

引用格式:

王钰, 李晓, 程传玲, 郭紫莹, 景天, 吴若昕, 王嘉梁, 许峰, 张春涛, 李登科, 马立超, 廖豫川. 影响卷烟抽吸干燥感的烟丝香味物质的筛选及评价[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2026, 52(1): 33–43.
WANG Y, LI X, CHENG C L, GUO Z Y, JING T, WU R X, WANG J L, XU F, ZHANG C T, LI D K, MA L C, LIAO Y C. Screening and evaluation of tobacco shred aroma compounds affecting the drying sensation during smoking[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2026, 52(1): 33–43.
投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



影响卷烟抽吸干燥感的烟丝香味物质的筛选及评价

王钰¹, 李晓¹, 程传玲¹, 郭紫莹¹, 景天¹, 吴若昕^{2*}, 王嘉梁²,
许峰², 张春涛², 李登科², 马立超², 廖豫川¹

(1. 郑州轻工业大学烟草科学与工程学院, 河南 郑州 450001;
2. 上海烟草集团有限责任公司天津卷烟厂, 天津 300163)

摘要: 为明确烟丝香味物质对卷烟抽吸干燥感的影响, 本研究以恒大卷烟(蓝金中支)为对象, 利用气相色谱-质谱联用技术(GC-MS)分析烟丝香味物质, 结合香味活力值(OAV)与感官评吸, 筛选对卷烟香味贡献度高、显著影响抽吸干燥感的香味物质; 采用Box-Behnken方法构建响应面模型, 系统探究重要烟丝香味物质在不同添加量下的交互作用及其对卷烟抽吸干燥感的影响规律。结果表明: 从烟丝中共检测出主要香味物质51种, 其中24种香味物质对烟草香味贡献度较高, 通过卷烟抽吸干燥感评价方法筛选出二氢猕猴桃内酯、苯乙醇(正向作用)和巨豆三烯酮、2-乙酰基吡咯(负向作用)4种显著影响卷烟抽吸干燥感的重要烟丝香味物质, 其影响程度从大到小依次为巨豆三烯酮、2-乙酰基吡咯、苯乙醇、二氢猕猴桃内酯, 巨豆三烯酮与2-乙酰基吡咯的交互作用对卷烟抽吸干燥感的影响最显著; 以烟丝中对应物质的含量计, 烟丝香味物质添加量组合I(二氢猕猴桃内酯2.61 μg/g、苯乙醇3.08 μg/g、巨豆三烯酮135.78 μg/g、2-乙酰基吡咯2.79 μg/g)可显著改善卷烟抽吸干燥感, 组合II(二氢猕猴桃内酯0.87 μg/g、苯乙醇2.05 μg/g、巨豆三烯酮271.56 μg/g、2-乙酰基吡咯4.88 μg/g)则明显加重卷烟抽吸干燥感。

关键词: 卷烟; 抽吸干燥感; 烟丝香味物质; 香味活力值; Box-Behnken响应面法

中图分类号: TS41+1

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2026)01-0033-11

Screening and evaluation of tobacco shred aroma compounds affecting the drying sensation during smoking

WANG Yu¹, LI Xiao¹, CHENG Chuanling¹, GUO Ziying¹, JING Tian¹, WU Ruoxin^{2*}, WANG Jialiang²,
XU Feng², ZHANG Chuntao², LI Dengke², MA Lichao², LIAO Yuchuan¹

(1. College of Tobacco Science and Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou, Henan 450001, China; 2. Tianjin Cigarette Factory of Shanghai Tobacco Group Co., Ltd., Tianjin 300163, China)

Abstract: To clarify the influence of tobacco shred aroma substances on the drying sensation during cigarette smoking, the Hengda cigarette (Blue Gold Medium) was selected as the research object. The aroma substances in the tobacco shred were analyzed by gas chromatography-mass spectrometry(GC-MS). Through odor activity value(OAV) and sensory evaluation, aroma substances with high contribution to cigarette aroma and significant influence on the drying sensation during smoking were screened. A response surface model was constructed using the Box-Behnken experimental design method to systematically explore the interactions of important tobacco shred aroma substances at different addition levels and their influence on the drying sensation during cigarette smoking. The results showed that 51 main aroma substances were detected in the tobacco shred, among which 24 aroma substances had a high contribution to the tobacco aroma.

收稿日期: 2025-03-31

修回日期: 2026-02-06

基金项目: 上海烟草集团有限责任公司项目(K2024-2-014P)

作者简介: 王钰(2000—), 女, 河南南阳人, 硕士研究生, 主要从事卷烟加工工艺研究, 315385620@qq.com; *通信作者, 吴若昕, 硕士, 工程师, 主要从事烟草化学研究, wuruoxin0305@163.com

Through the cigarette smoking drying sensation evaluation method, four important tobacco shred aroma substances that significantly affected the drying sensation during smoking were screened: dihydroactinidiolide and phenylethanol (positive effect), and megastigmatrienone and 2-acetylpyrrole (negative effect). Among them, megastigmatrienone and 2-acetylpyrrole had more significant impacts on the drying sensation during cigarette smoking, followed by phenylethanol and dihydroactinidiolide. The interaction between megastigmatrienone and 2-acetylpyrrole had the most significant effect on the drying sensation. Based on the content of the corresponding substances in the tobacco shred, aroma substance addition combination I(dihydroactinidiolide 2.61 $\mu\text{g/g}$, phenylethanol 3.08 $\mu\text{g/g}$, megastigmatrienone 135.78 $\mu\text{g/g}$, 2-acetylpyrrole 2.79 $\mu\text{g/g}$) significantly improved the drying sensation during cigarette smoking while combination II(dihydroactinidiolide 0.87 $\mu\text{g/g}$, phenylethanol 2.05 $\mu\text{g/g}$, megastigmatrienone 271.56 $\mu\text{g/g}$, 2-acetylpyrrole 4.88 $\mu\text{g/g}$) significantly aggravated the drying sensation.

