

真空辅助浸泡对陈粳米饭风味的影响

王逸欢¹, 夏书芹^{*1}, 张晓鸣¹, 王兴伟¹, 李晶², 龚艳玲²

(1. 江南大学食品学院, 江苏 无锡 214122; 2. 佛山市顺德区美的电热电器制造有限公司, 广东 佛山 528311)

摘要: 电饭煲热处理可赋予米饭怡人的特征风味, 但其在改善陈粳米饭的气味品质方面仍存在一定的局限。本研究借助气相色谱-嗅闻-质谱和气味活性值确定了造成陈粳米饭不良气味的特征化合物。采用气-质联用对不同条件浸泡处理的陈粳米饭气味特性进行分析, 并结合脂肪酶活力、游离脂肪酸组成、过氧化值和丙二醛含量的变化剖析真空辅助浸泡对陈粳米脂质氧化程度的影响。结果表明, 采用 50 °C 真空辅助浸泡处理 10 min 可以通过抑制米粒中脂肪酶的催化活性, 调控脂质氧化的进程, 使己醛、(E)-2-庚烯醛、壬烯醛、(E, E)-2, 4-癸二烯醛等关键陈味物质的含量分别下降了 12.4%、4.2%、100%、53.9%, 显著改善了电饭煲蒸煮陈粳米饭的气味品质。

关键词: 真空浸泡; 陈粳米; 溶氧量; 脂质氧化; 气味

中图分类号: TS 213.3 文章编号: 1673-1689(2023)06-0013-07 DOI: 10.3969/j.issn. 1673-1689.2023.06.003

Effect of Vacuum-Assisted Soaking on Flavor of Aged *Japonica* Rice

WANG Yihuan¹, XIA Shuqin^{*1}, ZHANG Xiaoming¹, WANG Xingwei¹, LI Jing², GONG Yanling²

(1. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214000, China; 2. Foshan Shunde Midea Electric Appliance Manufacturing Co., Ltd., Foshan, Guangdong 528311, China)

Abstract: Heat treatment in electric cookers can give rice pleasant characteristic flavors, but there are still some limitations in improving the odor quality of aged *Japonica* rice. The characteristic compounds causing the off-flavor of aged *Japonica* rice were determined by gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry and odor activity value. Gas chromatography-mass spectrometry was used to analyze the odor characteristics of aged *Japonica* rice with different soaking treatments. The effect of vacuum-assisted soaking on lipid oxidation degree of aged *Japonica* rice was investigated by analyzing the changes of lipase activity, composition of free fatty acid, peroxide value, and malondialdehyde content. The results showed that vacuum-assisted soaking at 50 °C for 10 min could regulate the process of lipid oxidation by inhibiting the catalytic activity of lipase in rice grains, and reduce the accumulated content of key aged flavor compounds such as hexanal, (E)-2-heptenal, nonanal and (E, E)-2, 4-decadienal by 12.4%, 4.2%, 100% and 53.8%, respectively, significantly improving the odor quality of aged *Japonica* rice cooked with an electric rice cooker.

Keywords: vacuum soaking, aged *Japonica* rice, dissolved oxygen, lipid oxidation, odor

收稿日期: 2021-03-05

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0400801)。

* 通信作者: 夏书芹(1979—), 女, 博士, 教授, 博士研究生导师, 主要从事食品加工与配料的研究。E-mail: sqxia@jiangnan.edu.cn

稻谷是我国的主要粮食作物之一,从战略和防灾等国家粮食安全角度出发,其需要一定的储藏量。然而稻谷具有不耐储藏的特性,易在储藏过程中发生陈化^[1],影响其食用品质。尤其明显的是,随着储藏时间的延长,蒸煮米饭的香味消失、出现令人不悦的糠酸味^[2]。因此,陈粳米饭的气味品质改善研究对满足人们的生活需求和减少大米陈化造成的经济损失具有重要意义。

