

龙杰, 吴昕烨, 毕金峰, 等. 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 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(18): 241–251. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021110341

LONG Jie, WU Xinye, BI Jinfeng, et al. 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[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(18): 241–251. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021110341

· 分析检测 ·

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

龙杰¹, 吴昕烨², 毕金峰², 姚闽娜¹, 庞杰^{1,*}, 李嘉欣³

(1. 福建农林大学食品科学学院, 福建福州 350002;

2. 中国农业科学院农产品加工研究所, 北京 100193;

3. 大连工业大学食品学院, 辽宁大连 116034)

摘要: 为明确不同渗透脱水联合干燥方式对桃脆片挥发性物质的影响, 采用顶空固相微萃取技术结合气相色谱-质谱联用技术 (headspace solid phase microextraction gas chromatography mass spectrometry, HS-SPME-GC-MS) 对蔗糖渗透脱水联合热风干燥 (SH)、低聚异麦芽糖渗透脱水联合热风干燥 (IH)、蔗糖渗透脱水联合真空冷冻干燥 (SF)、低聚异麦芽糖渗透脱水联合真空冷冻干燥 (IF) 制得的桃脆片样品进行挥发性成分分析。结果表明, 四种干燥方式共检测到 61 种挥发性物质, 其中 IF 总挥发性成分含量最高为 528.06 $\mu\text{g/g}$ 。结合香气活度值 (odor activity value, OAV) 分析分别筛选出 13 种 (SH)、18 种 (IH)、20 种 (SF)、22 种 (IF) 关键香气成分, 共有的关键组分为己醛、反式-2-己烯醛、壬醛、反式-2-壬烯醛、苯甲醛、己醇、反式-2-己烯-1-醇、1-辛烯-3-醇、苯甲酸甲酯和乙酸叶醇酯。电子鼻主成分分析可以对不同干燥方式下的桃脆片进行较好的区分。通过实验可知, 30% 低聚异麦芽糖渗透脱水联合真空冷冻干燥可以得到风味较好的桃脆片。本研究可为桃脆片的理论研究与实际生产提供一定的理论基础。

关键词: 桃脆片, 挥发性风味物质, 顶空固相微萃取气相色谱质谱联用法 (HS-SPME-GC-MS),

电子鼻, 渗透脱水

中图分类号: TS255.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)18-0241-11

本文网刊:

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021110341



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

LONG Jie¹, WU Xinye², BI Jinfeng², YAO Minna¹, PANG Jie^{1,*}, LI Jiaxin³

(1. College of Food Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China;

2. Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China;

3. School of Food Science and Technology, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China)

Abstract: In order to clarify the effects of different osmotic dehydration coupled with drying methods on the volatile substances of peach chips, head-space solid phase micro-extraction combined with gas chromatography mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS) was used for the analysis of volatile components of peach chips prepared by sucrose osmotic

收稿日期: 2021-11-29

基金项目: 财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系资助 (CARS-30-5-02); 国家自然科学基金青年科学基金项目 (31801564)。

作者简介: 龙杰 (1996-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 现代食品加工理论与技术, E-mail: longjie0410@163.com。

* 通信作者: 庞杰 (1965-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品化学与营养, E-mail: pang3721941@163.com。

dehydration combined with hot air drying (SH), isomalto-oligosaccharides osmotic dehydration combined with hot air drying (IH), sucrose osmotic dehydration combined with vacuum freeze drying (SF), isomalto-oligosaccharides osmotic dehydration combined with vacuum freeze drying (IF). The results showed that 61 volatile compounds were detected in the four drying methods, and the content of total volatile components in IF was the highest, which was 528.06 $\mu\text{g/g}$. Combined with the analysis of odor activity value (OAV), 13 (SH), 18 (IH), 20 (SF) and 22 (IF) key aroma components were selected respectively. Hexanal, trans-2-hexenal, nonanal, trans-2-nonenal, benzaldehyde, hexanol, trans-2-hexen-1-ol, 1-octen-3-ol, methyl benzoate and cis-3-hexenyl acetate were the key components in all drying methods. Principal component analysis of electronic nose could distinguish peach chips under different drying methods. The experiment showed that 30% isomalto-oligosaccharides osmotic dehydration combined with vacuum freeze-drying could obtain peach chips with good flavor. This study could provide a theoretical basis for the theoretical research and practical production of peach chips.

Key words: peach chips; volatile flavor compounds; headspace solid phase micro-extraction gas chromatography mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS); electronic nose; osmotic dehydration

桃(*Amygdalus persica* Linn)属于蔷薇科(Rosaceae)李属(*Prunus*),成熟果实果香浓郁,汁多味美,具有悠久栽培的历史,是广泛分布于我国的一种营养价值较高的水果。桃属于呼吸跃变型果实,采后迅速后熟,不耐贮运。在世界的产桃大国中,加工桃占有很大的比重,而我国桃以鲜食为主(约为80%),加工量仅占原料总产量的18%,难以满足市场需求^[1]。目前市场上桃加工产品较少,主要为桃罐头、桃汁等。因此,桃加工产品种类还需进一步丰富。

将鲜桃进行干制加工制成桃脆片,是丰富桃加工产品种类,实现桃原料深加工增值的有效途径。目前,果蔬产品干制的方式主要有热风干燥(hot air drying, HAD)、真空冷冻干燥(vacuum freeze drying, VFD)、压差闪蒸干燥、中短波红外干燥、真空油炸等。每种干燥方式各有优缺点,热风干燥和真空冷冻干燥是果蔬加工的常见方式。热风干燥是一种低耗能的干燥方式,具有操作简便、生产成本低等优点,然而热风干燥产品营养损失严重、色泽差、表面硬化等,产品品质有待提高^[2]。真空冷冻干燥利用水升华原理,先使物料冻结然后抽真空使冰直接升华,从而达到干燥物料的目的。食品经真空冷冻干燥后能最大程度保留其原有的营养物质、风味品质、色泽及形状,具有复水性好,脱水彻底的优点^[3]。渗透脱水技术是广泛应用于果蔬干燥前处理方式之一,具有节能、果蔬营养成分损失少等特点,可有效缩短果蔬干燥时间^[4]。Naknean等^[5]研究不同渗透溶质处理联合干燥对哈密瓜理化及感官特性的影响,发现渗透脱水处理明显改变果蔬的挥发性物质,不同渗透溶质处理将影响其风味特征。Hu等^[6]研究不同渗透脱水联合干燥方式对金桔的风味物质的影响,发现不同挥发性化合物的变化趋势受不同的渗透脱水方式的影响。生产上通常使用蔗糖、麦芽糖和麦芽糖醇等对果蔬进行渗透脱水^[7],但随着现代健康意识的提高,蔗糖(sucrose, SUC)等高GI糖类逐渐淡出消费市场。而低聚异麦芽糖(isomalto-oligosaccharides, IMO)作为功能性低聚糖的一种,具有保湿性好、甜度适中及功能性好等特点^[8]。Yen等^[9]研究表明,对于老年

人,长期摄入IMO可改善其结肠微生物形态和肠道功能。目前国内外关于IMO的研究主要集中于功能性研究,对于其在食品中的应用研究较少,因此本研究将开展IMO在桃脆片中的应用研究,以期果蔬渗透预处理提供新思路。

近年来,顶空固相微萃取气相色谱质谱联用技术(Headspace solid phase microextraction gas chromatography mass spectrometry, HS-SPME-GC-MS)已广泛应用于检测食品中的挥发性化合物,具有简便快捷、灵敏度高、重现性良好等优点,但该方法不能直接区分不同样品风味特征^[10]。为了提高检测效率,HS-SPME-GC-MS检测过程中还需对萃取条件进行优化,如萃取头种类、样品添加量、萃取时间、萃取温度、加入电解质含量等都是影响萃取效果的重要因素^[11]。电子鼻技术可以快速提供气味检测结果,准确区分不同气味。将GC-MS与电子鼻结合可以起到互相补充和验证的作用,有助于提高实验结果的真实性、有效性。已有学者利用GC-MS结合电子鼻分析了不同干燥方式对黄花菜粉^[12]和红枣^[13]挥发性风味物质的影响,然而对不同渗透脱水联合干燥桃脆片挥发性风味物质的研究未见报导。

因此,本研究拟采用HS-SPME-GC-MS定性并定量桃脆片中的香气组分,通过香气活度值分析(odor activity value, OAV)、主成分分析(principal component analysis, PCA)等对SUC、IMO渗透脱水联合热风干燥与真空冷冻干燥桃脆片挥发性风味物质进行分析,准确区分并验证不同渗透脱水联合干燥方式对桃脆片挥发性风味物质的影响。以期在实际生产提供技术依据,提升桃脆片的商业价值。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

