

鲜食玉米挥发性风味成分分析及变化规律研究进展

李国琰^{1,2}, 李巧玲², 张雁^{1*}, 廖娜¹, 王佳佳¹, 邓媛元¹

(1. 广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所/农业农村部功能食品重点实验室/广东省农产品加工重点实验室, 广东 广州 510610; 2. 河北科技大学 食品与生物学院, 河北 石家庄 050018)

摘要:鲜食玉米作为一种全谷物食品, 不仅含有蛋白质、氨基酸、脂肪、淀粉、可溶性糖, 还富含膳食纤维、维生素及其它生物活性物质, 具有调节肠道菌群、降血压、降血脂、预防癌症病变、保护视力等多种功效, 开发前景广阔。鲜食玉米独特的挥发性风味是体现其食用和加工品质的重要指标, 品种、加工工艺、贮藏方式等多种因素都会影响其挥发性风味物质的种类和含量。该文综述了鲜食玉米挥发性风味化合物分析技术的研究进展, 阐述了鲜食玉米在加工、贮藏过程中挥发性风味成分的变化规律, 为鲜食玉米挥发性风味物质的分析评价及其全谷物食品的风味品质调控提供参考。

关键词:鲜食玉米; 挥发性风味成分; 分析技术; 变化规律

Research Advances on Analysis Technology and Changes of Volatile Flavor Compounds in Fresh Corn

LI Guo-yan^{1,2}, LI Qiao-ling², ZHANG Yan^{1*}, LIAO Na¹, WANG Jia-jia¹, DENG Yuan-yuan¹

(1. Sericultural & Agri-Food Research Institute Guangdong Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Functional Foods, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Guangdong Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Guangzhou 510610, Guangdong, China; 2. College of Food Science and Biology, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, Hebei, China)

Abstract: Fresh corn is a type of whole grain food with broad development prospects, containing protein, amino acids, fat, starch and soluble sugar. And it also rich in dietary fiber, vitamins and bioactive substances. A number of positive health effects have been associated with consumption of fresh corn, such as regulation of intestinal flora, lowering of blood pressure, blood lipid levels, prevention of cancerous lesions and protective effects on eyesight. The edible quality of fresh corn could be improved through its aroma. Volatile flavor compounds in fresh corn are determined by the variety of corn, as well as its processing and storage conditions. This paper reviewed research progress on analytic technology for assessing volatile flavor compounds in fresh corn, and introduced the influence of processing and storage on changes in volatile flavor compounds in fresh corn. These findings provide a valuable reference for accurate analysis and evaluation of volatile flavor compounds in fresh corn, and a foundation for research into flavor regulation of whole-grain fresh corn foods.

Key words: fresh corn; volatile flavor compounds; analytical techniques; changing regularity

引文格式:

李国琰, 李巧玲, 张雁, 等. 鲜食玉米挥发性风味成分分析及变化规律研究进展[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(15): 210-218.

LI Guoyan, LI Qiaoling, ZHANG Yan, et al. Research Advances on Analysis Technology and Changes of Volatile Flavor Compounds in Fresh Corn[J]. Food Research and Development, 2021, 42(15): 210-218.

基金项目: 广东省现代农业产业技术体系创新团队项目(粤农农函[2019]1019号); 广东特支计划项目(2019BT02N112); 科技创新战略专项资金-高水平农科院建设(R2018PY-JC002、201602TD)

作者简介: 李国琰(1997—), 女(汉), 硕士研究生, 研究方向: 粮油食品化学。

* 通信作者: 张雁(1967—), 女(汉), 研究员, 博士, 研究方向: 食品生物化学与农产品加工。

鲜食玉米是指在乳熟后期至蜡熟初期采摘^[1],用于加工或直接食用的玉米类型。我国鲜食玉米包括各种类型的甜玉米、糯玉米以及其他适合鲜食的玉米品种^[2]。甜玉米乳熟期糖含量多于25%,食用时有较高的甜味^[3]。糯玉米淀粉结构中支链淀粉占比较高,食用时口感软糯^[4]。鲜食玉米是一种天然的全谷物食品,含有丰富的蛋白质、氨基酸、脂肪、淀粉、可溶性糖、膳食纤维、维生素、矿物质及多酚类生物活性物质^[5],经常食用可达到降血压、降血脂、预防癌症、调节肠道菌群、防便秘、保护视力等功效^[6]。

随着生活水平的持续提高,消费者不仅注重食品的营养价值和安全问题,也希望获得感官的愉悦。鲜食玉米因其清新独特的风味深受消费者喜爱。挥发性风味是体现鲜食玉米食用和加工品质的重要指标^[7]。鲜食玉米的挥发性风味易受到品种、成熟度、加工条件和储藏方式等因素的影响。因此,研究鲜食玉米及其制品加工过程中挥发性风味物质的变化对其生产加工有重要意义。本文综述了鲜食玉米中挥发性成分分析技术在提取、定性定量、分析评价等方面的研究进展,介绍了鲜食玉米在加工、贮藏过程中挥发性成分的变化,以期对鲜食玉米挥发性风味物质的分析评价及其全谷物食品的风味品质调控提供参考。

1 鲜食玉米挥发性风味成分分析技术

鲜食玉米中挥发性成分的分析主要包括挥发性风味物质的提取、分离鉴定以及定性与定量分析等。由于鲜食玉米挥发性风味物质不稳定且阈值较低,因此选择适宜的风味分析技术进行鲜食玉米挥发性风味物质评价就显得尤为重要。

1.1 挥发性风味物质提取技术

食品中风味物质分析的关键在于挥发性成分的提取^[8],对于鲜食玉米风味分析而言,主要的风味提取技术有同时蒸馏萃取(simultaneous distillation extraction, SDE)、顶空固相微萃取(headspace-solid phase microextraction, HS-SPME)、热脱附(thermal desorption, TD),且每种提取技术都有其特点所在,因此可依据分析目的、样品特性对提取技术进行选择,进而减少试验误差,更全面准确地分析样品中的挥发性风味成分。

