

基于SDE-GC-MS技术分析有色稻米的风味物质

鄢珊^{1,2}, 吴磊³, 郑兴飞^{1,4}, 李梦阳², 王彬², 胡中立², 刁英², 李佳文^{3*}, 徐得泽^{1,4*}

(1. 湖北省农业科学院粮食作物研究所, 粮食作物种质创新与遗传改良湖北省重点实验室, 农业农村部作物分子育种重点实验室, 湖北武汉 430064)(2. 武汉轻工大学生命科学与技术学院, 湖北武汉 430023)(3. 潜江市公共检验检测中心, 湖北潜江 433100)(4. 湖北洪山实验室, 湖北武汉 430070)

摘要:我国有色稻的栽培历史悠久、种质资源丰富。为了解不同颜色有色稻米的风味物质的差异, 该研究以9份有色稻米为主要材料, 采用同时蒸馏萃取法-气相色谱-质谱技术(SDE-GC-MS)对有色稻米的风味物质进行了初步探究。结果表明, 9份有色稻米中共鉴定出165种风味物质, 主要包括酸、醛、醇和酚等化合物; 其中, 共有风味物质22种, 相对含量占总量约73.66%~95.45%; 差异物质143种, 相对含量占总量约4.90%~26.37%。有色稻米的风味物质主要有亚油酸、棕榈酸、硬脂酸、壬醛、癸醛、反式-2-壬烯醛、反式-2,4-癸二烯醛、反式-2-癸烯醛、辛醛、二丙酮醇、1-辛烯-3-醇、2,6-二叔丁基-4-甲基苯酚、2,2'-亚甲基双(4-甲基-6-叔丁基苯酚)、愈创木酚、吲哚和2-正戊基呋喃等化合物。该研究结果为有色稻米的风味物质研究提供了基础数据和科学依据。

关键词: 有色稻米; 风味物质; SDE-GC-MS

文章编号: 1673-9078(2025)11-291-305

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.11.1189

Analysis of Flavor Substances in Colored Rice by Simultaneous Distillation Extraction-gas Chromatography-mass Spectrometry

YAN Shan^{1,2}, WU Lei³, ZHENG Xingfei^{1,4}, LI Mengyang², WANG Bin²,
HU Zhongli², DIAO Ying², LI Jiawen^{3*}, XU Deze^{1,4*}

(1. Institute of Food Crops, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Hubei Key Laboratory of Food Crop Germplasm and Genetic Improvement, Key Laboratory of Crop Molecular Breeding, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430064, China)(2. School of Life Science and Technology, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China)(3. Qianjiang Public Inspection and Testing Center, Qianjiang 433100, China)(4. Hubei Hongshan Laboratory, Wuhan 430070, China)

Abstract: China has a long history of cultivating colored rice and possesses abundant germplasm resources. To understand the differences in flavor substances among different colored rice varieties, this study focused on nine colored rice samples and preliminarily investigated the flavor compounds present in colored rice using Simultaneous Distillation Extraction-Gas

引文格式:

鄢珊, 吴磊, 郑兴飞, 等. 基于SDE-GC-MS技术分析有色稻米的风味物质[J]. 现代食品科技, 2025, 41(11): 291-305.

YAN Shan, WU Lei, ZHENG Xingfei, et al. Analysis of flavor substances in colored rice by simultaneous distillation extraction-gas chromatography-mass spectrometry [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(11): 291-305.

收稿日期: 2024-08-13; 修回日期: 2024-10-17; 接受日期: 2024-10-22

基金项目: 湖北省支持种业高质量发展资金农业种质资源保护利用项目(HBZY2023A001-47); 湖北省技术创新计划项目(2024BBB100); 粮食作物种质创新与遗传改良湖北省重点实验室开放基金课题(2020lzzj05; 2022lzzj08)

作者简介: 鄢珊(1997-), 女, 硕士, 科研助理, 研究方向: 生物体活性成分分析, E-mail: 309356080@qq.com; 共同第一作者: 吴磊(1995-), 女, 本科, 助理工程师, 研究方向: 食品检验, E-mail: dezexu@163.com

通讯作者: 徐得泽(1978-), 男, 硕士, 研究员, 研究方向: 优质专用稻新品种培育与产业化研究, E-mail: dezexu@163.com; 共同通讯作者: 李佳文(1983-), 男, 硕士, 质量工程师, 研究方向: 食品加工方面的研究, E-mail: 309356080@qq.com

Chromatography-Mass Spectrometry (SDE-GC-MS). The results identified 165 flavor compounds from the nine samples, including acids, aldehydes, alcohols, and phenolic compounds. Among these, 22 common flavor compounds accounted for approximately 73.66~95.45% content, while 143 differential compounds comprised about 4.90~6.37% content. The major flavor substances of colored rice include linoleic acid, palmitic acid, stearic acid, nonanal, decanal, trans-2-nonenal, trans-2,4-decadienal, trans-2-decenal, octanal, diacetone alcohol, 1-octen-3-ol, 2,6-di-tert-butyl-4-methylphenol, 2,2'-methylenebis(4-methyl-6-tert-butylphenol), guaiacol, indole, and 2-pentylfuran. The findings provide foundational data and scientific evidence for investigating flavor compounds in colored rice.

Key words: colored rice; flavor substance; SDE-GC-MS

水稻 (*Oryza sativa* L.) 是一种在世界范围内广泛种植的谷物, 也是亚洲最受欢迎的主食。其中, 色稻是水稻种质资源中的一类特种稻, 皮层中天然色素的累积沉淀, 特别是花青素和原花青素, 呈现黑色、紫色、红色等颜色^[1], 与普通大米相比, 色稻富含更多的营养成分和功能成分, 具有抗氧化、抗炎、抗衰老、抗癌、抗糖尿病等活性, 是药食同源的主食^[2,3]。色稻通常作为糙米食用, 保留了稻谷的麸皮、胚芽和胚乳的完整形态。气味是判断糙米品质的重要方面, 影响消费者的购买欲望, 与其新鲜度与品质优劣也高度相关^[4]。

近年来, 对水稻的挥发性风味物质研究主要集中在非芳香稻米和芳香稻米, 对有色稻米的风味研究较少。目前, 在水稻中已经报道了 500 多种挥发性风味物质^[5], 但没有一种化合物或一组化合物可以完全解释大米香气^[6]。同时蒸馏萃取法 (Simultaneous Distillation Extraction, SDE) 是公认的一种能全面提取食品中挥发性化合物的方法^[7]。彭智辅等^[8]采用 SDE 法提取出 101 种大米香气成分物质, 而固相微萃取法只提取出 31 种大米香气成分物质。Liu 等^[9]采用同时蒸馏萃取法-气相色谱-质谱技术 (Simultaneous Distillation Extraction Gas Chromatography-Mass Spectrometry, SDE-GC-MS) 对 13 种水稻的挥发性成分进行了研究, 在所有样品中共鉴定出 52 种挥发性化合物: 19 种醛、5 种醇、10 种酮、9 种碳氢化合物、6 种苯衍生物和 3 种其它化合物。LI 等^[10]采用 SDE-GC-MS 对水稻的风味成分进行了定性和定量分析, 主要风味成分包括 18 种醛、6 种醇、9 种酮、5 种酸、10 种碳氢化合物、10 种苯衍生物和 4 种其它成分。不同颜色稻米的风味物质也不同。金文刚等^[11]利用气相-离子迁移色谱方法 (Gas Chromatography Ion Mobility Spectrometry, GC-IMS) 从五彩米样品中鉴定出了 62 种挥发性气味成分, 主要包括醛、醇、酮、酯、呋喃、酸和醚, 发现黑米的醛类含量相对较高, 紫米中醇类和呋喃类含量相对较高, 绿米中酮类含量相对较高, 黄米中酯类、醚类和酸类含量均相对较

高。Sukhonthrea 等^[12]认为红米糠中的主要挥发物为肉豆蔻酸、壬醛、(E)- β -辛烯和 6,10,14-三甲基-2-戊腺酮, 黑米糠中的主要挥发物为肉豆蔻酸、壬醛、己酸、戊醛和天门冬氨酸; 红米糠和黑米糠的差异主要是愈创木酚含量的差异, 愈创木酚是产生烟熏味或黑米香气的主要原因, 是黑米中主要的气味成分。烹饪前和烹饪后稻米的风味物质也有所不同。Choi 等^[13]采用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱法 (Head Space-Solid Phase Microextraction Gas Chromatography-Mass Spectrometry, HP-SMPE-GC-MS) 从生黑米和煮熟黑米中共发现 101 种挥发性化合物; 其中, 有 44 种化合物在熟黑米中不存在, 熟黑米比生黑米新形成了 20 种化合物。稻米的碾米程度不同其风味物质也有所差别。相比糙米饭, 碾减率为 5.9% 的米饭的挥发性风味物质总量减少了 34.4%, 碾减率为 10.0% 的米饭的挥发性风味物质总量减少了 71.9%^[14]。挥发性化合物数量众多, 确定稻米中贡献香气的关键化合物一直是水稻香气品质研究的难点。

