

酶处理对烟叶低温热解特性及香味成分释放的影响

陈晨¹, 姜希², 杜赫¹, 梁淼², 潘海洋², 高磊¹, 郝娜¹, 张峻松^{2*}

(1.内蒙古昆明卷烟有限责任公司, 呼和浩特 010020; 2.郑州轻工业大学食品与生物工程学院, 郑州 450001)

摘要: 为了解酶处理对烟叶原料在低温加热状态下热失重及香味成分释放的影响, 采用连续流动分析仪、热重分析仪与自主搭建的快速管式升温炉及 GC/MS 联用仪, 结合感官质量评价, 探究了不同酶处理对烟叶原料常规化学成分、热解特性、香味成分热释放与感官品质的影响。结果显示, ①果胶酯酶与植物水解酶处理后烟叶中总糖含量提升最高; ②果胶酯酶和植物水解酶处理样品在挥发性成分脱除阶段的最大失重速率与失重率均有较明显提升, 提高了香味物质释放量和释放速率; ③果胶酯酶、植物水解酶处理样品的香味物质总量比空白对照有较明显提升; ④主成分分析与感官质量评价结果显示, 果胶酯酶与植物水解酶可以提升原料的综合香气品质与感官质量。研究表明, 果胶酯酶与植物水解酶可以提升烟叶加热状态下香气品质, 本结果可为加热卷烟原料品质提升提供方法参考和借鉴。

关键词: 生物酶; 加热卷烟; 热解特性; 香味成分热释放; 感官质量

中图分类号: TS41^{†1}

文献标识码: A

文章编号: 1007-5119 (2024) 05-0087-08

Effect of Enzyme Treatment on Low Temperature Pyrolysis Characteristics and Aroma Component Release of Tobacco Leaves

CHEN Chen¹, JIANG Xi², DU He¹, LIANG Miao², PAN Haiyang², GAO Lei¹, HAO Na¹, ZHANG Junsong^{2*}

(1. Inner Mongolia Kunming Cigarette Co., Ltd., Hohhot 010020, China; 2. College of Food and Biological Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: To investigate the effects of enzyme treatment on the thermal weight loss and aroma component release of tobacco raw materials under low-temperature heating. This study used a continuous flow analyzer, a thermogravimetric analyzer, a self-developed rapid tube heating furnace, and a GC/MS analyzer, combined with sensory quality evaluation, to investigate the effects of different enzyme treatments on the conventional chemical composition, pyrolysis characteristics, thermal release of aroma components, and sensory quality of tobacco raw materials. The following conclusions can be drawn: ① The total sugar content in tobacco leaves increased the highest after treatment with pectin esterase and plant hydrolase. ② The maximum weight loss rate and weight loss rate of samples treated with pectin esterase and plant hydrolase during the volatile matter removal stage were significantly improved, which increased the release amount and rate of aroma substances. ③ The total amount of aroma substances in the samples treated with pectin esterase and plant hydrolase showed a significant increase compared to the blank control. ④ The results of principal component analysis and sensory quality evaluation indicate that pectin esterase and plant hydrolase can improve the comprehensive aroma and sensory quality of raw materials. This indicates that pectin esterase and plant hydrolase can improve the aroma quality of tobacco leaves under heating conditions. The research results provide a method reference and reference for improving the quality of heated cigarette raw materials.

Keywords: biological enzymes; heated tobacco; pyrolysis characteristics; heat release of aroma components; sensory quality

加热不燃烧卷烟是一种新型烟草制品, 相比传统卷烟热解温度低, 有害成分释放量小。但在较低的加热温度下, 香味物质不能充分裂解释放, 造成吸味平淡, 香气不足等问题^[1]。近年来, 关于加热卷烟提质增香技术的研究成为行业内新的研究方向。

吴彦等^[2] 研究结果表明, 酶解枇杷果提取物能够降低加热卷烟刺激性, 柔和烟气, 增加果香和清甜香韵; 陈芝飞等^[3] 研究了加热卷烟气溶胶中 6 种酯类单体香料转移行为, 得出香料的总转移率与抽吸口序之间具有良好的线性正相关关系; 管明婧

基金项目: 内蒙古昆明卷烟有限责任公司科技项目(202115010534-JS-472)

第一作者: 陈晨(1990—), 本科, 工程师, 主要研究方向为卷烟产品研究。E-mail: 530669432@qq.com

*通信作者: 张峻松(1971—), 博士, 教授, 主要研究方向为烟草化学。E-mail: 13283712413@163.com

收稿日期: 2024-02-01

修回日期: 2024-06-25

等^[4]制备烟叶干馏香料并应用于加热卷烟中,改善了加热卷烟的抽吸品质。由此可见,目前对于加热卷烟增香提质主要采用外加香料的方式,缺乏针对烟草原料本身物理化学性质的调节手段。

生物酶处理是一种有效的卷烟增香提质技术,可以降解烟叶中的生物大分子,调节和改善烟叶内部化学组分的比例,以达到提高品质和改善香气的作用^[5]。例如邓羽翔等^[6]研究发现复合生物酶处理可以降低烟叶中淀粉、蛋白质及主流烟气中7种常见有害成分的含量;谢会雅等^[7]考察了不同条件下进行酶处理对烤烟常规化学成分含量的影响。

目前关于烟叶的生物酶处理研究主要关注烟草原料自身的理化性质变化和传统卷烟感官品质评价,而对原料热解性能和烟气成分释放涉及较少,另外,加热卷烟烟叶原料受热温度低,酶处理对原料低温热解特征及香味成分释放特征的影响尚不明确。为此,本研究采用热重分析仪自主搭建的程序升温加热平台及气相色谱质谱联用仪(GC/MS),重点探讨不同酶处理对烟叶原料低温热释放特性的影响规律,结合感官品质评价方法,为加热卷烟香气品质与感官质量的生物酶调控提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料与仪器

