

“粮食加工与风味形成” 特约专栏文章之一

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2021.01.001

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]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2021, 29(1): 1-9.

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

孙嘉卿¹, 冯涛¹, 张灿², 张康逸²✉

(1. 上海应用技术大学 香料香精技术与工程学院, 上海 201418;

2. 河南省农科院农副产品加工研究中心, 河南 郑州 450002)

摘要: 以玉米为研究材料, 基于气相离子迁移谱技术 (gas chromatography-ion mobility spectroscopy, GC-IMS) 和气相色谱质谱技术 (gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS) 分析炒、蒸、煮、速冻、预冷、冻干、漂染、清洗玉米等 9 种不同处理方式下玉米气味指纹图谱, 考察不同处理方式对玉米风味的影响。结果表明, 不同处理方式下的玉米都含有正己醛、1-辛烯-3 醇、辛醇、2-戊基噻唑等化合物, 多种挥发性有机物种类相同, 但含量存在较大差异, 不同处理方式下的玉米主要风味物质各不相同。

关键词: 玉米; 气相离子迁移谱技术; 风味; 气相色谱-质谱; 香气活力值

中图分类号: TS210.7; TS210.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-7561(2021)01-0001-09

网络首发时间: 2020-12-25 10:17:27

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3863.TS.20201224.1735.002.html>

Analysis of Volatile Flavor Compounds in Corn under Different Treatments by GC-MS and GC-IMS

SUN Jia-qing¹, FENG Tao¹, ZHANG Can², ZHANG Kang-yi²✉

(1. School of Perfume and Aroma Technology, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China;

2. Research Center of agricultural by-products processing of Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou, Henan 450002, China)

Abstract: Corn was used as the research material, based on gas chromatography ion mobility spectroscopy (Gc-IMS) and gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), the odor fingerprints of corn were analyzed under 9 different treatments, including frying, steaming, boiling, quick freezing, precooling, freeze-drying, bleaching and dyeing, washing, and so on. The results showed that there were n-hexanal, 1-octen-3-ol, octanol, 2-pentylthiazole and other compounds in corn under all different treatment methods. The kinds of

收稿日期: 2020-07-16

基金项目: 河南省农业科学院杰出青年科技基金 (2020JQ04); 河南省农业科学院科技创新创意项目 (豫财科〔2020〕36 号 2060302); 河南省重大科技专项 (151100111300)

Supported by: Outstanding Youth Science and Technology Fund of Henan Academy of Agricultural Sciences (No. 2020JQ04); Science and Technology Innovation Creative Project by Henan Academy of Agricultural Sciences (2060302, No.36, [2020], YuCaiKe); Major Science and Technology Special Project of Henan Province (No. 151100111300)

作者简介: 孙嘉卿, 女, 1997 年出生, 在读研究生, 研究方向为香料香精与风味分析。E-mail: jiaqingsun1021@163.com.

通讯作者: 张康逸, 男, 1981 年出生, 博士, 副研究员, 研究方向为食品科学。E-mail: kangyiz@163.com.

volatile organic compounds were the same, but the contents were different.

Key words: corn; gas phase ion mobility spectrometry; flavor; GC-MS; OAV

玉米被称为“黄金食品”，是禾本科玉蜀黍属一年生草本植物，原产于中南美洲，是世界重要的粮食和饲料作物^[1]，广泛分布于美国、中国、巴西等国家^[2]。玉米含有淀粉、蛋白质、脂肪、纤维等多种营养成分，此外还含有丰富的钙、铁、镁、硒、维生素、胡萝卜素、尼克酸等。玉米具有一定的药用功效，如可以防治心血管疾病，促进肠壁蠕动、预防便秘、抗氧化、防癌抗癌等。鲜食玉米具有降低血压、防癌抗癌、益智健脑等功效，随着人们对保健意识的增强，鲜食玉米越来越受到人们的喜爱，消费迅速增长。到 2020 年全国鲜食玉米种植面积达到 1 500 万亩。目前，全国鲜食玉米种植面积超过 1 200 万亩^[3]。近年来人们一方面致力于玉米副产品的开发^[4]，另一方面对于不同处理方式的变化过程如冻藏过程中^[5]、不同干燥工艺等对玉米品质及风味的影响^[6]、或不同品种鲜食甜糯玉米挥发性风味物质主成分分析^[7]均有较多的研究，但针对不同的处理方式产生的风味物质的对比分析研究较少。

气相色谱-离子迁移谱法（GC-IMS）是近年来在新兴技术领域兴起的热度较高的气相分离检测技术^[8]，该技术结合了气相色谱的高分离能力和离子迁移率光谱（IMS）的快速响应、高灵敏度、大气压下室温下即可进行、无需进行预处理即可提供快速分析和可变体积进样的优点，又弥补了气相色谱的低鉴别能力^[9]。在食品检测^[10]、鉴别^[11]、溯源、分级^[12]等各个领域发展迅速。目前已有研究采用 HS-SPME^[13-14]、SPME^[15]等对玉米风味进行研究，但是将 GC-IMS 技术用来表征不同处理方式下的青豆挥发性风味物质指纹图谱的研究尚未见报道。

1 材料与方法

1.1 材料

实验用的玉米采摘时间、采摘成熟度相似，保存方法为冷藏。其不同处理方式见表 1。

1.2 仪器与设备

FlavourSpec®风味分析仪、GCMS（5975C-

表 1 玉米样品
Table 1 Corn sample

序号	样品编号	处理方式说明
1	YM	对照玉米
2	QX-YM	清洗玉米
3	PT-YM	漂烫玉米（2 min）
4	YL-YM	预冷玉米
5	ZE-YM	蒸玉米（15 min）
6	ZU-YM	煮玉米（15 min）
7	C-YM	炒玉米
8	SD-YM	速冻玉米
9	DG-YM	冻干玉米

