

不同基质得率速溶普洱茶关键香气物质组成及其热释放规律分析

袁雨奇¹, 吴雪娇², 徐瓦珍¹, 王志霞¹, 陈国和¹, 谢贺¹, 黄建安^{1,3,4}, 刘仲华^{1,3,4*}, 王超^{1*}

(1. 湖南农业大学茶学教育部重点实验室, 国家植物功能成分利用工程技术研究中心, 湖南长沙 410128)

(2. 天士力控股集团有限公司研究院, 天津 300410)(3. 农业农村部园艺作物基因资源评价利用重点实验室, 湖南长沙 410128)(4. 植物功能成分利用省部共建协同创新中心, 湖南长沙 410128)

摘要: 通过控制浸提温度制备不同基质得率速溶普洱茶。采用感官审评、气相色谱-质谱仪、气相色谱-嗅闻仪及香气提取稀释法对普洱茶及速溶普洱茶香气品质进行分析, 并计算稀释因子和气味活力值, 从普洱茶中鉴定出关键香气物质 13 种, 从不同基质得率 (6.54%、14.61%、20.32%、24.02%、27.41%) 速溶普洱茶中分别鉴定出关键香气物质为 7、8、8、10、10 种。常压水中蒸馏分段回收冷凝液以考察关键香气物质在不同基质得率速溶茶中的释放规律, 测定各关键香气物质峰面积, 其变化趋势显著拟合 ($P < 0.01$) 幂函数模型。根据峰面积随基质得率升高的变化趋势, 将速溶茶关键香气物质分为 5 类。I 类为增加速率呈先增后降的橙花醇、二氢猕猴桃内酯; II 类为释放速率增大的芳樟醇、 β -紫罗兰酮、1,2,3-三甲氧基苯、3,4,5-三甲氧基苯; III 类为释放速率降低的 3,4-二甲氧基苯、1,2,4-三甲氧基苯; IV 类为释放速率呈先降后增趋势的 α -紫罗兰酮; V 类为与基质得率无关的香叶基丙酮。综上, 各关键香气物质随基质得率升高呈不同释放规律。

关键词: 速溶普洱茶; 基质得率; 关键香气物质; 香气释放规律

文章编号: 1673-9078(2025)06-242-253

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.6.0577

Analysis of the Compositions of Key Aroma Substances and Their Heat Release Trends of Instant Pu-erh Teas with Different Matrix Yields

YUAN Yuqi¹, WU Xuejiao², XU Wazhen¹, WANG Zhixia¹, CHEN Guohe¹, Xie He¹,

HUANG Jianan^{1,3,4}, LIU Zhonghua^{1,3,4*}, WANG Chao^{1*}

(1. Key Laboratory of Tea Science of Ministry of Education, National Research Center of Engineering and Technology for Utilization of Botanical Functional Ingredients, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

(2. Institute of Tasly Holding Group Co. Ltd., Tianjin 300410, China)(3. Key Laboratory for Evaluation and Utilization

引文格式:

袁雨奇, 吴雪娇, 徐瓦珍, 等. 不同基质得率速溶普洱茶关键香气物质组成及其热释放规律分析[J]. 现代食品科技, 2025, 41(6): 242-253.

YUAN Yuqi, WU Xuejiao, XU Wazhen, et al. Analysis of the compositions of key aroma substances and their heat release trends of instant pu-erh teas with different matrix yields [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(6): 242-253.

收稿日期: 2024-04-28

基金项目: 国家重点研究发展计划项目 (2023YFD1601500); 湖南省自然科学基金项目 (2023JJ40319); 国家现代茶产业技术体系 (CARS-19); 云南省科技攻关计划 (202202AE090030); 科技人才平台计划 (院士专家工作站) (202104AC100001-B01)

作者简介: 袁雨奇 (1994-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 茶叶深加工, E-mail: 383675727@qq.com

通讯作者: 刘仲华 (1965-), 男, 博士, 教授, 中国工程院院士, 研究方向: 茶叶深加工与资源利用, E-mail: zhonghua-liu-ms@hunau.edu.cn;

共同通讯作者: 王超 (1987-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向: 深加工技术及品质化学, E-mail: wangchao2809@126.com

of Gene Resources of Horticultural Crops, Ministry of Agriculture and Rural Affairs of China, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)(4.Co-Innovation Center of Education Ministry for Utilization of Botanical Functional Ingredients, Changsha 410128, China)

Abstract: Instant Pu-erh teas with different matrix yields were prepared by controlling extraction temperature. The aroma quality of Pu-erh tea and instant Pu-erh tea samples with different matrix yields were analyzed by sensory evaluation, gas chromatography-mass spectrometry, gas chromatography-olfactometry and aroma extraction dilution method, and the dilution factors and odor activity values were calculated. 13 key aroma substances were detected in Pu-erh tea, and 7, 8, 8, 10 and 10 key aroma substances were identified from the Instant Pu-erh tea samples with different matrix yields (6.54%, 14.61%, 20.32%, 24.02%, 27.41%), respectively. The condensates were recovered from different stages of distillation in water at atmospheric pressure to investigate the release trends of the key aroma substances in the instant tea with different matrix yields, and the peak areas of the key aroma substances were determined. The changing trends of the key aroma components were significantly fitted to a power function model ($P<0.01$). Based on the trends of peak area changing with the increasing matrix yield, the key aroma substances of the instant tea were classified into 5 categories: I, nerol and dihydroactinodiolide (their increasing showed an increase followed by decrease; II, linalool, β -ionone, 1,2,3-trimethoxybenzene and 3,4,5-trimethoxytoluene (their release rates increased); III, 3,4-dimethoxytoluene, 1,2,4-trimethoxytoluene and 2,4-trimethoxytoluene (their release rates decreased); IV, α -ionone (its release rate decreased then increased); V, geranyl acetone (which was not associated with matrix yield). In conclusion, all the individual key aroma substances exhibited different release trends with the increase of matrix yield.

Key words: instant Pu-erh tea; matrix yield; key aroma components; aroma release regularity

普洱茶是以云南大叶种晒青毛茶为原料,经渥堆发酵工艺制作而成^[1]。在渥堆过程中,原料经微生物、酶、湿热、氧化等共同作用,其内在品质发生了巨大变化,造就了其陈香显著、滋味浓厚醇和的风味特征^[1]。同时具备降脂^[2,3]、降血糖^[4]、抗氧化^[5]等保健功效。速溶普洱茶是以普洱茶为原料,经浸提、过滤、浓缩、干燥等工艺加工而成^[6]。速溶普洱茶不仅富集普洱茶有益成分,同时具备便捷性,深受广大消费者青睐^[7]。

速溶普洱茶风味品质形成是非挥发性基质成分和挥发性香气物质共同作用的结果。其中非挥发性基质成分主要包括:茶色素、儿茶素及咖啡碱等^[8];挥发性香气物质主要包括:甲氧基苯类、醇类、酮类、酯类等。目前,有关茶叶香气研究中,气相色谱-质谱联用仪(Gas Chromatography-mass Spectrometer, GC-MS)结合气相色谱-嗅觉仪联用分析法(Gas Chromatography-Olfactometry, GC-O)是常用方法^[9,10]。其中,GC-O结合气味活力值(Odor Activity Value, OAV)常用于筛选关键香气物质,在茶^[11]、白酒^[12]、红酒^[13]及咖啡^[14]等饮品中被广泛应用。Xu等^[15]采用顶空固相微萃取(Headspace Solid-phase Microextraction, HS-SPME)、GC-O及GC-MS

