



万帅,刘前进,席高磊,等.烟气基质下烤甜香韵天然香料与合成香料间香味相互作用研究[J].轻工学报,2026,41(3):88-97.

WAN S, LIU Q J, XI G L, et al. Aroma interactions between natural and synthetic flavorings with roasted sweet note in a cigarette smoke matrix[J]. Journal of Light Industry, 2026, 41(3): 88-97.

DOI: 10.12187/2026.03.009

烟气基质下烤甜香韵天然香料与合成香料间香味相互作用研究

万帅,刘前进,席高磊,陈彪,张洁,臧翔宇,芦昶彤,李耀光

河南中烟工业有限责任公司 技术中心,河南 郑州 450000

摘要:【目的】揭示烤甜香韵天然与合成香料在卷烟烟气基质下的香味阈值与相互作用规律。【方法】利用气相色谱-质谱联用(GC-MS)技术明确4种烤甜香韵天然香料中香气成分种类和含量,通过S曲线法测定烟气基质下4种烤甜香韵天然香料和8种烤甜香韵合成香料香味阈值,并结合Feller加和模型明确天然与合成香料香味的相互作用。【结果】4种天然香料中均含有甲基环戊烯醇酮(MCP)、2,3-二氢-3,5-二羟基-6-甲基-4(H)-吡喃-4-酮(DDMP)、5-羟甲基糠醛(5-HMF)、葫芦巴内酯等烤甜香韵挥发性成分。4种天然香料的香味阈值范围为 $8.146 \times 10^{-2} \sim 5.420 \times 10^{-1}$ ng/支,8种合成香料在烟气中的香味阈值范围为 $5.140 \times 10^{-7} \sim 6.041$ ng/支。枫槭浸膏/MCP、枫槭浸膏/DDMP、葫芦巴提取物/乙基葫芦巴内酯、烟草美拉德反应产物/MCP 4种二元组合,以及枫槭浸膏/麦芽酚/乙基麦芽酚、红枣浸膏/麦芽酚/乙基麦芽酚 2种三元组合的香味之间呈现和合作用,红枣浸膏/MCP组合香味之间呈现掩盖作用,其他21种二元组合均呈现加和作用。【结论】明确了卷烟烟气基质下烤甜香韵天然与合成香料的香味阈值范围及其相互作用规律,可为卷烟精准调香提供参考与借鉴。

关键词:烟气;烤甜香韵;天然香料;合成香料;香味阈值;S曲线;相互作用规律

中图分类号:TS411 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-1553(2026)03-0088-10

0 引言

卷烟调香是塑造中式卷烟风格特征的关键环节,其核心在于精确调控多种香料间的复杂相互作用:当两种香料混合后,若强度显著高于各自算术加和,则呈现和合作用,即 $1+1>2$ 的协同放大作用;若强度恰好等于各组分简单累加,则表现为加和作用;若某组分通过抑制或改变另一香韵的感知属

性,则会产生“掩盖”作用。这三种相互作用机制是烟用香精调配的基础,决定了最终烟气香韵的层次与平衡^[1-2]。一份理想的卷烟香精香料配方通常含有十余种天然香料和合成香料,其种类和比例需要调香师从卷烟风格需求出发,按照两类香料的功能特性及其香味的相互作用等,结合经验,通过长期反复实验和调整才能最终确定^[1]。随着国内烟草科技水平的提高,关于天然与合成香料在卷烟中的

收稿日期:2025-08-05;修回日期:2025-09-18;出版日期:2026-06-15

基金项目:河南中烟工业有限责任公司科技项目(AW2022011),河南省人才托举工程项目(2022HYTP020)。

作者简介:万帅(1992—),男,河南省驻马店市人,河南中烟工业有限责任公司工程师,主要研究方向为烟用香料品质控制。E-mail: 1240673900@qq.com

通信作者:李耀光(1973—),男,河南省安阳市人,河南中烟工业有限责任公司高级工程师,主要研究方向为香精香料品质控制。E-mail: 15670635752@163.com

功效评价研究已取得了一定进展^[3-7],但两者之间香味的相互作用规律仍鲜见报道。在卷烟调香中,系统厘清香料间的加和、和合、掩盖互作模式,是破解阈值-剂量-风味非线性难题的关键,这不仅有助于通过协同作用放大目标香韵,还可利用掩蔽效应剔除不良气息,从而为调香技术科学化提供支撑。

烤甜香是一种兼具烘烤香、甜香和焦甜香的复合香型,是中式卷烟香气风格的重要组成部分^[8]。红枣浸膏、枫槭浸膏、葫芦巴提取物、烟草美拉德反应产物等天然香料,以及麦芽酚、乙基麦芽酚、葫芦巴内酯、呋喃酮、甲基环戊烯醇酮(MCP)、5-羟甲基糠醛(5-HMF)等合成香料是卷烟调香常用的烤甜香韵单体香料^[9-14]。目前,相关研究多集中于香料的工艺优化与成分鉴定等方面,尚缺乏对其在烟气体系中相系作用规律的深入探讨。S曲线法是一种研究香味成分相互作用的有效方法,不仅适用于研究二元体系,还可以扩展至多元成分,并以图形形式直观呈现相互作用规律^[15-16]。然而,现有研究利用该方法研究香味成分的相互作用规律多在纯净空气或水基质中进行,而以卷烟烟气为基质的研究成果尚不多见。

鉴于此,本研究拟利用气相色谱-质谱联用(GC-MS)技术,明确4种烤甜香韵天然香料中挥发性香气成分种类和含量,首次采用S曲线法测定卷烟烟气中4种天然香料和8种合成香料的香味阈值,并结合Feller加和模型,明确卷烟烟气中26组烤甜香韵的二元组合与2组三元组合香味之间的相互作用,以期为烟气基质下香料间的香味相互作用研究提供方法借鉴,为卷烟精准调香提供参考。

1 材料与方法

1.1 主要材料与试剂

主要材料:中支参比卷烟(“黄金叶商鼎”空白卷烟,单支烟丝质量为500 mg),由河南中烟工业有限责任公司提供,经感官评价其烤甜香韵得分为2.47。

主要试剂:红枣浸膏、枫槭浸膏、葫芦巴提取物、烟草美拉德反应产物和2,3-二氢-3,5-二羟基-6-甲基-4(H)-吡喃-4-酮(DDMP),河南中烟工业有限责任公司;2-甲基吡嗪、2,5-二甲基吡嗪、

