

沙棘叶及其醇提冻干粉挥发性物质和关键营养成分分析

陈璐瑶, 张志刚, 邢国良, 王捷, 姚玉军, 吕兆林

Analysis of Volatile Components and Critical Nutritional Components of Sea Buckthorn Leaves and Alcohol-extracted Freeze-dried Powder

CHEN Luyao, ZHANG Zhigang, XING Guoliang, WANG Jie, YAO Yujun, and L Zhaolin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024050074>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

沙棘酸奶挥发性风味物质的GC-IMS表征

Characterization of Volatile Flavors of Fermented Sea-buckthorn Yoghurt Using Gas Chromatography-Ion Mobility Spectroscopy

食品工业科技. 2023, 44(13): 308-315 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022080120>

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>

广叶绣球菌保鲜及干制后挥发性风味成分差异分析

Analysis of the Differences in Volatile Flavor Components of *Sparassis latifolia* after Preservation and Drying

食品工业科技. 2024, 45(2): 289-299 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023020283>

HS-SPME-GC-MS结合电子鼻探究渗透脱水联合干燥方式对桃脆片挥发性风味物质的影响

HS-SPME-GC-MS Combined with Electronic Nose to Explore the Effects of Osmotic Dehydration Coupled with Drying Methods on the Volatile Compounds of Peach Chips

食品工业科技. 2022, 43(18): 241-251 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021110341>

顶空固相微萃取结合溶剂辅助风味蒸发分析无籽刺梨挥发性成分及其呈香贡献

Analysis the Volatiles and Its Aroma Contribution in *Rosa Sterilis* by HS-SPME and LLE-SAFE

食品工业科技. 2023, 44(20): 289-297 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022090300>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

陈璐瑶, 张志刚, 邢国良, 等. 沙棘叶及其醇提冻干粉挥发性物质和关键营养成分分析 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(8): 272–280.
doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024050074

CHEN Luyao, ZHANG Zhigang, XING Guoliang, et al. Analysis of Volatile Components and Critical Nutritional Components of Sea Buckthorn Leaves and Alcohol-extracted Freeze-dried Powder[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(8): 272–280. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024050074

· 分析检测 ·

沙棘叶及其醇提冻干粉挥发性物质和 关键营养成分分析

陈璐瑶^{1,2}, 张志刚³, 邢国良³, 王 捷³, 姚玉军³, 吕兆林^{1,2,*}

(1. 北京林业大学生物科学与技术学院, 北京 100083;

2. 林业食品加工与安全北京市重点实验室, 北京 100083;

3. 内蒙古宇航人生物工程有限公司, 内蒙古呼和浩特 011517)

摘 要: 为探究沙棘叶与经真空冷冻干燥得到的冻干粉挥发性物质和关键营养成分间的差异。采用顶空固相微萃取结合气相色谱-质谱等技术对沙棘叶及其冻干粉的挥发性组分和氨基酸、可溶性糖构成进行了系统表征。结果显示, 沙棘叶中检测到 64 种挥发性化合物, 冻干粉鉴定出 60 种, 包含 26 种加工后新生成的物质。香气活度值 (Odor Activity Values, OAV) 与香气轮廓图的分析表明, 沙棘叶具有较高的青香、水果香、甜香强度, 而冻干粉表现出较高的花香、青香、脂香属性。此外, 沙棘叶和冻干粉中均存在含量较高的 13 种氨基酸和 3 种可溶性糖, 特别是亮氨酸、丙氨酸均与 2-甲基-丁醛、糠醛等大多数挥发性化合物表现出了显著的相关性。该结果可为后续沙棘叶速溶粉的风味研究以及开发推广提供一定参考依据。

关键词: 沙棘叶, 真空冷冻干燥, 速溶粉, 顶空固相微萃取 (HS-SPME), 挥发性化合物

中图分类号: TS255.36

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)08-0272-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024050074



本文网刊:

Analysis of Volatile Components and Critical Nutritional Components of Sea Buckthorn Leaves and Alcohol-extracted Freeze-dried Powder

CHEN Luyao^{1,2}, ZHANG Zhigang³, XING Guoliang³, WANG Jie³, YAO Yujun³, LÜ Zhaolin^{1,2,*}

(1. School of Biological Science and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Beijing Key Laboratory of Forestry Food Processing and Safety, Beijing 100083, China;

3. Inner Mongolia Yuhangren Bioengineering Technology Co., Ltd., Hohhot 011517, China)

Abstract: To explore the differences in volatile substances and critical nutrients between sea buckthorn leaves and freeze-dried powder obtained by vacuum freeze-drying. The volatile components, amino acids, and soluble sugars of sea buckthorn leaves and their freeze-dried powder were systematically characterized by headspace solid-phase microextraction combined with gas chromatography-mass spectrometry. Results showed that 64 volatile compounds were detected in sea-buckthorn leaves, and 60 volatile compounds were identified in freeze-dried powder, including 26 newly generated substances after processing. The odor activity values (OAV) analysis and aroma profile showed that sea buckthorn leaves had higher green, fruity, and sweet intensity. In contrast, freeze-dried powder showed higher floral, green, and fat aroma properties. In addition, there were 13 amino acids and 3 sugars with high content in sea buckthorn leaves and freeze-dried powder. In particular, leucine and alanine significantly correlated with most volatile compounds, such as 2-methylbutanal and furfural. The results provide a reference for subsequent research on the flavor characteristics of sea buckthorn leaf instant powder and its development and promotion.

收稿日期: 2024-05-10

基金项目: 沙棘高效提取技术研究及产品开发 (2016hxfwsxy011)。

作者简介: 陈璐瑶 (1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 天然产物提取及功能食品开发, E-mail: chenluyao20212023@163.com。

* 通信作者: 吕兆林 (1971-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 林源活性物质提取及功能开发, E-mail: zhaolinlv@bjfu.edu.cn。

Key words: sea buckthorn leaves; vacuum-freeze-drying; instant powder; headspace solid-phase microextraction (HS-SPME); volatile compound

沙棘(*Hippophae rhamnoides* L.)是一种多刺且具有固氮能力的落叶灌木,其果实、籽粕等器官均可食用入药。我国拥有最高的沙棘分布和种植密度,天然沙棘种质资源十分丰富^[1]。作为沙棘植株的一部分,沙棘叶片同样也是白雀木醇、异鼠李素和多酚等诸多生物活性物质的重要来源,具有显著的抗调节脂质代谢、抑制 α -淀粉酶活性以及抗氧化功能^[2-3]。表现出了极高的应用潜力和利用价值。

有研究指出沙棘叶表现出较高的水浸出物、游离氨基酸水平以及较低的酚氨比值,苦涩收敛感较弱^[4],具有良好的制茶适宜性和开发成低咖啡碱饮品的潜力。但目前对沙棘叶的利用形式较为单一,更侧重于对营养价值和生物活性的评价利用,却鲜有对产品的香气组分和风味等感官品质的研究。如张靖鹏等^[5]在沙棘叶中添加一定比例的普洱茶末,同时富集沙棘叶中的总黄酮和普洱茶丰富的茶褐素,浸提后得到一款活性成分更均衡和较高抗氧化活性的产品。顾秋亚等^[6]使用金花菌发酵处理沙棘叶得到了沙棘叶发酵茶,得到的终产物不仅青涩味得以改善,降脂活性也得以提升。