1.1.1 同时蒸馏萃取

同时蒸馏萃取是通过同时加热样品和有机溶剂至沸腾,使得蒸馏和提取同时进行的操作,该法具有费用低,重复性好,提取效率高等优点^[9]。Buttery等^[10]利用Likens-Nickerson装置,以己烷为萃取剂,在负压条件下进行蒸馏萃取,获得鲜食玉米籽粒的挥发油,进

行挥发性成分分析,结果发现34种挥发性风味化合物,其主要成分为壬醇、庚醇、4-庚烯-2-醇、十一烷-2-醇。Lee^[11]采用相同的装置,在常压条件下对甜玉米罐头中吡嗪类化合物挥发性化合物进行分析,检测到两种吡嗪类化合物:二甲吡嗪和二甲基乙基吡嗪。任虹等^[12]也将同时蒸馏萃取应用于甜玉米须、糯玉米须中挥发性风味物质的萃取。

1.1.2 顶空固相微萃取

顶空固相微萃取集采样、萃取、浓缩、进样于一体,操作简便,不使用有机溶剂,是鲜食玉米挥发性风味成分提取最常用的方法^[8]。相关研究表明,挥发性化合物的提取与萃取纤维涂层的极性相关^[13],因此利用HS-SPME提取鲜食玉米挥发性风味成分时,选择合适的萃取头涂层就显得尤为重要。常用的萃取纤维有双极性的聚二甲基硅氧烷/二乙烯基苯涂层纤维萃取头(PDMS/DVB)、二甲基苯/碳分子筛/聚二甲基硅氧烷涂层纤维萃取头(DVB/CAR/PDMS),极性的碳分子筛/聚二甲基硅氧烷涂层纤维萃取头(CAR/PDMS)。赵阳阳等^[14]比较PDMS/DVB、CAR/PDMS两种不同涂层的萃取头对甜玉米挥发性成分的萃取情况,结果表明,较PDMS/DVB萃取头而言,CAR/PDMS萃取头可吸附相对分子质量较小的成分物质,有较合适的萃取范围,采用该萃取头检测到甜玉米中挥发性风味成分共24种。刘玉花等^[15]利用CAR/PDMS萃取甜玉米中的风味物质,共检测47种挥发性风味物质。

1.1.3 热脱附

热脱附是以氮气等惰性气体为载体,将挥发性成分富集到捕集阱中,通过自动热脱附仪将挥发性风味成分解吸出来,将挥发性风味物质吹送至气相色谱质谱联用仪进行分析的技术^[16]。操作方便,重复性高且不需要有机溶剂^[17]。Buttery等^[18]利用Tenax捕集阱对罐藏玉米、新鲜玉米、冻藏玉米中挥发性成分进行收集,在3种类型玉米中均检测到42种挥发性物质。雷春妮等^[19]利用2,6-二苯吡喃多孔聚合物树脂(Tenax-TA)捕集阱吸附甜玉米、紫糯玉米中风味物质,分别检测到34种、30种风味物质。

1.2 挥发性成分定性与定量分析

鲜食玉米中挥发性成分的检测方法有气相色谱-火焰离子化检测法(gas chromatography flame ionization detection, GC-FID)^[20],气相色谱-质谱联用技术(gas chromatography-mass spectrometer, GC-MS)。GC-MS具有灵敏度高、分离能力强、分析速度快等特点,是常用的分离鉴定挥发性风味物质的方法。GC-MS分析中常用的色谱柱有DB-WAX^[21]、HP-INNOWAX^[22];质谱仪

有四极杆质谱仪 (quadrupole mass spectrometer, Q-MS)^[18]、飞行时间质谱仪 (time of flight mass spectrometer, TOF-MS)^[21]。肖亚冬等^[21]利用 DB-WAX 色谱柱对甜玉米中挥发性风味成分进行分离,检测到硫类、醇类、酮类、醛类、烃类等化合物。赵阳阳等^[14]利用 HP-INNOWAX 对甜玉米中挥发性风味物质进行分离,检测到呋喃类、醇类、酮类、醛类、烃类等化合物。不同的色谱柱对挥发性风味成分的分离效果存在差异,可通过比较不同色谱柱对鲜食玉米中挥发性风味物质的分离效果,选择适合鲜食玉米挥发性风味物质分离的色谱柱。

1.2.1 定性分析

GC-MS 是对鲜食玉米挥发性风味成分定性分析的常用技术手段,具有灵敏度高、准确度高的特点。利用质谱数据库检索结合保留指数测算、气相色谱嗅闻 (gas chromatography-olfactometry, GC-O)、标准物比对等方法可对鲜食玉米中挥发性风味物质进行准确定性。通常与 GC-MS 仪器配套的标准物质质谱数据库主要有美国国家标准与技术研究院发布的 NIST 系列和 Wiley 公司发布的质谱数据库系列。

玉米中挥发性风味成分种类众多,研究人员主要集中于对玉米香气主要贡献成分,即风味活性物质的研究,GC-O 是在气相色谱柱末端安装分流口,使得挥发性物质按一定的分流比分别进入检测器和嗅闻仪,嗅闻人员对感受到的气味进行描述,从挥发性物质中确定风味活性物质的一种技术。由于每种挥发性风味物质有其独特的风味,GC-O 在评价气味风味物质的同时也可达到辅助定性的作用。

1.2.2 定量分析

通过峰面积归一法、内标法、外标法对鲜食玉米中风味物质进行定量分析。

1.2.2.1 峰面积归一法

在所有挥发性化合物均可被检出时,利用各物质峰面积占总峰面积的比值来表示该物质的相对含量,峰面积归一法只可用来比较不同挥发性风味物质间含量的差异,而不能进行准确定量。刘玉花等^[15]采用峰面积归一法计算鲜食玉米中各挥发性风味成分的相对含量,得出二甲基硫醚相对含量最高为 25.66%。刘春泉等^[23]利用该法分析了京甜紫花糯 2 号玉米的风味物质,得出含量最高的为含硫化物(65.55%),其次为醇类(9.62%)、醛类(4.81%)、酸类化合物(4.36%)。