1.1.1 试验材料 材料:加热卷烟叶组配方原料,内蒙古昆明卷烟有限责任公司提供。试剂:生物酶制剂,诺维信(中国)生物技术有限公司提供,分别为蛋白酶(T1, 60000 U/g)、果胶酯酶(T2, 30000 U/g)、 α -淀粉酶(T3, 4000 U/g)、 β -葡聚糖酶(T4, 20000 U/g)、植物水解酶(T5, 10000 U/g,来源为棘孢曲霉,由 β -葡聚糖酶、木聚糖酶、纤维素酶等组成)、漆酶(T6, 20000 U/g)、木聚糖酶(T7, 20000 U/g);二氯甲烷(色谱纯,迪科马科技有限公司)。

1.1.2 试验仪器 ME104E 电子天平(上海梅特勒-托利多仪器有限公司);SANPLUS8505 连续流动仪(上海一恒科学仪器有限公司);TA Discovery 热重分析仪(美国 TA 仪器公司);8890/5977B 气相色谱/质谱联用仪(美国 Agilent 公司);自制程序升温加热平台耦联烟气捕集装置,装置示意图如图 1 所示。

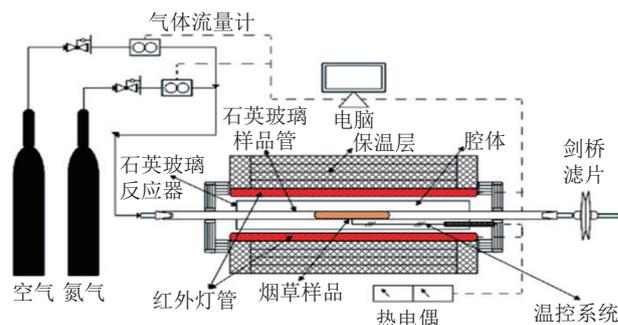


图 1 程序升温加热平台耦联烟气捕集装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of coupled flue gas capture device for program heating platform

1.2 试验方法

1.2.1 样品前处理 将烟叶回潮(湿度为 $26\% \pm 1\%$)并切丝,取一定质量的酶制剂加入 50 mL 蒸馏水中混匀制成稀释溶液,活度均为 60 U/g,均匀喷洒在 10 g 烟丝表面,对照为等量蒸馏水,将处理过后的烟丝置于恒温恒湿箱中进行发酵(温度 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度 75%,发酵时间 3 d),之后烘干水分。每个处理设置 3 次重复。

1.2.2 酶处理烟叶原料常规化学成分的测定 分别按照标准 YC/T 159—2019、YC/T 161—2002、YC/T 216—2013、YC/T 346—2010、YC/T 468—2021、YC/T 347—2010 方法测定总糖、还原糖、总氮、淀粉、果胶、总植物碱和纤维素含量。

1.2.3 酶处理烟叶原料的热解特性分析 将前处理过后的烟丝直接置于热重分析仪中进行慢速升温热解,热重分析条件为:烟末样品质量 8 mg;载气 N_2 ;流量 30 mL/min;升温程序为以 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速率从室温升至 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$,得到热重曲线(TG)与微分热重曲线(DTG)。样品在各阶段失重率为:阶段起始温度对应的样品质量百分比减去阶段结束时样品质量百分比。

1.2.4 酶处理烟叶原料的热释放香味成分测定 参照文献[8]方法,采用自制的程序升温加热平台耦联烟气捕集装置捕集香味成分。具体方法如下:称取 0.4 g 前处理后的烟丝置于石英玻璃样品管的石英舟中,通过气体流量计控制升温炉内气氛为空气,以 $20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 的速率由室温升至 $350\text{ }^{\circ}\text{C}$,保持 300 s,然后持续通气 5 min,将捕集过香味成分的剑桥滤片于 60 mL 二氯甲烷中超声萃取 30 min,加入乙酸苯乙酯内标, $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 水浴浓缩至 1 mL,经 $0.45\text{ }\mu\text{m}$

有机膜过滤并转移至色谱瓶中, 进行 GC/MS 分析。

GC 分析条件: 色谱柱安捷伦 HP-5(30 m×250 μm×0.25 μm), 载气为高纯氮气; 进样口温度 230 °C, 载气流速 1.0 mL/min。进样方式为分流进样, 分流比 5:1, 进样量 1 μL。升温程序为柱初温 50 °C, 保持 2 min, 以 4 °C/min 升至 280 °C, 保持 5 min, 再以 4 °C/min 升至 300 °C。

MS 分析条件: 电子轰击源(EI), 电子能量 70 eV, 离子源温度 230 °C, 四级杆温度 150 °C, 质谱扫描方式为全扫描, 溶剂延迟 8 min。

数据分析: 香味成分通过 NIST 14 谱库进行定性分析, 采用内标法进行半定量分析。

1.2.5 酶处理烟叶原料的感官品质评价 采用摇摆制粒机将样品制成烟草颗粒, 结合内蒙古昆明卷烟有限责任公司加热卷烟烟叶原料感官品质特性评价方法, 组织 9 位评吸专家, 以香味(25 分)、烟气

