

王绍梅, 宋文明, 冷 燕, 等. 花香型古树滇红茶挥发物质气相色谱分析[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(4): 1010-1015.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2021.04.025

花香型古树滇红茶挥发物质气相色谱分析

王绍梅¹, 宋文明², 冷 燕¹, 周启武¹

(1. 滇西科技师范学院, 云南省滇红茶工程技术研究中心, 云南 临沧 677000; 2. 临沧高级技工学校, 云南 临沧 677000)

摘要: 为探索花香型古树滇红茶的香气物质以及各种挥发性物质, 本研究结合同时蒸馏萃取法与气相色谱仪分析方法, 并辅以感官评价进行分析。经过蒸馏、萃取和浓缩等操作后, 对获取的滇红茶浓缩萃取液进行后续分析。感官评价结果表明该滇红茶浓缩萃取液主体的感官香味轮廓为花香, 并且带有甜香和青草香的余味, 整体呈现出浓郁的玫瑰花香。气相色谱仪分析鉴定出了 12 种关键成分, 包括 1 种醛类、6 种醇类、1 种酮类、1 种酯类以及苯乙腈、吲哚、2,4-二丁基-苯酚。在花香型古树滇红茶香味中起决定性作用的 4 种物质分别是苯乙醛、芳樟醇、芳樟醇氧化物和吲哚。从香气强度值来看, 具有较强香味的物质包括苯乙醛、苯甲醇、芳樟醇、香叶醇和 β -紫罗兰酮等。上述结果为研究古树滇红茶挥发性物质和风味提供了基础。

关键词: 滇红茶; 浓缩萃取; 挥发性物质

中图分类号: TS201; S571.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2021)04-1010-06

Gas chromatography analysis of volatile matter from Yunnan black tea with flower fragrance made from old trees

WANG Shao-mei¹, SONG Wen-ming², LENG Yan¹, ZHOU Qi-wu¹

(1. West Yunnan Normal University of Science and Technology, Yunnan Black Tea Engineering Technology Research Center, Lincang 677000, China; 2. Lincang School Senior Technician, Lincang 677000, China)

Abstract: To explore the aroma substances and various volatile substances of Yunnan black tea with flower fragrance made from old trees, methods of simultaneous distillation-extraction and gas chromatography (GC) analysis were combined in the research, coupled with sensory evaluation. After distillation, extraction and concentration, the concentrated extract of Yunnan black tea was analyzed subsequently. The sensory evaluation results showed that the main sensorial aroma outline of the concentrated extract of Yunnan black tea was flower fragrance, supplemented by sweet and green grass fragrance. In the whole, the concentrated extract of Yunnan black tea showed rose fragrance. Twelve key components were identified by gas chromatography, including one aldehyde, six alcohols, one ketone, one lipid and phenylacetonitrile, indole, 2,4-dibutylphenol. Four substances that played decisive roles in the aroma of Yunnan black tea with flower fragrance made from old trees were phenylacetaldehyde, linalool, linalool oxide and indole respectively. From the perspective of aroma intensity, the components with strong aroma included phenylacetaldehyde, benzyl alcohol, linalol, geraniol and β -ionone, etc. The above results provide the foundation for the study of volatile substances and flavor of Yunnan black tea made from old trees.

Key words: Yunnan black tea; concentrated extraction; volatile matter

收稿日期: 2020-10-15

基金项目: 云南省教育厅科学研究基金教师类项目(2020J0746); 云南省科技人才和平台计划建设项目(2018DH011)

作者简介: 王绍梅(1967-), 女, 云南临沧人, 教授, 主要从事滇红茶、普洱茶加工技术与感官审评研究。(E-mail) wshaomei32@126.com

滇红茶是云南红茶的统称, 是由云南独特的地理环境和气候孕育的优良大叶种茶, 也是中国首个以大叶种原料制成的红茶, 占据了国内市场较大的份额, 在国际上也具有较高的地位和声誉, 具有广阔的应用前景^[1]。近年来, 不同地区、树源的滇红茶

快速占领了各大红茶市场,但是古树滇红茶的风味特征尚不明确,需要经过大量的滇红茶挥发性物质试验进行探索^[2]。茶叶挥发性物质中的香气是影响茶叶品质的关键因素之一,研究古树滇红茶的香气特征对认知和改善滇红茶风味特征具有重要意义^[3]。目前,国内外许多学者进行了相关研究,多集中在红茶制备工艺的改进和优化^[4],对于古树滇红茶香气以及风味特征的研究较少。