鉴定出普洱茶39种活性香气物质;Ma等^[16]采用OAV鉴定出芳樟醇、1,2,3-三甲氧基苯、1,2,4-三甲氧基苯及 α -紫罗兰酮为普洱茶关键香气物质;佟文哲^[17]采用OAV鉴定出甲氧基苯类、醇类、醛类、酮类及酯类对普洱茶整体风味有重要贡献。目前,对普洱茶关键香气成分释放规律的研究已有报道,但鲜有对速溶普洱茶关键香气物质释放规律的研究。石禾云等^[18]对普洱茶对关键香气物质热释放规律进行测定,发现不同各类香气物质释放规律不同,醛类含量变化会随收集管数呈Sin曲线趋势,甲氧基苯类、醇类、酮类香气物质含量变化则呈指数递减;Wang等^[19]采用连续常压蒸馏回收砖茶的香气冷凝液,发现随浸提时间增加,茶叶香气总强度及各类香气物质含量均呈幂函数递减。

该研究采用HS-SPME结合GC-MS和GC-O筛选速溶普洱茶及其原料中的香气物质,采用香气提取物稀释分析法(Aroma Extract Dilution Analysis, AEDA)和OAV,确定不同基质得率速溶普洱茶关键香气物质构成,进而采用常压蒸馏分段回收冷凝液的方法考察关键香气物质在不同基质得率速溶普洱茶中的释放规律,阐明基质得率对速溶普洱茶关

键香气物质释放规律的影响,为提升速溶普洱茶香气品质提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

普洱茶(2009年)由云南天士力帝泊洱生物茶集团有限公司提供,样品在实验前用铝箔袋密封保存于-40℃冰箱。

1,2,4-三甲氧基苯(97%)、3,4,5-三甲氧基甲苯(98%)、 β -紫罗兰酮(97%)和水杨酸甲酯(99.5%),上海阿拉丁生物科技股份有限公司;1,2,3-三甲氧基苯(98%)和 α -紫罗兰酮(92%),北京白灵威科技有限公司;3,4-二甲氧基甲苯(98%),阿法埃莎(中国)化学有限公司;壬醛(95%)、芳樟醇(96%)和2-苯乙醇(99%),日本东京化成工业株式会社;香叶基丙酮(99%)、二氢猕猴桃内酯(98%)、无水乙醇(99%)和氯化钠(99%),上海麦克林生化科技有限公司;正构烷烃 $C_6\sim C_{30}$ (99%),美国Accu Standard公司。

1.1.2 仪器设备

BCD-551WPCX冰箱,长虹美菱股份有限公司;DL-2030低温冷却循环泵,无锡沃信仪器制造有限公司;DZTW型调温电热套,天津天泰仪器有限公司;R5006K2BB减压浓缩旋蒸仪,上海申生科技有限公司;DK-S26恒温水浴锅,上海森信实验仪器有限公司;SHB-95B循环水式多用真空泵,上海秋佐科学仪器有限公司;ME204T电子分析天平,瑞士Mettler Toledo公司;Trace1300-ISQ气相色谱-质谱联用仪、AS/AL自动进样器、Sorvall ST 16R台式高速离心机和Milli-Q超纯水系统系列,美国Thermo公司;65 μ m PDMS/DVB固相微萃取头、SPME手柄,美国Supelco公司;RTX-5MS石英毛细管色谱柱,美国Restek公司;ODP2辨嗅仪,德国Gerstel公司;IT-09A5恒温磁力搅拌机,北京信而泰科技股份有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品制备

取5份300g普洱茶分别置于5L圆底烧瓶中,各加入2500mL沸水进行常压蒸馏,各收集富含香气物质的冷凝液500mL,采用重蒸馏技术将冷凝液

二次蒸馏回收50mL。另取5份300g普洱茶分别置于5L锥形瓶中,按料液比1:8加入超纯水,浸提温度设置分别为 A_1 (4℃)、 A_2 (25℃)、 A_3 (50℃)、 A_4 (75℃)、 A_5 (100℃),浸提60min,过滤;茶渣进行二次、三次浸提,料液比调整为1:5,浸提温度及时间不变,浸提液用200目滤布过滤。合并三次浸提液放入4℃冰箱中过夜,取上清液;减压浓缩(温度70℃,转速20r/min)至固形物含量约20Bx°,离心除杂(8000r/min,10min)。浓缩处理后,不同浸提温度制备的浓缩液中分别加入重蒸馏回收的香气冷凝液混匀。参照Wang等^[20]的方法,采用静电喷雾干燥,获得不同基质得率速溶普洱茶。

1.2.2 基质得率的测定

参照GB 5009.3-2016方法测定基质得率($C_{Matrix\ yield}$,%)。称取上述浸提液5.00g(m_0)置于恒重铝盒(m_1)中,105℃烘4h,转移至干燥器中静置30min,称重;105℃烘干1h转移至干燥器中静置30min,称重。重复上述操作,直至连续两次称量质量之差不超过 2.00×10^{-3} g,即为恒重,并以最小重为准,记录质量(m_2)。不同基质得率速溶普洱茶基质得率计算公式如下:

$$C_{Matrix\ yield} = \frac{(m_2 - m_1) \times m}{300 \times m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

$C_{Matrix\ yield}$ ——基质得率, %;

m ——浸提上清液总质量, g;

m_0 ——随机抽取的浸提上清液质量, g;

m_1 ——铝盒质量, g;

m_2 ——铝盒与烘干过的样品恒重后的总质量, g。

1.2.3 感官审评

不同基质得率速溶普洱茶审评参考GB/T 23776-2018《茶叶感官审评方法》及GB/T 22111-2008《地理标志产品 普洱茶》,筛选对发酵茶无排斥、健康、无抽烟史,且对不同体积分数香气辨识正确率 $\geq 80\%$ 人员3~5人。取速溶普洱茶0.50g,置于250mL玻璃杯,用沸水150mL冲泡,审评人员对其感官品质进行审评并打分。由于本实验速溶茶外形差距小且无叶底,故不考虑外形及叶底,各因素占比调整为:香气40%、滋味40%、汤色20%,加权评分为百分制。

1.2.4 GC-O条件

1.2.4.1 样品前处理

取1.00g粉碎过的速溶普洱茶($A_1\sim A_5$)及原

料置于 20 mL 顶空瓶中, 加入 6 mL 饱和 NaCl 溶液与转子, 立即密封; 磁力搅拌器温度 70 ℃, 转速 400 r/min, 平衡 10 min, 插入 65 μm PDMS/DVB 萃取头 (新萃取头在使用之前在 GC 端老化 30 min), 吸附时间 60 min。萃取后插入 GC 端进样口, 解吸附 3 min, 同时启动仪器分析。

1.2.4.2 GC 及 ODP 条件

色谱柱 RTX-5MS 石英毛细管柱 (30 m×0.25 mm×0.25 μm); 进样口温度 250 ℃, 载气为高纯氮气 (纯度≥99.99%), 柱流量 1.00 mL/min, 检测器 (FID) 温度 250 ℃^[18], 初始温度 50 ℃, 保持 3 min, 以 2 ℃/min 的速度升至 125 ℃, 保持 5 min, 以 6 ℃/min 的速度升至 180 ℃, 保持 5 min, 以 15 ℃/min 的速度升至 250 ℃, 保持 5 min。原料采用分流进样, 速溶普洱茶 (A₁~A₅) 采用不分流进样。传输线温度 250 ℃, 色谱柱分离出的挥发性香气物质会在毛细管末端以 1:1 的分流比例分别进入 FID 检测器以及 ODP 嗅闻仪端口。

1.2.4.3 FD 值测定方法

采用 AEDA 法测定香气成分的 FD 值, 稀释梯度为 4ⁿ, 即通过手动稀释或调节分流比将原料样品的稀释比率分别调整为 1:4⁰、1:4¹、1:4²、1:4³、1:4⁵ 及 1:4⁶, 每个小组成员对同一样品的每一稀释梯度进行 2 次嗅闻, 直至嗅闻不到任何气味, 记录 FD 值。

