

香稻品种滇屯 502 复壮品系稻米挥发性成分分析*

于 洋^{1#}, 成南龙^{1#}, 普世皇¹, 李文灿², 谭学林¹,
陈丽娟¹, 张江丽¹, 文建成^{1**}

(1. 云南农业大学 稻作研究所, 云南 昆明 650201; 2. 勐海县农业技术推广中心, 云南 勐海 666200)

摘要:【目的】滇屯 502 复壮研究筛选到了一批具浓郁香味的品系而挥发性成分迄今尚不清; 揭示滇屯 502 及其 5 个复壮品系稻米的挥发性成分组成。【方法】采用顶空固相微萃取结合气质联用技术分析挥发性成分。【结果】滇屯 502 和 5 个复壮品系 502-23、502-44、502-50、502-92 及 502-115 的挥发性成分分别有 85、76、71、77、68 和 72 种, 包括醛类、醇类、酮类、酯类、烃类、呋喃类、醚类、吡啶类和酚类, 其中醛类、醇类和酮类成分的相对含量最丰富。从 5 个复壮品系 502-23、502-44、502-50、502-92 和 502-115 中鉴定出香稻关键香味化合物 11 种, 含量分别为 47.07%、46.02%、41.17%、44.63% 和 35.99%, 它们的含量均高于滇屯 502 (34.42%); 香稻香味的特征化合物 2-乙酰基-1-吡咯啉 (2AP) 的含量分别为 0.77%、0.26%、0.34%、0.27% 和 0.26%, 其中 502-23 的含量较滇屯 502 高 16.67%; 香气成分香叶基丙酮含量分别为 1.96%、2.84%、3.92%、1.50% 和 1.96%。【结论】5 个复壮品系稻米都含有丰富的香气成分, 尤其含有较高含量的关键香气成分, 说明它们的稻米具浓郁香味。

关键词: 复壮研究; 挥发性成分; 固相微萃取; 气质联用; 香稻

中图分类号: S 511.099

文献标识码: A

文章编号: 1004-390X (2019) 05-0738-07

Analysis of Volatile Components in Rejuvenation Lines from a Fragrant Rice Variety Diantun 502

YU Yang¹, PHONGSAI Channarong¹, PU Shihuang¹, LI Wencan², TAN Xuelin¹,
CHEN Lijuan¹, ZHANG Jiangli¹, WEN Jiancheng¹

(1. Rice Research Institute of Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China;

2. Menghai County Agricultural Technology Extension Center, Menghai 666200, China)

Abstract: [Purpose] It was still unknown for volatile components in aromatic rejuvenation lines which selected from a fragrant rice variety Diantun 502. Volatile components of the Diantun 502 and its five rejuvenation lines were identified. [Method] Headspace solid phase micro-extraction (SPME) combined with gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). [Result] The results showed that the volatile compounds in Diantun 502 and its five lines (502-23, 502-44, 502-50, 502-92 and 502-115) identified were about 85, 76, 71, 77, 68 and 72, mainly including aldehydes, alcohols, ketones, esters, hydrocarbons, furans, ethers, indoles and phenols. Aldehydes were the most abundant components, followed by alcohols and ketones. Eleven key aroma compounds in five lines were de-

收稿日期: 2018-11-02

修回日期: 2019-04-23

网络首发时间: 2019-09-27 11:40:01

*基金项目: 云南省重点新产品开发计划项目 (2015BB015); 院士专家工作站项目 (2018IC065) 资助。

作者简介: #对本文贡献等同, 为并列第一作者。于洋 (1991—), 男, 山东临沂人, 硕士研究生, 主要从事种质资源创新与利用研究。E-mail: kmyuyang@aliyun.com; 成南龙 (1993—), 男, 泰国人, 硕士研究生, 主要从事种质资源创新与利用研究。E-mail: 991012995@qq.com

**通信作者 Corresponding author: 文建成 (1970—), 男, 云南建水人, 博士, 教授, 主要从事水稻遗传育种研究。E-mail: jcwen1117@163.com

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1044.S.20190926.1648.003.html>



tected with the contents of 47.07%, 46.02%, 41.17%, 44.63% and 35.99%, respectively, each of all was higher than that of the Diantun 502 which was 34.42%. The contents of the key aroma compound (2-acetyl-1-pyrroline) of fragrant rice in these lines were 0.77%, 0.26%, 0.34%, 0.27% and 0.26%, respectively, and that in the line 502-23 was 16.67% more than that in Diantun 502. Aromatic substance geranyl acetone in the lines was also identified with the contents of 1.96%, 2.84%, 3.92%, 1.50% and 1.96%. [**Conclusion**] It is concluded that these aromatic rejuvenation lines are rich in aroma compounds, especially containing high levels of key rice aroma components.

