

基于HS-SPME-GC-MS和OAV分析苦水玫瑰添加后曲奇饼干香气成分的变化

牛启月¹, 刘洋¹, 祝秀梅², 胡朝栋³, 颜子曦¹, 吕兆林^{1*}

(1. 北京林业大学生物科学与技术学院, 北京 100083) (2. 甘肃省农产品质量安全检验检测中心, 甘肃兰州 730060)
(3. 兰州市农业科学研究院, 甘肃兰州 730060)

摘要: 为探究苦水玫瑰的添加对曲奇饼干香气的影响, 该研究将苦水玫瑰添加到曲奇饼干中, 并基于顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用法(HS-SPME-GC-MS)对苦水玫瑰花粉、苦水玫瑰曲奇饼干、原味曲奇饼干三者的挥发性成分进行鉴定, 利用特征香气成分的气味活度值(OAV)、正交偏最小二乘判别分析(OPLS-DA)以及变量投影重要性(VIP)等方法分析三者之间的成分异同, 并探讨了特征香气成分之间的交互作用。结果表明: 苦水玫瑰花粉、苦水玫瑰曲奇饼干、原味曲奇饼干分别鉴定出41、51、48种挥发性成分。基于OPLS-DA模型筛选出6种组间差异特征香气成分: 苯乙醛、2-庚酮、2-壬酮、2-十五酮、己酸乙酯、 δ -十二内酯。苦水玫瑰花粉的添加使曲奇饼干特征香气成分的含量发生了改变, 香叶醇和香茅醇等花香、甜香成分含量增加; γ -十二内酯和 δ -十二内酯等油脂味成分含量减少。综上所述, 苦水玫瑰花粉的添加增强了曲奇饼干的花香和甜香, 同时减弱了奶油味和油脂味。该研究为苦水玫瑰的精、深加工利用提供了新思路。

关键词: 苦水玫瑰; 曲奇饼干; 顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用法; 气味活度值; 正交偏最小二乘判别分析; 交互作用

文章编号: 1673-9078(2026)3-312-322

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.3.1844

Aroma Compound Changes in Cookies after Kushui Rose (*Rosa setata* × *R. rugosa*) Addition Based on HS-SPME-GC-MS and OAV Analyses

NIU Qiye¹, LIU Yang¹, ZHU Xiumei², HU Chaodong³, YAN Zixi¹, LYU Zhaolin¹

(1. College of Biological Sciences and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)
(2. Gansu Provincial Agricultural Products Quality and Safety Inspection and Testing Center, Lanzhou 730060, China)
(3. Lanzhou Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730060, China)

Abstract: To investigate how Kushui rose affects cookie aroma, Kushui rose was added to cookies, and the volatile compounds of Kushui rose powder, Kushui rose cookies, and plain cookies identified using headspace solid-phase microextraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry. The similarities and differences of volatile compounds among the three samples, as well as the interactions among characteristic aroma compounds, were examined using odor activity values of the characteristic aroma compounds, orthogonal partial least-squares discriminant analysis (OPLS-DA), and Variable Importance in

引文格式:

牛启月, 刘洋, 祝秀梅, 等. 基于HS-SPME-GC-MS和OAV分析苦水玫瑰添加后曲奇饼干香气成分的变化[J]. 现代食品科技, 2026, 42(3): 312-322.

NIU Qiye, LIU Yang, ZHU Xiumei, et al. Aroma compound changes in cookies after kushui rose (*Rosa setata* × *R. rugosa*) addition based on HS-SPME-GC-MS and OAV analyses [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(3): 312-322.

收稿日期: 2024-12-11; 修回日期: 2025-03-10; 接受日期: 2025-03-11

基金项目: 甘肃省特色优势农产品质量评价 (TYNPZ2022-06)

作者简介: 牛启月 (2001-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 天然活性物质开发利用, E-mail: niuqiye2023@163.com

通讯作者: 吕兆林 (1971-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 天然活性物质开发利用, E-mail: zhaolinlv@bjfu.edu.cn

Projection analysis. The results showed that 41, 51, and 48 volatile compounds were identified in the Kushui rose powder, Kushui rose cookies, and plain cookies, respectively. Based on the OPLS-DA model, six aroma compounds showing significant differences among the groups were screened, including phenylacetaldehyde, 2-heptanone, 2-nonanone, 2-pentadecanone, ethyl hexanoate, and δ -dodecalactone. The addition of Kushui rose powder changed the characteristic aroma compound content of the cookies: the content of floral and sweet aroma compounds, such as geraniol and citronellol, increased, whereas the content of lipid-derived aroma compounds, such as γ -dodecalactone and δ -dodecalactone, decreased. In summary, the addition of Kushui rose powder enhanced the floral and sweet aroma of cookies while attenuating creamy and fatty aromas. This study provides new insights into the value-added and deep processing utilization of Kushui rose.

Key words: Kushui rose; cookies; headspace solid-phase microextraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry; odor activity value; orthogonal partial least-squares discriminant analysis; interaction

苦水玫瑰 (*Rosa setate* $\times$ *R. rugosa*), 我国四大玫瑰品系之一, 是我国传统玫瑰和钝齿蔷薇杂交的一种可食用花卉^[1-13], 它也被认定为中国的国家地理标志产品^[4]。因苦水玫瑰生长在水质、海拔、气候独特的甘肃省兰州市永登县苦水镇, 而逐渐形成了独有的香气、色泽^[5]。苦水玫瑰被认定为药食同源的加工原料, 富含维生素、多酚、花色素、类胡萝卜素等物质, 且含有丰富的萜烯、醛、酮、酯和醇等香气物质^[6], 具有一定的抗氧化、抗炎、抗衰老、抗肥胖、抗肿瘤、抗糖尿病、保护肝脏等作用, 有益于人体健康^[7]。

曲奇饼干, 作为一种标志性的饼干品种^[8], 因其酥脆的口感和丰富的口味层次, 便捷的食用方式^[9], 赢得了消费者的广泛喜爱^[10]。曲奇饼干在高温短时烘烤过程中会发生一系列的化学反应, 产生令人愉悦的气味。现如今, 越来越多的消费者更倾向于选择色泽、香气、营养俱佳的功能性食品^[11], 将富含丰富营养成分及具有独特香气的苦水玫瑰花瓣加入曲奇饼干中, 可能会对曲奇饼干的芳香性产生显著影响。

本研究将苦水玫瑰花瓣粉碎后加入到曲奇饼干中, 利用 HS-SPME-GC-MS 技术手段及 OAV、OPLS-DA、VIP 值等分析方法对苦水玫瑰花粉、苦水玫瑰曲奇饼干、原味曲奇饼干的挥发性成分进行鉴定, 分析三者的特征香气成分, 探究苦水玫瑰添加对曲奇饼干香气的交互影响作用, 旨在为研发一款风味好、营养价值高、满足消费者需求、市场前景好的苦水玫瑰曲奇饼干提供数据支撑, 为苦水玫瑰的资源开发和利用提供新思路。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

甘肃省兰州市永登县苦水镇苦水玫瑰, 将玫瑰花瓣自然晾干后粉碎成粉末, 过 100 目孔径的筛子后在避光干燥处保存, 备用; 面粉、黄油、糖粉、牛奶等饼干原材料均来自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。

