

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2024.60109

足火温度对烘青绿茶香气成分的影响

齐玉岗^{1,2,3} 马卓涛¹ 尹旭超^{1,2} 纪昌中^{1,2,4}

(1. 安康学院现代农业与生物科技学院, 陕西 安康 725000; 2. 陕西省茶叶省市共建重点实验室, 陕西 安康 725000; 3. 白河县小兰香茶业有限公司, 陕西 安康 725800; 4. 安康市茶叶学会, 陕西 安康 725000)

摘要: [目的] 探究足火温度对烘青绿茶香气的影响。[方法] 制备不同足火温度的烘青绿茶, 对所制烘青绿茶香气进行感官审评, 采用顶空固相微萃取—气相色谱—质谱(HS-SPME-GC-MS)技术分析不同足火温度间关键香气成分及含量差异。[结果] 烘青绿茶干燥时足火温度为 80 °C 能够提高烘青绿茶感官审评香气得分; 5 种不同足火温度所制烘青绿茶中共鉴定出 79 种香气成分, 依据化学结构划分为 5 类: 醇类 37 种, 醛类 16 种, 酮类 9 种, 酯类 4 种和其他 13 种, 其中共有香气成分 23 种。结合关键挥发性成分分析和 OAV 分析, 5 种不同烘干温度烘青绿茶中筛选出苯乙醛、庚醛、香叶醇、顺式香叶醇、芳樟醇、己醇、辛醇 7 种关键香气成分。对烘青绿茶香气贡献度高的芳樟醇和香叶醇在不同足火温度干燥的绿茶香气总量占比分别为 33%~44% 和 14%~20%, 其含量在足火 80 °C 时提升幅度最大, 但进一步升高足火温度后, 其含量呈递减趋势。足火温度 80 °C 时萜烯醇类化合物含量较 70 °C 明显增加, 但足火温度 ≥ 90 °C 时, 萜烯醇类化合物含量呈下降趋势。[结论] 80 °C 足火烘干制成烘青绿茶的感官香气得分及香气成分含量高于其他足火温度的, 对提高香气品质最有效, 此温度可在烘青绿茶足火中应用。

关键词: 足火温度; 烘青绿茶; 香气成分; 气相色谱—质谱法(GC-MS)

Effect of full drying temperature on the aroma of baked green tea

QI Yugang^{1,2,3} MA Zhuotao¹ YIN Xuchao^{1,2} JI Changzhong^{1,2,4}

(1. School of Modern Agriculture and Biotechnology, Ankang University, Ankang, Shaanxi 725000, China; 2. Shaanxi Tea Key Lab Co-sponsored by Province and Municipality, Ankang, Shaanxi 725000, China; 3. Baihe County Xiaolanxiang Tea Co., Ltd., Ankang, Shaanxi 725800, China; 4. Ankang Tea Science Society, Ankang, Shaanxi 725000, China)

Abstract: [Objective] To investigate the effect of full drying temperature on the aroma of baked green tea. [Methods] Baked green tea was prepared at different full drying temperatures, and its aroma was evaluated using sensory analysis. The key aroma components and their content differences between different full drying temperatures were analyzed using headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS). [Results] The aroma score of the baked green tea improved when the full drying temperature was 80 °C. A total of 79 aroma components were identified in the baked green tea samples made at five different full drying temperatures. Based on their chemical structures, these components were divided into five categories: 37 alcohols, 16 aldehydes, 9 ketones, 4 esters, and 13 others. Among these, 23 aroma components were common across all five temperatures. Seven key aroma components including phenylacetaldehyde, heptaldehyde, geraniol, cis-geraniol, linalool, hexanol, and octanol were identified by combining key volatile component analysis with odor activity value (OAV) analysis. Linalool and geraniol, which contributed significantly to the aroma of baked green tea, accounted for 33%~44% and 14%~20% of the total aroma, respectively, across different full drying temperatures. Their content increased most significantly at 80 °C, but began to decrease as the full drying temperature increased further. The content of terpene alcohols was notably higher at 80 °C compared to 70 °C, but decreased at temperatures ≥ 90 °C. [Conclusion] The sensory aroma score and aroma

基金项目: 国家重点研发计划(编号: 2022YFD1602002); 中国富硒产业研究院富硒产业全产业链专项研发计划项目(编号: 2023FXZX-01); 白河县茶叶产业专家工作站科技服务(编号: 2023AYHX058)

通信作者: 纪昌中(1960—), 男, 安康学院副教授。E-mail: 1982990005@aku.edu.cn

收稿日期: 2024-08-08 **改回日期:** 2025-12-11

引用格式: 齐玉岗, 马卓涛, 尹旭超, 等. 足火温度对烘青绿茶香气成分的影响[J]. 食品与机械, 2026, 42(5): 59-67.

Citation: QI Yugang, MA Zhuotao, YIN Xuchao, et al. Effect of full drying temperature on the aroma of baked green tea[J]. Food & Machinery, 2026, 42(5): 59-67.

component content of baked green tea dried at 80 °C were higher than those dried at other temperatures. This temperature was the most effective in improving aroma quality and can be applied in the full drying process of baked green tea.