在茶叶香气成分提取的研究中,最常用的方法有减压蒸馏萃取法、同时蒸馏萃取法、水蒸气蒸馏萃取法和固相微萃取法^[5]。同时蒸馏萃取法能够提取、分离茶汤中的半挥发性、挥发性物质,该方法将水蒸气蒸馏与溶剂萃取相结合,有效提取挥发性物质的同时,还能降低试验复杂度,缩短分析时间^[6]。因此,在花香型古树滇红茶挥发性物质提取中,本研究采用了同时蒸馏萃取法,保证提取到的香气成分与实际用茶时的香气成分相符合。

探索茶叶挥发性物质中香气成分采用的仪器主要有二维气相色谱仪、高分辨率飞行时间质谱仪、气相色谱氢离子火焰检测仪以及气相色谱仪等^[7]。气相色谱仪具有操作简便,分离能力强,样品用量较低,鉴定准确度较高等特点,将气相色谱仪与人类鼻子的灵敏性结合,可以通过嗅闻等方式检测色谱柱流出物质的风味,保证能够对特定香气成分在某种浓度下进行风味活性、风味持续性时间、香气成分及强度的相关分析^[8]。因此,在花香型古树滇红茶挥发性物质的探索中,本研究拟结合同时蒸馏萃取法与气相色谱仪分析方法,确定挥发性物质香气贡献的主要成分,以期为客观评价花香型古树滇红茶的品质提供良好的试验依据,并为改善古树滇红茶的品质提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

为了研究古树滇红茶的挥发性物质,本试验所用花香型古树滇红茶由临沧市临翔区邦东乡曼岗古茶树的鲜叶加工而成,采制于谷雨时节(2020年4月19日)。制作加工过程采用萃取、超滤、反渗透浓缩等手段,制作完成后在干燥、冷冻的环境下存放,试验时取出^[9]。本研究采用的试剂及其体积分数见表1和表2。

1.2 方法

在试验中,采用同时蒸馏萃取法进行花香型古树滇红茶挥发性物质分析^[10]。蒸馏过程采用同时蒸馏萃取仪(SDE,郑州鑫尔瑞化验用品有限公司产品),冷冻过程采用BC-318A星号冰柜(海尔集团产品),质量分析使用BS223S电子分析天平[赛多利斯科学仪器(北京)有限公司产品]。采用岛津分析技术研发(上海)有限公司生产的QP-2010气相色谱仪和Rtx-5MS色谱柱进行气相色谱分析,色谱柱的参数为80.00 mm×0.31 mm×0.28 μm。此外,嗅闻设备则采用Gerstel ODP3嗅闻仪(上海宸乔生物科技有限公司产品)。

表1 采用Sigma-Aldrich公司的试剂及其体积分数

Table 1 Chemical reagents and volume fraction from Sigma-Aldrich

| 试剂 | 体积分数 (%) | 试剂 | 体积分数 (%) |
|-----|----------|--------|----------|
| 苯乙醛 | 95.2 | 薄荷醇 | 98.1 |
| 苯乙腈 | 98.9 | 芳樟醇氧化物 | 98.6 |
| 吡啶 | 97.2 | 芳樟醇 | 99.2 |

表2 采用Alfa Aesar公司的试剂及其体积分数

Table 2 Chemical reagents and volume fraction from Alfa Aesar

| 试剂 | 体积分数 (%) | 试剂 | 体积分数 (%) |
|------------|----------|--------|----------|
| 苯甲醇 | 98.9 | 薄荷醇 | 99.6 |
| β-紫罗兰酮 | 95.9 | 芳樟醇氧化物 | 99.3 |
| 2,4-二丁基-苯酚 | 99.1 | 芳樟醇 | >99.6 |

在采用同时蒸馏萃取法制备花香型古树滇红茶挥发性物质样品的过程中,将30 g花香型古树滇红茶置入500.0 ml烧杯中并加入300.0 ml蒸馏水,另取一个大小为250.0 ml的烧杯存储100.0 ml正己烷溶液备用。经过1.5 h的蒸馏萃取后,收集蒸馏萃取液并经过硫酸钠脱水处理^[11-12],处理后再次进行旋转蒸发,将温度保持在85℃左右,旋转频率为200 r/min。最终将萃取液浓缩至1.5 ml用于试验分析,该浓缩萃取液保存在-4℃环境中。进行气相色谱分析时,用质量浓度为1 mg/ml的内标环己酮溶液10.0 μl添加至990.0 μl同时蒸馏萃取仪浓缩样品中,以待试验。

