

易宇文, 何莲, 邓静, 等. 基于电子鼻和气质联用识别不同工艺的俄色茶 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(18): 361-370. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022100266

YI Yuwen, HE Lian, DENG Jing, et al. Identification of *Malus toringoides* (Rehd.) Hughes Teas with Different Processes Based on E-nose and GC-MS[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(18): 361-370. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022100266

· 分析检测 ·

基于电子鼻和气质联用识别不同工艺的俄色茶

易宇文¹, 何 莲¹, 邓 静^{1*}, 胡金祥¹, 彭毅秦¹, 乔明锋¹, 蔡雪梅¹, 朱开宪¹, 吴华昌¹, 雷 敏²

(1. 四川旅游学院, 四川成都 610100;

2. 炉霍雪域俄色有限责任公司, 四川甘孜藏族自治州 626500)

摘要: 为探究 3 种不同工艺加工的俄色茶气味的差异, 采用电子鼻、捕集阱顶空-气质联用仪 (trap head space-gas chromatography-mass spectrometry, HS-Trap-GC-MS) 结合正交偏最小二乘法判别分析 (orthogonal partial least squares discriminant analysis, OPLS-DA)、相对气味活度值 (relative odor activity value, ROAV) 和差异性热图分析俄色红茶、绿茶和康砖茶挥发性物质的差异。结果表明, 电子鼻能有效区分 3 种俄色茶, 电子鼻结合 OPLS-DA 建立预测模型其预测能力达 95.70%。GC-MS 分析表明醛类、酯类、烃类是主要挥发性物质, 醇类是红茶、绿茶主要共有挥发性物质; 醛类、酯类、烃类和醇类的含量差异是导致不同工艺俄色茶香气异同的主要原因。ROAV 值结合香气类型分析表明果香类挥发性物质对俄色茶气味形成的贡献相对较大; 异戊醛可能是俄色茶的关键香气物质。差异性热图分析表明, 三甲氧基酯、异戊醛、2-乙基呋喃是俄色茶主要共有挥发性物质。

关键词: 俄色茶, 不同工艺, 气相色谱-质谱联用法, 电子鼻, 正交偏最小二乘判别分析, 相对气味活度值, 差异性热图

中图分类号: TS207.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)18-0361-10

本文网刊:

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022100266



Identification of *Malus toringoides* (Rehd.) Hughes Teas with Different Processes Based on E-nose and GC-MS

YI Yuwen¹, HE Lian¹, DENG Jing^{1*}, HU Jinxiang¹, PENG Yiqin¹,
QIAO Mingfeng¹, CAI Xuemei¹, ZHU Kaixian¹, WU Huachang¹, LEI Min²

(1. Sichuan Tourism University, Chengdu 610100, China;

2. Luhuo Snow Field Russian Co., Ltd., Ganzi Tibetan Autonomous Prefecture 626500, China)

Abstract: The volatile substances among *Malus toringoides* (Rehd.) Hughes black tea, green tea and Kang brick tea were detected by electronic nose (E-nose), trap head space-gas chromatography-mass spectrometry (HS Trap GC-MS) and the differences of the volatile substances were analyzed by orthogonal partial least squares discriminant analysis (OPLS-DA), relative odor activity value (ROAV) and differential thermography in order to explore the odor differences of *Malus toringoides* (Rehd.) Hughes teas with three different processes. Result showed that E-nose could effectively distinguish three kinds of *Malus toringoides* (Rehd.) Hughes teas, and the prediction ability of the model established by E-nose combined with OPLS-DA was 95.70%. GC-MS analysis showed that aldehydes, esters and hydrocarbons were the main volatile substances, while alcohols were the main common volatile substances of black tea and green tea. The differences in the contents of aldehydes, esters, hydrocarbons and alcohols account for the variations in the aroma of *Malus toringoides*

收稿日期: 2022-10-28

基金项目: 四川省高校科研创新团队建设计划 (18TD0043); 四川省科技厅科技特派员项目 (18-181601); 四川旅游学院科技创新团队项目 (21SCT-UTG01)。

作者简介: 易宇文 (1980-), 男, 硕士, 研究员, 研究方向: 食品风味化学, E-mail: 147684620@qq.com。

* 通信作者: 邓静 (1970-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 食品风味化学, E-mail: 79190096@qq.com。

(Rehd.) Hughes teas produced by different processes. ROAV value combined with aroma type analysis showed that the volatile components of fruit aroma had a relatively large contribution to the formation of the odor of *Malus toringoides* (Rehd.). Isovaleraldehyde might be the key aroma substance to *Malus toringoides* (Rehd.) Hughes teas. Differential thermogram analysis showed that trimethoxyester, isovaleraldehyde and 2-ethylfuran were the main common volatile substances in *Malus toringoides* (Rehd.) Hughes teas.

Key words: *Malus toringoides* (Rehd.) Hughes tea; different processes; gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS); E-nose; orthogonal partial least squares discriminant analysis (OPLS-DA); relative odor activity value (ROAV); differential thermogram

变叶海棠(*Malus toringoides* (Rehd.) Hughes)为蔷薇科苹果属落叶灌木,大多分布在海拔3000~3500 m的高海拔地区,是中国特有植物资源,在四川、西藏等高海拔地区有分布。以变叶海棠叶为原料,按制茶工艺制成的饮品,当地人称为俄色茶。藏医和现代医学均认为俄色茶具有治疗消化不良,降血压、血脂^[1-3]等功效。近年来通过质谱、核磁、液相、气相和 IRIS Intrepid II XSP 等分析发现俄色茶主要成分为二氢查耳酮、黄酮、氨基酸、多糖、脂肪酸等^[4-6]。由此可见,俄色茶保健价值极高。

茶叶香气的形成既与所含香气物质(占茶叶质量的0.01%~0.05%)有关^[7],又与后序加工工艺存在极大联系^[8]。茶叶香气形成的4条途径^[9]是影响茶叶香气差异的重要因素。有研究表明,茶叶香气对茶叶品质的贡献率在25%~40%^[9-10]之间。郭洪伟等^[11]分析红茶和绿茶的主要香气成分表明:醇类和醛类物质是红茶的主要挥发性物质;醇类和酯类是绿茶的主要挥发性物质。乔小燕等^[12]的研究表明康砖茶主要挥发性物质为酮类、醛类和醇类。以变叶海棠叶为原料,通过不同加工工艺形成了俄色红茶、绿茶和康砖茶,其整体香味轮廓是否存在差异以及具体香气物质的差异未见相关报道。

茶叶中的香气物质分子量小、沸点低、挥发性强。选择有效香气检测方法至关重要。电子鼻是一种快速识别样品整体气味轮廓的仪器,其检测结果具有客观性、重复性、可视性等优点,但无法判断样品之间气味差异的具体物质。捕集阱自动顶空(trap head space)具有样品处理简单,气味物质自动萃取、富集和进样,方便快捷等特点。气相色谱质谱联用仪(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)是分离、鉴定物质的有效工具。电子鼻和 GC-MS 在茶叶整体气味轮廓及具体物质的鉴定领域有广泛应用。陆晨浩等^[13]发现发芽3天的黑麦茶香气与未发芽的差异明显。邵淑贤等^[14]研究表明利用黄观音乌龙茶的5种主要香气成分所构建 SVM 判别模型,其识别不同产地的黄观音乌龙茶的识别率为100%。WANG 等^[15]研究表明,不同工艺制备的茶叶其香气和含量差异大,挥发性物质含量结合聚类分析能够准确分类。另外,正交偏最小二乘判别分析(orthogonal partial least squares discriminant analysis, OPLS-DA)是一种有监督的分析方法,其通过去除变量的数据变

