21±0.12 ^d	12.50±0.71 ^c	1.33±0.09 ^a	1.69±0.10 ^a	—	—
喹啉	8.75±0.11 ^c	9.44±0.11 ^f	9.62±0.08 ^f	12.82±0.11 ^e	3.44±0.04 ^b	4.02±0.11 ^c	2.49±0.26 ^a	4.34±0.21 ^d
2,3'-联吡啶	97.04±0.49 ^d	118.73±1.20 ^e	225.11±0.77 ^f	337.46±1.00 ^e	3.55±0.13 ^b	6.60±0.15 ^c	2.18±0.13 ^a	4.00±0.26 ^b
烟碱	4 863.07±1.48 ^e	5 556.20±2.03 ^f	7 176.74±1.19 ^e	7 372.97±1.14 ^e	1 543.39±0.82 ^c	1 948.66±2.57 ^d	147.22±1.21 ^a	279.79±1.22 ^b
麦斯明	163.08±0.75 ^c	232.58±0.60 ^f	699.47±0.95 ^e	703.08±1.73 ^b	110.50±0.54 ^c	160.72±0.59 ^d	3.22±0.08 ^a	9.66±0.35 ^b
二烯烟碱	54.95±0.53 ^c	75.87±0.98 ^f	94.25±0.87 ^e	134.60±0.64 ^b	30.13±1.21 ^c	45.96±0.35 ^d	1.78±0.13 ^a	3.47±0.08 ^b
假木贼碱	24.43±0.49 ^b	28.36±0.42 ^c	69.20±0.63 ^d	88.34±0.36 ^c	19.64±0.44 ^a	27.47±1.11 ^c	—	—
新烟草碱	51.78±0.55 ^d	48.68±0.63 ^c	160.59±0.47 ^c	243.32±0.76 ^f	34.17±0.95 ^a	38.16±1.70 ^b	—	—
总计	5 330.15±1.68 ^c	6 157.79±2.90 ^f	8 636.04±2.27 ^e	9 283.31±1.51 ^b	1 780.96±3.43 ^c	2 290.69±2.86 ^d	178.98±1.62 ^a	330.39±1.17 ^b

注: 同行数据不同小写字母表示样品间差异有统计学意义(P<0.05); “—”表示未检出。

对于未施加甘油的烟草颗粒,白肋烟(8 636.04 μg/g)、雪茄烟(5 330.15 μg/g)、烤烟(1 780.96 μg/g)、香料烟(178.98 μg/g)的碱性香味成分释放量依次降低。烟气中的碱性香味成分主要分为氮杂环类(包括吡啶、吡嗪和喹啉等)和生物碱类(包括烟碱、二烯烟碱等),其中烟碱释放量占比较高,白肋烟和雪茄烟的烟碱释放量分别达到了7 176.74 μg/g和4 863.07 μg/g。

施加甘油后,不同类型烟草颗粒的碱性香味成分释放量均明显增加。施加甘油后不同类型烟草颗粒的碱性物质释放量增幅对比见图5。由图5可见,施加甘油后4种类型烟草颗粒的生物碱类物质释放量增幅为7.49%~84.60%,其中甘油对香料烟颗粒的生物碱类物质的促释放效果最显著,而对于其他3类烟草颗粒,施加甘油后其氮杂环类物质释放量的增幅均高于生物碱类的。结合表5可知,施加甘油后雪茄烟、白肋烟、烤烟、香料烟的烟碱释放量的增幅分别为14.25%、2.73%、26.26%和90.05%,3-甲基吡啶释放量的增幅分别为35.74%、134.27%、161.67%和30.96%。

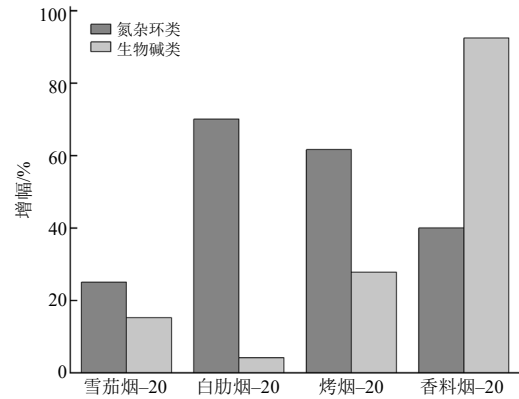


图5 施加甘油后不同样品碱性香味成分增幅对比
Fig. 5 Comparison of increase amplitude of alkaline aroma components in different samples after glycerol application

