

大米中挥发性风味物质的研究进展

彭凯雄¹, 唐群勇², 郑钰涵¹, 王彩霞¹, 刘新海¹, 陈柱伟², 徐娟娟²,
季 方², 陈晓明^{1*}, 吴建峰²

(1. 淮阴工学院生命科学与食品工程学院, 淮安 223003; 2. 江苏今世缘酒业股份有限公司, 涟水 223400)

摘 要: 大米是全球最重要的主食之一, 大米香气是大米中挥发性风味物质所呈现的整体香气和人类感官感知的综合结果, 是大米品质的重要组成部分, 也是影响消费者对大米可接受程度的主要因素。本文通过查阅大米挥发性风味物质方面的相关研究, 综述了大米挥发性风味物质种类和大米风味的影响因素, 着重介绍了大米品种与栽培、碾米精度、破碎程度、贮藏条件、蒸煮和非热加工等对大米中挥发性风味物质的影响, 并对大米挥发性风味物质的研究方向进行了展望, 旨在为大米行业的高品质发展提供新的思路 and 理论参考。

关键词: 大米; 挥发性风味物质; 影响因素; 风味分析

Research progress of volatile flavor substances in rice

PENG Kai-Xiong¹, TANG Qun-Yong², ZHENG Yu-Han¹, WANG Cai-Xia¹, LIU Xin-Hai¹,
CHEN Zhu-Wei², XU Juan-Juan², JI Fang², CHEN Xiao-Ming^{1*}, WU Jian-Feng²

(1. College of Life Science and Food Engineering, Huaiyin Institute of Technology, Huai'an 223003, China;
2. Jiangsu King's Luck Brewery Joint-stock Co., Ltd., Lianshui 223400, China)

ABSTRACT: Rice is one of the most important staple foods in the world. Rice aroma is the comprehensive result of the overall aroma and human sensory perception of volatile flavor compounds in rice. It is an important part of rice quality and the main factor affecting consumers' acceptability of rice. This paper reviewed the types of rice volatile flavor compounds and the influencing factors of rice flavor were reviewed by referring to the related research on rice volatile flavor compounds, emphatically introduced the effects of rice varieties and cultivation, milling accuracy, crushing degree, storage conditions, cooking and non-thermal processing on rice volatile flavor compounds, and prospected the research direction of rice volatile flavor compounds, aiming to provide new ideas and theoretical reference for the high-quality development of rice industry.

KEY WORDS: rice; volatile flavor components; influencing factors; flavor analysis

0 引 言

大米是全球近 35 亿人口的主食^[1], 随着生活水平的提高, 人们越来越注重大米品质。优质大米是目前大米产业的重点, 香味作为大米的主要特征品质之一, 直接影响

着适口性和消费者的可接受性。大米中的风味物质、香味特征化合物及其形成机制、香气质量的评价和研究成果对大米深加工中香气的保留以及育种专家选育高香气、高品质水稻都具有重要作用, 对大米市场竞争和农业经济发展具有重要意义。

基金项目: 江苏省科技项目(BE2020312)、淮安市科技项目(HAN202008)

Fund: Supported by the Jiangsu Science and Technology Project (BE2020312), and the Huai'an Science and Technology Project (HAN202008)

*通信作者: 陈晓明, 博士, 教授, 主要研究方向为食品生物技术。E-mail: 11000499@hyit.edu.cn

*Corresponding author: CHEN Xiao-Ming, Ph.D, Professor, College of Life Science and Food Engineering, Huaiyin Institute of Technology, Huai'an 223003, China. E-mail: 11000499@hyit.edu.cn

过去的半个世纪里,许多研究者致力于研究大米香气特征化合物及其形成机制,以及基因、种植条件、收获条件、贮藏条件和加工方法等对大米香气的影响。然而,大米是一个复杂的系统,其香气是由多种挥发物和人类感官的综合结果,由于挥发性化合物的复杂相互作用以及种植和加工过程中的诸多影响因素,大米香气质量的评价相当复杂。本文对近年来大米中挥发性风味物质研究进行总结,并对大米风味的研究方向进行展望,以期为大米深加工技术提升和产业的发展提供新的思路 and 理论参考。

1 大米中的风味成分

据报道,大米中有 300 多种挥发性风味物质,主要以醇、醛、烷烃类物质为主^[2]。表 1 列举了大米及米饭中较常见的主要挥发性物质及其香气描述,分别呈现果香、花香和一些令人不愉快的香气等,但大米的整体香气是其所含挥发性风味物质与人体感官感知的综合结果,不是由某种物

质的香气所决定。一般来说,这些挥发性成分来源主要分为两大部分:一是在自然生长期形成的,二是在后期加工贮藏中因大米中的脂质氧化分解等反应形成的。醛类、醇类、烷烃类和 2-乙酰基-1-吡咯啉(2-acetyl-1-pyrroline, 2-AP)均能在水稻自然生长期形成,杂环类、醛类、酯类和酚类物质可在后期加工贮藏中形成^[2]。挥发性风味物质的香气阈值不同,对大米整体香气的贡献值也不一样。2-AP 是多年来研究公认的大米香气的关键组分之一,可产生类似于爆米花的香气^[10],其香气阈值仅有 0.000053 mg/kg^[3],因此极少含量便可让稻米产生香味。不同品种大米和不同储藏经历的大米中的挥发性风味物质的组成和含量存在差异,导致不同大米感官呈现的整体香气有区别,且这些挥发性风味物质种类多、浓度低,因此大米风味一直是研究的热点和难点;但也发现一些规律,如,2-AP 可以作为大米香气质量的指标性物质^[11]; *E*-2-辛烯醛可作为大米老化标记物质^[12],可以利用大米中的 *E*-2-辛烯醛的含量判断大米的新鲜程度。

表 1 大米及米饭中主要挥发性风味物质
Table 1 Main volatile flavor compounds in rice and cooked rice

