

李云峰, 范競升, 陈冰琳, 等. 3 个甜玉米品种在不同储藏条件下可溶性固形物含量及挥发性风味成分变化 [J]. 华南农业大学学报, 2021, 42(3): 33-44.
LI Yunfeng, FAN Jingsheng, CHEN Binglin, et al. Changes of soluble solid contents and volatile flavor components of three sweet corn cultivars under different storage conditions[J]. Journal of South China Agricultural University, 2021, 42(3): 33-44.

3 个甜玉米品种在不同储藏条件下可溶性固形物含量及挥发性风味成分变化

李云峰[†], 范競升[†], 陈冰琳, 王思鸿, 刘 宇, 王 欣,
刘晓敏, 王青峰, 李小琴, 黄 君
(华南农业大学 农学院, 广东 广州 510642)

摘要:【目的】阐明甜玉米 *Zea mays* L. *saccharata* Sturt. 采后在不同贮藏温度、贮藏时间下可溶性固形物含量和挥发性风味物质的变化规律, 为甜玉米采后品质性状研究奠定基础。【方法】以 ‘奥弗兰’、‘王朝’、‘广良甜 27’ 3 个甜玉米品种为材料, 利用手持数显糖度计测定可溶性固形物含量; 同时采用顶空固相萃取法, 通过色谱-质谱联用仪测定 3 个品种在常温(室温)和 4℃ 低温储存条件下挥发性风味成分, 结合多元统计分析对不同品种的挥发性风味成分进行分析。【结果】与常温储藏相比, 甜玉米在低温储藏时可溶性固形物含量下降缓慢。在常温和低温储存条件下分别检测到 58 和 59 种挥发性物质, 主要为烷烃类和酯类物质。不同品种在不同储藏条件下挥发性风味物质种类存在一定差异, 共有的挥发性风味物质有 8 种, 分别为 3,8-二甲基癸烷、3-甲基十一烷、正十二烷、十四烷、3-甲基十五烷、十六酸乙酯、正十九烷和正十六烷。偏最小二乘判别分析 (Partial least squares discriminant analysis, PLS-DA) 表明, 常温 and 低温储藏时分别鉴定到 9 和 10 种变量重要性投影 (Variable importance projection, VIP)>1 的关键挥发性物质, 常温 and 低温储藏时 ‘奥弗兰’ 共有的关键挥发性物质为 (+)-环苜蓿烯, ‘王朝’ 为正十二烷。【结论】储藏温度和时间均会影响甜玉米可溶性固形物含量及挥发性物质的种类和含量。

关键词: 甜玉米; 气相色谱-质谱联用; 低温; 常温; 储藏; 挥发性物质; 可溶性固形物
中图分类号: S513 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-411X(2021)03-0033-12

Changes of soluble solid contents and volatile flavor components of three sweet corn cultivars under different storage conditions

LI Yunfeng[†], FAN Jingsheng[†], CHEN Binglin, WANG Sihong, LIU Yu, WANG Xin,
LIU Xiaomin, WANG Qingfeng, LI Xiaoqin, HUANG Jun
(College of Agriculture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: 【Objective】To clarify the change law of soluble solid contents and volatile flavor substances of sweet corn (*Zea mays* L. *saccharata* Sturt.) after harvest under different storage temperature and time, and lay a foundation for the research on the quality characteristics of sweet corn after harvest. 【Method】Three sweet

收稿日期: 2020-07-03 网络首发时间: 2021-04-02 15:09:01
网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20210402.1439.010.html>
作者简介: 李云峰 (1994—), 男, 硕士研究生, E-mail: 905723505@qq.com; 范競升 (1996—), 女, 硕士研究生, E-mail: 1458026006@qq.com; [†]表示同等贡献; 通信作者: 黄 君 (1986—), 男, 讲师, 博士, E-mail: junhuang@scau.edu.cn
基金项目: 广东省重点领域研发计划 (2008B020202013); 广东省自然科学基金 (2018A030313865)

corn cultivars of ‘Aofulan’, ‘Wangchao’, and ‘Guangliangtian 27’ were used as materials. The soluble solid contents of three cultivars were measured by a handheld digital sugar meter, and the volatile flavor components of sween corns under normal temperature (room temperature) and low temperature (4 ℃) storage conditions were detected and analyzed by headspace solid-phase microextraction through gas chromatography-mass spectrometry. Furthermore, multivariate statistical analysis was used analyze the volatile flavor components of different cultivars. 【Result】 Compared with normal temperature storage, the content of soluble solid of sweet corn decreased slowly under low temperature storage. Total 58 and 59 kinds of volatile substances were detected under normal and low temperature storage conditions respectively, mainly alkanes and esters. There were certain differences in the types of volatile flavor substances among different cultivars under different storage conditions. There were the same eight volatile flavor substances among different cultivars under different storage conditions, including 3,8-dimethyldecane, 3-methylundecane, dodecane, tetradecane, 3-methylpentadecane, ethyl hexadecanoate, nonadecane and n-hexadecane. Partial least squares discriminant analysis (PLS-DA) showed that nine and ten key volatile substances with variable importance projection (VIP)>1 have been identified under normal and low temperature storage respectively. The common key volatile substance of ‘Aofulan’ under normal and low temperature storage was (+)-cycloclofalene, and that of ‘Wangchao’ was eicosane. 【Conclusion】 Both storage temperature and time affect the content of soluble solids and the types and contents of volatile substances in sweet corn.

Key words: sweet corn; gas chromatography-mass spectrometry; low temperature; normal temperature; storage; volatile substance; soluble solid

甜玉米 *Zea mays* L. *saccharata* Sturt. 属于禾本科玉米属，又称水果玉米，是普通玉米胚乳淀粉合成基因发生隐性突变形成的特殊玉米类型^[1-2]。甜玉米鲜嫩香甜，营养价值高，维生素、蛋白质、糖和脂肪等含量均显著高于普通玉米^[3]。甜玉米富含 7 种“抗衰老”——钙、谷胱甘肽、维生素、镁、硒、维生素 E 和脂肪酸，还具有降低胆固醇、软化血管和防治冠心病的作用，深受消费者喜爱^[4]。近年来，我国甜玉米种植面积、单产连年攀升。随着人们消费水平的提高，消费者对甜玉米食用品质、营养品质的要求不断提升，带动了对甜玉米品质的深入研究^[5]。