Keywords: cigarette; drying sensation during smoking; tobacco shred aroma compounds; odor activity value; Box-Behnken response surface method

烟草作为一种重要的经济作物,在全球范围内广泛种植。我国是世界上最大的烟草生产国和消费国,烟叶产量与销量位居世界首位^[1]。感官质量是卷烟产品质量的重要组成部分,也是产品质量的基础和核心^[2]。干燥感来源于卷烟“三感”(轻松感、满足感、舒适感)^[3],不仅包含烟气刺激感官所产生的类似水分缺失的不适,还涵盖口腔及黏膜表面收缩、收敛、发涩、发苦、甜润度不足及残留感等“伪干燥感”相关表征,极大地影响消费者的抽吸体验^[4-6]。影响卷烟抽吸干燥感的因素是多维度的,研究者多通过优化加工工艺^[7-9]、提升保润效果^[10-12]及改进辅材搭配^[13]等方式改善卷烟干燥感,冯茜等^[7]与潘广乐等^[9]的研究结果表明合理配置卷烟加工参数可有效改善卷烟干燥感。张丽^[12]研究发现感官保润能降低卷烟抽吸过程中的干燥感和刺激性,进而提升卷烟舒适感。烟草香味物质是烟草品质的核心,对烟草内在质量与感官品质均有影响^[14-17]。郭华诚等^[15]研究表明,不同卷烟烟丝中的总香味物质含量及各类香味物质组成与感官评价结果呈正态分布,其中,卷烟香气与烟丝所含的总香味物质及大部分香味物质含量呈显著正相关。曹建敏等^[16]研究发现,2-甲基四氢呋喃-3-酮的含量与烟叶的感官质量呈极显著正相关。

目前针对烟草香味物质对卷烟感官品质的影响研究较为深入,但烟丝香味物质对卷烟抽吸干燥感的影响尚不明确,因此,有必要探索烟丝香味物质与卷烟抽吸干燥感之间的关系,以提升卷烟的感官质量。本研究以恒大卷烟蓝金中支(该款卷烟存在的不足主要为烟气干燥感较强)为研究对象,利用气相色谱-质谱联用技术(GC-MS)分析烟丝中的香味

物质,通过香味活力值(OAV)筛选对香味贡献度高的关键组分,建立卷烟抽吸干燥感评价体系;通过感官呼吸筛选出显著影响卷烟抽吸干燥感的重要香味物质,并结合Box-Behnken设计响应面实验,探究重要烟丝香味物质对卷烟抽吸干燥感的影响规律,以期改善卷烟抽吸干燥感提供参考依据,并为卷烟内在品质的优化提供新思路。

1 材料和方法

1.1 材料与仪器

材料:恒大蓝金中支成品卷烟(原烟)及同牌号烟丝由上海烟草集团有限责任公司天津卷烟厂提供;二氯甲烷(色谱纯)购于迪马科技股份有限公司;氯化钠(分析纯)购于天津市科密欧化学试剂开发中心。

仪器:GCMS-QP2010 Ultra气相色谱-质谱联用仪购于日本岛津公司;同时蒸馏萃取装置购于郑州赛克斯玻璃仪器有限公司。

1.2 方法

1.2.1 样品前处理

1) 样品烟末的制备。将烟丝置于40 °C的烘箱中烘干至能用手指捻碎,粉碎后过孔径为0.381 mm的筛,所得的烟末样品于温度为(22±1) °C、相对湿度为(60±3)%条件下平衡48 h。

2) 同时蒸馏萃取。在圆底烧瓶中加入25 g烟末样品、350 mL蒸馏水和25 g氯化钠,混合均匀后加热,保持溶液微沸;在另一圆底烧瓶加入50 mL二氯甲烷,60 °C水浴加热,进行同时蒸馏萃取;保持冷凝水源温度为1 °C,在水蒸气第二次回流时开始计时,蒸馏萃取2.5 h。收集萃取液并加入适量无水硫

酸钠, 过夜冷置后加入1 mL乙酸苯乙酯(0.641 8 g/L), 60 °C水浴加热浓缩至1 mL, 移取浓缩液至色谱瓶中, 待GC-MS进样分析。

1.2.2 GC-MS分析

1) 仪器分析条件

色谱条件: 色谱柱为DB-5MS毛细管柱(30.00 m×0.32 mm×0.25 μm); 进样口与传输线温度均为280 °C; 载气为氦气; 进样量1 μL; 分流进样, 分流比为5:1; 流速为1.00 mL/min, 溶剂切除时间为3 min。升温程序: 50 °C保持2 min, 以4 °C/min升至280 °C后保持20 min。

质谱条件: 电子轰击离子源为EI源, 电子能量为70 eV; 离子源温度为230 °C; 四级杆温度为150 °C; 电子倍增器电压为1 976 V; 质荷比扫描范围为30~550; 溶剂延迟8 min。

2) 定性定量分析方法

定性方法: 采用Wiley库和Nist17数据库对香味组分进行初步定性分析, 结合物质结构和性质, 经多张谱图比对验证后完成定性分析。

定量方法: 以10 μL质量浓度为0.641 8 g/L的乙酸苯乙酯为内标, 采用单一内标校正法进行半定量分析^[15], 以各香味成分的峰面积与内标面积之比为定量依据, 不考虑仪器信号响应差异, 假定相对校正因子为1, 回收率为100%, 香味组分的质量和浓度计算方法分别按式(1)和式(2)计算。

$$M_i = \frac{A_i}{A_s} \times F_i' \times M_s \quad (1)$$

$$C_i = \frac{M_i}{m} \quad (2)$$

式中: M_i 为香味物质的质量(μg), M_s 为内标物的质量(μg), A_i 为香味物质峰面积, A_s 为内标物峰面积, F_i' 为相对校正因子, C_i 为香味物质的质量浓度(μg/g), m 为称取的烟末质量(g)。

1.2.3 香味活力值(OAV)的计算

OAV可用于关键呈香物质的筛选^[18-19], 通常将OAV≥1的物质视为重要的呈香物质, 且OAV越大其香气贡献度越高。物质的香味阈值根据《化合物香味阈值汇编》^[20]和前人的研究结果^[21-22]确定。计算公式如式(3)所示。

$$OAV = C_i / OT_i \quad (3)$$

式中: C_i 为香味成分的质量浓度(μg/g), OT_i 为香味成分的嗅觉阈值(μg/g)。

1.2.4 卷烟抽吸干燥感评价方法

根据《卷烟 感官舒适性评价方法》(YC/T 496—2014)^[4]及已有研究^[23], 选取甜润、生津、口腔干燥感、舌面干燥感、舌根部干燥感和喉部干燥感作为卷烟抽吸干燥感评价指标; 采用基于几何平均复合判断矩阵的层次分析法确定单项指标权重^[24-25]。卷烟抽吸干燥感总分为100分, 各项指标评价等级及分值如表1所示。

表1 卷烟抽吸干燥感评分表

Table 1 Scoring sheet for cigarette smoking drying sensation

甜润(17分)			生津(15分)			口腔干燥感(24分)			舌面干燥感(6分)			舌根部干燥感(7分)			喉部干燥感(31分)		
I级	II级	III级	I级	II级	III级	I级	II级	III级	I级	II级	III级	I级	II级	III级	I级	II级	III级
17	13	9	15	11	8	24	20	16	6	4	2	7	5	4	31	23	16