1.2 仪器与设备

57357-U 固相微萃取操作平台、57357-U 型 SPME 手动进样手柄、SAAB-57328-U 型 50/30 μ m DVB/CAR on PDMS 固相萃取头, 美国 Supelco 公司; GCMS-QP2010Ultra GC-MS 联用仪, 日本岛津公司; Rtx-5MS 色谱柱 (0.25 mm $\times$ 30 m $\times$ 0.25 μ m), 美国 Agilent 公司。

1.3 实验方法

1.3.1 苦水玫瑰曲奇饼干和原味曲奇饼干的制备

向软化好的黄油中加入糖粉, 用打蛋器搅拌均匀; 将牛奶分三批加入, 并在加入的过程中不断搅拌, 直至其质地变得蓬松、发白, 并呈现羽毛状; 加入过筛后的面粉和苦水玫瑰花粉 (原味曲奇饼干不添加花粉), 用硅胶刮刀将其拌匀成粘面团状态; 面团静置后分成大小均匀的小面团, 搓圆、压平至 1 cm 厚; 放入烤箱中, 上火 190 $^{\circ}$ C, 下火 100 $^{\circ}$ C, 烘烤 15 min; 待饼干冷却至室温后每块独立封装, 低温保存待用^[12,13]。

1.3.2 苦水玫瑰花粉和曲奇饼干挥发性成分萃取

参考 Ao 等^[14]、李林竹^[15]的萃取方法。分别准确称取苦水玫瑰花粉、研磨后的苦水玫瑰曲奇饼干、原味饼干 2 g, 放入 15 mL 固相微萃取专用样品瓶中, 待分析用。

样品瓶在 60 $^{\circ}$ C 下平衡 10 min 后, 将活化好的固相萃取头插入样品瓶的顶空部分, 在此条件下吸附 30 min, 然后将萃取头取出, 立即插入气质联用仪进样口, 在 250 $^{\circ}$ C 条件下解吸 5 min。

1.3.3 苦水玫瑰花粉和曲奇饼干挥发性成分测定

GC 条件: Rtx-5MS 色谱柱 (0.25 mm $\times$ 30 m $\times$ 0.25 μ m); 在升温过程中, 首先以 50 $^{\circ}$ C 的温度维持 5 min, 然后以 5 $^{\circ}$ C $\cdot$ min⁻¹ 的温度升至 120 $^{\circ}$ C 并维持 5 min, 接着以 8 $^{\circ}$ C $\cdot$ min⁻¹ 的温度升至 230 $^{\circ}$ C 并维持

5 min; 载气为氦气, 流量 $1 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$; 分流进样, 分流比例为 5:1; 样品入口的温度为 230°C 。

MS 条件: 电离方式 EI, 离子能量 70 eV, 离子源温度 230°C , 扫描范围 $33\sim 500 \text{ m/z}$ 。

1.3.4 定性及定量分析

定性分析: 采用 GCMS Postrun Analysis 软件进行分析, 并通过 NIST14 和 NIST14s 谱库来查找谱图中的物质, 匹配度超过 90% 的予以保留; 再结合正构烷烃 (C10~C25) 的保留时间计算挥发性成分的保留指数来进行定性分析。

定量分析: 对定性得到的挥发性成分所对应的色谱峰进行积分, 利用已知浓度的外标物计算出挥发性成分的含量, 结果以 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 计。

呈香物质分析: 通过对挥发性成分气味活度值 (Odor Activity Value, OAV) 进行计算来评定苦水玫瑰花粉和曲奇饼干的特征香气成分。OAV 等于挥发性成分的浓度 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 与该成分在水中阈值 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的比值; 当 $\text{OAV} > 1$ 时, 表明该成分对香气产生了显著的影响^[16]。

1.4 数据处理

对全部实验数据进行了三次重复测定, 其结果均以平均值 $\pm$ 标准差的形式表示。使用 Origin 2022 绘制雷达图、柱状图、饼状图; 使用 SIMCA 14.1 进行 OPLS-DA 和 VIP 值分析。

2 结果与分析

2.1 苦水玫瑰花粉和曲奇饼干挥发性成分分析

对苦水玫瑰花粉、苦水玫瑰曲奇饼干、原味曲奇饼干的挥发性成分进行 HS-SPME-GC-MS 分析, 结果如图 1 所示。其挥发性成分的含量及各种类别的个数如表 1 和图 2 所示。根据表 1 可知, 苦水玫瑰花粉中共鉴定出 41 种挥发性成分, 总含量为 $80.79 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其中香茅醇的含量最高, 为 $19.68 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 苦水玫瑰曲奇饼干中共鉴定出 51 种挥发性成分, 总含量为 $27.86 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 含量最多挥发性成分也为香茅醇, 为 $2.56 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 原味曲奇饼干中共有 48 种挥发性成分被鉴定出, 总含量为 $30.52 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 己酸丁酯是挥发性成分中含量最高的, 为 $3.68 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。苦水玫瑰花粉、苦水玫瑰曲奇饼干、原味曲奇饼干三者共有的挥发性成分有苯甲醇、壬醛、癸醛、香叶基丙酮、2-十三酮、2-十五酮、D-柠檬烯、十四烷、十六烷, 共 9 种物质。

由图 2 可知, 挥发性成分主要以醇类、醛类、酮类、酯类和烷烃类为主。苦水玫瑰花粉的挥发性成分中有醇类 10 种、醛类 8 种、酮类 4 种、酯类 10 种、烷烃

类 7 种; 苦水玫瑰曲奇饼干的挥发性成分中有醇类 9 种、醛类 10 种、酮类 7 种、酯类 6 种、烷烃类 6 种; 原味曲奇饼干的挥发性成分中有醇类 6 种、醛类 8 种、酮类 5 种、酯类 12 种、烷烃类 6 种。苦水玫瑰花粉的添加使得曲奇饼干挥发性成分的个数和种类产生了一定的变化。一般不饱和或饱和醛类和醇类物质形成的原因是油酸、亚油酸和亚麻酸的氧化分解^[17], 一些芳香族醛类和醇类是由糖类、氨基酸类和酚酸类作为反应物的化学反应产生的^[18]。氨基酸和脂肪酸的代谢会生成酯类物质^[19]。大部分挥发性成分可以通过氨基酸或肽与糖的美拉德反应、脂质氧化和降解、氧化脂质与氨基酸或蛋白质之间的相互作用以及维生素降解这四种途径形成^[20]。颜子曦等^[3]在研究中发现, 苦水玫瑰花粉中氨基酸种类丰富, 检测到 17 种, 不饱和脂肪酸占比达 61.90%。相较于原味曲奇饼干, 苦水玫瑰曲奇饼干中的醇类、醛类和酮类的个数增加了, 这可能是由于苦水玫瑰花粉中的氨基酸与脂肪酸在饼干加工过程中发生了一系列反应, 从而增加了曲奇饼干挥发性成分的种类。

