

不同地区康普茶挥发性物质分析

伍小丫, 张悦, 张玮, 田文欣, 王鹏, 张宝善, 张海生, 赵育

Analysis of Volatile Components of Kombucha in Different Regions

WU Xiaoya, ZHANG Yue, ZHANG Wei, TIAN Wenxin, WANG Peng, ZHANG Baoshan, ZHANG Haisheng, and ZHAO Yu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023050254>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

凤冈锌硒茶挥发性成分提取及其香气成分分析

Extraction of Volatile Compounds and Analysis of Aroma Characteristics in Fenggang Zinc–Selenium Tea

食品工业科技. 2023, 44(18): 342–351 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022100238>

顶空固相微萃取–气相色谱–质谱法分析杜仲叶茯砖茶加工过程中挥发性成分

Analysis of Volatile Components in the Manufacturing Process of *Eucommia ulmoides* Leaves Fuzhuan Tea Based on Headspace Solid Phase Microextraction/Gas Chromatography–Mass Spectrometry Method

食品工业科技. 2023, 44(1): 96–108 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022030409>

不同树龄梁平柚果皮精油挥发性成分的差异分析

Difference Analysis of Volatile Components of Essential Oil of Liangping Pomelo Peel with Different Tree Ages

食品工业科技. 2020, 41(1): 17–24 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.01.004>

顶空固相微萃取结合气相色谱–质谱联用法对3种洋葱挥发性风味成分的分析

Analysis of Volatile Flavor Components in Three Onion by Headspace Solid Phase Microextraction Combined with Gas Chromatography–Mass Spectrometry

食品工业科技. 2022, 43(2): 319–327 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021070239>

基于HS–SPME–GC–MS和多元统计分析三种红茶特征挥发性成分

Analysis of Characteristic Volatile Components of Three Kinds of Black Tea Based on HS–SPME–GC–MS and Multivariate Statistics

食品工业科技. 2023, 44(17): 342–350 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022110267>

不同甜香风味特征的酱香型白酒中挥发性物质分析

Analysis of Volatile Compounds in Sauce–flavor Baijiu with Different Sweet Flavor Characteristics

食品工业科技. 2022, 43(18): 311–321 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022030067>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

伍小丫, 张悦, 张玮, 等. 不同地区康普茶挥发性物质分析 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(15): 244–252. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023050254

WU Xiaoya, ZHANG Yue, ZHANG Wei, et al. Analysis of Volatile Components of Kombucha in Different Regions [J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(15): 244–252. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023050254

· 分析检测 ·

不同地区康普茶挥发性物质分析

伍小丫¹, 张 悅¹, 张 玮¹, 田文欣¹, 王 鹏¹, 张宝善¹, 张海生^{1,2}, 赵 育^{1,*}

(1. 陕西师范大学食品工程与营养科学学院, 陕西西安 710119;

2. 农业农村部富硒产品开发与质量控制重点实验室, 安康市富硒产品研发中心, 陕西安康 725000)

摘要: 本研究采用顶空固相微萃取法结合气相色谱-质谱技术, 通过强极性色谱柱 DB-WAX 分离鉴定康普茶的挥发性成分, 使用香气活性值 (odor activity value, OAV) 结合化学计量学, 以探究不同地区康普茶的挥发性物质构成和特征性差异物质。结果表明: 不同地区康普茶挥发性物质存在明显差异, 共鉴定出 56 种挥发性物质, 主要为醇类、酸类、酯类和酚类物质, 借助于香气活性值筛选出 32 种对康普茶风味有贡献的物质 (OAV ≥ 1), 不同地区康普茶除乌鲁木齐和威海康普茶外异戊酸乙酯的 OAV 都较高, 对不同地区康普茶的风味构成有重要作用。同时使用偏最小二乘判别分析 (partial least squares discrimination analysis, PLS-DA), 筛选出 17 种变量重要性大于 1 的差异标记物。基于 OAV 和 PLS-DA 结果, 筛选出 14 种康普茶的特征性差异物质: 3-甲基-1-丁醇、2-乙基-1-己醇、苯乙醇、壬醇、乙酸、3-甲基丁酸、辛酸、乙酸乙酯、乙酸异戊酯、辛酸乙酯、苯乙酸乙酯、呋喃甲醛、2,6-二叔丁基对甲苯酚和 4-乙基苯酚。研究结果将为康普茶的优质化生产以及特色品牌的构建提供理论参考依据。

关键词: 康普茶, 气相色谱-质谱联用, 不同地区, 挥发性物质, 偏最小二乘判别分析, 特征香气

中图分类号: TS272

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)15-0244-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023050254

本文网刊: 

Analysis of Volatile Components of Kombucha in Different Regions

WU Xiaoya¹, ZHANG Yue¹, ZHANG Wei¹, TIAN Wenxin¹, WANG Peng¹, ZHANG Baoshan¹,
ZHANG Haisheng^{1,2}, ZHAO Yu^{1,*}

(1. College of Food Engineering and Nutritional Science, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China;

2. Key Laboratory of Se-enriched Products Development and Quality Control, Ministry of Agriculture and Rural Affairs,
Ankang Selenium-rich Product Research and Development Center, Ankang 725000, China)

Abstract: In this study, headspace solid phase micro-extraction (HS-SPME) combined with gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) was adopted to separate and identify the volatile components of Kombucha by using polar column DB-WAX. Then, odor activity value (OAV) combined with stoichiometry was used to explore the volatile substance composition and characteristic differential substances of Kombucha in different regions. The results showed that there were significant differences between the volatile substances of Kombucha in different regions. A total of 56 kinds of volatile substances were detected, mainly alcohols, acids, esters and phenols. The OAV results showed that 32 kinds of substances contributed to the flavor for Kombucha (OAV ≥ 1), the OAV of ethyl isovalerate of Kombucha in different regions was highest except for Urumqi and Weihai, it might play an important role in the flavor composition of Kombucha in different regions. Furthermore, with partial least squares discrimination analysis (PLS-DA), 17 variables with importance values greater than 1 as differential markers were identified. By integrating the results of OAV and PLS-DA, a total of 14 characteristic compounds of Kombucha were screened out, namely 3-methyl-1-butanol, 2-ethyl-1-hexanol, phenethyl alcohol, nonanol, acetic acid, 3-methylbutyric acid, caprylic acid, ethyl acetate, isopentyl acetate, ethyl caprylate, ethyl phenylacetate, furan formaldehyde, 2,6-di-tert-butyl-p-cresol, and 4-ethylphenol. The research results will provide

收稿日期: 2023-05-25

基金项目: 陕西省重点研发计划一般项目 (2023-YBNY-195); 陕西特色果品干制及精深加工关键技术研究与示范 (2023-ZDLNY-42); 农业农村部富硒产品开发与质量控制重点实验室项目 (Se-2021C06); 陕西省重点研发计划项目 (2022NY-144)。

作者简介: 伍小丫 (1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品发酵, E-mail: 2378807520@qq.com。

* 通信作者: 赵育 (1988-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 食品发酵, 食品微生物, E-mail: yuzhao@snnu.edu.cn。

theoretical reference for the standardization, high-quality production and construction of characteristic brands of Kombucha.