1.2.2.2 内标法

向样品中加入已知浓度内标物,通过内标物与样品中各挥发性成分峰面积大小的比值计算物质含量。

所选内标物应与样品中一部分待测组分有相近的出峰时间、沸点等理化性质,同时应有较高的稳定性,不会在分析过程中产生新的化学物质。内标法可消除因仪器不稳定等因素带来的误差,提高定量准确度。

若内标物与待测组分的理化性质差异较大,可通过对比已知浓度的某种挥发性风味物质与玉米中该物质的峰面积得出校正因子,进而对风味物质更加准确的定量。Buttery 等^[18]以 2-戊酮、3,5-二甲基吡啶、喹啉作为内标物,并将校正因子考虑在内,对不同玉米产品中挥发性风味物质分别进行定量,结果表明在玉米粒罐头、冷冻玉米粒、新鲜玉米粒中主要挥发性物质均为 3-羟基-2-丁酮、1-羟基-2-丙酮、2,3-丁二醇、乙醛和二甲基硫醚。其中玉米粒罐头中二甲基硫醚的含量最高为 9 100 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。

1.2.2.3 外标法

外标法要求外标物为待测化合物的标准品,通过配制不同梯度的标准品溶液,使其在与样品相同的条件下进行检测,得到标准品浓度与峰面积的标准曲线,进而对挥发性风味成分进行定量的方法。相对内标法而言,外标法不需计算校正因子但要求仪器有良好的重现性。Bills 等^[24]利用外标法分析了不同灭菌条件下甜玉米中二甲基硫醚、乙醛、丙酮、乙醇的含量变化,结果表明灭菌时间在 5 min~60 min 时,二甲基硫醚的含量均在 10 mg/kg 左右,而乙醛、丙酮、乙醇的含量均随灭菌时间的延长而增加,灭菌时间为 60 min 时,三者的含量分别为 17.5、2.3、535 mg/kg。Flora 等^[25]运用相同的方法对不同甜玉米制品中的二甲基硫醚和硫化氢进行定量,得出二甲基硫醚在玉米盐水罐头中含量最高为 4.09 mg/kg、硫化氢在真空冷冻玉米中含量最高为 148.29 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。

1.3 挥发性成分的感官分析评价

感官分析是利用人的感觉器官如嗅觉、味觉、视觉等对食品的特征进行评价的方法。在鲜食玉米挥发性风味的研究中常通过感官分析评价对风味物质进行气味描述,结合风味强度等方法判断各风味物质对于整体风味的贡献。

1.3.1 气相色谱-嗅闻技术

气相色谱-嗅闻技术是将气相色谱和人的嗅觉相关联,对食品中风味活性物质进行检测的方法^[26]。在 GC-O 中常用的分析方法有芳香萃取稀释法 (aroma extraction dilution analysis, AEDA)、频率检测法、时间强度法^[27]以及峰后强度法^[28]。吴幼茹等^[29]利用 GC-O-MS 对玉米、高粱、大米、糯米、小麦等酿酒原料的挥发

性成分进行分析,采用5点标度法描述气味强度,研究发现,玉米的香气活性物质有己酸乙酯、丙位十二内酯、 β -苯乙醇、壬醛、反-2-辛烯醛、2-壬酮、2-戊基呋喃、百里香酚,其中气味活性强度最大的为糠醛和百香里酚。Bredie等^[29]通过气味描述及其持续时间来描述不同挤压条件下玉米中的风味化合物,结果表明,2-乙酰基-1-吡咯啉和2-乙酰噻唑对挤出物中的爆米花、饼干味有一定的贡献。

1.3.2 风味强度法

为进一步研究特定风味物质对整体风味的贡献,常用风味物质在食品中的浓度与其感觉阈值之比,即气味活度值(odor activity value, OAV)来表示其风味强度。一般认为, OAV<1 表明该风味物质对整体风味无实际作用; OAV $\geq$ 1 且在一定范围内值越大表示该风味物质对整体风味的贡献越大^[30]。在 Buttery 等^[18]的研究中,用挥发性风味物质在玉米中检测到的浓度与水中阈值浓度之比的对数值来表示该物质对玉米风味的贡献。研究发现,二甲基硫醚、2-乙酰基-1-吡咯啉、2-乙基-3,6-二甲基吡嗪、乙醛、3-甲基丁醛、4-乙基愈创木酚和2-乙酰噻唑对甜玉米罐头香气有较大的贡献。

1.3.3 电子鼻

电子鼻基于不同的传感器对于风味物质的响应值不同的原理,利用传感器将化学信号转化为电信号,风味物质经传感器阵列形成对应的响应谱,进而对风味物质进行区分。与其他分析仪器相比,电子鼻可以全面、快速的检测样品挥发性风味的整体信息,得到该物质的“指纹数据”。玉米在贮藏过程中易被微生物污染,产生霉味、酸味影响玉米原本的风味,利用电子鼻可识别整体风味、判定玉米的品质,崔丽静等^[31]利用电子鼻区分霉变玉米与正常玉米,发现两者的信号值存在差异,并通过优化传感器组合,建立了利用电子鼻区分正常玉米与霉变玉米的方法。钱佳成等^[32]通过电子鼻研究了不同储藏条件下玉米中挥发性成分的变化,明确了利于玉米贮藏的条件。

1.4 挥发性成分的多元统计分析

鲜食玉米中挥发性成分种类较多,可采用多元统计方法,如主成分分析、聚类分析等对数据进行分析。通过主成分分析可以明确造成不同品种间风味差异的主要贡献成分^[33],更好的对不同品种进行区分,利用聚类分析可对具有不同香气特征的品种进行归类^[34]。