Keywords: rejuvenation; volatile components; solid-phase microextraction; gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS); aromatic rice

香米因具有怡人香味而受到消费者的喜爱, 具有很高的市场价值^[1-2]; 所以, 培育具有香味性状的水稻品种是品质育种的重要方向之一^[3-4]。香稻中含有 200 种对香气形成具有协同作用的挥发性化合物^[5-6], 包括醛类、醇类、酮类、酯类和杂环类等^[7-8]。挥发性香气成分的类型和比例导致气味差异, 而非香气挥发性成分有利于整体气味的形成^[9-11]。

近年来, 由于顶空固相微萃取 (SPME) 和气质联用 (气相色谱—质谱法, GC-MS) 技术具有容易操作、分析速度快、成本低以及不需要有机溶剂等诸多优点, 是稻米挥发性成分分析的主要手段。利用该分析手段在早籼稻稻米中鉴定出 265 种挥发性成分^[12], 从陈化过程中的苏软香型米和武育梗米中鉴定出醇类、醛类、酮类、烷烃类、醚类和杂环类挥发性成分^[13]。目前, 该技术已是食品、环境、化工和医药等领域被广泛应用的分析检测手段^[14]。

滇屯 502 为云南优质米生产企业使用的主要依靠品种, 是通过系谱选育法培育的籼型常规稻香软米品种^[15]。从示范推广至今已使用 30 多年, 由于种性退化严重, 制约了米业企业的生产发展。为了继续发挥该香稻品种的生产使用价值, 本课题组对滇屯 502 开展复壮研究, 筛选到一系列具有香味性状的复壮品系, 但这些品系稻米香气成分与滇屯 502 是否存在差异尚不清楚。为此, 本研究利用 SPME 结合 GC-MS 技术手段分析了复壮品系稻米挥发性成分, 旨在为滇屯 502 复壮研究提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 材料

材料共 6 种, 包括云南香稻品种滇屯 502,

以及对其开展复壮筛选出来的具有香味性状的 5 个复壮品系, 编号依次为 502-23、502-44、502-50、502-92 和 502-115。于 2018 年 2 月 3 日播种, 3 月 18 日移栽, 单穴单苗, 株距 15 cm, 行距 25 cm, 每份材料种植 13 行, 每行种植 34 株, 2 次重复, 7 月 29 日收获。稻谷自然晾晒干, 样品去瘪除杂, 脱壳备用。

1.2 仪器与设备

分析仪器是日本岛津公司的气质联用仪 (GCMS-QP2010-ultra) 和美国 Supelco 公司的固相微萃取装置 (SPME), 萃取头为 50/30 μm DVB/CAR on PDMS。

1.3 挥发性成分的提取与分析

1.3.1 样品准备

萃取头老化: 将萃取头放入气相色谱进样口, 入口温度为 250 $^{\circ}\text{C}$, 老化时间为 30 min。样品制备: 准确称量大米样品 5 g, 放置于 15 mL 顶空瓶中。之后, 在该瓶中放入磁子和插入 SPME 管, 调整并固定顶空瓶中萃取头的位置。80 $^{\circ}\text{C}$ 水浴 30 min, 吸附萃取 60 min, 迅速将萃取头放入 GC-MS 进样口, 解吸 15 min。拔出萃取头, 待下个样品使用。

1.3.2 GC-MS 分析条件

气相色谱—质谱法 (GC-MS) 分析时, 样品先通过 0.22 μm 孔径的有机过滤器。

色谱条件: 采用 Hp-5MS 色谱柱 (30 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25 μm), 进样口温度 250 $^{\circ}\text{C}$, 载气氮气, 纯度 99.999%, 柱流速 2.54 mL/min。升温程序: 在初始温度 40 $^{\circ}\text{C}$ 保持 3 min, 以 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的升温速度, 至 180 $^{\circ}\text{C}$ 时保持 1 min, 至 250 $^{\circ}\text{C}$ 时保持 5 min。进样量 1 μL , 分流比为 20:1。

