

基于 GC-IMS 分析碾减率对籼米米饭挥发性物质的影响

Effect of degree of milling on volatile compounds of indica rice after cooking

吴永康¹ 林亲录¹ 蒋志荣² 陈 辰²

WU Yong-kang¹ LIN Qin-lu¹ JIANG Zhi-rong² CHEN Chen²

何益荣³ 李江涛¹ 程云辉⁴ 丁玉琴¹

HE Yi-rong³ LI Jiang-tao¹ CHENG Yun-hui⁴ DING Yu-qin¹

(1. 中南林业科技大学稻谷及副产物深加工国家工程实验室, 湖南 长沙 410004;

2. 长沙荣业智能制造有限公司, 湖南 长沙 410000; 3. 湖南郴州粮油机械有限公司,

湖南 郴州 423000; 4. 长沙理工大学食品与生物工程学院, 湖南 长沙 410114)

(1. National Engineering Laboratory for Rice and By-product Deep Processing, Central South University of Forestry and Technology, Changsha, Hunan 410004, China; 2. Changsha Cherong Intelligent Manufacturing Co., Ltd., Changsha, Hunan 410000, China; 3. Hunan Chenzhou Grain & Oil Machinery Co., Ltd., Chenzhou, Hunan 423000, China; 4. School of Food Science and Bioengineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha, Hunan 410114, China)

摘要:目的:研究碾减率对籼米米饭挥发性物质组成的影响。方法:以籼稻“隆科早 1 号”为原料制备理想碾减率为 0%~14% 的籼米,同时采用气相色谱—离子迁移色谱(GC-IMS)测定米饭的挥发性物质,并根据指纹图谱结合多元统计分析籼米米饭中挥发性物质差异。结果:当碾减率为 8% 时,籼米米饭的感官评分最高。米饭中挥发性物质主要是醛类、酮类、醇类及少量的呋喃类等。大部分挥发性物质在碾减率为 0%~6% 的籼米米饭中含量较高;当碾减率为 10%~14% 时,米饭中的挥发性物质组成无明显差异。采用正交偏最小二乘法判别分析(OPLS-DA)筛选出 18 种特征标志物(VIP>1),其中,2-甲基-1-丁醇、乙酸异戊酯、异戊醇、2-戊烯醛、3-甲基丁酸、2-乙基呋喃等可以作为“隆科早 1 号”不同碾减率大米米饭的差异性挥发性物质。结论:碾磨可以降低糙米米饭中挥发性物质含量,当碾减率为 8% 时,米饭具有良好的气味和感官品质。

关键词:米饭;碾减率;GC-IMS 技术;挥发性风味成分

Abstract: **Objective:** This study aimed to investigate the effect of milling rate on the composition of volatile substances in indica rice. **Methods:** Indica rice with the ideal milling rate of 0%~14% was prepared from indica rice "Longkezaol 1", and the effect of milling degree on the sensory quality of indica rice after cooking was investigated. The volatiles of indica rice after cooking were determined by gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS). The differences of volatiles of rice with different milling rates were analyzed by fingerprinting and multivariate statistics. **Results:** The highest sensory scores were obtained for indica rice at a milling degree of 8%. The volatile substances in rice were mainly aldehydes, ketones, and some alcohols and furans. Most of the volatile components were higher in indica rice with a milling degree of 0%~6%, and there was no significant difference in the composition of volatile substances in the rice when the milling degree was 10%~14%. Among them, 2-methyl-1-butanol, isoamyl acetate, isoamyl alcohol, 2-pentenal, 3-methylbutyric acid, and 2-ethylfuran were used as the volatile substances of rice with different milling rates of "Longkezaol 1". The volatiles were found to be different in rice with different milling rates. **Conclusion:** Milling processing can reduce the volatile components content of brown rice, 8% of the milling degree can make the rice have good odor and sensory quality.

基金项目:长株潭国家自主创新示范区专项项目(编号:2018XK2007);国家自然科学基金面上项目(编号:31571874)

作者简介:吴永康,男,中南林业科技大学在读硕士研究生。

通信作者:丁玉琴(1984—),女,中南林业科技大学副教授,博士。

E-mail: suyul207@126.com

收稿日期:2021-09-26

Keywords: rice; degree of milling; GC-IMS; volatile components

目前中国大米加工行业普遍存在过度加工的现象,造成了碎米率高、营养损失严重和加工能耗高等问题^[1]。降低大米的加工精度是实现稻谷加工“节粮减损、节能降耗”的重要途径之一,但会影响大米的蒸煮特性和感官品质^[2-4]。筛选出适宜的加工精度使大米既能保留较完整的营养组分,又具备良好的蒸煮食味品质,对大米的适度加工具有重要意义^[5-8]。

