

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

Changes of volatile aroma components and biochemical components in Fenghuang dancong tea during processing

李张伟

LI Zhangwei

(韩山师范学院化学与环境工程学院, 广东 潮州 521041)

(*Institute of Chemistry and Environment Engineering, Hanshan Normal University, Chaozhou, Guangdong 521041, China*)

摘要:目的:优化凤凰单丛茶加工工艺。方法:采用顶空固相微萃取法(HS-SPME)、气相色谱—质谱法(GC-MS)和分光光度计法等对凤凰单丛茶加工过程中不同阶段的茶叶挥发性香气和非挥发性生化成分进行提取、测定及分析。结果:加工过程中,凤凰单丛茶的醇类、醛类、酮类和酯类物质含量呈下降趋势,烷烃类和芳香环类物质含量呈上升趋势;非挥发性生化成分中茶多酚、氨基酸、咖啡碱和儿茶素含量逐渐减少;可溶性糖含量和水浸出物含量则逐渐增加。茶叶香气中,吲哚、 α -法尼烯、橙花叔醇等含量大幅增加,是凤凰单丛茶茶叶重要的挥发性香气成分。结论:加工过程中,凤凰单丛茶的苦涩味和青草气逐渐减少,花果香味气体逐渐增加,形成了凤凰单丛茶特有的花果香味和香醇口感。

关键词:凤凰单丛茶;挥发性香气;非挥发性成分;加工过程

Abstract: **Objective:** This study aimed to optimize the processing technology of Fenghuang dancong tea. **Methods:** Headspace solid phase microextraction (HS-SPME), Gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), and spectrophotometer were used to extract, determine and analyze the volatile aroma and non-volatile biochemical components of Fenghuang dancong tea in different stages of processing. **Results:** The alcohols, aldehydes, ketones and esters showed a decreasing trend while the alkanes and aromatic ring substances exhibited an increasing trend during the processing. The contents of tea polyphenols, amino acids,

caffeine, and catechin in non-volatile biochemical components decreased gradually during processing. The contents of soluble sugar and water extract increased gradually. In tea aroma, the contents of indole, α -farnesene, and nerolidol increased significantly during the processing of Fenghuang dancong tea, which are important volatile aroma components of Fenghuang dancong tea. **Conclusion:** During the processing of Fenghuang dancong tea, the bitter and grassy taste gradually decreased, and the fragrance and fruit aroma gradually increased, which formed the special fruit and mellow taste of Fenghuang dancong tea.

Keywords: Fenghuang dancong tea; volatile aroma; non volatile components; processing process

茶叶的生产加工是茶叶香气和主要生化成分形成的关键过程,是茶叶品质的重要保证。Chen等^[1]研究发现,晒青后的萎凋和烘焙阶段对白茶香气的形成起重要作用;Guo等^[2]研究证实,加工可以使武夷岩茶的青涩气味转化为花香、木香和烘焙香气。凤凰单丛茶属于乌龙茶,其一般加工过程包括鲜叶、晒青、1次做青、2次做青、3次做青、4次做青、杀青、烘焙成茶等环节,但这些环节对凤凰单丛茶香气和主要生化成分的具体作用尚未明晰。

目前,茶叶香气的提取方法主要有蒸馏萃取法(SDE)、顶空固相微萃取法等,蒸馏萃取法是茶叶香气提取最常用的方法,但其提取时间长,提取温度高,容易造成香气物质分解^[3]。顶空固相微萃取法是一种集采样、萃取、浓缩和进样为一体的无溶剂香气成分提取方法,以石英玻璃纤维上涂有的高分子涂层为吸附剂,对样品进行萃取浓缩,且能直接在气相色谱进样口解析^[4],该法具有操作简单、条件温和,能最大程度体现茶叶原有香气的优点,目前已被用于红茶^[5]、绿茶^[6]和普洱茶^[7]等茶叶的

基金项目:广东省科技计划项目(编号:2017A030303086);广东省普通高校特色创新类项目(编号:2021KTSCX073)

作者简介:李张伟(1980—),男,韩山师范学院副教授,硕士。

E-mail:99094001@163.com

收稿日期:2023-07-08 **改回日期:**2023-12-08

香气提取中。

凤凰单丛茶属于乌龙茶品种之一,以其独特的花果香味而闻名,茶叶产品远销海内外,深受消费者欢迎^[8]。研究拟以凤凰单丛茶中常见蜜兰香型茶叶为例,采用顶空固相微萃取法、气相色谱质谱法等茶叶加工过程中抽取样品进行茶叶香气提取检测和水溶性生化成分(茶多酚、氨基酸、咖啡碱等)测定,考察茶叶在加工过程中香气和水溶性生化成分种类和含量的变化,分析茶叶香气和品质的来源,为凤凰单丛茶加工工艺的优化及凤凰单丛茶资源的开发提供依据。

1 材料及方法

1.1 试验材料

茶叶于2022年4月采自广东省潮州市凤凰山海拔800 m左右的高山春茶,经专家鉴定为蜜兰香型凤凰单丛茶。

1.2 试剂、仪器及设备

34种正构烷烃混标、咖啡碱、儿茶素和没食子酸:标准品,上海安谱实验科技股份有限公司;

茚三酮、谷氨酸、萘酮:分析纯,生工生物工程(上海)股份有限公司;

气相色谱质谱联用仪:Trace ISQ型,美国Thermo公司;

高效液相色谱仪:Ultimate 3000型,美国赛默飞世尔公司;

紫外可见分光光度计:UV-2600型,日本岛津公司。

1.3 试验方法

1.3.1 样品预处理 茶叶加工过程参照凤凰单丛茶传统加工工艺^[9],共8个阶段:鲜叶—晒青(阳光晒20 min,室内摊置2 h)—1次做青(做青1.5 min,摊置1 h)—2次做青(做青2 min,摊置1.5 h)—3次做青(做青2 min,摊置2 h)—4次做青(做青2 min,摊置2 h)—杀青(200℃,15 min)—烘焙成茶(初烘130℃5 min;复烘80℃4 h),各阶段完成后抽取一定质量样品,共8个样品。成茶装入茶叶包装袋后密封保存,其他7个阶段样品经冷冻干燥后于4℃密封保存。使用前,8个茶叶样品用研钵研磨粉碎,过60目筛。

1.3.2 茶叶HS-SPME提取 称取8个茶样各3.5 g至150 mL样品瓶中,加入10 mL沸腾超纯水,用带有聚四氟乙烯/硅胶隔垫的样品瓶盖密封,65℃水浴,平衡5 min后插入装有已完成老化的PDMS/DVB萃取头的手动进样器,65℃顶空萃取60 min,立即插入GC仪的进样口中解吸附5 min,同时启动仪器收集数据。

1.3.3 香气组分的GC-MS分析

(1) GC条件:色谱柱为TG-5MS(30 m×0.25 mm×0.25 μm),进样口温度为250℃,载气为高纯氮气(纯

度>99.999 9%),流速为1 mL/min;不分流进样。升温程序:60℃保持1 min,以10℃/min升温至230℃,保持10 min,以40℃/min升温至300℃。