将卷烟样品在温度(22±1) °C、相对湿度(60±3)%条件下平衡48 h后, 组织9名评吸专家进行打分, 各项指标以0.5分为记分单位, 按下式计算各单项指标平均得分, 结果保留2位小数。

$$\bar{X}_i = \frac{\sum X_i}{N} \quad (4)$$

式中: \bar{X}_i 为第*i*项指标平均得分; $\sum X_i$ 为第*i*项指标得分和; N 为评吸员人数。

1.2.5 卷烟加香方法

按照各香味物质在烟丝中的含量分别称取等

量标准品, 以95%乙醇溶液进行梯度稀释, 不同香味物质稀释倍数不同。根据烟丝中各香味物质的含量及单支卷烟质量, 计算每支卷烟不同香味物质的添加量, 各香味物质分别设置0.5倍、1.0倍和2.0倍3个添加水平(以苯乙醇为例, 0.5倍添加量为2.05 μg/g, 1.0倍添加量为4.10 μg/g, 2.0倍添加量为8.20 μg/g)。将不同添加量的香味物质用乙醇稀释至10 μL, 采用注射器将其添加至原烟中, 空白样品注射等量的95%乙醇溶液, 按照1.2.4所述方法进行平衡处理。

1.2.6 统计学分析方法

采用组内相关系数(ICC)作为评吸专家打分一致性的检验指标^[26], ICC取值范围为0~1。运用单因素方差分析法对卷烟抽吸干燥感得分进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 影响卷烟抽吸干燥感烟丝香味物质的筛选

2.1.1 烟丝香味物质GC-MS分析

烟丝香味物质的GC-MS定性与定量分析结果如表2所示。从烟丝样品中共检测出51种香味物质, 烟草香味物质总质量浓度为504.30 $\mu\text{g/g}$, 按化学结构或官能团将其分为6类: 醇类8种(41.12 $\mu\text{g/g}$), 醛类8种(54.26 $\mu\text{g/g}$), 酮类12种(199.96 $\mu\text{g/g}$), 酯类11种(179.72 $\mu\text{g/g}$), 酚类5种(8.89 $\mu\text{g/g}$), 杂环类7种(20.35 $\mu\text{g/g}$), 其中含量占比较高的酮类物质(39.65%)和酯类物质(35.64%)种类也较丰富。酮类物质赋予烟叶干草样甜香与花香^[27], 酯类物质赋予烟草成熟果香与酒香^[28], 二者均能减轻杂气, 柔和香味, 与卷烟感官品质密切相关^[29-30]。其他类别中部分香味物质也有提升烟气浓度和丰满度、改善余味、优化卷烟吸食品质的作用, 如醇类物质作为烟草中性致香成分, 能够提升烟草香气的圆润感; 醛类物质中的糠醛与卷烟烟气的焦甜感呈极显著正相关^[31]; 杂环类物质如吡咯, 能产生面包香或坚果香; 酚类物质可通过提供烟熏香丰富烟草香味^[32]。

表2 烟丝香味物质GC-MS定性与定量分析结果

Table 2 GC-MS qualitative and quantitative results of tobacco

shred aroma compounds			
分类	编号	香味物质	质量浓度/ ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)
醇类	1	苯乙醇	4.10
	2	植物醇	11.97
	3	香叶基香叶醇	1.52
	4	α -松油醇	0.27
	5	芳樟醇	2.93
	6	苯甲醇	4.53
	7	糠醇	11.56
	8	香叶醇	4.24
醛类	9	苯乙醛	5.86
	10	苯甲醛	3.13
	11	5-甲基糠醛	4.41

表2(续)

分类	编号	香味物质	质量浓度/ ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)
酮类	12	5-羟甲基糠醛	25.75
	13	十六烯醛	2.37
	14	5-甲基-2-呋喃甲醛	0.17
	15	壬醛	1.01
	16	糠醛	11.56
	17	6-甲基-5-庚烯-2-酮	1.34
	18	4-环戊烯-1,3-二酮	3.37
	19	茄尼酮	1.74
	20	香叶基丙酮	5.28
	21	巨豆三烯酮	135.78
	22	螺岩兰草酮	2.39
	23	2-甲基-四氢-3-呋喃酮	1.14
	24	法尼基丙酮	13.76
	25	氧化异氟尔酮	0.32
	26	马士酮	17.46
	酯类	27	甲基环戊烯酮
28		β -紫罗兰酮	1.68
29		二氢猕猴桃内酯	1.74
30		亚麻酸甲酯	44.86
31		反式-金合欢醇乙酸酯	10.28
32		棕榈酸甲酯	50.53
33		二十六烯酸甲酯	9.85
34		穿心莲内酯	36.10
35		棕榈酸乙酯	8.76
36		硬脂酸甲酯	0.24
37		亚油酸乙酯	1.49
38		二十碳酸乙烯基酯	1.45
39		亚硫酸环己基甲基十六烷基酯	14.42
酚类		40	2-甲氧基-4-乙基苯酚
	41	麦芽酚	0.34
	42	异丁香酚	0.14
	43	愈创木酚	2.92
	44	丁香酚	3.45
杂环类	45	2-乙酰基呋喃	4.81
	46	2-乙酰基吡咯	2.79
	47	1,2,3,4-四氢-1,1,6-三甲基萘	6.26
	48	3-乙烯基-2,3-二氢-1,1-二甲基-1H-茚	1.48
	49	1,5,8-三甲基-1,2-二氢萘	2.69
	50	3-(4,8,12-三甲基十三烷基)呋喃	1.28
	51	吡啶	1.04
烟丝香味物质总含量			504.30

2.1.2 烟丝香味物质OAV筛选

为进一步明确烟丝香味物质对卷烟整体香气的贡献度, 从GC-MS检测出的烟丝香味物质中筛选出OAV ≥ 1 的香味物质。从表3可以看出, 共筛选出

表3 24种烟丝香味物质的OAV

序号	香味物质	香味阈值/ ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	OAV
1	巨豆三烯酮	2.05×10^{-3}	6.62×10^4
2	棕榈酸乙酯	8.00×10^{-3}	1.10×10^4
3	吡嗪	1.40×10^{-3}	742.86
4	甲基环戊烯酮	2.60×10^{-2}	603.85
5	丁香酚	6.00×10^{-3}	575.23
6	2-甲基-四氢-3-呋喃酮	2.00×10^{-3}	570.00
7	苯乙醛	1.70×10^{-2}	344.45
8	苯乙醇	1.20×10^{-2}	341.97
9	壬醛	3.10×10^{-3}	325.81
10	2-乙酰基吡咯	1.10×10^{-2}	253.74
11	β -紫罗兰酮	7.00×10^{-3}	239.57
12	芳樟醇	1.50×10^{-2}	195.07
13	香叶基丙酮	6.00×10^{-2}	88.04
14	棕榈酸甲酯	2.00	25.27
15	异丁香酚	1.20×10^{-2}	11.67
16	二氢猕猴桃内酯	0.28	6.22
17	6-甲基-5-庚烯-2-酮	0.30	4.48
18	5-甲基糠醛	1.11	3.97
19	2-乙酰基呋喃	1.23	3.91
20	香叶醇	1.34	3.16
21	苯甲醇	2.54	1.78
22	麦芽酚	0.20	1.70
23	苯甲醛	2.00	1.57
24	糠醛	9.56	1.21