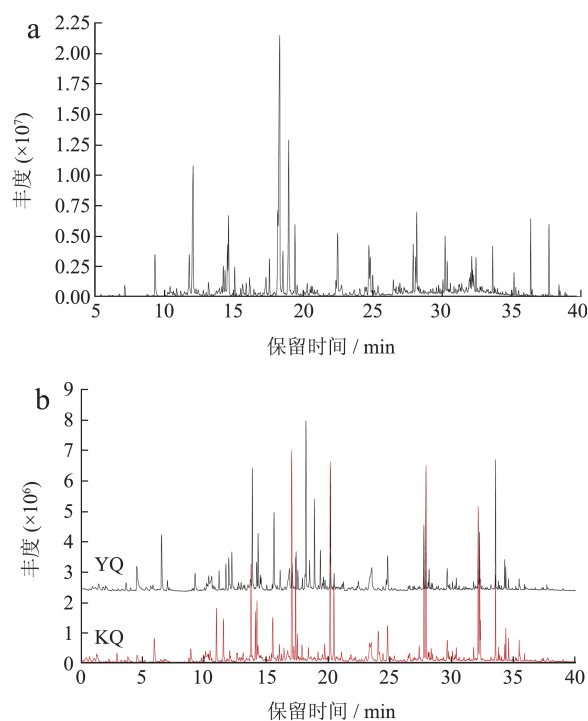


图 1 样品挥发性成分的总离子流色谱图

Fig.1 Total ion current chromatogram of volatile compounds in the sample

注: a 为苦水玫瑰花粉挥发性成分总离子流色谱图; b 为苦水玫瑰曲奇饼干与原味曲奇饼干挥发性成分总离子流色谱图对比。苦水玫瑰花粉 (Kushui rose powder, KH); 苦水玫瑰曲奇饼干 (Kushui rose cookies, KQ); 原味曲奇饼干 (Common cookies, YQ), 下同。

表 1 苦水玫瑰花粉、苦水玫瑰曲奇、原味曲奇挥发性成分分析

Table 1 Analysis of volatile components in Kushui rose powder, Kushui rose cookies and common cookies

编号	物质名称	保留时间/ min	化学物质登录 号 CAS	保留指数		含量/(mg·kg ⁻¹)		
				RI 库参考	实验数据	KH	KQ	YQ
1	1-戊醇	2.26	71-41-0	751	749.01	—	—	0.06 ± 0.03
2	己醇	5.15	111-27-3	860	853.21	—	0.11 ± 0.03	—
3	1-辛烯-3-醇	9.74	3391-86-4	979	975.54	—	0.03 ± 0.01	0.07 ± 0.02
4	苯甲醇	11.80	100-51-6	1 027	1 035.39	8.44 ± 0.18	0.65 ± 0.07	—
5	2-辛烯-1-醇	12.99	18409-17-1	1 069	1 062.68	—	—	0.09 ± 0.06
6	辛醇	13.12	111-87-5	1 072	1 070.11	—	0.08 ± 0.01	0.20 ± 0.09
7	麦芽酚	14.32	118-71-8	1 094	1 101.52	—	—	0.41 ± 0.11
8	苯乙醇	14.61	60-12-8	1 122	1 110.85	3.39 ± 0.22	0.21 ± 0.05	—
9	香茅醇	18.30	106-22-9	1 228	1 228.21	19.68 ± 1.33	2.56 ± 0.16	—
10	香叶醇	18.95	106-24-1	1 255	1 249.3	8.55 ± 0.72	1.36 ± 0.13	—
11	丁香酚	22.44	97-53-0	1 356	1 344.71	—	0.23 ± 0.09	—
12	甲基丁香酚	24.72	93-15-2	1 401	1 397.3	2.95 ± 0.12	0.19 ± 0.07	—
13	月桂醇	27.36	112-53-8	nq	1 404.81	1.08 ± 0.09	—	0.25 ± 0.04
14	2-十三烷醇	28.17	1653-31-2	1 510	1 502.82	3.05 ± 0.04	—	—
15	α-红没药醇	31.98	515-69-5	1 686	1 687.68	0.44 ± 0.02	—	—
16	2-十六醇	32.12	14852-31-4	1 702	1 704.26	0.85 ± 0.06	—	—
17	金合欢醇	32.43	4602-84-0	1 713	1 714.88	1.10 ± 0.17	—	—
18	庚醛	6.45	111-71-7	904	891.64	0.54 ± 0.03	0.19 ± 0.05	—
19	2-庚烯醛	7.32	18829-55-5	940	938.22	—	—	0.07 ± 0.01
20	苯甲醛	8.88	100-52-7	960	955.17	2.30 ± 0.10	0.39 ± 0.10	0.32 ± 0.14
21	苯乙醛	12.03	122-78-1	1 057	1 039.71	—	0.70 ± 0.07	0.17 ± 0.09
22	反式-2-辛烯醛	12.60	2548-87-0	1 058	1 055.58	—	0.16 ± 0.03	0.13 ± 0.08
23	壬醛	14.23	124-19-6	1 104	1 102.85	0.97 ± 0.02	0.88 ± 0.09	0.89 ± 0.20
24	反式-2-壬烯醛	16.05	18829-56-6	1 162	1 158.15	—	0.34 ± 0.03	0.30 ± 0.13
25	癸醛	17.51	112-31-2	1 208	1 204.2	1.24 ± 0.20	0.26 ± 0.06	0.37 ± 0.06
26	β-柠檬醛	18.53	106-26-3	1 240	1 235.76	1.77 ± 0.08	—	—
27	α-柠檬醛	19.40	141-27-5	1 270	1 264.01	2.71 ± 0.07	—	—
28	橙花醛	19.40	141-27-5	1 270	1 263.10	—	0.60 ± 0.05	—
29	月桂醛	25.13	112-54-9	1 404	1 409.07	0.22 ± 0.01	—	—
30	十四烷醛	30.59	124-25-4	1 611	1 611.82	—	0.04 ± 0.01	0.03 ± 0.01
31	棕榈醛	34.01	629-80-1	1 826	1 816.16	0.18 ± 0.01	0.04 ± 0.01	—
32	2-庚酮	5.92	110-43-0	886	873.38	—	1.22 ± 0.11	—
33	3,5-辛二烯-2-酮	13.17	30086-02-3	1 068	1 066.51	—	0.13 ± 0.05	—
34	2-壬酮	13.75	821-55-6	1 090	1 088.14	—	1.88 ± 0.21	1.45 ± 0.76
35	2-十一酮	20.17	112-12-9	1 294	1 289.39	—	2.03 ± 0.19	3.40 ± 0.55
36	香叶基丙酮	26.48	3796-70-1	1 455	1 450.34	0.65 ± 0.21	0.05 ± 0.01	0.08 ± 0.02
37	2-十三酮	27.92	593-08-8	1 496	1 494.03	1.94 ± 0.35	1.75 ± 0.11	2.97 ± 0.87
38	2-十五酮	32.14	2345-28-0	1 699	1 696.11	1.13 ± 0.06	0.08 ± 0.03	1.91 ± 0.23
39	法尼基丙酮	35.30	1117-52-8	1 919	1 909.15	0.27 ± 0.01	—	—

