

四款市售云南速溶普洱茶风味物质分析

杨迪涵¹, 王启¹, 王藤¹, 陈秋月¹, 伯年国¹, 官已青¹, 刘顺航², 李向波², 戚亚辉², 赵明^{1*}
(1. 云南农业大学茶学院, 云南省药用植物生物学重点实验室, 西南中药材种质创新与利用国家地方联合工程研究中心, 云南昆明 650201)(2. 云南天士力帝泊洱生物茶集团有限公司, 云南普洱 665000)

摘要: 为了阐明速溶普洱茶的风味特征及物质基础, 本研究以四款市售速溶普洱茶为对象, 系统分析其关键呈香成分和非挥发性物质含量。应用感官审评、分光光度法、高效液相色谱法 (High Performance Liquid Chromatography, HPLC) 和顶空进样-气相色谱-质谱联用技术 (Headspace-Gas Chromatography-Mass Spectrometry, HS-GC-MS) 等技术分析了四款市售速溶普洱茶的风味物质。结果表明, 通过感官审评, 速溶普洱茶表现出陈香、烘焙香、花香和果香的风味特征。样品中茶多酚、可溶性糖、游离氨基酸的质量分数分别为 13.16%~19.19%、9.99%~12.78%、2.54%~4.00%。应用 HPLC 测定儿茶素总含量在 24.82~104.21 mg·g⁻¹, 17 种氨基酸组分总含量在 4.09~20.71 mg·g⁻¹。应用 HS-GC-MS 检测到 68 种挥发性物质, 其中 6 个化合物的相对香气活度值 (Relative Odor Activity Value, rOAV) >1, 包括氧化芳樟醇、月桂烯、2-甲基吡嗪、1,2,3,4-四甲氧基苯、丁醛和戊醛, 为本研究速溶普洱茶的关键呈香物质。综上, 本文分析了四款市售速溶普洱茶的关键挥发性物质与非挥发性物质, 为后续产品品质评价与工艺优化提供理论基础与科学依据。

关键词: 速溶茶; 风味物质; 香气成分; 品质评价; 相对气味活度值

文章编号: 1673-9078(2026)7-221-231

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.7.0199

Analysis of Flavor Compounds in Four Yunnan Commercial Instant Pu-erh Teas

YANG Dihan¹, WANG Qi¹, WANG Teng¹, CHEN Qiuyue¹, BO Nianguo¹, GUAN Yiqing¹,
LIU Shunhang², LI Xiangbo², QI Yahui², ZHAO Ming^{1*}

(1.College of Tea Science, The Key Laboratory of Medicinal Plant Biology of Yunnan Province, National & Local Joint Engineering Research Center on Germplasm Innovation & Utilization of Chinese Medicinal Materials in Southwestern China, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)
(2.Yunnan Tasly Deepure Biological Tea Group Co. Ltd., Pu'er 665000, China)

Abstract: Key aroma-active and non-volatile compounds in four commercial instant Pu-erh teas were systematically analyzed to clarify their flavor characteristics and material bases. The flavor compounds were analyzed using sensory evaluation, spectrophotometry, high-performance liquid chromatography (HPLC), and headspace-gas chromatography-mass spectrometry (HS-GC-MS). Sensory evaluation revealed a flavor profile characterized by aged, roasted, floral, and fruity aromas. The mass fractions of tea polyphenols, soluble sugars, and free amino acids in the samples were 13.16%~19.19%, 9.99%~12.78%, and 2.54%~4.00%, respectively. The total catechin content measured by HPLC ranged between 24.82 and 104.21 mg·g⁻¹; the total content of 17

引文格式:

杨迪涵,王启,王藤,等.四款市售云南速溶普洱茶风味物质分析[J].现代食品科技,2026,42(7):221-231.

YANG Dihan, WANG Qi, WANG Teng, et al. Analysis of flavor compounds in four yunnan commercial instant Pu-erh teas [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(7): 221-231.

收稿日期: 2025-02-17; 修回日期: 2025-08-04; 接受日期: 2025-08-08

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32160728); 云南省农业基础研究联合专项 (202401BD070001-007)

作者简介: 杨迪涵 (2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 茶叶生物化学, E-mail: 1336618370@qq.com

通讯作者: 赵明 (1979-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 茶叶生物化学, E-mail: zhaoming02292002@aliyun.com

amino acid components ranged between 4.09 and 20.71 mg·g⁻¹. HS-GC-MS detected 68 volatile compounds. Among them, six had relative odor activity values (rOAVs)>1, including linalool oxide (floral and citrus aroma); beta-myrcene (floral and fruity aroma); 2-methylpyrazine (roasted aroma); 1,2,3,4-tetramethoxybenzene (aged aroma); butyraldehyde (light aroma); and pentanal (fruity aroma), which were identified as the key aroma compounds. In conclusion, key volatile and non-volatile compounds in four commercial instant Pu-erh teas were analyzed in this study, providing a theoretical foundation and scientific basis for future quality evaluation and process optimization of related products.

Key words: instant tea; flavor compounds; aroma components; quality evaluation; relative odor activity value

速溶茶 (Instant Tea) 是一种通过提取、浓缩、干燥等工序加工而成茶叶深加工产品, 不仅保持了传统茶叶的营养特性和风味, 还具有饮用方便、易于携带等特点^[1], 因此, 深受消费者欢迎, 市场前景广阔^[2]。速溶茶的风味品质主要由茶多酚、可溶性糖、游离氨基酸及挥发性物质共同决定^[3], 这些物质不仅赋予速溶茶独特的风味, 还是其健康益处的物质基础^[4]。因此有必要对速溶茶的风味物质进行分析, 以期为其品质与质量控制提供科学依据^[5]。

近年来, 普洱熟茶也被加工成速溶茶, 成为一种重要的茶叶精深加工产品, 关于速溶普洱茶的风味物质分析也得到了学者的重视。例如, Chen 等^[6]在速溶普洱茶中鉴定出包括 1-十二醇、1,2,3-三甲氧基苯、二氢猕猴桃内酯和 1-甲基萘等 19 种关键香气物质, 且通过相关性分析发现 1-十二醇与木香呈正相关, 1-甲基萘与药香呈正相关。Wang 等^[7]在静电喷雾干燥制得的速溶普洱茶中确定二氢- β -紫罗兰酮 (菌香) 为最重要的气味活性化合物, 除此之外, β -紫罗兰酮 (木香)、1,2,3-三甲氧基苯 (陈香)、芳樟醇 (花香) 和壬醛 (脂肪香、果香) 等物质对速溶普洱茶的整体香气形成起决定性作用。杨转等^[8]研究表明冷冻干燥和喷雾干燥处理的速溶普洱茶中 1,2,3-三甲氧基苯、1,2,4-三甲氧基苯和芳樟醇的含量均较高, 而吡嗪、邻苯二甲酸二甲酯和 4-联苯乙酮等物质只在冷冻干燥速溶普洱茶中检测到; 2,3,4-三甲氧基苯酚、2,6-二甲氧基苯酚和 1,2,3,4-四甲氧基苯等物质只在喷雾干燥速溶普洱茶中检测到, 除此之外, 冷冻干燥的速溶普洱茶中茶氨基酸含量明显高于喷雾干燥的速溶普洱茶, 达到 7.93 g/100 g, 且其滋味更为鲜醇、厚实。刘志达等^[9]研究表示在不同浸提温度条件下, 速溶普洱茶中风味物质的含量均有所不同, 在 94 °C 浸提温度下, 速溶普洱茶中茶多酚、粗多糖和茶褐素浸出率较高, 但其陈香风味贡献者甲氧基苯类化合物热损失率较高, 而在 80 °C 浸提温度下, 速溶普洱茶中呈陈香的 1,2,3-三甲氧基苯, 1,2-二甲氧基苯和 β -紫罗兰酮 3 种物质的含量最高, 这使得速溶普洱茶陈香风味凸显。

