

王学良,王忠妮,李祖军,等. 香稻苟当 3 号香味成分与土壤养分相关性分析[J]. 江苏农业科学,2023,51(7):168-173.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.07.023

香稻苟当 3 号香味成分与土壤养分相关性分析

王学良¹, 王忠妮², 李祖军², 徐海峰², 龚记熠¹, 浦选昌³, 郑桂云³, 张玉珊⁴, 朱速松²

(1. 贵州师范大学生命科学学院, 贵州贵阳 550001; 2. 贵州省农业科学院水稻研究所, 贵州贵阳 550006;

3. 贵州省黔东南州农业科学院, 贵州黔东南 556099; 4. 贵州省农业科学院生物技术研究所, 贵州贵阳 550006)

摘要: 苟当 3 号为贵州省特有栽培稻, 其香味浓郁, 品质优良, 但目前对苟当 3 号香味的研究报道不多。为探究苟当 3 号中控制香味的 *Badh2* 基因与不同种植地区的香味浓淡差异, 通过基因测序对比分析苟当 3 号的 *Badh2* 基因, 并采用 1.7% KOH 浸泡法、顶空固相微萃取(HS-SPME)和气相色谱-质谱(GC-MS)法、土壤元素鉴定法对苟当 3 号香味、挥发性物质成分及土壤养分进行分析, 分析结果表明, 苟当 3 号 *Badh2* 基因的基因型为 *Badh2.1* 即在第 7 外显子发生了 3 bp 突变以及 8 bp 缺失。同时发现, 随着种植点的升高稻米的香味会更加浓郁, 稻米中的 2-AP 与壬醛含量会随着种植点的升高而增加。此外, 随着种植点的升高土壤中的全氮含量也会增加。土壤养分与挥发物含量的相关性分析结果表明, 土壤中的全氮含量与 2-AP、壬醛含量呈显著正相关, 对稻米香味的贡献最大。本研究将为探索土壤元素、挥发性物质对稻米香味的影响提供理论依据。

关键词: 挥发性成分; 土壤养分; *Badh2* 基因; 2-AP; 苟当 3 号

中图分类号: S511.01 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2023)07-0168-06

我国香稻因具有浓郁的香气, 广受消费者的喜爱。人们目前普遍认为, 香稻中主要香味物质为 2-乙酰-1-吡咯啉 2-AP, 2-AP 的合成主要是因为 *Badh2* 基因突变所导致的^[1]。*Badh2* 基因会编码甜菜碱醛脱氢酶, 催化 4-氨基丁醛转化为 4-氨基丁酸, 由此使得 2-AP 的合成遭到抑制, 导致稻米缺乏香气。当 *Badh2* 基因突变后, 甜菜碱醛脱氢酶失去活性, 抑制了 4-氨基丁醛向 4-氨基丁酸的转化, 解除了对 2-AP 合成的抑制, 从而使稻米产生了香味^[2]。研究发现 *Badh2* 的突变类型复杂多样, 在 1、2、4、5、7、10、12、13、14 外显子上都有突变位点^[3]。最常见的为 *Badh2.1*, 即第 7 外显子上所发生的 8 碱基缺失以及 3 碱基突变, 著名香稻 Basmati 和 Jasmine 便是这种等位基因型^[4]。然而影

