基于可控氧化-美拉德反应的牛油风味特征分析

李鑫，付娜，王红强*

（华宝香精股份有限公司，上海 201800）

摘要：以精炼牛油为原料，使用酶解、通气氧化、美拉德反应等加工方式，探究可控氧化和美拉德反应对牛油品质，包括酸价、过氧化值及挥发性成分的影响。结果表明：原牛油酸价为 1.22 mg/g，过氧化值为 0 g/100 g，经氧化和美拉德反应加工后，其酸价和过氧化值升高。感官评价结果表明适度的氧化与美拉德反应相结合可以降低异味和酸味，增强牛油肉香、烤香、焦香风味。与低温氧化（130、140、150 ℃）相比，在较高温度（160、180、230 ℃）下氧化的牛油含有更多种类的挥发性成分。氧化牛油经美拉德反应后，其部分醛类含量降低或未检测到，如 2-己烯醛、反式-2-庚烯醛、(E,E)-2,4-庚二烯醛、(E,E)-2,4-壬二烯醛等。主成分分析结果表明氧化牛油和氧化加热反应牛油可以分别分为四组。偏最小二乘回归分析结果表明牛油在 150~180 ℃氧化后再进行美拉德反应可以更好的产生烤坚果味、焦糖味和肉香味。结论：160~180 ℃氧化结合美拉德反应可以提高牛油的风味品质。研究可为可控氧化和美拉德反应在高价值牛油香精的生产制造中提供理论依据。

关键词：牛油；可控氧化；美拉德反应；风味特征分析；偏最小二乘分析

文章编号：1673-9078(2025)12-278-290 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.12.1270

Analysis of the Flavor Characteristics of Beef Tallow Based on Controllable Oxidation-maillard Reaction

LI Xin, FU Na, WANG Hongqiang*

(Huabao Flavors & Fragrances Co. Ltd., Shanghai 201800, China)

Abstract: Using refined beef tallow as the raw material, processing approaches such as enzymatic hydrolysis, aeration oxidation, and the Maillard reaction were employed to investigate the effects of controllable oxidation and the Maillard reaction on the quality of beef tallow, including acid value, peroxide value, and volatile components. The results showed that the original beef tallow had an acid value of 1.22 mg/g and peroxide value of 0 g/100 g, andthe acid value and peroxide value increased after oxidation and the Maillard reaction processes. The results of sensory evaluation showed that moderate oxidation in combination with the Maillard reaction reduced off-flavors and acidity while enhancing the meaty, roasted, and caramelized flavors of the beef tallow. Beef tallow oxidized at higher temperatures (160, 180, 230 ℃) contained a greater variety of volatile components compared with those oxidized at lower temperatures (130, 140, 150 ℃). After the Maillard reaction, certain aldehydes in the oxidized beef tallow were reduced or not detected, such as 2-hexenal, trans-2-heptenal, (E, E)-2,4-heptadienal, and (E, E)-2,4-nonadienal. The results of principal component analysis showed that the oxidized beef tallow or the beef tallow subjected to oxidation-Maillard reactioncan be classified into four distinct groups. The results of partial least squares regression analyses showed that beef tallow oxidized

引文格式：

李鑫,付娜,王红强.基于可控氧化-美拉德反应的牛油风味特征分析[J].现代食品科技,2025,41(12):278-290.

LI Xin, FU Na, WANG Hongqiang. Analysis of the flavor characteristics of beef tallow based on controllable oxidation-maillard reaction [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(12): 278-290.

收稿日期：2024-08-28；修回日期：2024-10-09；接受日期：2024-10-09

作者简介：李鑫（1997-），女，硕士，研发助理，研究方向：食品加工与安全，E-mail：lx@hbflavor.com；共同第一作者：付娜（1985-），女，博士，调香师，研究方向：食品风味化学，E-mail：fn@hbflavor.com

通讯作者：王红强（1970-），男，博士，高级工程师，研究方向：食品添加剂及配料，E-mail：whq@hbflavor.com

firstly at 150~180 ℃ before being subjected to the Maillard reaction can lead to better roasted nutty, caramel and meaty flavors. In conclusion, the combination of oxidation at 160~180 ℃ and the Maillard reaction can improve the flavor quality of beef tallow. This study provides a theoretical basis for controllable oxidation and Maillard reaction in the manufacturing of high-value beef tallow flavoring product.

Key words: beef tallow; controlled oxidation; maillard reaction; flavor characterization; partial least squares analysis

肉类中的风味化合物是通过脂质氧化、美拉德反应、维生素降解以及降解产物之间相互作用产生的[1]。所以脂质氧化和美拉德反应对食物的风味形成起着很重要的作用，其中美拉德反应在肉类香精的生产制造中起着关键作用[2]。美拉德反应（Maillard Reaction），又称羰胺反应，是食品中还原糖与氨基酸或蛋白质在无需酶参与时发生的褐变反应，广泛存在于食品加工中[3]。脂类由脂肪酸组成，氧化降解后会产生大量的挥发性化合物。脂质氧化是肉香风味形成中的重要反应之一，氧化产物在一定程度上有助于提升食品的整体风味[4]。不但美拉德反应会产生特有的肉香味，而且动物脂肪的酶解物也被认为是优良的肉类风味前体[5,6]。

有研究表明，脂质氧化是肉香风味形成中的重要反应之一，氧化产物在一定程度上有助于提升食品的整体风味[4]。动物脂肪可以通过多种方式氧化，主要包括酶解、氧化和复合处理等。在美拉德反应中加入氧化的动物脂肪更容易区分鸡肉、牛肉、猪肉等肉类风味。适度的脂质氧化可以产生特色风味，如果氧化不足可能会导致特殊肉香气产生不足，过度氧化则会导致酸败、哈喇等异味产生。

目前有学者已研究了添加鸡油、鹅油、猪油等对风味的影响[7-9]。赵健等[10]研究表明在“半胱氨酸 - 还原糖”反应体系中加入脂质，脂质氧化降解过程中生成一些羰基化合物如脂肪醛等可以与半胱氨酸等发生反应。Song 等[11]研究了氧化牛油的理化性质及风味成分的变化，但并未分析美拉德反应对牛油理化性质及挥发性成分、脂肪酸组成的影响。因此，本实验在前人的基础上，以精炼牛油为实验材料进行通气氧化并与“氨基酸－葡萄糖－酵母提取物”进行美拉德反应，探究氧化温度及美拉德反应对牛油理化性质和挥发性成分的影响，为高附加值牛油的生产和提高牛油的风味品质提供可行途径。

1 材料与方法

1.1 原料

牛油，四川航佳生物科技有限公司；脂肪酶，诺维信投资有限公司；2-呋喃甲醇、1-辛烯-3-酮、3-丁酸壬醛、2,5-二甲基吡嗪、乙酸，D-葡萄糖，L-半胱氨酸，L-甲硫氨酸氨酸，酵母抽提物均由华宝香精股份有限公司提供。

1.2 主要仪器设备

7890A/5975C GC-MS 气相色谱－质谱联用仪，美国安捷伦公司；ZNHW 型控温电热套，杭州振和科学仪器有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 牛油可控氧化及美拉德反应

参照 Niu 等[12]方法制备热氧化牛油，并略作修改。将质量分数为 0.20% 的脂肪酶添加至牛油中，50 ℃水解 60 min。水解的牛油于沸水浴中加热 15 min 进行灭酶处理。油水分离后的上层油脂分别在 130、140、150、160、180 和 230 ℃加热 30 min，同时通入空气氧化，通气量为 3.50 L/min。通气完毕后立即置于冰水中冷却并置于 −18 ℃下备用。

根据 Ye 等[13]的方法进行美拉德反应，并略作修改。将氧化后的牛油（20.00 g）加入 D-葡萄糖、氨基酸（L-半胱氨酸 :L-甲硫氨酸氨酸 =3:1）和酵母提取物的水溶液（质量浓度均为 20.00 mg/mL），加热至 100 ℃进行美拉德反应，加热时间为 60 min。待油水分离后的上层油脂即为所需待测样品。未经处理的原牛油用 Z0 表示，原牛油未经氧化直接经美拉德反应后的样品用 ZR0 表示，根据通气氧化温度，将 130、140、150、160、180 和 230 ℃氧化所得牛油依次记作 ZY130、ZY140、ZY150、ZY160、ZY180、ZY230，经过不同温度氧化且又经过 100 ℃下热反应后的牛油依次记作 ZR130、ZR140、ZR150、ZR160、ZR180、ZR230。

