

基于电子鼻和 GC-IMS 技术分析不同类型鲜食玉米的风味差异

史亚兴[§], 董会[§], 徐丽, 樊艳丽, 刘辉, 史亚民, 俞媛年, 高宁,
赵久然*, 卢柏山*, 王荣焕*

(北京市农林科学院玉米研究所, 玉米 DNA 指纹及分子育种北京市重点实验室, 北京 100097)

摘要: 风味是评价鲜食玉米食用品质的指标, 为探究不同类型鲜食玉米挥发性风味的物质组成及含量的差异, 以农科糯 323 等 6 个玉米品种鲜果穗为试验材料, 采用电子鼻和气相色谱-离子迁移谱联用 (GC-IMS) 技术对鲜食玉米挥发性风味物质进行检测分析, 并结合相对气味活度值 (ROAV) 评价各挥发性风味物质对鲜食玉米整体风味的贡献程度。结果表明, 在 6 个参试鲜食玉米品种中共鉴定到 34 种挥发性风味物质, 包含 10 种酯类化合物 (34.68%~26.74%)、8 种醛类化合物 (28.46%~21.22%)、6 种醇类化合物 (10.33%~6.04%)、5 种酮类化合物 (14.74%~9.87%)、2 种醚类化合物 (10.05%~6.94%) 和 3 种其他类化合物。GC-IMS 指纹图谱显示, 挥发性风味物质含量的差异是造成不同类型鲜食玉米特征风味差异的重要因素。通过分析 ROAV 确定了 5 个鲜食玉米共有的关键香气成分和 23 个差异性特征风味物质。农科糯 323 的挥发性风味物质总体释放量最多, 其次是京科甜 608。异戊醛对农科糯 336、京紫糯 219、京科糯 768 和京科甜 608 籽粒的总体风味贡献值最大, 3-辛酮对农科糯 323 和京科糯 2000 的总体风味贡献值最大。研究结果为鲜食玉米挥发性风味物质的分析评价及特征风味精准调控提供理论依据。

关键词: 鲜食玉米; GC-IMS; ROAV; 挥发性风味物质

doi: 10.13304/j.nykjdb.2024.0708

中图分类号: S513

文献标志码: A

文章编号: 1008-0864(2024)11-0143-14

Flavor Differences of Different Types of Fresh Corn Based on Electronic Nose and GC-IMS Technology

SHI Yaxing[§], DONG Hui[§], XU Li, FAN Yanli, LIU Hui, SHI Yamin, YU Ainian, GAO Ning,
ZHAO Jiuran*, LU Baishan*, WANG Ronghuan*

(Beijing Key Laboratory of Maize DNA Fingerprinting and Molecular Breeding, Maize Research Institute, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China)

Abstract: Flavor is an important indicator of the edible quality of fresh corn. In order to explore the composition and content differences of volatile flavor compounds in different types of fresh corn, in this study, 6 different types of fresh corn varieties including NKN 323 were used as materials, and electronic nose technology and gas chromatography ion mobility spectrometry (GC-IMS) technology were used to detect the volatile flavor compounds in fresh corn to evaluate the contribution of volatile flavor compounds to the overall flavor of fresh corn by relative odor activity value (ROAV). The results showed that a total of 34 volatile flavor compounds were identified, including 10 esters (34.68%~26.74%), 8 aldehydes (28.46%~21.22%), 6 alcohols (10.33%~6.04%), 5 ketones (14.74%~9.87%), 2 ethers (10.05%~6.94%) and 3 other compounds. GC-IMS fingerprints showed that the difference of volatile flavor compounds content important which caused the difference of characteristic flavor of different types of fresh corn. 5

收稿日期: 2024-08-29; 接受日期: 2024-08-29

基金项目: 北京市农林科学院科技创新能力建设专项 (KJCX20220102); 现代农业产业技术体系北京市创新团队建设专项 (BAIC02-2023)。

联系方式: 史亚兴和董会为共同第一作者。史亚兴 E-mail: syx209@163.com; 董会 E-mail: donghui2013@163.com

*通信作者 赵久然 E-mail: maizezhao@126.com; 卢柏山 E-mail: maizelu@126.com; 王荣焕 E-mail: ronghuanwang@126.com

common key aroma components and 23 different characteristic flavor compounds of fresh corn were identified by ROAV. The total release of volatile flavor compounds of different types of varieties was NKN323, followed by JKT608. Isovaleraldehyde contributed the most to the overall flavor of NKN336, JZN219, JKN768 and JKT608, while 3-octanone contributed the most to the overall flavor of NKN323 and JKN2000. Above results provided theoretical basis for the analysis and evaluation of volatile flavor compounds in fresh corn and the precise control of characteristic flavor.

Key words: fresh corn; GC-IMS; ROAV; volatile flavor compounds

鲜食玉米通常于籽粒乳熟后期至蜡熟初期采摘,直接食用其鲜嫩果穗^[1-3],是一类天然的全谷物食品,以清甜鲜嫩、软糯多汁的口感和丰富的营养价值深受消费者青睐^[4-6]。我国鲜食玉米种类丰富,除了甜玉米、糯玉米和甜加糯玉米3种主要类型以外,近年还育成了紫糯玉米、黄糯玉米和甜味糯玉米等优质、特色的鲜食玉米新品种,引领并推动鲜食玉米产业升级和发展^[7-10]。

不同类型的鲜食玉米在风味和口感上各不相同,且风味极大地影响消费者的接受程度^[11-13]。鲜食玉米以风味独特、清新著称,挥发性风味物质是评价鲜食玉米食用品质的重要指标^[14-15]。挥发性风味物质种类繁多且相互影响,食品的香气并不是由一种呈香物质单独产生的,而是多种呈香物质的综合反映,鲜食玉米的独特风味就是由多种挥发性风味物质相互协作或拮抗而形成的^[16-17]。鲜食玉米的食用风味越来越受到国内外育种家的关注,但多集中在鲜食玉米挥发性风味成分的分析检测方面^[14,23],而针对不同类型及品种的鲜食玉米挥发性风味物质的分析还相对较少。

常见的挥发性风味物质检测方法有气相色谱-质谱联用技术(gas chromatography-mass spectrometer, GC-MS)、电子鼻技术、气相色谱-离子迁移谱联用技术(gas chromatography-ion mobility spectrometry, GC-IMS)等^[18-20]。其中,电子鼻和GC-IMS不需要对样品进行复杂的预处理,可直接对原始样品进行检测分析,简化了分析过程,目前在区分水果品种及产地等方面被广泛应用^[21-22]。本研究选用6种不同类型的鲜食玉米鲜果穗,采用电子鼻和GC-IMS技术进行分析检测,探究不同类型鲜食玉米的挥发性风味物质组成和含量的差异,构建可视化的挥发性风味物质指纹图谱,旨在为鲜食玉米特征风味精准调控及评价提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验于2023年在北京市农林科学院玉米研究所海南三亚科研育种基地开展。供试地块地势平整、肥力中等。供试材料为农科糯336(甜加糯, NKN336)、京紫糯219(紫糯, JZN219)、京科糯768(甜味糯, JKN768)、京科糯2000(糯, JKN2000)、农科糯323(黄糯, NKN323)、京科甜608(甜玉米, JKT608)共6个不同类型的鲜食玉米品种为试验材料,均由本单位自主选育。甜玉米品种取授粉后第21天的果穗,糯和甜加糯玉米品种取授粉后第23天的果穗,剥取果穗中部籽粒,置于-80℃保存,用于鲜食玉米籽粒挥发性风味物质的检测。