挥发性物质组成是影响米饭风味的重要因素。加工精度对大米的挥发性物质组成有显著影响,从而影响米饭的感官品质^[2-3,9-10]。安红周等^[3]研究发现,提高加工精度会使香粳稻“原阳新丰 2 号”米饭中的醛类物质含量显著降低,对香气风味有重要贡献的 2-乙酰基-1-吡咯啉含量也显著降低。Mahmud 等^[10]发现当碾磨时间由 10 s 延长到 140 s 时,香米“Cheonjihyang-1-se”的碾减率由 1.3% 增加至 10.0%,其醛类物质相对含量从 35% 增加至 45%,烃类化合物含量从 29% 减少至 20%,但 2-乙酰基-1-吡咯啉含量无显著变化。这可能是因为碾减率对大米及米饭挥发性物质的影响与稻米品种有关。而有关碾减率对非香籼米米饭挥发性物质影响的研究较少^[2]。气相色谱—离子迁移谱法(GC-IMS)结合了气相色谱的高分离能力和离子迁移谱的快速响应特性,可对挥发性物质进行可视化表征^[11-13]。与气相色谱—质谱法(GC-MS)相比,GC-IMS 在大米的醇类、酮类等挥发性物质定性识别方面具有显著优势^[12-13]。目前 GC-IMS 结合多元统计分析已被广泛应用于豆腐^[14]、松茸^[15]、杨梅酒^[16]、藜麦^[17]等食品的风味物质指纹图谱、筛选特征风味物质与质量监测等领域,但其在籼米米饭挥发性物质分析中的应用尚未见报道。课题组拟以籼稻“隆科早 1 号”为原料制备不同碾减率(碾磨除去米糠占糙米重量的百分比)的籼米,对其米饭的感官品质进行评价,并联合采用 GC-IMS 和主成分分析(PCA)、正交偏最小二乘法判别分析(OPLS-DA)等多元统计方法分析碾减率对“隆科早 1 号”米饭中挥发性物质的影响,以期筛选出籼米的适宜加工精度,旨在为籼米适度加工提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

籼稻:“隆科早 1 号”,袁隆平农业高科技股份有限公司。

1.2 主要仪器设备

稻谷精米检测机:JGMJ8098 型,上海嘉定粮油仪器有限公司;

气相色谱—离子迁移谱联用仪(GC-IMS):FlavourSpec 型,济南海能仪器股份有限公司。

1.3 方法

1.3.1 样品制备 用稻谷精米检测机将样品脱壳后,分离出未脱壳米粒及米粒不完整的糙米。用稻谷精米检测机对糙米进行碾磨处理,通过控制碾磨时间分别制备理想碾减率为 0%,2%,4%,6%,8%,10%,12%,14% 的籼米,实际碾减率为 0.00%,1.86%,3.62%,6.01%,7.96%,9.56%,12.47%,14.32%,将其分别编号为 Y0、Y2、Y4、Y6、Y8、Y10、Y12、Y14。

1.3.2 大米的蒸煮 参照 GB/T 15682—2008 并适当改进。取 3.5 g 大米样品用适量蒸馏水淘洗后,按 $m_{\text{水}}:m_{\text{米}}=1.0:1.3$ 装入样品瓶中,25 ℃ 浸泡 30 min,上笼蒸煮 30 min 后保温焖制 20 min。

1.3.3 米饭的感官评价 按 GB/T 15682—2008 执行。

1.3.4 籼米米饭挥发性成分测定 根据赵卿宇等^[18]的方法修改如下:顶空孵育温度 80 ℃;孵育时间 20 min;加孵育转速 500 r/min;顶空进样针温 85 ℃;进样体积 500 μL ,不分流模式。采用 FS-SE-54-CB-1 色谱柱(15 m $\times$ 0.53 mm),柱温 60 ℃,运行时间为 30 min。载气为高纯氮气。IMS 探测器温度为 45 ℃,漂移管流速为 150 mL/min。

1.3.5 数据处理与分析 采用 FlavourSpec® 风味分析仪内置的 VOCal 软件分析谱图,应用软件内置的 NIST 数据库和 IMS 数据库对物质进行定性分析。采用 Reporter 插件分析样品的三维谱图和差异谱图;采用 Gallery Plot 插件分析样品的指纹图谱;采用 SIMCA 14.1 对样品挥发性物质进行主成分分析和正交偏最小二乘法判别分析。