1.3.2 酸价及过氧化值测定

酸价的测定参照国标 GB 5009.229-2016《食品中酸价的测定》中《第三法 热乙醇指示剂滴定法》[14]。

过氧化值的测定参照 GB 5009.227-2016《食品中过氧化值的测定》中《第一法 滴定法》[15]。

1.3.3 描述性感官评价与喜好度分析

选择 7 名经过专业感官培训的工作人员（年龄为 25~40 岁，2 名男性和 5 名女性）成立感官评定小组，

选取肉香味、焦糖味、异味、脂肪味、烤坚果味、酸味作为风味描述词，采用定量感官评价法，根据评分标准（表1）进行打分。

采用9点快感标度法进行喜好度实验。评价员按照自己的喜欢程度对样品进行评分，在“8~9极其喜欢”、“6~7喜欢”、“5既不喜欢也不讨厌”、“3~4讨厌”、“1~2非常讨厌”、“0极其讨厌”选项中选择最能描述自己感受的选项。

表1 风味描述与强度评价标准

Table 1 Flavor description and intensity evaluation criteria

风味描述	标准品	得分
肉香味	2-甲基-3-呋喃硫醇	不可感知：0；弱，但能分辨出：1~2；较弱：3~4；风味适中：5；强烈：6~7；非常强烈：8~9
焦糖味	糠醛	
异味	2-呋喃甲醇、1-辛烯-3-酮、3-丁酸	
脂肪味	壬醛	
烤坚果味	2、5-二甲基吡嗪	
酸味	乙酸	

1.3.4 挥发性成分分析

参照Zheng等[16]方法，采用固相微萃取－气相色谱－质谱（Solid-Phase Micro Extraction/Gas Chromatography-Mass Spectrometry, SPME/GC-MS）测定油脂样品中的挥发性成分，并略作修改。SPME条件：称量捣碎牛油样品约4.00 g于20 mL顶空瓶中，加入转子后加盖密封，置于70 ℃水浴10 min，而后放置于恒温加热磁力搅拌器上于70 ℃加热并搅拌平衡20 min。而后将已老化（250 ℃下老化30 min）的75 μm PDMS/CAR SPME固/相微萃取头（Supelco）插入顶空瓶中吸附40 min，待手动进样。GC-MS进样解吸附时间为5 min。

GC-MS条件：色谱柱为Agilent HP-INNOWax 19091N-133（30 m×0.25 mm×0.25 μm），分流比为20:1。升温程序为：初温60 ℃保持2 min,，后以2 ℃/min升至250 ℃，保持30 min。载气为高纯He，流量1.00 mL/min。进样口温度250 ℃，离子源温度240 ℃，EI源，电离电压70 eV，质量扫描范围为全扫描。

1.4 数据处理

采用SPSS 26.0进行显著性差异分析，Excel和Origin 2021作柱形图。依据GB 2760-2014《食品安全国家标准 食品添加剂使用标准》选择相关挥发性成分，使用The Unscrambler X（10.4）进行偏最小二乘回归分析。

2 结果与讨论

2.1 氧化温度对牛油酸价的影响

酸价表示样品中的游离脂肪酸总量，游离脂肪酸主要来自于脂肪水解和脂肪氧化过程中产生的低分子脂肪酸。将牛油酶解后，分别在130、140、150、160、180、230 ℃氧化30 min，探究了氧化温度对牛油酸价的影响，结果如图1所示。由图可知，与原牛油相比，牛油经过高温氧化之后酸价上升，这是因为在高温氧化时生成脂肪酸所致[17]。在130~140 ℃下氧化后得到的牛油酸价最高，为1.79~1.82 mg/g。氧化过程中牛油的酸价呈波动性变化，这可能与牛油氧化过程中的酯类、醇类、酸类等有机物的形成与分解有关。在230 ℃下氧化的油脂酸价相较于其他温度氧化的油脂更低。这可能是因为部分脂肪酸在更高的温度下被氧化降解所致[18]。

原牛油经美拉德反应后酸价为1.70 mg/g，氧化牛油经美拉德反应后牛油酸价下降，其中在160 ℃下反应得到的热反应牛油酸价最低，为0.29 mg/g。这可能是因为氧化牛油参与了“氨基酸－葡萄糖－酵母提取物”的美拉德反应并为其提供风味前体物。此前，已有文献报道120 ℃以下氧化时不足以产生足够的风味前体，而160 ℃氧化时产生较高挥发性物质含量[11,19]。由此可见，牛油氧化温度可以控制在160~180 ℃下进行。

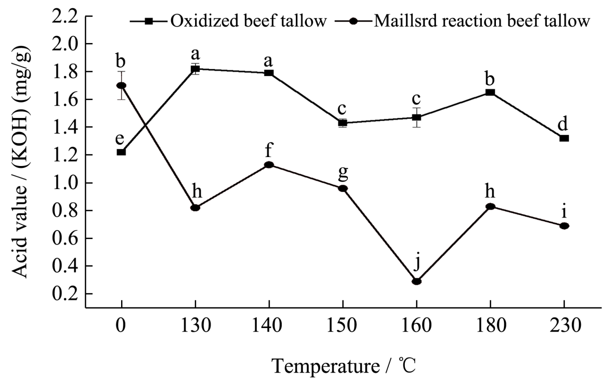

图1 氧化温度对牛油酸价的影响

Fig.1 Effect of oxidation temperature on the acid value of beef tallow

注：图中不同小写字母之间表示显著差异，$P<0.05$。下同。

2.2 氧化温度对牛油过氧化值的影响

过氧化物是脂类氧化的初级产物，过氧化值是反映油脂氧化状态的最常见方法。氧化温度对牛油过氧化值的影响如图2所示。与原牛油相比，在

130~140 ℃下氧化 30 min，牛油的过氧化值为 0 g/100 g，说明此时牛油未被氧化或过氧化物值含量低于检测限。在 150~230 ℃区间氧化时，过氧化值随氧化温度的升高先增加后减少，由 0.21 g/100 g 上升至 180 ℃时的最大值 0.81 g/100 g，在 230 ℃时下降到 0.02 g/100 g。这可能是由于氢过氧化物不稳定，在 230 ℃的高温氧化下过氧化物被分解所致[20,21]。Jin 等[22]研究表明干燥盐腌和干燥熟化处理的培根过氧化值随温度的升高而下降，这可能与过氧化物被分解有关。

热反应之后牛油的过氧化值的变化情况如图 2 所示。原牛油直接经美拉德反应后的过氧化值为 0 g/100 g。不同温度氧化牛油与“氨基酸－葡萄糖－酵母提取物”体系进行热反应后过氧化值变化趋势不同，其中经在 230 ℃下氧化再进行热反应得到的牛油过氧化值最高，为 0.91 g/100 g。130~140 ℃下氧化的牛油进行热反应后过氧化值略微上升，但上升趋势并不明显。150~180 ℃下氧化的牛油进行热反应后过氧化值先上升后下降。150 ℃以下氧化的牛油在热反应前后过氧化值变化不大。而 150~180 ℃氧化的牛油进行热反应后过氧化值显著降低，180 ℃氧化的牛油经热反应后过氧化值为 0.07 g/100 g，说明此温度段内氧化产物参与美拉德反应，为牛油风味提供较好的前体物质。

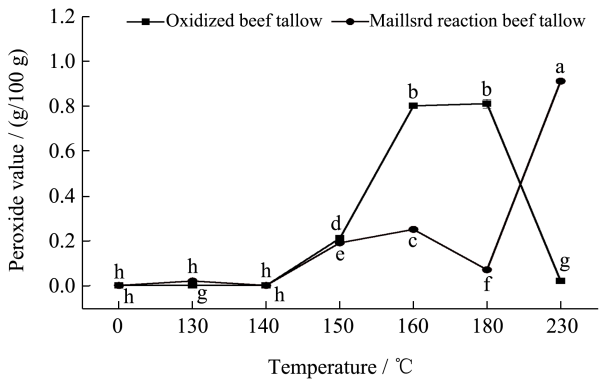

图 2 氧化温度对牛油过氧化值的影响

Fig.2 Effect of oxidation temperature on the peroxide value of beef tallow

2.3　感官评价及喜好度分析

选取了肉香味、焦糖味、异味、脂肪味、烤坚果味、酸味作为风味描述词，结合喜好度分析，探究了氧化温度对牛油不同风味强度的影响，图 3a 为牛油的感官评价图，图 3b 为喜好度分析图。由图 3 可知，原牛油脂肪味、异味较重，整体接受度不高。在较低温度下氧化时（130~150 ℃），脂肪味、异味、酸味降低，喜好度有所增加；在较高温度下氧化（160~230 ℃）后，异味、酸味增加，烤坚果味增加，肉香味、脂肪味、喜好程度下降。这归因于高温氧化下异味、酸味物质的累积[23]。氧化牛油进行热反应后肉香味显著增强，喜好度也有所增加。美拉德反应涉及食品加工过程中的一系列复杂反应，会形成各种美拉德反应产物，从而影响食品的感官特性、稳定性及营养价值[24]。氨基酸和糖的美拉德反应产物通常与香气相关，包括花果香、烤香、肉香等[25]。牛油经 160 ℃及更高温度氧化后进行美拉德反应，肉香味、烤坚果味焦糖味和喜好度明显增加，异味和酸味降低。由此可见，酶解、氧化与美拉德反应相结合可以降低异味和酸味，增强牛油肉香、烤香、焦香风味。尽管过度的脂质氧化会带来异味，但适度的脂质氧化分解产生的化合物可以参与美拉德反应形成风味化合物[26]。杨海华等[27]研究了高温对灰鹅油氧化稳定性及风味的影响，综合油脂氧化和风味变化，建议灰鹅液油加热温度应低于 130 ℃。不同动物源的油脂，最适加热氧化温度存在差异。