Keywords: full drying temperature; baked green tea; aroma composition; gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS)

绿茶作为中国产销量最大的茶类,深受人们喜爱^[1]。2023 年,中国绿茶产量 1.934×10^6 t, 占中国茶叶总产量的 57.91%, 其中烘青绿茶是其主要部分之一^[2]。

清明节前采摘加工的鲜叶,大部分为越冬后茶树第 1 次萌发的芽叶,茶树经过整个冬季的养分积蓄,其水浸出物、游离氨基酸总量较高^[3]。香气是评价和衡量茶叶品质的重要指标,在绿茶感官审评中所占权重达 25%。优质绿茶香气类型可分为栗香型、花香型与清香型等^[4-6]。绿茶加工过程中,非挥发性成分会发生复杂的化学变化,其成分含量和比例发生较大变化,绿茶香气物质含量低、组成复杂,因而分析较困难^[7]。茶叶的香气是由不同芳香物质以不同比例组合,并对人体嗅觉神经综合作用所形成的茶叶特有香型,是对茶叶品质进行评价的关键性指标。目前,从茶叶中提取得到的香气物质多达 700 多种,主要包括醇、酮、醛、酯等化合物,绿茶中已检出并鉴定的挥发性化合物有 260 多种,其含量仅占绿茶干物质的 0.005%~0.020%, 其中绝大部分是在加工过程中形成的^[8]。

绿茶的香气成分主要来源于两部分:一部分来自茶树鲜叶原料固有物质,在茶叶加工过程中,经过高温,低沸点的芳香物质挥发,而高沸点的芳香物质保留^[9-10];另一部分由茶鲜叶中香气前体物质在加工过程中经过酶促和热化学等作用转化而来,这是茶叶香气形成的主要形式,也是茶叶香气的主要部分^[11-13]。干燥是绿茶香气形成的重要阶段之一^[14-15],控制好干燥温度可以消除水闷味、青草气等不良气味,使得茶叶香气进一步发展,机械烘干一般采用两次进行,俗称毛火和足火,足火温度的掌控对茶叶香型的形成有很大影响。在足火过程中,低沸点的醇类和醛类大量挥发,具花果香的高沸点物质被大量激发,且新生成呋喃、吡喃、吡咯、糠醛等具烘炒香的物质成分,对茶叶具有提香的效果^[16]。在秋季绿茶干燥过程中引入变温干燥技术,有利于改善绿茶的综合品质,尤其是香气品质,在生产上具有一定的可行性^[17]。顶空固相微萃取—气相色谱—质谱(HS-SPME-GC-MS)技术作为食品中的挥发性物质提取、定性定量的重要方法^[18],被广泛应用于茶及相关产品挥发性物质检测领域^[19-23]。

研究拟通过不同足火温度干燥烘青绿茶,分析足火温度与绿茶香气品质之间的关系,以期得出更为准确的绿茶足火工艺规范,以确保绿茶的品质符合消费者的需求。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1 芽 1 叶茶树鲜叶:于 2024 年 4 月 2 日采自陕西省安

康市紫阳县向阳镇芭蕉村紫阳群体种茶园。

1.2 试剂与仪器

癸酸乙酯:色谱纯,麦克林生物科技有限公司;

茶叶杀青机:6CST-40 型,浙江上洋机械股份有限公司;

茶叶揉捻机:6CR-40 型,浙江上洋机械股份有限公司;

茶叶烘焙机:Xs-6CHZ-6 型,福建安溪祥山机械有限公司;

气相色谱—质谱联用仪(GC-MS):2030AM 型,岛津仪器(苏州)有限公司;

恒温磁力搅拌器:85-2 型,上海司乐仪器有限公司;

快速水分测定仪:DSH-50-5 型,上海越平科学仪器制造有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 鲜叶加工方法 鲜叶室温摊放至含水率 70% 左右,进行滚筒杀青,240 °C 杀青至含水量 58% 左右,杀青叶回潮后按照轻重轻的揉捻原则进行揉捻,将揉捻叶及时解块,解块后摊叶厚度 1~2 cm、毛火温度 105 °C 干燥 10 min 后,等分成 5 份,分别采用 70, 80, 90, 100, 110 °C 的足火温度烘干 30 min(分别编号为 T1、T2、T3、T4、T5)。

1.3.2 香气感官审评 参照 GB/T 23776—2018。

1.3.3 SPME 样品前处理 参照 Wei 等^[24]的方法有改动。取 3 g 绿茶茶样,加入 150 mL 沸水,加盖冲泡 4 min,将茶汤滤出置于冰水浴中冷却。取 10 mL 茶汤至顶空瓶中,加入 3 g NaCl 和 5 μ L 癸酸乙酯(10 μ g/L),涡旋振荡,40 °C 水浴 20 min,将 SPME 针头插入顶空瓶中推出吸附纤维头,吸附 40 min 进行 GC-MS 分析。

1.3.4 GC-MS 分析 色谱柱为 SH-I-5 SiI MS(30 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25 μ m)毛细管柱,采用不分流模式,载气为纯氦气。离子源温度 230 °C,进样口温度 250 °C,质谱扫描范围 30~400 (m/z),电离能 70 eV。升温程序:起始温度 40 °C,保持 5 min;以 4 °C/min 升至 180 °C;以 10 °C/min 升至 280 °C,保持 5 min。

1.3.5 定量分析 采用内标法,分别按式(1)、式(2)计算各组分质量浓度和香气活性值(OAV 值)。

$$C_i = \frac{C_{is} \times A_i}{A_{is}}, \quad (1)$$

$$OAV = \frac{C_i}{OT_i}, \quad (2)$$

式中:

C_i ——任一组分的质量浓度, $\mu\text{g/L}$;

C_{is} ——内标的质量浓度, $\mu\text{g/L}$;

A_i ——任一组分的色谱峰面积;

A_{is} ——内标的色谱峰面积;

OT_i ——任一组分在水中的香气阈值, $\mu\text{g/L}$ 。

1.4 数据处理

各试验重复3次,基于NTST质谱库对香气挥发性物质进行定性分析;采用Excel 2019软件进行数据计算,结果以平均值 $\pm$ 标准差表示,运用SIMCA14.1和TBtools软件作图。

2 结果与分析

2.1 香气感官审评

由表1可知,香气审评得分为 $T2>T3>T4>T1>T5$,足火温度 80°C 的香气评分最高,其香气类型为嫩栗香且高长,初步表明足火干燥温度 80°C 能够显著提高烘青绿茶感官香气品质与评分。

表1 不同足火温度绿茶香气感官审评结果[†]