有色稻米作为一种特殊的稻米品种, 具有独特的风味和营养价值。研究其风味特性不仅有助于推动农业多样性, 还能有效保护和利用水稻种质资源。目前, 有色稻米风味的研究主要采用顶空萃取法, 这种方法虽然能鉴定出挥发性风味成分, 但对一些半挥发性和非挥发性风味物质的鉴定却显得不够全面, 从而无法完整解释有色稻米的香气特征。本实验采用 SDE 提取 9 份有色稻米的风味物质, 并结合 GC-MS 技术识别和定量各种挥发性和非挥发性风味物质, 为深入理解有色稻米的风味特性奠定基础; 分析不同颜色稻米的风味差异, 为优质品种的选育提供依据。

1 材料与方法

1.1 原料

色稻米共 9 份 (表 1)。氯化钠 (分析纯), 无水硫酸钠 (分析纯), 国药集团化学试剂有限公司; 无水乙醚 (色谱级), 上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

表 1 11份稻米的基本信息				
Table 1 The basic information of 11 rice				
序号	名称	颜色	类型	来源
1	长粒黑米	黑	粳稻	黑龙江贡谷商贸有限公司
2	农家黑米	黑	粳稻	齐齐哈尔市恒昌玉米种植专业合作社
3	巴马黑米	黑	粳稻	巴马十琅生态农业有限公司
4	心选红米	红	粳稻	南京昀沛丰年食品有限公司
5	洋县红米	红	粳稻	洋县乐康生态农业有限公司
6	云南紫米	紫	粳稻	云南滇鹏糖业有限公司
7	武功山紫红米	紫红	粳稻	萍乡市巧农食品有限公司
8	五常糙米	黄	粳稻	齐齐哈尔市恒昌玉米种植专业合作社
9	洋县绿米	绿	粳稻	洋县乐康生态农业有限公司

1.2 实验仪器

DW-86L338J 型超低温冰箱，青岛海尔生物医疗股份有限公司；M32 型全自动高通量平行浓缩仪，北京莱伯泰科仪器股份有限公司；三重四极杆型气相色谱质谱联用仪（TSQ9000），赛默飞世尔科技公司；同时蒸馏萃取装置，天长市康玻实验设备有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 风味物质提取

使用 SDE 法提取有色稻米的风味物质^[10]，稍作修改。称取 50 g 有色稻米，放入 2 L 圆底烧瓶，再加入 20 g 氯化钠，加入 1 L 的纯水；量取 50 mL 无水乙醚置于 500 mL 圆底烧瓶中，两个烧瓶同时连接到同时蒸馏萃取冷凝管的两端，加热，回流萃取 4 h 后收集乙醚层，置于 100 mL 蓝盖瓶中，加入 20 g 无水硫酸钠，-80 ℃静置过夜，抽滤，收集滤液，得到风味物质溶液。将风味物质溶液用 M32 型全自动高通量平行浓缩仪浓缩至试管底部没有溶液，再用 1.5 mL 无水乙醚（色谱级）复溶，再使用 0.22 μm 的微孔滤膜过滤置于进样瓶中，使用 GC-MS 仪器进样分析。

1.3.2 色谱条件

色谱柱：HP-5MS 毛细管。起始温度 40 ℃保持 5 min，以 2.5 ℃/min 升温至 65 ℃保持 2 min；以 5 ℃/min 升温至 200 ℃保持 2 min；再以 10 ℃/min

升温至 250 ℃保持 5 min。进样口温度：250 ℃；检测器温度：250 ℃，载气：He；流量：1 mL/min；吹扫流量：50 mL/min，隔垫吹扫流量：3 mL/min，不分流。

1.3.3 质谱条件

电离方式为 EI；电子能量为 70 eV；离子源温度为 230 ℃；发射电流为 200 μA；接口温度为 280 ℃；检测电压是 350 V，扫描范围 29~550，采集模式为全扫描。

1.4 数据分析

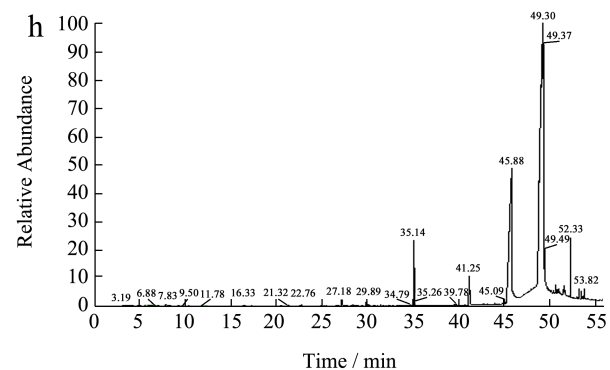
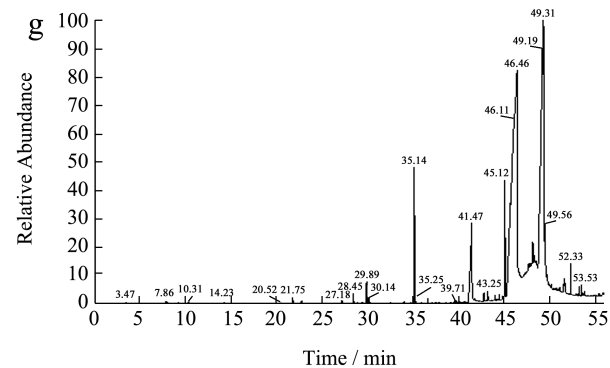
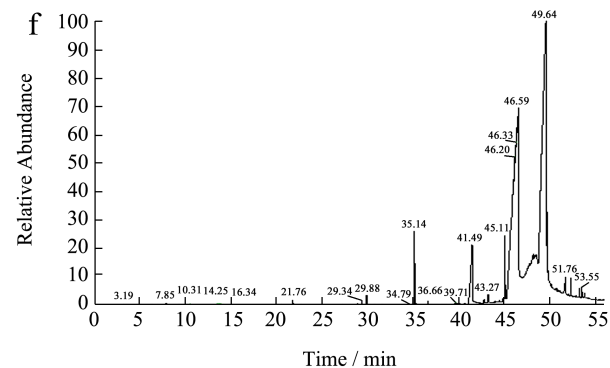
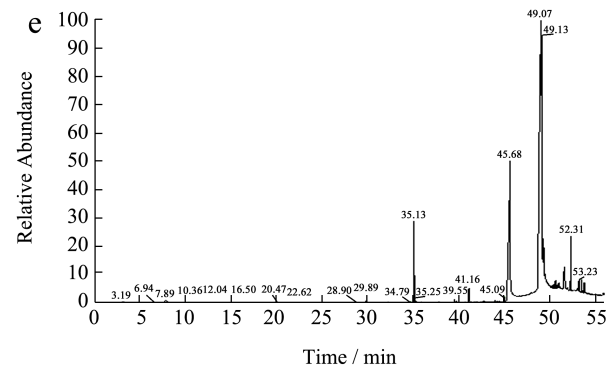
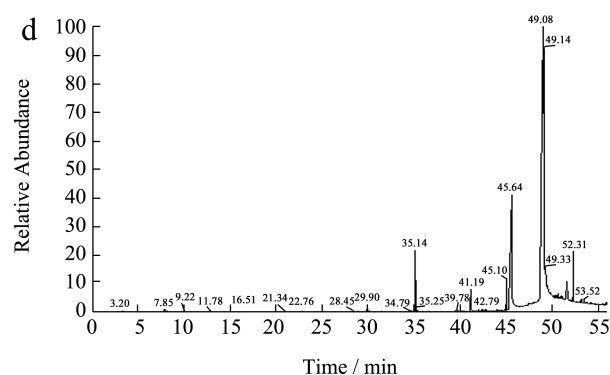
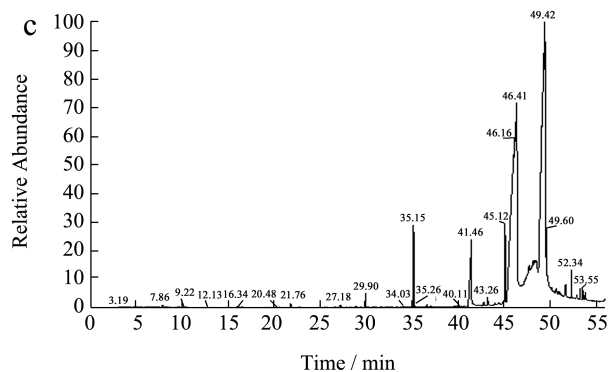
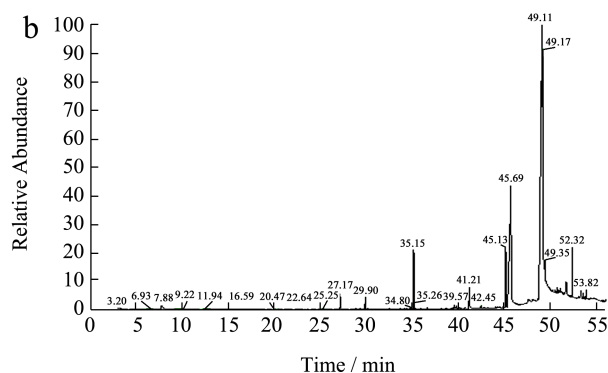
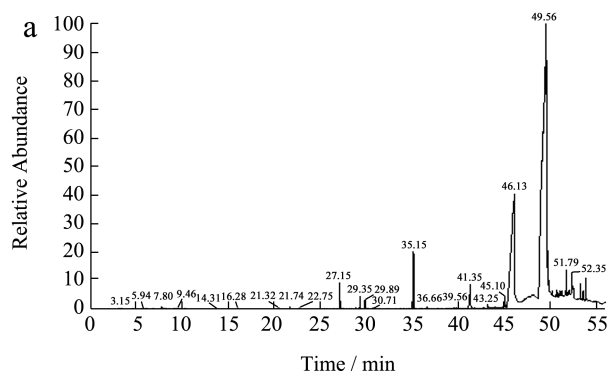
用 GC-MS 仪检测后，经 NIST17 图谱库检索以及对质谱图的离子碎片峰的分析，确定有关色谱峰的归属，用峰面积归一化法计算各成分的相对含量。