7890 A）气质联用仪、G4513A16 位自动进样塔：美国安捷伦科技有限公司；50/20 μm DVB/CAR/PDMS 萃取头：美国色谱科公司；MP5002 电子天平：上海舜宇恒平科学仪器有限公司；HH-S2 数显恒温水浴锅：金坛市医疗仪器厂；2-辛醇：上海源叶生物科技有限公司。

1.3 实验条件

1.3.1 GC-IMS 测定条件

顶空进样条件：顶空孵化温度：40 $^{\circ}\text{C}$ ；孵化时间：15 min；顶空进样针温度：45 $^{\circ}\text{C}$ ；进样量：500 μL ；孵化转速：500 rpm。

GC-IMS 条件：色谱柱类型：FS-SE-54-CB-1 15m ID：0.53 mm；柱温：60 $^{\circ}\text{C}$ ；漂移气（高纯 N_2 ，纯度 $\geq 99.999\%$ ）；流速：150 mL/min；IMS 探测器温度：45 $^{\circ}\text{C}$ 。

样品前处理：称取 2 g 样品，置于 20 mL 顶空瓶中，40 $^{\circ}\text{C}$ 孵育 15 min 后进样。

1.3.2 GC-MS 测定样品前处理

样品前处理：称取不同处理的玉米样品各 6 g，置于 30 mL 棕色螺口固相微萃取样品瓶中，放入 80 $^{\circ}\text{C}$ 恒温水浴锅中平衡 20 min；同时，将固相微萃取头插入 GC-MS 仪的进样口中，在 250 $^{\circ}\text{C}$ 条件下老化 20 min。然后再将萃取头插入平衡好的样品瓶中，在 80 $^{\circ}\text{C}$ 恒温水浴条件下吸附 50 min 后取出，插入气相色谱进样口，解吸 6 min。

1.3.3 GC-MS 分析条件

色谱条件：色谱毛细管柱为 DB-5MS（60 mm $\times$

0.32 mm, 1 μm); 色谱柱起始温度 40 $^{\circ}\text{C}$, 保持 2 min, 以 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的升温速率升至 180 $^{\circ}\text{C}$, 再以 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的升温速率升至 250 $^{\circ}\text{C}$, 并保持 10 min。载气为氦气, 载气流量为 0.8 mL/min, 压力为 3.29×10^4 Pa, 进样口温度为 250 $^{\circ}\text{C}$, 运行时间 47 min。

质谱条件: 电子轰击 (electron impact, IE) 离子源, 电子能量 70 eV, 离子源温度 230 $^{\circ}\text{C}$, 四级杆温度为 150 $^{\circ}\text{C}$, 质量扫描范围为 35~450 m/z, 溶剂延迟 3 min。

1.4 数据处理

利用功能软件 Laboratory Analytical Viewer 和分析软件和三款插件 Reporter、Gallery Plot、Dynamic PCA 以及 GC $\times$ IMS Library Search 对图谱进行差异分析, 通过内置的 NIST 2014 气相保留指数数据库与 G.A.S 的 IMS 迁移时间数据库二维定性分析。

2 结果与分析

2.1 GC-IMS 检测下不同处理方式玉米样品中的风味差异

不同处理方式的玉米样品挥发性物质 GC-IMS 图谱见图 1, 纵坐标代表气相色谱的保留时间,

横坐标代表离子迁移时间, 横坐标 1.0 处竖线为 RIP 峰 (反应离子峰, 经归一化处理)。RIP 峰两侧的每一个点代表一种挥发性有机物, 颜色越深表示浓度越大。结合以上说明及 GC-IMS 二维俯视图可以对不同样品之间的挥发性物质组成进行直观比较。当以鲜玉米为参照, 差异化分析所有谱图时, 风味物质的差异更加一目了然。与对照玉米相比, 清洗玉米的样品风味谱图和其较为相似, 风味物质浓度相差不大; 谱图较为相似的漂烫、预冷、速冻三种处理方式下的玉米样品有了变化, 但对风味的影响相对较小, 蒸、煮处理后的玉米风味物质明显减少, 变化较为明显; 炒制及冻干样品的谱图中, 挥发性物质种类最为丰富、与其他处理方式的玉米差异最大, 最为明显。

2.2 GC-IMS 检测下不同处理方式玉米样品风味物质指纹图谱对比

为了更具体直观表现不同样品、不同过程中挥发性物质的变化规律和相对含量的比较, 我们借助 Gallery Plot 插件来绘制挥发性物质的指纹谱图, 直观且定量地比较不同样品之间的挥发性有机物差异。

