

烟草和烟气化学

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).
LIU Mengmeng, ZHANG Yuan, SUN Xuehui, et al. Effect of glycerol content in reconstituted tobacco made by slurry process on the release of aromatic components from heated cigarette smoke[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2023, 29(5). doi:10.16472/j.chinatobacco. 2022.093

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

刘梦梦¹, 张媛¹, 孙学辉², 秦亚琼², 朱龙杰¹, 伍鹏霖¹, 朱怀远¹, 曹毅^{1*}

1 江苏中烟工业有限责任公司, 南京市建邺区兴隆大街 29 号 210019;

2 中国烟草总公司郑州烟草研究院, 郑州高新技术产业开发区枫杨街 2 号 450001

摘要: 【目的】探究稠浆法烟草薄片甘油含量对加热卷烟烟气中挥发/半挥发性香味成分释放的影响。【方法】采用 GC/MS 分析加热卷烟烟气中 179 种挥发/半挥发性香味成分的释放量, 对甘油含量与各香味成分的单位干基释放量进行相关性分析。【结果】(1) 甘油含量从 9.36% 增加到 28.40%, 挥发/半挥发性成分释放总量先上升后下降, 与甘油含量呈二次函数变化关系, R^2 为 0.9199。(2) 烟气中羧酸类、醛酮类、酚类、酯类、内酯类及氮杂环类物质的释放量随甘油含量的增加呈二次函数变化, 相关系数 R^2 分布在 0.8453~0.9465, 烃类物质释放量与甘油含量呈线性变化关系, R^2 为 0.9618。(3) 低沸点且与甘油容易形成氢键的成分, 其释放量与甘油含量呈正相关, 而含有长烷烃链或者大位阻取代基的高沸点类物质释放量与甘油含量一般呈弱相关。所检出的香味成分中, 单位干基释放量与甘油施加量呈显著正相关的有 12 种。

关键词: 加热卷烟; 香味成分; 甘油含量; 相关性分析; 沸点; 氢键

加热卷烟作为一种新型烟草制品, 加热温度在 200℃~400℃, 较传统卷烟的有害成分和侧流烟气释放量明显减少^[1-3], 近年来发展迅速。烟草制品的品质是由其烟气释放特征所决定的, 因此, 研究烟气中各种挥发性半挥发性香味成分的释放规律及其影响因素对加热卷烟的发展意义重大。许晓黎^[4]、司晓喜^[5]和罗彦波^[6]等在分析方法开发方面做了大量工作, 主要用于特定一种或一类物质的分析。赵国豪等^[7]研发了具有内加热功能的加热卷烟烟具装置和配套使用的烟支, 采用 GC/MS 法, 测定主流烟气中 32 种香味成分的释放量, 并对分析不同烟叶原料的差异。朱浩等^[8]研究了加热温度对 3 种加热不燃烧卷烟烟气中烟熏香成分种类和释放量的影响, 并与传统卷烟进行了比较。

与常规卷烟不同的是, 加热卷烟原料中添加大比例甘油作为发烟剂以提升气溶胶释放量, 并携带烟碱

和香味物质^[9-10]。为探究甘油对加热卷烟烟气释放的影响, 研究者们开展了一些工作。曹芸等^[11]为揭示加热状态下烟草颗粒烟气释放规律, 采用湿法造粒技术, 利用热分析仪和锥型量热仪研究甘油添加量与温度对其热解和烟气释放特性的影响。周明慧等^[12]以不同甘油质量分数的再造烟叶颗粒为原料, 通过二维气相色谱-质谱对受热释放的粒相物香味成分进行分析, 详细研究了加热温度对各类成分释放的影响。但目前研究中甘油的施加方式多为喷洒在加热卷烟原料表面^[13-14], 朱龙杰等^[15]采用稠浆法制作烟草薄片工艺, 制作了不同甘油添加比例的烟草薄片, 对其进行热重和热重-气质联用分析, 考察过程中甘油的热稳定性以及甘油添加比例对烟草薄片挥发性物质的影响规律, 但尚未见甘油施加量对加热卷烟挥发/半挥发性成分释放影响的研究。基于此, 本研究采用稠浆法制作 6 个不同甘

基金项目: 江苏中烟工业有限责任公司科技项目“加热卷烟烟气 pH 值和游离烟碱含量的关系研究”(202024)

作者简介: 刘梦梦(1990—), 硕士, 工程师, 主要从事烟草化学研究, Tel: 025-69896754, Email: 202356@jszygs.com

通讯作者: 曹毅(1980—), 博士, 高级工程师, Email: caoyi@jszygs.com

收稿日期: 2022-05-10; 网络出版日期: 2023-03-10

油含量的烟草薄片,并对制成的加热卷烟烟气中挥发/半挥发性成分进行检测,重点考察甘油含量对各成分释放的影响,旨在为加热卷烟产品研发及品质改善提供参考。

1 材料与方法

1.1 仪器、试剂与材料

林赛斯 TIM TESTER 材料导热及热阻测试系统(德国 Linseis 公司); SM450 型 20 孔道吸烟机(英国 Cerulean 公司); 7890B/5977A 气相色谱-质谱联用仪(美国 Agilent 公司); SML600E&H 直线型加热不燃烧卷烟吸烟机(合肥众沃仪器技术有限公司); IQOS 3 DUO 加热卷烟烟具(美国 Philip Morris 公司); Silver Tip Boy 卷烟管装填器(德国 Gizeh 公司); BEVS1806A/200 型磁吸式可调涂布器(广州盛华实业有限公司); KBF720 型恒温恒湿箱(德国 Binder 公司)。

羧甲基纤维素钠盐(CMC)、丙二醇、甘油、正丁醇、1,3-丁二醇:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;乙酸苯乙酯(99%,美国 Sigma Aldrich 公司);反式-3-己烯酸(99%,日本 Tokyo Chemical Industry 公司); N,O-双(三甲基硅基)三氟乙酰胺(BSTFA, >99%,美国 Regis Technologies 公司);三甲基氯硅烷(TMCS, 99%,美国 Sigma Aldrich 公司);二氯甲烷(色谱纯,德国 Merck 公司);超纯水(电阻率 $\geq 18.2 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$,德国默克公司)。

木浆纤维(无锡市斯木德工程材料有限公司);烟草粉末(福建三明);加热卷烟烟支空管(南通烟滤嘴有限责任公司);剑桥滤片: $\Phi 44 \text{ mm}$ (德国 Borgwaldt 公司)。

1.2 实验方法

1.2.1 稠浆法烟草薄片及加热卷烟的制作

按照稠浆法烟草薄片的生产工艺^[16],制浆时,按照木浆纤维、羧甲基纤维素钠盐(CMC)和烟粉质量比为 35:6:780 进行投料,不添加香精,通过改变甘油的添加量来调整薄片中的甘油含量。制作得到的烟草薄片在 60°C 下烘 1.5 h,用于薄片成型和去除多余水分。将烟草薄片置于温度 22°C 、相对湿度 50% 的恒温恒湿箱中平衡 48 h 备用。

将平衡好的烟草薄片切条后加入加热卷烟烟支空管,制作成加热卷烟,控制加热卷烟中薄片添加量为 0.3 g/支 。

1.2.2 烟草薄片导热系数的测试

将片状烟草薄片制备成边长 25 mm 的方形样品,

采用导热及热阻测试系统测试样品的导热系数。其中,上、下加热米条实验温度分别为 40°C 和 20°C ,荷载压强 0.2 MPa ,热流稳定平衡 300 s。

1.2.3 烟草薄片水分和甘油含量的测试

将不同甘油添加比例的烟草薄片在温度 22°C 、相对湿度 50% 条件下平衡 48 h^[17]。采用行业标准方法^[18-19],测试不同薄片样品的水分和甘油含量。