类别	物质名称	保留指数	香气阈值 ^[3] /(mg/kg)	香气描述	物质名称	保留指数	香气阈值 ^[3] /(mg/kg)	香气描述
醇类	壬醇 ^[4]	1662	—	玫瑰香味	异辛醇 ^[6]	—	—	—
	2-丁醇 ^[5]	—	—	葡萄酒的气味	1-辛烯-3-醇 ^[6-9]	986	0.0015	蘑菇香 ^[8-9]
	2-甲基丁醇 ^[6-7]	729	—	特殊气味	糠醇 ^[5]	845	1.9	苦辣气味
	2-乙基-1-己醇 ^[5]	1026	0.078	花香 ^[5]	庚醇 ^[8-9]	1461	0.0054	柑橘香 ^[8-9]
	戊醇 ^[6-9]	769	0.1502	果香 ^[9]	己醇 ^[7-9]	873	0.0056	水果香气 ^[8-9]
	辛醇 ^[4-6,8]	1073	0.1258	果香 ^[5,8]	异戊醇 ^[7]	769	—	不愉快香气
	异丁醇 ^[7-8]	631	—	茶香 ^[8]	/	/	/	/
	丁醛 ^[6-7]	906	—	刺激性气味	异丁醛 ^[6]	807	—	刺激气味
	2-甲基丁醛 ^[6-8]	942	—	果香 ^[8]	戊醛 ^[4,6-9]	700	0.012	木香 ^[8-9]
	己醛 ^[5-9]	800	0.005	青草味 ^[5,8-9]	庚醛 ^[6-9]	904	—	水果香 ^[8-9]
醛类	<i>E</i> -2-庚烯醛 ^[6-9]	957	0.013	青草香 ^[8-9]	辛醛 ^[4-7,9]	1001	0.0008	甜橙香 ^[5,9]
	<i>E</i> -2-辛烯醛 ^[4,6-7,9]	1057	0.003	脂肪香 ^[9]	葵醛 ^[4-6,8]	1200	0.0001	橘子香 ^[5,8]
	壬醛 ^[4-9]	1105	0.0011	柑橘香 ^[5,8-9]	<i>E</i> -2-壬烯醛 ^[4,6,8]	1551	0.00019	鸡肉香 ^[8]
	苯甲醛 ^[5,7,9]	961	0.3	苦坚果味 ^[5,9]	苯乙醛 ^[5,7]	1041	0.0063	坚果香 ^[5]
	3-甲基丁醛 ^[7-9]	653	—	麦芽香 ^[8-9]	<i>E</i> -2-戊烯醛 ^[7]	751	—	—
	<i>E</i> -2-己烯醛 ^[7,9]	852	—	绿叶香 ^[9]	糠醛 ^[7,9]	1467	0.77	苦杏仁香 ^[9]
	乙醛 ^[8]	718	0.0251	果香 ^[8]	香草醛 ^[9]	1491	—	香草味 ^[9]
	<i>E,E</i> -2,4-癸二烯醛 ^[5]	1314	0.0948	脂肪香气 ^[5]	/	/	/	/
	2-丁酮 ^[6-7]	587	—	—	香叶基丙酮 ^[4,6,8]	1885	0.06	花香 ^[8]
	2-庚酮 ^[7-8]	897.5	0.14	果香 ^[8]	2-戊酮 ^[7]	690	—	指甲油的气味
酮类	2,3-丁二酮 ^[9]	982	—	清香 ^[9]	/	/	/	/

表 1(续)

类别	物质名称	保留指数	香气阈值 ^[3] /(mg/kg)	香气描述	物质名称	保留指数	香气阈值 ^[3] /(mg/kg)	香气描述
脂类	邻苯二甲酸二异丁酯 ^[4-5]	1872	—	—	邻苯二甲酸二丁酯 ^[4-5]	1937	—	芳香气味 ^[5]
	亚油酸甲酯 ^[4,6]	2488	—	—	γ-壬内酯 ^[5]	1362	0.0097	椰香、桃子香 ^[5]
	邻苯二甲酸二甲酯 ^[5]	1466	—	—	棕榈酸甲酯 ^[4-5]	1328	—	茶香 ^[5]
	棕榈酸乙酯 ^[4]	2240	2	奶油香气	乙酸乙酯 ^[7]	609	0.005	果香 ^[9]
	己酸乙酯 ^[7]	1003	0.001	菠萝香	乙酸丁酯 ^[7]	809	—	果香气味
	2,4-二叔丁基苯酚 ^[6]	2280	—	—	2-戊基呋喃 ^[5-7]	987	—	花香 ^[5]
	苯酚 ^[5]	1200	5	特殊气味	2,3-二氢苯并呋喃 ^[5]	1219	—	甜香 ^[5]
其他	2-乙基呋喃 ^[5]	712	—	—	吡啶 ^[5]	753	2	恶臭
	2-AP ^[5,8]	922	0.000053	爆米花、坚果香 ^[5,8]	吡嗪 ^[4-5]	1287	0.04	焦油味 ^[5]
	萘 ^[4,9]	1707	—	刺激气味 ^[9]	4-甲基-2-甲氧基苯酚 ^[9]	1312	—	甜味 ^[9]
	乙酸 ^[9]	1449	30.7	酸味 ^[9]	/	/	/	/

注：—表示未查询到参考数据；保留指数值来源于 <https://webbook.nist.gov/chemistry/>，部分香气描述资料来源于化源网(<https://www.chemsrc.com/>)；/表示无此项。

2 大米挥发性风味物质的影响因素

影响大米挥发性风味成分的因素较多，从种植栽培到消费者餐桌之间的任何一个步骤都对大米挥发性风味成分存在影响(图 1)。大米中挥发性风味物质的影响因素主要有品种和栽培^[2]、碾米加工精度^[5,13]、大米破碎程度^[14]、包装储存^[15-16]、蒸煮及其他加工技术^[17]等。

2.1 品 种

品种是影响大米中挥发性风味物质的主要因素，粳稻、籼稻和糯稻之间^[18-19]；香稻和非香稻之间^[4]；地域性品种水稻(因地制宜研发的当地品种)之间^[6]等挥发性风味物质均有不同。