糠醛、糠醇、MCP、乙基环戊烯醇酮(ECP)、2-乙酰基吡咯、麦芽酚、乙基麦芽酚、5-HMF、葫芦巴内酯、乙基葫芦巴内酯和呋喃酮,纯度均 $\geq 98\%$,北京百灵威科技有限公司;二氯甲烷(分析纯),国药集团有限公司;乙醇(质量分数95%,食品级),河南汉永酒精有限公司;纯净水,杭州娃哈哈集团有限公司。

1.2 主要仪器与设备

BSA323 S型电子天平,赛多利斯科学仪器有限公司;HRH-286K型香精香料注射仪,北京慧荣和科技有限公司;8890-5977B型GC-MS仪,美国安捷伦科技有限公司;V-2500MT漩涡振荡器,上海辰邦西仪器科技有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 天然香料挥发性成分分析 分别精确称取红枣浸膏、枫槭浸膏、葫芦巴提取物、烟草美拉德反应产物各0.100 0 g,置于离心管中,加入10 mL水,充分溶解,再加入10 mL二氯甲烷,于漩涡振荡器以200 r/min的速率涡旋振荡20 min。使用分液漏斗分离有机相与水相,在有机相中加入3 g无水 Na_2SO_4 ,静置过夜去除水分。在常温下将有机相浓缩至1 mL,进行GC-MS分析。

1.3.2 标准溶液配制 使用2,6-二氯甲苯作为内标,精确称取2,6-二氯甲苯10.25 mg,并用二氯甲烷定容至100 mL,待用。

混合标准溶液配制:精确称取2-甲基吡嗪、2,5-二甲基吡嗪、糠醛、糠醇、MCP、2-乙酰基吡咯、麦芽酚、乙基麦芽酚、DDMP、5-HMF、葫芦巴内酯、呋喃酮各16.57 mg、15.95 mg、14.35 mg、14.69 mg、9.00 mg、11.00 mg、12.73 mg、45.76 mg、8.65 mg、14.64 mg、18.82 mg、23.15 mg于50 mL的容量瓶中,用二氯甲烷定容至刻度线。分别用移液管精确量取9 mL、7 mL、5 mL、3 mL、1 mL、0.5 mL、0.1 mL、0.05 mL、0.01 mL上述混合标准溶液置于10 mL容量瓶中,分别加入1 mL内标标准溶液,用二氯甲烷定容至刻度线,配制成不同质量浓度的混合标准溶液。

1.3.3 不同质量浓度香料样品制备 精确称取一定量的天然和合成香料于100 mL容量瓶中,以质量分数70%乙醇为溶剂定容至容量瓶刻度线,作为母液。采用定容法,按 $1/3^n$ 的比例将母液逐级稀释,

制备 10 个不同质量浓度的香料样品。

1.3.4 卷烟样品制备 使用香精注射机将 10 个不同质量浓度香料样品分别注射至 10 支参比卷烟中,注射量为 5 μL ,作为测试样品;将 5 μL 质量分数 70% 的乙醇分别注射至 20 支参比卷烟中,作为对照样品;以 1 支测试样品和 2 支对照样品为一组,每组样品用数字随机编码。将卷烟样品于温度(20 \pm 2) $^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度(60 \pm 5)%环境中平衡 48 h 后,进行感官评价,每组样品重复评价 3 次,结果取平均值。卷烟样品从制备完成到香味阈值评价结束的时间小于 7 d。

1.3.5 香料香味阈值测定 由 13 名经过系统训练的成员组成感官评价小组,所有成员均获得国家烟草质量监督检验中心检测岗位培训合格证书,且熟悉烤甜香韵香料在卷烟中的作用特征。天然和合成香料香味阈值根据《感官分析 方法学 采用三点强迫选择法(3-AFC)测定嗅觉、味觉和风味觉察阈值的一般导则》(GB/T 22366—2022)^[17]进行测定。小组成员从加有最高质量浓度香料的参比卷烟开始进行感官评价,每组重复 3 次。小组成员可以正确挑选出加有香料的烟支,则进行下一质量浓度香料的评价,依次往下进行,并记录对每一质量浓度样品的判断结果,计算正确识别概率 p ,即正确选择出加入香料的烟支 2 次及 2 次以上的概率。结

合校正公式 $P = \frac{3 \times p - 1}{2}$ 计算正确识别概率校正,其中 p 为实际测得的正确识别概率, P 为正确识别概率校正,通过 Origin 2021 软件绘制以香料质量浓度对数值 $\lg X$ 为 X 轴, P 为 Y 轴的拟合 S 曲线,曲线公式为 $P = 1 / (1 + e^{-(X-C)/D})$,其中 C 为阈值对数值,1/ D 为 S 曲线斜率,拟合度不小于 0.950。当 $P = 0.5$ 时,对应的横坐标为烟气基质下烤甜香料香味阈值对数值。

1.3.6 天然香料与合成香料相互作用研究 1) 二元体系。将天然香料(A)和合成香料(B)按照 1.3.5 测定的阈值比进行等比例扩大或缩小,从高到低配制 10 个不同质量浓度的二元香料混合物,通过三点强迫法(3-AFC),结合校正公式,绘制 $\lg X - P$ 曲线,进行 S 曲线拟合,计算香料混合物的实验香味阈值。通过 Feller 加和模型 $P(AB) = P(A) + P(B) -$

$P(A) \times P(B)$,计算混合后 A、B 香料在不同质量浓度下的理论概率,并进行 S 曲线拟合,当 $P = 0.5$ 时,纵坐标为理论香味阈值^[16]。

香料之间相互作用程度的判定通过公式 $F = \text{实验香味阈值} / \text{理论香味阈值}$ 进行^[18];当 $F < 0.5$ 时,香气成分之间发生和合作用;当 $0.5 < F < 1$ 时,香气之间发生加和作用;当 $F = 1$ 时,香气之间不发生作用;当 $F > 1$ 时,香气之间发生掩盖作用。