关于谷物、蔬菜及水果在贮藏过程中可溶性固形物、蛋白质和糖分等营养物质变化有诸多研究^[6-10]，但关于挥发性风味物质变化的报道较少^[9,11-13]。谷物和豆类在储存过程中会发生明显的生化 and 营养变化^[6,14-16]；谷物的含水量和储存温度会导致 pH，游离氨基氮、可溶性固形物、蛋白质和淀粉含量等急剧变化^[6-8]；甜椒在储藏期间芳香族挥发物含量显著降低^[9]；杏在低温储存一段时间后，无法恢复水果的果香^[10]。甜玉米采收后货架期有限，随着贮藏时间延长，食用品质和营养品质逐渐降低。风味是甜玉米食用品质的重要衡量标准。风

味主要通过挥发性风味物质体现^[17]。为探讨贮藏期间甜玉米挥发性风味物质的变化规律，本研究以 3 个广东省种植面积较大的甜玉米品种——‘奥弗兰’、‘王朝’和‘广良甜 27’为研究对象，采用顶空固相萃取方法，通过色谱-质谱联用仪测定 3 个品种在常温和低温储存时挥发性风味物质的变化规律，采用手持数显糖度计测定可溶性固形物含量变化情况，阐明甜玉米采后在不同贮藏温度、贮藏时间下挥发性风味物质和可溶性固形物含量的差异，以期对甜玉米采后品质性状研究奠定基础。

1 材料方法

1.1 材料

甜玉米品种‘奥弗兰’、‘王朝’和‘广良甜 27’于 2019 年秋季种植于华南农业大学增城试验基地。双行种植，行宽 0.67 m，株距 0.30 m，每个品种种植约 40 株，采用常规大田管理技术。单株套袋自交，各品种同一天授粉，授粉后 22 d 取长势一致的果穗用于后续挥发性物质和品质指标的测定。

1.2 方法

1.2.1 材料贮藏处理 低温储藏温度为 4 ℃，湿度

60%~70%; 常温储藏温度为室温 (23~26 ℃), 湿度 60%~70%。分别于储藏 0、3、5 d 后取样, 取其中 3 株玉米果穗中部籽粒 4~5 行混样作为 1 次重复, 每个样品做 3 次生物学重复。

1.2.2 可溶性固形物含量测定 取不同储藏温度、不同储藏时间的 3 个甜玉米品种籽粒分别用研钵研磨, 2 层洁净纱布过滤收集汁液, 利用 PAL-1 手持数显糖度计分别测定各样品可溶性固形物含量。

1.2.3 挥发性物质测定 每个品种籽粒混样约 30 g 于 250 mL 三角瓶内, 用锡纸包裹住瓶口后盖塞密闭。在 80 ℃ 水浴锅中顶空固相微萃取吸附 40 min (萃取纤维头为 50/30 μm CAR/DVB/pDMS), 立即插入色谱气化室, 解吸 5 min, 利用气相色谱-质谱联用仪 (GC-MS)(安捷伦 7890B-5977A) 进行分析。GC 条件参照褚能明等^[18]的方法, 并略做修改。色谱柱: DB5 柱 (30 m × 0.25 mm, 0.25 μm); 进样口温度: 250 ℃; 进样方式: 不分流进样; 升温程序: 50 ℃ 保持 3 min, 15 ℃/min 升至 110 ℃, 然后以 3 ℃/min 升温至 170 ℃, 再以 25 ℃/min 升温至 250 ℃, 维持 3 min; 载气: 高纯 He(体积分数为 99.999%), 流速: 1.0 mL/min; MS 条件: 电子电离; 电离电压: 70 eV; 离子源温度: 280 ℃; 选择性离子扫描, 扫描质量范围为 35~350 U。

1.3 数据处理

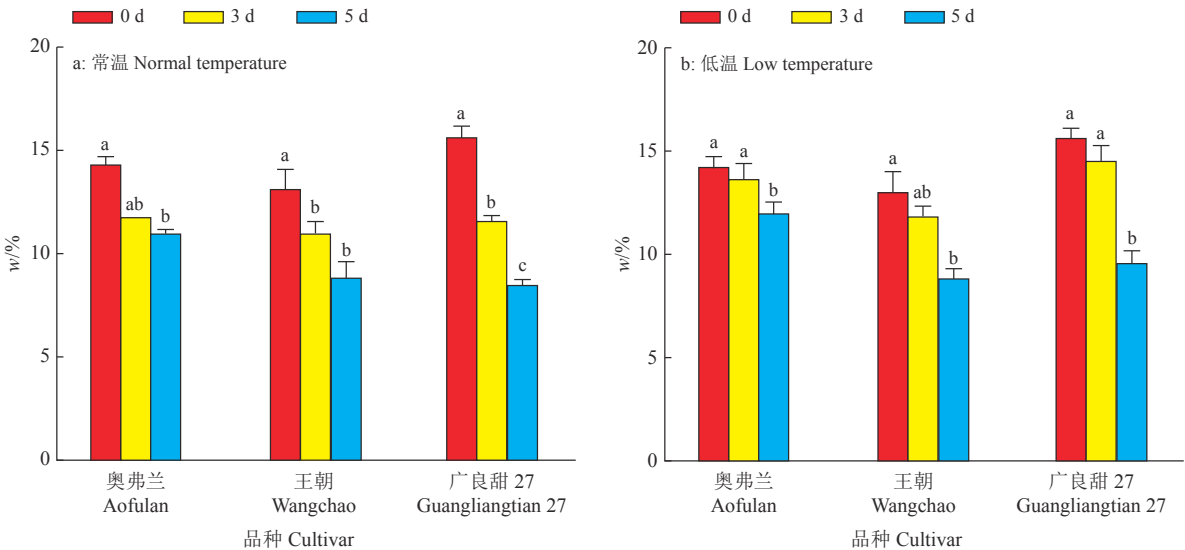
GC-MS 检测样品中未知挥发性成分定性分析与 NIST08 谱库匹配, 筛选记录匹配度大于 80 (最

大值为 100) 的物质, 并剔除相对含量小于 5% 的物质。定量分析按峰面积归一化法进行, 求得各挥发性成分的相对含量。使用 simca14.1 软件进行偏最小二乘分析 (Partial least squares discriminant analysis, PLS-DA)^[19], 采用 TBtools 软件 (<https://github.com/CJ-Chen/TBtools>) 进行系统聚类分析 (Hierarchical cluster analysis, HCA)^[20]。