粳稻、籼稻和糯稻之间挥发性风味物质差异较大。蔡文琴等^[20]等在早籼米、粳米、粳糯米和籼糯米中分别鉴定出了 26 种、22 种、29 种和 17 种挥发性风味物质，其中早籼米中检出了其他品种未检出的苯乙醇、2,4-二叔丁基酚。

崔琳琳等^[21]发现籼米的挥发性风味物质多于粳米，数量分别为 149 和 94 种，壬醇、癸醇和 2-乙基-1-己醇只在籼米中检出，2-环己酮和 2-癸酮只在粳米中检测到。

香米风味较好，因其接受度高于非香米，且经济价值更高，是水稻种植户的首选。黄亚伟等^[4]发现香米中的挥发性风味物质(83 种)高于非香米(73 种)，3,5-二甲基己醇、十一醛、丙烯酸-2-乙基己酯、二十四醇和正壬醇只在香米中检测出。2-AP 是香米中的主要芳香化合物和特征化合物，香稻品种的米饭比非香稻品种的米饭含有更多的 2-AP^[22-23]，可被用于区分香稻与非香稻品种^[10]，但随着检测技术的不断发展，近来研究发现 2-AP 并不是造成香米与非香米风味差异的唯一物质。例如，SETYANINGSIH 等^[24]发现戊醛、己醛、2-戊基呋喃、2,4-壬二烯醛、吡啶、1-辛烯-3-醇和 *E*-2-辛烯醛是造成印尼香米和非香米品种差异的主要原因。探究不同品种大米的关键挥发性风味物质，可以进一步提高关键挥发性风味物质基因调控途径、生长代谢途径，从而改良大米品种或筛选大米优良加工原料。

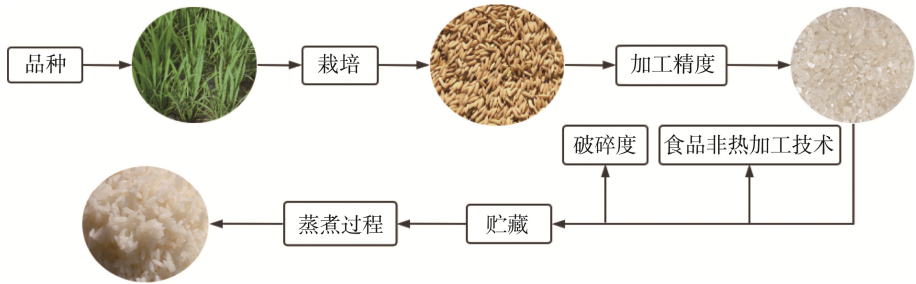


图 1 影响大米风味的因素
Fig.1 Factors affecting the flavor of rice

各地域性之间不同品种水稻也存在挥发性风味差异。例如, 刘敏等^[6]分别对贵州大粒溪香、大粒香、帅优 63、金麻粘 4 种不同品种水稻所产大米中的挥发性风味物质进行检测, 4 种大米中分别检出 52、39、37、29 种挥发性风味物质, 主成分综合得分显示, 大粒溪香综合评分最高, 金麻粘最低。

不同品种之间大米挥发性风味成分存在差异, 这给因地制宜开展育种研发提供了机会。例如, 2013 年江苏省农业科学院粮食作物研究所日本优质粳稻关东 194 为父本, 与江苏优质高产粳稻武香粳 14 杂交, 培育出优良食味粳稻新品种南粳 9108^[25], 该稻种凭借其独特的自然香味, 在“第十一届粳稻发展论坛暨 2013 全国优良食味粳稻品评会”上被评为一等奖^[26]。

2.2 栽培技术

水稻中挥发性风味物质形成受栽培地点(含海拔)、光照、土壤和收获时间、施加化学物质(氮肥、生长调节剂、钼、锰)等环境因素和人为干预的影响, 基于挥发性风味物质含量差异可区分稻米种植的地理分布^[27]。2-AP 作为大米香气的最重要物质, 也是香稻品种的重要代谢产物^[28], 其含量成为研究的重要指标。研究表明可在水稻育种和栽培阶段通过相应的栽培技术调节 2-AP 的含量, 从而影响大米的香气。表 2 列举了部分在栽培过程中对 2-AP 含量产生影响的因素, 由表 2 可知, 多种因素均能影响 2-AP 的含量, 例如, 地点、收获时间、施加化学物质等不同阶段均

能影响 2-AP 含量, 因此后期可从水稻栽培的地点、收获时间、施加化学物质、土壤环境等方面出发进行相关研究, 增加稻穗中的香气浓度、减少稻穗中香气的损失、最大程度保留稻穗中原有的挥发性风味物质, 达到提高大米产量和香气质量的目的, 水稻培育研究学者也可以大米挥发性风味物质为导向筛选或建立栽培及育种方法。

2.3 大米加工精度和破碎程度

稻谷砻谷去壳为糙米, 糙米经过碾磨抛光整理等工序变成精白米; 大米经粉碎机破碎成的碎米和米粉, 加工过程中的加工精度和破碎程度均对大米的挥发性风味物质有影响, 尤其是碾磨和破碎, 对大米挥发性风味影响较大。安红周等^[5]研究发现, 米饭中的醛类物质含量随大米加工精度的提高而显著下降。张敏等^[37]研究发现, 稻谷加工碾磨 3、6、9 min 的米饭风味物质含量分别减少了 50.7%、73%、79%。MAHMUD 等^[38]研究发现, 糙米在 10~140 s 的研磨过程中醛的含量从 35%增加到 45%, 烃的含量从 29%减少到 20%, 在碾磨的 100~120 s(对应于糙米 8.0%~9.6%的重量损失)之间更为突出; 但随着碾磨时间的延长, 酮和呋喃的含量下降; 2-AP、醇类基本不受碾磨时间的影响。WANG 等^[14]研究发现, 与糙米相比, 3 种碎米(过 6 目、8 目、10 目)中挥发性风味物质的相对浓度分别增加了 21%、43%和 26%, 其中 50%的碎米样品含有最多的庚醛、己醛、壬醛、1-辛烯-3-醇、1-戊醇和 2-戊基呋喃典型大米相关风味物质。