1.2.4 加热卷烟烟气挥发/半挥发性香味成分的分析方法

由于加热卷烟烟气中香味成分释放水平较低,因此采用加拿大深度抽吸模式,即抽吸容量 55 mL ,抽吸时间 2 s,抽吸间隔 30 s 捕集烟气。加热装置采用商品化 IQOS 加热器具,每支加热卷烟固定抽吸 11 口,每张剑桥滤片收集 4 支加热卷烟烟气粒相物,每个样品均平行抽吸 2 次。采用实验室自建方法^[20],分析测试加热卷烟烟气中挥发/半挥发性香味成分,主要分析步骤及参数如下:将捕集后的剑桥滤片放入玻璃瓶中,加入 20 mL 二氯甲烷萃取剂,超声萃取 40 min, $0.45 \mu\text{m}$ 微孔滤膜过滤,滤液进行 GC-MS/MS 分析。同时采用硅烷化衍生分析目标物中的酸性香味成分,取 $800 \mu\text{L}$ 滤液于色谱瓶中,加入 $300 \mu\text{L}$ 含 1% TMCS 的 BSTFA 衍生化试剂, 60°C 水浴衍生 40 min。GC-MS/MS 仪器分析方法包含 3 个,其中中性和碱性香味成分分别采用 DB-5MS ($60 \text{ m} \times 0.25 \text{ mm} \times 0.25 \mu\text{m}$) 和 DB-624 ($60 \text{ m} \times 0.25 \text{ mm} \times 1.4 \mu\text{m}$) 两种色谱柱分析,而硅烷化后的酸性成分采用 DB-5MS ($60 \text{ m} \times 0.25 \text{ mm} \times 0.25 \mu\text{m}$) 色谱柱分析。

1.2.5 数据分析与处理

基于 1.2.3 测得的不同甘油添加比例烟草薄片中的甘油和水分含量,利用公式(1),得到烟草薄片中的单位干基率,以百分数表示。

$$R = \frac{1-m_g-m_w}{1} \times 100\% \quad (1)$$

其中: R —烟草薄片中含甘油和水分的单位干基率,%; m_g —每克烟草薄片中的甘油质量, g; m_w —每克烟草薄片中的水分质量, g。最终烟草薄片的实测甘油含量和单位干基率见表 1。

基于 1.2.4 测得的加热卷烟烟气中挥发/半挥发性香味成分的释放量,利用公式(2)计算得到烟草单位干基质量下各组分的释放量。

$$S_i = \frac{m_n}{R_n} \quad (2)$$

其中: S_i —烟草薄片挥发/半挥发性成分单位干基质量释放量, $\mu\text{g/支}$; m_n —烟草薄片挥发/半挥发性香味成分检测量, $\mu\text{g/支}$; R_n —不同甘油添加比例烟

草薄片中不含甘油和水分的单位干基率，%。

表 1 不同甘油添加比例烟草薄片甘油、水分和单位干基率
Tab.1 Contents of glycerol and moisture as well as unit dry basis ratio in reconstituted tobacco with different glycerol addition ratios

甘油含量设计值/%	甘油/(mg/g)	水分/(mg/g)	单位干基率/%
10	93.58	114.10	79.2
14	139.84	131.60	72.9
18	176.34	138.06	68.6
22	209.65	149.40	64.1
26	249.30	156.00	59.5
30	284.04	162.89	55.3

2 结果与讨论

2.1 甘油含量对加热卷烟烟气酸、中、碱性香味成分释放总量的影响

通过分析计算，得到不同甘油含量的加热卷烟烟气中 179 种香味成分的释放总量，见表 2。甘油含量从 9.36%增加到 28.40%，加热卷烟烟气中 179 种成分释放总量在 403.26~616.69 μg/支之间变化（图 1）。随着甘油含量的增加，烟气香味成分释放总量呈现先上升后下降的趋势，在 16.7%左右出现极大值，与甘油含量呈二次函数变化关系， $R^2=0.9199$ 。

表 2 不同甘油含量加热卷烟烟气 179 种成分释放总量
Tab.2 The total release of 179 components in the smoke of heated cigarettes with different glycerol content

甘油含量/%	9.36	13.98	17.63	20.97	24.93	28.40
香味成分释放总量/(μg/支)	527.81	584.06	592.62	616.69	472.52	403.26

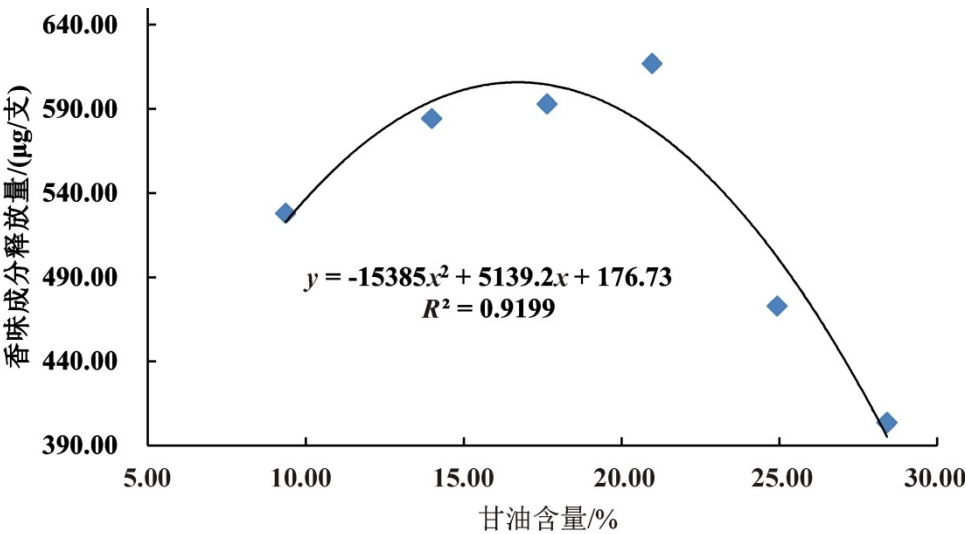


图 1 烟气中 179 种香味成分释放总量随甘油含量的变化
Fig.1 Changes of total release amount of 179 aroma components in smoke with different glycerol content

理论上，在加热温度相同的情况下，随着甘油含量的增加，烟草干基重量下降，则烟气中香味成分的释放量应该呈降低趋势，而由图 1 可知，烟气香味成分释放总量呈先上升后下降的趋势。一方面，甘油的加入能够改善烟草薄片的热导性能，增加低温下的失重比例，降低一些香味物质释放所需温度^[12-13]。如表 3 所示，甘油含量从 9.36%增加到 28.40%，烟草薄片的热导率从 0.115 W/(m·K)增加到 0.250 W/(m·K)。另一方面，甘油的溶剂化和扩散效应对香味物质的释放具有携带作用^[12]。

表 3 不同甘油添加比例烟草薄片的热导率（30℃）
Tab.3 Thermal conductivity of reconstituted tobacco with different glycerol addition ratios (30℃)

甘油添加量/%	热导率 λ/（W/(m·K)）
0	0.078
9.36	0.115
13.98	0.151
17.63	0.182
20.97	0.203
24.93	0.219
28.40	0.250

2.2 甘油含量对烟气中各类成分释放量的影响

179 种香味成分具体包括羧酸类 42 种、醇类 18 种、酚类 17 种、酯类 16 种、内酯类 11 种、醛酮类 47 种、氮杂环类 25 种以及烃类 3 种, 具体见表 4。各类成分释放量占总量比例随甘油含量的变化情况见图 2。结果显示, 加热卷烟烟气中羧酸类、醛酮类和酯类