响稻米香味的物质并不只有 2-AP, 除 2-AP 外稻米中 100 多种物质可产生香味, 主要包括醛、酮、醇、烃类等^[5]。醛类物质在稻米挥发性物质中占重要地位, 其中壬醛、己醛、庚醛、辛醛对稻米香味影响最大^[6]。研究发现, 香稻的生长条件也会影响自身的香气浓度, 如光照、温度、水分、肥料、矿质元素、盐分等因素^[7]。徐振江等发现, 温度对稻米香味浓淡有着重要影响, 当稻米的生长温度大于 25 °C 时稻米的香味就会有所下降^[8]。Bao 等的研究表明, 利用干湿交替的方式进行灌溉最终会使稻米有更加浓郁的香气^[9]。钟群等研究发现, 氮肥可以增加稻米中游离脯氨酸, 并且可以促进 2-AP 的积累^[10]。孙树侠等研究发现, 在氮元素含量较高的种植地稻米中 2-AP 含量会更高, 香味更浓^[11]。Mo 等研究发现, 施硅肥也可以增加稻米中 2-AP 的含量^[12]。Luo 等研究发现, 硒肥也可以使稻米中 2-AP 的含量增加^[13]。唐湘如等研究发现, 在水稻生长期间, 喷洒氯化镧能显著提高稻米中 2-AP 的含量, 使稻米香味更浓^[14]。

苟当 3 号是贵州省黔东南州精心培育的特有香稻品种, 它香气怡人, 品质优良。生产中发现, 不同地区种植的苟当 3 号其稻米香味浓度具有较大差异。为明确苟当 3 号产生香味以及不同种植点香味浓度差异的原因, 本研究分析了苟当 3 号中 *Badh2*

收稿日期: 2022-07-22

基金项目: 国家自然科学基金委员会-贵州省人民政府喀斯特科学研究中心项目(编号: U1812401); 国家重点研发计划(编号: 2017YFD0100402); 中央引导地方科技发展专项(编号: 黔科中引地 20194001 号); 贵州省农业科学院财政专项(编号: 黔农科院种质资源 202112 号)。

作者简介: 王学良(1997—), 男, 吉林辽源人, 硕士研究生, 主要从事水稻品质研究。E-mail: 1586279694@qq.com。

通信作者: 朱速松, 博士, 研究员, 主要从事水稻分子育种研究。E-mail: susongzhu@139.com。

的基因型,并对不同种植点的稻米进行了香味鉴定、挥发性成分分析,以及土壤成分分析,以期揭示不同地区种植的苟当 3 号香味差异形成的原因。

1 材料与amp;方法

1.1 试验材料及样品处理

苟当 3 号于 2021 年种植于贵州省从江县 5 个不同地区,种植点从高到低依次为高岭 857 m、机荚林 637 m、岑木 535 m、高大 437 m、虾板 242 m。材料进行正常田间管理,抽穗后取叶片置于超低温冰箱中保存,种子成熟后室温放置 3 个月,性状稳定后称取饱满的稻谷 20 g,用绿洲锋速 LTJM160 型精米机脱壳,用 FS-Ⅱ 型实验室旋风式粉碎磨磨成米粉过 50 目筛,真空包装, -20 ℃ 保存。

1.2 香味感官评价试验

将 5 g 叶片打碎倒入试管后加 1.7% 氢氧化钾溶液,用橡胶塞堵住管口,常温浸泡 10 min 后打开试管逐一嗅其气味,并对香味浓度进行评定。根据 Golam 等的方法^[15]对水稻的香气进行评分。对样品按 5 个标准进行评分,其中 1、2、3、4、5 分别对应无香气、轻度香气、中度香气、高度香气、特浓香气。所有的样本都由 3 名经验丰富的小组成员进行评分。

1.3 苟当 3 号 *Badh2* 基因全长测序

为验证苟当 3 号会产生香气的原因是否为 *Badh2* 基因的突变而导致的,对苟当 3 号的 *Badh2* 基因全长进行测序。首先待抽穗后从大田内收取材料的叶片组织采用十六烷基三甲基溴化铵 (CTAB) 法提取材料叶片组织 DNA。其次在 NCBI 网站上搜索 *Badh2* 基因的全基因组序列,引物参考 Shi 等在文献中设计的 10 对 *Badh2* 基因全长扩增引物^[2]。由北京擎科生物科技有限公司合成这 10 对引物。合成后对苟当 3 号的 DNA 进行扩增。其扩增产物经 1% 琼脂糖凝胶电泳检测合格后送北京擎科生物科技有限公司进行测序,并使用 DNAMAN 对测序结果进行对比分析。