(2) MS条件:电子电离源,离子源温度250℃,MS传输线温度250℃,扫描时间0.3 s,质量扫描范围40~400。

1.3.4 茶叶水溶性成分测定

(1) 儿茶素总量和茶多酚含量:按GB/T 8313—2018进行。

(2) 咖啡碱含量:按GB/T 8312—2013执行。

(3) 总氨基酸含量:按GB/T 8314—2013执行。

(4) 水浸出物含量:按GB/T 8305—2013执行。

(5) 茶多糖含量:采用硫酸萘酚法^[10]。

1.3.5 数据处理 香气成分GC-MS结果运用NIST谱库检索GC-MS分析得到的数据,保留匹配度>70的成分,并计算各组分的保留指数。采用峰面积归一法^[11]进行定量分析。茶叶水溶性成分结果采用Duncan检验,样品测定均重复3次。

2 结果与讨论

2.1 挥发性香气成分分析

由表1和图1可知,各加工阶段凤凰单丛茶样品中共检出118种挥发性香气成分,其中鲜叶100种、晒青74种、1次做青79种、2次做青80种、3次做青81种、4次做青63种、杀青66种、成茶77种;挥发性香气成分中,醇类29种、酯类25种、烯类20种、醛类6种、酮类5种、烷烃类16种、酸类6种、杂环类11种,8个阶段样品共有成分39种;共有成分中,相对含量较高的分别为芳樟醇、脱氢芳樟醇、吲哚、橙花叔醇、新植二烯、苯甲基-2-羟基苯酯等。

凤凰单丛茶加工过程中,醇类占香气成分的26.33%~39.85%,其中含量较高的有芳樟醇、脱氢芳樟醇、环氧芳樟醇、橙花叔醇、 α -松油醇和植醇等。茶叶中的芳樟醇是由丙酮酸通过异戊烯基焦磷酸(MEP)途径生成焦磷酸香叶酯(GPP),再由GPP在萜烯合成酶(TPS)作用下生成的^[12-13]。芳樟醇呈芬芳的花香味和柑橘味,阈值为0.6 μg/L^[14],较容易被人的嗅觉所捕获。芳樟醇含量在2次做青过程中达到峰值(1.94%),之后呈下降趋势,在成茶阶段含量最低为0.63%(图2),与Chen等^[15-16]的报道相似。做青过程中,茶叶细胞中的氧化酶被激活,使茶叶发生褐色反应,生成了一些新的挥发性香气物质,同时,茶叶青草味渐渐消失,花果香味开始呈现^[9]。脱氢芳樟醇和环氧芳樟醇是芳樟醇衍生生成的,脱氢芳樟醇是以芳樟醇糖苷前体为底物,在相关酶的作用下生成的^[17],呈清新的花草香味^[18]。脱氢芳樟醇含量在鲜叶阶段最高达6.51%,在晒青、做青、杀青和成茶阶

表 1 凤凰单丛茶加工过程中挥发性香气成分的相对含量

Table 1 Relative content of volatile aroma components during processing of Fenghuang danzong tea

种类	化合物名称	保留 指数	相对含量/%							
			鲜叶	晒青	1次做青	2次做青	3次做青	4次做青	杀青	成茶
醇类	苯甲醇	1 041	—	—	—	—	—	—	0.12±0.03	—
	芳樟醇氧化物 I	1 078	—	—	—	—	0.22±0.16	—	—	0.12±0.05
	芳樟醇氧化物 II	1 095	0.45±0.05	—	—	—	0.29±0.14	0.24±0.07	—	0.11±0.02
	芳樟醇	1 104	1.69±0.15	1.90±0.21	1.25±0.32	1.94±0.13	1.46±0.08	1.42±0.28	1.11±0.15	0.63±0.22
	脱氢芳樟醇	1 109	6.51±0.22	1.54±0.18	1.66±0.55	2.06±0.82	1.98±0.26	1.75±0.19	1.52±0.25	2.34±0.57
	顺式-薄荷基-2,8-二烯-1-醇	1 135	0.59±0.23	—	—	—	—	—	—	0.15±0.05
	1-壬醇	1 164	0.69±0.19	—	—	—	—	—	—	—
	环氧芳樟醇	1 176	2.74±0.74	0.88±0.46	1.54±0.15	1.05±0.33	2.45±0.27	1.67±0.21	1.39±0.39	1.32±0.20
	α-松油醇	1 198	1.47±0.19	1.59±0.22	1.35±0.14	1.87±0.09	1.27±0.38	1.32±0.15	1.32±0.32	0.79±0.04
	异丁醇	1 227	—	—	—	—	—	0.31±0.25	—	—
	橙花醇	1 237	—	—	—	—	—	—	—	0.18±0.01
	香叶醇	1 264	—	0.47±0.27	0.39±0.32	—	0.43±0.17	—	—	—
	顺式-薄荷基-1,8-二烯-2-醇	1 271	0.21±0.12	—	—	—	—	—	—	0.10±0.04
	2-萘乙醇	1 369	0.43±0.07	—	0.21±0.09	—	0.32±0.15	—	0.52±0.34	0.26±0.19
	2-甲基-1-十六烷醇	1 450	0.19±0.12	—	0.16±0.02	—	—	—	—	—
	香叶基香叶醇	1 556	0.24±0.08	0.16±0.99	—	0.35±0.31	0.22±0.06	—	—	0.26±0.17
	橙花叔醇	1 568	1.47±0.87	0.79±0.26	0.70±0.10	1.20±0.04	10.65±2.74	3.80±2.69	5.35±3.21	11.54±3.88
	β-菖蒲烯醇	1 669	0.67±0.32	0.56±0.12	0.58±0.45	0.81±0.37	0.93±0.09	0.71±0.62	0.45±0.07	0.82±0.22
	2-己基-1-癸醇	1 714	—	—	0.08±0.03	0.17±0.02	—	—	—	—
	叔十六烷硫醇	1 803	0.39±0.15	0.31±0.07	0.33±0.09	0.61±0.35	0.41±0.34	0.29±0.12	0.38±0.12	—
	1-七烷三醇	1 824	—	—	0.06±0.02	0.10±0.05	0.08±0.06	—	—	—
	叶绿醇	1 864	4.94±1.78	6.84±2.33	5.97±1.98	4.45±2.55	3.46±1.78	5.77±3.68	4.79±1.21	2.14±0.35
	异植物醇	1 948	0.74±0.55	1.24±0.28	1.59±0.72	1.66±0.99	1.27±0.34	2.12±1.67	1.15±0.18	0.50±0.08
2-甲基-1-十六醇	1 985	0.15±0.07	—	0.10±0.05	0.28±0.08	—	0.08±0.09	—	—	
(E)-3,7,11,15-四甲基-1,6,10,14-十六碳四烯-3-醇	2 022	0.18±0.04	0.13±0.08	0.17±0.15	0.37±0.31	0.19±0.03	—	—	0.12±0.05	
香叶基芳樟醇	2 036	0.33±0.12	0.13±0.03	0.53±0.07	0.25±0.05	0.40±0.11	0.37±0.25	0.57±0.39	0.08±0.01	
植物醇	2 115	4.81±1.99	14.86±2.88	16.48±2.37	11.53±1.79	10.77±0.85	18.41±5.20	11.29±1.93	4.34±2.17	
3,7,11,15-四甲基-2-十六烯-1-醇	2 144	0.57±0.07	1.16±0.36	0.72±0.05	0.50±0.24	0.60±0.39	0.88±0.28	0.33±0.14	0.27±0.03	
(E,E)-12-甲基-2,13-十八烷二烯-1-醇	2 987	0.04±0.02	—	1.38±0.77	2.83±1.05	1.53±0.28	0.72±0.31	1.23±1.11	0.53±0.24	
醛类	苯乙醛	1 051	0.49±0.26	—	—	—	0.48±0.09	0.53±0.30	—	0.23±0.05
	十二醛	1 121	0.80±0.55	—	—	—	—	—	0.54±0.17	0.41±0.30
	癸醛	1 207	0.47±0.10	0.22±0.14	0.24±0.06	—	—	—	—	0.14±0.06
	环柠檬醛	1 224	0.52±0.22	—	—	—	—	—	—	0.21±0.02
	(E,E)-2,4-癸二烯醛	1320	—	—	—	—	0.18±0.02	—	—	—
	4-(2,2-二甲基-6-亚甲基环己基)丁醛	1 357	—	—	—	—	—	—	0.29±0.05	—