24种对卷烟整体香味贡献度高的香味物质,其OAV分布范围为 $1.21\sim 6.62\times 10^4$,总OAV为 8.15×10^4 。巨豆三烯酮的OAV(6.62×10^4)最高,糠醛的(1.21)最低,二者相差4个数量级,表明不同香味物质对烟草香味贡献度差异很大。通过组织评吸发现:二氢猕猴桃内酯具有的香豆素样香气能够丰满卷烟香味并降低刺激性;苯乙醇带有的玫瑰花香和蜜甜香能增加烟气的圆熟和津醇感,改善余味。

2.1.3 卷烟抽吸干燥感评分信度分析

将上述24种烟丝香味物质按不同添加量进行卷烟加香处理,以空白样品为对照组,按照1.2.4评价方法组织评吸专家打分,采用组内相关系数法对9位评吸专家的评分结果进行一致性检验,专家对卷烟抽吸干燥感指标的评分一致性较好($\text{ICC} > 0.75, P < 0.01$),对7项指标的评分一致性(表4)均达到中等及以上($\text{ICC} \geq 0.50, P < 0.01$),说明评吸数据可靠,可用于后续统计分析。

表4 卷烟抽吸干燥感专家评分一致性结果

评吸专家	ICC						
	甜润	生津	口腔干燥感	舌面干燥感	舌根部干燥感	喉部干燥感	卷烟抽吸干燥感
1	0.751	0.840	0.817	0.878	0.790	0.903	0.767
2	0.698	0.842	0.808	0.903	0.755	0.894	0.756
3	0.780	0.798	0.713	0.851	0.760	0.850	0.870
4	0.776	0.684	0.736	0.674	0.731	0.876	0.809
5	0.860	0.680	0.740	0.745	0.784	0.768	0.790
6	0.598	0.712	0.862	0.766	0.790	0.740	0.754
7	0.850	0.720	0.693	0.760	0.860	0.731	0.850
8	0.742	0.816	0.767	0.890	0.761	0.843	0.812
9	0.846	0.880	0.843	0.683	0.763	0.891	0.761

注: ICC取值范围为0~1, <0.50表明一致性较差, [0.50, 0.75)表明一致性中等, [0.75, 0.90)表明一致性较好, ≥ 0.90 表明一致性极好。

2.1.4 烟丝香味物质卷烟抽吸干燥感筛选结果

由表5可知,与对照组抽吸干燥感总得分相比,加入二氢猕猴桃内酯与苯乙醇的6种卷烟样品的总得分均明显升高,加入巨豆三烯酮和2-乙酰基吡咯的6种卷烟样品的总得分均显著降低,说明二氢猕猴桃内酯和苯乙醇对卷烟抽吸干燥感具有显著正向作用,巨豆三烯酮和2-乙酰基吡咯对卷烟干燥感具有显著负向作用,且在以本底含量0.5~2.0倍的添加范围内,4种香味物质对卷烟抽吸干燥感的正、

负影响不变。从单项指标得分来看,4种香味物质对卷烟干燥感各单项指标的影响差异较大:二氢猕猴桃内酯对甜润感和生津感改善明显,可显著增强烟气甜润度并促进口腔唾液分泌;苯乙醇显著改善口腔干燥感,有效降低烟气经口腔呼出后的干涩感;巨豆三烯酮和2-乙酰基吡咯分别显著加重喉部干燥感和口腔干燥感,且二者均会使口腔残留与涂布感明显增强。

某些烟丝香味物质在特定添加量下仅对单项

干燥感评价指标产生显著影响,如吡啶在0.5倍添加量下对口腔干燥感影响不显著,但随添加量的增加口腔干燥感增强,可能是由于卷烟燃烧产物中小分子醛类化合物(如甲醛、乙醛)生成量随吡啶添加量的增加而增加,进而加重口腔干燥感。其余香味物质不同添加量下卷烟抽吸干燥感总得分与对照组

相比均无显著差异,因此不纳入后续影响物质筛选与深入分析范畴。综合上述感官评价与统计分析结果,推测二氢猕猴桃内酯、苯乙醇、巨豆三烯酮和2-乙酰基吡咯为显著影响卷烟抽吸干燥感的重要烟丝香味物质。

表5 卷烟抽吸干燥感评价结果

Table 5 Evaluation results for the drying sensation of cigarette smoking

不同添加量的烟丝香味物质	甜润得分	生津得分	口腔干燥感得分	舌面干燥感得分	舌根部干燥感得分	喉部干燥感得分	抽吸干燥感总得分
对照	13.96f	12.03de	20.04f	3.96d	4.05d	25.04c	79.08de
二氢猕猴桃内酯0.5倍	14.03e	14.79a	21.72c	4.50c	5.11c	24.11d	84.26c
二氢猕猴桃内酯1.0倍	16.52a	14.06b	20.20e	4.49c	5.86a	26.94a	88.07a
二氢猕猴桃内酯2.0倍	15.01c	13.22c	20.93d	4.96b	5.05c	25.04c	84.21c
苯乙醇0.5倍	15.37b	12.01de	20.01f	4.87b	5.42b	26.15b	83.83d
苯乙醇1.0倍	14.20d	12.93d	23.03a	5.57a	5.05c	26.69a	87.47b
苯乙醇2.0倍	14.98c	14.01b	21.99b	4.02d	4.99c	25.04c	85.03b
2-甲基-四氢-3-呋喃酮0.5倍	13.85f	12.01de	19.89f	3.98d	4.52c	24.90c	79.15d
2-甲基-四氢-3-呋喃酮1.0倍	14.57cd	11.96de	20.03ef	4.18d	4.57c	24.68cd	79.99d
2-甲基-四氢-3-呋喃酮2.0倍	14.51cd	11.84de	20.68d	4.30cd	4.30d	25.20c	80.83d
6-甲基-5-庚烯-2-酮0.5倍	14.21d	11.36e	18.56g	4.52c	4.31d	25.03c	77.99de
6-甲基-5-庚烯-2-酮1.0倍	14.08e	11.89de	19.77fg	4.39cd	4.59c	24.56d	79.28d
6-甲基-5-庚烯-2-酮2.0倍	14.87c	12.01de	18.96f	4.09d	4.22d	23.90d	78.05de
β -紫罗兰酮0.5倍	13.96f	12.01de	20.11e	4.01d	4.10d	25.04c	79.23d
β -紫罗兰酮1.0倍	14.08e	11.74de	19.57f	3.93d	4.55c	24.66cd	78.53de
β -紫罗兰酮2.0倍	13.96f	12.11d	20.01f	3.90d	4.50d	24.50d	78.98d
香叶基丙酮0.5倍	13.90f	11.99de	19.98fg	3.90d	4.46d	24.15d	78.38de
香叶基丙酮1.0倍	14.50cd	11.97de	19.31fg	3.74d	4.52c	23.75de	77.79de
香叶基丙酮2.0倍	14.10d	11.60e	19.80fg	3.80d	4.30d	23.70de	77.30de
甲基环戊烯酮0.5倍	14.20d	11.70de	19.00fg	3.77d	4.51c	23.90de	77.08de
甲基环戊烯酮1.0倍	14.25d	11.52e	19.09fg	3.80d	4.20d	23.94de	76.80de
甲基环戊烯酮2.0倍	13.99e	11.50e	19.11fg	3.60de	4.16d	23.50de	75.86de
芳樟醇0.5倍	14.21d	11.64e	19.21fg	3.65d	3.20f	23.50de	75.41de
芳樟醇1.0倍	14.09e	11.59e	18.84f	3.62d	3.02g	23.47de	74.63e
芳樟醇2.0倍	14.50cd	11.87de	18.70f	3.75d	3.16g	23.40de	75.38de
香叶醇0.5倍	14.06e	11.66e	18.20f	3.80d	3.25fg	23.00de	73.97e
香叶醇1.0倍	13.92f	11.57e	18.14f	3.81d	3.57f	23.04de	74.05e
香叶醇2.0倍	13.90f	11.59e	18.31f	3.66d	3.50f	23.10de	74.06e
苯甲醇0.5倍	13.50fg	11.80de	18.50f	3.57de	3.40f	23.01de	73.78e
苯甲醇1.0倍	13.45fg	11.71de	18.67f	3.56de	3.47f	22.64de	73.50e
苯甲醇2.0倍	13.98f	11.90de	18.41f	3.50de	3.60f	22.90de	74.29e
棕榈酸乙酯0.5倍	14.21d	11.80de	18.50f	3.40de	3.40f	22.00e	73.31e
棕榈酸乙酯1.0倍	14.25d	11.48e	18.65f	3.18de	3.48f	22.01e	73.05ef
棕榈酸乙酯2.0倍	14.30d	11.30ef	18.21f	3.21de	3.48f	22.00e	72.50ef
异丁香酚0.5倍	14.05e	11.52e	18.65f	3.00d	3.59f	22.51de	73.32e