1.2 试验方法

1.2.1 样品处理 挑选无破损的玉米籽粒200 g左右,用铝箔纸包裹,冷水上锅蒸,水开后蒸30 min后取出,样品用于分析检测。

1.2.2 鲜食玉米挥发性风味物质检测 采用电子鼻和GC-IMS技术分析检测鲜食玉米的挥发性风味物质。

① 电子鼻分析。采用PEN3电子鼻分析仪(AIRSENSE, 德国)进行分析,称取2 g样品置于样品瓶中加盖密封,3次重复。将装有样品的样品瓶在室温下静置30 min后,采用顶空吸气法进行分析。传感器清洗时间为120 s、归零时间5 s、样品准备时间5 s、进样流量400 mL·min⁻¹,清洗时间120 s,检测时间400 s。统计分析10个电子传感器的G/G₀值(测定值/空白值)^[24]。

② GC-IMS分析。取2 g样品置于20 mL顶空瓶中,40℃孵育15 min,采用FlavourSpec®气相离子迁移谱(G.A.S.公司)进行测定。顶空孵化温度40℃、孵化时间15 min、进样体积500 μL,不流动进样;孵化转速500 r·min⁻¹、进样针温度85℃。

表 1 传感器名称及性能描述
Table 1 Sensor name and performance description

传感器编号 Sensor number	传感器名称 Sensor name	性能描述 Performance description
1	W1C	对芳香成分灵敏,苯类 Sensitive to aromatic components, benzene
2	W5S	对氮氧化合物很灵敏 Sensitive to nitrogen oxides
3	W3C	对芳香成分灵敏,氨类 Sensitive to aromatic components, ammonia
4	W6S	对氢化物灵敏 Sensitive to hydride
5	W5C	对短链烷烃芳香成分灵敏 Sensitive to aromatic components of short chain alkanes
6	W1S	对甲基类灵敏 Sensitive to methyl
7	W1W	对硫化物灵敏 Sensitive to sulfide
8	W2S	对醇类、醛酮类灵敏 Sensitive to alcohols, aldehydes and ketones
9	W2W	对芳香成分、有机硫化物灵敏 Sensitive to aromatic components and organic sulfides
10	W3S	对长链烷烃灵敏 Sensitive to long chain alkanes

采用 MXT-WAX 毛细管色谱柱(15 m×0.53 mm, 1.0 μm),柱温 60 ℃,载气为高纯氮气(≥99.999%);进样口温度 80 ℃、电离源为氙源(3H);迁移管长度 53 mm、电场强度 500 V·cm⁻¹、迁移管温度 45 ℃;漂移气体为高纯氮气(纯度≥ 99.999%)、流速 50 mL·min⁻¹,正离子模式^[25]。利用 VOCal 数据处理软件中的 Reporter 和 Gallery Plot 等和软件内置的 GC 保留指数(NIST 2020)数据库和 IMS 迁移时间数据库进行检索和比对,对目标物进行定性分析。

表 2 气相色谱条件
Table 2 Gas chromatographic condition

时间 Time/min	漂移气流速 EPC1/(mL·min ⁻¹)	载气流速 EPC2/(mL·min ⁻¹)
0	150	2
2	150	2
10	150	10
20	150	100
25	150	150
30	150	150

1.2.3 相对气味活度值计算 相对气味活度值(relative odor activity value, ROAV)是在 OAV 基础上进一步评价其中某一种挥发性风味物质对整体风味的贡献程度,有效表征食品香味体系关键香气成分,是判定关键挥发性风味物质的方法。将对样品总体风味贡献最大的组分 ROAV 定义为 100,其余各组分的 ROAV 按下式计算^[26-27]。

$$ROAV_x \approx \frac{C_x}{C_{stan}} \times \frac{T_{stan}}{T_x} \times 100 \tag{1}$$

式中, C_x 和 T_x 分别为各挥发物的相对含量(%)和对应的空气中的阈值; C_{stan} 和 T_{stan} 分别为对整体风味贡献最大的挥发物的相对含量(%)和空气中的阈值。各挥发物的 ROAV 值均介于 0~100,ROAV 值越大,对样品整体风味贡献作用越大,ROAV≥1.0 为关键风味化合物,0.1≤ROAV<1.0 对样品的整体风味具有修饰作用,ROAV<0.1 的风味物质成分对样品整体风味具有潜在的贡献作用。

1.3 数据分析与处理

采用 Microsoft Excel 2016 进行相关数据处理;采用 DPS6.05 软件进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 参试鲜食玉米品种的挥发性风味物质

采用电子鼻分析参试鲜食玉米品种的挥发性风味物质,结果如图 1 所示。可以看出,参试鲜食玉米品种在电子鼻 10 个传感器上均有响应,且存在差异。总体来看,W1S、W1W 和 W2S 这 3 种传感器的响应值均高于其他 7 种传感器,这表明鲜食玉米的挥发性贡献物主要由甲基类化合物、硫化物和醇类、醛酮类化合物组成,其含量的差异可能是造成不同类型品种风味不同的主要原因。其中,农科糯 323 在 W2S、W1S 和 W5S 传感器上的响应值均明显高于其他品种,表明该品种

具有较高含量的甲基类化合物、醇类、醛酮类化合物和氮氧化合物。京紫糯 219 在 W1W 传感器

上明显高于其他品种,表明该品种具有较高含量的硫化物。

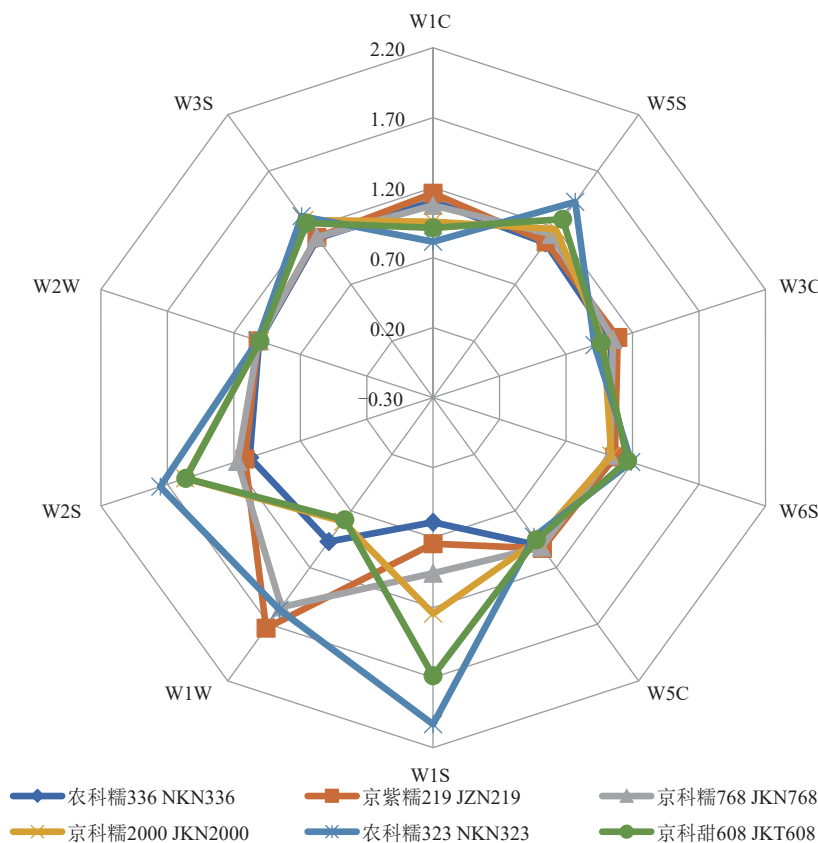


图1 参试鲜食玉米品种的电子鼻检测结果雷达图

Fig. 1 Radar map of the tested fresh corn varieties detected by electronic nose

2.2 参试鲜食玉米品种挥发性风味物质的组分构成

利用 GC-IMS 分析技术进一步探究不同类型鲜食玉米的特征风味差异,其检测结果的二维图谱和差异见图2。由图2可知,参试鲜食玉米样品中挥发性风味物质的 GC 分离效果较好,且不同样品间挥发性风味物质的种类大致相同,但含量存在一定的差异。如在图中红色圆圈处均可观察到斑点的颜色在不同样品间出现了较明显的变化,表明挥发性风味物质含量差异是导致不同类型鲜食玉米特征风味的重要因素。