2.2.4 各香味成分释放量变化率对比

为进一步明确甘油对不同类型烟草颗粒香味成分释放量的影响,对表3~表5中的数据进行Min-Max归一化处理,绘制施加甘油后不同样品各香味成分释放量变化率综合热图,如图6所示。结合图6及表3~表5可知,施加甘油后,雪茄烟中各类

归一化的香味成分释放量变化率

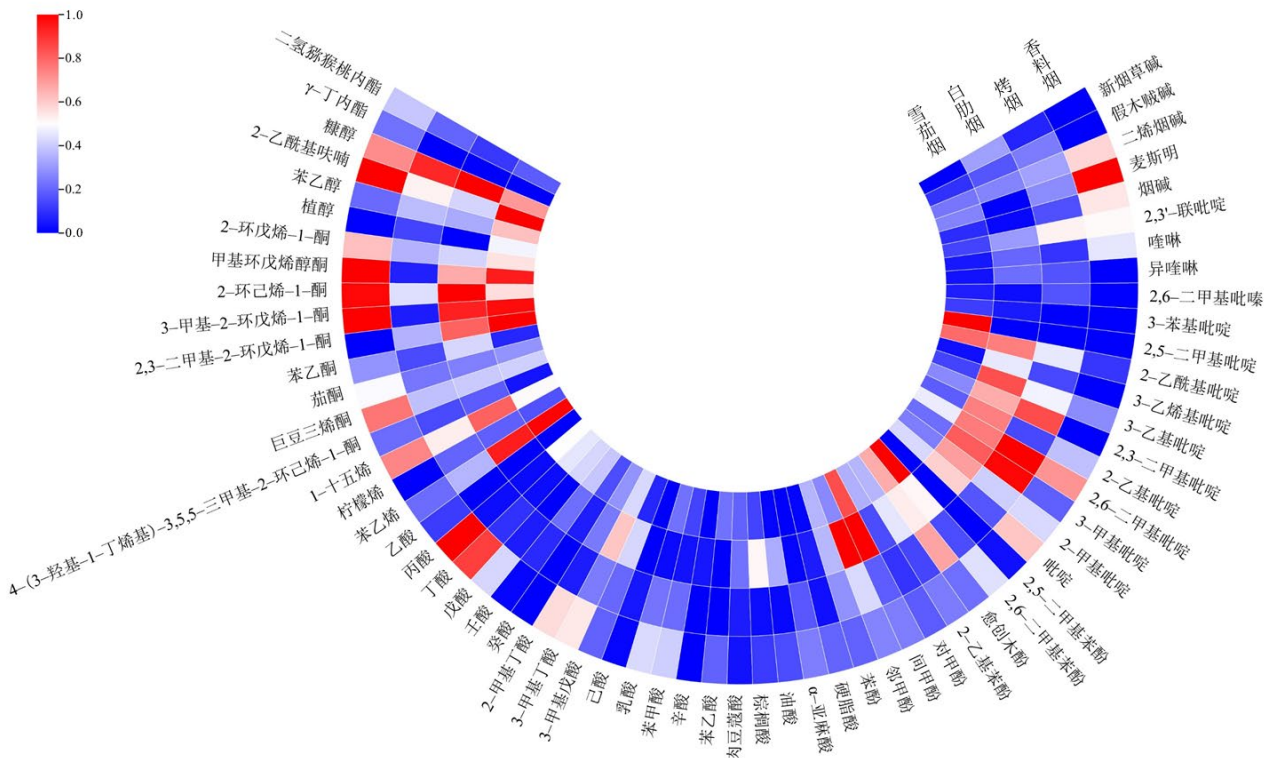


图6 施加甘油后不同样品各香味成分变化率综合热图

Fig. 6 Comprehensive heat map of flavor constituent variation rates across different tobacco samples following glycerol application