图 2 中每一行代表一个样品中选取的全部信号峰, 图中每一列代表同一挥发性有机物在不同

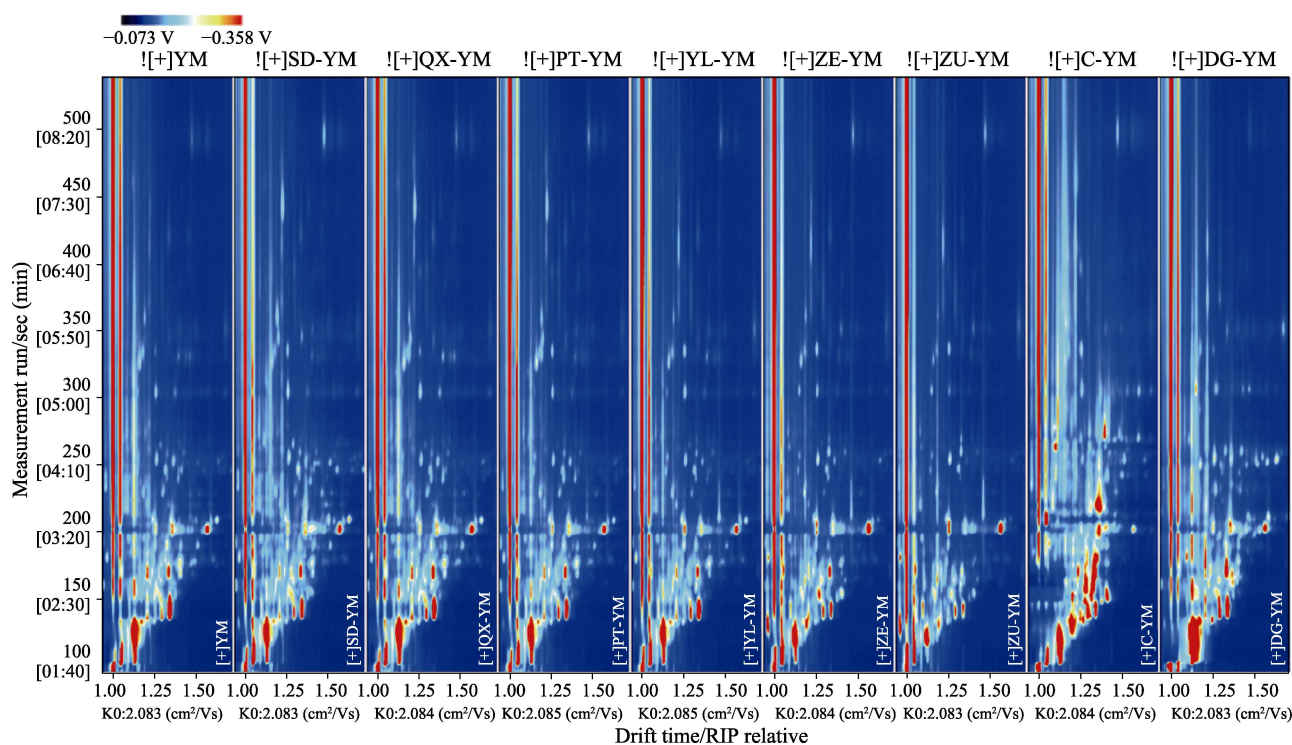


图 1 不同处理方式的玉米样品挥发性物质成分二维谱图 (俯视图)

Fig.1 Two dimensional spectrum of volatile compounds in corn samples with different treatment methods (top view)

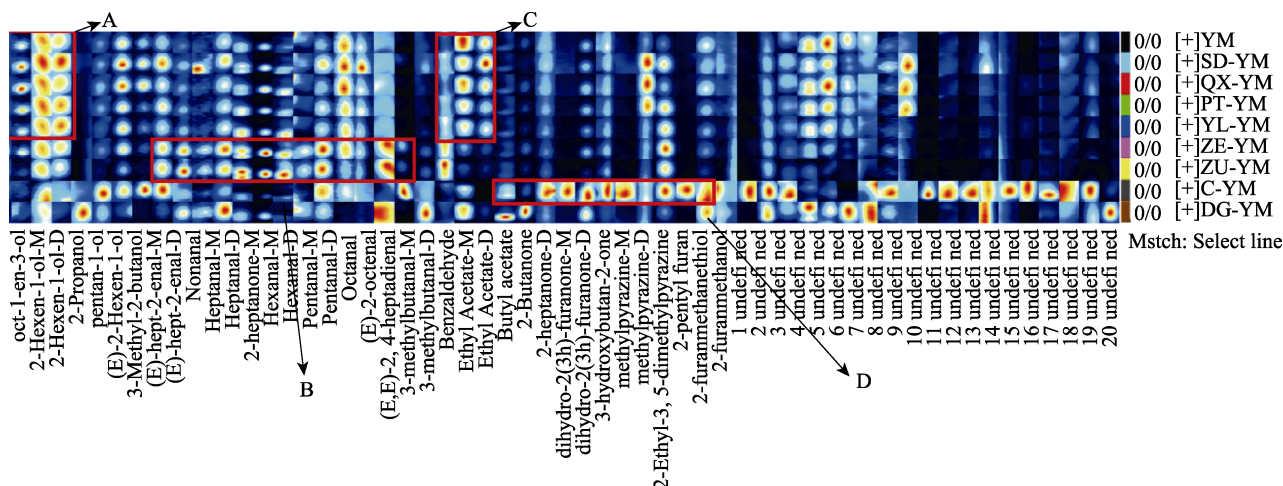


图 2 不同处理方式的玉米样品 Gallery Plot 指纹谱图

Fig.2 Gallery plot fingerprint of corn samples with different treatment methods

样品中的信号峰。从图中可以看出每种样品的完整挥发性有机物信息以及样品之间挥发性有机物的差异。不同样品的风味物质变化在 Gallery Plot 指纹谱图更加明显，每一列是不同样品中的一种风味物质，颜色深浅代表浓度高低，通过纵向的比较，不同风味物质浓度呈现一定的规律，非常直观。玉米中部分风味物质未准确定性，我们以阿拉伯数字顺序编号并放于最后，主要对已准确定性的 37 种挥发性成分进行分析，我们把这些物质按照醇、醛、酮等进行分类，相同种类的物质放在一起，以便分析不同加工过程中，样品中的风味物质变化规律。如图 2A 框所示，主要是鲜玉米中的 1-辛烯-3-醇、反-2-己烯醇、戊醇、2-丙醇等醇类物质，我们看到醇类物质在鲜玉米中浓度最高，且清洗、漂烫、预冷过程基本没有改变，经过蒸煮炒冻干等加工过程后浓度会降低。如图 2B

框所示，乙酸乙酯、乙酸丁酯等酯类物质的变化规律类似醇类物质，在鲜玉米中浓度最高，在速冻、清洗、漂烫、预冷等工艺的处理下浓度逐渐减小均有所降低，经蒸煮炒或冻干处理后浓度达到最低。如图 2C 框所示，辛醛、2-庚醛、壬醛、3-甲基丁醛等各种醛类物质在蒸和煮的过程中浓度会达到最大，说明蒸煮的过程中生成大量的醛类物质。如图 2D 框所示，2-庚酮、2-丁酮、3-羟基-2-丁酮、2-甲基-吡嗪、2-乙基-3,5-二甲基吡嗪、2-戊基呋喃等酮类物质、吡嗪及呋喃等杂环衍生物会在炒制过程中大量生成，浓度最高。