续表 1

种类	化合物名称	保留 指数	相对含量/%							
			鲜叶	晒青	1次做青	2次做青	3次做青	4次做青	杀青	成茶
酮类	1-(4-甲基苯基)-乙酮	1 179	—	1.12±0.54	—	1.02±0.38	1.29±0.85	1.37±0.14	—	—
	顺式茉莉酮	1 392	0.20±0.05	—	0.08±0.07	—	—	—	—	0.13±0.04
	反式-香叶基丙酮	1 455	0.34±0.09	0.42±0.44	0.63±0.05	0.57±0.36	0.54±0.08	0.36±0.18	—	—
	β -紫罗酮	1 494	0.57±0.03	0.66±0.08	0.68±0.22	0.36±0.05	0.54±0.17	0.73±0.07	0.78±0.05	1.28±0.17
	法尼基丙酮	1 897	0.53±0.33	0.35±0.02	0.49±0.06	0.67±0.08	0.44±0.20	0.33±0.14	0.98±0.75	0.20±0.03
酯类	10,12-十八烷酸甲酯	1 150	0.22±0.06	—	—	—	—	—	—	—
	异戊酸-顺-3-己烯酯	1 232	0.44±0.31	—	—	—	—	0.34±0.23	—	—
	香叶酸甲酯	1 321	0.53±0.40	—	—	—	0.15±0.03	0.37±0.11	—	0.35±0.24
	2,5-十八碳二炔酸甲酯	1 335	0.06±0.02	0.04±0.01	—	—	—	—	—	—
	(Z)-己酸-3-己烯酯	1 376	0.03±0.03	—	—	—	0.34±0.04	—	—	0.41±0.05
	己酸己酯	1 386	0.24±0.16	—	0.15±0.19	—	—	—	—	—
	(E)-十七烯八炔酸甲酯	1 475	0.07±0.03	—	—	—	—	—	—	—
	二氢猕猴桃内酯	1 526	0.40±0.02	0.25±0.15	0.21±0.30	0.21±0.17	0.34±0.26	0.20±0.02	—	—
	十二碳五烯酸甲酯	1 544	0.23±0.15	0.17±0.03	0.18±0.19	0.28±0.25	0.21±0.07	—	—	0.12±0.03
	顺式-3-己烯基苯甲酸酯	1 578	—	—	—	—	0.93±0.56	—	1.27±0.99	0.72±0.25
	顺式-3-己烯基苯乙酸酯	1 632	0.25±0.04	0.20±0.06	0.16±0.10	0.19±0.21	0.16±0.05	0.20±0.14	—	0.13±0.13
	磷酸三丁酯	1656	0.84±0.15	0.71±0.09	0.63±0.33	0.93±0.24	0.81±0.58	0.61±0.20	1.59±0.14	1.13±0.16
	亚硫酸,己基十五烷基酯	1 697	0.74±0.65	0.61±0.43	0.82±0.19	1.07±0.07	0.34±0.11	—	0.45±0.08	0.53±0.12
	2-乙基-十二烯-3-醇甲 酸酯	1 732	—	—	0.21±0.05	0.37±0.10	0.26±0.08	—	—	—
	乙二醇月桂酸酯	1 816	0.25±0.13	0.17±0.16	0.15±0.03	0.28±0.08	0.25±0.12	—	—	—
	邻苯二甲酸十五烷基异 戊酯	1 875	0.24±0.04	—	0.29±0.02	0.31±0.05	—	—	—	—
	顺-9-十四碳烯乙酸酯	1 882	5.84±3.22	10.03±2.64	8.29±4.96	5.90±1.02	4.84±1.36	7.82±3.74	5.55±4.00	2.92±1.25
	十六酸甲酯	1 925	1.19±0.55	0.60±0.28	0.62±0.39	0.86±0.24	0.77±0.06	1.15±0.27	1.50±0.30	1.46±0.93
	7-甲基-Z-十四烯-1-醇乙 酸酯	1 962	0.18±0.23	—	0.14±0.04	0.20±0.05	—	0.28±0.22	1.96±0.36	0.18±0.05
	邻苯二甲酸十八烷基异 丁酯	1 969	0.58±0.24	0.64±0.08	0.87±1.11	0.89±0.09	0.89±0.25	0.73±0.15	1.47±0.96	0.59±0.30
	棕榈酸乙酯	1 996	0.63±0.15	0.53±0.24	0.66±0.22	1.14±0.71	0.66±0.43	0.53±0.08	0.92±0.36	0.43±0.37
	亚油酸甲酯	2 069	1.67±0.53	0.33±0.26	0.34±0.04	0.43±0.16	1.06±0.69	0.14±0.17	0.25±0.02	0.14±0.09
	8,11,14-十七碳三烯酸 甲酯	2 087	—	—	0.06±0.02	0.51±0.06	0.08±0.12	—	—	—
9,12-十八碳二烯酸甲酯	2 096	1.60±0.36	0.57±0.62	1.29±0.40	1.86±1.31	1.37±0.36	1.10±0.08	1.66±0.36	3.43±1.82	
硬脂醇乙酸酯	2 195	0.92±0.72	0.66±0.17	0.83±0.30	0.85±0.54	0.48±0.35	0.67±0.07	0.48±0.08	0.40±0.31	
烷烃类	十四烷	1 398	0.47±0.15	0.33±0.34	0.41±0.05	0.49±0.17	0.42±0.30	0.39±0.36	0.28±0.19	0.25±0.27
	十五烷	1 503	0.51±0.12	0.28±0.07	0.20±0.15	0.23±0.25	1.08±0.63	0.68±0.34	2.65±0.17	4.35±1.66
	十六烷	1 600	0.53±0.14	0.22±0.18	—	0.47±0.07	0.54±0.26	—	0.54±0.47	0.51±0.33
	十七烷	1 703	0.18±0.07	—	—	0.44±0.18	—	—	0.13±0.06	—
	植烷	1 785	0.26±0.10	0.30±0.18	0.29±0.06	0.36±0.14	0.44±0.33	0.40±0.02	—	—
	十八烷	1 797	0.47±0.19	0.41±0.08	0.48±0.22	1.00±0.06	0.56±0.10	—	0.69±0.19	0.60±0.05
	十九烷	1 904	0.44±0.13	0.51±0.28	0.38±0.07	0.46±0.15	—	0.38±0.26	0.44±0.51	0.28±0.07
二十烷	2 004	0.29±0.09	0.26±0.18	0.35±0.05	0.47±0.34	0.32±0.16	0.27±0.11	—	0.16±0.09	