含量较高, 相对比例均在 20% 以上, 氮杂环类成分比例最低, 为 1% 左右。甘油含量从 9.36% 增加到 28.40%, 羧酸类和醇类的占比先降低后升高, 酯类、内酯类和酚类的占比则先升高后降低, 烃类成分的占比逐渐降低, 而醛酮类和氮杂环类占比变化规律不明显。

表 4 不同甘油含量加热卷烟烟气中各类成分释放总量

Tab.4 Total release amount of various components in the smoke of heated cigarettes with different glycerol content (μg/支)

甘油含量/%	羧酸类	醛酮类	酯类	醇类	内酯类	烃类	酚类	氮杂环类
9.36	153.40	121.28	109.76	57.50	34.73	33.58	12.28	5.29
13.98	154.99	137.14	136.21	60.73	44.57	28.03	16.17	6.23
17.63	159.31	132.95	142.65	61.22	46.02	27.77	17.04	5.66
20.97	156.27	141.02	168.51	64.24	42.94	21.60	16.59	5.53
24.93	127.26	107.27	117.73	58.53	28.92	15.97	12.39	4.44
28.40	117.91	85.22	87.00	60.34	22.62	14.61	11.30	4.26

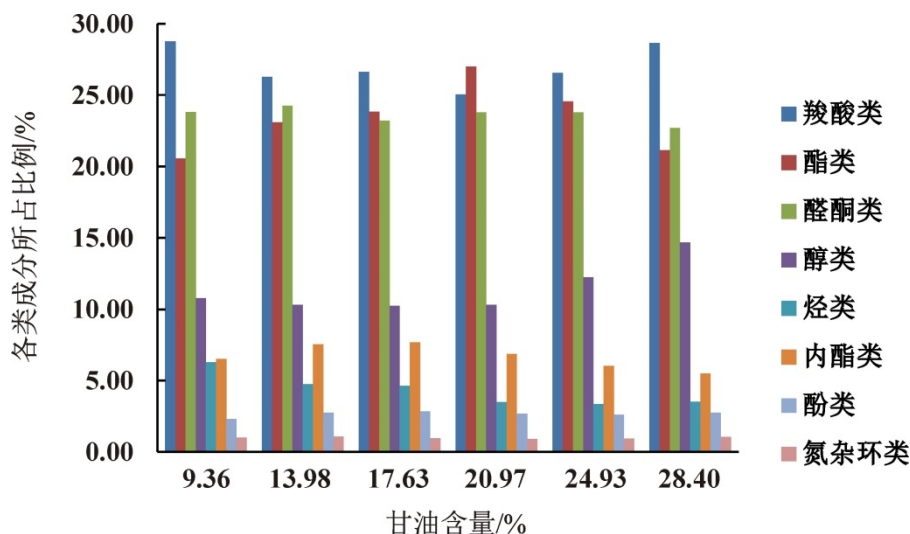


图 2 不同甘油含量加热卷烟烟气中各类成分的相对比例

Fig.2 Relative proportions of various components in the smoke of heated cigarettes with different glycerol content

各类成分释放量随甘油含量变化趋势见图 3。结果显示, 烟气中羧酸类、醛酮类、酚类、酯类、内酯类及氮杂环类物质的释放量随甘油含量的增加呈现先升高后降低的趋势, 与总量的变化趋势相同。烟气中的有机酸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, 醛酮类物质主要源于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, 酚类主要来源于绿原酸、奎尼酸、芸香苷、芦丁、氨基酸以及一些大分子物质如纤维素、木质素等的热解, 酯类和内酯类物质主要源于胡萝卜素、糖以及部分氨基酸的热解, 而小分子氮杂环化合物主要

源于氨基酸、蛋白质及其他含氮物质的热解和美拉德反应产物的转移。甘油的加入起到了传热媒介的作用, 有利于热量稳定且快速地传递, 因此对上述成分的迁移释放都有促进作用^[21-23]。

由图 3 可知, 羧酸类、醛酮类、酚类、酯类、内酯类及氮杂环类物质的释放量随甘油含量的增加呈二次函数变化关系, 相关系数 R^2 分布在 0.8453~0.9465, 释放量的最大值分别出现在 14.8%、16.4%、17.9%、18.1%、16.7%及 15.1%, 拐点对加热卷烟芯材中优化甘油施加量具有参考指导意义。

在醇类成分释放量与甘油含量的二次函数拟合曲

线中, R^2 为 0.5234, 即随着甘油含量的增加, 烟气中醇类物质的释放量也呈现先升高后降低的趋势, 但降低趋势没有羧酸等 6 类物质显著。推测原因是醇类物质与甘油性质相似, 且因为氢键的存在而分子间作用力较强, 甘油对烟气中醇类物质的携带能力较强。

由图 3 可知, 烟气中烃类物质释放量与甘油含量

呈线性关系, 随着甘油含量增加, 烃类物质释放量降低, R^2 为 0.9618。随着甘油含量增加, 烟草干基重量减小, 使得释放的烃类物质质量减少; 此外, 烃类在几类物质中极性最低, 无法与甘油分子之间形成氢键, 分子间作用力弱, 甘油对其携带能力较差。