1.4 挥发性成分分析

将 25 g 米粉倒进 50 mL 顶空进样瓶中,盖好瓶口,加入 40 mL ddH₂O 后放置于加热平台。于 80 ℃ 进行加热,一定温度平衡 20 min。平衡后将萃取头刺穿隔垫,调整高度置于样品上方 5 cm 处,萃取吸附 40 min 后将纤维头插入气相色谱-质谱仪进口解吸 5 min。进样口温度 255 ℃,流速 1.0 mL/min。

起始柱温为 45 ℃,以 9 ℃/min 的速度升温,温度达到 255 ℃ 后保持 10 min。电离方式 EI,质谱扫描范围 40 ~ 500 amu/s,检索数据库 NIST11。

1.5 土壤检测方法

pH 值采用 pH 计进行检测;有机质含量采用重铬酸钾滴定比色法测定;全氮含量采用凯氏定氮法测定;全钾含量采用 NaOH 熔融火焰光度法测定;碱解氮含量采用碱解扩散法测定;速效磷含量采用钼锑抗比色法测定;速效钾含量采用 NH₄AC 浸提法测定;全磷含量采用碱溶钼锑抗比色法测定。

1.6 数据分析

使用 Thermo TraceFinder 4.1 软件对数据进行处理,未知成分经过检索后同标准数据库进行对比。筛选出综合分大于 70 同时正反比对分数大于 600 的物质。将筛选出来的物质的保留指数与 NIST library(2017)数据库进行比对来确定其成分。挥发性物质的相对含量应用面积归一法计算。数据处理采用 Excel 2021。

2 结果与分析

2.1 香味感官评价试验

本研究在从江县选取 5 个地区对苟当 3 号进行种植。采用 KOH 浸泡法对 5 个地区的稻米香味给予评判。由 10 人组成小组每人 2 次对材料进行闻香味试验并对香味浓度进行打分。通过感官试验,发现不同种植点种植的稻米的香味存在差异(表 1)。在高岭种植点稻米的香味最为浓郁,在虾板种植点香味得分最低。

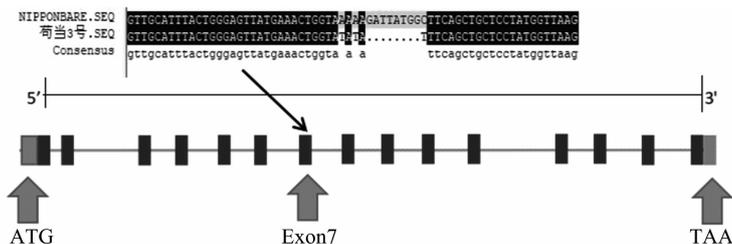
表 1 稻米香味感官评价排列

种植点	香味得分
高岭	5
机荚林	4
岑木	3
高大	2
虾板	1

注:各种种植点香味判断为 20 次。

2.2 苟当 3 号 *Badh2* 基因全长测序结果

为探究苟当 3 号产生香味是否为 *Badh2* 基因突变所致,对苟当 3 号中 *Badh2* 基因进行测序。序列对比结果显示,苟当 3 号的 *Badh2* 基因在第 7 外显子表现为 3 bp 突变以及 8 bp 缺失(图 1),从而断定苟当 3 号会产生香气是由于 *Badh2* 基因的突变所致。