表 2 栽培过程中影响挥发性风味物质 2-AP 的因素
Table 2 Influence factors of volatile substances 2-AP during cultivation

影响因素	观察到的影响	参考文献
地点	“荷当 1 号”品种在原产地适宜地区(贵州省从江县)种植时, 大米中的 2-AP 含量高于非原产地(贵州省贵阳市), 前者整体香味相对浓郁。	[29]
海拔	高海拔种植的水稻比从低海拔种植的水稻含有更高的 2-AP, 不同栽培地区收获的 29 个水稻样品的 2-AP 含量范围为(2.2±0.4)~(172.8±0.3) μg/g, 种植在海拔高度为 93 和 77.72 m 的水稻中挥发性化合物浓度最高。	[23]
收获时间	在成熟后一周内的不同时间采收对大米产量没有显著影响, 但影响香气成分的积累, 随着采收期的推迟, 2-AP 含量先增后减。	[30]
施加生长调节剂	所有使用生长调节剂(赤霉素、多效唑、3-吲哚乙酸和多效唑混合溶液、脯氨酸和氯化锌混合溶液)的处理都会导致香气含量降低, 与对照组的 2-AP 含量相比, 赤霉素处理降低 19%, 3-吲哚乙酸降低 9%, 多效唑降低 22%, 混合调节剂降低 21%。	[31]
施加钼	与不施钼相比, 施加钼的桂香沾稻米中 2-AP 含量和产量分别提高了 75.05%和 67.94%, 梅香沾 2 号分别提高了 87.71%和 83.51%。	[32]
施加氮肥和不同水量	在分蘖期以 30 和 60 kg N/ha(氮/公顷)额外施用氮肥, 与充分浇水条件相比, 在减少用水量的条件下, 提高了所有水稻品种在成熟期时的整精米产量和籽粒中的 2-AP 含量。	[33]
施加锰	施加锰导致的 2-AP 形成相关酶活性提高, 从而导致稻米中 2-AP 的含量增加	[34]
光照	水稻在孕穗期使用蓝光和组合光照会降低降低了籽粒中 17.18%~28.68% 2-AP 含量	[35]
土壤环境	主要香味挥发性风味物质 2-AP (0.28%)和壬醛(5.24%)在土壤中速效钾和速效磷含量最高(24.50 mg/kg)的高大种植点相对含量最高, “荷当 1 号”在该种植点的香味最浓郁	[36]

稻谷到精白米的加工过程中挥发性风味物质损失无法避免,如何减少大米在必要加工条件下的香气损失仍需要进一步研究。建议通过现代育种技术培育研发香气质量较高的水稻品种,即使通过加工损失一部分香气,但整体香气质量较高的品种。值得注意的是,精白米到米粉的加工过程可以通过调控米粉的破碎度来增加米粉整体香气,但也存在一部分香气损失,且精白米破碎之后容易氧化变质,不耐储存,破碎之后需及时使用。大米加工精度和破碎对大米制品的影响还需结合具体深加工大米制品开展进一步研究。

2.4 贮藏条件

大米中的原有挥发性风味物质在贮藏期内会随着温度和时间增长而发生变化,如原有部分挥发性风味物质含量流失或增加、非大米原有挥发性风味物质增加,从而导致蒸煮后的米饭出现令人不悦的气味,俗称“陈味”^[39]。例如, YUAN 等^[40]研究发现,大米在高温高湿的条件下贮藏会导致脂质降解更快,形成醛、酮和呋喃类挥发性风味成分。ZHAO 等^[41]研究发现,4、30 和 70℃条件下储存 300 d 的大米中部分挥发性风味物质较初始含量均有增加,如己醛增加 1.87、3.08 和 3.16 倍、辛醛增加 1.19、3.31 和 12.14 倍、壬醛增加 2.30、3.05 和 7.02 倍、*E*-2-辛烯醛增加 1.86、2.89 和 9.41 倍、葵醛增加 1.07、1.14 和 6.31 倍、1-庚醇增加 1.44、4.15 和 16.25 倍、1-辛醇增加 2.56、5.87 和 20.50 倍,表明高温可促进这些物质变化,因此,需要通过降低贮藏温度来延缓大米中挥发性风味物质的变化,保持大米香气。ZHAO 等^[42]研究发现,贮藏期大米随着温度的升高,辛醛、1-辛醇、环己酮单体和环己酮二聚体增加,乙酸乙酯和 1-己醇减少,高温会加速大米风味品质的劣变。GUAN 等^[43]研究发现,乳酸异戊酯、3-甲基-2-己酮和吡啶仅在储存的前 1 个月内存在,贮藏第 2 个月与第 1 个月的大米相比,醛的含量增加,酮含量减少,大米样品储存 6 个月后,出现陈年大米的气味;储藏 12 个月的大米样品比 6 个月的样品中多了 17 种新的挥发性风味物质,产生了霉味。贾温倩等^[44]研究发现,随着贮藏时间的延长与温度的升高,挥发性风味物质的总体相对含量升高,醛类物质变化最为明显。王立峰等^[45]发现,3 种包装方式(编织袋、自然密闭、抽真空)对大米贮藏期间的挥发性风味物质有影响,其中 3 种包装方式贮藏 180 d 后烃类种类和含量均减少,但正戊醛、己醛含量随储藏时间延长而增加。

在贮藏期间,影响大米挥发性风味物质主要是温度和时间,高温可缩短大米的货架期和保质期,储存时间越长,越增加大米发生氧化变质的机率,储藏期间可以通过包装材质和真空状态抑制霉菌的生长和脂肪酸的产生,减少因脂肪和蛋白质氧化产生的不良的风味物质^[46],建议研发专用的大米保鲜仪器保持大米的新鲜度和香气的稳定性。