2) 三元体系。将天然香料(A)、合成香料(B)和合成香料(C)按照二元体系的方法绘制 $\lg X - P$ 曲线,计算三元体系实验香味阈值。进一步通过 Feller 加和模型 $P(ABC) = P(A) + P(B) + P(C) - P(A) \times P(B) - P(A) \times P(C) - P(B) \times P(C) + P(A) \times P(B) \times P(C)$ 计算理论概率,获得理论香味阈值。相互作用判定方法同二元体系。

1.3.7 GC-MS 检测条件 GC 条件:色谱柱为 Agilent 122-5562 DB-5 MS 毛细管柱(60 m \times 250 μm \times 0.25 μm);进样口温度为 280 $^{\circ}\text{C}$;载气为高纯 He,流速为 1.0 mL/min;进样方式为分流进样,分流比 3:1;进样量为 1 μL ;升温程序为初始温度 40 $^{\circ}\text{C}$,以 3 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速率升温至 180 $^{\circ}\text{C}$,保持 20 min,再以 2 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速率升温至 200 $^{\circ}\text{C}$,保持 10 min,最后以 4 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速率升温至 280 $^{\circ}\text{C}$ 。

MS 条件:采用 Scan 模式;传输线温度为 280 $^{\circ}\text{C}$;离子源温度为 230 $^{\circ}\text{C}$;四级杆温度为 150 $^{\circ}\text{C}$;离子源为 XTR-EI 源,电子能量为 70 eV;溶剂延迟时间为 10 min;扫描范围 10~800 amu。

1.3.8 天然香料挥发性成分定性定量分析 采用 MS 数据库进行检索(匹配度 \geq 80),通过比对保留指数和标准品保留时间进行定性分析;通过内标标准曲线进行定量分析。所有实验均重复 3 次,结果取平均值。

1.4 数据处理与分析

采用 Excel 2021 软件进行数据处理与分析,利用 Origin 2021 绘制 S 曲线图。

2 结果与分析

2.1 内标标准曲线分析

采用内标法建立 12 种合成香料的标准曲线,结

果见表1。由表1可知,所有合成香料线性方程的 R^2 均在0.999 0以上,说明标准曲线拟合效果较好。

2.2 4种天然香料挥发性成分分析

为量化天然香料中挥发性成分对卷烟烤甜香韵的贡献程度,通过内标标准曲线法测定了4种天然香料中具有烤甜香韵挥发性成分的含量,结果见表2。由表2可知,红枣浸膏中含有5种烤甜香韵挥发性成分,分别为MCP、2-乙酰基吡咯、呋喃酮、DDMP和5-HMF,这与杨鹏元等^[11]的研究结果一致。其含量范围为0.670~40.270 $\mu\text{g/g}$,其中5-HMF的含量最高,2-乙酰基吡咯的含量最低,结合烤甜香韵挥发性成分的转移率^[18-19],红枣浸膏香味阈值的测定可以参考5-HMF的香味阈值。此外,在研究红枣浸膏与合成香料的相互作用时,合成香料可以选择红枣浸膏中未检出的烤甜香韵挥发性成分,如麦芽酚、乙基麦芽酚、ECP和葫芦巴内酯等,考查其相互作用。同样地,枫槭浸膏香味阈值的测定参考葫芦巴内酯的香味阈值,与枫槭浸膏相互作用的合成香料可以选择乙基麦芽酚、ECP、DDMP和乙基葫芦巴内酯等;葫芦巴提取物香味阈值的测定参考葫芦巴内酯的香味阈值,与葫芦巴提取物相互作用的合成香料可以选择乙基麦芽酚、ECP和乙基葫芦巴内酯等;烟草美拉德反应产物香味阈值的测定参考5-HMF的香味阈值,与烟草美拉德反应产物相互作用的合成香料可以选择MCP、ECP、DDMP、麦芽酚和葫芦巴内酯等。

2.3 基于S曲线法测定4种天然香料与8种合成香料香味阈值

依据4种天然香料挥发性成分的分析结果及卷烟配方单体香料使用频率,筛选出8种具有烤甜香韵的合成香料,分别为麦芽酚、乙基麦芽酚、MCP、ECP、DDMP、5-HMF、葫芦巴内酯及乙基葫芦巴内酯。依据化学结构可分为呋喃酮类、呋喃类、吡喃酮类及环戊酮类。采用S曲线法探究烟气基质中香料间的相互作用时,需先明确各香料的香味阈值,现以葫芦巴内酯、5-HMF、乙基麦芽酚及ECP为代表,阐述烟气基质中该8种合成香料香味阈值的S曲线法测定过程,结果见图1。由图1可知,在卷烟烟气基质下,上述4种合成香料的香味阈值分别为 5.140×10^{-7} ng/支、 2.594×10^{-3} ng/支、 2.218×10^3 ng/支和 4.018×10^{-1} ng/支。

8种合成香料的S曲线拟合方程及香味阈值见表3。由表3可知,8种香料的S曲线回归系数(R^2)均大于0.950,说明S曲线方程拟合有效。香味阈值最大的是乙基麦芽酚,为 2.218×10^3 ng/支,最小的是葫芦巴内酯,为 5.140×10^{-7} ng/支。与相关研究^[20]相比,烟气基质下该8种合成香料的香味阈值均大幅减小,这与测定的基质不同有关,传统阈值多在水、乙醇或空气介质中测定,香气以自由态直接作用于人体嗅上皮,卷烟燃吸时进入口腔的复杂化学成分体系可以同时激活舌头上的味觉受体和鼻腔中的嗅觉受体,加之化学成分之间的相互

表1 13种合成香料的标准曲线线性方程及参数

Table 1 Standard curvilinear equations and parameters of 13 synthetic flavorings

名称	线性方程	R^2	线性范围/ $(\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1})$	定量离子
2-甲基吡嗪	$y=0.1858x-0.0003$	0.9997	0.33~298.26	67,94
糠醛	$y=0.2428x+0.0139$	0.9991	0.29~258.30	39,96
MCP	$y=0.2269x+0.0106$	0.9994	0.18~162.00	97,112
2-乙酰基吡咯	$y=0.2079x+0.0076$	0.9991	0.22~198.00	39,109
麦芽酚	$y=0.2498x+0.0600$	0.9992	1.27~228.60	71,126
DDMP	$y=0.3261x+0.0032$	0.9994	0.87~155.70	43,144
糠醇	$y=0.4106x+0.0176$	0.9999	0.35~317.52	81,98
2,5-二甲基吡嗪	$y=0.1604x-0.0023$	0.9992	0.32~285.30	42,108
葫芦巴内酯	$y=0.2643x+0.0350$	0.9995	0.38~338.76	128,43
乙基麦芽酚	$y=0.1805x+0.0258$	0.9992	0.29~834.06	43,140
5-HMF	$y=0.3568x+0.0968$	0.9996	0.29~263.52	97,126
呋喃酮	$y=0.1982x+0.0142$	0.9996	2.35~416.70	113,128