2.3 GC-MS 和 GC-IMS 两种不同检测方式下不同处理方式玉米样品风味物质对比

表 2, 3 分别为 GC-IMS 和 GC-MS 所分析出的 9 种不同处理方式下玉米的主要风味物质。

通过对比分析不同处理方式下玉米的共有风

表 2 GC-IMS 分析显示 9 种不同处理方式下的玉米挥发性物质峰面积

Table 2 Peak area of volatile compounds of corn under 9 different treating methods via GC-IMS

序号	化合物名称	玉米样品的峰面积								
		YM	SD-YM	QX-YM	PT-YM	YL-YM	ZE-YM	ZU-YM	C-YM	DG-YM
1	壬醛	148.20	242.33	158.20	188.92	159.13	198.84	211.19	252.47	78.54
2	2-戊基呋喃	55.13	123.00	70.43	128.47	133.00	165.05	133.45	156.23	57.86
3	1-辛烯-3-醇	122.13	138.63	157.04	154.20	109.89	82.55	61.23	106.93	86.40
4	反-2-庚烯醛	165.72	219.94	213.99	162.80	175.10	159.39	98.39	137.06	95.41
5	庚醛	13.72	36.70	13.99	14.52	13.11	20.72	23.83	14.31	31.87
6	2-庚酮	104.68	140.39	103.58	97.19	102.20	160.02	142.26	51.34	177.56
7	反-2-己烯醇	91.51	108.08	118.99	141.56	145.04	179.59	175.74	75.38	53.54
8	正己醛	795.78	902.33	987.90	860.63	769.48	1381.69	1269.50	288.37	846.06
9	戊醛	39.89	44.77	37.77	26.80	28.09	48.61	52.09	29.79	64.25
10	乙酸乙酯	3316.59	2234.81	2825.93	2059.39	1959.09	949.35	564.78	1301.99	2586.37
11	2-丁酮	162.74	157.99	173.06	146.86	142.23	141.20	159.62	291.03	324.19

续表 2

序号	化合物名称	玉米样品的峰面积								
		YM	SD-YM	QX-YM	PT-YM	YL-YM	ZE-YM	ZU-YM	C-YM	DG-YM
12	2-丙醇	140.88	185.54	157.14	175.78	173.87	187.60	201.02	214.40	116.45
13	异戊醛	33.43	29.30	52.71	37.07	39.29	103.97	123.47	59.64	72.68
14	3-羟基-2-丁酮	703.61	728.25	821.38	736.12	601.13	695.72	277.92	2501.31	1 457.64
15	3-甲基-2-丁醇	105.98	128.35	131.55	123.02	114.94	120.20	72.12	347.27	174.24
16	苯甲醛	70.48	107.68	53.27	43.59	51.64	77.52	74.66	87.62	255.03
17	糠醇	81.18	62.47	78.69	64.29	53.68	56.16	34.74	125.67	148.58
18	反-2-辛烯醛	61.18	66.12	61.70	50.83	52.51	63.05	37.45	38.58	11.54
19	反,反-2,4-庚二烯醛	93.60	153.64	96.23	107.34	96.73	112.21	100.62	44.19	22.87
20	正辛醛	34.76	54.23	38.38	44.91	46.11	68.77	67.31	42.77	39.49
21	γ -丁内酯	80.65	86.98	75.01	71.82	65.62	65.66	64.68	196.74	58.83
22	2-甲基吡嗪	143.23	132.74	129.85	121.03	113.51	102.36	87.35	258.66	57.44
23	正己醛	346.02	397.88	360.99	412.15	434.13	544.68	637.82	292.05	300.38
24	乙酸丁酯	128.98	176.36	128.36	91.30	101.30	34.37	24.53	2.04	33.09
25	1-戊醇	77.19	102.87	79.15	98.10	104.65	82.43	77.32	27.49	21.54
26	糠(基)硫醇	14.70	28.51	17.34	16.04	11.39	23.60	20.15	338.16	19.37
27	2-乙基-3,5-二甲基吡嗪	124.75	297.68	299.84	278.73	145.87	137.53	114.60	197.34	139.37

表 3 GC-MS 分析显示不同处理方式下的玉米主要风味物质的相对含量 (相对内标物 2-辛醇的浓度)
 Table 3 GC-MS analysis shows the relative content of main flavor compounds (relative internal standard 2-octanol concentration) in different treatment methods