异,将分离信息集中在一个主成分中,使模型变得简单且易于解释。

本研究以不同工艺的俄色茶为研究对象,采用电子鼻、HS-Trap-GC-MS 技术结合 OPLS-DA、ROAV、差异性热图,识别不同工艺的俄色茶整体气味轮廓,鉴定俄色茶挥发性物质,分析俄色茶主要香气物质及差异,旨在比较不同工艺条件下俄色茶气味异同,探明不同工艺条件下俄色茶气味特点,为俄色茶风味研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

俄色茶样品由四川炉霍雪域俄色有限公司提供,样品信息见表1,样品加工方法参见文献[16]。取四个不同年份(2019、2020、2021和2022年)的俄色红茶、绿茶和康砖茶各3份,将样品分别混匀,研磨成粉,过40目筛,备用。

表1 样品信息表
Table 1 Sample information

样品编号	样品名称	配料
A	俄色红茶	高山变叶海棠嫩芽
B	俄色绿茶	高山变叶海棠嫩芽
C	俄色康砖茶	高山变叶海棠碎嫩芽

FOX 4000 电子鼻 Alpha MOS 公司; Clarus 680 气相色谱仪、Elite-5MS(30 m×0.25 mm×0.25 μm)色谱柱、Clarus SQ8T 质谱仪、HST40 捕集阱顶空进样器 美国珀金埃尔默公司; DFY-400C 高速粉碎机 温岭市林大机械有限公司; ME203E 电子天平 梅特勒-托利多仪器(上海)有限责任公司; 6CR-40 型揉捻机、6CFJ-1 发酵机、6CH-12 烘干机 信阳一鼎茶业科技有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品工艺及参数 俄色红茶制备工艺及参数: 采摘(高山变叶海棠嫩芽)、萎凋(加温 50 °C 萎凋,至含水量 60% 左右)、揉捻(40 型揉捻机按轻、重、轻进行冷揉,至成条率 90%)、发酵(发酵机温度 35 °C,相对湿度 80%,发酵时间 6 h)、干燥(烘焙 100 °C,时间 45 min)、筛选、检验、包装。

俄色绿茶制备工艺及参数: 采摘(高山变叶海棠嫩芽)、摊青(摊青床,厚度 2~5 cm,通微风,15 min 翻动一次,至鲜叶含水量 70%)、杀青(温度为 270 °C,

至含水量为 60%)、揉捻(40 型揉捻机按轻、重、轻进行冷揉,至成条率 90%)、烘干(温度 100 ℃,至含水量为 6%)、筛选、检验、包装。

俄色康砖茶制备工艺参数: 采摘(高山变叶海棠嫩芽或碎嫩芽)、杀青(温度为 270 ℃,至含水量为 55%)、揉捻(40 型揉捻机按轻、重、轻进行冷揉,揉捻叶细胞破坏率为 80%)、渥堆(堆高 80 cm,室温 25 ℃,茶坯含水量 35%,渥堆时间为 15 d)、干燥(烘焙 200 ℃,时间 15 min)、筛拼(蒸压成型)、干燥(压饼成型后的俄色茶置于干燥环境,自然干燥)、检验、包装。

1.2.2 电子鼻检测 样品前处理: 取 2.0 g 俄色茶粉装入洁净的 10 mL 顶空瓶,用顶空盖、垫密封,备用。

电子鼻检测条件: 样品在孵化器(70 ℃)内孵化 5 min,进样量 500 μL,进样速度 500 μL/s,手动进样。每个样品检测 120 s,检测器清洁 180 s。每个样品检测 20 次,取 10 次稳定(依据其在主成分二维图中的集中程度)数据进行分析。

1.2.3 GC-MS 检测 样品前处理: 取俄色茶粉 4.0 g 装入 20 mL 顶空瓶,用 GC-MS 专用瓶盖密封,装入自动进样器。备用。

萃取及进样条件: 萃取温度 70 ℃,进样针温度 75 ℃,传输线温度 80 ℃,萃取时间 1800 s,干吹 120 s,解析 10 s,顶空瓶加压/释压 120 s,捕集阱保持 240 s,捕集阱循环 4 次。

气相条件^[17]: 载气(99.999% He),流速 1.0 mL/min。起始温度 30 ℃,保持 3 min,然后以 2 ℃/min 升至 160 ℃,再以 10 ℃/min 升至 230 ℃,保留 3 min。

质谱条件: EI 离子源,电子轰击能量为 70 eV,

离子源温度 230 ℃,电子倍增电压 1650 V;质量扫描范围: 45~450 m/z;标准调谐文件。

定性、定量: 首先去除柱流失的含硅类物质,然后选取正反匹配度均大于 700(最大 999),参考 NIST 2011 谱库,同时结合质谱图进行定性。以相对峰面积计算相对含量。

检测结果有效性选择: 每个样品检测 5 次,仅取 3 次都能检测到的物质作为有效结果。

1.2.4 相对气味活度值(relative odor activity value, ROAV)的计算 相对气味活度值(ROAV)是一种结合阈值判定化合物重要性的方法,其原理及计算方法见参考文献 [18-19]。

$$ROAV = \frac{C}{T}$$

式中: C 表示某物质的相对百分含量; T 表示该物质的呈香阈值。

1.3 数据处理

OPLS-DA 分析、绘图、预测变量重要性投影(variable importance in projection, VIP): SIMCA14.1 软件。平均值及标准偏差($\bar{x} \pm SD$): SPSS 25。电子鼻雷达图、差异性热图: 数据归一化处理及制图采用 origin 2021。

2 结果与分析

2.1 电子鼻分析俄色茶整体气味轮廓

表 2 是电子鼻检测 3 种工艺的俄色茶传感器响应数据,经 OPLS-DA 分析的结果。表中可以看出,传感器(LY2/LG、LY2/G、LY2/AA、LY2/Gh、LY2/gCT、P30/2、TA/2)的响应值差异不显著($P > 0.05$),其他传感器差异则显著($P < 0.05$)。从 VIP 值可知,

表 2 不同工艺俄色茶电子鼻传感器响应值

Table 2 Response value of *Malus toringoides* (Rehd.) Hughes tea electronic nose sensor in different processes