Key words: Kombucha; gas chromatography-mass spectrometry; different regions; volatile components; partial least squares-discriminant analysis; characteristic aroma

康普茶是糖茶水经酵母、乳酸菌和醋酸菌的共生菌群发酵而成的茶饮料^[1], 酸甜爽口且风味独特, 具有保护肝脏、抗菌、抗氧化和抗癌等功效^[2-3]。复杂的微生物共生关系及其发酵过程促进了康普茶独特风味的形成, 包括醇、醛的形成, 以及醇、醛向酸、酯的转化^[4], 这些化学物质的形成与转化, 是决定康普茶品质与风味的重要因素之一^[5]。

近年来, 鉴于康普茶的健康效益以及独特风味, 研究者们对其展开了广泛的研究, 主要包括康普茶的发酵条件及其影响^[6-7]、工艺优化及新产品的研发^[8-9]、微生物菌群及代谢^[10-12]、化学成分及其保健功效^[13-15]。随着消费者对康普茶感官品质要求的进一步提高, 其挥发性成分的研究也越来越受到重视。邓雯瑾等^[16]研究发现康普茶挥发性物质发酵前以醇类、萜烯类和含氮化合物为主, 发酵后醇类和酯类等挥发性物质有所增加。袁磊等^[17]对其优化工艺后的康普茶进行测定, 检测到 19 种风味成分, 其中醇类 7 种、酯类 6 种、酸类 4 种、酚类 1 种、烷烃 1 种。Phetxumphou 等^[18]通过系统完整的感官描述性分析, 发现低温高糖条件下发酵的康普茶更加香甜浓稠。康普茶作为一种风味饮品, 其风味品质在生产过程具有重要意义, 因此, 对不同地区的康普茶的挥发性物质构成进行更深入的探究, 继而选择优质康普茶作为发酵液用于发酵生产具有重要意义。

为研究不同地区康普茶的风味特征, 采用顶空固相微萃取法(HS-SPME)提取挥发性化合物, 结合气相色谱-质谱(GC-MS)技术, 通过 DB-WAX 色谱柱分离鉴定康普茶的挥发性成分, 并使用香气活性值法(OAV)结合偏最小二乘判别分析(PLS-DA)^[19-20], 以探究不同地区康普茶的挥发性物质构成, 明晰不同地区康普挥发性成分的差异, 为康普茶的优质化生产以及特色品牌构建提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

康普茶 来自 8 个地区, 包括华东地区: 威海(WH)、合肥(HF); 东北地区: 哈尔滨(HRB)、沈阳(SY); 中南地区: 桂林(GL)、长沙(CS); 西北地区: 乌鲁木齐(WLMQ)、西安(XA), 均购于淘宝, 为家庭自酿康普茶, 样品于 2021 年 10 月发酵完毕, 每个地区样品取 3 个不同发酵罐中刚发酵好的康普茶。样品贮存于 4 ℃ 冰箱待测定; 正己烷、甲醇、1,2-二氯苯标品、正构烷烃混标(C7~C40) 色谱纯, 浓度为 1000 μg/mL, 上海 Sigma-Aldrich 公司。

Agilent 7890B-5977B 气质联用仪、DB-WAX 色谱柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm) 美国 Agilent 公

司; 手动 SPME 进样器、50/30 μm DVB/CAR/PDMS 固相微萃取头 美国 Supelco 公司; DF-101S 恒温磁力搅拌器 河南予华仪器有限公司; PL203 电子天平 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 顶空固相微萃取处理 参考 Al-Mohammadi 等^[21]的方法略作修改。准确称量康普茶样品 5.00 g, 置于 20 mL 顶空瓶中, 同时加入 500 μL 溶于甲醇的内标物 1,2-二氯苯(1.3048 μg/μL)。随后, 立即用聚四氟乙烯/硅橡胶隔垫密封。将密封完成的顶空瓶放置到集热式磁力搅拌器中, 于 50 ℃ 条件下平衡 10 min, 紧接着将 DVB/CAR/PDMS(50/30 μm) 萃取纤维针插入顶空瓶中, 伸出纤维涂层, 于距离样品上表面约 1 cm 处吸附萃取 25 min。萃取结束后, 立即收回纤维涂层, 并拔出固相微萃取纤维针, 于 250 ℃ 条件下, 在 GC 进样口热解析 7.5 min, 进行挥发性化合物的分析。每个地区样品独立测定 3 次, 结果表示为含量±标准差。

1.2.2 GC-MS 分析 GC 条件: 参考 Flraig 等^[22] 和 All-egrone 等^[23] 的方法, 采用 DB-WAX(30 m×0.25 mm×0.25 μm) 强极性色谱柱分离、鉴定康普茶的挥发性化合物, 载气为高纯氦气(纯度>99.999%), 载气流速为 1.5 mL/min, 整个过程采用不分流模式进样。

升温程序^[24]: 起始柱温 40 ℃, 保持 3 min, 然后以 5 ℃/min 的速率升温至 75 ℃ 并保持 5 min, 再以 5 ℃/min 的速率升温至 110 ℃ 保持 5 min, 最后以 10 ℃/min 的速率升温至 230 ℃ 保持 5 min。

MS 条件: 采用电子轰击(Electron impact, EI)电离源, 电子能量为 70 eV, 离子源温度为 230 ℃, 全扫描模式, 核质比扫描范围为 35~500 m/z。

定性方法: 将 GC-MS 分析得到的各化合物色谱峰的质谱信息与 NIST 14 标准谱库进行检索比对, 匹配指数大于 80% 作为物质鉴定标准, 同时, 结合文献报道的已知化合物进行确认; 将正构烷烃(C7~C40)以与样品相同的升温程序进行分析, 根据正构烷烃混标物质的保留时间, 计算化合物的 Kováts 保留指数(Kováts index, KI), 结合文献以及数据库中的 KI, 对未知化合物进行鉴定。KI 按照公式(1)计算:

$$KI_x = 100 \times n + \frac{RT_x - RT_n}{RT_{n+1} - RT_n} \times 100 \quad \text{式 (1)}$$

式中: KI_x , 待测物质 x 的保留指数; RT_x , 待测物质 x 的保留时间; RT_n , 碳原子数为 n 的正构烷烃的保留时间; RT_{n+1} , 碳原子数为 n+1 的正构烷烃的保留时间; $RT_n < RT_x < RT_{n+1}$ 。

定量方法:采用内标法进行半定量,根据峰面积与浓度的关系计算得到未知化合物的浓度;每个样品独立测定三次,浓度按照公式(2)计算:

$$C_x = f_x \times \frac{A_x}{A_{is} \times m_x} \times m_{is} \times 1000000 \quad \text{式 (2)}$$

式中: C_x , 未知化合物 x 的含量, ng/g; A_x , 未知化合物 x 的峰面积; A_{is} 为内标物的峰面积; m_x , 用于萃取的康普茶样品的质量, g; m_{is} , 加入内标物 is 的质量, mg; f_x , 未知化合物 x 对内标物 is 的相对质量校正因子;本试验中未知化合物 x 的相对质量校正因子均为 1; 1000000 为单位换算系数。

1.2.3 OAV 计算 在各种挥发性成分定量的基础上,根据参考文献中各挥发性物质在水中的风味阈值^[25], OAV 按公式(3)计算^[26]:

$$OAV_x = \frac{W_x}{OT_x} \quad \text{式 (3)}$$

式中: W_x , 康普茶香气组分 x 的含量, ng/g; OT_x ,

香气组分 x 在水中的香气阈值, $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。

1.3 数据处理

使用 Rx64 4.1.0 软件进行挥发性成分的热图(Heatmap)分析;使用 SIMCA 14.1 进行偏最小二乘判别分析。

2 结果与分析

2.1 不同地区康普茶挥发性成分分析

采用静态顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用双柱法对 8 个地区的康普茶挥发性成分进行分离鉴定,共检测出挥发性物质 56 种(表 1),包括 22 种醇类物质、6 种酸类物质、13 种酯类物质、9 种醛类物质、4 种酚类物质以及 2 种酮类物质。另外,不同地区检测出的康普茶挥发性物质种类也不相同,其中合肥康普茶含有挥发性物质种类最为丰富,有 34 种,其次为威海康普茶,有 31 种;长沙康普茶 27 种,哈尔滨和沈阳康普茶都为 26 种;桂林和西安康普茶分别为 25 种和 24 种;乌鲁木齐康普茶种类最少,仅为 19 种。