序号	化合物名称	YM	DG-YM	C-YM	PT-YM	QX-YM	SD-YM	YL-YM	ZE-YM	ZU-YM	%
1	正己醛	8.30	—	14.44	6.61	5.80	4.26	12.39	17.51	14.08	
2	庚醛	—	—	—	—	—	—	—	1.47	—	
3	苯甲醛	—	50.12	24.41	—	—	—	—	6.92	—	
4	苯乙醛	—	—	8.83	—	1.29	0.96	1.57	2.33	1.66	
5	反-2-辛烯醛	3.48	—	3.19	2.12	2.12	1.22	3.29	4.60	—	
6	壬醛	16.63	76.01	37.31	17.53	19.14	11.19	25.09	43.05	35.61	
7	反式-2-壬醛	2.99	—	—	1.61	—	—	2.34	5.13	2.08	
8	反式-2-癸烯醛	—	—	—	—	—	—	—	1.19	0.49	
9	反式-2,4-癸二烯醛	—	—	—	—	—	—	—	11.68	—	
10	癸醛	4.34	13.36	10.40	6.69	17.43	6.34	3.69	11.47	9.14	
11	反,反-2,4-壬二烯醛	—	—	—	—	—	—	—	0.83	—	
12	橙花醇	—	—	—	—	—	—	—	5.00	—	
13	辛醇	15.18	—	7.64	7.53	10.18	6.50	10.47	—	6.79	
14	1-辛烯-3-醇	13.11	22.22	—	4.24	4.97	4.34	6.57	2.62	3.20	
15	柏木脑	—	—	—	0.41	—	—	1.08	0.51	0.17	
16	3-辛烯-2-酮	2.34	—	—	—	—	1.28	—	—	—	
17	2-壬酮	4.14	—	—	2.00	—	1.96	2.86	1.66	1.21	
18	甲基辛基甲酮	0.40	—	—	0.29	—	—	0.32	—	0.25	
19	alpha-紫罗酮	—	—	—	—	0.21	—	0.40	0.37	—	
20	BETA-二氢紫罗兰酮	0.27	—	—	0.37	0.17	—	0.40	0.31	0.27	
21	2,3-二氢-3,5-二羟基-6-甲基-4(H)-吡喃-4-酮	—	—	33.73	—	—	—	—	—	—	
22	4-(2,6,6-三甲基-2-环己烯-1-基)-3-丁烯-2-酮	0.36	—	0.42	0.28	—	0.16	—	—	0.27	
23	6,10-二甲基-5,9-十一双烯-2-酮	2.34	—	1.84	0.84	0.67	0.65	—	1.60	0.90	
24	苯乙酸甲酯	0.73	—	—	0.92	1.31	0.88	0.82	0.97	0.39	
25	月桂酸乙酯	—	—	1.01	—	0.45	—	—	—	0.45	
26	邻苯二甲酸二异丁酯	2.12	—	0.93	—	0.34	0.88	3.91	2.12	1.63	
27	14-甲基十五烷酸甲酯	—	—	1.16	0.62	—	0.12	—	—	0.41	
28	邻苯二甲酸二丁酯	—	0.66	2.75	2.80	0.96	—	4.89	3.66	2.41	
29	棕榈酸甲酯	—	—	—	—	0.26	—	1.42	0.60	—	
30	棕榈酸乙酯	1.89	0.19	1.17	2.04	1.13	0.84	2.97	2.63	2.70	

续表 3

序号	化合物名称	YM	DG-YM	C-YM	PT-YM	QX-YM	SD-YM	YL-YM	ZE-YM	ZU-YM
31	2,6-二叔丁基对甲酚	3.61	—	0.39	0.41	2.90	0.61	0.50	0.80	—
32	4-乙烯基愈创木酚	—	3.59	29.51	—	—	—	—	—	0.69
33	4-乙烯基-2-甲氧基苯酚	2.70	—	—	1.54	1.24	1.74	—	6.81	3.63
34	十一烷	5.94	18.84	11.22	9.97	11.15	8.34	9.09	—	6.07
35	十二烷	0.96	41.43	1.51	0.90	—	0.76	1.29	—	0.64
36	十四烷	0.71	—	1.40	0.79	0.83	0.71	0.66	—	0.76
37	(+)-柠檬烯	—	68.36	—	—	—	—	—	—	—
38	正十六烷	1.55	—	0.59	1.00	0.72	0.77	—	—	1.56
39	正十七烷	—	—	0.29	0.73	0.41	0.28	—	—	0.84
40	2,5-二甲基吡嗪	—	—	63.80	—	—	—	—	—	—
41	2-乙基-6-甲基吡嗪	—	—	10.95	—	—	—	—	—	—
42	2-甲基-6-乙基吡嗪	—	—	21.81	—	—	—	—	—	—
43	3-乙基-2,5-甲基吡嗪	—	19.88	127.66	—	—	—	—	—	—
44	2-乙酰基吡咯	—	—	19.26	—	—	—	—	—	—
45	2-戊基呋喃	19.32	—	33.43	10.97	9.68	11.75	14.04	11.15	10.04
46	间二甲苯	—	7.76	—	0.77	—	0.94	—	—	—
47	甲氧苯基酚	10.40	—	—	—	21.82	19.75	—	—	9.80

味物质，由图 3 韦恩图发现，GC-MS 和 GC-IMS 共同检测出的风味物质一般为 3~7 种，多为正己醛、1-辛烯-3-醇、辛醇、2-戊基噻唑等化合物，推测为玉米的主要风味物质。具体的：壬醛为九种不同处理方式下两种不同检测方法均共有的风味物质；除冻干玉米外，其他处理方式中均检测出正己醛、2-戊基呋喃、1-辛烯-3-醇；冻干、炒制、蒸玉米中两种检测方法共同检出的风味物质有苯甲醛；除冻干、炒制、蒸煮外，其他的处理方式中共同检测出反 2-辛烯醛，与本研究 GC-IMS 单独检测时醛类浓度逐渐降低的结论一致，即经蒸煮炒或冻干处理后浓度达到最低。

在 GC-MS 分析出的风味物质中，结合表 4 的 OAV 值，得出以下结论。

醛类中，以在两种检测方式检测重合性较高的正己醛为例，其在蒸煮、炒制中的 OAV 值明显高于其他处理方式，另外，所检测到 OAV 值较高的醛的种类也多于其他处理方式，在经蒸处理后，带有些许果子香气的庚醛、带有油脂气的反，反-2,4-壬二烯醛的 OAV 值较高，且出现在其他处理方式之外，可能是因为高温作用下发生美拉德反应，故被考虑认为是蒸玉米时产生的特征风味。蒸玉米和煮玉米对比发现，主要风味物质类似，但相比煮玉米，蒸玉米的风味物质更加丰富，从而更具研究价值。