桃 采自北京市平谷桃产业基地,品种为‘谷艳’硬溶质白桃,八成熟,果实颜色、大小相近,无明显病虫害和机械损伤。当天运回实验室并立即进行样品预处理。将样品用清水洗净、去皮、机械去核、切片(厚度约为8 mm),存于-40℃冷库备用;2-苯氧基乙醇、C7~C40正构烷烃、氯化钠 纯度99%,美国

Sigma-Aldrich公司;甲醇 纯度 99%,上海麦克林生化科技有限公司;低聚异麦芽糖 食品级,山东保龄宝生物股份有限公司;蔗糖 食品级,广州宝汇生物科技有限公司。

FA-200 切片机 广东省南海市德丰电热设备厂;AUW220 电子天平、GCMS-QP2020 NX 气相色谱-质谱联用仪 日本岛津公司;WZB45 数显折光仪 上海精密科学仪器有限公司;YL56821 研磨机 北京卡斯特默科技发展有限公司;DHG-9123A 电热恒温鼓风箱 上海精宏实验设备有限公司;ALPHA1-4Lplus 真空冷冻干燥设备 德国 Christ公司;PEN 3.5 电子鼻 德国 Aisence 公司;CTC PAL RSI 自动进样机械臂 广州智达实验室科技有限公司;DB-WAX(30 m×0.25 mm×0.25 μm)型毛细管柱 美国 Agilent 公司;二乙烯基苯/碳分子筛/聚二甲基硅氧烷(DVB/CAR/PDMS 50/30 μm)萃取头 美国 Supelco 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 渗透脱水处理 配制浓度为 30% 的蔗糖及低聚异麦芽糖溶液分别作为渗透液^[14],将-40 ℃冷库中的桃片移至-18 ℃冰箱冷藏 24 h 后取出置于 4 ℃冰箱 1 h,随即取出置于室温下解冻 30 min,除去其表面水分后浸没于渗透液中,渗透温度为 25 ℃,料液比设定为 1:5 g/L,每隔 30 min 充分搅拌以克服渗透液在渗透过程中产生蓄积而增加的传质阻力。渗透结束后,将桃片取出,以流动的水清洗表面附着的糖液,并用吸水纸吸除表面水分,待下一步干燥处理。

1.2.2 热风干燥 将渗透脱水预处理后的桃片单层平铺于放有纱布的托盘上,并放入已稳定工作的电热鼓风干燥箱。干燥温度设定为 80 ℃、风速设定为 2 m/s,干燥直至水分质量分数(湿基)约为 7%^[14],停止实验。实验样品为 30% 蔗糖渗透脱水联合热风干燥(SH)桃脆片和 30% 低聚异麦芽糖渗透脱水联合热风干燥桃脆片(IH)。

1.2.3 真空冷冻干燥 经渗透脱水预处理后的桃片在-80 ℃条件下预冻 12 h,随即放入冻干机干燥仓中,其冷阱温度为-53 ℃,真空度约为 1 mbar,干燥至水分质量分数(湿基)约为 7%^[14],停止实验。实验样品为 30% 蔗糖渗透脱水联合真空冷冻干燥桃脆片(SF)和 30% 低聚异麦芽糖渗透脱水联合真空冷冻干燥桃脆片(IF)。

1.2.4 顶空固相微萃取和气相色谱质谱联用(HS-SPME-GC-MS)条件

1.2.4.1 HS-SPME 条件 将热风干燥桃脆片浸没于液氮中并充分打粉后准确称取 2.0 g 样品于 20 mL 顶空进样瓶中,加入 2 mL NaCl 溶液(0.2 g/mL)和 50 μL 2-苯氧基乙醇(25 μg/mL,溶于甲醇中),用聚四氟乙烯隔垫密封瓶盖旋紧,将样品瓶置于 45 ℃下振荡平衡 30 min,平衡结束后将 DVB/CAR/PDMS

萃取头插入顶空小瓶萃取 40 min,萃取结束后将萃取头置于进样口中解析 3 min。

1.2.4.2 GC-MS 条件 GC 条件:色谱柱为 DB-WAX(30 m×0.25 mm×0.25 μm),升温程序:40 ℃保持 3 min,以 5 ℃/min 升至 120 ℃,再以 8 ℃/min 升至 240 ℃,保持 5 min。进样口温度 250 ℃,整个过程采用无分流模式,纯度>99.999% 的氦气作为载气,色谱柱流量为 1 mL/min。MS 条件:质谱接口温度为 250 ℃,离子源温度为 230 ℃,电离方式为 EI,离子能量为 70 eV,扫描质量范围为 35~500 u,溶剂延迟时间为 3 min。

1.2.5 定性与半定量分析 定性方式:a.将化合物的质谱与标准谱库 NIST14 比对,选取质谱数据匹配度 80 以上的挥发性成分;b.C7~C40 正构烷烃以与样品相同升温程序分析,根据正构烷烃结果计算化合物的 Kováts 保留指数即 RI,且与计算机商业谱库 NIST 2011 比对。Kováts 保留指数计算见公式(1):

$$RI(x) = 100 \times n + \frac{RT(x) - RT(n)}{RT(n+1) - RT(n)} \times 100 \quad \text{式 (1)}$$

式中:RI(x)为物质 x 的 Kováts 保留指数;RT(x)为物质 x 的保留时间;RT(n)和 RT(n+1)分别代表 n 个烷烃碳原子和 n+1 个烷烃碳原子的保留时间。

半定量方式:选用 2-苯氧基乙醇作为内标物(通过实验筛选出该具有较高保留指数的化合物,避免影响样品出峰结果),根据被测化合物和内标物相应的色谱峰面积之比,计算被测组分的相对含量,表示为 μg/g。

1.2.6 香气活度值(OAV)分析 通过查阅文献,确定化合物在水中的阈值。在定量的基础上计算每种物质的 OAV 值,计算见公式(2):

$$OAV_i = \frac{C_i}{OT_i} \quad \text{式 (2)}$$

式中:C_i为物质 x 的浓度(μg/g);OT_i为物质 x 在水中的阈值(μg/g)。

1.2.7 电子鼻分析方法 配备 10 种金属氧化物半导体检测装置(W1C、W5S、W3C、W6S、W5C、W1S、W1W、W2S、W2W、W3S)(表 1)。在检测之前,将 2.0 g 桃粉置于顶空进样瓶中,用聚四氟乙烯隔垫密封瓶盖旋紧。随即将样品在室温下保持 20 min 后开始检测。电子鼻参数设置为:传感器清洗时间为 180 s,自动调零时间为 10 s,内部和进样口流速均为 600 mL/min。样品检测时间为 60 s,在此期间测量每秒吸收的气体。

1.3 数据处理

每个实验重复三次。采用 SPSS 24.0 进行样本间的显著性差异分析,当 P<0.05 则认为差异具有统计学意义。采用 SPSS 24.0 和 WinMuster 1.6.2.18 进行 PCA 分析。使用 Origin 2017 作图。

表1 PEN 3.5 电子鼻传感器敏感物质

Table 1 PEN 3.5 sensitive substances of electronic nose sensors

编号	传感器	敏感物质
R1	W1C	芳烃化合物
R2	W5S	氮氧化物
R3	W3C	氨, 芳香分子
R4	W6S	氢化物
R5	W5C	烯烃, 芳族, 极性分子
R6	W1S	烷类
R7	W1W	硫化物
R8	W2S	醇, 部分芳香族化合物
R9	W2W	芳烃化合物, 硫的有机化合物
R10	W3S	烷烃和脂肪族

2 结果与分析

2.1 渗透脱水联合干燥桃脆片的挥发性化合物分析

在 HS-SPME-GC-MS 条件下, 分别对不同渗透脱水联合干燥桃脆片挥发性化合物进行分析, 总离子流图见图 1, 结果见表 2。由表 2 可知, 不同渗透脱水联合干燥方式下的桃脆片挥发性物质含量和种类有明显差异。采用 GC-MS 共检测到 61 种挥发性成分, 其中醛类 15 种、醇类 13 种、酯类 8 种、酮类 6 种、烷烃类 8 种、杂环类 8 种、酸类 1 种和内酯类 2 种。在不同处理下的桃脆片中含量较高的化合物有苯甲醛(35.13~58.76 $\mu\text{g/g}$)、糠醛(8.28~30.21 $\mu\text{g/g}$)、十一烷(7.20~73.18 $\mu\text{g/g}$)、十二烷(5.44~74.18 $\mu\text{g/g}$)、己醛(6.11~102.08 $\mu\text{g/g}$)和反式-2-己烯醛(2.61~195.57 $\mu\text{g/g}$)。四种干燥方式分别检测到 37 种(IH)、37 种(SF)、37 种(IF)和 25 种(SH)挥发性物质。其中总挥发成分含量最高为 IF(528.06 $\mu\text{g/g}$), 其次是 SF(135.67 $\mu\text{g/g}$)、IH(120.97 $\mu\text{g/g}$)和 SH(85.26 $\mu\text{g/g}$)。