传感器	性能	红茶(A)	绿茶(B)	康砖茶(C)	P-value	VIP
LY2/LG	对氧化能力较强的气体敏感	0.056±0.004	0.052±0.004	0.031±0.005	0.309	1.018
LY2/G	对有毒气体敏感	-0.100±0.004	-0.073±0.004	-0.041±0.003	0.064	0.899
LY2/AA	对有机化合物敏感	-0.018±0.003	-0.027±0.003	-0.015±0.002	0.356	1.929
LY2/Gh	对有毒气体敏感	-0.060±0.003	-0.043±0.003	-0.020±0.005	0.122	0.915
LY2/gCTI	对有毒气体敏感	-0.088±0.004	-0.064±0.004	-0.036±0.002	0.04	0.899
LY2/gCT	对易燃气体敏感	-0.061±0.004	-0.035±0.002	-0.026±0.004	0.224	0.941
T30/1	对极性化合物敏感	0.886±0.005	0.781±0.015	0.665±0.009	0.021	0.896
P10/1	对非极性化合物敏感	0.824±0.013	0.717±0.017	0.628±0.009	0.026	0.903
P10/2	对非极性易燃气体敏感	0.785±0.013	0.698±0.014	0.621±0.011	0.038	0.898
P40/1	对氧化能力较强的气体敏感	0.788±0.017	0.677±0.020	0.583±0.008	0.034	0.901
T70/2	对芳香族化合物敏感	0.843±0.006	0.668±0.021	0.498±0.012	0.03	0.896
PA/2	对有机化合物、有毒气体敏感	0.945±0.006	0.868±0.013	0.788±0.01	0.021	0.893
P30/1	对可燃气体、有机化合物敏感	0.946±0.004	0.840±0.01	0.761±0.007	0.039	0.910
P40/2	对氧化能力较强的气体敏感	0.817±0.006	0.703±0.012	0.610±0.009	0.038	0.902
P30/2	对有机化合物敏感	0.898±0.012	0.753±0.014	0.624±0.006	0.054	0.896
T40/2	对氧化能力较强的气体敏感	0.542±0.009	0.399±0.013	0.348±0.005	0.049	1.010
T40/1	对氧化能力较强的气体敏感	0.598±0.020	0.461±0.027	0.342±0.009	0.039	0.897
TA/2	对有机化合物敏感	0.546±0.024	0.480±0.026	0.373±0.015	0.102	0.894

LY2/LG、LY2/AA、T40/2 这 3 根传感器的值大于 1, 说明其在识别样品中贡献比其他传感器大; 3 个样品在 T40/2 传感器上, 差异显著且 VIP 值大于 1, 说明传感器 T40/2 在识别俄色茶中有重要作用。

图 1 是电子鼻检测结果的传感器数据绘制的雷达图。图中可以看出红茶样品在所有传感器(除 LY2 型)上的响应值均高于其他样品。有研究表明, 电子鼻能快速识别不同香气的茶叶, 茶叶香气越浓郁, 其电子鼻传感器的响应值越高^[20]。说明红茶样品香气浓郁, 其次是绿茶, 康砖茶香气最次。

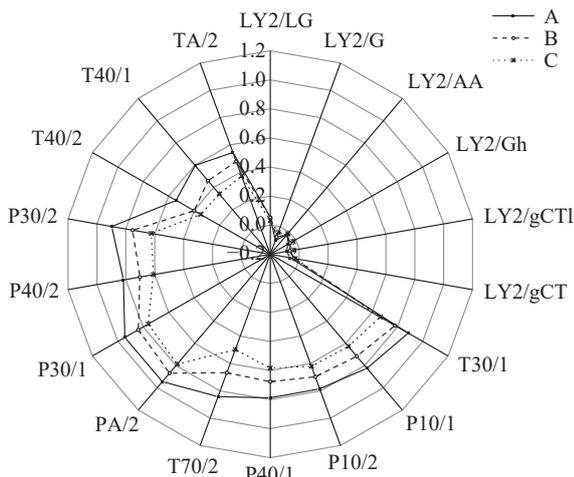


图 1 电子鼻雷达图
Fig.1 Electronic nose radar diagram

图 2 是样品经 OPLS-DA 分析的散点图。3 个样品分布在不同区域, 均无交叉, 这既能说明工艺对俄色茶香气形成的影响大, 又能说明电子鼻能够有效区分样品且重复性良好。3 个样品自变量拟合指数 $R^2X=0.991$, 因变量指数 $R^2Y=0.964$; 模型预测指数 $Q^2=0.957$, 其预测能力为 95.70%。一般认为自变量和因变量拟合指数大于 0.5 即可接受^[21]。

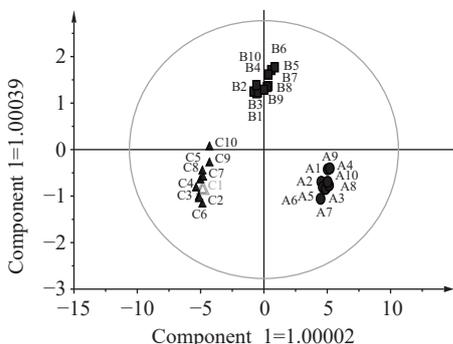


图 2 电子鼻 OPLS-DA 分析
Fig.2 OPLS-DA analysis of electronic nose

图 3 是判别模型经过 300 次(最大 999)置换检验的结果。图中, 所有方形和圆形点横坐标均在大于 0 的位置, Q^2 回归线与 Y 轴的交点小于 0。这说明模型拟合效果好, 模型验证有效。由此可见, 通过电子鼻结合 OPLS-DA 数据模型来区分不同工艺的俄色茶效果良好。

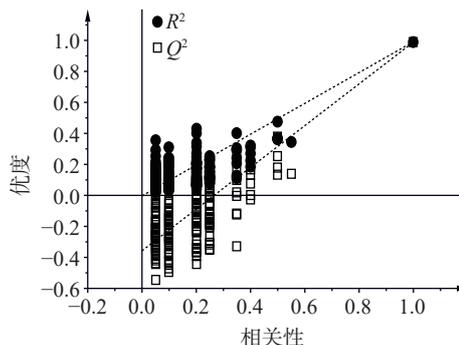


图 3 电子鼻模型交叉验证结果
Fig.3 Cross validation results of electronic nose model

2.2 不同工艺的俄色茶挥发性物质差异分析

GC-MS 对俄色茶挥发性物质的定性及定量检测结果见表 3, 分类见表 4。3 种工艺的俄色茶共鉴定出 98 种挥发性物质, 红茶、绿茶和康砖茶分别鉴定出 52、52 和 52 种; 相对含量分别为 94.01%、90.20% 和 92.98%。其中包括醛类 24 种、酯类 5 种、醇类 16 种、烃类 21 种、酮类 13 种、呋喃 4 种、其他物质 15 种。醛类、酯类、醇类(康砖茶除外)、烃类(康砖茶)是样品主要挥发性物质。共有物质 10 种: 异戊醛、辛醛、2-甲基庚醛、庚醛、三甲氧基酯、癸烷、2,2-二甲基癸烷、2,2,4,4-四甲基辛烷、4-甲基-3-丁烯-2-酮、2-乙基呋喃。这些被检测到的物质、种类、共有物质及含量的差异, 初步反映了 3 种工艺条件下俄色茶气味的差异。