2 结果与分析

2.1 有色稻米的风味物质

通过 GC-MS 检测得到的水稻风味物质的总离子色谱图有明显差异，风味物质的丰度也有明显差异（图 1）。将图中各未知物质的质谱图信息与质谱标准数据库的已知物质进行比对，结果表明在 9 份有色稻米中共鉴定出 165 种风味物质，包括 37 种烷烃、9 种醇、17 种酸、20 种醛、11 种酚、21 种酮、26 种酯和 24 种其它物质。醛、醇、酮和酸类化合物是大米的主要风味特征化合物，Liu 等^[9]采用 SDE-GC-MS 法在 13 种谷子中共鉴定出 52 种挥发性化合物，其中包括 19 种醛，5 种醇，10 种酮，9 种碳氢化合物，6 种苯衍生物和 3 种其它化合物。Li 等^[10]采用 SDE-GC-MS 对 4 种谷子的香气评价，主要风味成分包括 18 种醛、6 种醇、9 种酮、5 种酸、10 种碳氢化合物、10 种苯衍生物和 4 种其它成分。许多研究发现 2-乙酰基-1-吡咯啉（2-AP）是香米中挥发物的主要成分，并且随着干燥温度的升高，其浓度呈上升趋势。然而，在本研究中，对在稻米样本中均未发现 2-AP。这一发现引发了对其含量和影响因素的深入探讨。首先，2-AP 在大米中的含量通常较低，可能仅在 μg/kg 级别^[15]。此外，处理方法及仪器灵敏度低、基质干扰、色谱分离共流出等问题，可能是未能检测到 2-AP 的原因之一。因此，进一步的研究可以多方面考虑优化分析条件，以提高对 2-AP 的检测灵敏度。同时，探索不同稻米品种和处理方法对 2-AP 生成的影响，有助于揭示其在稻米风味的重要作用。

从图2可以看出,武功山紫红米的风味物质种类最多,共检测出92种物质,其次是巴马黑米和云南紫米,均检测出89种物质。长粒黑米和农家黑米分别检测出64种和70种物质;心选红米和洋县红米分别检测出66种和70种物质;五常糙米和洋县绿米分别检测出71种和85种物质。这些风味物质主要包括酸类、酚类、酯类、醛类、酮类等。其中,烷烃类物质有15~24种,洋县红米的烷烃类物质种类最多;酸类物质有7~13种,巴马黑米的酸类物质种类最多;醛类物质有5~15种,武功山紫红米的醛类物质种类最多;酚类物质有4~8种,巴马黑米和云南紫米都检测出8种酚类物质;酮类物质有6~13种,武功山紫红米的酮类物质种类最多;酯类物质有6~12种,云南紫米的酯类物质种类最多。根据表2所示,有色稻米酸类物质的相对含量最高,为83.47%~94.30%,除酸类物质以外,酚类物质的相对含量也较高,范围为1.91%~7.67%。



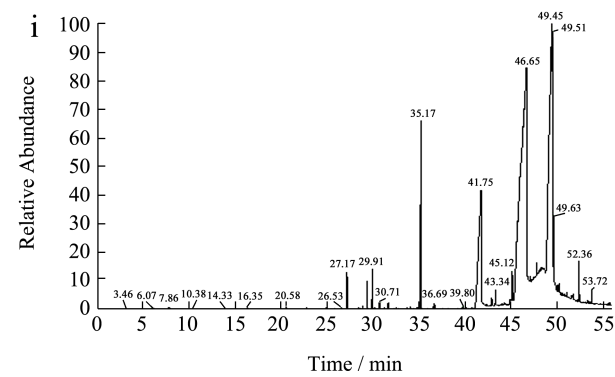


图 1 有色稻米的风味物质总离子色谱图

Fig.1 Total ion chromatogram of flavor substances of colored rice

注：(a) 长粒黑米；(b) 农家黑米；(c) 巴马黑米；(d) 心选红米；(e) 洋县红米；(f) 云南紫米；(g) 武功山紫红米；(h) 五常糙米；(i) 洋县绿米。

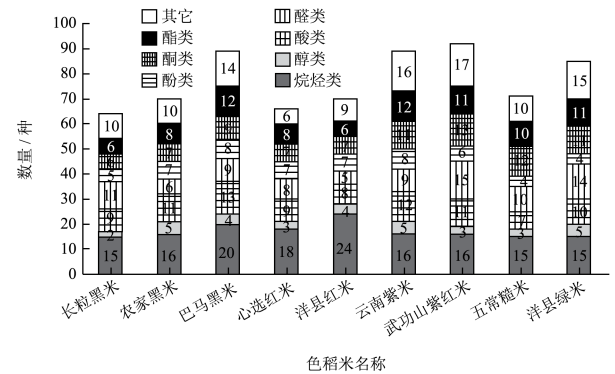


图 2 有色稻米的风味物质种类

Fig.2 The flavored species of colored rice

2.2 有色稻米的共有风味物质

由表 3 所示，9 份有色稻米检出 22 种共有成分，这些共有成分在不同色稻米中的占比分别为：长粒黑米 84.49%，农家黑米 84.57%，巴马黑米 91.80%，心选红米 85.97%，洋县红米 73.66%，云南紫米 91.11%，武功山紫红米 89.10%，五常糙米 87.34%，洋县绿米 95.45%。酸类是所有色稻米样品中鉴定出的风味物质相对含量最多的一类化合物，其相对含量在 66.38%~87.86% 之

间，共有 6 种酸类化合物，主要有肉豆蔻酸、棕榈酸、亚油酸、硬脂酸、月桂酸、十五烷酸。其中亚油酸（27.81%~57.18%）和棕榈酸（20.82%~47.42%）的相对含量占比最高，长粒黑米的亚油酸含量最高，而武功山紫红米的亚油酸含量最低，但其棕榈酸含量最高。反油酸、棕榈油酸和月桂酸的存在表明，有色稻米麸皮层含有更高含量的脂肪^[16]。然而，酸类物质含量的增加是有色稻米老化质量下降的特征之一。Zhang 等^[17]在 5 个粳稻品种的米糠油中检测到了高含量的酸类，包括亚油酸（38.63%~43.50%）、油酸（32.3%~41.20%）和棕榈酸（16.26%~18.93%）。米糠层含有大部分米粒的脂肪，主要包括油酸和亚油酸等不饱和脂肪酸^[18]。脂肪酸的增加与水稻品种和储存条件密切相关。在脱壳过程中，糙米麸皮层的细胞壁和细胞膜被部分破坏，导致米糠中的脂质从油体中泄漏，从而使酶和脂质接触，加速老化，增强了酶对脂质的作用，最终导致脂质的水解和氧化速度加快^[19]。

醛类包括壬醛、癸醛和反式-2,4-癸二烯醛。壬醛散发出柑橘和肥皂的香气，癸醛则具有柑橘果香，而反式-2,4-癸二烯醛则带有鸡油味和鸡肉香气，这些成分共同贡献了煮熟米饭的大部分香气^[5]。醇类主要有二丙酮醇，其气味阈值相对较高。酚类包括 4-乙炔基-2-甲氧基苯酚、2,6-二叔丁基-4-甲基苯酚和 2,2'-亚甲基双（4-甲基-6-叔丁基苯酚）。在有色稻米煮熟的过程中，香豆酸和阿魏酸的热脱羧反应会生成苯酚和 4-乙炔基-2-甲氧基苯酚。其中，4-乙炔基-2-甲氧基苯酚具有有丁香、烟熏和咖喱的香气，为米饭增添了甜味^[20,21]。酮类主要有 2,6-二叔丁基-4-羟基-4-甲基-2,5-环己二烯-1-酮和 1-羟基环己基苯基甲酮。酯类有棕榈酸甲酯和邻苯二甲酸二丁酯。此外，其它类化合物包括 2,5-二甲基呋喃和芥酸酰胺。呋喃是最丰富的杂环化合物，具有相对较低的气味阈值，主要由脂质氧化和美拉德反应产生；而 2,5-二甲基呋喃是最受欢迎的香料成分，为色稻米提供了甜的水果香气。