醛类物质在桃挥发性物质中的含量最为丰富, 其气味阈值较低, 对整体香气贡献尤为重要。四种干燥方式的桃脆片中均含有的醛类物质为己醛、反式-2-己烯醛、反,反-2,4-庚二烯醛、壬醛及反式-2-壬烯醛, 这类 C6~C9 醛类主要来自脂肪酸的氧化降解^[15]。其中 C6 醛类是桃类果实的主要呈香物质, 赋予桃青草香的感官属性^[16]。己醛、反式-2-己烯醛及反,反-2,4-己二烯醛在真空冷冻干燥桃脆片中含量更高, 这主要是由于它们受热易散失的特点使其在热风干燥加工后损失较大^[17]。苯甲醛具有苦杏仁香、坚果香^[18], 在热风干燥桃脆片中苯甲醛含量较高。桃中苯甲醛可能部分来自桃自身的苦杏仁苷的酶解^[19], 另一部分也可能来自干燥过程中美拉德反应的异亮氨酸的 Strecker 降解^[20]。而热风干燥相比于真空冷冻干燥, 美拉德反应程度更高, 所以其中苯甲醛含量稍高。此外, 蔗糖渗透脱水过程中固形物增量高于低聚异麦芽糖^[21], 且蔗糖易进一步分解为葡萄糖和果糖, 更提升了其中美拉德反应程度, 导致 SH 中苯甲醛含

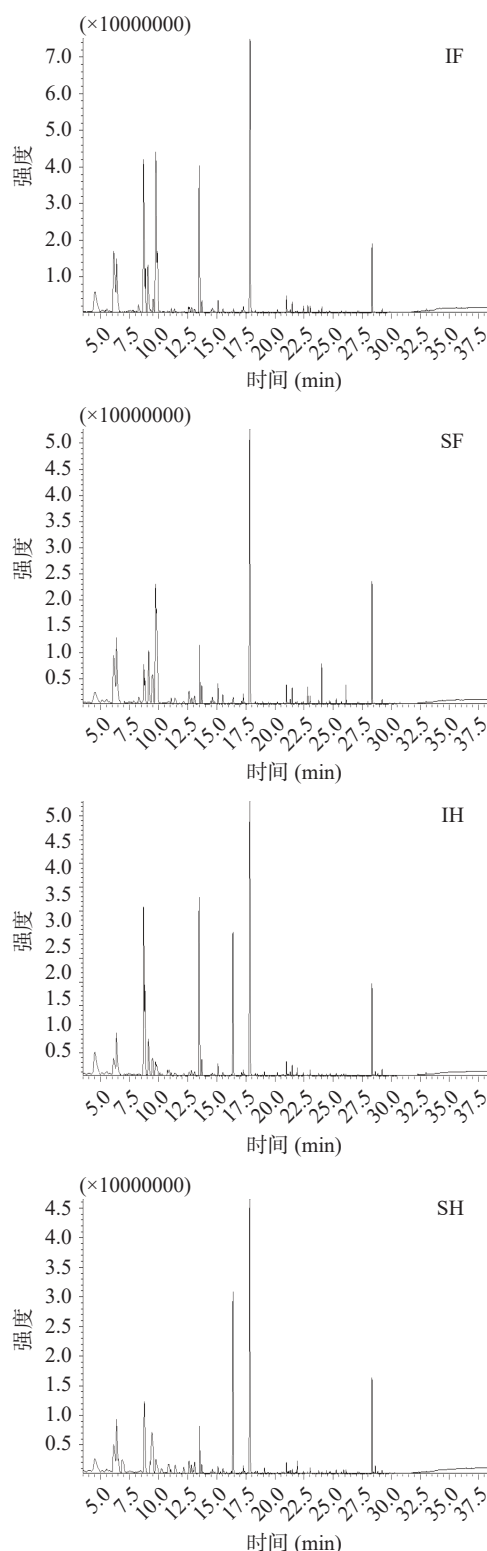


图1 HS-SPME-GC-MS 分析桃脆片 TIC 图

Fig.1 TIC of HS-SPME-GC-MS analysis for peach chips

量最高。壬醛具有柑橘和玫瑰的香味; 反, 反-2, 4-庚二烯醛呈现青草、香辛料样的脂肪香味。对比不同糖液浸渍处理下的热风干燥桃脆片, 结果表明, 两种糖液浸渍处理下的热风干燥桃脆片中醛类物质含量无明显差异。这可能是由于渗透脱水结合热风干燥中, 对桃脆片挥发性风味物质影响更显著的是热风干燥本身, 而非渗透脱水处理。对于不同糖液浸渍处理下的真空冷冻干燥桃脆片, IF 与 SF 中共有的 9 种醛

表 2 HS-SPME-GC-MS 分析桃脆片挥发性化合物成分及含量
Table 2 Volatile compounds and contents of peach chips identified by HS-SPME-GC-MS