表5(续)

不同添加量的烟丝香味物质	甜润得分	生津得分	口腔干燥感得分	舌面干燥感得分	舌根部干燥感得分	喉部干燥感得分	抽吸干燥感总得分
异丁香酚1.0倍	13.52fg	11.68e	18.53f	3.29de	3.24fg	22.67de	72.93e
异丁香酚2.0倍	13.22g	11.11ef	18.60f	3.01d	3.36f	22.60de	71.90ef
苯甲醛0.5倍	13.36g	11.32e	18.30f	3.24de	3.33f	22.50de	72.05ef
苯甲醛1.0倍	13.87f	11.52e	18.48f	3.08e	3.29f	22.60de	72.84e
苯甲醛2.0倍	13.60fg	11.50e	18.70f	3.20de	3.20g	22.87de	73.07e
麦芽酚0.5倍	14.01e	11.61e	18.90f	3.10de	3.25fg	22.40de	73.27e
麦芽酚1.0倍	13.81f	11.53e	18.39f	3.17de	3.41f	22.51de	72.82ef
麦芽酚2.0倍	14.13de	11.21ef	18.45f	3.56de	3.50f	22.10de	72.95e
棕榈酸甲酯0.5倍	14.40d	11.40e	18.70f	3.50de	3.48f	21.50e	72.98e
棕榈酸甲酯1.0倍	14.04e	11.59e	18.58f	3.15de	3.44f	21.77e	72.57e
棕榈酸甲酯2.0倍	13.98f	11.32e	18.64f	3.01e	3.60f	21.00e	71.55ef
2-乙酰基呋喃0.5倍	13.50fg	11.25ef	19.00fg	3.20de	3.21g	21.90e	72.06ef
2-乙酰基呋喃1.0倍	13.94f	11.21ef	19.05fg	3.11de	3.41f	22.01e	72.73e
2-乙酰基呋喃2.0倍	13.80f	11.99de	19.11fg	3.12de	3.11g	21.58e	72.71e
壬醛0.5倍	13.80f	11.27ef	18.87f	3.30de	3.10g	22.33de	72.67e
壬醛1.0倍	13.94f	11.47e	18.24f	3.27de	3.34f	22.15de	72.41e
壬醛2.0倍	13.98f	11.21ef	18.20f	3.40de	3.48f	22.11de	72.38ef
糠醛0.5倍	14.13de	11.45e	18.20f	3.10de	3.60f	22.00e	72.48e
糠醛1.0倍	13.64fg	11.53e	18.24f	3.06e	3.57f	22.10de	72.14ef
糠醛2.0倍	14.04e	11.54e	18.31f	3.06e	3.55f	22.60de	73.10e
吡啶0.5倍	13.54fg	11.63e	18.20f	3.00e	3.30f	23.01de	72.68e
吡啶1.0倍	13.54fg	11.69e	17.90g	3.05e	3.24fg	23.21de	72.63e
吡啶2.0倍	14.04e	11.80de	17.65g	3.10de	3.00g	23.30de	72.89e
5-甲基糠醛0.5倍	13.80f	11.30ef	18.78f	3.11de	3.02g	21.50e	71.51ef
5-甲基糠醛1.0倍	13.09g	11.96de	19.08fg	3.16de	3.10g	21.68e	72.07ef
5-甲基糠醛2.0倍	12.98g	11.98de	19.00fg	3.15de	3.12g	21.44e	71.67ef
丁香酚0.5倍	13.00g	11.64e	18.66f	3.89d	3.22fg	21.80e	72.21ef
丁香酚1.0倍	13.24g	11.24ef	18.23f	3.56de	3.17g	21.99e	71.43ef
丁香酚2.0倍	13.12g	11.40e	18.55f	3.90d	3.11g	21.98e	72.06ef
苯乙醛0.5倍	13.11g	11.60e	18.21f	3.56de	3.00g	23.50de	72.98e
苯乙醛1.0倍	13.13g	11.82de	18.39f	3.18de	3.07g	22.59de	72.18ef
苯乙醛2.0倍	12.94g	11.80de	18.40f	3.12de	3.08g	22.10de	71.44ef
巨豆三烯酮0.5倍	12.04j	11.22ef	15.55i	2.85e	2.88h	18.41g	62.95f
巨豆三烯酮1.0倍	12.21h	11.16ef	15.96h	2.42g	3.05g	17.49g	62.29f
巨豆三烯酮2.0倍	12.01j	11.36e	12.13l	2.75f	3.55f	18.73f	60.53h
2-乙酰基吡咯0.5倍	12.14i	11.01f	15.91g	2.79f	3.05g	18.13h	63.03g
2-乙酰基吡咯1.0倍	12.99g	10.23g	14.90j	2.70f	2.71i	18.18h	61.71g
2-乙酰基吡咯2.0倍	13.01g	10.60g	14.20k	2.51g	2.11j	15.20i	57.63i