在大米蒸煮过程中,脂肪酶水解脂质产生游离脂肪酸^[3],游离脂肪酸通过酶促氧化或自动氧化,进一步降解形成氢过氧化物和小分子羰基化合物^[4],而高浓度挥发性羰基化合物是形成陈米不良风味的主要原因^[5]。此外,也有研究表明,脂质氧化降解产生小分子醛类物质是陈米糠酸味的主要来源^[6]。浸泡吸水是电饭煲蒸煮米饭的重要环节,也是陈粳米不良风味前体物质及主要陈味化合物生成和积累的关键阶段。在该过程中,米粒的脂肪氧化程度与浸泡温度、环境的溶氧量以及米粒的水分含量相关^[7]。前期研究表明,当电饭煲吸水阶段的温度为 50 ℃时,能够较好地抑制陈米内源酶活力,减缓脂质氧化进程,避免挥发性羰基化合物的大量积累,降低陈粳米饭的糠酸味,但与其与新米饭的气味品质相比仍然存在一定程度差异。真空辅助处理是控制体系中活性氧含量的有效手段,也是调控脂肪氧化进程的关键步骤。有研究发现,使用真空低温加热鸡胸肉,有效抑制了鸡胸肉的脂肪氧化速率^[8];采用真空腌渍鲭鱼,负压所特有的低氧分压能有效抑制鲭鱼组胺的产生和脂肪的氧化^[9]。然而,关于电饭煲真空辅助浸泡参数与米饭风味改善之间的关系以及真空辅助浸泡过程中脂肪氧化程度的变化对陈米风味改良的作用还未见报道。因此,基于对陈米脂质氧化程度的控制,在电饭煲烹饪米饭吸水阶段采用真空辅助处理,旨在进一步延缓陈米的脂质氧化进程,改善陈粳米饭的气味品质,提高其与新米饭气味品质的相似性。

作者通过感官评价、电子鼻以及气质联用等分析手段,剖析真空辅助浸泡处理不同时间对陈粳米饭气味品质的影响。从调控陈粳米脂肪酶活力、延缓脂质氧化进程、减少引起陈米糠酸味前体物质生成的角度,阐明电饭煲烹饪米饭吸水阶段真空处理提升陈粳米饭气味品质的原因,为陈米风味改良和电饭煲去陈蒸煮模式的设计提供指导。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

新粳米、一年陈粳米(秋田小町):吉林丰裕机械种植专业合作社;1,2-二氯苯(色谱纯)、C13 烷酸(色谱纯):美国 Sigma-Aldrich 公司;橄榄油(分析纯):上海阿拉丁试剂有限公司;氢氧化钾、硫代巴比妥酸、磷酸氢二钠、磷酸二氢钾、酚酞、亚硫酸钠、浓硫酸、无水甲醇、乙酸、甲基叔丁基醚、正己烷、无水乙醚、无水乙醇、95%乙醇(分析纯):国药集团化学试剂有限公司。

MB-FS4089 型电饭煲(可调吸水阶段浸泡温度、时间;可设置真空度 44 kPa);佛山市顺德区美的电热电器制造有限公司;THZ-92A 气浴恒温振荡器:上海博迅实业有限公司医疗设备厂;SCIONSQ-456-GC 气相色谱-质谱联用仪:美国布鲁克公司;QP2010 型气相色谱-质谱-嗅闻联用仪:岛津公司;DVB/CAR/PDMS 萃取头:美国 Supelco 公司;782 Oxygen Meter:苏格兰 Strathkelvin 仪器有限公司;GC-2030AF 气相色谱仪:日本岛津公司;Heracles II 型快速气相色谱电子鼻:法国 Alpha MOS S.A.公司。

1.2 实验方法

1.2.1 米饭蒸煮工艺 称取 300 g 新米或陈米,用适量水淘洗 2 次,米水质量比为 1:1.45,基于 MB-FS4089 型电饭煲调整浸泡温度为 50 ℃,同时分别设置常压浸泡 10 min 以及真空(44 kPa)辅助浸泡 10、20、30 min 进行处理后,再采用同样的程序对米饭进行蒸煮。

1.2.2 挥发性风味物质的分析 称取不同浸泡条件蒸煮后的 10.00 g 米饭与 30.00 g 饱和氯化钠溶液混合,加入 20 μL 的 2,4,6-三甲基吡啶(0.017 μg/μL)作为内标并匀浆,取 8.00 g 浆液于 20 mL 顶空瓶中,加入搅拌子,然后密封,70 ℃水浴萃取。气相色谱(GC)参数:DB-WAX 弹性毛细管柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm);分流比为 1:1;载气(He)的流量为 0.8 mL/min。质谱(MS)参数:离子源温度为 250 ℃;传输线温度为 250 ℃;发射电流为 80 μA;检测器电压为 1 000 eV;电子能量为 70 eV。

1.2.3 气味活性值(OAV)的计算 使用以下公式计算 OAV:

$$A = \frac{C}{T}$$

式中, A 为挥发性风味物质的气味活性值 OAV; C 是米饭中挥发性风味化合物的质量分数, $\mu\text{g}/\text{hg}$; T 是该化合物的气味阈值, $\mu\text{g}/\text{hg}$ 。