2 结果与分析

2.1 碾减率对籼米米饭感官品质的影响

由表 1 可知,米饭的感官品质随碾减率的增加而增加($P<0.05$)。当理想碾减率为 0%~6% 时,米饭的气味得分随碾减率的提高而增加,进一步提高碾减率,米饭的气味得分无显著性变化。当理想碾减率为 8% 时,外观、滋味、冷饭质地、适口性和感官评定总分最高,进一步提高籼米的碾减率,米饭的感官品质未得到明显的提升。安红周等^[4]认为当“原阳新丰 2 号”的碾减率 $>6.81\%$,留皮度 $\leq 2.2\%$ 时,进一步提高加工精度,米饭的感官评分变化不显著。因此,从米饭感官品质的角度来看,8% 的碾减率是“隆科早 1 号”的适宜加工精度。

2.2 不同碾减率籼米米饭的挥发性成分定性分析

由图 1 可知,糙米米饭的挥发性物质含量最为丰富,碾磨会降低米饭的挥发性物质含量。

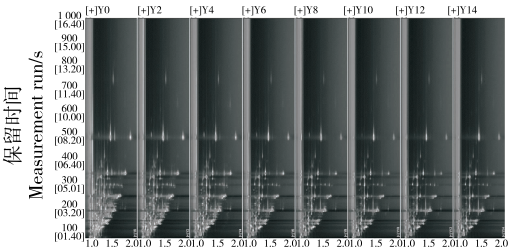
由表 2 可知,米饭中共鉴定出的挥发性物质有 47 种单体及部分物质的二聚体,包括醛类 17 种、醇类 12 种、酮类 8 种、酯类 4 种、呋喃类 3 种、吡嗪类 2 种及有机酸类 1 种,未被鉴定的物质 8 种,其中醛类和酮类是米饭的重

表 1 碾减率对米饭感官品质的影响[†]

Table 1 The sensory properties of cooked rice with various degree of milling

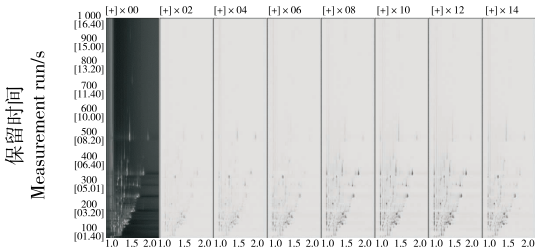
理想碾减率/%	气味(20 分)	外观(20 分)	适口性(30 分)	滋味(25 分)	冷饭质地(5 分)	感官评定总分
0	14.6±1.11 ^c	8.6±0.92 ^c	20.1±2.07 ^c	18.9±2.34 ^{bc}	3.2±0.40 ^c	65.4±4.27 ^e
2	14.6±1.02 ^c	6.9±1.64 ^d	19.1±1.92 ^c	17.9±0.97 ^c	3.5±0.50 ^{bc}	62.0±2.19 ^f
4	13.9±1.22 ^b	14.2±2.27 ^c	19.3±1.10 ^c	18.3±1.35 ^{bc}	3.7±0.46 ^{abc}	69.4±4.18 ^d
6	15.8±1.17 ^a	16.1±0.94 ^b	20.5±1.28 ^c	19.3±1.00 ^b	3.6±0.49 ^{bc}	75.3±1.68 ^c
8	16.6±0.80 ^a	18.7±0.64 ^a	25.9±0.94 ^a	21.9±0.83 ^a	4.2±0.60 ^a	87.3±1.49 ^a
10	16.7±0.64 ^a	18.1±0.83 ^a	24.2±1.33 ^b	20.9±0.94 ^a	4.0±0.63 ^{ab}	83.9±2.02 ^b
12	16.7±0.46 ^a	18.7±0.78 ^a	24.1±1.14 ^b	21.2±1.17 ^a	4.1±0.42 ^a	84.9±1.22 ^{ab}
14	16.6±0.80 ^a	18.7±0.78 ^a	23.9±1.04 ^b	20.7±1.10 ^a	4.2±0.16 ^a	84.1±1.81 ^b

[†] 字母不同表示差异显著($P<0.05$)。



横坐标1.0处竖线为反应离子峰(RIP峰), RIP峰两侧的每一个点代表一种挥发性物质,白色亮斑面积越大越亮,表示物质的浓度越高

(a) 原始图谱



黑点表示该物质浓度与糙米米饭(Y0)有差异

(b) 差异图谱

图 1 不同碾减率粘米米饭挥发性物质成分 GC-IMS 图谱

Figure 1 Topographic plots of GC-IMS spectra of cooked rice with various degree of milling