种类	序号	化合物	CAS	RI ^a /RI ^b	定性方式	相对含量(μg/g)			
						SH	IH	SF	IF
醛类	1	己醛	66-25-1	1076/1078	MS/RI	6.75±0.64 ^c	9.05±2.69 ^c	20.89±2.37 ^b	85.19±16.89 ^a
	2	反式-2-己烯醛	6728-26-3	1211/1216	MS/RI	4.01±0.33 ^c	3.50±0.89 ^c	35.94±8.79 ^b	163.88±31.69 ^a
	3	辛醛	124-13-0	1285/1287	MS/RI	—	—	0.17±0.05 ^b	1.20±0.55 ^a
	4	壬醛	124-19-6	1384/1390	MS/RI	0.61±0.09 ^b	0.84±0.45 ^b	1.20±0.29 ^b	7.07±2.01 ^a
	5	反,反-2,4-己二烯醛	142-83-6	1394/1398	MS/RI	—	—	0.47±0.13	—
	6	反,反-2,4-庚二烯醛	4313-03-5	1491/1497	MS/RI	0.14±0.05 ^c	0.56±0.23 ^b	0.50±0.18 ^b	2.62±1.17 ^a
	7	癸醛	112-31-2	1490/1498	MS/RI	—	—	0.46±0.08	—
	8	苯甲醛	100-52-7	1505/1508	MS/RI	58.11±6.64 ^a	48.76±9.53 ^a	42.04±11.90 ^a	35.13±10.71 ^a
	9	反式-2-壬烯醛	18829-56-6	1537/1542	MS/RI	0.08±0.02 ^b	0.11±0.06 ^b	0.09±0.02 ^b	0.77±0.26 ^a
	10	反-2,顺-6-壬二烯醛	557-48-2	1584/1591	MS/RI	—	—	—	1.28±0.85
	11	2-(4-甲基-3-环己烯-1-基)丙醛	29548-14-9	1608/1620	MS/RI	0.12±0.02	—	—	—
	12	2,6,6-三甲基-1,3-环己二烯-1-甲醛	116-26-7	1616/1622	MS/RI	0.14±0.06	—	—	—
	13	苯乙醛	122-78-1	1637/1646	MS/RI	—	0.43±0.26 ^b	0.15±0.03 ^b	1.38±0.76 ^a
	14	2-丁基-2-辛烯醛	13019-16-4	1647/1659	MS/RI	—	—	0.32±0.02 ^b	1.83±0.87 ^a
	15	柠檬醛	5392-40-5	1703/1717	MS/RI	—	—	—	0.15±0.13
种类(个)						8	7	11	10
总和						69.96 ^c	63.25 ^c	102.23 ^b	300.50 ^a
醇类	1	3-庚醇	589-82-2	1295/1306	MS/RI	—	—	1.50±0.34 ^b	6.44±1.09 ^a
	2	己醇	111-27-3	1356/1359	MS/RI	1.54±0.14 ^b	2.65±0.52 ^b	1.64±0.30 ^b	14.09±3.14 ^a
	3	(3E)-3-己烯-1-醇	928-97-2	1354/1366	MS/RI	—	—	0.49±0.07	—
	19	叶醇	928-96-1	1372/1386	MS/RI	0.20±0.11 ^b	0.46±0.20 ^b	—	3.10±1.77 ^a
	20	反式-2-己烯-1-醇	928-95-0	1411/1419	MS/RI	0.84±0.23 ^b	1.93±0.08 ^b	1.72±0.28 ^b	14.21±5.21 ^a
	21	1-辛烯-3-醇	3391-86-4	1444/1456	MS/RI	0.17±0.04 ^b	0.28±0.09 ^b	0.16±0.04 ^b	0.97±0.22 ^a
	22	2-乙基己醇	104-76-7	1477/1484	MS/RI	0.53±0.11 ^c	0.98±0.31 ^{bc}	1.14±0.14 ^b	6.44±1.46 ^a
	23	芳樟醇	78-70-6	1538/1552	MS/RI	—	—	0.05±0.01 ^b	0.31±0.17 ^a
	24	辛醇	111-87-5	1549/1561	MS/RI	—	0.18±0.10 ^a	0.22±0.01 ^a	—
	25	薄荷脑	1490-04-6	1616/1631	MS/RI	—	—	—	0.60±0.11
	26	苯甲醇	100-51-6	1864/1877	MS/RI	—	—	0.16±0.02	—
	27	苯乙醇	60-12-8	1901/1912	MS/RI	—	0.34±0.19 ^b	—	2.54±0.58 ^a
	28	柏木脑	77-53-2	2055/2069	MS/RI	—	—	—	0.17±0.07
种类(个)						5	7	9	10
总和						3.28 ^c	6.82 ^b	7.08 ^b	48.87 ^a
酯类	29	乙酸己酯	142-92-7	1274/1276	MS/RI	—	1.33±0.48 ^b	0.64±0.34 ^c	9.62±2.66 ^a
	30	乙酸叶醇酯	3681-71-8	1316/1320	MS/RI	0.30±0.11 ^c	1.40±0.21 ^b	1.53±0.27 ^b	19.86±4.61 ^a
	31	乙酸反式-2-己烯酯	2497-18-9	1331/1336	MS/RI	—	1.54±0.94 ^b	1.19±0.18 ^b	12.08±3.52 ^a
	32	苯甲酸甲酯	93-58-3	1619/1631	MS/RI	0.16±0.05 ^c	0.41±0.16 ^b	0.46±0.19 ^b	1.24±0.61 ^a
	33	苯甲酸丙酯	2315-68-6	1727/1742	MS/RI	—	0.08±0.04 ^c	0.60±0.20 ^b	7.59±2.34 ^a
	34	月桂酸甲酯	111-82-0	1827/1834	MS/RI	—	0.04±0.02	—	—
	35	棕榈酸甲酯	112-39-0	2236/2243	MS/RI	0.21±0.09 ^c	0.51±0.34 ^b	0.35±0.12 ^{bc}	1.94±0.51 ^a
	36	棕榈酸乙酯	628-97-7	2231/2243	MS/RI	—	0.03±0.01	—	—
种类(个)						3	8	6	6
总和						0.67 ^c	5.34 ^b	4.17 ^b	52.33 ^a
酮类	37	2-甲基-3-辛酮	923-28-4	1320/1323	MS/RI	0.69±0.21	—	—	—
	38	甲基庚烯酮	110-93-0	1338/1341	MS/RI	0.48±0.22	—	—	—
	39	4-氧代异佛尔酮	1125-21-9	1671/1677	MS/RI	0.10±0.05 ^a	0.16±0.09 ^a	—	—
	40	大马士酮	23726-93-4	1799/1814	MS/RI	0.07±0.04 ^a	0.05±0.02 ^a	—	—
	41	橙花基丙酮	3879-26-3	1821/1835	MS/RI	0.29±0.04	—	—	—
	42	香叶基丙酮	689-67-8	1853/1867	MS/RI	—	0.24±0.13 ^b	0.11±0.03 ^c	0.92±0.26 ^a
种类(个)						5	3	1	1
总和						1.63 ^a	0.45 ^b	0.11 ^c	0.92 ^b
杂环类	43	2-正戊基呋喃	3777-69-3	1223/1235	MS/RI	—	0.72±0.34 ^a	0.27±0.26 ^b	0.99±0.13 ^a
	44	糠醛	98-01-1	1459/1468	MS/RI	9.29±1.01 ^b	24.36±5.85 ^a	—	—

续表 2

种类	序号	化合物	CAS	RI ^a /RI ^b	定性方式	相对含量(μg/g)			
						SH	IH	SF	IF
烷烃类	45	茶香螺烷	36431-72-8	1487/1496	MS/RI	0.12±0.04	—	—	—
	46	2-糠酸甲酯	611-13-2	1546/1553	MS/RI	—	—	0.05±0.02	—
	47	5-甲基呋喃醛	620-02-0	1574/1582	MS/RI	0.22±0.11 ^b	0.58±0.33 ^a	—	—
	48	糠醇	98-00-0	1651/1666	MS/RI	—	0.28±0.16	—	—
	49	烟酸甲酯	93-60-7	1729/1743	MS/RI	—	0.20±0.08 ^a	0.11±0.03 ^a	—
	50	2-乙酰基吡咯	1072-83-9	1936/1952	MS/RI	—	0.27±0.14	—	—
	种类(个)					3	6	3	1
	总和					9.63 ^b	26.41 ^a	0.43 ^d	0.99 ^e
	51	3-甲基癸烷	13151-34-3	1045/1048	MS/RI	—	—	0.27±0.06 ^b	1.40±0.89 ^a
	52	5-甲基癸烷	13151-35-4	1047/1049	MS/RI	—	—	0.32±0.07 ^b	1.54±1.04 ^a
酸类	53	2,5-二甲基壬烷	17302-27-1	1055/1059	MS/RI	—	0.29±0.12	—	—
	54	十一烷	1120-21-4	1092/1100	MS/RI	—	10.83±2.43 ^b	11.82±4.62 ^b	59.61±13.57 ^a
	55	十二烷	112-40-3	1191/1200	MS/RI	—	7.16±1.27 ^b	8.30±2.58 ^b	57.07±17.11 ^a
	56	十三烷	629-50-5	1297/1300	MS/RI	—	0.19±0.02 ^c	0.58±0.10 ^b	1.16±0.27 ^a
	57	十四烷	629-59-4	1392/1400	MS/RI	—	0.06±0.03	—	—
	58	十六烷	629-73-2	1588/1600	MS/RI	—	—	—	0.97±0.46
	种类(个)					0	5	5	6
	总和					0	18.53 ^b	21.29 ^b	121.75 ^a
内酯类	59	壬酸	112-05-0	2157/2169	MS/RI	—	—	0.22±0.15	—
酯类	60	丙位己内酯	695-06-7	1685/1694	MS/RI	0.09±0.05 ^b	0.17±0.08 ^b	0.14±0.03 ^b	1.27±0.39 ^a
	61	二氢猕猴桃内酯	17092-92-1	2324/2337	MS/RI	—	—	—	1.43±0.74
	种类(个)					1	1	1	2
	总和					0.09 ^c	0.17 ^b	0.14 ^{bc}	2.70 ^a
	总计					85.26 ^c	120.97 ^b	135.67 ^b	528.06 ^a

注: “—”表示未检出; 不同小写字母表示显著性差异($P<0.05$); RI^a为计算的保留指数; RI^b为文献中的保留指数。

类物质中,除苯甲醛外,IF 含量显著高于 SF($P<0.05$)。对比不同干燥方式,热风干燥桃脆片中己醛和反式-2-己烯醛含量显著低于真空冷冻($P<0.05$),如 IF 中 C6 醛类含量最高为(249.07 μg/g)。因此,相比于真空冷冻干燥,高温长时间的热风干燥对桃脆片中呈现青香、果香及花香的化合物风味损失较大。辛醛气味阈值低,具有浓郁的果香,在热风干燥中未检出,在真空冷冻干燥中均被检出,这可能是由于在热风干燥过程中长时、高温加热后辛醛的氧化分解导致^[22]。Sinesio 等^[23]比较真空冷冻干燥与热风干燥果蔬的风味变化,发现真空冷冻干燥样品有明显果香,而热风干燥样品呈现焦香、烤香。与本研究结果一致。