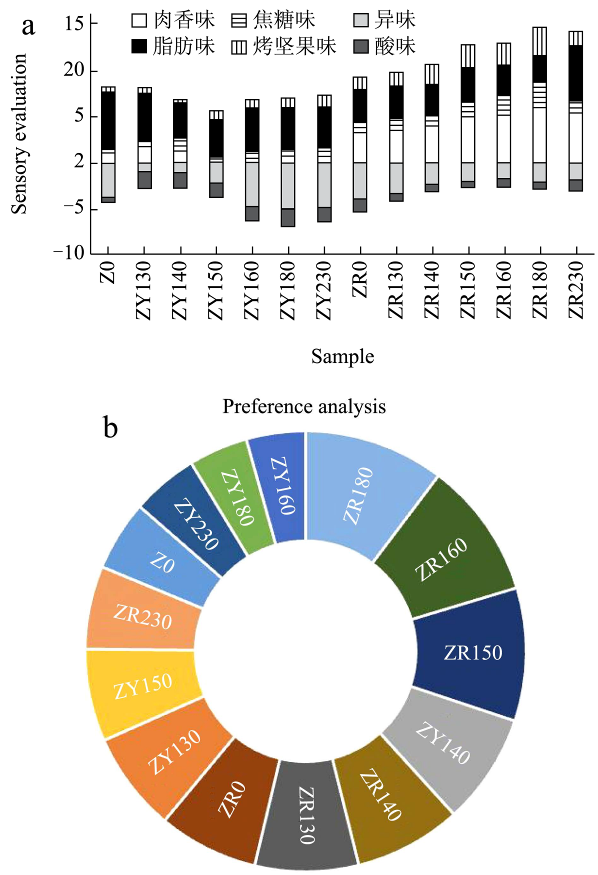

图 3 感官评价及喜好度分析

Fig.3 Sensory evaluation and preference analysis

2.4　挥发性成分分析

探究了氧化温度对牛油挥发性成分的影响，结果如表 3 所示，其 Venn 图分析如图 4a 所示。牛油在不同温度下氧化后，鉴定出的挥发性成分共 89 种，种类最多的为 ZY180，鉴定出 50 种成分，种类最少为 ZY140，鉴定出 19 种成分。Z0、ZY130、ZY140、 ZY150、ZY160、ZY180、ZY230 共有物质为 6 种，分别为庚醛、正戊醇、辛醛、正己醇、壬醛、己酸。原牛油中独有物质为6种，分别为3-羟基-2-丁酮、异丁酸、2,3-丁二醇、异戊酸、乙酰胺、异己酸。原牛油中乙酸（24.52%）、丁酸（15.43%）、丙酸（13.28%）是含量最高的前三种物质，经氧化后，含量显著下降。与低温氧化（130、140、150 ℃）相比，在较高温度（160、180、230 ℃）下氧化可以产生更多的挥发性成分。氧化后，ZY130、ZY140、ZY150、ZY160、ZY180、ZY230 共鉴定出 82 种物质，共有物质为 8 种，分别为庚醛、正戊醇、辛醛、正己醇、壬醛、正庚醇、(E,E)-2,4-庚二烯醛、己酸。这些由脂质氧化产生的饱和或不饱和醛类可能是肉香风味的主要挥发性成分[12]。

经氧化后的牛油，与“氨基酸－葡萄糖－酵母提取物”进行美拉德反应得到风味牛油，其挥发性成分鉴定结果详见表 3，Venn 图分析如图 4b 所示。ZR130、ZR140、ZR150、ZR160、ZR180、ZR230 共鉴定出 101 种成分，其共有物质为 12 种，分别为庚醛、2-戊基呋喃、正戊醇、辛醛、反式-2-庚烯醛、正己醇、壬醛、正庚醇、(E,E)-2,4-庚二烯醛、苯甲醛、正辛醇、己酸。2-戊基呋喃、反式-2-庚烯醛、壬醛、正庚醇、正辛醇含量随着氧化温度的升高呈先增加后下降的趋势。醛类、醇类、酮类等化合物阈值较低，在肉制品热加工中起风味增强作用[28,29]。经热反应后的牛油整体接受度高于原牛油，可能与上述醇、醛化合物含量的增加有关。ZR130 中鉴定出的物质最多，有 59 种，其次为 ZR160，有 50 种。1-辛烯-3-醇具有独特的蘑菇香味，常在脂类含量高的食品中检测出来，其形成过程与多不饱和脂肪酸的氧化有关[30]。在美拉德反应后的牛油中被检测出，且在 ZR160 中具有最高的含量。单独存在于 ZR130 中的物质最多，有 23 种，多为萘类（9 种）。萘属多环芳烃类，是由两个苯环构成的最简单多环芳烃，通过蛋白质、脂肪和碳水化合物在高温下的不完全降解产生[31]。

表 3 牛油的挥发性成分及其含量

Table 3 The volatile components and their content of beef tallow

编号	保留时间/min	名称	CAS 号	挥发性成分相对含量/%													
				Z0	ZY130	ZY140	ZY150	ZY160	ZY180	ZY230	ZR0	ZR130	ZR140	ZR150	ZR160	ZR180	ZR230
C1	0.13	己醛	66-25-1	—	52.86	—	—	—	—	—	1.08	—	—	—	—	—	—
C2	1.41	庚醛	111-71-7	4.31	10.26	14.4	3.39	11.22	8.52	14.34	3.57	15.73	21.14	10.15	12.47	11.42	21.19
C3	2.16	3-甲基-2-丁烯醛	107-86-8	—	—	—	—	0.45	—	—	—	—	—	—	—	—	—
C4	2.7	叶醛	6728-26-3	—	0.68	2.21	4.87	—	0.41	4.04	—	—	1.53	1.44	—	0.62	1.90
C5	3.02	2-己烯醛	505-57-7	0.68	—	—	—	5.41	6.47	—	—	1.36	—	—	0.85	—	—
C6	3.26	2- 甲基丁醛	96-17-3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.23	—	—	—	—
C7	4.26	4- 庚烯醛	6728-31-0	—	—	—	—	0.14	—	—	—	—	—	—	—	—	—
C8	6.66	辛醛	124-13-0	1.95	4.23	5.71	3.58	4.76	5.15	7.31	5.56	8.06	12.30	16.24	15.2	16.30	13.99
C9	8.48	反式-2-庚烯醛	18829-55-5	—	—	12.35	26.78	19.42	20.63	11.45	—	3.89	5.46	7.68	2.09	2.01	2.62
C10	9.16	2-庚烯醛	57266-86-1	2.18	1.34	—	—	—	0.27	—	—	—	—	—	—	—	—
C11	12.73	壬醛	124-19-6	1.99	4.62	8.06	6.12	5.14	4.71	4.04	7.79	4.55	10.55	11.09	12.98	12.83	7.37
C12	14.56	反-2-辛烯醛	2548-87-0	0.53	—	4.37	5.57	5.84	6.15	3.52	—	0.98	1.54	—	1.34	1.16	0.86
C13	15.86	糠醛	98-01-1	—	—	—	—	—	—	0.31	—	—	—	—	—	—	0.53
C14	18.15	(E,E)-2,4-庚二烯醛	4313-03-5	—	0.42	3.95	5.96	3.72	2.78	0.70	—	0.34	0.44	0.47	0.20	0.15	0.08
C15	18.94	癸醛	112-31-2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.42	—	—
C16	19.74	苯甲醛	100-52-7	3.28	—	1.15	—	—	—	—	1.39	0.40	0.43	0.93	0.31	0.34	0.59
C17	20.83	反式-2-壬烯醛	18829-56-6	—	—	—	—	—	—	—	—	0.67	1.20	—	0.90	—	0.61
C18	20.92	2-壬烯醛	2463-53-8	—	0.59	—	3.76	1.91	2.45	2.19	2.02	—	—	1.22	—	—	—
C19	24.06	反式,反式-2,4-辛二烯醛	30361-28-5	—	—	—	—	0.13	0.16	0.14	—	—	—	—	—	—	—
C20	27.21	反式-2-癸烯醛	3913-81-3	—	0.17	—	4.02	2.41	3.15	—	2.89	0.54	0.88	0.91	1.31	0.81	—