注：同列数据不同字母表示处理间的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

2.2 重要烟丝香味物质复合作用评价

2.2.1 响应面实验设计结果与方差分析

采用Design Expert 12对各因素进行回归拟合，

得到二次多项回归方程 $Y=48.83+40.00A+7.49B+18.71C+17.79D-1.85AB-3.19AC-1.33AD+5.09BC+3.12BD-10.29CD-12.40A^2-7.04B^2-5.84C^2-6.41D^2$ ，其中， Y 代表卷烟样品抽吸干燥感评得分； A 代表

二氢猕猴桃内酯的添加倍数; *B*代表苯乙醇的添加倍数; *C*代表巨豆三烯酮的添加倍数; *D*代表2-乙酰基吡咯的添加倍数。响应面实验结果及干燥感得分方差分析结果分别见表6和表7。由表6和表7可知,该模型 $P < 0.000 1$,说明该模型拟合极显著,具有统计学意义;失拟项 $P = 0.141 5$,表明响应值与预测值之间拟合良好;校正决定系数(r^2_{adj})=0.943 2,预测决定系数(r^2_{pred})=0.840 9,二者差值小于0.2,表明该模型稳定性好、预测结果稳定可靠;响应面变异系数(CV)为1.91%(<10%),表明本实验的可信度高。

表6 响应面实验设计及干燥感评吸得分

序号	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>Y</i>
1	1.0	1.0	1.0	1.0	93.50
2	0.5	1.0	0.5	1.0	82.00
3	1.0	1.0	1.0	1.0	91.20
4	2.0	1.0	0.5	1.0	88.21
5	1.0	1.0	1.0	1.0	92.50
6	1.0	1.0	0.5	2.0	87.30
7	1.0	1.0	1.0	1.0	92.50
8	1.0	2.0	2.0	1.0	83.11
9	2.0	1.0	2.0	1.0	78.00
10	0.5	0.5	1.0	1.0	82.60
11	1.0	0.5	2.0	1.0	82.60
12	2.0	1.0	1.0	0.5	89.70
13	0.5	1.0	1.0	2.0	77.20
14	2.0	2.0	1.0	1.0	81.31
15	1.0	0.5	0.5	1.0	93.01
16	2.0	1.0	1.0	2.0	78.40
17	2.0	0.5	1.0	1.0	89.40
18	1.0	0.5	1.0	0.5	89.90
19	0.5	1.0	1.0	0.5	85.00
20	0.5	2.0	1.0	1.0	80.21
21	1.0	2.0	1.0	2.0	78.10
22	0.5	1.0	2.0	1.0	79.00
23	1.0	2.0	1.0	0.5	83.10
24	1.0	0.5	1.0	2.0	78.40
25	1.0	1.0	2.0	0.5	91.40
26	1.0	1.0	1.0	1.0	93.80
27	1.0	2.0	0.5	1.0	81.10
28	1.0	1.0	2.0	2.0	65.00
29	1.0	1.0	0.5	0.5	92.20

表7 干燥感评吸得分方差分析结果

来源	平方和	自由度	均值	<i>F</i>	<i>P</i>
模型	1 260.87	14	90.06	34.20	<0.000 1
<i>A</i>	5.26	1	5.26	2.00	0.179 4
<i>B</i>	22.24	1	22.24	8.45	0.011 5
<i>C</i>	193.14	1	193.14	73.35	<0.000 1
<i>D</i>	373.27	1	373.27	141.76	<0.000 1
<i>AB</i>	4.99	1	4.99	1.90	0.190 1
<i>AC</i>	14.77	1	14.77	5.61	0.032 8
<i>AD</i>	2.55	1	2.55	0.97	0.341 5
<i>BC</i>	37.66	1	37.66	14.30	0.002 0
<i>BD</i>	14.15	1	14.15	5.37	0.036 1
<i>CD</i>	153.53	1	153.53	58.31	<0.000 1
<i>A</i> ²	234.71	1	234.71	89.14	<0.000 1
<i>B</i> ²	75.76	1	75.76	28.77	<0.000 1
<i>C</i> ²	52.08	1	52.08	19.78	0.000 6
<i>D</i> ²	62.79	1	62.79	23.85	0.000 2
失拟项	36.86	14	2.63		
残差	32.68	10	3.27	3.13	0.141 5
纯误差	4.18	4	1.05		
总离差	1 297.74	28			

2.2.2 响应面分析

采用Box-Behnken模型对卷烟抽吸干燥感得分进行响应面分析及线性回归方程拟合,依据三维曲面图与等高线图分析各因素两两交互作用对卷烟抽吸干燥感的影响程度,结果如图1所示。由图1可知,*C*(巨豆三烯酮的添加倍数)和*D*(2-乙酰基吡咯的添加倍数)对响应值有显著影响,其次是*B*(苯乙醇的添加倍数),*A*(二氢猕猴桃内酯的添加倍数)的影响最小。对比各因素交互作用对响应值的影响,*C*与*D*交互作用对应的响应面曲面坡度更陡,说明*C*与*D*的交互作用对响应值影响显著;*A*与*B*、*B*与*C*及*A*与*C*的交互作用对响应值的影响不显著。实验结果显示,对响应值*Y*影响较显著的参数组合分别为: $A=1.43, B=0.73, C=0.99, D=1.03$;或 $A=0.51, B=0.55, C=1.91, D=1.69$,对应模型预测响应值*Y*分别为93.86、64.44。