醇类物质在桃挥发性物质中的贡献非常重要,其前体多为不饱和脂肪酸^[24]。IF 中醇类挥发性物质总含量最高,且其中己醇(14.09 μg/g)、叶醇(3.10 μg/g)和反式-2-己烯-1-醇(14.21 μg/g)等青香型 C6 醇类显著高于其他处理组($P<0.05$)。四种干燥方式均含有的挥发性物质为己醇、反式-2-己烯-1-醇、1-辛烯-3-醇和 2-乙基己醇。1-辛烯-3-醇作为脂肪族不饱和醇,具有蘑菇香和花香。3-庚醇和芳樟醇仅在真空冷冻干燥中被检出。3-庚醇具有青草味,芳樟醇属于链状萜烯醇类,具有玫瑰香、柠檬香。对比不同糖液浸渍处理下的热风干燥,辛醇(柑橘香,玫瑰香)和苯乙醇(蜂蜜香,玫瑰香)仅在 IH 中被检出。对比不同糖

液浸渍处理下的真空冷冻干燥,(3E)-3-己烯-1-醇(苔藓味,清香)和苯甲醇(甜香,花香)仅在 SF 被检出,而 IF 中独有的物质有薄荷脑(薄荷味)、苯乙醇(蜂蜜香,玫瑰香)和柏木脑(木香)。对于不同干燥方式而言,蔗糖浸渍处理后醇类物质的检出均少于低聚异麦芽糖浸渍处理,可能的原因是浸渍过程中部分蔗糖与醇类通过糖苷键结合,形成低挥发性的结合态香气物质,因此,醇类物质组成存在一定差异^[25]。此外,不同干燥方式的桃脆片挥发性风味化合物的不同可能是由于其中酶的失活以及香气前体物质损失程度存在差异^[26]。因此,真空冷冻干燥桃脆片相较于热风干燥桃脆片,桃果的清香、花香风味更为丰富。

酯类物质通常具有果香气味和轻微油脂香味,是桃香味的主要物质基础。对桃香气起主要作用的物质为乙酸己酯和乙酸反式-2-己烯酯等直链酯类化合物^[27]。四种干燥方式均含有的挥发性物质为苯甲酸甲酯和棕榈酸甲酯,分别具有果香和微青果香。IF 中酯类挥发性物质总含量最高,且均显著高于其他干燥方式($P<0.05$),其中的重要物质有乙酸叶醇酯(19.86 μg/g)、乙酸反式-2-己烯酯(12.08 μg/g)和乙酸己酯(9.62 μg/g),分别呈果香、青草香和甜果香。比较 SH 与 IH 处理组结果发现,IH 中酯类风味物质种类多于 SH,且其含量显著高于 SH($P<0.05$)。SH 中未检测到乙酸己酯和乙酸反式-2-己烯酯。热风处

理组中酯类化合物含量低于真空冷冻处理组,究其原因可能是酯类物质主要是酸类和醇类物质酯化反应的产物,而高温处理下的醇类和酸类大大损失,且热风干燥的高温促使美拉德反应向着更复杂的方向进行,产生大量杂环类、酮类等物质,致使酯类物质含量减少。另外,在真空冷冻干燥过程中,物料内伴随着水分的散失可能形成了包含糖类和挥发物高度浓缩液的微小区域,这导致糖分子间以氢键缔合,构成稳定的网状结构,风味物质附于此结构中,因此,真空冷冻干燥桃脆片风味品质好于热风干燥^[28]。

酮类物质通常具有脂香和焦香香气,随碳链增长呈现出较强的花香香气^[29]。SH 中酮类物质种类及总量显著高于其他干燥方式($P<0.05$),其次为 IH,这可能是因为热风干燥过程发生了美拉德反应,提高了 Strecker 降解反应程度,得到较多的醛酮类挥发性化合物^[30]。此外,蔗糖受热分解得到的还原性单糖易参与美拉德反应,而低聚异麦芽糖热稳定性强,仅具有少量还原性末端,美拉德反应程度低^[31]。因此,SH 中酮类物质含量较高、种类更丰富。热风干燥处理组中酮类风味物质含量显著高于真空冷冻干燥处理组($P<0.05$),热风干燥处理组具有明显的脂香、焦香香气。IF 中仅有的酮类物质为香叶基丙酮,其具有玉兰香、花果清香。甲基庚烯酮仅在 SH 中被检出,具有胡椒味和蘑菇香味。大马士酮在热风干燥样品中检出,其具有较低的嗅觉阈值,带有浓郁的玫瑰香、果香。

杂环类挥发性化合物以呋喃类、吡啶类物质为主,其中呋喃类物质通常呈甜香和谷物香,其生成途径主要为美拉德反应、糖类的热降解等过程。吡啶类物质通常具有焙烤香气,主要来源于氨基酸的热降解过程^[32]。糠醛仅在热风干燥中被检出,是糖类与酸在热、氧条件下水解后脱水环化而成^[33],具有花香味和杏仁香味。5-甲基呋喃醛作为糠醛衍生物,也仅在热风干燥中被检出,主要源于热风干燥过程中的美拉德反应。对比不同渗糖处理,SF 中杂环类物质比 IF 更丰富,说明蔗糖分解为还原糖后参与美拉德反应程度比低聚异麦芽糖更高。热风干燥桃脆片中杂环类物质种类、含量显著高于真空冷冻干燥桃脆片($P<0.05$),这与热风干燥过程中发生美拉德反应有关。

烷烃类物质可利用香气合成等途径进行转化,从而对香气品质起一定的作用^[34]。除 SH 无烷烃类物质被检出外,其他干燥方式下烷烃类含量较高的为十一烷和十二烷,由于烃类物质嗅觉阈值较高,对桃脆片整体风味贡献较小,但对其风味具有修饰的作用。壬酸具有脂肪和椰子味香气,仅在 SF 中少量检出。内酯类化合物如 γ -己内酯是桃特征香气的重要贡献物质,是果实“桃味”的重要来源^[35]。内酯类物质的形成途径主要为脂肪酸途径,其中有脂氧合酶氧化和 β -氧化两条分支^[36]。二氢猕猴桃内酯具有香豆

素样香气及麝香香气,仅在 IF 中被检测到。四种干燥方式均检测到丙位己内酯,其具有甜香、果香,且 IF 中显著高于其他干燥方式($P<0.05$),而热风干燥处理组中无明显差异。可能的原因是,真空冷冻干燥条件下物质的氧化程度低,对部分易氧化风味物质的保留效果好^[37]。而对于 SF 中丙位己内酯的含量偏低,还需进一步研究。

渗透脱水联合干燥桃脆片的风味是由各类物质共同作用形成的,醛类、醇类、酯类、酮类和内酯类是重要风味物质,烷烃类、杂环类和酸类等主要起到丰富香气组成及调和香味物质的作用。此外,不同干燥方式对桃脆片挥发性风味物质种类、含量有着显著影响。热风干燥主要促进了部分醛类、酮类及呋喃类物质生成,且其含量普遍较低,而真空冷冻干燥主要提高了多种醛类、醇类物质的保留率,且香气物质含量较高、种类较多,呈现更为浓郁、丰富的香味。究其差异原因,热风干燥过程中长时间保持高温,桃脆片中的热敏活性物质损失严重,低沸点香气物质大量流失。干燥过程中发生美拉德反应,糠醛、5-甲基呋喃醛等含量较高,致使热风干燥桃脆片呈较明显的焙烤气味。真空冷冻干燥过程中所处环境温度较低且为真空环境,桃脆片中的大多数挥发性物质得到较好的保留。Mui 等比较不同干燥香蕉脆片风味,发现真空冷冻干燥相比于热风干燥,大部分挥发性物质受热分解率明显更低^[38]。比较不同糖液浸渍预处理联合干燥,结果发现,对于热风干燥处理,蔗糖浸渍预处理主要丰富了桃脆片中酮类物质种类,而其中醇类、酯类、烷烃类及杂环类含量及种类均显著低于低聚异麦芽糖预处理组($P<0.05$);对于真空冷冻干燥处理,蔗糖浸渍预处理主要丰富了桃脆片中醛类、杂环类风味物质种类,而低聚异麦芽糖处理组中桃脆片其余种类风味物质稍多,且其含量显著高于蔗糖浸渍预处理组($P<0.05$)。本研究中,渗透脱水联合热风干燥过程中香气物质的变化也可通过 Thijssen 等提出的选择性扩散理论来解释。根据该理论,当干燥导致物料水分含量降低时,挥发性物质的扩散系数比剩余水的扩散系数下降得更快,因此,其检出量随之降低^[39]。综合比较发现,低聚异麦芽糖预处理联合真空冷冻干燥桃脆片风味特征明显好于其他处理方式的桃脆片。不同糖种类浸渍预处理联合干燥对于桃脆片风味物质的影响机制尚未明确,仍需进一步研究。