续表3

编号	保留时间/min	名称	CAS 号	挥发性成分相对含量/%													
				Z0	ZY130	ZY140	ZY150	ZY160	ZY180	ZY230	ZR0	ZR130	ZR140	ZR150	ZR160	ZR180	ZR230
C21	30.35	(E,E)-2,4-壬二烯醛	5910-87-2	—	—	—	—	0.16	0.21	0.14	—	—	—	—	—	—	—
C22	32.58	2,4-癸二烯醛	2363-88-4	—	—	—	—	—	—	0.09	—	—	—	—	—	—	—
C23	33.19	反-2-十一烯醛	53448-07-0	—	—	—	—	—	0.99	—	—	—	—	—	—	—	—
C24	33.20	2-十一烯醛	2463-77-6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.31	—	—
C25	34.01	(E,Z)-2,4-癸二烯醛	25152-83-4	—	—	—	—	0.29	0.22	—	—	—	—	—	—	—	—
C26	36.24	反式-2,4-癸二烯醛	25152-84-5	—	—	—	1.08	0.79	0.55	0.12	0.7	0.15	0.22	0.49	0.32	0.10	—
C27	46.8	桃醛	104-67-6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.12	0.14
		醛类（27 种）		14.92	75.17	52.2	65.13	61.79	62.82	48.39	250	36.67	55.92	50.62	48.7	45.86	49.88
C28	0.47	3-庚酮	106-35-4	—	—	—	—	—	0.16	—	—	0.13	—	—	0.23	—	—
C29	1.46	2-庚酮	110-43-0	—	—	—	0.39	1.15	1.85	1.88	—	0.48	—	—	0.56	0.69	—
C30	2.87	3-己烯-2-酮	763-93-9	—	—	—	—	0.18	—	—	—	—	—	—	—	—	—
C31	3.44	4-辛酮	589-63-9	—	—	—	—	—	0.25	0.57	—	—	—	—	0.37	0.47	0.64
C32	4.86	3-辛酮	106-68-3	—	—	—	—	—	0.27	—	—	—	—	—	0.39	0.56	—
C33	5.34	3-羟基-2-丁酮	513-86-0	0.42	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
C34	6.44	2-辛酮	111-13-7	—	—	—	—	0.70	1.00	1.05	—	—	—	—	0.87	1.26	1.13
C35	10.04	2-环戊烯酮	930-30-3	—	—	—	—	—	0.11	0.31	—	—	—	—	—	—	—
C36	10.28	1-羟基-2-丁酮	5077-67-8	—	—	—	—	—	—	0.12	—	—	—	—	—	—	—
C37	12.45	2-壬酮	821-55-6	—	—	—	—	0.14	0.16	0.44	—	—	—	—	0.23	0.34	0.80
C38	16.23	L-薄荷酮	14073-97-3	—	—	2.42	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
C39	16.45	薄荷酮	10458-14-7	—	—	—	—	—	—	—	—	0.87	—	—	—	—	—
C40	17.92	2-丁基环戊酮	934-42-9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.39	—
C41	18.56	2-癸酮	693-54-9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.18	0.26	0.21
C42	18.89	2-异丙亚基环己酮	13747-73-4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.26	—	—	—	—
C43	23.62	异弗尔酮	78-59-1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.14	—	—
C44	25.00	植酮	502-69-2	—	—	—	—	—	—	—	—	0.07	—	—	—	—	—
C45	26.70	2,3-辛二酮	585-25-1	—	—	—	—	—	—	0.36	—	—	—	—	—	0.16	0.18
C46	41.98	2-异丁基环己烷-1-酮	4668-64-8	—	—	—	—	—	0.12	—	—	—	—	—	—	—	—
		酮类（19 种）		0.42	0.00	2.42	0.39	2.17	3.92	4.73	0.00	1.55	0.26	0.00	2.97	4.13	2.96
C47	0.52	1-戊烯-3-醇	616-25-1	—	—	—	—	0.67	—	—	—	1.42	—	—	—	—	—
C48	1.52	正丁醇	71-36-3	—	1.05	—	—	—	—	—	—	1.77	—	—	—	—	—
C49	2.07	反式仲戊醇	1576-95-0	—	0.45	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
C50	4.52	正戊醇	71-41-0	2.95	5.86	5.49	4.69	7.83	3.96	5.33	1.63	24.62	11.84	5.09	5.21	4.62	12.10
C51	6.75	5-甲基-3-己醇	623-55-2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.55	—
C52	7.15	3-庚醇	589-82-2	—	—	—	—	—	0.54	0.68	—	—	—	—	—	—	—

续表3

编号	保留时间/min	名称	CAS号	挥发性成分相对含量/%													
				Z0	ZY130	ZY140	ZY150	ZY160	ZY180	ZY230	ZR0	ZR130	ZR140	ZR150	ZR160	ZR180	ZR230
C53	7.30	(S)-(+)-5-甲基-1-己醇	57803-73-3	—	—	—	—	—	0.85	—	—	—	—	—	—	—	—
C54	8.08	顺式仲戊醇	1576-96-1	—	—	—	—	—	0.18	—	—	—	—	—	—	—	—
C55	10.43	正己醇	111-27-3	0.75	0.7	2.07	1.13	1.43	1.12	2.19	1.23	7.63	7.24	4.69	3.83	3.86	5.00
C56	12.31	4-辛醇	589-62-8	—	—	—	—	—	0.15	—	—	0.07	0.16	0.14	0.36	0.49	—
C57	12.79	3-辛醇	589-98-0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4.24	2.49	—
C58	13.69	2-乙基己醇	104-76-7	—	—	—	—	—	—	—	0.27	0.58	—	—	—	—	—
C59	15.19	2-环己烯-1-醇	822-67-3	—	1.01	—	—	—	—	—	—	—	0.02	—	—	—	—
C60	15.27	1-辛烯-3-醇	3391-86-4	—	—	—	—	—	—	0.46	—	2.27	2.12	—	2.98	2.71	1.12
C61	16.92	正庚醇	111-70-6	—	3.16	6.67	2.8	2.41	2.11	6.09	3.48	8.1	10.24	16.55	13.35	14.72	6.29
C62	20.44	2-庚醇	543-49-7	—	—	—	0.53	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
C63	21.34	4-乙基环己醇	4534-74-1	—	—	—	—	—	0.35	0.21	—	—	—	—	0.46	0.39	—
C64	22.77	正辛醇	111-87-5	—	0.57	—	1.82	1.46	1.45	1.01	2.31	2.91	4.73	8.02	8.56	9.72	2.84
C65	23.69	2,3-丁二醇	513-85-9	1.02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
C66	24.40	(R)-1,2-丙二醇	4254-14-2	0.43	0.19	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
C67	25.91	反式-2-辛烯-1-醇	18409-17-1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.10	—
C68	25.98	反式-2-壬烯-1-醇	31502-14-4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.1	—	—
C69	26.45	苯甲醇	100-51-6	—	—	—	—	—	—	—	0.04	—	—	—	—	—	—
C70	27.34	苯乙醇	60-12-8	—	—	—	—	—	—	—	0.1	—	—	—	—	—	—
C71	28.70	正壬醇	143-08-8	—	—	—	—	—	0.26	—	—	—	—	—	0.36	—	0.16
C72	29.31	1-氨基-3-甲氧基丙-1-醇	1435-44-9	—	0.07	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
C73	35.08	1,3-丙二醇	504-63-2	2.19	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		醇类（27种）		7.34	13.06	14.23	10.97	13.80	10.97	15.97	9.06	49.37	36.35	34.49	39.45	40.65	27.51
C74	16.03	乙酸	64-19-7	24.52	1.90	—	2.94	4.09	3.05	—	1.49	—	—	1.96	—	—	2.18
C75	16.94	1,2,4-苯三羧酸	54699-35-3	—	—	3.98	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
C76	19.51	甲酸	64-18-6	3.52	—	—	—	6.32	6.73	9.53	—	—	—	—	—	—	—
C77	21.44	丙酸	79-09-4	13.28	0.61	—	1.11	0.66	0.86	1.51	—	0.27	—	0.43	0.19	—	0.78
C78	23.27	异丁酸	79-31-2	2.68	—	—	—	—	—	—	0.91	0.52	0.70	—	0.18	—	0.54
C79	26.36	丙烯酸	79-10-7	0	—	—	—	—	—	0.44	—	—	—	—	—	—	—
C80	26.84	丁酸	107-92-6	15.43	0.28	—	—	0.43	0.40	3.35	4.91	0.20	0.22	—	0.14	—	1.20
C81	29.11	异戊酸	503-74-2	5.59	—	—	—	—	—	—	3.24	0.35	—	—	—	—	0.38
C82	32.93	戊酸	109-52-4	2.44	—	—	0.61	0.54	0.51	2.65	—	—	—	0.20	0.20	0.16	1.40
C83	35.23	癸酸	334-48-5	—	—	—	—	—	—	—	2.22	—	—	—	—	—	—
C84	36.39	4-甲基戊酸	646-07-1	2.70	—	—	—	—	—	—	0.43	—	—	—	—	—	—
C85	38.65	己酸	142-62-1	3.19	1.45	3.5	1.5	1.69	1.2	4.53	2.42	0.52	0.76	0.62	1.05	0.79	2.82
C86	44.04	庚酸	111-14-8	—	—	—	—	0.26	0.24	1.04	0.41	0.12	—	—	0.33	0.33	0.88