续表 1

种类	化合物名称	保留 指数	相对含量/%								
			鲜叶	晒青	1次做青	2次做青	3次做青	4次做青	杀青	成茶	
烷烃类	二十一烷	2 103	1.21±1.12	0.30±0.04	0.79±0.41	1.29±0.62	0.83±0.33	0.80±0.42	2.26±0.92	4.45±3.93	
	二十二烷	2 206	0.38±0.07	2.13±1.26	1.63±0.69	0.78±0.20	0.75±0.86	0.64±0.21	1.04±0.33	0.55±0.14	
	二十三烷	2 295	0.90±0.38	1.40±1.05	0.91±0.36	2.16±0.47	1.10±0.36	1.27±0.78	0.62±0.22	0.71±0.45	
	二十四烷	2 395	1.10±0.07	0.76±0.15	0.95±0.36	1.22±1.01	0.76±0.18	0.64±0.74	0.74±0.36	0.37±0.02	
	四五烷,1,5,4 二溴-	2 407	0.61±0.38	0.27±0.29	0.34±0.11	0.50±0.05	0.33±0.19	0.14±0.15	0.39±0.28	—	
	二十五烷	2 495	1.95±1.56	0.22±0.13	2.22±0.90	2.31±0.66	1.37±1.02	1.48±0.74	1.66±1.21	0.88±0.35	
	十四烷,2,6,10-三甲基-	2 643	1.94±1.80	1.62±0.89	1.18±0.44	1.27±0.88	1.24±0.36	0.75±0.58	0.75±0.23	0.51±0.03	
	二十九烷	2 900	1.58±0.63	1.47±1.25	1.30±0.93	1.07±0.52	0.69±0.16	0.68±0.36	0.58±0.07	0.52±0.14	
烯类	α -蒎烯	1 039	—	—	—	—	—	—	0.04±0.02	—	
	γ -蒎品烯	1 058	0.46±0.09	—	—	—	—	—	—	0.24±0.06	
	双环[4.1.0]庚-2-烯,3,7, 7-三甲基	1 245	0.12±0.07	—	—	0.12±0.02	—	0.11±0.04	—	—	
	β -蒎烯	1 257	1.28±0.09	0.63±0.24	0.63±0.17	2.12±0.48	0.93±0.35	1.78±0.19	1.54±0.50	0.65±0.33	
	α -紫罗烯	1 352	0.39±0.22	0.14±0.12	0.19±0.03	—	0.39±0.23	—	0.30±0.04	—	
	α -柏木烯	1 406	0.34±0.04	0.63±0.39	0.50±0.41	0.54±0.22	1.55±0.70	0.85±0.32	1.66±0.13	1.27±0.66	
	石竹烯	1 432	—	0.19±0.25	—	—	0.21±0.03	—	—	—	
	反式- β -法尼烯	1 459	1.04±0.77	0.41±0.09	—	0.47±0.15	1.70±0.13	1.00±0.25	2.82±1.17	5.18±2.06	
	γ -杜松烯	1 468	0.13±0.02	—	0.08±0.07	—	—	—	—	0.33±0.04	
	β -红没药烯	1 485	0.26±0.22	—	—	—	—	—	0.21±0.03	0.29±0.11	
	(E, Z)-3,7,11-三甲基- 1,3,6,10-十二碳四烯	1 496	0.43±0.07	—	—	0.39±0.15	0.65±0.04	—	—	—	
	α -法尼烯	1 511	3.25±1.02	2.22±0.29	1.74±0.35	2.02±0.72	3.21±0.48	2.03±0.80	4.64±0.52	6.87±1.17	
	萜澄茄-1,4-二烯	1 534	1.03±0.69	0.86±0.87	0.87±0.09	0.88±0.12	1.47±0.73	0.89±0.26	0.39±0.22	0.96±0.74	
	1-十六烯	1 581	0.22±0.18	0.19±0.04	0.18±0.25	0.28±0.07	—	—	0.65±0.33	—	
	顺-1-氯-9-十八碳烯	1 590	—	0.13±0.06	0.14±0.13	0.18±0.05	0.22±0.05	—	0.25±0.07	0.12±0.02	
	E-法尼烯环氧化物	1 613	0.05±0.02	—	0.07±0.05	0.12±0.08	—	0.06±0.02	—	—	
	β -瓜烯	1 642	0.30±0.11	0.20±0.06	—	0.42±0.28	0.35±0.30	0.30±0.04	—	0.29±0.32	
	卡达烯	1 678	—	—	0.09±0.06	—	0.53±0.07	—	0.63±0.04	0.23±0.38	
十八烯	1 769	0.19±0.07	0.19±0.03	0.19±0.14	0.26±0.09	0.17±0.11	—	0.15±0.06	—		
新植二烯	1 840	13.63±2.87	25.25±7.67	23.17±2.99	15.44±1.45	11.83±2.51	20.10±4.97	14.77±2.86	7.20±1.17		
酸类	壬酸	1 280	0.11±0.04	—	—	0.16±0.11	—	—	—	0.10±0.06	
	蝶呤-6-羧酸	1 346	—	0.02±0.01	—	—	—	—	—	—	
	肉豆蔻酸	1 761	0.23±0.05	0.20±0.08	—	0.17±0.13	0.12±0.04	—	0.22±0.06	—	
	十五烷酸甲	1 846	2.12±1.39	1.24±0.66	1.55±0.37	1.63±0.28	1.07±0.54	1.03±0.09	0.80±0.33	0.59±0.07	
	棕榈酸	1 942	0.12±0.15	0.08±0.02	—	—	—	—	—	—	
	亚油酸	2 124	2.76±0.69	—	—	2.34±1.93	—	—	—	—	
杂环类	苯腈	1 146	0.16±0.03	—	—	—	0.42±0.18	—	1.17±0.22	1.06±0.37	
	3,4-二甲基邻苯二胺	1 192	0.50±0.14	—	0.24±0.21	0.20±0.02	—	0.20±0.06	0.19±0.05	0.24±0.04	
	1-甲基萘	1 289	0.13±0.08	—	—	—	—	—	—	—	
	吡啶	1 303	4.62±1.14	1.41±0.46	1.50±0.53	1.63±0.11	4.11±0.25	2.91±0.27	3.86±1.13	15.55±2.04	
	二丁基羟甲基苯	1 517	0.43±0.28	0.33±0.20	0.21±0.11	0.33±0.28	0.57±0.09	0.31±0.24	—	0.75±0.12	
	7-表-顺-倍半萜水合物	1 549	0.16±0.05	0.15±0.18	0.13±0.08	0.16±0.05	0.21±0.10	—	—	0.37±0.22	
	1-十八碳磺酰氯	1 597	0.54±0.39	0.44±0.05	0.87±0.58	0.89±0.36	0.59±0.18	0.82±0.27	0.44±0.35	0.42±0.09	

续表 1

种类	化合物名称	保留指数	相对含量/%							
			鲜叶	晒青	1次做青	2次做青	3次做青	4次做青	杀青	成茶
杂环类	菲	1 749	0.19±0.07	0.16±0.12	0.21±0.06	0.31±0.40	0.24±0.09	—	—	—
	N-苯基-2-萘胺	2 254	0.64±0.34	0.99±0.35	1.49±0.78	3.13±1.52	2.30±0.76	1.60±1.11	0.95±0.87	0.89±0.36
	17-戊三康定	2 271	0.54±0.22	0.35±0.10	0.33±0.09	0.38±0.41	0.38±0.23	0.20±0.13	0.14±0.02	0.13±0.08
	9-(2',2'-二甲基丙酰基偶氮)-3,6-二氯-2,7-双[2-(二乙氨基)-乙氧基]芴	2 580	0.26±0.05	2.33±1.76	0.91±0.25	—	—	—	0.19±0.04	—