主成分分析是指在损失较少信息的前提下,利用降维将原始变量转化成少数的指标进行数据分析的方法^[35]。宋江峰等^[36]对不同品种甜糯玉米软罐头中挥发性风味成分进行主成分分析,结果表明不同品种玉

米罐头各有代表其独特风味特征的挥发性风味物质组合。龙粘2号玉米软罐头主要挥发性风味成分是2,3-二氢化苯并呋喃、2-呋喃甲醇、呋喃甲醛、3-甲基丁酸和4-乙基-2-甲氧基-苯酚;江南花糯玉米软罐头的主要挥发性风味成分是(Z)-2-庚烯醛、乙酸、3-羟基-2-丁酮、吡嗪。徐瑞等^[37]通过主成分分析,得到玉米的主要特征香气成分为棕榈酸乙酯、癸醛、2,3-辛二酮、4-甲基二苯甲酮、辛醛、植烷、癸二酸二壬酯、棕榈酸异丙酯、邻苯二甲酸二异丁酯、十四酸异丙酯。因此,通过主成分分析可得到不同玉米品种中主要风味物质的组成。

聚类分析是依据评价样品的多种指标,找到可区分评价指标间相似程度的统计量,进而对相似程度大的样品归类的方法。宋江峰等^[36]将6种甜糯玉米软罐头风味成分进行聚类分析,结果表明,“京甜紫花糯1号”玉米软罐头、“改良花糯”玉米软罐头可以聚为一类;“紫糯”和“黑糯”玉米软罐头产品则各成一类。由此可见,对风味成分的聚类分析可用来区分不同品种的甜糯玉米软罐头。

2 鲜食玉米主要挥发性风味成分

风味是决定鲜食玉米及其加工制品品质的重要因素之一,不同的挥发性风味成分对于鲜食玉米风味贡献不同,它们的种类、含量及其相互作用共同决定着玉米的风味。鲜食玉米中含有多种风味物质,主要由醛类、醇类、酯类、酮类、呋喃类等物质构成,雷春妮等^[19]对比了“普甜玉米”、“紫糯玉米”中的香气成分,结果表明:两种玉米中醇类物质的相对含量最高,赵阳阳等^[14]分析发现甜玉米中呋喃类化合物的相对含量最高为22.9%。鲜食玉米及其制品中相对含量>2%的挥发性风味成分见表1。

表1 鲜食玉米中主要挥发性风味成分
Table 1 Main volatile flavor compounds in fresh corn

挥发性风味成分	气味描述	挥发性风味成分	气味描述
己醛 ^[15]	草香	正己醇 ^[19]	青味
壬醛 ^[19]	清香	2-庚醇 ^[19]	蘑菇
2-甲基丁醛 ^[14]	清香	顺-3-壬烯-1-醇 ^[19]	黄瓜
2-己烯醛 ^[19]	果香	1-戊烯-3-醇 ^[14]	青味
异戊醛 ^[36]	果香	2-乙基-1-己醇 ^[15]	柑橘
苯甲醛 ^[36]	坚果香	雪松醇 ^[8]	清香
呋喃甲醛 ^[36]	甜香	橙花叔醇 ^[8]	花香
3-羟基-2-丁酮 ^[8]	奶香	1-戊醇 ^[8]	脂肪
2-庚酮 ^[14]	梨香	1-辛烯-3-醇 ^[8]	蘑菇
苯乙酮 ^[19]	杏仁	2,3-丁二醇 ^[8]	果香
乙酸丁酯 ^[15]	果香	2-戊基呋喃 ^[19]	青香
乙酸乙酯 ^[19]	果香	2-乙基呋喃 ^[14]	甜香

3 鲜食玉米中挥发性风味成分的变化规律

3.1 加工工艺对鲜食玉米挥发性风味成分的影响

3.1.1 烫漂处理

烫漂一方面可以钝化酶的活性,防止褐变的产生,另一方面可促进玉米中典型风味成分的产生。刘春泉等^[23]分析了烫漂处理对京甜紫花糯2号玉米挥发性成分的影响,研究表明,未经处理的玉米粒中挥发性成分以醇类为主,其中乙醇、3-甲基丁醇、庚醇含量较高。经烫漂处理后含硫类化合物占比最大,其中主要物质为二甲基硫醚,是对煮熟玉米香气贡献的关键挥发性物质^[38],由热不稳定的化合物S-甲基甲硫氨酸磺酸盐分解产生^[24]。此外,Flora等^[39]研究发现,甜玉米经热处理后含硫化合物对其香气贡献显著增强。

吴建平^[22]分别对授粉14、20、24、33 d后采收的玉米进行烫漂处理,研究烫漂对不同采收期糯玉米中挥发性风味成分的影响。结果表明,烫漂处理有效抑制了糯玉米中醇类、醛类、酮类物质的生成,其中授粉33 d后采收的糯玉米经烫漂后中醇类、醛类、酮类物质的降幅最大为71.75%。结合感官分析,烫漂样品比生鲜样品有较高的接受度,烫漂样品中有明显的熟玉米香,而生鲜样品中豆生味、油脂氧化味比较明显。有研究指出,生鲜玉米样中不良风味物质可由脂肪氧合酶(lipoxygenase, LPO)催化不饱和脂肪酸产生^[40],如亚油酸氧化生成己醛^[41],亚麻酸氧化生成己烯醛^[41]等。因此,可以通过热处理使LPO失活,减少不良风味的产生^[42]。