表2 4种天然香料中烤甜香韵挥发性成分含量
Table 2 Contents of volatile compounds with roasted sweet note in 4 natural flavorings

天然香料名称	烤甜香韵挥发性成分	$RI^{①}$	$RI^{②}$	含量 $/(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$
红枣浸膏	MCP	1026	1036	0.930
	2-乙酰基吡咯	1068	1059	0.670
	呋喃酮	1086	1072	15.050
	DDMP	1145	1154	31.890
	5-HMF	1228	1266	40.270
枫槭浸膏	MCP	1029	1036	1.280
	葫芦巴内酯	1103	1106	44.540
	麦芽酚	1114	1108	1.980
	5-HMF	1234	1233	68.710
葫芦巴提取物	2-甲基吡嗪	828	820	0.800
	糠醇	855	857	3.380
	2,5-二甲基吡嗪	915	911	0.570
	MCP	1026	1036	0.950
	2-乙酰基吡咯	1066	1059	0.730
	葫芦巴内酯	1101	1106	15.510
	麦芽酚	1112	1108	7.510
	DDMP	1146	1154	5.250
	5-HMF	1230	1233	3.270
	烟草	2-甲基吡嗪	826	820
糠醛		835	842	2.140
美拉德反应产物	2,5-二甲基吡嗪	915	911	1.130
反应产物	乙基麦芽酚	1200	1193	384.940
	5-HMF	1230	1233	56.060

注:①表示通过正构烷烃(C_7-C_{30})计算得到;②表示查询NIST网站(webbook.nist.gov)得到。

作用,因而使合成香料的香味阈值发生较大的变化。

本实验将4种天然香料中挥发性成分作为一个单体成分进行香味阈值的测定,方法同合成香料,结果见图2。由图2并结合表2可知,烟气基质下,红枣浸膏的香味阈值为 5.420×10^{-1} ng/支,而红枣浸膏中5-HMF含量为 $40.270 \mu\text{g/g}$,如果红枣浸膏中5-HMF全部转移至卷烟烟气中,其含量为 2.183×10^{-5} ng/支,远小于合成香料5-HMF的香味阈值,造成这种差异的原因可能是红枣浸膏中存在的某些香气化合物与5-HMF之间发生和合或加和作用,使得红枣浸膏中5-HMF的香味阈值远低于单一合成香料中的5-HMF。同样地,枫槭浸膏的香味阈值为 8.146×10^{-2} ng/支,其所含葫芦巴内酯含量大于合成香料中葫芦巴内酯的香味阈值;葫芦巴提取物的香味阈值为 5.534×10^{-1} ng/支,其所含葫芦巴内酯含量大于合成香料中葫芦巴内酯的香味阈值;烟草美

拉德反应产物的香味阈值为 1.333×10^{-1} ng/支,其所含5-HMF含量小于合成香料中5-HMF的香味阈值。以上结果表明,烟气基质下4种天然香料中香味成分会发生相互作用,影响其对烤甜香韵的贡献程度。

2.4 烟气基质下天然香料与合成香料的相互作用分析

2.4.1 天然香料与合成香料二元体系的相互作用

天然香料与合成香料的相互作用见表4。由表4可知,红枣浸膏/MCP二元组合在卷烟烟气中的实验香味阈值为 2.760×10^{-2} ng/支,理论香味阈值为 2.060×10^{-2} ng/支, F 为1.340,说明红枣浸膏与MCP在卷烟烟气中存在相互掩盖作用,当卷烟调香配方中同时使用红枣浸膏和MCP时,卷烟烤甜香韵感知程度会降低;红枣浸膏另外5种二元组合在卷烟烟气中的 F 均大于0.5且小于1,说明红枣浸膏与这5个合成香料混合后在卷烟烟气中存在加和作用,可以提升卷烟的烤甜香韵。

枫槭浸膏与MCP、麦芽酚、乙基麦芽酚和DDMP的二元组合在卷烟烟气中的 F 值小于0.5,表明枫槭浸膏与上述香料之间存在和合作用,在卷烟调香配方中使用上述组合,卷烟烤甜香韵感知程度会极大提升。而枫槭浸膏与ECP、5-HMF和乙基葫芦巴内酯的二元组合在卷烟烟气中的 F 值均大于0.5且小于1,表明枫槭浸膏与这3种合成香料混合后在卷烟烟气中存在加和作用。

葫芦巴提取物/乙基葫芦巴内酯二元组合在卷烟烟气中的 F 值为0.454,说明葫芦巴提取物与乙基葫芦巴内酯在卷烟烟气中存在和合作用;另外6种二元组合在卷烟烟气中的 F 值均大于0.5且小于1,表明葫芦巴提取物与这6种合成香料混合后在卷烟烟气中存在加和作用,能提升卷烟烟气的烤甜香韵。

烟草美拉德反应产物/MCP二元组合在卷烟烟气中的 F 值为0.458,说明烟草美拉德反应产物与MCP在卷烟烟气中存在和合作用;另外5种二元组合在卷烟烟气中的 F 值均大于0.5且小于1,表明烟草美拉德反应产物分别与这5种合成香料组合存在加合作用,能提升卷烟烟气的烤甜香韵。