1.2.4 米饭关键陈味物质的鉴定 基于气相色谱-嗅闻-质谱联用(GC-O-MS)对不同条件蒸煮米饭中特征气味成分进行检测,在实验过程中记录相应气味物质的嗅闻时间和气味描述。GC 条件与 1.2.2 中色谱条件相同,样品经色谱柱分离后,流出物在 MS 及嗅闻器间被 1:1 分流,分别检测;MS 条件与 1.2.2 中质谱参数相同。

1.2.5 脂肪酶活力的测定 在电饭煲烹饪米饭浸泡吸水阶段结束后取样,根据 GB/T 5523—2008《粮油检验 粮食、油料的脂肪酶活动度的测定》的方法测定米粒脂肪酶活力,脂肪酶活力用中和 1 g 试样(干基)中游离脂肪酸所消耗氢氧化钾的毫克数表示。同时根据 GB/T 5497《粮食、油料检验 水分测定法》测定米粒水分质量分数。

1.2.6 溶氧量测定 在电饭煲烹饪米饭浸泡吸水阶段结束后,吸取 3 mL 浸泡液于反应器中,用校准后的 782 Oxygen Meter 进行测定。以质量分数 5% 亚硫酸钠溶液为零氧溶液,以鼓泡通氧 10 min 的蒸馏水为满氧溶液对仪器进行校准。

1.2.7 游离脂肪酸的测定 采用氨基柱(NH_2SPE)分离脂肪酸,并采用气相色谱对游离脂肪酸进行分析。

将不同条件浸泡后的米粒沥干后研磨成粉,取 20 g 米粉,加入 100 mL 石油醚于 150 r/min 振摇 3 h 后过滤,旋转蒸发蒸干溶剂,用 4 mL 正己烷复溶后,过氨基柱(NH_2SPE),加入 2 mL 二氯甲烷-异丙醇(体积比 2:1)洗脱甘油酯 2 次。再用 10 mL 体积分数 2% 的乙酸-甲基叔丁基醚洗脱游离脂肪酸,氮吹至无液体。在氮吹后的试管中加入 2 mL 甲醇溶液和 0.5 mL 浓硫酸,60 ℃ 水浴 30 min,冷却至室温,加入 2 mL 正己烷和 3 mL 水涡旋混匀,分层后吸取上层油相 1 mL,待气相色谱检测,以 C13 烷酸(2.001 g/L)为内标。气相色谱参数:DB-WAX 弹性毛细管柱;程序升温:100 ℃ 持续 3 min,以 10 ℃/min 升高至 180 ℃,持续 1 min,再以 3 ℃/min 升高至 240 ℃,持续 15 min;分流比为 10:1;燃气(H_2)流量为 47 mL/min;载气(N_2)流量为 3 mL/min。

1.2.8 过氧化值(POV)测定 采用分光光度法,在电饭煲烹饪米饭浸泡吸水阶段结束后取样,根据

GB/T 5009.7—2016《食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定》的方法进行分析。

1.2.9 丙二醛(MDA)浓度测定 将不同条件浸泡后的米粒沥干后研磨成粉,称取 5.00 g 米粉于研钵,加入 10 mL 体积分数为 10% 的三氯乙酸研磨后,4 000 r/min 离心 10 min。吸取 2 mL 上清液(以蒸馏水为空白),加入 2 mL 质量分数 0.6% 的硫代巴比妥酸溶液,混匀。沸水浴 15 min 后冷却至室温,分别于 450、532、600 nm 测定吸光值,计算丙二醛浓度。

$$C=6.45 \times (A_{532}-A_{600})-0.56A_{450}$$

式中: C 为丙二醛浓度, $\mu\text{mol}/\text{L}$; A_{532} 、 A_{600} 、 A_{450} 分别为 532、600、450 nm 的吸光值。

1.2.10 米饭感官评价 参照 GB/T 15682—2008 筛选米饭感官评定小组成员并对不同浸泡条件处理后蒸煮的米饭进行感官评定。感官评分标准在 GB/T 15682—2008 的基础上根据陈粳米饭的特点进行调整,如表 1 所示,以气味特性为主,以新米烹饪的米饭为对照(香气 10 分,糠酸味 0 分)。

表 1 米饭气味品质感官评定

Table 1 Sensory evaluation of rice flavor quality

香味(10分)	糠酸味(10分)
具有浓郁的米饭特有香气: 7~10分	米饭有较浓糠酸味:7~10分
米饭香味寡淡:3~6分	米饭有较淡糠酸味:3~6分
米饭失去清香:0~2分	米饭无糠酸味:0~2分