参照文献[13]的方法对花香型古树滇红茶浓缩萃取液进行感官评价,首先配置各种不同香气强

度级别的标准溶液,并邀请 10 名受过训练的评价员嗅闻溶液的香味,标准溶液的香气强度等级如表 3 显示。其中,最低香气强度为 1,最高香气强度为 9。在香味嗅闻试验中,每次由实验人员吸取 10 μl 浓缩萃取液至闻香条中,由评分员嗅闻 60 s 后给出相应的得分。

表 3 标准溶液的香气强度等级

Table 3 Aroma strength grades of standard solutions

| 香气成分 | 香味特征 | 感官评价(香味强度)得分 | | |
|---------------|------|--------------|--------|----------|
| | | 香味强度 1 | 香味强度 4 | 香味强度 9 |
| β -紫罗兰酮 | 花香 | 0.32 | 0.91 | 2.12 |
| 乙醇醇 | 青草香 | 72.60 | 293.40 | 641.30 |
| 雪松醇 | 陈旧香 | 60.30 | 212.10 | 465.40 |
| 乙基吡咯 | 烘烤香 | 55.60 | 221.60 | 443.20 |
| 芳香醇氧化物 | 甜香 | 226.50 | 953.80 | 1 752.90 |

在气相色谱仪分析中,主要包括色谱条件分析、质谱条件分析、定性分析和定量分析。在色谱条件分析中,采用的色谱柱为 Rtx-5MS 石英柱,初始温度为 50 $^{\circ}\text{C}$ 并保持 5 min,然后以 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 速度升温至 200 $^{\circ}\text{C}$,保持 1 min;载气流的速度为 3 ml/min;进样量和分流比分别设置为 1.0 μl 和 20:1。在质谱条件分析中,采用电子轰击离子源,能量设置为 70 eV,传输线的温度保持在 300 $^{\circ}\text{C}$,离子源的温度保持在 260 $^{\circ}\text{C}$,扫描范围为 50~450 M/Z。此外,在定性分析中,需要对比标准品进行 12 种成分(苯乙醛、薄荷醇、苯乙腈、芳樟醇氧化物、吡啶、芳樟醇、苯甲醇、苯乙醇、 β -紫罗兰酮、邻苯二甲酸二异丁酯、2,4-二丁基-苯酚、香叶醇)的精确度分析,其他成分则采用标准谱库进行相似度检验,并给出相应的特征峰值分析结果,最终给出综合性的保留指数。在定量分析中,给出 12 种成分的标准曲线进行定量,其他成分则采用内标环己酮的定量分析得到试验结果。

在本研究中,采用 Excel 2010 软件中的统计工具完成试验数据分析,给出统计结果并制图。

2 结果与分析

2.1 感官评价结果

图 1 显示,滇红茶浓缩萃取液主体的感官香味轮廓为花香,并且带有甜香和青草香的余味,整体呈现出浓郁的玫瑰花香气味。在红茶香气的感官研究

中,有学者对明桂红 2 号红茶进行了研究,主要表现为甜香和花香^[14]。此外,有学者对坦洋工夫红茶进行研究,该红茶表现为持久的馥郁花香^[15]。花香型古树滇红茶的香气轮廓与其他类似红茶的风味轮廓基本一致,保持了良好的花香气味。

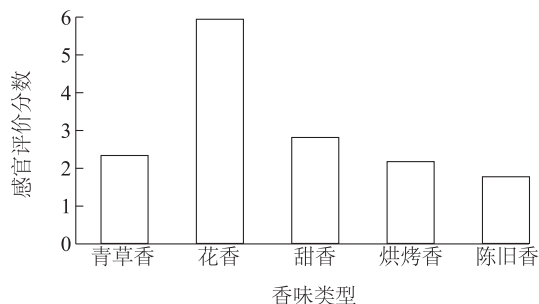
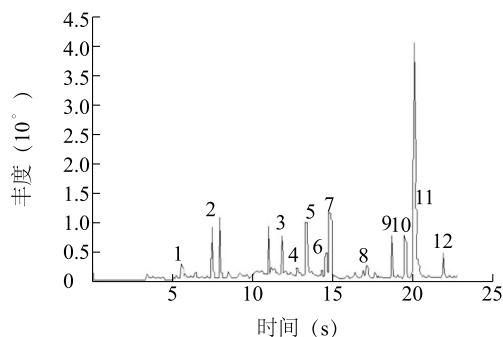