随着市场上速溶普洱茶产品的增多与流行, 有必要对其特征风味物质进行分析研究。目前已有对速溶绿茶、速溶红茶和速溶白茶等速溶茶类进行品质分析的研究^[10,11], 而针对速溶普洱茶风味物质的研究仍较为有限。为此本论文收集了四款市售速溶普洱茶, 应用分光光度法测定茶多酚、可溶性糖和游离氨基酸含量; 应用高效液相色谱法精准定量儿茶素、生物碱、酚酸、黄酮类和氨基酸等关键呈味物质; 应用顶空进样-气相色谱-质谱联用技术鉴定挥发性香气活性化合物; 应用感官审评技术评估香气特征与滋味属性, 分析上述产品的风味品质和特征风味性物质, 为速溶普洱茶的品质评价及风味改进提供实验依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

本研究基于加工工艺差异, 选取样品 A (古茶型)、B (古茶复香型)、C (甘醇型)、D (甘醇复香型) 四款速溶普洱熟茶作为研究对象, 云南天士力帝泊洱生物茶集团有限公司, 生产于 2022 年 5 月 12 日; 乙腈、甲醇 (色谱纯), Sigma 公司; 咖啡碱 (Caffeine, CA)、儿茶素 (Catechin, C)、没食子儿茶素 (Gallocatechin, GC)、儿茶素没食子酸酯 (Catechin gallate, CG)、没食子儿茶素没食子酸酯 (Gallocatechin Gallate, GCG)、表儿茶素 (Epicatechin, EC)、表没食子酸儿茶素 (Epigallocatechin, EGC)、表儿茶素没食子酸酯 (Epicatechin-3-gallate, ECG)、表没食子儿茶素没食子酸酯 (Epigallocatechin-3-gallate, EGCG)、没食子酸 (Gallic acid, GA)、1,4,6-O-没食子酰基- β -D-葡萄糖 (GG)、鞣花酸、杨梅素、槲皮素、山奈酚、花旗松素和芦丁 (标准品纯度大于 98%), 成都曼思特生物科技有限公司; 天冬氨酸 (Aspartic Acid, Asp)、谷氨酸 (Glutamic Acid, Glu)、丝氨酸 (Serine, Ser)、组氨酸 (Histidine, His)、甘氨酸 (Glycine, Gly)、苏氨酸 (Threonine, Thr)、精氨酸 (Arginine, Arg)、丙氨酸 (Alanine, Ala)、酪氨酸 (Tyrosine, Tyr)、半胱氨酸 (Cysteine, Cys)、甲硫氨酸 (Methionine, Met)、苯

丙氨酸 (Phenylalanine, Phe)、异亮氨酸 (Isoleucine, Ile)、亮氨酸 (Leucine, Leu)、赖氨酸 (Lysine, Lys)、脯氨酸 (Proline, Pro) (标准品), 美国安捷伦公司; 茶氨酸 (Theanine, Thea) (标准品), 中国药品生物制品检定所。

1200 高效液相色谱仪, 美国 Agilent 公司; DZKW-S-8 电热恒温水浴锅, 北京市永光明医疗仪器有限公司; 756CRT 紫外-可见分光光度计, 上海元析仪器有限公司; AR-1140 电子分析天平, 奥豪斯仪器上海有限公司; DHG-9140 电热恒温鼓风干燥箱, 上海中友仪器设备有限公司; 7697A-8890-7000D 顶空进样-气相色谱-质谱联用仪, 美国 Agilent 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 茶叶感官审评

参照现行国家标准《茶制品 第1部分: 固态速溶茶》(GB/T 31740.1-2015) 的审评方法, 邀请年龄在 20~45 岁的 12 名高级评茶员对样品进行感官审评, 并对各组样品的滋味和香气给出综合评语, 同时对滋味进行评分。

1.2.2 茶叶非挥发性成分测定

使用蒽酮硫酸法测定可溶性糖含量^[12]; 根据 GB/T 8314-2013《茶 游离氨基酸总量的测定》测定游离氨基酸含量; 根据 GB/T 8313-2018 测定茶多酚含量; 采用课题组建立的高效液相色谱法测定儿茶素、没食子酸、咖啡碱、黄酮质量分数和 17 种氨基酸组分含量^[13,14]。

1.2.3 茶叶挥发性成分测定

精确称取样品 3 g, 置于 20 mL 顶空瓶立即密封顶空瓶, 按照仪器参考条件分析测定。每个样品重复以上试验 6 次。

顶空条件: 加热箱温度 130 °C, 定量环温度 150 °C, 传输线温度 170 °C, 样品瓶平衡时间 20 min, 进样持续时间 0.5 min, GC 循环时间 35 min, 样品瓶体积 20 mL, 定量环最终压力: 68.95 kPa。

色谱条件: 样本用分流模式注入 GC-MS 系统进行分析, 进样量 1 μL, 分流比 10:1。样品经 VF-WAXms 毛细管柱 (25 m×0.25 mm×0.2 μm, Agilent CP9204) 分离后进入质谱检测。进样口温度 180 °C, 载气为高纯氦气, 载气流量 2 mL·min⁻¹, 隔垫吹扫流量 3 mL·min⁻¹。升温程序: 初始温度 40 °C, 平衡 2 min, 然后以 5 °C·min⁻¹ 的速度升至 100 °C, 再以 15 °C·min⁻¹ 的速度升至 230 °C, 并维持 5 min, 后运行 230 °C 维持 2 min。

定性、定量方法: 挥发性物质分析数据经 Agilent MassHunter 软件进行初步处理, 采用峰面积归一化法计算各组分的相对含量。物质定性基于 GC-MS 检测所得质谱图, 与 NIST 20 质谱数据库 (National Institute of Standards and Technology, USA) 进行比对, 并结合保留时间和文献数据进行确认, 匹配度大于 85% 的化合物作为有效物质记录。物质定量采用相对定量法, 即以各组分峰面积占总峰面积的比例 (%) 表示其相对含量。为保证数据的可靠性与代表性, 每种样品均设 6 个重复, 并对重复测定结果取平均值。

1.2.4 关键挥发性物质分析

挥发性物质各组分相对含量 (Ci) 采用各色谱峰面积与总峰面积比值的面积归一算法计算; 计算出各挥发性物质相对含量后, 通过查阅文献得到化合物在水中香气阈值 (Ti), 由下式计算出各挥发性物质的相对香气活度值 (Relative Odor Activity Value, rOAV)^[15], 其中 rOAV 值大于等于 1 的化合物为对样品香型起到决定性作用的关键挥发性物质, 而 rOAV 值小于 1 的化合物, 则为对样品香型起到修饰性作用的挥发性物质^[16]。

$$R = \frac{C_i}{C_{\max}} \times \frac{T_{\max}}{T_i} \times 100 \quad (1)$$

式中:

R——相对香气活度值, rOAV;

C_{max}——最大香气贡献组分的相对含量, %;

T_{max}——最大香气贡献组分在水中的香气阈值, μg·kg⁻¹;

C_i——样品各挥发性物质的平均相对含量, %;

T_i——各挥发性物质在水中的香气阈值, μg·kg⁻¹。

1.3 数据分析

非挥发性成分每个茶样提取 3 次, 每个提取测定 2 次, 挥发性成分每个茶样 6 个重复。输入 IBM SPSS Statistics 26.0 采用单因素 ANOVA 进行方差显著性分析 (P<0.05); 采用 GraphPadPrism 8 作图。

2 结果与讨论

2.1 感官审评特征

感官审评发现, 该四款速溶普洱茶样品皆具备速溶茶的基本特征, 形态为粉末, 无结块, 无肉眼可见外来杂质, 都具有良好的冲溶性 (表 1)。其中样品 A 汤色为红棕带金圈、样品 B 汤色为红褐带金圈、样品 C 和样品 D 汤色皆为红浓明亮 (图 1a)。样品 B 的滋味更为醇和, 样品 C、D 滋味更甜, 样品 D 更为鲜爽、回甘 (图 1b)。四个样品香气为“陈香”、“烘焙香”、“花香”、“果香”的风味特征。

表 1 四款市售速溶普洱茶感官审评结果

Table 1 The sensory evaluation results of four commercially available instant Pu-erh teas							
样品	形态	杂质	汤色	滋味	香气	冲溶性	
A	粉末、无结块	无	红棕带金圈	醇和	纯正、陈香、烘焙香浓郁、花果香	均匀的浑浊液	
B	粉末、无结块	无	红褐带金圈	醇和	纯正、陈香、烘焙香浓郁、花香	均匀的浑浊液	
C	粉末、无结块	无	红浓明亮	醇正	较纯、稍有陈香、有烘焙香	均匀的浑浊液	
D	粉末、无结块	无	红浓明亮	醇正	较纯、稍有陈香、有烘焙香、甜香	均匀的浑浊液	