1.2.5 GC-MS 条件

1.2.5.1 OAV 测定样品前处理

取 1.00 g 粉碎的速溶普洱茶 (A₁~A₅) 及其原料置于 20 mL 顶空瓶中, 加入 6 mL 饱和 NaCl 溶液, 立即密封, 待后续 GC-MS 测定。

1.2.5.2 香气释放规律测定样品前处理

将 30.00 g 不同基质得率速溶普洱茶加入至 500 mL 圆底烧瓶中, 加入 250 mL 预煮沸的超纯水, 采用常压蒸馏方法分段等量 (每管 15 mL) 收集香气冷凝液 15 管考察香气物质的释放规律, 回收冷凝液取 6 mL 于 20 mL 顶空瓶中, 加入 2.40 g NaCl, 立即密封, 平衡时间 10 min, 插入老化处理的 65 PDMS/DVB 萃取头, 萃取温度为 70 ℃, 萃取时间 60 min, 萃取后插入 GC-MS 进样口, 解吸附时间 3 min。

1.2.5.3 GC 及 MS 条件

色谱柱条件及升温程序参考 1.2.4.2, 不分流进样。电子电离 (Electron Ionization, EI) 源; 电子能量 70 eV; 离子源温度 250 ℃; 传输线温度 250 ℃,

质量扫描采集范围 m/z 35~650 u。

1.2.6 标准品溶液配制

称取香气物质 (FD≥16) 标准品用乙醇定容, 并稀释至合适质量浓度范围 (10⁻²~10⁻³ μg/mL), 取 9 个浓度梯度, 经 HS-SPME 富集、GC-MS 检测, 得到目标化合物在不同浓度下的峰面积, 绘制标准曲线; C₆~C₃₀ 正构烷烃混标溶于氯仿, 待测。

1.2.7 数据分析

GC-MS 检测得到的色谱图由 NIST 21 谱库定性, Excel 2021 进行初步数据处理, 采用 Xcalibur Qual Browser 进行谱图比对, 通过计算保留指数 RI (Retention Index, RI) 确定香气物质, 建立标准曲线进行定量分析; 其中, 标准曲线和非线性拟合曲线绘制采用 Origin 2021。

C₆~C₃₀ 正构烷烃混合液经 GC-MS 分析, 获得标准烷烃保留时间 (Retention Time, RT), 计算出各香气物质 RI, 计算公式如下:

$$D = 100n + 100 \times \frac{T_x - T_n}{T_{n+1} - T_n} \quad (2)$$

式中:

D ——保留指数 (RI);

n ——未知化合物出峰时间前的正构烷烃碳原子数;

$n+1$ ——未知化合物出峰时间后的正构烷烃碳原子数;

T_x ——未知化合物保留时间;

T_n ——未知化合物出峰前正构烷烃的 RT;

T_{n+1} ——未知化合物出峰后正构烷烃的 RT;

$T_n < T_x < T_{n+1}$ 。

OA V 计算方法: 采用 GC-MS 对所有 FD≥16 的香气化合物进行定量, 并查阅文献确定其嗅觉阈值计算 OA V 值, OA V 值>1 的香气成分即可确定为关键香气成分。OA V 值的计算公式如下:

$$B = \frac{C_i}{O_i} \quad (3)$$

式中:

B ——气味活力值 (OA V);

C_i ——样品中香气成分测定浓度;

O_i ——该香气成分的嗅觉阈值 (OT_i)。

2 结果与讨论

2.1 基质得率的测定

速溶茶基质得率随浸提温度增加而升高, 基质得率与浸提温度 (4~100 ℃) 呈正相关。

表 1 不同浸提温度制备的速溶普洱茶基质得率的测定

Table 1 The matrix yield determination of instant Pu-erh tea samples manufactured under different digestion temperature conditions								
样品	<i>m</i> /g	<i>m</i> ₁ /g	<i>m</i> ₀ /g	<i>m</i> ₂ /g	基质得率/%	平均值/%	STDEV/%	RSD/%
A ₁	4 796	31.62	5.00	31.64	6.39	6.54	0.20	3.05
	4 796	32.29	5.01	32.31	6.68			
A ₂	4 913	34.85	5.02	34.90	14.44	14.61	0.24	1.63
	4 913	30.56	5.03	30.61	14.78			
A ₃	4 781	34.95	5.03	35.02	20.46	20.32	0.19	0.91
	4 781	30.57	5.01	30.63	20.19			
A ₄	4 647	31.61	5.01	31.69	23.86	24.02	0.22	0.93
	4 647	32.20	5.01	32.27	24.18			
A ₅	4 475	34.68	5.50	34.77	26.14	27.41	1.80	6.56
	4 475	33.21	5.05	33.31	28.69			

注: *m*: 浸提液上清液总质量; *m*₁: 恒重后的铝盒质量; *m*₀: 随机抽样的浸提上清液质量; *m*₂: 烘干恒重后的浸提上清液与铝盒质量; STDEV 为标准偏差; RSD 为相对标准偏差 (RSD < 10%, *n*=2)。

表 2 不同基质得率速溶茶感官审评结果

Table 2 Sensory tests results of instant Pu-erh tea samples with different matrix yields								
样品编号	加权总分	香气	评分	滋味	评分	汤色	评分	
A ₁	84	陈香平和、带木香、花果香	84	纯正	80	橙红明亮	92	
A ₂	84	陈香平和、带木香	82	纯正	82	橙红明亮	95	
A ₃	85	陈香平和、带木香	82	醇和	83	红浓明亮	96	
A ₄	87	陈香纯正、带木香、花果香	86	醇厚	86	红浓明亮	92	
A ₅	86	陈香纯正、带木香	85	醇厚	85	红浓明亮	90	

2.2 不同基质得率速溶普洱茶感官品质分析

随基质得率升高, 滋味醇厚度愈高。当基质得率为 24.02% (A₄) 时, 感官审评加权总分最高, 陈香纯正、木香、花果香显现, 滋味醇厚, 汤色红浓明亮。表明基质得率在一定区间时, 浸提温度升高令可溶性物质含量增加, 进而影响关键香气物质释放, 从而改善香气品质^[8]。

2.3 关键香气物质定量分析及OAV计算

不同基质得率速溶普洱茶以普洱茶为原料加工而成, 赋予其独特香气特征。因此, 该研究通过对原料香气物质进行定性定量分析, 筛选出对其风味品质起决定性作用的关键香气物质。如表 3 所示, 将原料用 4ⁿ 梯度稀释后以 GC-O 嗅闻及 GC-MS 全定量

测定, 筛出 FD≥16 且 OAV > 1 的 13 种关键香气物质^[21], 分别为: 芳樟醇 (OAV=254 522)、二氢猕猴桃内酯 (OAV=249 700)、橙花醇 (OAV=96 897)、壬醛 (OAV=29 484)、3,4,5- 三甲氧基甲苯 (OAV=21 319)、β-紫罗兰酮 (OAV=16 988)、香叶基丙酮 (OAV=7 738)、水杨酸甲酯 (OAV=2 095)、α-紫罗兰酮 (OAV=1 417)、1,2,4- 三甲氧基苯 (OAV=1 298)、1,2,3- 三甲氧基苯 (OAV=636)、3,4-二甲氧基苯 (OAV=52) 及苯乙醇 (OAV=20), 这些香气物质对原料香气品质有十分重要的作用^[17]。其中, 甲氧基苯类 (3,4-二甲氧基甲苯、1,2,3-三甲氧基苯、1,2,4-三甲氧基苯及 3,4,5-三甲氧基甲苯) 及酮类 (α-紫罗兰酮及香叶基丙酮) 对原料香气品质贡献最大, 该结果与前人研究相符^[22-24]。