续表1

编号	物质名称	保留时间/ min	化学物质登录 号 CAS	保留指数		含量/(mg·kg ⁻¹)			
				RI 库参考	实验数据	KH	KQ	YQ	
酸类	40	辛酸	16.73	124-07-2	1 175	1 182.32	—	0.91 ± 0.04	0.48 ± 0.14
	41	2-乙基丁酸	17.98	88-09-5	nq	1 214.61	—	—	0.22 ± 0.10
	42	壬酸	19.54	112-05-0	1 275	1 268.66	—	0.10 ± 0.01	0.12 ± 0.06
	43	癸酸	23.49	334-48-5	1 380	1 369.78	—	1.52 ± 0.28	0.54 ± 0.04
	44	月桂酸	29.64	143-07-7	1 564	1 567.21	—	0.44 ± 0.09	0.45 ± 0.11
	45	十四烷酸	33.17	544-63-8	nq	1 784.93	—	1.49 ± 0.25	—
酯类	46	己酸乙酯	10.44	123-66-0	994	988.19	—	—	0.16 ± 0.02
	47	乙酸己酯	10.96	142-92-7	1 008	1 009.47	—	0.32 ± 0.07	0.87 ± 0.01
	48	己酸丁酯	17.05	626-82-4	1 188	1 189.05	—	0.44 ± 0.02	3.68 ± 0.63
	49	辛酸乙酯	17.22	106-32-1	1 197	1 193.29	—	—	0.25 ± 0.04
	50	2-甲基-己基丁酸酯	18.40	10032-15-2	1 234	1 231.63	—	—	0.25 ± 0.12
	51	甲酸香茅酯	19.55	105-85-1	nq	1 269.02	0.38 ± 0.05	—	0
	52	δ-辛内酯	19.71	698-76-0	1 288	1 275.17	0	0.15 ± 0.02	0.29 ± 0.07
	53	壬酸乙酯	20.28	123-29-5	1 298	1 292.68	0.41 ± 0.11	—	0
	54	香茅醇乙酸酯	22.35	150-84-5	1 354	1 342.54	0.68 ± 0.09	—	0
	55	己酸己酯	24.05	6378-65-0	1 386	1 382.08	0.28 ± 0.02	—	0.73 ± 0.22
	56	辛酸丁酯	24.15	589-75-3	1 387	1 384.04	0	—	0.17 ± 0.03
	57	癸酸乙酯	24.54	110-38-3	1 398	1 392.99	0.47 ± 0.3	—	0
	58	δ-癸内酯	27.76	705-86-2	1 490	1 489.31	0	0	1.92 ± 0.37
	59	月桂酸乙酯	30.21	106-33-2	1 592	1 592.68	2.01 ± 0.19	0	0
	60	γ-十二内酯	31.76	2305-05-7	1 678	1 676.14	0	0.11 ± 0.05	0.18 ± 0.06
	61	δ-十二内酯	32.25	713-95-1	1 710	1 706.87	0	0.12 ± 0.01	1.32 ± 0.21
	62	肉豆蔻酸乙酯	33.64	124-06-1	1 792	1 791.29	1.53 ± 0.12	0	0
	63	δ-十四内酯	35.45	2721-22-4	1 938	1 920.06	0	0.14 ± 0.07	0.26 ± 0.08
	64	棕榈酸乙酯	36.37	628-97-7	1 992	1 991.08	2.23 ± 0.07	—	—
	65	亚油酸乙酯	38.41	544-35-4	2 162	2 155.32	0.35 ± 0.01	—	—
66	亚麻酸乙酯	38.49	1191-41-9	2 169	2161.5	0.18 ± 0.06	—	—	
烯炔类	67	D-柠檬烯	11.52	5989-27-5	nq	1 027.24	1.99 ± 0.32	0.45 ± 0.12	0.77 ± 0.02
	68	金合欢烯	28.16	502-61-4	1 509	1 502.34	—	—	0.12 ± 0.01
	69	新植二烯	34.28	504-96-1	1 842	1836	—	0.30 ± 0.08	—
	70	3,7,11,15-四甲基-2-十六碳烯	34.37	14237-73-1	1 830	1 842.31	—	0.25 ± 0.06	0.38 ± 0.18
	71	3-呋喃甲醇	4.54	4412-91-3	835	837.23	—	0.11 ± 0.02	—
	72	2-正戊基呋喃	10.07	3777-69-3	993	977.26	—	—	0.15 ± 0.07
	73	2-庚基二氢呋喃酮	12.23	104-67-6	nq	1 696.22	—	0.82 ± 0.10	—

续表1								
编号	物质名称	保留时间/ min	化学物质登录 号 CAS	保留指数		含量/(mg·kg ⁻¹)		
				RI 库参考	实验数据	KH	KQ	YQ
74	十一烷	10.50	1120-21-4	1 100	1 098.31	—	0.44 ± 0.11	0.69 ± 0.24
75	5-甲基十一烷	15.93	1632-70-8	nq	1 152.52	—	—	0.07 ± 0.01
76	十二烷	17.36	112-40-3	1 200	1 198.99	—	0.49 ± 0.06	1.43 ± 0.51
77	5-丁基壬烷	19.34	17312-63-9	nq	1 280.25	—	0.06 ± 0.01	—
78	3-甲基-5-丙基壬烷	20.48	31081-18-2	nq	1 299.19	0.18 ± 0.04	—	—
79	4,6-二甲基十二烷	14.24	61141-72-8	1 325	1317	—	0.15 ± 0.03	—
80	十四烷	24.82	629-59-4	1 400	1 399.47	1.90 ± 0.16	0.69 ± 0.09	0.76 ± 0.26
81	2,6,10-三甲基十三烷	26.96	3891-99-4	nq	1 464.74	0.48 ± 0.04	—	—
82	十六烷	28.09	544-76-3	1 600	1 599.34	1.07 ± 0.11	0.14 ± 0.04	0.18 ± 0.07
83	十七烷	28.56	629-78-7	1 700	1699.18	0.67 ± 0.05	—	—
84	十八烷	29.78	593-45-3	1 800	1 798.98	0.19 ± 0.03	—	0.14 ± 0.02
85	二十烷	29.59	112-95-8	2 000	1 998.92	0.19 ± 0.06	—	—
86	1-吡咯烷酮	11.67	1072-83-9	1 063	1 061.51	—	0.19 ± 0.01	—
87	玫瑰醚	13.48	3033-23-6	nq	1 108.42	2.15 ± 0.22	0.23 ± 0.04	—
88	3,5-二羟基-6-甲基-2,3-二氢-4H-吡喃-4-酮	15.52	28564-83-2	1 149	1 142.71	—	1.78 ± 0.15	0.86 ± 0.13
89	3-壬烯-5-炔	17.21	74685-67-9	1 321	1 310.54	—	—	0.04 ± 0.02