2 结果与分析

2.1 3 个甜玉米品种可溶性固形物含量分析

利用 PAL-1 手持数显糖度计分别测定 3 个甜玉米品种 ‘奥弗兰’、‘王朝’ 和 ‘广良甜 27’ 在不同储藏温度和不同储藏时间下的可溶性固形物含量。常温和低温储藏的 3 个甜玉米品种在不同储藏时间下的可溶性固形物含量均呈现下降趋势, 但在不同储藏条件下不同甜玉米品种可溶性固形物含量下降趋势略有差异 (图 1)。常温和低温储藏 0 d 的 ‘奥弗兰’ 可溶性固形物含量显著高于储藏 5 d 的 ‘奥弗兰’; 常温和低温储藏 0 d 的 ‘王朝’ 可溶性固形物含量显著高于储藏 5 d 的 ‘王朝’, 而且常温储藏 0 天的 ‘王朝’ 可溶性固形物含量显著高于储藏 3 d 的 ‘王朝’; 低温储藏 0 和 3 d 的 ‘广良甜 27’ 可溶性固形物含量均显著高于储藏 5 d 的 ‘广良甜 27’, 常温储藏 0、3、5 d 的 ‘广良甜 27’ 可溶性固形物含量间均差异显著。



各图中相同品种柱子上的不同小写字母表示不同储藏天数间差异显著 ($P<0.05$, Duncan's 法)
Different lowercase letters on the columns of the same cultivar indicate significant differences among different storage periods ($P<0.05$, Duncan's method)

图 1 常温和低温不同储藏时间 3 个甜玉米品种的可溶性固形物含量
Fig. 1 Soluble solid contents of three sweet corns at different storage time under normal temperature and low temperature storage

2.2 3 个甜玉米品种挥发性风味物质测定

利用 GC-MS 分别测定 3 个甜玉米品种 ‘奥弗兰’、‘王朝’ 和 ‘广良甜 27’ 在不同储藏温度 and 不同储藏时间下的挥发性风味物质的相对含量 (图 2, 表 1)。3 个甜玉米品种在常温和低温下分别检测到 58 和 59 种挥发性风味物质, 其中 ‘奥弗兰’、‘王

朝’ 和 ‘广良甜 27’ 在常温储存条件下分别检测到 33、31、31 种; 在低温储存条件下分别检测到 34、33、27 种 (表 1)。储藏 0 d 的 3 个甜玉米品种在 34.431~34.439 min 处均存在高丰度的峰 (十六酸乙酯)(图 2)。储藏 0 d 时 ‘奥弗兰’ 相对含量最高的物质为壬醛 (具油脂气味和甜橙气息), 但在常温和

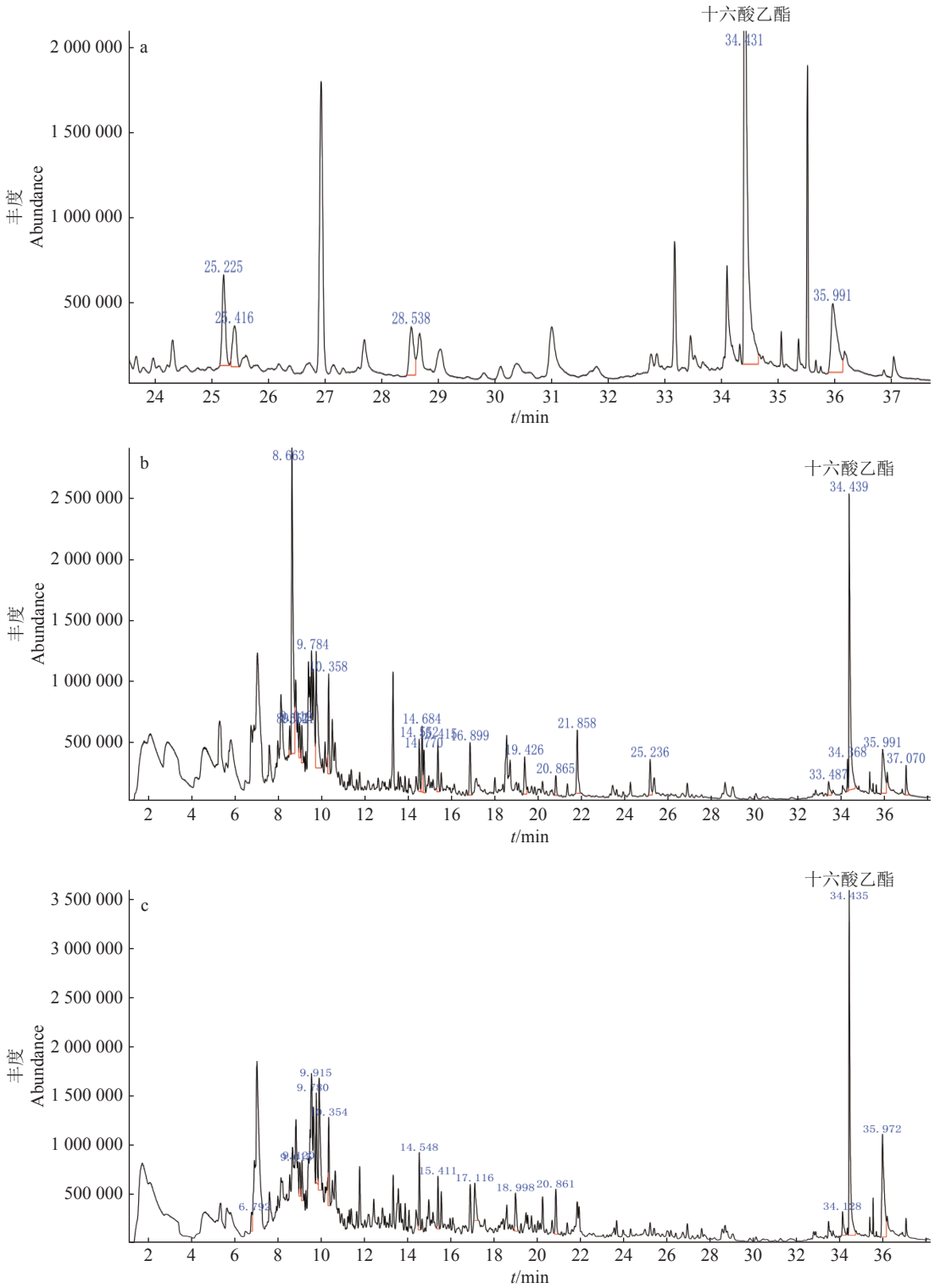


图 2 3 个甜玉米品种储藏 0 d 时挥发性物质的 GC-MS 总离子图

Fig. 2 GC-MS total ion current chromatograms of volatile substances in three sweet corns while storing for 0 d