Table 1 Aroma sensory evaluation of green tea at different full drying temperatures

试样	评语	评分
T1	清香稍淡	88.97 ± 0.25^d
T2	嫩栗香高长	93.00 ± 0.36^a
T3	栗香高长	92.03 ± 0.35^b
T4	栗香	90.13 ± 0.15^c
T5	栗香略带高火味	86.17 ± 0.21^e

[†] 同列字母不同代表差异显著($P<0.05$)。

2.2 香气成分分析

由表2可知,5种足火温度加工的烘青绿茶中共检出79种香气成分,依据化学结构香气成分可划分为5类:醇类37种、醛类16种、酮类9种、酯类4种和其他13种,其中共有香气成分23种。

由图1可知,醇类含量最多,占比为77.55%~85.85%,其次是醛类和酮类,占比分别为4.40%~9.47%和1.35%~7.24%。酯类物质具有水果香,占比为0.95%~1.96%,是良好的香型成分。当足火温度为 80°C 时,醇类含量最高,栗香较明显。醇类总体呈现花果香、木香、清新愉悦的风味^[21];醛类大部分为脂肪酸、氨基酸代谢途径的产物,通常具有花香、果香^[22];醇类和醛类对绿茶香气贡献较大,均是优质绿茶栗香的物质基础^[25],使烘青绿茶在 80°C 香气得分较高。

香叶醇、芳樟醇是评价茶叶香气品质优劣的重要指标^[26]。不同足火温度干燥的绿茶芳樟醇和香叶醇含量分别占香气总量的33%~44%和14%~20%,在足火温度 80°C 时的提升幅度最大,但进一步升高足火温度,其含量

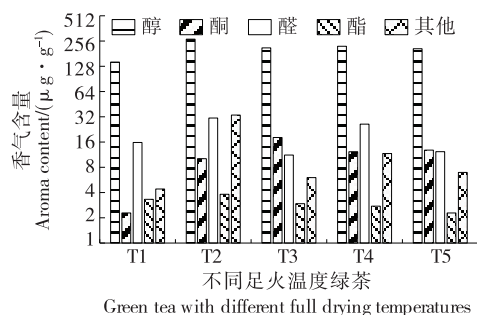


图1 不同足火温度下绿茶的香气成分含量

Figure 1 Aroma components of green tea at different full drying temperatures

呈递减趋势。辛醇、顺式芳樟醇(1)、反式芳樟醇氧化物(吡喃)、反式芳樟醇氧化物(呋喃类)和水杨酸甲酯含量也较高,在不同干燥温度下其含量变化规律与芳樟醇和香叶醇的相同。

萜烯醇类物质中含量较高的有芳樟醇和香叶醇。在足火干燥过程中,萜烯醇类在热的作用下环化、脱水 and 异构化,升高足火温度能使干茶样中萜烯醇类含量明显增加,其中以芳樟醇提高最多,当足火温度 $>90^\circ\text{C}$ 时,萜烯醇类的相对含量均呈降低趋势^[8,27],证明了足火温度为 80°C 时萜烯醇类含量较 70°C 明显增加,但足火温度 $>90^\circ\text{C}$ 时,萜烯醇类含量呈下降趋势。

2.3 特征性香气成分分析

由表3可知,辛醇(青草味,柑橘味)、芳樟醇(花香,木香)、香叶醇(青草味,柠檬味)、庚醛(青草味)、(E)- β -紫罗兰酮(紫罗兰,花香)、壬醛(花香,青草味)、异戊醛(桃子味)、苯乙醛(玫瑰味)、脱氢紫罗兰酮(紫罗兰,木质香)9种香气成分的OAV值 >1 ,辛醇、芳樟醇、香叶醇和庚醛4种香气成分在5种足火温度下对绿茶香气均有贡献,且辛醇、芳樟醇和庚醛3种香气成分的OAV值 >100 ,对绿茶香气贡献度高。

研究^[26]表明,芳樟醇对栗香的形成有重要贡献, β -紫罗兰酮对绿茶香气有较大影响,是栗香茶中花香馥郁的特征物质;茉莉酮、香叶醇对嫩栗香型贡献较大,是嫩栗香型特征性组分^[28]。试验测得芳樟醇、香叶醇占香气总量比值分别为33%~44%和14%~20%; β -紫罗兰酮和茉莉酮含量较少,但贡献值 >1 ,且在 80°C 时相对含量最高,栗香较显著。

2.4 多元统计分析

由图2和图3可知,不同足火温度下绿茶香气成分差异明显, 80°C 下香气成分变化较显著, $90, 100, 110^\circ\text{C}$ 下香气成分差异较小,即足火温度 80°C 对绿茶香气有显著影响,印证了香气含量的变化情况。

由图4可知,当足火温度为 80°C 时,香气成分变化较显著,当足火温度为 $90, 100, 110^\circ\text{C}$ 时,香气成分变化较

表 2 不同足火温度绿茶香气成分[†]