(30 分)、劲头(10 分)、刺激性(10 分)、余味(15 分)和均匀性(10 分)为指标, 采用中心加热式电加热烟具进行感官品质评价。

1.3 数据处理

各样品平行测定 3 次, 取平均值, 采用 Excel 软件对数据进行处理, 采用 SPSS 21 软件对数据进行差异显著性分析及主成分分析。

2 结 果

2.1 不同生物酶处理对烟叶原料常规化学成分含量的影响

由表 1 可知, 各样品常规化学成分含量差异显著, 与 CK(空白对照样品)相比, T2 处理烟丝的果胶含量降低 35.8%, T3 处理烟丝的淀粉含量降低 42.2%, T5 处理烟丝的果胶与纤维素含量分别降低 22.8% 与 38.2%。与 CK 相比, T2、T5 总糖含量提升较明显, 分别提升 23.5% 和 31.4%。

表 1 不同酶处理对烟叶原料化学成分含量的影响

Table 1 Effect of different enzyme treatments on the chemical composition content of tobacco leaf raw materials

样品编号 Sample number	还原糖 Reducing sugar	总糖 Total sugar	总氮 Total nitrogen	淀粉 Starch	果胶 Pectin	纤维素 Cellulose	总植物碱 Total alkaloid	%
CK	10.57b	11.37c	1.78ab	4.15a	8.37ab	11.03a	1.80c	
T1	11.03b	12.32bc	1.04d	3.82a	7.91b	10.12ab	2.06b	
T2	11.57ab	14.04ab	1.76ab	3.97a	5.37c	10.27ab	1.92bc	
T3	10.54b	13.02abc	1.84ab	2.40b	8.44a	10.81a	1.76c	
T4	10.20b	11.64c	1.71bc	2.65b	7.98b	9.64ab	2.32a	
T5	13.15a	14.94a	1.91a	3.90a	6.46c	6.82d	2.04b	
T6	10.99b	12.90abc	1.54c	2.75b	6.11c	8.83bc	2.30a	
T7	10.82b	11.95bc	1.85ab	3.83a	7.98b	7.46cd	1.74c	

注: 同列数字后标有不同小写字母表示处理间差异显著($p<0.05$)。

Note: The numbers in the same column followed by different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($p<0.05$).

2.2 不同生物酶处理对烟叶原料热解特性的影响

不同生物酶处理的烟叶原料按照 1.2.3 小节方法进行热重试验, DTG 曲线如图 2 所示。由图可知, 烟叶原料的热解过程可分为 4 个失重阶段, 阶段 I 主要包括自由水及结合水的散失, 阶段 II 主要包括单糖、低聚糖、小分子有机酸、游离氨基酸和其他热不稳定的挥发性成分的降解, 阶段 III 与阶段 IV 主要包括蛋白质、类脂、果胶等生物大分子和半纤维素、纤维素和木质素的热解^[9]。

由图 2 与表 2 可以看出, 酶处理对烟叶原料热失重行为的影响主要集中在阶段 II、III、IV, 对温度区间以及 t_{max} 的影响较小, 对 DTG_{max} 与失重率

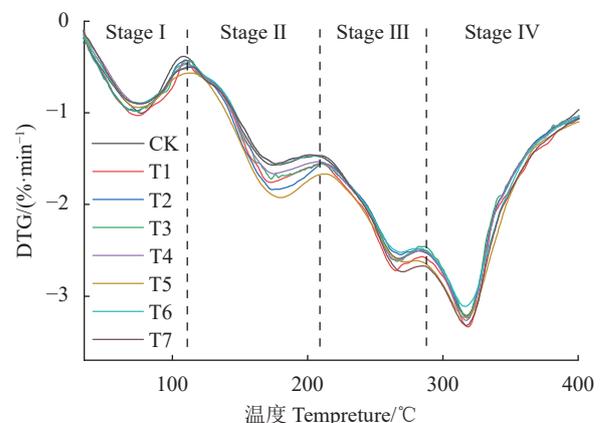


图 2 不同酶处理烟草原料的 DTG 曲线

Fig. 2 DTG curves of tobacco raw materials treated with different enzymes

表2 不同酶处理烟草原料的热解特性参数

Table 2 Pyrolysis characteristics parameters of tobacco raw materials treated with different enzymes

阶段 Stage	热解特性参数	CK	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
阶段 I	温度区间/°C	30~107	30~109	30~111	30~114	30~111	30~114	30~114	30~115
	$t_{\max}/^{\circ}\text{C}$	76a	74b	71d	73c	75ab	74b	75ab	75ab
	$\text{DTG}_{\max}/(\% \cdot \text{min}^{-1})$	1.00a	1.03a	0.97b	0.98b	0.90d	0.93c	0.88e	0.90cd
	失重率/%	4.25d	4.71a	4.47b	4.75a	4.05e	4.03e	4.33c	3.90f
阶段 II	温度区间/°C	107~209	109~210	111~211	114~210	111~209	114~212	114~203	115~201
	$t_{\max}/^{\circ}\text{C}$	175bc	171e	174cd	173d	176b	181a	176b	177b
	$\text{DTG}_{\max}/(\% \cdot \text{min}^{-1})$	1.57e	1.75c	1.83b	1.73c	1.66d	1.92a	1.57e	1.55e
	失重率/%	9.73g	10.62c	11.81b	10.39d	9.97e	12.52a	8.71h	9.83f
阶段 III	温度区间/°C	209~282	210~283	211~283	210~285	209~285	212~282	203~282	201~285
	$t_{\max}/^{\circ}\text{C}$	266cd	263d	269ab	266cd	266cd	271a	268bcd	270abc
	$\text{DTG}_{\max}/(\% \cdot \text{min}^{-1})$	2.58cd	2.71a	2.55cd	2.61bc	2.60bc	2.63b	2.52d	2.73a
	失重率/%	15.63f	17.76a	15.47g	16.31c	16.59b	15.3h	16.17d	15.71e
阶段 IV	温度区间/°C	282~400	283~400	283~400	285~400	285~400	282~400	282~400	285~400
	$t_{\max}/^{\circ}\text{C}$	317a	317a	318a	317a	317a	316a	316a	317a
	$\text{DTG}_{\max}/(\% \cdot \text{min}^{-1})$	3.21c	3.33a	3.25bc	3.23c	3.26bc	3.24bc	3.11d	3.30b
	失重率/%	24.35a	23.81b	23.74c	23.35e	23.63d	23.18f	24.32a	24.33a

注：同行数字后标有不同小写字母表示处理间差异显著($p < 0.01$)。

Note: The numbers in the same line followed by different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($p < 0.01$).