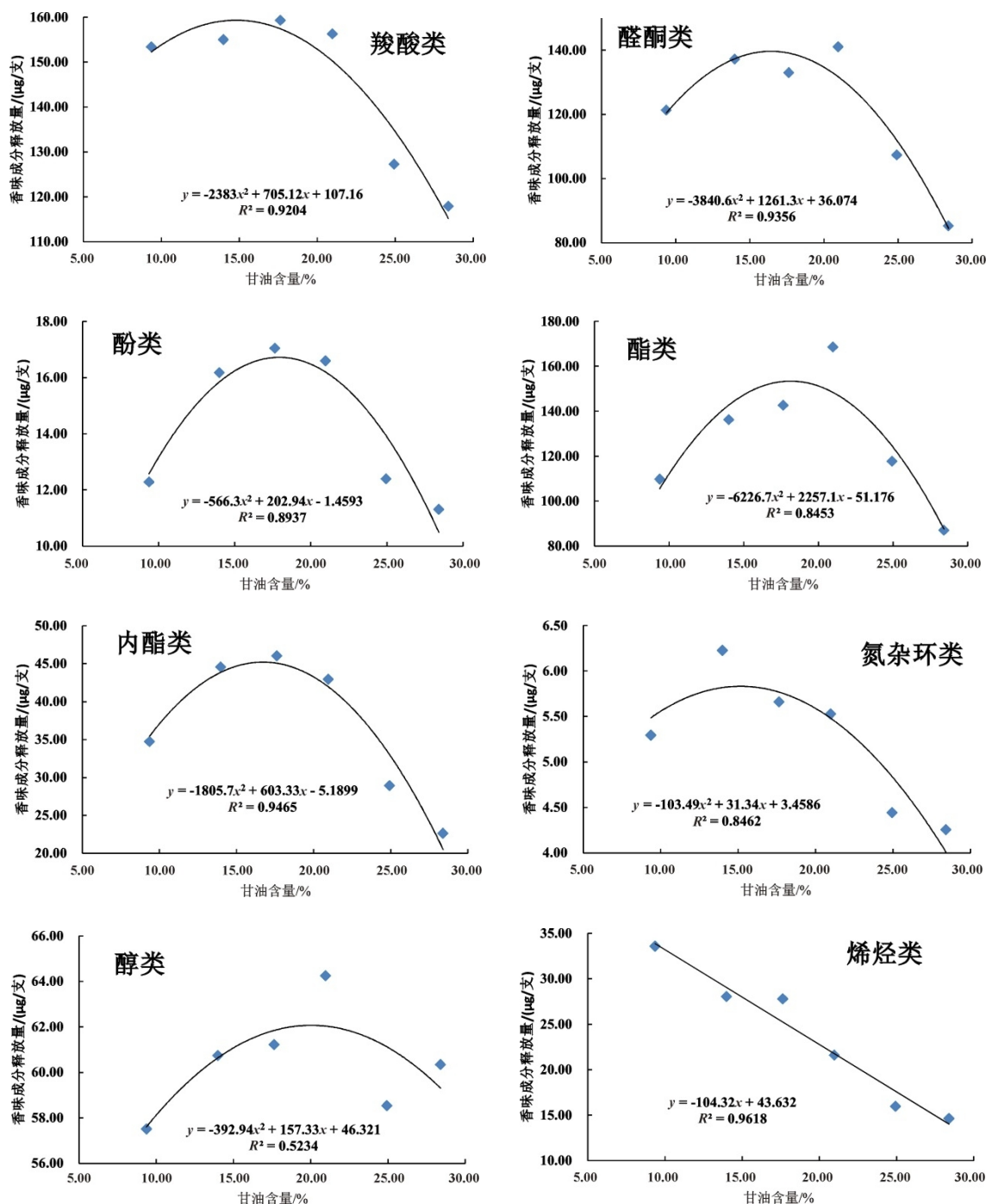


图 3 烟气各类物质释放量随甘油含量变化图

Fig.3 Variation of the release of various components in the smoke of heated cigarette with glycerol content

2.3 甘油含量与烟气中各香味成分释放量的相关性分析

为排除烟草薄片干基质量下降对烟气中各香味成分释放带来的影响，后续分析中，以单位干基质量下各组分的释放量（公式（2））代替检测值，与甘油含量进行相关性分析。烟气中 179 种香味成分的单位干基释放量见表 5～表 11。179 种香味成分中，释放量

较高的前 14 种成分（图 4）分别为：三醋酸甘油酯、乙酸、1-羟基-2-丙酮、糠醇、新植二烯、棕榈酸、5-羟甲基糠醛、2-糠醛、3,5-二羟基-2-甲基-4H-吡喃-4-酮、2,3-二氢-3,5-二羟基-6-甲基-4H-吡喃-4-酮、丙酸、5-甲基-2-糠醛、亚麻酸和 1-羟基-2-丁酮，约占全部检出成分总量的 80%。

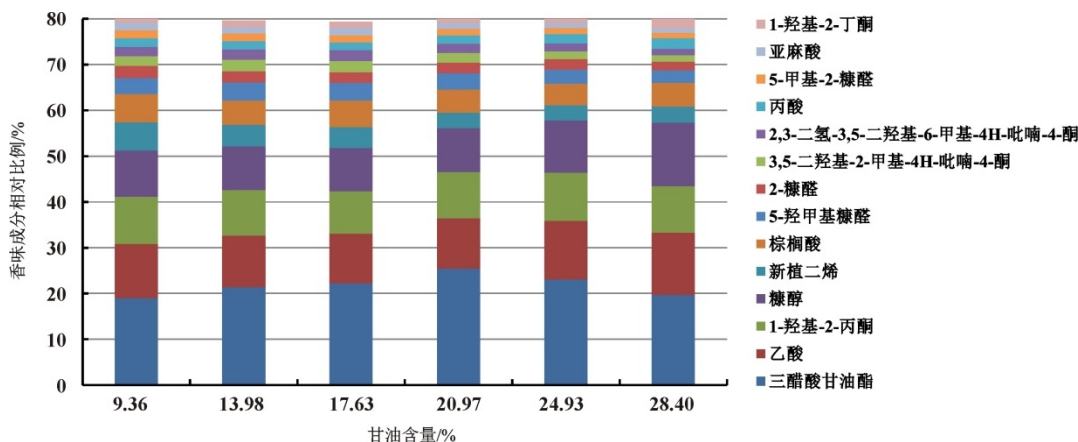


图 4 释放量前 14 种成分及其比例
Fig.4 The top 14 components in release amount and their proportions

表 5a 不同甘油含量加热卷烟烟气中羧酸类成分单位干基释放量

Tab. 5a The unit dry basis release of carboxylic acids in the smoke of heated cigarettes with different glycerol content (μg/支)																					
甘油量	甲酸	乙酸	羟基乙酸	丙酸	3-羟基丙酸	丁酸	异丁酸	2-甲基丁酸	戊酸	异戊酸	3-甲基戊酸	4-甲基戊酸	异戊烯酸	4-戊烯酸	糠酸	己酸	反式-2-甲基-2-丁烯酸	γ-戊酮酸	苯甲酸	庚酸	水杨酸
9.36%	6.35	80.20	0.23	12.85	1.41	1.00	0.38	0.67	0.29	1.35	0.09	0.10	0.07	0.14	2.29	0.95	0.18	1.38	0.63	0.20	0.43
13.98%	7.86	92.10	0.25	14.84	1.85	1.15	0.41	0.71	0.33	1.52	0.11	0.12	0.08	0.16	2.80	1.17	0.19	1.58	0.67	0.22	0.48
17.63%	7.76	95.48	0.26	14.78	1.63	1.21	0.45	0.89	0.34	1.73	0.11	0.14	0.09	0.19	3.00	1.02	0.25	1.68	0.79	0.25	0.55
20.97%	8.21	107.61	0.27	17.64	1.48	1.44	0.51	0.86	0.48	1.83	0.13	0.15	0.09	0.19	2.87	1.51	0.25	1.47	0.70	0.30	0.50
24.93%	6.67	104.08	0.18	16.47	1.13	1.28	0.45	0.82	0.37	1.73	0.11	0.12	0.08	0.17	2.22	1.28	0.22	1.13	0.55	0.25	0.42
28.40%	5.77	101.56	0.14	17.38	0.83	1.46	0.51	0.87	0.43	1.86	0.13	0.16	0.09	0.18	2.01	1.32	0.24	1.12	0.60	0.29	0.38

表 5b 不同甘油含量加热卷烟烟气中羧酸类成分单位干基释放量

Tab. 5b The unit dry basis release of carboxylic acids in the smoke of heated cigarettes with different glycerol content （μg/支）																						
甘油量	辛酸	苯乙酸	壬酸	4-氧代壬酸	3-苯基丙酸	癸酸	乳酸	2-丁烯酸	呋喃乙酸	3-甲基糠酸	间甲基苯甲酸	2-甲基-4-戊烯酸	间羟基苯甲酸	棕榈酸	油酸	亚油酸	亚麻酸	二十酸	硬脂酸	肉豆蔻酸	月桂酸	
9.36%	0.74	0.83	0.72	0.13	0.08	0.38	1.43	1.50	0.077	0.019	0.051	3.45	0.01	41.84	3.84	6.07	11.30	0.51	8.48	0.87	0.19	
13.98%	0.92	0.93	0.74	0.14	0.08	0.44	0.67	1.59	0.081	0.022	0.055	4.06	0.01	43.31	3.58	6.13	11.22	0.47	8.46	0.91	0.22	
17.63%	1.03	1.06	0.76	0.13	0.10	0.45	0.66	1.81	0.085	0.023	0.073	4.39	0.01	51.36	4.52	7.48	14.21	0.57	9.66	0.99	0.23	
20.97%	1.22	0.87	0.89	0.15	0.09	0.51	0.66	1.81	0.087	0.027	0.062	5.30	0.01	49.19	4.12	6.72	12.12	0.53	9.59	1.00	0.30	
24.93%	1.01	0.76	0.74	0.13	0.07	0.50	0.40	1.71	0.054	0.022	0.050	5.18	0.01	37.85	2.86	5.23	8.22	0.44	7.95	0.72	0.20	
28.40%	1.10	0.71	0.89	0.15	0.07	0.54	0.29	1.77	0.061	0.024	0.054	5.52	0.00	39.06	2.93	5.41	7.63	0.45	8.26	0.76	0.25	