表 2 有色稻米的风味物质种类的相对含量（%）

Table 2 The relative content of flavor substances in the colored rice (%)								
有色稻米	烷烃类	醇类	酸类	醛类	酚类	酮类	酯类	其它类
长粒黑米	0.34	0.33	91.45	0.26	4.20	0.22	1.39	2.22
农家黑米	0.54	0.50	87.04	0.22	5.14	0.45	3.11	3.16
巴马黑米	0.33	0.19	94.13	0.16	2.19	0.23	1.75	1.07
心选红米	0.50	0.49	91.41	0.20	3.55	0.32	1.40	2.37
洋县红米	0.65	0.41	88.96	0.10	5.46	0.33	0.88	3.24
云南紫米	0.19	0.18	94.30	0.11	1.91	0.30	1.97	1.05
武功山紫红米	0.27	0.27	90.62	0.57	4.16	0.61	2.44	2.19
五常糙米	0.36	0.52	88.69	0.50	6.15	0.83	0.92	2.05
洋县绿米	0.68	0.73	83.47	0.78	7.67	0.94	1.20	4.87

2.3 有色稻米的非共有风味物质

由表4所示,非共有成分143种,相对含量为26.37%~4.90%。主要为烷烃34种、醇8种、酸11种、醛17种、酚8种、酮19种、酯24种,其它物质22种。酸类包括6-十八碳烯酸、壬酸、油酸、反油酸、顺式-9-十六烯酸、棕榈油酸、辛酸等11种,相对含量在0.20%~22.59%之间。烷烃类有正十九烷、8-己基十五烷、2,6-二甲基十一烷、4,7-二甲基十一烷等34种,烷烃类通常具有较高的气味阈值,大多数烷烃香气微弱,甚至无味,因此对食品风味的直接贡献有限。酮类有19种,主要是脂质自动氧化和美拉德反应的产物,它们赋予米饭令人愉悦的气味,如水果味、香蕉味、焦糖味和坚果味^[22]。酯类有24种,其中棕榈酸乙酯及亚油酸乙酯具有“淡花果香”^[23]。酯类物质在米饭风味中起烘托作用,使米饭的香气更加温润和饱满^[24]。

醛类主要包括反式-2-壬烯醛、反式-2-癸烯醛、反式-2-辛烯醛、香草醛、正己醛等17种,其相对含量范围为0.03%~0.67%。醛类是米饭中最丰富的挥发性风味物质,主要来源于脂质的氧化和分解,具有相对较低的气味阈值,赋予米饭水果和草本植物的香气,在稻米的风味及品质中发挥着重要作用^[25]。大米麸皮层中的脂肪酸是形成醛类物质的主要因素^[16]。己醛是水稻中最重要的挥发物之一,而己醛有绿色气味^[26],为米饭带来果香和草香^[27]。水稻的异味与高浓度的己醛密切相关,脂肪酶和脂氧合酶的活性越高,己醛、戊醛等的含量随着储存过程中也会增加,这被视为水稻脂质氧化的标志^[28,29]。香草醛具有香草味,仅在洋县绿米中检测到;反式-2-庚烯醛则带有草本味,仅在武功山紫红米中检测到;反式-2-壬烯醛散发有鸡肉和烤肉的香气^[27],而在农家黑米中未检测到。(E,E)-2,4-十烯醛和反式-2-壬烯醛与其它挥发性风味物质进行了比较,并被报道为大米香精的重要气味剂^[30]。Jezussek等^[31]的研究证明,(E,E)-2,4-十二烯醛和香草醛是四种糙米品种中最重要的气味成分。然而,反式-2-辛烯醛、反式-2-壬烯醛、反式-2-癸烯醛和(E,E)-2,4-癸二烯醛是不饱和烯醛,能够为米饭提供脂肪香味,且随着链长的增加,对米饭风味的贡献越小^[32]。

醇类共10种,主要包括1-辛烯-3-醇、1-壬醇、辛醇、2-丁基辛醇等。1-辛烯-3-醇是在脂质氧化过程中产生的,具有较低的气味阈值,赋予米饭蘑菇和秸秆的香气,对煮熟的米饭香气贡献显著^[33],仅在云南紫米和洋县绿米中检测到。1-辛烯-3-醇、1-壬醇、辛醇和大多数醇类化合物均具有较低的气味阈值,对大米风味有一定贡献。醇类是由脂肪酸的二级过氧化氢物分解而成,

进一步由醛类分解形成,是仅次于醛的第二丰富的挥发物,赋予米饭花香、果香及甜味^[34]。

酚类相对含量范围为0.04%~0.33%,主要有菜籽多酚、异香兰素、愈创木酚、1-萘酚、4-戊基苯酚、2,4-二叔丁基苯酚、2-萘酚、2,4-双(1-苯乙基)苯酚。菜籽多酚,又称4-乙烯基-2,6-二甲氧基苯酚,具有独特的苯酚气味,仅在五常糙米中未检测到。愈创木酚,又称2-甲氧基苯酚,散发烟熏或类似黑米的香气,在煮熟的香米和非香米味均有检测到^[31],是黑米的关键气味成分^[12]。本实验在黑米和紫米中均检测到愈创木酚,表明其是黑米和紫米的主要风味物质之一。其它类化合物共有26种,主要有2-戊基呋喃、2,3-二氢苯并呋喃、吡啶等化合物。2-戊基呋喃和2,3-二氢苯并呋喃是米饭发主要特征风味化合物,主要来源于亚油酸的氧化^[14]。2-戊基呋喃和2,3-二氢苯并呋喃仅在红米中未检测到,表明其是红米与其它颜色稻米的主要差异风味物质。不同浓度的2-戊基呋喃呈现出不同的风味特征,在低浓度时具有坚果气味,而在高浓度时表现出大豆香气,因此它被视为芳香稻米、非芳香稻米和黑米中的一种气味活性成分^[21,35]。2-戊基呋喃的相对含量较低,范围为0.09%~0.12%,为黑米、紫米、黄米和绿米赋予了坚果气味。吡啶的相对含量在0.01%~0.44%之间,低浓度的吡啶赋予了有色稻米花香、水果味和草本气味^[36],是大米的风味指标之一^[37]。仅在心选红米中未检测到吡啶,表明其是大部分色稻米的主要风味物质之一。

稻米的香味由多种风味物质混合控制,主要包括萜烯、呋喃酮、派罗酮、酸、醇、醛、酯、含氮和硫的挥发性化合物,此外还有苯类和苯丙烷类化合物。羰基化合物可以产生原生且浓郁的香气,醛类则带来水果和草本植物的香气,醇类则提供较为柔和的花香、果香以及甜味。酮类物质则具有优异持久的清香气味(包括花香和果香)^[24]。有机杂环化合物如吡嗪、吡啶及呋喃类化合物则产生甜香味,并且吡嗪类及吡啶类化合物的含量与米饭品质呈正相关^[38]。己醛、壬醛、苯甲醛、十六烷酸和甲酯被确定为新鲜香米中的香气活性成分;而2-甲基丙酸和3-羟基-2,2,4-三甲基戊酯等成分的增加则可能导致大米风味的下降。此外,醛、酮和呋喃等挥发性化合物增加是存储期间香米质量下降的重要原因^[39]。某些风味化合物的增加与稻米的质量密切相关。高质量的稻米通常含有丰富的风味化合物,这不仅提升了其香气和口感,还增加了消费者的满意度。因此,通过分析这些风味化合物的含量,可以有效评估稻米的整体质量。

表 3 9份有色稻米中共有风味物质的相对含量
Table 3 The relative content of common flavor substances in 9 varieties of colored rice