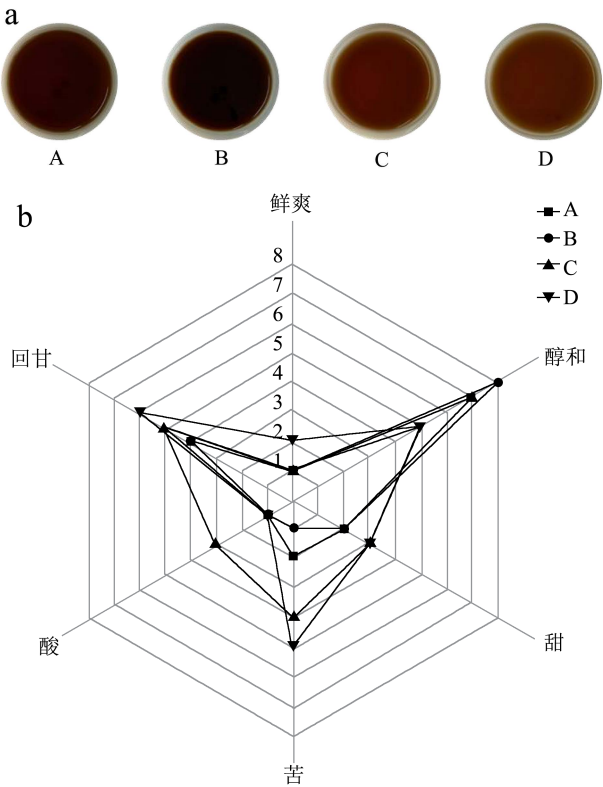


图 1 样品感官评定特征

Fig.1 Sensory evaluation characteristics of sample

注: (a) 茶样感官审评照片; (b) 茶汤的滋味特征。

2.2 茶叶生化成分含量

2.2.1 茶多酚、可溶性糖、游离氨基酸

测定速溶普洱茶中的茶多酚、可溶性糖、游离氨基酸(图2、表2)。茶多酚作为茶叶多酚类物质的总称,其质量分数为13.16%~19.19%(样品D最高,样品C最低),在赋予茶汤苦涩味的同时对色、香、味形成具有关键作用^[17]。这一含量范围处于已报道的速溶茶茶多酚总量范围(质量分数10%~40%)^[18]内。可溶性糖质量分数为9.99%~12.78%(样品D最高,样品A最低),其通过增强甜醇度和茶汤厚度直接影响滋味呈现^[19]。游离氨基酸质量分数分布于2.54%~4.00%区间,与前期报道的速溶茶游离氨基酸水平(质量分数2.54%~4.00%)^[20]相吻合,其中样品D(质量分数4.00%)和样品B(质量分数2.54%)分别呈现极值。

值得关注的是,样品D的茶多酚(质量分数19.19%)、可溶性糖(质量分数12.78%)和游离氨基酸(质量分数4.00%)含量均显著高于其他样品,该组合特征通过抑制苦涩味^[21]并强化鲜甜感,最终形成更为鲜爽甘甜的复合滋味。

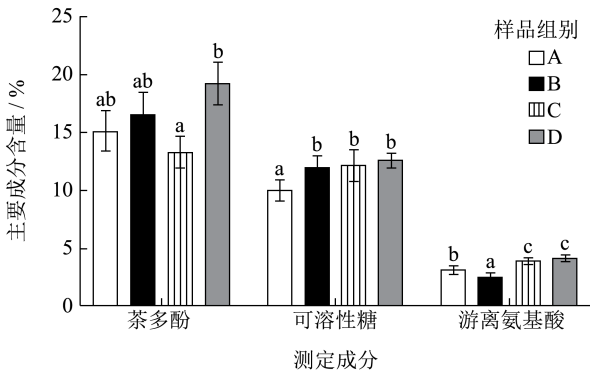


图 2 速溶普洱茶茶多酚、可溶性糖、游离氨基酸含量

Fig.2 Contents tea polyphenols, soluble sugar and free amino acid in instant tea samples

注: 图中差异显著性以不同小写字母表示 ($P<0.05$)。

表 2 四款市售速溶普洱茶茶多酚、可溶性糖、游离氨基酸的物质含量 (%)

Table 2 Contents of tea polyphenols, soluble sugars, and free amino acids in four commercial instant Pu-erh teas

	A	B	C	D
茶多酚	15.11 ± 2.13 ^{ab}	16.56 ± 2.96 ^{ab}	13.16 ± 2.02 ^a	19.19 ± 2.44 ^b
可溶性糖	2.53 ± 0.40 ^a	3.01 ± 0.11 ^b	3.02 ± 0.45 ^b	3.12 ± 0.34 ^b
游离氨基酸	3.19 ± 0.16 ^b	2.54 ± 0.15 ^a	4.00 ± 0.20 ^c	3.84 ± 0.30 ^c

注: 表中物质含量用“平均值 ± 标准误”表示, 组间差异显著性以不同小写字母标注 ($P<0.05$)。

2.2.2 儿茶素、生物碱、酚酸、黄酮类

应用 HPLC 测定了速溶普洱茶的儿茶素、生物碱、酚酸、黄酮类含量(表3)。测定发现,四个样品中的总儿茶素含量在24.82~104.21 mg·g⁻¹,明显高于蒋宾等^[22]速溶茶儿茶素总量24.48~27.65 mg·g⁻¹,样品A、B儿茶素组分中占比最高的成分为GC,含量分别为10.36、7.70 mg·g⁻¹,样品C、D儿茶素组分中占比最高的成分为EGCG,含量分别为20.22、

33.10 mg·g⁻¹。黄酮类物质中芦丁的占比最高, 含量在 3.49~10.39 mg·g⁻¹。生物碱类物质中咖啡碱的占比最高, 含量在 55.99~66.47 mg·g⁻¹。酚酸类物质中鞣花酸的占比最高, 含量在 11.51~16.11 mg·g⁻¹。

儿茶素分为酯型儿茶素和非酯型儿茶素, 对茶叶品质的形成具有重要作用^[23]。酯型儿茶素(GCG、EGCG、ECG、CG)苦涩味重、收敛性强, 但具有较强的抗氧化性和清除自由基能力^[24], 四个样品的酯型儿茶素含量在 5.21~65.02 mg·g⁻¹; 非酯型儿茶素(GC、EGC、C、EC)苦涩味较弱, 对茶汤滋味有一定影响^[25], 四个样品的非酯型儿茶素含量在 19.61~42.05 mg·g⁻¹。样品 B 的非酯型儿茶素比酯型儿茶素的比值最高, 故其滋味也更为醇和(图 1b)。

2.2.3 氨基酸组分

应用 HPLC 测定四款速溶普洱茶中 17 个氨基酸组分的含量(表 4), 17 个氨基酸组分总含量在 4.09~20.71 mg·g⁻¹, 其中样品 D 的含量最高, 与游离氨基酸测定结果相符。茶氨酸是茶叶中特有的氨基酸, 能使茶汤更为顺滑、鲜爽^[26], 样品 A、B、D 的氨基酸中, 茶氨酸含量均为最高, 分别为 5.82、4.71、10.45 mg·g⁻¹。天冬氨酸(Asp)被认为是茶叶

鲜爽味的主要组成成分^[27], 在四个样品中占比较高, 含量分别为 1.96、1.67、0.52、2.97 mg·g⁻¹, 与肖艳琴等^[28]对普洱熟茶天冬氨酸测定的结果相比有较大提升。

茶多酚作为一种天然的氧化剂, 其含量显著影响茶叶的保健功效及感官品质^[29,30]。本研究中, 样品 D 的茶多酚含量(19.19%)显著高于其他样品($P<0.05$), 其与茶黄素(Theaflavins, TFs)的协同氧化作用可能促进红浓明亮汤色的形成。进一步研究发现, 样品 D 中的可溶性糖(12.78%)和游离氨基酸(4.00%)含量在四个样品中最高, 可溶性糖与游离氨基酸的相互作用, 赋予了速溶普洱茶甘甜和鲜美的滋味, 这也在一定程度上解释了为何样品 D 的滋味口感更为丰富。此外, 研究还发现, 儿茶素作为茶叶中的重要活性物质, 其组成比例对茶叶的品质起着关键作用^[31]。样品 B 中较高的非酯型儿茶素比例可能使其口感更加醇厚, 这是因为非酯型儿茶素在茶汤中表现为更为柔和的苦涩味, 而酯型儿茶素则带来了较强的收敛性, 这种苦涩与收敛之间的平衡, 使得样品 B 的口感层次更加丰富。在氨基酸方面, 氨基酸作为茶叶中重要的风味物质, 其种类和含量直接影响着茶叶的滋味^[32], 样品 D 中高含量的氨基酸提升了其鲜爽口感。