质谱条件: 利用电子电流源, 离子源温度 220 $^{\circ}\text{C}$, 电子电离能 20 eV, 四极杆温度 150 $^{\circ}\text{C}$,

溶剂延迟 2.7 min。扫描模式为全扫描, 扫描质量范围为 40~500 amu, 谱库 NIST11。

1.3.3 数据分析

通过与 NIST 标准质谱库匹配, 用计算机搜索获得样品中每种未知挥发性组分的表征, 确认挥发性化合物的化学组成。当匹配度>80 (最大 100) 时, 即为某种化学成分。使用峰面积归一化法确定化合物的相对含量。

2 结果与分析

2.1 复壮品系稻米挥发性成分的相对含量

通过固相微萃取法分析滇屯 502 及其 5 个复壮品系稻米的挥发性成分, 结果 (图 1 和表 1) 表明: 5 个品系与滇屯 502 在挥发性成分含量和种类上都存在差异。滇屯 502 和 5 个复壮品系 502-23、502-44、502-50、502-92 及 502-115 鉴定出挥发性成分分别有 76、71、77、68、72 和 85 种。它们含有的挥发性成分包括, 烃类、醇类、酮类、醛类、酯类、呋喃类、醚类、吡啶类和酚类, 分别为 43 种、32 种、27 种、26 种、11 种、5 种、3 种和 1 种; 其他类挥发性成分 5 种。

有研究认为醛类成分具有很低的阈值对整体风味的影响很大^[16]。与滇屯 502 相比, 5 个复壮品系稻米中的醛类物质相对含量最丰富, 醛类占

总挥发性成分的 41.71%~54.87%, 其中 502-92 含量最高为 54.87%, 滇屯 502 含量最低为 41.71%。醇类成分占总挥发性成分的 11.16%~17.69%, 5 个品系的含量均低于滇屯 502 (17.69%)。酮类成分占总挥发性成分的 10.60%~17.31%, 品系 502-50 (17.31%) 和 502-44 (15.36%) 的含量高于滇屯 502 (14.83%), 而且这 2 个品系的香叶基丙酮含量分别为 3.92% 和 2.84%, 也都高于滇屯 502 (2.45%)。

烃类占总挥发性成分的 5.89%~9.23%, 品系 502-92 (9.23%) 和 502-115 (8.65%) 相对含量高于滇屯 502 (8.40%)。呋喃类占总含量的 3.11%~5.50%, 其中品系 502-50 (5.50%)、502-44 (4.92%) 和 502-92 (4.83%) 的含量高于滇屯 502 (4.73%)。酯类占总挥发性成分的 1.42%~2.06%, 品系 502-23 (2.06%)、502-92 (1.77%)、502-44 (1.66%) 和 502-50 (1.57%) 的含量都高于滇屯 502 (1.52%)。醚类、酚类和吡啶类成分的含量较少, 只在 502-44 中鉴定出吡啶类成分 2,3-二氢-1,1,5-6-四甲基-1H-吡啶, 相对含量为 0.27%, 滇屯 502 及其 5 个品系中都鉴定出香味特征性成分 2-乙酰-1-吡咯啉 (2AP)。