注：“nq”表示未查询到；“—”表示未检测到。同下。

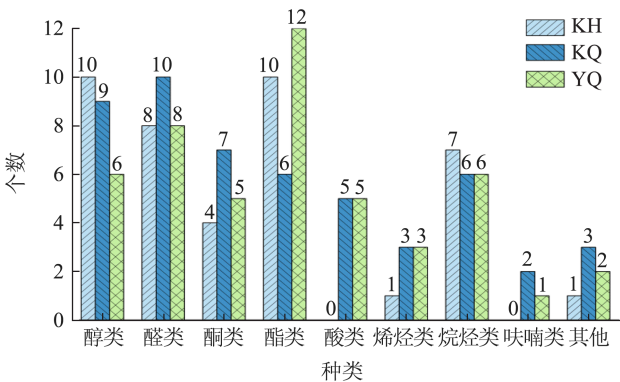


图2 苦水玫瑰花粉、苦水玫瑰曲奇饼干、原味曲奇饼干挥发性成分的种类

Fig.2 Types of volatile components of in Kushui rose powder, Kushui rose cookies and common cookies

2.2 苦水玫瑰花粉和曲奇饼干特征香气成分OAV分析

挥发性成分对苦水玫瑰花粉或曲奇饼干整体香气的最终贡献不仅取决于其浓度，还取决于其 OAV，OAV 可以反映每种物质对整体香气的贡献，因此广泛应用于多种食品中关键香气成分的鉴定^[21]。OAV 是挥发性成分浓度与该物质阈值的比值，通常情况下，OAV 较高的关键香气化合物被认为是影响整体香气的主要贡献者。当 OAV 大于 1 时则认为该挥发

性成分对香气有一定影响，当 OAV 大于 10 则认为该挥发性成分对香气贡献极大^[22]，可以被认为是特征香气成分。本研究通过查阅文献中挥发性成分的阈值，计算出苦水玫瑰花粉、苦水玫瑰曲奇饼干、原味曲奇饼干挥发性成分的 OAV，从而确定出特征香气成分，结果如表 2 所示。结果表明，在苦水玫瑰花粉 41 种挥发性成分中有 17 种可以计算 OAV，OAV 排名前三的物质分别为苯乙醇（玫瑰花香、甜香、面包香）、癸醛（甜香、橙香、花香、脂肪味、带有轻微的青瓜味）、苯甲醇（玫瑰花香），这些物质对苦水玫瑰花特征香气做出了贡献。在苦水玫瑰曲奇饼干 51 种挥发性成分中有 30 种可以计算 OAV，其中苯乙醇、癸醛、2-庚酮（果香、甜香、草本味，椰子味）的 OAV 相对较大。在原味曲奇饼干 48 种挥发性成分中有 31 种可以计算 OAV，其中癸醛、2-十五酮（清新，茉莉花香，芹菜味）、壬醛（花香、脂肪味、橙皮味、蜡质味）的 OAV 相对较大。结合表 1，虽然苦水玫瑰曲奇饼干挥发性成分的含量（27.86 mg·kg⁻¹）低于原味曲奇饼干挥发性成分的含量（30.52 mg·kg⁻¹），但苦水玫瑰曲奇饼干 OAV 的总和（21 045.75）要远远大于原味曲奇饼干 OAV 的总和（8 961.59）。这说明苦水玫瑰花粉的加入使曲奇饼干整体的风味有了一定的提高。

表 2 苦水玫瑰花粉、苦水玫瑰曲奇、原味曲奇特征香气成分分析

Table 2 Analysis of characteristic aroma components in Kushui rose powder, Kushui rose cookies and common cookies							
编号	物质名称	香气描述	香气类型 *	阈值 /(mg·kg ⁻¹)	OAV		
					KH	KQ	YQ
A1	1-戊醇	甜味、脂肪味	3,5	1.6	—	—	0.04
A2	己醇	草本味、木质味、甜味、果香	2,3	0.2	—	0.56	—
A3	1-辛烯-3-醇	甜味、泥土味、薰衣草香、玫瑰香、干草味	1,3	0.014	—	2.44	5.00
A4	苯甲醇	玫瑰花香	1	0.001 2	7 036.86	543.86	—
A5	2-辛烯-1-醇	清香、柑橘味、脂肪味	2,4,5	0.04	—	—	2.25
A6	辛醇	清香、橙-玫瑰味	1,2,4	0.042	—	1.9	4.82
A7	麦芽酚	焦糖-奶油糖果味、草莓味	2,3	0.029	—	—	14.19
A8	苯乙醇	玫瑰花香、甜香、面包香	1,3	0.000 015	226 272.23	13 778.84	—
A9	香茅醇	花香、蜡质味、柑橘味	1,2	0.011	1 789.28	232.82	—
A10	香叶醇	玫瑰香、蜡质味、桃子味	1,2	0.004	2 137.8	339.59	—
A11	丁香酚	丁香香气	1	0.006	—	38.51	—
A12	甲基丁香酚	甜香、丁香-康乃馨、清新、肉桂味	3,6	0.068	43.39	2.84	—
A13	月桂醇	泥土味、肥皂味、脂肪味、蜂蜜味、椰子味	3,5	0.073	14.83	—	3.42
A14	金合欢醇	花香、清香、热带水果香、香辛料味、金属味	1,2,4,6	1	1.1	—	—
A15	庚醛	青草味、脂肪味、刺激性气味	4,6	0.003	178.6	64.8	—
A16	苯甲醛	苦杏仁味、坚果味、木香	—	0.1	23.03	3.94	3.21
A17	苯乙醛	清香, 花香, 蜂蜜味, 可可味	1,4	0.004	—	175.66	43.46
A18	壬醛	花香、脂肪味、橙皮味、蜡质味	1,2,5	0.001	966.26	879.96	890.6
A19	癸醛	甜香、橙香、花香、脂肪味、带有轻微的青瓜味	1,2,3,4,5	0.000 1	12 387.24	2 574.87	3 660.62
A20	月桂醛	肥皂香、蜡质味、橙香、清香、花香	1,2,4	0.000 5	441.55	—	—
A21	2-庚酮	果香、甜香、草本味、椰子味	2,3	0.001	—	1 216.7	—
A22	2-壬酮	玫瑰香、茶香	1,4	0.005	—	375.72	289.32
A23	2-十一酮	桃子味	2	0.007	—	289.4	486.11
A24	香叶基丙酮	花香、果香、清香、蜡质味、木香	1,2,4	0.06	10.82	0.81	1.31
A25	2-十五酮	清新, 茉莉花香, 芹菜香	1,4	0.001	1 129.04	79.63	1 908.96
A26	辛酸	轻微难闻气味、弱果酸味	6	0.91	—	1	0.53
A27	2-乙基丁酸	腐臭味、油腻味、酸味	5,6	0.015	—	—	14.83
A28	壬酸	脂肪味、奶酪味、蜡质味	5	3	—	0.03	0.04
A29	癸酸	脂肪味、难闻腐臭味	5,6	2.2	—	0.69	0.25
A30	月桂酸	脂肪味	5	0.01	—	43.94	44.79
A31	己酸乙酯	菠萝-香蕉味、酒味	2	0.000 3	—	—	546.36
A32	乙酸己酯	花香、果香(苹果、樱桃、梨)	1,2	0.002	—	160.55	433.17
A33	己酸丁酯	菠萝味	2	0.7	—	0.63	5.25
A34	辛酸乙酯	花香、果香	1,2	0.005	—	—	50.42
A35	2-甲基-己基丁酸酯	清香、果香	2,4	0.022	—	—	11.17
A36	癸酸乙酯	白兰地味、果香、蜡质味、甜香	2,3	0.008	58.4	—	—
A37	δ-癸内酯	油腻味、桃子味	2,5	0.1	—	—	19.17
A38	γ-十二内酯	脂肪味、桃子味、麝香味	2,5,6	0.007	—	16.05	25.4
A39	δ-十二内酯	椰子味、奶油味	5	0.01	—	11.61	132.09
A40	δ-十四内酯	奶油味	5	0.0017	—	81.16	150.85
A41	棕榈酸乙酯	蜡质味、奶油味、黄油味、脂香、醋味	5,6	2	1.12	—	—
A42	D-柠檬烯	甜橙香	2	0.004	496.91	113.52	191.41
A43	金合欢烯	果味、草本味	2	0.01	—	—	12.1
A44	2-正戊基呋喃	甜味、泥土味、薰衣草香、玫瑰香、干草味	1,2	0.014	—	—	10.49
A45	2-庚基二氢呋喃酮	桃子味	2	0.06	—	13.72	—