食品加工过程中干燥方式的选择往往在一定程度上影响着产物的色泽、质地和营养品质^[7]。真空冷冻干燥能够在隔绝氧气的条件下,保持物料的干燥温度处于较低水平,是获得优质产物的最温和的干燥方式之一^[8]。Wang 等^[9]的研究表明真空冷冻干燥有效保留了新鲜桃子的挥发性化合物,同时丰富了桃片中挥发性化合物的多样性和含量。宋娟等^[10]发现真空冷冻干燥得到的苹果干不仅与新鲜苹果的香气最为接近,还有效降低了抗氧化物的损失,获得了更好的口感质地。

为进一步丰富沙棘叶相关产品的消费市场,研究使用沙棘叶提取物结合真空冷冻干燥得到了一款沙棘叶冻干粉,采用顶空固相微萃取(Headspace Solid-Phase Microextraction, HS-SPME)联合气相色谱-质谱(Gas Chromatography-Mass Spectrometry, GC-MS)等技术对沙棘叶和冻干粉的挥发性物质差异、主要营养物质的构成以及二者的相关性进行多元统计分析,以探究真空冷冻干燥工艺后速溶粉的香气特征、氨基酸和可溶性糖组成的差异性。相关结果可为沙棘叶冻干速溶粉的感官品质的提升和扩大沙棘叶的商品化开发利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

新鲜沙棘叶 采自内蒙古自治区呼和浩特市清水河县北堡乡,将新鲜沙棘叶(剔除叶柄的全叶)在室温下自然阴干(室温约 20~25 ℃,并控制最终水分含量<10%),粉碎后过 30 目筛,避光保存备用;盐酸、

无水乙醇、氯化钠、吡啶、硅烷化试剂 分析纯,北京化工厂;麦芽糊精 食品级,山东嘉珂生物科技有限公司;2-辛醇、正构烷烃($C_{10}\sim C_{25}$)标准品、氨基酸混标、可溶性糖标准品 美国 Sigma Chemical 公司;实验室用水为娃哈哈纯净水。

LC 20A 高效液相色谱、GCMS-QP2010 Ultra 气相色谱质谱联用仪 日本岛津公司;57357-U 固相微萃取平台、57357-U SPME 手动进样手柄、SAAB-57328-U 固相萃取头 美国 Supelco 公司;Rtx-5MS 色谱柱 美国 Agilent 公司;CL-60T 超声仪 济南通海机械设备有限公司;RE-2000E 旋转蒸发仪 郑州生化仪器有限公司;CEB124 电子天平 上海赞唯横器有限公司;HXLG-10-50B 冻干机 上海沪析实业有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 沙棘叶速溶粉的制备 根据前期预实验的最优条件,称取干燥沙棘叶粉末以 1:25(m:v)的料液比在 60% 乙醇-水溶液(v:v)中浸泡约 10~12 h。然后在 50 ℃ 下辅以超声提取 50 min。除去滤渣,保留上清液,45 ℃ 温度下将溶剂旋干,然后加入 5 倍质量的纯净水溶解,于-80 ℃ 低温冰箱中预冻 8~10 h。真空冷冻干燥的条件为:真空度 0 Pa,冷阱温度-50 ℃,干燥时间 24 h(使含水量保持在 4%~5% 范围内)。最后将样品粉碎过筛后置于冰箱冷藏保存备用。

1.2.2 HS-SPME 提取挥发性化合物 参考 Ao 等^[11]的方法并稍作修改。称取沙棘叶和沙棘叶速溶粉样品各 1.5 g,转移至顶空瓶内,然后加入饱和氯化钠溶液和已知浓度的 2-辛醇。将顶空瓶置于固相微萃取装置上,设定萃取温度为 70 ℃,使用三合一萃取头顶空吸附 40 min。在进样口于 230 ℃ 温度下解析 5 min 后,进样分析。

1.2.3 GC-MS 分析 GC 条件:采用非极性柱 Rtx-5MS(0.25 mm×30 m×0.25 μ m)进行分离,以 1 mL/min 的高纯度氦(>99.99%)作为载气;分流比设置为 5:1;进样口温度为 230 ℃。

升温程序:采用程序升温,初始柱温为 40 ℃,以 5 ℃/min 的速度升至 130 ℃,然后以 10 ℃/min 的速度升至 150 ℃,再以 3 ℃/min 的速度升至 180 ℃,保持 1 min,最后以 10 ℃/min 的速度至 260 ℃,保持 3 min。

质谱条件:质谱离子源温度为 200 ℃,电离电压为 70 eV。全扫描模式下的质量扫描范围为 m/z 40~500。

1.2.4 挥发性化合物的定性、定量分析与香气活度值的计算 定性分析:初步鉴定是基于将未知化合物

的质谱与 NIST 14 和 NIST 14s 质谱数据库中的质谱进行匹配,保留匹配度大于 80% 的物质。然后根据正构烷烃($C_8 \sim C_{25}$)的保留指数计算了挥发性组分的保留指数(Retention Index, RI),用以最终确定样品中的挥发性化合物^[11]。

定量分析: 配制已知浓度的 2-辛醇溶液作为内标物,以某挥发性化合物与 2-辛醇的峰面积之比计算其含量。

香气活度值(Odor Activity Value, OAV): 某挥发性化合物的含量与其在空气中的察觉阈值之比,具体阈值参考文献^[12]。

1.2.5 氨基酸的测定 氨基酸衍生化: 参考 Ao 等^[11]的方法,下同。称取 1 g 样品,与 4 mL 6 mol/L 的盐酸混匀后,在 110 °C 下保温 20 h,除去滤渣,加入纯水至 10 mL 刻度。取 0.4 mL 水解液,氮吹除去溶剂,然后加纯水定容至 0.5 mL,40 °C 下保温 1 h。最后加入正己烷萃取混合液,取下层溶液过膜进样。采用氨基酸混标进行外标法定量。

液相色谱条件: Kromasil 100-5- C_{18} 柱(250 mm×4.6 mm);流动相 A: 0.01 mol/L 甲酸铵缓冲液-乙腈(97:3),流动相 B: 乙腈: 水(80:20);流速 0.5 mL/min;检测波长 254 nm;柱温 40 °C。

1.2.6 可溶性糖的测定 可溶性糖衍生化: 取 1 mL 样品醇提液并旋蒸以完全除去溶剂,用 1 mL 吡啶溶解后,加入 0.4、0.2 mL 硅烷化试剂,8000 r/min 离心 10 min,取上清液于气相色谱分析。采用可溶性糖标品进行外标法定量。

GC-FID 条件: HP-5 色谱柱(30 m×0.25 mm×0.25 μ m);升温程序: 以 180 °C 的初温保持 2 min,按照 6 °C/min 到 200 °C,保持 6 min,最后按照 40 °C/min 到 280 °C,保持 8 min。高纯氮气(1 mL/min)作为载气,20:1 的分流比。进样口温度为 280 °C。检测器温度为 300 °C。H₂: 30 mL/min;尾吹气: 30 mL/min;空气: 300 mL/min。

1.3 数据处理

每个样品均重复进行 3 次,表中数据以平均值±标准偏差表示;使用 SIMCA-P 14.1 软件构建相关性分析与显著性分析;相关图表的绘制均使用 Origin 2021 软件。