醛类物质生成途径比较复杂, 一般认为醛类物质是微生物发酵时, 不同氨基酸在对应酶作用下生成不同的醛类物质^[22]; 醛类物质也可通过脂肪酸过氧化及降解产生或者是某些不稳定醇被氧化而成为醛类物质^[23]。醛类物质是俄色茶主要挥发性物质, 其含量在 21.33%~48.62% 之间。异戊醛(沸点 92~93 °C)是三个样品主要共有物质, 且含量较高(10.87%、4.75%、10.94%), 在发酵茶中, 特别是红茶^[19] 和黑茶^[24] 中比较常见。异丁醛(沸点 94 °C)是俄色红茶独有的主要挥发性物质, 含量为 13.48%。李慧等^[19] 认为异戊醛、异丁醛是构成红茶果香、甜香、焦糖香的主体香气物质。因此可认为异丁醛是红茶区别于绿茶和康砖茶的关键物质。己醛是红茶和绿茶检测到的共有物质, 含量均大于 7.50%, 在康砖茶中未检出。己醛在大多数茶叶中均有检出, 其含量在红茶中相对较高^[19]。3-甲基-2-丁烯醛(异戊烯醛)是康砖茶中检出的含量很高的物质(11.32%), 是一种具有脂肪香味的物质^[25]; 其在六大茶类^[26-27] 以及一些六大茶类以外的茶(如各种保健茶)中含量均不高^[25,28], 而俄色康砖茶含量高, 但无阈值相关数据, 需要进一步研究。

酯类香气形成^[29] 可能是氨基酸在脱氨、脱羧而氧化形成酸和醇, 最后经过酯合成酶作用, 从而形成酯香。酯类物质在三个样品中种类较少, 但含量高(17.41%~36.53%)。三甲氧基酯在三个样品中的含量均高于 16%, 是含量最高物质, 但无其气味和阈值

表 3 俄色茶挥发性物质差异分析

Table 3 Difference analysis of volatile substances in *Malus toringoides* (Rehd.) Hughes tea

序号	保留时间(min)	CAS	中文名称	红茶(A, %)	绿茶(B, %)	康砖茶(C, %)	分类
1	2.121	78-84-2	异丁醛	13.48±1.00			
2	2.919	16630-91-4	2-甲基庚醛	4.54±0.44	1.98±0.15	0.89±0.17	
3	2.927	123-15-9	2-甲基戊醛			0.21±0.10	
4	3.022	96-17-3	异戊醛	10.87±1.13	4.75±1.47	10.94±0.81	
5	4.518	497-03-0	顺-2-甲基-2-丁醛		0.56±0.02		
6	4.65	107-86-8	3-甲基-2-丁烯醛	0.30±0.04		11.32±1.15	
7	4.743	5435-64-3	3,5,5-三甲基己醛		0.25±0.05		
8	4.758	110-62-3	戊醛			0.63±0.54	
9	4.833	4009-55-6	五-3,4-二烯醛	0.38±0.09		2.15±0.50	
10	4.908	1576-87-0	反式-2-戊烯醛	0.70±0.16	0.34±0.05		
11	6.372	66-25-1	己醛	12.69±2.40	7.51±1.04		
12	7.548	63883-69-2	(E)-2-乙基-2-烯醛		0.85±0.46		醛类
13	7.628	1998-01-1	糠醛	0.77±0.04			
14	8.106	872-53-7	环戊甲醛	0.10±0.02	0.17±0.05		
15	8.659	505-57-7	2-己烯醛	0.78±0.09	0.25±0.06		
16	8.716	6789-80-6	3-己烯醛			0.37±0.11	
17	11.159	6728-31-0	(Z)-4-庚烯醛		0.15±0.01		
18	11.301	111-71-7	庚醛	0.46±0.03	0.65±0.04	0.54±0.11	
19	14.769	100-52-7	苯甲醛	0.81±0.17	0.69±0.24		
20	17.934	124-13-0	辛醛	0.30±0.06	0.75±0.02	1.76±0.39	
21	20.516	122-78-1	苯乙醛	0.27±0.03	0.27±0.04		
22	25.162	42452-48-2	2,4-二甲基庚-2,4-二烯醛			0.23±0.10	
23	25.257	124-19-6	壬醛	2.17±0.39	2.04±0.32		
24	32.585	112-31-2	癸醛		0.12±0.00		
1	1.793	687-47-8	L-乳酸乙酯	0.12±0.06		1.69±0.71	
2	1.871	503-30-0	三甲氧基酯	16.70±0.61	32.29±4.17	17.73±0.54	
3	3.887	109-60-4	乙酸丙酯	0.38±0.04	0.55±0.02		酯类
4	6.499	107-31-3	甲酸甲酯		3.42±1.25		
5	7.010	123-86-4	乙酸丁酯	0.21±0.10	0.27±0.04		
1	2.349	2026-48-4	L-缬氨酸			0.26±0.04	
2	2.454	1569-50-2	3-戊烯-2-醇		1.63±0.89	2.64±0.08	
3	2.899	765-42-4	环丙基甲基甲醇		2.25±0.98		
4	3.322	4415-82-1	环丁基甲醇	7.20±0.56	5.78±0.78		
5	3.334	1576-95-0	顺-2-戊烯-1-醇			0.07±0.03	
6	4.535	123-51-3	异戊醇	0.26±0.03		0.42±0.04	
7	4.563	137-32-6	活性戊醇	0.51±0.04			
8	5.349	71-41-0	戊醇	0.74±0.11	0.58±0.02		醇类
9	5.416	1576-96-1	反-2-戊醇		0.44±0.04		
10	8.834	928-96-1	青叶醇	3.99±0.23	1.17±0.22		
11	16.485	26001-58-1	(2Z)-2-辛烯-1-醇	0.13±0.11			
12	20.066	100-51-6	苯甲醇	0.20±0.04		0.78±0.22	
13	23.043	111-87-5	辛醇			0.24±0.05	
14	25.955	19780-39-3	3-乙基-2-庚醇	0.17±0.06		0.22±0.01	
15	70.813	29783-26-4	顺-4-环戊烯-1,3-二醇		2.08±0.36	0.80±0.22	
16	74.221	3391-86-4	1-辛烯-3-醇(蘑菇醇)	0.89±0.09			
1	2.101	558-30-5	甲基环氧丙烷		6.33±0.33	3.46±0.25	
2	2.476	18631-84-0	1-甲基-2-亚甲基环丙烷			0.38±0.09	
3	5.183	2422-86-8	双环[3.2.0]庚-2,6-二烯			0.66±0.17	
4	5.424	591-93-5	1,4-戊二烯	1.16±0.32		0.28±0.05	烃类
5	5.456	18631-83-9	亚乙基环丙烷			0.18±0.06	
6	6.032	7423-69-0	3,5-二甲基-1-己烯	0.11±0.04		0.39±0.09	
7	8.866	65378-76-9	1,2,4,4-四甲基环戊烯			0.89±0.11	
8	9.437	926-54-5	trans-2-甲基戊二烯	0.36±0.09		2.13±0.09	