表 3 速溶普洱儿茶素含量 (mg·g⁻¹)
Table 3 Contents of catechin in instant tea samples (mg·g⁻¹)

物质		A	B	C	D
儿茶素	GC	10.36 ± 1.04 ^b	7.70 ± 1.22 ^a	13.72 ± 1.78 ^d	12.42 ± 1.39 ^c
	EGC	6.68 ± 2.08 ^c	3.92 ± 0.37 ^a	4.49 ± 0.39 ^b	3.83 ± 0.40 ^a
	C	4.78 ± 0.43 ^b	3.79 ± 0.48 ^a	11.28 ± 1.95 ^d	7.87 ± 0.46 ^c
	EGCG	8.02 ± 0.23 ^b	2.25 ± 0.62 ^a	20.22 ± 4.05 ^c	33.10 ± 2.30 ^d
	EC	6.98 ± 0.33 ^b	4.20 ± 0.47 ^a	12.55 ± 2.02 ^c	15.07 ± 0.75 ^d
	GCG	3.05 ± 0.15 ^b	1.23 ± 0.22 ^a	10.96 ± 2.25 ^d	5.62 ± 0.40 ^c
	ECG	6.60 ± 0.39 ^b	1.11 ± 0.18 ^a	17.70 ± 3.64 ^c	24.9 ± 1.76 ^d
	CG	0.78 ± 0.07 ^a	0.63 ± 0.13 ^a	1.34 ± 0.21 ^b	1.40 ± 0.08 ^b
黄酮类	花旗松素	3.89 ± 0.27 ^b	1.36 ± 0.44 ^a	10.13 ± 1.50 ^d	4.78 ± 0.31 ^c
	芦丁	6.43 ± 1.96 ^b	3.49 ± 0.76 ^a	10.39 ± 3.94 ^d	8.29 ± 3.16 ^c
	杨梅素	2.96 ± 0.48 ^b	2.15 ± 0.58 ^a	4.90 ± 0.92 ^d	3.44 ± 0.22 ^c
	槲皮素	0.30 ± 0.18 ^a	0.34 ± 0.18 ^a	0.99 ± 0.21 ^b	0.57 ± 0.07 ^a
	木犀草素	0.07 ± 0.07 ^a	0.13 ± 0.07 ^a	0.28 ± 0.04 ^a	0.14 ± 0.01 ^a
	山奈酚	0.08 ± 0.02 ^a	0.08 ± 0.02 ^a	0.11 ± 0.02 ^a	0.11 ± 0.01 ^a
生物碱	咖啡碱	66.47 ± 1.17 ^d	63.38 ± 8.48 ^b	63.82 ± 9.36 ^c	55.99 ± 2.93 ^a
	茶碱	0.76 ± 0.07 ^a	0.69 ± 0.14 ^a	0.64 ± 0.10 ^a	0.50 ± 0.03 ^a
酚酸	鞣花酸	11.51 ± 1.04 ^a	12.80 ± 1.85 ^c	16.11 ± 1.17 ^d	12.09 ± 1.70 ^b
	没食子酸	2.51 ± 0.62 ^d	0.90 ± 0.60 ^a	1.87 ± 1.40 ^c	1.68 ± 2.21 ^b

注: 表中物质含量用“平均值 ± 标准误”表示, 组间差异显著性以不同小写字母标注 ($P<0.05$)。

表 4 速溶普洱茶氨基酸组分含量 (mg·g⁻¹)
Table 4 Contents of amino acids in instant tea samples (mg·g⁻¹)

氨基酸		A	B	C	D
天冬氨酸	Asp	1.96 ± 0.59 ^b	1.67 ± 0.52 ^b	0.52 ± 0.02 ^a	2.97 ± 0.69 ^c
谷氨酸	Glu	0.18 ± 0.01 ^b	0.14 ± 0.02 ^b	0.08 ± 0.01 ^a	0.22 ± 0.05 ^c
丝氨酸	Ser	0.25 ± 0.03 ^b	0.20 ± 0.06 ^b	0.16 ± 0.02 ^a	0.43 ± 0.26 ^c
组氨酸	His	0.35 ± 0.07 ^b	0.26 ± 0.12 ^b	0.07 ± 0.01 ^a	0.49 ± 0.10 ^c
甘氨酸	Gly	0.17 ± 0.04 ^b	0.12 ± 0.01 ^a	0.10 ± 0.01 ^a	0.16 ± 0.04 ^b
苏氨酸	Thr	0.10 ± 0.01 ^a	0.09 ± 0.01 ^a	0.11 ± 0.01 ^a	0.11 ± 0.02 ^a
丙氨酸	Ala	0.32 ± 0.03 ^b	0.26 ± 0.06 ^b	0.22 ± 0.01 ^a	0.47 ± 0.18 ^c
茶氨酸	Thea	5.82 ± 3.23 ^b	4.71 ± 2.48 ^b	0.17 ± 0.01 ^a	10.45 ± 2.06 ^c
精氨酸	Arg	0.71 ± 0.13 ^b	0.57 ± 0.21 ^{ab}	0.45 ± 0.05 ^a	0.82 ± 0.32 ^b
酪氨酸	Tyr	0.65 ± 0.09 ^b	0.53 ± 0.07 ^{ab}	0.37 ± 0.02 ^a	0.80 ± 0.15 ^c
半胱氨酸	Cys	0.01 ± 0.00 ^a	0.01 ± 0.00 ^a	0.01 ± 0.00 ^a	0.02 ± 0.00 ^b
γ-氨基丁酸	GABA	0.04 ± 0.01 ^a	0.03 ± 0.01 ^a	0.04 ± 0.01 ^a	0.05 ± 0.02 ^a
缬氨酸	Val	0.08 ± 0.02 ^a	0.07 ± 0.01 ^a	0.09 ± 0.01 ^a	0.08 ± 0.01 ^a
甲硫氨酸	Met	0.92 ± 0.14 ^b	0.68 ± 0.19 ^b	0.43 ± 0.03 ^a	1.26 ± 0.49 ^c
苯丙氨酸	Phe	0.72 ± 0.20 ^b	0.51 ± 0.15 ^{ab}	0.32 ± 0.02 ^a	1.14 ± 0.47 ^c
异亮氨酸	Ile	0.45 ± 0.04 ^b	0.39 ± 0.08 ^{ab}	0.34 ± 0.02 ^a	0.56 ± 0.19 ^c
亮氨酸	Leu	0.40 ± 0.08 ^{ab}	0.34 ± 0.13 ^a	0.52 ± 0.01 ^b	0.49 ± 0.18 ^b
脯氨酸	Pro	0.12 ± 0.07 ^a	0.09 ± 0.06 ^a	0.09 ± 0.02 ^a	0.19 ± 0.15 ^a

注：表中物质含量用“平均值 ± 标准误”表示，组间差异显著性以不同小写字母标注（*P* < 0.05）。

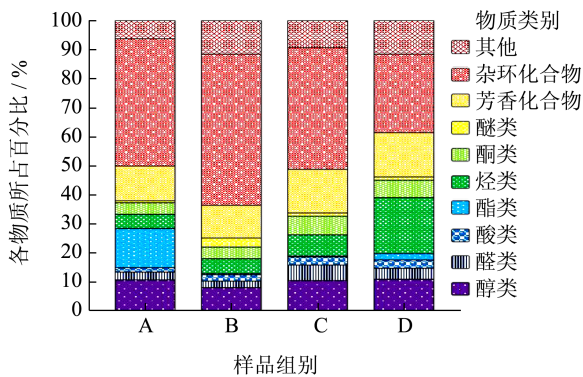


图 3 速溶普洱茶挥发性成分种类

Fig.3 Kinds of volatile compounds in instant Pu-erh tea

2.3 挥发性物质组成差异

2.3.1 四款速溶普洱茶挥发性成分鉴定及差异

应用 HS-GC-MS 检测四款速溶茶的挥发性成分，共鉴定出 68 种香气物质，包括 8 种醇类、5 种醛类、11 种酸类、4 种酯类、6 种烃类、9 种酮类、8 种芳香类、7 种杂环化合物、3 种醚类、5 种其他类化合物。这十类物质共同构成了速溶普洱茶的香气特征，如图 3 所示。其中，杂环化合物的相对含量最高（27.00%~52.07%），其次为芳香化合物（11.32%~15.23%），然后依次为烃类（4.81%~19.31%）、其他类（6.11%~11.50%）、醇