表 1 不同地区康普茶挥发性成分定性定量结果(ng/g)

Table 1 Qualitative and quantitative results of volatile components of Kombucha in different regions (ng/g)

编号	物质	RI计算/文献	定性方式	威海	合肥	哈尔滨	沈阳	桂林	长沙	乌鲁木齐	西安
C 醇类											
C1	3-甲基-1-丁醇	1247/1237	RI, MS	1494.15±65.05	4639.67±29.01	957.15±114.13	1914.03±51.20	2005.26±185.56	2645.44±50.56	2.57±0.12	3661.62±276.69
C2	2-庚醇	-	MS	56.42±5.28	46.57±3.15	-	-	-	-	-	-
C3	反式芳樟醇氧化物	-	MS	163.07±21.38	91.63±10.29	101.58±7.67	317.57±57.31	-	-	-	-
C4	2-壬醇	-	MS	31.16±2.90	-	-	-	-	-	-	-
C5	2-乙基-1-己醇	1525/1522	RI, MS	80.96±4.23	163.74±4.48	83.48±2.70	-	64.09±2.15	8313.34±19.29	-	58.25±3.62
C6	芳樟醇	1557/1549	RI, MS	142.13±8.11	-	-	250.21±2.01	194.18±7.55	431.67±6.17	-	-
C7	L-薄荷醇	1649/1651	RI, MS	239.43±4.17	61.73±5.23	458.48±8.36	-	-	-	-	-
C8	alpha-松油醇	-	MS	151.45±14.67	-	125.10±6.56	231.95±10.82	73.35±7.32	103.16±4.19	-	-
C9	苯乙醇	1900/1912	RI, MS	445.43±4.83	1270.47±2.95	843.8±63.95	1349.03±42.68	711.99±91.41	1074.75±62.66	254.37±4.67	2146.86±182.52
C10	庚乙二烯乙二醇	-	MS	44.82±4.77	39.89±0.19	127.24±4.08	-	26.01±4.35	-	-	-
C11	乙醇	906/900	RI, MS	1334.8±88.90	404.38±18.39	390.27±387.44	29745.77±646.13	14570.05±746.18	30371.18±621.43	1331.18±79.16	21720.71±671.73
C12	2-壬烯-1-醇	-	MS	-	-	117.68±5.77	-	-	-	-	48.02±4.26
C13	2-甲基丙醇	-	MS	-	237.77±12.98	-	227.30±6.09	-	222.96±2.91	-	182.24±16.51
C14	正己醇	1364/1371	RI, MS	-	127.57±2.11	-	-	47.28±2.47	-	-	-
C15	辛醇	1565/1561	RI, MS	-	65.42±9.60	-	-	-	-	-	-
C16	壬醇	1665/1668	RI, MS	-	103.15±12.75	-	-	300.80±15.79	425.22±29.93	-	83.47±4.51
C17	月桂醇	-	MS	-	-	-	122.02±5.07	32.79±3.12	-	-	76.85±4.16
C18	反-2-十一烯醇	-	MS	-	-	-	68.17±3.72	-	-	-	-
C19	3-甲基-2-己醇	-	MS	-	-	-	-	-	-	146.84±5.95	-
C20	6-甲基-1-庚醇	-	MS	-	-	-	-	-	557.27±47.42	-	-
C21	5-乙基-2-庚醇	-	MS	-	-	-	-	-	113.24±28.22	-	-
C22	樟脑	-	MS	-	-	73.92±1.77	-	-	-	-	-
S 酸类											
S1	乙酸	1458/1460	RI, MS	7646.17±127.59	17194.52±481.23	35874.82±153.73	14185.25±150.93	11283.22±208.87	14050.22±565.88	25958.86±918.84	20431.72±307.55
S2	2-甲基丙酸	-	MS	79.13±2.28	464.74±16.39	182.31±5.72	156.44±5.88	-	-	-	172.38±5.62
S3	3-甲基丁酸	-	MS	584.75±43.70	4623.79±256.66	3579.84±290.04	809.61±16.15	706.71±59.97	808.12±63.54	1306.17±70.88	2146.46±68.73
S4	辛酸	2086/2089	RI, MS	690.74±141.06	43.15±1.25	126.89±3.88	-	-	845.09±21.52	-	-
S5	己酸	1828/1827	RI, MS	-	-	89.64±2.09	-	-	257.21±12.77	-	-
S6	4-甲基-2-氧代戊酸	-	MS	-	66.14±2.76	-	-	-	-	-	-
Z 酯类											
Z1	乙酸乙酯	898/891	RI, MS	12330.73±206.42	39387.18±664.82	27916.21±985.52	26319.06±379.36	12544.15±669.16	27510.56±229.48	-	19840.95±736.82
Z2	2-甲基丁酸乙酯	-	MS	61.06±3.99	154.42±6.53	-	-	-	-	-	-
Z3	乙酸异戊酯	1104/1112	RI, MS	614.20±21.38	3851.04±107.94	1460.44±68.66	902.61±56.02	723.41±56.49	1911.01±54.58	-	2171.39±65.46
Z4	正己酸乙酯	1243/1246	RI, MS	189.63±2.05	621.77±94.11	-	62.15±3.21	36.86±4.61	355.14±36.37	-	61.74±4.68
Z5	乳酸乙酯	-	MS	42.20±5.67	196.21±3.21	-	-	-	-	-	-
Z6	辛酸乙酯	1445/1441	RI, MS	600.85±40.74	-	-	-	-	126.41±4.22	-	-
Z7	乙酸异龙脑酯	-	MS	37.37±4.90	69.46±1.83	-	-	-	-	-	-

续表 1

编号	物质	RI计算/文献	定性方式	威海	合肥	哈尔滨	沈阳	桂林	长沙	乌鲁木齐	西安
Z8	苯乙酸乙酯	1786/1779	RI, MS	314.71±10.20	731.72±34.46	432.61±5.02	965.61±15.92	161.57±7.92	401.17±4.07	79.78±0.73	276.99±20.23
Z9	乙酸苯乙酯	1795/1801	RI, MS	73.57±2.34	438.15±16.24	447.21±19.69	286.39±4.50	134.17±8.72	281.41±8.28	148.15±12.71	424.12±18.85
Z10	异戊酸乙酯	1060/1064	RI, MS	381.24±5.39	1253.42±59.19	260.07±16.41	406.76±7.28	148.2±12.73	412.89±22.85	—	219.77±4.55
Z11	丁酸乙酯	—	MS	—	80.74±6.26	—	—	—	—	—	—
Z12	水杨酸甲酯	—	MS	—	—	—	81.52±2.87	—	—	—	—
Z13	3-呋喃甲酸甲酯	—	MS	—	—	—	—	—	—	146.15±9.09	—
Q	醛类										
Q1	壬醛	1397/1400	RI, MS	97.50±15.38	52.05±4.04	—	350.56±3.28	64.77±3.69	486.53±7.07	37.53±0.88	53.67±3.94
Q2	2,5-二甲基苯甲醛	—	MS	435.65±38.82	430.7±11.55	454.41±17.68	267.31±7.74	335.29±21.66	175.10±4.59	1487.23±127.39	200.02±7.75
Q3	正辛醛	—	MS	—	—	—	220.08±3.32	—	310.64±28.45	—	—
Q4	苯甲醛	1534/1530	RI, MS	—	104.78±1.22	231.03±7.56	—	—	—	705.59±7.18	69.74±8.11
Q5	4-丙基苯甲醛	—	MS	—	101.23±9.29	—	190.76±20.48	85.41±6.89	116.05±12.59	—	59.76±4.82
Q6	呋喃甲醛	—	MS	—	—	—	—	—	—	16157.25±249.55	—
Q7	5-甲基呋喃醛	—	MS	—	—	—	—	—	—	264.41±6.93	—
Q8	2,6-二甲基苯甲醛	—	MS	—	—	—	—	—	—	55342.1±260.03	—
Q9	5-羟甲基糠醛	—	MS	—	—	—	—	—	—	166.65±4.12	—
F	酚类										
F1	2,6-二叔丁基对甲苯酚	—	MS	1766.20±76.65	1846.08±53.80	1791.56±7.47	766.29±38.66	1622.11±89.21	—	1536.26±223.05	1786.96±121.39
F2	4-乙基苯酚	—	MS	766.18±112.32	—	164.64±6.93	—	61.52±1.73	420.09±6.36	—	—
F3	2,4-二叔丁基苯酚	—	MS	237.5±30.24	210.64±20.08	273.44±15.65	323.76±13.82	481.66±33.33	343.01±11.08	5438.37±96.02	202.53±8.01
F4	乙基麦芽酚	—	MS	550.09±2.95	—	—	—	—	—	—	—
T	酮类										
T1	3-羟基-2-丁酮	—	MS	—	123.83±7.06	444.23±38.48	68.80±8.32	126.78±11.79	—	—	161.48±2.72
T2	环己酮	—	MS	—	—	—	—	—	—	565.59±20.64	—