图1 苟当3号 *Badh2* 基因第7外显子突变情况

2.3 5个不同种植点稻米挥发性成分分析

为了探究苟当3号在不同种植点香味差异的原因是否与2-AP含量有关,本试验对不同种植点苟当3号中香味挥发物2-AP浓度进行测定。从检测结果来看不同种植点苟当3号中2-AP的浓度存在差异(表2)。且随着种植点海拔的升高稻米中2-AP的含量也随之增加(图2)。同时为研究其他挥发性物质对苟当3号香味的影响,本研究对5个种植点稻米中的挥发性成分进行分析,检测出的挥发性成分主要包括醛类(壬醛、己醛、庚醛、辛醛、戊醛、苯甲醛等)、醇类(1-辛烯醇-3-醇、正己醇等)、酮类(3-己酮、2,3-丁二酮等)(表3)。通过检测结果发现不同种植点其稻米中的挥发性物质存在较大差异。在高岭种植点稻米香味最为浓郁,而虾板种植点香味最低,在高岭种植点稻米中2-AP与壬醛的含量都高于虾板种植点,且这2种物质的浓度都随着种植点的升高而增加。2-AP与挥发性物质相关性分析结果(表4)表明,2-AP与壬醛呈极显著正相关,与异丁醛则不相关。造成二者间

香味浓度差距的主要原因可能是由于稻米中2-AP与壬醛含量的差异。

表2 不同种植点稻米2-AP浓度

村名	田块地名	东经	北纬	海拔(m)	2-AP浓度(mg/kg)
高增村	虾板	108°56'8"	25°47'49"	242	0.15
高增村	高大	108°55'58"	25°48'17"	437	0.16
新生村	岑木	108°56'30"	25°44'53"	535	0.18
美德村	机英林	108°58'8"	25°48'18"	637	0.20
建华村	高岭	108°57'33"	25°46'43"	857	0.22

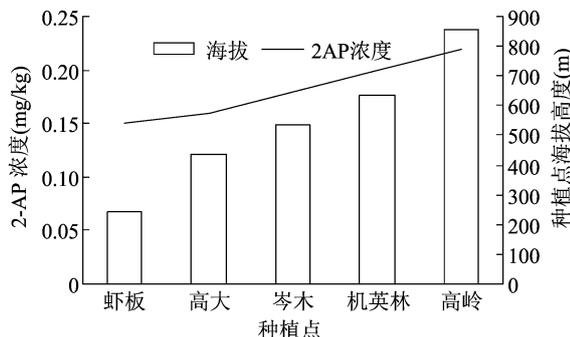


图2 稻米中2AP浓度与种植点高度的关系

表3 苟当3号材料不同海拔高度种植地点各类挥发物质种类及其含量的GC-MS分析结果

种类	化合物名称	不同种植点稻米挥发物相对含量(%)					
		虾板	高大	岑木	机英林	高岭	
醛	4-氨基丁醛	0.08	0.10	0.11	0.13	0.15	
	壬醛	0.19	0.21	0.24	0.25	0.29	
	己醛	4.09	4.77	3.91	4.24	4.38	
	戊醛	13.58	11.91	15.19	13.45	14.60	
	庚醛	0.12	0.14	0.15	0.17	0.17	
	辛醛	0.22	0.21	0.24	0.25	0.27	
	E-2-壬烯醛	0.11	0.13	0.14	0.13	0.16	
	异丁醛	28.21	27.39	28.90	26.88	23.63	
	2-甲基丁醛	14.52	12.42	18.48	14.36	15.07	
	糠醛	5.85	13.91	0	0	6.54	
	苯甲醛	1.95	2.01	2.10	2.21	1.65	
	醇	1-辛烯醇-3-醇	0.06	0.08	0.09	0.08	0.12
		正己醇	0.05	0.07	0.06	0.07	0.08
酮	3-己酮	0	10.00	0	11.09	9.23	
	2,3-丁二酮	12.26	13.48	13.80	0	0	
	γ-氨基丁酸	0.03	0.04	0.04	0.02	0.05	