种类	中文名	CAS	分子式	保留时间/ min	长粒黑米 /%	农家黑米 /%	巴马黑米 /%	心选红米 /%	洋县红米 /%	云南紫米 /%	武功山紫红米 /%	五常糙米 /%	洋县绿米 /%
烷烃类	十一烷	1120-21-4	C ₁₁ H ₂₄	22.60	0.04	0.06	0.02	0.04	0.04	0.03	0.024	0.043	0.066
	二十二烷	629-94-7	C ₂₁ H ₄₄	40.74	0.03	0.08	0.03	0.06	0.08	0.03	0.026	0.085	0.147
	正十六烷	544-76-3	C ₁₆ H ₃₄	30.29	0.02	0.03	0.01	0.02	0.03	0.02	0.021	0.014	0.01
醇类	二丙酮醇	123-42-2	C ₆ H ₁₂ O ₂	7.79	0.32	0.42	0.18	0.48	0.37	0.15	0.236	0.492	0.626
	肉豆蔻酸	544-63-8	C ₁₄ H ₂₈ O ₂	41.24	1.35	1.36	3.32	1.65	1.39	4.83	5.074	2.083	11.073
酸类	棕榈酸	57-10-3	C ₁₆ H ₃₂ O ₂	45.79	21.56	21.31	39.19	20.82	23.67	39.20	47.423	24.4	40.241
	亚油酸	60-33-3	C ₁₈ H ₃₂ O ₂	49.21	57.18	51.99	43.69	56.13	40.62	41.82	27.811	51.47	30.381
	硬脂酸	57-11-4	C ₁₈ H ₃₆ O ₂	49.43	1.06	0.46	1.37	0.94	0.65	1.18	0.711	0.741	1.243
	月桂酸	143-07-7	C ₁₂ H ₂₄ O ₂	36.64	0.06	0.10	0.09	0.05	0.02	0.11	0.129	0.02	0.146
	十五烷酸	1002-84-2	C ₁₅ H ₃₀ O ₂	43.20	0.10	0.12	0.19	0.04	0.02	0.16	0.198	0.044	0.185
醛类	壬醛	124-19-6	C ₉ H ₁₈ O	22.73	0.06	0.06	0.03	0.03	0.03	0.01	0.06	0.092	0.049
	癸醛	112-31-2	C ₁₀ H ₂₀ O	26.62	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.00	0.015	0.018	0.017
	反式-2,4-癸二烯醛	25152-84-5	C ₁₀ H ₁₆ O	30.14	0.03	0.05	0.02	0.05	0.03	0.02	0.103	0.086	0.046
酚类	4-乙烯基-2-甲氧基苯酚	7786-61-0	C ₉ H ₁₀ O ₂	29.88	0.22	0.41	0.26	0.17	0.20	0.19	0.435	0.196	0.699
	2,6-二叔丁基-4-甲基苯酚	128-37-0	C ₁₅ H ₂₄ O	35.15	2.59	3.09	1.19	1.54	3.70	1.22	2.901	4.370	4.479
	2,2'-亚甲基双(4-甲基-6-叔丁基苯酚)	119-47-1	C ₂₃ H ₃₂ O ₂	52.32	1.31	1.46	0.48	1.51	1.35	0.34	0.569	1.552	2.434
	2,6-二叔丁基-4-羟基-4-甲基-2,5-环己二烯-1-酮	10396-80-2	C ₁₃ H ₂₀ O ₂	34.04	0.02	0.07	0.03	0.03	0.05	0.03	0.06	0.068	0.101
酯类	1-羟基环己基苯基甲酮	947-19-3	C ₁₃ H ₁₆ O ₂	39.56	0.06	0.09	0.02	0.05	0.10	0.02	0.037	0.123	0.051
	棕榈酸甲酯	112-39-0	C ₁₇ H ₃₄ O ₂	44.51	0.04	0.08	0.04	0.07	0.04	0.06	0.108	0.059	0.089
酯类	邻苯二甲酸二丁酯	84-74-2	C ₁₆ H ₂₂ O ₄	45.10	0.32	2.07	1.29	1.00	0.39	1.39	1.707	0.567	0.62
	2,5-二甲基呋喃	625-86-5	C ₆ H ₈ O	3.16	0.01	0.01	0.00	0.04	0.03	0.02	0.027	0.048	0.061
其它类	芥酸酰胺	112-84-5	C ₂₂ H ₃₄ NO	51.66	0.12	1.25	0.31	1.26	0.83	0.31	1.426	0.768	2.681
	总计				86.49	84.57	91.80	85.97	73.66	91.11	89.10	87.34	95.45

表 4 9份有色稻米的差异风味物质的相对含量

Table 4 The relative content of differences flavor substances in 9 varieties of colored rice

种 类	中 文 名	CAS	分子式	保留时间 /min	长粒黑米 /%	农家黑米 /%	巴马黑米 /%	心选红米 /%	洋县红米 /%	云南紫米 /%	武功山紫红米 /%	五常糙米 /%	洋县绿米 /%
烷 烃 类	十四烷	629-59-4	C ₁₄ H ₃₀	32.50	0.03	0.03	—	0.02	0.03	0.01	0.02	0.04	0.04
	十二烷	112-40-3	C ₁₂ H ₂₆	26.47	0.02	—	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	—
	正十七烷	629-78-7	C ₁₇ H ₃₆	34.16	—	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.04	—	0.03
	2,6,11,15-四甲基十六烷	504-44-9	C ₂₀ H ₄₂	35.93	0.03	0.05	0.01	0.03	0.03	0.01	0.02	—	0.07
	正十五烷	629-62-9	C ₁₅ H ₃₂	32.81	—	0.01	0.02	0.01	0.01	—	—	0.04	0.09
	2-甲基十五烷	1560-93-6	C ₁₆ H ₃₄	34.69	—	0.02	0.01	0.02	0.02	—	0.01	0.02	0.02
	2,6,11-三甲基十二烷	31295-56-4	C ₁₃ H ₃₂	30.57	—	0.02	0.01	0.02	0.03	—	0.02	0.02	—
	2,6,10-三甲基十四烷	14905-56-7	C ₁₇ H ₃₆	32.91	0.01	0.02	0.01	—	0.02	—	—	—	0.01
	4-甲基十四烷	25117-24-2	C ₁₅ H ₃₂	33.05	0.01	0.01	—	—	0.01	0.00	—	0.01	—
	5-乙基-2-甲基辛烷	62016-18-6	C ₁₁ H ₂₄	20.47	—	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	—	—	—
	2,6,10-三甲基十三烷	3891-99-4	C ₁₆ H ₃₄	34.08	0.02	—	—	0.01	0.02	—	—	0.02	—
	2-甲基十二烷	1560-97-0	C ₁₃ H ₂₈	36.41	—	—	—	—	—	0.01	0.01	—	0.02
	4,6-二甲基十二烷	61141-72-8	C ₁₄ H ₃₀	30.29	—	—	—	—	—	0.01	—	—	0.03
	2,6,10,15-四甲基十七烷	54833-48-6	C ₂₁ H ₄₄	29.17	—	—	—	—	0.01	—	—	0.01	—
	3,8-二甲基癸烷	17312-55-9	C ₁₂ H ₂₆	30.83	—	—	0.01	—	—	0.01	—	—	—
	正十八烷	593-45-3	C ₁₈ H ₃₈	41.98	—	0.03	—	0.02	0.029s	0.02	0.03	0.01	0.10
	3-乙基-3-甲基癸烷	17312-66-2	C ₁₃ H ₂₈	29.55	—	—	0.01	—	—	0.01	0.01	0.01	0.01
	3-甲基十五烷	2882-96-4	C ₁₆ H ₃₄	36.81	—	—	—	—	—	—	0.01	—	—
	环十三烷	295-02-3	C ₁₃ H ₂₆	34.91	—	—	0.01	—	—	—	—	—	—
	5-甲基-5-丙基壬烷	17312-75-3	C ₁₃ H ₂₈	28.50	—	—	—	—	—	—	—	0.02	—
	3-乙基-2,6,10-三甲基十一烷	N	C ₁₆ H ₃₄	28.52	0.02	—	0.01	0.01	0.02	—	—	—	0.02
	1-甲氧基-4-甲基双环(2.2.2)辛烷	6555-95-9	C ₁₀ H ₁₈ O	30.71	0.03	—	0.02	—	—	—	—	—	—
	1,2-二苯氧基乙烷	104-66-5	C ₁₄ H ₁₄ O ₂	42.01	—	—	—	0.07	0.03	—	—	—	—
	二十五烷	629-99-2	C ₂₅ H ₅₂	53.72	—	—	0.10	—	—	—	—	—	—
	2-甲基二六烷	1560-92-5	C ₁₇ H ₃₆	48.59	—	0.03	—	0.05	0.07	—	—	—	—
	戊基环丙烷	2511-91-3	C ₈ H ₁₆	21.31	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	—	0.02	—	—