Table 2 Aroma composition of green tea at different full drying temperatures

类别	香气成分	含量/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)				
		T1	T2	T3	T4	T5
醇类 (37种)	1-戊醇	ND	1.81±0.02	ND	2.53±0.07	ND
	1,4-戊二烯-3-醇	ND	ND	3.32±0.16	ND	2.93±0.05
	叶醇	1.93±0.08	4.96±0.35	4.15±0.64	2.29±0.03	2.28±0.09
	己醇	0.66±0.14	1.49±0.97	1.61±0.32	1.82±0.11	0.98±0.19
	3-甲基-1,5-戊二醇	ND	ND	0.70±0.06	ND	ND
	庚醇	ND	1.65±0.08	0.88±0.09	ND	ND
	1-辛烯-3-醇	0.66±0.07	1.26±0.09	1.24±0.03	1.29±0.16	1.07±0.09
	羟芳樟醇	ND	ND	2.48±0.03	3.25±0.01	ND
	苯甲醇	ND	0.61±0.03	ND	0.57±0.09	0.64±0.08
	2,6-二甲基-1,7-辛二烯-3,6-二醇	ND	ND	ND	2.38±0.08	ND
	2-乙基-1-己醇	2.92±0.04	ND	ND	ND	ND
	4-乙基-1-辛炔-3-醇	3.13±0.04	6.87±0.39	4.37±0.42	3.73±0.40	2.79±0.29
	顺式芳樟醇(I)	5.66±0.67	13.40±3.77	8.54±0.60	8.38±1.01	11.10±0.54
	辛醇	2.36±0.05	4.34±0.32	4.53±0.21	5.19±0.12	3.09±0.35
	反式芳樟醇氧化物(呋喃类)	6.78±0.35	14.60±1.58	11.58±1.11	11.34±2.03	10.22±0.54
	芳樟醇	74.35±3.08	128.12±3.87	96.60±4.64	93.86±11.15	81.23±1.65
	异烯醇	ND	3.28±0.21	12.35±0.41	22.07±3.13	35.39±1.58
	苯乙醇	1.81±0.13	2.08±0.18	ND	4.78±0.16	ND
	2-甲基-1-庚烯-3-醇	0.11±0.03	ND	ND	ND	ND
	(Z)-3-壬烯-1-醇	0.29±0.02	0.56±0.12	0.40±0.03	ND	ND
	(E,Z)-3,6-壬二烯醇	ND	ND	ND	0.18±0.03	0.49±0.02
	氧化芳樟醇	ND	ND	ND	1.48±0.13	ND
	芳樟醇氧化物 III	0.89±0.04	2.57±0.10	ND	ND	ND
	反式芳樟醇氧化物(吡喃)	2.99±0.24	6.62±0.65	4.98±0.30	4.11±0.39	4.03±0.33
	薄荷醇	0.45±0.06	1.05±0.12	0.90±0.07	0.68±0.10	1.14±0.09
	L-4-松油醇	ND	0.42±0.06	ND	0.37±0.09	0.45±0.02
	(E)-松香醇	ND	0.60±0.03	ND	ND	ND
	顺式-3,6-壬二烯-1-醇	ND	0.32±0.03	ND	ND	ND
	异冰片醇	ND	0.63±0.11	0.38±0.09	ND	ND
	3-乙基-4-甲基-3-庚醇	ND	0.32±0.03	0.20±0.02	ND	ND
	松油醇	0.75±0.07	2.47±0.27	1.95±0.13	2.25±0.40	2.34±0.20
	橙花醇	2.60±0.17	4.29±0.22	3.43±0.25	3.77±0.93	2.97±0.13
	3,7-二甲基辛-2-烯-1-醇	ND	0.21±0.01	ND	ND	ND
	异香叶醇	0.27±0.01	0.74±0.10	0.50±0.14	0.44±0.15	0.31±0.05
	香叶醇	34.89±2.40	55.74±4.81	42.35±0.12	39.57±3.72	35.74±3.06
	阿米芬醇	ND	8.30±1.37	2.16±0.24	4.95±0.95	4.75±0.58
	紫罗兰醇	0.28±0.12	0.31±0.05	0.46±0.12	0.45±0.09	0.50±0.10
酮类 (9种)	3-己烯-2-酮	ND	ND	6.54±0.10	ND	ND
	苏卡酮	1.39±0.33	3.34±0.60	3.64±0.14	4.78±0.83	3.83±0.38
	异丙基戊基酮	ND	1.07±0.06	ND	ND	ND
	苯乙酮	0.23±0.03	ND	0.32±0.02	ND	ND
	(Z)-茉莉酮	ND	2.15±0.30	1.44±0.20	1.62±0.45	1.18±0.09

续表 2

类别	香气成分	含量/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)				
		T1	T2	T3	T4	T5
酮类 (9种)	香叶基丙酮	ND	1.59±0.36	2.16±0.24	3.29±0.96	2.41±0.30
	脱氢紫罗兰酮	ND	ND	ND	0.18±0.01	0.37±0.03
	β -紫罗兰酮	ND	ND	ND	0.56±0.04	0.53±0.02
	(<i>E</i>)- β -紫罗兰酮	ND	0.48±0.02	ND	ND	0.63±0.02
醛(16种)	2-甲基丁醛	ND	ND	ND	3.95±0.10	ND
	戊醛	ND	ND	ND	7.82±0.30	ND
	己醛	1.80±0.81	0.32±0.04	ND	ND	ND
	异戊醛	ND	ND	1.28±0.03	ND	ND
	羟基特戊醛	ND	9.95±0.13	ND	ND	ND
	庚醛	3.01±0.34	6.20±0.39	4.06±0.66	4.72±1.62	1.91±0.17
	3-丁丙烯醛	ND	ND	ND	0.59±0.03	ND
	安息香醛	0.41±0.02	0.36±0.09	0.41±0.03	0.48±0.14	0.33±0.02
	辛醛	1.38±0.59	ND	ND	ND	ND
	苯乙醛	1.14±0.05	2.37±0.22	3.52±0.28	5.92±0.89	8.02±0.43
	壬醛	4.97±0.20	9.20±1.76	ND	ND	ND
	(<i>E</i>)-2-壬烯-1-醛	ND	ND	ND	0.44±0.01	ND
	反式-3,3-二甲基环己基乙醛	0.44±0.01	ND	ND	ND	ND
	橙花醛	0.12±0.02	0.33±0.05	0.19±0.03	0.16±0.06	0.21±0.12
	柠檬醛	0.92±0.01	ND	ND	ND	ND
	癸醛	1.64±0.25	2.21±0.20	1.74±0.22	2.08±0.46	1.81±0.23
酯类 (4种)	丁内酯	ND	ND	ND	0.04±0.01	ND
	水杨酸甲酯	2.08±0.11	3.20±0.12	2.50±0.06	2.71±0.57	2.28±0.13
	2-甲基乙酰乙酸甲酯	1.24±0.09	ND	ND	ND	ND
	己酸乙烯酯	ND	0.61±0.07	0.44±0.02	ND	ND
其他 (13种)	4-反式-6-反式-别辛烯	0.35±0.01	ND	0.47±0.01	0.50±0.03	0.47±0.04
	新亚戊基环己烷	0.46±0.01	ND	ND	ND	ND
	丁酸	0.97±0.02	ND	ND	ND	ND
	2,4-二叔丁基苯酚	2.63±0.96	6.04±0.32	3.68±0.53	3.15±0.40	3.98±0.90
	3,4-二甲基反式-2-戊烯	ND	9.50±0.03	ND	ND	ND
	曲普烯	ND	8.34±0.03	ND	ND	ND
	(<i>Z</i>)-2-庚烯	ND	5.73±0.10	ND	ND	ND
	顺式- β -奥西梅烯	ND	1.67±0.15	ND	1.75±0.11	ND
	4-反式,6-顺式丙二烯	ND	1.12±0.19	0.55±0.28	0.50±0.23	ND
	萨夫拉纳尔	ND	0.95±0.06	1.33±0.08	1.90±0.31	ND
	十二烷	ND	0.21±0.03	ND	ND	ND
	乙酸	ND	ND	ND	0.72±0.03	ND
	戊基环丙烷	ND	ND	ND	3.15±0.17	2.50±0.07