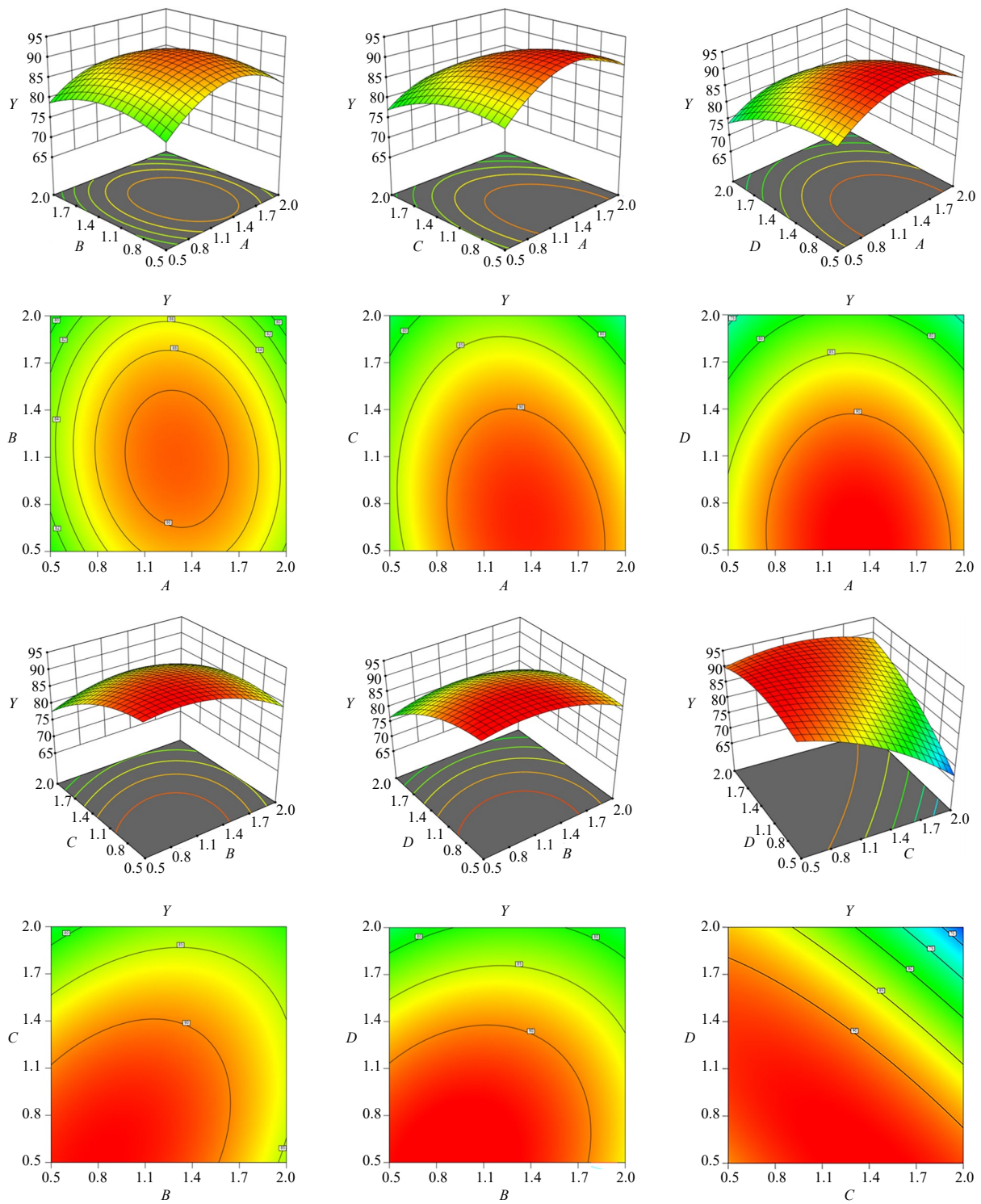


图1 响应面图和等高线图

Fig. 1 Response surface plot and contour plot

综上，4种重要烟丝香味物质中，巨豆三烯酮和2-乙酰基吡咯对卷烟抽吸干燥感影响较显著，其次是苯乙醇，二氢猕猴桃内酯的影响最小；巨豆三烯酮和2-乙酰基吡咯的交互作用对卷烟抽吸干燥感影响最显著。根据实际工艺条件，将香味物质在

烟丝中的添加量调整为：二氢猕猴桃内酯1.50倍、苯乙醇0.75倍、巨豆三烯酮1.00倍、2-乙酰基吡咯1.00倍；或二氢猕猴桃内酯0.50倍、苯乙醇0.50倍、巨豆三烯酮2.00倍、2-乙酰基吡咯1.75倍。

2.2.3 验证实验

以烟丝中香味物质含量计,对卷烟抽吸干燥感影响最显著的2种添加量组合分别为:组合I,二氢猕猴桃内酯2.61 $\mu\text{g/g}$ 、苯乙醇3.08 $\mu\text{g/g}$ 、巨豆三烯酮135.78 $\mu\text{g/g}$ 、2-乙酰基吡咯2.79 $\mu\text{g/g}$;组合II,二氢猕猴桃内酯0.87 $\mu\text{g/g}$ 、苯乙醇2.05 $\mu\text{g/g}$ 、巨豆三烯酮271.56 $\mu\text{g/g}$ 、2-乙酰基吡咯4.88 $\mu\text{g/g}$ 。依照上述组合对卷烟样品分别进行加香验证重复实验($n=5$),并按照1.2.4评价方法组织评吸专家分别进行打分,结果如表8所示。由表8可知,组合I与组合II模型预测值与重复实验结果吻合良好(相对误差 $\leq 1.97\%$),且实测数据标准差小(标准差 ≤ 0.23),表明模型具有较高的可靠性,可以显著改善或加重卷烟抽吸干燥感。

表8 验证实验结果

组合	模型预测值	实测均值 \pm 标准差($n=5$)	相对误差
I	93.86	92.05 \pm 0.23	1.97%
II	64.44	65.23 \pm 0.21	1.21%

3 结论与讨论

本研究通过GC-MS分析,从恒大蓝金中支卷烟烟丝中检测出51种主要香味物质,结合香味活力值(OAV)鉴定出24种贡献度较高的香味物质,并筛选出二氢猕猴桃内酯、苯乙醇、巨豆三烯酮和2-乙酰基吡咯4种显著影响卷烟抽吸干燥感的重要烟丝香味物质。其中,二氢猕猴桃内酯(内酯类)和苯乙醇(醇类)对卷烟抽吸干燥感具有正向改善作用,前者可能通过其香豆素样香气丰满烟香并降低刺激性;后者可能依托其甜润的花香特征中和烟气刺激性并提升湿润感、缓解干燥感。而巨豆三烯酮(萜烯类)与2-乙酰基吡咯(吡咯类)对卷烟抽吸干燥感的负向加重作用则可能源于其热解特性,前者高温裂解可能生成具有收敛性的醛酮类产物,加剧喉部与口腔干燥不适感^[33];后者的碱性特征可能通过改变烟气pH影响口腔黏膜的水分平衡^[34]。

Box-Behnken响应面设计实验结果表明,巨豆三烯酮与2-乙酰基吡咯的交互作用对卷烟抽吸干燥感的影响最为显著($P<0.0001$),表现为剂量依赖的“拮抗-协同”转化特征^[35];苯乙醇的作用表现出“阈值效应”,即低浓度时抑制卷烟抽吸干燥感,

超量添加可能因香气过饱和而增加刺激性。验证实验证实:组合I(二氢猕猴桃内酯2.61 $\mu\text{g/g}$ 、苯乙醇3.08 $\mu\text{g/g}$ 、巨豆三烯酮135.78 $\mu\text{g/g}$ 、2-乙酰基吡咯2.79 $\mu\text{g/g}$)通过合理调控正向或负向影响卷烟抽吸干燥感的香味物质的添加比例,平衡两类物质对抽吸干燥感的调控效应,有效改善了卷烟抽吸干燥感,验证了响应面模型的预测可靠性,为“减害提质”型卷烟配方优化提供了可行思路;组合II(二氢猕猴桃内酯0.87 $\mu\text{g/g}$ 、苯乙醇2.05 $\mu\text{g/g}$ 、巨豆三烯酮271.56 $\mu\text{g/g}$ 、2-乙酰基吡咯4.88 $\mu\text{g/g}$)显著加重卷烟抽吸干燥感,凸显了负向影响因素的协同放大效应,实际生产中需严格控制此类物质的添加量。