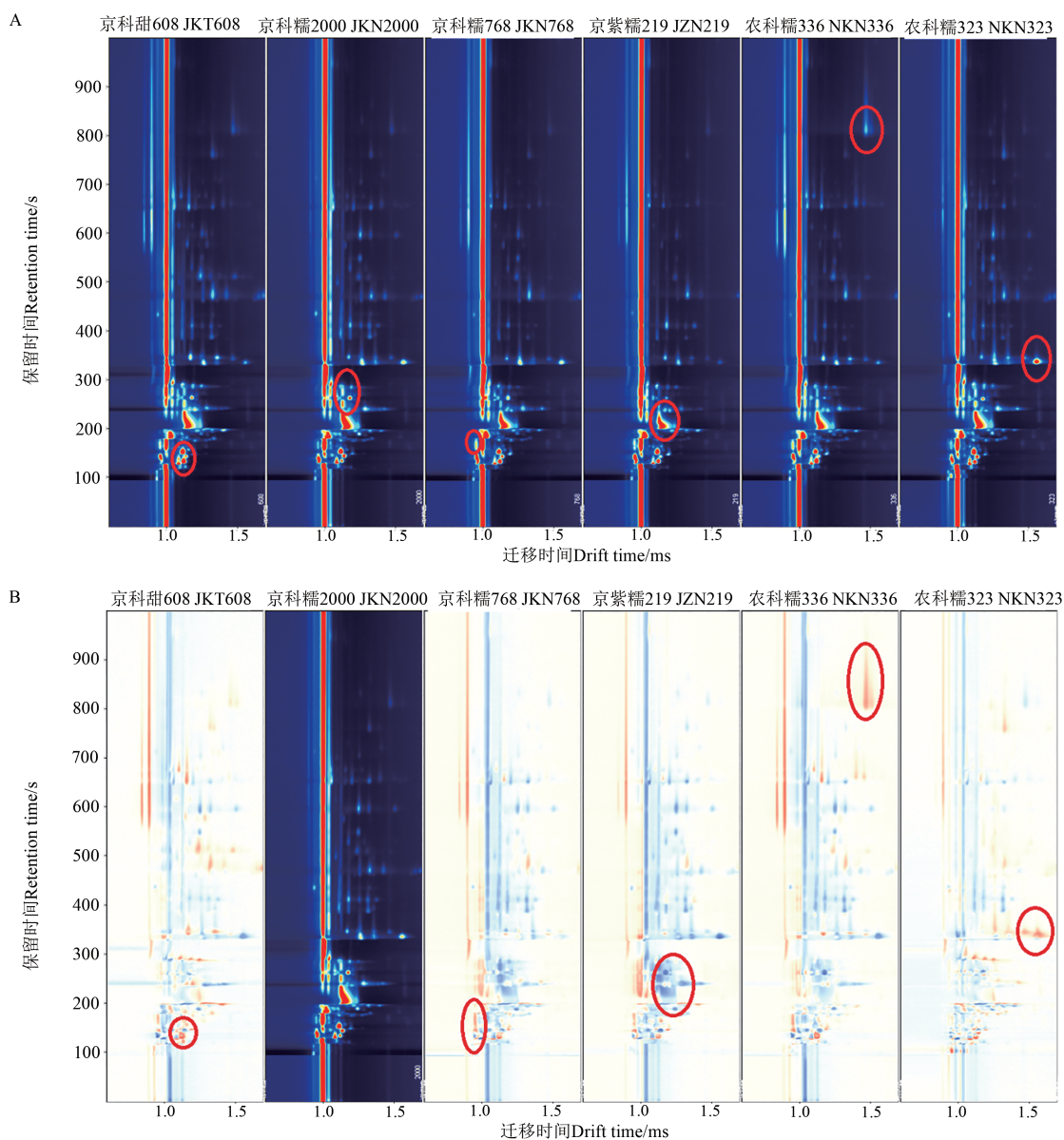
为了更具体、更直观地表现不同类型鲜食玉米挥发性风味物质含量的差异,采用仪器自带的 Gallery Plot 插件生成可视化指纹图谱(图3)。由图3可知,在参试鲜食玉米中共鉴定出34种挥发性风味物质,A框主要为醇类化合物,以农科糯323和京科甜608含量较高;B框和D框分别为醛

类和酮类化合物,以京科糯2000、农科糯323和京科甜608含量较高;C框主要为酯类化合物,以京科糯768、京科糯2000、农科糯323和京科甜608含量较高;E框为农科糯336含量较高的化合物,其中包括酯类和醛类化合物;F框为其他芳香化合物,以京科糯768、京科糯2000和农科糯323含量较高。

综合分析表明,酯类化合物在参试鲜食玉米品种中含量较高,参试鲜食玉米品种以农科糯323的挥发性风味物质含量较高且种类丰富。

2.3 参试鲜食玉米中挥发性风味物质浓度差异分析

根据挥发性风味物质的保留指数、保留时间和迁移时间^[28],对不同类型鲜食玉米挥发性风味物质进行定性和定量分析。结果(图4)表明,农科糯323的挥发性风味物质总体释放量最多,京



A:俯视图;B:差异对比图。横坐标代表相对迁移时间,纵坐标代表气相色谱的保留时间(s),横坐标1.0处红色竖线为RIP峰,峰两侧的每个点代表一种挥发性风味化合物,颜色代表物质峰的强度,从蓝色到红色,颜色越深表示峰强度越大。

A: Top view; B: Difference comparison. The abscissa represents the relative migration time, the ordinate represents the retention time (s) of gas chromatography, the red vertical line at abscissa 1.0 represents the RIP peak, each point on both sides of the peak represents a volatile flavor compound, the color represents the intensity of the substance peak, from blue to red, and the darker the color, the greater the peak intensity.

