王晓雪, 杨嫣婕, 翁文谨, 等. 沙棘全果粉曲奇制备及风味特征评价 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(5): 238−248. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025020111

WANG Xiaoxue, YANG Yanjie, WENG Wenjin, et al. Preparation and Flavor Characteristics Evaluation of Seabuckthorn Whole Fruit Powder Cookies[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(5): 238−248. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025020111

· 工艺技术 ·

沙棘全果粉曲奇制备及风味特征评价

王晓雪[1], 杨嫣婕[1], 翁文谨[1], 刘　洋[1], 王小勇[2], 吕兆林[1,3,*]

（1.北京林业大学生物科学与技术学院, 北京 100083;
2.北京原麦山丘食品有限公司, 北京 101200;
3.林业食品加工与安全北京市重点实验室, 北京 100083）

摘　要: 目的：本研究以沙棘全果粉为原料制作沙棘全果粉曲奇，优化配方，并研究其特征风味。方法：以感官评价为依据，通过正交试验优化配方，并采用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用法测定样品中挥发性成分，计算香气活性值探究沙棘全果粉曲奇的特征风味。结果：以低筋面粉质量为基准，加入 6% 沙棘全果粉、60% 黄油、20% 糖粉、20% 牛奶的沙棘全果粉曲奇为橙黄色，色泽均匀，形态完整，组织紧密，甜度适宜，带有沙棘特殊风味，综合感官评分为 75.33 分。沙棘全果粉曲奇中的风味组分丰富，包括沙棘全果粉中呈现出果香、甜香和植物气味的酯类物质，以及原味曲奇中呈现出脂香的醛类和酮类物质。沙棘全果粉曲奇的特征风味物质有乙酸壬酯、异戊酸、己醛、1-辛醇、δ-辛内酯等，在果香、甜香、植物气味方面有显著贡献。沙棘全果粉曲奇的风味是由多组结构相似的物质交互形成的。结论：本研究通过感官评价优化沙棘全果粉曲奇的配方，有效改善了其适口性，并进一步解析了产品的风味特征与关键风味物质，为沙棘全果粉曲奇的工艺生产提供理论支持，在沙棘全果粉曲奇的品质研究方面具有一定的应用价值。

关键词: 沙棘全果粉曲奇, 沙棘全果粉, 顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用（HS-SPME-GC-MS）, 食品风味, 交互作用

中图分类号: TS207.3; S793.6　　**文献标识码:** B　　**文章编号:** 1002−0306(2026)05−0238−11

本文网刊:

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025020111

Preparation and Flavor Characteristics Evaluation of Seabuckthorn Whole Fruit Powder Cookies

WANG Xiaoxue[1], YANG Yanjie[1], WENG Wenjin[1], LIU Yang[1], WANG Xiaoyong[2], LÜ Zhaolin[1,3,*]

（1.College of Biological Sciences and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2.Beijing Yuanmai Shanqiu Food Co., Ltd., Beijing 101200, China;
3.Beijing Key Laboratory of Forestry Food Processing and Safety, Beijing 100083, China）

Abstract: Objective: To develop more palatable sea buckthorn-based products with broader consumer appeal, this study used whole sea buckthorn fruit powder to produce cookies. The formulation was optimized, and the flavor profile was investigated. Methods: Based on sensory evaluation, the cookie formulation was optimized using an orthogonal experimental design. Volatile compounds in the samples were analyzed using headspace solid-phase microextraction combined with gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS) and odor activity values (OAVs) were calculated to explore the characteristic aroma compounds of sea buckthorn whole fruit powder cookies. Results: The optimal cookie formulation, using low-gluten flour, included 6% sea buckthorn whole-fruit powder, 60% butter, 20% powdered sugar, and 20% milk. The cookies exhibited a uniform orange-yellow color, intact shape, dense texture, suitable sweetness, and a distinctive sea buckthorn flavor, with a sensory score of 75.33. The flavor consisted of ester compounds

收稿日期: 2025−02−17

基金项目: 企业横向课题（2016hxfwswxy011）。

作者简介: 王晓雪（2001−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 天然活性物质提取与功能性食品开发, E-mail: wangxiaoxue601@163.com。

*** 通信作者:** 吕兆林（1971−）, 女, 博士, 教授, 研究方向: 天然活性物质提取与功能性食品开发, E-mail: zhaolinlv@bjfu.edu.cn。

from sea buckthorn, imparting fruity, sweet, and green notes, and aldehydes and ketones from the base recipe, contributing to buttery aromas. The characteristic aroma compounds of sea buckthorn whole fruit powder cookies included nonyl acetate, isovaleric acid, hexanal, 1-octanol, and δ-octa lactone, which significantly contributed to their fruity, sweet, and plant-like aromas. The flavor profile of the cookies was formed through the interaction of multiple structurally similar compounds. Conclusion: This study optimized the formula of sea buckthorn whole fruit powder cookies through sensory evaluation, effectively improved their palatability, and further analyzed the flavor characteristics and key flavor substances of the products. This study provided theoretical support for the formulation optimization, flavor characterization, and potential industrial application of sea buckthorn whole fruit powder cookies.

Key words: sea buckthorn whole fruit powder cookies; sea buckthorn whole fruit powder; headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS); food flavor; interaction

沙棘(*Hippophae rhamnoides* L.)是一种落叶灌木, 属于胡颓子科沙棘属(*Hippophae*)。在中国, 沙棘的种植面积广泛, 占全球沙棘种植面积的约 90%, 并覆盖新疆、内蒙古、山西等 16 个省市[1]。沙棘不仅具有显著的生态价值, 其果实、种子和叶片中均含有丰富的活性成分, 如黄酮类化合物、维生素、不饱和脂肪酸、血清素和白藜芦醇等。研究表明, 沙棘具有抗氧化、抗炎、抗癌、抗菌等生理活性, 此外, 还在促进伤口愈合、肝脏保护及神经保护等方面展现出良好的效果[2−4]。

沙棘全果粉由沙棘全果干燥粉碎制作而成, 不提油不去籽, 全果全营养, 更好地保留沙棘中丰富的营养物质及特征香气。沙棘全果粉营养成分丰富, 具有调节脂质代谢和肠道菌群等生理功能[5]。但其口感偏酸涩, 将沙棘全果粉应用于食品中, 不仅能减轻沙棘本身的酸涩感, 还能为食品增添沙棘的特殊风味。此外, 沙棘全果粉具有良好的保存性、加工性和较低的运输成本, 是生产沙棘全果粉产品的重要优势之一。尽管如此, 当前关于沙棘全果粉在食品中的应用研究仍较为稀缺, 现有沙棘相关产品多集中于沙棘果粉或果浆的开发与应用。例如, Gani 等[6] 通过将沙棘提取物添加至小麦粉中, 制备出功能性饼干, 显著提高了饼干中的酚类物质含量。相比之下, 采用沙棘全果粉作为原料, 能够避免在果粉或果浆加工过程中可能造成的营养成分损失, 从而更好地保留沙棘的全面营养成分, 并提供更为丰富的沙棘风味。

食品的风味组成复杂, 是消费者选择食品的重要考量因素[7]。沙棘的风味通常被描述为酸涩并带有刺激性气味及发酵味[8], 因此, 沙棘的加入会显著影响食品的风味特征。杨秉坤等[9] 对沙棘饮料和沙棘酸奶的风味进行研究, 发现乙酸乙酯、甲酸丁酯和甲酸异戊酯等酯类物质为其主要风味物质, 产品具有沙棘的特殊风味, 风味更加浓郁。随着对食品风味研究的深入, 已发现多个风味化合物的混合效应并非简单的加和关系[10]。因此, 本研究将探讨沙棘全果粉曲奇中风味物质之间的相互作用。

本研究以新疆地区沙棘全果粉为原料, 结合感官评价, 采用正交试验优化沙棘全果粉曲奇的配方。通过顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术(HS-SPME-GC-MS), 分析沙棘全果粉(Seabuckthorn whole fruit powder, SP)、原味曲奇(Original cookie, OC)和沙棘全果粉曲奇(Seabuckthorn whole fruit powder cookie, SPC)中的挥发性成分, 并利用香气活性值(Odor activity value, OAV)法分析果粉对沙棘全果粉曲奇风味特征的影响, 进一步探讨风味物质间的交互作用。本文旨在为沙棘全果粉曲奇的研发与品质评价提供科学数据支持, 并评估其风味贡献物质, 期望为制备口感优良且消费者可接受的沙棘全果粉曲奇提供理论依据, 推动更具风味的沙棘全果粉曲奇产品的开发。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