2.2 香气活度值的分析

为确定各风味物质对桃脆片香气的贡献程度,本研究将结合 OAV 分析进一步确定桃脆片关键香气物质。当 $OA\geq 1$ 时,该香气化合物对桃脆片整体风味贡献呈正相关,认定其为桃脆片中的关键香气成分,当 $OA<1$ 时,香气化合物对整体风味呈负相关^[40]。如表 3 所示,SH、IH、SF 和 IF 分别有 13、18、20 和 22 种 $OA\geq 1$ 的物质,且四种干燥方式中共有的 $OA\geq 1$ 的化合物有己醛、反式-2-己烯醛、壬

醛、反式-2-壬烯醛、苯甲醛、己醇、反式-2-己烯-1-醇、1-辛烯-3-醇、苯甲酸甲酯和乙酸叶醇酯。这些物质主要为果蔬中常见的 C6~C9 化合物,嗅觉阈值较低,具有青香及果香。其中,壬醛(柑橘香,玫瑰香)虽然其含量极少,但由于具有极低的香气阈值(0.0011 $\mu\text{g/g}$),在四种干燥方式中 OAV 值均最大,在 SH、IH、SF 和 IF 中分别为 555、764、1091 和 6427,因此,此物质是桃脆片中最重要香气物质。对于不同干燥桃脆片, IH 中特有的 OAV ≥ 1 的化合物为糠醛,主要呈现杏仁味、面包味。糠醛阈值(9.562 $\mu\text{g/g}$)和含量(24.36 $\mu\text{g/g}$)均较高, OAV ≥ 1 , 因此它是 IH 中的关键香气化合物。SH 中特有的 OAV ≥ 1 的化合物为甲基庚烯酮,呈现胡椒味、蘑菇香,虽然其含量小(0.48 $\mu\text{g/g}$),但由于极低的香气阈值(0.0068 $\mu\text{g/g}$),因此,它是 SH 中的关键香气化合物。大马士酮

(0.002 $\mu\text{g/g}$)阈值极低,仅在 SH 及 IH 中被极少量检出, OAV 值较高,呈现果香、玫瑰香。SF 中特有的 OAV ≥ 1 的化合物为癸醛、(3E)-3-己烯-1-醇,分别呈现橙皮香、苔藓味,其中癸醛(0.003 $\mu\text{g/g}$)阈值较低,对 SF 桃脆片整体风味有重要贡献。IF 中特有的 OAV ≥ 1 的化合物有反-2-, 顺-6-壬二烯醛、丙位己内酯、苯乙醇及柠檬醛,分别呈现黄瓜味、果香、蜂蜜香及柠檬香,其中反-2-, 顺-6-壬二烯醛(0.0008 $\mu\text{g/g}$)及柠檬醛(0.004 $\mu\text{g/g}$)香气阈值极低,对 IF 香气轮廓的形成起重要作用。辛醛(橘子香)、芳樟醇(玫瑰香、柠檬香)及 3-庚醇(青草味)仅在 SF 及 IF 中被检出,前二者由于极低的气味阈值,对真空冷冻干燥桃脆片风味特征形成有重要贡献。此外, IF 中己醛、反式-2-己烯醛、辛醛、壬醛、反式-2-壬烯醛、苯乙醛、己醇、叶醇、反式-2-己烯-1-醇、1-辛烯-3-醇、芳樟

表3 桃脆片中挥发性化合物的 OAV 值

Table 3 OAV values of volatile compounds in peach chips

序号	化合物	OT($\mu\text{g/g}$)	气味描述	OAV			
				SH	IH	SF	IF
1	己醛	0.073	青草味	92	124	286	1167
2	反式-2-己烯醛	0.0887	青草味	45	39	405	1848
3	辛醛	0.000587	橘子香	—	—	290	2044
4	壬醛	0.0011	柑橘香, 玫瑰香	555	764	1091	6427
5	糠醛	9.562	杏仁味, 面包味	<1	3	—	—
6	癸醛	0.003	橙皮香, 花香	—	—	153	—
7	反式-2-壬烯醛	0.00019	清香, 黄瓜香	421	579	474	4053
8	反式-2-辛烯醛	0.003	清香, 坚果香	—	—	<1	—
9	苯甲醛	0.75089	苦杏味, 焦糖香	77	63	56	47
10	反-2-, 顺-6-壬二烯醛	0.0008	黄瓜味, 清香	—	—	—	1600
11	苯乙醛	0.0063	山楂味, 蜂蜜味	—	68	24	219
12	柠檬醛	0.04	柠檬香	—	—	—	4
13	己醇	0.0056	青草味, 花香	275	473	293	2516
14	叶醇	0.0039	青草味	51	118	—	795
15	反式-2-己烯-1-醇	0.2319	清香, 核桃香	4	8	7	61
16	(3E)-3-己烯-1-醇	0.11	苔藓味, 清香	—	—	4	—
17	1-辛烯-3-醇	0.0015	蘑菇香	113	187	107	647
18	3-庚醇	0.24	青草味	—	—	6	27
19	芳樟醇	0.00022	玫瑰香, 柠檬香	—	—	227	1409
20	辛醇	0.1258	柑橘香, 玫瑰香	—	1	2	—
21	苯乙醇	0.56423	蜂蜜香, 玫瑰香	—	<1	—	5
22	苯甲酸甲酯	0.073	果香	2	6	6	17
23	棕榈酸甲酯	2	微青果香	<1	<1	<1	<1
24	棕榈酸乙酯	2	蜂蜡香	—	<1	—	—
25	乙酸叶醇酯	0.013	果香	23	108	118	1528
26	乙酸己酯	0.115	甜果香, 药草香	—	12	6	84
27	甲基庚烯酮	0.068	胡椒味, 蘑菇香	7	—	—	—
28	香叶基丙酮	0.06	清香, 玉兰香	—	4	2	15
29	大马士酮	0.002	果香, 玫瑰香	35	25	—	—
30	5-甲基呋喃醛	1.11	杏仁味, 焦糖味	<1	<1	—	—
31	2-正戊基呋喃	0.0058	豆腥味, 果香	—	124	47	171
32	丙位己内酯	0.26	果香, 甜香	<1	<1	<1	5
总OAV值				1700	2706	3604	24736

注: “—”表示未检出; OT为文献中物质在水中的阈值, 阈值查询来自香气化合物阈值汇编^[41]; 香气描述查询自<http://www.flavornet.org/flavornet.html>。

醇、乙酸叶醇酯、乙酸己酯及香叶基丙酮的 OAV 值均明显高于其他干燥方式,是 IF 香气轮廓的重要组成部分。对于干制方式而言,热风干燥桃脆片关键香气成分为壬醛、苯甲醛及大马士酮,呈现柑橘香、苦杏仁味的同时带有浓郁的玫瑰样香气;真空冷冻干燥桃脆片关键香气成分为壬醛、辛醛、芳樟醇及 3-庚醇,赋予其柑橘香、玫瑰香及青草味。究其原因,热风干燥过程中部分物质美拉德反应程度加深,其反应产物增多,同时部分重要物质发生氧化、热降解,而真空冷冻干燥过程中长时间处于低温、真空环境,对于桃本身的重要香气物质保留率更高。综上所述,相比于渗透脱水预处理溶质种类的不同,不同的干燥处理更显著地改变了桃脆片的风味特征,热风干燥桃脆片通常带有美拉德反应产物的焙烤香、苦杏仁味,而真空冷冻干燥方式下,由于桃片处于低温、真空环境下,氧化、热反应产物较少,能最大程度地保留桃原有的青草香、花香及果香。总体而言,IF 中 OAV ≥ 1 的关键香气成分种类最多,总 OAV 值明显高于其他干燥方式,且其中丙位己内酯的 OAV ≥ 1 ,因此,IF 具有最好的桃特征性风味。

2.3 电子鼻分析

不同干燥方式桃脆片的电子鼻传感器响应值雷达图如图 2 所示,除 W1C、W3C、W6S、W5C、W3S 无明显差异外,其余表现出明显差别。对于热风干燥, W5S、W2W 和 W1W 中 SH 响应值最大,其次为 IH,这表明 SH 及 IH 中氮氧化物、硫化物和芳香族化合物含量较高,这与 GC-MS 结果中热风干燥桃脆片 2-乙酰基吡咯、烟酸甲酯及苯甲醛含量较高有关。对于真空冷冻干燥, W1S 和 W2S 中 IF 响应值最大,其次为 SF,这说明其中烷烃类、醇类和部分芳香族类化合物含量较高,与 GC-MS 结果中真空冷冻干燥桃脆片十一烷、十二烷、3-庚醇、己醇、(3E)-3-己烯-1-醇、反式-2-己烯-1-醇、芳樟醇及苯乙醛含量