要风味物质。醛类物质主要是某些氨基酸和脂肪酸氧化产物,具有脂肪香味,其含量过高会产生腐败味^[19]。多数的酮类物质具有清香气味,有花香和果香,香味优异持久^[20]。

2.3 不同碾减率粘米米饭的挥发性物质 GC-IMS 指纹图谱

由图 2 可知,大部分挥发性物质在碾减率为 0%~6% 的粘米米饭中含量较高,当碾减率>8% 时含量下降。其中,2-十一烯醛、癸醛、辛醛、苯甲醛、庚醛、丙酮、2-庚酮、2-己酮、丁酸甲酯、2-甲基-1-丁醇、异戊醇、甲基吡嗪、2-乙基呋喃等物质在 Y0(碾减率为 0%,即糙米)中含量较高,且随着碾减率的增加而降低。2-壬烯醛、壬醛、2-辛烯醛、苯乙醛、2-丁酮、麦芽酚、3-辛醇、乙酸异戊酯等物质在 Y2 中含量较高,随着碾减率的增加,粘米中挥发性物质含量逐渐降低。但是己醛、戊醛、苯乙醇等物质含量随碾减率的增加而增加,且在 Y14 中最高。己醛主要来源于亚油酸的氧化,安周红等^[3]研究表明米饭的己醛含量随大米碾减率的提高而显著下降,可能是因为碾磨过程中除去了富含脂质的糊粉层,留下的胚乳中己醛等脂质氧化产物含量降低^[21]。然而,研究中米饭的己醛含量随碾减率的增加而增加,与 Mahmud 等^[10]的研究结果一致,这可能与米的品种、碾磨工艺等有关。碾磨程度高,碾米过程中米温升高,可能会造成脂肪氧化程度增加,从

而使己醛含量增加。

2.4 粘米米饭挥发性成分的多元统计分析

由图 3(a)可知,所有样品均在 95% 的置信椭圆内。进一步利用 OPLS-DA 研究碾减率对粘米米饭的挥发性物质影响,如图 3(b)所示, R^2_X 、 R^2_Y 和 Q^2 分别为 0.877, 0.836, 0.645。对 OPLS-DA 模型进行交叉验证(置换拟合 200 次), R^2 和 Q^2 两条回归斜率均>0,且截距分别<0.5 和 -0.5,表明模型不存在过拟合现象[图 3(c)]。

由图 3(b)可知,不同碾减率米饭的挥发性物质具有明显的区域分布特征。糙米米饭 Y0 在第四象限,米饭 Y2、Y4 在第一象限,米饭 Y6、Y8 在第二象限,米饭 Y10、Y12、Y14 在第三象限,且有部分重叠,说明碾减率为 10%~14% 的米饭的挥发性组成差异较小,与米饭的感官评价结果基本一致。

通常认为 VIP 值(变量重要性投影值)>1 的变量是模型的重要特征标志物。不同碾减率的米饭中 VIP 值>1 的挥发性物质有 21 种,其中被鉴定出来的有 18 种,主要为醛类、酯类和醇类,如图 3(d)所示。米饭中 2-甲基-1-丁醇、乙酸异戊酯、异戊醇、2-戊烯醛、3-甲基丁酸和 2-乙基呋喃 6 种物质含量在糙米米饭中含量最高,且随碾减率的提高而降低(图 2),可以作为“隆科早 1 号”不同碾减率大米米饭的差异性挥发性物质。

表 2 米饭中鉴定出的挥发性成分[†]