香味成分变化率按从大到小排序依次为中性(77.70%)、酸性和酚类物质(32.21%)、碱性(15.53%)，其中2,3-二甲基-2-环戊烯-1-酮、2-乙酰基呋喃、2,5-二甲基吡啶为变化率较大的3种香味物质，其变化率分别为214.76%、207.32%、204.23%；白肋烟中各类香味成分变化率按从大到小排序依次为中性(65.44%)、酸性和酚类物质(53.32%)、碱性(7.49%)，其中糠醇、邻甲酚、间甲酚为变化率较大的3种香味物质，其变化率分别为338.30%、245.19%、208.33%；烤烟中各类香味成分变化率按从大到小排序依次为中性(44.07%)、酸性和酚类物质(29.34%)、碱性(28.62%)，其中2,6-二甲基吡啶、3-甲基吡啶、糠醇为变化率较大的3种香味物质，其变化率分别为292.86%、161.67%、150.53%；香料烟中各类香味成分变化率按从大到小排序依次为碱性(84.60%)、中性(67.42%)、酸性和酚类物质(32.81%)，其中2-乙酰基呋喃、3-甲基-2-环戊烯-1-酮、麦斯明为变化率较大的3种香味物质，其变化率分别为266.78%、204.72%、199.69%。这说明施加甘油虽然整体提高了烟草颗粒各类香味成分的释放量，但由于烟叶的组织结构和内在化学成分不同，不同类型烟草颗粒在各类香味成分释放量的变化率上也存在差异。

3 结论与讨论

低温加热条件下不同类型烟草颗粒的热失重过程较为相似，主要包括脱水阶段、脱挥发分阶段以及半纤维素和纤维素热解阶段3个阶段，但不同失重阶段的 T_{\max} 、 $v_{DTG, \max}$ 和失重率存在差异，这是由于样品本身微观结构和内部化学成分不同。在脱水阶段，施加20%甘油后，各类型样品的失重率都降低，表明甘油中的羟基可与样品中的水分形成氢键，从而提高水分吸附的稳定性。另外，根据本课题组前期样品含水率测定结果可知，样品的失重率均低于其含水率，这一方面可能是因为样品在热重分析前已经过预干燥处理，另一方面则是由于升温速率较快，导致阶段I干燥时间不足，水分未能完全脱除^[27]。在脱挥发分阶段，施加20%甘油后，各类型样品的 $v_{DTG, \max 2}$ 及失重率均明显增加，这与张贾

宝等^[9]的研究结果一致，其中雪茄烟的热失重参数受甘油影响最明显。例如，就失重率而言，施加甘油对雪茄烟失重率的影响最大(提升262.32%)，对白肋烟和烤烟的影响次之，而对香料烟失重率的影响最小(提升65.11%)，表明甘油对不同类型烟草颗粒阶段II失重率的影响存在差异，这可能与烟叶自身孔隙结构及甘油与原料间的作用力有关。一般而言，晾晒烟孔隙率和疏松程度比烤烟和香料烟的高^[28]，同时烟叶孔隙率越大，甘油在其中的迁移或释放性能越强^[29]，这与本研究结果基本一致。研究^[8,30]表明，甘油对烤烟和雪茄烟等不同类型烟叶热解阶段II的反应活化能的影响程度不同，由于烟叶原料内在成分与微观结构存在差异，甘油与原料载体间的相互作用程度亦有不同，使得甘油在与原料的共热解过程中表现出不同的反应路径。在半纤维素和纤维素热解阶段，施加20%甘油后，各类型样品的 $v_{DTG, \max 3}$ 及失重率均有不同程度的降低，其中烤烟在阶段III的热失重参数受甘油影响最明显。

中性香味成分对卷烟香气和吃味有重要贡献。由于不同类型样品的内部化学成分含量存在差异，各样品中性香味成分释放总量亦存在差异，其中，烤烟的中性香味成分释放总量最高(294.40 $\mu\text{g/g}$)，香料烟和白肋烟的次之，雪茄烟的最低(191.79 $\mu\text{g/g}$)。与对照样品相比，施加20%甘油后，不同类型烟草样品的中性香味成分释放总量提高至340.82~466.45 $\mu\text{g/g}$ ，其中雪茄烟的提升幅度最大，为77.70%，中性香味成分的增加有助于改善加热卷烟产品烟香不足的问题^[31-33]。

烟气中的酸性香味成分和酚类物质来自原料内有机酸的蒸发转移、糖类物质热解及木质素或多酚热分解等过程^[34]，不仅能平衡烟气酸碱度，且能改善吃味、减少刺激性，使烟气更加醇和、舒适，有助于改善卷烟的香味品质^[26,35-36]。不同类型对照样品的酸性香味成分和酚类物质释放总量存在差异，香料烟的酸性香味成分和酚类物质释放总量最高(815.28 $\mu\text{g/g}$)，雪茄烟和烤烟的次之，白肋烟的最低(193.68 $\mu\text{g/g}$)，这与霍现宽等^[34]的研究结果一致。香料烟释放的酸性香味成分和酚类物质含量较高，可能与其原料中含有较丰富的有机酸和多酚类物质有关^[37]。与对照样品相比，施加20%甘油后，