2.5 蒸煮过程

大米蒸煮过后的挥发性风味物质主要为醛、酯、杂环、

酮、酸类化合物^[47-48]。米饭与大米原料的挥发性风味成分有细微差异,与大米在蒸煮过程中所受到的热量、压力和水量等因素有关:(1)大米在蒸煮过程中,脂类物质会发生热降解、氧化、水解等反应生成油酸等游离脂肪酸和一些醛类、醇类、酮类等小分子产物^[49];(2)大米通过加热变成米饭会发生美拉德反应,反应产物主要有呋喃、吡咯、吡嗪和噻吩类物质^[50]。加热会促进糠醛、2(5H)呋喃酮和内酯类化合物生产,使米饭产生甜香和椰香^[51]。值得注意的是,米饭中的 2-AP 含量比大米高^[52], γ -壬内酯被认为是新鲜米饭的重要气味活性化合物之一^[53]。

蒸煮之前浸泡大米有助于均匀烹饪,缩短烹饪时间,但会降低米饭中的香气^[54]。不同蒸煮方法对米饭的风味物质有影响,蒸煮容器的热量产生机制和升温方式不同,导致米饭风味和感官存在差异^[55]。傅婕等^[56]研究发现,使用不锈钢锅煮煮粳米饭会产生高浓度辛醛和 1-辛烯-3-酮;铸铁锅煮煮粳米饭会产生较高浓度的 3-羟基-2-丁酮;而仅在搪瓷锅煮煮的粳米饭和籼米饭中检出糠醛。李柳燕等^[57]研究发现,电压力锅煮煮的米饭醛类物质数量比电饭锅多,电饭锅煮煮的米饭中 2-正戊基呋喃和 3,7-二甲基-2,6-辛二烯醛含量相对更高。XU 等^[58]研究发现,大米在不同压力(0.00、0.05、0.10 和 0.18 MPa)条件下蒸煮米饭的风味物质分别为 56、55、66 和 57 种,推测 0.18 MPa 蒸煮的米饭风味物质减少可能是由于蒸汽排放过程中风味物质损失较大所致。

蒸煮过程是米饭风味形成不可或缺的步骤(图 2),通过美拉德反应、热反应和酯化反应把大米中的脂肪、蛋白质和淀粉等物质转化为典型的挥发性风味成分,共同形成米饭挥发性风味特征。挥发性风味成分不仅与蒸煮容器材质相关,还与蒸煮容器/电器的功率、加热方式、受热范围、压力和浸泡等存在关联,因此选择适合的蒸煮容器/电器煮煮米饭可提高米饭的香气质量。但大米风味向米饭风味转化的机制尚未完全明确,仍需进一步研究。

2.6 食品非热加工新技术

高静水压、脉冲电场和超声处理^[59]等创新性非热加工技术可促进大米挥发性风味的释放及减少不良挥发性风味的产生。DENG 等^[60]研究高静水压处理粳米和籼米对其风味成分的影响,将大米样品在 200、400 和 600 MPa 下处理 10 min,醛类物质含量下降,籼米比粳米更明显;进行 3 次高静水压处理后,粳米中杂环和芳烃类物质的含量减少,籼米中的杂环和芳烃含量没有明显差异。XIA 等^[61]研究高静水压对发芽糙米的风味成分的影响,37℃孵育 36 h 获得发芽谷物,随后在 100、300 和 500 MPa 压力下进行高静水压处理 15 min,证实高静水压处理后增强了发芽糙米的风味成分,促进了醛、醇和酮风味物质。BAI 等^[62]发现脉冲电场预处理技术会导致米饭中的苯酚、酮减少,酸和醛增加,吡啶和苯甲醛的含量降低,己醛、辛醛、2-癸酮和苯乙酮的含量保持或增加。ZHANG 等^[63]研究发现,超声波-酶处理后可增加糙米所制米饭香气。

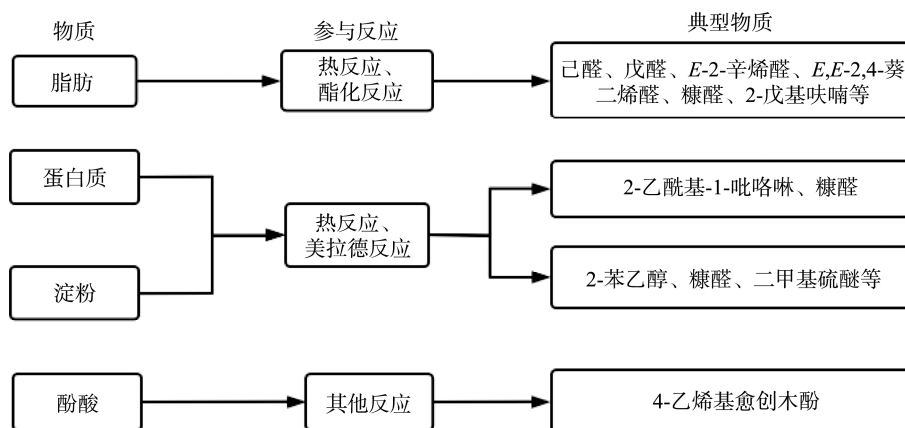


图 2 米饭蒸煮风味形成反应途径

Fig.2 Reaction pathway of cooking flavor formation of rice

食品非热加工技术在大米加工中应用研究较少,表明大米挥发性风味在此方面有很大的科研潜力,其中挥发性的呈现机制尚需要深入探究,未来的大米深加工技术应往风味保持、风味提升和延长货架期方面发展创新。

3 总结与展望

大米的挥发性风味成分研究虽已有大量报道,但主要集中在稻米品种、碾米精度、包装储存和蒸煮方法等对大米风味的影响方面。随着大米产业向纵深发展,在引种、研制高香大米品种时,仍存在无法复刻原产地香气品质的问题;影响大米挥发性风味物质的因素较多,栽培、贮藏条件和加工技术对大米挥发性风味物质的影响规律和大米挥发性风味之间的转化机制也尚不明确,仍然需要深入研究;在大米深加工行业,如何鉴别通过添加香精类物质,以陈米冒充新米、劣质品种冒充优质大米等掺假问题和如何保持大米制品货架期内的香气质量稳定性等仍是研究热点和难度。