表 3 关键香气物质含量及气味活力值 (OAV)

Table 3 The odor activity values and concentrations of key aroma components (OAV)										
名称	RI ^a /RI ^b	质量浓度/(mg/L)	斜率	截距	R ² /(×10 ⁻¹)	阈值/(mg/L)	文献	FD	OAV	气味描述
芳樟醇	1 103/1 105	69.23	8.86×10 ⁶	3.64×10 ⁸	9.98	2.72×10 ⁻⁴	[25]	≥16	254 522	柠檬、柑橘
二氢猕猴桃内酯	1 533/1 531	124.85	6.52×10 ⁷	7.09×10 ⁹	9.99	5.00×10 ⁻⁴	[26]	1 024	249 700	木香
橙花醇	1 229/1 226	29.06	7.02×10 ⁷	1.89×10 ⁹	9.99	3.00×10 ⁻⁴	[27]	16	96 867	花香、柠檬
壬醛	1 085/1 081	91.40	5.01×10 ⁶	1.82×10 ⁸	9.91	3.10×10 ⁻³	[28]	≥16	29 484	玫瑰花香
3,4,5- 三甲氧基甲苯	1 402/1 400	94.87	5.74×10 ⁷	4.89×10 ⁹	9.95	4.45×10 ⁻³	[29]	1 024	21 319	陈香
β-紫罗兰酮	1 488/1 486	142.70	9.05×10 ⁷	3.29×10 ⁹	9.96	8.40×10 ⁻³	[30]	64	16 988	木香
香叶基丙酮	1 466/1 459	77.38	2.34×10 ⁷	4.76×10 ⁷	9.94	1.00×10 ⁻²	[29]	64	7 738	青草、薄荷
水杨酸甲酯	1 178/1 180	83.79	1.01×10 ⁷	5.37×10 ⁸	9.97	4.00×10 ⁻²	[29]	≥16	2 095	薄荷、冬青
α-紫罗兰酮	1 428/1 430	15.02	3.74×10 ⁷	4.79×10 ⁸	9.97	1.06×10 ⁻²	[29]	1 024	1 417	木香、芫荽
1,2,4- 三甲氧基苯	1 370/1 379	337.44	2.27×10 ⁷	3.84×10 ⁸	9.72	2.60×10 ⁻¹	[29]	1 024	1 298	木香、陈香
1,2,3- 三甲氧基苯	1 330/1 326	165.40	2.19×10 ⁷	2.81×10 ⁹	9.93	2.60×10 ⁻¹	[29]	256	636	陈香、药香
3,4- 二甲氧基甲苯	1 244/1 242	74.63	3.77×10 ⁶	1.28×10 ⁸	9.95	1.44×10 ⁰	[29]	64	52	陈香、木香
苯乙醇	1 115/1 117	7.68	1.15×10 ⁷	6.45×10 ⁷	9.99	3.90×10 ⁻¹	[31]	≥16	20	坚果香、花香

注：a：RTX-5MS 检测挥发性化学物质的保留指数；b：参比挥发性化学品的保留指数或网站 <https://pubchem.ncbi.nlm.gov/compound/>

表 4 不同基质得率速溶普洱茶关键香气物质含量 (mg/L)

Table 4 The concentration of the key aroma components of instant Pu-erh tea samples with different matrix yields

名称	定性方式	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅
二氢猕猴桃内酯	MS、RI、STD	120.72	120.91	119.38	119.16	117.79
芳樟醇	MS、RI、STD	58.30	75.16	78.01	79.34	62.32
橙花醇	MS、RI、STD	29.33	29.70	29.77	29.39	28.83
3,4,5-三甲氧基甲苯	MS、RI、STD	/	/	/	99.45	97.81
β-紫罗兰酮	MS、RI、STD	/	138.62	138.37	138.02	138.09
α-紫罗兰酮	MS、RI、STD	14.69	16.08	16.28	14.63	14.80
1,2,3-三甲氧基苯	MS、RI、STD	/	/	/	157.13	153.57
香叶基丙酮	MS、RI、STD	7.10	5.50	6.11	3.66	3.98
1,2,4-三甲氧基苯	MS、RI、STD	51.77	27.77	23.98	20.92	15.79
3,4-二甲氧基甲苯	MS、RI、STD	95.42	95.98	89.94	84.68	77.29

注：“/”表示未检出。

2.4 不同基质得率速溶普洱茶关键香气物质确定

为确定不同基质得率的速溶普洱茶的关键香气物质，采用 GC-O 嗅闻结合 GC-MS 分析对速溶普洱茶样品 (A₁~A₅) 的香气物质进行 GC-MS

定性定量分析并测定 OAV 值。基质得率为 6.54% (A₁) 时，速溶普洱茶关键香气物质仅 7 种，主要类别是甲氧基苯类、醇类、酮类和酯类。其中，甲氧基苯类物质^[32]一般认为是陈香香型的关键香气物质之一。基质得率为 14.61% (A₂) 时，关键香气物质为 8 种，较 A₁ 多了 1 种物质为 β-紫罗

兰酮 (138.62 mg/L, OAV=16 502), 表明酮类物质有所增加, 但仍以甲氧基苯类物质为主。在基质得率为 20.32% (A₃) 时, 关键香气物质为 8 种, 香气物质数量及含量较 A₂ 未发生明显改变。基质得率为 24.02% (A₄) 时, 关键香气物质为 10 种, 增加 2 种含量较高的甲氧基苯类物质, 分别为 1,2,3-三甲氧基苯 (157.13 mg/L, OAV=604) 和 3,4,5-三甲氧基甲苯 (99.45 mg/L, OAV=22 345), 呈现陈香、木香和药香, 被认为是普洱茶的特征香型^[15,32,33], 表明基质得率为 24.02% (A₄) 时, 香气品质有较大提升; 基质得率为 27.41% (A₅) 时, 关键香气物质数量为 10 种, 除 α -紫罗兰酮 (14.80 mg/L, OAV=1 396) 及香叶基丙酮 (3.98 mg/L, OAV=398) 外, 各关键香气物质含量均有下降, 表明 A₅ 香气品质较 A₄ 相比欠佳, 表明基质得率过高时, 较高浸提温度对速溶普洱茶香气品质存在负面影响^[34]。综上, 速溶普洱茶 A₄ 关键香气物质数量及含量最大, 香气品质最佳, 该结果与感官审评结果相一致。