† ND表示未检出。

小,进一步说明足火温度 80 ℃对绿茶香气品质有显著影响。

由图 5 可知,试验建立的 PLS-DA 模型有良好的拟合参数, $R^2X=0.996$,接近 1,模型稳定; $R^2Y=0.799$,表示模

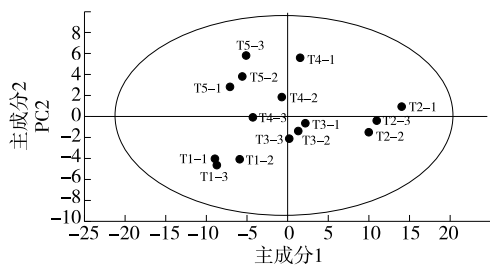
型稳定,可以解释原始数据。

由图 6 可知,异烯醇、芳樟醇、苯乙醛、香叶醇、苯乙醇、芳樟醇顺式(1)、苏卡酮、反式芳樟醇氧化物(呋喃型)、松油醇、4-乙基-1-辛炔-3-醇、辛醇、庚醛和反式芳樟醇氧

表 3 关键香气成分香气类型和 OAV 值
Table 3 Aroma types and OAV of key aroma components

类别	香气物质	香气类型	OAV 值				
			T1	T2	T3	T4	T5
醇类	1-戊醇	陈香	ND	0.000 45	ND	0.000 63	ND
	己醇	青草味	0.117 83	0.266 40	0.287 50	0.325 66	0.174 97
	庚醇	香草味,甜香	ND	0.003 88	0.002 08	ND	ND
	1-辛烯-3-醇	蘑菇味	0.026 27	0.050 40	0.049 58	0.051 76	0.042 70
	苯甲醇	甜香,花香,玫瑰,焦糖味	ND	0.000 03	ND	0.000 03	0.000 03
	2-乙基-1-己醇	柑橘,花香	0.000 11	ND	ND	ND	ND
	辛醇	青草味,柑橘	107.412 73	197.323 05	151.818 18	235.880 50	140.386 76
	反式芳樟醇氧化物(呋喃类)	甜香,花香	0.035 70	0.076 82	0.060 95	0.059 70	0.053 80
	芳樟醇	花香,木质	337.937 95	582.365 55	439.100 38	426.635 48	369.232 88
	异烯醇	清香,花香,果味	ND	0.029 80	0.112 27	0.200 60	0.321 76
	(Z)-3-壬烯-1-醇	花香	ND	ND	ND	ND	ND
	(E,Z)-3,6-壬二烯醇	—	ND	ND	ND	ND	ND
	氧化芳樟醇	花香	ND	ND	ND	ND	ND
	芳樟醇氧化物 III	柑橘,花香,甜味	ND	ND	ND	ND	ND
	反式芳樟醇氧化物(吡喃)	木香	0.000 83	0.001 84	0.001 38	0.001 14	0.001 12
	薄荷醇	薄荷	0.000 14	0.000 32	0.000 27	0.000 20	0.000 35
	松油醇	花香	0.002 27	0.007 47	0.005 90	0.006 81	0.007 08
	橙花醇	柑橘,花香	0.053 08	0.087 55	0.070 07	0.076 95	0.060 67
	香叶醇	青草味,柠檬	4.651 94	7.431 74	5.646 51	5.276 00	4.765 05
酮类	苏卡酮	果味,柑橘	0.027 86	0.066 87	0.072 85	0.095 69	0.076 62
	香叶基丙酮	花香	ND	0.026 52	0.036 02	0.054 85	0.040 23
	脱氢紫罗兰酮	紫罗兰,花香	ND	ND	ND	2.006 92	4.077 61
	(E)- β -紫罗兰酮	花香	ND	47.648 83	ND	ND	63.132 59
醛类	己醛	青草味	0.030 00	0.005 33	ND	ND	ND
	异戊醛	巧克力味	ND	ND	14.218 08	ND	ND
	庚醛	青草味	300.687 79	620.131 94	406.228 47	472.000 00	190.620 91
	3-丁丙烯醛	青草味,清香	ND	ND	ND	0.011 60	0.000 00
	安息香醛	杏仁味,果味	0.013 22	0.011 55	0.013 23	0.015 35	0.010 79
	辛醛	柑橘,橙子,青草味	0.005 57	ND	ND	ND	ND
	苯乙醛	花香,玫瑰味	0.284 44	0.592 73	0.879 52	1.480 92	2.005 56
	壬醛	花香,甜橙味,柠檬味	4.517 25	8.363 64	ND	ND	ND
	(E)-2-壬烯-1-醛	青草味,黄瓜味	ND	ND	ND	0.639 63	ND
	橙花醛	—	0.000 77	0.002 14	0.001 24	0.001 08	0.001 40
	癸醛	—	0.182 22	0.245 56	0.193 33	0.231 11	0.201 11
	柠檬醛	柠檬味	0.032 81	ND	ND	ND	ND
酯类	水杨酸甲酯	薄荷味,冬青味	0.051 89	0.080 02	0.062 56	0.067 78	0.057 11
其他	3,4-二甲基反式-2-戊烯	—	ND	0.019 00	ND	ND	ND
	十二烷	—	ND	0.070 00	ND	ND	ND