常规的低温保藏效果不够理想,随着科学技术的发展,未来可开发陈米反新技术、研发特殊包装材料等延缓大米挥发性风味物质变化的新技术充分保留大米原有挥发性风味物质。因稻谷相较于大米耐储藏,挥发性风味物质较为稳定,可以积极推广大米现用现碾技术,通过在社区投放无人碾米机,实现小批量现吃现碾,减少贮藏期挥发性风味成分变化或损失。

相信随着现代分析检测技术和加工技术的发展,对大米挥发性风味领域的探寻有利于更全面解释大米风味变化规律,进一步开发大米挥发性风味物质的保持和香气质量提高技术,为大米原料的深加工应用,如白酒酿造行业智能化生产过程中的大米风味物质的变化与转移提供科学的理论依据。

参考文献

- [1] PEREIRA C, LOURENCO VM, MENEZES R, *et al.* Rice compounds with impact on diabetic control [J]. *Foods*, 2021, 10(9): 1992.
- [2] HU XQ, LU L, GUO ZL, *et al.* Volatile compounds, affecting factors and

evaluation methods for rice aroma: A review [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2020, 97(C): 136–146.

- [3] 里奥·范海默特. 化合物嗅觉阈值汇编第二版[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- LEO VH. Compilation of compound olfactory thresholds 2nd ed [M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [4] 黄亚伟, 徐晋, 王若兰, 等. HS-SPME/GC-MS 对五常大米中挥发性成分分析[J]. *食品工业*, 2016, 37(4): 266–269.
- HUANG YW, XU J, WANG RL, *et al.* Analysis on HS-SPME/GC-MS technology in volatile components of Wuchang rice [J]. *Food Ind*, 2016, 37(4): 266–269.
- [5] 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 HZ, CHEN HH, YIN WT, *et al.* Effect of milling degree on the edible quality and flavor of rice [J]. *J Cere Oils Ass*, 2021, 36(1): 1–7.
- [6] 刘敏, 王健健, 刘芳宏, 等. 基于 SPME-GC-MS 对不同品种大米挥发性物质分析[J]. *中国酿造*, 2017, 36(6): 170–174.
- LIU M, WANG JJ, LIU FH, *et al.* Analysis of volatile compounds in different varieties of rice based on SPME-GC-MS [J]. *China Brew*, 2017, 36(6): 170–174.
- [7] 朱麟, 旭东, 何悦, 等. 甬优系列籼粳杂交稻米挥发性风味成分分析[J]. *中国粮油学报*, 2022, 37(2): 154–160.
- ZHU L, XU D, HE Y, *et al.* Analysis on volatile components of Yongyou series Indica-Japonica hybrid rice [J]. *J Cere Oils Ass*, 2022, 37(2): 154–160.
- [8] 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.
- DENG RY, YAN ZQ, ZHU SS, *et al.* Rice quality and flavor substance analysis of different indica varieties in Guizhou Province [J]. *Jiangsu Agric Sci*, 2021, 49(11): 138–146.
- [9] 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.
- ZHANG M, MIAO J, SU HM, *et al.* Analysis of flavor compounds in different varieties of cooked rice [J]. *Food Sci*, 2017, 38(16): 110–114.
- [10] VERMA DK, SRIVASTAV PP. A paradigm of volatile aroma compounds in rice and their product with extraction and identification methods: A comprehensive review [J]. *Food Res Int*, 2020, 130(C): 108224.
- [11] DIAS LG, HACKE A, BERGARA SF, *et al.* Identification of volatiles and odor-active compounds of aromatic rice by OSME analysis and SPME/