Table 2 Volatile compounds identified in rice

化合物名称	保留指数	保留时间/s	迁移时间/ms	风味描述	化合物名称	保留指数	保留时间/s	迁移时间/ms	风味描述
戊醛	692.5	163.232	1.434	NF	丙酮	454.4	99.773	1.126	辛辣甜香
辛醛单体	1 006.5	359.265	1.405	橙香	苯乙醇	1 175.1	601.424	1.301	玫瑰香
辛醛二聚体	1 006.5	359.265	1.829	橙香	2-正戊基呋喃	996.2	344.653	1.261	果香
壬醛单体	1 112.0	510.696	1.476	柑橘	2-戊酮	692.0	163.003	1.398	果香
壬醛二聚体	1 111.4	509.973	1.950	柑橘	2-甲基丁醛	655.5	152.886	1.407	刺激性
2-甲基吡嗪	830.8	224.748	1.070	NF	2-甲基-1-丁醇	738.7	182.040	1.480	NF
丁酸甲酯	742.7	183.643	1.149	NF	2-己酮	779.4	198.607	1.504	果香
乙酸甲酯	469.2	103.682	1.185	果香	2-庚酮单体	891.1	256.121	1.263	梨香
麦芽醇	1 118.4	519.939	1.198	果浆味	2-庚酮二聚体	891.1	256.121	1.639	梨香
异戊醇	725.3	176.568	1.488	辛辣味	2-乙基己醇	1 042.5	410.978	1.423	NF
乙酸异戊酯	882.4	251.611	1.314	NF	2-乙基呋喃	660.7	154.265	1.324	NF
己醛单体	793.9	205.603	1.256	脂肪味	2-丁酮	569.3	130.123	1.249	丙酮
己醛二聚体	792.5	204.866	1.570	脂肪味	2,6-二甲基吡嗪	932.9	291.155	1.133	NF
庚醛单体	903.9	266.537	1.329	脂肪味	2,5-二甲基呋喃	687.7	161.393	1.347	NF
庚醛二聚体	902.7	265.590	1.705	脂肪味	1-丙醇	494.4	110.350	1.236	NF
乙酸乙酯	599.8	138.171	1.344	果香	1-戊醇	759.8	190.599	1.252	NF
乙醇	440.4	96.094	1.049	青味	1-辛烯-3-醇	982.2	332.817	1.163	NF
癸醛	1 275.9	746.054	1.541	NF	羧基丙酮	611.1	141.160	1.233	NF
丁醛	587.6	134.952	1.295	刺激性	正己醇	866.5	243.339	1.321	青味
苯乙醛	1 027.1	388.815	1.263	NF	反-2-戊烯醛	756.8	189.403	1.111	脂肪味
苯甲醛单体	960.4	314.354	1.157	坚果味	反-2-辛烯醛单体	1 054.8	428.709	1.336	油脂
苯甲醛二聚体	960.4	314.354	1.478	坚果味	反-2-辛烯醛二聚体	1 054.3	427.970	1.824	油脂
6-甲基-5-庚烯-2-酮	990.0	339.446	1.182	NF	反-2-壬烯醛	1 188.2	620.138	1.413	脂肪味
3-辛醇	986.2	336.200	1.404	柑橘	反-2-己烯醛	844.2	231.743	1.522	肥皂味
3-甲基丁酸	873.3	246.838	1.224	刺激性	反-2-己烯-1-醇	892.7	257.068	1.186	果香
3-甲基丁醛	636.4	147.827	1.416	NF	反-2-庚烯醛单体	956.4	311.040	1.261	果香
3-羟基-2-丁酮	701.0	166.681	1.346	NF	反-2-庚烯醛二聚体	954.8	309.619	1.672	果香
2-十一烯醛	1 394.7	916.689	1.494	水果桔皮					