的影响较为显著。阶段 I 各样品的 t_{\max} 为 71~76 °C, DTG_{\max} 为 0.88%~1.03%/min, 失重率为 3.90%~4.71%。

阶段 II 各样品的 t_{\max} 为 171~181 °C, DTG_{\max} 为 1.55%~1.92%/min, 失重率为 8.71%~12.52%。其中各样品失重率之间差异最为显著, 且除 T6 样品外, 其余各样品失重率相较 CK 均有较明显提升, 提升最明显的是 T2 与 T5 样品, 其失重率分别增加 2.08% 与 2.79%, 且 DTG_{\max} 增加 0.26% 与 0.35%。阶段 II 中 T6 的失重率相较于 CK 有一定程度的降低。

阶段 III 与阶段 IV 均可归为大分子物质的裂解, 对其进行综合对比分析。阶段 III、IV 各样品的 t_{\max} 为 316~318 °C, DTG_{\max} 为 (3.11%~3.33%)/min, 两阶段的总体失重率为 38.48%~41.57%。由表 2 可知, 各样品的 t_{\max} 之间差异较小, 除 T6 样品外, 其余酶处理样品的 DTG_{\max} 相比 CK 均有所提升。T2(39.21%)、T3(39.66%)、T5(38.48%)的失重率较 CK(39.98%)有所降低。

2.3 不同生物酶处理对烟叶原料香味成分热释放的影响

不同生物酶处理的烟叶原料热释放香味成分含量如表 3 所示, 共检出 41 种对烟叶香气影响较大的香味成分, 按照官能团分为醛类、酮类、醇类、烯炔类、酯类、酚类与杂环类。不同酶处理的烟叶

原料热释放香味成分总量如图 3 所示, T2、T5 和 T6 的香味物质总量较 CK 分别提升 800.85、620.79 和 194.96 $\mu\text{g/g}$ 。

图 4 为不同酶处理样品中不同类别香味物质的含量对比。由图 4 与表 3 可知, 与 CK 相比, T2 中醛类物质含量提升最为明显, 增幅为 38.02%。酮类物质的含量与种类最多, 其中 T2 与 T5 的增幅较 CK 最明显, 分别增加 73.88% 与 54.27%。醇类物质在 T1 中含量提升最为明显, 增量为 29.52%。各样品中烯炔类物质的含量相较于 CK 都有不同程度的降低, 主要是由新植二烯含量的降低导致。检出的酯类产物的种类及含量较少。酚类物质在 T2 样品中含量增加最多, 增幅为 15.31%。杂环类物质在 T1 样品中的增量较大, 增幅为 6.63%, 除 T2 与 T6 样品, 其余酶处理样品中的杂环类物质均呈降低趋势。

2.4 香气成分的主成分分析

对 7 种不同酶处理的加热卷烟叶组配方原料的 7 类香气成分进行主成分分析, 分析结果如表 4-6 所示。由表 4 可知, 前 3 个主成分的累计贡献率达到 86.196%, 可以解释原始数据的大部分信息, 因此本研究选择前 3 个主成分作为数据分析的有效成分。

各主成分在各因子变量上的载荷值代表该主成分与该因子的相关程度, 载荷值 > 0.8 时, 可认为

表 3 不同酶处理烟草原料的香味成分含量比较

Table 3 Comparison of aroma content of tobacco raw materials processed with different enzymes