续表3

编号	保留时间/min	名称	CAS 号	挥发性成分相对含量/%													
				Z0	ZY130	ZY140	ZY150	ZY160	ZY180	ZY230	ZR0	ZR130	ZR140	ZR150	ZR160	ZR180	ZR230
C87	49.20	辛酸	124-07-2	—	—	—	—	—	0.15	0.64	5.56	0.11	—	—	0.24	0.22	0.55
C88	54.15	壬酸	112-05-0	—	—	—	—	—	0.15	0.34	—	0.13	—	—	—	0.13	0.22
C89	63.62	苯甲酸	65-85-0	—	—	—	—	—	—	0.18	—	0.16	—	—	—	—	0.50
		酸类（16 种）		73.35	4.24	7.48	6.16	13.99	13.29	24.21	21.59	2.38	1.68	3.21	2.33	1.63	11.45
C90	0.17	5-甲基-1-己烯	3524-73-0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.31	—	—
C91	0.26	对-二甲苯	106-42-3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.14	—	—
C92	1.11	1-癸烯	872-05-9	—	—	—	—	—	—	—	—	0.04	—	—	—	—	—
C93	1.72	十二烷	112-40-3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.55	0.65	—
C94	2.59	辛烷	111-65-9	—	—	—	—	—	—	—	29.07	—	—	—	—	—	—
C95	5.63	顺-2-辛烯	7642-04-8	—	—	—	—	—	—	—	—	0.08	—	—	—	—	—
C96	7.27	3-乙基-3-甲基-1-戊烯	6196-60-7	—	—	—	—	0.64	—	—	—	—	—	—	—	—	—
C97	13.32	3-乙基-2-甲基-1,3-己二烯	61142-36-7	—	—	—	—	—	—	—	—	0.46	0.58	—	—	0.36	—
C98	15.61	二甲基苯乙烯	1195-32-0	—	—	—	—	—	—	—	—	0.11	—	—	—	—	—
C99	16.94	1-乙基环己烯	1453-24-3	—	—	—	—	1.07	—	—	—	—	—	—	—	—	—
C100	17.04	顺式-1,2-二甲基环戊烷	1192-18-3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.43	—	—
C101	18.92	1-甲基-2-亚甲基环己烷	2808-75-5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.44	—
C102	20.84	顺式-1-乙基-2-甲基环戊烷	930-89-2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.78	—
C103	26.57	3-十一炔	60212-30-8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.25	—	—
C104	28.02	（E）-5-戊基氧基-2-戊烯	56052-85-8	—	—	—	—	0.81	—	—	—	—	—	—	—	—	—
C105	29.51	苯酚	108-95-2	—	—	—	—	—	—	—	0.08	—	—	—	—	—	—
C106	31.22	对甲酚	106-44-5	—	—	—	—	—	—	—	0.31	—	—	—	—	—	—
C107	33.60	α-姜黄烯	644-30-4	—	—	—	—	—	—	—	—	0.17	—	—	—	—	—
C108	35.97	2,4-二叔丁基酚	96-76-4	—	—	—	—	—	—	—	0.25	—	—	—	—	—	—
C109	37.10	1-甲基萘	90-12-0	—	—	—	—	—	—	—	—	0.26	—	—	—	—	—
C110	38.84	2-甲基萘	91-57-6	—	—	—	—	—	—	—	—	0.34	—	—	—	—	—
C111	42.87	1,3-二甲基萘	575-41-7	—	—	—	—	—	—	—	—	0.13	—	—	—	—	—
C112	44.52	联苯	92-52-4	—	—	—	—	—	—	—	—	0.32	—	—	—	—	—
C113	44.63	2,6-二甲基萘	581-42-0	—	—	—	—	—	—	—	—	0.37	—	—	—	—	—
C114	44.96	1,5-二甲基萘	571-61-9	—	—	—	—	—	—	—	—	0.24	—	—	—	—	—
C115	44.99	1,6-二甲基萘	575-43-9	—	0.37	3.57	—	—	—	—	—	0.07	—	—	—	—	—
C116	49.68	3-甲基联苯	643-93-6	—	—	—	—	—	—	—	—	0.06	—	—	—	—	—
C117	50.05	1,4,5-三甲基萘	2131-41-1	—	—	—	—	—	—	—	—	0.11	—	—	—	—	—

续表3

编号	保留时间/min	名称	CAS 号	挥发性成分相对含量/%													
				Z0	ZY130	ZY140	ZY150	ZY160	ZY180	ZY230	ZR0	ZR130	ZR140	ZR150	ZR160	ZR180	ZR230
C118	52.66	1,4,6-三甲基萘	2131-42-2	—	—	—	—	—	—	—	—	0.18	—	—	—	—	—
C119	55.08	百里香酚	89-83-8	—	—	2.27	—	—	—	—	—	0.26	0.52	0.25	—	—	—
C120	55.58	4-异丙-1,6-二甲萘	483-78-3	—	0.47	3.44	—	—	—	—	—	0.60	0.40	0.48	—	—	—
C121	74.70	蒽	120-12-7	—	—	—	—	—	—	—	—	0.11	0.27	—	—	—	—
		烃类（32种）		0.00	0.84	9.28	0.00	2.52	0.00	0.00	29.71	3.91	1.77	0.73	1.68	2.23	0.00
C122	23.56	γ-戊内酯	108-29-2	—	—	—	—	—	—	0.59	—	—	—	—	—	—	0.28
C123	25.66	γ-丁内酯	96-48-0	1.58	0.25	—	—	1.03	1.14	1.67	—	—	—	—	—	—	0.31
C124	29.95	γ-己内酯	695-06-7	—	0.47	—	—	0.57	0.69	0.84	—	—	—	—	0.21	0.22	0.52
C125	35.12	delta-戊内酯	542-28-9	—	—	—	—	0.33	0.44	0.85	—	—	—	—	—	—	0.11
C126	35.42	γ-庚内酯	105-21-5	—	—	—	—	0.19	0.32	0.50	—	—	—	—	0.16	0.20	0.46
C127	35.57	邻苯二甲酸二甲酯	131-11-3	—	—	—	—	—	—	—	0.03	—	—	—	—	—	—
C128	41.25	γ-辛内酯	104-50-7	—	—	—	—	—	0.26	0.30	0.10	—	—	—	0.17	0.29	0.41
C129	48.91	三乙酸甘油酯	102-76-1	—	—	—	—	—	—	0.24	—	0.11	—	—	—	—	—
		酯类（8种）		1.58	0.72	0.00	0.00	2.12	2.85	4.99	0.13	0.11	0.00	0.00	0.54	0.71	2.09
C130	1.43	3-乙基噻吩	1795-01-3	—	—	—	—	—	—	—	—	0.04	—	—	0.07	0.05	—
C131	1.62	吡啶	110-86-1	—	—	—	—	—	—	—	—	0.04	—	—			
C132	1.89	吡嗪	290-37-9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.81	—	—	—	1.87
C133	3.73	2-戊基呋喃	3777-69-3	0.60	—	—	—	0.93	2.62	0.83	—	1.03	1.15	1.17	1.85	2.61	1.27
C134	4.43	2-甲基吡嗪	109-08-0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.26
C135	10.44	樟脑	464-48-2	—	—	—	—	—	—	—	—	0.25	—	—	—	—	—
C136	11.29	3-乙基吡啶	536-78-7	—	—	—	—	—	—	—	—	0.10	0.18	0.22	—	—	—
C137	16.34	2-戊基噻吩	4861-58-9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.38	0.28	—
C138	24.86	2,5-二甲基四氢呋喃	13-38-9	—	—	—	—	0.23	—	—	—	—	—	—	—	—	—
C139	28.04	4-甲基噻唑	693-95-8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.44	—	—
C140	28.38	苯并噻唑	95-16-9	—	—	—	—	—	—	—	0.12	—	—	—	—	—	—
C141	28.71	2-乙酰基吡咯	1072-83-9	—	—	—	—	—	—	—	0.13	—	—	—	—	—	—
C142	33.58	2H-吡喃-2-酮	504-31-4	—	—	—	—	—	0.12	—	—	—	—	—	—	—	—
C143	33.94	乙酰胺	60-35-5	0.63	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
C144	36.65	(Z)-茴香脑	25679-28-1	—	—	—	—	—	—	—	—	0.22	—	—	—	—	—
C145	56.84	二苯并呋喃	132-64-9	—	—	1.49	—	—	—	—	—	0.47	0.62	0.16	—	—	—
C146	60.04	甘油	56-81-5	—	2.28	4.36	0.72	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		其他类（17种）		1.23	2.28	5.85	0.72	1.16	2.74	0.83	0.25	2.15	2.76	1.55	2.74	2.94	3.40