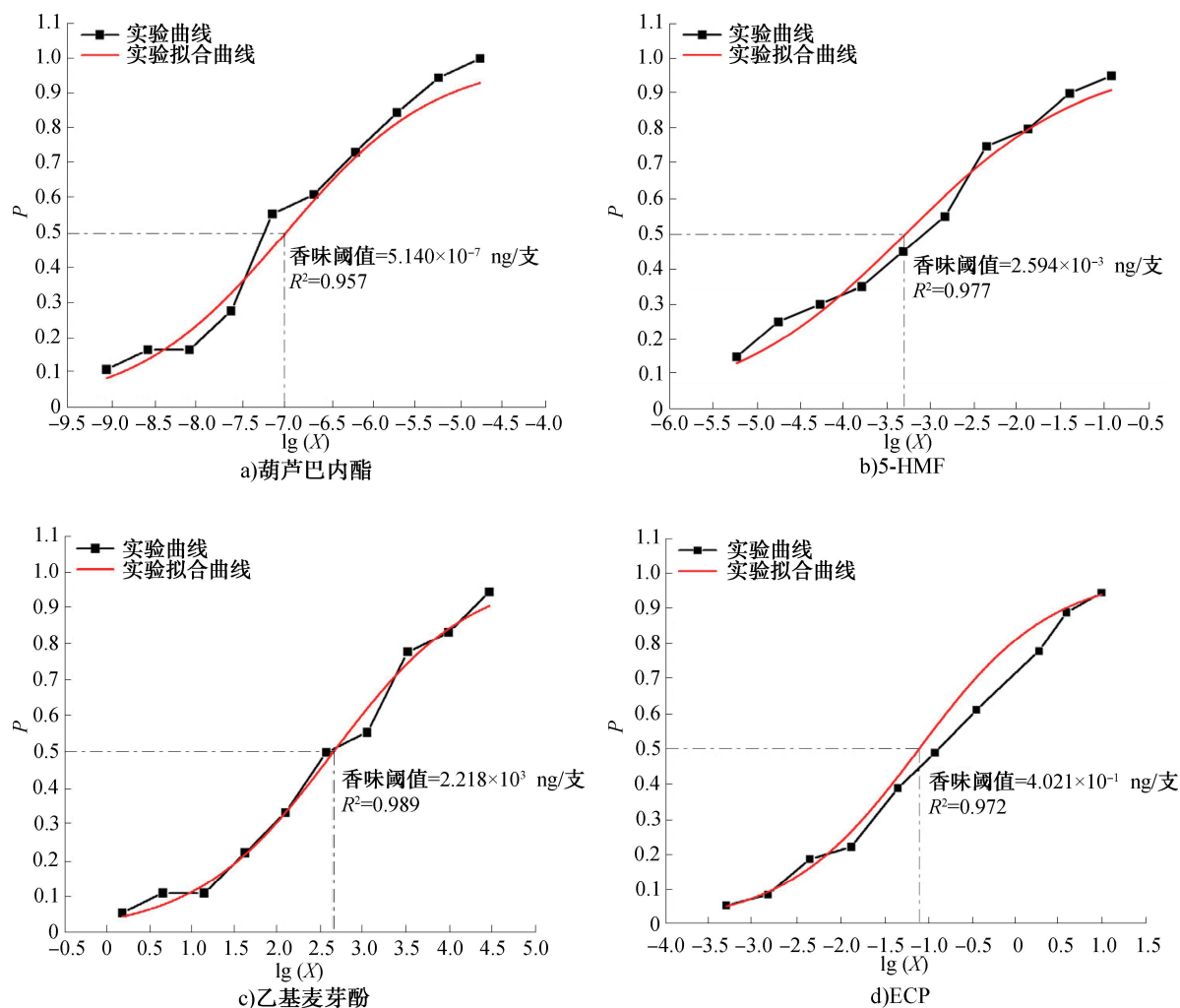


图1 烟气中葫芦巴内酯、5-HMF、乙基麦芽酚和ECP的香味阈值S曲线

Fig. 1 S-curve of aroma thresholds of sototone, 5-HMF, ethyl maltol and ECP in cigarette smoke

表3 8种合成香料的S曲线拟合方程及香味阈值

Table 3 S-curve fitting equations and aroma thresholds of 8 synthetic flavorings with roasted sweet note in cigarette smoke

合成香料名称	拟合方程	回归系数	香味阈值/(ng·支 ⁻¹)
乙基葫芦巴内酯	$Y = 1/1 + e^{(-1.227 \times (x+6.188))}$	0.973	3.243×10^{-6}
5-HMF	$Y = 1/1 + e^{(-0.977 \times (x+3.286))}$	0.977	2.594×10^{-3}
乙基麦芽酚	$Y = 1/1 + e^{(-1.240 \times (x-2.648))}$	0.989	2.218×10^3
麦芽酚	$Y = 1/1 + e^{(-1.091 \times (x+0.801))}$	0.951	7.906×10^{-1}
DDMP	$Y = 1/1 + e^{(-1.263 \times (x-0.082))}$	0.975	6.041
ECP	$Y = 1/1 + e^{(-1.312 \times (x+1.095))}$	0.972	4.018×10^{-1}
MCP	$Y = 1/1 + e^{(-1.240 \times (x+0.786))}$	0.980	7.860×10^{-1}
葫芦巴内酯	$Y = 1/1 + e^{(-1.154 \times (x+6.988))}$	0.957	5.140×10^{-7}

2.4.2 天然香料与合成香料三元体系的相互作用 枫槭浸膏与红枣浸膏均为卷烟调香中高频使用的烤甜天然香料,麦芽酚与乙基麦芽酚亦是最常用的烤甜合成香料,因此选择具有代表性的枫槭浸

膏/麦芽酚/乙基麦芽酚和红枣浸膏/麦芽酚/乙基麦芽酚三元体系进行研究,相互作用结果见图3。由图3可知,枫槭浸膏/麦芽酚/乙基麦芽酚三元体系在卷烟烟气中的实验香味阈值为 2.842×10^2 ng/支,理论