沙棘全果粉　新疆康元生物技术集团股份有限公司; 低筋面粉、黄油、糖粉、全脂灭菌牛奶　北京原麦山丘食品有限公司; 己醇标准品、辛醛标准品、十一烷标准品、壬酸标准品、正构烷烃(C10~C25)标准品　美国 Sigma 公司。

FW100 高速万能粉碎机　天津市泰斯特仪器有限公司; SK-642F 电烤炉　新麦机械(无锡)有限公司; B15 打发器　上海世麦智能科技有限公司; ACS-D11 电子秤　上海乾峰电子仪器有限公司; TVT6700 质构仪　波通瑞华科学仪器有限公司(瑞典 Perten); BC5196 硅胶刮刀　拜格日用品有限公司; 57357-U 固相微萃取操作平台　美国 Supelco 公司; GCMS-QP2010Ultra 气相色谱质谱联用仪　日本岛津公司。

1.2　实验方法

1.2.1　沙棘全果粉曲奇配方优化

1.2.1.1　沙棘全果粉曲奇(SPC)配方正交试验　参考许栗等[11], 以低筋面粉质量为基准, 按不同比例加入沙棘全果粉(SP)、黄油、糖粉以及 40 g 牛奶, 以 SP、黄油、糖粉三个因素为影响沙棘全果粉曲奇品质的因素, 依据单因素实验的优选结果对 SPC 品质进行评价分析。选用三因素三水平正交试验, 确定其最佳工艺配方。正交试验因素水平如表 1 所示。

称取一定量的黄油和糖粉, 将糖粉加入黄油中, 40 g 牛奶分 3 次加入并搅拌均匀, 再称取 200 g 低筋面粉、一定比例的 SP 加入, 搅拌均匀揉成面团。将面团平均分成 15 g 左右的小面团, 将面团压平, 保证

表 1 正交试验因素水平

Table 1 Factor level of orthogonal test

水平	因素		
	A SP(%)	B 黄油(%)	C 糖粉(%)
1	4	50	20
2	6	60	25
3	8	70	30

每个面饼厚度均匀, 放入烤盘, 上火温度为 190 ℃, 下火温度为 100 ℃, 烘烤 15 min, 待曲奇冷却至室温后每块独立封装。上述同样配方比例和制作步骤, 但不加入 SP, 制得原味曲奇作为对照。

1.2.1.2 沙棘全果粉曲奇感官评价 设立感官评价小组, 小组成员共 7 人, 4 位女生 3 位男生, 年龄在 20~30 岁之间, 对 SPC 色泽、形态、滋味、口感及组织 5 个方面进行感官评价。评价标准及对应评分区间如表 2 所示。

表 2 SPC 感官评价标准

Table 2 Sensory evaluation criteria for SPC

感官	评价标准	评分区间
色泽(20)	色泽不均匀, 有烤焦现象, 明显异色	0~7
	呈浅黄色, 色泽不均匀, 略有异色	8~14
	橙黄色, 色泽基本均匀, 无烤焦	15~20
形态(20)	表面起泡, 破碎严重, SP分布不均匀	0~7
	外形基本完整, SP分布较均匀	8~14
	外形完整, 表面无明显气孔, SP分布均匀	15~20
滋味(20)	沙棘香味无, 有异味	0~7
	沙棘香味淡, 无异味	8~14
	沙棘香味浓, 无异味	15~20
组织(20)	质地僵硬, 有杂质, 厚薄极不均匀	0~7
	略有大孔, 组织较粗糙, 厚薄较均匀	8~14
	组织紧密不散, 无杂质, 无明显大空洞和局部过硬的状态, 厚薄均匀	15~20
口感(20)	较硬、口感粗糙、粘牙, 甜味淡或过腻	0~7
	紧实不细腻、略粘牙, SP质感较重, 略淡或略甜	8~14
	酥松、细腻、不粘牙, SP质感好, 甜味适宜	15~20

1.2.2 曲奇挥发性化合物表征

1.2.2.1 顶空固相微萃取(HS-SPME)样品前处理 分别准确称取沙棘全果粉、研磨后的沙棘全果粉曲奇、原味曲奇 2 g, 放入 15 mL 固相微萃取专用样品瓶中待用。60 ℃ 下平衡 10 min 后, 在此条件下吸附 30 min, 气质联用仪进样口解析进样[12]。

1.2.2.2 气相色谱-质谱联用法(GC-MS)测定 采用 GC-MS 对沙棘全果粉、原味曲奇、沙棘全果粉曲奇进行检测, 具体条件如下。

GC 条件: Rtx-5MS 色谱柱(0.25 mm×30 m×0.25 μm); 升温程序为 50 ℃ 保持 5 min, 以 5 ℃/min 的速率升温至 120 ℃ 后保持 5 min, 再以 8 ℃/min 的速率升温至 230 ℃ 后保持 5 min; 载气为氦气, 流速 1 mL/min; 分流进样, 分流比为 5∶1; 进样口温度 230 ℃。

MS 条件: 电离方式 EI, 离子能量 70 eV, 离子源温度 230 ℃, 扫描范围 33~500 m/z。

定性分析: 采用 GCMS Postrun Analysis 软件进行分析, 利用 NIST14 和 NIST14s 标准质谱库检索谱图中的挥发性成分, 保留匹配度≥90% 的物质; 并结合正构烷烃保留时间计算保留指数, 与 NIST Chemistry WebBook 中查询得到的 RI 值进行对比, 来筛选挥发性成分。

$$RI = 100n + 100\frac{T_x - T_n}{T_{n+1} - T_n}$$

式中: RI 表示挥发性成分的保留指数; n 表示正构烷烃的碳原子个数; T_x 表示挥发性物质出峰的保留时间, min; T_n 表示碳原子数为 n 的正构烷烃的保留时间, min; T_{n+1} 表示碳原子数为 n+1 的正构烷烃的保留时间, min。

定量分析: 采用外标法定量, 对定性得到的挥发性成分的色谱峰进行积分, 并选择己醇、辛醛、十一烷和壬酸作为定量的外标物, 利用已知浓度的标准品计算出挥发性成分的含量, 结果以 mg/kg 表示。

1.2.2.3 风味物质分析 对检测到的挥发性成分进行风味物质分析, 查询其阈值及香气特征[13]。通过计算 OAV 值进行表征以确定该组分在整体风味中的贡献程度, 其中 OAV 值是挥发性成分的含量与阈值之比, 当 OAV>1 时, 说明该成分对风味具有较大的贡献[14]。

本研究对 SP 和 SPC 中的共有特征香气成分进行分析, 将 SP 中特征香气成分的 OAV 值作为理论数值, 按照 SPC 中实际含有 SP 含量对 HS-SPME-GC-MS 分析结果进行折算, 折算后 SPC 中共有的特征香气成分的 OAV 值为实际数值, 将理论数值和实际数值进行对比, 两者总和为 1, 结果以百分比表示。

1.3 数据处理

所有实验重复三次, 实验数据用平均数±标准差(SD)表示。采用 Excel 对数据进行整理分析, Origin 2021 绘制图表, SIMCA 14.1 进行正交偏最小二乘判别分析(OPLS-DA), SPSS 26.0 进行显著性分析(P<0.05)。

2 结果与分析

2.1 SPC 感官评价及正交试验结果

正交试验基于单因素实验的结果, 单因素实验结果: SP 在曲奇中的最佳添加范围为 4%~8%, 黄油的最佳添加量为 50%~70%, 糖粉的最优添加范围为 20%~30%。基于上述原料添加比例, 采用正交试验法对不同配比的 SPC 进行了优化。试验 1~9 所制备的 SPC 形态如图 1 所示。根据感官评分结果, 正交试验数据详见表 3, 方差分析结果见表 4。

由表 3 可知, 最佳配方为 $A_2B_2C_1$。极差分析结果表明, 影响沙棘全果粉曲奇品质的主要因素为糖粉, 其次为沙棘全果粉, 而黄油的影响相对较小。表 4 显示, 不同添加比例 SP 和糖粉对曲奇的感官特