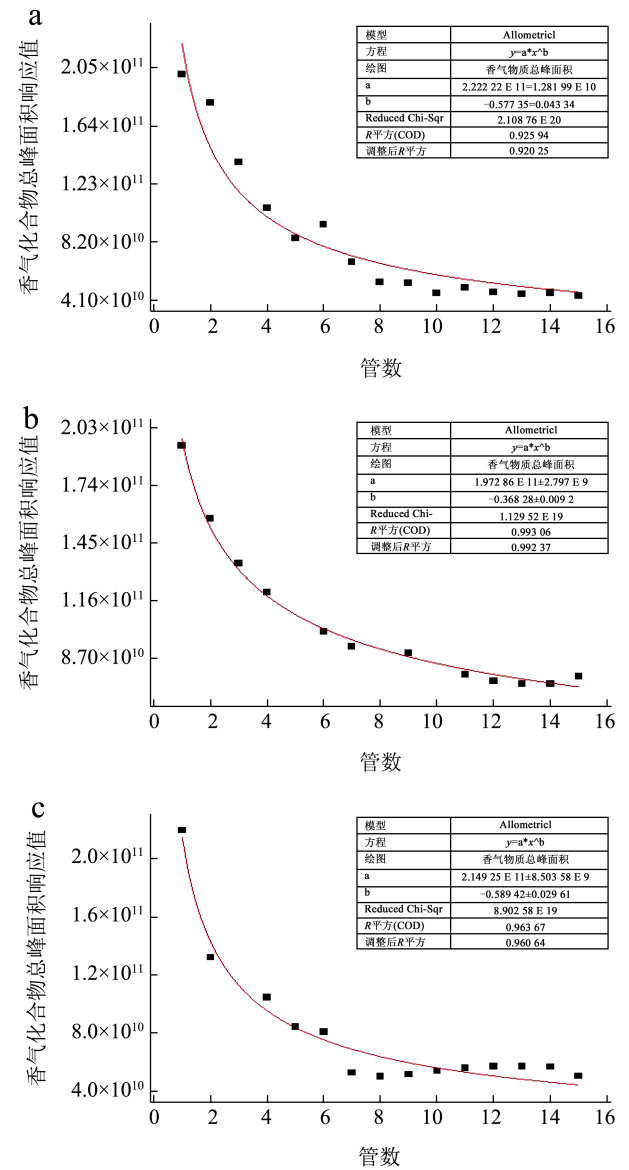
表 5 不同基质得率速溶普洱茶关键香气物质
气味活力值 (OAV)

名称	样品编号				
	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅
二氢猕猴桃内酯	241 436	241 820	238 765	238 329	235 581
芳樟醇	214 355	276 320	286 819	291 682	229 115
橙花醇	97 750	98 998	99 235	97 971	96 100
3,4,5-三甲氧基甲苯	/	/	/	22 349	21 981
β -紫罗兰酮	/	16 502	16 472	16 431	16 440
α -紫罗兰酮	1 386	1 517	1 536	1 380	1 396
1,2,3-三甲氧基苯	/	/	/	604	591
香叶基丙酮	710	550	611	366	398
1,2,4-三甲氧基苯	199	107	92	80	61
3,4-二甲氧基甲苯	66	67	62	59	54

注: “/” 表示未检出。

2.5 不同基质得率速溶普洱茶关键香气物质热释放规律

采用 GC-MS 扫描常压蒸馏回收 15 管 (每管 15 mL) 冷凝液的香气总峰面积, 通过非线性拟合模型可直观呈现速溶普洱茶香气总量变化趋势, 以收集冷凝液 PVC 管数为 X 坐标, 以香气总峰面积为 Y 坐标分析香气释放规律。结果表明, 随基质得率 (6.54%~27.41%) 升高, 速溶普洱茶 (A₁~A₅) 香气总峰面积变化均与非线性拟合曲线 $y=a \cdot x^b$ 显著拟合 ($R^2 \geq 0.90$), 通过指数系数 (Exponent Coefficient, EC) 可判定香气物质释放及增加速率, EC 绝对值越大, 释放或增加速率越大^[19]。结果表明, 当基质得率 24.02% (A₄) 时香气总量释放速率最小。



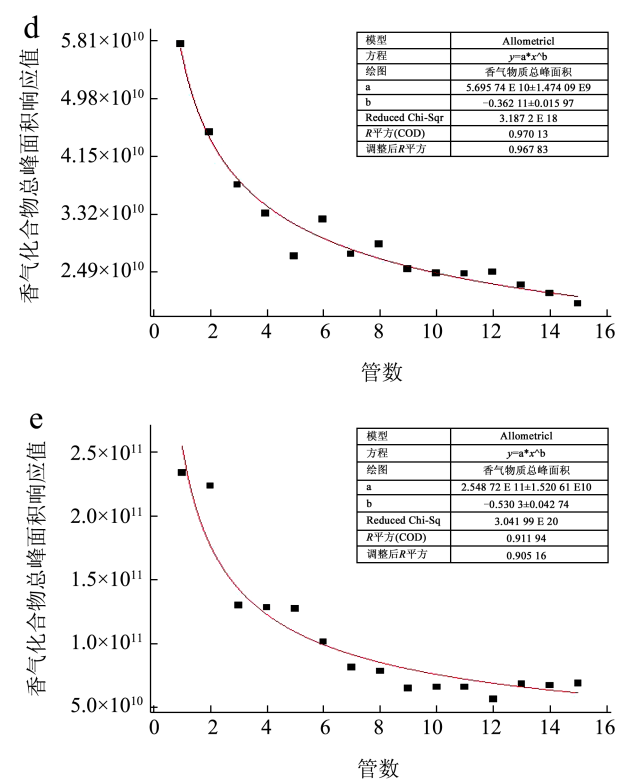


图 1 分段截留不同基质得率速溶普洱茶关键香气释放规律非线性拟合图

Fig.1 The non-linear fitting diagram of the key aroma components release regularities of the instant Pu-erh tea samples with different matrix yields by collecting segmentally

注: a~e 分别为 A₁、A₂、A₃、A₄、A₅。

为解释基质得率对关键香气物质释放影响，将冷凝液收集管数 (X) 和各关键香气物质峰面积 (Y) 进行非线性拟合。结果表明，各关键香气物质峰面积变化均可显著拟合非线性拟合曲线 $y=a*x^b$ ($P<0.01$)。随基质得率升高，根据 EC 值及其变化趋势不同，将该 10 种关键香气物质分为 5 类。I 类为 $EC>0$ 且增加速率呈先增后降趋势的物质，为呈

花果香的橙花醇^[35]及呈木香的二氢猕猴桃内酯^[36]，当基质得率为 14.61% (A₂) 时，橙花醇 (EC=0.81)、二氢猕猴桃内酯 (EC=0.43) 增加速率最大，造成该现象原因可能是：适宜基质得率 (浸提温度) 下，浸提液中酯类与碱类物质发生皂化反应^[37]促进橙花醇合成，同时，具热敏性的类胡萝卜素^[38] (二氢猕猴桃内酯合成前体^[39]) 得以保留，促进二氢猕猴桃内酯合成；II 类为 $EC<0$ 且释放速率逐渐增大的物质，为芳樟醇、 β -紫罗兰酮、1,2,3-三甲氧基苯、3,4,5-三甲氧基甲苯，在基质得率为 27.41% (A₄) 时，芳樟醇 (EC=-0.19)、 β -紫罗兰酮 (EC=-0.82)、1,2,3-三甲氧基苯 (EC=-0.35)、3,4,5-三甲氧基甲苯 (EC=-0.35) 释放速率达到最大，证明基质得率 (浸提温度) 升高能够促进该类呈花果香及陈香物质释放^[34]；III 类为 $EC<0$ 且释放速率逐渐降低的物质，为 3,4-二甲氧基甲苯、1,2,4-三甲氧基苯，即在基质得率为 27.41% (A₅) 时，1,2,4-三甲氧基苯 (EC=-0.05) 释放速率达到最小，当基质得率为 14.61% (A₃) 时，3,4-二甲氧基甲苯 (EC=-0.72) 释放速率达到最小，证明基质得率升高时，茶褐素及多酚类含量升高对该类关键香气物质有极显著的保留作用^[8]；IV 类为 $EC<0$ 且释放速率呈先降后增趋势的物质，为 α -紫罗兰酮，即基质得率在 20.32% (A₃) 时， α -紫罗兰酮释放速率达到最小 (EC=-0.36)，表明基质得率较低或较高时均能促进 α -紫罗兰酮释放，目前未见报道解释该实验现象；V 类为 $EC<0$ 且释放速率与基质得率无关的物质，为香叶基丙酮，它是重要的芳香物质合成中间体，其合成与释放需适宜温度和催化剂^[40]，表明该香气物质释放受其他因素控制。综上，随基质得率增加，各关键香气物质释放趋势不同。