2.2 复壮品系稻米中关键风味化合物含量差异

在滇屯 502 及其 5 个复壮品系稻米中鉴定出

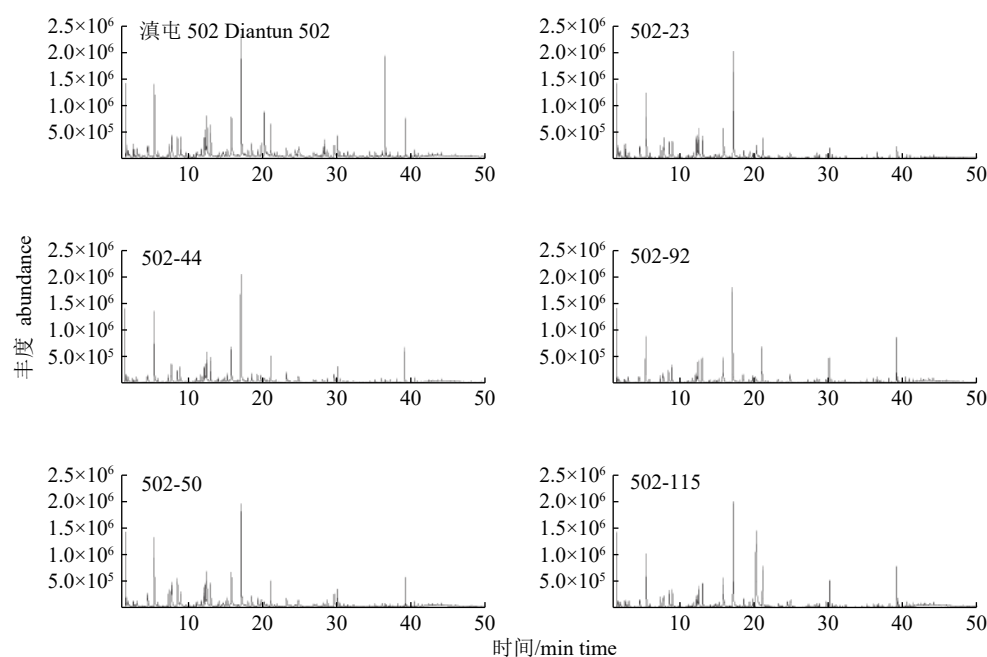


图 1 滇屯 502 及其复壮品系挥发性成分 GC-MS 总离子流图

Fig. 1 Total ion current chromatogram of volatile compounds of rice variety Diantun 502 and its rejuvenated lines

表 1 滇屯 502 及其复壮品系挥发性成分的含量和种类

Tab. 1 The content and number of volatile components in rice variety Diantun 502 and its rejuvenated lines							
物质名称 substance names	指标 index	滇屯 502 Diantun 502	502-23	502-44	502-50	502-92	502-115
醛类 aldehydes	C/%	41.71	50.57	53.80	47.59	54.87	44.78
	N	20	19	21	19	22	21
醇类 alcohols	C/%	17.69	16.92	15.06	17.61	13.70	11.16
	N	17	15	12	18	14	12
酮类 ketones	C/%	14.83	11.56	15.36	17.31	12.44	10.60
	N	16	12	15	16	11	13
酯类 esters	C/%	1.52	2.06	1.66	1.57	1.77	1.42
	N	4	6	3	3	4	5
烃类 hydrocarbons	C/%	8.40	5.89	6.90	7.93	9.23	8.65
	N	18	16	13	12	12	15
呋喃类 furans	C/%	4.73	4.72	4.92	5.50	4.83	3.11
	N	4	3	2	5	1	2
醚类 ethers	C/%	0.61	0.78	0.17	0.50	0.51	0.64
	N	2	1	1	1	1	1
吡啶类 indoles	C/%	—	—	0.27	—	—	—
	N	—	—	1	—	—	—
酚类 phenols	C/%	0.66	0.77	0.26	0.34	0.27	0.26
	N	1	1	1	1	1	1
其他 others	C/%	9.77	5.17	1.60	1.65	2.38	19.38
	N	3	3	2	2	2	2

注: — 表示未检出; C 表示该成分占总挥发性成分百分比; N 表示挥发性成分种类。
Note: —, undetected; C, percentage of total volatile components; N, volatile components type.

2-乙酰基-1-吡咯啉 (2AP)、1-辛烯-3-醇、正己醇、壬醛、己醛、辛醛、庚醛、戊醛、(E)-2-壬烯醛、十一醛和 2,3-二氢-1,1,5-6-四甲基-1H-吡啶等 11 种挥发性成分(表 2), 是稻米中关键风味化合物^[17-18]。醛类气味特征以水果香、青草香和甜香为主^[17-19], 在 5 个品系中鉴定出 7 种醛类物质, 分别为具青草香的己醛、脂肪香的壬醛、水果香的戊醛、水果味的庚醛、柑橘味的辛醛、黄瓜香的 E-2-壬烯醛和玫瑰香的十一醛, 它们的含量为 32.22%~40.48%, 都高于滇屯 502 (28.83%)。其中, 己醛被认为是香稻中重要的香气成分, 5 个品系中己醛的相对含量 (8.13%~11.87%) 都高于滇屯 502 (7.83%)。5 个品系中鉴定出具蘑菇风味的 1-辛烯-3-醇^[19]和水果芳香的正己醇^[17]等醇类物质, 它们的含量为 3.51%~7.78%, 其中品系 502-23 (7.78%)、502-44 (5.69%) 和 502-50 (6.97%) 的含量高于滇屯 502 (4.93%)。2-乙酰基-1-吡咯啉 (2AP) 是一种具爆米花香味的成分, 易溶于水、乙醇和乙醚, 被认为是香稻香味的特征化合物和主要贡献物^[20-22]。在 5 个品系都鉴定出 2-乙