† ND表示未检出。



$R^2X[1]=0.722$ $R^2X[2]=0.129$ Ellipse: Hotelling's T2 (95%)

图2 不同足火温度下绿茶香气成分主成分分析载荷图

Figure 2 Loading diagram of principal component analysis (PCA) of aroma components of green tea at different full drying temperatures

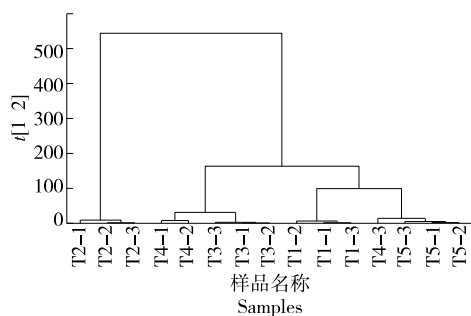
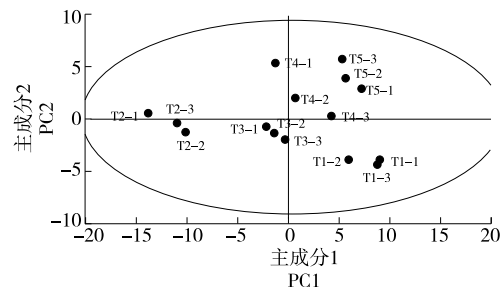


图3 不同足火温度下绿茶香气成分的层次聚类分析

Figure 3 Hierarchical cluster analysis (HCA) of aroma components of green tea at different full drying temperatures

化物(吡喃型)13种关键挥发性成分的VIP值>1。

根据OAV以及关键挥发性成分分析,筛选出苯乙醛、庚醛、香叶醇、顺式香叶醇、芳樟醇、己醇和辛醇7种香气



$R^2X[1]=0.722$ $R^2X[2]=0.128$ Ellipse: Hotelling's T2 (95%)

图4 最小二乘法判别模型载荷图

Figure 4 Loading diagram of partial least squares discriminant analysis (PLS-DA)

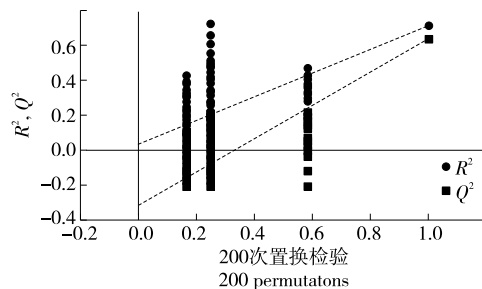


图5 置换检验图

Figure 5 Permutation test

成分,利用聚类热图进行可视化,结果如图7所示。由图7可知,5种足火温度下,香气成分可聚成两类:一类在70, 110℃下足火,二者只有苯乙醛含量差异较大,其他香气成分差异较小;另一类在80,90,100℃下足火,80℃的香叶醇、顺式香叶醇、芳樟醇含量较高,100℃的己醇、辛醇含量较高。

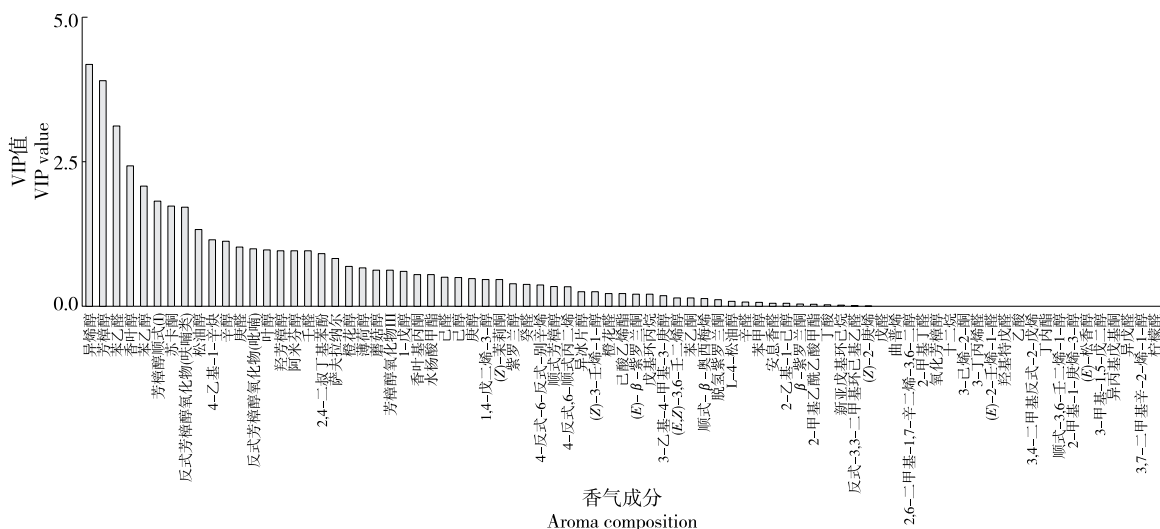


图6 不同足火温度下关键挥发性香气成分分析图

Figure 6 Key volatile aroma component analysis of different full drying temperatures