注: —表示某物质RI无法计算或未检测出; RI文献值来源于<https://webbook.nist.gov/>数据库。

进一步的分析表明, 8个地区康普茶共同含有的挥发性物质有9种, 分别为苯乙醇、3-甲基-1-丁醇、乙醇、乙酸、3-甲基丁酸、苯乙酸乙酯、乙酸苯乙酯、2,5-二甲基苯甲醛、2,4-二叔丁基苯酚。Zhao等^[5]和袁磊等^[17]的研究中检测出的风味物质有乙醇、苯乙醇、乙酸、乙酸乙酯等, 这与本研究结果较为一致。

不同地区康普茶的挥发性成分热图分析如图1所示, 其中不同的颜色强度代表了香气成分含量的标准化值, 红色表示高含量, 蓝色表示低含量, 可见康普茶中挥发性物质的含量和种类呈现出一定的地区差异性。相关聚类分析结果显示, 西安、桂林、沈阳和长沙康普茶挥发性物质组成较为类似, 威海和哈尔滨康普茶挥发性物质组成较为类似, 但这6个地区康普茶与乌鲁木齐和合肥康普茶挥发性物质相差较大。总的来说, 来自中南地区(桂林和长沙)的康普茶在挥发性物质的组成上具有一定相似性, 来自华东、东北、西北地区的康普茶未发现明显的地域相关性。

2.2 不同地区康普茶挥发性成分组成差异分析

8个地区康普茶挥发性物质组成类别相似(图2), 主要为醇类、酸类、酯类和酚类。长沙康普茶醇类挥发性物质含量最高, 为44258.01 ng/g, 占其挥发性物质总量超过47%, 沈阳、西安和桂林康普茶醇类挥发性物质含量较高, 分别为34226.05、27978.02和18025.80 ng/g, 占其挥发性物质总含量均超过36%; 哈尔滨和乌鲁木齐康普茶酸类挥发性物质含量较高, 分别为39853.47和27265.03 ng/g, 占其挥发性物质总含量的52%和25%, 其中乌鲁木齐康普茶醛类和酚类挥发性物质含量最高, 分别为

74160.76和6974.63 ng/g, 占其挥发性物质的总量的66%和6%, 威海康普茶酚类挥发性物质含量为3319.97 ng/g, 但占其挥发性物质总量的10%; 合肥康普茶酯类挥发性物质含量最高, 为46784.11.62 ng/g, 占其挥发性物质的总量超过59%, 长沙和哈尔滨康普茶酯类挥发性物质含量较高, 为30998.59和30516.53 ng/g, 占其挥发性物质总量超过33%, 威海康普茶酯类挥发性物质含量为14645.56 ng/g, 占其挥发性物质总量超过46%; 西安康普茶醇类、酸类和酯类挥发性物质含量分布均匀, 分别占其挥发性物质的总量的37%、30%和30%。挥发性物质总含量为乌鲁木齐>长沙>沈阳>合肥>哈尔滨>西安>桂林>威海。

不同地区康普茶中某些醇类挥发性物质带有典型的花果香味, 其中乙醇(甜香)在5种康普茶(沈阳、桂林、西安、乌鲁木齐和长沙)的醇类挥发性物质中含量最高, 占比均超过68%, 而在其他3种康普茶(威海、合肥和哈尔滨)的醇类挥发性物质中, 3-甲基-1-丁醇(威士忌酒、麦芽、苹果香气)含量最高, 占比均超过29%, 苯乙醇(玫瑰、丁香香气)在西安康普茶的醇类挥发性物质中含量较高, 占比超过7%; 在威海、沈阳、桂林和长沙康普茶检测出芳樟醇(花香、薰衣草香气), 在威海、合肥、哈尔滨和沈阳康普茶中检测出反式芳樟醇氧化物(花香), 有研究报道某些红茶菌种中的酿酒酵母可以水解糖苷键化合物, 释放芳樟醇^[5,7], 推测芳樟醇及其氧化物是由于发酵过程中酵母菌的代谢而产生。乌鲁木齐、哈尔滨和合肥康普茶醇类挥发性物质总含量较低(均≤10%),