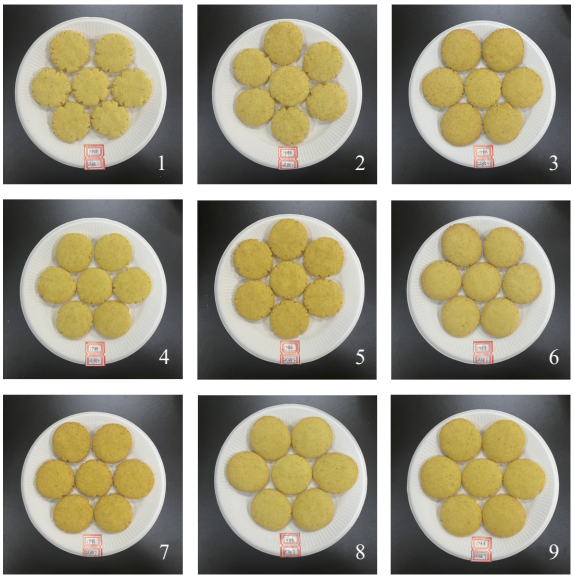


图 1　正交试验制得的 SPC 形态图

Fig.1　SPC morphology diagram obtained by orthogonal test

表 3　SPC 原料正交试验结果

Table 3　Results of orthogonal test on raw material of SPC

试验号	A	B	C	感官评分
1	4%	50%	20%	65.86
2	4%	60%	30%	64.86
3	4%	70%	25%	64.71
4	6%	50%	25%	72.95
5	6%	60%	20%	75.33
6	6%	70%	30%	62.24
7	8%	50%	30%	67.48
8	8%	60%	25%	68.43
9	8%	70%	20%	71.62
K_1	195.43	206.29	212.81	
K_2	210.52	208.62	206.10	
K_3	207.52	198.57	194.57	
R	5.03	3.35	6.08	
主次		C>A>B		
最优方案		$A_2B_2C_1$		

表 4　SPC 正交试验方差分析(α=0.05)

Table 4　Analysis of variance of orthogonal test of SPC (α=0.05)

方差来源	离差平方和	自由度	*F*值	*P*值
A	33.365	2	24.974	0.039*
B	12.440	2	9.311	0.097
C	39.542	2	29.597	0.033*
误差	1.336			

注：*表示差异显著，*P*<0.05。

性具有显著影响，与正交试验结果相符。其中，最佳配方 $A_2B_2C_1$ 对应正交试验中的第 5 组样品，其综合感官评分为 75.33 分，处于较高水平。该配方制得的曲奇呈橙黄色，色泽均匀，沙棘全果粉分布均匀且无杂质，质地酥松细腻，并具有良好的沙棘风味。

综上，以低筋面粉质量为基准，确定最佳工艺配方为：沙棘全果粉 6%、黄油 60%、糖粉 20%。所得沙棘全果粉曲奇整体风味协调，酸涩感得到有效平衡，同时沙棘赋予曲奇独特的风味特征，具备良好的消费者接受度。因此，本研究进一步分析沙棘全果粉曲奇的风味组成，并探讨沙棘对其风味特征的影响机制。

2.2　沙棘全果粉、沙棘全果粉曲奇及原味曲奇挥发性化合物表征

本研究采用 HS-SPME-GC-MS 对 SP、OC 和 SPC 的挥发性成分进行分析。三种样品总离子流色谱图如图 2 所示。

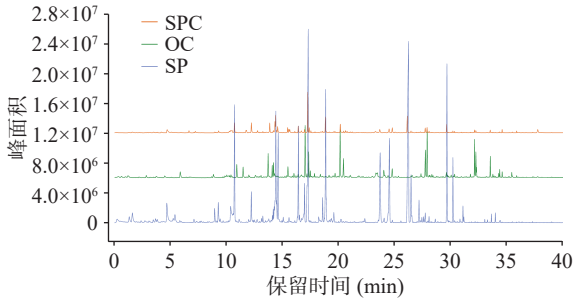


图 2　3 种样品 HS-SPME-GC-MS 分析总离子流色谱图

Fig.2　Total ion current chromatograms of HS-SPME-GC-MS analysis for 3 samples

在三种样品中共检测到 193 种挥发性成分，其中 SP、OC 和 SPC 分别检出 99 种、96 种和 88 种挥发性化合物，总含量分别为 8.15×10^5、1.11×10^5 和 6.77×10^4 mg/kg。三种样品中不同类别挥发性物质的含量如图 3 所示。

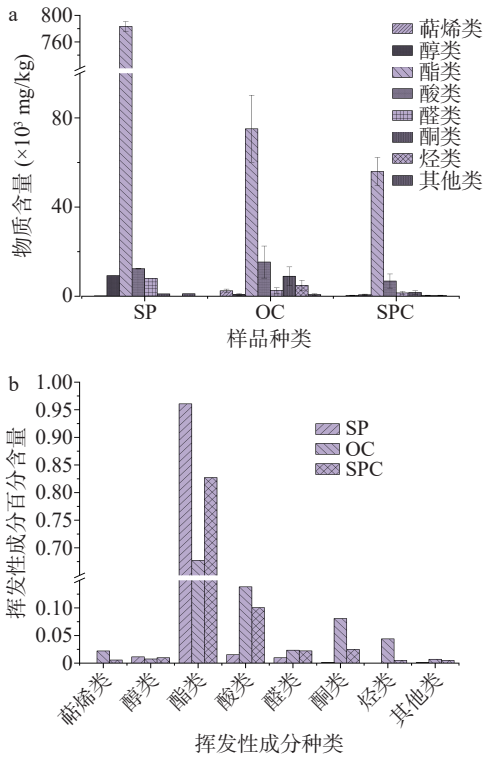


图 3　SP、OC 及 SPC 挥发性物质含量(a)及百分含量(b)柱状图

Fig.3　SP, OC and SPC volatile substance content (a) and percentage (b) column chart

由图 3 可见，三种样品中酯类物质均为主要挥发性成分。其中，SP 中酯类含量最高，为 7.83×10^5 mg/kg，占总挥发性化合物含量的 96.07%；SPC 次之，占 82.71%；OC 中酯类含量最低，仅占 67.71%。沙棘中挥发性成分多为乙酯类和 3-甲基丁酯类物质[15−16]。Ma 等[17] 对沙棘的风味物质进行分析和预测，发现酯类物质占总挥发性化合物含量的 88% 以上，这一结果与本研究相符。

除酯类外，酸类化合物也是三种样品中的重要挥发性成分。在 OC 和 SPC 中，酸类物质的相对含量较高，分别占 13.82% 和 10.05%，而在 SP 中仅占 1.52%。酸类物质在曲奇风味形成中具有重要作用，但含量过高可能导致刺激性气味的增强，从而影响曲奇风味[18]。SPC 中酸类物质的主要成分为己酸、辛酸和癸酸，这些物质在 OC 中也有检出，而在 SP 中未检测到，表明 SP 的加入对曲奇酸类物质的形成影响较小。然而，由于酸类化合物的嗅觉阈值较高，其刺激性气味并不显著，反而使 SPC 的气味更加丰富。此外，醛类和酮类物质主要由脂肪氧化反应生成，在食品风味的形成中发挥重要作用，能够赋予产品醇厚而丰富的香气[19]。

2.3 SPC 特征风味物质分析

2.3.1 风味物质分析 感官评价中，感官小组成员均认为在 OC 中加入 SP 制得的 SPC 带有特殊沙棘风味，为进一步明确 SPC 的风味特征，进一步筛选风味贡献较高的，即 OAV>1 的挥发性成分共 90 种。将 SP、OC 及 SPC 中的风味分为果香、甜香、植物气味、脂香、刺激性气味 5 类，更细致地区分与表征每种风味物质的风味贡献。

在 SPC、OC 和 SP 中，共筛选出 90 种关键风味物质，其中 SPC、OC 和 SP 分别含有 51 种、52 种和 51 种风味成分。酯类物质为主要挥发性成分，共检测到 37 种，其次为醛类（15 种）、醇类（13 种）和酸类（10 种）。各挥发性风味物质的具体信息及其 OAV 如表 5 所示。