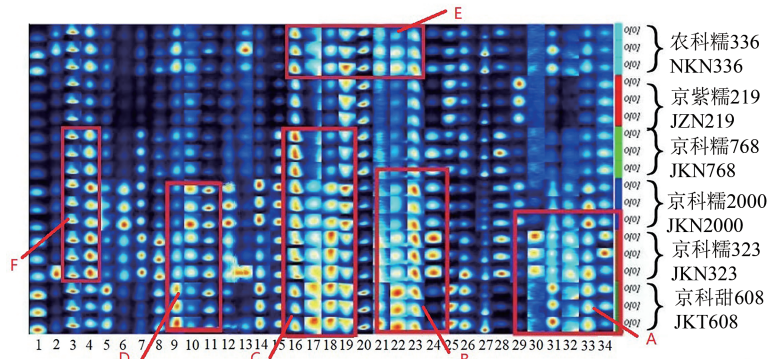
图2 参试鲜食玉米品种GC-IMS的俯视图和差异对比图

Fig. 2 Top view and difference comparison diagram of GC-IMS of the tested fresh corn varieties

紫糯219最少。进一步分析发现,挥发性风味物质主要由酯类(10种)、醛类(8种)、醇类(6种)、酮类(5种)、醚类(2种)构成,是鲜食玉米特征风味的重要组成,另外还有少量的吡啶类、吡嗪类和烯类物质。采用峰体积归一法计算参试鲜食玉米中各挥发性风味物质的相对含量,结果表明,酯类含量较高,占比34.68%~26.74%;其次是醛类,占比

26.00%~21.22%。

由表3可知,参试鲜食玉米各品种间,挥发性风味物质含量分布存在一定的相似性,甲酸异戊酯、1-庚烯、正己醛、丁酸乙酯、二丁醚等含量普遍较高。但每种类型鲜食玉米又有其独特的含量较高的成分,如农科糯336、京紫糯219和京科甜608中以1-庚烯含量最高,京科糯768和京科糯2000

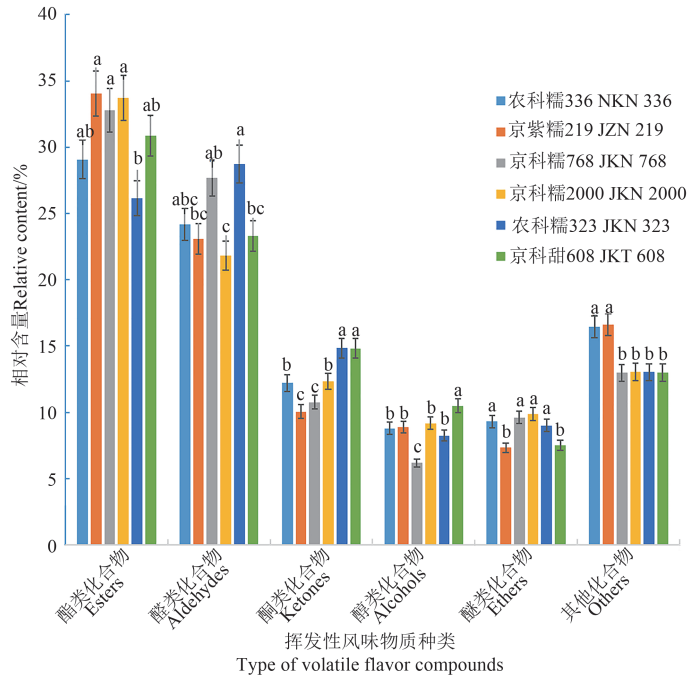


注:图中行代表样本的全部信号峰,列代表同一挥发性风味物质在不同样本中的信号峰,颜色深浅代表含量高。A~F框分别代表醇类、醛类、酮类、酯类&醛类及其他芳香化合物。1—乙酸乙酯(D);2—2-甲基吡嗪(D);3—1-庚烯;4—二丁醚;5—二乙基二硫醚;6—2-甲基吡啶;7—2-庚酮;8—2-辛酮;9—3-庚酮;10—甲基乙基酮;11—3-辛酮;12—戊酸乙酯;13—丙酮酸乙酯;14—乙酸异戊酯;15—丁酸乙酯;16—甲酸异戊酯;17—丁酸丁酯;18—异戊酸甲酯;19—丙酸甲酯;20—乙酸甲酯(D);21—(E)-2-己烯醛;22—2-甲基丁醛;23—丁醛;24—正己醛;25—异戊醛;26—庚醛(D);27—2-己烯醛;28—正戊醛;29—1-丁醇(D);30—3-甲基-1-丁醇;31—2-甲基-1-丙醇(D);32—2-己醇;33—2-戊醇;34—苯甲基醇。

Note: In the figure, the rows represent all selected signal peaks in the sample, the columns represent the signal peaks of the same volatile flavor compound in different samples, and the color intensity represents the content level. Boxes A to F represent alcohols, aldehydes, ketones, esters & aldehydes, and other aromatic compounds, respectively. 1—Ethyl acetate (D); 2—2-methylpyrazine (D); 3—1-heptene; 4—butyl ether; 5—diethyl disulfide; 6—2-methylpyridine; 7—Heptan-2-one; 8—Octan-2-one; 9—3-Heptanone; 10—Butan-2-one; 11—3-octanone; 12—Ethyl pentanoate; 13—Ethyl pyruvate; 14—Isoamyl acetate; 15—Ethyl butyrate; 16—Isoamyl formate; 17—Butyl butanoate; 18—Methyl 3-methylbutanoate; 19—Methyl propionate; 20—Methyl acetate (D); 21—(E)-2-hexenal; 22—2-methylbutanal; 23—Butanal; 24—Hexanal; 25—3-methylbutanal; 26—Heptanal (D); 27—2-Hexenal; 28—Pentanal; 29—1-butanol (D); 30—3-Methyl-1-butanol; 31—2-methyl-1-propanol (D); 32—2-Hexanol; 33—Pentan-2-ol; 34—Phenylmethanol.

图3 参试鲜食玉米挥发性风味物质指纹图谱

Fig. 3 Fingerprint of volatile flavor compounds in fresh corn



注:不同小写字母表示不同处理间在 $P<0.05$ 水平差异显著。

Note: Different small letters indicate significant differences between different treatments at $P<0.05$ level.

图4 参试鲜食玉米挥发性化合物类别相对含量

Fig. 4 Relative content of volatile compounds in fresh corn

表3 参试鲜食玉米挥发性风味物质定性定量分析

Table 3 Qualitative and quantitative analysis of volatile flavor compounds in fresh corn