注: 香气类型*: 1-花香, 2-果香, 3-甜香, 4-清香, 5-油脂味, 6-异味; 香气描述查询网站: <http://www.thegoodscentscompany.com/>。

为了进一步探究苦水玫瑰花粉的添加对曲奇饼干的香气的影响,本研究将各个特征香气成分的香气描述进行分类,分为花香、果香、甜香、清香、油脂味、异味这六类。本研究对苦水玫瑰花粉、苦水玫瑰曲奇饼干、原味曲奇饼干的特征香气成分的 OAV 取以 10 为底数的对数,绘制出香气雷达图,如图 3 所示。可以看出添加苦水玫瑰花粉的曲奇饼干花香和甜香的气味特征更加突出,对该香气起主要贡献的物质是苯乙醇 (OAV=13 778.84),此外还有癸醛 (OAV=2 574.87)、壬醛 (OAV=879.96)、苯甲醇 (OAV=543.86)、2-壬酮 (OAV=375.72)、香叶醇 (OAV=339.59) 等;而油脂味有明显的降低,这与内酯类和酸类特征香气成分含量的降低有关,例如 2-乙基丁酸 (油腻味、酸味)、 δ -十二内酯 (椰子味、奶油味)、 δ -十四内酯 (奶油味) 的含量降低,所以 OAV 也降低。

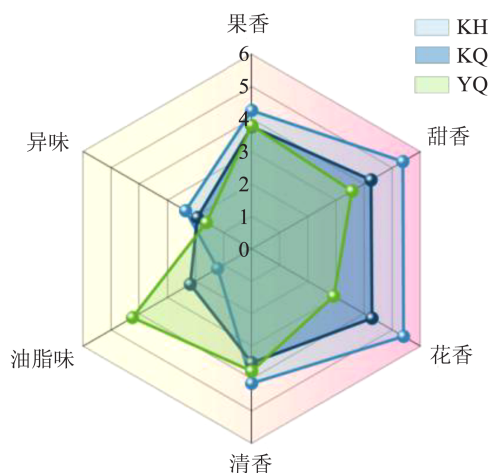


图 3 苦水玫瑰花粉、苦水玫瑰曲奇饼干、原味曲奇饼干的香气雷达图

Fig.3 Aroma radar map of Kushui rose powder, Kushui rose cookies and common cookies

2.3 苦水玫瑰花粉和曲奇饼干特征香气成分 OPLS-DA 及 VIP 值分析

本研究以苦水玫瑰花粉、苦水玫瑰曲奇饼干、原味曲奇饼干特征香气成分的 OAV 作为因变量,通过 OPLS-DA 分析从而对三者进行有效的区分,分析结果如图 4 所示。本次分析中的自变量拟合指数 (R^2X) 为 0.980, 因变量拟合指数 (R^2Y) 为 0.998, 模型预测指数 (Q^2) 为 0.997, R^2 和 Q^2 超过 0.5 表示模型拟合结果可接受^[22]。经过 200 次置换检验,如图 4d, Q^2 回归线与纵轴的相交点小于零,说明模型不存在过拟合^[23,24],模型验证有效,认为该结果可用于苦水玫瑰

花粉、苦水玫瑰曲奇饼干、原味曲奇饼干特征香气成分鉴别分析。

由图 4a 可以看出对苦水玫瑰花粉、苦水玫瑰曲奇饼干、原味曲奇饼干特征香气起贡献作用的物质有很大的差异,苦水玫瑰花粉的香气与两种曲奇饼干的香气也存在一定的差异。图 4b 结合表 2,可以分析出每种特征香气成分与苦水玫瑰花粉、苦水玫瑰曲奇饼干、原味曲奇饼干的相关性。苦水玫瑰花粉与 A8(苯乙醇)、A14(金合欢醇)、A20(月桂醛)、A36(癸酸乙酯)的相关性良好,这些特征香气成分呈现出玫瑰香、清香、热带水果香、橙香、白兰地味,赋予了苦水玫瑰花粉独特的香气。苦水玫瑰曲奇饼干与 A11(丁二醇)、A17(苯乙醛)、A21(2-庚酮)、A45(2-庚基二氢呋喃酮)的相关性良好,这些特征香气成分呈现出丁香香气、花香、清香、蜂蜜味、果香、甜香,使曲奇饼干的花香、甜香更加浓郁。原味曲奇饼干与 A1(1-戊醇)、A5(2-辛烯-1-醇)、A27(2-乙基丁酸)、A37(δ -癸内酯)的相关性良好,这些特征香气成分呈现出甜味、脂肪味、清香、柑橘味、油腻味,使原味曲奇饼干给人以甜腻的感觉。

VIP 值可以反映特征香气成分对模型分类的贡献程度^[25],利用 OPLS-DA 形成的 VIP 值的大小进行分析,一般 VIP 值大于 1 的特征香气成分被认为是造成组间差异的重要物^[26],将 $VIP > 1$ 作为筛选差异特征香气成分的标准。各个特征香气成分的 VIP 值如图 4c 所示,其中共有 21 个特征香气成分的 VIP 值大于 1,包括 6 个醇类,1 个醛类,3 个酮类,2 个酸类,6 个酯类,3 个其他类。具体的特征香气成分的种类可在表 2 中查询。结合 OPLS-DA 分析结果中的 VIP 值以及 OAV 筛选关键的特征香气成分。基于 $VIP > 1$ 以及 $OAV > 100$ 总共筛选出 6 种成分,即苯乙醛、2-庚酮、2-壬酮、2-十五酮、己酸乙酯、 δ -十二内酯,这 6 种成分既是苦水玫瑰花粉、苦水玫瑰曲奇饼干、原味曲奇饼干的关键特征香气成分又是对三者风味贡献较大的成分。

2.4 特征香气成分交互作用探讨

大量研究表明,物质整体的气味并不是组成成分香气的简单相加,而是存在香气成分之间的交互作用,有研究人员将香气成分之间的交互作用分为四类:累加作用、协同作用、融合作用和掩盖作用^[27]。结构相似的物质之间存在明显的累加、协同作用,而结构、香气不同的化合物之间几乎没有相互作用或者有掩盖作用^[28]。