表 5 SP、OC 及 SPC 风味物质汇总

Table 5 Summary of flavor compounds in SP, OC and SPC

序号	名称	CAS号	风味描述	风味分类	阈值（mg/kg）	OAV(×10^3)		
						SPC	OC	SP
			萜烯类					
A1	d-柠檬烯	5989-27-5	令人愉快的柠檬味	1	0.034	6.79	32.93	−
			醇类					
A2	乙醇	64-17-5	轻微的特有气味	5	0.62	−	−	2.10
A3	1-戊醇	71-41-0	特征性的甜味	2	0.15	0.19	0.28	−
A4	1-十二烷醇	112-53-8	特有的脂肪味	4	0.016	−	12.69	−
A5	正己醇	111-27-3	草本味、甜味、水果味	1、2、3	0.034	0.62	0.71	1.99
A6	2,4-庚二烯醇	4313-03-5	脂肪味、青香的气味	3、4	0.0154	1.43	−	39.45
A7	正庚醇	111-70-6	木质的、微弱的脂肪味	3、4	0.0054	1.78	2.75	17.51
A8	苯乙醇	60-12-8	典型的玫瑰气味	3	0.564	0.56	−	9.62
A9	苯甲醇	100-51-6	特有的令人愉快的水果味	1	2.55	0.01	0.02	0.08
A10	1-辛烯-3-醇	3391-86-4	甜美的薰衣草、玫瑰的味道	3	0.0015	18.94	31.66	−
A11	反式-2-辛烯醇	18409-17-1	坚果味	4	0.02	−	3.33	−
A12	1-辛醇	111-87-5	清新的橙子、玫瑰味	1、3	0.042	1.28	3.43	6.99
A13	2-壬醇	628-99-9	强烈的果绿气味	1、3	0.058	−	−	2.24
A14	1-壬醇	143-08-8	典型的玫瑰橙子气味	1、3	0.05	0.54	−	8.09
			酯类					
A15	苯乙酸乙酯	101-97-3	令人愉快的、甜的蜂蜜味道	2	0.1556	5.65	−	69.16
A16	δ-癸内酯	705-86-2	油腻的桃子味	1、4	0.066	30.67	180.02	−
A17	3-甲基丁酸异戊酯	659-70-1	甜的、苹果和芒果特有的气味	1、2	0.02	290.06	−	2999.35
A18	乙酸辛酯	112-14-1	橙子气味和花香	1、3	0.047	−	5.94	−
A19	2-甲基丁酸异戊酯	27625-35-0	水果味	1	0.0086	−	−	592.40
A20	己酸丁酯	626-82-4	典型的菠萝味	1	10	−	2.24	−
A21	异戊酸2-甲基丁酯	2445-77-4	草本的、甜的水果味	1、2、3	0.024	30.84	−	330.02
A22	辛酸乙酯	106-32-1	令人愉快的水果花香	1、3	0.0193	738.20	86.72	5726.78
A23	丙烯酸正丁酯	141-32-2	强烈的、青香的水果味	1、3	0.022	−	42.24	−
A24	γ-十二内酯	2305-05-7	脂肪味、桃子的味道	1、4	0.00043	−	2946.90	−
A25	己酸异戊酯	2198-61-0	甜的水果味	1、2	0.32	17.67	−	193.63
A26	乙酸壬酯	143-13-5	水果味、栀子花香	1、3	0.6	1.12	−	−
A27	肉桂酸乙酯	103-36-6	甜甜的蜂蜜味	2	0.017	−	−	23.74
A28	苯甲酸异戊酯	94-46-2	甜的水果味	1、2	0.25	29.39	−	625.88
A29	己酸己酯	6378-65-0	草本气味	3	6.4	−	0.72	−

续表 5

序号	名称	CAS号	风味描述	风味分类	阈值（mg/kg）	OAV（×10³）		
						SPC	OC	SP
A30	2,4-癸二烯酸乙酯	3025-30-7	梨子味	1	0.1	2.08	–	91.91
A31	δ-十二内酯	713-95-1	椰果味、油性气味	1、4	0.053	13.85	153.07	–
A32	壬酸乙酯	123-29-5	坚果味、水果味	1、4	0.377	–	–	2.76
A33	癸酸乙酯	110-38-3	葡萄味	1	0.005	396.62	–	10302.60
A34	丁酸丁酯	109-21-7	梨和菠萝的味道	1	0.4	–	2.00	–
A35	辛酸异戊酯	2035-99-6	水果味	1	0.07	10.58	–	310.05
A36	乙酸己酯	142-92-7	苹果、樱桃、梨的味道和花香	1、3	0.115	–	48.17	–
A37	月桂酸乙酯	106-33-2	花香、水果味	1、3	5.9	0.10	–	3.56
A38	肉豆蔻酸乙酯	124-06-1	蜡状气味、鸢尾植物气味	3、4	4	0.02	–	0.60
A39	γ-壬内酯	104-61-0	椰子的气味	1	0.0097	–	41.63	–
A40	γ-己内酯	695-06-7	甜美的草本气味	2、3	0.26	0.61	0.68	5.38
A41	δ-辛内酯	698-76-0	甜味、脂肪味、椰子味、牛奶味	1、2、4	0.2	2.65	9.95	2.26
A42	十一酸乙酯	627-90-7	椰子的气味	1	0.0003	–	–	1241.87
A43	己酸乙酯	123-66-0	菠萝和香蕉味道	1	0.005	834.10	246.09	14802.17
A44	苯甲酸乙酯	93-89-0	依兰的、水果的味道	1、3	0.0556	49.44	–	747.05
A45	辛酸甲酯	111-11-5	葡萄酒的、橙子的气味	1	0.2	0.12	–	2.98
A46	棕榈酸乙酯	628-97-7	蜡状的甜味	2、4	2	–	–	0.14
A47	3-羟基丁酸乙酯	5405-41-4	新鲜的葡萄味	1	2.5	–	–	0.23
A48	异戊酸乙酯	108-64-5	葡萄酒味的、苹果的气味	1	0.00001	–	–	936673.40
A49	2-甲基丁酸乙酯	7452-79-1	青香果味	1	0.968	–	–	3.82
A50	3-羟基己酸乙酯	2305-25-1	水果味	1	0.045	–	–	53.58
A51	异戊酸异丁酯	589-59-3	苹果和覆盆子的风味	1、3	0.034	–	–	8.55
			酸类					
A52	月桂酸	143-07-7	脂肪气味	4	0.1	–	29.19	–
A53	肉豆蔻酸	544-63-8	蜡状的油性气味	4	10	–	0.05	–
A54	癸酸	334-48-5	油腻的、难闻的气味	4、5	10	0.12	0.42	–
A55	乙酸	64-19-7	强烈的醋的气味	5	0.013	38.01	–	659.92
A56	丁酸	107-92-6	腐臭的黄油的气味	5	2.4	0.30	–	–
A57	异戊酸	503-74-2	腐臭的奶酪的气味	4、5	0.49	1.16	–	–
A58	己酸	142-62-1	腐臭的、刺鼻的奶酪味	4、5	0.89	2.21	2.31	–
A59	辛酸	124-07-2	轻微难闻的气味	5	3	0.46	1.07	–
A60	壬酸	112-05-0	特有的脂肪气味	4	4.6	0.06	0.25	–
A61	庚酸	111-14-8	腐臭的、酸的脂肪味	4	0.64	–	–	5.92
			醛类					
A62	糠醛	98-01-1	特有的刺激性气味	5	9.56	–	0.02	–
A63	2,4-癸二烯醛	25152-84-5	油性的脂肪味	4	0.000027	2264.83	6082.98	1707.34
A64	癸醛	112-31-2	柑橘味、脂肪气味和花香	1、3、4	0.003	27.59	97.42	–
A65	月桂醛	112-54-9	脂肪气味和紫罗兰的气味	3、4	0.01	0.81	5.49	–
A66	十三醛	10486-19-8	柑橘、蜡质的、柚子皮的风味	1、4	0.01	1.78	9.71	–
A67	十四醛	124-25-4	油腻的、鸢尾的气味	3、4	0.11	0.08	0.41	0.93
A68	己醛	66-25-1	脂肪味、水果气味	1	0.005	8.62	32.67	57.50
A69	2,4-壬二烯-1-醛	5910-87-2	脂肪味、花香	3、4	0.0001	–	307.81	521.61
A70	庚醛	111-71-7	油腻的、刺鼻的气味	4、5	0.26	0.12	0.18	0.87
A71	壬醛	124-19-6	强烈的脂肪气味	4	0.0011	–	637.48	–
A72	苯甲醛	100-52-7	苦杏仁气味	5	0.75	0.18	0.35	1.98
A73	反-2-癸烯醛	3913-81-3	蜡质的橙子味	1、4	0.017	–	–	17.03
A74	辛醛	124-13-0	脂肪味、柑橘和蜂蜜的气味	1、2、4	0.0008	44.32	52.16	126.88
A75	苯乙醛	122-78-1	刺鼻的风信子气味	3、5	0.0063	93.22	24.05	286.24
A76	异戊醛	590-86-3	辛辣的、刺鼻的苹果气味	1、5	0.00035	–	–	147.96
			酮类					
A77	2-十一酮	112-12-9	桃子的甜味	1、2	0.0055	89.83	477.64	–
A78	2-十五烷酮	2345-28-0	牛奶味道、蓝莓味道	1、4	0.001	105.78	1516.36	–
A79	3-辛烯-2-酮	1669-44-9	柠檬味	1	0.25	–	0.19	–