† 数据库风味描述来源于 <http://www.thegoodscentscompany.com/index.html>; NF 代表未检索到。

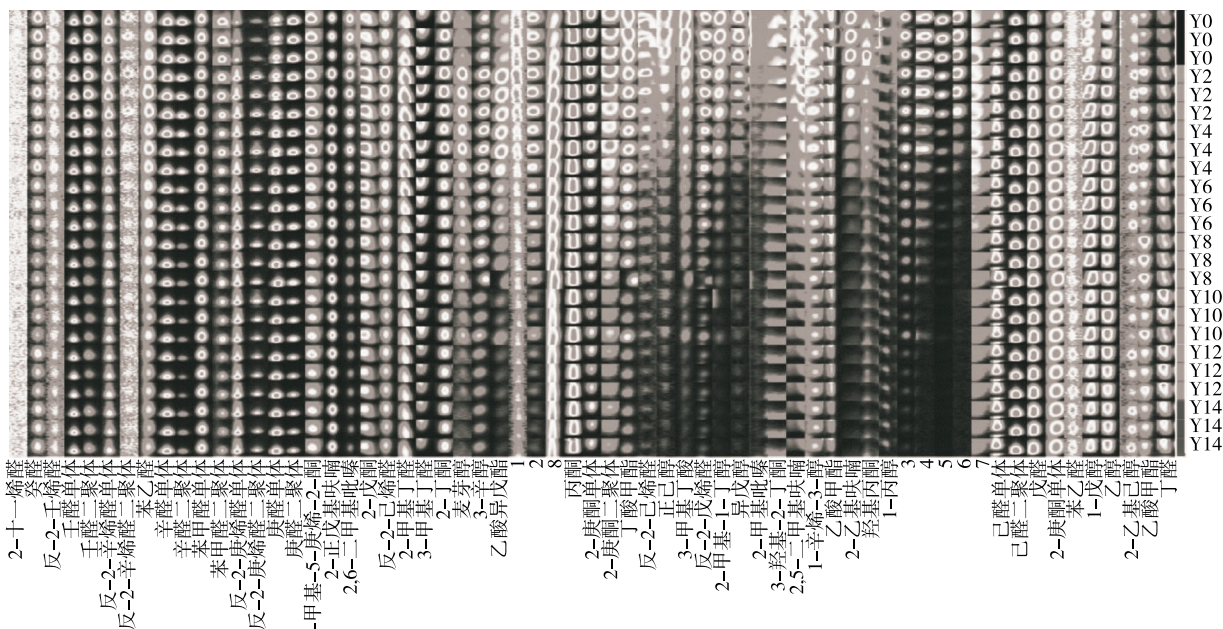


图 2 不同碾减率糙米米饭的挥发性物质的指纹图谱

Figure 2 Gallery plot analysis of rice with various degree of milling

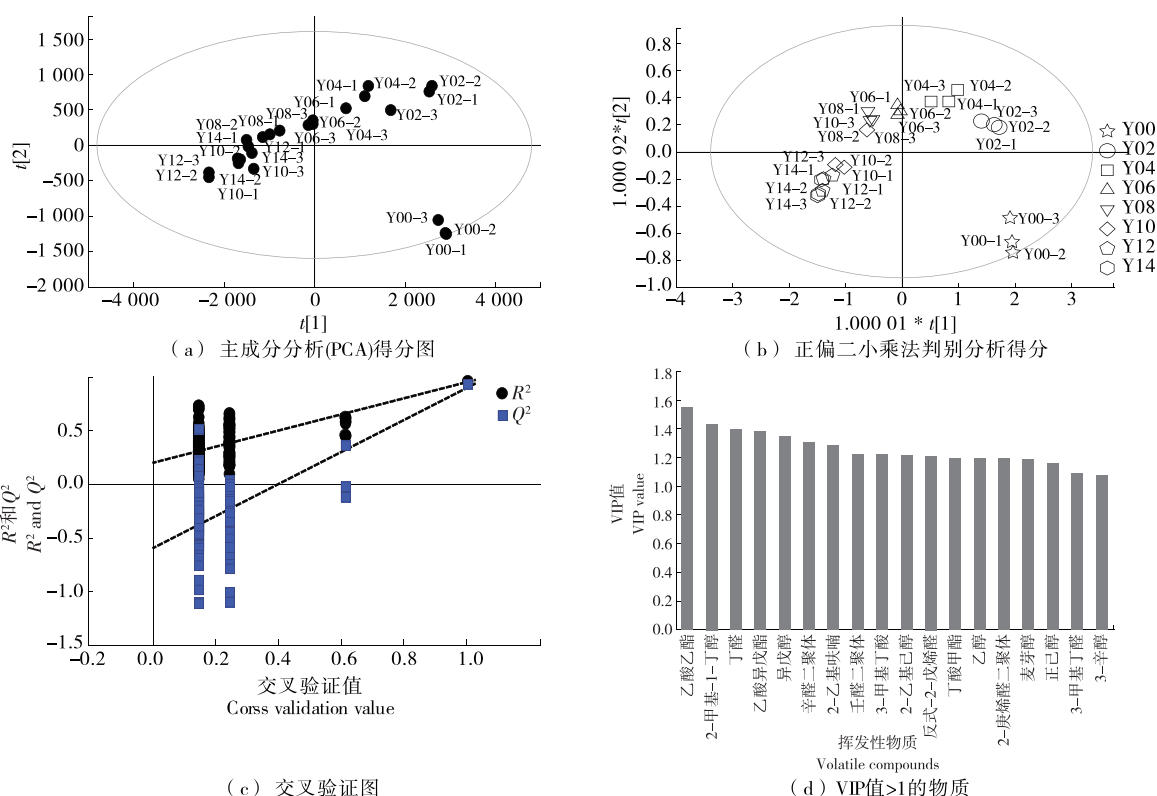


图 3 不同碾减率米饭的挥发性物质的多元统计分析

Figure 3 Multivariate statistical analysis of volatiles in cooked rice with different degree of milling