续表 3

序号	保留时间(min)	CAS	中文名称	红茶(A, %)	绿茶(B, %)	康砖茶(C, %)	分类
9	9.667	2415-72-7	丙基环丙烷	0.20±0.03		1.54±0.04	
10	15.737	5911-04-6	3-甲基壬烷	0.09±0.03		7.68±1.04	
11	16.836	17302-37-3	2,2-二甲基癸烷	4.99±0.60	1.03±0.42	0.22±0.05	
12	17.776	124-18-5	癸烷	0.29±0.06	0.29±0.02	0.33±0.08	
13	18.439	13643-08-8	2,4-辛二烯	0.18±0.06	0.13±0.05		
14	19.410	62183-79-3	2,2,4,4-四甲基辛烷	0.69±0.22	0.24±0.05	0.10±0.03	
15	19.490	5989-27-5	D-柠檬烯		0.18±0.02	0.39±0.02	
16	19.918	62108-25-2	2,6,7-三甲基癸烷	0.32±0.09			
17	22.735	34825-93-9	3-(溴甲基)环己烯			0.14±0.07	
18	25.020	629-50-5	正十三烷		0.25±0.04		
19	30.139	1002-43-3	3-甲基十一烷	0.22±0.08			
20	32.330	62108-22-9	2,5,9-三甲基癸烷	0.28±0.07			
21	58.419	62108-26-3	2,6,8-三甲基癸烷			0.34±0.09	
1	2.311	78-93-3	2-丁酮		2.86±0.18		
2	4.475	3102-33-8	4-甲基-3-丁烯-2-酮	0.21±0.04	0.17±0.03	0.71±0.19	
3	4.773	565-69-5	2-甲基-3-戊酮	0.69±0.12			
4	6.284	4359-77-7	3-亚甲基-2-酮	0.14±0.01	0.59±0.03		
5	8.261	110-93-0	甲基庚烯酮	0.36±0.04	0.30±0.03		
6	10.653	110-43-0	2-庚酮		0.12±0.02		
7	10.743	10493-98-8	2-羟基-2-环戊烯-1-酮			2.21±0.48	酮类
8	16.703	10408-15-8	6-甲基-6-庚-2-酮			0.18±0.03	
9	19.913	2408-37-9	2,2,6-三甲基环己酮			0.39±0.03	
10	22.094	98-86-2	苯乙酮			0.11±0.02	
11	22.652	30086-02-3	3,5-辛二烯-2-酮		0.15±0.00		
12	24.421	38284-27-4	3,5-辛二烯酮	0.14±0.07	0.10±0.03		
13	26.225	78-59-1	异佛尔酮			1.60±0.30	
1	3.570	3208-16-0	2-乙基呋喃	1.88±0.62	2.25±1.36	8.38±0.58	
2	4.803	930-27-8	3-甲基呋喃		0.62±0.07		呋喃
3	16.953	3777-69-3	2-正戊基呋喃		0.29±0.01		
4	17.553	70424-14-5	(E)-2-(2-戊烯基)呋喃			0.28±0.02	
1	1.768	64-18-6	甲酸	0.27±0.04	0.77±0.18		
2	2.789	115-10-6	二甲醚	0.11±0.08	0.79±0.05		
3	5.559	13218-13-8	硝基乙腈			0.37±0.03	
4	7.225	646-07-1	4-甲基戊酸		0.17±0.05		
5	7.308	5390-28-3	2-硝基乙醇丙酸盐		0.32±0.04	0.23±0.14	
6	9.350	108-38-3	间二甲苯	0.11±0.02	0.15±0.05		
7	10.488	7714-32-1	苯乙基甲基亚砷			3.08±0.59	
8	10.506	106-42-3	对二甲苯	0.22±0.13	0.08±0.03		其他
9	13.097	95-65-8	3,4-二甲基苯酚			0.48±0.15	
10	18.187	71487-16-6	3-甲基-4-戊醇醋酸盐	0.17±0.07			
11	22.987	4810-09-7	3-甲基-1-庚烯		0.10±0.03	0.19±0.02	
12	25.91	527-53-7	1,2,3,5-四甲基苯			0.14±0.04	
13	30.226	91-20-3	萘		0.13±0.02		
14	38.132	91-57-6	2-甲基萘			0.48±0.09	
15	70.703	2443-40-5	3-甲基环氧乙烷-2-羧酸	0.71±0.27		1.15±0.18	

相关数据。三甲氧基酯在金牡丹^[30]及铁观音^[31]中有检出。甲酸甲酯是一种具有甜香、青果香气的物质,仅在俄色绿茶中有检出,且含量较高(3.42%)。

茶叶中醇类物质的形成:蛋白质水解成氨基酸以及氨基酸与酶、邻醌等作用生成醇类物质^[32]。醇类物质含量在 5.43%~14.09% 之间,通常具有花、果气息。红茶和绿茶共有物质 3 种,环丁基甲醇、青叶醇是含量较高的物质(>1%)。红茶与康砖茶共有物

质 2 种,为苯甲醇,3-戊烯-2-醇(>1.50%)。绿茶与康砖茶共有物质 1 种:顺-4-环戊烯-1,3-二醇。

三个样品均检测到烃类物质,其含量均大于 8%。康砖茶烃类物质含量最高(19.30%)。烃类物质中以烷烃为主,一般认为烷烃类物质阈值较高^[33],其可能对康砖茶香气形成贡献较小。

2.3 俄色茶 ROAV 分析及差异比较

为探明 3 种工艺的俄色茶中各挥发性组分对样

表 4 俄色茶挥发性物质种类及相对含量

Table 4 Types and relative content of volatile substances in *Malus toringoides* (Rehd.) Hughes tea

类别	红茶(A)		绿茶(B)		康砖茶(C)	
	种类	含量(%)	种类	含量(%)	种类	含量(%)
醛类	15	48.62	16	21.33	10	29.04
酯类	4	17.41	4	36.53	2	19.42
醇类	9	14.09	7	13.93	8	5.43
烃类	12	8.89	7	8.55	16	19.30
酮类	5	1.54	7	4.29	6	5.20
呋喃	1	1.88	3	3.16	2	8.66
其他	6	1.59	8	2.41	8	5.93
合计	52	94.01	52	90.20	52	92.98

品整体香气贡献,实验结合挥发性物质的气味阈值、香气描述以及香气类型,对 52 种(能检索到阈值)挥发性物质进行分析,结果见表 5。红茶、绿茶、康砖茶分别检测到 28、35、19 种有阈值的香气物质。根据香气描述和香气类型:果香(17 个)、腥香(8 个)、焙烤香(6 个)、异香(4 个)、花香(3 个)、焦香(2 个)、迷香(1 个)、奶香(1 个)、肉香(1 个)、焦糖香(1 个)、烟香(1 个);果香、腥香和焙烤香是样品主要香气。依据香气类型和 ROAV 值,果香(12160768)、甜香焦糖香(8986444)、腥香(596098)对红茶气味的形成相对贡献较大;对红茶香气贡献最大的 10 种物质是异戊醛、异丁醛、壬醛、1-辛烯-3-醇、辛醛、己醛、庚醛、异戊醇、苯乙醛、活性戊醇;果香(6297561)、花

表 5 俄色茶香气成分的 ROAV 分析

Table 5 ROAV analysis of aroma components of *Malus toringoides* (Rehd.) Hughes tea