续表 5

序号	名称	CAS号	风味描述	风味分类	阈值（mg/kg）	OAV(×10³)		
						SPC	OC	SP
A80	苯乙酮	98-86-2	甜味、刺激性的药味	2、5	0.065	–	0.86	–
A81	2-庚酮	110-43-0	辣味、水果味	1、5	0.023	5.84	20.51	–
A82	2-壬酮	821-55-6	芸香气味	3	0.041	11.43	27.33	–
A83	α-紫罗兰酮	127-41-3	木质的、紫罗兰的气味	1、3	0.01	–	–	11.64
A84	乙偶姻	513-86-0	木质的酸奶味	4	0.014	–	–	8.62
A85	苯丙酮	110-93-0	脂肪的柑橘气味	1、4	0.068	–	–	1.49
			其他类					
A86	对伞花烃	99-87-6	柠檬的柑橘香味	1	0.01	–	10.14	–
A87	2-戊基呋喃	3777-69-3	水果味	1	0.0058	31.74	33.69	–
A88	麦芽酚	118-71-8	焦糖味、果酱味	2	1.24	–	0.28	–
A89	2,6-二甲基吡嗪	108-50-9	坚果味、咖啡味	4	0.718	–	0.07	–
A90	庚酸醚	106-30-9	白兰地的水果味	1	0.002	12.45	–	168.50

注: “–”表示该样品中未检测到该挥发性成分。风味分类中1代表果香, 2代表甜香, 3代表植物气味, 4代表脂香, 5代表刺激性气味[13]。

由表 5 可见, 三种样品中共有 14 种风味物质, 包括 7 种醛类、4 种酯类和 3 种醇类。SP 与 SPC 共有 17 种风味成分, 其中包括 3 种醇类、12 种酯类、1 种酸类和 1 种醚类物质。OC 与 SPC 共有 17 种挥发性化合物, 包括 1 种萜烯类、2 种醇类、2 种酯类、4 种酸类、3 种醛类、4 种酮类和 1 种呋喃类物质。在 SP 中, OAV 最高的风味化合物为异戊酸乙酯, 而己酸乙酯、癸酸乙酯等酯类物质的 OAV 也较高, 表明其对 SP 具有重要的风味贡献。

在 SP 中检测到 2-壬醇, 其具有明显的水果风味, 但在 SPC 中经加热氧化后, 转化生成 2-壬酮和壬醛等化合物, 增强了脂肪类气味。此外, 在原料 SP 中检测到的苯甲醇具有愉悦的水果香气, 但在 SPC 加热后转化为苯甲醛, 呈现出类似苦杏仁的气味。SP 富含醇类物质, 在 SPC 的烘焙过程中, 这些醇类化合物在高温条件下氧化, 生成相应的醛类、酮类和酸类物质, 从而丰富了 SPC 的风味构成[20]。然而, 这些氧化产物如异戊酸、己酸等通常带有脂肪气味或一定的刺激性气味, 对 SPC 风味产生不好的影响[21]。

Tiitinen 等[22] 研究沙棘果的风味特征时发现, 短链羟基和羧基酯类是沙棘的主要挥发性成分, 其中己酸乙酯、辛酸乙酯等酯类物质的含量均超过 70%。Ma 等[17] 进一步分析沙棘风味物质, 认为 9 种酯类化合物对沙棘风味具有重要贡献, 其中多种成分在 SP 中被检测到, 且其 OAV 较高。曾奥等[23] 研究沙棘的关键风味物质, 发现 3-甲基丁酸异戊酯、己酸异戊酯、辛酸乙酯和癸酸乙酯等酯类化合物对沙棘的典型风味起关键作用, 这些物质主要呈现水果、花香和草本气息, 并赋予 SPC 独特的沙棘风味特征。

在 OC 中, OAV 较高的风味物质主要为醛类和酮类, 其中癸醛、辛酸和 2-十五烷酮等是 OC 对 SPC 主要的风味贡献化合物, 这些成分集中在醛类、酮类和酸类类别中, 该结果与以往研究中对曲奇风味物质的检测结果一致[24]。SPC 中的酮类化合物主要来源于 OC, 其中 2-十一酮、2-十三酮和 2-十五烷酮等物质的含量较高, 且嗅觉阈值较低, 能够呈现坚果香气, 从而提升 SPC 的风味复杂性。此外, 癸醛、辛酸和 2-十五烷酮等化合物除了呈现花香和果香外, 还带有牛奶、奶酪等乳脂类气息, 同时具有一定的酸味和辛辣感, 使 SPC 风味更具层次感。

基于所有物质的风味分类, 分别将果香、甜香、植物气味、脂香、刺激性气味 5 类物质的 OAV 加和并取对数, 得到各类风味物质的 lgOAV 绘制风味轮廓图, 如图 4 所示。由图可见, SP 在果香、甜香、刺激性气味及植物气味方面表现突出, 而 OC 则以脂香为主要特征。在 SP 中, OAV 较高的 3-甲基丁酸异戊酯、己酸异戊酯、辛酸乙酯和苯甲酸乙酯等酯类化合物, 在 SPC 中的 OAV 值同样较高, 表明这些物质在 SPC 中对风味贡献显著。SP 的加入赋予 SPC 沙棘特有的浓郁水果风味, 并增强了甜香、花香和草木香, 使其整体风味更为丰富且令人愉悦。

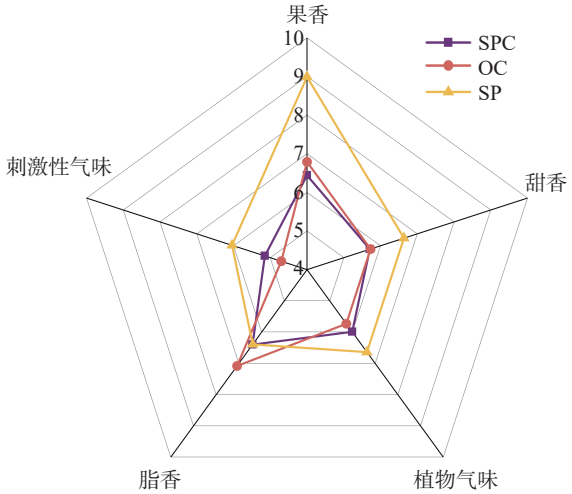


图 4 SP、OC 及 SPC 风味轮廓图

Fig.4 Aroma profiles of SP, OC and SPC

2.3.2 特征风味聚类热图分析 聚类热图分析旨在探讨 SP、OC 和 SPC 之间的风味差异及其关键贡献

成分，该方法有助于识别样品间相似的风味特征，并进一步确认 SPC 的特征风味[25]。如图 5 所示，横轴代表三种样品，纵轴表示不同类别的风味成分。

聚类热图分析结果表明，OC 与 SPC 的风味特征较为相近。SP 的风味成分占比最高，约占所有风味物质的三分之二，主要包括苯甲酸异戊酯和肉豆蔻酸乙酯等酯类化合物，以及苯甲醇、苯乙醇、正己醇等醇类物质，使 SP 具有明显的花香和水果香气。OC 的风味成分主要由癸醛、月桂醛等醛类物质以及 2-庚酮、2-十五烷酮等酮类化合物组成，赋予其较为突出的脂肪风味。相比之下，SPC 的风味构成较为复杂，主要包含 2-戊基呋喃、己酸、1-戊醇等化合物，呈现出甜香、水果香及脂肪风味的综合感官特征。