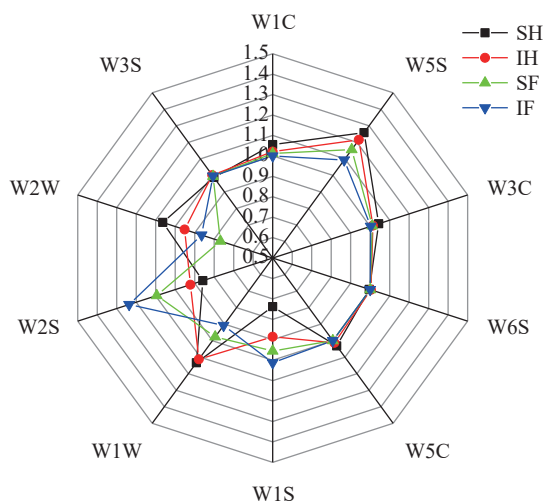


图 2 不同干燥方法桃脆片电子鼻雷达图

Fig.2 Radar diagram of electronic nose of peach chips by different drying methods

较高有关。这可能是因为真空冷冻干燥低真空、热反应速率低,能最大限度地保留桃原有香气物质。而不同糖溶液渗透脱水预处理能在一定程度上改变桃脆片风味,主要影响在个别醇类、醛类及酮类物质是否得到检出或含量高低,未引起电子鼻响应值的显著变化。

由于雷达图不足以对不同干燥方式桃脆片香气特征进行分类,因此对不同干燥方式下的桃脆片样品进行了 PCA 分析,分析结果如图 3 所示。利用 PCA 分析可将电子鼻数据进行降维处理,保留原始数据整体信息的同时并对特征向量进行线性分类^[42]。由图可知,主成分一和主成分二贡献率分别为 97.94% 和 1.90%,累计方差贡献率为 99.84%,表明其可以有效反映原始数据的整体信息。第一主成分上,SH 与 IH、SF、IF 相距甚远,表明它们在第一主成分上差异明显,推测是因为 SH 中醇类、烷烃类及酯类挥发性化合物较少,美拉德反应产物较多,其次为 IH。而 SF 和 IF 相距较近,表明二者之间风味特征有一定相似性。第二主成分上,IH 与另三者相距稍远,表明它们在第二主成分上有一定的差异。由 SH 与 IH 相距稍远,SF 与 IF 稍近可知,热风干燥中两种糖液浸渍后风味呈现明显差异,而真空冷冻干燥中两种糖液浸渍后风味存在一定差异。各处理组之间均分散无交叉,说明主成分分析可将不同渗透脱水联合干燥的桃脆片有效区分,表明不同的干燥方式对桃脆片挥发性物质影响较大。

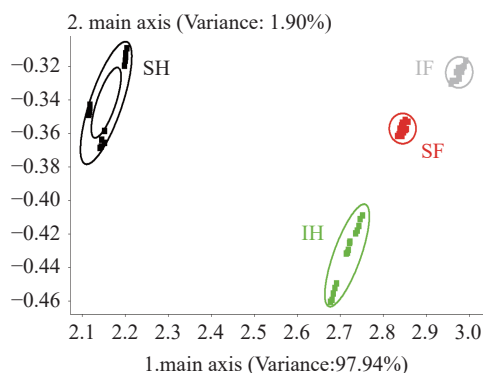


图 3 不同干燥方法桃脆片样品的 PCA 图

Fig.3 PCA diagram of peach chips by different drying methods

3 结论

本研究采用 HS-SPME-GC-MS 结合电子鼻技术分析了四种渗透脱水联合干燥方式下桃脆片的挥发性物质组成及含量,共检测出 61 种挥发性物质,其中 IF 中挥发性物质含量、种类最为丰富。热风干燥过程中长时间高温处理致使桃中醛类、醇类、酯类及酸类物质减少,酮类及杂环类等美拉德反应产物增多。此外,蔗糖渗透脱水预处理可能更加加剧其反应程度。

真空冷冻干燥由于其低真空、低温的干燥条件,桃中大部分香气物质都得到保留,干燥过程中发生反

应生成的新物质较少。OAV 分析筛选出桃脆片香气关键组分为己醛、反式-2-己烯醛、壬醛、反式-2-壬烯醛、苯甲醛、己醇、反式-2-己烯-1-醇、1-辛烯-3-醇、苯甲酸甲酯和乙酸叶醇酯。壬醛(柑橘香,玫瑰香)在四种干燥方式中 OAV 均最大,对桃脆片风味有重要贡献。GC-MS 结合电子鼻分析可知,相比于渗透脱水预处理溶质种类的不同,不同的干燥处理更显著地改变了桃脆片的风味特征,热风干燥桃脆片通常带有美拉德反应产物的焙烤香、苦杏仁味,而真空冷冻干燥方式下,桃脆片呈现青草香、花香及果香。目前,果蔬渗透脱水研究方向主要集中于渗透液理化特性及传质动力学等,而有关渗透溶质结构及性质对果蔬风味的影响机制仍不明晰,针对糖液渗透脱水联合干燥过程中可能参与的反应及其对风味物质的影响还需进一步研究。四种干燥方式中以低聚异麦芽糖渗透脱水预处理联合真空冷冻干燥桃脆片风味最佳,此外,低聚异麦芽糖还兼具一定的功能性。因此本研究可为桃脆片的实际生产与研究提供一定的理论基础,具有部分参考价值。

参考文献

- [1] 毕金峰,吕健,刘璇,等.国内外桃加工科技与产业现状及展望[J].食品科学技术学报,2019,37(5):7-15. [BI J F, LÜ J, LIU X, et al. Research on techniques and industry situation and prospect for peach processing in domestic and abroad[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2019, 37(5): 7-15.]
- [2] 周国燕,陈唯实,叶秀东,等.猕猴桃热风干燥与冷冻干燥的实验研究[J].食品科学,2007(8):164-167. [ZHOU G Y, CHEN W S, YE X D, et al. Study on freeze-drying and hot-air drying kiwi-fruit slice[J]. *Food Science*, 2007(8): 164-167.]
- [3] 汪廷彩,苏平,祝水兰.真空冷冻干燥技术在食品加工中的应用及展望[J].粮油加工与食品机械,2002(12):31-34. [WANG T C, SU P, ZHU S L. Application and prospect of vacuum freeze drying technology in food processing[J]. *Cereals and Oils Processing*, 2002(12): 31-34.]
- [4] 张晓敏,兰彦平,周连第,等.果蔬渗透脱水技术研究进展[J].食品研究与开发,2012,33(9):204-207. [ZHANG X M, LAN Y P, ZHOU L D, et al. Research progress on osmotic dehydration in fruit and vegetables[J]. *Food Research and Development*, 2012, 33(9): 204-207.]
- [5] NAKNEAN P, MANEYAM R, KAM-ONSRI A. Effect of different osmotic agents on the physical, chemical and sensory properties of osmo-dried cantaloupe[J]. *Chiang Mai Journal of Science*, 2012, 40(3): 427-439.
- [6] HU X, WANG R R, GUO J J, et al. Changes in the volatile components of candied kumquats in different processing methodologies with headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. *Molecules*, 2019, 24(17): 3053.
- [7] 宋悦,金鑫,毕金峰,等.超声辅助渗透处理对热风干燥及真空冷冻干燥黄桃片品质的影响[J].食品科学,2020,41(15):177-185. [SONG Y, JIN X, BI J F, et al. Effect of ultrasonic-assisted osmotic dehydration on the quality characteristics of hot air dried and vacuum freeze dried yellow peach chips[J]. *Food Science*, 2020, 41(15): 177-185.]
- [8] SORNDECH W, NAKOM N, TONGTA S, et al. Isomalto-oligosaccharides: Recent insights in production technology and their use for food and medical applications[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2018, 95: 135-142.
- [9] YEN C H, TSENG Y H, KUO Y W, et al. Long-term supplementation of isomalto oligosaccharides improved colonic microflora profile, bowel function, and blood cholesterol levels in constipated elderly people: A placebo-controlled, diet-controlled trial[J]. *Nutrition*, 2011, 27(4): 445-450.
- [10] MELUCCI D, BENDINI A, TESINI F, et al. Rapid direct analysis to discriminate geographic origin of extra virgin olive oils by flash gas chromatography electronic nose and chemometrics[J]. *Food Chemistry*, 2016, 204: 263-273.
- [11] PRAT L, ESPINOZA M I, AGOSIN E, et al. Identification of volatile compounds associated with the aroma of white strawberries (*Fragaria chiloensis*) [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2014, 94(4): 752-759.
- [12] 马尧,郝慧慧,张海红,等. GC-MS 结合电子鼻分析不同干燥方式对黄花草粉挥发性物质的影响 [J]. 食品科学, 2022, 43(6): 324-330. [MA X, HAO H H, ZHANG H H, et al. The effects of different drying methods on volatile flavor components of daylily powder were analyzed by GC-MS combined with electronic nose[J]. *Food Science*, 2022, 43(6): 324-330.]
- [13] SONG J X, CHEN Q Q, BI J F, et al. GC/MS coupled with MOS e-nose and flash GC e-nose for volatile characterization of Chinese jujubes as affected by different drying methods[J]. *Food Chemistry*, 2020, 331: 127201.
- [14] LÜ J, YI J, BI J, et al. Effect of sucrose concentration of osmotic dehydration pretreatment on drying characteristics and texture of peach chips dried by infrared drying coupled with explosion puffing drying[J]. *Drying Technology*, 2017, 35(15): 1887-1896.
- [15] UMER H, WANG D, WU G F, et al. Post-storage changes of volatile compounds in air- and sun-dried raisins with different packaging materials using HS-SPME with GC/MS[J]. *Food Research International*, 2019, 119: 23-33.
- [16] LIU Y, HE C C, SONG H L, et al. Comparison of fresh watermelon juice aroma characteristics of five varieties based on gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry[J]. *Food Research International*, 2018, 107(MAY): 119-129.
- [17] 王鹏,田洪磊,詹萍,等.采用 GC-MS 技术分析新疆蟠桃鲜果及其果汁制品中的挥发性物质 [J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(11): 199-205. [WANG P, TIAN H L, ZHAN P, et al. Analysis of volatile substances in Xinjiang flat peach fruits and its juice products by GC-MS[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2016, 42(11): 199-205.]
- [18] KARAFFA L S. The merck index: An encyclopedia of chemicals, drugs, and biologicals[M]. RSC Publishing, 2013.
- [19] AUBERT C, MILHET C. Distribution of the volatile compounds in the different parts of a white-fleshed peach (*Prunus persica* L. Batsch) [J]. *Food Chemistry*, 2007, 102(1): 375-384.
- [20] REINECCIUS G. Flavor chemistry and technology[M]. CRC press, 2005.