序号	中文名称	阈值(g·kg ⁻¹)	红茶(A)	绿茶(B)	康砖茶(C)	香气描述	香气类型
1	异丁醛	0.000015	8986444.44	0.00	0.00	焦糖、可可	甜香、焦糖香
2	甲酸	2.44	0.11	0.32	0.00	-	-
3	反-2-戊醇	0.0000892	0.00	4970.10	0.00	-	-
4	二甲醚	0.303967	0.35	2.59	0.00	轻微醚香味	迷香
5	癸醛	0.000003	0.00	40555.56	0.00	青草味	腥香
6	2-丁酮	0.0354	0.00	80.80	0.00	奶油味	奶香
7	3-戊烯-2-醇	0.0004	0.00	4078.33	6594.17	草青味	腥香
8	2-甲基戊醛	0.0000032	0.00	0.00	65312.50	果香	果香
9	异戊醛	0.0000011	9881515.15	4318484.85	9945757.58	果香	果香
10	顺-2-戊烯-1-醇	0.00072	0.00	0.00	90.28	脂香味	焙烤香
11	2-乙基呋喃	0.008	235.21	281.54	1046.88	烧焦味	焦香
12	乙酸丙酯	0.002	187.50	274.33	0.00	水果味	果香
13	异戊醇	0.000004	63750.00	0.00	105333.33	水果香	果香
14	活性戊醇	0.0000159	31823.90	0.00	0.00	水果香	果香
15	2-甲基-3-戊酮	0.00008	8645.83	0.00	0.00	-	-
16	顺-2-甲基-2-丁醛	0.00046	0.00	1227.54	0.00	苹果香	果香
17	戊醛	0.000012	0.00	0.00	52472.22	杏仁、麦芽、脂香	焙烤香
18	反式-2-戊烯醛	0.00098	712.93	344.22	0.00	胶臭味	异香
19	戊醇	0.0001502	4906.79	3854.86	0.00	果香	果香
20	己醛	0.000073	173803.65	102899.54	0.00	苹果、鲜香	果香
21	甲酸甲酯	0.49	0.00	6.99	0.00	芳香	花香
22	乙酸丁酯	0.000058	3534.48	4609.20	0.00	杏仁、青草	焙烤香
23	糠醛	0.009562	80.70	0.00	0.00	水果香	果香
24	4-甲基戊酸	0.00081	0.00	209.88	0.00	似红糖香	焦香
25	2,2,6-三甲基环己酮	0.0001	0.00	0.00	3923.33	-	-
26	苯乙酮	0.000065	0.00	0.00	1692.31	蘑菇味	腥香
27	2-己烯醛	0.00003	26000.00	8300.00	0.00	苹果	果香
28	青叶醇	0.0019	2097.54	614.39	0.00	青草	腥香
29	间二甲苯	0.001	112.67	146.00	0.00	塑料味	异香
30	3-己烯醛	0.00000021	0.00	0.00	1750793.65	青草味	腥香
31	对二甲苯	0.001	216.00	81.33	0.00	坚果味	果香
32	2-庚酮	0.00014	0.00	854.76	0.00	坚果味	果香
33	(Z)-4-庚烯醛	0.00004	0.00	3800.00	0.00	油脂味	肉香
34	庚醛	0.0000028	165833.33	231428.57	193095.24	脂香、坚果香	焙烤香
35	3,4-二甲基苯酚	0.0012	0.00	0.00	399.72	-	-
36	苯甲醛	0.00075089	1079.16	915.36	0.00	樱桃	果香
37	甲基庚烯酮	0.000068	5284.31	4338.24	0.00	柑橘香、青草	果香
38	2-正戊基呋喃	0.0000058	0.00	49770.11	0.00	可可、烧烤味	焙烤香

续表 5

序号	中文名称	阈值(g·kg ⁻¹)	红茶(A)	绿茶(B)	康砖茶(C)	香气描述	香气类型
39	癸烷	0.01	29.00	29.10	33.40	汽油味	异香
40	辛醛	0.000000587	508233.96	1275411.70	3001135.72	芳香	花香
41	2,4-辛二烯	0.012	14.64	11.00	0.00	-	-
42	苯甲醇	0.00254621	78.81	0.00	306.60	果香、焙烤味	焙烤香
43	D-柠檬烯	0.000034	0.00	5421.57	11421.57	柑橘、水果味	果香
44	苯乙醛	0.0000063	43333.33	42116.40	0.00	风信子、水仙花	花香
45	3,5-辛二烯-2-酮	0.00015	0.00	995.56	0.00	-	-
46	辛醇	0.0001258	0.00	0.00	1923.69	柑橘味	果香
47	异佛尔酮	0.011	0.00	0.00	145.21	刺激性气味	异香
48	萘	0.000006	0.00	21444.44	0.00	香辛味、烟味	烟香
49	正十三烷	0.042	0.00	5.92	0.00	青草味	腥香
50	壬醛	0.0000011	1972121.21	1850909.09	0.00	青香、柠檬	果香
51	2-甲基萘	0.000003	0.00	0.00	159777.78	青草味、霉味	腥香
52	1-辛烯-3-醇	0.0000015	594000.00	0.00	0.00	蘑菇、泥土	腥香

注: 所有阈值数据均来自文献[34], “-”表示没有查阅到其香气类型。

香(1317535)、焙烤香(285808)对绿茶气味的形成相对贡献较大;对绿茶贡献最大的10种物质是异戊醛、壬醛、辛醛、庚醛、己醛、2-正戊基呋喃、苯乙醛、癸醛、萘、2-己烯醛;果香(10129749)、花香(3001136)、腥香(1918858)对康砖茶气味的形成贡献相对较大;对康砖茶香气贡献最大的10种香气物质是异戊醛、辛醛、3-己烯醛、庚醛、2-甲基萘、异戊醇、2-甲基戊醛、戊醛、D-柠檬烯、3-戊烯-2-醇。果香类物质对俄色茶气味的形成贡献大,醛、醇是俄色茶香气的主要来源。异戊醛、辛醛、庚醛是3种俄色茶共有主要香气物质,且异戊醛是含量最高(有气味)的物质。可以推测异戊醛可能是俄色茶关键香气

物质。

2.4 挥发性物质差异性分析

根据表4的分类,选取每个样品中每类含量前5的物质^[35]进行差异性热图分析,其结果见图4。由图4各种物质丰度可知,三甲氧基酯、异戊醛、2-乙基呋喃是3个样品的主要共有挥发性物质。除共有物之外,红茶主要挥发性物质是异丁醛、己醛、环丁基甲醇、2,2-二甲基癸烷、叶醇、2-甲基庚醛、2-乙基呋喃;绿茶主要挥发性物质是己醛、环丁基甲醇、2-乙基呋喃、甲基环氧丙烷、甲酸甲酯、环丙基甲基甲醇;康砖茶主要挥发性物质为2-乙基呋喃、trans-2-甲基戊二烯、L-乳酸乙酯、甲基环氧丙烷、3-戊烯-2-