- GC-MS [J]. Food Res Int, 2021, 142(4): 110206.
- [12] GRIGLIONE A, LIBERTO E, CORDERO C, *et al.* High-quality Italian rice cultivars: Chemical indices of ageing and aroma quality [J]. Food Chem, 2015, 172: 305–313.
- [13] RODRIGUEZ AM, CHO S, BILLIRIS MA, *et al.* Impacts of degree of milling on the appearance and aroma characteristics of raw rice [J]. J Sci Food Agric, 2016, 96(9): 3017–3022.
- [14] WANG ZY, SU HM, BI X, *et al.* Effect of fragmentation degree on sensory and texture attributes of cooked rice [J]. J Food Process Pres, 2019, 43(4): 13920.
- [15] 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.
JIANG P, ZHANG H, WANG L, *et al.* Study on the changes of cooking flavor volatiles by different packing ways of rice after storage [J]. J Food Sci Biotechnol, 2012, 31(10): 1039–1045.
- [16] 赵卿宇, 王占占, 陈博睿, 等. 大米储藏期间风味品质的变化研究[J]. 中国食品学报, 2021, 21(6): 203–215.
ZHAO QY, WANG ZZ, CHEN BR, *et al.* Studies on the changes of flavor quality during rice storage [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2021, 21(6): 203–215.
- [17] TAKEMITSU H, AMAKO M, SAKO Y, *et al.* Analysis of volatile odor components of superheated steam-cooked rice with a less stale flavor [J]. Food Sci Technol Res, 2016, 22(6): 771–778.
- [18] YANG DS, SHEWFELT RL, LEE KS, *et al.* Comparison of odor-active compounds from six distinctly different rice flavor types [J]. J Agric Food Chem, 2008, 56(8): 2780–2787.
- [19] AJARAYASIRI J, CHAISERI S. Comparative study on aroma-active compounds in Thai, black and white glutinous rice varieties [J]. Kasertart J-Nat Sci, 2008, 42(4): 715–722.
- [20] 蔡文琴, 洪丽霞, 吴生文, 等. 特香型白酒酿造用不同种类大米营养成分和挥发性香气成分的差异性分析[J]. 中国酿造, 2022, 41(2): 29–33.
CAI WQ, HONG LX, WU SW, *et al.* Difference analysis of nutrient compounds and volatile aroma compounds of different types of rice used in Te-flavor Baijiu brewing [J]. China Brew, 2022, 41(2): 29–33.
- [21] 崔琳琳, 赵荣, 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 LL, ZHAO S, ZHOU YM, *et al.* Analysis of volatile flavors of rice based on GC-MS and electronic nose technology [J]. J Cere Oils Ass, 2018, 33(12): 134–141.
- [22] SANSENYA S, HUA Y, CHUMANEE S. The correlation between 2-acetyl-1-pyrroline content, biological compounds and molecular characterization to the aroma intensities of thai local rice [J]. J Oleo Sci, 2018, 67(7): 893–904.
- [23] SANSENYA S, WECHAKON K. Effect of rainfall and altitude on the 2-cetylpyrroline and volatile compounds profile of black glutinous rice (Thai upland rice) [J]. J Sci Food Agric, 2021, 101(14): 5784–5791.
- [24] SETYANINGSIH W, MAJCHRZAK T, DYMERSKI T, *et al.* Key-marker volatile compounds in aromatic rice (*Oryza sativa*) grains: An HS-SPME extraction method combined with GC×GC-TOFMS [J]. Molecules, 2019, 24(22): 4180.
- [25] 王才林, 张亚东, 朱镇, 等. 优良食味梗稻新品种南梗 9108 的选育与利用[J]. 江苏农业科学, 2103, 41(9): 86–88.
WANG CL, ZHANG YD, ZHU Z, *et al.* Breeding and utilization of new japonica rice variety Nanjing 9108 [J]. Jiangsu Agric Sci, 2103, 41(9): 86–88.
- [26] 孟庆虹, 孙雅君, 王才林, 等. 第十一届梗稻发展论坛之‘13’全国优良食味梗稻品评结果报告[J]. 北方水稻, 2013, 43(5): 1–4, 10, 91–92.
MENG QH, SUN YJ, WANG CL, *et al.* Evaluation results of nation-wide japonica rice varieties with better palatability in eleventh japonica rice development forum in 2013 [J]. North Rice, 2013, 43(5): 1–4, 10, 91–92.
- [27] AKHOUNZADEH H, GHOLAMI A, MASOUM S, *et al.* Headspace solid-phase microextraction GC-MS for rapid rice aroma analysis using optimization tools [J]. Chromatographia, 2018, 81(6): 931–945.
- [28] JIE Y, SHI TY, ZHANG ZJ, *et al.* Identification of key volatiles differentiating aromatic rice cultivars using an untargeted metabolomics approach [J]. Metabolites 2021, 11(8): 528.
- [29] 王倩, 张大双, 田瑞平, 等. 贵州香糯稻‘荷当 1 号’原产地与非原产地稻米挥发性物质的差异[J/OL]. 分子植物育种: 1–21. [2022-05-20]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20211122.1547.012.html>
WANG Q, ZHANG DS, TIAN RP, *et al.* Differences of volatile compounds between origin and non origin rice of Guizhou fragrant glutinous rice ‘Goudang 1’ [J/OL]. Mol Plant Breed: 1–21. [2022-05-20]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20211122.1547.012.html>
- [30] ZHANG JS, TONG TY, POTCHO PM, *et al.* Harvest time effects on yield, quality and aroma of fragrant rice [J]. J Plant Growth Regul, 2021, 40: 2249–2257.
- [31] GOUFOL P, WONGPORNCHAI S, TANG X. Decrease in rice aroma after application of growth regulators [J]. Agron Sustain Dev, 2011, 31: 349–359.
- [32] IMRAN M, HUSSANIN S, RANA MS, *et al.* Molybdenum improves 2-acetyl-1-pyrroline, grain quality traits and yield attributes in fragrant rice through efficient nitrogen assimilation under cadmium toxicity [J]. Ecotox Environ Saf, 2021, 211: 111911.
- [33] LI YH, MO ZW, LI YZ, *et al.* Additional nitrogen application under different water regimes at tillering stage enhanced rice yield and 2-acetyl-1-pyrroline (2-AP) content in fragrant rice [J]. J Plant Growth Regul, 2022, 49: 954–964.
- [34] LI MJ, ASHRAF U, TIAN H, *et al.* Manganese-induced regulations in growth, yield formation, quality characters, rice aroma and enzyme involved in 2-acetyl-1-pyrroline biosynthesis in fragrant rice [J]. Plant Physiol Biochem, 2016, 103: 167–175.
- [35] CEHN JL, XIE WJ, HUANG ZL, *et al.* Light quality during booting stage modulates fragrance, grain yield and quality in fragrant rice [J]. J Plant Interact, 2021, 16(1): 42–52.
- [36] 王倩, 田瑞平, 王忠妮, 等. 不同种植点的土壤成分与香糯‘荷当 1 号’挥发性成分的关系[J/OL]. 分子植物育种: 1–24. [2022-07-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.s.20210709.0845.004.html>
WANG Q, TIAN RP, WANG ZN, *et al.* Relationship between soil components and volatile components of aromatic rice ‘Goudang 1’ in different planting sites [J/OL]. Mol Plant Breed: 1–24. [2022-07-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.s.20210709.0845.004.html>
- [37] 张敏, 苏慧敏, 王子元. 稻米加工对米饭风味的影响[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(9): 8–14.
ZHANG M, SU HM, WANG ZY. The effect of rice processing on the flavor of cooked rice [J]. J Cere Oils Ass, 2017, 32(9): 8–14.
- [38] MAHMUD MMC, OH Y, KIM TH, *et al.* Effects of milling on aromatics, lipophilic phytonutrients, and fatty acids in unprocessed white rice of scented rice ‘Cheonjiyang-1-se’ [J]. Food Sci Biotechnol, 2018, 27(2): 383–392.
- [39] 王逸欢. 陈梗米饭异味成因剖析及饭煲调控式浸泡处理改良作用[D].