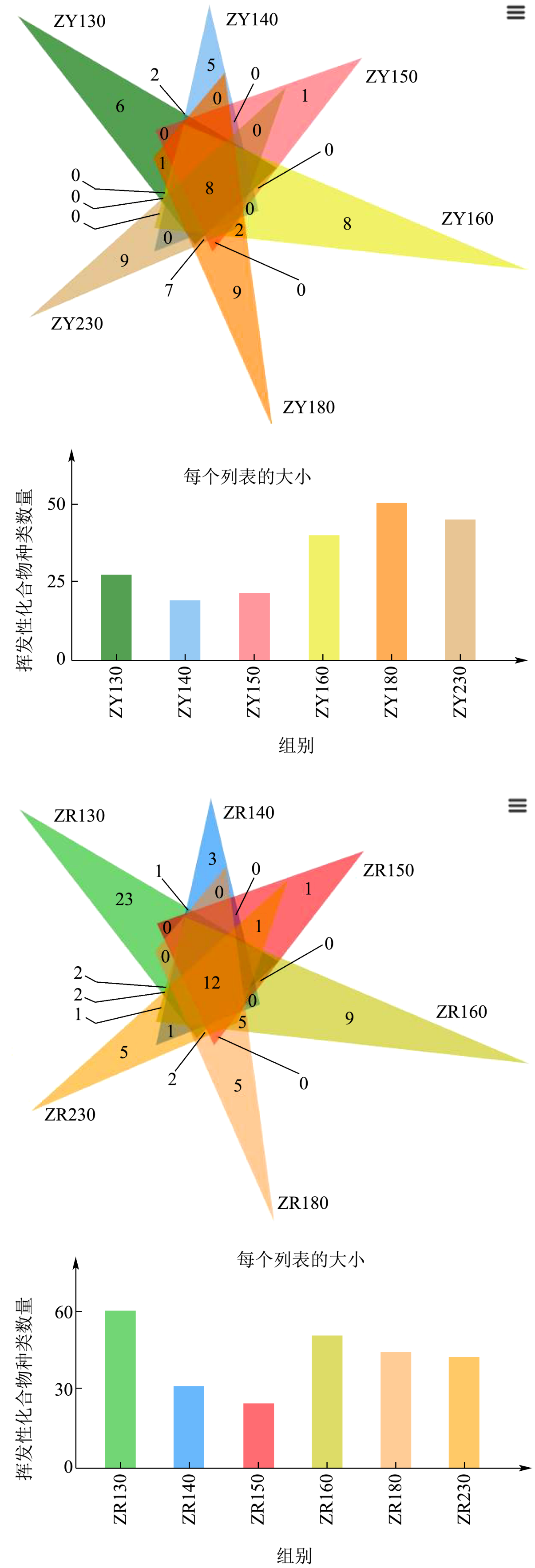

图 4 Venn 图分析

Fig.4 Venn diagram analysis

鉴定出的挥发性成分按照种类的不同，大致可以分为醛类、酮类、醇类、酸类、烃类和其他类，牛油的挥发性成分物质分类和含量分别如图 5a 和图 5b 所示。酸类是原牛油中的主要挥发性成分，含有 9 种酸，含量高达 73.35%，其次是醛类，为 14.92%。这些酸类成分可能是牛油酸味和异味的主要来源。美拉德反应后的原牛油酸类物质含量降低。原牛油经不同温度氧化后，醛类成分含量显著提高，为 48.39%~75.17%。氧化后，酸类物质含量大幅度降低，且越低的氧化温度含量降低越明显。醇类物质经氧化后，含量也有所提高，为 10.97%~14.23%。牛油原油在较低温度下（130、140、150 ℃）氧化后，酸类物质含量降低，种类减少，并伴随着醛类、醇类物质含量上升，种类增加。这与油脂在被氧化过程中所产生的氢过氧化物易发生复杂的裂解和相互作用，生成醛、醇、酮等小分子挥发性产物有关[32,33]。郑美玉等[34]研究了 13 种市售牛油的风味物质，结果表明 13 种牛油样品中共检测出了 158 种化合物，其中醛类、杂环类和酮类化合物是此次鉴定数量最多的化合物。这与本次结果不同，可能是因为不同牛油之间品质差异较大造成。原牛油不含酮类，经氧化后产生少量酮类。氧化的牛油经过美拉德反应后，醛类和酸类物质含量有所下降，醇类物质含量上升。醛类和醇类物质在热反应牛油中含量最高，对牛肉风味有突出贡献。

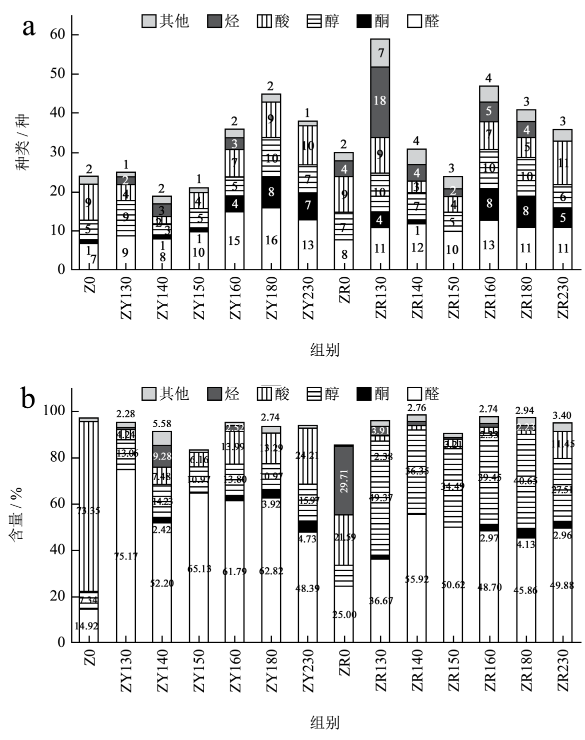

图 5 挥发性化合物种类及含量分析

Fig.5 Analysis of the classification, variety and content of volatile compounds

另外，比较了原油、原油热反应油、180 ℃氧化油及其热反应油，详见下图6。由图5和图6可知，与原油相比，经热反应后的原油增加了较多的烃类物质，并降低了酸类物质含量。氧化和热反应过程主要增加了物质种类，包括11种醛、12种醇、12种酮、4种内酯、4种烃、3种酸和2种杂环化合物，其中烃类和杂环化合物源自热反应过程。与ZR0相比，ZR180含有较多的醛类、酮类和醇类，含有较低的酸类和烃类，因此氧化过程可以为热反应过程增加多种风味物质前体。ZY180含有16种醛，含量为62.82%，但经热反应后检测出11种，含量为45.89%，降低了26.95%。大多数醛类在氧化过程中含量增加，而经热反应过程后含量降低或未检测到，如2-己烯醛、反式-2-庚烯醛、(E,E)-2,4-庚二烯醛、(E,E)-2,4-壬二烯醛等经热反应后并未检测。Xu等[35]研究表明大多数醛在含有猪油的反应混合物中质量浓度较低且有己醛、庚醛、（2E）-庚烯醛和（E,E）-2,4-庚二烯醛未能检测到。这可能是因为经氧化产生的部分醛类物质参与了随后的美拉德反应而导致其含量减少或消失。酸类物质在ZY180中有9种，而在ZR180中仅有5种，且含量不足2%。伴随着醛类、酸类物质含量的减少，醇类物质含量在ZR180增加，由10.97%增至40.65%，增幅270.56%。