2 结果与分析

2.1 沙棘叶速溶粉挥发性风味化合物及香气类型的变化

2.1.1 挥发性化合物的种类及含量 香气是评价感官品质的关键指标之一,沙棘叶与其冻干粉的挥发性化合物总离子流图,如图 1 所示,鉴定出挥发性化合物共 94 种。沙棘叶速溶粉中挥发性化合物总含量由 108.76 mg/kg 增加到 149.20 mg/kg,新生成了芳樟醇、月桂醛、苯乙酮十二烷、2-戊基呋喃等 26 种挥发性化合物。

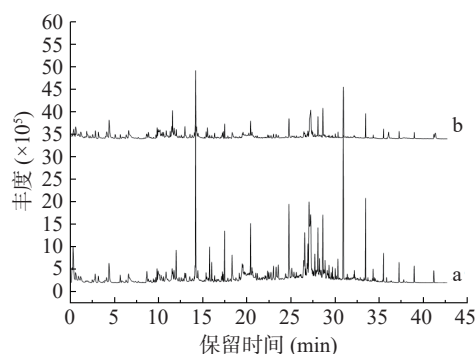


图 1 沙棘叶(a)、沙棘叶速溶粉(b)总离子流图

Fig.1 Total ion flow diagrams of sea buckthorn leaves (a), sea buckthorn leaves instant powder (b)

如表 1 所示,沙棘叶中共检出 65 种挥发性成分,包括醇类 16 种(22.97%)、醛类 15 种(36.01%)、酮类 13 种(8.60%)、酯类 7 种(14.43%)、烷烃类 8 种(11.91%)、酸类 3 种(3.74%)、醚类 1 种(0.89%)和其他化合物 1 种(1.44%)。壬醛、青叶醛、桉叶油醇、二氢猕猴桃内酯和正十四烷是其主要的挥发性成分。沙棘叶冻干速溶粉中则鉴定出醇类 14 种(19.36%)、醛类 17 种(37.33%)、酮类 11 种(5.45%)、酯类 3 种(11.55%)、烷烃类 12 种(23.17%)、酸类 1 种(1.33%)和其他化合物 2 种(1.82%),未检出醚类化合物,共计 59 种。壬醛、二氢猕猴桃内酯、正十四烷、癸醛和反-2-顺-6-壬二烯醛是冻干沙棘叶速溶粉中含量占比较高的挥发性成分。其中醛类、醇类和酯类化合物的含量百分比均在 10% 以上,被认为是构成二者香气的主要挥发性成分,与王宁宁^[13]的结果一致。

2.1.1.1 醛类化合物 醛类物质主要由脂质氧化和氨基酸分解代谢产生,被形容为具有果味和油脂香气。其阈值一般会低于其同源醇,在较低的浓度下也能对样品香气形成起着重要作用^[14]。醛类也是沙棘叶和沙棘叶速溶粉中种类、含量最丰富的挥发性物质,分别占总量的 36.01% 和 37.33%。两个样品均检测到 16 种醛类,包含 13 种共有成分。沙棘叶中含量最高为壬醛、2-己烯醛和 2,4-庚二烯醛。速溶粉加工过程中脯氨酸、赖氨酸的降解以及美拉德反应的增强会促进壬醛的形成^[15],从而使其含量提高,与癸醛、2,6-壬二烯醛同为速溶粉中最主要的醛类化合物。

2.1.1.2 醇类化合物 醇类物质是沙棘叶和速溶粉中的第二大挥发性化合物组,不仅能促进香气浓郁持久,还能使茶汤滋味醇厚回甘,被认为是脂肪酸氧化降解的产物,尤其是饱和醇类,一般具有较高的气味阈值,是样品次要气味来源^[16]。速溶粉中共鉴定出醇类物质 14 种,主要是苯乙醇、苯甲醇和正辛醇。桉叶油醇是沙棘叶中含量最高的醇类物质,其次是苯甲醇。沙棘叶中的 2-戊烯-1-醇也是红茶和冻干速溶红茶中的主要醇类物质,也在大多数茶品种中被检

表 1 沙棘叶与沙棘叶冻干速溶粉挥发性化合物鉴定结果

Table 1 Identification of volatile compounds in freeze-dried instant powder of sea buckthorn leaves and sea buckthorn leaves

序号	定性方式	RI ^a /RI ^b	名称	香气描述	含量(mg/kg)		差异性水平
					沙棘叶	速溶粉	
		醇类	24种				
1	MS	743	2,3-丁二醇	水果香、洋葱味	—	1.25±0.04	***
2	RI、MS	763/769	2-戊烯-1-醇	青香	1.13±0.05	—	***
3	RI、MS	868/860	正己醇	草本味、木质味、甜味、果香、花香	1.07±0.06	—	***
4	RI、MS	969/969	1-辛烯-3-醇	草本味、泥土味、薰衣草香、玫瑰香、甜香	1.33±0.05	1.30±0.05	***
5	MS	969	2-甲基环己醇	—	—	1.05±0.02	***
6	RI、MS	1031/1036	苯甲醇	水果香、甜香	2.92±0.17	2.13±0.14	***
7	RI、MS	1039/1035	3,5-辛二烯-2-醇	—	—	0.93±0.06	***
8	MS	1051	甲基环庚醇	—	2.09±0.11	—	***
9	RI、MS	1030/1059	桉叶油醇	樟脑味、青香	4.68±0.23	—	***
10	RI、MS	1068/1065	正辛醇	橙子香、玫瑰香、甜味、青草香	1.05±0.05	2.05±0.15	***
11	MS	1064	芳樟醇	玫瑰香、铃兰香、木质香	—	1.39±0.04	***
12	RI、MS	1079/1078	青蒿醇	—	1.24±0.05	—	***
13	RI、MS	1095/1088	2,6-二甲基-1,7-辛二烯-3-醇	—	1.11±0.06	—	***
14	RI、MS	1093/1083	芳樟醇	薰衣草香、花香	1.40±0.06	1.14±0.01	***
15	RI、MS	1116/1123	苯乙醇	玫瑰香、蜂蜜味、泥土味	1.34±0.02	2.31±0.17	***
16	MS	1138	葑醇		1.33±0.01	—	***
17	MS	1143	α -松油醇	紫丁香花香	1.07±0.03	1.34±0.04	***
18	MS	1150	邻甲基苄醇		—	1.51±0.7	***
19	RI、MS	1162/1159	天竺葵醇	脂肪味、橙子香、玫瑰香	—	1.02±0.4	***
20	MS	1164	氧化芳樟醇(呋喃类)	花香、木质香、樟脑味	1.29±0.04	—	***
21	MS	1164	薄荷醇	胡椒香、泥土香、木质香	—	1.29±0.05	***
22	RI、MS	1165/1161	4-松油醇	—	1.01±0.04	—	***
23	MS	1255	氧化芳樟醇(吡喃类)	花香	0.95±0.03	—	***
24	RI、MS	1478/1477	月桂醇	脂肪味、花香、蜡味	—	1.84±0.06	***
		醛类	19种				
25	RI、MS	652/643	2-甲基-丁醛	—	—	0.54±0.01	***
26	RI、MS	750/745	2-戊烯醛	—	0.99±0.05	—	***
27	RI、MS	801/806	正己醛	脂肪味、青木味、水果味	1.83±0.08	2.22±0.17	***
28	RI、MS	824/814	2-己烯醛	苹果香、青草味	6.37±0.29	4.70±0.23	
29	RI、MS	830/831	糠醛	杏仁味	—	0.33±0.01	***
30	RI、MS	903/905	正庚醛	—	0.53±0.01	—	***
31	RI、MS	966/962	苯甲醛	苦杏仁味、坚果味、甜味	1.92±0.06	0.74±0.03	***
32	RI、MS	992/991	2,4-庚二烯醛	坚果味、脂肪味	2.53±0.11	3.12±0.19	***
33	MS	990	1-甲基-2-庚醛	—	—	1.22±0.07	***
34	RI、MS	1006/1005	正辛醛	脂肪味、柑橘香、蜂蜜味	1.38±0.04	0.94±0.03	***
35	RI、MS	1079/1081	苯乙醛	青香、风信子香、甜味、水果香	2.05±0.10	4.25±0.26	***
36	RI、MS	1104/1104	壬醛	脂肪味、橙子香、玫瑰香	13.60±0.76	19.76±1.01	**
37	RI、MS	1116/1112	2-壬醛	黄瓜香、青香、脂肪味	0.84±0.03	2.69±0.13	***
38	RI、MS	1126/1120	2,6-壬二烯醛	黄瓜香、紫罗兰花香	0.78±0.04	4.88±0.27	***
39	RI、MS	1134/1126	桃金娘醛	—	0.79±0.03	0.62±0.02	**
40	RI、MS	1197/1186	藏红花醛	花香、甜香、草药味	1.58±0.08	1.43±0.08	NS
41	RI、MS	1207/1204	癸醛	甜香、蜡味、花香、柑橘香、脂肪味	2.37±0.14	5.86±0.30	***
42	RI、MS	1220/1214	环柠檬醛	薄荷味、樟脑味	0.67±0.02	0.65±0.01	NS
43	RI、MS	1412/1402	月桂醛	紫罗兰香、脂肪味、木质香	—	2.68±0.17	***
		酮类	17种				
44	RI、MS	883/888	3-甲基-2-庚酮	—	0.51±0.03	0.24±0.01	***
45	MS	952	4-甲基环己酮	—	0.38±0.02	0.20±0.01	***
46	MS	963	1-(3-亚甲基环戊基)乙酮	—	0.61±0.03	—	***
47		968/943	1-辛烯-3-酮	蘑菇味	—	0.27±0.01	***
48	MS	983	3,4-二甲基环丁-3-烯-1,2-二酮	—	—	0.99±0.04	***
49	RI、MS	985/988	6-甲基-5-庚烯-2-酮	绿色、柑橘香、脂肪味、梨子香	1.13±0.05	1.06±0.06	NS