续表4

种 类	中 文 名	CAS	分 子 式	保留时间 /min	长粒黑米 /%	农家黑米 /%	巴马黑米 /%	心选红米 /%	洋县红米 /%	云南紫米 /%	武功山紫红米 /%	五常糙米 /%	洋县绿米 /%
烷 烃 类	正二十七烷	593-49-7	C ₂₇ H ₅₆	34.79	0.06	0.08	0.03	0.05	0.07	—	—	—	—
	4-甲基十六烷	25117-26-4	C ₁₇ H ₃₆	37.99	0.01	—	—	—	0.01	—	—	—	—
	4,7-二甲基十一烷	17301-32-5	C ₁₃ H ₂₈	20.42	0.02	—	—	—	—	—	—	—	—
	1-甲氧基金刚烷	6221-74-5	C ₁₁ H ₁₈ O	26.04	—	—	0.00	—	—	—	0.00	—	—
	2,6,10-三甲基十五烷	3892-00-0	C ₁₈ H ₃₈	38.61	—	—	—	—	0.01	0.01	—	—	0.02
	3-甲基十四烷	18435-22-8	C ₁₅ H ₃₂	36.65	—	—	—	—	0.02	—	—	—	—
	7-己基二十烷	55333-99-8	C ₂₆ H ₅₄	36.64	—	—	—	—	—	—	—	0.02	—
	环十四烷	295-17-0	C ₁₄ H ₂₈	33.78	—	—	—	—	—	0.01	0.01	—	—
	1- 壬醇	143-08-8	C ₉ H ₂₀ O	25.47	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	—	—	0.01	0.01
	2- 丁基辛醇	3913/2/8	C ₁₂ H ₂₆ O	29.68	—	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	—
醇 类	1- 十六烷醇	36653-82-4	C ₁₆ H ₃₄ O	39.27	—	0.03	—	—	0.02	0.01	—	—	0.03
	1- 辛烯 -3- 醇	3391-86-4	C ₈ H ₁₆ O	15.87	—	—	—	—	—	0.01	—	—	0.04
	3- 十六烷醇	593-03-3	C ₁₆ H ₃₄ O	42.06	—	0.02	—	—	—	—	—	—	—
	苯乙醇	1960/12/8	C ₈ H ₁₀ O	23.00	—	—	0.01	—	—	0.01	—	—	—
	二十六碳醇	506-52-5	C ₂₆ H ₅₄ O	53.43	—	—	—	—	—	—	—	—	0.03
	十五醇	629-76-5	C ₁₅ H ₃₂ O	35.33	—	—	—	—	—	—	0.02	—	—
	6- 十八碳烯酸	N	C ₁₈ H ₃₄ O ₂	40.52	10.03	—	6.06	—	—	6.78	6.06	—	—
	壬酸	112-05-0	C ₉ H ₁₈ O ₂	28.89	0.05	0.03	0.01	—	—	0.01	—	—	—
	油酸	112-80-1	C ₁₈ H ₃₄ O ₂	42.73	—	0.04	0.06	0.02	—	—	—	—	0.02
	反油酸	112-79-8	C ₁₈ H ₃₄ O ₂	49.17	—	11.49	—	11.65	22.55	—	3.04	9.94	—
酸 类	顺式 -9- 十六烯酸	2091-29-4	C ₁₆ H ₃₀ O ₂	44.85	0.07	—	—	0.12	0.03	—	—	—	—
	棕榈油酸	373-49-9	C ₁₆ H ₃₀ O ₂	44.87	—	0.14	0.12	—	—	0.15	0.13	—	0.12
	辛酸	124-07-2	C ₈ H ₁₆ O ₂	25.70	—	0.02	0.01	—	—	0.00	—	—	0.04
	正癸酸	334-48-5	C ₁₀ H ₂₀ O ₂	31.62	—	—	0.01	—	—	0.01	0.01	—	—
	法尼酸	7548-13-2	C ₁₅ H ₃₀ O ₂	42.21	—	—	0.01	—	—	—	—	—	—
	沼泽酸	1945-53-5	C ₂₀ H ₃₀ O ₂	52.51	—	—	—	—	—	—	0.04	—	0.02
	十七烷酸	506-12-7	C ₁₇ H ₃₄ O ₂	47.80	—	—	—	—	—	0.05	—	—	—

续表4

种 类	中 文 名	CAS	分子式	保留时间 /min	长粒黑米 /%	农家黑米 /%	巴马黑米 /%	心选红米 /%	洋县红米 /%	云南紫米 /%	武功山紫红米 /%	五常糙米 /%	洋县绿米 /%
醛 类	反式-2-壬烯醛	N	C ₉ H ₁₆ O	24.94	0.02	—	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.06
	反式-2-癸烯醛	3913-81-3	C ₁₀ H ₁₈ O	28.44	0.02	0.02	0.01	0.04	—	0.01	0.14	0.07	0.04
	十二醛	112-54-9	C ₁₂ H ₂₄ O	32.71	0.02	—	0.01	0.02	0.02	—	0.01	0.02	0.04
	2-十一烯醛	2463-77-6	C ₁₁ H ₂₀ O	31.48	0.02	—	—	0.03	—	0.00	0.02	0.06	—
	反-2-辛烯醛	2548-87-0	C ₈ H ₁₄ O	20.50	0.03	—	—	—	—	—	0.03	0.04	0.04
	十八烷醛	638-66-4	C ₁₈ H ₃₆ O	40.11	0.04	—	—	—	—	0.02	—	0.05	0.09
	正己醛	66-25-1	C ₆ H ₁₂ O	5.99	0.02	—	0.05	—	—	0.02	0.04	—	0.17
	2-丁基-2-辛烯醛	13019-16-4	C ₁₂ H ₂₂ O	31.68	—	—	0.02	—	—	0.01	—	—	0.16
	正辛醛	124-13-0	C ₈ H ₁₆ O	17.26	—	—	—	—	—	—	0.01	0.03	0.02
	苯乙醛	122-78-1	C ₈ H ₈ O	19.58	—	—	—	—	—	—	—	—	0.01
	3,5-二叔丁基-4-羧基苯甲醛	1620-98-0	C ₁₃ H ₂₂ O ₂	41.01	0.01	—	—	—	—	—	0.01	—	—
	乙缩醛	105-57-7	C ₆ H ₁₄ O ₂	6.92	—	0.05	0.01	0.02	—	—	0.02	—	—
	(2E)-2-十四碳烯醛	51534-36-2	C ₁₄ H ₂₆ O	31.48	—	0.02	—	—	—	—	—	—	—
	(E,E)-2,4-壬二烯醛	5910-87-2	C ₉ H ₁₄ O	26.93	—	—	—	—	—	0.00	0.01	—	0.02
	香草醛	121-33-5	C ₈ H ₈ O ₃	32.29	—	—	—	—	—	—	—	—	0.04
	反式-2-庚烯醛	57266-86-1	C ₇ H ₁₂ O	14.23	—	—	—	—	—	—	0.04	—	—
	二十烷醛	2400-66-0	C ₂₀ H ₄₀ O	40.10	—	—	—	—	—	—	0.04	—	—
	莱籽多酚	28343-22-8	C ₁₀ H ₁₂ O ₃	36.51	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	—	0.06
	异香兰素	621-59-0	C ₈ H ₈ O ₃	32.29	—	0.03	0.02	—	0.04	—	—	—	—
	愈创木酚	90-05-01	C ₇ H ₈ O ₂	21.72	0.08	0.09	0.18	—	—	0.11	0.17	—	—
	1-萘酚	90-15-3	C ₁₀ H ₈ O	35.34	—	0.05	0.03	0.13	—	0.03	0.07	—	—
	4-戊基苯酚	14938-35-3	C ₁₁ H ₁₆ O	26.38	—	—	0.00	—	—	—	—	—	—
	2,4-二叔丁基苯酚	96-76-4	C ₁₄ H ₂₂ O	35.25	—	—	—	0.15	0.14	—	—	—	—
	2-萘酚	135-19-3	C ₁₀ H ₈ O	35.65	—	—	—	0.04	0.02	0.01	—	—	—
	2,4-双(1-苯乙基)苯酚	2769-94-0	C ₂₂ H ₂₂ O	52.22	—	—	—	—	—	—	—	0.04	—

续表4

种 类	中 文 名	CAS	分 子 式	保留时间 /min	长粒黑米 /%	农家黑米 /%	巴马黑米 /%	心选红米 /%	洋县红米 /%	云南紫米 /%	武功山紫红米 /%	五常糙米 /%	洋县绿米 /%
酮 类	7,9-二叔丁基-1-氧杂螺[4.5] 癸-6,9-二烯-2,8-二酮	82304-66-3	C ₁₇ H ₃₄ O ₃	44.03	0.06	0.08	0.04	0.09	0.08	0.05	—	0.10	—
	植酮	502-69-2	C ₁₈ H ₃₆ O	42.80	0.04	0.09	—	0.08	0.04	—	0.11	0.14	0.22
	香叶基丙酮	3796-70-1	C ₁₃ H ₂₂ O	33.70	0.03	0.04	0.01	0.02	0.02	—	0.01	0.04	0.06
	2-癸酮	693-54-9	C ₁₀ H ₂₀ O	26.14	0.01	—	—	—	—	0.00	0.01	0.02	0.02
	4-(2-羟基异丙基)苯乙酮	54549-72-3	C ₁₁ H ₁₄ O ₂	34.44	—	0.04	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.04
	二苯甲酮	119-61-9	C ₁₃ H ₁₀ O	38.14	—	—	—	—	—	—	—	—	0.05
	3-辛烯-2-酮	1669-44-9	C ₈ H ₁₄ O	19.47	—	—	—	—	—	—	0.01	—	—
	2-十五烷酮	2345-28-0	C ₁₅ H ₃₀ O	39.70	—	0.05	0.02	0.04	—	0.04	0.05	0.07	0.10
	2-羟基环十五烷酮	4727-18-8	C ₁₅ H ₂₈ O ₂	42.74	—	—	0.08	—	—	0.09	0.03	—	—
	4-氯苯丁酮	939-52-6	C ₁₀ H ₁₁ ClO	20.74	—	—	0.01	—	0.02	0.01	—	0.01	—
	beta-紫罗酮	79-77-6	C ₁₃ H ₂₀ O	34.54	—	—	0.01	—	—	0.00	—	—	—
	异佛尔酮	78-59-1	C ₉ H ₁₄ O	23.27	—	—	—	—	—	0.02	—	0.01	—
	5,8-十三庚酮	67238-16-8	C ₁₃ H ₂₄ O ₂	48.57	—	—	—	—	—	—	—	0.21	—
	1-羟基-3,5,8-三甲氧基氧杂蒽-9-酮	49599-09-9	C ₁₆ H ₁₄ O ₆	52.47	—	—	—	—	—	—	—	0.03	—
	法尼基丙酮	1117-52-8	C ₁₈ H ₃₀ O	44.22	—	—	—	—	—	0.03	0.04	—	0.17
	十七烷酮	2922-51-2	C ₁₇ H ₃₄ O	44.04	—	—	—	—	—	—	0.11	—	0.13
	4-氧代异佛尔酮	1125-21-9	C ₉ H ₁₂ O ₂	24.27	—	—	—	—	—	—	—	—	0.01
	苯乙酮	98-86-2	C ₈ H ₈ O	20.74	—	—	—	—	—	—	0.02	—	—
	2-十九烷酮	629-66-3	C ₁₉ H ₃₈ O	48.30	—	—	—	—	—	—	0.11	—	—