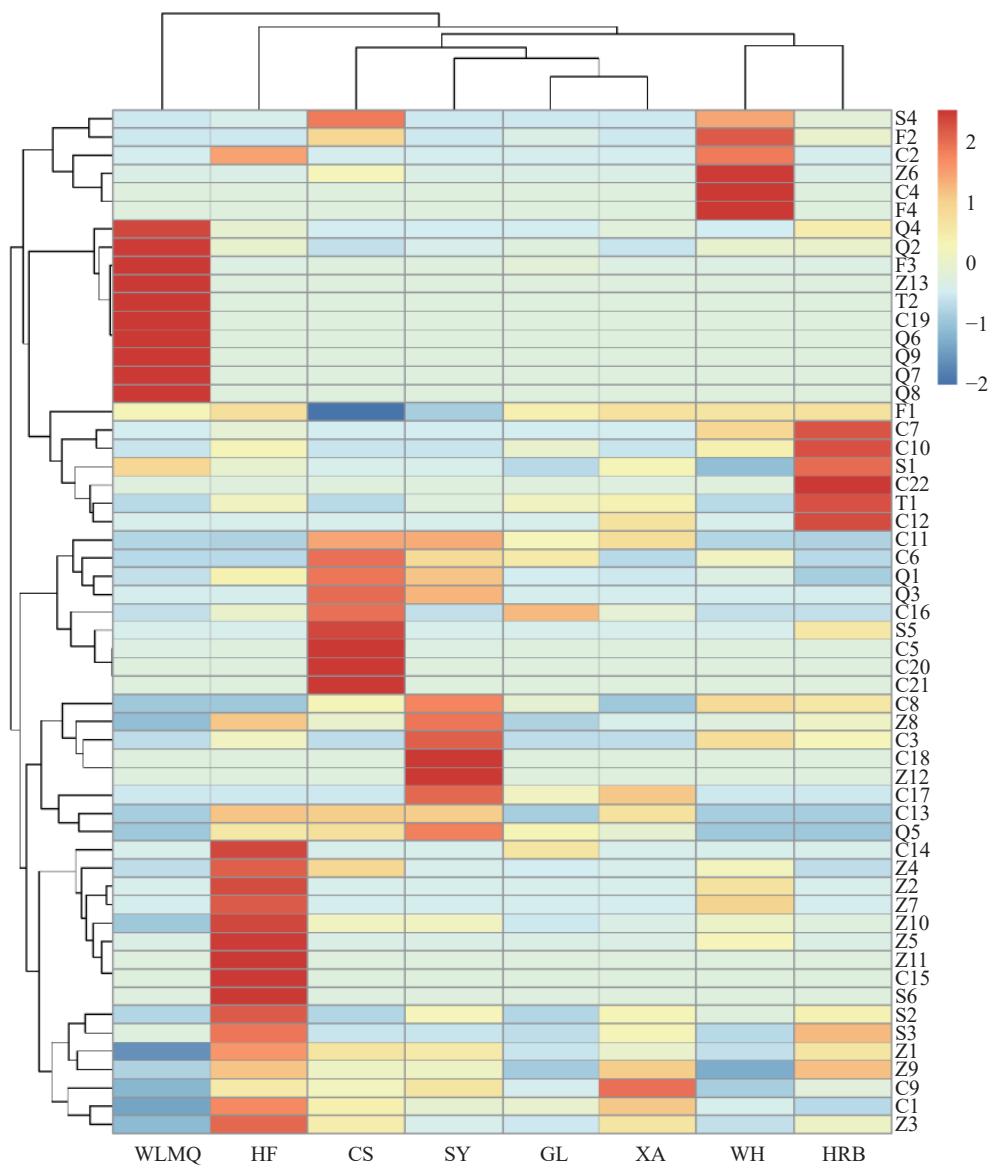


图 1 不同地区康普茶挥发性成分热图

Fig.1 Heatmap analysis of volatile components of Kombucha in different regions

可能是微生物转化或发生酯化等生化反应^[5],但其中合肥康普茶醇类挥发性物质达 12 种,高级醇种类较其他地区康普茶多,这对康普茶的风味有积极影响^[17]。

不同地区康普茶中主要酸类挥发性物质是乙酸和 3-甲基丁酸,它们具有比较尖锐的酸味^[6],乙酸在 8 个地区康普茶的酸类挥发性物质中占比均超过 76%,3-甲基丁酸占比均超过 4%,两者含量远高于其他酸类挥发性物质,这与赵振军等^[27]的研究结果一致。酸类物质的差异也与红茶菌微生物代谢有关,如在发酵过程中,醋酸菌利用乙醇生成乙酸,将葡萄糖转化为葡萄糖酸和葡萄糖醛酸;乳酸菌利用酵母菌的代谢产物生长繁殖,并产生乳酸^[28]。在所有地区康普茶的挥发性物质中并未检测到乳酸,Zhang 等^[29]研究 6 种不同基底的康普茶也未检测到乳酸,但本研究中在威海和合肥康普茶中检测到了具有花果香味的乳酸乙酯。赵振军等^[27]和蒋立文等^[30]的研究发现,康普茶中总游离氨基酸含量随着发酵时间延长略

有增加,这些游离氨基酸是最重要的芳香前体物质,如:某些支链氨基酸(亮氨酸、异亮氨酸和缬氨酸等)分解后可转化为有麦芽香气的酯类物质、有果香和酒精味的醇类物质或呈现酸甜味、腐败味、水果味或黄油味的酸类物质,推测乙酸(酸味),2-甲基丙酸(黄油和奶酪味),3-甲基丁酸(酸味和奶酪味),正辛酸(奶酪香和甜香)由此产生。

不同地区康普茶中主要酯类挥发性物质是乙酸乙酯(菠萝香气)和乙酸异戊酯(苹果香气),乙酸乙酯在 7 个地区康普茶(除乌鲁木齐康普茶外)的酯类挥发性物质中含量最高,占比均超过 84%,乙酸异戊酯次之(除沈阳和乌鲁木齐康普茶),占比均超过 4%。在沈阳康普茶中,苯乙酸乙酯(菠萝香气)的含量仅次于乙酸乙酯,3-呋喃甲酸甲酯和乙酸苯乙酯(玫瑰蜂蜜香气)是乌鲁木齐康普茶的主要挥发性酯类物质。酯类物质是康普茶中重要的挥发性化合物,大多可产生令人愉悦的水果香和花香^[16],本研究中,具有典型苹果香气的 2-甲基丁酸乙酯、丁酸乙酯、乙酸异戊

酯和正己酸乙酯, 具有典型菠萝香气的乙酸乙酯和辛酸乙酯, 具有典型玫瑰香气的乙酸苯乙酯和苯乙酸乙酯等均检测出。相关研究表明红茶菌菌种中能促进产生花香、植物清香和果香风味物质的微生物多为酵母, 推测酯类香气物质的产生与酵母菌的代谢密切相关^[4]。

不同地区康普茶中主要的酚类挥发性物质是 2,6-二叔丁基对甲苯酚, 具有特殊的烤麦片味, 其在 6 个地区(除乌鲁木齐和长沙外)康普茶的酚类挥发性物质中占比均超过 52%, 在乌鲁木齐和长沙康普茶中, 2,4-二叔丁基苯酚是主要酚类挥发性物质, 占比均超过 45%。酚类物质较其他挥发性物质类别含量都较低(均<10%)。据相关文献报道^[31], 康普茶经发酵后, 酚类物质总含量增加, 可能是因为多酚在红茶菌共生体系中复杂酶的作用下被降解为小分子物质; 此外酚类物质的含量也与茶叶种类有关, 如在相同条件下, 以绿茶发酵的康普茶酚类物质较红茶发酵的康普茶酚类物质含量高。经溯源发现, 沈阳、西安、长沙康普茶的发酵基底为金骏眉, 乌鲁木齐康普茶的发酵基底为滇红红茶, 故推测酚类挥发性物质含量低的原因可能是采用的茶叶品种酚类物质含量较低。

不同地区康普茶中醛类(均<1.7%)和酮类(均<0.6%)挥发性物质含量相对较低, 其中乌鲁木齐康普茶比较特殊, 醛类挥发性物质占比超过 67%, 其中 2,6-二甲基苯甲醛和呋喃甲醛(杏仁香甜香)的含量显著高于其他醛类挥发性物质, 含量所占比例分别为 75% 和 22%。乌鲁木齐和长沙康普茶中未检测出酮类挥发性物质, 其他 6 个地区康普茶中酮类挥发性物质种类较少, 均为 1~2 种, 袁磊等^[17]用红茶菌发酵红茶, 发酵液中未检出酮类物质, 与本实验结果类似。

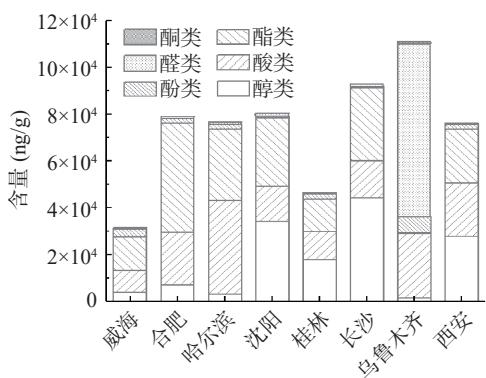


图 2 不同地区康普茶挥发性物质类别组成

Fig.2 Volatile substance category composition of Kombucha in different region

2.3 不同地区康普茶挥发性香气物质 OAV 分析

OAV 是代表香气化合物对样品风味贡献程度大小的一个比值, 研究中认为当 OAV≥1 时, 该香气化合物对样品风味有贡献, 且 OAV 值越大, 则其贡献越大^[32], 通过计算各香气物质的 OAV 对其进行筛选。