续表 1

序号	定性方式	RI ^a /RI ^b	名称	香气描述	含量(mg/kg)		差异性水平
					沙棘叶	速溶粉	
50	RI、MS	1062/1056	苯乙酮	甜香、草本味、樱桃香、花香	—	0.41±0.02	***
51	RI、MS	1059/1052	青蒿酮	—	—	0.78±0.03	***
52	MS	1068	3,5-壬二烯-2-酮	—	0.44±0.02	—	***
53	RI、MS	1076/1071	3,5-辛二烯-2-酮	—	1.58±0.06	0.79±0.04	***
54	RI、MS	1141/1134	2-茨酮	薄荷香	1.28±0.07	—	***
55	RI、MS	1234/1225	3-乙基-4-甲基吡咯-2,5-二酮	—	0.87±0.04	—	***
56	RI、MS	1243/1237	优葛缕酮	—	0.29±0.01	—	***
57	RI、MS	1453/1442	香叶基丙酮	青香、玫瑰香、木兰香	0.66±0.04	1.97±0.12	***
58	RI、MS	1460/1454	5,6-环氧- β -紫罗兰酮	—	0.53±0.03	—	***
59	RI、MS	1470/1467	紫罗兰酮	草本香、紫罗兰香、花香	0.73±0.05	0.81±0.05	NS
60	RI、MS	1846/1840	植酮	—	0.34±0.02	0.62±0.03	***
		酯类	9种				
61	MS	848	乳酸乙酯	—	—	1.84±0.09	***
62	RI、MS	927/921	甲酸己酯	苹果味、李子味、甜味	2.16±0.14	—	***
63	MS	992	3-己烯酸乙酯	青香、水果香	1.60±0.07	—	***
64	RI、MS	999/994	己酸乙酯	菠萝香、香蕉香、酒香	3.29±0.18	—	***
65	RI、MS	1169/1160	苯甲酸乙酯	洋甘菊香、花香、芹菜味、果香	2.45±0.17	—	***
66	RI、MS	1234/1227	水杨酸甲酯	薄荷香、辣味、甜香、冬青味	0.95±0.05	—	***
67	RI、MS	1381/1381	癸酸乙酯	葡萄香、木质香	1.33±0.08	—	***
68	RI、MS	1495/1489	二氢猕猴桃内酯	木质香, 干草味	3.91±0.23	14.25±0.79	NS
69	RI、MS	1961/1963	邻苯二甲酸-1-丁酯-2-异丁酯	—	—	1.14±0.06	***
		酸类	3种				
70	MS	964	5-己烯酸	—	1.00±0.04	—	***
71	RI、MS	977/974	正己酸	脂肪味、辛辣味	1.83±0.09	1.98±0.08	NS
72	RI、MS	1278/1272	天竺葵酸	脂肪味、青香	1.24±0.07	—	***
		醚类	1种	柑橘香、薄荷味			
73	RI、MS	1020/1013	对甲苯甲醚	—	0.97±0.05	—	***
		烷烃类	15种				
74	MS	850	1,2-环氧基环庚烷	—	—	2.24±0.12	***
75	RI、MS	861/863	1-乙基环己烯	—	1.41±0.06	—	***
76	RI、MS	985/986	3,5,5-三甲基-2-己烯	—	—	1.16±0.07	***
77	MS	1018	D-柠檬烯	—	2.16±0.16	1.18±0.04	***
78	MS	1214	正十二烷	—	—	1.46±0.05	***
79	RI、MS	1325/1315	4,6-二甲基十二烷	—	1.39±0.08	—	***
80	MS	1326	2,3-二甲基十三烷	—	—	2.34±0.11	***
81	RI、MS	1332/1320	金合欢烷	—	1.35±0.06	3.49±0.18	***
82	MS	1377	庚基环己烷	—	—	1.26±0.05	***
83	MS	1431	正十四烷	—	3.42±0.19	11.37±0.76	***
84	RI、MS	1454/1458	5-甲基十四烷	—	0.98±0.05	1.29±0.04	**
85	MS	1611	(1-丙基庚基)环己烷	—	0.99±0.03	—	***
86	MS	1612	十六烷	—	1.27±0.07	2.67±0.14	***
87	RI、MS	1738/1746	8-甲基十七烷	—	—	0.93±0.06	***
88	RI、MS	1760/1765	正十一烷基环己烷	—	—	0.97±0.05	***
		其他	3种				
89	RI、MS	1005/1004	2-戊基呋喃	青豆味、黄油味	—	1.66±0.06	***
90	RI、MS	1025/1032	对伞花烃	胡萝卜味、柑橘香	1.57±0.03	—	***
91	RI、MS	1273/1268	邻叔丁基苯酚	—	—	1.06±0.02	***