3.1.2 灭菌

灭菌是玉米汁生产过程中必要的单元操作之一,不同的灭菌条件会造成玉米汁营养成分和风味发生不同程度的变化。程媛等^[43]对不同灭菌条件下甜玉米汁中挥发性成分的变化进行分析,均检测到醛类、醇类、酯类、酸类、酮类、萜烯类、醚类、芳烃和含硫化合物,各挥发性成分含量随灭菌条件的变化呈现出不同的变化趋势。随着灭菌温度升高,醇类、酸类含量降低,酯类含量总体上呈增加的趋势。D-柠檬烯和月桂烯作为生鲜玉米汁中主要的风味成分,含量均随灭菌强度的增加减少,而玉米典型风味物质二甲基硫醚在高温杀菌处理后仍有较高的含量。牛丽影等^[44]研究了121℃高压灭菌处理5 min对烫漂甜、糯玉米匀浆中挥发性成分的影响,结果表明玉米匀浆经高压处理后,所含风味物质的数量明显增加,新检出2-甲基呋喃、丙烯酸乙酯、2-庚酮、噻啉、二甲基亚砷,且糯玉米中二甲基硫醚的含量显著增加。

3.1.3 干燥

鲜食果蔬干燥制粉一方面可以抑制酶活,延长货架期,另一方面对加工制品风味的组成也会产生影响^[45]。康志敏等^[46]比较了煮后低温干燥、炒制干燥、冷冻干燥等不同干燥工艺下鲜玉米粉中挥发性成分变化,在鲜玉米粉、煮制低温干燥的玉米粉、炒制玉米粉、冷冻玉米粉中分别鉴定到38、17、32种和8种挥发性风味物质。冷冻玉米粉中检测到大量的醛类物质,炒制玉米粉含有大量杂环类化合物,可能来自于加热过程中的美拉德反应。相比其它两种干燥方式而言,经煮后低温干燥处理的玉米粉能更好地保留鲜玉米中的香气成分。

3.1.4 挤压膨化

挤压膨化作为一种连续混合、蒸煮和成型的加工方法,成本低、用途广泛,其通过瞬时加热使得物料成为玻璃态,在此过程中会发生分解、降解、变性和交联作用以及氧化、聚合、水解等各种化学反应诱导大量风味物质产生^[47]。Bredie等^[29]研究了不同挤压膨化条件对玉米粉中香气化合物变化的影响。研究发现提高挤压膨化温度、降低湿度或延长停留时间通常会增加美拉德衍生化合物的数量和含量,如吡嗪类、吡咯类、呋喃类和含硫杂环类。为满足消费者的感官需求,玉米粉挤压膨化时常会添加风味物质,为使得风味物质分布均匀,并且具有较高的稳定性,在挤压膨化前将风味物质加入到原料中是一种较理想的方法^[48]。Menis等^[49]在玉米粉挤压膨化前将异戊醛、丁酸乙酯、丁酸加入其中,利用响应面法研究了原料湿度、挤压温度、螺杆转速对风味物质的影响,结果表明,原料湿度越大,丁酸乙酯的保留率越高。而原料湿度、挤压温度、螺杆转速对异戊醛、丁酸的影响不显著。Conti-Silva等^[50]同样也将异戊醛、丁酸乙酯、丁酸添加到玉米粉中,研究不同挤压膨化条件对3种物质保留率的影响,结果表明挤压膨化后异戊醛的保留率最低,丁酸的保留率最高,其原因可能是由于3种物质蒸汽压、沸点的不同,其中,丁酸的蒸汽压最高,沸点最低,而戊醛的沸点最低,蒸汽压最高。

3.1.5 发酵

玉米中有较多具有抗氧化活性的营养成分但其生物效应较低,常通过发芽、发酵等方式来提高其营养组成和促进风味物质产生。Hiran等^[51]分别利用植物乳杆菌、乳球菌、枯草杆菌和长双歧杆菌对发芽玉米进行发酵处理,研究了经发芽、发酵后玉米中挥发性成分的变化。结果表明,相较于未经处理的玉米,发芽

玉米在不同发酵条件下产生了挥发性风味物质乳酸、2,3-丁二醇、苯并呋喃,在长双歧杆菌发酵的发芽玉米中检测到己酸,其它3种发酵处理的发芽玉米中均检测到吡嗪。发芽玉米经72 h长双歧杆菌发酵培养后,挥发性化合物的含量均高于其他发酵处理。

3.2 贮藏过程中玉米挥发性风味成分的变化

相对其它粮谷类作物而言,玉米脂肪含量较高,贮藏稳定性较低。在贮藏过程中,易发生脂肪氧化、糖类代谢等反应而对玉米的风味产生影响^[52]。

马良等^[52]对比了水分含量为14.5%的玉米在25℃下分别贮藏0、60、120、180 d时挥发性成分的变化,详细分析了醇类、醛类、酸类、酯类、酮类等物质的变化规律。其中酮类物质含量随贮藏时间的增加不断减少;酸类物质相对含量随贮藏时间延长呈现先降低后增加的趋势;醇类、醛类、酯类物质相对含量随贮藏时间延长均呈现先增加后减少的趋势。在贮藏120 d时玉米中挥发性成分种类最多,1-辛醇、壬醛在贮藏阶段均被检出且分别在贮藏180、60 d时含量最高。醛类和酯类作为玉米贮藏期间风味的主要贡献物质在贮藏120 d时含量最高。

徐瑞等^[37]研究了不同贮藏温度-4、-18、-40℃下贮藏一个月后鲜食玉米中挥发性成分的变化。研究发现,不同贮藏温度下,玉米中挥发性成分含量最高的为醛类,其次分别为酯类、酸类、酮类。随贮藏温度的降低,醛类物质相对含量先增加后减少;酮类物质相对含量不断减少;酯类、酸类物质相对含量先减少后增加,贮藏温度为-4℃时,反油酸、硬脂酸相对含量越高,可能与该温度下利于脂肪的分解有关。

钱佳成等^[32]利用电子鼻和顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用分析了不同氧气浓度(2%、5%、8%、21%)对玉米中挥发性成分的影响,通过主成分分析,选取酸酯类、芳香烃类、醇类3个主成分来分析不同氧气浓度对它们的影响,研究发现,氧气浓度对酸酯类物质影响较大,酸酯类物质与脂肪氧化有关,氧气浓度高促进脂肪氧化,氧气浓度较低时,氧化速率降低。