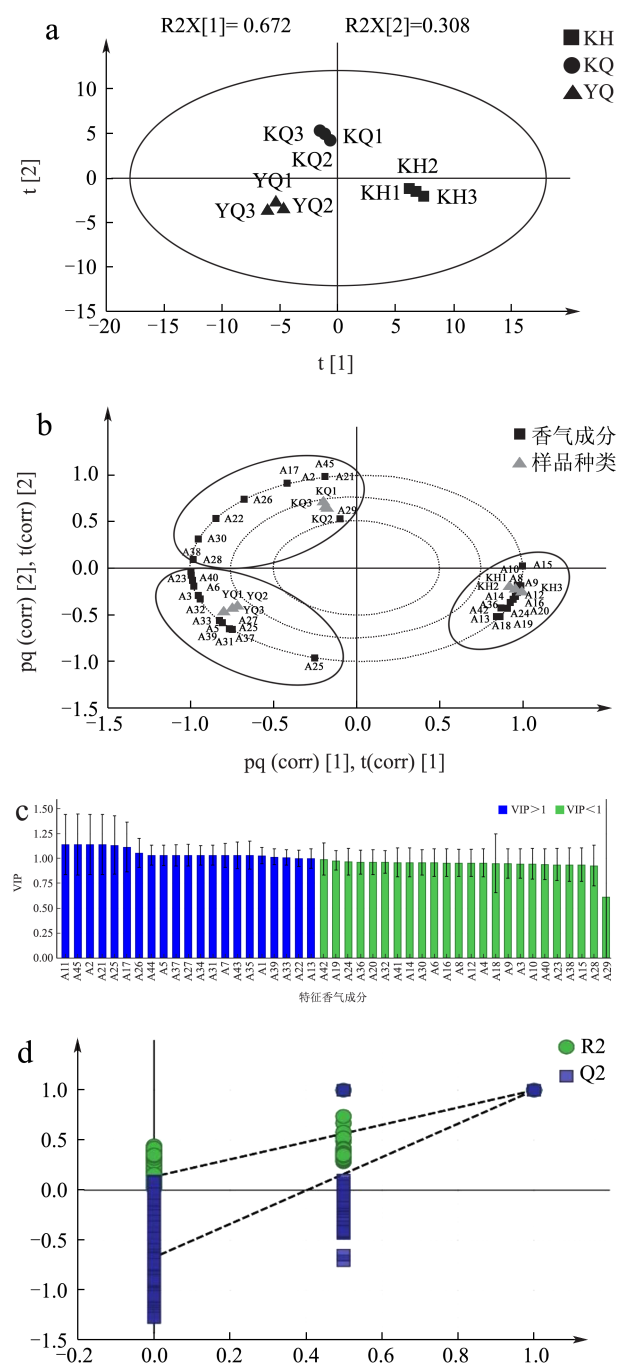


图4 特征香气成分的 OPLS-DA 及 VIP 值分析

Fig.4 Analysis of characteristic aroma components using OPLS-DA and VIP value

注：a 为苦水玫瑰花粉、苦水玫瑰曲奇饼干、原味曲奇饼干的 OPLS-DA 得分图；b 为 Biplot 图；c 为 VIP 值图；d 为模型置换验证图。

本研究对苦水玫瑰花粉和苦水玫瑰曲奇饼干中的共有特征香气成分进行了分析，将苦水玫瑰花粉中特征香气成分的 OAV 值作为理论数值，按照苦水玫瑰曲奇饼干中实际含有苦水玫瑰花粉的含量对 HS-SPME-GC-MS 分析结果进行折算，折算后苦水玫瑰曲奇饼干

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，结果如图 5a 所示。图 5a 中的 6 种香气成分是苦水玫瑰花粉和苦水玫瑰曲奇饼干共同含有，但原味曲奇饼干中未检测到的。可以看出，将苦水玫瑰花粉添加到曲奇饼干中，这些香气成分的实际 OAV 值均有不同程度的升高。这可能与曲奇饼干这种含糖基质有关，香叶醇和香茅醇在含糖基质中的协同作用会加强^[29]，所以将苦水玫瑰花粉添加到曲奇饼干中有利于玫瑰花香的呈现。

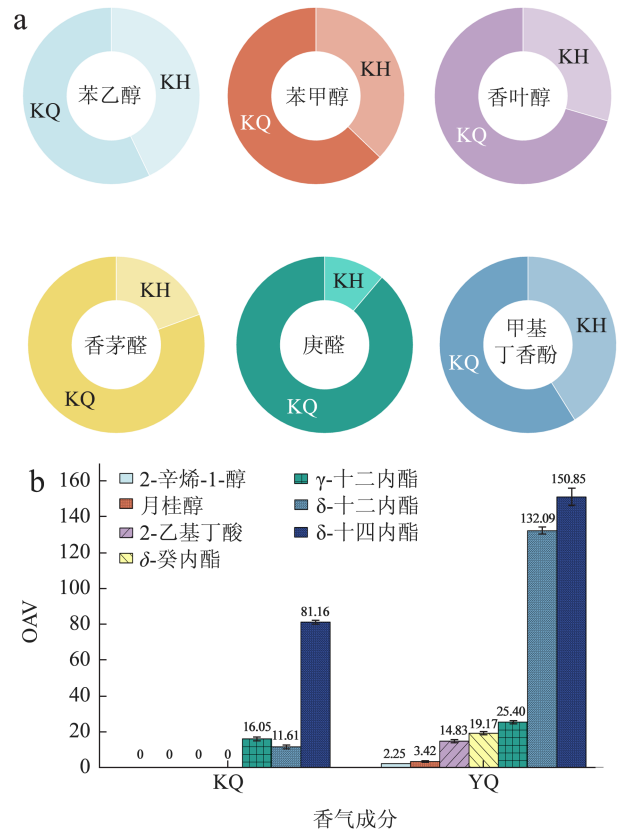


图5 共有香气成分的 OAV 值对比

Fig.5 Comparison of OAV values of common aroma components

注：a 为苦水玫瑰花粉与苦水玫瑰曲奇饼干共有香气成分理论与实际 OAV 值对比；b 为苦水玫瑰曲奇饼干和原味曲奇饼干的共有香气成分 OAV 值对比。

与原味曲奇饼干相比，苦水玫瑰曲奇饼干中的有些香气成分的 OAV 降低，具体结果如图 5b 所示。这 7 种香气成分对油脂味起贡献作用，其中 γ -十二内酯和 δ -十二内酯贡献最大。刘政^[30]根据 OAV 法测定二元混合物间的相互作用关系时得出， γ -十二内酯和 δ -十二内酯起加成协同作用，可使香气效果相互叠加，所以苦水玫瑰曲奇饼干中 γ -十二内酯和 δ -十二内酯的减少导致了油脂味的减弱。由此可见，苦水玫瑰曲奇饼干花香更加浓郁、奶油味和油脂味减弱，这并不是单一特征香气成分增加或减少的结