表 4 2-AP 与挥发性物质的相关性分析结果

挥发性物质	与 2-AP 浓度的相关系数	挥发性物质	与 2-AP 浓度的相关系数
4-氨基丁醛相对含量	0.98**	2-甲基丁醛相对含量	0.22
壬醛相对含量	0.98**	糠醛相对含量	-0.37
己醛相对含量	-0.02	苯甲醛相对含量	-0.34
戊醛相对含量	0.48	1-辛烯醛-3-醇相对含量	0.85
庚醛相对含量	0.94*	正己醇相对含量	0.79
辛醛相对含量	0.95*	3-己酮相对含量	0.51
E-2-壬烯醛相对含量	0.84	2,3-丁二酮相对含量	-0.86
异丁醛相对含量	0.23	γ -氨基丁酸相对含量	0.26

注: * 表示在 0.05 水平上显著相关; ** 表示在 0.01 水平上极显著相关。表 6 同。

2.4 不同种植点的土壤特性

为明确苟当 3 号的香气浓度与土壤成分的关系,本研究对 5 个种植点土壤的碱解氮含量、速效钾含量、有效磷含量、全磷含量、全钾含量、全氮含量、有机质含量及 pH 值共 8 个指标进行测定。检测结果(表 5)显示以上 8 个指标在从江县 5 个种植点中分布具有较大差异,碱解氮含量在机英林种植点最高,为 287.67 mg/kg;有机质含量在高岭种植点最高,为 52.43 g/kg;pH 值在高岭种植点最高,为 5.37;全钾、速效钾含量在芩木种植点最高,分别为 14.36 g/kg、47.06 mg/kg;全磷、有效磷含量在高大种植点最高,分别为 1.11 g/kg、30.17 mg/kg;全氮

含量最高的种植点为高岭,为 3.02 g/kg。对比 5 个地区的土壤成分可以发现,碱解氮与有效磷含量的变异系数达到了 94.00%,说明这 2 种成分在不同的土壤中差别较大,变异系数最小的为 pH 值,说明在不同种植地土壤中变化较小。速效钾、全磷、全钾、全氮、有机质含量的变异系数范围在 19% ~ 55% 之间,说明这 5 个指标在不同种植点土壤中具有较大差别。通过对比虾板与高岭种植点的土壤成分发现,在高岭种植点土壤中,除有效磷、全钾含量外,其他指标均高于虾板种植点,全氮与有机质的含量更是明显高于虾板地区且远高于 5 个种植点的平均值。

表 5 从江县不同种植点土壤肥力成分含量

土壤取样点	碱解氮含量 (mg/kg)	有机质含量 (g/kg)	pH 值	全钾含量 (g/kg)	全磷含量 (g/kg)	速效钾含量 (mg/kg)	有效磷含量 (mg/kg)	全氮含量 (g/kg)
虾板	150.98	28.74	4.67	12.59	0.80	42.00	14.35	1.73
高大	143.26	27.33	5.25	10.92	1.11	35.29	30.17	1.80
芩木	256.44	47.13	5.13	14.36	0.80	47.06	10.82	2.93
机英林	287.67	43.10	5.13	12.95	0.55	32.00	9.41	2.58
高岭	179.31	52.43	5.37	12.55	0.91	43.14	13.15	3.02
平均值	151.73	39.75	5.11	12.67	0.83	39.89	15.58	2.41
标准差	143.41	22.13	0.54	2.41	0.17	12.24	14.76	1.22
变异系数(%)	94.00	55.00	10.00	19.02	20.48	30.68	94.00	50.00

为了研究土壤成分对香味挥发性物质的影响,对土壤成分与香味挥发性物质的相关性进行分析。结果表明,土壤中全氮含量与 2-AP、壬醛、庚醛呈显著正相关,有机质含量与 2-AP、壬醛、辛醛呈显著正相关,pH 值与正己醇呈显著正相关,全钾含量与己醛、戊醛、异丁醛、2-甲基丁醛呈显著正相关,全磷含量与糠醛呈显著正相关,有效磷含量与糠醛呈显著正相关,全钾含量与糠醛呈显著负相关,有