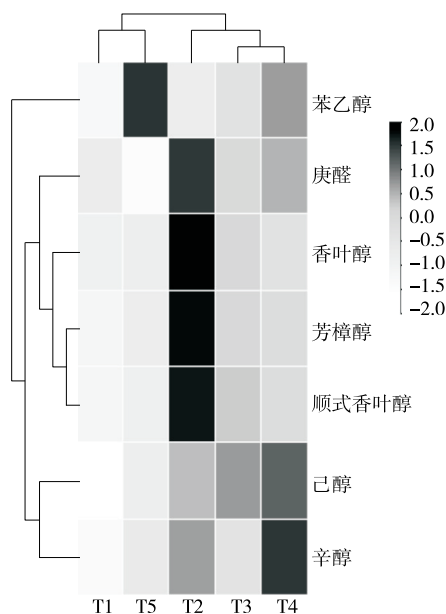


图 7 7 种关键香气成分热图

Figure 7 Heat map of 7 key aroma components

3 结论

对春季绿茶采用 70, 80, 90, 100, 110 °C 足火制成的烘青绿茶样品挥发性成分进行了分析。结果表明, 烘青绿茶干燥时足火温度 80 °C 能够提高烘青绿茶香气品质; 5 种不同足火温度所制烘青绿茶中共鉴定出 79 种香气成分, 依据化学结构可划分为 5 类: 醇类 37 种、醛类 16 种、酮类 9 种、酯类 4 种和其他 13 种, 共有香气成分 23 种。结合关键挥发性成分分析和香气活性值分析, 5 种不同足火温度下烘青绿茶中筛选出苯乙醇、庚醛、香叶醇、顺式香叶醇、芳樟醇、己醇和辛醇 7 种关键香气成分, 且以 80 °C 足火时各关键香气成分含量高, 其香气类型与感官审评相符。

该研究尚未考虑茶树品种、初烘温度、足火时间等多种因素同时对烘青绿茶香气品质的影响, 后期将进一步研究。

参考文献

- [1] 夏涛. 制茶学[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2016: 34-46.
XIA T. Manufacture of tea[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2016: 34-46.
- [2] 梅宇, 梁晓. 2023 年我国茶叶产销及进出口形势分析[J]. 中国茶叶, 2024, 46(4): 18-26.
MEI Y, LIANG X. Analysis of China's tea production, sales, import and export situation in 2023[J]. China Tea, 2024, 46(4): 18-26.
- [3] 刘建军, 陈猛, 罗影, 等. 春季不同时期绿茶品质化学成分研究[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(16): 146-154.
LIU J J, CHEN M, LUO Y, et al. Study on quality chemical

composition of green teas at different times during spring[J]. Food Research and Development, 2022, 43(16): 146-154.

- [4] 石亚丽, 朱荫, 马婉君, 等. 名优炒青绿茶挥发性成分研究进展[J]. 茶叶科学, 2021, 41(3): 285-301.
SHI Y L, ZHU Y, MA W J, et al. Research progress on the volatile compounds of premium roasted green tea[J]. Journal of Tea Science, 2021, 41(3): 285-301.
- [5] 张铭铭, 江用文, 袁海波, 等. 绿茶栗香的形成及工艺研究进展[J]. 中国农学通报, 2020, 36(2): 129-137.
ZHANG M M, JIANG Y W, YUAN H B, et al. Chestnut-like aroma of green tea: research progress of formation and technology[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2020, 36(2): 129-137.
- [6] 尹鹏, 肖智中, 于飞, 等. 栗香型绿茶研究进展[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(3): 219-224.
YIN P, XIAO Z Z, YU F, et al. Research progress of chestnut-like aroma quality of green tea[J]. Food Research and Development, 2020, 41(3): 219-224.
- [7] 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.
- [8] 宛晓春, 夏涛. 茶树次生代谢[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 125-138.
WAN X C, XIA T. Secondary metabolism of tea plant[M]. Beijing: Science Press, 2015: 125-138.
- [9] 张悦, 朱荫, 吕海鹏, 等. 不同海拔烘青绿茶的品质成分分析[J]. 食品科学, 2022, 43(2): 2 257-2 268.
ZHANG Y, ZHU Y, LÜ H P, et al. Comparative analysis of quality components in baked green tea made from tea plants grown at different altitudes[J]. Food Science, 2022, 43(2): 2 257-2 268.
- [10] 李玮轩, 解东超, 邵晨阳, 等. 动态顶空萃取结合气相色谱—嗅觉测量—质谱联用技术解析不同品种烘青绿茶的挥发性成分[J]. 食品科学, 2024, 45(5): 137-148.
LI W X, XIE D C, SHAO C Y, et al. Dynamic headspace combined with gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry for analysis of volatile components in baked green tea from different cultivars[J]. Food Science, 2024, 45(5): 137-148.
- [11] 王华杰, 滑金杰, 余勤艳, 等. 基于 IRAE-HS-SPME/GC-MS 分析杀青方式对绿茶栗香形成的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(14): 209-217.
WANG H J, HUA J J, YU Q Y, et al. Effects of fixation methods on the formation of the chestnut-like aroma of green tea analyzed by infrared-assisted extraction coupled to headspace solid-phase microextraction combined with gas chromatography-mass spectrometry[J]. Food Science, 2021, 42