μg/g

类别 Category	香味成分 Aroma components	CK	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
醛类	5-甲基呋喃醛	127.71	157.51	116.60	70.31	120.44	124.74	107.49	53.05
	糠醛	84.55	100.66	97.59	40.67	75.58	67.84	69.11	17.70
	苯乙醛	265.13	76.07	444.73	165.01	387.18	301.76	323.98	53.05
	小计	477.39	334.24	658.92	275.99	583.24	494.34	500.58	123.8
酮类	DDMP	235.14	243.91	290.41	171.11	219.48	328.57	218.30	200.67
	2-吡咯烷酮	50.23	40.33	65.94	62.91	46.54	52.76	49.34	46.34
	巨豆三烯酮	157.10	149.7	249.92	105.01	115.84	188.09	111.76	105.68
	4-叔丁基苯丙酮	175.28	377.81	623.77	360.46	203.80	455.53	324.34	328.54
	9-羟基-4,7-巨豆二烯-3-酮	68.18	78.79	81.50	73.72	59.81	93.50	88.18	41.54
	苯乙酮	21.43	12.72	26.91	24.44	18.45	23.54	20.34	18.34
	甲基环戊烯醇酮	21.88	57.24	28.07	12.54	10.03	20.04	20.81	75.45
	邻甲基苯乙酮	56.12	62.84	66.63	52.38	48.24	54.87	53.52	43.56
	茄酮	90.27	100.50	120.03	140.90	90.31	149.39	102.66	133.29
	小计	927.39	1180.91	1612.59	1059.82	865.84	1430.71	1086.11	1030.46
醇类	糠醇	132.26	157.69	146.72	83.60	137.69	142.58	128.49	96.71
	麦芽醇	84.85	86.14	99.19	83.24	75.39	79.48	83.27	76.34
	香叶基香叶醇	132.94	202.63	193.67	135.24	168.24	159.34	127.09	117.49
	叶绿醇	109.81	149.13	128.36	129.65	138.54	167.50	134.38	66.38
	小计	459.86	595.59	567.94	431.73	519.86	548.9	473.23	356.92
烯烃类	(+)-香橙烯	45.26	19.87	96.35	49.63	82.85	40.47	82.22	38.74
	香树烯	68.34	20.95	94.99	28.45	—	—	51.86	3.36
	新植二烯	800.72	550.23	578.78	588.76	435.07	642.84	561.41	706.68
	右旋萜二烯	138.51	128.91	153.19	79.26	98.15	117.28	139.74	—
	小计	1086.33	745.77	923.31	746.1	763.11	897.46	896.08	748.78
酯类	γ-丁内酯	28.36	23.54	29.50	15.99	24.99	29.04	27.03	20.64
	棕榈酸甲酯	100.92	117.62	125.96	117.85	117.76	139.07	113.06	78.96
	小计	129.28	141.16	155.46	133.84	142.75	168.11	140.09	99.6
酚类	苯酚	405.52	392.87	459.62	408.21	393.21	449.86	422.62	492.93
	愈创木酚	111.54	84.81	136.59	103.76	92.39	128.94	117.84	87.56
	小计	517.06	477.68	596.21	511.97	485.6	578.8	540.46	580.49
杂环类	2,4-二甲基吡啶	44.16	43.87	18.60	13.88	46.14	16.57	15.69	12.36
	2-乙酰基吡咯	50.03	58.35	39.14	22.94	26.12	23.75	63.37	16.66
	3,5-二甲基吡啶	11.49	11.65	10.48	6.90	9.70	12.00	9.79	3.21
	3-甲基吡啶	42.64	12.16	44.40	19.87	39.31	38.54	39.95	12.60
	3-甲基吡啶	152.59	176.38	139.03	130.24	31.32	40.71	146.28	60.24
	吡啶	130.97	158.12	179.86	184.94	144.71	184.49	160.55	147.70
	小计	431.88	460.53	431.51	378.77	297.3	316.06	435.63	252.77
总量	5529.59	5209.49	6330.44	4845.76	4556.53	6150.38	5724.55	4296.83	

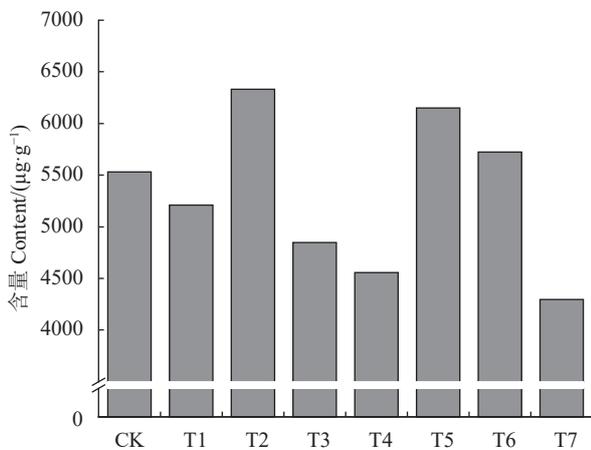


图 3 不同酶处理的烟叶原料热释放香味成分总量
Fig. 3 Total amount of aroma components released from tobacco materials treated with different enzymes

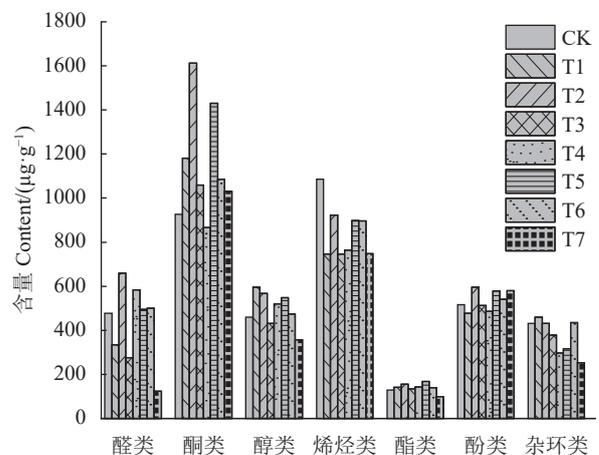


图 4 不同类别香味物质含量对比
Fig. 4 Comparison of different aroma substance contents

表4 主成分的特征值及贡献率
Table 4 Eigenvalues and contribution rates of principal components

主成分 Principal component	特征值 Characteristic value	贡献率 Contribution rate/%	累积贡献率 Accumulated contribution rate/%
1	3.324	47.492	47.692
2	1.588	22.692	70.185
3	1.121	16.012	86.196
4	0.683	9.753	95.949
5	0.164	2.350	98.299
6	0.109	1.561	99.860
7	0.010	0.140	100.000

主成分与因子之间具有显著相关性^[10]。由表4与表5可知,第1主成分的贡献率为47.692%,与醛类、醇类、酯类高度正相关。第2主成分的贡献率为22.692%,与酚类高度正相关;第3主成分的贡献率为16.012%,与烯炔类高度正相关。