如表 2 所示, 对康普茶风味有贡献的特征性物质(OAV≥1)有 32 种。

威海、合肥、哈尔滨、沈阳、桂林、长沙、乌鲁木齐和西安康普茶分别有 22、20、16、18、17、19、10、16 种 OAV 大于 1 的香气物质。具有酸味的 3-甲基丁酸、乙酸, 具有花香(玫瑰)的乙酸苯乙酯, 这 3 种香气物质在 8 种康普茶中 OAV 均大于 1, 它们对康普茶的风味形成具有重要作用。2-甲基丁酸乙酯(苹果香气)是威海康普茶中 OAV 最大的香气物质, 丁酸乙酯(苹果香气)是乌鲁木齐康普茶中 OAV 最大的香气物质, 异戊酸乙酯(水果香气)是其他 6 种康普茶中 OAV 最大的香气物质, 表明它们对康普茶香气的贡献较大, 是重要的特征风味物质。除乌鲁木齐康普茶外, 苯乙醇(蜂蜜和玫瑰香气)、乙酸乙酯(菠萝香气)、乙酸异戊酯(苹果香气)和苯乙酸乙酯(菠萝和花香)在其他 7 个地区康普茶中 OAV 均大于 1, 与之类似的还有壬醛(柑橘香气和草本植物香气), 在 7 个地区康普茶中(除哈尔滨康普茶外)OAV 均大于 1。

康普茶风味酸甜爽口, 苯乙醇(蜂蜜香气)、2-甲基丙酸和乙酸(酸味)对其风味轮廓的形成具有重要作用。乙醇阈值较高, 为 2000 mg/kg, OAV 虽然小于 1, 但也是关键的香气物质。2-乙基-1-己醇(玫瑰、草本植物清香)、壬醇(草本植物清香、花香)、3-甲基-2-己醇、丁酸乙酯(苹果香气)、水杨酸甲酯(薄荷香气)、苯甲醛(杏仁、焦糖)、呋喃甲醛(面包、杏仁、甜香)的 OAV 均只在 1 种康普茶中大于 1, 与之类似的还有 L-薄荷醇(薄荷味)、辛酸(奶酪香、甜香)和辛酸乙酯(菠萝香气、花香)等香气物质的 OAV 在少数康普茶中大于 1, 表明不同香气物质对康普茶香气的贡献程度不同, 不同地区的康普茶的关键香气物质也具有一定的相似性和差异性。

2.4 不同地区康普茶差异性成分分析

PLS-DA 是一种有监督的判别分析统计学方法, 可以对复杂数据进行降维处理, 从而实现其可视化、判别和预测。将不同地区康普茶挥发性物质的含量作为 Y 变量进行 PLS-DA 建模。拟合模型预测成分的累计统计量 $R^2X=0.997$, 模型解释率 $R^2Y=0.990$, 预测能力参数 $Q^2=0.983$, 都接近 1, 表明其稳定可靠, 具有较好的解释度^[33]。如图 3 所示, 不同地区康普茶样品在 PLS-DA 得分图上区分较好, 组内差异较小, 组间分布分散。长沙、沈阳、桂林、西安和威海康普茶分布在第二象限附近, 哈尔滨以及合肥康普茶分布在第三象限附近, 乌鲁木齐康普茶分布在第一象限, 不同地区的康普茶有较为明显的区分。

对建立的模型进行 200 次置换检验, 如图 4 所示, Q^2 与 y 轴的交点在负半轴, 表明该模型有效, 未过拟合, 可以用于解释不同地区康普茶挥发性物质的差异。为明确不同地区康普茶差异的关键物质, 计算 VIP 以确定各物质对康普茶风味的贡献度。

表 2 不同地区康普茶香气物质 OAV 及香气描述

Table 2 OAV and aroma description of Kombucha aroma substances in different regions

香气物质	威海	合肥	哈尔滨	沈阳	桂林	长沙	乌鲁木齐	西安	香气描述
3-甲基-1-丁醇	1.52	4.73	<1	1.95	2.05	2.70	<1	3.74	威士忌酒香、麦芽香、焦糖香
反式芳樟醇氧化物	2.72	1.53	1.69	5.29	<1	<1	<1	<1	花香
2-乙基-1-己醇	<1	<1	<1	<1	<1	27.71	<1	<1	玫瑰香、草本植物清香
芳樟醇	37.40	<1	<1	65.84	51.10	113.6	<1	<1	香菜、花卉、薰衣草、柠檬、玫瑰
L-薄荷醇	2.39	<1	4.58	<1	<1	<1	<1	<1	薄荷味
alpha-松油醇	1.76	<1	1.45	2.70	<1	1.20	<1	<1	油脂味、茴香、薄荷
苯乙醇	1.14	3.26	2.16	3.46	1.83	2.76	<1	5.50	蜂蜜味、玫瑰味、丁香味
壬醇	<1	1.45	<1	<1	<1	<1	<1	<1	草本植物清香、花香
月桂醇	<1	6.45	<1	<1	18.80	26.56	<1	5.22	脂肪、蜡
3-甲基-2-己醇	<1	<1	<1	<1	<1	<1	1.81	<1	—
乙酸	6.37	14.33	29.90	11.82	9.40	11.71	21.63	17.03	酸味
2-甲基丙酸	1.58	9.29	3.65	3.13	<1	<1	<1	3.45	黄油味、奶酪味
3-甲基丁酸	1.19	9.44	7.31	1.65	1.44	1.65	2.67	4.38	酸味、奶酪味
辛酸	1.38	<1	<1	<1	<1	1.69	<1	<1	奶酪香、甜香
乙酸乙酯	2.64	8.44	5.98	5.64	2.69	5.90	<1	4.25	菠萝香气
2-甲基丁酸乙酯	969.21	2451.11	<1	<1	<1	<1	<1	<1	苹果香气
乙酸异戊酯	27.92	175.05	66.38	41.03	32.88	86.86	<1	98.70	苹果香气
正己酸乙酯	189.63	621.77	<1	62.15	36.86	355.14	<1	61.74	苹果香气
辛酸乙酯	31.13	<1	<1	<1	<1	6.55	<1	<1	菠萝香气、花香
苯乙酸乙酯	2.02	4.70	2.78	6.21	1.04	2.58	<1	1.78	水果香、甜香
乙酸苯乙酯	3.87	23.06	23.54	15.07	7.06	14.81	7.79	22.32	玫瑰香、蜂蜜味、烟草味
异戊酸乙酯	886.60	2914.93	604.81	945.95	344.65	960.21	<1	511.09	水果香
水杨酸甲酯	<1	2.02	<1	<1	<1	<1	<1	<1	薄荷味
丁酸乙酯	<1	<1	<1	<1	<1	<1	60.9	<1	苹果香
2,6-二叔丁基对甲苯酚	1.77	1.85	1.79	<1	1.62	<1	1.54	1.79	烤麦片味
4-乙基苯酚	36.48	<1	7.84	<1	2.93	20	<1	<1	酚味、香料气味
壬醛	6.50	3.47	<1	23.37	4.32	32.44	2.5	3.58	柑橘香气、草本植物清香
2,5-二甲基苯甲醛	2.18	2.15	2.27	1.34	1.68	<1	7.44	1.00	—
辛醛	<1	<1	<1	31.90	<1	45.02	<1	<1	—
苯甲醛	<1	<1	<1	<1	<1	<1	2.02	<1	杏仁味、焦糖香
呋喃甲醛	<1	<1	<1	<1	<1	<1	5.39	<1	面包香、杏仁味、甜香
3-羟基-2-丁酮	<1	8.85	31.73	4.91	9.06	<1	<1	11.53	黄油味、奶油味

注: 香气描述来源于 <https://www.femaflavor.org/>。

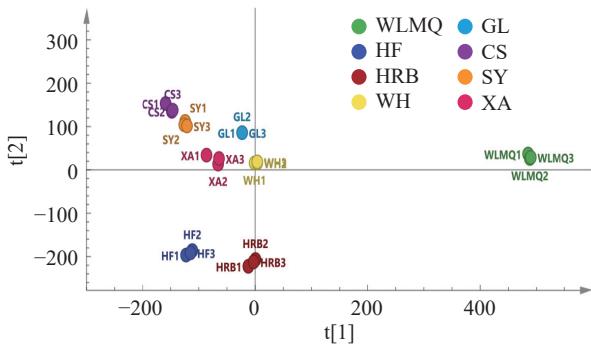


图 3 不同地区康普茶香气成分 PLS-DA 分析

Fig.3 PLS-DA analysis of volatile components of Kombucha in different regions

VIP ≥ 1 的风味物质具有较大的贡献, 定义其为差异标志物^[34], 根据图 5 可知筛选出 17 种 VIP ≥ 1 的差异标志物, 分别为 5 种醇类(具有威士忌酒香的 3-甲基-1-丁醇、具有玫瑰和草本植物清香的 2-乙基-1-己醇、具有蜂蜜和玫瑰香气的苯乙醇、具有甜香的乙醇、具有草本植物清香的壬醇), 3 种酸类(具有酸味