3 结论

试验表明,适当碾磨可以提高“隆科早 1 号”米饭的感官品质。利用 GC-IMS 技术鉴定出米饭中 47 种单体及部分物质的二聚体,主要是醛类、酮类以及醇类等。大部分挥发性物质在碾减率为 0%~6% 的籼米米饭中含量较高,而已醛、戊醛和苯乙醇的含量随碾减率的增加而增加,在碾减率为 14% 的米饭中含量最高。2%~6% 的碾减率能保留米饭中的大部分挥发性物质;当碾减率为 10%~14% 时,米饭的挥发性物质组成无明显差异。通过多元统计分析筛选出 18 种差异性挥发成分(VIP>1),其中,2-甲基-1-丁醇、乙酸异戊酯、异戊醇、2-戊烯醛、3-甲基丁酸、2-乙基呋喃等可作为“隆科早 1 号”不同碾减率大米米饭的差异性挥发性物质。后续将进一步研究碾米压力、碾米转速等对籼米米饭感官品质和风味物质组成的影响。

参考文献

- [1] 赵志浩,邓媛元,魏振承,等.大米适度加工和副产物综合利用现状及展望[J].广东农业科学,2020,47(11):144-152.
ZHAO Zhi-hao, DENG Yuan-yuan, WEI Zhen-cheng, et al. Current status and prospect of appropriate processing of rice and comprehensive utilization of by-products[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2020, 47(11): 144-152.
- [2] 李柳燕,詹展,张威,等.碾磨程度和蒸煮方式对优质籼稻米饭

品质的影响[J].食品与机械,2021,37(8):40-44,109.

- LI Liu-yan, ZHAN Zhan, ZHANG Wei, et al. Effects of milling degree and cooking method on the cooked rice quality of high-quality Indica rice[J]. Food & Machinery, 2021, 37(8): 40-44, 109.
- [3] 安红周,陈会会,尹文婷,等.加工精度对大米食用品质及风味的影响[J].中国粮油学报,2021,36(1):1-7.
AN Hong-zhou, CHEN Hui-hui, YIN Wen-ting, et al. Effect of milling degree on the edible quality and flavor of rice[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2021, 36(1): 1-7.
- [4] 安红周,杨柳,林乾,等.不同加工精度籼米的感官品质和营养品质[J].中国粮油学报,2021,36(3):1-7.
AN Hong-zhou, YANG Liu, LIN Qian, et al. Sensory evaluation and nutritional quality of indica rice with different milling degrees[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2021, 36(3): 1-7.
- [5] 王立峰,张磊,姚铁俊,等.碾磨程度对大米特征组分和米粉品质特性的影响[J].食品与机械,2019,35(5):195-201.
WANG Li-feng, ZHANG Lei, YAO Yi-jun, et al. Effect of milling degree on content of characteristic components and quality properties of rice flour[J]. Food & Machinery, 2019, 35(5): 195-201.
- [6] 蔡沙,李森,管骁,等.大米加工精度对其营养品质和食用品质的影响[J].湖北农业科学,2019,58(21):150-154,188.
CAI Sha, LI Sen, GUAN Xiao, et al. The influence of rice milling degree on its nutritional quality and food quality[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2019, 58(21): 150-154, 188.