为利用主成分分析反映各酶处理原料样品的综合香气品质,进一步根据表5中3个主成分的特征向量建立样品热释放香味成分的线性关系式(1)-(3)

$$Y_1 = 0.460X_1 + 0.390X_2 + 0.464X_3 + 0.269X_4 + 0.493X_5 + 0.102X_6 + 0.308X_7 \quad (1)$$

$$Y_2 = -0.076X_1 + 0.441X_2 - 0.244X_3 + 0.099X_4 - 0.031X_5 + 0.770X_6 - 0.369X_7 \quad (2)$$

$$Y_3 = 0.141X_1 - 0.256X_2 - 0.344X_3 + 0.785X_4 - 0.255X_5 + 0.095X_6 + 0.324X_7 \quad (3)$$

式中: Y_1 、 Y_2 和 Y_3 分别代表第1主成分值、第2主成分值与第3主成分值。

通过表4和表5所得特征向量和特征值,采用归一化法按各公因子对应的方差贡献率为权重计算得到综合因子评分 $Y=0.55Y_1+0.26Y_2+0.19Y_3$,根据综合因子评分函数计算其综合评分,结果见表6。

由表6可知,综合评价得分中T2样品的香味成分得分最高,为1.80,香气得分排序为T2>T5>CK>T6>T1>T4>T3>T7。

表5 主成分特征向量和载荷值
Table 5 Principal component eigenvectors and load values

因子 Factor	第1主成分 The first principle component		第2主成分 The second principle component		第3主成分 The third principle component	
	特征向量 Eigenvector	载荷值 Load value	特征向量 Eigenvector	载荷值 Load value	特征向量 Eigenvector	载荷值 Load value
X_1	0.460	0.840	-0.076	-0.096	0.141	0.149
X_2	0.390	0.712	0.441	0.556	-0.256	-0.271
X_3	0.464	0.846	-0.244	-0.308	-0.344	-0.365
X_4	0.269	0.490	0.099	0.125	0.785	0.832
X_5	0.493	0.898	-0.031	-0.039	-0.255	-0.270
X_6	0.102	0.185	0.770	0.971	0.095	0.101
X_7	0.308	0.562	-0.369	-0.465	0.324	0.343

注: X_1 ~ X_7 分别代表醛类、酮类、醇类、烯炔类、酯类、酚类、杂环类香味物质的含量。

Note: X_1 ~ X_7 represent the content of aldehydes, ketones, alcohols, olefins, esters, phenols and heterocyclic substances, respectively.

表6 主成分综合得分
Table 6 Principal component analysis comprehensive score

处理Treatment	Y_1	Y_2	Y_3	Y	排序Rank
CK	0.05	-0.68	2.25	0.28	3
T1	0.42	-1.7	-1.03	-0.41	5
T2	2.67	1.28	0.01	1.80	1
T3	-1.3	-0.41	-0.41	-0.90	7
T4	-0.41	-1.19	-0.75	-0.68	6
T5	1.59	1.3	-0.7	1.08	2
T6	0.35	-0.25	0.74	0.27	4
T7	-3.37	1.65	-0.09	-1.44	8

2.5 不同生物酶处理对烟叶原料感官品质的影响

不同酶处理烟草原料的感官质量评价得分如表7所示。由表7可知,生物酶处理均可在不同程度上提升卷烟感官品质,其中提升较大的处理为T2、T6与T5,总分相较于CK分别提升29.4、26.5和28.4。其中,T2、T5对于吃味(香味、余味与刺激性)的提升较为明显,总体提升17.0与17.9;

T6对于烟气(劲头与均匀性)的提升较为明显,总体提升17.3。

3 讨论

生物酶处理可以选择性地将卷烟燃吸中具有负面影响的生物大分子,催化水解为香味物质或香味前体,因其底物专一性强,不同生物酶处理对烟叶物质组分的影响存在差异。本研究结果表明,不同酶处理烟叶原料的常规化学成分含量差异显著,果胶酯酶与植物水解酶处理后,烟叶还原糖与总糖含量提升较为明显,这是由于果胶酯酶与植物水解酶的作用底物均为植物细胞壁主要组分,能促使糖类物质进一步溶出,糖含量的提升有助于柔和烟气,提升烟气甜感^[11-12]。

表 7 不同酶处理烟叶原料的感官品质评价

Table 7 Sensory quality evaluation of tobacco raw materials treated with different enzymes

处理Treatment	香味 Aroma	烟气 Smoke	劲头 Strength	刺激性 Irritation	余味 After taste	均匀性 Stability	总分 Total score
CK	15.3	17.8	4.1	4.4	6.2	4.5	52.3
T1	16.7	22.4	7.4	4.7	7.7	7.7	66.6
T2	22.8	23.2	7.7	7.6	12.5	7.9	81.7
T3	17.1	19.5	5.3	5.1	8.3	6.6	61.9
T4	17.6	21.6	7.2	5.6	7.3	7.2	66.5
T5	23.8	21.0	5.4	8.3	11.7	8.6	78.8
T6	20.1	26.8	8.8	7.7	9.2	8.1	80.7
T7	20.2	25.3	8.2	5.4	9.7	6.7	75.5

烟叶的低温热解过程可分为 4 个失重阶段。其中, 阶段 I 存在差异, 可能是由于大分子物质的降解改变了原料的微观结构与物质组成, 从而影响持水能力。例如, 木聚糖酶处理后烟叶失重率降低, 与木聚糖酶降解了部分半纤维素, 致使组织结构疏松而持水力下降有关^[13]。阶段 II 中果胶酯酶和植物水解酶处理后烟叶失重率与 DTG_{max} 的提升最为明显, 表明此两种酶使原料中的果胶与纤维素分解为糖类等香味物质的前体物, 提高了小分子物质及挥发性产物的含量^[14-15], 这与样品中总糖与还原糖含量提高的结果相对应。漆酶处理后烟叶失重率降低, 可能是由于其促进了酶促棕色化反应, 加强了烟草中的多酚类物质与氨基酸、糖类等小分子物质结合^[16]。在木质素纤维素类高分子分解的 III 和 IV 阶段中, DTG_{max} 的提升表明酶处理可以提高此阶段的反应活性。