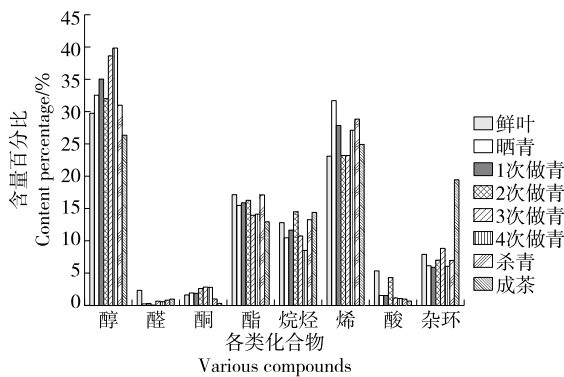


图 1 凤凰单丛茶加工过程中挥发性香气成分的类型和相对含量

Figure 1 Types and relative contents of volatile aroma components in Fenghuang danzong tea during processing

段不断下降,与凤凰单丛茶加工过程中花果香生成,青草气味渐渐减少相一致^[19]。环氧芳樟醇是由芳樟醇氧化而来,其气味与芳樟醇相似,呈甜蜜的花果香味和柑橘味。环氧芳樟醇的变化趋势与芳樟醇的相似,在加工过程中逐渐下降,与 Ma 等^[16]的结果相似。橙花叔醇是以法尼烯焦磷酸(FPP)为底物,通过橙花叔醇合成酶的作用生成的^[20],在凤凰单丛茶中的含量一般较高^[21],且带有清甜的橙花香气,为凤凰单丛茶重要的香气组成成分^[18]。橙花叔醇含量在加工过程中逐渐增加,由鲜叶时的 1.47% 增加到烘干后的 11.54%,其中,做青过程中的增加幅度最大,与 Ma 等^[20]的结果相似。植物醇有淡淡的青草香气^[18],其含量在晒青、做青、杀青阶段升高,但在成茶阶段降低,可能是加工阶段,茶叶中某些与植物醇生成相关的酶被激活,因此植物醇含量增高;而在成茶阶段,因为经历了长时间高温烘烤,部分植物醇挥发损失,因此含量降低^[16]。 α -松油醇具有紫丁香花香,是凤凰单丛茶挥发性香气的重要组成成分^[13],其含量在做青阶段有所升高,但在烘干阶段降低。凤凰单丛茶加工过程中,醇类物质的相对含量先增加后降低,在鲜叶阶段,茶叶醇类物质相对含量仅有 29.76%,在晒青和做青阶段醇类物质含量不断

上升,4次做青后达到最高峰 39.85%,而后在杀青和成茶阶段下降至 26.33%。这可能是杀青和成茶阶段的高温环境导致部分醇类物质挥发或分解^[15]。

烯类物质是凤凰单丛茶香气的重要组成成分,其中 α -法尼烯和新植二烯等烯类物质在凤凰单丛茶中具有较高的相对含量。 α -法尼烯是由茶叶中的丙酮酸通过细胞溶质甲羟戊酸途径生成法尼烯焦磷酸,再由法尼烯焦磷酸在相关酶的催化下生成而来^[22],其相对含量呈先下降后上升的趋势,特别是在杀青和成茶阶段, α -法尼烯含量上升幅度大,分别达到 4.64% 和 6.87%,与 Chen 等^[15-16]的结果相似。新植二烯是茶叶中的叶绿素转化为叶绿醇,并由叶绿醇进一步脱水而形成的,具有青草的清香气味,其相对含量呈先上升后下降的趋势。

吲哚是由茶叶中的色氨酸转化而来,其相对含量在成茶阶段呈上升趋势,与 Zeng 等^[23]的研究结果相似。加工过程中,由于茶叶叶片受损,激发了茶叶基因中色氨酸合成 β 亚单位基因的表达,从而使大量色氨酸合成 β 亚单位生成,进而转化为吲哚。含量较低时,吲哚呈淡淡的花香味,且其相对含量的上升与茶叶香气的大量产生有直接关系。

茶叶中的 β -紫罗酮是由 β -胡萝卜素在胡萝卜素裂解酶(CCDs)作用下分解生成的,具有木香和紫罗兰花的香气,且感官阈值较低^[22]。凤凰单丛茶加工过程中 β -紫罗酮相对含量逐渐上升,由鲜叶时的 0.57% 上升至晒青后的 0.66%,做青后的 0.73%,杀青后的 0.78% 和成茶后的 1.28%,说明 β -紫罗酮在茶叶加工过程中不断生成,且相对含量也越来越高。

茶叶中的酯类物质如十五酸甲酯、苯甲基-2-羟基苯酯和顺-9-十四碳烯乙酸酯等在鲜茶叶中的相对含量较高,在加工过程中有所波动,但在最后成茶阶段均下降,说明这些酯类物质在茶叶加工过程中不断生成转化,赋予了茶叶丰富的香气特征。