醇类中，以 1-辛烯-3-醇为例，对照玉米中 OAV 值最高，蒸煮炒制等处理方式下明显减低。这可能来源于脂氧合酶对部分脂肪酸的氧化作

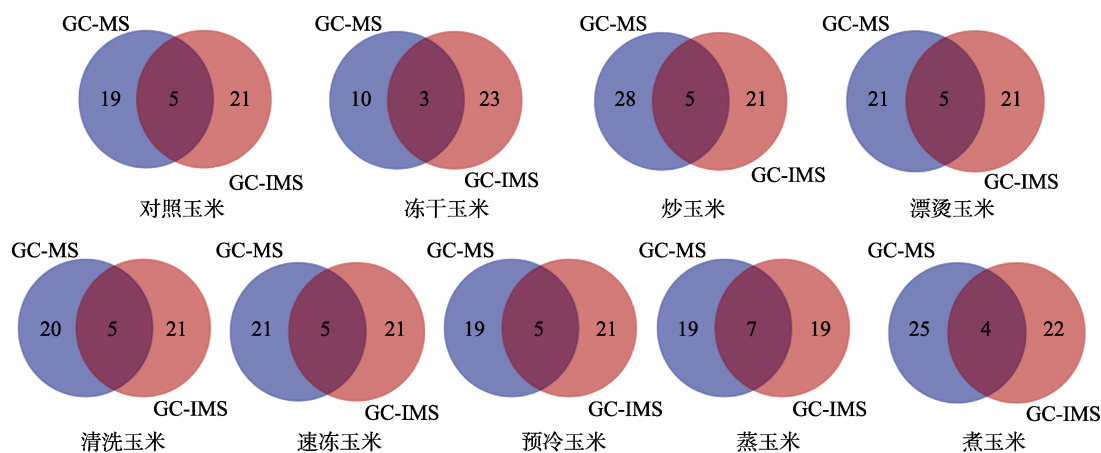


图 3 不同处理方式下 GC-MS 和 GC-IMS 的风味韦恩图

Fig.3 Venn diagram of flavor of GC-MS and gc-ims under different treatment methods

表 4 GC-MS 检测下 9 中不同处理方式的玉米 OAV 值大于 3 的风味物质
 Table 4 Flavor compounds with OAV value greater than 3 detected by GC-MS

化合物名称	对照玉米	冻干玉米	炒玉米	漂烫玉米	清洗玉米	速冻玉米	预冷玉米	蒸玉米	煮玉米
正己醛	368.75		641.59	293.9	257.72	189.15	550.55	778.1	625.93
庚醛								98.33	
苯甲醛		31.32	15.25					4.32	
苯乙醛			441.47		64.48	47.76	78.37	116.42	82.81
反-2-辛烯醛	232.08		212.98	141.33	141.14	81.21	219.51	306.94	
壬醛	83.13	380.02	186.53	87.66	95.71	55.94	125.43	215.26	178.05
反式-2-壬醛	7 465.89			4 020.67			5 859.61	12 827.82	5 204.53
反式-2,4-癸二烯醛								11 676.23	
癸醛	8 687.72	26 715.94	20 795.02	13 382.72	34 856.69	12 679.16	7 389.13	22 935.62	18 287.79
反,反-2,4-壬二烯醛								3307.21	
辛醇	30.36		15.27	15.06	20.36	12.99	20.94		13.58
1-辛烯-3-醇	2 621.89	443.58		847.17	993.37	868.95	1 314.36		640.64
柏木脑				164.12			432.76	203.64	66.49
3-辛烯-2-酮	69 913.92					38 220.16			
2,5-二甲基吡嗪			7 088.78						
2-戊基呋喃	643.9		1 114.44	365.83	322.65	391.5	467.84	371.8	334.52

用、醇脱氢酶对部分醛类物质的还原作用^[16]、酯类物质水解反应的结果^[17]。而具有生豆味、青草味特征的被认为是与碳原子数 6~8 的醇类正相关^[18]。漂烫处理后醇类物质减少与牛丽影等的研究结果一致^[19]。

对于 2,5-二甲基吡嗪、2-戊基呋喃等杂环化合物很明显在炒制玉米中含量最高,这可能是由于鲜玉米经过炒制处理,在加热过程中发生美拉德反应,形成大量的杂环类香味化合物^[20],很明显可被认为是炒玉米的关键呈香物质。均与本研究 GC-IMS 单独检测 9 种处理方式下醇类、醛类以及杂环类化合物变化趋势一致。

酯类物质是脂肪氧化产生的游离脂肪酸和醇的相互作用形成的,由于对香气贡献不大 OAV 值较小且差异不明显,邻苯二甲酸二异丁酯、14-

甲基十五烷酸甲酯、邻苯二甲酸二丁酯等虽然相对含量较少,但在不同种处理方式中均有发现,后续可考虑香气重组缺失实验对其香气贡献值进行更细致的评估,故未在表中列出。

综上,可以根据不同种化合物的总体含量初步对玉米的处理方式进行判断。

2.4 不同处理方式下玉米样品的香气轮廓图

对 9 种不同处理方式下的玉米中 OAV 值大于 100 的风味化合物结合其风味特征,采用七个感官描述词来评价其香气:花甜香、脂肪青香、蘑菇干草香、坚果烤土豆、蔬菜样豆青香、苦杏仁样、辛辣干柏油,在 OAV 值相差不大的情况下按照相对含量建立表 5,并绘制香气轮廓图。

从图 4 中可以看出,经不同方式处理的玉米与花甜香的香气方向比较接近,且均以花甜香和

表 5 九种玉米七个香气描述词的相对含量
 Table 5 Relative contents of seven aroma descriptors of nine Maize Species

样品/描述词	YM	DG-YM	C-YM	PT-YM	QX-YM	SD-YM	YL-YM	ZE-YM	ZU-YM
脂肪青香	26.46	0.00	25.26	17.87	7.92	11.96	28.49	41.22	23.45
花甜香	21.24	89.36	58.67	24.22	48.70	20.89	30.74	62.21	46.86
蘑菇干草香	15.45	22.22	0.00	4.24	4.97	5.62	6.57	0.00	3.20
蔬菜样豆青	19.32	0.00	1.51	10.97	4.97	11.75	2.97	11.15	10.04
苦杏仁样	0.00	50.12	24.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
坚果烤土豆	0.00	0.00	1.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
辛辣干柏油	0.00	0.00	0.00	0.00	0.28	0.26	15.11	0.51	0.17