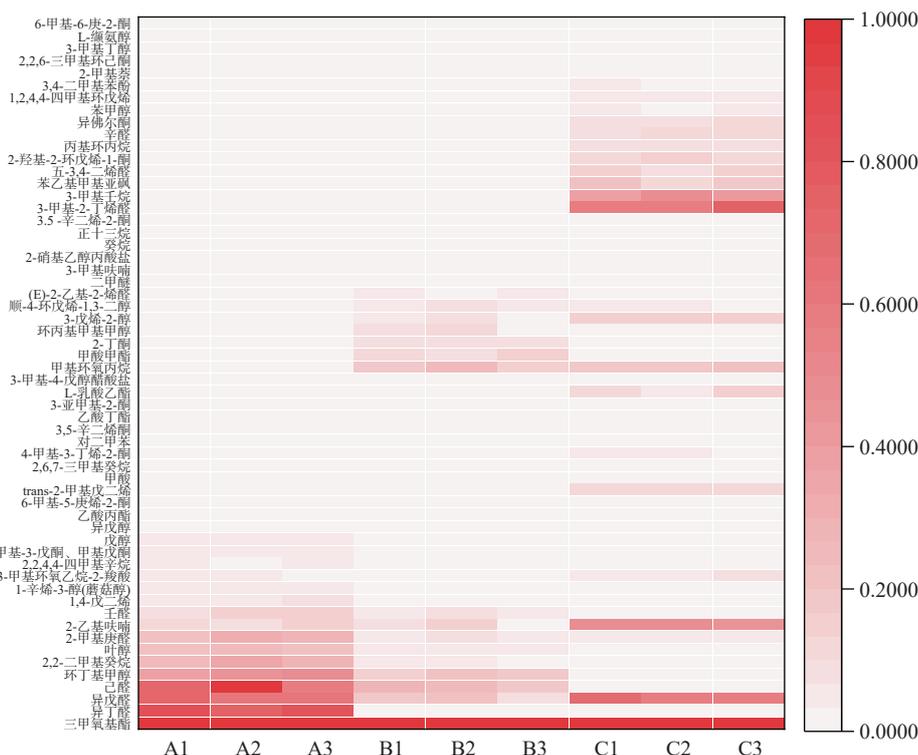


图4 挥发性物质差异性热图分析

Fig.4 Differential thermogram analysis of volatile substances

醇、3-甲基-2-丁烯醛、3-甲基壬烷、苯乙基甲基亚砷、五-3,4-二烯醛、2-羟基-2-环戊烯-1-酮、辛醛、异佛尔酮。

2,2-二甲基癸烷、叶醇、2-甲基庚醛、甲基环氧丙烷、甲酸甲酯、环丙基甲基甲醇的丰度反应了红茶、绿茶的差异。己醛、环丁基甲醇、trans-2-甲基戊二烯、L-乳酸乙酯、3-戊烯-2-醇、3-甲基-2-丁烯醛、3-甲基壬烷、苯乙基甲基亚砷、五-3,4-二烯醛、2-羟基-2-环戊烯-1-酮、辛醛、异佛尔酮的丰度反应了绿茶、康砖茶的差异。红茶、康砖茶的差异与绿茶、康砖茶类似,仅在绿茶、康砖茶差异的基础上增加了叶醇、甲基环氧丙烷。纵观整个热图,3个样品差异明显。

3 结论

实验以俄色茶为研究对象,通过电子鼻和 GC-MS 分析,结合 OPLS-DA、ROAV、差异性热图等方法对俄色茶整体气味轮廓进行识别和鉴定具体挥发性物质。电子鼻雷达图及 OPLS-DA 分析表明不同工艺的俄色茶差异明显。GC-MS 检测表明三种处理方式分别鉴定出 52、52 和 52 种,共计 98 种挥发性物质;醛类、酯类、烃类是俄色茶主要挥发性物质,醇类是红茶、绿茶主要挥发性物质;醛类、酯类、烃类和醇类的含量差异是导致不同工艺俄色茶香气异同的主要原因。ROAV 值结合香气类型分析表明:果香、甜香和腥香对红茶香气的形成贡献较大,果香、花香、焙烤香对绿茶香气的形成贡献较大,果香、花香和腥香对康砖茶香气的形成贡献较大;果香对俄色茶香气的形成相对贡献较大,异戊醛可能是俄色茶的关键香气物质。差异性热图分析表明三甲氧基酯、异戊醛、2-乙基呋喃是 3 个样品主要共有挥发性物质。

三甲氧基酯是俄色茶含量最高的共有物质,3-甲基-2-丁烯醛(有气味的相关报道)是康砖茶中含量较高的物质(11.32%),但目前没有其气味及阈值相关报道,故无法判断其在俄色茶中具体作用。下一步课题组将结合 GC-O 对其进行进一步研究。

参考文献

[1] 嘎务. 藏药晶镜本草: 藏文[M]. 北京: 民族出版社, 1995. [GA W. Tibetan medicine crystal mirror herb: Tibetan[M]. Beijing: Ethnic Publishing House, 1995.]

[2] 周海玉, 李敏, 蔡晓洋, 等. 藏药俄色果对急性酒精性肝损伤小鼠的保护作用及其机制初探[J]. 中药材, 2016(1): 193-196. [ZHOU H Y, LI M, CAI X Y, et al. Preliminary study on the protective effect and mechanism of Tibetan medicine Oseko on mice with acute alcoholic liver injury[J]. Traditional Chinese Medicine, 2016(1): 193-196.]

[3] LI D, PENG C, XIE X, et al. Antidiabetic effect of flavonoids from *Malus toringoides* (Rehd.) Hughes leaves in diabetic mice and rats[J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2014, 153(3): 561-567.

[4] WANG H, XU Q, CHAI C, et al. Nutritional components of fruits and leaves of *Malus toringoides* and *Malus transitoria* in west-east Sichuan[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2010, 46(8): 157-161.

[5] 夏冬梅, 李敏, 王道清, 等. 藏药俄色叶中根皮苷、根皮素含量分析[J]. 中国现代中药, 2014(8): 618-622. [XIA D M, LI M, WANG D Q, et al. Analysis of phloridzin and phloridzin contents in the leaves of Tibetan medicine Ruse[J]. *Modern Chinese Medicine*, 2014(8): 618-622.]

[6] 温馨, 田甜, 沈悦, 等. 超声波辅助提取变叶海棠中总黄酮工艺优化及抗氧化活性研究[J]. 天然产物研究与开发, 2016, 28(3): 452-456, 461. [WEN X, TIAN T, SHEN Y, et al. Optimization of ultrasonic assisted extraction process and antioxidant activity of total flavonoids from *Begonia variabilis*[J]. *Research and Development of Natural Products*, 2016, 28(3): 452-456, 461.]

[7] 宛晓春. 茶叶生物化学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003. [WAN X C. Tea biochemistry[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2003.]

[8] 郭雯飞. 茶叶香气生成机理的研究[J]. 中国茶叶加工, 1996(4): 34-37. [GUO W F. Study on the mechanism of tea aroma generation[J]. *China Tea Processing*, 1996(4): 34-37.]

[9] 王力, 林智, 吕海鹏, 等. 茶叶香气影响因子的研究进展[J]. 食品科学, 2010(15): 293-298. [WANG L, LIN Z, LÜ H P, et al. Research progress in influencing factors of tea aroma[J]. *Food Science*, 2010(15): 293-298.]

[10] 施梦南, 龚淑英. 茶叶香气研究进展[J]. 茶叶, 2012, 38(1): 19-23. [SHI M N, GONG S Y. Research progress in tea aroma[J]. *Tea*, 2012, 38(1): 19-23.]

[11] 郭洪伟, 田云刚, 王建霞, 等. 不同工艺古丈毛尖红茶与绿茶的香气成分分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(1): 19-28. [GUO H W, TIAN Y G, WANG J X, et al. Analysis of aroma components of Guzhang Maojian black tea and green tea with different processes[J]. *Journal of Food Safety and Quality Inspection*, 2020, 11(1): 19-28.]

[12] 乔小燕, 操君喜, 车劲, 等. 基于滋味和香气成分结合化学计量法鉴别不同贮藏年份的康砖茶[J]. 现代食品科技, 2020, 36(9): 260-269, 299. [QIAO X Y, CAO J X, CHE J, et al. Identification of Kangzhan tea in different storage years based on taste and aroma components combined with chemometric method[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2020, 36(9): 260-269, 299.]