表 1 不同储藏条件下 3 个甜玉米品种挥发性风味成分的相对含量¹⁾

Table 1 Relative contents of volatile flavor components in three sweet corns under different storage conditions

%

品种 Cultivar	挥发性成分 Volatile substance	0 d	常温		低温	
			Normal temperature		Low temperature	
			3 d	5 d	3 d	5 d
奥弗兰	八甲基环四硅氧烷	10.73	—	—	—	—
	氯甲酸正辛酯	6.16	—	—	—	—
	壬醛	18.19	—	—	—	—
	正十二烷	0.98	6.04	8.53	3.69	2.62
	3,8-二甲基癸烷	1.51	3.36	—	—	—
	萘	5.48	—	—	—	—
	正癸醛	2.21	—	—	3.69	2.29
	9-甲基十九烷	1.38	—	12.35	1.48	1.97
	(+)-环苜蓿烯	8.13	13.02	27.93	18.95	21.47
	[1 <i>S</i> ,2 <i>R</i> ,6 <i>R</i> ,7 <i>R</i> ,8 <i>S</i> ,(+)]-1,3-二甲基-8-(1-甲基乙基)	3.93	5.16	—	10.25	—
	三环[4.4.0.0(2,7)]癸-3-烯	1.60	4.01	7.40	2.02	1.96
	十四烷	5.22	3.37	—	—	—
	聚二甲基硅氧烷	1.07	—	—	1.80	3.02
	(-)- α -萜澄茄油烯	3.89	—	—	1.21	—
	香叶基丙酮	1.43	—	—	3.68	4.13
	1,2,4a,5,6,8a-六氢-1-异丙基-4,7-二甲基萘	1.46	—	—	2.03	1.65
	2,4-二叔丁基酚	2.33	—	—	5.59	5.52
	(1 <i>S</i> ,8a <i>R</i>)-1-异丙基-4,7-二甲基-1,2,3,5,6,8a-六氢萘	3.99	—	3.91	3.33	—
	正十六烷	1.96	—	4.95	4.07	—
	正十七烷	1.12	—	—	—	—
	姥鲛烷	1.45	—	—	—	—
	十四酸乙酯	12.91	28.62	15.77	9.22	22.40
	十六酸乙酯	2.89	4.54	—	—	5.09
	油酸乙酯	—	—	—	1.63	—
	4-甲基十一烷	—	9.71	—	7.80	4.85
	3-甲基十一烷	—	—	—	1.30	—
	(-)- α -蒎烯	—	—	—	1.67	—
	8-甲基-十七烷	—	3.80	—	2.46	2.03
	3-甲基十五烷	—	—	—	4.39	—
	正十八烷	—	2.99	—	6.76	—
	正十九烷	—	—	—	1.01	—
	正二十一烷	—	—	—	1.97	1.14
	正二十烷	—	—	—	—	5.62
	邻二甲苯	—	—	—	—	1.19
	二异丁基对苯二甲酸酯	—	2.79	—	—	—
	2-甲基十一烷	—	4.76	—	—	—
	2-溴十二烷	—	4.39	—	—	—
	癸基环戊烷	—	3.45	—	—	—
	2,6-二叔丁基-4-甲基苯酚	—	—	7.56	—	—
	3-甲基十三烷	—	—	7.46	—	—
	8-己基十五烷	—	—	4.14	—	—
	2,2',5,5'-四甲基联苯基	—	—	—	—	—

续表 1Continued table 1

%

品种 Cultivar	挥发性成分 Volatile substance	0 d	常温		低温	
			Normal temperature		Low temperature	
			3 d	5 d	3 d	5 d
王朝	十一烷	1.23	—	—	—	—
	壬醛	23.78	—	45.81	—	13.58
	正十九烷	1.89	2.10	—	5.90	—
	3,8-二甲基癸烷	1.86	2.73	—	4.00	—
	3-甲基十一烷	10.58	10.11	—	—	—
	正十二烷	4.96	5.34	4.21	2.02	3.92
	9-甲基十九烷	2.56	3.77	5.98	1.78	5.11
	(+)-环苜蓿烯	3.59	1.75	—	—	1.70
	[1S,2R,6R,7R,8S,(+)]-1,3-二甲基-8-(1-甲基乙基)	2.24	—	—	—	—
	三环[4.4.0.0(2,7)]癸-3-烯					
	十四烷	2.77	3.41	5.43	2.13	2.99
	6-β-纳曲醇盐酸盐	3.23	—	—	—	—
	(1S,8aR)-1-异丙基-4,7-二甲基-1,2,3,5,6,8a-六氢萘	2.80	—	—	—	—
	3-甲基十五烷	1.24	3.25	4.36	3.05	3.50
	正十六烷	4.68	1.97	2.98	6.37	1.58
	正十七烷	2.51	2.23	2.68	8.94	2.03
	棕榈酸甲酯	1.22	—	—	—	—
	2-[(4-甲氧基苯基)氨基]-4,6-二甲基吡啶-3-甲酰胺	1.21	1.38	—	1.92	—
	十六酸乙酯	19.92	13.97	10.14	2.48	31.09
	(9Z)-十八碳-9,17-二烯醛	6.04	—	—	—	—
	正二十烷	1.68	—	2.81	3.92	1.92
	环十四烷	—	2.98	—	—	2.62
	正十八烷	—	4.95	—	9.13	—
	正二十六烷	—	3.57	—	—	—
	正二十一烷	—	1.73	2.54	—	3.01
	八甲基环四硅氧烷	—	24.24	—	—	—
	3,7-二甲基癸烷	—	2.58	—	—	—
	4-甲基十一烷	—	1.93	—	—	—
	2-甲基十一烷	—	4.69	—	—	—
	2,4-二叔丁基酚	—	1.35	—	—	—
	正癸醛	—	—	9.25	5.76	5.60
	2-溴十二烷	—	—	3.81	—	—
	2,6-二叔丁基-4-甲基苯酚	—	—	—	34.18	—
	2,4,6-三叔丁基苯酚	—	—	—	4.88	—
	四十四烷	—	—	—	3.56	—
	壬烯	—	—	—	—	2.25
	2-硝基苯辛醚	—	—	—	—	1.89
	油酸乙酯	—	—	—	—	11.55
	正二十四烷	—	—	—	—	2.33
	三癸基环氧乙烷	—	—	—	—	1.57
	十八烯	—	—	—	—	1.78