1.2.11 米饭气味特性分析 采用快速气相色谱电子鼻(Heracles II)进行气味特性分析。称取蒸煮后的米饭样品 4 g 于 10 mL 顶空瓶中,迅速加盖密封待测,每个参数条件设置 4 组平行。色谱柱:DB-5 和 DB-1701(L.D:10 m×0.18 mm);检测器:氢火焰检测器;顶空萃取温度 60 ℃,顶空时间 600 s;进样口温度 250 ℃,进样速度 500 $\mu\text{L}/\text{s}$,进样量 500 μL ;捕集温度 45 ℃,解吸温度 250 ℃;起始柱温为 50 ℃,保持 2 s 后以 1 ℃/s 升至 80 ℃,然后 3 ℃/s 升至 120 ℃,保持 21 s 后以 1.5 ℃/s 升至 250 ℃,保持 60 s;检测器温度 260 ℃,采集时间 100 s。

1.2.12 数据处理 采用 Origin 2018 和 Excel 2019 对实验数据进行整理及图像绘制,实验结果表示为平均值±标准偏差,并采用 SPSS 22 对数据进行单因素方差分析,设差异显著性水平为 0.05。

2 结果与分析

2.1 陈粳米饭不良风味物质鉴定

在大米陈化过程中,挥发性风味物质种类及含量呈现上升趋势,其中,脂肪氧化产生的醛类的含量与大米风味品质存在显著的负相关性^[10]。为比较新、陈粳米饭挥发性风味物质的差异,明确陈米气

味劣变的原因,使用 GC-MS 对其挥发性风味物质的种类及含量进行分析,并采用 GC-O-MS 对新、陈粳米饭的气味特征进行鉴定。气味活性值(OAV)为气味化合物浓度与阈值的比值, $OAV>1$ 的物质对米饭气味具有重要贡献^[11]。陈粳米饭中 $OAV>1$ 及其气味描述与新米饭存在明显差异的主要挥发性风味见表 2。

表 2 新、陈粳米饭中差异性挥发性风味物质的 OAV 值及气味特征描述

Table 2 Odor activity values (OAV) and odor description characteristics of different volatile flavor compounds in fresh and aged Japonica rice

化合物名称	气味描述		质量分数/($\mu\text{g}/\text{hg}$)		气味活性值(OAV)	
	新米饭	陈米饭	新米饭	陈米饭	新米饭	陈米饭
(E,E)-2,4-癸二烯醛	油脂味	油脂酸败味	0.17	1.04	79.81	194.29
壬烯醛	香甜味	油脂味	1.07	1.89	133.34	236.25
2-辛烯醛	焦香味	臭虫味	1.60	2.23	5.33	7.43
壬醛	清香	腊味	5.93	8.84	59.30	88.40
(E)-2-庚烯醛	米粥清香	焦糊味	1.14	2.03	0.87	1.56
己醛	青草味	脂肪味	2.32	11.32	5.15	25.16

通过比较发现,新米饭中壬烯醛、2-辛烯醛、壬醛、(E)-2-庚烯醛、己醛的气味表现为香甜、焦香、清香、米粥清香和青草味等香气特性,但其在陈米饭中,则表现为油脂味、臭虫味、腊味、焦糊味、脂肪味等不良气味,且该 5 种物质在陈米饭中的 OAV 值明显高于新米饭。这可能是因为某些脂肪氧化产生的醛类物质在低浓度时呈现芳香气息,而在较高浓度时会呈现令人不悦的气味^[12]。此外,(E,E)-2,4-癸二烯醛在新、陈米饭中都有油脂的味道,而其在陈米饭中含量更高,加重了其不良风味,使其呈现油脂酸败味,因此也是对陈米饭风味造成不良影响的重要物质。

2.2 真空辅助浸泡处理时间对陈粳米饭挥发性风味物质的影响

米饭气味轮廓的形成与挥发性风味化合物的组成和含量密切相关^[13],为明晰真空辅助浸泡时间与陈粳米饭气味特性的关系,采用气-质联用对陈粳米饭的挥发性风味物质进行测定,并对关键不良风味物质的质量分数进行分析,结果见图 1。

由图 1 可知,相比于常压浸泡,真空辅助浸泡 10 min 处理后蒸煮的米饭中己醛、(E)-2-庚烯醛、壬烯醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛的质量分数明显降低,且下降的比例分别为 12.4%、4.2%、100%、53.9%,这表明在真空条件下浸泡 10 min 能够有效