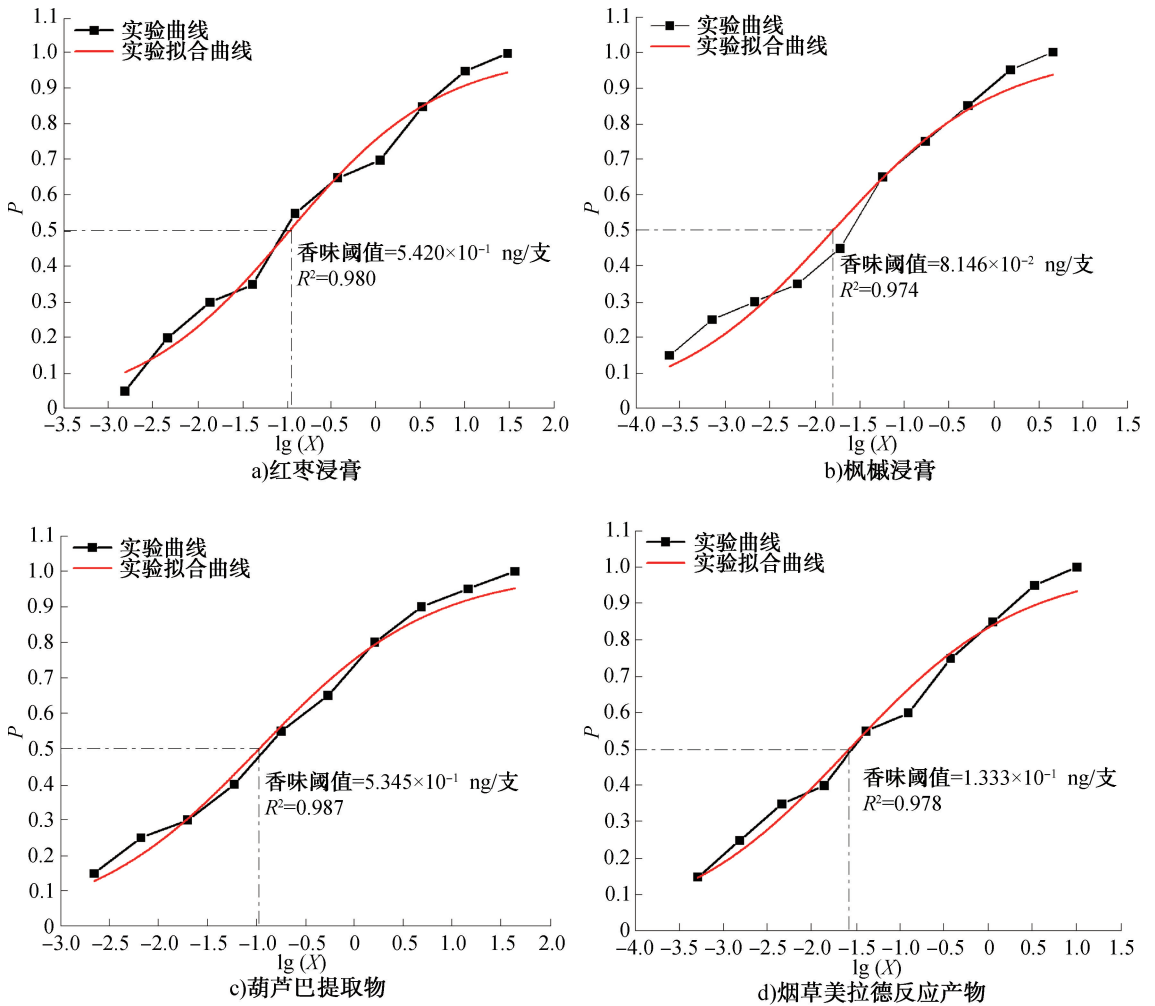


图 2 烟气中 4 种天然香料香味阈值 S 曲线

Fig. 2 S-curve of aroma thresholds of 4 natural flavorings with roasted sweet note in cigarette smoke

表 4 天然香料与合成香料的相互作用

Table 4 Interactions between natural and synthetic flavorings with roasted sweet note in cigarette smoke

天然香料	合成香料	实验香味阈值/(ng·支 ⁻¹)	理论香味阈值/(ng·支 ⁻¹)	F	相互作用种类
红枣浸膏	麦芽酚	1.106×10 ⁻¹	1.887×10 ⁻¹	0.586	加和
	乙基麦芽酚	168.255×10 ⁻¹	349.920×10 ⁻¹	0.481	和合
	MCP	2.760×10 ⁻²	2.060×10 ⁻²	1.340	掩盖
	ECP	1.032×10 ⁻¹	1.342×10 ⁻¹	0.769	加和
	葫芦巴内酯	4.988×10 ⁻²	7.870×10 ⁻²	0.634	加和
	DDMP	6.123×10 ⁻¹	1.057×10 ⁻¹	0.579	加和
枫槭浸膏	麦芽酚	6.076×10 ⁻²	1.244×10 ⁻¹	0.488	和合
	乙基麦芽酚	195.420	444.600	0.440	和合
	MCP	6.471×10 ⁻²	1.866×10 ⁻¹	0.346	和合
	ECP	3.810×10 ⁻²	7.277×10 ⁻²	0.523	加和
	DDMP	5.714×10 ⁻¹	1.241	0.460	和合
	5-HMF	6.901×10 ⁻³	1.078×10 ⁻²	0.650	加和
	乙基葫芦巴内酯	8.317×10 ⁻³	1.264×10 ⁻²	0.658	加和

表4(续)

天然香料	合成香料	实验香味阈值/(ng·支 ⁻¹)	理论香味阈值/(ng·支 ⁻¹)	F	相互作用种类
葫芦巴 提取物	麦芽酚	1.016×10^{-1}	1.896×10^{-1}	0.535	加和
	乙基麦芽酚	194.522	353.158	0.550	加和
	MCP	1.044×10^{-1}	2.079×10^{-1}	0.502	加和
	ECP	7.014×10^{-2}	1.348×10^{-1}	0.520	加和
	DDMP	6.471×10^{-1}	1.064	0.608	加和
	5-HMF	4.435×10^{-2}	6.807×10^{-2}	0.652	加和
	乙基葫芦巴内酯	3.758×10^{-2}	8.278×10^{-2}	0.454	和合
烟草美拉德 反应产物	麦芽酚	6.323×10^{-2}	1.185×10^{-1}	0.533	加和
	乙基麦芽酚	219.770	318.400	0.680	加和
	MCP	5.970×10^{-2}	1.303×10^{-1}	0.458	和合
	ECP	4.197×10^{-2}	6.080×10^{-2}	0.690	加和
	DDMP	6.123×10^{-1}	9.035×10^{-1}	0.678	加和
	葫芦巴内酯	1.177×10^{-2}	1.762×10^{-2}	0.668	加和