续表 1Continued table 1

%

品种 Cultivar	挥发性成分 Volatile substance	0 d	常温		低温	
			Normal temperature		Low temperature	
			3 d	5 d	3 d	5 d
广良甜27	环庚烷	1.98	—	—	—	—
	2,6,10,15-四甲基十七烷	2.66	—	—	—	—
	3,8-二甲基癸烷	2.86	—	6.37	—	2.53
	3-甲基十一烷	5.50	14.58	15.63	—	5.81
	安息香酸乙酯	11.91	—	—	—	5.53
	正十二烷	5.91	11.26	10.16	—	6.01
	3-甲基十三烷	5.37	7.99	—	—	—
	十四烷	3.77	5.23	3.34	—	3.34
	香叶基丙酮	4.48	—	—	—	—
	2,4-二叔丁基酚	4.29	—	—	—	3.03
	3-甲基十五烷	4.15	3.88	3.39	—	3.16
	9-十六碳烯酸乙酯	2.45	—	—	—	—
	十六酸乙酯	27.76	—	3.80	19.07	25.62
	油酸乙酯	16.91	—	—	—	17.17
	2-庚酮	—	8.91	—	—	—
	十三烷	—	3.26	—	—	—
	正十九烷	—	5.25	—	—	4.16
	正十六烷	—	5.71	1.03	—	1.38
	4-甲基十一烷	—	4.20	4.56	—	—
	2-甲基十一烷	—	10.15	10.46	—	5.42
	2-甲基癸烷	—	6.52	2.31	—	—
	5,6-二甲基癸烷	—	2.53	—	—	—
	甲基丁香酚	—	5.26	4.65	—	—
	环十四烷	—	5.27	—	—	3.54
	六甲基环三硅氧烷	—	—	10.65	—	—
	3,7-二甲基癸烷	—	—	5.94	—	—
	植烷	—	—	1.87	—	—
	9-甲基十九烷	—	—	1.81	—	—
	2-甲基十九烷	—	—	7.04	—	—
	10-甲基十九烷	—	—	4.51	—	—
	2,6-二叔丁基-4-甲基苯酚	—	—	2.48	—	—
	1,3-二甲苯	—	—	—	16.17	—
	邻苯二甲酸二异丁酯	—	—	—	33.19	—
	邻苯二甲酸二丁酯	—	—	—	19.22	—
	亚油酸乙酯	—	—	—	12.35	—
	2-溴十二烷	—	—	—	—	4.52
	8-甲基十七烷	—	—	—	—	2.22
	正十七烷	—	—	—	—	2.54
	十四酸乙酯	—	—	—	—	1.95
	正十八烷	—	—	—	—	2.09

1) “—” 表示未检测出

1) “—” indicates not detectable

低温储藏 3 和 5 d 时,均未检测到壬醛(表 1)。储藏 0 d 时,‘王朝’相对含量最高的物质也为壬醛,常温储藏 3 d 时,未检测到壬醛,储藏 5 d 时,壬醛的相对含量高于 0 d;低温储藏 3 d 时,未检测到壬醛,储藏 5 d 时,壬醛的相对含量低于 0 d (表 1)。储藏 0 d 时,‘广良甜 27’相对含量最高的物质为十六酸乙酯(具蜡香、果爵和奶油香气),常温储藏 3 d 时,未检测到,储藏 5 d 时,十六酸乙酯的相对含量低于 0 d;低温储藏 3 d 时,十六酸乙酯的相对含量低于 0 d,储藏 5 d 时,十六酸乙酯的相对含量低于 0 d 高于 3 d (表 1)。由表 1 可知,储藏 0 d 时相对含量大于

10% 的物质,随着储藏温度的不同和储藏时间的延长,相对含量呈现不同的变化;储藏 3 和 5 d 时均检测到一些储藏 0 d 时未检测到的挥发性物质,且部分物质的相对含量高于 10%,这些因素可能是甜玉米在储藏期间风味变差的原因。

常温储藏条件下主要检测到 9 类挥发性物质,包括烷烃类、酯类、烯烃类、醛类、酮类、芳香烃类、酚类、盐类和酰胺类;低温储藏条件下主要检测到 10 类挥发性物质,包括烷烃类、酯类、烯烃类、醛类、酮类、芳香烃类、酚类、盐类、酰胺类和醚类(表 2)。

表 2 常温和低温储藏条件下 3 个甜玉米品种挥发性风味成分的相对含量¹⁾

香气类别 Aroma class	奥弗兰 Aofulan		王朝 Wangchao		广良甜27 Guangliangtian 27	
	常温	低温	常温	低温	常温	低温
	Normal temperature	Low temperature	Normal temperature	Low temperature	Normal temperature	Low temperature
烷烃类 Alkanes	41.95	28.90	50.78	39.11	69.03	26.30
酯类 Esters	24.12	20.44	15.08	22.08	20.94	64.37
烯烃类 Olefins	19.75	27.19	2.53	3.85	—	—
醛类 Aldehydes	8.09	8.79	28.29	18.25	—	—
酮类 Ketones	—	1.70	—	—	4.47	1.49
芳香烃类 Arenes	4.46	11.26	0.93	0.93	—	5.39
酚类 Phenols	1.64	1.72	0.45	13.02	5.56	2.44
盐类 Salts	—	—	1.08	1.08	—	—
酰胺类 Amides	—	—	0.86	1.04	—	—
醚类 Ethers	—	—	—	0.63	—	—

1) “—” 表示未检测出
1) “—” indicates not detectable

甜玉米中挥发性物质的相对含量以烷烃类和酯类最高,为主要挥发性物质,但不同品种和不同储藏温度之间存在差异。常温储藏时‘奥弗兰’、‘王朝’和‘广良甜 27’的烷烃类物质相对含量最高;低温储藏时 3 个品种相对含量最高的物质却不同,‘奥弗兰’和‘王朝’烷烃类物质含量较高,而‘广良甜 27’酯类物质含量较高。常温储藏时‘奥弗兰’和‘广良甜 27’的主要挥发性物质为烷烃类和酯类,而‘王朝’的主要挥发性物质为烷烃类和醛类;低温储藏时‘王朝’和‘广良甜 27’的主要挥发性物质为烷烃类和酯类,而‘奥弗兰’的主要挥发性物质为烷烃类和烯烃类。