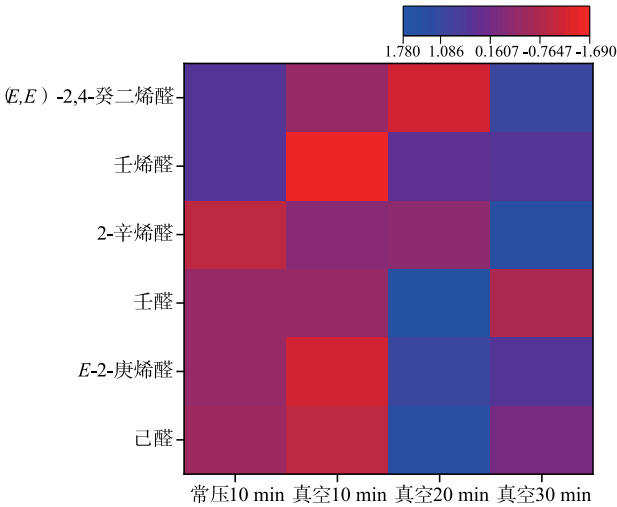


图 1 不同条件浸泡处理后陈粳米饭挥发性风味物质质量分数热图

Fig. 1 Heat map of flavor compounds in aged Japonica rice after soaking under different conditions

抑制陈粳米不良风味物质的产生。然而,真空辅助浸泡 20 min 后米饭中己醛、(E)-2 庚烯醛、壬醛的质量分数以及真空辅助浸泡 30 min 后 2-辛烯醛、(E)-2-庚烯醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛的质量分数明显高于常压和真空浸泡处理 10 min。这可能是因为浸泡阶段虽然采用真空处理降低了环境溶氧量,使酶活受到抑制,但未使脂肪酶彻底失活,延长浸泡时间反而会导致不良风味前体物质大量积累,在

后续蒸煮过程中裂解产生高浓度小分子醛类物质。

2.3 基于脂质氧化链分析真空处理对陈粳米饭气味品质的影响

电饭煲吸水阶段温度较低、环境水分较多,易促进脂肪酶催化活性,产生游离脂肪酸^[14],其中不饱和和游离脂肪酸发生酶促氧化或自动氧化产生氢过

氧化物,该物质不稳定,易自发或受到活性氧攻击分解生成小分子羰基物质^[15],引起不良风味。为考察吸水阶段真空辅助浸泡处理对陈粳米脂肪酶活力及脂肪氧化的影响,对不同条件浸泡后的陈米米粒及浸泡液进行分析,结果见表3。

表3 不同条件浸泡处理后陈粳米粒中的脂肪酶活力与水分质量分数及浸泡液中的溶氧量

Table 3 Lipase activity, moisture content, and dissolved oxygen content in soaking liquid of aged *Japonica* rice grain after soaking under different conditions

浸泡方式	脂肪酶活力/(mg/g)	水分质量分数/%	溶氧量/(mg/L)
常压 10 min	10.26±0.49 ^a	26.99±0.09 ^c	11.00±0.23 ^a
真空 10 min	6.58±0.66 ^b	28.37±0.12 ^b	9.41±0.19 ^b
真空 20 min	8.74±0.69 ^a	30.19±0.27 ^a	8.53±0.20 ^c
真空 30 min	9.61±0.08 ^a	29.73±0.28 ^a	8.60±0.16 ^c

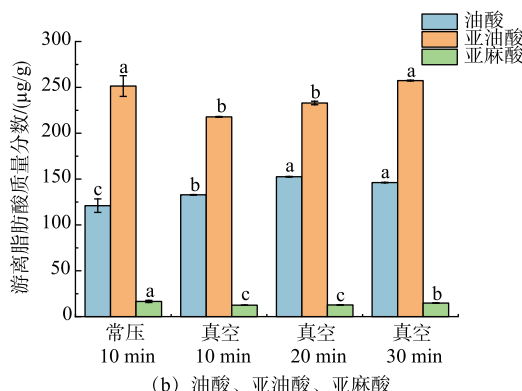
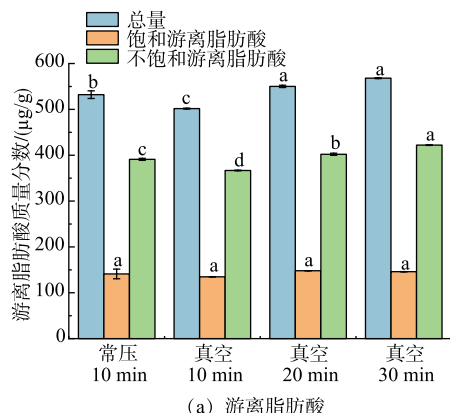
注:表中同一列具有不同字母的数据之间存在显著差异($P<0.05$)