2.3.3　特征风味 OPLS-DA 及变量投影重要性(Variable importance in projection, VIP)值分析　目前有很多研究通过 OPLS-DA 分析并参考 VIP 值探究特征香气[26−27]。本研究依据 SPC、SP 和 OC 的风味物质 OAV，建立 OPLS-DA 模型。为考察该模型建模效果，利用置换检验分析进行 200 次交叉验证(见图 6a)，R^2X=0.998，R^2Y=0.997，模型预测指数 Q^2=0.994，超过 0.5 表示模型拟合较好，且 R^2 和 Q^2 间距合理，没有过拟合现象，代表模型十分可靠，可用来进一步分析三种样品间的差异性。图 6b 为 OPLS-DA 分析，PCA1 贡献率为 75.9%，PCA2 贡献率为 23.9%，主成分贡献率之和大于 80%，表明模型具有较好的解释力和适用性，三种样品被明显区分，其挥发性风味组分具有显著差异。

图 6c 为样品中风味物质对样品分类的贡献，红色区域是 SP 样品及其贡献较多的风味物质，主要包括 A69(2, 4-壬二烯-1-醛)、A68(己醛)等醛类物质和 A12(1-辛醇)、A9(苯甲醇)等醇类物质，上述物质主要呈现水果味、花香和甜香，为 SPC 提供了沙棘特殊的果香和植物气味；黄色区域是 OC 及其贡献较大的风味物质，主要包括 A52(月桂酸)、A11(反式-2-辛烯醇)、A71(壬醛)等物质，上述物质主要为坚果味、脂肪气味等丰富的脂香，为 SPC 贡献黄油的脂香和烘烤气味；蓝色区域与 SPC 显著相关的风味物质较少，仅有 A26(乙酸壬酯)、A56(丁酸)、A57(异戊酸)，呈现的风味比较多样，综合了 OC 和 SP 提供的不同风味成分，与上述风味轮廓图与聚类热图分析结果相符。

通过 OPLS-DA 模型分析，每种风味物质均获得一个 VIP 值，该值反映了其在区分样品间风味差异中的贡献程度。通常，VIP 值大于 1 的物质被视为重要的贡献因子，是三组样品间主要的差异风味物质。如图 6d 所示，共有 28 种风味物质的 VIP 值超过 1，

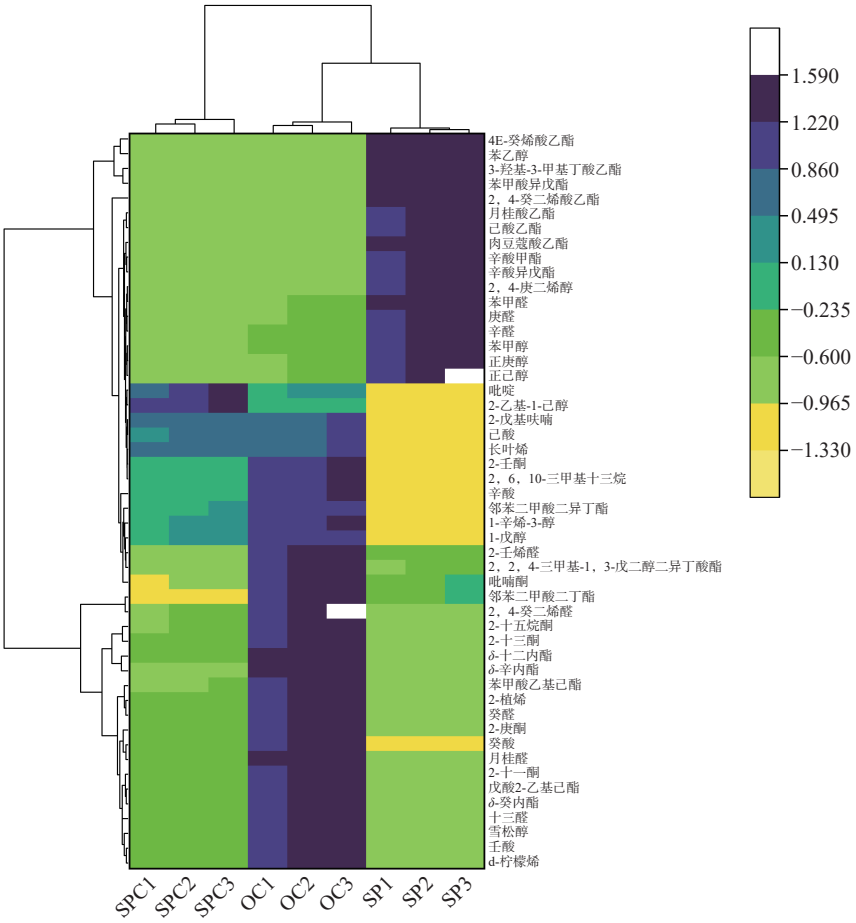


图 5　SP、OC 及 SPC 风味聚类热图

Fig.5　Heat maps of SP, OC and SPC aroma clusters

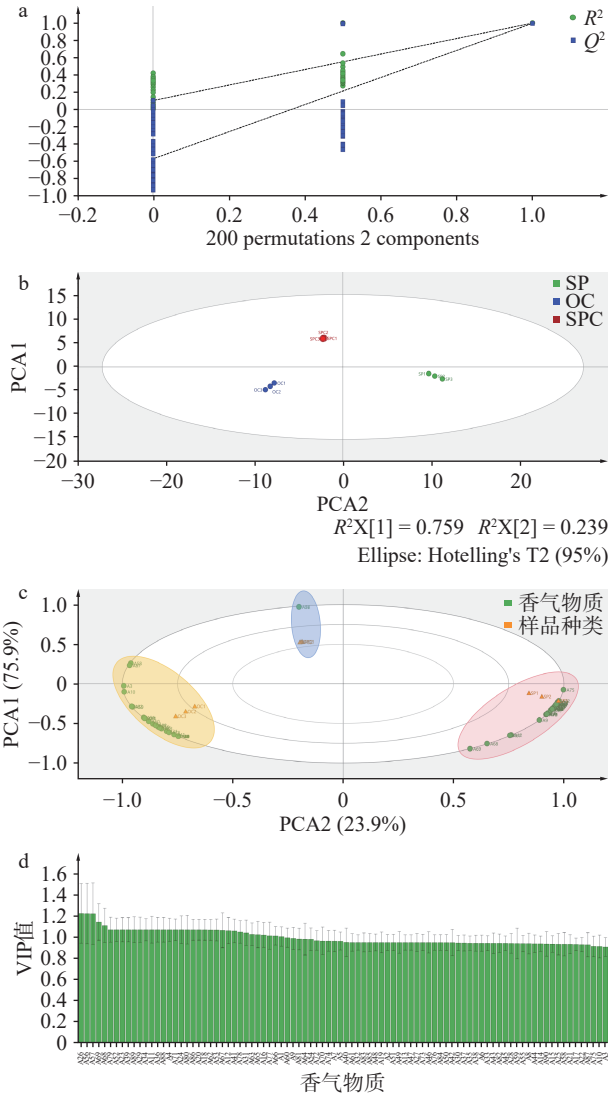


图 6 OPLS-DA 及 VIP 值分析图

Fig.6 Analysis of OPLS-DA and VIP values

其中大多数源自 OC 样品。其中，OC 与 SPC 共有的物质主要呈现出脂肪气味、油性气味等脂香特征风味物质，表明 SPC 中上述风味主要由 OC 贡献。综合筛选 VIP 值大于 1 且 OAV 超过 1000 的物质，包括乙酸壬酯、异戊酸、己醛、1-辛醇、δ-辛内酯、2-十五烷酮、δ-十二内酯、2,4-癸二烯醛、δ-癸内酯和 2-十一酮。这些物质对样品间风味差异的贡献尤为显著。

2.4 SPC 风味物质交互作用分析

风味物质之间的相互作用对食品风味的形成具有重要影响[9]。这些相互作用通常被归类为协同作用、加成作用和掩盖作用，协同作用指两种或多种物质相互作用时，其综合风味效果超过各自单独作用的总和；加成作用则是多种物质的风味效果相加；掩盖作用则是某些物质的风味掩盖了其他物质的风味[28−29]。在本研究中，采用 OAV 法来评估 SPC 中风味物质的相互作用，通过比较理论 OAV 与实际 OAV 的比值，判断风味物质间的交互作用类型[30−31]。选择 SPC 与 SP 共有物质中 lgOAV 较高的四种特征风味物质实际 OAV 与理论 OAV 对比如图 7 所示。