序号 Number	化合物名称 Compound name	CAS#	分子式 Molecular formula	保留指数 Retention index	保留时间 Retention time/s	迁移时间 Migration time/ms	相对含量 Relative content/%					
							农科糯	京紫糯	京科糯	京科糯	农科糯	京科甜
							336 NKN336	219 JZN219	768 JKN768	2000 JKN2000	323 NKN323	608 JKT608
1	苯基甲醇 Phenylmethanol	C100516	C ₇ H ₈ O	1 036.90	293.93	1.81	0.75	1.20	0.84	0.74	0.96	0.64
2	2-戊醇 Pentan-2-ol	C6032297	C ₅ H ₁₂ O	1 156.40	472.96	1.42	2.86	2.63	2.02	2.94	2.48	3.77
3	2-己醇 2-Hexanol	C626937	C ₆ H ₁₄ O	1 187.00	530.59	1.30	0.43	0.33	0.36	0.46	0.47	0.52
4	1-丁醇(D) 1-Butanol(D)	C71363	C ₄ H ₁₀ O	1 122.40	411.49	1.38	0.32	2.82	0.43	1.06	0.55	0.43
5	3-甲基-1-丁醇 3-Methyl-1- butanol	C123513	C ₅ H ₁₂ O	1 184.20	524.93	1.52	0.14	0.20	0.12	0.13	0.30	0.14
6	2-甲基-1-丙醇 (D) 2-Methyl-1- propanol(D)	C78831	C ₄ H ₁₀ O	1 078.40	343.68	1.36	4.78	2.12	2.27	3.22	3.53	4.82
7	正戊醛 Pentanal	C110623	C ₅ H ₁₀ O	982.50	240.93	1.43	1.70	1.22	3.16	2.41	3.15	1.01
8	正己醛 Hexanal	C66251	C ₆ H ₁₂ O	1 073.60	336.97	1.56	3.47	2.32	9.00	8.60	14.56	3.08
9	庚醛(D) Heptanal(D)	C111717	C ₇ H ₁₄ O	1 156.10	472.29	1.70	3.20	3.13	3.69	1.82	2.63	4.65
10	丁醛 Butanal	C123728	C ₄ H ₈ O	893.30	190.39	1.11	2.85	3.78	2.68	3.15	2.88	2.31
11	异戊醛 3-Methylbutanal	C590863	C ₅ H ₁₀ O	907.80	197.68	1.41	2.96	5.75	2.30	1.80	1.33	4.52
12	2-甲基丁醛 2-Methylbutanal	C96173	C ₅ H ₁₀ O	876.10	182.46	1.15	1.08	0.90	0.75	0.73	0.93	1.22
13	(E)-2-己烯醛 (E)-2-hexenal	C6728263	C ₆ H ₁₀ O	122 7.20	617.09	1.18	0.46	0.51	0.38	0.31	0.34	0.50
14	2-己烯醛 2-Hexenal	C505577	C ₆ H ₁₀ O	124 4.50	656.25	1.16	8.49	4.16	4.03	2.40	2.65	7.83
15	丙酸甲酯 Methyl propionate	C554121	C ₄ H ₈ O ₂	907.20	197.37	1.32	2.97	4.97	2.46	2.87	2.05	3.01
16	乙酸甲酯(D) Methyl acetate (D)	C79209	C ₃ H ₆ O ₂	790.30	147.54	1.20	4.39	6.70	4.26	2.08	1.89	3.25
17	异戊酸甲酯 Methy 3- methylbutanoate	C556241	C ₆ H ₁₂ O ₂	102 8.50	285.04	1.19	2.80	2.56	1.70	2.88	2.94	2.88
18	甲酸异戊酯 Isoamyl formate	C110452	C ₆ H ₁₂ O ₂	107 2.90	336.13	1.27	10.23	11.43	14.00	11.59	9.64	8.66
19	乙酸异戊酯 Isoamyl acetate	C123922	C ₇ H ₁₄ O ₂	110 8.20	388.35	1.32	0.89	1.10	0.80	2.57	1.10	2.26

表3 参试鲜食玉米挥发性风味物质定性定量分析
Table 3 Qualitative and quantitative analysis of volatile flavor compounds in fresh corn 续表 Continued

序号 Number	化合物名称 Compound name	CAS#	分子式 Molecular formula	保留指数 Retention index	保留时间 Retention time/s	迁移时间 Migration time/ms	相对含量 Relative content/%					
							农科糯	京紫糯	京科糯	京科糯	农科糯	京科甜
							336	219	768	2000	323	608
							NKN336	JZN219	JKN768	JKN2000	NKN323	JKT608
20	丙酮酸乙酯 Ethyl pyruvate	C617356	C ₅ H ₈ O ₃	1 247.50	661.19	1.46	1.84	1.09	0.67	0.38	0.35	0.72
21	戊酸乙酯 Ethyl pentanoate	C539822	C ₇ H ₁₄ O ₂	1 122.70	412.03	1.26	0.81	1.56	0.91	1.64	1.47	0.93
22	丁酸乙酯 Ethyl butyrate	C105544	C ₆ H ₁₂ O ₂	1 006.20	262.59	1.18	2.66	4.00	7.90	9.18	5.85	6.41
23	乙酸乙酯(D) Ethyl acetate(D)	C141786	C ₄ H ₈ O ₂	875.30	182.13	1.34	1.04	0.61	0.52	0.69	0.89	1.34
24	丁酸丁酯 Butyl butanoate	C109217	C ₈ H ₁₆ O ₂	1 176.30	509.60	1.31	0.80	0.66	0.49	0.50	0.56	1.00
25	2-辛酮 Octan-2-one	C111137	C ₈ H ₁₆ O	1 304.30	762.91	1.33	2.05	1.93	2.20	1.97	4.55	3.86
26	2-庚酮 Heptan-2-one	C110430	C ₇ H ₁₄ O	1 196.20	549.24	1.25	1.76	1.11	2.53	2.67	3.05	1.52
27	甲基乙基酮 Butan-2-one	C78933	C ₄ H ₈ O	896.70	192.04	1.25	1.90	2.57	1.78	3.16	2.54	1.81
28	3-辛酮 3-Octanone	C106683	C ₈ H ₁₆ O	1 244.10	655.51	1.33	2.05	1.36	1.03	2.64	1.65	1.88
29	3-庚酮 3-Heptanone	C106354	C ₇ H ₁₄ O	1 178.00	512.93	1.24	4.57	2.90	2.97	2.15	2.95	5.37
30	二乙基二硫醚 Diethyl disulfide	C110816	C ₄ H ₁₀ S ₂	1 209.40	577.22	1.15	0.96	1.55	1.36	1.77	1.21	2.02
31	二丁醚 Butyl ether	C142961	C ₈ H ₁₈ O	982.90	241.21	1.28	7.75	5.40	8.45	8.28	8.00	5.09
32	2-甲基吡啶 2-Methylpyridine	C109068	C ₆ H ₇ N	1 220.10	600.88	1.32	0.53	0.63	0.52	1.95	1.22	0.64
33	2-甲基吡嗪(D) 2-Methylpyrazine (D)	C109080	C ₅ H ₆ N ₂	1 246.60	659.68	1.40	4.14	2.24	1.47	1.58	0.84	1.36
34	1-庚烯 1-Heptene	C592767	C ₇ H ₁₄	730.00	127.10	1.09	12.35	14.56	11.93	9.67	10.50	10.57

以甲酸异戊酯含量最高,农科糯 323 以正己醛含量最高。

2.4 参试鲜食玉米中挥发性风味物质相对气味活度值(ROAV)分析

由于挥发性风味物质的化学组成、分子结构以及鼻腔黏膜的嗅觉细胞对挥发性气味分子的察觉能力等因素的差异,导致人们对不同类型的挥

发性风味物质的嗅觉敏感性差异较大,通常把能感受到某种呈味物质所需要的该物质的最低浓度称为阈值^[29-30]。根据查询到的各类挥发性风味物质的阈值进行 ROAV 计算,由表 4 可知,参试鲜食玉米中异戊醛(似香蕉、葡萄的香味)和 3-辛酮(甜香、果香、蜡香等)均呈现较高的气味贡献值,为鲜食玉米提供了香甜的味道。不同类型鲜食玉米比较发现,京科糯 768、京紫糯 219 和农科糯 323 样

表 4 参试鲜食玉米挥发性风味物质 ROAV 值和气味
Table 4 ROVA value and odor of volatile flavor compounds in fresh corn