表 6 不同甘油含量加热卷烟烟气中醇类成分单位干基释放量

Tab. 6 The unit dry basis release of alcohol components in the smoke of heated cigarettes with different glycerol content (μg/支)

甘油量	糠醇	薄荷醇	植醇	2,3-丁二醇	4-羟基苯乙醇	3-羟基苯乙醇	高香草醇	月桂醇	苯甲醇	二十二烷醇	苯乙醇	5-甲基-2-糠醇	紫丁香醇	二十烷醇	芳樟醇	正己醇	1,3-丁二醇	正癸醇
9.36%	68.07	0.51	0.76	0.96	0.59	0.52	0.21	0.21	0.14	0.10	0.14	0.18	0.059	0.059	0.047	0.020	0.013	0.015
13.98%	77.70	0.92	0.73	1.03	0.66	0.71	0.25	0.25	0.26	0.08	0.21	0.25	0.088	0.047	0.066	0.021	0.014	0.014
17.63%	83.10	1.30	0.95	0.99	0.70	0.57	0.28	0.25	0.23	0.12	0.22	0.26	0.120	0.055	0.035	0.022	0.016	0.022
20.97%	94.13	0.98	0.83	1.05	0.64	0.81	0.25	0.28	0.27	0.11	0.27	0.33	0.112	0.075	0.066	0.027	0.016	0.017
24.93%	93.23	0.94	0.61	1.08	0.54	0.52	0.20	0.29	0.22	0.07	0.20	0.27	0.097	0.050	0.052	0.025	0.012	0.017
28.40%	104.27	0.83	0.65	1.05	0.51	0.42	0.20	0.31	0.18	0.07	0.14	0.20	0.110	0.051	0.058	0.029	0.011	0.020

表 7 不同甘油含量加热卷烟烟气中酚类成分单位干基释放量

Tab. 7 The unit dry basis release of phenolic components in the smoke of heated cigarettes with different glycerol content (μg/支)

甘油量	邻苯二酚	对乙基愈创木酚	1,2,3-苯三酚	愈创木酚	1,4-苯二酚	麦芽酚	苯酚	2-甲氧基苯酚	4-乙基-2-甲氧基苯酚	3-甲氧基苯酚	丁香酚	4-乙基愈创木酚	异丁香酚	4-甲基愈创木酚	2,6-二叔丁基对甲酚	对乙基苯酚	3,4-二甲酚
9.36%	4.760	4.255	0.896	1.439	1.136	1.035	0.997	0.568	0.164	0.057	0.052	0.038	0.027	0.029	0.027	0.016	0.009
13.98%	5.995	5.281	1.728	2.647	1.728	1.824	1.372	0.905	0.329	0.106	0.060	0.051	0.033	0.033	0.044	0.022	0.011
17.63%	6.560	6.924	1.778	2.813	1.793	1.910	1.472	0.904	0.321	0.098	0.052	0.064	0.039	0.038	0.034	0.028	0.013
20.97%	6.739	6.256	1.669	3.323	1.856	2.402	1.669	1.108	0.437	0.133	0.033	0.070	0.039	0.041	0.047	0.028	0.012
24.93%	5.933	5.849	1.076	2.034	1.479	1.429	1.580	0.857	0.269	0.096	0.013	0.062	0.030	0.040	0.039	0.027	0.012
28.40%	6.510	6.257	1.085	1.356	1.157	0.995	1.953	0.669	0.145	0.069	0.013	0.076	0.029	0.052	0.040	0.034	0.016

表 8a 不同甘油含量加热卷烟烟气中醛酮类成分单位干基释放量

Tab. 8a The unit dry basis release of aldehydes and ketones in the smoke of heated cigarettes with different glycerol content (μg/支)

甘油量	1-羟基-2-丙酮	5-羟基-2-甲基糠醛	2-糠醛	5-甲基-2-糠醛	2-羟基-2-环戊烯-1-酮	2-环戊烯-1,4-二酮	2-乙酰基-2-噻吩	1-羟基-2-丁酮	呋喃基-2-噻吩	苯乙醛	9-羟基-4,7-二噻吩-3-酮	二羟基-3-丙酮	3-羟基-2-丁酮	3-甲基-2-戊二酮	2-羟基-3-甲基-2-环戊烯-1-酮	对羟基-2-环戊烯-1-酮	2-环戊烯-1-酮	1,2-环戊二酮	香叶基-2-丙酮	β-大马酮	3-甲基-2-环戊烯-1-酮	间甲基苯乙酮
9.36%	70.18	23.55	18.43	11.72	5.78	4.68	2.13	2.23	1.29	1.83	1.44	1.19	0.96	0.98	0.44	0.44	0.59	0.42	0.20	0.18	0.19	0.14
13.98%	81.50	31.95	20.75	13.26	7.13	5.78	2.76	3.33	1.51	2.37	1.95	1.74	1.26	1.85	0.44	0.44	0.96	0.63	0.26	0.25	0.37	0.19
17.63%	81.08	34.07	20.39	13.53	7.80	5.83	2.74	3.21	1.76	2.67	2.06	2.22	1.28	1.82	0.52	0.52	0.96	0.66	0.32	0.25	0.35	0.20
20.97%	99.73	35.02	22.79	13.99	8.85	6.55	2.98	3.76	1.50	2.84	2.01	2.45	1.42	2.39	0.47	0.47	1.09	0.81	0.36	0.23	0.44	0.28
24.93%	85.36	25.48	18.52	11.23	7.16	5.13	2.40	3.16	1.24	2.29	1.46	2.18	1.24	1.82	0.34	0.34	0.91	0.62	0.29	0.20	0.35	0.22
28.40%	76.44	20.27	14.43	8.79	8.48	3.91	1.92		1.16	1.93	1.19	2.13	1.05	1.34	0.33	0.33	0.80	0.49	0.02	0.20	0.29	0.20

表 8b 不同甘油含量加热卷烟烟气中醛酮类成分单位干基释放量

Tab. 8b The unit dry basis release of aldehydes and ketones in the smoke of heated cigarettes with different glycerol content (μg/支)

甘油量	1,2-环己二酮	2-环己酮	2-甲基-2-环戊烯-1-酮	苯甲醛	3-羟基-2-苯基-2-丙酮	3-吡啶-2-基-2-丙酮	1H-吡咯-2-基-2-丙酮	3-乙基-2-羟基-2-丙酮	异佛尔酮	3-甲基-2-苯基-2-丙酮	苯乙酮	β-紫罗兰酮	3-糠醛	呋喃酮	巨豆三酮 I	巨豆三酮 II	巨豆三酮 III	3-羟基-β-大马酮	巨豆三酮 IV	金合欢基-2-丙酮 II	2-乙酰基-5-呋喃酮	香豆基酮	甲基异丁基酮	香兰素
9.36%	0.152	0.164	0.189	0.104	0.045	0.126	0.152	0.073	0.056	0.018	0.045	0.051	0.038	1.149	0.088	0.215	0.054	0.177	0.152	0.290	0.227	0.024	0.063	0.044
13.98%	0.233	0.219	0.261	0.106	0.059	0.192	0.288	0.086	0.077	0.025	0.062	0.069	0.041	2.414	0.145	0.357	0.095	0.261	0.261	0.398	0.343	0.026	0.069	0.067
17.63%	0.233	0.219	0.277	0.118	0.064	0.190	0.321	1.910	0.083	0.025	0.064	0.058	0.044	2.711	0.146	0.350	0.092	0.277	0.248	0.452	0.350	0.032	0.073	0.071
20.97%	0.265	0.218	0.296	0.129	0.064	0.234	0.484	0.120	0.087	0.030	0.072	0.062	0.047	3.370	0.179	0.421	0.115	0.281	0.312	0.484	0.374	0.028	0.094	0.073
24.93%	0.202	0.185	0.252	0.106	0.047	0.168	0.319	1.462	0.072	0.025	0.062	0.050	0.034	2.218	0.128	0.303	0.081	0.235	0.218	0.336	0.303	0.025	0.118	0.067
28.40%	0.163	0.163	0.217	0.089	0.052	0.145	0.235	0.071	0.060	0.020	0.058	0.054	0.036	1.863	0.098	0.235	0.060	0.181	0.163	0.271	0.235	0.024	0.127	0.047