烟叶加热状态下释放的香味成分是评价原料品质的重要指标, 本研究中果胶酯酶处理对醛类物质的提升最为明显, 尤其是苯乙醛释放量增幅最高, 可以丰富加热卷烟烟香, 增添杏仁香风味^[17]。另外, 5-甲基呋喃醛与糠醛在蛋白酶处理后热释放增幅较大, 这与原料中底物蛋白质分解产生的氨基酸促进了美拉德反应产物的生成有关^[18], 果胶酯酶与植物水解酶显著提升了巨豆三烯酮、茄酮等烟草重要香味成分的含量, 这可能是由于果胶酯酶与植物水解酶分解了细胞壁的主要组成物质, 使细胞通透性提升, 促进了烟草内源性香味物质的释放^[15]。不同酶处理后烟叶释放的烯炔类物质中新植二烯含量均不同程度降低, 表明新植二烯在酶处理烟叶时发生转化与损失^[19]。酚类物质中, 果胶酯酶处理后酚类物质含量增加最多, 它们在抽吸过程中可发生酸性反应, 平衡柔和吸味^[20], 其中愈创木酚在

果胶酯酶、植物水解酶及漆酶处理后释放有所增加, 可以丰富烟熏香, 提升烟气甜感^[21]。杂环类香味物质在蛋白酶处理后热释放量增幅较大, 其次为果胶酯酶与漆酶处理样品, 可以起到增浓烟气, 提升劲头, 丰富烘焙与坚果香韵的作用^[21], 其余酶处理样品中的杂环类物质含量均呈下降趋势, 可能会导致烟气劲头不足、吸味平淡。

进一步利用香气成分的主成分分析法, 建立了香气品质评价模型, 发现果胶酯酶与植物水解酶处理后的原料样品香气品质较优, 但同时也应注意生物酶的选用不适宜可能会造成香气品质下降。果胶酯酶、漆酶与植物水解酶可以显著提升加热卷烟的感官品质, 这与主成分分析结果基本一致, 表明基于香味成分的主成分分析法, 可在一定程度上评判烟叶原料的感官品质优劣。

4 结 论

研究了 7 种不同酶处理对烟叶原料常规化学成分、热解特性、香味成分热释放与感官品质的影响, 主要得出以下结论: ①酶处理改变了烟叶内物质组成, 果胶酯酶与植物水解酶处理后烟叶中总糖含量提升最高, 分别为 23.5% 和 31.4%。②烟叶原料的热解可分为水分散失、挥发性成分脱除、纤维素类成分分解及木质素分解等阶段, 且各酶处理烟叶原料的热解特征参数存在显著差异。果胶酯酶与植物水解酶处理后的烟叶原料, 在挥发性成分脱除阶段的失重率提升 2.08% 与 2.79%, DTG_{max} 增加 0.26% 与 0.35%, 在纤维素类及木质素分解阶段的失重率有所降低。③果胶酯酶与植物水解酶处理烟叶原料的香味物质总量, 相较于空白对照分别提升 800.85、620.79 μg/g, 且酮类物质含量分别增加 73.88% 与 54.27%。④主成分分析与感官评价的结果表明果胶酯酶与植物水解酶可以提升烟气综合香气品质与