脂肪酶是脂肪代谢中的第一限速酶,可以水解大米中的脂质产生游离脂肪酸,其催化活性与水分含量和环境溶氧量有关^[16]。从表3可知,与常压浸泡相比,真空辅助浸泡10 min处理能够显著抑制脂肪酶的活力($P<0.05$);然而,进一步延长真空辅助浸泡处理时间至20 min后,脂肪酶活力却显著增大($P<0.05$),这会导致脂肪酶解程度加剧,游离脂肪酸的积累量也相应增大,其在后续蒸煮中氧化降解产生较多的不良风味化合物,不利于陈粳米饭风味的改善。结合米粒水分质量分数和环境溶氧量分析可知,真空辅助浸泡处理10 min后脂肪酶活力的降低主要与环境溶氧量的降低有关。延长真空浸泡处理时间后,环境溶氧量降低至极限值,此时米粒中的水分质量分数成为影响脂肪酶活力的主要因素,长时间的浸泡使米粒表面产生裂缝^[17],导致更多的水

分渗透进入米粒内部,提高了米粒中的脂肪酶活性,加快了米粒的脂肪氧化进程。

游离脂肪酸是重要的风味前体物质,同时也可以进一步降解并产生小分子挥发性风味物质,对米饭的气味品质具有重要影响。为进一步研究电饭煲吸水阶段真空浸泡处理对陈米饭风味改良的原因,对不同条件下浸泡处理后陈米粒中的游离脂肪酸组成和质量分数进行分析,结果见图2。

由图2(a)可知,真空辅助浸泡10 min处理游离脂肪酸总量最低,与脂肪酶活力结果一致,表明在此条件浸泡能通过抑制脂肪酶活力,减少游离脂肪酸的产生。不饱和游离脂肪酸易氧化分解,是大米中发生脂质氧化的主要物质。油酸、亚油酸和亚麻酸是大米中含量较高的不饱和游离脂肪酸,也是氧化生成醛类的主要前体物质,不同浸泡处理后米



图中具有不同字母的数据之间存在显著差异($P<0.05$)

图2 不同条件浸泡处理陈粳米粒中游离脂肪酸的组成及质量分数

Fig. 2 Composition and content of free fatty acids of aged *Japonica* rice grain after soaking under different conditions

粒中这3种脂肪酸的质量分数见图2(b)。与常压浸泡相比,真空辅助浸泡处理后油酸积累量有不同程度升高($P<0.05$),表明油酸氧化降解产生壬醛^[18]。结合图1分析可知,真空辅助浸泡处理后壬醛质量分数的升高可能与其浸泡阶段油酸积累量较高有关。而亚油酸的质量分数与脂肪酶活力变化趋势一致,其中真空浸泡10 min 积累量最低,随着浸泡时间的延长,其积累量又呈现升高趋势。亚油酸可降解产生(*E,E*)-2,4-癸二烯醛、(*E*)-2-庚烯醛、壬烯醛和己醛^[19],而亚麻酸可降解产生(*E*)-2-丁烯醛、(*E*)-2-戊烯醛、(*E*)-2-己烯醛^[18]。因此,真空辅助浸泡处理10 min 后关键陈味物质(*E,E*)-2,4-癸二烯醛、(*E*)-2-庚烯醛、壬烯醛和己醛质量分数的降低与其在浸泡阶段亚油酸积累量降低有关。而延长真空辅助浸泡时间至30 min 后,其亚油酸质量分数显著增大($P<0.05$),可能是引起该条件下蒸煮陈米饭中不良风味化合物大量积累的原因。

过氧化值(POV)是对脂肪一级氧化产物的衡量指标,可指示脂肪氧化的初级程度^[20];丙二醛(MDA)是脂质氧化二级产物,其含量是反映脂质氧化程度的重要指标。为研究真空辅助浸泡处理不同时间后陈梗米脂质氧化程度的差异,对其 POV 和 MDA 进行分析,结果见表4。

由表4可知,真空辅助浸泡10 min 处理 POV 和 MDA 均最低,这表明该条件能够显著减缓陈米粒的脂质氧化进程。在本研究中,不同条件浸泡的陈米粒均未检测到导致游离脂肪酸氧化降解的脂肪氧合酶,因此推测在电饭煲吸水阶段浸泡过程中,米粒中的游离脂肪酸主要以自动氧化的形式进行氧化降解。真空浸泡10 min 时脂肪酶活力受到抑