图 1 滇红茶浓缩萃取液的感官评价结果

Fig.1 Sensory evaluation of the concentrated extract of Yunnan black tea

2.2 挥发性物质的定性分析

在挥发性物质的定性分析中,本研究采用气相色谱仪进行分析,得到滇红茶浓缩萃取液总离子流图(图 2),直接略去一些含量较少的成分,因此部分色谱柱将会出现一些混杂的波峰现象。综合分析图 2 和表 4 发现,花香型古树滇红茶浓缩萃取液中的主要挥发性物质包括醇类、酯类和酮类,该结果与现有红茶的气相色谱仪分析结果^[16]基本一致。此外,表 4 显示, β -紫罗兰酮、苯甲醇、吡啶、苯乙醇、2,4-二丁基-苯酚的特征离子含量较高,对应的含量也相对较高,与前人研究结果^[17]一致。



1: 苯乙醛; 2: 薄荷醇; 3: 苯乙腈; 4: 芳樟醇氧化物; 5: 吡啶; 6: 芳樟醇; 7: 苯甲醇; 8: 苯乙醇; 9: β -紫罗兰酮; 10: 邻苯二甲酸二异丁酯; 11: 2,4-二丁基-苯酚; 12: 香叶醇。

图 2 滇红茶浓缩萃取液中 12 种试剂对应成分的鉴定结果

Fig.2 Identification results of ingredients extracted by 12 reagents in the concentrated extract of Yunnan black tea

表4 标准溶液的离子数量特征

Table 4 Lon quantitative characteristics of standard solution

| 序号 | 保留时间 (s) | 成分 | 特征值 | 特征离子 数量 |
|----|-------------|---------------|-------|------------|
| 1 | 16.68 | 苯乙醛 | 1 029 | 584 493 |
| 2 | 19.13 | 薄荷醇 | 1 065 | 768 969 |
| 3 | 21.69 | 苯乙腈 | 1 125 | 735 196 |
| 4 | 23.89 | 芳樟醇氧化物 | 1 117 | 462 917 |
| 5 | 24.26 | 吡啶 | 1 126 | 6 983 117 |
| 6 | 27.65 | 芳樟醇 | 1 189 | 838 969 |
| 7 | 28.68 | 苯甲醇 | 1 167 | 8 994 118 |
| 8 | 29.16 | 苯乙醇 | 1 288 | 6 296 117 |
| 9 | 31.97 | β -紫罗兰酮 | 1 346 | 10 293 126 |
| 10 | 33.56 | 邻苯二甲酸二异丁酯 | 1 365 | 654 698 |
| 11 | 35.24 | 2,4-二丁基-苯酚 | 1 372 | 7 784 168 |
| 12 | 36.65 | 香叶醇 | 1 481 | 1 714 952 |

2.3 挥发性物质的定量分析

表5显示,在花香型古树滇红茶浓缩萃取液中,

表5 花香型古树滇红茶中挥发性物质的标准曲线及含量

Table 5 Standard curve and contents of volatile matter in Yunnan black tea with flower fragrance made from old trees