4 展望

挥发性风味是影响鲜食玉米及其加工制品食用品质的重要因素。近年来,有关鲜食玉米挥发性风味的研究已取得一定进展。挥发性风味物质的提取是分析过程中的关键技术,同时蒸馏萃取、顶空固相微萃取、热脱附法已被用于鲜食玉米挥发性风味的提取,但任何一种方法均不能将玉米挥发性风味化合物完

全提取,因此,可通过比较多种提取方法,结合两种或两种以上的技术以提取更多的鲜食玉米挥发性化合物。目前,已知挥发性风味物质的定量可通过GC-MS以峰面积归一法、内标法及外标法来实现,而对于未知挥发性风味化合物的鉴定,则需要借助GC-O判断挥发性物质是否为气味活性化合物,在GC-MS和GC-O分析的基础上,可实现鲜食玉米挥发性风味化合物组成谱的构建。

鲜食玉米风味易受加工工艺、贮藏条件等多种因素的影响。玉米经适度的烫漂处理,会产生对玉米香气贡献较大的含硫类化合物,经发酵处理可以增加玉米中风味物质的种类。然而,对于造成鲜食玉米加工贮藏过程中风味变化的机理尚不明确,可加强对风味化合物的前体物质及相关合成酶的研究,随着食品风味化学、基因组学、代谢组学的不断发展,玉米风味的形成机制等将被进一步揭示,为玉米品种选育和香气调控提供理论依据。

参考文献:

- [1] 王浩,刘景圣,郑明珠,等. 鲜食糯玉米贮藏过程中淀粉含量及相关酶活性变化的研究[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(3): 6-10, 24.
WANG Hao, LIU Jingsheng, ZHENG Mingzhu, et al. Research on the change of starch content and enzymes activities associated with starch synthesis in fresh-eating waxy corn in the process of storage [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2017, 32(3): 6-10, 24.
- [2] 牛丽影,沈凌雁,刘春菊,等. 鲜食玉米质构特性分析[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(12): 48-53.
NIU Liying, SHEN Lingyan, LIU Chunju, et al. Texture analysis of fresh-edible corn [J]. Food Research and Development, 2020, 41(12): 48-53.
- [3] SINGH I, LANGYAN S, YADAVA P. Sweet corn and corn-based sweeteners[J]. Sugar Tech, 2014, 16(2): 144-149.
- [4] 丁卫英,张玲,韩基明,等. 糯玉米淀粉的研究进展[J]. 农产品加工, 2019(16): 63-64, 70.
DING Weiying, ZHANG Ling, HAN Jiming, et al. Research progress of waxy-corn starch[J]. Farm Products Processing, 2019(16): 63-64, 70.
- [5] 李水琴. 不同类型鲜食玉米主要品质形成规律的研究[D]. 昆明: 云南大学, 2017: 1-3.
LI Shuiqin. Study on the formation regulation of main quality of different types of fresh corn[D]. Kunming: Yunnan University, 2017: 1-3.
- [6] 何美娟. 玉米中类胡萝卜素分析及籽粒发育与热处理过程中变化规律研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2014.
HE Meijuan. Analysis of carotenoids in maize and regulation of carotenoids change in development and thermal treating process[D].