酰基-1-吡咯啉 (2AP), 含量为 0.26%~0.77%, 其中品系 502-23 (0.77%) 的含量高于滇屯 502 (0.66%)。吡啶类成分 2,3-二氢-1,1,5-6-四甲基-1H-吡啶在品系 502-44 中鉴定出, 并未在滇屯 502 中鉴定出。在香稻绥稻 4 号稻米中鉴定出吡啶化合物, 含量虽较低却表现强烈的风味特征^[23]。

在稻米关键风味化合物上, 与滇屯 502 比较, 品系 502-23 的醛类、醇类和 2-乙酰基-1-吡咯啉 (2AP) 含量均较高, 品系 502-44 的醛类、醇类、酮类和吡啶类含量较高, 品系 502-50 的醛类、醇类和酮类含量较高, 502-92 和 502-115 仅在醛类含量上较高。总体上, 5 个复壮品系稻米中的关键香气成分都高于滇屯 502, 说明复壮研究获得的 5 个香稻品系香味更浓郁。

3 讨论

本研究采用顶空固相微萃取结合气质联用技术分析了滇屯 502 及其 5 个复壮品系稻米的挥发性成分, 挥发性成分中醛类、醇类和酮类含量最为丰富。但不同香味挥发性成分对香米香气贡献

表 2 滇屯 502 及其复壮品系关键风味化合物占总挥发性成分百分比

Tab. 2 The key flavor compounds of rice variety Diantun 502 and its rejuvenated lines %

物质名称 substance names	滇屯 502 Diantun 502	502-23	502-44	502-50	502-92	502-115
醛类 aldehydes						
戊醛 pentanal	—	1.02	0.94	—	1.72	1.04
己醛 hexanal	7.83	11.07	11.83	10.70	9.13	8.13
庚醛 heptanal	1.93	2.45	2.04	1.74	2.99	2.23
辛醛 octanal	3.33	3.59	3.80	3.37	4.65	3.39
壬醛 nonanal	13.45	18.36	18.37	15.54	19.01	15.94
(E)-2-壬烯醛 (E)-2-nonenal	1.32	1.87	2.03	2.09	1.00	1.16
十一醛 undecanal	0.97	0.16	0.79	0.42	1.98	0.33
合计 total	28.83	38.52	39.80	33.86	40.48	32.22
醇类 alcohols						
正己醇 1-hexanol	2.89	4.11	3.30	4.14	2.49	1.92
1-辛烯-3-醇 1-octen-3-ol	2.04	3.67	2.39	2.83	1.39	1.59
合计 total	4.93	7.78	5.69	6.97	3.88	3.51
吡啶类 indoles						
2,3-二氢-1,1,5,6-四甲基-1H-吡啶 2,3-dihydro-1,1,5,6-tetramethyl-1H-Indene	—	—	0.27	—	—	—
酚类 phenols						
2-乙酰-1-吡咯啉 2-acetyl-1-pyrroline	0.66	0.77	0.26	0.34	0.27	0.26
总计 sum	34.42	47.07	46.02	41.17	44.63	35.99

不同，仅靠成分高低并不能确定该成分对整体香气的贡献程度，相同浓度下阈值越低对香气的贡献就越大^[24]，如香稻香味特征性成分 2-乙酰基-1-吡咯啉 (2AP) 阈值非常低 (0.1 μg/kg)，可赋予香稻显著的香味^[25]。醛类关键化合物中，壬醛含量最高，这与张文灿等^[23]的研究结果一致，壬醛阈值低 (1 μg/kg)，是众多香米的关键香味成分^[5]。醇类中，正己醇含量最高，正己醇阈值低 (90 μg/kg)，具有水果香气，天然存在于水果中^[23]。吡啶含量高时产生不愉快气味，但低含量时产生优雅的茉莉花香^[26]，502-44 中含低含量的吡啶，有助于整体形成特殊的香味。以上几种香味成分阈值较低，在含量低时也能呈现强烈的风味特征，对整体风味的形成影响较大。