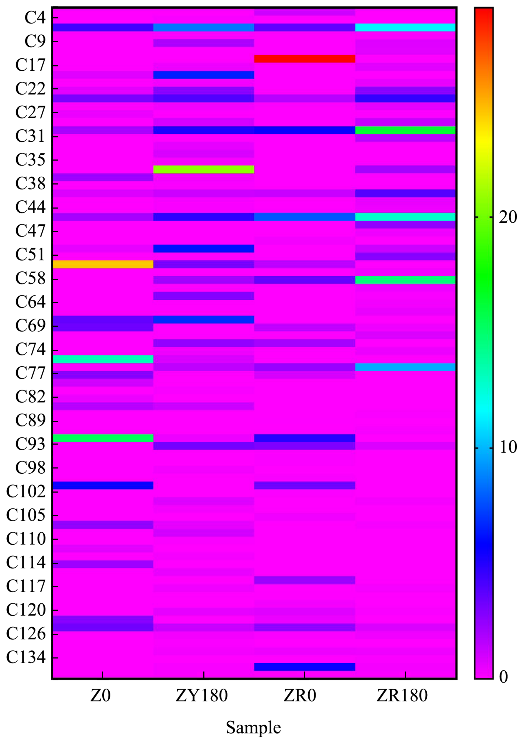

图6 牛油经4种方式处理后的挥发性成分变化

Fig.6 The profile of volatile components of beef tallow after 4 different treatments

注：C3-C140表示挥发性物质的序号。

2.5 主成分分析

对氧化后的牛油鉴定出的挥发性成分进行主成分分析（Principal Component Analysis, PCA），见图7a。前两个主成分贡献率为60.80%，氧化后的牛油可以按照氧化温度的不同分为4组，其中ZY130、ZY140距离相近，归为一组，ZY150、ZY160在同一象限，归为一组，ZY180一组，ZY230一组。4组之间样本相互独立，说明不同温度氧化的牛油彼此风味不同。ZY230与其他三组距离较远，说明200 ℃以上高温氧化对牛油挥发性成分影响极大。

对氧化加美拉德反应后得到的牛油挥发性成分进行PCA分析，结果如图7b所示。前两个主成分贡献率为60.20%，按照氧化温度的不同可以分为4组，其中ZR130一组，ZR140、ZR150一组，ZR160、ZR180一组，ZR230一组。ZR130与ZR140、ZR150的差异主要体现在PC1上，ZR160、ZR180差别较小，其差异主要体现在PC2上。ZR230与其他三组距离较远，说明与其他3组氧化加热反应牛油风味差异较大。牛油的氧化过程可以产生小分子化合物，为美拉德反应提供风味前体物[36]。因此氧化温度不同，风味前体物不同，再经过热反应后的牛油风味差异显著。

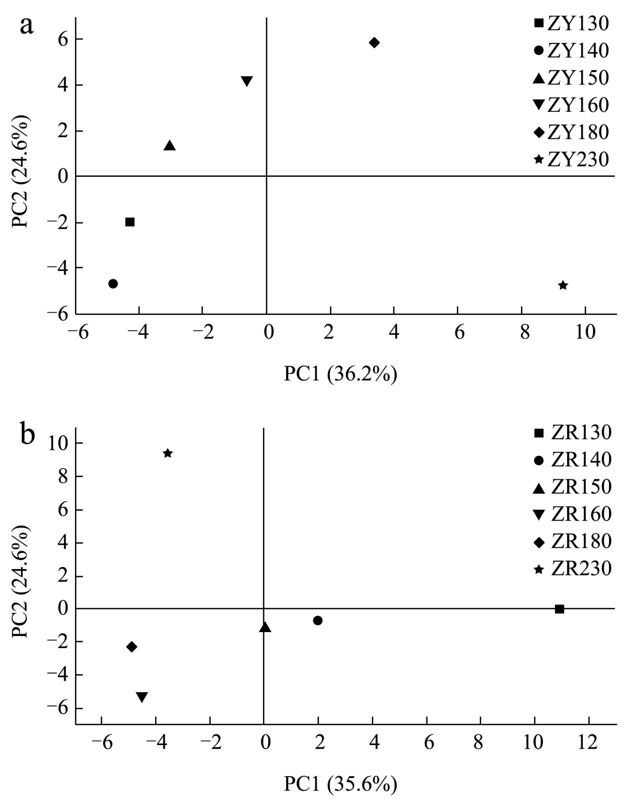

图7 主成分分析

Fig.7 Principal component analysis

2.6 偏最小二乘回归分析

偏最小二乘回归用于检验氧化加美拉德反应后牛油的挥发性成分和感官属性之间的关系，以不同样品的挥发性成分为X变量，感官评价结果为Y变量，结果如图8所示，图8a为得分图，图8b为载荷图。由于氧化加美拉德反应牛油具有更好的应用价值，故在此只讨论了氧化加美拉德反应牛油与感官评价的相关性。

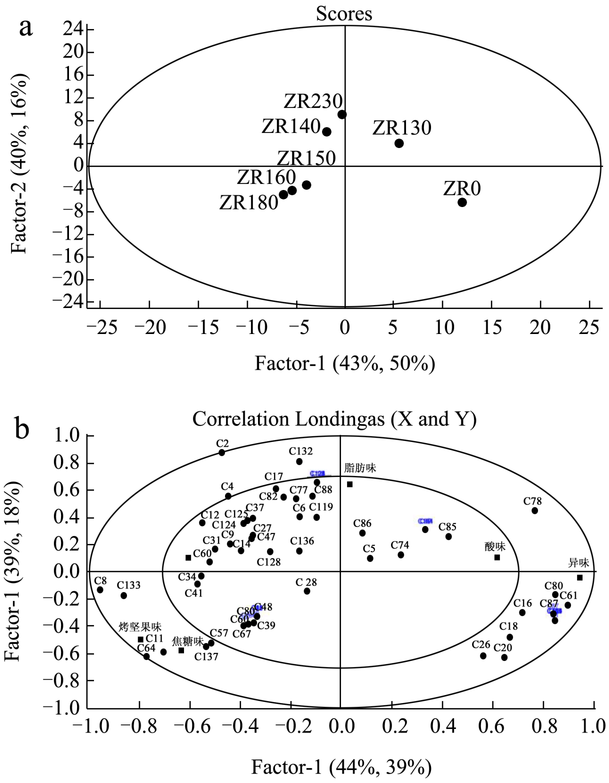

图8 偏最小二乘回归分析

Fig.8 Partial least squares regression analysis

图中内外椭圆分别代表50%和100%的解释方差，落于内外椭圆之间的X变量和Y变量能够很好地被PLSR模型所解释。所建立的PLSR模型包括两个主成分，分别解析了83%的X方差和57%的Y方差。由图可知，ZR130位于第一象限，脂肪味和酸味与其正相关；ZR140、ZR230位于第二象限，与肉香味相关；ZR150、ZR160、ZR180位于第三象限，与焦糖味、烤坚果味有关；ZR0位于第四象限，与异味有关。由图可知肉香味、烤坚果味、焦糖味、异味均在50%解释方差之外，表明这些感官风味能被PLSR模型很好的解释。C81（丁酸）、C82（异戊醇）等与异味相关。这些酸类、醇类可能对异味有促进作用[4]。C133（2-戊基呋喃）、C8（辛醛）可能会对肉香味有强化。C11（壬醛）、C58（3-辛醇）、C137（2-戊基噻吩）、C65（正辛醇）可能对焦香味、烤坚果味起强化作用。C5（2-己烯醛）、C6（2-甲基丁醛）、C17（反式-2-壬烯醛）、C120（百里香酚）等则可能对热反应牛油的脂肪味有促进作用。C61（1-戊烯-3-醇）、C86（己酸）、C87（庚酸）可能与酸味相关。