- Nanjing :Nanjing Agricultural University,2014.
- [7] 李水琴,罗吉,朱志妍,等.不同鲜食玉米灌浆期子粒主要营养成分的积累动态[J].玉米科学,2019,27(2):77-85.
- LI Shuiqin, LUO Ji, ZHU Zhiyan, et al. Dynamic of the main nutrient ingredients accumulated in different fresh corn grains during filling stage[J]. Journal of Maize Sciences,2019,27(2):77-85.
- [8] 褚能明,柯剑鸿,袁亮. 不同鲜食甜糯玉米挥发性风味物质主成分分析[J].核农学报,2017,31(11):2175-2185.
- CHU Nengming, KE Jianhong, YUAN Liang. Principal components analysis for volatility of flavor compositions in different fresh sweet glutinous corn [J].Journal of Nuclear Agricultural Sciences,2017,31(11):2175-2185.
- [9] 孙杰,蒲丹丹,陈海涛,等.五香牛肉干挥发性风味成分的分离与鉴定[J].食品科学,2016,37(6):121-125.
- SUN Jie, PU Dandan, CHEN Haitao, et al. Analysis of volatile flavor compounds in spiced beef jerky[J]. Food Science,2016,37(6):121-125.
- [10] BUTTERY R G, LING L C, CHAN B G. Volatiles of corn kernels and husks: possible corn ear worm attractants[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry,1978,26(4):866-869.
- [11] LEE C Y. Pyrazine compounds in canned sweet corn flavour[J]. Food Chemistry,1978,3(4): 319-322.
- [12] 任虹,张乃元,刘玉平,等. 甜玉米须和糯玉米须挥发性成分分析[J].中国食品学报,2013,13(11):169-178.
- REN Hong, ZHANG Naiyuan, LIU Yuping, et al. Analysis of volatile flavor components in Chinese sweet corn silk and waxy corn silk[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2013,13(11):169-178.
- [13] MURAT C,GOURRART K,JEROSCH H,et al. Analytical comparison and sensory representativity of SAFE, SPME, and Purge and Trap extracts of volatile compounds from pea flour[J]. Food Chemistry,2012,135(3): 913-920.
- [14] 赵阳阳,林海伟,欧仕益. 甜玉米籽粒及其芯风味成分分析[J].食品与机械,2011,27(1):52-55.
- ZHAO Yangyang, LIN Haiwei, OU Shiyi. Analysis of flavors on seed and cob of sweet corn[J]. Food & Machinery, 2011, 27(1): 52-55.
- [15] 刘玉花,宋江峰,李大婧,等. 速冻甜玉米风味物质 HS-SPME/GC-MS 分析[J].食品工业科技,2010,31(7):95-98.
- LIU Yuhua, SONG Jiangfeng, LI Dajing, et al. Analysis of the volatile flavor components of the quickly-frozen sweet corn by HS-SPME/GC-MS[J].Science and Technology of Food Industry,2010,31(7):95-98.
- [16] 李娜,张富县,李妙清,等.鲜山楂不同部位挥发性成分分析[J].中国食品添加剂,2019,30(6):121-127.
- LI Na, ZHANG Fuxian, LI Miaoqing, et al. Analysis of volatile components in different parts of fresh hawthorn[J]. China Food Additives,2019,30(6):121-127.
- [17] WANG S Y,ZHAO F,WU W X, et al. Comparison of volatiles in different jasmine tea grade samples using electronic nose and automatic thermal desorption-gas chromatography-mass spectrometry followed by multivariate statistical analysis[J]. Molecules,2020,25(2): 380.
- [18] BUTTERY R G,STERN D J,LING L C. Studies on flavor volatiles of some sweet corn products[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry,1994,42(3): 791-795.
- [19] 雷春妮,周围,蒋玉梅,等. 热脱附-气相色谱/质谱联用分析鲜食玉米香气成分[J].食品工业科技,2014,35(2):71-75.
- LEI Chunni, ZHOU Wei, JIANG Yumei, et al. Thermal desorption coupled to GC-MS for analyzing aroma components in fresh corn[J]. Science and Technology of Food Industry,2014,35(2):71-75.
- [20] CHEN J,REINECCIUS G A,LABUZA T P. Prediction and measurement of volatile retention during extrusion processing[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2007,21(3):365-383.
- [21] 肖亚冬,宋江峰,李大婧,等. 甜玉米汁中类胡萝卜素热降解与其挥发性成分的相关性分析[J].食品科学,2018,39(8):27-32.
- XIAO Yadong, SONG Jiangfeng, LI Dajing, et al. Correlation between thermal degradation of carotenoids and volatile compounds in sweet corn juice[J].Food Science,2018,39(8):27-32.
- [22] 吴建平,牛丽影,李大婧,等. 鲜食糯玉米挥发性成分与感官属性相关性分析[J].食品科学,2016,37(16):94-99.
- WU Jianping, NIU Liying, LI Dajing, et al. Correlation analysis of volatile components and sensory properties in fresh waxy corn[J]. Food Science,2016,37(16):94-99.
- [23] 刘春泉,宋江峰,刘玉花,等. 京甜紫花糯 2 号玉米软罐头加工过程中风味成分变化[J].核农学报,2010,24(3):555-561.
- LIU Chunquan, SONG Jiangfeng, LIU Yuhua, et al. Flavor composition changes during "jingtian no. 2" waxy corn soft can processing [J].Journal of Nuclear Agricultural Sciences,2010,24(3):555-561.
- [24] BILLS D D,KEENAN T W. Dimethyl sulfide and its precursor in sweet corn[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1968,16(4):643-645.
- [25] FLORA L F, WILEY R C. Influence of cultivar, process, maturity, and planting date on the dimethyl sulfide and hydrogen sulfide levels in sweet corn[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1974, 22(5): 816-819.
- [26] 谢恬,王丹,马明娟,等.OAV 和 GC-O-MS 法分析五香驴肉风味活性物质[J].食品科学,2018,39(8):123-128.
- XIE Tian, WANG Dan, MA Mingjuan, et al. Identification of flavor-active compounds in spiced donkey meat by odor activity value (OAV) calculation and gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry[J]. Food Science,2018,39(8):123-128.
- [27] 李超,柯润辉,王明,等. GC-O/MS 检测技术在食品香气物质分析中的研究进展[J].食品与发酵工业:1-7.[2021-01-13].<https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.022614>.
- LI Chao, KE Runhui, WANG Ming, et al. Research progress on analysis of food aroma substances by GC-O/MS [J].Food and Fer-

