

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2024.80437

# 杀菌条件、包装材料对真空包装甜玉米挥发性风味物质的影响

吴坤龙<sup>1</sup> 刘 标<sup>1</sup> 刘 辉<sup>2</sup> 李彦坡<sup>2,3</sup>

(1. 文成县现代农业与康养产业研究院, 浙江 温州 325300; 2. 温州市农业科学研究院, 浙江 温州 325006; 3. 温州市特色食品资源工程技术研究中心, 浙江 温州 325006)

**摘要:** [目的] 研究杀菌条件和包装材料对贮藏后甜玉米挥发性风味物质的影响, 并结合微生物情况和感官品质确定最佳处理条件。[方法] 将甜玉米于不同温度(121, 110 °C)下杀菌处理不同时间(10, 15 min), 经不同包装材料(尼龙/聚丙烯、聚酯/铝/聚乙烯)包装处理贮藏6个月后, 检测其菌落总数、总色差, 并采用顶空固相微萃取—气质联用技术, 深入分析挥发性风味物质的种类含量及变化情况。[结果] 从微生物安全情况看, 各处理组菌落总数均在食品安全范围内, 贮藏6个月后最高的菌落总数为3.54 lg(CFU/g), 出现在聚酯/铝/聚乙烯包装121 °C杀菌10 min处理组。从色差情况看, 聚酯/铝/聚乙烯包装组色差值均明显小于尼龙/聚丙烯包装组。从挥发性风味物质来看, 共检测出140种挥发性风味物质, 主要为其他类(主要为含氮、含硫类化合物、酚类等)、酯类、醇类, 不同处理组的挥发性风味物质种类差别较小, 基于香气活性值分析及主成分分析, 5-乙基-3-羟基-4-甲基-2(5H)-呋喃酮、2-甲氧基-3-异丁基吡嗪、呋喃酮、(E)-2-壬烯醛、反-4-癸烯醛、反-2, 顺6-壬二烯醇为甜玉米关键挥发性风味物质, 为风味呈现起主要作用。(E)-2-壬烯醛、反-2, 顺6-壬二烯醇、呋喃酮、苯甲醛为差异性挥发性风味物质, 是不同处理组风味差异的主要原因。从挥发性风味物质含量来看, 杀菌温度越高、处理时间越长, 挥发性风味物质含量越高, 聚酯/铝/聚乙烯包装组挥发性风味物质含量高于尼龙/聚丙烯包装组。[结论] 真空包装甜玉米的最优杀菌包装组合为聚酯/铝/聚乙烯包装, 121 °C杀菌15 min。

**关键词:** 甜玉米; 杀菌; 包装材料; 挥发性风味物质

## Effects of different sterilization conditions and packaging materials on volatile flavor substances of sweet corn in vacuum packaging

WU Kunlong<sup>1</sup> LIU Biao<sup>1</sup> LIU Hui<sup>2</sup> LI Yanpo<sup>2,3</sup>

(1. Wencheng Institution of Modern Agriculture and Healthcare Industry, Wenzhou, Zhejiang 325300, China; 2. Wenzhou Academy of Agriculture Science, Wenzhou, Zhejiang 325006, China; 3. Wenzhou Specialty Food Resources Engineering Technology Research Center, Wenzhou, Zhejiang 325006, China)

**Abstract:** [Objective] Study the effects of different sterilization conditions and different packaging materials on the volatile flavor compounds of sweet corn after storage, and also based on microbial conditions and sensory quality to determine the optimal treatment conditions. [Methods] The types and contents of volatile flavor compounds were analyzed by headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry after 6 months of sterilization treatment and packaging treatment of sweet corn with different packaging materials (PA/PP, PET/AL/PE). Detect the total number of bacterial colonies and total color difference. [Results] From the perspective of microbial safety, the total number of bacteria in each treatment group was within the food safety range. The highest total number of bacteria after six months of storage was 3.54 lg(CFU/g), which occurred in the PET/AL/PE group treated with 121 °C sterilization for 10 minutes. From the overall color difference situation, the color difference values of the polyester/aluminum/polyethylene packaging group were significantly lower than those of the nylon/polypropylene packaging group. From the perspective of volatile flavor compounds, total of 140

基金项目: 温州市科技计划项目(编号: N2023024); 温州市科技特派员团队项目(编号: X2023106)

通信作者: 李彦坡(1983—), 男, 温州市农业科学研究院副教授, 博士。E-mail: Lianpo2003@126.com

收稿日期: 2024-05-10 改回日期: 2024-09-27

volatile flavor substances were detected, mainly other types (mainly nitrogen, sulfur compounds, phenols, etc.), esters, alcohols, and there was little difference in the types of volatile flavor substances in different treatment groups. Based on aroma activity value analysis and principal component analysis, 5-ethyl-3-hydroxy-4-methyl-2(5H)-furanone, 2-methoxy-3-isobutylpyrazine, furanone, (*E*)-2-nonenal, trans-4-decenal, trans-2, and cis-6-nonenol were the key volatile flavor compounds of sweet corn, which played a major role in flavor. (*E*)-2-nonenal, trans-2, cis-6-nonenol, furanone, benzaldehyde were differentiated volatile flavor substances, which were the main cause of flavor differences among different treatment groups. From the perspective of volatile flavor substance content, the higher the sterilization temperature and the longer the sterilization time, the higher the volatile flavor substance content, and the volatile flavor substance content in PET/AL/PE packaging group was higher than that in PA/PP packaging group. [Conclusion] PET/AL/PE packaging, 121 °C sterilization for 15 min, is the best sterilization packaging combination of vacuum packaging sweet corn, suitable for promotion and application in processing and production.

**Keywords:** sweet corn; sterilization; packaging materials; volatile flavor substance

鲜食玉米具有比普通玉米更饱满的籽粒、更佳的风味以及更丰富的营养成分,是一种低脂肪、低热量、高纤维食品,备受消费者喜爱<sup>[1]</sup>。鲜食玉米主要品种有甜玉米、糯玉米、甜糯玉米等,甜玉米是鲜食玉米中的一种主要类别,具有显著的甜味特征,因其籽粒在乳熟期含有较高含量的可溶性糖而得名<sup>[2]</sup>。甜玉米作为一种鲜食作物,其保鲜问题直接影响其口感、营养价值和商业价值<sup>[3]</sup>。

真空包装是一种通过去除包装内的氧气含量来延长产品保质期的技术<sup>[4]</sup>。经去皮、清洗、烫漂、真空包装、高温杀菌处理后得到的甜玉米食用贮藏便捷、保质期长,是一种延长甜玉米保质期的重要方法<sup>[5]</sup>。甜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,不同的包装材料、灭菌工艺均会影响其挥发性风味物质的种类和含量<sup>[6]</sup>。

通过检测、鉴定包装贮藏后挥发性风味物质的变化,探讨真空包装对玉米醇类、酯类、酮类等风味化合物的影响,对维持产品风味稳定性,提升产品感官品质具有重要意义<sup>[7]</sup>。研究拟采用顶空固相微萃取—气质联用技术(HS-SPME-GC/MS)对不同包装、不同杀菌条件处理的真空包装甜玉米贮存6个月后的挥发性物质成分种类和含量变化进行比较,运用香气活性值(OAV)定位并挑选出决定真空包装甜玉米香味特性的核心呈香物质,确定各挥发性香气成分的香气活性值,从而鉴别出在感官品质中起关键作用的香气成分。采用主成分分析法(PCA)对筛选出的主要呈香物质进行综合性评估和解析,直观展现不同包装材质与杀菌工艺条件对真空包装甜玉米挥发性香气成分的综合影响程度。结合感官品质和微生物情况,得到最佳处理条件,为优化甜玉米真空包装开发利用提供依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与试剂

甜玉米:品种为金玉甜2号,温州市农业科学研究院;

氯化钠:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

2-辛醇:色谱纯,美国Merck公司;

尼龙/聚丙烯高温蒸煮袋(PA/PP透明)、聚酯/铝/聚乙烯高温蒸煮袋(PET/AL/PE铝箔):诸城市鼎泰包装有

限公司。

### 1.2 主要仪器与设备

真空包装机:DZ600-2S型,温州市惠泰机械有限公司;

全自动高温杀菌釜:DN700×700型,浙江伊瑞机械有限公司;

色差仪:CR10型,日本KONICA MINOLTA公司;

气相色谱—质谱联用仪:Agilent 8890-7000D型,美国Agilent公司;

固相微萃取装置:SPME Arrow型,瑞士CTC Analytics AG公司。

### 1.3 试验方法

1.3.1 样品处理 采收乳熟期的甜玉米,去除苞叶,切掉顶端过嫩部分和穗柄。将处理后的玉米穗90 °C烫漂10 min,冷水中冷却沥干,放入不同材质真空包装袋中,用真空包装机进行包装,真空包装条件为抽真空时间20~25 s,加热时间2~4 s,真空度0.08~0.15 MPa。高温高压灭菌处理,擦干水分,常温贮藏6个月后备用。

1.3.2 杀菌参数设置 包装方式及杀菌公式见表1。

表1 各组杀菌参数

Table 1 Sterilization parameters for each group

组别	包装材料	杀菌公式
A	PA/PP透明	10 min-15 min-20 min/110 °C
B	PET/AL/PE铝箔	10 min-15 min-20 min/110 °C
C	PA/PP透明	10 min-10 min-20 min/121 °C
D	PET/AL/PE铝箔	10 min-10 min-20 min/121 °C
E	PA/PP透明	10 min-15 min-20 min/121 °C
F	PET/AL/PE铝箔	10 min-15 min-20 min/121 °C