效磷含量与异丁醛呈显著负相关(表 6)。

3 讨论与结论

稻米能否产生香味通常取决于其体内的 *Badh2* 基因是否发生突变^[16]。*Badh2* 基因的突变类型有很多,现已发现 17 个突变类型,最常见的为在第 7 外显子所发生的 8 碱基缺失以及 3 碱基替换,从而造成 2-AP 的积累^[17]。通过对苟当 3 号的 *Badh2*

表 6 土壤养分与挥发性物质相关性分析结果

挥发性物质	相关系数							
	碱解氮含量	有机质含量	pH 值	全钾含量	全磷含量	速效钾含量	有效磷含量	全氮含量
4-氨基丁醛相对含量	0.41	0.84	0.78	0.15	-0.19	-0.06	-0.36	0.81
壬醛相对含量	0.40	0.92*	0.75	0.28	-0.17	0.12	-0.43	0.89*
己醛相对含量	-0.53	-0.38	0.49	0.93*	0.65	-0.58	0.83	-0.38
戊醛相对含量	0.46	0.80	0.04	0.89*	-0.39	0.76	-0.80	0.79
庚醛相对含量	0.61	0.81	0.77	0.22	-0.34	-0.21	-0.39	0.80
辛醛相对含量	0.47	0.94*	0.49	0.45	-0.42	0.19	-0.68	0.88*
<i>E</i> -2-壬烯醛相对含量	0.18	0.82	0.87	0.16	0.17	0.28	-0.15	0.83
异丁醛相对含量	0.41	0.55	-0.36	0.88*	-0.58	0.67	-0.88*	0.51
2-甲基丁醛相对含量	0.54	0.62	-0.03	0.94*	-0.35	0.76	-0.67	0.67
糠醛相对含量	-0.87	-0.59	0.17	-0.91*	0.88*	-0.21	0.93*	-0.60
苯甲醛相对含量	0.61	-0.27	-0.27	0.24	-0.49	-0.43	-0.10	-0.18
1-辛烯醛-3-醇相对含量	0.10	0.81	0.83	0.12	0.18	0.29	-0.16	0.80
正己醇相对含量	0.09	0.53	0.92*	-0.29	0.19	-0.29	0.12	0.51
3-己酮相对含量	0.07	0.12	0.67	-0.57	0.06	-0.76	0.29	0.09
2,3-丁二酮相对含量	-0.38	-0.61	-0.42	-0.03	0.48	0.35	0.47	-0.53
γ -氨基丁酸相对含量	-0.47	0.33	0.54	-0.11	0.73	0.60	0.29	0.34
2-乙酰-1-吡咯啉相对含量	0.47	0.89*	0.69	0.27	-0.30	0.01	-0.45	0.85*

基因组进行全长测序基本证实了苟当 3 号之所以会产生香味是由于其 *Badh2* 基因第 7 外显子发生突变导致 2-AP 积累引起的。

除受基因影响外,生长环境也对稻米的香味起重要作用,其中土壤环境最为关键,土壤中的全氮、有机质含量在很大程度上影响着稻米的香味^[18]。在全氮含量高的地区同一品种的稻米通常会比其他种植点的稻米更具有香气^[19-20]。氮肥能够提高植株体内的氮含量,利于促进氨基酸的合成,氨基酸是 2-AP 合成的重要组分,因此增加氮肥有利于提高稻米中 2-AP 的含量^[21-22]。海拔高度会影响环境的温度、光照等条件从而对稻米香味的浓度^[23]。对不同地区苟当 3 号 2-AP 含量进行检测,发现 2-AP 浓度会随着种植点的升高而随之增高同时稻米的香味也会增加,说明海拔高度对 2-AP 浓度具有一定的影响。土壤养分与稻米挥发性物质含量相关性分析结果表明,土壤中全氮、有机质含量与 2-AP 浓度呈显著正相关,当土壤中全氮、有机质含量升高时 2-AP 的浓度也会随之升高,并且稻米的香味也会增加。在高岭种植点土壤中全氮含量较高,进而促进了 2-AP 的合成,使该地点的稻米香味更加浓郁,该结果与冬天一等所研究的氮肥对香稻影响的结果^[24]基本吻合。同时通过土