类（8.00%~10.96%）、酯类（0.41%~13.51%）、酮类（3.99%~6.35%）、醛类（2.18%~5.34%）、醚类（0.76%~3.23%）、酸类（1.55%~2.88%）。不同速溶普洱茶样品的挥发性物质种类和相对含量不同，品质特征也有所不同，杨转等^[8]制作的速溶普洱茶中醇类、酯类和酮类含量较高，茶样呈现“陈香”浓郁、陈醇的风味特征；刘志达等^[9]在不同浸提温度下制作速溶普洱茶，在 60 ℃时醇类、酯类和醛类含量较高茶样呈现“花香”、“甜香”的风味特征，在 80 ℃时芳香化合物和酮类含量较高，茶样“陈香”凸显。

将检测的挥发性成分峰面积值相对含量为指标进行 PCA 分析，经过质量控制后，用 PCA 分析了四个样本之间的差异，如图 4 所示。质量控制样品聚集在一起，表明该方法是稳定的，并产生了高质量的数据。相同处理的样品聚在一起，不同样品相互分离，区分显著，说明四款速溶普洱茶的挥发性物质存在明显差异。

为进一步筛选在四款速溶普洱茶中具有显著差异的关键香气物质，本文结合变量投影重要性（Variable Importance in Projection, VIP）值、差异倍数（Fold Change, FC）及显著性检验（*P* 值）共同作为筛选标准。设定筛选阈值为：VIP > 1, FC > 2, *P* < 0.05，最

终筛选出若干具有代表性的差异香气成分，结果如表 5 所示。在样品 A 中，邻苯二甲酸二乙酯、邻氨基对甲苯酚和 2- 丙炔 -1- 醇的相对含量较高，相对含量在 20.61%、13.74%、12.64%；在样品 B 中，烯丙基腈、邻氨基对甲苯酚和 2- 甲基吡嗪的相对含量较高，相对含量在 17.72%、14.89%、12.21%；在样品 C 中，1- 乙基吡咯、邻氨基对甲苯酚和烯丙基腈的相对含量较高，相对含量在 15.39%、13.26%、11.96%；在样品 D 中，氯乙炔、烯丙基腈和邻氨基对甲苯酚的相对含量较高，相对含量在 18.49%、12.70%、10.11%。

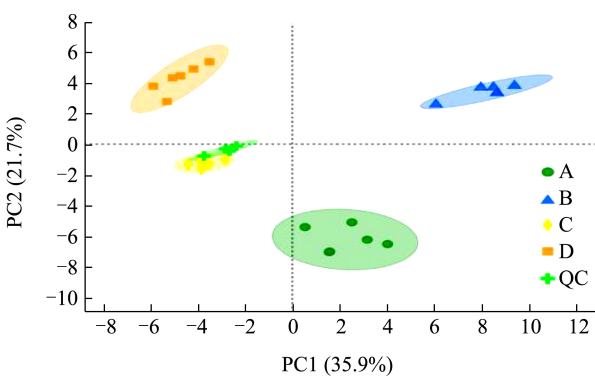


图 4 普洱速溶茶挥发性物质的 PCA 分析

Fig.4 PCA analysis of volatile compounds of Pu-erh instant tea

表 5 速溶普洱熟茶挥发性成分相对含量（%）

Table 5 Relative content of volatile components in instant ripe Pu-erh tea (%)							
类型	香气物质	保留时间/min	化学式	A	B	C	D
醇类	2-甲基亚磺酰乙醇	1.549	C ₃ H ₈ O ₂ S	—	0.01 ± 0.00	0.02 ± 0.01	4.52 ± 1.39
	2-(4-亚甲基环己基-2-烯-1-基) 丙醇	13.657	C ₁₀ H ₁₆ O	0.22 ± 0.04	0.34 ± 0.08	0.35 ± 0.01	0.35 ± 0.04
	乙二醇	15.604	C ₂ H ₆ O ₂	0.06 ± 0.02	0.02 ± 0.00	0.56 ± 0.08	0.47 ± 0.17
	糠醇	16.885	C ₅ H ₆ O ₂	4.65 ± 1.21	3.52 ± 0.24	5.40 ± 0.29	2.77 ± 0.12
	氧化芳樟醇	17.863	C ₁₀ H ₁₈ O ₂	0.12 ± 0.02	0.54 ± 0.11	0.12 ± 0.01	0.21 ± 0.04
	苯甲醇	18.852	C ₇ H ₈ O	0.14 ± 0.03	0.12 ± 0.02	0.21 ± 0.01	2.68 ± 0.36
	2-丙炔-1-醇	20.526	C ₃ H ₄ O	12.64 ± 4.37	8.52 ± 4.65	7.80 ± 3.13	1.86 ± 0.84
醛类	丁醛	1.707	C ₄ H ₈ O	1.38 ± 0.43	0.85 ± 0.32	2.44 ± 0.45	1.22 ± 0.38
	戊醛	2.282	C ₅ H ₁₀ O	2.48 ± 0.77	1.87 ± 0.50	4.46 ± 2.19	2.98 ± 0.83
	糠醛	2.918	C ₅ H ₄ O ₂	0.05 ± 0.04	0.08 ± 0.03	0.13 ± 0.03	0.04 ± 0.02
	5-甲基呋喃醛	15.675	C ₆ H ₆ O ₂	0.22 ± 0.02	0.71 ± 0.07	0.07 ± 0.02	0.10 ± 0.03
	4-(1,1-二甲基乙基) 苯丙醛	19.753	C ₁₃ H ₁₈ O	0.08 ± 0.03	0.07 ± 0.02	0.19 ± 0.01	0.07 ± 0.01
酸类	2,5-二羟基苯甲酸	5.404	C ₇ H ₆ O ₄	0.18 ± 0.09	0.08 ± 0.03	0.10 ± 0.06	0.18 ± 0.08
	马来酸	12.218	C ₄ H ₄ O ₄	0.33 ± 0.07	0.56 ± 0.08	0.76 ± 0.06	0.62 ± 0.06
	丙酸	15.494	C ₃ H ₆ O ₂	0.72 ± 0.24	1.37 ± 0.08	1.08 ± 0.08	0.66 ± 0.11
	丁酸	16.378	C ₄ H ₈ O ₂	0.22 ± 0.04	0.20 ± 0.01	0.39 ± 0.03	0.32 ± 0.03
	3,4-二羟基苯乙酸	16.957	C ₈ H ₈ O ₄	0.04 ± 0.01	0.11 ± 0.02	0.05 ± 0.01	0.03 ± 0.01
	异戊酸	17.089	C ₅ H ₁₀ O ₂	0.18 ± 0.03	0.30 ± 0.02	0.54 ± 0.03	0.65 ± 0.08
	(Z)-2-甲基-2-丁烯酸	17.395	C ₅ H ₈ O ₂	0.23 ± 0.04	0.10 ± 0.00	0.12 ± 0.01	0.08 ± 0.01
	月桂酸	18.466	C ₁₂ H ₂₄ O ₂	0.14 ± 0.03	—	—	—
	3-甲基-2-戊烯酸	19.948	C ₆ H ₁₀ O ₂	0.26 ± 0.04	0.31 ± 0.02	0.26 ± 0.02	0.25 ± 0.03
	巴比妥酸	20.034	C ₄ H ₄ N ₂ O ₃	0.14 ± 0.05	0.42 ± 0.02	0.37 ± 0.03	0.31 ± 0.08
	苯甲酸	22.705	C ₇ H ₆ O ₂	0.01 ± 0.00	0.02 ± 0.02	0.01 ± 0.00	0.13 ± 0.05
	硫氰酸苄酯	19.118	C ₈ H ₇ NS	0.19 ± 0.04	0.17 ± 0.01	0.22 ± 0.01	2.42 ± 0.29
酯类	乙酸橙花酯	19.567	C ₁₂ H ₂₀ O ₂	0.10 ± 0.02	0.18 ± 0.01	0.10 ± 0.02	0.04 ± 0.01
	二氢猕猴桃内酯	22.007	C ₁₁ H ₁₆ O ₂	0.29 ± 0.05	0.32 ± 0.03	0.22 ± 0.03	0.03 ± 0.01
	邻苯二甲酸二乙酯	23.063	C ₁₂ H ₁₄ O ₄	20.61 ± 6.40	0.08 ± 0.02	0.03 ± 0.02	0.04 ± 0.02