1.3.3 菌落总数测定 参照GB 4789.2—2016。

1.3.4 色差测定 参照潘梦垚<sup>[9]</sup>的方法,按式(1)计算色差值。

$$\Delta E = \left[ (L^* - L_0)^2 + (a^* - a_0)^2 + (b^* - b_0)^2 \right]^{1/2}, \quad (1)$$

式中:

$\Delta E$ ——色差值;

$L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ ——测试时产品的亮度、红度、黄度；

$L_0$ 、 $a_0$ 、 $b_0$ ——产品的初始亮度、红度、黄度。

### 1.3.5 挥发性风味物质测定

(1) 挥发性风味物质提取:将玉米样品从 $-80\text{ }^\circ\text{C}$ 冰箱取出,液氮研磨,涡旋混匀,每个样本称取约 500 mg 于顶空瓶中,分别加入饱和 NaCl 溶液,10  $\mu\text{L}$  内标溶液,采用全自动固相微萃取装置进行 HS-SPME 萃取,供 GC-MS 分析。

(2) 挥发性风味物质分析:HS-SPME 萃取条件为  $60\text{ }^\circ\text{C}$  恒温震荡 5 min,120  $\mu\text{m}$  DVB/CWR/PDMS 萃取头插入样品顶空瓶,顶空萃取 15 min, $250\text{ }^\circ\text{C}$  下解析 5 min,然后进行 GC-MS 分离鉴定。采样前萃取头于 Fiber Conditioning Station 中  $250\text{ }^\circ\text{C}$  老化 5 min。

(3) 色谱条件:参照文献[10]。

(4) 挥发性风味物质定性定量方法:采集到的挥发性成分通过 NIST Library 和 Wiley Library 谱图库进行定性分析。利用已知浓度内标物的峰面积与样品中各挥发性物质峰面积的比值按式(2)计算具体含量。

$$C_0 = \frac{V_s \times c_s}{m} \times \frac{A_0}{A_s} \quad (2)$$

式中:

$C_0$ ——挥发性风味物质的质量分数, $\mu\text{g/g}$ ;

$c_s$ ——内标物的质量浓度, $\text{mg/L}$ ;

$V_s$ ——内标物的体积, $\mu\text{L}$ ;

$m$ ——样品的质量, $\text{g}$ ;

$A_0$ ——待测组分的色谱峰面积;

$A_s$ ——内标物的色谱峰面积。

### 1.4 香气活性值(OAV)分析

OAV 值能够体现风味物质对整体风味形成的贡献程度,风味物质的气味阈值通过查阅文献[11]获得。按式(3)计算各风味物质的 OAV 值。

$$V_{\text{OAV}} = \frac{C_i}{O_T} \quad (3)$$

式中:

$V_{\text{OAV}}$ ——挥发性风味物质的 OAV 值;

$C_i$ ——挥发性风味物质的质量分数, $\mu\text{g/g}$ ;

$O_T$ ——挥发性风味物质的气味阈值, $\mu\text{g/kg}$ 。

### 1.5 数据处理

每个样品平行 3 次。采用 Excel 2019 进行数据分析,结果以平均值 $\pm$ 标准误差表示;采用 Origin 2021 软件绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 对菌落总数的影响

试验发现,不同处理的真空包装甜玉米贮藏 6 个月均未出现胀袋或泄漏情况,符合商业无菌的要求。由图 1 可知,不同处理组菌落总数差异较小,最高的为 D 组,菌

落总数为  $3.54\text{ lg}(\text{CFU/g})$ ,远低于行业规定的真空软包装甜玉米最大菌落总数( $10\text{ }000\text{ CFU/g}^{[12]}$ )。因此,不同处理组均能满足食品安全要求。

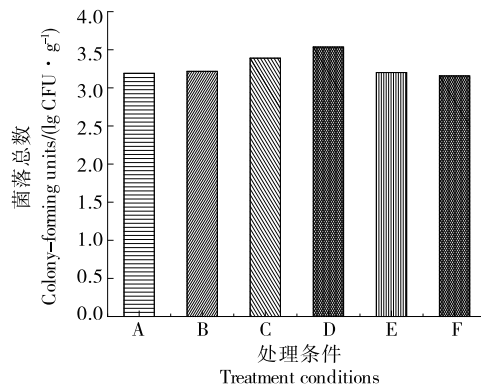


图 1 不同处理组菌落总数情况

Figure 1 Total colony number in different treatment groups

### 2.2 对色差值的影响

甜玉米籽粒的颜色主要由类黄酮、单宁和类胡萝卜素等色素共同决定,这些色素在高温高压处理过程中容易发生热降解,导致色泽改变。由图 2 可知,温度越高、杀菌时间越长,总色差值越大,色泽变化越明显,主要是由于随着杀菌程度的加大,类胡萝卜素等色素分解程度加剧<sup>[13]</sup>。从包装材料来看,铝箔包装组色差值明显小于透明包装组,主要是由于铝箔材料透光率低,阻隔性强,有效避免了褐变的发生<sup>[14]</sup>。因此,铝箔材料更适合作为鲜食玉米的真空包装。

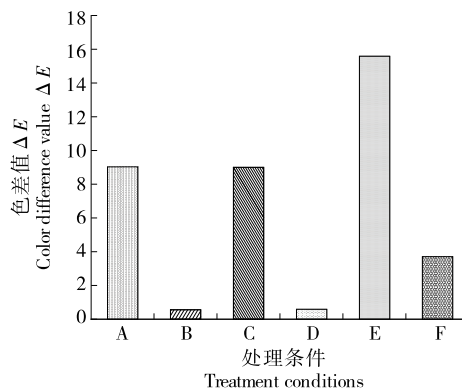


图 2 不同处理组色差值情况

Figure 2 Color difference value in different treatment groups

### 2.3 挥发性风味物质组成

2.3.1 挥发性风味成分种类及相对含量 由表 2 可知,各组样品中共检出 8 大类、140 种挥发性风味物质,其中,酮类 15 种、醛类 19 种、酯类 40 种、酸类 2 种、醇类 22 种、烯炔类 9 种、烷烃类 5 种、其他类(主要为含氮、含硫类化合物、酚类等)28 种。

表2 不同处理条件下真空包装甜玉米挥发性风味成分的种类及含量

Table 2 The contents of volatile compounds of vacuum packaged sweet corn under different treating methods