复壮品系 11 种关键香味成分总量均高于滇屯 502，但有些复壮品系个别香味关键性成分低于滇屯 502。如 502-23 的十一醛含量，502-44 的十一醛和 2-乙酰基-1-吡咯啉 (2AP) 含量，502-50 的庚醛、十一醛和 2-乙酰基-1-吡咯啉 (2AP) 含量，502-92 的 (E)-2-壬烯醛、正己醇、1-辛烯-3-醇和 2-乙酰基-1-吡咯啉 (2AP) 含量，502-115 的 (E)-2-壬烯醛、十一醛、正己醇、1-辛烯-

3-醇和 2-乙酰基-1-吡咯啉 (2AP) 含量均低于滇屯 502，尤其关键香味成分 2-乙酰基-1-吡咯啉 (2AP) 只在 502-23 中高于滇屯 502，可能是环境因素造成的，具体原因还需进一步研究。

MATHURE 等^[27]对 91 种香稻的挥发性成分进行定量分析，发现 2-乙酰基-1-吡咯啉 (2AP) 含量和吡啶呈正相关，本研究中只在 502-44 中发现吡啶，其 2-乙酰基-1-吡咯啉 (2AP) 含量仅为 0.26%。香叶基丙酮是酮类挥发性成分中重要的香气成分，已在多种植物研究中被报道，如在云南蒸熏茶的香气成分中发现了 30 种挥发性化合物，其中香叶基丙酮是主要的香味成分，具木兰香气^[28]；在药材广金钱草中鉴定出 10 种主要挥发性成分，香叶基丙酮含量为 1.75%^[29]。有研究表明：香禾糯烹饪前并未产生香叶基丙酮，烹饪后却出现了新的香味成分香叶基丙酮，但其含量较低^[30]，滇屯 502 及其 5 个复壮品系中都鉴定出香气成分香叶基丙酮，相对含量较高，该成分在香稻滇屯 502 中是否是一种关键的香味成分还有待研究。如图 2 所示：只在滇屯 502 中发现了低含量苯类化合物，杨洁等^[31]认为香味强度与苯类化合物的含量有关，即苯类化合物含量越高，香米香味强

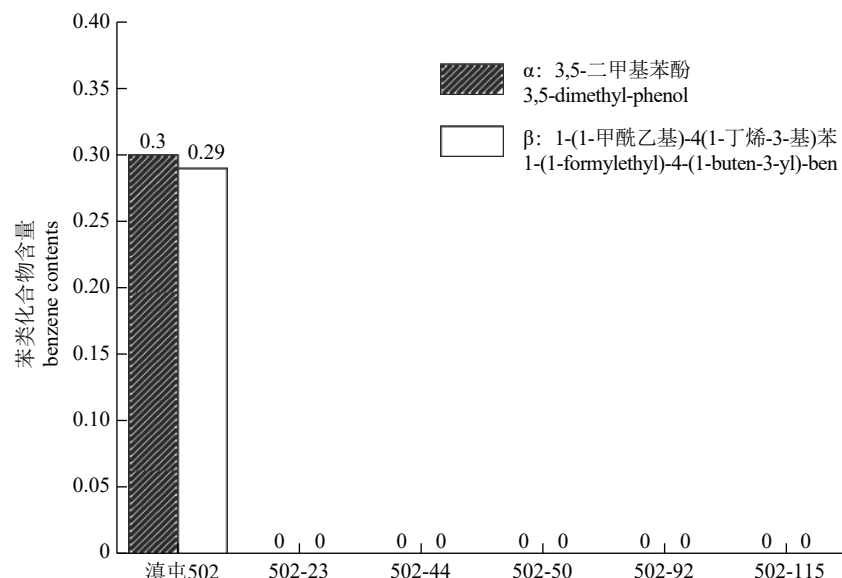


图2 滇屯502及其复壮品系苯类化合物占总挥发性成分百分比

Fig. 2 The benzene compounds of rice variety Diantun 502 and its rejuvenated lines

度越强,这与本研究结果不相符。

复壮品系稻米含有非常丰富的香气成分。除了香味性状外,营养价值也是评价水稻品质的重要标准,进一步对滇屯502及其复壮品系的营养指标(蛋白质、维生素和矿物质元素等)进行鉴定,以期为云南香稻育种研究提供优质的水稻资源。