续表5

类型	香气物质	保留时间/min	化学式	A	B	C	D
烃类	2-乙氧丙烷	15.893	C ₁₀ H ₂₂ O	0.10 ± 0.03	0.20 ± 0.01	0.30 ± 0.02	0.18 ± 0.03
	1-乙氧基丁-1-烯-3-炔	6.541	C ₆ H ₈ O	0.79 ± 0.19	0.69 ± 0.14	2.42 ± 0.19	1.04 ± 0.17
	氯乙炔	1.560	C ₂ HCl	0.01 ± 0.01	0.05 ± 0.03	0.22 ± 0.05	18.49 ± 2.14
	间氨基苯乙炔	22.589	C ₈ H ₇ N	0.08 ± 0.04	0.04 ± 0.01	0.10 ± 0.01	0.07 ± 0.00
	月桂烯	18.587	C ₁₀ H ₁₆	0.91 ± 0.11	0.12 ± 0.02	2.39 ± 0.14	1.24 ± 0.05
	3-丙基环戊烯	20.540	C ₈ H ₁₄	5.57 ± 3.90	7.21 ± 3.84	4.66 ± 1.90	1.86 ± 1.91
酮类	4-甲基-3-戊烯-2-酮	5.477	C ₆ H ₁₀ O	0.14 ± 0.08	0.23 ± 0.05	1.60 ± 0.30	2.51 ± 0.29
	1-(1H-咪唑-5-基)戊酮	12.966	C ₈ H ₁₂ N ₂ O	0.20 ± 0.05	0.11 ± 0.04	0.27 ± 0.02	0.16 ± 0.01
	4-环戊烯-1,3-二酮	15.845	C ₅ H ₄ O ₂	0.29 ± 0.13	0.36 ± 0.04	0.12 ± 0.01	0.11 ± 0.02
	(E)-4-己烯-2-酮	16.989	C ₆ H ₁₀ O	4.64 ± 1.23	3.51 ± 0.25	5.39 ± 0.28	2.77 ± 0.12
	羟基丙酮	17.090	C ₃ H ₆ O ₂	0.18 ± 0.03	0.30 ± 0.02	0.54 ± 0.03	0.65 ± 0.08
	环戊酮	17.783	C ₅ H ₈ O	0.97 ± 0.12	1.10 ± 0.05	0.68 ± 0.08	0.79 ± 0.06
	2,4-二羟基苯乙酮	18.253	C ₈ H ₈ O ₃	—	0.47 ± 0.06	—	0.04 ± 0.01
	2,5-二羟基-4-甲氧基苯乙酮	20.086	C ₉ H ₁₀ O ₄	0.03 ± 0.01	0.44 ± 0.04	0.02 ± 0.00	0.03 ± 0.00
	苯乙酮	21.285	C ₈ H ₈ O	0.11 ± 0.03	0.05 ± 0.01	0.05 ± 0.01	0.01 ± 0.01
芳香化合物	2-异丙氧基苯	14.496	C ₉ H ₁₂ O	0.14 ± 0.03	0.12 ± 0.03	0.34 ± 0.02	0.43 ± 0.03
	邻氨基对甲苯酚	16.118	C ₇ H ₉ NO	13.74 ± 1.43	14.89 ± 1.34	13.26 ± 0.66	10.11 ± 0.62
	4-异丙基甲苯	16.246	C ₁₀ H ₁₄	0.15 ± 0.05	0.02 ± 0.02	0.52 ± 0.03	2.52 ± 0.13
	2-甲氧基-5-氨基苯酚	16.314	C ₇ H ₉ NO ₂	0.29 ± 0.04	0.32 ± 0.03	0.30 ± 0.02	0.27 ± 0.03
	1,2,3,4-四甲氧基苯	20.694	C ₁₀ H ₁₄ O ₄	0.13 ± 0.02	0.48 ± 0.04	0.09 ± 0.00	0.05 ± 0.01
	3-叔丁基苯酚	21.082	C ₁₀ H ₁₄ O	0.09 ± 0.01	0.07 ± 0.01	0.10 ± 0.01	0.12 ± 0.02
	3,5-二叔丁基苯酚	21.751	C ₁₄ H ₂₂ O	1.70 ± 0.28	0.44 ± 0.03	1.26 ± 0.15	1.31 ± 0.11
杂环化合物	2-甲氧基-5-甲基苯胺	16.517	C ₈ H ₁₁ NO	3.04 ± 0.5	2.30 ± 0.29	4.65 ± 0.25	3.02 ± 0.15
	1-甲基吡咯	5.642	C ₅ H ₇ N	0.33 ± 0.13	0.90 ± 0.17	0.41 ± 0.04	0.60 ± 0.10
	1-乙基吡咯	6.537	C ₆ H ₉ N	5.17 ± 0.87	4.97 ± 1.07	15.39 ± 1.25	9.75 ± 0.53
	2-甲基吡嗪	8.613	C ₅ H ₆ N ₂	3.23 ± 1.25	12.21 ± 0.58	2.64 ± 0.37	2.63 ± 0.23
	1,2,5-三甲基吡咯	9.199	C ₇ H ₁₁ N	0.20 ± 0.07	0.64 ± 0.14	0.88 ± 0.04	0.57 ± 0.09
	2-乙基吡嗪	10.262	C ₆ H ₈ N ₂	0.33 ± 0.19	1.52 ± 0.20	0.36 ± 0.05	0.27 ± 0.06
	2,3,5-三甲基吡嗪	11.923	C ₇ H ₁₀ N ₂	0.48 ± 0.22	0.72 ± 0.08	0.50 ± 0.03	0.31 ± 0.04
其他	3H-茚基吡咯烷	21.957	C ₁₃ H ₁₅ N	0.02 ± 0.01	0.01 ± 0.00	0.13 ± 0.01	0.02 ± 0.01
	八甲基环四硅氧烷	2.856	C ₈ H ₂₄ O ₄ Si ₄	1.16 ± 0.83	0.16 ± 0.08	0.44 ± 0.26	0.48 ± 0.31
	十四甲基环七硅氧烷	13.640	C ₁₄ H ₄₂ O ₇ Si ₇	0.01 ± 0.01	0.02 ± 0.01	0.01 ± 0.00	0.05 ± 0.02
	十六烷基环八硅氧烷	16.216	C ₁₆ H ₄₈ O ₈ Si ₈	0.01 ± 0.01	0.03 ± 0.01	0.01 ± 0.00	0.13 ± 0.04
	5-氨基-1H-吡唑-4-甲腈	10.254	C ₄ H ₄ N ₄	0.13 ± 0.07	0.88 ± 0.11	0.09 ± 0.02	0.11 ± 0.06
	烯丙基腈	14.817	C ₄ H ₅ N	8.49 ± 1.07	17.72 ± 1.08	11.96 ± 0.71	12.70 ± 0.68
醚类	对氨基苯甲醚	16.709	C ₇ H ₉ NO	0.06 ± 0.02	0.15 ± 0.02	0.05 ± 0.01	0.06 ± 0.02
	邻苯二甲醚	17.510	C ₈ H ₁₀ O ₂	0.02 ± 0.01	3.83 ± 0.35	0.01 ± 0.00	0.77 ± 0.09
	邻氨基苯乙醚	17.728	C ₈ H ₁₁ NO	1.12 ± 0.14	1.33 ± 0.16	1.48 ± 0.05	0.51 ± 0.05