表 9 不同甘油含量加热卷烟烟气中氮杂环类成分单位干基释放量

Tab.9 The unit dry basis release of nitrogen heterocycles in the smoke of heated cigarettes with different glycerol content (μg/支)

甘油量	2-甲吡啶	3-甲吡啶	4-甲吡啶	2,3-二甲基吡啶	2,6-二甲基吡啶	3,5-二甲基吡啶	2,4,6-三甲基吡啶	2-乙基吡啶	2-乙基噻吩	3-羟基吡啶	2,3-联吡啶	2-甲吡啶	2,3-二甲基吡啶	2,5-二甲基吡啶	2,6-二甲基吡啶	2,3,5-三甲基吡啶	乙基吡啶	2-乙基噻吩	二烯烟碱	麦司明	可替宁	哇啉			
9.36%	2.525	0.106	0.253	0.247	0.020	0.009	0.011	0.003	0.004	0.018	0.278	0.391	0.025	0.040	0.004	0.056	0.020	0.003	0.008	0.152	0.114	2.146	0.091	0.126	0.016
13.98%	3.827	0.178	0.425	0.082	0.032	0.014	0.019	0.004	0.004	0.023	0.425	0.686	0.041	0.066	0.007	0.093	0.032	0.004	0.011	0.192	0.206	1.866	0.134	0.165	0.025
17.63%	3.484	0.160	0.408	0.087	0.031	0.013	0.019	0.006	0.004	0.026	0.496	0.787	0.044	0.073	0.007	0.093	0.032	0.003	0.010	0.190	0.190	1.735	0.160	0.175	0.028
20.97%	3.666	0.172	0.437	0.090	0.034	0.016	0.022	0.005	0.005	0.033	0.530	0.827	0.047	0.089	0.008	0.105	0.041	0.005	0.014	0.218	0.281	1.607	0.187	0.172	0.031
24.93%	3.210	0.155	0.387	0.076	0.032	0.015	0.018	0.005	0.003	0.029	0.387	0.588	0.034	0.086	0.008	0.091	0.039	0.005	0.012	0.235	0.168	1.597	0.138	0.118	0.024
28.40%	2.911	0.148	0.362	0.072	0.031	0.013	0.016	0.004	0.004	0.024	0.325	0.470	0.036	0.078	0.007	0.085	0.031	0.004	0.009	0.217	0.119	1.537	0.123	1.049	0.016

表 10 不同甘油含量加热卷烟烟气中酯类成分单位干基释放量

Tab.10 Unit dry basis release of esters in heated cigarette smoke with different glycerol content (μg/支)

甘油量	三醋酸甘油酯	乙二醇二乙酸酯	棕榈酸甲酯	油酸乙酯	邻苯二甲酸二丁酯	亚麻酸乙酯	亚油酸乙酯	丙酮酸甲酯	3-羟基苯甲酸甲酯	亚油酸甲酯	硬脂酸甲酯	亚麻酸甲酯	油酸甲酯	棕榈酸乙酯	肉豆蔻酸甲酯	肉豆蔻酸乙酯
9.36%	129.13	5.82	1.05	0.45	0.97	0.20	0.14	0.23	0.08	0.18	0.10	0.09	0.10	0.033	0.016	0.003
13.98%	174.33	8.02	1.32	0.63	1.19	0.16	0.19	0.25	0.10	0.18	0.12	0.14	0.14	0.037	0.023	0.003
17.63%	195.39	7.67	1.36	0.71	1.24	0.22	0.34	0.22	0.11	0.20	0.14	0.16	0.16	0.038	0.016	0.003
20.97%	249.56	8.63	1.44	0.75	1.14	0.19	0.22	0.17	0.10	0.20	0.13	0.14	0.16	0.041	0.023	0.003
24.93%	186.92	7.06	1.09	0.50	0.97	0.27	0.25	0.20	0.06	0.15	0.14	0.10	0.10	0.034	0.015	0.003
28.40%	147.65	6.00	0.92	0.38	0.92	0.24	0.27	0.15	0.07	0.14	0.12	0.22	0.17	0.031	0.014	0.002

表 11 不同甘油含量加热卷烟烟气中内酯类及烃类成分单位干基释放量

Tab.11 The unit dry basis release of lactones and hydrocarbons in the smoke of heated cigarettes with different glycerol content (μg/支)

甘油量	3,5-二羟基-2-甲基-4H-吡喃-4-酮	2,3-二氢-3,5-二羟基-6-甲基-4H-吡喃-4-酮	2-羟基丁内酯	7-羟基-6-甲氧基-2H-1-苯并吡喃-2-酮	5-羟基甲基-2(5H)-呋喃酮	γ-丁内酯	2(5H)-呋喃酮	2-甲基四氢呋喃-3-酮	泛酰内酯	α-当归内酯	二氢猕猴桃内酯	新植二烯	4-羟基苯乙烯	柠檬烯
9.36%	14.14	13.70	6.05	3.37	2.42	1.70	1.39	0.48	0.27	0.21	0.13	42.13	0.23	0.034
13.98%	19.93	18.89	9.03	4.58	2.76	2.55	2.14	0.48	0.37	0.23	0.19	38.13	0.29	0.025
17.63%	21.81	20.70	10.80	5.00	3.10	2.41	2.08	0.41	0.38	0.23	0.19	40.09	0.36	0.035
20.97%	20.78	19.72	11.47	5.16	2.87	2.95	2.68	0.53	0.42	0.25	0.19	33.34	0.31	0.034
24.93%	14.05	13.73	9.73	3.92	2.37	2.24	1.56	0.35	0.32	0.22	0.13	26.55	0.25	0.034
28.40%	10.43	10.31	11.01	3.24	2.22	1.77	1.08	0.27	0.25	0.18	0.13	26.09	0.29	0.031

检测出单位干基释放量高于 0.1 μg/支的 37 种羧酸类物质中,与甘油含量呈正相关的物质有 20 种,呈弱相关的物质有 17 种。释放量与甘油含量呈正相关的酸性物质多数为小分子量的直链羧酸,这类物质沸点低(均低于甘油沸点),与甘油的分子间作用力也较强,其中,乙酸、丙酸、丁酸等 8 种羧酸释放量与甘油含

量呈显著正相关(表 12)。另一方面,释放量与甘油含量呈弱相关的酸性物质主要为一些含有长烷基链的大分子羧酸(如棕榈酸、油酸、亚油酸、硬脂酸等),以及含有苯环等大位阻取代基的羧酸(如糠酸、苯甲酸、苯乙酸等),这类物质沸点高于甘油,且与甘油的分子间作用力较弱,因此甘油对其携带能力较差。

表 12 与甘油含量呈显著正相关的羧酸类物质

Tab.12 Carboxylic acids with significant positive correlation with glycerol content

项目	指标	乙酸	丙酸	丁酸	异丁酸	异戊酸	庚酸	癸酸	2-甲基-4-戊烯酸
甘油含量	Pearson 相关性	0.834*	0.884*	0.889*	0.839*	0.892*	0.837*	0.959**	0.958**
	显著性(双侧)	0.039	0.019	0.018	0.037	0.017	0.038	0.002	0.003

注: *在 0.05 水平(双侧)上显著相关, **在 0.01 水平(双侧)上显著相关。下同

Note: *significantly correlated at the 0.05 level (two-sided), **significantly correlated at the 0.01 level (two-sided). Same below.