种类	名称	质量分数/( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )						
		A组	B组	C组	D组	E组	F组	
酮类	5-乙基-3-羟基-4-甲基-2(5H)-呋喃酮	2.49±0.06	2.54±0.13	2.18±0.15	2.21±0.06	2.52±0.07	2.61±0.20	
	呋喃酮	4.35±0.22	3.93±0.12	3.75±0.11	3.62±0.12	4.13±0.35	4.07±0.26	
	苯乙酮	0.03±0.00	0.01±0.00	0.02±0.00	0.02±0.00	0.01±0.00	0.01±0.00	
	6-乙基-5,6-二氢-2H-吡喃-2-酮	1.01±0.02	1.02±0.02	0.93±0.05	0.96±0.03	1.03±0.01	1.06±0.02	
	3-己酮	0.95±0.05	0.88±0.03	0.97±0.04	0.98±0.07	0.92±0.05	0.96±0.11	
	3-壬烯-5-酮	0.92±0.03	0.77±0.05	0.72±0.01	0.62±0.02	0.81±0.04	0.74±0.06	
	3-(羟甲基)-2-壬酮	0.42±0.01	0.43±0.01	0.37±0.02	0.39±0.02	0.43±0.01	0.46±0.01	
	1,3-二甲基-4-哌啶酮	0.37±0.02	0.35±0.02	0.33±0.01	0.31±0.02	0.37±0.02	0.35±0.04	
	四氢-6-甲基-2H-吡喃-2-酮	0.31±0.01	0.32±0.02	0.29±0.01	0.33±0.01	0.32±0.00	0.38±0.02	
	二氢-3-甲基-2,5-呋喃二酮	0.26±0.01	0.23±0.01	0.23±0.01	0.23±0.01	0.24±0.01	0.25±0.02	
	二氢-2-甲基-3(2H)-呋喃酮	0.24±0.01	0.24±0.02	0.18±0.02	0.16±0.02	0.22±0.01	0.17±0.01	
	6-戊基-2H-吡喃-2-酮	0.12±0.02	0.11±0.01	0.10±0.02	0.12±0.01	0.15±0.02	0.18±0.02	
	1,3-二氢-2H-吡喃-2-酮	0.09±0.01	0.13±0.03	0.09±0.03	0.13±0.01	0.12±0.02	0.16±0.04	
	4-十一烷酮	0.03±0.00	0.03±0.00	0.05±0.00	0.05±0.01	0.03±0.00	0.04±0.00	
	2,2,5-三甲基-3,4-己二酮	0.02±0.00	0.02±0.00	0.02±0.00	0.02±0.00	0.02±0.00	0.03±0.00	
	醛类	(E)-2-壬烯醛	2.17±0.10	2.20±0.08	1.95±0.07	2.05±0.08	2.25±0.05	2.41±0.20
		苯甲醛	1.01±0.03	0.10±0.01	0.64±0.01	0.37±0.01	0.19±0.02	0.08±0.01
		反-4-癸烯醛	0.05±0.00	0.05±0.00	0.04±0.00	0.05±0.00	0.05±0.00	0.06±0.00
		(E,E)-2,6-壬二醛	0.29±0.00	0.31±0.02	0.28±0.02	0.30±0.02	0.30±0.01	0.30±0.01
香茅醛		0.22±0.00	0.23±0.01	0.22±0.01	0.23±0.00	0.23±0.01	0.24±0.03	
E-2-辛烯醛		0.07±0.00	0.06±0.00	0.06±0.00	0.06±0.00	0.06±0.00	0.07±0.01	
顺式-柠檬醛		0.69±0.05	0.75±0.03	0.63±0.06	0.76±0.00	0.72±0.04	0.82±0.08	
己醛		0.09±0.01	0.08±0.01	0.10±0.01	0.10±0.01	0.07±0.01	0.08±0.01	
十一碳烯醛		0.01±0.00	0.01±0.00	0.02±0.00	0.02±0.00	0.00±0.00	0.01±0.00	
2,6-二甲基-5-庚烯醛		11.82±0.41	10.74±0.39	10.52±0.41	10.73±0.51	10.63±0.53	10.95±0.78	
叶醇缩醛		0.33±0.01	0.34±0.01	0.28±0.02	0.32±0.01	0.34±0.01	0.36±0.01	
环己烷甲醛		0.19±0.01	0.16±0.01	0.15±0.00	0.16±0.01	0.17±0.01	0.17±0.01	
3,4-二甲氧基苯甲醛		0.18±0.01	0.24±0.05	0.19±0.05	0.20±0.04	0.25±0.06	0.33±0.08	
可可醛		0.10±0.00	0.11±0.01	0.10±0.02	0.11±0.03	0.11±0.00	0.10±0.01	
4-甲氧基苯甲醛		0.09±0.00	0.10±0.01	0.09±0.01	0.10±0.00	0.10±0.01	0.12±0.01	
低聚乙醛		0.08±0.01	0.08±0.00	0.08±0.00	0.09±0.00	0.09±0.00	0.10±0.01	
2-乙基-己醛		0.03±0.00	0.03±0.00	0.02±0.00	0.03±0.00	0.03±0.00	0.04±0.00	
$\alpha$ -亚乙基-苯乙醛		0.02±0.00	0.00±0.00	0.05±0.01	0.02±0.01	0.01±0.00	0.00±0.00	
$\alpha$ ,4-二甲基-3-环己烯-1-乙醛		0.01±0.00	0.04±0.02	0.02±0.01	0.03±0.01	0.06±0.01	0.08±0.01	
酯类		乙酸庚酯	0.05±0.00	0.07±0.02	0.06±0.01	0.06±0.01	0.06±0.00	0.06±0.01
	己酸异戊酯	0.56±0.02	0.62±0.05	0.52±0.05	0.61±0.04	0.61±0.03	0.71±0.05	
	甲酸辛酯	0.09±0.01	0.10±0.03	0.09±0.03	0.09±0.02	0.09±0.00	0.09±0.01	
	异丁酸庚酯	0.43±0.01	0.49±0.04	0.40±0.03	0.47±0.02	0.47±0.03	0.56±0.05	
	乙酸异丁酯	1.79±0.06	1.61±0.12	1.71±0.04	1.58±0.05	1.67±0.05	1.64±0.18	
	丙酸己酯	0.14±0.01	0.18±0.04	0.17±0.04	0.17±0.02	0.18±0.01	0.15±0.01	
	庚酸乙酯	0.03±0.00	0.03±0.00	0.02±0.00	0.03±0.00	0.03±0.00	0.03±0.00	

续表 2

种类	名称	质量分数/( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )					
		A组	B组	C组	D组	E组	F组
酯类	苯甲酸甲酯	0.05±0.00	0.06±0.00	0.05±0.00	0.06±0.00	0.06±0.00	0.07±0.01
	乙酸芳樟酯	0.83±0.03	0.94±0.08	0.78±0.07	0.91±0.06	0.91±0.04	1.09±0.08
	异丁酸 2-甲基丁酯	0.04±0.00	0.03±0.00	0.04±0.00	0.03±0.04	0.05±0.01	0.04±0.00
	丁酸丁酯	0.02±0.00	0.01±0.00	0.02±0.00	0.02±0.00	0.02±0.00	0.01±0.00
	苯乙酸乙酯	0.09±0.00	0.10±0.01	0.08±0.01	0.11±0.01	0.10±0.00	0.11±0.01
	己酸丁酯	0.08±0.00	0.08±0.00	0.08±0.01	0.08±0.00	0.08±0.00	0.09±0.01
	十一酸乙酯	0.04±0.00	0.05±0.01	0.04±0.01	0.05±0.01	0.05±0.01	0.07±0.01
	甲酸异茨酯	4.51±0.16	5.09±0.45	4.22±0.37	4.78±0.28	4.98±0.22	5.93±0.48
	3-甲基硫羧丁酸-S-(1-甲基丙基)酯	2.32±0.10	2.50±0.14	1.84±0.12	1.92±0.08	2.52±0.05	2.88±0.24
	(E)-2-甲基-2-丁酸-2-甲丙酯	2.16±0.07	2.10±0.09	1.78±0.12	1.95±0.11	2.10±0.12	2.50±0.24
	脱氢戊二酸内酯	2.00±0.03	2.03±0.04	1.86±0.08	1.93±0.07	2.03±0.06	2.10±0.15
	正戊酸-(Z)-3-己烯酯	1.47±0.07	1.58±0.05	1.38±0.16	1.47±0.11	1.61±0.04	1.84±0.15
	戊酸糠酯	0.74±0.03	0.82±0.07	0.69±0.05	0.81±0.04	0.80±0.05	0.95±0.08
	异丁酸香茅酯	0.53±0.05	0.70±0.14	0.53±0.14	0.77±0.12	0.69±0.11	0.90±0.18
	邻苯二甲酸二甲酯	0.37±0.03	0.65±0.19	0.10±0.03	0.28±0.04	0.58±0.23	0.70±0.15
	(Z)-2-甲基-丙酸-3,7-二甲基-2,6-亚辛基酯	0.37±0.04	0.49±0.10	0.38±0.10	0.49±0.08	0.47±0.07	0.61±0.12
	2,6-二甲基庚烷-4-乙酸酯	0.28±0.01	0.25±0.02	0.24±0.02	0.23±0.03	0.28±0.02	0.26±0.01
	2-苯氧乙基异丁酸酯	0.27±0.03	0.37±0.07	0.28±0.08	0.39±0.09	0.37±0.07	0.48±0.11
	$\epsilon$ -己内酯	0.26±0.01	0.23±0.00	0.23±0.00	0.24±0.08	0.25±0.01	0.26±0.02
	2-甲基丁基己酸酯	0.23±0.01	0.25±0.02	0.20±0.02	0.22±0.01	0.24±0.01	0.28±0.02
	(E)-2-甲基丙烯酸-2-甲基丁-2-烯-1-基酯	0.16±0.01	0.13±0.01	0.14±0.00	0.15±0.01	0.13±0.01	0.14±0.03
	己二酸二甲酯	0.15±0.01	0.16±0.01	0.14±0.01	0.16±0.01	0.16±0.01	0.19±0.01
	2-呋喃丙酸乙酯	0.10±0.00	0.11±0.02	0.10±0.01	0.10±0.01	0.11±0.01	0.13±0.01
	二丁酯-1-甲基乙烯基酯-磷酸	0.09±0.01	0.12±0.02	0.10±0.03	0.13±0.02	0.12±0.02	0.16±0.03
	2-甲基丁酸 3-甲基丁酯	0.08±0.00	0.09±0.02	0.08±0.01	0.09±0.01	0.08±0.01	0.09±0.01
	二氢茉莉酮酸甲酯	0.06±0.02	0.10±0.03	0.06±0.02	0.10±0.02	0.09±0.03	0.12±0.02
	顺-3-己烯基丁酸酯	0.06±0.00	0.06±0.01	0.05±0.00	0.06±0.00	0.06±0.00	0.06±0.00
	辛酸戊酯	0.06±0.01	0.07±0.01	0.06±0.01	0.08±0.02	0.07±0.01	0.09±0.02
	丁酸异戊酯	0.05±0.00	0.04±0.00	0.05±0.00	0.04±0.00	0.06±0.01	0.05±0.00
	[1S-(1 $\alpha$ ,5 $\alpha$ ,6 $\beta$ )]-2,7,7-甲基-乙酸酯-双环[3.1.1]庚-2-烯-6-醇	0.04±0.00	0.05±0.01	0.04±0.00	0.05±0.00	0.05±0.00	0.06±0.01
	(5-甲基-2-丙-1-烯-基-2-己烯-4-基)己酸酯	0.04±0.01	0.06±0.02	0.04±0.01	0.05±0.01	0.06±0.02	0.07±0.01
	苯甲酸异丙酯	0.03±0.00	0.07±0.01	0.02±0.00	0.07±0.00	0.03±0.01	0.11±0.01
	丙酸 2,2-二甲基戊酯	0.03±0.00	0.02±0.00	0.02±0.00	0.02±0.00	0.03±0.00	0.03±0.00
酸类	10-十一烯酸	0.33±0.03	0.44±0.08	0.34±0.08	0.41±0.05	0.43±0.06	0.55±0.11
	2-甲基-戊酸	0.15±0.01	0.06±0.01	0.11±0.00	0.07±0.00	0.07±0.01	0.06±0.00
醇类	反-2,顺 6-二烯醇	0.86±0.03	0.93±0.07	0.71±0.05	0.79±0.04	0.92±0.03	1.11±0.08
	脱氢芳樟醇	1.22±0.08	1.26±0.09	1.09±0.04	1.22±0.03	1.27±0.07	1.39±0.04
	(-)-顺-香芹醇	12.19±0.58	13.86±0.81	11.17±0.96	12.98±0.88	13.23±0.62	15.69±1.24
	壬醇	1.35±0.06	1.52±0.14	1.13±0.08	1.41±0.05	1.46±0.04	1.75±0.12
	(E,Z)-3,6-壬二烯-1-醇	0.14±0.00	0.16±0.01	0.14±0.01	0.15±0.01	0.16±0.00	0.18±0.01
	1-辛醇	0.13±0.01	0.12±0.00	0.11±0.00	0.12±0.01	0.13±0.01	0.12±0.01