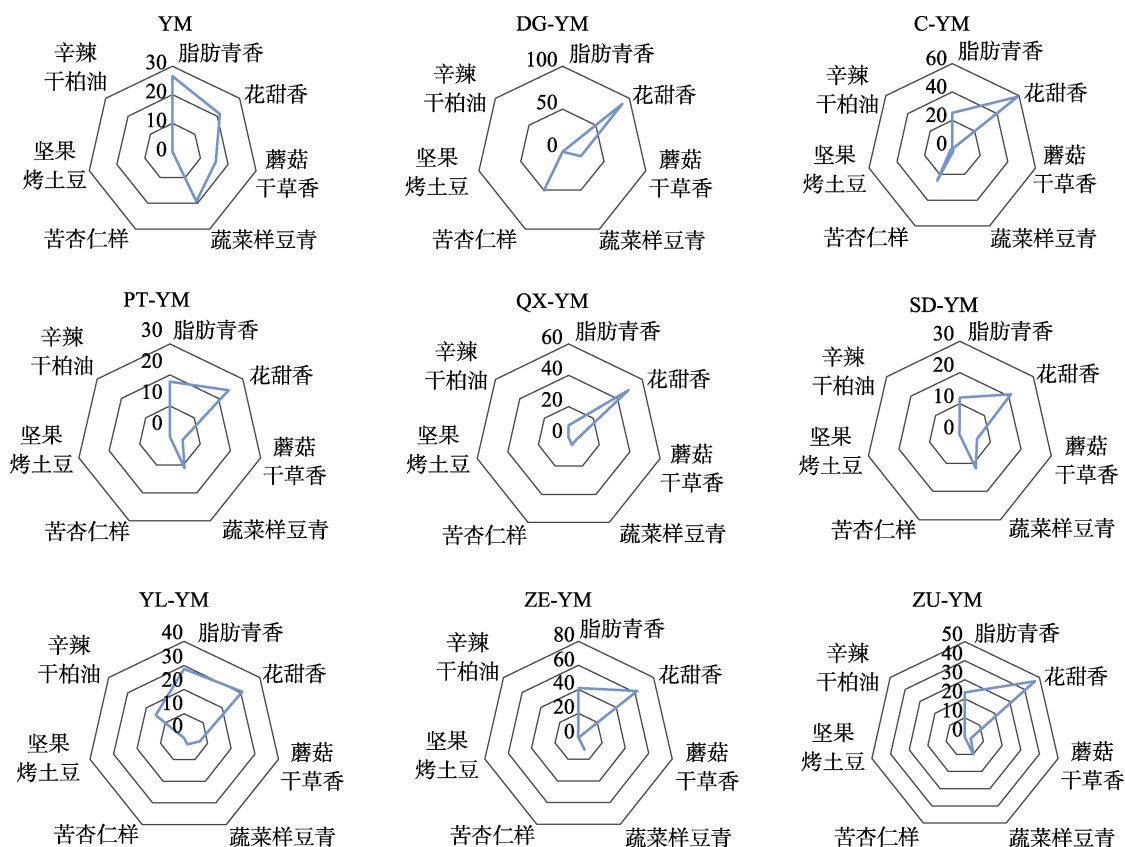


图 4 9 种玉米样品的香气轮廓图
Fig.4 Aroma profile of 9 corn samples

脂肪青香为主，在蒸玉米中体现的尤为明显。花甜香主要由壬醛、癸醛、苯乙醛等醛类化合物贡献，脂肪青香主要是因为正己醛、反-2-壬醛、辛醇等所带来。其中，对照玉米更多的是蔬菜样豆青香，考虑到主要是受 2-戊基呋喃的含量影响；冻干玉米和炒玉米中由苯甲醛带来的苦杏仁香气较明显，脂质氧化被认为是导致甜玉米冻藏期间产生不良风味的重要因素之一^[21]。吡嗪类物质对炒玉米中的坚果烤土豆的特征风味贡献较大；预冷玉米中各类风味较为均匀；煮玉米、蒸玉米和清洗玉米香气轮廓最为接近，速冻玉米和漂烫玉米最为接近，与指纹图谱所得结论基本一致。

3 结论

总体看来，在不同处理方式下玉米所含的主要风味物质是固定的，但对于不同处理方式的特征风味还是有对应的变化。在对速冻、清洗、漂染、预冷、蒸、煮、炒、冻干以及对照玉米通过 GC-MS 分析，共得到 152 种风味物质，其中不同处理方式下 OAV>100 关键呈香物质有正己醛、反-2-辛烯醛、壬醛、反式-2-壬醛、癸醛、1-辛烯-3-

醇、2-戊基呋喃等，GC-IMS 分析中，得到 26 种香气化合物。其中，壬醛、2-戊基呋喃、1-辛烯-3-醇等在采用 GC-MS 分析时也被证明是不同处理方式下玉米的主要风味物质。但也有一些成分在不同处理方式下均被 GC-IMS 捕捉到但在 GC-MS 中出现频率较低，比如庚醛仅在蒸玉米中、2-庚酮仅在清洗玉米中、苯甲醛仅在冻干玉米、炒玉米、蒸玉米中经 GC-MS 发现。而有些在 GC-MS 分析中含量较高且 OAV 值也较高的物质如正己醛、癸醛、等未被 GC-IMS 捕捉，可能是由于香气阈值较低。对于辛醇、棕榈酸乙酯等香气阈值高却未被分析出的可能是由于谱库建立不完整而显示“unidentified”。根据本研究中不同处理方式下关键呈香物质的差异，下一阶段可结合相关加工产生特异性风味的工艺进一步进行精细化研究，以寻找的最佳的加工玉米的方式。

参考文献：

- [1] 徐瑞. 鲜糯玉米冻藏期间品质变化研究[D]. 西南大学, 2019. XU R. Study on quality change of fresh waxy corn during frozen storage[D]. Southwest University, 2019.
- [2] 唐荣, 秦涛, 刘兴艳. 玉米饮料的研究现状与发展前景[J]. 食