本研究明确了影响恒大蓝金中支卷烟抽吸干燥感的4种重要烟丝香味物质,揭示了其复合作用对感官干燥感的调控规律,可为同类卷烟的配方优化提供参考,但研究仍存在以下局限性:1) 普适性验证不足。本研究虽建立了适用于单一品牌卷烟(恒大蓝金中支)的香味物质筛选方法,但烟丝香味成分因卷烟品牌、类型和配方不同而存在显著差异,其对卷烟抽吸干燥感产生的影响也不尽相同,因此后续研究需拓展研究对象,选取不同品牌、不同类型的卷烟,以验证本研究筛选的关键香味物质影响规律及构建模型的普适性;2) 热解机制尚不明确。本研究虽明确了巨豆三烯酮与2-乙酰基吡咯交互作用对卷烟干燥感的显著影响,但二者交互作用的热解动力学基础、高温燃烧转化路径及关键热解产物均未明确。由于烟气中有数千种复杂成分,不能排除燃烧过程中其他物质的干扰,后续需结合热重-质谱联用(TG-MS)等热分析与质谱联用技术,深入研究重要烟丝香味物质在燃烧过程中的转化路径及其产物对卷烟抽吸干燥感的具体贡献。

参考文献:

- [1] WANG Z, ZHENG Q D, GARTNER C, et al. Comparison of tobacco use in a university town and a nearby urban area in China by intensive analysis of wastewater over one year period[J]. Water Research, 2021, 206: 117733.
- [2] 张勇刚, 宋朝鹏, 李常军, 等. 烟叶感官质量评价研究进展[J]. 湖北农业科学, 2010, 49(9): 2271-2274.
- [3] 孙东亮, 赵华民. 基于消费者感知的细支卷烟轻松感、满足感设计思路[J]. 中国烟草学报, 2017, 23(2): 42-49.
- [4] YC/T 496—2014. 卷烟 感官舒适性评价方法[S].

- [5] YC/T 497—2014. 卷烟 中式卷烟风格感官评价方法[S].
- [6] YC/T 564—2018. 基于消费体验的中式卷烟感官评价方法[S].
- [7] 冯茜, 邓瑞君, 师家园. 优化制丝工艺路线的研究与应用[J]. 轻工科技, 2021, 37(12): 20–21, 41.
- [8] 姚光明, 乔学义, 申玉军, 等. 真空回潮工序对烤烟烟叶感官质量的影响[J]. 烟草科技, 2011, 44(3): 5–8.
- [9] 潘广乐, 郭斌, 王宗英, 等. 滚筒烘丝机参数对烟丝物理和感官质量的影响[J]. 河南科技, 2020, 39(8): 60–63.
- [10] 楚文娟, 樊文鹏, 高子婷, 等. 新型保润剂丙二醇吡咯酯的制备及其对再造烟叶保润效果研究[J]. 轻工学报, 2024, 39(2): 87–93.
- [11] 梁淼, 侯佩, 李晓, 等. 卷烟保润材料及作用机理研究进展[J]. 江西农业学报, 2016, 28(10): 46–50, 55.
- [12] 张丽. 卷烟保润性能及其应用技术研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2012.
- [13] 王亚龙, 程传玲. 异麦芽酮糖醇在卷烟增香保润中的应用[J]. 云南化工, 2021, 48(6): 50–51, 64.
- [14] 史宏志, 刘国顺. 烟草香味学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.
- [15] 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.
- [16] 曹建敏, 刘帅帅, 邱军, 等. 烤烟重要致香物质与评吸质量的相关性研究[J]. 中国烟草科学, 2012, 33(6): 75–79.
- [17] 王宣静, 张天兵, 苏海洋, 等. 枫槭叶酶解液美拉德反应及其挥发性成分分析[J]. 食品工业科技, 2021, 42(3): 222–229.
- [18] 刘哲. 基于香气活力值的烟叶、卷烟、烟草添加剂主要香气成分研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2020.
- [19] 毛亚浩, 丁静怡, 余君, 等. 基于OAV和PCA的茄芯烟叶中关键呈香物质[J]. 湖北工业大学学报, 2023, 38(1): 47–52.
- [20] 里奥·范海默特. 化合物香味阈值汇编[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [21] 杨靖, 宋梦坤, 杨鹏飞, 等. 基于香气活力值的烤烟烟叶清(青)香风格特征分析[J]. 烟草科技, 2020, 53(1): 34–43.
- [22] 岳翠男, 秦丹丹, 李文金, 等. 基于HS-SPME-GC-MS和OAV鉴定浮梁红茶关键呈香物质[J]. 食品工业科技, 2022, 43(9): 251–258.
- [23] 李朝建, 李晓刚. 烤烟主要化学成分与吸味品质的相关性[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2009, 35(3): 252–256.
- [24] 刘万里, 刘三阳. AHP中群决策判断矩阵的构造[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(11): 1907–1908, 1913.
- [25] 江厚龙, 梁颖涛, 黄富饶, 等. 基于最优组合赋权法的基地单元初烤烟叶可用性分区评价[J]. 西南农业学报, 2024, 37(12): 2710–2719.
- [26] KARBALAIE A, ETEHADTAVAKOL M, ABTAHI F, et al. Image enhancement effect on inter and intra-observer reliability of nailfold capillary assessment[J]. Microvascular Research, 2018, 120: 100–110.
- [27] 张梦玥, 史宏志, 毕艳玖, 等. 白肋烟、晒烟和烤烟烟叶在6年贮藏过程中主要酮类香气成分的变化趋势[J]. 中国烟草学报, 2018, 24(5): 23–34.
- [28] 赵嘉幸, 陈黎, 任宗灿, 等. GC-MS/MS法测定烟草中的57种酯类香味成分[J]. 烟草科技, 2019, 52(12): 39–49.
- [29] 杜咏梅, 张建平, 王树声, 等. 主导烤烟香型风格及感官质量差异的主要化学指标分析[J]. 中国烟草科学, 2010, 31(5): 7–12.
- [30] 胡建军, 周冀衡, 李文伟, 等. 烤烟香味成分与其感官质量的典型相关分析[J]. 烟草科技, 2007, 40(3): 9–15, 22.
- [31] 薛超群, 王建伟, 奚家勤, 等. 烤烟烟叶理化指标与焦甜感程度的关系[J]. 烟草科技, 2011, 44(12): 9–13.
- [32] 朱浩, 柴国璧, 迟广俊, 等. 卷烟主流烟气烟熏香成分的感官导向分析[J]. 烟草科技, 2017, 50(1): 41–49.
- [33] 侯英, 徐济仓, 王保兴, 等. 叶黄素的热解产物分析[J]. 烟草科技, 2007, 40(12): 27–32.
- [34] 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.
- [35] 陈敏, 张瑾, 董欣琪, 等. 多元抗生素与重金属混合物对蛋白核小球藻的时间依赖性协同与拮抗作用[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(5): 850–859.

责任编辑: 毛友纯

英文编辑: 罗 维