续表2

种类	名称	质量分数/( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )						
		A组	B组	C组	D组	E组	F组	
醇类	2-壬醇	0.02±0.00	0.03±0.00	0.02±0.01	0.02±0.01	0.02±0.00	0.02±0.00	
	(R)-2-己醇	2.34±0.11	2.14±0.20	2.42±0.14	2.29±0.11	2.36±0.01	2.31±0.26	
	(E)-2-庚-1-醇	0.08±0.00	0.07±0.00	0.03±0.00	0.04±0.01	0.04±0.00	0.06±0.00	
	$\alpha$ -松油醇	0.02±0.00	0.02±0.00	0.02±0.00	0.02±0.00	0.02±0.00	0.02±0.00	
	苯甲醇	0.14±0.01	0.11±0.01	0.11±0.01	0.09±0.01	0.12±0.01	0.11±0.02	
	1-戊醇	0.20±0.01	0.20±0.01	0.19±0.01	0.21±0.01	0.18±0.00	0.23±0.04	
	7-甲基-3-亚甲基-6-辛基-1-醇	3.25±0.06	3.41±0.13	3.02±0.24	3.22±0.15	3.24±0.07	3.67±0.15	
	4-苯基-1-丁烯-4-醇	2.44±0.16	2.74±0.25	2.24±0.20	2.53±0.18	2.65±0.11	3.20±0.26	
	(E)-2,6-二甲基辛基-5,7-二烯-2-醇	1.64±0.01	1.69±0.04	1.50±0.08	1.53±0.07	1.69±0.06	1.77±0.09	
	反式对-薄荷-1-醇	1.63±0.08	1.78±0.05	1.32±0.12	1.58±0.08	1.74±0.04	2.03±0.17	
	2,2,6-三甲基-6-乙烯基四氢-2H-咪喃-3-醇	1.11±0.05	1.21±0.10	0.92±0.05	1.19±0.03	1.18±0.08	1.48±0.13	
	(Z)-3-辛烯-1-醇	0.27±0.01	0.23±0.01	0.23±0.01	0.20±0.01	0.25±0.01	0.23±0.03	
	(Z)-3-壬基-1-醇	0.20±0.00	0.21±0.01	0.18±0.01	0.20±0.01	0.21±0.01	0.22±0.02	
	1-壬烯-4-醇	0.10±0.00	0.10±0.02	0.09±0.01	0.10±0.01	0.08±0.01	0.10±0.01	
	4-苯基-2-丁醇	0.03±0.00	0.04±0.01	0.03±0.00	0.04±0.00	0.04±0.00	0.05±0.00	
	$\alpha$ -甲基-苯甲醇	0.03±0.00	0.03±0.00	0.03±0.00	0.03±0.00	0.03±0.00	0.03±0.00	
	烯烴类	(+)-柠檬烯	0.02±0.00	0.02±0.00	0.02±0.00	0.02±0.00	0.02±0.00	0.02±0.00
		$\alpha$ -蒎烯	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00
		1,10-十一碳二烯	1.59±0.05	1.66±0.03	1.45±0.09	1.52±0.04	1.72±0.02	1.91±0.05
		1-十二碳烯	0.99±0.02	1.08±0.05	0.94±0.10	1.04±0.06	1.08±0.05	1.17±0.03
$\alpha$ -衣兰油烯		0.89±0.09	1.20±0.23	0.91±0.24	1.22±0.15	1.18±0.21	1.55±0.33	
$\alpha$ -氧化蒎烯		0.85±0.03	0.86±0.01	0.75±0.04	0.79±0.03	0.88±0.01	0.95±0.05	
$\beta$ -蒎烯		0.53±0.06	0.70±0.13	0.54±0.13	0.68±0.11	0.68±0.10	0.87±0.16	
9-甲基-1-十一碳烯		0.22±0.01	0.24±0.01	0.21±0.01	0.23±0.01	0.24±0.01	0.27±0.03	
$\alpha$ -石竹烯		0.21±0.03	0.20±0.04	0.17±0.02	0.23±0.02	0.26±0.01	0.33±0.03	
烷烴类		2-甲基-十一烷	1.22±0.03	1.30±0.10	1.01±0.04	1.16±0.06	1.32±0.03	1.59±0.11
	4,4-二甲基-十一烷	0.98±0.06	1.06±0.05	0.87±0.07	0.99±0.03	1.02±0.04	1.19±0.10	
	2,3,3-三甲基-辛烷	0.53±0.01	0.48±0.01	0.47±0.01	0.49±0.01	0.50±0.02	0.51±0.05	
	5-乙基-5-甲基-癸烷	0.31±0.02	0.35±0.01	0.30±0.03	0.34±0.02	0.34±0.02	0.39±0.03	
	5-甲基-十二烷	0.22±0.01	0.24±0.03	0.20±0.02	0.22±0.03	0.27±0.01	0.30±0.02	
其他	2-甲氧基-3-异丁基吡嗪	21.69±0.47	23.32±1.20	19.66±1.53	22.34±1.81	22.64±1.67	27.54±2.70	
	苯甲硫醇	0.07±0.00	0.08±0.00	0.07±0.00	0.08±0.00	0.08±0.00	0.10±0.01	
	2-噻吩甲基硫醇	0.74±0.01	0.72±0.04	0.63±0.03	0.68±0.02	0.74±0.01	0.79±0.05	
	2-乙氧基-3-甲基吡嗪	0.53±0.02	0.49±0.01	0.47±0.00	0.51±0.01	0.49±0.02	0.53±0.03	
	萘	3.20±0.14	3.38±0.20	3.12±0.25	3.07±0.18	2.26±0.24	2.16±0.20	
	2-戊基呋喃	0.22±0.01	0.10±0.01	0.25±0.01	0.11±0.01	0.36±0.02	0.10±0.01	
	4-甲基噻唑	0.86±0.05	0.78±0.06	0.59±0.08	0.71±0.07	0.73±0.08	0.52±0.06	
	异丁香酚	0.04±0.00	0.08±0.02	0.01±0.00	0.03±0.00	0.06±0.02	0.08±0.02	
	2-乙酰基噻唑	0.01±0.00	0.01±0.00	0.01±0.00	0.00±0.00	0.03±0.00	0.01±0.00	
	2-乙酰吡咯	0.06±0.00	0.05±0.00	0.05±0.00	0.06±0.01	0.06±0.01	0.06±0.01	
	苯酚	2.48±0.90	1.94±0.80	2.43±0.11	1.99±0.42	1.81±0.51	2.17±0.72	
	间二甲苯	0.02±0.00	0.01±0.00	0.01±0.00	0.01±0.00	0.02±0.00	0.02±0.00	

续表 2

种类	名称	质量分数/( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )					
		A组	B组	C组	D组	E组	F组
其他	邻二甲苯	0.01±0.00	0.01±0.00	0.01±0.00	0.01±0.00	0.01±0.00	0.01±0.00
	2-己酰基呋喃	5.35±0.29	5.98±0.61	4.93±0.44	5.83±0.39	5.88±0.20	7.04±0.63
	(甲硫基)-苯	1.35±0.09	1.33±0.07	1.17±0.11	1.28±0.09	1.37±0.03	1.64±0.16
	4,5-二甲基-1,3-苯二醇	1.26±0.11	1.73±0.35	1.35±0.38	1.92±0.29	1.82±0.40	2.40±0.60
	2-戊基噻吩	0.78±0.03	0.80±0.05	0.73±0.02	0.78±0.03	0.78±0.02	0.84±0.08
	2-乙酰基-5-甲基呋喃	0.37±0.06	0.27±0.05	0.30±0.01	0.32±0.02	0.30±0.05	0.32±0.08
	3-乙酰基-2-氧代-1,3-恶唑烷	0.35±0.02	0.37±0.02	0.34±0.02	0.30±0.03	0.25±0.03	0.24±0.02
	2-吡啶甲胺	0.31±0.01	0.28±0.01	0.28±0.01	0.27±0.01	0.30±0.01	0.29±0.01
	1,2,4,5-四嗪-3-胺	0.29±0.01	0.27±0.02	0.27±0.01	0.25±0.01	0.28±0.02	0.25±0.01
	1,2-二甲氧基-4-(1-丙烯基)-苯	0.24±0.01	0.32±0.06	0.28±0.08	0.31±0.05	0.31±0.08	0.42±0.13
	1-甲基-萘	0.22±0.01	0.01±0.00	0.14±0.04	0.01±0.00	0.57±0.07	0.01±0.00
	3-乙酰基-2,5-二甲基呋喃	0.19±0.01	0.18±0.00	0.16±0.01	0.16±0.01	0.20±0.01	0.20±0.01
	2,3-二甲基-5-(1-甲基丙基)-吡嗪	0.12±0.01	0.14±0.02	0.11±0.01	0.13±0.01	0.13±0.01	0.16±0.02
	4-甲基-2-硝基-苯酚	0.11±0.01	0.11±0.01	0.10±0.02	0.11±0.01	0.11±0.01	0.12±0.02
	2-甲氧基-4-乙基苯酚	0.09±0.00	0.49±0.18	0.06±0.01	0.42±0.08	0.70±0.10	1.10±0.23
	2-甲基-3-(甲硫基)-吡嗪	0.03±0.00	0.03±0.00	0.03±0.00	0.03±0.00	0.04±0.00	0.04±0.00