类别 Category	化合物名称 Compound name	阈值 Threshold	ROAV 值 ROAV value						气味描述 Odor description
			农科糯 336	京紫糯 219	京科糯 768	京科糯 2000	农科糯 323	京科甜 608	
			NKN336	JZN219	JKN768	JKN2000	NKN323	JKT608	
醇类 Alcohols	苯基甲醇 Phenylmethanol	5.50	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	微弱的芳香味 Faint fragrance
	2-戊醇 Pentan-2-ol	1.00	0.15	0.07	0.14	0.14	0.20	0.13	有一定的香气 It has a certain aroma
	2-己醇 2-hexanol	50.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	类似香蕉香气 Banana like aroma
	1-丁醇(D) 1-butanol(D)	0.48	0.04	0.16	0.06	0.11	0.09	0.03	药品、水果气味 Smell of medicine and fruit
	3-甲基-1-丁醇 3-methyl-1-butanol	0.01	1.24	0.89	1.35	1.08	3.91	0.83	有特殊不愉快气味,有辛辣而令人厌恶味 Unpleasant smell, with pungent and disgusting taste
	2-甲基-1-丙醇(D) 2-methyl-1-propanol(D)	0.03	7.82	1.79	4.78	4.80	8.43	5.17	咖啡、可可香气,微带甜的水果和巧克力似风味 Coffee, cocoa aroma, slightly sweet fruit and chocolate like flavor
	正戊醛 Pentanal	0.85	0.11	0.04	0.26	0.14	0.29	0.04	坚果香,苦杏仁、辛香 Nutty, bitter almond, spicy
醛类 Aldehydes	正己醛 Hexanal	0.23	0.81	0.28	2.72	1.84	4.99	0.47	类似于刚切好的草,类似干草的清香风味 Cut grass, the fragrance of hay
	庚醛(D) Heptanal(D)	0.26	0.66	0.34	0.99	0.34	0.80	0.63	有水果香气、强烈的油脂和清香 Fruit aroma, strong oil and fragrance
	丁醛 Butanal	0.10	1.54	1.05	1.86	1.55	2.27	0.82	具有较强的刺激性气味 Strong pungent odor
	异戊醛 3-methylbutanal	0.00	100.00	100.00	100.00	55.50	65.29	100.00	具有类似于香蕉和葡萄香味的特征性气味 Banana, grape and other characteristic aroma
	2-甲基丁醛 2-methylbutanal	0.05	1.30	0.56	1.16	0.80	1.62	0.96	具有坚果香、霉香、烤香、壤香 Nutty, moldy, roasted, earthy
	(E)-2-己烯醛 (E)-2-hexenal	0.79	0.03	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	具有新鲜的绿叶香味 Fresh green leaf aroma
	2-己烯醛 2-hexenal	0.15	3.05	0.77	1.87	0.79	1.39	1.85	水果香味 Fruit aroma

表 4 参试鲜食玉米挥发性风味物质 ROAV 值和气味

Table 4 ROVA value and odor of volatile flavor compounds in fresh corn

续表 Continued

类别 Category	化合物名称 Compound name	阈值 Threshold	ROAV 值 ROAV value						气味描述 Odor description
			农科糯 336	京紫糯 219	京科糯 768	京科糯 2000	农科糯 323	京科甜 608	
			NKN336	JZN219	JKN768	JKN2000	NKN323	JKT608	
酯类 Esters	丙酸甲酯 Methyl propionate	0.35	0.46	0.39	0.49	0.40	0.46	0.30	具有芳香气味,有水果香气 和老姆酒样的香味 Aromatic smell, with fruit aroma and rum like aroma
	乙酸甲酯(D) Methyl acetate (D)	5.10	0.05	0.04	0.06	0.02	0.03	0.02	有芬芳的水果味 Fragrant fruit flavor
	异戊酸甲酯 Methy 3-methylbutanoate	0.20	0.76	0.36	0.59	0.71	1.16	0.51	苹果样香气,有菠萝、苹果汁 的香韵 Apple aroma, pineapple and apple juice aroma
	甲酸异戊酯 Isoamyl formate	149.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	具有浓甜的水果香气,似黑 醋栗、李子、梅子样的香味 Sweet fruit aroma, like blackcurrant, plum and plum
	乙酸异戊酯 Isoamyl acetate	0.50	0.10	0.06	0.11	0.25	0.17	0.16	有梨类香气,味道微甜略涩 Pear aroma, slightly sweet and astringent taste
	丙酮酸乙酯 Ethyl pyruvate	22.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	味道特征为甜、水果味、菠萝 蜜、青香、蜡香及木香香韵 It tastes sweet, fruity, pineapple, green, waxy and woody
	戊酸乙酯 Ethyl pentanoate	0.90	0.05	0.05	0.07	0.09	0.13	0.04	有较浓的脂肪臭并带有果 香,味道厚重刺激性很强 Thick fat odor, fruity aroma, thick taste and strong irritation
	丁酸乙酯 Ethyl butyrate	0.90	0.16	0.12	0.61	0.50	0.51	0.25	有明显的脂肪臭,也带有菠 萝的香,味道较涩但爽口 It smells of fat and pineapple. It tastes astringent but refreshing
	乙酸乙酯(D) Ethyl acetate (D)	0.02	2.82	0.85	1.82	1.71	3.51	2.37	其香气类似苹果,味道有点 涩,刺激性强 The aroma is like apple, and the taste is a little astringent, with strong irritation
	丁酸丁酯 Butyl butanoate	0.03	1.39	0.59	1.09	0.80	1.43	1.14	有强烈的、甜润的水果香气, 并有香蕉和菠萝似的香韵 It has a strong, sweet fruit aroma, banana and pineapple like aroma

表 4 参试鲜食玉米挥发性风味物质 ROAV 值和气味

Table 4 ROVA value and odor of volatile flavor compounds in fresh corn

续表 Continued

类别	化合物名称	阈值	ROAV 值 ROAV value						气味描述
			农科糯	京紫糯	京科糯	京科糯	农科糯	京科甜	
			336	219	768	2000	323	608	
Category	Compound name	Threshold	NKN336	JZN219	JKN768	JKN2000	NKN323	JKT608	Odor description
酮类	2-辛酮	0.23	0.48	0.23	0.66	0.42	1.56	0.59	具有霉香、酮香,并有牛奶、乳酪、蘑菇的气味
	Octan-2-one								Musty, ketone, milk, cheese, mushroom
	2-庚酮	0.02	4.14	1.34	7.66	5.73	10.47	2.35	具有香蕉、奶酪及轻微的药香
	Heptan-2-one								With banana, cheese and slight medicinal aroma
	甲基乙基酮	1.30	0.08	0.05	0.10	0.12	0.15	0.05	有似丙酮的气味
Ketones	Butan-2-one								It smells like acetone
	3-辛酮	0.00	85.33	29.16	55.33	100.00	100.00	51.16	具有甜香、果香、蜡香气味,并带有老姆酒香
	3-octanone								Sweet, fruity, waxy, with rum aroma
	3-庚酮	0.26	0.95	0.31	0.79	0.41	0.89	0.73	具有甜香、果香、蜡香气味,并带有老姆酒香
	3-Heptanone								Sweet, fruity, waxy, with rum aroma
醚类	二乙基二硫醚	0.03	1.74	1.43	3.16	2.91	3.17	2.38	—
	Diethyl disulfide								
Ethers	二丁醚	0.88	0.48	0.17	0.67	0.46	0.72	0.20	—
	Butyl ether								
其他	2-甲基吡啶	1.90	0.02	0.01	0.02	0.05	0.05	0.01	焦糖味和坚果香味
	2-methylpyridine								Caramel and nutty
	2-甲基吡嗪(D)	2.00	0.11	0.03	0.05	0.04	0.03	0.02	爆米花香气
Others	2-methylpyrazine (D)								Popcorn aroma
	1-庚烯	1.50	0.44	0.27	0.55	0.32	0.55	0.25	像汽油一样
	1-heptene								Like gasoline