注: 表中物质含量用“平均值 ± 标准误”表示, “—”表示未检测到该物质。

2.3.2 四款速溶普洱茶挥发性成分差异化合物分析

茶叶中的挥发性物质组成非常复杂，它们中的大多数物质没有气味或存在微弱的气味，因此筛选关键挥发性物质对揭示速溶普洱茶香气的组成起着重要作用^[33]。研究人员通常采用香气活度值（OAV）^[34]和相对气味活度值（rOAV）^[35]来评估挥发性物质对香气的贡献程度。一般认为 rOAV>1 的挥发性物质对香气的贡献度最大，0.1≤rOAV<1 的挥发性物质对香气有一定的修饰作用。本研究根据气味类型和 rOAV 值筛选出 15 种挥发性物质，如表 6 所示。样品 A 中有 6 种物质 rOAV>1，7 种物质 0.1≤rOAV<1；样品 B 中有 6 种物质 rOAV>1，5 种物质 0.1≤rOAV<1；样品 C 中有 8 种物质 rOAV>1，4 种物质 0.1≤rOAV<1；样品 D 中有 8 种物质 rOAV>1，4 种物质 0.1≤rOAV<1。

其中，在四款速溶普洱茶中 rOAV>1 的物质有氧化芳樟醇（“花香”、“柑橘香”）、月桂烯（“花香”、“果香”）、2-甲基吡嗪（“烘焙香”）、1,2,3,4-四甲氧基苯（“陈香”）、丁醛（“清香”）和戊醛（“果香”），这些物质为四款速溶普洱茶的关键香气组分，其中，1,2,3,4-四甲氧基苯的 rOAV 值最高，使四个茶样呈现“陈香”的风味特征，与感官审评的结果相符。除此之外，氧化芳樟醇、月桂烯和戊醛在样品 C、D 中的 rOAV 值高于其他两个样品，与感官审评中样品 C、D 呈“花香”、“果香”的结果相符。0.1≤rOAV<1 的物质有乙酸橙花酯（“花香”）、二氢猕猴桃内酯（“木香”、“麝香味”）、2-乙基吡嗪（“烘焙香”、“可

可味”）、苯乙酮（“坚果香”）和糠醛（“烘焙香”、“杏仁味”），这些物质对四款速溶普洱茶的香气形成有一定修饰作用。除此之外，苯甲醇（“花香”）、4-甲基-3-戊烯-2-酮（“清香”、“甜香”）在样品 A 和样品 B 中的 0.1≤rOAV<1，而在样品 C 和样品 D 中的 rOAV>1，说明这些物质对样品 C 和样品 D 的香气形成具有较大贡献，这也印证了感官审评中，样品 C、D 呈“花香”的结果。

对具有香气描述的挥发性物质进行分类和归纳，结果如图 5 所示，四款速溶普洱茶的挥发性物质被分类为“花香”、“果香”、“坚果香”、“陈香”和“清香”。1,2,3,4-四甲氧基苯和 4-异丙基甲苯使茶样呈“陈香”，4-甲基-3-戊烯-2-酮、2-甲基吡嗪、2-乙基吡嗪、糠醛和苯乙酮使茶样呈“烘焙香”，在样品 C、D 中这些物质的 rOAV 值较高，茶样的“陈香”和“烘焙香”也更浓郁，其中，甲氧基苯类化合物被认为是在发酵过程中微生物降解和甲基化儿茶素形成的一类物质，通常呈现“陈香”的风味特征，在茶叶堆积发酵中的热降解也有助于甲氧基苯类化合物的形成^[36]，研究表明 1,2,3,4-四甲氧基苯可作为普洱熟茶的风味特征物质，用于区分普洱熟茶和生茶^[37]。2-甲基吡嗪和 2-乙基吡嗪可能源于加工过程中糖与氨基酸或茶氨酸结合发生的美拉德反应，使茶样呈现“焦糖香”、“烘焙香”的风味特征^[38]。氧化芳樟醇、乙酸橙花酯、月桂烯、苯甲醇和月桂酸通常在绿茶、乌龙茶中富集为“花香”品质形成起到决定性作用^[39]。

表 6 速溶普洱茶的挥发性物质香气贡献度

Table 6 Aroma contribution of volatile compounds in instant Pu-erh tea						
挥发性化合物	在水中的香气阈值 / ($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	rOAV				香气特征
		A	B	C	D	
氧化芳樟醇	6	9.37	11.91	14.17	50.10	花香、柑橘香
苯甲醇	100	0.66	0.16	1.48	37.69	花香
乙酸橙花酯	2 000	0.03	0.01	0.03	0.03	花香
二氢猕猴桃内酯	500	0.28	0.08	0.31	0.08	木香、麝香味
月桂烯	13	33.42	1.21	128.47	133.89	花香、果香
月桂酸	500	0.14	<0.01	<0.01	<0.01	椰子油味
4-甲基-3-戊烯-2-酮	200	0.34	0.15	5.56	17.67	清香、甜香
2-甲基吡嗪	250	6.38	6.53	7.43	14.85	烘焙香
2-乙基吡嗪	600	0.27	0.34	0.42	0.62	烘焙香、可可味
苯乙酮	65	0.81	0.10	0.55	0.19	坚果香
糠醛	100	0.21	0.10	0.89	0.58	烘焙香、杏仁味
1,2,3,4-四甲氧基苯	0.64	100.00	100.00	100.00	100.00	陈香
4-异丙基甲苯	5 500	0.01	<0.01	0.07	0.65	陈香
丁醛	57	11.29	1.98	30.03	29.79	清香
戊醛	200	6.01	1.26	15.63	21.23	果香

注：阈值均来源于《化合物嗅觉阈值汇编原书》。

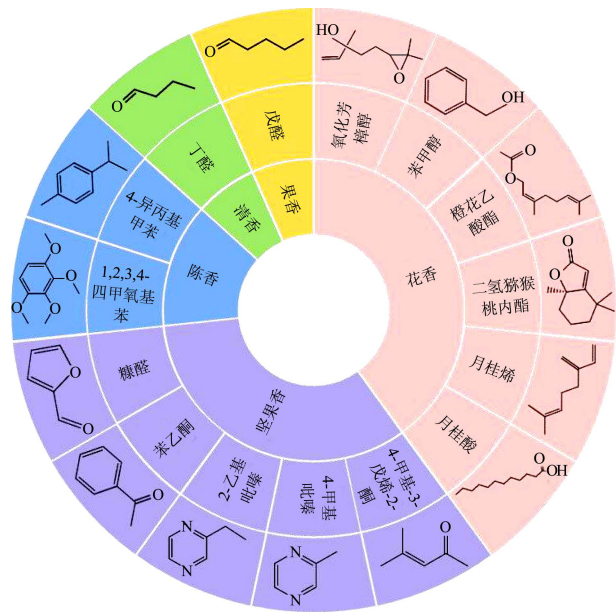


图 5 速溶普洱茶特征挥发性物质

Fig.5 Characteristic volatile compounds in instant Pu-erh tea

关于风味特征的研究发现，四款速溶普洱茶各自展现了独特的香气特性：“陈香”、“烘焙香”、“花香”和“果香”。通过 HS-GC-MS 鉴定到的主要挥发性化合物包括氧化芳樟醇（“花香”和“柑橘香”）、月桂烯（“花香”和“果香”）、2-甲基吡嗪（“烘焙香”）、1,2,3,4-四甲氧基苯（“陈香”）、丁醛（“清香”）及戊醛（“果香”），其中，1,2,3,4-四甲氧基苯的 rOAV 值最高，可能是四款茶样呈现“陈香”特征的关键贡献物质。这些挥发性化合物共同作用，形成了茶样丰富且浓郁的香气特征。

3 结论

本研究通过解析四款市售速溶普洱茶的非挥发性成分与挥发性化合物，揭示了其风味特征形成的物质基础。非挥发性成分中，茶多酚（13.16%~19.19%）与茶汤红浓明亮的色泽显著相关，而可溶性糖（9.99%~12.78%）和游离氨基酸（2.54%~4.00%）的协同作用赋予茶汤甘甜与鲜爽的滋味，其中样品 D 因三者含量最高表现出更丰富的口感层次。而儿茶素组成的差异进一步影响滋味特性，如样品 B 的非酯型儿茶素比例更高，茶样呈现更醇厚、收敛性更低的口感。挥发性成分分析表明，氧化芳樟醇、月桂烯、2-甲基吡嗪及 1,2,3,4-四甲氧基苯（rOAV 最高）等 6 种关键香气活性物质（rOAV > 1）共同构建了“陈香”、“烘焙香”、“花香”和“果香”等特征香气。综上所述，通过对四款速溶普洱茶中非挥发性成分和挥发性成分的综合分析，更全面综合地了解其品质特征和口感差异。这些研究结果为后续系统分析速溶普洱茶的风味

特征和品质提升提供了实验依据。本研究选用的四款市售速溶普洱茶样品均为单一批次，受限于产品批次流通与购买可及性，未能涵盖不同批次样品，后续研究可进一步探讨不同批次间的风味一致性与稳定性。

参考文献

[1] 王伟伟,张建勇,陈琳,等.安吉白茶速溶茶粉加工技术研究[J].食品科技,2020,45(7):76-81.