各组挥发性成分含量较多的为2-甲氧基-3-异丁基吡嗪,其次是顺-香芹醇,此外,2,6-二甲基-5-庚烯醛、2-己酰基呋喃、甲酸异苄酯、呋喃酮等含量也较高。

由图3可知,各样品中检出的挥发性风味物质种类基本一致,但相对含量差异较大。6组样品中挥发性物质相对含量由高到低依次为F>B>E>A>D>C,含量最高的为F组,挥发性物质总质量分数为150.16  $\mu\text{g}/\text{g}$ 。

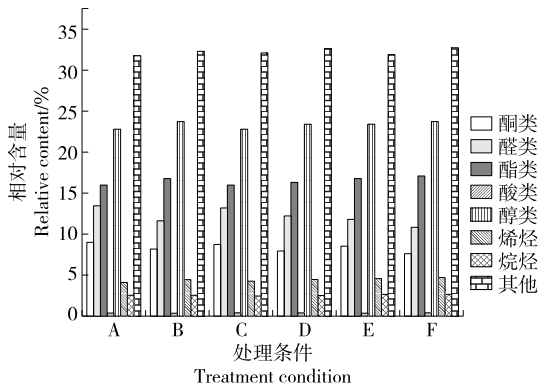


图3 各化合物种类相对含量变化

Figure 3 Relative content and quantity of various volatile substances in samples

2.3.2 醛、酮类化合物 醛类物质主要来源于玉米中氨基酸的 Strecker 降解及多不饱和脂肪酸的双键氧化<sup>[15]</sup>。各组醛类化合物共 19 种,相对含量分别为 13.50%, 11.66%, 13.21%, 12.29%, 11.82%, 10.87%, 其中 2,6-二甲

基-5-庚烯醛、(E,E)-2,6-壬二醛、E-2-壬烯醛、香茅醛、苯甲醛相对含量较高,多为相对分子质量较大的醛类。酮类物质主要来源于美拉德反应中氨基酸经系列反应产生和脂类物质的氧化<sup>[16]</sup>。酮类化合物共 15 种,相对含量分别为 8.98%, 8.18%, 8.74%, 7.95%, 8.54%, 7.62%, 含量较高的分别为呋喃酮、5-乙基-3-羟基-4-甲基-2(5H)-呋喃酮、6-乙基-5,6-二氢-2H-吡喃-2-酮和 3-己酮。

由图4可知,从整体风味呈现来看,醛酮类化合物主要赋予了甜玉米甜香、果香风味,2,6-二甲基-5-庚烯醛融合了青草味、水果味以及黄瓜香味,呈现出丰富多元的香气特质<sup>[17]</sup>,(E,E)-2,6-壬二醛具有青香、甜瓜香,苯甲醛具有杏仁香和樱桃香,3,4-二甲氧基苯甲醛呈甜香和草香气<sup>[18]</sup>。酮类化合物中,呋喃酮具有果香、甜香、草莓香气,5-乙基-3-羟基-4-甲基-2(5H)-呋喃酮具有甜香、果香及焦糖香气,3-己酮具有甜香、果香、蜡香气味<sup>[19]</sup>,且醛酮类化合物阈值普遍较低,对甜玉米整体风味的形成贡献较大。

从变化规律来看,杀菌温度、杀菌时间与醛酮类化合物相对含量占比呈正相关,杀菌温度主要使美拉德反应速度升高、杀菌时间加长,甜玉米内美拉德反应程度加深,使醛类和酮类物质的相对含量均有增加,与张杰等<sup>[20]</sup>的研究结论一致。透明包装组的醛类和酮类化合物含量占比高于铝箔包装组,可能是透明包装的透光率高,贮藏过程中甜玉米中的脂类物质发生光氧化产生醛、酮等挥发性物质<sup>[21]</sup>。

2.3.3 醇、酯类化合物 甜玉米中的醇类化合物可能来

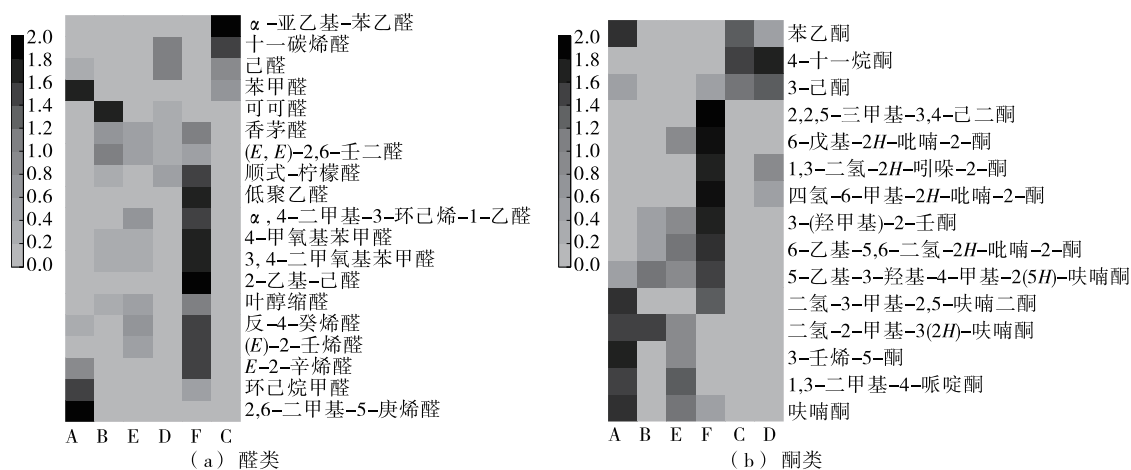


图4 醛类、酮类挥发性风味物质的相对含量热图

Figure 4 Heat map of relative content of aldehydes and ketones volatile flavor substances

源于贮藏过程中酯类物质的水解<sup>[22]</sup>。各组中醇类化合物共22种,相对含量分别为22.77%, 23.71%, 22.85%, 23.45%, 23.39%, 23.82%,含量较高的为(-)-顺-香芹醇、7-甲基-3-亚甲基-6-辛基-1-醇、4-苯基-1-丁烯-4-醇、(R)-2-己醇等,多为C<sub>8</sub>及以上醇类。甜玉米中酯类物质形成过程较为复杂,可能是由玉米中脂肪氧化产生的游离脂肪酸和醇的相互作用形成的<sup>[23]</sup>。酯类化合物共40种,相对含量分别为16.00%, 16.80%, 16.00%, 16.33%, 16.83%, 17.12%,其中含量较高的为甲酸异茨酯、(E)-2-甲基-2-丁酸-2-甲丙酯、脱氢戊二酸内酯和乙酸异丁酯。

由图5可知,从香味呈现来看,醇类化合物大多具有青草香、甜香。香芹醇具有类似香芹叶的香味,(R)-2-己醇有淡青的嫩枝叶气息,壬醇具有甜香、果香,脱氢芳樟醇主要呈现花草香气。不饱和醇类阈值普遍较低,对甜玉米气味的贡献率较大。酯类化合物多带有水果味,其中长链酯类化合物具有轻微脂肪气味,短链酯一般具有水果风味。乙酸异丁酯具有甜的果香,正戊酸-(Z)-3-己烯酯具有青草香、果香<sup>[24]</sup>。醇酯类物质赋予甜玉米果香、青香,是甜玉米整体风味的重要贡献者。

从不同杀菌条件来看,醇酯类化合物总量与醛酮类趋势一致。杀菌温度越高、时间越长,化合物总量越高。宋江峰等<sup>[25]</sup>研究发现,糯玉米罐头贮藏后期醇类物质含量不断增加,酯类化合物相对含量较高。程媛等<sup>[26]</sup>研究发现,酯类化合物含量与杀菌温度呈正相关,与试验组酯类物质变化一致。甜玉米罐头醇酯类物质分析尚未见相关报道。

从不同包装材料来看,铝箔包装醇、酯类化合物总量均高于透明包装,可能是由于铝箔材料的高阻隔性能能够有效避免脂类物质的降解和醇类物质的挥发。

2.3.4 烷烃、烯烃类化合物 甜玉米中的烷烃、烯烃类物质可能来源于加热杀菌过程中的脂肪酸氧化降解、美拉

德反应副产物、碳水化合物热裂解等。其中烷烃类化合物共有5种,整体占比较低,相对分子质量较大,相对含量较多的为2-甲基-十一烷、4,4-二甲基-十一烷。烯烃类化合物共有9种,占比分别为4.10%, 4.44%, 4.27%, 4.48%, 4.57%, 4.71%,含量较多的为1,10-十一碳二烯、1-十二碳烯和 $\alpha$ -衣兰油烯。烷烃、烯烃类化合物香气一般较弱或无气味<sup>[27]</sup>,风味阈值通常也较高,对样品风味的贡献较小。但烷烃、烯烃类化合物可能存在协同作用,进而对甜玉米整体风味形成有一定影响<sup>[28]</sup>。