制,使游离脂肪酸的积累量降低,同时米粒中的水分质量分数和浸泡液中溶氧量都较低,进一步抑制了游离脂肪酸的氧化分解,使其 POV 和 MDA 值降低。而延长真空辅助浸泡时间后,脂肪酶活力升高,使此阶段积累的游离脂肪酸总量增大。此外,在长时间浸泡过程中米粒中游离脂肪酸进一步发生氧化降解,导致 POV 和 MDA 值升高。因此,真空辅助浸泡10 min 处理可以有效延缓吸水阶段陈米粒的脂肪氧化进程,降低脂肪氧化产物的积累。

表4 不同条件浸泡处理陈梗米粒中脂质氧化状况

Table 4 Lipid oxidation status of aged Japonica rice grain after soaking under different conditions

浸泡方式	过氧化值/ ($\times 10^{-2}$ meq/kg)	丙二醛/($\mu\text{mol/kg}$)
常压 10 min	12.03 $\pm$ 0.36 ^a	0.28 $\pm$ 0.01 ^{ab}
真空 10 min	9.92 $\pm$ 0.28 ^b	0.26 $\pm$ 0.04 ^b
真空 20 min	11.88 $\pm$ 1.02 ^a	0.28 $\pm$ 0.01 ^{ab}
真空 30 min	12.56 $\pm$ 0.33 ^a	0.29 $\pm$ 0.01 ^a

注:表中同一列具有不同字母的数据之间存在显著差异($P<0.05$)

2.4 基于感官评定和电子鼻分析研究真空辅助浸泡处理对陈梗米饭气味品质的影响

为了明确真空辅助浸泡处理对陈梗米饭气味品质的改良作用,揭示真空辅助浸泡对脂肪氧化程度的影响及其与陈米气味改良的相关性,采用感官评价及电子鼻分析评价不同真空浸泡参数对陈梗米饭气味品质的改良效果,结果见图3。

图3(a)感官评价结果显示,与常压浸泡相比,真空辅助浸泡处理10 min 显著降低了陈梗米饭的糠酸味,提升了气味品质,表明适当的真空辅助浸泡可调控米粒脂肪氧化进程,降低陈味化合物的生

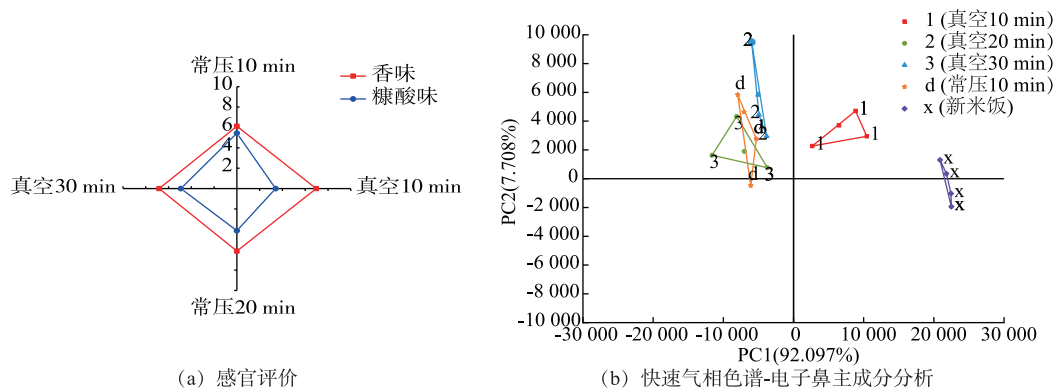


图3 不同条件浸泡处理后蒸煮陈梗米饭的气味品质

Fig. 3 Odor quality of aged Japonica rice after soaking under different conditions

成和积累,实现改善陈米饭风味的目的。电子鼻分析能客观地评价不同样品的香气轮廓相似性,避免人为因素的干扰。从图 3(b)可以看出,第一主成分(PC1)的方差贡献率为 92.10%,第二主成分(PC2)的方差贡献率为 7.71%,二者累计方差贡献率达到 99.81%,代表了样品绝大部分信息,表明该模型能较全面地解释不同浸泡处理后蒸煮米饭间的风味轮廓差异。其中主成分的贡献率越大,表示其能够反映样品越多的信息^[21]。由图 3(b)可以看出,浸泡吸水阶段真空处理 10 min 后蒸煮的陈粳米饭与新米饭的整体风味最为接近,表明真空辅助浸泡处理 10 min 能有效抑制陈粳米饭糠酸味的产生,提高陈米饭与新米饭的风味相似性。