[13] 陆晨浩, 王曦如, 仲梦涵, 等. 基于 GC-MS 和电子感官技术分析发芽对黑麦茶风味的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(10): 192-197. [LU CH H, WANG X R, ZHONG M H, et al. Analysis of the effect of germination on the flavor of rye tea based on GC-MS and electronic sensory technology[J]. *Food Science*, 2020, 41(10): 192-197.]

[14] 邵淑贤, 徐梦婷, 林燕萍, 等. 基于电子鼻与 HS-SPME-GC-MS 技术对不同产地黄观音乌龙茶香气差异分析[J/OL]. 食品科学: 1-12 [2022-10-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.ts.20220621.1725.047.html>. [SHAO S X, XU M T, LIN Y P, et al. Analysis of aroma difference of Huangguanyin Oolong tea from different places based on electronic nose and HS-SPME-GC-MS technology[J/OL]. *Food Science*: 1-12 [2022-10-03] <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.ts.20220621.1725.047.html>.]

[15] WANG K, LIU F, LIU Z, et al. Comparison of catechins and volatile compounds among different types of tea using high performance liquid chromatograph and gas chromatograph mass spectrometer[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2011, 46(7): 1406-1410.

[16] DB 5133/T 50-2021, 地理标志产品—炉霍雪域俄色茶生产技术规程[S]. [DB 5133/T 50-2021, Technical procedures for the production of luhuo snow region russian tea as a product of geo-

- graphical indications[S].]
- [17] 王小会, 张丽霞, 孙庆娜. 干燥温度对景天三七茶香气的影响[J]. 食品研究与开发, 2013, 34(8): 28-32. [WANG X H, ZHANG L X, SUN Q N. Effect of drying temperature on the aroma of Jingtian Sanqi tea[J]. Food Research and Development, 2013, 34(8): 28-32.]
- [18] WANG W, QIAO W U, DONG Q, et al. Effect of processing conditions on the key flavor compounds of baked quail eggs as analyzed by "ROAV" method[J]. Food Science, 2013, 34(22): 234-238.
- [19] 李慧, 聂拟宁, 熊丙全, 等. 摇青工艺对“崇庆枇杷茶”加工红茶的香气品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(2): 188-195. [LI H, NIE Z N, XIONG B Q, et al. Effect of shaking green process on the aroma quality of "Chongqing Loquat Tea" processed black tea[J]. Food and Fermentation Industry, 2021, 47(2): 188-195.]
- [20] WANG S Y, ZHAO F, WU W X, et al. Comparison of volatiles in different jasmine tea grade samples using electronic nose and automatic thermal desorption-gas chromatography-mass spectrometry followed by multivariate statistical analysis[J]. Molecules, 2020, 25(2): 380.
- [21] YUN J, CUI C J, ZHANG S H, et al. Use of headspace GC/MS combined with chemometric analysis to identify the geographic origins of black tea[J]. Food Chemistry, 2021, 360: 130033.
- [22] 范文来, 徐岩. 酒类风味化学[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2014. [FAN W L, XU Y. Flavor chemistry of alcohol[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2014.]
- [23] 徐春晖, 王远兴. 基于 GC-MS 结合化学计量学方法鉴别 3 种江西名茶[J]. 食品科学, 2020, 41(20): 141-150. [XU C H, WANG Y X. Identification of three kinds of famous tea in Jiangxi based on GC-MS and chemometrics[J]. Food Science, 2020, 41(20): 141-150.]
- [24] 舒娜. 六堡茶关键风味物质研究[D]. 重庆: 西南大学, 2021. [SHU N. Research on key flavor substances of Liubao tea[D]. Chongqing: Southwest University, 2021.]
- [25] 梁贵秋, 李全, 陆飞, 等. 桑叶茶挥发性成分的 GC-MS 分析[J]. 现代食品科技, 2013, 29(5): 1157-1159, 1177. [LIANG G Q, LI Q, LU F, et al. GC-MS analysis of volatile components of mulberry leaf tea[J]. Modern Food Science and Technology, 2013, 29(5): 1157-1159, 1177.]
- [26] 孟雪莉. 雅安藏茶色香味品质研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2019. [MENG X L. Study on the quality of Ya'an Tibetan tea[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2019.]
- [27] 刘珍珍. 汉中绿茶加工过程中风味物质的形成与变化分析[D]. 汉中: 陕西理工大学, 2020. [LIU Z Z. Analysis on the formation and change of flavor substances during the processing of Hanzhong green tea[D]. Hanzhong: Shanxi University of Science and Technology, 2020.]
- [28] 邓媛元, 张雁, 汤琴, 等. 干燥方式对苦瓜茶感官品质及挥发性物质的影响[J]. 中国食品学报, 2019, 19(2): 173-184. [DENG Y Y, ZHANG Y, TANG Q, et al. Effects of drying methods on the sensory quality and volatile substances of balsam pear tea[J]. Chinese Journal of Food, 2019, 19(2): 173-184.]
- [29] 高丽萍, 夏涛. 茉莉花香气形成机理及其影响因素初探[J]. 茶业通报, 2000(3): 13-16. [GAO L P, XIA T. Preliminary study on the formation mechanism of jasmine fragrance and its influencing factors[J]. Tea Industry Bulletin, 2000(3): 13-16.]
- [30] 林家正, 涂政, 陈琳, 等. 红光萎凋对茶叶挥发性成分及其成品红茶品质的影响[J]. 茶叶科学, 2021, 41(3): 393-405. [LIN J Z, TU Z, CHEN L, et al. The effect of red light withering on the volatile components of tea and the quality of finished black tea[J]. Tea Science, 2021, 41(3): 393-405.]
- [31] 王蔚, 黄旭建, 林允志, 等. 铁观音茶梗中挥发性物质分析[J]. 热带作物学报, 2019, 40(5): 965-972. [WANG W, HUANG X J, LIN Y Z, et al. Analysis of volatile substances in Tieguanyin tea stem[J]. Journal of Tropical Crops, 2019, 40(5): 965-972.]
- [32] 李丹, 陈岗, 练学燕, 等. 自动化生产线加工过程中“川红芽茶”主要品质成分变化及回归分析[J]. 食品工业科技, 2015, 36(23): 79-83, 88. [LI D, CHEN G, LIAN X Y, et al. Change and regression analysis of main quality components of "Sichuan red bud tea" in the process of automatic production line processing[J]. Food Industry Science and Technology, 2015, 36(23): 79-83, 88.]
- [33] 王丽丽, 张应根, 杨军国, 等. 顶空固相微萃取/气相色谱——质谱联用法分析绿茶和白茶香气物质[J]. 茶叶学报, 2017, 58(1): 1-7. [WANG L L, ZHANG Y G, YANG J G, et al. Analysis of aroma substances in green tea and white tea by headspace solid phase microextraction/gas chromatography-mass spectrometry[J]. Journal of Tea Science, 2017, 58(1): 1-7.]
- [34] 里奥·范海默特. 化合物嗅觉阈值汇编[M]. 北京: 科学出版社, 2018: 1-659. [LEO V H. Compilation of olfactory threshold of compounds[M]. Beijing: Science Press, 2018: 1-659.]
- [35] ZHANG X, WEI J P, ZHAO S Y, et al. Flavor differences between commercial and traditional soybean paste[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 142: 111052.