- mentation Industries:1-7.[2021-01-13].<https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.022614.4>.
- [28] 吴幼茹,刘诗宇,樊晓璐,等. GC-O-MS 分析 5 种酿酒原料中蒸煮香气成分[J]. 食品科学,2016,37(24):94-98.
- WU Youru, LIU Shiyu, FAN Xiaolu, et al. Analysis of aroma components of five different cooked grains used for Chinese liquor production by GC-O-MS[J]. Food Science,2016,37(24):94-98.
- [29] BREDIE W L P, MOTTRAM D S, GUY R C E. Aroma volatiles generated during extrusion cooking of maize flour[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry,1998,46(4):1479-1487.
- [30] 王梦琪,朱荫,张悦,等. “清香”绿茶的挥发性成分及其关键香气成分分析[J]. 食品科学,2019,40(22):219-228.
- WANG Mengqi, ZHU Yin, ZHANG Yue, et al. Analysis of volatile composition and key aroma compounds of green teas with fresh scent flavor[J]. Food Science,2019,40(22):219-228.
- [31] 崔丽静,周显青,林家永,等. 电子鼻快速判别玉米霉变技术研究[J]. 中国粮油学报,2011,26(10):103-107.
- CUI Lijing, ZHOU Xianqing, LIN Jiayong, et al. Study on rapid identification technology of moldy corn by electronic nose[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association,2011,26(10):103-107.
- [32] 钱佳成,宋伟. 不同储藏条件下玉米挥发性成分研究[J]. 食品工业科技,2020,41(16):252-258, 265.
- QIAN Jiacheng, SONG Wei. Analysis of volatile components of corn under different storage conditions[J]. Science and Technology of Food Industry,2020,41(16):252-258, 265.
- [33] 高歌,庞雪莉,刘海华,等. 基于 GC-MS-O 香气成分分析和多元统计分析的柚子品种鉴别[J]. 中国食品学报,2020,20(5):283-292.
- GAO Ge, PANG Xueli, LIU Haihua, et al. Volatiles identification of pomelo based on GC-MS-O and multivariate statistical analysis[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology,2020,20(5):283-292.
- [34] 王秋霜,吴华玲,姜晓辉,等. 基于多元统计分析方法的广东罗坑红茶香气品质研究[J]. 现代食品科技,2016,32(2):309-316.
- WANG Qiushuang, WU Hualing, JIANG Xiaohui, et al. Multivariate statistical analysis of the aroma qualities of black tea from Luokeng Guangdong[J]. Modern Food Science and Technology,2016,32(2):309-316.
- [35] JI X Y. Investigation of the volatile components in commercial sufu (Chinese fermented soybean curd) based on HS-SPME/GC-MS combined with multivariate statistical analysis[J]. Journal of Food Processing and Preservation,2020,44(1):1-8.
- [36] 宋江峰,李大婧,刘春泉,等. 甜糯玉米软罐头主要挥发性物质主成分分析和聚类分析[J]. 中国农业科学,2010,43(10):2122-2131.
- SONG Jiangfeng, LI Dajing, LIU Chunquan, et al. Principal components analysis and cluster analysis of flavor compositions in waxy corn soft can[J]. Scientia Agricultura Sinica,2010,43(10):2122-2131.
- [37] 徐瑞,李洪军,贺稚非. 玉米冻藏过程中挥发性成分变化及主成分分析[J]. 食品与发酵工业,2019,45(1):210-218.
- XU Rui, LI Hongjun, HE Zhifei. Changes and principal component analysis of volatile compounds in corn ears during frozen storage[J]. Food and Fermentation Industries,2019,45(1):210-218.
- [38] WILEY R. Sweet Corn Aroma: Studies of its chemical components and influence on flavor[M]. Raleigh: North Carolina State University,1985: 349-366.
- [39] FLORA L F, WILEY R C. Sweet corn aroma: chemical components and relative importance in the overall flavor response[J]. Journal of Food Science,1974,39(4): 770-773.
- [40] THEERAKIJLKAIT C, BARRETT D M, MCDANIEL M R. Sweet corn germ enzymes affect odor formation[J]. Journal of Food Science,1995,60(5): 1034-1040.
- [41] DAMERAU A, KAMLANG-EK P, MOISIO T, et al. Effect of SPME extraction conditions and humidity on the release of volatile lipid oxidation products from spray-dried emulsions[J]. Food Chemistry,2014,157: 1-9.
- [42] BARRETT D M, GARCIA E L, RUSSELL G F, et al. Blanch time and cultivar effects on quality of frozen and stored corn and broccoli[J]. Journal of Food Science,2000,65(3): 534-540.
- [43] 程媛,吴继军,刘忠义,等. 不同杀菌方式的甜玉米饮料挥发性风味成分分析[J]. 现代食品科技,2019,35(5):281-288.
- CHENG Yuan, WU Jijun, LIU Zhongyi, et al. Analysis of volatile compounds in sweet corn beverage with different sterilizations[J]. Modern Food Science and Technology,2019,35(5):281-288.
- [44] 牛丽影,刘夫国,李大婧,等. 热处理对乳熟期玉米汁挥发性风味成分的影响[J]. 核农学报,2014,28(3):446-452.
- NIU Liying, LIU Fuguo, LI Dajing, et al. Effect of heat processing on the volatile flavor components of milk-stage corn juice[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences,2014,28(3):446-452.
- [45] 马璐瑶,林海峰,王喆,等. 干燥方式对不同生长期秋葵果实营养成分及挥发性风味物质的影响[J]. 食品科学,2020,41(8):186-193.
- MA Luyao, LIN Haifeng, WANG Zhe, et al. Effects of drying methods on nutritional quality and volatile substances of okra fruit harvested at different growth stages[J]. Food Science,2020,41(8):186-193.
- [46] 康志敏,郭东旭,何梦影,等. 不同干燥工艺对鲜玉米粉品质及风味的影响[J]. 食品工业科技,2020,41(18):58-63,69.
- KANG Zhimin, GUO Dongxu, HE Mengying, et al. Effect of different drying methods on the quality and flavor profiles of fresh corn flour[J]. Science and Technology of Food Industry,2020,41(18):58-63,69.
- [47] 陈焱芳,张雁,邓媛元,等. 挤压膨化糙米香气物质的顶空固相微萃取条件优化[J]. 食品研究与开发,2020,41(12):117-125.
- CHEN Yanfang, ZHANG Yan, DENG Yuanyuan, et al. Optimization of extraction conditions of compounds of extruded brown rice aroma by HS-SPME [J]. Food Research and Development,2020,41(12):117-125.

- [48] BHANDARI B,D'ARCY B,YOUNG G, et al. Flavour retention during high temperature short time extrusion cooking process: a review [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2001, 36 (5): 453-461.
- [49] MENIS M E C, MILANI T M G, JORDANO A, et al. Extrusion of flavored corn grits: Structural characteristics, volatile compounds retention and sensory acceptability [J]. LWT-Food Science and Technology, 2013, 54(2): 434-439.
- [50] CONTI-SILVA A C,BASTOS D H M,ARÊAS J A G. The effects of extrusion conditions and the addition of volatile compounds and flavour enhancers to corn grits on the retention of the volatile compounds and texture of the extrudates[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2012, 47(9): 1896-1902.
- [51] HIRAN P,KERDCHOECHUEN O,LAOHAKUNJIT N. Combined effects of fermentation and germination on nutritional compositions, functional properties and volatiles of maize seeds[J]. Journal of Cereal Science, 2016, 71: 207-216.
- [52] 马良,王若兰. 玉米储藏过程中挥发性成分变化研究[J]. 现代食品科技, 2015, 31(7): 316-325.
- MA Liang, WANG Ruolan. Changes in volatile components of during storage[J]. Modern Food Science and Technology, 2015, 31(7): 316-325.
- 加工编辑: 张璐
收稿日期: 2021-02-17