检测出的 13 种醇类物质中有 8 种物质的释放量与甘油含量呈正相关，其中糠醇和月桂醇释放量与甘油含量相关性显著（表 13）。与甘油含量呈负相关的醇类物质多数有长烷烃链（如二十二烷醇，沸点为 376℃）或大位阻取代基（如 3-羟基苯乙醇和 4-羟基苯乙醇，沸点均在 375℃左右）。

检测出的含量高于 0.1 μg/支的 9 种酚类物质中，4 种物质的释放量与甘油含量呈正相关，其中有显著相关性的为苯酚（表 13），另外 5 种酚类物质的释放量与甘油含量呈弱相关。酚类物质含有羟基，且沸点一般不超过 300℃，但邻苯二酚、愈创木酚及麦芽酚等，苯环平面上含有多个羟基，极易形成分子内氢键^[24]，削弱了与甘油的分子间作用力，导致甘油对这类物质

的携带能力减弱。

多数醛酮类物质分子结构中只存在氢键受体，没有给体；氮杂环类物质中，吡啶和吡嗪类化合物中仅存在氢键受体，无给体，而吡咯类化合物则仅存在氢键给体，而无受体，因此这两类成分与甘油之间的相互作用不如醇类和羧酸类物质强，表现为多数醛酮类和氮杂环类成分的释放量与甘油含量之间的相关性不显著，整体呈现先升高后降低的趋势。检测出的醛酮类成分中，与甘油的施加量呈显著正相关的只有 1-羟基-2-丁酮（表 13），而氮杂环中的二烯烟碱释放量与甘油含量负相关显著（ $r=-0.966$ ，显著性（双侧） $=0.002$ ）。

表 13 与甘油含量呈显著正相关的醇、酚及醛酮类物质

Tab.13 Alcohols, phenols, aldehydes and ketones with significant positive correlation with glycerol content

项目	指标	糠醇	月桂醇	苯酚	1-羟基-2-丁酮
甘油含量	Pearson 相关性	0.980**	0.977**	0.937**	0.954**
	显著性（双侧）	0.001	0.001	0.006	0.003

检测出的酯类和内酯类物质多数分子量较大，沸点较高，与甘油的施加量呈负相关，但相关性均不显著。三种烃类物质中，新植二烯的含量约占 99%，其释放量与甘油含量呈显著负相关（ $r=-0.996$ ，显著性（双侧） $=0.002$ ）。作为烤烟中含量最高的中性致香成分，新植二烯是叶绿素的降解产物，在加热过程中以原型转移的方式进入烟气^[25]，沸点较高（344℃），更易在滤嘴降温段冷凝，且与甘油的分子间作用力弱，降低了烟气中的释放量。

3 结论

（1）采用 GC/MS 方法，分析了加热卷烟中挥发/半挥发共 179 种香味成分。甘油含量从 9.36%增加到 28.40%，179 种成分释放总量在 403.26~616.69 μg/支之间变化，呈现先上升后下降的趋势，与甘油含量呈二次函数变化关系， $R^2=0.9199$ ；（2）加热卷烟烟气中羧酸类、醛酮类和酯类含量较高，相对比例均在 20%以上，氮杂环类成分比例最低，为 1%左右，烃类物质释放量与甘油含量呈线性变化关系， R^2 为 0.9618，其余物质释放量随甘油含量的增加呈现先升高后降低的趋势，呈二次函数变化关系，相关系数 R^2 分布在

0.8453~0.9465；（3）多数低沸点的羧酸类和醇类物质因能与甘油之间形成较强的氢键相互作用，其单位干基释放量与甘油含量呈正相关，少数含有长烷烃链或者大位阻取代基的高沸点羧酸类和醇类物质的释放量与甘油含量之间呈弱相关；（4）多数醛酮类和氮杂环类化合物因只存在氢键的给体或者受体，与甘油之间的相互作用力较弱，其单位干基释放量与甘油含量之间呈弱相关；（5）酯类、内酯类和烃类物质多数分子量较大，沸点较高，且烃类物质与甘油之间无法形成氢键，因此这三类物质的单位干基释放量多数与甘油含量呈弱相关。

参考文献

[1] Baker R R. Smoke generation inside a burning cigarette: Modifying combustion to develop cigarettes that may be less hazardous to health[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2006, 32(4): 373-385.

[2] 周昆, 杨继, 杨柳, 等. 加热不燃烧卷烟气溶胶研究进展[J]. 中国烟草学报, 2017, 23(5): 141-149.

ZHOU Kun, YANG Ji, YANG Liu, et al. Research advances related to heat-not-burn cigarette aerosol[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2017, 23(5): 141-149.

[3] 刘珊, 崔凯, 曾世通, 等. 加热非燃烧型烟草制品剖析[J]. 烟草科技, 2016, 49(11): 56-65.