续表4

种类	中文名	CAS	分子式	保留时间 /min	长粒黑米 /%	农家黑米 /%	巴马黑米 /%	心选红米 /%	洋县红米 /%	云南紫米 /%	武功山紫红米 /%	五常糙米 /%	洋县绿米 /%
酯类	2- 单棕榈酸酯	23470-00-0	C ₁₉ H ₃₈ O ₄	53.80	0.98	0.44	0.16	0.16	0.37	0.12	0.10	0.17	—
	肉豆蔻酸异丙酯	110-27-0	C ₁₇ H ₃₄ O ₂	42.44	0.02	0.06	0.01	0.05	—	0.01	—	0.02	0.04
	丙位壬内酯	104-61-0	C ₉ H ₁₆ O ₂	31.29	0.03	0.02	0.01	0.01	—	0.01	0.01	0.02	0.04
	2,2,4- 三甲基-1,3- 戊二醇二 异丁酸酯	6846-50-0	C ₁₆ H ₃₀ O ₄	37.18	—	—	—	0.01	—	0.01	—	—	—
	甲酸辛酯	112-32-3	C ₉ H ₁₈ O ₂	21.30	—	—	—	—	—	0.00	—	0.04	—
	乙二醇单硬脂酸酯	111-60-4	C ₂₀ H ₄₀ O ₃	52.82	—	—	—	—	—	—	—	—	0.03
	乙二醇棕榈酸酯	4219-49-2	C ₁₈ H ₃₆ O ₃	50.31	—	—	—	—	—	—	—	—	0.18
	脱氢枞酸甲酯	1235-74-1	C ₂₁ H ₃₀ O ₂	51.43	—	—	—	—	0.02	—	—	0.02	0.04
	12- 甲基十三烷酸甲酯	5129-58-8	C ₁₃ H ₃₀ O ₂	40.29	—	—	—	—	—	—	0.01	—	—
	二氢猕猴桃内酯	17092-92-1	C ₁₁ H ₁₆ O ₂	35.74	0.01	0.02	0.01	—	—	0.01	0.01	0.01	0.02
	丁位十四内酯	2721-22-4	C ₁₄ H ₂₆ O ₂	44.37	—	—	0.04	0.08	0.03	—	0.06	—	0.07
	对羧基苯甲酸异戊酯	6521-30-8	C ₁₂ H ₁₆ O ₃	30.07	—	0.02	0.01	—	—	—	0.02	—	—
	棕榈酸乙酯	628-97-7	C ₁₈ H ₃₆ O ₂	46.11	—	0.42	—	—	—	—	—	—	—
	亚油酸乙酯	544-35-4	C ₂₀ H ₃₆ O ₂	48.50	—	—	0.03	—	—	0.01	—	—	—
	亚油酸甲酯	112-63-0	C ₁₉ H ₃₄ O ₂	48.12	—	—	0.08	—	—	0.17	—	—	0.04
	油酸甲酯	112-62-9	C ₁₉ H ₃₆ O ₂	48.24	—	—	0.05	—	—	—	0.28	—	—
	肉豆蔻酸单甘油酯	589-68-4	C ₁₇ H ₃₄ O ₄	51.07	—	—	0.03	—	—	—	—	—	—
	苯甲酸丁酯	136-60-7	C ₁₁ H ₁₄ O ₂	31.72	—	—	—	0.02	—	—	—	0.02	—
	邻苯二甲酸正丁异辛酯	84-78-6	C ₂₀ H ₃₀ O ₄	43.12	—	—	—	—	0.02	—	—	—	—
	辛酸乙酯	106-32-1	C ₁₀ H ₂₀ O ₂	26.33	—	—	—	—	—	—	—	0.01	—
	松脂酸甲酯	127-25-3	C ₂₁ H ₃₂ O ₂	46.67	—	—	—	—	—	—	—	—	0.02
	十四酸乙酯	124-06-1	C ₁₆ H ₃₂ O ₂	41.79	—	—	—	—	—	0.06	0.07	—	—
	反-9- 十八碳烯酸甲酯	1937-62-8	C ₁₉ H ₃₆ O ₂	48.24	—	—	—	—	—	0.14	—	—	—
	十八酸乙酯	111-61-5	C ₂₀ H ₄₀ O ₂	49.67	—	—	—	—	—	—	0.08	—	—

续表4

种类	中文名	CAS	分子式	保留时间 /min	长粒黑米 /%	农家黑米 /%	巴马黑米 /%	心选红米 /%	洋县红米 /%	云南紫米 /%	武功山紫红米 /%	五常糙米 /%	洋县绿米 /%
其它类	呋咪	120-72-9	C ₈ H ₇ N	29.33	0.39	0.04	0.02	—	0.03	0.09	0.02	0.01	0.44
	硬脂酰胺	124-26-5	C ₁₈ H ₃₇ NO	52.07	—	—	0.02	0.06	0.05	0.04	0.04	0.05	0.12
	2,3-二氢苯并呋喃	496-16-2	C ₈ H ₈ O	27.14	0.67	0.83	0.10	—	—	0.02	0.07	0.35	0.89
	油酸酰胺	301-02-0	C ₁₈ H ₃₅ NO	52.08	0.65	0.43	0.26	0.68	0.58	0.34	—	0.28	0.13
	α-二去氢萹蒾烯	21391-99-1	C ₁₃ H ₂₀	36.10	—	0.01	0.00	—	—	—	0.01	—	0.02
	5-甲氧基-6,7-二甲基苯并呋喃	35355-35-2	C ₁₁ H ₁₂ O ₂	37.07	—	—	0.03	—	—	—	0.02	—	0.02
	十六碳酰胺	629-54-9	C ₁₆ H ₃₃ NO	49.73	—	—	0.22	—	0.91	0.11	—	—	0.22
	对二乙氧基苯	122-95-2	C ₁₀ H ₁₄ O ₂	30.90	—	—	—	—	—	—	—	—	0.01
	3,5-二羟基戊苯	500-66-3	C ₁₁ H ₁₆ O ₂	35.49	—	0.02	0.01	—	—	0.01	0.01	0.02	0.02
	N-苯基-2-萘胺	135-88-6	C ₁₆ H ₁₃ N	50.25	—	—	—	—	—	0.05	0.10	—	—
	2-正戊基呋喃	3777-69-3	C ₉ H ₁₄ O	16.27	0.01	—	0.02	—	—	0.01	0.02	0.08	0.12
	2,3-二氢-1-十六烷基-1H-茚	55334-29-7	C ₂₅ H ₄₂	53.53	0.09	0.42	0.03	0.33	0.52	—	0.23	0.36	—
	苯乙烯	100-42-5	C ₈ H ₈	10.34	—	—	0.05	—	—	0.03	0.13	—	—
	甲苯	108-88-3	C ₇ H ₈	4.71	0.01	—	—	—	—	0.01	0.01	—	—
	乙基苯	100-41-4	C ₈ H ₁₀	8.73	—	—	—	—	—	—	0.02	—	0.02
	邻二甲苯	95-47-6	C ₈ H ₁₀	9.22	—	—	—	—	—	0.01	0.03	—	—
	2-甲基戊酸酐	63169-61-9	C ₁₂ H ₂₂ O ₃	20.58	—	—	—	—	—	—	—	—	0.10
	7-甲基-6-十三烯	24949-42-6	C ₁₄ H ₂₈	40.52	—	—	—	—	—	0.00	0.01	—	0.02
	2-正己基噻吩	18794-77-9	C ₁₀ H ₁₆ S	28.68	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	—	—	—
	1-萘氨基苯	90-30-2	C ₁₆ H ₁₃ N	50.23	0.26	0.14	—	—	0.30	—	—	0.10	—
	檀香素	487-11-6	C ₁₂ H ₁₆ O ₃	38.53	—	—	—	—	—	0.00	—	—	—
	间二甲苯	108-38-3	C ₈ H ₁₀	9.14	—	—	—	—	—	—	0.04	—	—