由图6可知,从不同处理条件来看,烷烃、烯烃类的挥发性风味物质整体含量规律与醇酯、其他类化合物一致,均呈现杀菌温度越高、时间越长,相对含量越高的趋势,铝箔包装组的相对含量高于透明包装组。

2.3.5 其他类化合物 其他类化合物主要由含氮、含硫类化合物、酚类等共28种组成,其相对含量在所有挥发性风味物质中最高,分别为31.76%, 32.25%, 32.12%, 32.62%, 31.88%, 32.78%,其中含量较高的为2-甲氧基-3-异丁基吡嗪、2-己酰基呋喃、萘、苯酚等。吡嗪类化合物是加热食品中的典型香味组分,主要由美拉德反应中氨基酮和Strecker醛的杂环化形成<sup>[29]</sup>,噻唑类化合物形成路径与吡嗪类相似。呋喃类物质主要来源于糖的焦糖化反应和碳水化合物的降解。Kuo等<sup>[30]</sup>研究发现,吡咯等含氮类香气活性化合物是通过缩合反应环化形成。噻吩类物质的形成整体与呋喃酮类相似,主要经醛糖反应重排产物与氨反应直接环合产生。

由图7可知,从香味呈现来看,吡嗪类化合物主要呈现烘烤风味或坚果风味。2-甲氧基-3-异丁基吡嗪具有胡椒、咖啡香气,2-乙氧基-3-甲基吡嗪具有榛子、烘烤香气。呋喃、噻唑类多具有甜香,2-己酰基呋喃具有甜香、果香、青香等香味,2-乙酰基-5-甲基呋喃具有清甜及烤面包气味,4-甲基噻唑具有坚果、蔬菜青香、热带水果气味,2-戊



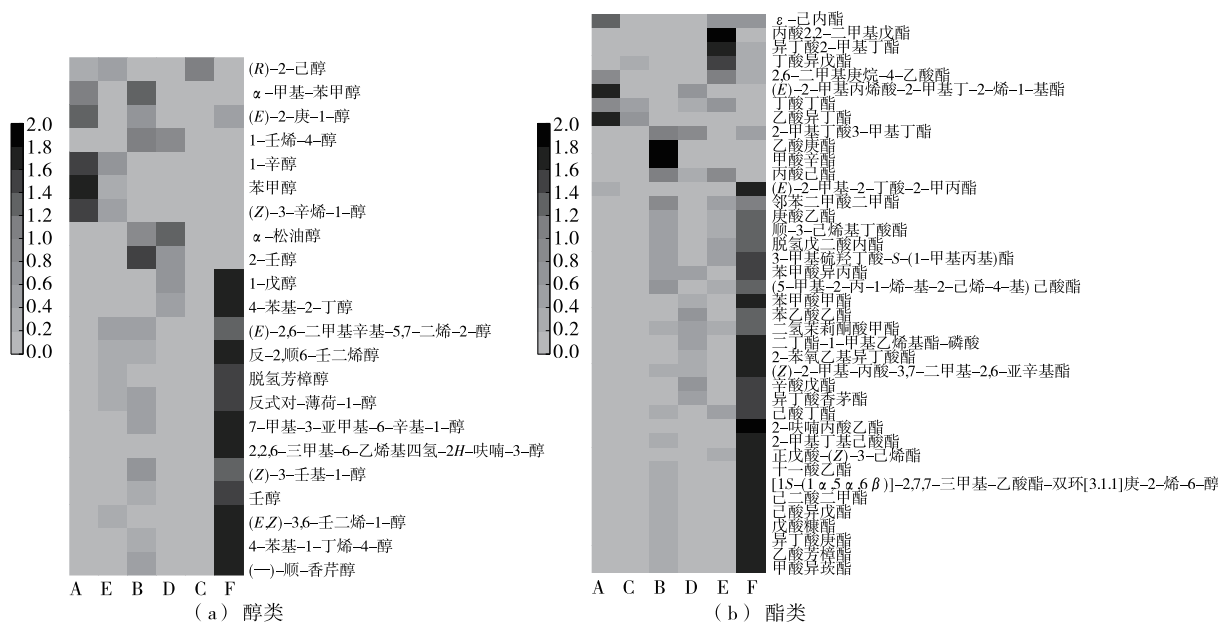


图5 醇类、酯类挥发性风味物质的相对含量热图

Figure 5 Heat map of relative content of alcohols and esters volatile flavor substances

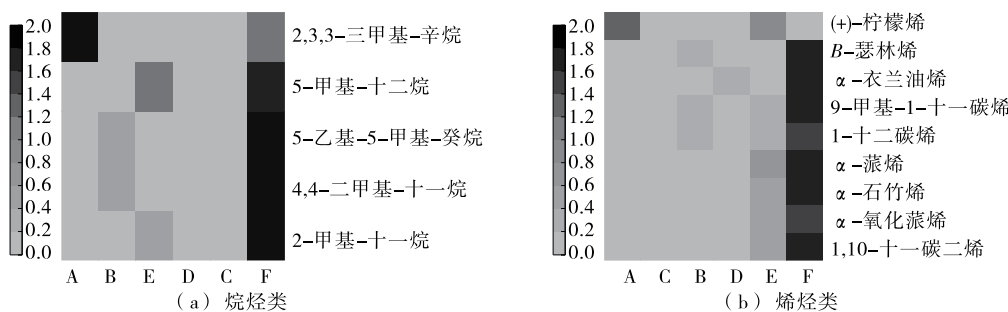


图6 烷烃、烯烃类挥发性风味物质的相对含量热图

Figure 6 Heat map of relative content of alkanes and alkenes volatile flavor substances

基噻吩具有浓郁咖啡香味。这些杂环类化合物阈值普遍较低,对甜玉米香气形成具有重要贡献。其中,甲硫基一苯等含硫化合物可能来源于含硫氨基酸的热降解产物,这些含硫化合物由于阈值较低,对整体香气的形成也至关重要<sup>[15]</sup>。苯、萘类等物质可能来源于包装材料,这些物质阈值整体偏大,对甜玉米风味的形成整体影响不大。

从不同杀菌条件来看,其他类化合物总量与醛、酮、醇、酯类趋势一致。杀菌温度越高、时间越长,化合物总量越高。在美拉德反应中,吡嗪生成速率在 70 °C 时开始显著上升,120 °C 时达到最大值,反应条件与甜玉米高温杀菌过程条件吻合,故试验组中吡嗪类物质相对含量较高<sup>[31]</sup>。Boekel 等<sup>[32]</sup>研究发现,温度的升高会加速咪喃、咪喃酮类风味物质的生成。Eric 等<sup>[33]</sup>研究表明,噻吩类物质含量随美拉德反应温度的升高而升高,与试验组趋势一致。

从不同包装材料看,其他类挥发性风味物质变化规

律与醇、酯类趋势一致,受益于铝箔材料的高阻隔性,铝箔材料组的其他类挥发性物质含量高于透明材料组的。

通常被认为是甜玉米特征性风味成分的二甲基硫脲在试验组中均未检出,与宋江峰等<sup>[25]</sup>的研究结论一致。贮藏后期,甜玉米中的含硫类物质不断减少,说明甜玉米的典型“玉米味”在不断减弱,整体呈现出甜香、果香、焦香等复合香味。

#### 2.4 基于 OAV 值的主要呈香物质分析

真空包装甜玉米贮藏后风味受挥发性成分含量及感觉阈值双重影响<sup>[34]</sup>。风味物质中部分化合物对塑造和决定整体风味表现起到了尤为突出的作用,为核心呈香物质。以各挥发性风味物质的质量浓度和相对应的感官阈值计算各物质的 OAV 值,采用 OAV 值来评价单个香气物质对样品整体香气的贡献度,当 OAV 值 > 1 时,认为该香气物质对样品香气具有一定影响性;当 OAV 值 > 10 时,认为该香气物质对香气贡献极大<sup>[35]</sup>。通过相关文献资料

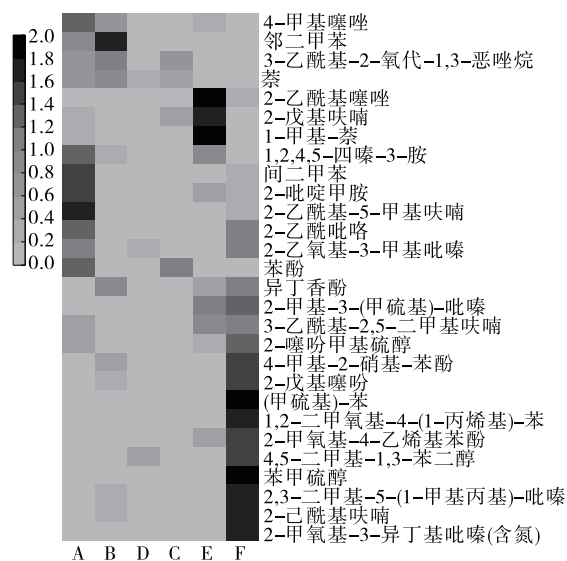


图7 其他类挥发性风味物质的相对含量热图

Figure 7 Heat map of relative content of other volatile flavor substances

和《化合物嗅觉阈值手册》,共收集 54 种挥发性风味物质的具体阈值数据,其中部分化合物的 OAV 值见表 3。

由表 3 可知,各组甜玉米的 OAV 值不同,但整体差距较小。OAV 值 >10 的物质有 6 种,OAV 值 >1 的物质有 9 种,这些主要挥发性风味物质大多呈现出甜香、果香等香气。其中,5-乙基-3-羟基-4-甲基-2(5H)-咪唑酮、2-甲氧基-3-异丁基吡嗪的 OAV >10 000,其相对含量较高,在香气类型上主要表现为果香、甜香、焦糖香等,对香气形成贡献极大,是真空包装甜玉米主要关键挥发性风味物质。咪唑酮、(E)-2-壬烯醛的 OAV >10,含量较高,对香气贡献度较高。反-4-癸烯醛、反-2,顺 6-壬二烯醇的 OAV >1,对甜玉米香气的形成贡献较大,反-4-癸烯醛具有浓郁的水果香气,壬二烯醇具有青香、黄瓜香等果香。苊硫醇、