| 序号 | 成分 | 标准回归方程 | R^2 | 校正因子 | 香气含量 ($\mu\text{g/g}$) |
|----|---------------|------------------|---------|-------|--------------------------|
| 1 | 苯乙醛 | $Y=1.365x-0.065$ | 0.998 6 | 0.719 | 0.84 ± 0.02 |
| 2 | 薄荷醇 | $Y=2.012x-0.263$ | 0.999 3 | 0.514 | 0.44 ± 0.03 |
| 3 | 苯乙腈 | $Y=0.187x-0.453$ | 0.998 2 | 0.813 | 0.57 ± 0.02 |
| 4 | 芳樟醇氧化物 | $Y=4.311x-0.087$ | 0.997 3 | 0.335 | 0.48 ± 0.06 |
| 5 | 吡啶 | $Y=1.682x-0.176$ | 0.998 6 | 0.258 | 0.37 ± 0.01 |
| 6 | 芳樟醇 | $Y=0.267x-0.244$ | 0.995 9 | 0.487 | 1.15 ± 0.02 |
| 7 | 苯甲醇 | $Y=0.554x-0.018$ | 0.998 9 | 0.685 | 0.37 ± 0.03 |
| 8 | 苯乙醇 | $Y=0.156x-0.067$ | 0.999 1 | 0.654 | 0.86 ± 0.06 |
| 9 | β -紫罗兰酮 | $Y=1.683x-0.128$ | 0.999 4 | 0.279 | 0.13 ± 0.03 |
| 10 | 邻苯二甲酸二异丁酯 | $Y=9.182x-0.446$ | 0.998 6 | 1.656 | 0.84 ± 0.02 |
| 11 | 2,4-二丁基-苯酚 | $Y=4.573x-0.442$ | 0.999 3 | 2.225 | 2.14 ± 0.03 |
| 12 | 香叶醇 | $Y=4.287x-0.734$ | 0.999 6 | 2.168 | 2.25 ± 0.05 |

Y 表示含量; x 表示吸光值。

表7显示,具有较强香味的物质包括苯乙醛、苯甲醇、芳樟醇、香叶醇和 β -紫罗兰酮等,香气强度值(OVA)分别为255.00、1 335.15、568.15、19 000.00、950.00。其中,根据已有研究结果^[15, 18-20],对红茶花香贡献较大的物质包括芳樟醇、香叶醇、 β -紫罗兰酮和吡啶,本研究中这4种成分的 OVA 分别为

通过建立标准曲线回归方程,利用方程求解每种挥发性物质的定量结果,结果更为精确。12种成分的回归曲线结果均显著($P<0.05$)。

2.4 气相色谱仪分析以及香气强度分析

表6显示,在花香型古树滇红茶浓缩萃取液中检测到了12种香气物质,试验中仅当香味稀释倍数(FD)值 ≥ 1.0 时记录香气物质,包括1种醛类、6种醇类、1种酮类、1种酯类以及苯乙腈、吡啶、2,4-二丁基-苯酚。对花香型古树滇红茶浓缩萃取液香气起决定性作用的4种物质(FD 值 ≥ 15.5)分别是苯乙醛、芳樟醇、芳樟醇氧化物和吡啶,分别表现出来的是青草香、花香、甜香以及花香;对花香型古树滇红茶浓缩萃取液香气起重要作用的物质(FD 值 ≥ 4.0)是苯甲醇、薄荷醇、 β -紫罗兰酮和苯乙腈,分别表现出来的是甜香+烘烤香、青草香、花香和青草香+甜香;其他物质对于香味的影响度较低。在本研究中,花香型古树滇红茶的花香主要来自醇类氧化物和吡啶,并伴随着芳樟醇氧化物产生的甜香,因此具体香味中存在浓郁的玫瑰花香气。

568.15、19 000.00、950.00、5.98;对甜香产生较大贡献的物质有3种,分别是芳樟醇氧化物、苯乙醛和薄荷醇,本研究中这3种成分的 OVA 分别为88.00、255.00、18.95。综合表6和表7可以看出,苯乙醛、苯甲醇、芳樟醇氧化物、芳樟醇、香叶醇和吡啶是花香型古树滇红茶挥发性香气的主要物质。因此,本

研究的花香型古树滇红茶浓缩萃取液的感官评价是具有浓郁的玫瑰花香,即是由花香为主,甜香为辅产生的香味氛围。

表 6 滇红茶浓缩萃取液的气相色谱仪分析结果

Table 6 Gas chromatography analysis results of the concentrated extract of Yunnan black tea

| 序号 | 成分 | 香味特征 | 香味稀释倍数 (FD) 值 |
|----|---------------|--------|---------------|
| 1 | 苯乙醛 | 青草香 | 16.1 |
| 2 | 薄荷醇 | 青草香 | 4.1 |
| 3 | 苯乙腈 | 青草香+甜香 | 4.2 |
| 4 | 芳樟醇氧化物 | 甜香 | 15.9 |
| 5 | 吡嗪 | 花香 | 15.8 |
| 6 | 芳樟醇 | 花香 | 16.2 |
| 7 | 苯甲醇 | 甜香+烘烤香 | 4.1 |
| 8 | 苯乙醇 | 花香 | 1.6 |
| 9 | β -紫罗兰酮 | 花香 | 4.2 |
| 10 | 邻苯二甲酸二异丁酯 | 陈旧香 | 1.1 |
| 11 | 2,4-二丁基-苯酚 | 青草香 | 1.3 |
| 12 | 香叶醇 | 花香 | 1.2 |