- (14): 209-217.
- [12] 尤秋爽, 石亚丽, 朱茵, 等. 加工工艺对绿茶关键呈香成分的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(8): 194-200.
- YOU Q S, SHI Y L, ZHU Y, et al. Effect of different processing technologies on the key aroma-active compounds of green tea[J]. Food Science, 2023, 44(8): 194-200.
- [13] 周天山, 米晓玲, 余有本, 等. 兰香型茶叶香气组分主成分分析[J]. 西北林学院学报, 2016, 31(1): 254-259.
- ZHOU T S, MI X L, YU Y B, et al. Principal component analysis of aroma components in tea with orchid-like aroma[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(1): 254-259.
- [14] 韦勇, 牟春林. 绿宝石绿茶不同提香方式的对比试验研究[J]. 贵州师范学院学报, 2019, 35(12): 13-15.
- WEI Y, MOU C L. A comparative study on different aroma enhancement technology of *Lvbaoshi* green tea[J]. Journal of Guizhou Education University, 2019, 35(12): 13-15.
- [15] 邓余良, 尹军峰, 许勇泉, 等. 恒温远红外提香技术在绿茶加工中的应用研究[J]. 茶叶科学, 2013, 33(4): 336-344.
- DENG Y L, YIN J F, XU Y Q, et al. Application research of calm-holding temperature-far infrared technology for green tea processing[J]. Journal of Tea Science, 2013, 33(4): 336-344.
- [16] 张娅楠, 欧伊伶, 覃丽, 等. 红茶中香气物质的形成及工艺对其影响的研究进展[J]. 食品工业科技, 2019, 40(11): 351-357.
- ZHANG Y N, OU Y L, QIN L, et al. Research progress on the formation of aroma substances and its influence of processes in black tea[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(11): 351-357.
- [17] 刘梦圆, 项希, 李敏, 等. 变温干燥处理对秋季绿茶品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(24): 7 909-7 918.
- LIU M Y, XIANG X, LI M, et al. Effect of variable temperature drying on the quality of autumn green tea[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(24): 7 909-7 918.
- [18] 庞纪伟, 殷菲彤, 刘云芬, 等. HS-SPME-GC-MS在水果产品挥发性物质检测中的研究进展[J]. 食品与机械, 2023, 39(4): 217-224.
- PANG J W, YIN F L, LIU Y F, et al. Research progress of HS-SPME-GC-MS in the detection of volatile substances in fruit products[J]. Food & Machinery, 2023, 39(4): 217-224.
- [19] 李光彩, 陆小双, 张孟聪, 等. 超临界 CO₂ 萃取绿茶香气成分工艺优化及物质分析[J]. 食品与机械, 2025, 41(3): 177-186.
- LI G C, LU X S, ZHANG M C, et al. Optimization of supercritical CO₂ extraction process for aroma compounds in green tea and composition analysis[J]. Food & Machinery, 2025, 41(3): 177-186.
- [20] 李张伟. 凤凰单丛茶加工过程中挥发性香气成分和生化成分的变化[J]. 食品与机械, 2024, 40(2): 152-160, 167.
- LI Z W. Changes of volatile aroma components and biochemical components in Fenghuang Dancong tea during processing[J]. Food & Machinery, 2024, 40(2): 152-160, 167.
- [21] 龙立梅, 宋沙沙, 李柰, 等. 3种名优绿茶特征香气成分的比较及种类判别分析[J]. 食品科学, 2015, 36(2): 114-119.
- LONG L M, SONG S S, LI N, et al. Comparisons of characteristic aroma components and cultivar discriminant analysis of three varieties of famous green tea[J]. Food Science, 2015, 36(2): 114-119.
- [22] 郭丽, 彭群华, 赵锋, 等. 不同等级新九曲红梅茶的风味化学特征[J]. 食品科学, 2021, 42(4): 215-220.
- GUO L, PENG Q H, ZHAO F, et al. Flavor chemistry characteristics of new Jiuqu Hongmei tea of different grade levels[J]. Food Science, 2021, 42(4): 215-220.
- [23] 张芬, 陈家献, 袁冬寅, 等. 3种新式茉莉花茶茶饮基底茶品质分析[J]. 食品与机械, 2023, 39(11): 186-191, 210.
- ZHANG F, CHEN J X, YUAN D Y, et al. Analysis on quality in three kinds of basal tea of noval-jasmine tea beverage[J]. Food & Machinery, 2023, 39(11): 186-191, 210.
- [24] WEI Y M, YIN X C, WU H T, et al. Improving the flavor of summer green tea (*Camellia sinensis* L.) using the yellowing process[J]. Food Chemistry, 2022, 388: 132982.
- [25] 朱茵, 杨停, 施江, 等. 西湖龙井茶香气成分的全二维气相色谱—飞行时间质谱分析[J]. 中国农业科学, 2015, 48(20): 4 120-4 146.
- ZHU Y, YANG T, SHI J, et al. Analysis of aroma components in Xihu Longjing tea by comprehensive two-dimensional gas chromatography time-of-flight mass spectrometry[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(20): 4 120-4 146.
- [26] 张铭铭, 尹洪旭, 邓余良, 等. 基于 HS-SPME/GC×GC-TOFMS/OAV 不同栗香特征绿茶关键香气组分分析[J]. 食品科学, 2020, 41(2): 244-252.
- ZHANG M M, YIN H X, DENG Y L, et al. Analysis of key odorants responsible for different chestnut-like aromas of green teas based on headspace solid-phase microextraction coupled with comprehensive two-dimensional gas chromatography time-of-flight mass spectrometry and odor activity value[J]. Food Science, 2020, 41(2): 244-252.
- [27] YANG Y Q, QIAN M C, DENG Y L, et al. Insight into aroma dynamic changes during the whole manufacturing process of chestnut-like aroma green tea by combining GC-E-Nose, GC-IMS, and GC × GC-TOFMS[J]. Food Chemistry, 2022, 387: 132813.
- [28] 尹洪旭, 杨艳芹, 姚月凤, 等. 基于气相色谱—质谱技术与多元统计分析对不同栗香特征绿茶判别分析[J]. 食品科学, 2019, 40(4): 192-198.
- YIN H X, YANG Y Q, YAO Y F, et al. Discrimination of different characteristics of chestnut-like green tea based on gas chromatography-mass spectrometry and multivariate statistical data analysis[J]. Food Science, 2019, 40(4): 192-198.