2.3 3 个甜玉米品种挥发性风味物质差异

本研究建立了不同甜玉米品种在常温和低温

储藏时挥发性物质相对含量的 PLS-DA 模型(图 3),更加直观地体现不同甜玉米品种在不同储藏条件下挥发性物质特点。常温和低温储藏条件下 PLS-DA 模型的得分图显示,常温储藏时 3 个甜玉米品种的不同储藏时间聚类性略差(图 3a),低温储藏时‘奥弗兰’、‘王朝’和‘广良甜 27’的不同储藏时间分别聚类在一起(图 3b)。常温和低温储藏时 PC1 均可以区分 3 个甜玉米品种的不同储藏时间。

通过变量重要性投影 (Variable importance projection, VIP) 分析每一个变量对 PLS-DA 模型的总体贡献度,以 VIP=1 为阈值。图 3c、3d 中,有数字代号的圆圈代表 VIP>1 的挥发性物质,没有数字代号的圆圈代表 VIP<1 的挥发性物质。常温条件下 VIP>1 的挥发性物质分别是 (+)-环苜蓿烯、正二

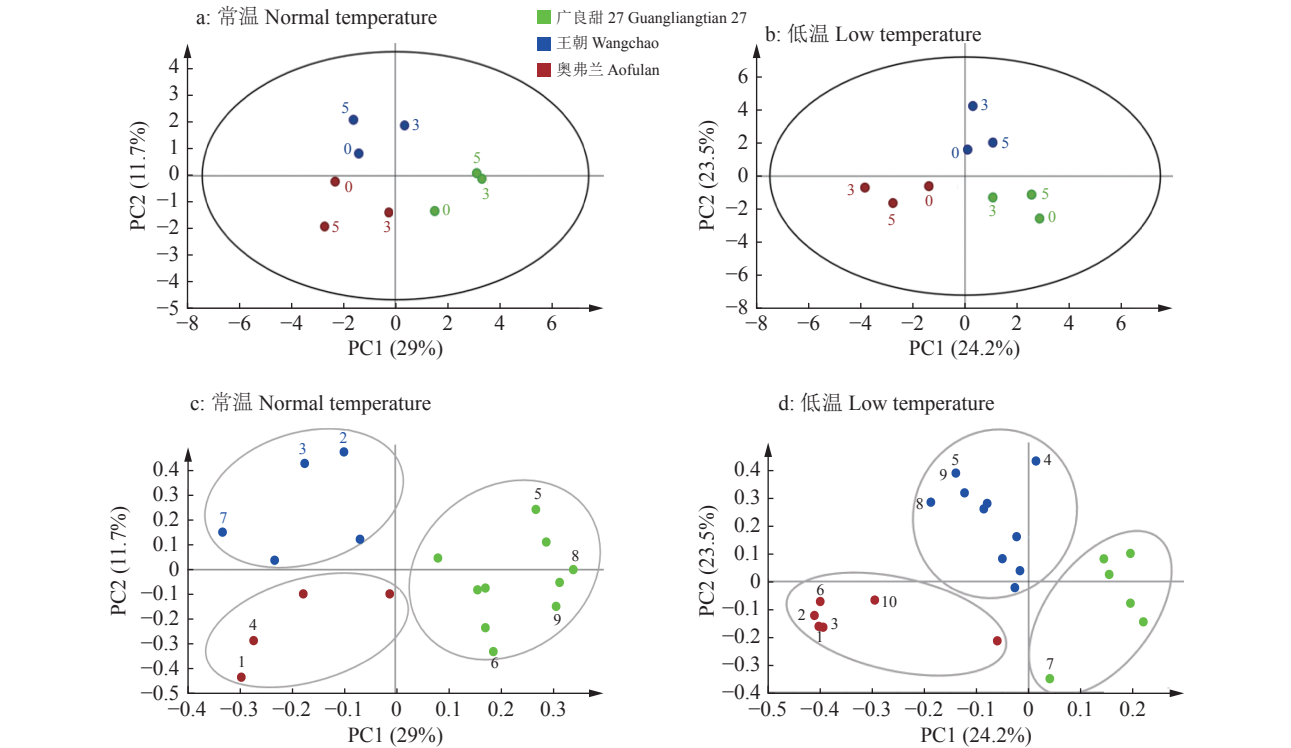


图 a, b 中, 圆点旁边的数字代表储藏天数; 图 c 中, 1: (+)-环苜蓿烯, 2: 正二十烷, 3: 壬醛, 4: (-)- α -蒎烯, 5: 3-甲基十五烷, 6: 3-甲基十三烷, 7: 正十七烷, 8: 4-甲基十一烷, 9: 正十二烷; 图 d 中, 1: α -衣兰油烯, 2: (+)-环苜蓿烯, 3: (-)- α -葑烯, 4: 正二十烷, 5: 9-甲基十九烷, 6: δ -杜松烯, 7: 2,4-二叔丁基酚, 8: 正癸醛, 9: 正十六烷, 10: 衣兰烯

In figure a and b, the number next to the dot indicates storage period; In figure c, 1: (+)-Cycloclofalene, 2: Eicosane, 3: Nonanal, 4: (-)- α -Pinene, 5: 3-Methylpentadecane, 6: 3-Methyltridecane, 7: n-Heptadecane, 8: 4-Methylundecane, 9: Dodecane; In figure d, 1: α -Muuroylene, 2: (+)-Cycloclofalene, 3: (-)- α -Cubebene, 4: Eicosane, 5: 9-Methylnonadecane, 6: δ -Cadinene, 7: 2,4-Ditert-butyl phenol, 8: Decanal, 9: n-Hexadecane, 10: Ylangene

图 3 低温和常温储藏时 3 个甜玉米品种的偏最小二乘分析

Fig. 3 Partial least squares discriminant analysis of three sweet corns under normal and low temperature storage

十烷、壬醛等, 低温条件下 VIP>1 的挥发性物质分别是 α -衣兰油烯、(+)-环苜蓿烯、(-)- α -葑烯油烯等 (表 3)。常温储藏时 ‘奥弗兰’ 的关键挥发性物质为 (+)-环苜蓿烯、(-)- α -蒎烯, ‘王朝’ 的为壬醛、正二十烷、正十七烷, ‘广良甜 27’ 的为正十

二烷、3-甲基十三烷、3-甲基十五烷、4-甲基十一烷 (图 3c); 低温储藏时, ‘奥弗兰’ 的关键挥发性物质为 (+)-环苜蓿烯、衣兰烯、 δ -杜松烯、(-)- α -葑烯油烯、 α -衣兰油烯, ‘王朝’ 的为 9-甲基十九烷、正二十烷、正十六烷、正癸醛, ‘广良甜 27’ 的