注: “RI^a”表示该物质在“<https://NIST.Chemistry.WebBook>”中查询到的保留指数; “RI^b”表示该物质实际计算得到的保留指数; “—”表示该样品中未鉴定出物质; 香气描述参考<http://www.flavornet.org/>网站或参考文献[24]; 差异性水平 “* $P<0.05$ ”、“** $P<0.01$ ”、“*** $P<0.001$ ”、“NS $P>0.05$ ”。

出^[17]。而氧化芳樟醇(呋喃类)和氧化芳樟醇(吡喃类)的产生通常与 β -D-葡萄糖苷糖基化键的断裂和合成有关,也是红茶、绿茶等研究的关键气味化

合物^[18]。

2.1.1.3 酯类化合物 酯类物质通常产生于脂肪或蛋白质降解引起的醇类和酸之间的酯化反应。有

7 种酯类物质在沙棘叶鉴定出,主要是二氢猕猴桃内酯、己酸乙酯和苯甲酸乙酯。沙棘叶速溶粉损失了 6 种酯类化合物,仅检测出二氢猕猴桃内酯、乳酸乙酯和邻苯二甲酸-1-丁酯-2-异丁酯 3 种。说明酯类化合物在加工过程中不稳定易挥发,这与 Zhang 等^[19]的研究结论相一致。速溶粉中二氢猕猴桃内酯的含量大幅度提高约 3 倍,是最丰富的酯类化合物。Shao 等^[20]也得到了相似的结论,相较于分散固定等前处理步骤,绿茶经焙烤过程后氢猕猴桃内酯的含量更高。这主要是加工过程中胡萝卜素经热处理发生非酶促氧化的结果。

2.1.1.4 酮类化合物 酮类物质通常来源于烷烃降解和美拉德反应。有 13 种酮类物质在沙棘叶中鉴定出,其中以 3,5-辛二烯-2-酮、2-茨酮和 6-甲基-5-庚烯-2-酮的含量最为丰富。速溶粉中鉴定出酮类物质 11 种,含量最高的是反-香叶基丙酮,其次是 6-甲基-5-庚烯-2-酮和 3,4-二甲基环丁-3-烯-1,2-二酮。6-甲基-5-庚烯-2-酮在乌龙茶中也有报道,被形容为“草本味”^[21]。速溶粉中 1-辛烯-3-酮虽然少量存在 (0.27 ± 0.01 mg/kg),但具有较低的气味阈值,能够散发出蘑菇状的气味,是速溶粉“青香”的重要来源之一。

2.1.1.5 烷烃类化合物 沙棘叶速溶粉中共鉴定出烷烃类物质 12 种,新生成了 7 种,如 1,2-环氧基环庚烷、庚基环己烷等,总含量也增加到 30.35 mg/kg,成为速溶粉含量仅次于醛类的第二大类挥发性化合物。烷烃类物质一般产生于脂肪酸长链的脱羧基反应,具有较高的气味阈值,因而对样品香气形成的影响作用极小,只会一定程度上起到平衡最终香气的作用^[22]。尤其是增加的这 7 种烷烃类物质都是饱和烷烃,通常对样品香气特征影响较小,不饱和碳氢化合物的种类和含量往往是影响香气形成的重要原因^[23]。

2.1.2 香气活度值分析及香气轮廓的变化 香气是不同浓度下不同种类的挥发性化合物气味属性的综合呈现,但并非所有的挥发性物质都有气味能被感知。一般认为 $OAV > 1$ 的化合物是关键香气成分,能够决定样品的香气分布, $OAV > 10$ 则对香气形成有显著贡献^[25]。沙棘叶中 $OAV > 10$ 的挥发性化合物共有 48 种,被形容为“花香”和“草本香”的紫罗兰酮对整体香气贡献最大, OAV 为 104960.89。沙棘叶速溶粉中有 50 种, OAV 值最大的是形容为“玫瑰香”和“蜂蜜味”的苯乙醇($OAV=153897.17$)。速溶粉的香气活度值(OAV)由 28079.58 增加到 483507.96,以醛类和醇类化合物 OAV 的提高最显著。

参考 GB/T 14487-2017《茶叶感官审评术语》^[26],归纳出 7 种香气类型:甜香(如蜂蜜味)、花香(如铃兰香、玫瑰香)、水果香(如苹果香、菠萝香)、脂香(如坚果香)、青香(如薄荷味)、木质香(如草本味)、辛辣味。由图 2 可知速溶粉与沙棘叶的香气类型整

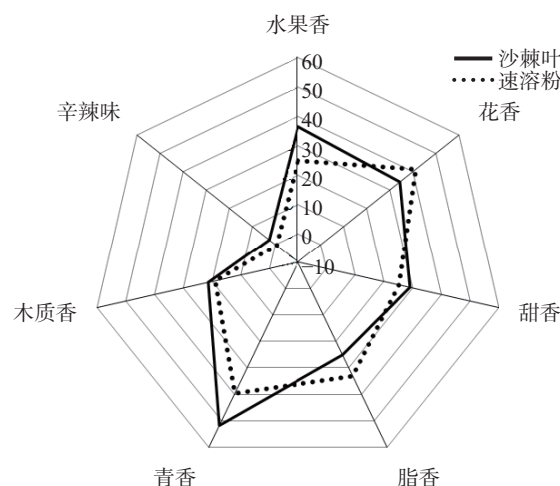


图 2 沙棘叶与沙棘叶冻干速溶粉香气雷达图

Fig.2 Aroma radar diagram of sea buckthorn leaves and freeze-dried instant powder of sea buckthorn leaves

体上较为相似,但沙棘叶以青香、水果香、花香和甜香占主导。表现柑橘香和橙香的癸醛和对伞花烃、壬醛具有极大的香气活度值,对其果香的形成有显著贡献。多种具有水果香的酯类化合物如甲酸己酯、3-己烯酸乙酯和癸酸乙酯等的存在也是其果香馥郁的原因之一,尤其是具有较低的阈值(0.003 mg/kg)的己酸乙酯。呈现为胡萝卜香的对伞花烃和呈现草本香的紫罗兰酮是沙棘叶青香的最主要贡献者。紫罗兰酮也是大部分茶香形成的主要挥发性物质之一,一般来自茶叶加工过程中的各类热降解反应或发酵过程的酶促反应^[27]。

相比之下,速溶粉花香和脂香的香气特征更为突出。除了和 2,6-壬二烯醛(紫罗兰花香、黄瓜味) OAV 值均成倍加有关外,仅在速溶粉中出现的芳樟醇、天竺葵醇以及月桂醛多被描述为“玫瑰、铃兰、紫罗兰”、“脂肪”状的气味,也是其具有较高的花香和脂香强度的重要原因。对脂香同样有贡献的,还有呈现黄油味的 2-戊基呋喃,它由加工过程产生,是氨基和糖通过美拉德反应和斯特雷克降解合成的产物^[28]。

2.2 沙棘叶速溶粉氨基酸、可溶性糖的构成分析

沙棘叶和沙棘叶冻干速溶粉均鉴定出了 13 种氨基酸,包括 3 种必需氨基酸,结果如图 3 所示。速溶粉中氨基酸的种类虽未发生变化,但每种氨基酸的含量和总量均降低,为 12.80 ± 0.64 mg/g DW。甘氨酸(1.89 ± 0.08 mg/g DW)和丝氨酸(2.83 ± 0.16 mg/g DW)是速溶粉中占主导地位的氨基酸,可为茶汤贡献“甜味”。赖氨酸、天冬氨酸和谷氨酸这三种鲜味氨基酸的总量虽然降低,但总占比却由 13.81% 提高到 33.91%,在一定程度上能够反映氨基酸最终呈味的不同。