表 7 滇红茶浓缩萃取液中各类物质的香气强度值

Table 7 Aroma intensity values of substances in concentrated extract of Yunnan black tea

| 序号 | 成分 | 阈值 | 香气强度值 |
|----|---------------|---------|------------------------|
| 1 | 苯乙醛 | 4.260 | 255.00 \pm 15.00 |
| 2 | 薄荷醇 | 922.300 | 18.95 \pm 0.58 |
| 3 | 苯乙腈 | 336.400 | 455.00 \pm 0.87 |
| 4 | 芳樟醇氧化物 | 6.580 | 88.00 \pm 0.20 |
| 5 | 吡嗪 | 143.600 | 5.98 \pm 0.17 |
| 6 | 芳樟醇 | 6.820 | 568.15 \pm 13.27 |
| 7 | 苯甲醇 | 2.680 | 1 335.15 \pm 84.18 |
| 8 | 苯乙醇 | 754.100 | 0.44 \pm 0.03 |
| 9 | β -紫罗兰酮 | 0.186 | 950.00 \pm 320.00 |
| 10 | 邻苯二甲酸二异丁酯 | 无 | — |
| 11 | 2,4-二丁基-苯酚 | 无 | — |
| 12 | 香叶醇 | 0.075 | 19 000.00 \pm 133.00 |

有研究表明,在花香和甜香相结合的红茶中,对呈现的香气起第一决定性作用的成分基本来自苯甲醇、香叶醇、芳樟醇及其氧化物,这些醇化物

及其氧化物的含量一般都大于 5%;起第二决定性作用的是苯乙醛和苯乙醇等,含量一般大于 1%^[20]。关于红茶的研究发现,吡嗪表现出浓郁的花香,是形成红茶花香的主要化合物之一^[21]。芳樟醇及其氧化物构成了祁门红茶独特的花香,并且相应的香气物质含量和香气强度值都较高^[22]。在本研究中,花香型古树滇红茶的主要香气贡献成分与大多数红茶的香气贡献成分基本一致,主要是苯乙醛、苯甲醇、香叶醇、吡嗪、芳樟醇、芳樟醇氧化物。通过该结果也进一步解释了来自古树的滇红茶与其他滇红茶以及其他类型红茶产品的整体香气轮廓相似,呈现出相似花香(玫瑰)的原因。

3 结 论

本研究采用感官评价、同时蒸馏萃取法、气相色谱仪分析方法,探索花香型古树滇红茶的香气成分以及各种挥发性物质。专家的感官评价结果为:滇红茶浓缩萃取液主体的感官香味轮廓为花香,并且带有甜香和青草香的余味,整体呈现出浓郁的玫瑰花香气味。气相色谱仪分析鉴定出了 12 种关键成分,分别包括 1 种醛类、6 种醇类、1 种酮类、1 种酯类以及苯乙腈、吡嗪、2,4-二丁基-苯酚。在花香型古树滇红茶香味中起决定性作用的 4 种香气物质分别是苯乙醛、芳樟醇、芳樟醇氧化物和吡嗪。从香气强度值来看,具有较强香味的物质包括苯乙醛、苯甲醇、芳樟醇、香叶醇和 β -紫罗兰酮等。花香型古树滇红茶整体的香气轮廓与其他红茶类似。本研究结果为客观评价古树滇红茶的品质、风味,提升古树滇红茶加工工艺和茶叶质量提供了数据支撑。

参考文献:

- [1] 韩 斌,孔继君,罗成雁.新时代背景下凤庆滇红茶产业创新发展研究[J].资源开发与市场,2019,35(10):1304-1307.
- [2] XU J, ZHUO J, ZHU Y, et al. Analysis of volatile organic pyrolysis products of bituminous and anthracite coals with single-photon ionization time-of-flight mass spectrometry and gas chromatography/mass spectrometry[J]. Energy & Fuels, 2017, 31(1):730-737.
- [3] HIDAYAT S, BAKAR M S A, YANG Y, et al. Characterisation and Py-GC/MS analysis of *Imperata cylindrica* as potential biomass for bio-oil production in Brunei Darussalam[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2018, 134:510-519.
- [4] 刘 聪,张文杰,严 亮,等.顶空固相微萃取结合 GC/MS 分析玫瑰香型滇红茶香气成分[J].食品科技,2017,42(8):300-