注：N：未查阅到相关数据；—：未检测到该风味物质。

3 结论

本文采用同时蒸馏萃取法提取 9 份有色稻米的风味物质, 结合气相色谱-质谱联用技术分析风味物质的成分。9 份有色稻米共鉴定出 165 种风味物质, 包括 37 种烷烃、9 种醇、17 种酸、20 种醛、11 种酚、21 种酮、26 种酯和 24 种其它物质。有色稻米含有 22 种共有风味物质, 主要有十一烷、二十二烷、正十六烷、二丙酮醇、肉豆蔻酸、棕榈酸、亚油酸、硬脂酸、月桂酸、十五烷酸、壬醛、癸醛、反式-2,4-癸二烯醛、4-乙烯基-2-甲氧基苯酚、2,6-二叔丁基-4-甲基苯酚、2,2'-亚甲基双(4-甲基-6-叔丁基苯酚)、2,6-二叔丁基-4-羟基-4-甲基-2,5-环己二烯-1-酮、1-羟基环己基苯基甲酮、棕榈酸甲酯、邻苯二甲酸二丁酯、2,5-二甲基呋喃、芥酸酰胺。该研究结果为有色稻米风味物质研究提供了基础数据和科学依据。

参考文献

- [1] MBANJO E, KRETZSCHMAR T, JONES H, et al. The genetic basis and nutritional benefits of pigmented rice grain [J]. *Front Genet*, 2020, 11: 229.
- [2] 武文豪,何冲冲,王传波,等.特种稻黑米和红米研究进展[J].*植物遗传资源学报*,2024,25(7):1046-1055.
- [3] 芦润青,吴云霞,耿敬章,等.色稻营养、功能成分及生物活性研究进展[J].*食品工业科技*,2023,44(5):411-419.
- [4] 陈焱芳,张雁,邓媛元,等.糙米挥发性风味物质分析技术及其在加工中变化研究进展[J].*中国粮油学报*,2020,35(8):160-169.
- [5] GUAN L, ZHANG M. Formation and release of cooked rice aroma [J]. *Journal of Cereal Science*, 2022, 107: 103523.
- [6] VERMA D K, SRIVASTAV P P. Science and Technology of Aroma, Flavor, and Fragrance in Rice [M]. Canada: Library and Archives Canada, 2019.
- [7] 安红梅,尹建军,张晓磊,等.同时蒸馏萃取技术在食品分析中的应用[J].*食品研究与开发*,2011,32(12):216-220.
- [8] 彭智辅,李杨华,练顺才,等.大米、糯米蒸煮香气成分的研究[J].*酿酒科技*,2014,12:42-46.
- [9] LIU J, LI S, ZHANG A, et al. Volatile profiles of 13 foxtail millet commercial cultivars (*Setaria italica* Beauv.) from China [J]. *Cereal Chemistry*, 2016, 94(2): 170-176.
- [10] LI S, ZHAO W, LIU S, et al. Characterization of nutritional properties and aroma compounds in different colored kernel varieties of foxtail millet (*Setaria italica*) [J]. *Journal of Cereal Science*, 2021, 100: 103248.
- [11] 金文刚,刘俊霞,王金泽,等.基于气相色谱-离子迁移色谱分析五彩糙米挥发性成分差异[J].*中国食品学报*,2023,23(7):382-391.
- [12] SUKHONTHARA S, THEERAKULKAIT C, MIYAZAWA M. Characterization of volatile aroma compounds from red and black rice bran [J]. *Journal of Oleo Science*, 2009, 58(3): 155-161.
- [13] LEE J, LEE K R, SEO H, et al. Effect of milling degrees on volatile profiles of raw and cooked black rice (*Oryza sativa* L. cv. *Sintoheugmi*) [J]. *Applied Biological Chemistry*, 2018, 61(1): 91-105.
- [14] 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.
- [15] 刘洪斌,段晓亮,李颖,等.大米中2-乙酰基-1-吡咯啉检测技术及形成机制研究进展[J].*粮油食品科技*,2022,30(5):227-233.
- [16] YAN B, ZHAO C J, YAN M, et al. Influence of gene regulation on rice quality: Impact of storage temperature and humidity on flavor profile [J]. *Food Chemistry*, 2019, 283: 141-147.
- [17] ZHANG D, DUAN X, WANG Y, et al. A comparative investigation on physicochemical properties, chemical composition, and *in vitro* antioxidant activities of rice bran oils from different japonica rice (*Oryza sativa* L.) varieties [J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2021,15(2): 2064-2077.
- [18] CHO K, KIM H, LEE J, et al. Determination of fatty acid composition in 120 korean native rice cultivars [J]. *Horticultural Science*, 2006, 41(4): 1082D.
- [19] ZHANG D, HUANG S, WANG Q, et al. Lipidomics and volatilomics reveal the changes in lipids and their volatile oxidative degradation products of brown rice during accelerated aging [J]. *Food Chemistry*, 2023, 421: 136157.
- [20] ZHAO Q, XI J, XU D, et al. A comparative HS-SPME/GC-MS-based metabolomics approach for discriminating selected japonica rice varieties from different regions of China in raw and cooked form [J]. *Food Chemistry*, 2022, 385: 132701.
- [21] ZENG Z, ZHANG H, CHEN J Y, et al. Direct extraction of volatiles of rice during cooking using solid-phase microextraction [J]. *Cereal Chemistry*, 2007, 84(5): 423-427.
- [22] XIA Q, MEI J, YU W, et al. High hydrostatic pressure treatments enhance volatile components of pre-germinated brown rice revealed by aromatic fingerprinting based on HS-SPME/GC-MS and chemometric methods [J]. *Food Research International*, 2017, 91: 103-114.
- [23] 王娜.基于组学技术的中国黄酒陈酿香气组分分析及酒龄识别的研究[D].无锡:江南大学,2020.
- [24] 张敏,苗菁,苏慧敏,等.不同品种稻米的米饭风味分析[J].*食品科学*,2017,38(16):110-114.
- [25] DENG Y, ZHONG Y, YU W J, et al. Effect of hydrostatic high pressure pretreatment on flavor volatile profile of cooked rice [J]. *Journal of Cereal Science*, 2013, 58(3): 479-487.
- [26] VERMA D K, SRIVASTAV P P. A paradigm of volatile aroma compounds in rice and their product with extraction and identification methods: A comprehensive review [J]. *Food Research International*, 2020, 130: 108924.
- [27] 邓茹月,闫志强,朱速松,等.贵州省不同籼稻品种稻米品质及风味物质分析[J].*江苏农业科学*,2021,49(11):138-146.
- [28] BERGMAN C J, DELGADO J T, BEYANT 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.
- [29] SUZUKI Y, ISE K, LI C Y, et al. Volatile components in stored rice

- [*Oryza sativa* (L.)] of varieties with and without lipoxygenase-3 in seeds. [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1999, 47(3): 1119-1124.
- [30] ZENG Z, ZHANG H, CHEN J Y, et al. Flavor volatiles of rice during cooking analyzed by modified headspace SPME/GC-MS [J]. Cereal Chemistry, 2008, 85(2): 140-145.
- [31] JEZUSSEK M, JULIANO B O, SCHIEBERLE P. Comparison of key aroma compounds in cooked brown rice varieties based on aroma extract dilution analyses [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2002, 50(5): 1101-1105.
- [32] FAN X J, JIAO X, LIU J G, et al. Characterizing the volatile compounds of different sorghum cultivars by both GC-MS and HS-GC-IMS [J]. Food Research International, 2021, 140: 109975.
- [33] WANG Z, SU H, BI X, et al. Effect of fragmentation degree on sensory and texture attributes of cooked rice [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2019, 43(4): e13920.
- [34] YANG D S, SHEWFEIT R L, LEE K S, et al. Comparison of odor-active compounds from six distinctly different rice flavor types [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56(8): 2780-2787.
- [35] HINGE V R, PATIL H B, NADAF A B. Aroma volatile analyses and 2AP characterization at various developmental stages in basmati and non-basmati scented rice (*Oryza sativa* L.) cultivars [J]. Rice, 2016, 9(1): 38.
- [36] KAISER R. Flowers and fungi use scents to mimic each other [J]. Science, 2006, 311(5762): 806-807.
- [37] GRIMM C C, GODSHALL M A, BRAGGINS T J, et al. Screening for sensory quality in foods using solid phase micro-extraction tandem mass spectrometry [J]. Advances in Experimental Medicine & Biology, 2004, 542(542): 167.
- [38] ZENG Z, ZHANG H, ZHANG T, et al. Flavor volatiles in three rice cultivars with low levels of digestible protein during cooking [J]. Cereal Chemistry, 2008, 85(5): 689-695.
- [39] ZHAO Q, YOUSAF L, XUE Y, et al. Changes in flavor of fragrant rice during storage under different conditions [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 100(8): 3435-3444.