- [7] 刘厚清, 景梦瑶, 周涛. 白米的加工精度对食味及经济性的影响[J]. 粮食加工, 2018, 43(5): 36-41.
- LIU Hou-qing, JING Meng-yao, ZHOU Tao, et al. The effect of the processing precision of white rice on the taste and economy[J]. Grain Processing, 2018, 43(5): 36-41.
- [8] BILLIRS M A, SIEBENMORGEN T J, MEULLENET J F, et al. Rice degree of milling effects on hydration, texture, sensory and energy characteristics: Cooking using excess water[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 113(4): 559-568.
- [9] CHOI S, SEO H S, LEE K R, et al. Effect of milling and long-term storage on volatiles of black rice (*Oryza sativa* L.) determined by headspace solid-phase microextraction with gas chromatography-mass spectrometry[J]. Food Chemistry, 2019, 276: 572-582.
- [10] MAHUMD M M, OH Y, KIM T H, et al. Effects of milling on aromatics, lipophilic phytonutrients, and fatty acids in unprocessed white rice of scented rice 'Cheonjiyang-1-se' [J]. Food Science and Biotechnology, 2018, 27(2): 383-392.
- [11] LU W, LIN T, REN Z, et al. Rapid discrimination of *Citrus reticulata* 'Chachi' by headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry fingerprints combined with principal component analysis[J]. Food Research International, 2020, 131: 108985.
- [12] LIS Y, YANG H F, TIAN H H, et al. Correlation analysis of the age of brandy and volatiles in brandy by gas chromatography-mass spectrometry and gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. Microchemical Journal, 2020, 157: 104948.
- [13] 刘强, 刘纪伟, 田恬, 等. 高温胁迫下糙米短期储藏气味指纹图谱变化规律的动态分析[J]. 中国农业科学, 2021, 54(2): 379-391.
- LIU Qiang, LIU Ji-wei, TIAN Tian, et al. Dynamic analysis for the characteristics of flavor fingerprints for brown rice in short-term storage under high temperature stress [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(2): 379-391.
- [14] YANG Y, WANG B, FU Y, et al. HS-GC-IMS with PCA to analyze volatile flavor compounds across different production stages of fermented soybean whey tofu [J]. Food Chemistry, 2021, 346: 128880.
- [15] LI M Q, YANG R W, ZHANG H, et al. Development of a flavor fingerprint by HS-GC-IMS with PCA for volatile compounds of *Tricholoma matsutake* Singer[J]. Food Chemistry, 2019, 290: 32-39.
- [16] 鲜灵芝, 刘金阳, 鲁金花, 等. 基于气相色谱-离子迁移谱分析杨梅酒和糯米杨梅酒的风味特征[J]. 食品与机械, 2021, 37(2): 14-18.
- XIAN Ling-zhi, LIU Jin-yang, LU Jin-hua, et al. The flavor characteristics of bayberry wine and glutinous rice bayberry wine were analyzed based on gas chromatography-ion migration spectrum[J]. Food & Machinery, 2021, 37(2): 14-18.
- [17] YANG X S, ZHU K L, GUO H M, et al. Characterization of volatile compounds in differently coloured *Chenopodium quinoa* seeds before and after cooking by headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. Food Chemistry, 2021, 348: 129086.
- [18] 赵卿宇, 沈群. GC-IMS 技术结合化学计量学方法在青稞分类中的应用[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(2): 165-169.
- ZHAO Qing-yu, SHEN Qun. Application of GC-IMS technology combined with chemometrics method in classification of hullless barley[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2020, 35(2): 165-169.
- [19] 苏慧敏, 张敏, 苗菁, 等. 不同加工程度大米食味变化分析[J]. 食品科学, 2016, 37(18): 58-63.
- SU Hui-min, ZHANG Min, MIAO Jing, et al. Changes in rice taste with milling degree[J]. Food Science, 2016, 37(18): 58-63.
- [20] 崔琳琳, 赵燊, 周一鸣, 等. 基于 GC-MS 和电子鼻技术的大米挥发性风味成分分析[J]. 中国粮油学报, 2018, 33(12): 134-141.
- CUI Lin-lin, ZHAO Shen, ZHOU Yi-ming, et al. Analysis of volatile flavors of rice based on GC-MS and electronic nose technology[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2018, 33(12): 134-141.
- [21] BERGMAN C J, DELGADO J T, BRYANT R, et al. Rapid gas chromatographic technique for quantifying 2-acetyl-1-pyrroline and hexanal in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Cereal Chemistry, 2000, 77(4): 454-458.
- MA Yu-qing, FANG Cheng-gang, XIA Li-fei, et al. Effect of different fermentation degree on aroma components of heavy withered 'Yunkang No.10' black tea[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2020, 33(4): 760-768.
- [19] 张厅, 刘晓, 熊元元, 等. 四川黑茶渥堆过程中主要品质成分和茶汤色差变化及其相关性研究[J/OL]. 食品与发酵工业. (2021-06-28) [2021-09-23]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.026946>.
- ZHANG Ting, LIU Xiao, XIONG Yuan-yuan, et al. Changes and correlation of main quality components and tea soup color difference of Sichuan dark tea during post-fermentation[J/OL]. Food and Fermentation Industries. (2021-06-28) [2021-09-23]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.026946>.

(上接第 25 页)

- [16] 金友兰, 黄甜, 蒋容港, 等. 不同类型发花砖茶特征香气成分研究[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(3): 188-196.
- JIN You-lan, HUANG Tian, JIANG Rong-gang, et al. Characteristic volatile components of different types of fermented brick tea[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(3): 188-196.
- [17] 马士成, 王梦琪, 刘春梅, 等. 六堡茶挥发性成分中关键香气成分分析[J]. 食品科学, 2020, 41(20): 191-197.
- MA Shi-cheng, WANG Meng-qi, LIU Chun-mei, et al. Analysis of volatile composition and key aroma compounds of Liupao tea[J]. Food Science, 2020, 41(20): 191-197.
- [18] 马玉青, 方成刚, 夏丽飞, 等. 不同发酵程度对重萎调“云抗 10 号”红茶香气成分的影响[J]. 西南农业学报, 2020, 33(4): 760-768.