果,而是特征香气成分之间交互作用的结果。

3 结论

通过 HS-SPME-GC-MS 检测和特征香气成分 OAV 分析发现,苦水玫瑰花粉香气浓郁,其关键特征香气成分为苯乙醇、癸醛、苯甲醇、香叶醇、香茅醇、2-十五酮等。原味曲奇饼干主要呈现奶油香、果香、油脂味,对此起贡献作用的特征香气成分为 1-戊醇、2-辛烯-1-醇、 δ -癸内酯等。苦水玫瑰花粉的添加使曲奇饼干香气成分的种类及含量发生了改变。相较于原味曲奇饼干,苦水玫瑰曲奇饼干中醇类、醛类、酮类的种类增加,酯类的种类减少;相同种类中,苦水玫瑰曲奇饼干的苯乙醛、2-壬酮的含量增加, δ -十二内酯的含量减少。

通过 OPLS-DA 及 VIP 值分析,筛选出苯乙醛、2-庚酮、2-壬酮、2-十五酮、己酸乙酯、 δ -十二内酯这 6 种差异特征香气成分。苦水玫瑰花粉的添加使香叶醇和香茅醇含量增加,其在曲奇饼干这种含糖基质中的协同作用会加强, γ -十二内酯和 δ -十二内酯含量减少,其对油脂味的呈现起累加、协同作用。综上所述,苦水玫瑰花粉的添加使曲奇饼干的花香和甜香更加浓郁,奶油味和油脂味得到减弱,这可能是特征香气成分之间交互作用的结果。

将苦水玫瑰花粉添加到曲奇饼干中,既改善丰富了饼干的风味,又可以使饼干营养价值得到提升。苦水玫瑰曲奇饼干能更好的满足消费者对营养健康食品的需求,让曲奇饼干更具有吸引力,该研究也为苦水玫瑰资源的开发利用提供了新的思路。

参考文献

- [1] WU Y, HAN X, YUAN W Q, et al. Salt intervention for the diversities of essential oil composition, aroma and antioxidant activities of Kushui rose (*R. setata*×*R. rugosa*) [J]. Industrial Crops and Products, 2020, 150: 112417.
- [2] 把灵珍,王波,雷春妮,等.“中国苦水玫瑰”氨基酸含量及其代谢香气组分与种植区域的相关性[J].食品科学,2023,44(8):277-283.
- [3] 颜子曦,李永慧,孟德豪,等.苦水玫瑰中49项营养及活性成分指标分析与评价[J].北京林业大学学报,2023,45(2):120-128.
- [4] 王楠.乡村振兴背景下甘肃省苦水玫瑰产业发展研究[J].商场现代化,2024,21:13-15.
- [5] 武艺,胡建忠,韩雪,等.基于 SPME-GC-MS 探讨盐渍处理对苦水玫瑰纯露挥发性成分构成的影响[J].食品科学,2020,41(20):205-210.
- [6] 梁玉浩,陈春霞,孔祥锦,等.低醇加香蜂蜜酒酿造工艺优化及其香气构成分析[J].食品与发酵科技,2024,60(3):64-75.
- [7] HEGDE A S, GUPTA S, SHARMA S, et al. Edible rose flowers: A doorway to gastronomic and nutraceutical research [J]. Food Research International, 2022, 162: 1-16.
- [8] SOMALI D, ARFAT A, HAMID M S, et al. Effect of mixing time on properties of whole wheat flour-based cookie doughs and cookies [J]. Foods, 2023, 12(5): 941.
- [9] DIVYASREE A, RAVULA S R, TRIDIB K G, et al. Biscuit baking: A review [J]. Lwt, 2020, 131: 109726.
- [10] 程冰,王笋,赵龙珂,等.奇亚籽膳食纤维低糖酥性饼干的制备与表征分析[J].河南农业大学学报,2022,56(6):1015-1023.
- [11] TÂNIA C S P P, LILLIAN B, CELESTINO S-B, et al. Edible flowers: Emerging components in the diet [J]. Trends in Food Science & Technology, 2019, 93: 244-258.
- [12] 杨宇迪,程湛,满媛,等.葡萄籽超微粉添加对曲奇饼干香气的影响[J].食品科学,2017,38(20):103-111.
- [13] 陶虹伶,杨文建,裴斐,等.松茸曲奇特征风味成分分析鉴定[J].食品科学,2016,37(16):128-134.
- [14] AO X, MU Y H, LI L Z, et al. Roasting intervention for the volatile composition of three varieties of nuts originating from *Torreya yunnanensis* [J]. Journal of Food Biochemistry, 2022, 46(2): 1-12.
- [15] 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.
- [16] 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: 1-10.
- [17] BI S, WANG A J D, LAO F, et al. Effects of frying, roasting and boiling on aroma profiles of adzuki beans (*Vigna angularis*) and potential of adzuki bean and millet flours to improve flavor and sensory characteristics of biscuits [J]. Food Chemistry, 2021, 339: 1-13.
- [18] BART A S, WIM J M E, GERRIT S. Branched chain aldehydes: production and breakdown pathways and relevance for flavour in foods [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2009, 81(6): 987-999.
- [19] 吴玉珍,王洁琼,余海涛,等.基于 HS-SPME-GC-MS 和 OAV 分析不同干燥方式菊花脑的挥发性物质差异[J].食品科学,2023,44(8): 228-237.
- [20] DENG Y, LUO Y L, WANG Y G, et al. Effect of different drying methods on the myosin structure, amino acid composition, protein digestibility and volatile profile of squid fillets [J]. Food Chemistry, 2015, 171: 168-176.
- [21] YE Y H, ZHENG S Y, WANG Y X. Analysis of aroma components changes in Gannan navel orange at different growth stages by HS-SPME-GC-MS, OAV, and multivariate analysis [J]. Food Research International, 2024, 175: 113622.
- [22] WANG M Q, MA W J, SHI J, et al. Characterization of the key aroma compounds in Longjing tea using stir bar sorptive extraction (SBSE) combined with gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), gas chromatography-olfactometry (GC-O), odor activity value (OAV), and aroma recombination [J]. Food Research International, 2020, 130(C): 1-10.
- [23] YUN J, CUI C J, ZHANG S H, et al. Use of headspace GC/MS combined with chemometric analysis to identify the geographic origins

of black tea [J]. Food Chemistry, 2021, 360: 1-9.

[24] ZHANG J L, ZHONG L W, WANG P J, et al. HS-SPME-GC-MS combined with orthogonal partial least squares identification to analyze the effect of LPL on yak milk's flavor under different storage temperatures and times [J]. Foods, 2024, 13(2): 342.

[25] 李武峰,邱丽霞,关家伟,等.基于HS-SPME-GC-MS和OPLS-DA模型探究不同嫩度驴肉的关键挥发性物质成分差异[J].畜牧兽医学报,2022,53(12):4258-4270.

[26] ZHU Y, LV H P, SHAO C Y, et al. Identification of key odorants responsible for chestnut-like aroma quality of green teas [J]. Food Research International, 2018, 108: 74-82.

[27] ZHU J C, CHEN F, WANG L Y, et al. Evaluation of the synergism among volatile compounds in Oolong tea infusion by odour threshold with sensory analysis and E-nose [J]. Food Chemistry, 2017, 221: 1484-1490.

[28] 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.

[29] XIAO Z B, LUO J, NIU Y W, et al. Olfactory impact of esters on rose essential oil floral alcohol aroma expression in model solution [J]. Food Research International, 2019, 116: 211-222.

[30] 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.