有研究^[24]认为,乌龙茶的香气主要来源于加工过程中脂肪酸的氧化裂解产物、胡萝卜素类的氧化产物及萜烯醇类物质的水解产物。凤凰单丛茶中具有花香味的

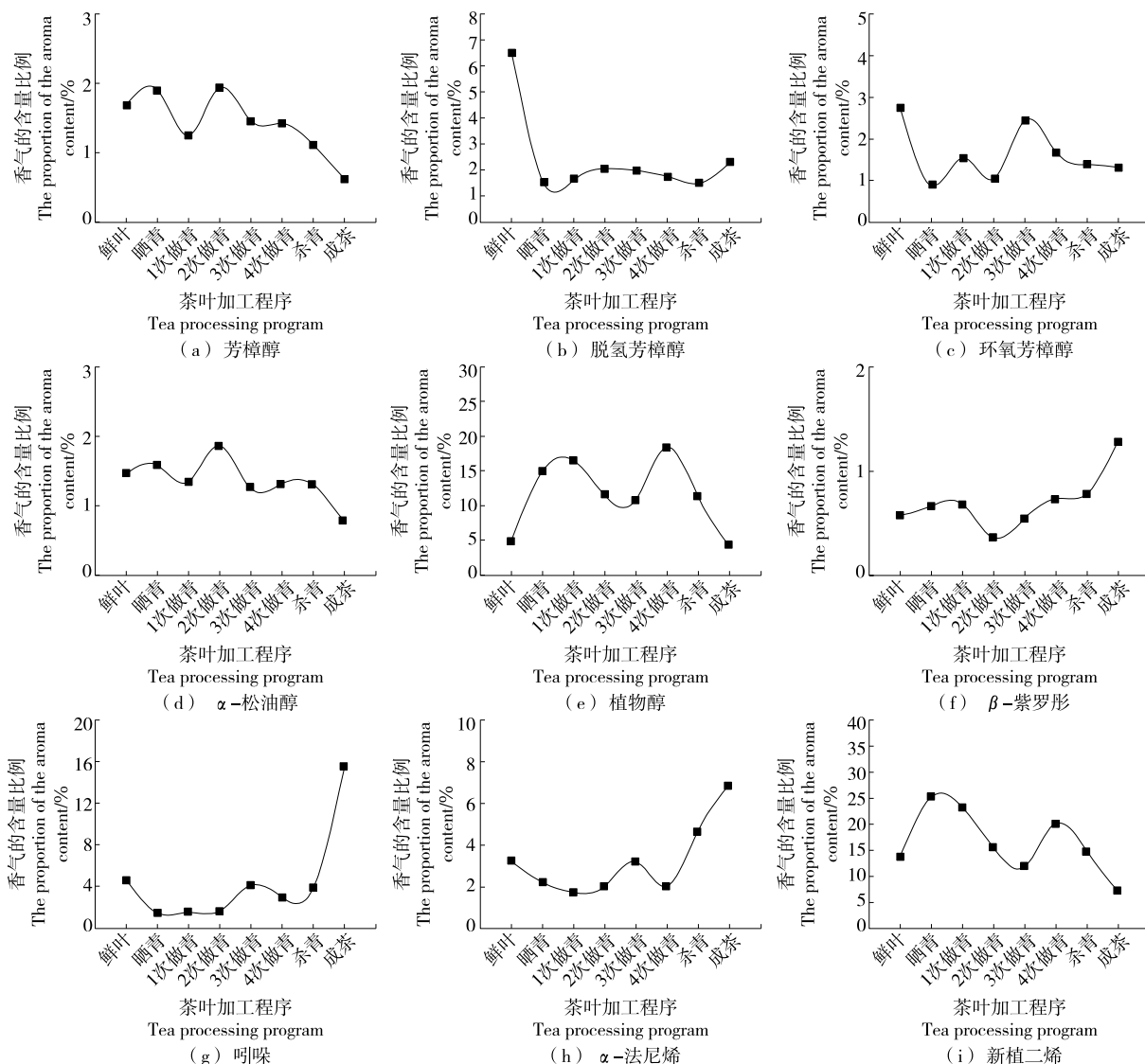


图 2 凤凰单丛茶加工过程中各种重要香气成分含量的变化

Figure 2 Changes of various important aroma components in Fenghuang danzong tea during processing

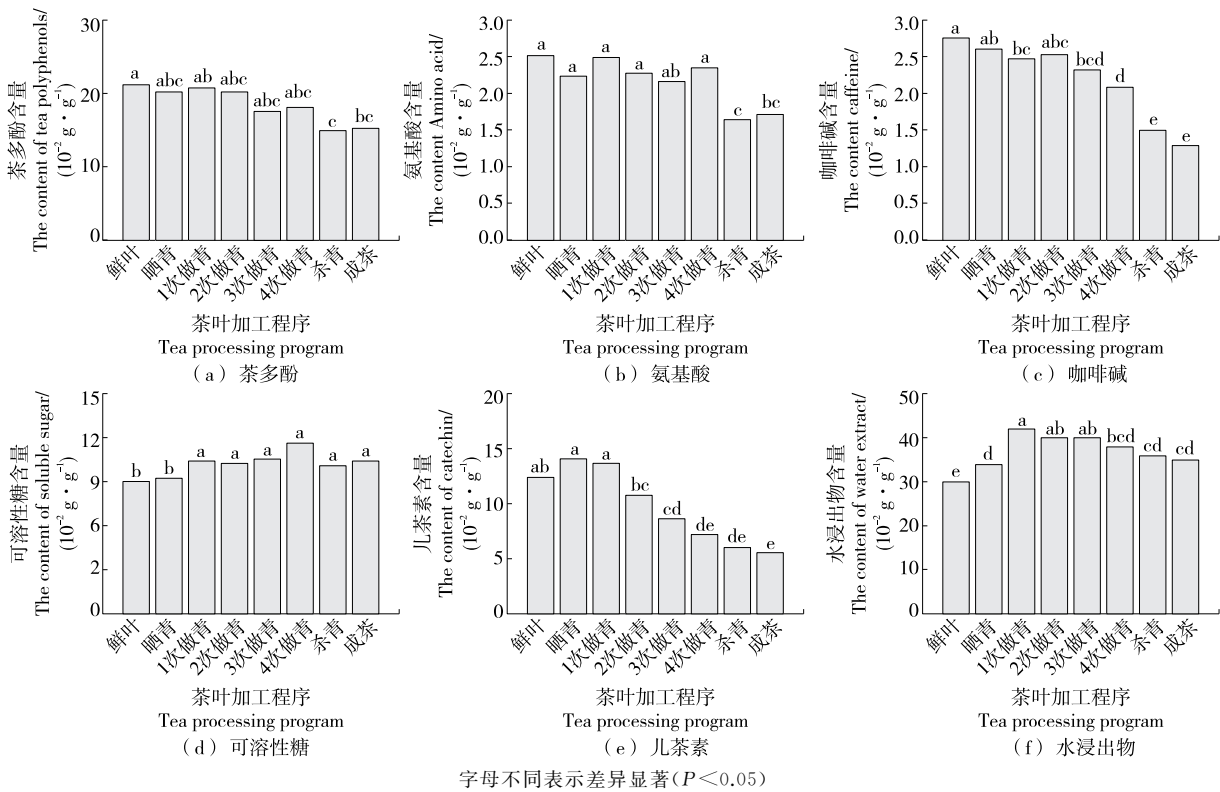
α -法尼烯、吲哚和 β -紫罗酮和具有果香味的橙花叔醇等在加工过程中含量增加,而带有青草气味的脱氢芳樟醇、新植二烯等在加工过程中含量降低,说明在凤凰单丛茶加工过程中,具有花果香味的香气物质不断生成和积累,具有青草味的成分则不断分解释放,形成了凤凰单丛茶特有的花果香气。

2.2 挥发性水溶性生化成分分析

凤凰单丛茶的加工过程不仅赋予了茶叶花果香的香气,还对茶叶的水溶性物质如茶多酚、氨基酸和咖啡碱等物质产生影响,使茶叶口感更加醇厚鲜甜。凤凰单丛茶加工过程中各水溶性生化成分含量如图 3 所示。茶多酚是凤凰单丛茶中重要的水溶性物质,呈苦涩和浓郁的复杂口感,是凤凰单丛茶滋味的重要组成部分,其含量在做青过程中略有下降。黄欢等^[25]认为,茶叶加工过程中茶

多酚含量下降的原因主要有:① 茶多酚与咖啡碱发生反应,生成缔合络合物,使茶多酚含量减少;② 茶叶的加工过程会提高细胞中多酚氧化酶和过氧化物酶活性,促使细胞中的茶多酚发生氧化和转化,从而形成不同的氧化和转化产物,使细胞中茶多酚含量下降;③ 茶多酚的酚羟基被氧化后形成茶黄素等茶色素,降低了茶多酚含量。这与 Guo 等^[2]的结果相似,说明凤凰单丛茶加工过程中茶多酚的变化过程与其他乌龙茶有一定的共同点。

凤凰单丛茶茶叶中的氨基酸具有鲜甜味,是茶汤中鲜爽滋味的主要来源,加工过程中其含量不断下降,是因为做青过程中,茶叶之间不断地碰撞、摩擦,茶叶细胞破损后,茶叶中的氨基酸与茶多酚的氧化产物茶黄素、茶褐素和茶红素等相互作用,形成暗红色的高聚合物,使得氨基酸含量下降。而杀青过程中,由于杀青温度较高,茶叶



字母不同表示差异显著($P < 0.05$)