可溶性糖参与诸多挥发性成分的代谢途径,在评价风味、口感方面起着决定性的作用^[29]。沙棘叶和速溶粉中都检测到了果糖、葡萄糖和蔗糖。蔗糖

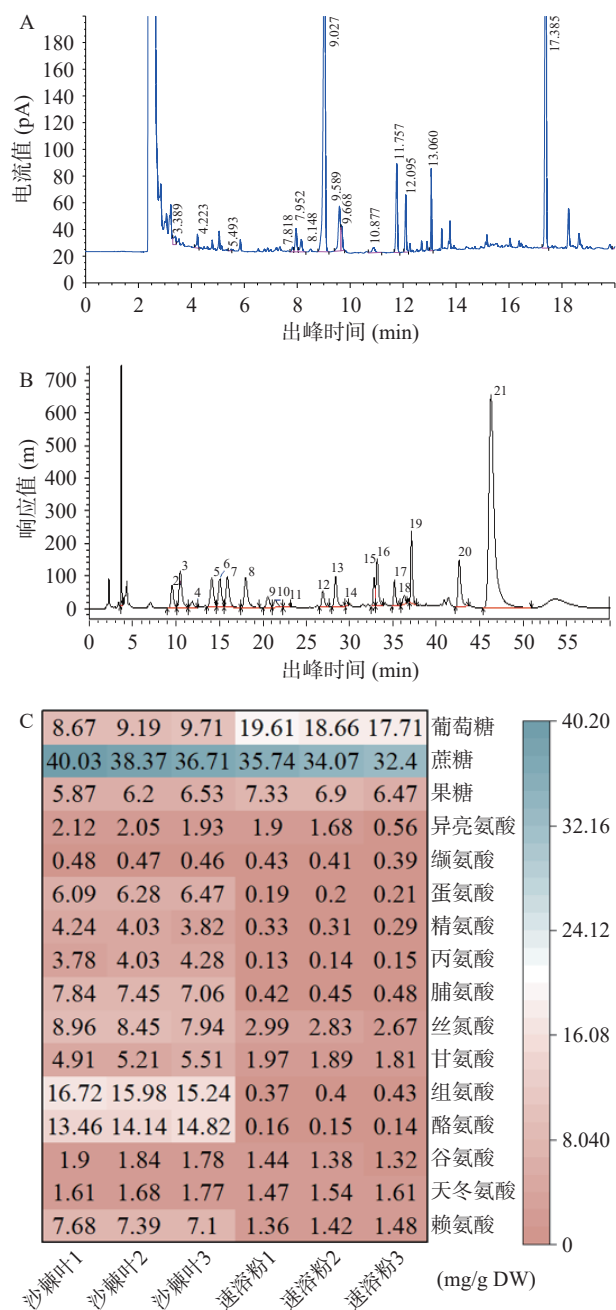


图3 样品可溶性糖气相色谱检测结果(A), 氨基酸液相色谱检测结果(B)和基于氨基酸、可溶性糖含量的热图分析(C)

Fig.3 Sample soluble sugar gas chromatography results (A), amino acid liquid chromatography results (B) and heatmap analysis based on amino acid and soluble sugar content (C)

是速溶粉中含量最高的糖(34.07 ± 1.67 mg/g DW), 相较于沙棘叶其含量略有减少, 但果糖和葡萄糖的水平均提高。经加工过程, 可溶性糖总量由 53.76 mg/g DW 提高到 59.63 mg/g DW, 一方面是由于加工过程中纤维素多糖和葡萄糖苷键的破坏增强了游离糖的释放^[30]; 另一方面则是蔗糖由于脱支酶活性而水解, 引起了果糖和葡萄糖的增加。

2.3 沙棘叶速溶粉挥发性风味化合物与氨基酸、可溶性糖的关联性分析

2.3.1 PCA 分析 沙棘叶与冻干速溶粉中 91 种挥发性组分与 16 种非挥发组分 PCA 分析结果如

图 4 所示, 总累积方差贡献率为 94.1%(PC1 为 89.7%, PC2 为 4.4%)。沙棘叶与速溶粉分别位于不同的象限内, PCA 的双曲线显示了两个样本(SL 与 SLIP)的良好分离。

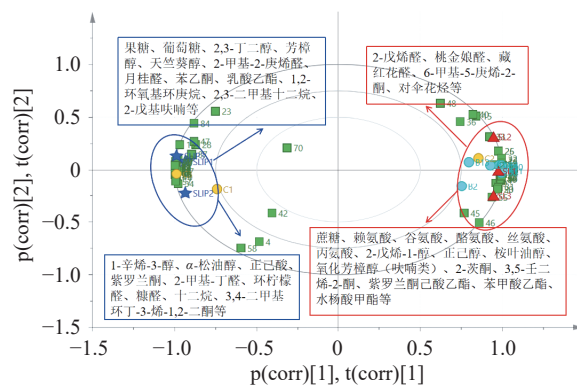


图4 沙棘叶(SL)与沙棘叶冻干速溶粉(SLIP)中 91 种挥发性组分与 16 种非挥发性组分 PCA 得分图

Fig.4 Plot of PCA scores for 91 volatile fractions and 16 non-volatile fractions of sea buckthorn leaves versus freeze-dried instant powder of sea buckthorn leaves

沙棘叶(SL)样品主要分布在 PC1 的正方向, 在 13 种氨基酸、1 种可溶性糖(蔗糖)、10 种醇、3 种醛、6 种酮、6 种酯、2 种酸、1 种醚、4 种烷烃含量上与沙棘叶速溶粉有显著区别。除了和苯甲醇、2-己烯醛、桃金娘醛、6-甲基-5-庚烯-2-酮、柠檬烯等较高的含量水平正相关外, 仅在沙棘叶中出现的 2-戊烯-1-醇、桉叶油醇、2-茨酮、甲酸己酯、水杨酸甲酯、对伞花烃等 32 种挥发物也是区分沙棘叶的沙棘叶速溶粉的关键物质, 主要为沙棘叶贡献青香、水果香和木质香。

沙棘叶速溶粉主要分布在 PC1 的负方向和 PC2 的正方向, 在 8 种醇、3 种醛、4 种酮、2 种酯、7 种烷烃含量上与沙棘叶速溶粉(SLIP)有显著区别。具有更高的花香和脂香香气描述, 这和其特有组分芳樟醇(玫瑰香、铃兰香、木质香)、天竺葵醇(脂肪味、橙子香、玫瑰香)、月桂醇(脂肪味、花香、蜡味)、2-戊基呋喃(青豆味、黄油味)等密切相关, 与 OAV 的分析结果相一致。另外沙棘叶速溶粉还表现出果糖(C1)和葡萄糖(C3)含量升高的特征。

2.3.2 相关性分析 使用 Pearson 相关性分析得到了 16 种非挥发性组分(13 种氨基酸、3 种可溶性糖)与干 91 挥发性化合物的相关系数热图, 见图 5。