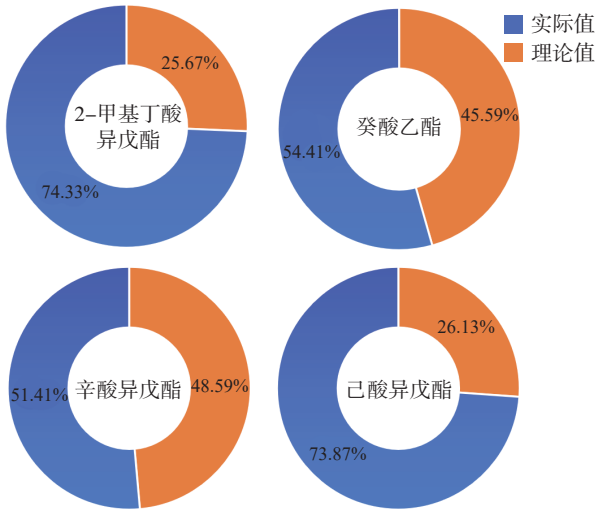


图 7 风味物质实际 OAV 与理论 OAV 对比图

Fig.7 Comparison of actual and theoretical OAV values of aromatic substances

分析结果显示，SP 和 SPC 共有的特征风味物质中，辛酸异戊酯和癸酸乙酯主要呈现水果味，其实际 OAV 略高于理论值，表现为加成作用；而己酸异戊酯和 2-甲基丁酸异戊酯则展现出更丰富的香甜水果味，实际 OAV 远高于理论值，表现为协同作用。这表明，风味更丰富的物质对 SPC 的风味贡献更为显著。在 SPC 的制备和烘烤过程中，SP 中具有甜香和水果香的物质得以保留，其实际 OAV 高于理论值，表现出更浓郁的风味。有研究指出，结构相似或风味相似的物质间可能产生更强的相互作用[32]。因此，进一步研究多种结构相似的物质在交互作用下对 SPC 风味的贡献具有重要意义。多种风味物质的理论 OAV 是通过 SP 和 OC 作为原料在 SPC 中所占比例，折算得到各风味物质 OAV 之和；实际 OAV 是 SPC 中各风味物质 OAV 之和。两者比值为 X，若该比值大于 1，则表明存在掩盖作用；若等于 1，则无作用；若介于 0.5 和 1 之间，则为加成作用；若小于 0.5，则为协同作用。SP 和 SPC 中结构相似的物质间交互作用如表 6 所示。

SP 和 SPC 中结构相似的物质间的交互作用也

表 6 SP 与 SPC 共同风味物质交互作用

Table 6 Interactions between SP and SPC co-flavouring compounds

组号	风味物质	风味描述	理论OAV(×10⁴)	实际OAV(×10⁴)	X	交互作用
1	2-甲基丁酸异戊酯&3-甲基丁酸异戊酯&辛酸乙酯	甜的、令人愉快的水果花香	30.059	102.826	0.292	协同
2	异戊酸异丁酯&辛酸甲酯	苹果、橙子和覆盆子的气味	0.038	0.0115	3.297	掩盖
3	1-壬醇&2-壬醇	果绿气味和玫瑰橙子气味	0.033	0.0539	0.612	加成

表 7　OC 与 SPC 共同风味物质交互作用

Table 7　Interactions between OC and SPC co-flavouring compounds

组号	风味物质	风味描述	理论OAV(×10⁴)	实际OAV(×10⁴)	X	交互作用
1	己酸丁酯&辛酸乙酯&乙酸辛酯	令人愉快的水果香、花香	9.185	73.820	0.124	协同
2	γ-十二内酯&δ-十二内酯	脂肪味	299.998	1.385	216.605	掩盖
3	2-庚酮&庚醛	水果味&刺鼻气味	2.001	0.595	3.363	掩盖
4	丁酸丁酯&己酸乙酯&乙酸己酯	热带水果的味道	28.671	83.410	0.344	协同
5	2-壬酮&壬醛	芸香气味&脂肪气味	64.336	1.143	56.287	掩盖

表现出复杂性。其中，2-甲基丁酸异戊酯、3-甲基丁酸异戊酯和辛酸乙酯在 SPC 中呈现出更显著的甜香和愉悦的水果花香，表现为协同作用；而 1-壬醇和 2-壬醇的实际 OAV 值高于理论值，在玫瑰味和橙子味上表现为加成作用，说明结构相似的物质间大多表现为加成或协同作用[33]。然而，异戊酸异丁酯和辛酸甲酯虽然都表现出水果风味，但两者相互掩盖，反而减少了果香的形成，这可能是由于两者结构间的差异，使得风味间未表现为协同或加成作用[31]。

表 7 所示为 OC 与 SPC 共同风味物质交互作用。OC 与 SPC 中共有的特征风味物质交互作用同样十分显著，不同的是，部分结构相似的物质，在风味表现上具有较大差异。第 1 组己酸丁酯、辛酸乙酯和乙酸辛酯三种风味物质结构相似度高，且均表现为令人愉悦的水果味和花香；第 4 组丁酸丁酯、己酸乙酯和乙酸己酯则呈现出香蕉和菠萝等热带水果味道，第 1 组和第 4 组中风味物质实际 OAV 远高于理论值，在烘烤制备 SPC 后，表现为更加浓郁的水果和花香等风味。第 2 组 γ-十二内酯和 δ-十二内酯是 SPC 中脂香的特征风味物质，其 X 值远大于 1，表现为显著的掩盖作用，削弱了 OC 中的油脂气味在 SPC 中的体现，这与之前的研究结果相符[34]。

与表 6 中结果相比，部分结构相似的物质，在风味表现上具有较大差异。第 3 组中 2-庚酮表现为水果风味，而庚醛完全呈现油腻的、刺鼻的气味；第 5 组中，2-壬酮呈现芸香气味，而壬醛则表现为强烈的脂肪气味，上述两组物质由于官能团不同，在风味中表现为掩盖作用，很大程度上减弱刺激性气味在 SPC 中的体现[33]。

综上所述，SPC 最终的风味并非由单一物质或一类物质决定，而是多种结构相似的物质在相互作用下共同作用的结果。深入研究这些相互作用机制，对于优化食品风味和品质具有重要意义。

3　结论

依据对沙棘全果粉曲奇的感官评价，通过正交试验优化配方。利用 HS-SPME-GC-MS 对沙棘全果粉、原味曲奇和沙棘全果粉曲奇进行风味物质对比分析，探究沙棘全果粉曲奇的特征风味及其交互作用。配方实验中，以感官评价为依据进行正交试验，得到沙棘全果粉曲奇的最优配方为：200 g 低筋面粉、12 g 沙棘果粉、120 g 黄油、40 g 糖粉和 40 g 牛奶，该配方下的沙棘全果粉曲奇为橙黄色，外形完整组织紧密，口感酥松细腻，味道酸甜适宜且具有沙棘特殊风味，添加沙棘全果粉对曲奇的色泽、风味、口感有很大改善。挥发性物质分析中，沙棘全果粉曲奇与沙棘全果粉检测到共有物质主要为酯类物质，与原味曲奇检测到共有物质主要为酸类、酮类等物质，沙棘全果粉饼干中的挥发性成分以酯类物质为主。特征风味分析中，沙棘全果粉曲奇特征风味物质有乙酸壬酯、异戊酸、己醛、1-辛醇、δ-辛内酯等，其中果香、甜香和植物气味主要由沙棘全果粉贡献，脂香物质由原味曲奇贡献。沙棘全果粉曲奇丰富的风味是多组结构相似的风味物质交互作用的结果。

本研究依据感官评价优选沙棘全果粉曲奇配方，制得感官评价良好的沙棘产品，成功解决了沙棘虽含有丰富的营养物质，但由于其酸涩的口感难以被消费者所接受的问题。进一步探究其风味特征和关键风味物质，在沙棘全果粉曲奇的品质研究及产品控制方面具有独特的应用价值。

© The Author(s) 2026. 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 Zhaolin, YUAN Weiqiong, ZHANG Bolin, 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] 胡建忠，温秀凤，王东健. 新疆开展沙棘资源建设与开发利用工作的调研与建议[J]. 中国水土保持，2021(9)：16−18. [HU Jianzhong, WEN Xiufeng, WANG Dongjian. Investigation and suggestions on the construction, development and utilization of seabuckthorn resources in Xinjiang[J]. Soil and Water Conservation in China, 2021(9): 16−18.]

[3] WANG Kewen, XU Zhenzhen, LIAO Xiaojun. Bioactive compounds, health benefits and functional food products of sea buckthorn: A review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 62(24): 6761−6782.