LIU Shan, CUI Kai, ZENG Shitong, et al. Analysis of blend and

- aerosol composition of two heat-not-burn tobacco products[J]. Tobacco Science & Technology, 2016, 49(11): 56-65.
- [4] 许晓黎, 马晓龙, 雷萍, 等. 热裂解气相色谱质谱法研究香兰素在加热不燃烧卷烟中的转移行为[J]. 纸和造纸, 2019, 38(05): 33-36.
- XU Xiaoli, MA Xiaolong, LEI Ping, et al. Study on transfer behavior of vanillin in heat-not-burn cigarette by Py-GC/MS[J]. Paper and Paper Making, 2019, 38(05): 33-36.
- [5] 司晓喜, 向本富, 蒋薇, 等. 加热卷烟气溶胶中香味成分的GC-MS/MS 同时测定和比较[J]. 食品与机械, 2021, 37(06): 86-96.
- SI Xiaoxi, XIANG Benfu, JIANG Wei, et al. Determination and comparison of aroma components in different heated cigarette aerosols by GC-MS/MS[J]. Food & Machinery, 2021, 37(06): 86-96.
- [6] 罗彦波, 陈小静, 李翔宇, 等. 化学衍生-液相色谱-串联质谱法测定加热卷烟烟气中的醛酮类香味成分[J]. 分析化学, 2020, 48(06): 794-801.
- LUO Yanbo, CHEN Xiaojing, LI Xiangyu, et al. Determination of aldehyde and ketone flavor compounds in mainstream smoke of heated tobacco products by chemical derivatization-liquid chromatography-tandem mass spectrometry[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2020, 48(06): 794-801.
- [7] 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): 24-32.
- ZHAO Guohao, GUO Guoning, HUANG Long, et al. Differences in aroma component releases in aerosols of self-made electrically heated cigarette with different tobacco materials[J]. Tobacco Science & Technology, 2021, 54(3): 24-32.
- [8] 朱浩, 席辉, 柴国璧, 等. 温度对加热非燃烧卷烟烟熏香成分释放的影响[J]. 烟草科技, 2017, 50(11): 33-38.
- ZHU Hao, XI Hui, CHAI Guobi, et al. Effects of heating temperature on release of smoky aerosol components from heat-not-burn tobacco products[J]. Tobacco Science & Technology, 2017, 50(11): 33-38.
- [9] 董高峰, 田永峰, 尚善斋, 等. 用于加热不燃烧(HnB)卷烟的再造烟叶生产工艺研究进展[J]. 中国烟草学报, 2020, 26(1): 109-117.
- DONG Gaofeng, TIAN Yongfeng, SHANG Shanzhai, et al. Production technology of reconstituted tobacco for heat-not-burn (HnB) cigarettes: a review[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2020, 26(1): 109-117.
- [10] 张园园, 唐婷婷, 张佳琳, 等. 加热不燃烧烟草薄片发展现状及展望[J]. 中华纸业, 2020, 41(18): 14-17.
- ZHANG Yuanyuan, TANG Tingting, ZHANG Jialin, et al. Development status and prospect on heating non-combustible reconstituted tobacco[J]. China Pulp & Paper Industry, 2020, 41(18): 14-17.
- [11] 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): 79-86.
- CAO Yun, WANG Peng, BAO Sui, et al. Effects of temperature and glycerol on pyrolysis and smoke release of reconstituted tobacco particles[J]. Tobacco Science & Technology, 2020, 53(8): 79-86.
- [12] 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.
- ZHOU Huiming, HUA Qing, TAO Liqi, et al. Release behaviors of aroma components from reconstituted tobacco particles under heat-not-burn condition[J]. Tobacco Science & Technology, 2019, 52(5): 67-76.
- [13] 司晓喜, 崔华鹏, 朱瑞芝, 等. 不同 GL/PG 质量比和添加总量对加热卷烟气溶胶逐口释放特性的影响[J]. 轻工学报, 2022, 37(2): 78-86.
- SI Xiaoxi, CUI Huapeng, ZHU Ruizhi, et al. The effect of the mass ratio and total amount of GL/PG on the puff-by-puff release characteristics of heated cigarette aerosol[J]. Journal of Light Industry, 2022, 37(2): 78-86.
- [14] 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.
- CAO Yun, WANG Chenghu, WANG Peng, et al. Effects of glycerin/propylene glycol ratios on pyrolysis and smoke release of tobacco granules[J]. Tobacco Science & Technology, 2022, 55(3): 50-58.
- [15] 朱龙杰, 曹毅, 秦艳华, 等. 甘油施加比例对加热卷烟薄片热性能及热解产物的影响[J]. 中国烟草学报, 2022, 28(5): 8-16.
- ZHU Longjie, CAO Yi, QIN Yanhua, et al. Effect of glycerol addition ratio on thermal properties and pyrolysis products of tobacco sheet of heated cigarette[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2022, 28(5): 8-16.
- [16] 《卷烟工艺》(第二版)编写组. 卷烟工艺[M]. 北京: 北京出版社, 2000.
- Compilation group of cigarette technology(Second Edition). Cigarette technology[M]. Beijing: Beijing Press, 2000.
- [17] GB/T 16447—2004 烟草及烟草制品 调节和测试大气环境[S].
- GB/T 16447-2004 Tobacco and tobacco products-Atmosphere for conditioning and testing[S].
- [18] YC/T 345—2010 烟草及烟草制品 水分的测定 气相色谱法[S].
- YC/T 345-2010 Tobacco and tobacco products-Determination of water content-Gas Chromatographic method[S].
- [19] YC/T 243—2008 烟草及烟草制品 1,2-丙二醇、丙三醇的测定 气相色谱法[S].
- YC/T 243-2008 Tobacco and tobacco products-Determination of 1,2-propylene glycol and glycerol-Gas Chromatographic method[S].
- [20] Guo Q, Pan L, Qin Y, et al. Combined use of analyte protectants and precolumn backflushing for a robust, high-throughput quantitative determination of aroma compounds in cigarette mainstream smoke by gas chromatography-tandem mass spectrometry[J]. Microchemical Journal, 2022, 175: 10121-10129.
- [21] Chortyk O T, Schlotzhauer W S. Studies on the pyrogenesis of tobacco smoke constituents (A review)[J]. Beiträge zur Tabakforschung, 1973, 7(3): 165-178.
- [22] Ledl F, Schleicher E. New aspects of the Maillard reaction in foods and in the human body[J]. Angewandte Chemie International Edition in English, 1990, 29(6): 565-706.
- [23] 谢剑平. 烟草与烟气化学成分[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- XIE Jianping. Tobacco and smoke chemical composition[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011.
- [24] 张文勤, 郑燕, 马宁, 等. 有机化学(第五版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2014.
- ZHANG Wenqin, ZHENG Yan, MA Ning, et al. Organic chemistry (Fifth Edition) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2014.
- [25] Rowland R L. Flue-cured tobacco. II. Neophytadiene[J]. Journal of the American Chemical Society, 1957, 79: 5007-5010.

Effect of glycerol content in reconstituted tobacco made by slurry process on the release of aromatic components from heated cigarette smoke

LIU Mengmeng¹, ZHANG Yuan¹, SUN Xuehui², QIN Yaqiong², ZHU Longjie¹, WU Penglin¹, ZHU Huaiyuan¹, CAO Yi^{1*}

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

² Zhengzhou Tobacco Research Institute of CNTC, Zhengzhou 450001, China

Abstract: This study aims to explore the effect of glycerol content in reconstituted tobacco made by slurry process on the release of volatile/semi-volatile aromatic components from heated cigarette smoke. To this end, GC/MS method was used to analyze the release of 179 volatile/semi-volatile aromatic components in heated cigarette smoke and correlation analysis was carried out with the unit dry basis release of each aroma component. The results showed that: 1) When the glycerol content increased from 9.36% to 28.40%, the total release of volatile/semi-volatile aromatic components firstly increased and then decreased, forming a quadratic function with the glycerol content. 2) The release of carboxylic acids, aldehydes and ketones, phenols, esters, lactones and nitrogen heterocyclic substances in the smoke changed quadratically with the increase of glycerol content, where the correlation coefficient change from 0.8453 to 0.9465. Moreover, the release amount of hydrocarbon substances had a linear relationship with the glycerol content, where R^2 was 0.9618. 3) The component that has a low boiling point and is easy to form hydrogen bonds with glycerol had a positive correlation with the glycerol content, while those containing long alkane chains or large steric substituent with high boiling point were weakly correlated with the glycerol content. Of the detected aromatic components, 12 were significantly positively correlated with the glycerol content.

Keywords: heated cigarette; aromatic components; glycerol content; correlation analysis; boiling point; hydrogen bond

*Corresponding author. Email: caoyi@jszygs.com

《烟草科技》2023 年第 8 期目次

· 烟草农学

- 烤烟 Y2001 多腺毛改良株系的创制及抗性分析
..... 罗 锐, 王召军, 滕环瑜, 等
- 普通烟草 *NtIAA13b* 基因的克隆及功能分析
..... 喻奇伟, 朱紫童, 何 轶, 等
- 防治烟蚜的杀虫剂筛选及对红彩瑞猎蝽安全性评价
..... 马光祥, 夏长剑, 陈德鑫, 等
- 晾晒湿度对雪茄茄衣烟叶颜色的影响
..... 饶雄飞, 樊 俊, 吴哲宽, 等
- 基于熵权法和改进 TOPSIS 法的烤烟质量综合评价
..... 常延斌, 王桂瑶, 牟文君, 等

· 烟草化学

- 气流通道设计参数对自然烟气卷烟逐口烟气组分的影响
..... 冯露露, 付丽丽, 张莹莹, 等
- 滤嘴通风率对加热卷烟气溶胶主要成分释放量的影响
..... 张 博, 杜 文, 王志国, 等

- 中支卷烟丝束加香酯类和醇类单体香料的逐口转移行为
..... 黄世杰, 杨泽恩, 吕阳波, 等

· 烟草工艺

- 初烤砂烟叶面不同区位的理化特性及聚类分析
..... 王玉真, 卞俊萍, 华一崑, 等
- 基于主成分分析的细支卷烟物理质量评价方法
..... 朱 波, 李善莲, 李金学, 等

· 设备与仪器

- 基于融合注意力时间卷积网络的烘丝出口含水率控制方法
..... 刘静远, 李 昕, 刘 杰, 等
- 基于线性卡尔曼滤波器的加香工序数据降噪算法
..... 赵培成, 李春华, 叶 飞, 等
- ZJ118 卷接机组切纸轮负压控制系统的设计
..... 陈荣林, 陈 杰, 朱登科, 等