2-噻吩甲基硫醇等含硫类化合物整体 OAV 值也较高,苊硫醇具有韭葱、洋葱的气味,2-噻吩甲基硫醇具有令人不愉快的烧灼味、焦糊味,是甜玉米中不愉快气味的主要来源。

综上,甜玉米中整体的主体香味物质种类在各处理条件下无明显差异,但在不同包装中,OAV 值差距明显,铝箔包装中挥发性风味物质的 OAV 值大于透明包装,对甜玉米整体挥发性风味物质的保持,铝箔包装的效果好于透明包装。

2.5 挥发性风味物质主成分分析

对不同杀菌工艺、不同包装材料贮藏的真空包装甜玉米中的 9 种关键挥发性风味物质 (OAV ≥ 1) 进行主成分分析,得出主成分的相关矩阵特征值以及累积贡献率,各挥发性风味物质在主成分分析中的数值大小直接对应其对主成分影响力的强弱程度,结果如图 8 所示。

由图 8(a) 可知,第一、二主成分的累计贡献率 >90%,能较好地反映不同处理方式下真空包装甜玉米中挥发性风味物质的变化规律。第一主成分中 (E)-2-壬烯醛、反-2,顺 6-壬二烯醇的贡献率较大,(E)-2-壬烯醛具有脂肪气息、青香、黄瓜香和甜瓜香,反-2,顺 6-壬二烯醇具有青香、蜡香、黄瓜香、西瓜香等香气。第二主成分中咪唑酮、苯甲醛的贡献率较大,咪唑酮具有果香、焦香、焦糖和菠萝样香气,苯甲醛具有苦杏仁、樱桃及坚果香气,说明这些挥发性风味物质是真空包装甜玉米差异性风味的来源。

由图 8(b) 可知,不同处理样品之间的挥发性风味物质差异较大。铝箔包装的 B 组和 F 组在第 4 象限,整体挥发性风味物质比较接近。而 C、D 组位于第 3 象限,主要挥发性风味物质无分布,说明试验组中杀菌温度 121 °C,杀菌时间 10 min 的 C、D 组整体风味最差。整体来看,杀菌温度 121 °C,杀菌时间 15 min,铝箔包装的 F 组,其整体风味保持得最好。

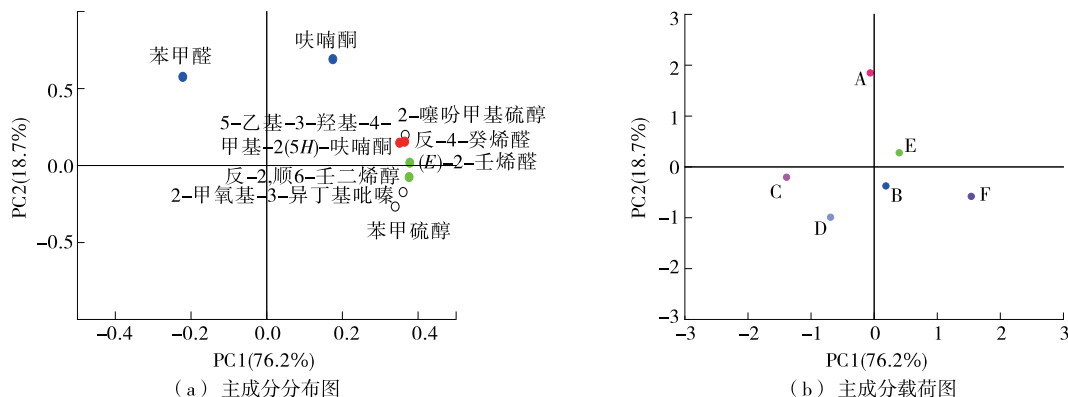


图 8 不同处理下甜玉米风味物质的主成分分布图及载荷图

Figure 8 Principal component scatter plot of sweet corn under different treating methods and main component load diagram of key volatile flavor substances

表 3 部分挥发性风味物质的 OAV 值  
Table 3 Part of volatile compounds OAV value

化合物	阈值/ ( $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	OAV 值					
		A 组	B 组	C 组	D 组	E 组	F 组
乙酸庚酯	0.09	0.604	0.777	0.639	0.678	0.667	0.660
己酸异戊酯	2	0.278	0.311	0.260	0.306	0.304	0.356
甲酸辛酯	0.75	0.114	0.140	0.121	0.122	0.123	0.126
异丁酸庚酯	13	0.033	0.037	0.031	0.036	0.036	0.043
乙酸异丁酯	66	0.027	0.024	0.026	0.024	0.025	0.025
丙酸己酯	8	0.018	0.023	0.021	0.022	0.022	0.019
庚酸乙酯	2.2	0.013	0.014	0.011	0.013	0.013	0.014
5-乙基-3-羟基-4-甲基-2(5H)-呋喃酮	0.000 03	83 050.492	84 725.358	72 324.192	73 666.670	83 745.647	86 904.837
呋喃酮	0.04	108.638	98.081	93.846	90.551	103.447	101.546
(E)-2-壬烯醛	0.09	24.083	24.397	21.713	22.867	25.069	26.730
苯甲醛	0.3	3.364	0.343	2.128	1.248	0.650	0.262
反-4-癸烯醛	0.027	1.919	1.832	1.632	1.741	1.983	2.133
(E,E)-2,6-壬二醛	0.75	0.381	0.415	0.371	0.399	0.402	0.405
香茅醛	3.5	0.063	0.067	0.062	0.066	0.066	0.068
E-2-辛烯醛	3	0.022	0.021	0.021	0.021	0.021	0.022
顺式-柠檬醛	32	0.022	0.024	0.020	0.024	0.022	0.026
己醛	4.5	0.020	0.019	0.022	0.022	0.016	0.017
2-甲氧基-3-异丁基吡嗪	0.002	10 863.822	11 700.075	9 826.752	11 172.533	11 302.945	13 792.218
苜硫醇	0.000 4	187.383	203.128	182.163	205.341	205.371	252.248
2-噻吩甲基硫醇	0.005	147.776	144.009	125.229	135.622	147.549	158.145
2-乙氧基-3-甲基吡嗪	0.8	0.662	0.609	0.590	0.639	0.608	0.659
2-戊基呋喃	6	0.036	0.017	0.042	0.019	0.061	0.017
4-甲基噻唑	60	0.014	0.013	0.010	0.012	0.012	0.009
反-2,顺-6-壬二烯醇	0.5	1.724	1.852	1.417	1.584	1.848	2.212
脱氢芳樟醇	3.8	0.321	0.330	0.287	0.320	0.336	0.365
(-)-顺-香芹醇	250	0.049	0.055	0.045	0.052	0.053	0.063
壬醇	50	0.027	0.030	0.023	0.028	0.029	0.035
(E,Z)-3,6-壬二烯-1-醇	10	0.014	0.016	0.014	0.015	0.016	0.018

### 3 结论

以贮藏 6 个月的真空包装甜玉米为研究对象,通过 GC-MS、菌落总数、总色差,对不同包装、不同杀菌工艺的真空包装甜玉米进行了分析检测。结果表明,不同处理组杀菌效果都能满足食品安全需求;从色差情况看,铝箔包装组的色差明显优于透明包装组,说明铝箔包装更有利于甜玉米感官品质的提升;在挥发性风味物质方面,共检出酮类、醛类、酯类等 8 大类、140 种挥发性风味物质,其他类(主要为含氮、含硫类化合物、酚类等)化合物、醇类化合物、酯类化合物是真空包装甜玉米的主要风味组分;

结合香气活性值和主成分分析,发现 5-乙基-3-羟基-4-甲基-2(5H)-呋喃酮、2-甲氧基-3-异丁基吡嗪、呋喃酮、(E)-2-壬烯醛、反-4-癸烯醛、反-2,顺-6-壬二烯醇对真空包装甜玉米的风味起到了主要作用。(E)-2-壬烯醛、反-2,顺-6-壬二烯醇、呋喃酮、苯甲醛是差异性挥发性风味物质,这些物质是不同包装真空甜玉米贮藏后挥发性风味物质差异较大的原因。从杀菌条件来看,121℃杀菌组的整体挥发性风味物质总量高于 110℃杀菌组,杀菌时间 15 min 组的整体挥发性风味物质含量高于杀菌时间 10 min 组,不同杀菌条件下风味物质种类基本一致。从不同包装材料来看,铝箔包装因透光性低,气密性好,能够较好地保存甜

玉米的香气,风味更加突出。综上,真空包装甜玉米的最优杀菌包装组合为铝箔包装,121℃下杀菌15 min。后续可耦合高灵敏度电子鼻等对真空包装甜玉米香气成分特点进行重点分析,同时进一步探索风味物质产生机理。