表 6 不同基质得率速溶茶每管香气冷凝液中各关键香气物质峰面积

Table 6 The response values of peak area of the key aroma components of the instant Pu-erh tea samples with different matrix yields detected in each tube of condensed water																					
RI	名称	速溶茶每管冷凝液中关键香气物质峰面积 (×10 ⁹)															截距 (a)	EC(b)	R ²	P	拟合曲线 模型
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15					
A ₁	1 103	芳樟醇	3.59	3.11	2.99	2.89	2.83	2.77	2.73	2.70	2.66	2.63	2.60	2.58	2.55	2.53	3.10	2.35×10 ⁹	-0.09	0.69	6.49×10 ⁻⁸
	1 248	3,4-二甲氧基甲苯	2.71	2.21	1.26	0.82	0.64	0.47	0.37	0.27	0.22	/	/	/	/	/	/	3.01×10 ⁹	-1.03	0.72	2.66×10 ⁻⁸
	1 231	橙花醇	1.84	1.32	1.00	0.71	1.54	0.72	0.84	0.85	1.64	1.07	1.32	1.34	1.55	1.64	1.76	1.22×10 ⁹	0.15	0.60	6.69×10 ⁻⁸
	1 380	1,2,4-三甲氧基苯	5.98	6.69	6.4	5.96	6.67	7.01	8.26	7.00	7.24	6.31	6.99	5.86	5.34	4.93	3.61	6.94×10 ⁹	-0.24	0.13	4.97×10 ⁻¹¹
	1 433	α-紫罗兰酮	3.71	1.97	1.13	0.59	0.44	0.39	0.31	0.28	0.30	0.26	0.55	/	/	/	/	3.81×10 ⁹	-0.93	0.92	6.31×10 ⁻¹²
A ₂	1 455	香叶基丙酮	1.50	1.15	0.72	0.37	0.50	0.52	0.45	0.39	0.38	0.35	0.33	0.34	0.31	0.28	0.32	1.53×10 ⁹	-0.52	0.39	4.06×10 ⁻¹²
	1 533	二氢猕猴桃内酯	0.36	2.57	2.15	2.48	2.74	2.78	3.25	2.79	3.02	3.05	3.55	3.48	3.59	4.12	3.78	1.37×10 ⁹	0.11	0.83	1.66×10 ⁻¹²
	1 102	芳樟醇	4.88	4.83	4.80	4.78	4.77	4.75	4.74	4.73	4.72	4.72	4.71	4.70	4.70	4.69	4.69	5.22×10 ⁹	-0.01	0.97	2.13×10 ⁻¹²
	1 230	橙花醇	1.37	1.28	2.82	2.99	3.06	4.53	5.25	5.30	6.78	6.65	7.67	7.20	7.38	8.81	9.34	1.02×10 ⁹	0.81	0.97	1.87×10 ⁻¹⁵
	1 250	3,4-二甲氧基甲苯	1.73	1.26	1.14	0.90	0.57	0.57	0.44	0.38	0.31	0.28	0.24	0.22	0.20	0.18	0.18	1.88×10 ⁹	-0.72	0.92	7.80×10 ⁻¹¹
A ₃	1 378	1,2,4-三甲氧基苯	4.69	4.03	4.90	4.37	3.48	4.71	4.70	4.12	4.51	4.14	4.38	3.71	3.61	3.08	3.00	4.87×10 ⁹	-0.09	0.23	9.39×10 ⁻¹³
	1 440	α-紫罗兰酮	3.78	2.46	1.30	1.36	0.83	0.84	0.73	0.65	0.67	0.54	0.52	0.50	/	/	/	3.86×10 ⁹	-0.84	0.98	2.80×10 ⁻¹¹
	1 458	香叶基丙酮	1.52	0.82	0.82	0.72	0.44	0.56	0.47	0.38	0.47	0.37	0.37	0.33	/	/	/	1.47×10 ⁹	-0.60	0.95	1.70×10 ⁻¹⁰
	1 490	β-紫罗兰酮	2.00	2.43	0.92	1.08	1.55	1.60	1.63	1.41	1.38	1.17	1.14	1.01	0.96	0.89	0.91	2.14×10 ⁹	-0.26	0.45	2.73×10 ⁻⁹
	1 529	二氢猕猴桃内酯	0.72	0.93	3.27	3.02	2.46	3.28	3.41	3.00	3.56	3.50	4.04	3.82	4.00	3.89	4.40	1.37×10 ⁹	0.43	0.78	9.11×10 ⁻¹²
A ₃	1 106	芳樟醇	4.99	4.99	4.93	4.86	4.80	4.98	4.51	4.67	4.64	4.61	4.59	4.56	4.54	4.52	4.43	5.12×10 ⁹	-0.05	0.74	8.32×10 ⁻²³
	1 249	3,4-二甲氧基甲苯	1.08	0.56	0.34	0.47	0.29	0.20	/	/	/	/	/	/	/	/	/	1.09×10 ⁹	-0.98	0.88	3.66×10 ⁻⁸
	1 227	橙花醇	1.78	1.93	2.49	4.13	3.15	3.14	4.92	5.09	5.42	6.05	6.61	6.61	5.95	6.61	5.95	1.57×10 ⁹	0.55	0.88	3.34×10 ⁻¹³
	1 378	1,2,4-三甲氧基苯	3.15	3.55	3.13	4.73	3.08	2.88	4.04	3.87	3.76	3.63	3.60	3.24	2.48	3.24	2.48	3.63×10 ⁹	-0.04	0.03	6.14×10 ⁻¹¹
	1 438	α-紫罗兰酮	1.34	0.49	0.87	0.83	0.66	0.60	0.60	0.59	0.51	0.34	0.50	0.49	0.51	0.49	0.51	1.17×10 ⁹	-0.36	0.65	8.50×10 ⁻¹⁰
	1 450	香叶基丙酮	0.69	0.55	0.55	0.59	0.50	0.54	0.44	0.40	0.40	0.37	0.35	0.36	0.32	0.36	0.32	7.15×10 ⁸	-0.26	0.85	2.01×10 ⁻¹⁴
	1 487	β-紫罗兰酮	2.46	1.76	1.65	1.64	1.33	1.08	1.25	1.15	1.01	0.98	0.93	0.91	0.84	0.91	0.84	2.46×10 ⁹	-0.39	0.96	2.00×10 ⁻¹⁶
	1 529	二氢猕猴桃内酯	2.26	2.36	1.93	2.98	2.01	1.92	2.83	3.04	3.09	3.33	3.64	3.61	3.07	3.61	3.07	1.84×10 ⁹	0.23	0.51	5.60×10 ⁻¹²