Figure 3 Contents of water-soluble biochemical components

中氨基酸分解成挥发性的醛类物质如甲醛、乙醛等,从而导致氨基酸含量减少^[26]。

茶叶中咖啡碱呈淡淡的苦涩味,但与茶多酚中的茶黄素以氢键结合后便能形成具有鲜爽滋味的物质,是凤凰单丛茶滋味的重要来源。凤凰单丛茶加工过程中,与茶多酚和氨基酸的变化相似,咖啡碱含量不断下降,主要原因有^[25]:① 做青过程中,茶叶细胞中咖啡碱分子中的氮原子能与儿茶素分子中羟基氢以氢键的形式结合,使得咖啡碱和儿茶素形成新的化合物,从而降低咖啡碱含量;② 烘焙成茶时温度较高,导致茶叶中的咖啡碱发生升华,咖啡碱含量下降。咖啡碱含量下降,使得茶叶在加工过程中的苦涩味逐渐淡化,从而使茶叶口感更加鲜爽。

与茶多酚、氨基酸和咖啡碱的变化不同,凤凰单丛茶茶叶中可溶性糖含量在做青过程中增加,可能是做青过程中,茶叶细胞中某些纤维素酶活力被激活,将更多的多糖转化为可溶性糖,使糖含量提高;而杀青过程的高温使茶叶中的纤维素酶失去活性,使得可溶性糖含量未增加^[27]。

儿茶素是茶叶滋味的组分之一,赋予了茶叶回甘味和收敛性^[28]。在凤凰单丛茶加工过程中,儿茶素含量呈先上升后下降趋势,在晒青和1次做青阶段上升,一方面可能与含有酚羟基的不溶性大分子分解成儿茶素有关,另一方面是在晒青和做青的初始阶段,一些糖类的分解代谢产物为儿茶素的合成提供了必要的底物^[19]。而在做

青的中后阶段及杀青成茶阶段,儿茶素由于大量分解,导致含量下降。茶叶成茶阶段儿茶素含量下降,降低了茶叶的苦涩味,增加了收敛性。

茶叶中水浸出物是指茶叶中能溶于热水可溶物的总称。茶叶加工过程中,水浸出物含量先上升后下降,与何加兴等^[19]的研究结果相似。在晒青和做青的早期阶段,由于细胞失水导致细胞内某些水解酶活性被激活,使得一些不溶性物质分解成可溶性物质,水浸出物含量上升;而随着做青程度的加深以及杀青成茶阶段,由于呼吸作用和酶促作用增强,细胞内一些可溶性物质被分解消耗,导致水浸出物含量下降^[27]。

3 结论

试验结果显示,在凤凰单丛茶加工过程中,具有花果香气的吲哚、 β -紫罗酮、 α -法尼烯、橙花叔醇等物质含量上升,而具有青草味的脱氢芳樟醇、新植二烯等物质含量下降。加工使茶叶的青涩气消散,花香味聚积,形成了凤凰单丛茶特有的花果香味。茶叶加工过程中,茶多酚、咖啡碱和儿茶素含量逐渐减少,可溶性糖含量和水浸出物含量逐渐增加。茶叶中茶多酚、咖啡碱和儿茶素等物质含量的下降,减轻了茶叶的苦涩味,而可溶性糖、水浸出物含量增加,使得茶叶的鲜甜醇厚口感更佳。后续将进一步探索加工条件如烘焙温度、做青次数和时间等对凤凰

单丛茶香气和主要生化成分的影响。

参考文献

- [1] CHEN Q, ZHU Y, DAI W, et al. Aroma formation and dynamic changes during white tea processing[J]. Food Chemistry, 2019, 274: 915-924.
- [2] GUO X, HO C T, WAN X, et al. Changes of volatile compounds and odor profiles in Wuyi rock tea during processing [J]. Food Chemistry, 2021, 341: 128230.
- [3] JEON D B, HONG Y S, LEE G H, et al. Determination of volatile organic compounds, catechins, caffeine and theanine in Jukro tea at three growth stages by chromatographic and spectrometric methods [J]. Food Chemistry, 2017, 219: 443-452.
- [4] DONG W J, HU R S, LONG Y Z, et al. Comparative evaluation of the volatile profiles and taste properties of roasted coffee beans as affected by drying method and detected by electronic nose, electronic tongue, and HS-SPME-GC-MS[J]. Food Chemistry, 2019, 272: 723-731.
- [5] CHEN X H, CHEN D J, JIANG H, et al. Aroma characterization of Hanzhong black tea (*Camellia sinensis*) using solid phase extraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry and olfactometry and sensory analysis[J]. Food Chemistry, 2019, 274: 130-136.
- [6] TAN H R, LAU H R, LIU H, et al. Characterisation of key odourants in Japanese green tea using gas chromatography-olfactometry and gas chromatography-mass spectrometry[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 108: 221-232.
- [7] DU L P, WANG C, ZHANG C X, et al. Characterization of the volatile and sensory profile of instant Pu-erh tea using GC×GC-TOFMS and descriptive sensory analysis[J]. Microchemical Journal, 2019, 146: 986-996.
- [8] 代凤玲, 孙彬妹, 谢沛娟, 等. 凤凰单丛茶香气研究进展[J]. 中国茶叶, 2018(2): 19-22.
- DAI F L, SUN B M, XIE P J, et al. Research progress on aroma of Fenghuang dancong tea[J]. China Tea, 2018(2): 19-22.
- [9] 叶汉钟. 黄柏梓. 凤凰单丛[M]. 上海: 上海文化出版社, 2009: 5.
- YE H Z, HUANG B Z. Fenghuang Dancong [M]. Shanghai: Shanghai Culture Press, 2009: 5.
- [10] 张正竹. 茶叶生物化学试验教程[M]. 北京: 中国农业出版社, 2009: 44-45.
- ZHANG Z Z. A tutorial on tea biochemistry experiments [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2009: 44-45.
- [11] WANG C, LU S, WU Y, et al. Study of aroma formation and transformation during the manufacturing process of Biluochun green tea in Yunnan Province by HS-SPME and GC-MS [J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2016, 96: 4 492-4 498.
- [12] DUDAREVA N. Plant phenylacetaldehyde synthase is a bifunctional homotetrameric enzyme that catalyzes phenylalanine decarboxylation and oxidation[J]. Journal of Biological Chemistry, 2006, 281: 23 357-23 366.
- [13] LI Z W, WANG J H. Analysis of volatile aroma compounds from five types of Fenghuang Dancong tea [J]. International Food Research Journal, 2021, 28(3): 612-626.
- [14] SCHUH C, SCHIEBERLE P. Characterization of the key aroma compounds in beverage prepared from Darjeeling black tea: Quantitative differences between tea leaves and infusion[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54(3): 916-924.
- [15] CHEN S, LIU H, ZHAO X, et al. Non-targeted metabolomics analysis reveals dynamic changes of volatile and non-volatile metabolites during oolong tea manufacture [J]. Food Research International, 2020, 128: 108778.
- [16] MA C Y, LI J X, CHEN W, et al. Study of the aroma formation and transformation during the manufacturing process of oolong tea by solid-phase micro-extraction and gas chromatography-mass spectrometry combined with chemometrics [J]. Food Research International, 2018, 108: 413-422.
- [17] CHEN W, HU D, MIAO A Q, et al. Understanding the aroma diversity of Dancong tea (*Camellia sinensis*) from the floral and honey odors: Relationship between volatile compounds and sensory characteristics by chemometrics [J]. Food Control, 2022, 140: 109103.
- [18] QI D, MIAO A, CHEN W, et al. Characterization of the volatile compounds profile of the innovative broken oolong-black tea in comparison with broken oolong and broken black tea [J]. Food Control, 2021, 129: 108197.
- [19] 何加兴, 欧伊伶, 宋加艳, 等. 黄金茶 1 号夏秋乌龙茶加工过程化学成分变化与品质形成分析[J]. 食品工业科技, 2020, 41 (18): 223-230.
- HE J X, OU Y L, SONG J Y, et al. Analysis of chemical components changes and quality formation of Huangjincha 1 summer oolong tea during processing[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(18): 223-230.
- [20] MA C, QU Y, ZHANG Y, et al. Determination of nerolidol in teas using headspace solid phase microextraction-gas chromatography [J]. Food Chemistry, 2014, 152: 285-290.
- [21] LI Z W, WANG J H. Identification and similarity analysis of aroma substances in main types of Fenghuang Dancong tea[J]. PLoS One, 2020, 15(12): e0244224.
- [22] YANG Z, BALDERMANN S, WATANABE N. Recent studies of the volatile compounds in tea [J]. Food Research International, 2013, 53(2): 585-599.
- [23] ZENG L T, ZHOU Y, GUI J D, et al. Formation of volatile tea constituent indole during the oolong tea manufacturing process[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2016, 64: 5 011-5 019.
- [24] ZHANG N, JING T, ZHAO M, et al. Untargeted metabolomics coupled with chemometrics analysis reveals potential non-volatile markers during oolong tea shaking[J]. Food Res Int, 2019, 123: 125-134.