### 参考文献

- [1] 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. The current situation and development trend of fresh corn seed industry in China[J]. China Seed Industry, 2020(10): 14-18.
- [2] 赵文明,崔亚坤,张美景,等.鲜食糯玉米杂交种对花粒期高温的响应及耐高温性评价[J].江苏农业科学,2024,52(3):97-103.  
ZHAO W M, CUI Y K, ZHANG M J, et al. Response of fresh waxy maize hybrids to high temperature at flowering stage and evaluation of high temperature tolerance[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2024, 52(3): 97-103.
- [3] 李坤,黄长玲.我国甜玉米产业发展现状、问题与对策[J].中国糖料,2021,43(1):67-71.  
LI K, HUANG C L. Development status, problems and countermeasures of sweet corn industry in China[J]. Chinese Sugar, 2021, 43(1): 67-71.
- [4] 李雪,郑晓卫,唐璐,等.真空包装鲜食玉米酸败微生物分离鉴定及其特性研究[J].食品科技,2023,48(12):290-298.  
LI X, ZHENG X W, TANG L, et al. Isolation, identification and characterization of rancidity microorganisms in vacuum packaged fresh corn[J]. Food Science and Technology, 2023, 48(12): 290-298.
- [5] ZHAO Z, MA F, ZHANG B. Study on preservation method and mechanism of peeling waxy corn kernels treated with composite film[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46: e16451.
- [6] CHEN T Y, WANG H Y, SU W, et al. Analysis of the formation mechanism of volatile and non-volatile flavor substances in corn wine fermentation based on high-throughput sequencing and metabolomics[J]. Food Research International, 2023, 165: 112350.
- [7] 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. HS-SPME/GC-MS analysis of flavor compounds of quick-frozen sweet maize[J]. Science and Technology for the Food Industry, 2010, 31(7): 95-98.
- [9] 潘梦垚.水煮笋制品软包装技术及其保质期研究[D].无锡:江南大学,2013:21.  
PAN M Y. Research on soft packaging technology and shelf life of boiled bamboo shoot products[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2013: 21.
- [10] 马敬宜,姚衡斌,周琼琼,等.复合光源萎凋对信阳红茶品质
- 的影响[J].中国食品学报,2023,23(9):192-201.  
MA J Y, YAO H B, ZHOU Q Q, et al. The effect of composite light source withering on the quality of Xinyang black tea[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(9): 192-201.
- [11] 刘斌善,魏晓明,邵丹青,等.GC-MS/O结合香气活性值表征烧麦中关键香气成分及其贮存过程中的变化情况[J].食品科学,2023,44(6):268-276.  
LIU B S, WEI X M, SHAO D Q, et al. The value of GC-MS/O binding aroma activity was used to characterize the key aroma components in shaomai and their changes during storage[J]. Food Science, 2023, 44(6): 268-276.
- [12] 刘鑫洋.甜玉米真空包装技术及货架期预测模型研究[D].无锡:江南大学,2022:37.  
LIU X Y. Study on vacuum packaging technology and shelf life prediction model of sweet corn[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022: 37.
- [13] 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 Y D, SONG J F, LI D J, et al. Correlation between thermal degradation of carotenoids and volatile compounds in sweet corn juice[J]. Food Science, 2018, 39(8): 27-32.
- [14] 张芷芸,姜启兴,龚创奇.pH、包装厚度和光照对即食藕条产品褐变的影响[J].食品科技,2020,45(8):33-38.  
ZHANG Z Y, JIANG Q X, GONG C Q. Effects of pH, package thickness and light on browning of ready-to-eat lotus root products[J]. Food Science and Technology, 2020, 45(8): 33-38.
- [15] 刘小琴,叶阳,曾德玉,等.膨化玉米复合粉配方优化及挥发性风味物质分析[J].食品与机械,2023,39(10):206-216.  
LIU X Q, YE Y, ZENG D Y, et al. Formulation optimization and analysis of volatile flavor substances of extruded corn compound powder[J]. Food & Machinery, 2023, 39(10): 206-216.
- [16] 雷婷,葛中会,刘贝叶,等.基于吹扫捕集—气相色谱—质谱联用分析单粮型白酒风味成分[J].农产品加工,2022(24):58-62.  
LEI T, GE Z H, LIU B Y, et al. Analysis of flavor components of single grain liquor by purging-catch-gas chromatography-mass spectrometry[J]. Agricultural products Processing, 2022(24): 58-62.
- [17] 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, FEN T, ZHANG C, et al. Analysis of volatile flavor compounds of maize under different treatment methods by GC-MS and GC-IMS[J]. Grain, Oil and Food Science and Technology, 2021, 29(1): 1-9.
- [18] 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, et al. Changes of volatile components and principal component analysis of maize during frozen storage[J]. Food and Fermentation Industry, 2019, 45(1): 210-218.
- [19] 巨晓军, 章明, 单艳菊, 等. 鸡肉品质分析及关键风味物质和基因的筛选[J]. 中国农业科学, 2023, 56(9): 1 813-1 826.
- JU X J, ZHANG M, SHAN Y J, et al. Analysis of chicken quality and screening of key flavor substances and genes[J]. Agricultural Science in China, 2023, 56(9): 1 813-1 826.
- [20] 张杰, 唐善虎, 李思宁, 等. 加热温度对牦牛肉肌原纤维蛋白与葡萄糖或果糖美拉德反应挥发性成分的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(7): 222-231.
- ZHANG J, TANG S H, LI S N, et al. Effect of heating on the main components and antioxidant activities of Maillard reaction products[J]. Science and Technology for the Food Industry, 2018, 39(7): 222-231.
- [21] 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: 扬州大学, 2017: 8.
- WU J P. Study on the role of lipoxygenase (LOX) in aroma formation of fresh waxy corn[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2017: 8.
- [22] 刘雅静, 李萍, 于子越, 等. 微波陈化黄酒的工艺优化及其风味物质分析[J]. 中国酿造, 2022, 41(9): 199-203.
- LIU Y J, LI P, YU Z Y, et al. Process optimization of microwave aging rice wine and analysis of its flavor compounds[J]. China Brewing, 2022, 41(9): 199-203.
- [23] HO C T, ZHENG X, LI S. Tea aroma formation[J]. Food Science and Human Wellness, 2015, 4(1): 9-27.
- [24] 权苗苗, 许飞, 陈洁, 等. 多菌种醇制多孔挂面的品质及风味物质分析[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2022, 43(5): 53-60.
- QUAN M M, XU F, CHEN J, et al. Analysis of quality and flavor substances of porous dough made by polystrain fermentation[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2022, 43(5): 53-60.
- [25] 宋江峰, 李大婧, 刘春泉. 贮藏过程中京甜紫花糯 2 号玉米软罐头的主要挥发性风味成分的变化[J]. 核农学报, 2011, 25(5): 980-987.
- SONG J F, LI D J, LIU C Q. Changes in the main volatile flavor components of Jing Tian Zi Hua Nuo 2 corn soft canned food during storage[J]. Chinese Journal of Nuclear Agriculture, 2011, 25(5): 980-987.
- [26] 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 Science and Technology, 2019, 35(5): 281-288.
- [27] 田露琴, 戴怡凤, 徐浩, 等. 饮料酒中手性风味物质分析方法研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(5): 291-298.
- TIAN L Q, DAI Y F, XU H, et al. Research progress on analysis methods of chiral flavor substances in beverages and wines[J]. Food and Fermentation Industry, 2023, 49(5): 291-298.
- [28] 朱文政, 严顺阳, 徐艳, 等. 顶空固相微萃取—气质联用分析不同烹制时间红烧肉挥发性风味成分[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(2): 247-253.
- ZHU W Z, YAN S Y, XU Y, et al. Analysis of volatile flavor components of braised pork with different cooking time by SPME-GCMS[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(2): 247-253.
- [29] 杨平. 武夷岩茶焙火过程中关键 Maillard 反应香气成分及形成途径研究[D]. 北京: 北京工商大学, 2022: 5.
- YANG P. Study on Key aroma components and formation pathways of Maillard reaction in the roasting process of Wuyi rock tea[D]. Beijing: Beijing Technology and Business University, 2022: 5.
- [30] KUO P C, LAI Y Y, CHEN Y J, et al. Changes in volatile compounds upon aging and drying in oolong tea production[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2011, 91(2): 293-301.
- [31] MAGA J A, KATZ I. Pyrazines in foods: an update[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2009, 16(1): 1-48.
- [32] BOEKEL M A J S V. Formation of flavour compounds in the Maillard reaction[J]. Biotechnology Advances, 2006, 24(2): 230-233.
- [33] ERIC K, RAYMOND L V, ABBAS S, et al. Temperature and cysteine addition effect on formation of sunflower hydrolysate Maillard reaction products and corresponding influence on sensory characteristics assessed by partial least square regression[J]. Food Research International, 2014, 57(1): 242-258.
- [34] 李婷, 田佳乐, 刘洋, 等. 基于固相微萃取—气相色谱—质谱与电子鼻技术分析发酵乳中的挥发性风味物质[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(10): 233-241.
- LI T, TIAN J L, LIU Y, et al. Analysis of volatile flavor compounds in fermented milk by solid phase microextraction, gas chromatography-mass spectrometry and electronic nose[J]. Food and Fermentation Industry, 2020, 46(10): 233-241.
- [35] 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): 2 175-2 185.
- ZHU N M, KE J H, YUAN L. Principal component analysis of volatile flavor compounds in different fresh sweet waxy maize [J]. Chinese Journal of Nuclear Agriculture, 2017, 31(11): 2 175-2 185.