壤养分与稻米中挥发性物质含量相关性分析发现,全氮含量与 4-氨基丁醛呈显著正相关而与 γ -氨基丁酸相关性不显著。4-氨基丁醛为 2-AP 合成的前体物质而 γ -氨基丁酸是 *Badh2* 基因正常无突变的情况下由 4-氨基丁醛转化而来,经检测发现 4-氨基丁醛含量的上升并未导致 γ -氨基丁酸含量的增加,表明苟当 3 号会产生香味的原因是 *Badh2* 基因发生了突变。

香稻中挥发性成分复杂多样,可达 200 多种,其中具有香气的近 100 种,主要为醛类、醇类、酯类、酮类、烃类以及酚类^[25-26]。在苟当 3 号稻米中所测出的挥发性物质共有 16 种,其中醛类物质最多,且醛类物质中戊醛、庚醛、己醛、壬醛含量较为突出,这些物质对稻米的香味都具有重要影响。醛类物质阈值很低且对稻米香味有重要影响^[27-28]。在检测到的挥发性成分中我们发现了一个重要的化合物——壬醛。该物质与 2-AP 具有十分相似的气味,并且在稻米中的含量也是随着种植点海拔的升高而逐渐增高。土壤养分与稻米挥发性物质含量相关性分析结果表明,壬醛与全氮、有机质含量呈显著正相关。2-AP 浓度与挥发性物质相关性分析结果表明,2-AP 浓度与 4-氨基丁醛、壬醛含量呈极显著正相关。4-氨基丁醛为合成 2-AP 的前体

物质,与 2-AP 浓度呈正相关,壬醛与 2-AP 有着相似的气味并且与全氮、有机质含量呈显著正相关,因此影响稻米茱萸 3 号香味的另一因素就是稻米中壬醛的含量。

本研究对茱萸 3 号的 *Badh2* 基因进行全基因组测序发现在第 7 外显子处发生了 3 bp 突变以及 8 bp 缺失,该突变会造成 2-AP 的积累。经研究发现,稻米中壬醛的含量也对稻米的香气有一定的影响,因此造成茱萸 3 号香味差异的主要成分是稻米中 2-AP 与壬醛的含量。同时结合土壤基本养分与香味挥发性物质含量的分析来看,稻米香味主要受土壤中全氮、有机质含量的影响,因此可以通过改善土壤中有有机质、全氮的含量从而进一步提高茱萸 3 号的香味浓度。

参考文献:

- [1] Routray W, Rayaguru K. 2-Acetyl-1-pyrroline: a key aroma component of aromatic rice and other food products [J]. *Food Reviews International*, 2018, 34(6): 539-565.
- [2] Shi W W, Yang Y, Chen S H, et al. Discovery of a new fragrance allele and the development of functional markers for the breeding of fragrant rice varieties [J]. *Molecular Breeding*, 2008, 22(2): 185-192.
- [3] Shao G N, Tang A, Tang S, et al. A new deletion mutation of fragrant gene and the development of three molecular markers for fragrance in rice [J]. *Plant Breeding*, 2010, 130(2): 172-176.
- [4] Bradbury L M T, Fitzgerald T L, Henry R J, et al. The gene for fragrance in rice [J]. *Plant Biotechnology Journal*, 2005, 3(3): 363-370.
- [5] 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): 347-353.
- [6] 张江丽, 李娟, 张春龙, 等. 云南优质软米品种‘滇屯 502’香味性状的遗传分析 [J]. *分子植物育种*, 2018, 16(16): 5397-5406.
- [7] 李辉. 香稻香味的研究进展 [J]. *粮食加工*, 2010, 35(5): 47-49.
- [8] 徐振江, 肖立中, 王维, 等. 香稻产量和品质形成的温度效应 [J]. *华南农业大学学报*, 2006, 27(4): 1-4.
- [9] Bao G G, Ashraf U, Wang C L, et al. Molecular basis for increased 2-acetyl-1-pyrroline contents under alternate wetting and drying (AWD) conditions in fragrant rice [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2018, 133: 149-157.
- [10] 钟群, 唐湘如. 氮肥施用对香稻香气含量的影响及其机理 [J]. *广东农业科学*, 2014, 41(4): 85-87.
- [11] 孙树侠, 刘书城. 水稻的香味及 N、Zn 肥对香味效应的研究 [J]. *作物学报*, 1991, 17(6): 430-435.
- [12] Mo Z W, Lei S, Ashraf U, et al. Silicon fertilization modulates 2-acetyl-1-pyrroline content, yield formation and grain quality of aromatic rice [J]. *Journal of Cereal Science*, 2017, 75: 17-24.
- [13] Luo H W, Du B, He L X, et al. Foliar application of sodium selenate induces regulation in yield formation, grain quality characters and 2-acetyl-1-pyrroline biosynthesis in fragrant rice [J]. *BMC Plant Biology*, 2019, 19(1): 502.
- [14] 唐湘如, 吴密. 施用锌、铁、硼肥对香稻糙米香气和剑叶脯氨酸含量的影响 [J]. *杂交水稻*, 2006, 21(6): 69-72.
- [15] Golam F, Norzulaani K, Jennifer A, et al. Evaluation of kernel elongation ratio and aroma association in global popular aromatic cultivars in tropical environment [J]. *African Journal of Agricultural Research*, 2010, 5: 1515-1522.
- [16] 邵高能, 谢黎虹, 焦桂爱, 等. 利用 CRISPR/CAS9 技术编辑水稻香味基因 *Badh2* [J]. *中国水稻科学*, 2017, 31(2): 216-222.
- [17] 刘文静, 胡文彬, 周政, 等. 一种新的水稻香味基因功能标记的开发与应用 [J]. *热带作物学报*, 2022, 43(4): 675-683.
- [18] 魏晓东, 张亚东, 赵凌, 等. 稻米香味物质 2-乙酰-1-吡咯啉的形成及其影响因素 [J]. *中国水稻科学*, 2022, 36(2): 131-138.
- [19] 莫钊文, 范平珊, 潘圣刚, 等. 肥料类型及施用方式对香稻香气 2-乙酰-1-吡咯啉含量的影响 [J]. *华北农学报*, 2016, 31(5): 152-158.
- [20] 张晓磊, 董卓娅, 韦永贵, 等. 栽培环境影响香稻香味物质积累的研究进展 [J]. *天津农业科学*, 2020, 26(8): 64-66, 76.
- [21] 邢丕鹏, 刘金海, 罗昊文, 等. 有机栽培条件下不同机械种植方式对香稻产量、品质以及香气的影响 [J]. *中国稻米*, 2021, 27(5): 41-44.
- [22] 于洋, 成南龙, 普世皇, 等. 香稻品种滇屯 502 复壮品系稻米挥发性成分分析 [J]. *云南农业大学学报(自然科学)*, 2019, 34(5): 738-744.
- [23] 李静, 袁继超, 蔡光泽. 海拔对水稻产量和品质的影响研究进展 [J]. *中国农学通报*, 2013, 29(24): 1-4.
- [24] 佟天一, 蔡健旋, 张集胜, 等. 香稻专用肥料类型对香稻产量、品质和香气的影响 [J]. *作物杂志*, 2021(4): 152-158.
- [25] Kim M K, Kim H A, Koh K, et al. Identification and quantification of anthocyanin pigments in colored rice [J]. *Nutrition Research and Practice*, 2008, 2(1): 46-49.
- [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): 1101-1105.
- [27] 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): 82-86.
- [28] 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.