表 3 常温和低温储藏时偏最小二乘分析模型中 VIP>1 的挥发性物质

Table 3 Volatile substance of VIP>1 in partial least squares discriminant analysis model under normal temperature and low temperature storage

常温 Normal temperature			低温 Low temperature	
序号 Number	挥发性成分 Volatile substance	VIP	挥发性成分 Volatile substance	VIP
1	(+)-环苜蓿烯 (+)-Cycloclofalene	1.66	α -衣兰油烯 α -Muuroylene	1.43
2	正二十烷 Eicosane	1.45	(+)-环苜蓿烯 (+)-Cycloclofalene	1.43
3	壬醛 Nonanal	1.38	(-)- α -葑烯油烯 (-)- α -Cubebene	1.42
4	(-)- α -蒎烯 (-)- α -Pinene	1.23	正二十烷 Eicosane	1.41
5	3-甲基十五烷 3-Methylpentadecane	1.14	9-甲基十九烷 9-Methylnonadecane	1.37
6	3-甲基十三烷 3-Methyltridecane	1.14	δ -杜松烯 δ -Cadinene	1.35
7	正十七烷 n-Heptadecane	1.10	2,4-二叔丁基酚 2,4-Ditert-butyl phenol	1.15
8	4-甲基十一烷 4-Methylundecane	1.06	正癸醛 Decanal	1.14
9	正十二烷 Dodecane	1.04	正十六烷 n-Hexadecane	1.14
10			衣兰烯 Ylangene	1.00

为 2,4-二叔丁基酚(图 3d)。不同储藏条件不同品种均有其特异的关键挥发性物质,且‘奥弗兰’和‘王朝’在不同储藏条件下存在共有的特异关键挥发性物质,‘奥弗兰’为(+)-环苜蓿烯,‘王朝’为正二十烷。关键挥发性物质可能是造成不同甜玉米品种特异食用风味的原因之一。

2.4 关键挥发性风味物质的筛选及聚类分析

当 VIP>1 时,其相应的变量为影响模型的关键变量,VIP 越大,其相应变量总体贡献越大,在不同品种间差异越显著^[21]。本研究中,如图 3 所示,低温储藏时 3 个甜玉米品种的不同储藏时间分别聚类在一起,即‘广良甜 27’的不同储藏时间聚类在一起,‘王朝’的不同储藏时间聚类在一起,‘奥弗兰’的不同储藏时间聚类在一起,说

明 10 种关键挥发性物质可以区分 3 个甜玉米品种。常温储藏时 3 个甜玉米品种聚类性略差,‘奥弗兰’和‘王朝’的不同储藏时间未聚类到一起,这可能是常温储藏时甜玉米挥发性物质含量下降过快所致。

此外,关键挥发性物质的相对含量在不同品种间差异显著(图 4),常温储藏时不同品种间相对含量最高的关键挥发性物质均不同,‘奥弗兰’为(+)-环苜蓿烯,‘王朝’为壬醛,‘广良甜 27’为正十二烷;低温储藏时不同品种间相对含量最高的关键挥发性物质也不同,‘奥弗兰’为(+)-环苜蓿烯,‘王朝’为正十六烷,‘广良甜 27’为 2,4-二叔丁基酚。在不同储藏条件下,3 个甜玉米品种中仅有‘奥弗兰’相对含量最高的关键挥发性物质

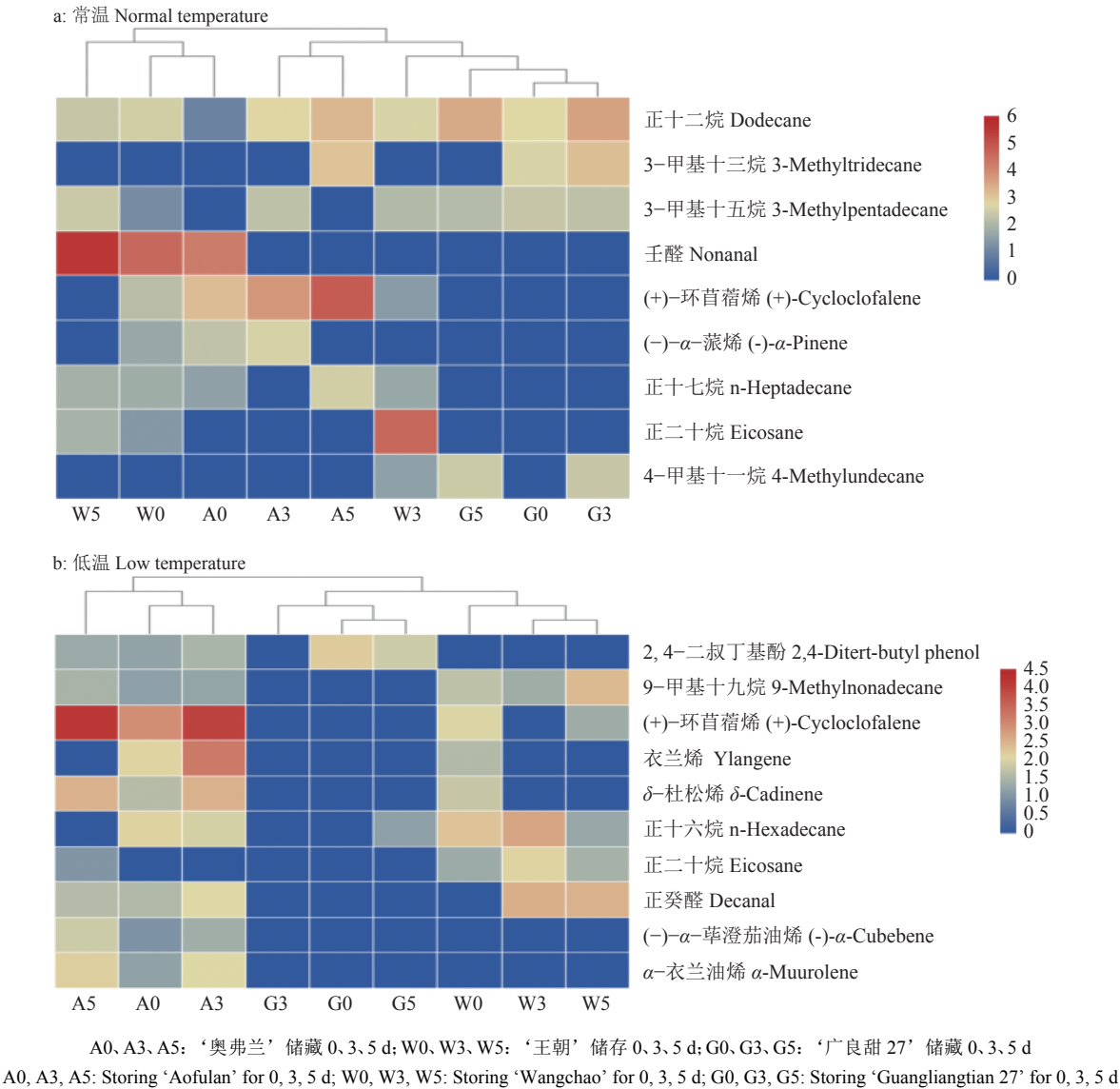


图 4 常温和低温储藏时 3 个甜玉米品种关键差异挥发性物质的聚类分析

Fig. 4 Cluster analysis of key aromatic volatile substances in three sweet corns under normal temperature and low temperature storage