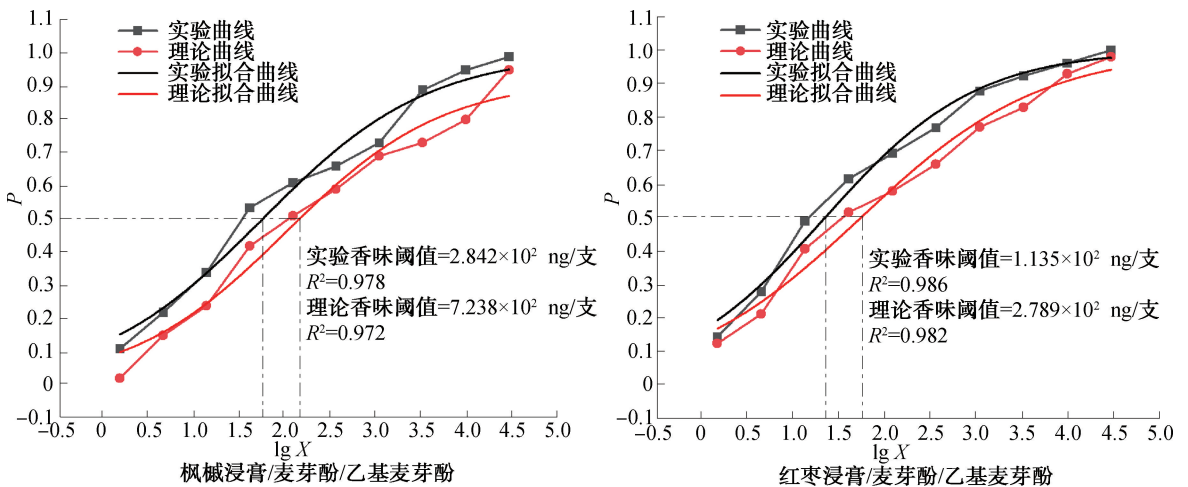


图3 枫槭浸膏/麦芽酚/乙基麦芽酚和红枣浸膏/麦芽酚/乙基麦芽酚在卷烟烟气中的和合作用
Fig.3 Synergistic effects of maple extract/maltol/ethyl maltol and jujube extract/maltol/ethyl maltol in cigarette smoke

香味阈值为 7.238×10^2 ng/支, F 值为 0.390, 红枣浸膏/麦芽酚/乙基麦芽酚三元体系在卷烟烟气中的实验香味阈值为 1.135×10^2 ng/支, 理论香味阈值为 2.789×10^2 ng/支, F 值为 0.408, 说明这 2 组三元体系在卷烟烟气中均存在和合作用, 可极大提升卷烟烟气烤甜香韵。

3 结论

本研究利用 GC-MS 技术、S 曲线法和 Feller 加和模型明确了中支卷烟烟气中 4 种烤甜香韵天然香料与 8 种合成香料的相互作用。结果表明: 红枣浸膏、枫槭浸膏、葫芦巴提取物和烟草美拉德反应产物中含有 MCP、DDMP、5-HMF 和葫芦巴内酯等烤甜

香韵挥发性成分; 4 种天然香料的香味阈值范围为 $8.146 \times 10^{-2} \sim 5.420 \times 10^{-1}$ ng/支, 8 种合成香料在烟气中的香味阈值范围为 $5.140 \times 10^{-7} \sim 6.041$ ng/支; 红枣浸膏/MCP 二元体系在烟气中呈现掩盖作用, 枫槭浸膏/MCP、枫槭浸膏/DDMP、葫芦巴提取物/乙基葫芦巴内酯、烟草美拉德反应产物/MCP 这 4 组二元体系及枫槭浸膏/麦芽酚/乙基麦芽酚、红枣浸膏/麦芽酚/乙基麦芽酚这 2 组三元体系呈现和合作用, 其他体系呈现加和作用。

本研究首次将 S 曲线法应用于卷烟烟气基质下天然香料与合成香料间的相互作用分析, 研究结果可为卷烟调香提供参考。但本研究仅考查了烤甜香韵香料的相互作用关系, 后续将进一步拓展不同

香韵香料的组合,为卷烟数字化设计提供数据支撑。

参考文献:

- [1] 程世鸿,邵璐. 卷烟调香技术研究进展[J]. 广东化工, 2024,51(18):107-109.
CHENG S H, SHAO L. Review of cigarette flavoring technology[J]. Guangdong Chemical Industry, 2024, 51(18):107-109.
- [2] 吴雷,董鸿辉,张荣亚,等. 基于烟气转移行为和相对气味活度值的卷烟甜香香基模块开发与应用[J]. 中国烟草学报,2025,31(1):1-13.
WU L, DONG H H, ZHANG R Y, et al. Development and application of sweet flavor-based module in cigarettes based on transfer rate and ROAV of cigarette smoke components [J]. Acta Tabacaria Sinica,2025,31(1):1-13.
- [3] 蔡佳校,卢红兵,李燕春,等. 基于数字化调香技术的烟用表香香精开发与应用[J]. 烟草科技,2023,56(10):61-69.
CAI J X, LU H B, LI Y C, et al. Development and application of top flavors for cigarettes based on digital flavoring technology[J]. Tobacco Science & Technology, 2023,56(10):61-69.
- [4] 陈芝飞,杨靖,马宇平,等. 烟用香料作用阈值感官评价方法的建立及应用[J]. 烟草科技,2016,49(4):30-36.
CHEN Z F, YANG J, MA Y P, et al. Establishment and application of sensory evaluation method for functional threshold of tobacco flavor [J]. Tobacco Science & Technology,2016,49(4):30-36.
- [5] 徐秀娟,洪祖灿,柴国璧,等. 基于香气活性值的烟草提取物成分分析及感官作用评价[J]. 轻工学报, 2023,38(2):63-71.
XU X J, HONG Z C, CHAI G B, et al. Component analysis and sensory evaluation of tobacco extracts based on aroma activity values [J]. Journal of Light Industry, 2023, 38(2):63-71.
- [6] 史清照,范武,张启东,等. 卷烟烟气和烟丝中果香成分组群感官贡献对比[J]. 轻工学报,2023,38(2):72-79.
SHI Q Z, FAN W, ZHANG Q D, et al. Comparative study on sensory contributions of fruity aroma components in smoke and filler of cigarette [J]. Journal of Light Industry,2023,38(2):72-79.
- [7] 张新龙,赵尔婉,黄家乐,等. 基于美拉德反应的红茶茶末烟用香料的制备及加香效果研究[J]. 轻工学报, 2024,39(6):57-69.
ZHANG X L, ZHAO E W, HUANG J L, et al. Study on the preparation and flavoring effect of cigarette flavor from black tea dust based on Maillard reaction[J]. Journal of Light Industry,2024,39(6):57-69.
- [8] 郑峰洋,尹献忠,李耀光,等. 加热卷烟中6种烤甜香单体香料的逐口转移行为[J]. 烟草科技,2021,54(12):46-52.
ZHENG F Y, YIN X Z, LI Y G, et al. Puff-by-puff transfer behaviors of six single flavors with roasted sweet aroma in heated tobacco products [J]. Tobacco Science & Technology,2021,54(12):46-52.
- [9] 蔡莉莉,赵志伟,席高磊,等. 3种市售枫槭浸膏关键致香成分感官导向分析[J]. 烟草科技,2020,53(11):36-42.
CAI L L, ZHAO Z W, XI G L, et al. Sensory analysis of key aroma components in three commercially available maple concretes [J]. Tobacco Science & Technology, 2020,53(11):36-42.
- [10] 柴颖,乔月梅,郭春生,等. 烟叶醇化初期烤甜香味物质形成规律[J]. 安徽农业科学,2024,52(24):158-162,187.
CHAI Y, QIAO Y M, GUO C S, et al. The formation rules of flavor substance with roasted sweet aroma in leaves during the early stage of aging [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2024,52(24):158-162,187.
- [11] 杨鹏元,洪广峰,张启东,等. 红枣烤甜香特征成分的确定及制备工艺优化[J]. 中国烟草学报,2016,22(6):41-50.
YANG P Y, HONG G F, ZHANG Q D, et al. Determination of roasted sweet aroma component in red jujube extract and optimization of its extraction technology [J]. Acta Tabacaria Sinica,2016,22(6):41-50.
- [12] LIU H, HUI T, FANG F, et al. Characterization and discrimination of key aroma compounds in pre-and postrigor roasted mutton by GC-O-MS, GC E-nose and aroma recombination experiments[J]. Foods,2021,10(10):2387.
- [13] AC-PANGAN M F, ENGESETH N J, CADWALLADER K R. Identification of important aroma components and sensory profiles of minimally processed (unroasted) and conventionally roasted dark chocolates [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry,2023,71(25):9856-9867.
- [14] WANG R, WU L X, GUO B X, et al. Characterization of aroma-active compounds in sesame hulls at different roasting temperatures by SAFE and GC-O-MS [J]. Food Chemistry: (X), 2024,21:101203.
- [15] XIAO Z B, LI Q, NIU Y W, et al. Mechanism of the interaction between olfactory receptors and characteristic aroma compounds in sweet orange juice [J]. LWT,2024, 207:116660.
- [16] ZENG S T, ZHANG L L, LI P, et al. Molecular mechanisms of caramel-like odorant-olfactory receptor interactions based on a computational chemistry approach [J]. Food Research International,2023,171:113063.
- [17] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会. 感官分析方法学 采用三点强迫选择法(3-AFC)测定嗅觉、味觉和风味觉察阈值的一般导则: GB/T

22366—2022[S].北京:中国标准出版社,2022.

State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Sensory analysis Methodology General guidelines for the determination of olfactory, gustatory and flavor perception thresholds using the three-point forced choice method (3-AFC): GB/T 22366—2022[S]. Beijing: China Standards Press, 2022.

[18] 黄勇兵.代表性香料单体在中、低焦油卷烟中的转移行为研究[D].长沙:湖南师范大学,2014.

HUANG Y B. Research on the transfer behavior of typical

flavor monomers in moderate/low-tar cigarettes [D]. Changsha: Hunan Normal University, 2014.

[19] 陈芝飞,蔡莉莉,郑峰洋,等.加热卷烟中6种酮类单体香料的转移行为[J].中国烟草学报,2022,28(4):1-7.

CHEN Z F, CAI L L, ZHENG F Y, et al. Transfer behavior of 6 ketone flavor components in heated tobacco products [J]. Acta Tabacaria Sinica, 2022, 28(4): 1-7.

[20] LJ VAN GEMERT. Odour Thresholds Compilations of odour in air, water and other media [M]. The Netherlands: Oliemans Punter & Partners BV, 2011.

Aroma interactions between natural and synthetic flavorings with roasted sweet note in a cigarette smoke matrix

WAN Shuai, LIU Qianjin, XI Gaolei, CHEN Biao, ZHANG Jie, ZANG Xiangyu,

LU Changtong, LI Yaoguang

Technology Center, China Tobacco Henan Industrial Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China

Abstract: [Objective] This study aimed to reveal the aroma thresholds and interaction patterns of natural and synthetic flavorings with roasted sweet note in a cigarette smoke matrix. **[Methods]** Gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) was employed to identify the aroma components in four natural flavorings with roasted sweet note. The S-curve method was then used to determine the aroma thresholds of these four natural flavorings and eight synthetic flavorings in a cigarette smoke matrix, and Feller's additive model was applied to elucidate the interactions between the natural and synthetic flavorings. **[Results]** 1) All four natural flavorings contained roasted sweet aroma components such as methyl cyclopentenolone (MCP), 2,3-dihydro-3,5-dihydroxy-6-methyl-4(H)-pyran-4-one (DDMP), 5-hydroxy methyl furfural (5-HMF) and sotolone. 2) The aroma thresholds of the eight synthetic flavorings ranged from 5.140×10^{-7} to 6.041 ng/cigarette, while those of the four natural flavorings ranged from 8.146×10^{-2} to 5.420×10^{-1} ng/cigarette. 3) Synergistic effects were observed in four binary combinations (maple extract/MCP, maple extract/DDMP, fenugreek extract/ethyl sotolone, and tobacco Maillard reaction product/MCP) and two ternary systems (maple extract/maltol/ethyl maltol and jujube extract/maltol/ethyl maltol). A masking effect was observed in the jujube extract/MCP binary combination, whereas additive interactions dominated the other 21 binary combinations. **[Conclusion]** This study elucidated the aroma threshold ranges and interaction patterns of natural and synthetic flavorings with roasted sweet note in a cigarette smoke matrix, providing a reference for precision flavoring of cigarettes.

Key words: cigarette smoke; roasted sweet aroma; natural flavorings; synthetic flavorings; aroma threshold; S-curve method; interaction pattern

[责任编辑:王晓波 贾学伟]