[4] MENG Dehao, LI Yonghui, ZHENG Yaqi, et al. A rapid GC-MS method for the simultaneous determination of serotonin and resveratrol using characteristic ions: Investigating the distributions of target compounds in different organs of sea buckthorn[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2023, 17(3): 2537−2546.

[5] JIANG Haitao, ZHANG Wanli, LI Xiangxin, et al. The anti-obesogenic effects of dietary berry fruits: A review[J]. Food Research International, 2021, 147: 110539.

[6] GANI A, JAN R, AHMAD A B, et al. Encapsulation of saffron and sea buckthorn bioactives: Its utilization for development of

low glycemic baked product for growing diabetic population of the world[J]. LWT, 2021, 142: 111035.
[7] CAI Jiashen, ZHU Yunyang, MA Runhui, et al. Effects of roasting level on physicochemical, sensory, and volatile profiles of soybeans using electronic nose and HS-SPME-GC-MS[J]. Food Chemistry, 2021, 340: 127880.
[8] TKACZ K, WOJDYŁO A, TURKIEWICZ I P, et al. Anti-diabetic, anti-cholinesterase, and antioxidant potential, chemical composition and sensory evaluation of novel sea buckthorn-based smoothies[J]. Food Chemistry, 2021, 338: 128105.
[9] 杨秉坤, 剧柠, 丁雨红, 等. 沙棘酸奶挥发性风味物质的 GC-IMS 表征[J]. 食品工业科技, 2023, 44(13): 308−315. [YANG Bingkun, JU Ning, DING Yuhong, et al. Characterization of volatile flavors of fermented sea-buckthorn yoghurt using gas chromatography-ion mobility spectroscopy[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(13): 308−315.]
[10] 周琦. 甜橙和宽皮橘汁中关键香气比较、重组及交互作用研究[D]. 重庆: 西南大学, 2021. [ZHOU Q. Study on the comparison, recombination and interaction of key aromas in sweet orange juice and mandarin juice[D]. Chongqing: Southwest University, 2021.]
[11] 许粟, 史大娟, 刘宇泽, 等. 响应面法优化刺梨曲奇饼干配方[J]. 食品工业科技, 2023, 44(14): 200−208. [XU Su, SHI Dajuan, LIU Yuze, et al. Optimization of formulation of the Roxburgh rose cookies by response surface analysis[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(14): 200−208.]
[12] 李林竹. 焙烤香榧果仁的香气成分研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019. [LI L Z. The research on the aroma components of baked *Torreya* nuts[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.]
[13] BURDOCK A G. Fenaroli's handbook of flavor ingredients: Volume 2[M]. CRC Press: 2019-07-17.
[14] 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.
[15] SOCACI S A, SOCACIU C, TOFANĂ M, et al. In-tube extraction and GC-MS analysis of volatile components from wild and cultivated sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L. ssp. *carpatica*) berry varieties and juice[J]. Phytochemical Analysis, 2013, 24(4): 319−328.
[16] LEUNG G S, MARRIOTT R. Year to year variation in sea buckthorn juice volatiles using headspace solid phase microextraction[J]. Flavour and Fragrance Journal, 2016, 31(2): 124−136.
[17] MA X Y, YANG W, MARSOL-VALL A, et al. Analysis of flavour compounds and prediction of sensory properties in sea buckthorn (*Hippophaë rhamnoides* L.) berries[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2020, 55(4): 1705−1715.
[18] 葛晓佳, 唐楠煜, 杨瑞, 等. 沙棘添加对乳酸菌发酵牛乳风味和消费者接受度的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(3): 97−105. [GE Xiaojia, TANG Nanyu, YANG Rui, et al. Study on the effect of sea buckthorn on the flavor and consumer acceptance of *Lactobacillus* fermented milk[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(3): 97−105.]
[19] MENG Dehao, ZHAO Dongbo, ZHAO Zhichao, et al. Revealing key aroma compounds and the potential metabolic pathways in sea buckthorn berries[J]. Food Chemistry, 2025, 476: 143430.
[20] 敖璇. 热杀菌方式对沙棘原浆风味物质的影响研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2022. [AO Xuan. Effects of thermal sterilization on flavor compounds of sea buckthorn pulp[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2022.]
[21] LIN Xue, WANG Qingke, HU Xiaoping, et al. Evaluation of different *Saccharomyces cerevisiae* strains on the profile of volatile compounds in pineapple wine[J]. Journal of Food Science and Technology, 2018, 55(10): 4119−4130.
[22] TIITINEN K M, HAKALA M A, KALLIO H P. Quality components of sea buckthorn (*Hippophaë rhamnoides*) varieties[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2005, 53(5): 1692−1699.
[23] 曾奥, 许炳烨, 王雪, 等. 新疆大果沙棘原浆、籽油和果油气味特征及产品间相关性[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(2): 132−142. [ZENG Ao, XU Bingye, WANG Xue, et al. Odor characteristics and inter-product correlation of Xinjiang large berry sea buckthorn pulp, seed oil and fruit oil[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(2): 132−142.]
[24] HAN Z P, ZHANG W H, ZHOU W, et al. Alternation of aroma and flavor profiles in biscuits by an enzymatic approach[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 186(4): 012064.
[25] 潘婉舒, 胡先强, 张正义, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 和 PLS-DA 分析不同季节早白尖红茶挥发性风味物质[J]. 食品工业科技, 2023, 44(1): 277−283. [PAN Wanshu, HU Xianqiang, ZHANG Zhengyi, et al. Identification of volatile flavor compounds of Zaobaijian black tea harvested in different seasons based on HS-SPME-GC-MS and PLS-DA[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(1): 277−283.]
[26] JIANG Kexin, XU Kunli, WANG Jiao, et al. Based on HS-SPME-GC-MS combined with GC-O-MS to analyze the changes of aroma compounds in the aging process of Citri Reticulatae Pericarpium[J]. Food Bioscience, 2023, 54: 102798.
[27] 董闯, 续辉, 祝亚辉, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 和 OAV 分析西藏不同地区牦牛乳拉拉关键呈香物质[J]. 食品工业科技, 2025, 46(10): 281−290. [DONG Chuang, XU Hui, ZHU Yahui, et al. Analysis of key aroma presenting substances in yak milk Lala from different regions of Tibet based on HS-SPME-GC-MS and OAV[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(10): 281−290.]
[28] FERREIRA V, DE-LA-FUENTE-BLANCO A, SÁENZ-NAVAJAS M P. A new classification of perceptual interactions between odorants to interpret complex aroma systems. application to model wine aroma[J]. Foods, 2021, 10(7): 1627.
[29] 牛云蔚, 马一玮, 肖作兵, 等. 红茶特征香气成分的鉴定及感知交互作用[J]. 食品科学, 2023, 44(6): 292−300. [NIU Yunwei, MA Yiwei, XIAO Zuobing, et al. Identification and perceptual interaction of characteristic aroma compounds in black tea[J]. Food Science, 2023, 44(6): 292−300.]
[30] 吴奇霄, 赵兴蓉, 余松柏, 等. 白酒中吡嗪类化合物分析及与酯的感知交互作用[J]. 现代食品科技, 2024, 40(11): 345−357. [WU Qixiao, ZHAO Xingrong, YU Songbai, et al. Analysis of pyrazines in Baijiu and their perceptual interactions with esters[J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(11): 345−357.]
[31] JIN Lei, LIAN Xueyan, CHEN Li, et al. Characteristic aroma analysis and interaction study of key aroma compounds of Chuanhong congou black tea[J]. European Food Research and Technology, 2024, 250(2): 441−454.
[32] 牛云蔚, 朱全, 肖作兵. 茅台酒香气组成及关键香气成分间的协同作用[J]. 中国食品学报, 2021, 21(10): 215−226. [NIU Yunwei, ZHU Quan, XIAO Zuobing. The aroma composition and synergistic effect among key aroma compounds in Moutai Baijiu[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(10): 215−226.]
[33] 李文艳. 葡萄酒萜烯类物质呈香的感知互作及气味强度预测模型构建[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2023. [LI W Y. Perceptual interactions of aroma presentation and construction of odor intensity prediction model of wine terpenoids[D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2023.]
[34] 刘政. 内酯类物质对切达奶酪的风味贡献及其交互作用研究[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2021. [LIU Z. Study on the flavor contribution and perceptual interaction of lactones in cheddar cheese[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2021.]