续表 6

RI	名称	速溶茶每管冷凝液中关键香气物质峰面积 (×10 ⁹)															截距 (a)	EC(b)	R ²	P	拟合曲线 模型
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15					
1 106	芳樟醇	7.70	5.80	4.76	5.05	4.68	5.26	4.53	4.98	4.33	4.26	5.53	5.97	5.94	5.87	5.27	6.32×10 ⁹	-0.08	0.89	2.29×10 ⁻¹⁰	
1 244	3,4-二甲氧基甲苯	3.34	2.35	1.52	0.98	0.72	0.65	0.44	0.40	0.26	/	/	/	/	/	/	3.53×10 ⁹	-0.83	0.96	3.38×10 ⁻⁷	
1 231	橙花醇	5.67	1.42	1.35	1.27	1.34	1.80	1.71	2.00	1.94	2.17	2.33	2.50	2.49	2.36	2.39	3.57×10 ⁹	0.16	0.82	1.50×10 ⁻¹⁷	
1 325	1,2,3-三甲氧基苯	7.16	6.34	5.84	5.29	4.26	5.32	4.41	4.52	3.71	3.55	3.25	2.96	2.61	2.25	1.92	7.88×10 ⁹	-0.23	0.85	2.99×10 ⁻¹⁵	
1 381	1,2,4-三甲氧基苯	4.77	4.79	4.79	4.61	3.68	4.84	4.45	4.81	4.53	4.86	4.45	4.45	3.94	3.67	3.44	4.99×10 ⁹	-0.07	0.20	9.41×10 ⁻¹⁴	
A ₄ 1 404	3,4,5-三甲氧基甲苯	9.88	9.52	8.78	7.70	5.82	7.47	5.94	5.95	4.89	4.77	3.91	3.43	2.80	2.28	1.87	1.16×10 ¹⁰	-0.25	0.81	6.30×10 ⁻¹⁴	
1 437	α-紫罗兰酮	6.06	4.36	2.53	1.71	1.07	1.02	0.66	0.62	0.56	/	/	/	/	/	/	6.43×10 ⁹	-0.81	0.95	3.15×10 ⁻⁷	
1 451	香叶基丙酮	1.77	1.46	0.96	0.78	0.53	0.54	0.40	0.42	0.37	0.35	0.36	0.38	0.35	0.35	0.31	1.89×10 ⁹	-0.67	0.95	1.19×10 ⁻¹²	
1 488	β-紫罗兰酮	7.36	5.23	3.37	2.63	2.14	1.98	1.57	1.51	1.25	0.85	1.11	1.07	0.97	0.90	0.83	7.70×10 ⁹	-0.71	0.98	1.32×10 ⁻¹⁵	
1 528	二氢猕猴桃内酯	3.91	3.71	3.50	3.31	2.93	3.57	3.39	3.67	3.51	3.90	3.72	4.11	3.97	4.17	4.31	3.37×10 ⁹	0.04	0.76	3.63×10 ⁻²⁴	y=a*x^b
1 106	芳樟醇	6.88	4.79	4.13	4.39	4.35	4.23	4.25	4.16	4.16	4.46	4.06	4.24	3.97	3.53	3.37	6.08 × 10 ⁹	-0.19	0.70	3.11×10 ⁻¹⁴	
1 244	3,4-二甲氧基甲苯	3.82	2.83	2.04	1.60	1.10	0.89	0.58	0.48	0.34	0.32	/	/	/	/	/	4.11 × 10 ⁹	-0.81	0.92	5.88×10 ⁻⁷	
1 229	橙花醇	1.49	1.46	1.29	1.36	1.37	1.60	1.53	1.81	1.83	1.92	1.94	1.43	2.24	1.54	1.46	1.32 × 10 ⁹	0.11	0.19	7.05×10 ⁻¹²	
1 325	1,2,3-三甲氧基苯	6.44	5.93	5.43	5.26	4.57	4.62	4.05	3.84	3.50	3.39	2.36	2.66	2.56	2.28	1.93	7.28 × 10 ⁹	-0.35	0.82	4.74×10 ⁻¹²	
1 382	1,2,4-三甲氧基苯	4.74	4.87	4.87	4.89	4.38	4.74	4.48	4.60	4.50	4.38	4.39	4.33	4.55	4.33	3.99	4.98 × 10 ⁹	-0.05	0.50	2.16×10 ⁻¹⁹	
A ₅ 1 400	3,4,5-三甲氧基甲苯	8.94	9.05	8.38	8.10	6.95	6.92	6.15	5.81	5.13	4.62	3.98	3.58	3.46	2.93	2.42	1.07 × 10 ¹⁰	-0.35	0.74	1.23×10 ⁻¹⁰	
1 430	α-紫罗兰酮	7.17	4.99	3.27	2.57	1.58	1.16	0.84	0.71	0.61	0.56	0.49	0.20	0.22	0.19	/	7.72 × 10 ⁹	-0.98	0.94	3.39×10 ⁻¹⁰	
1 450	香叶基丙酮	1.88	1.45	0.53	0.82	0.31	0.23	0.38	0.33	0.30	0.16	0.26	0.27	0.12	0.09	0.23	1.99 × 10 ⁹	-0.89	0.90	2.81×10 ⁻⁹	
1 486	β-紫罗兰酮	9.01	0.32	4.64	3.85	2.78	2.27	1.86	1.61	1.38	1.24	0.75	0.89	0.90	0.78	0.75	7.93 × 10 ⁹	-0.82	0.65	7.22×10 ⁻⁶	
1 531	二氢猕猴桃内酯	4.09	3.94	3.78	3.70	3.51	3.70	3.24	3.37	3.36	3.43	3.54	3.70	4.35	4.62	4.61	3.68 × 10 ⁹	0.01	0.86	3.92×10 ⁻¹³	

注：“/”表示未检出。

3 结论

本实验以普洱茶为原料,控制浸提温度制备不同基质得率速溶普洱茶,采用感官审评、HS-SPME、AEDA、GC-O 及 GC-MS 实验方法对原料关键香气物质进行分析,最终确定原料中 13 种关键香气物质 ($OAV > 1$)。为确定不同基质得率速溶茶关键香气物质,本研究对其进行 GC-O 及 GC-MS 分析,基质得率为 6.54%~27.41% 时,速溶普洱茶的关键香气物质 ($OAV > 1$) 分别为 7、8、8、10 和 10 种,当基质得率为 24.02% 时,香气物质数量及含量达到最大,香气品质最佳。为解释基质得率对关键香气物质释放的影响,采用常压蒸馏方式等量收集不同基质得率速溶普洱茶的香气冷凝液 15 管,并采用 GC-MS 分析,检测香气物质总峰面积与各关键香气物质峰面积。经非线性拟合分析可知,调控适宜的基质得率 (24.02%) 对减缓香气释放有益。本实验还对各关键香气物质释放规律进行测定。结果表明,随基质得率升高,根据 EC 值及其变化趋势不同,该 10 种关键香气物质分为 5 类, I 类为增加速率呈先增后降的物质:橙花醇、二氢猕猴桃内酯; II 类为释放速率逐渐增大的物质:芳樟醇、 β -紫罗兰酮、1,2,3-三甲氧基苯、3,4,5-三甲氧基甲苯; III 类为释放速率逐渐降低的物质:3,4-二甲氧基甲苯、1,2,4-三甲氧基苯; IV 类为释放速率呈先降后增趋势的物质: α -紫罗兰酮; V 类为与基质得率变化无关的物质:香叶基丙酮。总之,关键香气物质随基质得率升高呈不同释放规律。

本研究从感官审评、化学物质基础及关键香气物质动态分析层面上,探究基质得率对速溶普洱茶香气品质及其关键香气物质释放的影响,有助于速溶茶生产工艺优化,为提高速溶茶风味品质提供了一定理论基础。在后续研究中,还需要对影响速溶普洱茶基质得率的其他工艺参数(如浸提时间、液料比、干燥方式等)进行正交实验,进而深入探究基质得率对各关键香气物质释放的影响。

参考文献

- [1] 黄业伟,朱强强,向泽敏,等.普洱熟茶主要成分检测和分离的研究进展与展望[J].中国茶叶加工,2019,1:59-63.
- [2] CAI X, FANG C, HAYASHI S, et al. Pu-erh tea extract ameliorates high-fat diet-induced nonalcoholic steatohepatitis and insulin resistance by modulating hepatic IL-6/STAT3 signaling in mice [J]. Journal of Gastroenterology, 2016, 51(8):

819-829.