不同类型烟草样品的酸性香味成分和酚类物质释放总量提高至296.95~1 082.74 $\mu\text{g/g}$, 其中白肋烟的提升幅度最大, 为53.32%。

烟气中的碱性香味成分多源于烟叶原料加热过程中蛋白质、氨基酸等组分的裂解及美拉德反应, 主要可分为氮杂环类和生物碱类, 其含量提升有助于增强烟气的焙烤香、坚果香等特征香气, 同时有助于提升烟气浓度^[27]。由于不同类型对照样品的氮含量存在明显差异, 其碱性香味成分释放总量也存在明显差异。本研究结果表明, 白肋烟的碱性香味成分释放总量最高(8 636.04 $\mu\text{g/g}$), 雪茄烟和烤烟的次之, 香料烟的最低(178.98 $\mu\text{g/g}$)。与对照样品相比, 施加20%甘油后, 不同类型烟草样品的碱性香味成分释放总量提高至330.39~9 283.31 $\mu\text{g/g}$, 其中香料烟的提升幅度最大, 为84.60%。此外, 未施加甘油时, 4种不同类型烟草颗粒中生物碱类物质释放量远高于氮杂环类的; 施加甘油后, 仅香料烟颗粒生物碱类物质(特别是烟碱)释放量增幅显著高于氮杂环类的, 表明甘油对不同类型烟草颗粒生物碱的热稳定性影响不一, 这可能与烟碱在原料中的存在状态有关。

整体来看, 甘油的施加提高了酯类、酮类、生物碱类物质及酸性物质的总释放量(仅个别酸性组分含量出现负增长), 这可能是因为甘油与烟草中的有机酸发生了酯化反应, 同时甘油自身热解生成小分子醛酮类物质, 这些物质也可能参与烟草组分的二次反应, 导致样品香味成分释放量的变化。甘油对不同类型样品香味成分释放量的影响存在差异, 可能与样品内在化学成分的种类和含量不同有关^[30]。

通过分析甘油对雪茄烟、白肋烟、烤烟、香料烟4种烟草颗粒热解特性及各类香味成分释放特性的影响, 可为加热卷烟烟芯配方中不同烟叶原料的选用提供一定的理论依据, 后续仍需评价不同类型烟叶香味成分释放量与感官质量的关系, 从而为颗粒型加热卷烟烟芯配方设计提供参考。

参考文献:

[1] 崔雨琪, 邓婷, 丁莎, 等. 聚乳酸-活性炭-异戊酸乙酯复合膜的制备及其缓释性能[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2020, 46(6): 664-669.

[2] 李智, 肖忠铎, 赵文涛, 等. 烟丝含水率和雾化剂复配比例对电加热卷烟气溶胶粒径分布和浓度的影响[J]. 中国烟草学报, 2025, 31(1): 14-23.

[3] 刘兴乐, 杨俊鹏, 张敦铁, 等. 基于感官品质与常规化学成分的电加热卷烟用烟叶原料评价[J]. 轻工学报, 2024, 39(4): 72-79.

[4] 何红梅, 刘献军, 饶先立, 等. 乳酸对电加热卷烟气溶胶不同形态烟碱释放规律的影响[J]. 中国烟草学报, 2024, 30(4): 10-20.

[5] 李朝建, 饶先立, 郑晓云, 等. 不同工艺制备的加热卷烟烟草薄片热失重行为研究[J]. 轻工学报, 2022, 37(1): 55-61.

[6] 曹芸, 王成虎, 王鹏, 等. 甘油与丙二醇复配比例对烟草颗粒热解和释烟特性的影响[J]. 烟草科技, 2022, 55(3): 50-58.

[7] AUER R, CONCHA-LOZANO N, JACOT-SADOWSKI I, et al. Heat-not-burn tobacco cigarettes: smoke by any other name[J]. JAMA Internal Medicine, 2017, 177(7): 1050-1052.

[8] DAI Y J, XU J, ZHU L J, et al. Mechanism study on the effect of glycerol addition on tobacco pyrolysis[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2021, 157: 105183.

[9] 张贾宝, 王轶群, 梁淼, 等. 加热卷烟烟叶原料低温热解特性及其与感官品质相关性分析[J]. 轻工学报, 2023, 38(3): 94-101.

[10] 赵国豪, 郭国宁, 黄龙, 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(3): 24-30.

[11] 刘梦梦, 张媛, 孙学辉, 等. 稠浆法烟草薄片甘油含量对加热卷烟烟气香味成分释放的影响[J]. 中国烟草学报, 2023, 29(5): 1-11.