4 结论

采用SPME结合GC-MS技术分析,在滇屯502及其5个复壮品系(502-23、502-44、502-50、502-92和502-115)稻米中鉴定出挥发性成分分别有85、76、71、77、68和72种,包括烃类、醇类、酮类、醛类、酯类、呋喃类、醚类、吡啶类和酚类等,其中醛类、醇类和酮类成分含量最丰富。发现含有香稻关键香味化合物11种,含量为34.42%~47.07%,5个复壮品系的含量均高于滇屯502,其中502-23含量最高,较滇屯502高36.75%,其他4个品系502-44、502-50、502-92和502-115分别高33.70%、19.61%、29.66%和4.56%。在5个品系中都鉴定出香稻香味的特征化合物2-乙酰基-1-吡咯啉(2AP),502-23的含量较滇屯502高16.67%。滇502及其5个复壮品系中都鉴定出香叶基丙酮含量为1.50%~3.92%,在稻米中很少报道鉴定出该酮类成分。

[参考文献]

- [1] LAU W C P, RAFII M Y, ISMAIL M R, et al. Review of functional markers for improving cooking, eating, and the nutritional qualities of rice[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2015, 6: 832. DOI: [10.3389/fpls.2015.00832](https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00832).
- [2] MO Z W, WU L, PAN S G, et al. Shading during the grain filling period increases 2-acetyl-1-pyrroline content in fragrant rice[J]. *Rice*, 2015, 8(1): 1. DOI: [10.1186/s12284-015-0040-y](https://doi.org/10.1186/s12284-015-0040-y).
- [3] 何振宇. 广东省水稻品质改良现状及未来育种策略[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
- [4] 周小理, 王惠, 周一鸣, 等. 不同烹煮方式对米饭食味品质的影响[J]. *食品科学*, 2017, 38(11): 75. DOI: [10.7506/spkx1002-6630-201711013](https://doi.org/10.7506/spkx1002-6630-201711013).
- [5] CHAMPAGNE E T. Rice aroma and flavor: a literature review[J]. *Cereal Chemistry*, 2008, 85(4): 447. DOI: [10.1094/CCHEM-85-4-0445](https://doi.org/10.1094/CCHEM-85-4-0445).
- [6] MO Z W, HUANG J X, XIAO D, et al. Supplementation of 2-ap, Zn and La improves 2-acetyl-1-pyrroline concentrations in detached aromatic rice panicles *in vitro*[J]. *PLoS One*, 2016, 11(2): e0149523. DOI: [10.1371/journal.pone.0149523](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0149523).
- [7] 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. DOI: [10.1016/j.jcs.2013.09.010](https://doi.org/10.1016/j.jcs.2013.09.010).
- [8] ZENG Z, ZHANG H, ZHANG T, et al. Analysis of flavor volatiles of glutinous rice during cooking by combined gas chromatography-mass spectrometry with modified headspace solid-phase microextraction method[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2009, 22(4): 347. DOI: [10.1016/j.jfca.2008.11.020](https://doi.org/10.1016/j.jfca.2008.11.020).
- [9] HINGE V R, PATIL H B, NADAF A B. Comparative