- [3] HUANG F, WANG S, ZHAO A, et al. Pu-erh tea regulates fatty acid metabolism in mice under high-fat diet [J]. Frontiers in Pharmacology, 2019, 10(5): 1-10.
- [4] LEE L, FOO K. Recent advances on the beneficial use and health implications of Pu-erh tea [J]. Food Research International, 2013, 53(2): 619-628.
- [5] ZHANG Z, HE F, YANG W, et al. Pu-erh tea extraction alleviates intestinal inflammation in mice with flora disorder by regulating gut microbiota [J]. Food Science & Nutrition, 2021, 9(9): 4883-4892.
- [6] 白晓丽,郭卫华,孔俊豪,等.速溶普洱茶中水分、咖啡碱和茶多酚含量近红外光谱快速测定方法的建立[J].食品工业科技,2019,40(1):234-238.
- [7] 陈会娟,李瑞利,童华荣.速溶茶生产加工中增香保香技术的研究进展[J].食品与发酵工业,2013,39(3):153-157.
- [8] 翁彦如.普洱茶水溶性基质成分对关键香气释放的影响[D].天津:天津科技大学,2019.
- [9] 徐咏全,张晨霞,孔雅雯,等.HS-SPME-GC-MS-GC-O 分析普洱茶粉中的关键性香气组分[J].食品研究与开发,2017,38(20):152-159.
- [10] 苟伟,夏丽飞,张艳梅,等.基于HS-SPME-GC-MS的不同品种普洱熟茶香气成分的比较分析[J].现代食品科技, 2023,39(10):278-288.
- [11] WANG M, MA W, SHI J, et al. Characterization of the key aroma compounds in Longjing tea using stir bar sorptive extraction (SBSE) combined with gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), gas chromatography-olfactometry (GC-O), odor activity value (OAV), and aroma recombination [J]. Food Research International, 2020, 130: 108908.
- [12] YANG Y, AI L, MU Z, et al. Flavor compounds with high odor activity values ($OAV > 1$) dominate the aroma of aged Chinese rice wine (Huangjiu) by molecular association [J]. Food Chemistry, 2022, 383: 132370.
- [13] CAO W, SHU N, WEN J, et al. Characterization of the key aroma volatile compounds in nine different grape varieties wine by headspace gas chromatography-ion mobility spectrometry (HS-GC-IMS), odor activity values (OAV) and sensory analysis [J]. Foods, 2022, 11(18): 2767.
- [14] AMANPOUR A, SELLI S. Differentiation of volatile profiles and odor activity values of turkish coffee and french press coffee [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2016, 40: 1-9.
- [15] XU Y, WANG C, LI C, et al. Characterization of aroma-active compounds of Pu-erh tea by headspace solid-phase microextraction (HS-SPME) and simultaneous distillation-extraction (SDE) coupled with GC-olfactometry and GC-MS [J]. Food Analytical Methods, 2016, 9(5): 1188-1198.
- [16] MA L, GAO M, HU J, et al. Characterization of the key active

- aroma compounds in Pu-erh tea using gas chromatography-time of flight/mass spectrometry-olfactometry combined with five different evaluation methods [J]. *European Food Research and Technology*, 2022, 248(1): 45-56.
- [17] 佟文哲.普洱茶特征香气化合物的研究[D].天津:天津科技大学,2020.
- [18] 石禾云,杨豆豆,张娅,等.普洱熟茶关键香气物质热释放规律分析[J].*食品科学*,2023,44(16):243-250.
- [19] WANG C, XU W, YUAN Y, et al. Characterization and modelling of odor-active compounds release behavior from Fubrick tea during boiling-water extraction by molecular sensory science approach [J]. *Food Chemistry*: X, 2023, 17: 100551.
- [20] WANG C, LI J, ZHANG Y, et al. Effects of electrostatic spray drying on the sensory qualities, aroma profile and microstructural features of instant Pu-erh tea [J]. *Food Chemistry*, 2022, 373: 131546.
- [21] CARATTI A, SQUARA S, STILO F, et al. Integrated strategy for informative profiling and accurate quantification of key-volatiles in dried fruits and nuts: an industrial quality control perspective [J]. *Foods*, 2022, 11(19): 3111.
- [22] KAWAKAMI M, KOBAYASHI A, YAMANISHI T, et al. Flavor constituents of microbial-fermented teas Chinese-zhuan-cha and Koku-cha [J]. *Journal of the Agricultural Chemical Society of Japan*, 1987, 61(4): 457-465.
- [23] 吕海鹏,钟秋生,王力,等.普洱茶加工过程中香气成分的变化规律研究[J].*茶叶科学*,2009,29(2):95-101.
- [24] 赵阳,龚加顺,王秋萍.古树普洱茶生茶贮藏过程中香气成分的变化[J].*食品科学*,2022,43(4):241-248.
- [25] FLAIG M, QI S, WEI G, et al. Characterization of the key odorants in a high-grade Chinese green tea beverage (*Camellia sinensis*; Jingshan cha) by means of the sensomics approach and elucidation of odorant changes in tea leaves caused by the tea manufacturing process [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2020, 68(18): 5168-5179.
- [26] LIU H, XU Y, WU J, et al. GC-IMS and olfactometry analysis on the tea aroma of Yingde black teas harvested in different seasons [J]. *Food Research International*, 2021, 150: 110784.
- [27] 肖作兵,王红玲,牛云蔚,等.基于OAV和AEDA对工夫红茶的PLSR分析[J].*食品科学*,2018,39(10):242-249.
- [28] ZHU J, NIU Y, XIAO Z. Characterization of the key aroma compounds in Laoshan green teas by application of odour activity value (OAV), gas chromatography-mass spectrometry-olfactometry (GC-MS-O) and comprehensive two-dimensional gas chromatography mass spectrometry (GC $\times$ GC-qMS) [J]. *Food Chemistry*, 2021, 339: 128136.
- [29] GEMERT L.化合物嗅觉阈值汇编(原书第二版)[M].北京:科学出版社,2018.
- [30] PANG X, YU W, CAO C, et al. Comparison of potent odorants in raw and ripened Pu-erh tea infusions based on odor activity value calculation and multivariate analysis: understanding the role of pile fermentation [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67(47): 13139-13149.
- [31] XIAO Z, CAO X, ZHU J, et al. Characterization of the key aroma compounds in three world-famous black teas [J]. *European Food Research and Technology*, 2022, 248(9): 2237-2252.
- [32] DENG X, HUANG G, TU Q, et al. Evolution analysis of flavor-active compounds during artificial fermentation of Pu-erh tea [J]. *Food Chemistry*, 2021, 357: 129783.
- [33] WANG C, LI J, WU X, et al. Pu-erh tea unique aroma: volatile components, evaluation methods and metabolic mechanism of key odor-active compounds [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2022, 124: 25-37.
- [34] 刘志达,李祖云,王超,等.浸提温度对速溶普洱茶品质的影响[J].*现代食品*,2023,29(21):80-82.
- [35] 郑芳玲,甘诗雅,赵蕾,等.基于GC-MS/GC-O的不同地区红茶特征香气及分子感官分析[J].*食品科学*,2023,44(24): 262-268.
- [36] 陈国和,胡腾飞,王乐涯,等.基于HS-SPME-GC-O-MS结合OAV鉴定槟榔香六堡茶关键香气物质[J].*食品与发酵工业*,2024,50(8):271-277.
- [37] 袁源.皂化反应制备肥皂的影响因素研究[J].*化纤与纺织技术*,2022,51(7):74-76.
- [38] ANTONIO M, EUGENIA A, CECILIA P, et al. Chemistry, occurrence, properties, applications, and encapsulation of carotenoids-a review [J]. *Plants*, 2023, 12(2): 313-313.
- [39] 王玉华,王德权,高政绪,等.烤烟自然醇化过程中类胡萝卜素降解产物含量变化及其与感官质量的关系[J].*浙江农业科学*,2020,61(2):340-344.
- [40] 徐启星,罗丽娜,李庆文,等.香叶基丙酮的合成研究[J].*中国烟草学报*,1996,3(2):40-44.