3 结 语

通过对新、陈粳米饭中挥发性风味物质的贡献

程度和气味特性进行分析,确定了脂肪氧化降解产生的 (*E,E*)-2,4-癸二烯醛、壬烯醛、2-辛烯醛、壬醛、(*E*)-2-庚烯醛、己醛是对陈粳米饭不良风味具有重要贡献的风味物质。结合米粒的脂肪氧化程度及米饭的挥发性风味物质分析发现,真空辅助浸泡处理 10 min 可以降低浸泡液中溶氧量、调控陈米脂肪酶活力、延缓浸泡过程中米粒脂肪氧化降解的进程来减少脂质氧化产物的生成和积累,从而使在该条件下蒸煮的陈粳米饭中关键陈化风味物质的质量分数明显降低。感官评价和电子鼻分析结果进一步表明,真空辅助浸泡处理 10 min 后蒸煮的陈米饭的气味品质得到了显著提高,与新米饭的气味轮廓相似性最高,实现了电饭煲烹饪对陈粳米饭气味品质的提升,同时也为电饭煲去陈蒸煮模式的设计提供了依据。

参考文献:

- [1] 张玉荣,王游游,刘敬婉. 稻谷的陈化对其米粉制品品质的影响[J]. 河南工业大学学报,2018,39(5):1-7.
- [2] 满忠秀,林颖,康文翠,等. 不同储藏期大米蒸煮气味的检测及可视化分析[J]. 中国食品学报,2018,18(1):285-291.
- [3] 王毅,罗自生. 糙米储藏过程中品质变化研究进展[J]. 食品安全质量检测学报,2017,8(3):767-772.
- [4] 孔晓雪,楼宵玮,李新福,等. 外源酶制剂在传统腊肉现代化工艺改造中的应用[J]. 食品与生物技术学报,2020,39(5):74-81.
- [5] 曾长庚,黄建运,叶大庆. 大米陈化研究进展[J]. 粮食储藏,2017,46(4):45-50.
- [6] 曹欣欣,王莉娜,盛文杰,等. 麦芽、大米中游离脂肪酸检测及其对麦汁中醛类化合物的影响[J]. 中外酒业,2017,23:31-41.
- [7] MEXIS S F, KONTOMINAS M G. Effect of γ -irradiation on the physicochemical and sensory properties of hazelnuts (*Corylus avellana* L.)[J]. *Radiation Physics Chemistry*, 2009, 78(6):407-413.
- [8] 刘敏. 真空低温加热对鸡胸肉品质及脂肪与蛋白氧化影响的研究[D]. 烟台:烟台大学,2016.
- [9] 杨鹏. 多脂红身鱼类鲭鱼在腌渍与干制加工中的品质变化及其控制技术的研究[D]. 杭州:浙江工业大学,2010.
- [10] 姜平,张晖,王立,等. 大米经不同包装方式贮藏后蒸煮风味物质的变化[J]. 食品与生物技术学报,2012,31(10):1039-1045.
- [11] LIU H, WANG Z, ZHANG D, et al. Characterization of key aroma compounds in Beijing roasted duck by gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry, odor-activity values, and aroma-recombination experiments [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67:5847-5856.
- [12] YANG D, ROBERT L, KYU-SEONG L, et al. Comparison of odor-active compounds from six distinctly different rice flavor types[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2008, 56:2780-2787.
- [13] 梁静,杨冬梅,武建勇,等. 粳砂稻谷各组织香气成分分析[J]. 食品发酵与工业,2014,40(1):202-206.
- [14] 李莉,谢骏琦,时优,等. 高温高湿条件下纳米包装材料对大米酶活性及成分的影响[J]. 食品科学,2016,37(24):278-284.
- [15] 王玉良. 贮藏因素和加工工艺对山核桃脂肪氧化的影响[D]. 南京:南京农业大学,2011.
- [16] 吴煜樟,卢红梅,陈莉,等. 氧气含量与光照对薏仁米储藏中脂肪氧化的影响[J]. 现代食品科技,2019,35(5):109-116.
- [17] ZHU L, GANG C. Effect of soaking and cooking on structure formation of cooked rice through thermal properties, dynamic viscoelasticity, and enzyme activity[J]. *Food Chemistry*, 2019, 289:616-624.
- [18] 杜乐. 油脂中 C18 不饱和脂肪酸氧化产物的分析[D]. 天津:天津科技大学,2019.
- [19] 王建辉,王秀,陈奇,等. 氧化分解过程中亚油酸组成成分及挥发性物质的变化[J]. 食品与机械,2016,32(5):5-10.
- [20] HUA Y F, HUANG Y R, QIU A Y. Soybean protein aggregation induced by lipoxygenase catalyzed linoleic acid oxidation[J]. *Food Research International*, 2007, 39(2):240-249.
- [21] 张鹏,李江阔,陈绍慧. 电子鼻对不同贮藏/货架期甜柿判别分析[J]. 食品与生物技术学报,2015,34(4):390-395.