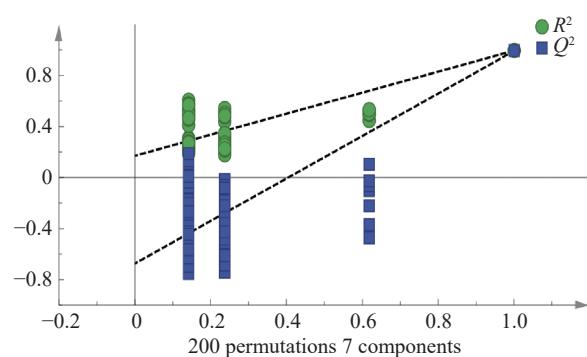


图 4 PLS-DA 模型置换检验

Fig.4 PLS-DA model displacement test

的乙酸、具有奶酪香的 3-甲基丁酸和辛酸), 4 种酯类(具有菠萝香气的乙酸乙酯、乙酸异戊酯和辛酸乙酯、具有水果香气和甜香的苯乙酸乙酯), 2 种醛类(具有杏仁甜香的呋喃甲醛、2,6-二甲基苯甲醛), 3 种酚(具有烤麦片味的 2,6-二叔丁基对甲苯酚、具有香料气味的 4-乙基苯酚、乙基麦芽酚)。其中乙醇、乙

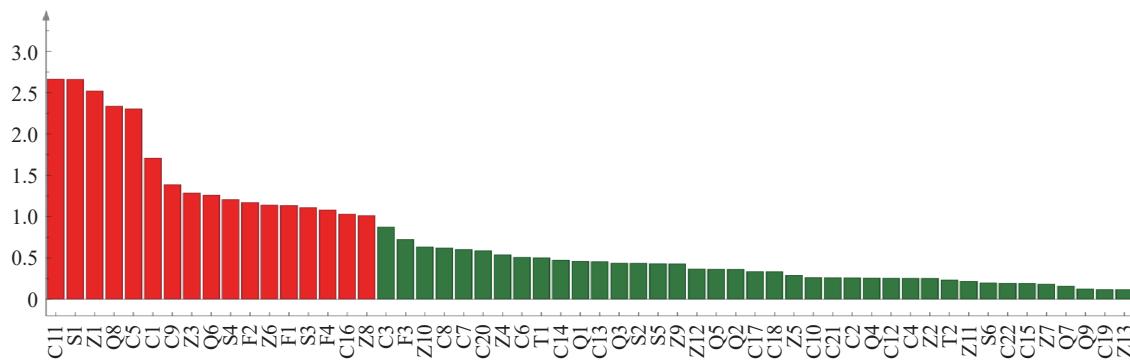


图 5 不同地区康普茶挥发性成分 VIP 图

Fig.5 VIP chart of volatile components of Kombucha in different regions

酸和乙酸乙酯是 VIP 最高的三种物质, 表明其对不同地区康普茶的风味差异影响较大。

结合 OAV 分析结果, 17 种 $VIP \geq 1$ 的差异标志物中有 14 种物质 $OAV \geq 1$, 最终确定 14 种康普茶特征性差异物质: 3-甲基-1-丁醇、2-乙基-1-己醇、苯乙醇、壬醇、乙酸、3-甲基丁酸、辛酸、乙酸乙酯、乙酸异戊酯、辛酸乙酯、苯乙酸乙酯、呋喃甲醛、2,6-二叔丁基对甲苯酚和 4-乙基苯酚。

3 结论

本研究以不同地区的康普茶为研究对象, 对其挥发性物质组成进行分析, 结果表明 8 个地区的康普茶挥发性物质含量与种类存在较大差异。共检测出挥发性物质 56 种, 8 个地区共同含有的挥发性物质有 9 种, 分别为苯乙醇、3-甲基-1-丁醇、乙醇、乙酸、3-甲基丁酸、苯乙酸乙酯、乙酸苯乙酯、2,5-二甲基苯甲醛和 2,6-二叔丁基对甲苯酚。

基于 OAV 分析, 鉴定了 32 种呈香物质($OAV \geq 1$), 主要由醇类、酸类、酯类和醛类组成, 与前人^[17,30]研究结果一致, 以草本植物清香、花木香、酸味和水果香气(包括苹果和菠萝香气)为主, 其中水果香气具有重要地位, 如 2-甲基丁酸乙酯(苹果香气)是威海康普茶中 OAV 最大的香气物质, 丁酸乙酯(苹果香气)是乌鲁木齐康普茶中 OAV 最大的香气物质, 异戊酸乙酯(水果香气)是其他 6 种康普茶中 OAV 最大的香气物质, 因而表明它们在不同地区的康普茶风味中有重要作用; 采用 PLS-DA 分析进一步筛选出 8 个地区康普茶中的差异性标志物, 分别为 5 种醇类, 3 种酸类, 4 种酯类, 2 种醛类, 3 种酚, 并结合 OAV 分析结果可最终确定 14 种康普茶特征性差异物质。

本研究采用顶空固相微萃取结合气相色谱串联质谱技术, 对不同地区康普茶的挥发性成分进行检测, 运用 OAV 以及 PLS-DA 方法探究了不同地区康普茶的挥发性物质的种类和构成, 并比较了它们的差异性, 但使用的分析方法也存在一定局限性, 如一些香气物质阈值缺乏等, 后续将会采用不同的方法, 对其特征香气进行深入探究。此外, 康普茶中的挥发性香气物质的含量与种类受红茶菌中微生物组成和种

群动态变化的影响, 这种特殊的群落共生关系又与初始茶类型、初始糖浓度和发酵温度等因素有关, 因而后续研究各因素对挥发性香气物质的影响以及发酵过程中微生物演替和香气物质变化的效应关系对于康普茶的优质化生产也十分重要。

© The Author(s) 2024. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] KITWETCHAROEN H, PHUNG L T, KLANRIT P, et al. Kombucha healthy drink—recent advances in production, chemical composition and health benefits [J]. *Fermentation*, 2023, 9(1): 48.
- [2] BORTOLOMEDI B M, PAGLARINI C S, BROD F C A. Bioactive compounds in Kombucha: A review of substrate effect and fermentation conditions [J]. *Food Chemistry*, 2022, 385: 132719.
- [3] de MIRANDA J F, RUIZ L F, SILVA C B, et al. Kombucha: A review of substrates, regulations, composition, and biological properties [J]. *Journal of Food Science*, 2022, 87(2): 503–527.
- [4] 檀馨悦, 黎琪, 王晴, 等. 红茶菌中风味物质相关功能微生物的研究进展 [J]. *食品科学*, 2020, 41(11): 327–335. [TAN X Y, LI Q, WANG Q, et al. Progresses in functional microorganisms associated with flavor compounds in Kombucha tea [J]. *Food Science*, 2020, 41(11): 327–335.]
- [5] ZHAO Z J, SUI Y C, WU H W, et al. Flavour chemical dynamics during fermentation of Kombucha tea [J]. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 2018, 30(9): 732–741.
- [6] SKNEPNEK A, TOMIC S, MILETI D, et al. Fermentation characteristics of novel *Coriolus versicolor* and *Lentinus edodes* Kombucha beverages and immunomodulatory potential of their polysaccharide extracts [J]. *Food Chemistry*, 2020, 342(5): 128344.
- [7] LÜ H P, ZHONG Q S, LIN Z, et al. Aroma characterisation of Pu-erh tea using headspace-solid phase microextraction combined with GC/MS and GC-Olfactometry [J]. *Food Chemistry*, 2012, 130(4): 1074–1081.
- [8] 杨婧娟, 赵声兰, 马雅鸽, 等. 红茶菌复合发酵饮品的配方优化及发酵工艺研究 [J]. *食品科技*, 2019, 44(11): 109–115. [YANG J J, ZHAO S L, MA Y G, et al. Research on formula optimization and fermentation condition of Kombucha fermented beverage [J]. *Food Science and Technology*, 2019, 44(11): 109–115.]
- [9] ZOU C, LI R Y, CHEN J X, et al. Zijuan tea-based Kombucha: Physicochemical, sensorial, and antioxidant profile [J]. *Food Chemistry*, 2021, 363(9): 130322.