感官品质。研究结果可为酶处理在加热卷烟烟叶原料中的适用性提供参考。

参考文献

- [1] 郝捷, 李选文, 张宝, 等. 纤维素酶在烟草中的应用进展[J]. *生物技术进展*, 2023, 13(2): 166-173.
HAO J, LI X W, ZHANG B, et al. Application progress of cellulase in tobacco[J]. *Current Biotechnology*, 2023, 13(2): 166-173.
- [2] 吴彦, 徐赫男, 刘启斌, 等. 酶解枇杷果提取物在加热卷烟中的应用[J]. *香料香精化妆品*, 2022(195): 23-7.
WU Y, XU H N, LIU Q B, et al. Application of enzymatic hydrolysis of loquat extract in heat-not-burn cigarettes[J]. *Flavour Fragrance Cosmetics*, 2022(195): 23-7.
- [3] 陈芝飞, 陈泽少, 罗灿选, 等. 加热卷烟气溶胶中6种酯类单体香料转移行为研究[J]. *轻工学报*, 2022, 37(3): 58-64.
CHEN Z F, CHEN Z S, LUO C X, et al. Study on transfer behavior of six ester flavors in aerosol of heated tobacco products[J]. *Journal of Light Industry*, 2022, 37(3): 58-64.
- [4] 管明婧, 王成虎, 张劲, 等. 烟叶干馏香料的制备及在加热卷烟中的应用[J]. *烟草科技*, 2022, 55(5): 55-65.
GUAN M J, WANG C H, ZHANG J, et al. Preparation of tobacco dry distilled flavors and their applications to heated tobacco products[J]. *Tobacco Science & Technology*, 2022, 55(5): 55-65.
- [5] 郝捷, 季婧, 李力群, 等. 生物酶和微生物技术改善烟叶香气的研究进展[J]. *生物技术进展*, 2022, 12(6): 817-824.
HAO J, JI Q, LI L Q, et al. Research progress on improving aroma of tobacco leaf with bio-enzymes and microorganism technology[J]. *Current Biotechnology*, 2022, 12(6): 817-824.
- [6] 邓羽翔, 周东, 陈思昂, 等. 复合生物酶对烟叶的提质减害作用研究[J]. *安徽农业科学*, 2022, 50(19): 176-179.
DENG Y X, ZHOU D, CHEN S A, et al. Study on the effects of combinatorial enzymes on tobacco quality and harm reduction[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2022, 50(19): 176-179.
- [7] 谢会雅, 朱列书, 牛艳丽, 等. 利用酶制剂降解烤烟烟叶中淀粉和蛋白质的研究[J]. *中国烟草科学*, 2008, 29(6): 23-26.
XIE H Y, ZHU L S, NIU Y L, et al. Using enzyme to degrade hydrolyze starch and protein of flue-cured tobacco leaves[J]. *Chinese Tobacco Science*, 2008, 29(6): 23-26.
- [8] 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.
GUO C S, WANG Y Q, CHEN C, et al. Effects of glycerin on the release of aroma components from different parts of flue-cured tobacco[J]. *Chinese Tobacco Science*, 2023, 44(2): 88-96.
- [9] LIANG M, YANG T, ZHANG G, et al. Effects of hydrochloric acid washing on the structure and pyrolysis characteristics of tobacco stalk[J]. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2023, 13: 6817-6830.
- [10] 李瑞丽, 王翰书, 何峰, 等. 超声功率对红枣浸膏香气成分及含量的影响[J]. *中国食品添加剂*, 2023, 34(2): 268-275.
LI R L, WANG H S, HE F, et al. Effect of ultrasonic power on aroma composition and content of red date extract[J]. *China Food Additives*, 2023, 34(2): 268-275.
- [11] 郑霖霖, 赵亮, 蔡兴华, 等. 外源酶制剂对雪茄茄芯烟叶化学成分和感官品质的影响[J]. *烟草科技*, 2022, 55(10): 26-33.
ZHENG L L, ZHAO L, CAI X H, et al. Effects of exogenous enzyme preparations on chemical components and sensory quality of tobacco leaves for cigar fillers[J]. *Tobacco Science & Technology*, 2022, 55(10): 26-33.
- [12] 王林, 周平, 贺佩, 等. 糖类物质对烟草香气品质的影响研究进展[J]. *中国烟草科学*, 2021, 42(6): 92-98.
WANG L, ZHOU P, HE P, et al. Research progress on the influence of carbohydrates on tobacco aroma quality[J]. *Chinese Tobacco Science*, 2021, 42(6): 92-98.
- [13] 王敏, 杨星星, 段国燕, 等. 生物酶预处理对秸秆纤维/聚乳酸可降解复合材料的性能影响[J]. *塑料工业*, 2023, 51(3): 145-151.
WANG M, YANG X X, DUAN G Y, et al. Effect of enzyme pretreatment on properties of straw fiber/polylactic acid degradable composites[J]. *China Plastics Industry*, 2023, 51(3): 145-151.
- [14] 马鹏飞, 李巧灵, 林凯, 等. 加热非燃烧烟草薄片的热解特征研究[J]. *食品与机械*, 2018, 34(4): 71-74.
MA P F, LI Q L, LIN K, et al. Study on pyrolysis characteristic of the heat-not-burn reconstituted tobacco[J]. *Food & Machinery*, 2018, 34(4): 71-74.
- [15] 马海燕. 果胶酶和纤维素酶对烤烟中化学成分的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2009.
MA H Y. Effect on the chemical components in flue-cured tobacco by pectinase and cellulose[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2009.
- [16] 吕作新, 刘好宝, 刘彩萍. 烟叶烘烤过程中的酶促棕色化反应及其调控途径[J]. *中国烟草科学*, 1997(2): 21-23.
LÜ Z X, LIU H B, LU C B. The enzymatic browning reaction and its controlling ways in flue-cured tobacco curing course[J]. *Chinese Tobacco Science*, 1997(2): 21-23.
- [17] 李梦琦, 赵一凡, 郑飞云, 等. 耐高糖产香酵母菌的分离鉴定及其应用[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(24): 45-51.
LI M Q, ZHAO Y F, ZHENG F Y, et al. Isolation, identification and application of sugar-tolerant and aroma-producing yeast[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2019, 45(24): 45-51.
- [18] 钱蕾, 侯亚龙, 杨程, 等. Maillard反应物在梗丝中增香及改善吸味的研究[J]. *香料香精化妆品*, 2018(6): 20-25, 32.
QIAN L, HOU Y L, YANG C, et al. Study on improving the aroma profile and smoking quality of cut stem by Maillard reaction products[J]. *Flavour Fragrance Cosmetics*, 2018(6): 20-25, 32.
- [19] 周芳芳, 杨学书, 杨策, 等. 云南3个主栽烤烟品种致香物质含量差异及区域特征分析[J]. *江西农业学报*, 2021, 33(10): 80-86.
ZHOU F F, YANG X S, YANG C, et al. Analysis of content differences and regional characteristics of aroma components in 3 main cultivars of flue-cured tobacco in Yunnan[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2021, 33(10): 80-86.
- [20] 齐奎元, 赵华武, 金江华, 等. 朱砂烟和普通烤烟烟叶酚类物质差异分析[J]. *山东农业科学*, 2023, 55(5): 76-83.
QI K Y, ZHAO H W, JIN J H, et al. Difference analysis of phenolics in cinnabar tobacco and common flue-cured tobacco leaves[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2023, 55(5): 76-83.
- [21] 史宏志, 刘国顺, 杨慧娟, 等. *烟草香味学*[M]. 北京: 中国农业出版社, 2011.
SHI H Z, LIU G S, YANG H J, et al. *Tobacco aroma science*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2011.