[12] 陈潜, 李克, 金勇, 等. 再造烟草颗粒卷烟与常规卷烟的对比[J]. 中国烟草学报, 2018, 24(4): 20-26.

[13] 曹芸, 张劲, 王鹏, 等. 烟草颗粒热解与释烟特性影响因素研究[J]. 中国烟草学报, 2021, 27(1): 18-26.

[14] 赵龙, 王芳, 韩航航, 等. 甘油对烟草薄片、烟草颗粒加热状态下烟气常规成分释放的影响[J]. 农村科学实验, 2019(35): 64-65.

[15] 曹芸, 王鹏, 鲍穗, 等. 温度与甘油对烟草颗粒热解及释烟特性的影响[J]. 烟草科技, 2020, 53(8): 79-85.

[16] 曹芸, 张劲, 王成虎, 等. 烟叶原料种类对烟草颗粒热解和释烟特性的影响[J]. 烟草科技, 2022, 55(4): 42-50.

[17] GB/T 16447—2004. 烟草及烟草制品 调节和测试的大气环境[S].

[18] 洪华俏. 卷烟主流烟气中香气成分的研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2008.

- [19] 王洪波, 郭军伟, 夏巧玲, 等. 部分国产烟草样品的热重分析[J]. 烟草科技, 2009, 42(9): 47-49.
- [20] 陈绍凯, 刘仁祥, 李全鑫, 等. 不同烟草类型烟叶质体色素与化学成分分析[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(6): 291-293.
- [21] 赵晓丹, 史宏志, 钱华, 等. 不同类型烟草常规化学成分与中性致香物质含量分析[J]. 华北农学报, 2012, 27(3): 234-238.
- [22] 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(1): 97-113.
- [23] 凌军, 王绍坤, 胡巍耀, 等. 烟叶热分解过程及其动力学分析[J]. 西南农业学报, 2016, 29(4): 976-981.
- [24] 郭春生, 王轶群, 陈晨, 等. 甘油对不同部位烤烟香味成分释放行为的影响[J]. 中国烟草科学, 2023, 44(2): 88-96.
- [25] 郭华诚, 张月华, 李阳光, 等. 烟丝挥发性香味物质与卷烟感官质量的相关性研究[J]. 食品与机械, 2019, 35(1): 209-212.
- [26] 邓其馨, 苏明亮, 黄延俊, 等. 不同滤嘴通风中细支卷烟烟气主要中性和碱性香味成分逐口释放规律[J]. 中国烟草学报, 2022, 28(1): 17-26.
- [27] 吴东川, 吴键, 陈震, 等. 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.
- [28] 刘洋, 胡军, 刘菲, 等. 不同类型烟叶的孔结构表征[J]. 烟草科技, 2015, 48(3): 84-88.
- [29] 赵美丽. 甘油在烟草物料中迁移规律及其力学特性影响研究[D]. 郑州: 郑州烟草研究院, 2023.
- [30] LIANG M, WANG Y Q, DAI S P, et al. Effect of glycerol addition and heating rate on the thermal release behavior of cigar tobacco[J]. Biomass Conversion and Biorefinery, 2025, 15(4): 6071-6086.
- [31] 周慧明, 华青, 陶立奇, 等. 加热非燃烧状态下再造烟叶颗粒香味成分的释放行为[J]. 烟草科技, 2019, 52(5): 67-76.
- [32] 唐培培, 曾世通, 刘珊, 等. 甘油对烟叶热性能及加热状态下烟气释放的影响[J]. 烟草科技, 2015, 48(3): 61-65.
- [33] 朱咸鑫, 朱列书, 胡日生, 等. 浓香型产区烤烟品种间化学成分和中性致香物质的差异[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2017, 43(5): 512-517.
- [34] 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(8): 37-45.
- [35] 谢玉龙, 朱先约, 蔡君兰, 等. 滤嘴通风对卷烟烟气酸性成分的影响[J]. 烟草科技, 2018, 51(3): 30-36.
- [36] 尹莉莉, 赵百东, 杨虹琦, 等. 高效液相色谱法测定烤烟非挥发性有机酸含量[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2014, 40(2): 139-143.
- [37] 张晓宇, 宁敏, 朱青林, 等. 白肋烟和香料烟的热失重过程及其产物的比较研究[J]. 河南农业大学学报, 2015, 49(6): 756-763.

责任编辑: 伍锦花
英文编辑: 张承平