- characterization of aroma volatiles and related gene expression analysis at vegetative and mature stages in basmati and non-basmati rice (*Oryza sativa* L.) cultivars[J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2015, 178(4): 619. DOI: [10.1007/s12010-015-1898-2](#).
- [10] 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: 38. DOI: [10.1186/s12284-016-0113-6](#).
- [11] MATHURE S V, WAKTE K V, JAWALI N, et al. Quantification of 2-acetyl-1-pyrroline and other rice aroma volatiles among indian scented rice cultivars by HS-SPME/GC-FID[J]. Food Analytical Methods, 2011, 4(3): 326. DOI: [10.1007/s12161-010-9171-3](#).
- [12] 宋伟, 胡婉君, 徐宗季, 等. 湖南省主要早籼稻品种挥发性物质种类及含量[J]. 中国农业科学, 2017, 50(2): 348. DOI: [10.3864/j.issn.0578-1752.2017.02.013](#).
- [13] 康文翠, 林颖, 满忠秀. 基于 GC-MS 与多变量分析方法的的不同储藏期大米挥发特征气味的分析[J]. 中国粮油学报, 2018, 33(5): 94. DOI: [10.3969/j.issn.1003-0174.2018.05.016](#).
- [14] 林家永, 高艳娜, 吴胜芳, 等. 顶空固相微萃取-气质联用法分析稻谷挥发性成分[J]. 食品科学, 2009, 30(20): 277. DOI: [10.7506/spkx1002-6300-200920059](#).
- [15] 李铮友, 师常俊, 李晓艾, 等. 香软米滇屯 502 的选育[J]. 云南农业大学学报, 1999, 14(1): 28.
- [16] 苗菁, 苏慧敏, 张敏. 米饭中关键风味化合物的分析[J]. 食品科学, 2016, 37(2): 82. DOI: [10.7506/spkx1002-6630-201602014](#).
- [17] 梁静, 杨冬梅, 田向荣, 等. 永顺颗砂贡米香气成分的气相色谱—质谱分析[J]. 食品科学, 2014, 35(8): 236. DOI: [10.7506/spkx1002-6630-201408047](#).
- [18] 刘玉平, 苗志伟, 陈海涛, 等. 4 种市售香米中挥发性成分提取与分析[J]. 食品科学, 2011, 32(20): 181. DOI: [10.7506/spkx1002-6630-201120038](#).
- [19] 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. DOI: [10.7506/spkx1002-6630-201716017](#).
- [20] WANCHANA S, KAMOLSUKYUNYONG W, RUENGPHAYAK S, et al. A rapid construction of a physical contig across a 4.5 cM region for rice grain aroma facilitates marker enrichment for positional cloning[J]. Science Asia, 2005, 31(3): 299. DOI: [10.2306/scienceasia1513-1874.2005.31.299](#).
- [21] BRADBURY L M T, GILLIES S A, BRUSHETT D J, et al. Inactivation of an aminoaldehyde dehydrogenase is responsible for fragrance in rice[J]. Plant Molecular Biology, 2008, 68(4/5): 439. DOI: [10.1007/s11103-008-9381-x](#).
- [22] YAHYA F, FRYER P J, BAKALIS S. The absorption of 2-acetyl-1-pyrroline during cooking of rice (*Oryza sativa* L.) with pandan (*Pandanus amaryllifolius* Roxb.) leaves [J]. Procedia Food Science, 2011, 1(1): 722. DOI: [10.1016/j.profoo.2011.09.109](#).
- [23] 张文灿, 袁永红. 绥粳 4 号香米的风味组成及关键致香化合物的鉴定[J]. 中国粮油学报, 2014, 29(4): 5.
- [24] 乔宇, 谢笔钧, 张妍, 等. 三种温州蜜柑果实香气成分的研究[J]. 中国农业科学, 2008(5): 1452. DOI: [10.3864/j.issn.0578-1752.2008.05.025](#).
- [25] YANG D S, LEE K S, JEONG O Y, et al. Characterization of volatile aroma compounds in cooked black rice[J]. Journal Of Agricultural And Food Chemistry, 2008, 56(1): 35. DOI: [10.1021/jf072360c](#).
- [26] 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. DOI: [10.1021/jf0108720](#).
- [27] MATHURE S V, JAWALI N, THENGANE R J, et al. Comparative quantitative analysis of headspace volatiles and their association with BADH2 marker in non-basmati scented, basmati and non-scented rice (*Oryza sativa* L.) cultivars of India[J]. Food Chemistry, 2014, 142: 383. DOI: [10.1016/j.foodchem.2013.07.066](#).
- [28] 杨彬, 彭远菊, 闫刚, 等. SPME/GC-MS 法分析云南蒸酶茶的香气成分[J]. 热带农业科技, 2018, 41(2): 24. DOI: [10.16005/j.cnki.tast.2018.02.004](#).
- [29] 马贤鹏, 欧邦露, 马晋芳, 等. GC-MS 联用技术分析广金钱草中的挥发性成分[J]. 广东化工, 2018, 45(9): 63. DOI: [10.3969/j.issn.1007-1865.2018.09.027](#).
- [30] 孔政, 赵德刚. 贵州香禾糯烹饪前和烹饪后的香味成分区别[J]. 食品科技, 2014, 39(6): 164. DOI: [10.13684/j.cnki.spkj.2014.06.037](#).
- [31] 杨洁, 熊光权, 程薇, 等. 顶空固相微萃取与气质联用法分析香米中的挥发性成分[J]. 湖北农业科学, 2010, 49(11): 2898. DOI: [10.14088/j.cnki.issn0439-8114.2010.11.035](#).

责任编辑: 何承刚