- 无锡: 江南大学, 2021.
- WANG YH. Causation analysis of the off-flavor in aged japonica rice and the improvement effect of controlled soaking treatment in rice cooker [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.
- [40] YUAN B, ZHAO C, YAN M, *et al.* Influence of gene regulation on rice quality: Impact of storage temperature and humidity on flavor profile [J]. Food Chem, 2019, 283: 141–147.
- [41] ZHAO Q, XUE Y, SHEN Q. Changes in the major aroma-active compounds and taste components of Jasmine rice during storage [J]. Food Res Int, 2020, 133: 109160.
- [42] ZHAO QY, GUO H, HOU DZ, *et al.* Influence of temperature on storage characteristics of different rice varieties [J]. Cere Chem, 2021, 98(4): 935–945.
- [43] GUAN BB, ZHAO JW, JIN HJ, *et al.* Determination of rice storage time with colorimetric sensor array [J]. Food Anal Methods, 2017, 10(4): 1504–062.
- [44] 贾温倩, 张威, 舒在习. 不同储藏条件对稻米蒸煮特性及挥发性成分的影响[J]. 食品科技, 2019, 44(12): 183–192.
- JIA WQ, ZHANG W, SHU ZX. Effects of different storage conditions on rice cooking characteristics and volatile components [J]. Food Sci Technol, 2019, 44(12): 183–192.
- [45] 王立峰, 王红玲, 姚铁俊, 等. 不同包装方式对大米储藏品质及挥发性成分的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(13): 2576–2591.
- WANG LF, WANG HL, YAO YJ, *et al.* Effects of different packages on edible quality and volatile components of rice during storage [J]. Sci Agric Sin, 2017, 50(13): 2576–2591.
- [46] WANG F, HU Q, MARIGA AM, *et al.* Effect of nano packaging on preservation quality of Nanjing 9108 rice variety at high temperature and humidity [J]. Food Chem, 2018, 239: 23–31.
- [47] 刘美艳, 张子沛, 赵国华. 酶法方便米饭香气成分的 SPME/GC-MS 分析[J]. 食品科学, 2013, 34(6): 234–237.
- LIU MY, ZHANG ZP, ZHAO GH. SPME/GC-MS analysis of aroma compounds in ready-to-eat rice [J]. Food Sci, 2013, 34(6): 234–237.
- [48] 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]. J Food Compos Anal, 2009, 22(4): 347–353.
- [49] 徐兴凤, 钟业俊, 刘成梅, 等. 米饭气味成分形成途径及影响因素[J]. 食品工业科技, 2013, 34(13): 378–382, 387.
- XU XF, ZHONG YJ, LIU CM, *et al.* Formation pathways and influences of rice aroma [J]. Sci Technol Food Ind, 2013, 34(13): 378–382, 387.
- [50] 麻荣荣. 重结晶过程中淀粉与米饭中典型风味物质相互作用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2020.
- MA RR. Investigation on the interaction between starch and typical aromatic compounds in cooked rice during recrystallization [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2020.
- [51] JINAKOT I, JIRAPAKKUL W. Volatile aroma compounds in jasmine rice as affected by degrees of milling [J]. J Nutr Sci Vitaminol, 2019, 65: S231–S234.
- [52] KASOTE D, SINGH V, BOLLINEDI H, *et al.* Profiling of 2-acetyl-1-pyrroline and other volatile compounds in raw and cooked rice of traditional and improved varieties of India [J]. Foods, 2021, 10(8): 1917.
- [53] ZENG Z, ZHANG H, ZHANG T, *et al.* Screening for γ -nonalactone in the headspace of freshly cooked non-scented rice using SPME/GC-O and SPME/GC-MS [J]. Molecules, 2009, 14(8): 2927–2934.
- [54] CHAMPAGNE ET, BETT-GARBER KL, THOMSON JL. Impact of presoaking on flavor of cooked rice [J]. Cereal Chem, 2008, 85(5): 706–710.
- [55] WIERINGA FT, LAILIOU A, GUYONDET C, *et al.* Stability and retention of micronutrients in fortified rice prepared using different cooking methods [J]. Ann Ny Acad Sci, 2014, 1324(1): 40–47.
- [56] 傅婕, 吴跃, 隋鹤齐. 基于气相离子迁移谱的不同材质锅具电磁加热米饭风味物质研究[J]. 粮油食品科技, 2021, 29(5): 56–63.
- FU J, WU Y, SUI HQ. Research on flavor substances of cooked rice by electromagnetic induction heating with pots made of different materials based on GC-IMS [J]. Sci Technol Cere Oils Foods, 2021, 29(5): 56–63.
- [57] 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 LY, ZHAN Z, ZAHNG W, *et al.* Effects of milling degree and cooking method on the cooked rice quality of high-quality Indica rice [J]. Food Mach, 2021, 37(8): 40–44, 109.
- [58] XU DP, HONG Y, GU ZB, *et al.* Effect of high pressure steam on the eating quality of cooked rice [J]. LWT-Food Sci Technol, 2019, 104: 100–108.
- [59] XIA Q, GREEN BD, ZHU ZZ, *et al.* Innovative processing techniques for altering the physicochemical properties of wholegrain brown rice (*Oryza sativa* L.)-opportunities for enhancing food quality and health attributes [J]. Crit Rev Food Sci, 2019, 59(20): 3349–3370.
- [60] DENG Y, ZHONG Y, YU WJ, *et al.* Effect of hydrostatic high pressure pretreatment on flavor volatile profile of cooked rice [J]. J Cere Sci, 2013, 58(3): 479–487.
- [61] XIA Q, MEI J, YU WJ, *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 Res Int, 2017, 91: 103–114.
- [62] BAI TG, ZHANG L, QIAN JY, *et al.* Pulsed electric field pretreatment modifying digestion, texture, structure and flavor of rice [J]. LWT-Food Sci Technol, 2021, 138: 110650.
- [63] ZHANG XX, WANG L, CHENG MY, *et al.* Influence of ultrasonic enzyme treatment on the cooking and eating quality of brown rice [J]. J Cere Sci, 2015, 63: 140–146.

(责任编辑: 郑丽 韩晓红)

作者简介

彭凯雄, 硕士研究生, 主要研究方向为食品风味化学。
E-mail: 729224019@qq.com

陈晓明, 博士, 教授, 主要研究方向为食品生物技术。
E-mail: 11000499@hyit.edu.cn