(下转第 167 页)

- Research, 2009, 23(15): 1 424-1 430.
- [16] NIPHADKAR S S, VETAL M D, RATHOD V K. Purification and characterization of polyphenol oxidase from waste potato peel by aqueous two-phase extraction [J]. Preparative Biochemistry & Biotechnology, 2015, 45(7): 632-649.
- [17] GAO C, CAI C, LIU J, et al. Extraction and preliminary purification of polysaccharides from *Camellia oleifera* Abel. seed cake using a thermoseparating aqueous two-phase system based on EOPO copolymer and deep eutectic solvents[J]. Food Chemistry, 2020, 313: 126164.
- [18] JI Y W, RAO G W, XIE G F. Ultrasound-assisted aqueous two-phase extraction of total flavonoids from *Tremella fuciformis* and antioxidant activity of extracted flavonoids [J]. Preparative Biochemistry & Biotechnology, 2022, 52(9): 1 060-1 068.
- [19] CHEN Z, ZHANG W, TANG X, et al. Extraction and characterization of polysaccharides from Semen Cassiae by microwave-assisted aqueous two-phase extraction coupled with spectroscopy and HPLC [J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 144: 263-270.
- [20] WANG H, DONG Y, XIU Z. Microwave-assisted aqueous two-phase extraction of piceid, resveratrol and emodin from *Polygonum cuspidatum* by ethanol/ammonium sulphate systems[J]. Biotechnology Letters, 2008, 30(12): 2 079-2 084.
- [21] LI P, XUE H, XIAO M, et al. Ultrasonic-assisted aqueous two-phase extraction and properties of water-soluble polysaccharides from *Malus hupehensis*[J]. Molecules, 2021, 26(8): 2 213.
- [22] JI X, PENG Q, YUAN Y, et al. Extraction and physicochemical properties of polysaccharides from *Ziziphus Jujuba* cv. Muzao by ultrasound-assisted aqueous two-phase extraction[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 108: 541-549.
- [23] LIANG J, ZENG Y, WANG H, et al. Extraction, purification and antioxidant activity of novel polysaccharides from *Dendrobium officinale* by deep eutectic solvents[J]. Natural Product Research, 2019, 33(22): 3 248-3 253.
- [24] XUE H, XU J, ZHANG J, et al. Modeling, optimization, purification, and characterization of polysaccharides from *Lilium Lancifolium* Thunb[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 162: 113491.
- [25] HASHEMIFESHARAKI R, XANTHAKIS E, ALTINTAS Z, et al. Microwave-assisted extraction of polysaccharides from the marshmallow roots: Optimization, purification, structure, and bioactivity[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 240: 116301.
- [26] LE B, GOLOKHAVAST K S, YANG S H, et al. Optimization of microwave-assisted extraction of polysaccharides from *Ulva pertusa* and evaluation of their antioxidant activity [J]. Antioxidants, 2019, 8(5): 129.
- [27] CHENG Z, YANG Y, LIU Y, et al. Two-steps extraction of essential oil, polysaccharides and biphenyl cyclooctene lignans from *Schisandra chinensis* Baill fruits [J]. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 2014, 96: 162-169.
- [28] LIN Y, ZENG H, WANG K, et al. Microwave-assisted aqueous two-phase extraction of diverse polysaccharides from *Lentinus edodes*: Process optimization, structure characterization and antioxidant activity [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 136: 305-315.
- [29] 杨占群, 宋小幸, 周倩瑜, 等. 响应面法优化微波辅助提取黑糯米多糖的工艺及其对疲劳小鼠氧化损伤的影响[J]. 粮食与油脂, 2020, 33(6): 92-96.
- YANG Z Q, SONG X X, ZHOU Q Y, et al. Optimization of microwave-assisted extraction of polysaccharide from black glutinous maize by response surface method and its protection effect of oxidative damage on fatigue mice[J]. Cereals & Oils, 2020, 33(6): 92-96.
- [30] 任俊鹏, 杨志萍, 陈贵堂, 等. 山茱萸多糖提取工艺优化及对 α -葡萄糖苷酶的抑制作用[J]. 食品工业, 2022, 43(4): 4-7.
- REN J P, YANG Z P, CHEN G T, et al. Optimization of extraction technology of polysaccharides from *Cornus officinalis* and inhibition of α -glucosidase[J]. The Food Industry, 2022, 43(4): 4-7.
- [31] TAN J, CUI P, GE S, et al. Ultrasound assisted aqueous two-phase extraction of polysaccharides from *Cornus officinalis* fruit: Modeling, optimization, purification, and characterization [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 84: 105966.
- (上接第 160 页)
- [25] 黄欢, 赵展恒, 王玉娇, 等. 铁观音加工过程中咖啡碱、茶多酚、游离氨基酸含量变化研究[J]. 福建农业学报, 2014, 29(3): 282-285.
- HUANG H, ZHAO Z H, WANG Y J, et al. Study on the content change of caffeine, tea polyphenols and free amino acids in the Tieguanyin oolong tea machining process [J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2014, 29(3): 282-285.
- [26] 杨云, 刘彬彬, 周子维, 等. 新品系‘606’乌龙茶加工过程中呈味物质的变化与品质分析[J]. 食品工业科技, 2021, 42(23): 311-318.
- YANG Y, LIU B B, ZHOU Z W, et al. Changes of taste compounds and quality analysis during the manufacturing process of a new tea line ‘606’ oolong tea[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(23): 311-331.
- [27] WU L, HUANG X, LIU S, et al. Understanding the formation mechanism of oolong tea characteristic non-volatile chemical constituents during manufacturing processes by using integrated widely-targeted metabolome and DIA proteome analysis[J]. Food Chemistry, 2020, 310: 125941.
- [28] 邓俊琳, 何扬帆, 陈建, 等. 渥堆发酵过程中藏茶化学成分的变化[J]. 食品与机械, 2023, 39(9): 26-31.
- DENG J L, HE Y Y, CHEN J, et al. Changes of chemical components of Tibetan tea during pile fermentation process[J]. Food & Machinery, 2023, 39(9): 26-31.