- [21] 李卓豪, 毕金峰, 易建勇, 等. 不同小分子糖渗透草莓的传质动力学及对真空冷冻干燥草莓品质的影响[J/OL]. 食品科学: 1-16[2022-08-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20210911.1250.014.html>. [LI Z H, BI J F, YI J Y, et al. Effects of osmotic dehydration with various small-molecule sugars on mass transfer kinetics of strawberries and qualities of its freezing-dried products[J/OL]. Food Science: 1-16[2022-08-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20210911.1250.014.html>]
- [22] TIAN Y T, ZHAO Y T, HUANG J J, et al. Effects of different drying methods on the product quality and volatile compounds of whole shiitake mushrooms[J]. Food Chemistry, 2016, 197: 714-722.
- [23] SINESIO F, MONETA E, SPATARO P, et al. Determination of sensory quality of dehydrated vegetables with profiling[J]. Italian Journal of Food Science, 1995, 7(1): 11-18.
- [24] 张艳荣, 吕呈蔚, 刘通, 等. 不同干燥方式对姬松茸挥发性风味成分分析[J]. 食品科学, 2016, 37(10): 116-121. [ZHANG Y R, LÜ C W, LIU T, et al. Effect of different drying methods on volatile flavor components in *Agaricus blazei*[J]. Food Science, 2016, 37(10): 116-121.]
- [25] 范刚, 王可兴, 潘思轶. 水果中糖苷键合态香气物质的研究进展[J]. 中国农业科学, 2010, 43(24): 5100-5111. [FAN G, WANG K X, PAN S Y. Advances in research of glycosidically bound aroma compounds in fruits[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(24): 5100-5111.]
- [26] FREEMAN G G, WHENHAM R J. The use of synthetic ($\pm$)-s-1-propyl-L-cysteine sulfoxide and of alliinase preparations in studies of flavour changes resulting from processing of onion (*Allium cepa* L.)[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2010, 26(9): 1333-1346.
- [27] ZHANG B, SHEN J Y, WEI W W, et al. Expression of genes associated with aroma formation derived from the fatty acid pathway during peach fruit ripening[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010, 58: 6157-6165.
- [28] FLINK J, KAREL M. Retention of organic volatiles in freeze-dried solutions of carbohydrates[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1970, 18(2): 295-297.
- [29] 蒋鹏飞, 王赵改, 史冠莹, 等. 不同干燥方式的苦瓜粉品质特性及香气成分比较[J]. 现代食品科技, 2020, 36(3): 234-244. [JIANG P F, WANG Z G, SHI G Y, et al. Quality characteristics and aroma components of bitter melon (*Momordica charantia* L.) powder dried by different methods[J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(3): 234-244.]
- [30] 刘璇, 赖必辉, 毕金峰, 等. 不同干燥方式芒果脆片香气成分分析[J]. 食品科学, 2013, 34(22): 179-184. [LIU X, LAI B H, BI J F, et al. Analysis of aroma components in mango chips by different drying methods[J]. Food Science, 2013, 34(22): 179-184.]
- [31] 车夏宁, 林海龙, 赵永武, 等. 低聚异麦芽糖理化功能特性及生产方法研究进展[J]. 中国酿造, 2014(7): 4. [CHE X N, LIN H L, ZHAO Y W, et al. Research progress on physico chemical properties and physiological functions and production of isomaltoligosaccharide[J]. China Brewing, 2014(7): 4.]
- [32] CREWS C, CASTLE L. A review of the occurrence, formation and analysis of furan in heat-processed foods[J]. Trends in Food Science & Technology, 2007, 18(7): 365-372.
- [33] 杨杨, 王冰, 石彦国, 等. 酸浆豆腐后熟过程中风味物质的形成途径分析[J]. 食品科学, 2021, 42(20): 152-159. [YANG Y, WANG B, WANG Y G, et al. Analysis of the formation of flavor substances in the process of ripening of fermented soybeans whey tofu[J/OL]. Food Science, 2021, 42(20): 152-159.]
- [34] 范霞, 崔心平. 基于 HS-SPME/GC-MS 和电子鼻技术研究江苏省不同肉质桃子七月份采后贮藏期的香气成分[J]. 食品科学, 2021, 42(20): 222-229. [FAN X, CUI X P. Based on HS-SPME/GC-MS and electronic nose technology to study the aroma compounds of peach of different flesh types during the July postharvest storage in jiangsu province[J]. Food Science, 2021, 42(20): 222-229.]
- [35] BELITZ H D, GROSCH W, SCHIEBERLE P. Food chemistry[M]. Springer Berlin Heidelberg, 2004.
- [36] 席万鹏, 郁松林, 周志钦. 桃果实香气物质生物合成研究进展[J]. 园艺学报, 2013, 40(9): 1679-1690. [XI W P, YU S L, ZHOU Z Q. Advances in aroma compounds biosynthesis of peach fruit[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2013, 40(9): 1679-1690.]
- [37] WANG J, YUAN Z L, REN R C, et al. Comparison of volatiles of banana powder dehydrated by vacuum belt drying, freeze-drying and air-drying[J]. Food Chemistry, 2007, 104(4): 1516-1521.
- [38] MUI W, DURANCE T D, SCAMAN C H. Flavor and texture of banana chips dried by combinations of hot air, vacuum, and microwave processing[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2002, 50(7): 1883-1889.
- [39] THIJSSEN H A C. Flavour retention in drying pre-concentrated food liquids[J]. Journal of Applied Chemistry and Biotechnology, 1971, 21(12): 372-377.
- [40] XU X D, XU R, JIA Q. Identification of dihydro- β -ionone as a key aroma compound in addition to C8 ketones and alcohols in *Volvariella volvacea* mushroom[J]. Food Chemistry, 2019, 293: 333-339.
- [41] VAN GEMERT L J. Compilations of odour threshold values in air, water and other media[M]. Oliemans Punter & Partners BV, 2003.
- [42] BALDWIN E A, BAI J, PLOTTO A, et al. Electronic noses and tongues: Applications for the food and pharmaceutical industries[J]. Sensors, 2011, 11(5): 4744-4766.