[2] ZHANG T, NI H, QIU X J, et al. Suppressive interaction approach for masking stale note of instant ripened Pu-erh tea products [J]. Molecules, 2019, 24(24): 4473.

[3] WANG Q, BELSCAK-CVITANOVIC A, DURGO K, et al. Physicochemical properties and biological activities of a high-theabrownins instant Pu-erh tea produced using *Aspergillus tubingensis* [J]. LWT-Food Science & Technology, 2018, 90: 598-605.

[4] SUN Y, WANG Y, SONG P, et al. Anti-obesity effects of instant fermented teas *in vitro* and in mice with high-fat-diet-induced obesity [J]. Food & Function, 2019, 10(6): 3502-3513.

[5] JIN J C, LIANG S, QI S X, et al. Widely targeted metabolomics reveals the effect of different raw materials and drying methods on the quality of instant tea [J]. Frontiers in Nutrition, 2023, 10: 1236216.

[6] CHEN G, XUE Y, ZHU G, et al. Characterization of the influence of extraction factors on instant Pu-erh tea: Focusing on changes in sensory quality and aroma profile [J]. Food Chemistry: X, 2024, 24: 101925.

[7] 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(Pt B): 131546.

[8] 杨转,郭桂义,王乔健,等.普洱速溶茶粉的制备工艺优化[J].食品工业科技,2016,37(21):243-248.

[9] 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.

[10] 王文成,胡银凤,饶建平,等.微波真空干燥速溶绿茶工艺优化[J].食品与发酵工业,2021,47(4):202-207.

[11] 刘谢缘,马莹,曾琪,等.过氧化氢酶、多酚氧化酶及其组合对白芽奇兰速溶茶粉香气品质的影响[J].食品科学,2024,45(22):146-153.

[12] ZHAO M, ZHANG D L, SU X Q, et al. An integrated metagenomics/metaproteomics investigation of the microbial communities and enzymes in solid-state fermentation of Pu-erh tea [J]. Scientific Reports, 2015, 5: 10117.

[13] ZHAO M, MA Y, DAI L, et al. A high-performance liquid chromatographic method for simultaneous determination of 21 free amino acids in tea [J]. Food Analytical Methods, 2013, 6(1): 69-75.

[14] NIAN B, CHEN L, YI C, et al. A high performance liquid chromatography method for simultaneous detection of 20 bioactive components in tea extracts [J]. Electrophoresis, 2019, 40(21): 2837-2844.

[15] XUE J, LIU P, YIN J, et al. Dynamic changes in volatile compounds

- of shaken black tea during its manufacture by GC x GC-TOFMS and multivariate data analysis [J]. *Foods*, 2022, 11(9): 1-17.
- [16] CHEN G, ZHU G, XIE H, et al. Characterization of the key differential aroma compounds in five dark teas from different geographical regions integrating GC-MS, ROAV and chemometrics approaches [J]. *Food Research International*, 2024, 194: 114928.
- [17] 吕海鹏,王梦琪,张悦,等.普洱茶后发酵过程中多酚类成分生物转化的研究进展[J].*食品科学*,2018,39(23):306-312.
- [18] 高玉萍,涂云飞,孔俊豪,等.固态速溶茶理化品质研究[C].中国贵州贵阳:2013.
- [19] DENG S, ZHOU X, DONG H, et al. Mellow and thick taste of Pu-erh ripe tea based on chemical properties by sensory-directed flavor analysis [J]. *Foods*, 2022, 11(15): 2285.
- [20] 耿丽晶,周围,郭雪,等.不同生产工艺条件对速溶普洱茶中主要成分含量的影响[J].*食品工业科技*,2013,34(24):265-270,274.
- [21] MEI S, DING J, CHEN X. Identification of differential volatile and non-volatile compounds in coffee leaves prepared from different tea processing steps using HS-SPME/GC-MS and HPLC-Orbitrap-MS/MS and investigation of the binding mechanism of key phytochemicals with olfactory and taste receptors using molecular docking [J]. *Food Research International*, 2023, 168: 112760.
- [22] 蒋宾,黄尹,石兴云,等.以云南铁观音为原料的速溶茶加工研究[J].*食品研究与开发*,2018,39(19):68-73.
- [23] LIU Z, RAN Q, LI Q, et al. Interaction between major catechins and umami amino acids in green tea based on electronic tongue technology [J]. *Journal of Food Science*, 2023, 88(6): 2339-2352.
- [24] 苏裕盛,余春森,沈成万.儿茶素改善阿尔茨海默病认知功能的文献研究[J].*茶叶*,2023,49(1):32-36.
- [25] 陈志达,周辉,陈兴华,等.福鼎白茶滋味品质的量化评价[J].*浙江大学学报(农业与生命科学版)*,2020,46(3):334-343.
- [26] DEB S, BORAH A. L-THEANINE, the unique constituent of tea, improves neuronal survivability by curtailing inflammatory responses in MPTP model of Parkinson's disease [J]. *Neurochemistry International*, 2024, 179: 105830.
- [27] YU P, YEO A S, LOW M Y, et al. Identifying key non-volatile compounds in ready-to-drink green tea and their impact on taste profile [J]. *Food Chemistry*, 2014, 155: 9-16.
- [28] 肖艳琴,李若愚,刘琨毅,等.凝结魏茨曼氏菌发酵普洱茶细菌群落与品质特征研究[J].*中国酿造*,2025,44(1):112-118.
- [29] 王冰洁,黄奕,赵芸,等.黑茶品质化学成分及工艺影响因素研究进展[J].*食品工业*,2023,44(1):206-211.
- [30] GUO Z, BARIMAH A O, YIN L, et al. Intelligent evaluation of taste constituents and polyphenols-to-amino acids ratio in matcha tea powder using near infrared spectroscopy [J]. *Food Chemistry*, 2021, 353: 129372.
- [31] 折改梅,张香兰,陈可可,等.茶氨酸和没食子酸在普洱茶中的含量变化[J].*云南植物研究*,2005,5:126-130.
- [32] YU Z, YANG Z. Understanding different regulatory mechanisms of proteinaceous and non-proteinaceous amino acid formation in tea (*Camellia sinensis*) provides new insights into the safe and effective alteration of tea flavor and function [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2020, 60(5): 844-858.
- [33] PENG Q, LI S, ZHENG H, et al. Characterization of different grades of Jiuqu hongmei tea based on flavor profiles using HS-SPME-GC-MS combined with E-nose and E-tongue [J]. *Food Research International*, 2023, 172: 113198.
- [34] WANG M Q, MA W J, 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.
- [35] CHEN G, ZHU G, XIE H, et al. Characterization of the key differential aroma compounds in five dark teas from different geographical regions integrating GC-MS, ROAV and chemometrics approaches [J]. *Food Research International*, 2024, 194: 114928.
- [36] 陈国和,胡腾飞,王乐涯,等.基于顶空固相微萃取-气相色谱-嗅闻仪-质谱仪结合气味活力值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] 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]. *The Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67(47): 13139-13149.
- [38] 郭向阳.茶氨酸在茶叶烘焙香气形成中的作用及机理[D].合肥:安徽农业大学,2019.
- [39] QI H, DING S, PAN Z, et al. Characteristic volatile fingerprints and odor activity values in different citrus-tea by HS-GC-IMS and HS-SPME-GC-MS [J]. *Molecules*, 2020, 25(24): 6027.