3 结论

本实验通过调节氧化温度对牛油进行氧化，并将氧化牛油与“氨基酸－葡萄糖－酵母提取物”进行美拉德反应，探究氧化和美拉德反应后牛油的酸价、过氧化值及挥发性成分的变化。结果表明精炼牛油经160~180 ℃氧化30 min后与“氨基酸－葡萄糖－酵母提取物”进行美拉德反应，热反应后的牛油具有良好的风味和应用价值。牛油经氧化和美拉德反应后酸价和过氧化值上升。感官评价表明原牛油脂肪味和异味较重，酶解、氧化与美拉德反应相结合可以降低异味和酸味，增强牛油肉香、烤香、焦香风味，提高喜好程度。牛油氧化后共鉴定出89种挥发性成分，氧化牛油经美拉德反应后共检测到101种挥发性成分。与低温氧化（130、140、150 ℃）相比，在较高温度（160、180、230 ℃）下氧化可以产生更多的挥发性成分，主要为醛类和醇类，经美拉德反应后部分醛类含量降低或未检测到，如2-己烯醛、反式-2-庚烯醛、(E,E)-2,4-庚二烯醛、(E,E)-2,4-壬二烯醛等。主成分分析结果表明氧化牛油和美拉德反应牛油可以根据温度高低分为四组，其中160、180 ℃氧化的牛油风味差异较小。偏最小二乘回归分析结果显示牛油在150~180 ℃氧化后进行美拉德反应可以更好的产生烤坚果味、焦糖味和肉香味。综合所述，牛油经160~180 ℃氧化后经美拉德反应可以提高牛油的利用价值。因此，可控氧化与美拉德反应在高附加值香精的生产制造中具有广阔的应用前景。

参考文献

[1] KHAN M I, JO C, TARIQ M R. Meat flavor precursors and factors influencing flavor precursors-a systematic review [J]. Meat Science, 2015, 110: 278-284.

[2] NIU Y, WU M, XIAO Z, et al. Effect of fatty acids profile with thermal oxidation of chicken fat on characteristic aroma of chicken flavors assessed by gas chromatography-mass spectrometry and descriptive sensory analysis [J]. Food Science and Technology Research, 2016, 22(2): 245-254.

[3] STAROWICZ M, ZIELIŃSKI H. How Maillard reaction influences sensorial properties (color, flavor and texture) of food products? [J]. Food Reviews Unternational, 2019, 35(8): 707-725.

[4] MA X, ZHAN P, TIAN H, et al. Effects of different enzymatic hydrolyses of mutton tallow on the aroma characteristics of the Maillard reaction of xylose-cysteine based on GC-MS, e-nose,

and statistical analysis [J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2020, 122(3): 1900212.
[5] NEETHLING J, HOFFMAN L C, MULLER M. Factors influencing the flavour of game meat: a review [J]. Meat Science, 2016, 113: 139-153.
[6] XIA B, NI Z, HU L, et al. Development of meat flavors in peony seed-derived Maillard reaction products with the addition of chicken fat prepared under different conditions [J]. Food Chemistry, 2021, 363: 130276.
[7] LIU J, LIU M, HE C, et al. Effect of thermal treatment on the flavor generation from Maillard reaction of xylose and chicken peptide [J]. LWT - Food Science and Technology, 2015, 64(1): 316-325.
[8] HAN D, ZHANG C, FAUCONNIER M, et al. Characterization and differentiation of boiled pork from Tibetan, Sanmenxia and Duroc×(Landrac×Yorkshire) pigs by volatiles profiling and chemometrics analysis[J]. Food Research International, 2020, 130: 108910.
[9] GĄSIOR R, WOJTYCZA K, MAJCHER M A, et al. Key Aroma compounds in roasted white kołuda goose [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(21): 5986-5996.
[10] 赵健,赵梦瑶,曹长春,等.脂肪醛对“半胱氨酸-木糖”美拉德反应进程及肉香物质形成的影响[J].食品科学,2017,38(20):63-69.
[11] SONG S, ZhANG X, HAYAT K, et al. Formation of the beef flavour precursors and their correlation with chemical parameters during the controlled thermal oxidation of tallow [J]. Food Chemistry, 2011, 124(1): 203-209.
[12] NIU Y, WU M, XIAO Z, et al. Effect of fatty acids profile with thermal oxidation of chicken fat on characteristic aroma of chicken flavors assessed by gas chromatography-mass spectrometry and descriptive sensory analysis [J]. Food Science and Technology Research, 2016, 22(2): 245-254.
[13] YE Y, YE S, WANYAN Z, et al. Producing beef flavors in hydrolyzed soybean meal-based Maillard reaction products participated with beef tallow hydrolysates [J]. Food Chemistry, 2022, 378: 132119.
[14] GB5009.229-2016,食品安全国家标准 食品中酸价的测定[S].
[15] GB5009.227-2016,食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定[S].
[16] ZHENG Z, ZHANG M, LIU W, et al. Effect of beef tallow, phospholipid and microwave combined ultrasonic pretreatment on Maillard reaction of bovine bone enzymatic hydrolysate [J]. Food Chemistry, 2022, 377: 131902.
[17] 梁诗雅,张凤娇,何松贵,等.高酸价肉油在传统泡酒过程中的脂质氧化及风味成分变化[J].中国酿造,2022,41(11):120-126.
[18] 封莉,邓绍林,黄明,等.脂肪酶对中式香肠脂肪降解、氧化和风味的影响[J].食品科学, 2015,36(1):51-58.
[19] MULTARI S, MARSOL-VALL A, HEPONIEMI P, et al. Changes in the volatile profile, fatty acid composition and other markers of lipid oxidation of six different vegetable oils during short-term deep-frying [J]. Food Research International, 2019, 122: 318-329.
[20] DOMÍNGUEZ R, PATEIRO M, GAGAOUA M, et al. A comprehensive review on lipid oxidation in meat and meat products [J]. Antioxidants, 2019, 8(10): 429.
[21] VILJANEN K, KIVIKARI R, HEINONEN M. Protein−lipid interactions during liposome oxidation with added anthocyanin and other phenolic compounds [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2004, 52(5): 1104-1111.
[22] JIN G, ZHANG J, YU X, et al. Lipolysis and lipid oxidation in bacon during curing and drying–ripening [J]. Food Chemistry, 2010, 123(2): 465-471.
[23] QI B, ZHANG Q, SUI X, et al. Differential scanning calorimetry study-assessing the influence of composition of vegetable oils on oxidation [J]. Food Chemistry, 2016, 194: 601-607.
[24] SHAKOOR A, ZHANG C, XIE J, et al. Maillard reaction chemistry in formation of critical intermediates and flavour compounds and their antioxidant properties [J]. Food Chemistry, 2022, 393: 133416.
[25] GAO P, XIA W, LI X, et al. Optimization of the Maillard reaction of xylose with cysteine for modulating aroma compound formation in fermented tilapia fish head hydrolysate using response surface methodology [J]. Food Chemistry, 2020, 331: 127353.
[26] TIKK K, HAUGEN J, ANDERSEN H J, et al. Monitoring of warmed-over flavour in pork using the electronic nose-correlation to sensory attributes and secondary lipid oxidation products [J]. Meat Science, 2008, 80(4): 1254-1263.
[27] 杨海华,胡佳慧,郑华,等.高温对灰鹅液油食用安全性及风味物质的影响[J].中国油脂,2023,48(7):23-28.
[28] WANG L, SUN X, HUANG G, et al. Conjugation of soybean protein isolate with xylose/fructose through wet-heating Maillard reaction [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2018, 12(4): 2718-2724.
[29] HOA V B, CHO S, SEONG P, et al. Quality characteristics, fatty acid profiles, flavor compounds and eating quality of cull sow meat in comparison with commercial pork [J]. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences, 2020, 33(4): 640-650.
[30] CALKINS C R, HODGEN J M. A fresh look at meat flavor [J]. Meat Science, 2007, 77(1): 63-80.
[31] LU F, KUHNLE G K, CHENG Q. Vegetable oil as fat replacer inhibits formation of heterocyclic amines and polycyclic aromatic hydrocarbons in reduced fat pork patties [J]. Food Control, 2017, 81: 113-125.
[32] 苏晓霞,郭斐,黄一珍,等.精炼过程对菜籽油风味成分的影响[J].中国油脂,2019,44(3):41-47.
[33] 仲琴,薛寒,楼展展,等.压榨菜籽油加速氧化过程挥发性成分变化分析[J].食品工业科技,2021,42(21):91-99.
[34] 郑美玉,张天宇,聂强胜,等.不同市售牛油的风味物质及品质与组成对比研究[J/OL].中国油脂, 1-12[2024-09-02].
[35] XU Y, CHEN Q, LEI S, et al. Effects of lard on the formation of volatiles from the Maillard reaction of cysteine with xylose [J]. J Sci Food Agric, 2011, 91(12): 2241-2246.
[36] 杨峥,张玲,都荣强,等.氧化及未氧化脂肪对热反应水溶性产物的影响[J].食品科学技术学报,2015,33(2):34-41.