- [10] 徐伟, 葛阳阳, 陈翠婷, 等. 基于宏基因组技术分析传统红茶菌中菌群组成及其主要代谢通路[J]. 食品工业科技, 2018, 39(5): 119–123, 129. [XU W, GE Y Y, CHEN C T, et al. Microorganism composition and main metabolic pathways analysis of traditional Kombucha by metagenomic technology[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(5): 119–123, 129.]
- [11] ARIKAN M, MITCHELL A L, FINN R D, et al. Microbial composition of Kombucha determined using amplicon sequencing and shotgun metagenomics[J]. *Journal of Food Science*, 2020, 85(2): 455–464.
- [12] 黎琪, 王晴, 檀馨悦, 等. 利用扩增子测序技术分析不同红茶菌中微生物多样性[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(18): 267–274.
- [13] LI Q, WANG Q, TAN X Y, et al. Analysis of microbial diversity from different Kombucha using amplicon sequencing[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(18): 267–274.]
- [14] JAYME C S J, MEIRELES M I, DE L B, et al. Kombucha: Formulation, chemical composition, and therapeutic potentialities [J]. *Current Research in Food Science*, 2022, 5: 360–365.
- [15] IVANIŠOVÁ E, MEŇHARTOVÁ K, TERENTJEVA M, et al. The evaluation of chemical, antioxidant, antimicrobial and sensory properties of Kombucha tea beverage[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2020, 57(5): 1840–1846.
- [16] AHMED R F, HIKAL M S, ABOU-TALEB K A. Biological, chemical and antioxidant activities of different types Kombucha[J]. *Annals of Agricultural Sciences*, 2020, 65(1): 35–41.
- [17] 邓雯瑾, 李启明. 红茶菌饮料工艺优化及发酵前后香气成分分析[J]. 食品与发酵科技, 2020, 56(3): 35–40, 77. [DENG W J, LI Q M. Optimization of Kombucha beverage technology and analysis of aroma components before and after fermentation[J]. *Food and Fermentation Sciences and Technology*, 2020, 56(3): 35–40, 77.]
- [18] YUAN L, ZHANG G H, HE G Q. Effects of fermentation conditions on quality and flavor of Kombucha[J]. *Food Science*, 2017, 38(2): 92–97.]
- [19] PHETXUMPHOU K, VICK R, BLANC L, et al. Processing condition effects on sensory profiles of Kombucha through sensory descriptive analysis[J]. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 2022, 81: 99–108.
- [20] 赵玉, 张玉环, 李建科, 等. GC-O 结合 OAV 鉴定陇南初榨橄榄油关键香气成分 [J]. 食品科学, 2022, 43(8): 184–189. [ZHAO Y, ZHANG Y H, LI J K, et al. Identification of key aroma compounds in Longnan virgin olive oil by GC-O coupled with OAV analysis[J]. *Food Science*, 2022, 43(8): 184–189.]
- [21] 陶小庆, 陈钰, 欧阳宇彤, 等. 铜仁市不同区域绿茶香气有机成分分析 [J]. *广东化工*, 2022, 49(6): 180–184. [TAO X Q, CHEN Y, OUYANG Y T, et al. Analysis of aroma components of green buds in different areas of Tongren City[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2022, 49(6): 180–184.]
- [22] AL-MOHAMMADI A R, ISMAIEL A A, IBRAHIM R A, et al. Chemical constitution and antimicrobial activity of Kombucha fermented beverage[J]. *Molecules*, 2021, 26(16): 5026.
- [23] ALLEGGRONE G, BELLARDO F, CABELLA P. Comparison of volatile concentrations in hand-squeezed juices of four different lemon varieties[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2006, 54(5): 1844–1848.
- [24] YAN T, LIN J, ZHU J, et al. Aroma analysis of Fuyun 6 and Jinguan black tea in the Fu'an area based on E-nose and GC-MS[J]. *European Food Research and Technology*, 2022, 248: 947–961.
- [25] 里奥·范海默特. 化合物香味阈值汇编[M]. 北京: 科学出版社, 2015. [VAN GEMERTLJ. Compound fragrance threshold compilation[M]. Beijing: Science Press, 2015.]
- [26] MAO S, LU C, LI M, et al. Identification of key aromatic compounds in Congou black tea by partial least-square regression with variable importance of projection scores and gas chromatography–mass spectrometry/gas chromatography–olfactometry[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2018, 98(14): 5278–5286.
- [27] 赵振军, 周黎, 刘勤晋. 红茶菌发酵普洱茶茶汤过程中主要成分变化[J]. 食品科学, 2010, 31(1): 79–83. [ZHAO Z J, ZHOU L, LIU Q J. Variations in major components of Pu-erh tea infusion during fermentation by Kombucha culture[J]. *Food Science*, 2010, 31(1): 79–83.]
- [28] 邱卫华. 红茶菌微生物群落多样性及其分析方法的研究进展[J]. 食品工业科技, 2019, 40(24): 311–317. [QIU W H. Research advances on microbial diversity and its analytical methods of Kombucha[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(24): 311–317.]
- [29] ZHANG J, VAN MULLEM J, DIAS D R, et al. The chemistry and sensory characteristics of new herbal tea-based Kombuchas[J]. *Journal of Food Science*, 2021, 86(3): 740–748.
- [30] 蒋立文, 刘德华, 廖卢燕, 等. 红茶菌发酵过程中主要化学成分变化的研究[J]. 食品科学, 2007, 28(3): 238–240. [JIANG L W, LIU D H, LIAO L Y, et al. Study on changes in major components during tea fungus fermentation[J]. *Food Science*, 2007, 28(3): 238–240.]
- [31] JAYABALAN R, RADOMIR V M, JASMINA S V, et al. A review on Kombucha tea-microbiology, composition, fermentation, beneficial effects, toxicity, and tea fungus[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2014, 13(4): 538–550.
- [32] 刘登勇, 周光宏, 徐幸莲. 确定食品关键风味化合物的一种新方法: “ROAV”法[J]. 食品科学, 2008, 344(7): 370–374. [LIU D Y, ZHOU G H, XU X L. “ROAV” method: A new method for determining key odor compounds of rugao ham[J]. *Food Science*, 2008, 344(7): 370–374.]
- [33] 杨镰, 邓静, 朱建仓, 等. 五种产香酵母对发酵耙豌豆挥发性风味物质的影响 [J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(9): 276–284. [YANG L, DENG J, ZHU J C, et al. Effect of five aroma-producing yeasts on volatile flavor compounds of fermented pulpy peas[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2024, 50(9): 276–284.]
- [34] LIU D, QI Y, ZHAO N, et al. Multivariate analysis reveals effect of glutathione-enriched inactive dry yeast on amino acids and volatile components of kiwi wine[J]. *Food Chemistry*, 2020, 329: 127086.