在速溶粉中含量较高的糠醛、2, 4-庚二烯醛、苯乙醛、2, 6-壬二烯醛、壬醛、2-壬醛等 9 种醛类与多数氨基酸表现较强负相关, 这些化合物是氨基酸美拉德反应的产物, 二羰基化合物存在下发生氧化脱氨和脱羧反应的结果^[31], 香气一般被描述为具有“紫罗兰花香、风信子香、坚果味”等, 说明氨基酸的损失对速溶粉“花香”和“脂香”的形成是有利的。9 种醇类化合物(桉叶油醇、4-松油醇、2-戊烯-1-醇等)和大部分酯类(甲酸己酯、己酸乙酯等)都与果糖、葡萄糖、天

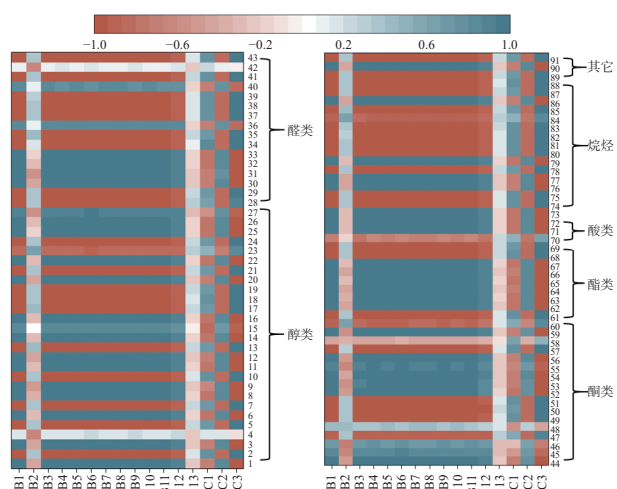


图 5 91 种挥发性组分与 16 种非挥发组分相关性热图

Fig.5 Correlation heat map of 91 volatile components and 16 non-volatile components

注: 1~91 分别代表 91 种挥发性成分, 与表 1 的编号所对应; B1~B13 分别代表赖氨酸、天冬氨酸、谷氨酸、酪氨酸、组氨酸、甘氨酸、丝氨酸、脯氨酸、丙氨酸、精氨酸、蛋氨酸、缬氨酸、异亮氨酸; C1~C3 分别代表果糖、蔗糖、葡萄糖。

冬氨酸和异亮氨酸表现出负相关, 与其他 11 种氨基酸和蔗糖表现出较强正相关。随着加工工艺的进行, 果糖和葡萄糖水平升高, 可归因于加工过程蔗糖水解、氧化以及酶活性的变化^[32]。而氨基酸、蔗糖含量水平的下降, 常伴随具有“菠萝香、李子香、葡萄香”酯类物质以及具有“樟脑味、青香、薄荷香”的醇类物质的损失, 从而造成果香和青香强度的下降。

总体而言, 除天冬氨酸(B2)和异亮氨酸(B13)外, 绝大多数挥发性化合物都与氨基酸间表现出了极为显著的相关性, 说明氨基酸单体在促成独特味道和作为香气化合物的前体方面起着至关重要的作用, 其代谢的相关途径主要包括脱氢、脱羧、转氨和氧化反应。例如丙氨酸可以经过 Strecker 降解生成正己醛, 这可以很好地解释冻干沙棘叶速溶粉中正己醛含量增加而丙氨酸含量降低^[33]。蛋氨酸通过相关酶转化为 S-腺苷-蛋氨酸(SAM), SAM 是许多甲基化芳香挥发物(如苯甲酸乙酯)的甲基供体, 蛋氨酸与苯甲酸乙酯的负相关性可以解释为 SAM 通过另一种循环进一步代谢成了其它代谢物^[34]。速溶粉中 2-甲基-丁醛的生成则是亮氨酸在转氨酶的作用下, 氨基发生转移, 最后经脱羧酶作用生成, 或者是通过缬氨酸和亮氨酸的 Strecker 降解形成, 因此与亮氨酸表现负相关^[35]。然而, 氨基酸、可溶性糖与和挥发性风味化合物之间的联系非常复杂。它们彼此间既能互相作用, 又能参与酶促反应、热降解、美拉德反应和加热氧化, 参与挥发性风味化合物作为前体的各种途径。

3 结论

研究发现, 醛类和酯类化合物是沙棘叶和冻干粉的主要挥发性组分。沙棘叶主要表现青香和果香, 对香气贡献最大的化合物为紫罗兰酮、对伞花烃、正壬醛等; 冻干粉中主要的特征香气成分为苯乙醇、癸

醛和月桂醛, 花香和脂香是其主要的香气类型。营养成分方面, 沙棘叶冻干粉中果糖和葡萄糖含量因蔗糖的水解而增加, 各氨基酸的含量受加工过程的影响虽表现出了不同程度的损失, 但谷氨酸等鲜味氨基酸的总占比提高, 丰富了味觉层次。

2 种样品不仅在 91 种挥发性化合物和 13 种氨基酸、3 种可溶性糖构成上有显著差异。大部分酯类和醇类化合物还与氨基酸和可溶性糖表现出较强正负相关性, 也在一定程度上印证了氨基酸作为香气前体物的参与各种香气成分形成转化途径。

研究结果阐明了沙棘叶和沙棘叶冻干速溶粉之间挥发性化合物和非挥发性化合物组成上的差异, 揭示了加工过程后的香气和主要营养成分(氨基酸、可溶性糖)的相关性规律, 为沙棘叶速溶粉及相关产品的开发提供了理论依据和新思路。

© The Author(s) 2025. 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] 吕兆林, 袁玮琼, 张柏林, 等. 沙棘果实中主要活性成分质量分布[J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(1): 144-152. [LÜ Z L, YUAN W Q, ZHANG B L, et al. A review on mass distribution of active components from Hippophae rhamnoides fruits[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(1): 144-152.]
- [2] MU Y H, TAO C, YUAN W Q, et al. Sea buckthorn leaf L-quebrachitol extract for improved glucose and lipid metabolism in insulin-resistant hepG2 cells[J]. BioResources, 2022, 17(1): 527-542.
- [3] 陶翠, 王捷, 姚玉军, 等. 沙棘中白雀木醇表征方法及其分布规律[J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(1): 121-126. [TAO C, WANG J, YAO Y J, et al. Characterization method of white sparrow wood alcohol in sea buckthorn and its distribution law[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(1): 121-126.]
- [4] 陈海银. 山西省沙棘叶资源性化学评价及制茶关键技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2021. [CHEN H Y. Research on chemical evaluation of sea buckthorn leaf resources and key technology of tea making in Shanxi province[D]. Taiyuan: North Central University, 2021.]
- [5] 张靖鹏, 翟宇晴, 张得钧. 基于响应面法优化沙棘普洱茶粉水提工艺及体外抗氧化能力评价研究[J]. 云南民族大学学报(自然科学版), 2024, 33(1): 31-40. [ZHANG J P, ZHAI Y Q, ZHANG D J. Optimization of water extraction process of sea buckthorn Pu'er tea powder based on response surface method and evaluation of antioxidant capacity in vitro[J]. Journal of Yunnan University for Nationalities (Natural Science Edition), 2024, 33(1): 31-40.]
- [6] 顾秋亚, 李姝瑶, 杨文华, 等. 富含黄酮苷元沙棘叶发酵茶的制备及其生物活性[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(24): 118-124. [GU Q Y, LI S Y, YANG W H, et al. Preparation and biological activity of sea buckthorn leaf fermented tea rich in flavonoid aglycones[J]. Food Research and Development, 2022, 43(24): 118-124.]
- [7] DU L, 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] CHUMROENPHAT T, SOMBOONWATTHANAKUL I,