- 305.
- [5] XU J, ZHUO J, ZHU Y, et al. Analysis of volatile organic pyrolysis products of bituminous and anthracite coals with single-photon ionization time-of-flight mass spectrometry and gas chromatography/mass spectrometry[J]. Energy & Fuels, 2017, 31(1):730-737.
- [6] 马占福,李洪亮,杜新,等.2种萃取法在滇红茶成分萃取中的差异性分析及应用[J].食品科技,2017,42(1):219-224.
- [7] ALMEIDA H N, CALIXTO G Q, CHAGAS B M, et al. Characterization and pyrolysis of *Chlorella vulgaris* and *Arthrospira platensis*; potential of bio-oil and chemical production by Py-GC/MS analysis [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(16):14142-14150.
- [8] TANG H, MA J K, CHEN L, et al. GC-MS characterization of volatile flavor compounds in stinky Tofu brine by optimization of headspace solid-phase microextraction conditions [J]. Molecules, 2018, 23:3155.
- [9] YOUSEF S, EIMONTAS J, STRIUGAS N, et al. Pyrolysis kinetic behavior and TG-FTIR-GC-MS analysis of metallised food packaging plastics[J]. Fuel, 2020, 282:118737.
- [10] 孙海林,阮志国,车彦云,等.超临界 CO₂ 流体萃取滇红茶及其提取物成分分析[J].云南中医学院学报,2015,38(4):23-27, 37.
- [11] 咎明丽,杜明君,杨婉秋.做形工艺对云南凤庆红茶主要香气成分的影响[J].昆明学院学报,2017,39(6):46-49.
- [12] ABOUMRAD N, DUVERNAY F, CHIAVASSA T, et al. Methanol ice VUV photoprocessing: GC-MS analysis of volatile organic compounds[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2016, 458(2):1234-1241.
- [13] 曾小翠,蒋玉兰,吕杨俊,等.基于 GC-MS/GC 的滇红戚风蛋糕香气物质研究[J].中国茶叶加工,2017(2):28-33.
- [14] 陈佳,邱勇娟,赖兆荣,等.茶树新品系桂红2号红茶香气成分分析[J].中国热带农业,2018(5):68-72.
- [15] 李晓静,游芳宁,李磊磊,等.不同工艺不同品种坦洋工夫红茶品质的比较[J].食品工业科技,2018,39(19):27-33,39.
- [16] OLSZEWSKI M P, ARAUZO P J, WADRZYK M, et al. Py-GC-MS of hydrochars produced from brewer's spent grains[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2019, 140:255-263.
- [17] KOZIEL J A, NGUYEN L T, GLANVILLE T D, et al. Method for sampling and analysis of volatile biomarkers in process gas from aerobic digestion of poultry carcasses using time-weighted average SPME and GC-MS[J]. Food Chemistry, 2017, 232:799-807.
- [18] 范远景,王林,董万领,等. SPME-GC/MS 法测定红茶及红茶粉中的挥发性[J].现代食品科技,2012,28(9):1231-1235.
- [19] ZHANG L, ZENG Z, ZHAO C, et al. A comparative study of volatile components in green, oolong and black teas by using comprehensive two-dimensional gas chromatography-time-of-flight mass spectrometry and multivariate data analysis [J]. Journal of Chromatography A, 2013, 1313:245-252.
- [20] 葛晓杰,苏祝成,狄德荣,等.基于顶空固相微萃取/气质联用的红茶特征香型呈香活性成分研究[J].食品工业科技,2016,37(23):304-310.
- [21] 储俊,董荣荣,王晓,等.近红外光谱结合化学计量法分析茶叶与茶汤的化学品质差异[J].辽宁中医药大学学报,2021, 23(1):39-45.
- [22] 宋增光,曾海英,李婷,等.红曲薏米与红茶复配及风味特性[J].食品工业,2020,41(3):343-348.

(责任编辑:王妮)