品中 ROAV≥1 的挥发性风味物质在 10 种以上,主要包括 2-甲基-1-丙醇(D)(咖啡、可可和似巧克力的风味)、丁醛(刺激性气味)、2-庚酮(香蕉、奶酪香)、二乙基二硫醚、乙酸乙酯(D)(水果香)、3-甲基-1-丁醇(令人不愉快的香气)等,为鲜食玉米贡献了一定的乳酪香、水果香等气息。当 0.1≤ROAV<1.0 时,表明该物质在香气风格中主要起到一定的修饰作用,烘托主要香气特征。参试鲜食玉米中,0.1≤ROAV<1.0 的挥发性物质均在 10 个以上,主要包括 2-己烯醛(水果香)、丙酸甲

酯(水果香、老姆酒香)、异戊酸甲酯(苹果、菠萝香韵)、乙酸异戊酯(梨香、微甜略涩)、丁酸乙酯(味道较涩但爽口)、乙酸乙酯(D)(似苹果香气、味道涩)、丁酸丁酯(甜润水果香)、2-辛酮(酮香、乳酪香)、二丁醚、1-庚烯(似汽油味道)等,使不同类型的鲜食玉米风味更加丰富协调。

3 讨论

挥发性风味物质是影响鲜食玉米食用和加工的重要因素之一,人们期望鲜食玉米能像水稻香

米一样具有典型的特征风味物质,但鲜食玉米的关键性风味物质不是单一的^[31-33],而是几种或一组挥发性风味物质相互作用共同决定的^[34]。挥发性风味物质的产生途径主要包括脂类的水解和氧化,蛋白质、氨基酸的自动降解以及糖类的代谢等^[35-37]。本研究结果显示,GC-IMS共鉴定到34种挥发性风味物质,其中酯类化合物和醛类化合物种类最为丰富且在挥发性风味物质总体释放量中占比较高,酯类化合物是由有机酸或无机酸与醇进行酯化反应而生成的,醛类化合物是脂肪氧化的主要产物。在分析鲜食玉米关键挥发性风味物质时,不应局限于“以量定效”的原则。相对气味活度值(ROAV)可以客观地反映各类挥发性风味物质对鲜食玉米香气风格的贡献值,可实现在复杂基质中对特征风味物质的精准鉴定^[26-27]。本研究通过计算参试鲜食玉米的ROAV值发现,异戊醛和3-辛酮具有极低的风味阈值,虽然在挥发性风味总体释放量中占比不高,但却表现出浓烈的特征香气,是鲜食玉米独特风味的关键挥发性风味物质,为鲜食玉米提供似水果的香甜味道。

鲜食玉米的香韵构成十分丰富,除了水果的香甜味道,还包含了清香、乳酪香等其他香气特征,这些特征香气含量和种类的不同决定了鲜食玉米风味各异,如甜玉米的清香、糯玉米的醇香以及鲜食玉米蒸煮后的浓香等。本研究结果显示,挥发性风味物质种类和含量在样品间存在差异,这与前人研究结果一致^[38-39]。3-甲基-1-丁醇、2-甲基-1-丙酮(D)、正己醛、丁醛、乙酸乙酯(D)和2-庚酮是农科糯323关键风味差异的重要组分,为该品种提供了似巧克力、乳酪的特征香韵和干草的清香风味。2-甲基-1-丙酮(D)和2-己烯醛是农科糯336关键风味差异的重要组分,呈现了似水果的香甜气息。正戊醛、庚醛(D)、乙酸甲酯(D)、2-庚酮、3-辛酮是京科糯768关键风味差异的重要组分,呈现出坚果香和似水果的芬芳。丁醛(D)和3-辛酮是京紫糯219和京科糯2000关键风味差异的重要组分。京科甜608的关键风味差异组分为2-己烯醛。鲜食玉米独特的香气风格并非由各类挥发性风味物质简单的加和所产生的,而是通过复杂的协调作用形成的,因此今后还需对各类挥发性风味物质间的相互转化及协作拮抗关系进行深入研究。

综上所述,甲基类化合物、硫化物和醇类、酮类化合物是参试鲜食玉米风味差异的主要原因,黄糯玉米品种农科糯323具有较高含量的甲基类化合物、醇类、酮类化合物和氮氧化合物可能是导致黄糯玉米品种有较好风味的原因,紫糯玉米品种京紫糯219具有较高含量的硫化物。GC-IMS分析共检测出34种挥发性风味物质,其中酯类和醛类物质占比较高,挥发性风味物质含量的差异是造成不同类型鲜食玉米特征风味差异的重要因素。ROAV数据分析表明,异戊醛、3-辛酮、2-甲基-1-丙酮(D)、2-庚酮、二乙基二硫醚为鲜食玉米特征风味的关键挥发性风味物质。

参 考 文 献

- [1] 赵久然,卢柏山,史亚兴,等.我国糯玉米育种及产业发展动态[J].玉米科学,2016,24(4):67-71.
ZHAO J R, LU B S, SHI Y X, *et al.* Development trends of waxy corn breeding and industry in China [J]. Corn Sci., 2016, 24(4):67-71.
- [2] 徐丽,赵久然,卢柏山,等.我国鲜食玉米种业现状及发展趋势[J].中国种业,2020(10):14-18.
XU L, ZHAO J R, LU B S, *et al.* Current situation and development trend of fresh corn seed industry in China [J]. China Seed Industry, 2020(10):14-18.
- [3] 贾铭,张世洪,杨虎,等.鲜食糯玉米绿色高产高效栽培技术[J].种子科技,2021,39(17):48-50.
JIA M, ZHANG S H, YANG H, *et al.* Green, high yield and high efficiency cultivation techniques of fresh waxy corn [J]. Seed Technol., 2021, 39(17):48-50.
- [4] 李紫琪,古艳婷,郭燕枝,等.我国鲜食玉米标准体系及营养标准研究[J].食品安全质量检测学报,2022,13(18):5964-5973.
LI Z Q, GU Y T, GUO Y Z, *et al.* Study on the standard system and nutritional standard of fresh corn in China [J]. J. Food Safety Quality Inspection, 2022, 13(18):5964-5973.
- [5] 卢柏山,董会,赵久然,等.不同鲜食玉米品种适采期氨基酸含量分析[J].中国农业科技导报,2023,25(11):132-142.
LU B S, DONG H, ZHAO J R, *et al.* Amino acid content analysis of different fresh corn varieties at suitable harvest time [J]. J. Agric. Sci. Technol., 2023, 25(11):132-142.
- [6] 卢柏山,董会,史亚兴,等.不同品种鲜食玉米体外抗氧化能力综合评价[J].华北农学报,2021,36(S1):101-110.
LU B S, DONG H, SHI Y X, *et al.* Comprehensive evaluation of antioxidant capacity *in vitro* of different varieties of fresh corn [J]. Acta Agric. Sin., 2021, 36(S1):101-110.
- [7] 史亚兴,张保民.鲜食玉米的发展与前景——探索我国甜玉米的北方市场[J].蔬菜,2016(12):1-6.
SHI Y X, ZHANG B M. Development and prospect of fresh corn-explore the northern market of sweet corn in China! [J]. Vegetables, 2016(12):1-6.