- 品安全质量检测学报, 2018, 9(16): 4349-4355.
- TANG R, QIN T, LIU X Y. Research status and development prospect of corn beverage[J]. Journal of food safety and quality inspection, 2018, 9 (16): 4349-4355.
- [3] 梁秋华, 范杰杰, 马中义, 等. 承德市鲜食玉米优势品种调研[J]. 农业科技通讯, 2020(4): 97-100.
- LIANG Q H, FAN Q J, MA Z Y, et al. Investigation on dominant varieties of fresh corn in Chengde City[J]. Agricultural science and technology communication, 2020 (4): 97-100.
- [4] 赵迎春. 玉米须菊花复合饮料的研制[J]. 食品与发酵科技, 2018, 54(3): 21-25.
- ZHAO Y C. Development of corn silk chrysanthemum compound beverage[J]. Food and fermentation technology, 2018, 54(3): 21-25.
- [5] 徐瑞, 李洪军, 贺雅非. 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 of volatile components and principal component analysis of corn during frozen storage[J]. Food and fermentation industry, 2019, 45 (1): 210-218.
- [6] 康志敏, 张康逸, 朱笑鹏, 等. 不同加工工艺的青豆粉营养品质及风味变化分析[J]. 现代食品科技, 2019, 35(10): 205-212.
- KANG Z M, ZHANG K Y, ZHU X P, et al. Analysis of nutritional quality and flavor change of green soybean powder with different processing technology[J]. Modern food technology, 2019, 35(10): 205-212.
- [7] 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.
- ZHU N M, KE J H, YUAN L. Principal component analysis of volatile flavor compounds in different fresh sweet waxy corn[J]. Journal of Nuclear Agriculture, 2017, 31(11): 2175-2185.
- [8] WANG S, CHEN H, SUN B, et al. Recent progress in food flavor analysis using gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS)[J]. Food Chemistry, 2019, 315: 126-158.
- [9] 梁天一, 杨娟, 董浩, 等. 基于 GC-IMS 技术鉴别不同年份新会陈皮中的挥发性风味物质[J]. 中国调味品, 2020, 45(4): 168-173.
- LIANG T Y, YANG J, DONG H, et al. Identification of volatile flavor compounds in Xinhui tangerine peel from different years based on GC-IMS[J]. China Condiment, 2020, 45(4): 168-173.
- [10] 康晓风, 王珊, 刘半红, 等. 基于离子迁移谱的玉米霉变早期预警标示分子研究[A]. 中国食品科学技术学会. 中国食品科学技术学会第十七届年会摘要集[C]. 中国食品科学技术学会: 中国食品科学技术学会, 2020: 2.
- KANG X F, WANG S, LIU B H, et al. Molecular study on early warning marker of corn mildew based on ion mobility spectroscopy [A]. Chinese society of food science and technology. Abstracts of the 17th annual meeting of China Society of food science and technology[C]. China Society of food science and technology: China Society of food science and technology, 2020: 2.
- [11] 金文刚, 陈小华, 耿敬章, 等. 基于气相-离子迁移谱分析不同产地“汉中仙毫”气味指纹差异[J/OL]. 食品与发酵工业: 1-11[2020-11-14]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.025578>.
- JIN W G, CHEN X H, GENG J Z, et al. Analysis of odor fingerprints of "Hanzhong Xianhao" from different habitats based on gas chromatography ion mobility spectrometry[J/OL]. Food and fermentation industry: 1-11[2020-11-14]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.025578>.
- [12] 白璐. 金华火腿风味品质研究[D]. 渤海大学, 2020.
- BAI L. Food industry division[D]. Bohai University, 2020.
- [13] 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 Y H, SONG J F, LI D J, et al. Analysis of flavor compounds in quick frozen sweet corn by HS-SPME/GC-MS[J]. Food industry science and technology, 2010, 31(7): 95-98.
- [14] 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. Study on the changes of volatile components in corn during storage[J]. Modern food technology, 2015, 31(7): 316-325.
- [15] 朱力杰, 石月, 刘秀英, 等. 固相微萃取-气质联用分析玉米煎饼的挥发性风味物质[J]. 食品工业科技, 2016, 37(10): 102-105+122.
- ZHU L J, SHI Y, LIU X Y, et al. Analysis of volatile flavor compounds in corn pancakes by solid phase microextraction coupled with gas chromatography mass spectrometry[J]. Food industry technology, 2016, 37(10): 102-105+122.
- [16] FELLMAN J K, MILLER T W, MATTINSON D S, et al. Factors that influence biosynthesis of volatile flavor compounds in apple fruits[J]. Hort Science, 2000, 35(6): 1026-1033.
- [17] 潘冰燕, 鲁晓翔, 张鹏, 等. GC-MS 结合电子鼻分析 1-MCP 处理对线椒低温贮藏期挥发性物质的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(2): 238-243.
- PAN B Y, LU X X, ZHANG P, et al. Effect of 1-MCP Treatment on volatile compounds in Pepper during low temperature storage[J]. Food science, 2016, 37(2): 238-243.
- [18] 吴建平. 鲜食糯玉米香气形成中脂氧合酶(LOX)的作用研究[D]. 扬州大学, 2017.
- WU J P. Study on the role of Lipoygenase (LOX) in aroma formation of fresh waxy corn[D]. Yangzhou University, 2017.
- [19] 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 L Y, LIU F G, LI D J, et al. Effect of heat treatment on volatile flavor components of corn juice at milk ripening stage[J]. Acta nuclear agri, 2014, 28(3): 446-452.
- [20] 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/OL]. 食品工业科技: 1-7[2020-07-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1759.ts.20200402.1333.010.html>.
- KANG Z M, GUO D X, HE M J. Effects of different drying processes on the quality and flavor of fresh corn flour[J/OL]. Food industry science and technology: 1-7[2020-07-16] <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1759.ts.20200402.1333.010.html>.
- [21] 刘夫国. 甜玉米脂氧合酶的分离纯化及与风味的关系研究[D]. 南京师范大学, 2013.
- LIU F J. Isolation and purification of lipoygenase from sweet corn and its relationship with flavor[D]. Nanjing Normal University, 2013. 完
- 备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lspkj.ijournal.cn/ch/index.aspx>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。