- SAENSOUK S, et al. Changes in curcuminoids and chemical components of turmeric (*Curcuma longa* L.) under freeze-drying and low-temperature drying methods[J]. Food Chemistry, 2020, 339: 128121.
- [9] WANG J R, WU X Y, CUI C B, et al. Effect of osmotic dehydration combined with vacuum freeze-drying treatment on characteristic aroma components of peach slices[J]. Food Chemistry: X, 2024, 30(22): 101337.
- [10] 宋娟, 张海燕, 曾朝珍, 等. 干燥方式对苹果干品质特性及风味的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(17): 221–231. [SONG J, ZHANG H Y, ZENG C Z, et al. Effect of drying method on quality characteristics and flavor of dried apple[J]. Food Industry Science and Technology, 2024, 45(17): 221–231.]
- [11] AO X, MU Y H, XIE S, et al. Impact of UHT processing on volatile components and chemical composition of sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides*) pulp: A prediction of the biochemical pathway underlying aroma compound formation[J]. Food Chemistry, 2022, 390: 133142.
- [12] LEO VAN MEHEIT. 水和其他介质中的风味阈值汇编(第二增订版)[M]. 科学出版社, 2021. [LEO VAN MEHEIT. Compilation of flavor thresholds in water and other media (second revised edition) [M]. Science Press, 2021.]
- [13] 王宁宁. 骆驼蓬和沙棘叶化学成分分析及生物活性研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2022. [WANG N N. Analysis of chemical constituents and bioactivity of camelina and sea buckthorn leaves [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2022.]
- [14] 伍小丫, 张悦, 张玮, 等. 不同地区康普茶挥发性物质分析[J/OL]. 食品工业科技, 1–9[2024-01-29]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023050254> [WU X Y, ZHANG Y, ZHANG W, et al. Analyse volatile substances in Kang Pu tea from different regions[J/OL]. Food Industry Science and Technology, 1–9[2024-01-29]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023050254>]
- [15] CHEN G, WU F, PEI F, et al. Volatile components of white *Hypsizygus marmoreus* detected by electronic nose and HS-SPME-GC-MS: Influence of four drying methods[J]. International Journal of Food Properties, 2017, 20(12):2901–2910.
- [16] 刘雅芳, 滕杰, 刘洋, 等. SBSE-GC-MS 分析不同等级宁红茶的差异香气成分[J]. 食品工业科技, 2023, 44(11): 254–264. [LIU Y F, TENG J, LIU Y, et al. SBSE-GC-MS analysis of differential aroma components of different grades of Ning Hong tea[J]. Food Industry Science and Technology, 2023, 44(11): 254–264.]
- [17] ASSAF S, HADAR Y, DOSORETZ C G. 1-Octen-3-ol and 13-hydroperoxylinoleate are products of distinct pathways in the oxidative breakdown of linoleic acid by *Pleurotus pulmonarius*[J]. Enzyme and Microbial Technology, 1997(21): 484–490.
- [18] LÜ S D, WU Y S, WEI J F, et al. Application of gas chromatography-mass spectrometry and chemometrics methods for assessing volatile profiles of Pu-erh tea with different processing methods and aging years[J]. RSC Advances, 2015, 5(107): 87817.
- [19] ZHANG T, NI H, QIU X J, et al. Suppresnsive interaction approach for masking stale note of instant ripened Pu-Erh tea products[J]. Molecules, 2019, 24(24): 4473.
- [20] SHAO C Y, ZHANG Y, LÜ H P, et al. Aromatic profiles and enantiomeric distributions of chiral odorants in baked green teas with different picking tenderness[J]. Food Chemistry, 2022, 388: 132969.
- [21] 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 olfactometry and sensory analysis[J]. Food Chemistry, 2019(274): 130–136.
- [22] WANG C, LI J, ZHANG Y, et al. Effects of electrostatic spray drying on the sensory qualities, aroma profile, and microstructural features of instant Pu-erh tea.[J]. Food chemistry, 2022(373): 131546.
- [23] QIN D D, WANG Q S, JIANG X H, et al. Identification of key volatile and odor-active compounds in 10 main fragrance types of Fenghuang Dancong tea using HS-SPME/GC-MS combined with multivariate analysis[J]. Food Research International, 2023, 173: 113356.
- [24] BUROCK G A. Fenaroli's Handbook of Flavor Ingredients[M]. 6th ed. Florida: CRC Press, 1975.
- [25] WANG C, ZHANG C, KONG Y, et al. A comparative study of volatile components in Dianhong teas from fresh leaves of four tea cultivars by using chromatography-mass spectrometry, multivariate data analysis, and descriptive sensory analysis[J]. Food Research International, 2017, 100: 267–275.
- [26] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 茶叶感官审评术语. GB/T 14487-2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Tea sensory terminology GB/T 14487-2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.]
- [27] 马林龙, 罗正飞, 刘艳丽, 等. 基于多元统计方法的临沧市普洱生茶香气成分分析[J]. 食品工业科技, 2023, 44(20): 331–337. [MA L L, LU Z F, LIU Y L, et al. Analysis of aroma components of Lincang Pu'er raw tea based on multivariate statistical methods [J]. Food Industry Science and Technology, 2023, 44(20): 331–337.]
- [28] 杨凯辉. 微波等离子灯模拟日晒提高藏茶品质的工艺研究及风味物质分析[D]. 成都: 四川农业大学, 2022. [YANG K H. Process study and flavor substance analysis of simulated solarization by microwave plasma lamp to improve the quality of Tibetan tea[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2022.]
- [29] ZHAO R, XIAO H W, LIU C J, et al. Dynamic changes in volatile and non-volatile flavor compounds in lemon flavedo during freeze-drying and hot-air drying[J]. LWT, 2023(175): 114510.
- [30] DAS R P, KIM Y, HONG S, et al. Profiling of volatile and non-phenolic metabolites—Amino acids, organic acids, and sugars of green tea extracts obtained by different extraction techniques[J]. Food Chemistry, 2019(296): 69–77.
- [31] GAMZE G, DUYGU K, HASIM K, et al. Impact of production and drying methods on the volatile and phenolic characteristics of fresh and powdered sweet red peppers[J]. Food Chemistry, 2021 (338): 128129.
- [32] HU X D, HOU Y L, LIU S T, et al. Comparative analysis of volatile compounds and functional components in fresh and dried monk fruit (*Siraitia grosvenorii*) [J]. Microchemical Journal, 2024 (196): 109649.
- [33] QIU Y J, WU Y Y, LI L H, et al. Elucidating the mechanism underlying volatile and non-volatile compound development related to microbial amino acid metabolism during golden pomfret (*Trachinotus ovatus*) fermentation[J]. Food Research International, 2022, 162: 112095.
- [34] ITAY M, EFRAIM L, ITAY G, et al. Amino acids metabolism as a source for aroma volatiles biosynthesis[J]. Current Opinion in Plant Biology, 2022(67): 102221.
- [35] MU Y H, AO X, ZHAO Z C, et al. The anabolism of volatile compounds during the pasteurization process of sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides*) pulp[J]. Journal of Food Science And Technology, 2024(29): 105943.