- [8] 卢柏山,史亚兴.糯玉米京紫糯 218 选育及其特征特性研究[J].农业科技通讯,2011(5):108-110.
LU B S, SHI Y X. Breeding and characteristics of waxy maize Jingzinuo 218 [J]. Agric. Sci. Technol. Commun., 2011(5): 108-110.
- [9] 赵久然,卢柏山,史亚兴.“京科糯 2000”等系列糯玉米品种选育及种质创新[J].中国科技成果,2011(11):72-73.
ZHAO J R, LU B S, SHI Y X. Breeding and germplasm innovation of a series of waxy maize varieties such as “Jingkenuo 2000” [J]. China Sci. Technol. Achievements, 2011 (11):72-73.
- [10] 徐丽,史亚兴,席胜利,等.“甜味糯”新型鲜食玉米及其代表品种京科糯 768 的选育[J].植物遗传资源学报,2023,24(1): 317-324.
XU L, SHI Y X, XI S L, *et al.*. A new type of fresh corn——waxy corn with sweet taste and the representative variety Jingkenuo 768 [J]. J. Plant Genetic Resour., 2023, 24(01): 317-324.
- [11] LIU M, ZHU K, YAO Y, *et al.*. Antioxidant, anti-inflammatory and antitumor activities of phenolic compounds from white, red and black *Chenopodium quinoa* seed [J]. Cereal Chem., 2020, 97(3):703-713.
- [12] 袁惠琦.脂氧合酶在鲜食糯玉米风味形成中的作用及其在采后贮藏中的应用[D].镇江:江苏大学,2020.
YUAN H Q. The role of lipoxygenase in the formation of fresh waxy cornflavor and its application in postharvest storage [D]. Zhenjiang: Jiangsu University,2020.
- [13] 孙神振,赵森,吴洪婕,等.不同品种类型玉米口感与营养及风味品质的比较[J].作物研究,2011,25(6):556-558.
SUN S Z, ZHAO M, WU H J, *et al.*. Nutritional and flavor quality analysis of different kinds of waxy corn [J]. Crop Res., 2011,25(6):556-558.
- [14] 李国琰,李巧玲,张雁,等.鲜食玉米挥发性风味成分分析技术及变化规律研究进展[J].食品研究与开发,2021,42(15): 210-218.
LI G Y, LI Q L, ZHANG Y, *et al.*. Research advances on analysis technology and changes of volatile flavor compounds in fresh corn [J]. Food Res. Dev., 2021,42 (15):210-218.
- [15] 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 N M, KE J H, YUAN L. Principal components analysis for volatility of flavor compositions in different fresh sweet glutinous corn [J]. J. Nuclear Agric., 2017,31(11):2175-2185.
- [16] 陈芳,阚健全,孔梅.浅谈食品风味化学[J].中国调味品,2001 (2):30-32.
CHEN F, KAN J Q, KONG M. Discussion on food flavor chemistry [J]. Chin. Condiments, 2001(2):30-32.
- [17] 丁耐克.食品风味化学[M].北京:中国轻工业出版社,2006: 1-383.
- [23] 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(7):95-98.
LIU Y H, SONG J F, LI D J, *et al.*. Analysis of the volatile flavor components of the quick-frozen sweet corn by HS-SPME/GC-MS [J]. Food Industry Sci. Technol., 2010(7):95-98.
- [24] 刘瑶,左进华,高丽朴,等.流态冰预冷处理对甜玉米贮藏品 质的影响[J].制冷学报,2020,41(03):83-90.
LIU Y, ZUO J H, GAO L P, *et al.*. Effect of slurry ice precooling treatment on quality of sweet corn [J]. J. Refrigeration, 2020, 41 (03):83-90.
- [25] 孙嘉卿,冯涛,张灿,等.结合 GC-MS 和 GC-IMS 分析不同处理 方式下玉米的挥发性风味物质[J].粮油食品科技,2021, 29(1):1-9.
SUN J Q, FENG T, ZHANG C, *et al.*. Analysis of volatile flavor compounds in corn under different treatments by GC-MS and GC-IMS [J]. Grain Oil Food Sci. Technol., 2021,29(1):1-9.
- [26] 李扬,李妍,李栋,等.基于 ROAV 和嗅闻技术分析乳脂的关键 风味化合物[J].食品科学,2023,44(6):262-267.
LI Y, LI Y, LI D, *et al.*. Analysis of key flavor compounds in dairy fat products using relative odor activity value and olfactometry [J]. Food Sci., 2023,44(6):262-267.
- [27] 刘登勇,周光宏,徐幸莲.确定食品关键风味化合物的一种新 方法:“ROA”法[J].食品科学,2008(7):370-374.
LIU D Y, ZHOU G H, XU X L. “ROA” Method: a new method for determining key odor compounds of rugao ham [J]. Food Sci., 2008 (7):370-374.
- [28] 魏泽宏,唐涛,刘少军,等.一种基于风味特征的杂交鱼类肉 品质评价方法:CN202110491076.9 [P]. 2022-05-17.
- [29] 张卫斌.食品感官分析标度域——基于味觉行为的实验及 理论研究[D].杭州:浙江工商大学,2012.
ZHANG W B. Scale domain of food sensory analysis- experimental and theoretical research based on taste behavior [D]. Hangzhou: Zhejiang Industrial and Commercial University, 2012.
- [30] GEMERT L J V. Compilations of odour threshold values in air, water and other media [J].2003.
- [31] 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 L, WANG R L. Changes in volatile components of maize during storage [J]. Modern Food Sci. Technol., 2015, 31(7) 316-325.
- [32] 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 R, LI H J, HE Z F. Changes and principal component analysis of volatile compounds in corn ears during frozen storage [J]. Food Fermentation Industry, 2019,45(1):210-218.
- [33] 谢正敏,练顺才,叶华夏,等.玉米蒸煮香气成分的研究[J].酿 酒科技,2012(9):68-71.
XIE Z M, LIAN S C, YE H X, *et al.*. Research on the flavoring compositions of maize [J]. Brewing Technol., 2012(9): 68-71.
- [34] FAN X, JIAO X, LIU J, *et al.*. Characterizing the volatile compounds of different *Sorghum* cultivars by both GC-MS and HS-GC-IMS [J]. Food Res. Int., 2020,140(4):109975.1-11.
- [35] 王俊沪,霍贵成.干酪风味物质的生成[J].中国乳品工业, 2004, 32(12):36-42.
WANG J H, HUO G C. Formation of cheese flavor compounds [J]. China Dairy Industry, 2004, 32 (12):36-42.
- [36] 曹锦轩,吕彤,王颖,等.脂肪相关酶类在干腌肉制品风味形 成过程中的作用[J].现代食品科技,2015,31(1):254-258.
CAO J X, LV T, WANG Y, *et al.*. The role of fat-related enzymes in the process of flavor formation in dry-cured meat

- products [J]. *Modern Food Sci. Technol.*, 2015, 31(1): 254-258.
- [37] EKPA O, FOGLIANO V, LINNEMANN A. Identification of the volatile profiles of 22 traditional and newly bred maize varieties and their porridges by PTR-QiTOF-MS and HS-SPME GC-MS [J]. *J. Sci. Food Agric.*, 2021, 101(4): 1618-1628.
- [38] 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 Y, WU J J, LIU Z Y, *et al.*. Analysis of volatile compounds in sweet corn beverage with different sterilizations [J]. *Modern Food Sci. Technol.*, 2019, 35(5): 281-288.
- [39] 沈凌雁, 牛丽影, 刘春菊, 等. 不同品种鲜食糯玉米清汁与籽粒中挥发性成分比较[J]. *核农学报*, 2021, 35(4): 902-910.
SHEN L Y, NIU L Y, LIU C J, *et al.*. Comparison of volatile components in clear juice and kernel of different fresh-edible waxy corn cultivars [J]. *J. Nuclear Agric.*, 2021, 35(4): 902-910.