相同;在相同储藏条件下,3 个甜玉米品种间相对含量最高的关键挥发性物质均不同。随着储藏时间的延长,常温储藏时不同品种相对含量最高的关键挥发性物质含量迅速增加,但低温储藏时仅有‘奥弗兰’迅速增加,‘王朝’和‘广良甜 27’均变化不明显。因此,在储藏期间相对含量迅速变化的关键挥发性物质可能是引起甜玉米挥发性物质差异的原因之一,同时储藏条件可能也会影响挥发性物质的变化。

3 讨论与结论

可溶性固形物含量是评价果蔬类食品风味的重要指标之一^[17],是甜玉米食用品质的重要组成部分。可溶性固形物含量越低,其风味品质越差^[22-23]。本研究结果显示,不同甜玉米品种在不同贮藏条件下的可溶性固形物含量均存在明显差异,低温和常温贮藏 0 和 5 d 的‘奥弗兰’、‘王朝’和‘广良甜 27’,可溶性固形物的含量均差异显著,说明不同甜玉米品种储藏至 5 d 时,可溶性固形物含量均已显著降低;低温和常温贮藏 0 和 3 d 的‘奥弗兰’,可溶性固形物含量均差异不显著,说明‘奥弗兰’储藏至 3 d 时,储藏温度对可溶性固形物含量影响不显著;‘王朝’和‘广良甜 27’低温储藏 0 和 3 d 的可溶性固形物含量均差异不显著,但常温储藏却差异显著,说明‘王朝’和‘广良甜 27’储藏至 3 d 时,储藏温度和时间是引起甜玉米可溶性固形物含量下降的重要原因。与常温储藏相比,低温储藏可能延缓了可溶性固形物含量的下降,因此,储藏温度和储藏时间可能在保持甜玉米风味品质中发挥重要作用。另外,在相同储藏温度和时间下,不同甜玉米品种的可溶性固形物含量也存在差异,这可能是由品种间的特异性引起的。

挥发性风味成分是评价甜玉米食用品质的重要评价指标,目前玉米中已鉴定出醇类、芳香烃、醛类、烷烃、烯烃等多种挥发性成分,且在不同储藏温度下存在差异^[24]。在本研究中,烷烃类和酯类物质是构成甜玉米挥发性风味物质的主要成分,不同品种间存在一定的差异性,常温储藏条件下‘广良甜 27’中的烷烃类和酯类物质占比接近 90%,而‘奥弗兰’‘王朝’中的烷烃类和酯类物质占比接近 70%;低温储藏时‘广良甜 27’中的烷烃类和酯类物质占比 90.67%,‘王朝’占比 61.19%,而‘奥弗兰’低于 50%。‘王朝’在常温储藏时醛类物质含量超过 28%,‘奥弗兰’中

含量很低,‘广良甜 27’未检测到;而‘奥弗兰’在低温储藏下烯烃类物质含量超过 27%,‘王朝’中含量很低,‘广良甜 27’未检测到。因此,不同品种有共有的 8 种挥发性成分(3,8-二甲基癸烷、3-甲基十一烷、正十二烷、十四烷、3-甲基十五烷、十六酸乙酯、正十九烷和正十六烷),又有其独特的挥发性成分,这种独特的挥发性成分可能是造成不同甜玉米品种间风味物质差异的原因。PLS-DA 是一种用于判别分析的多变量统计分析方法^[19]。本试验通过 PLS-DA 模型鉴定的关键差异挥发性成分,在不同品种间也具有明显的差异。该结果与前人在其他植物上的研究一致,不同品种间有相似的挥发性物质^[13, 25],也存在着差异挥发性物质,且相对含量也具有一定差异^[10, 21, 24, 26-29]。对 3 个甜玉米品种关键差异挥发性成分的聚类分析发现,低温储藏时‘奥弗兰’、‘王朝’和‘广良甜 27’的不同储藏时间分别聚类在一起,常温储藏时聚类性略差,‘奥弗兰’和‘王朝’的不同储藏时间未聚类到一起,这可能是常温储藏时甜玉米挥发性物质含量下降过快所致。

影响果蔬挥发性风味物质释放的因素很多,贮藏温度或预处理均会对挥发性化合物产生显著影响^[10]。有关甜玉米储藏期间挥发性物质变化的研究还处于初级阶段,但在其他蔬果中已有大量报道,例如,与在常温下储存的水果相比,低温储存的西红柿主要挥发性化合物含量显著降低,有助于风味的糖和酸却不受低温存储的影响^[30]。但是与前人不同的是,在本研究中甜玉米可溶性固形物(糖、酸等)含量受低温储藏影响,这可能是物种差异所致。

本研究揭示了不同甜玉米品种在不同储藏温度 and 不同储藏时间下可溶性固形物含量和挥发性物质的差异,但引起不同品种间可溶性固形物含量和挥发性物质差异的其他原因有待进一步深入研究。因此,仍需在此基础上,从分子机制方面入手,解析关键挥发性成分的生物合成途径,寻找关键调控候选基因,为甜玉米育种奠定基础。

参考文献:

[1] BUTRÓN A, ÁLVAREZ A, REVILLA P, et al. Agromonic performance of sweetcorn populations derived from crosses between sweetcorn and field corn[J]. [Spanish Journal of Agricultural Research](#), 2008, 6(3): 378-384.

[2] JHA S K, SINGH N K, AGRAWAL P K. Complementation of sweet corn mutants: A method for grouping sweet

- corn genotypes[J]. *Journal of Genetics*, 2016, 95(1): 183-187.
- [3] 周雪岩. 河北省鲜食玉米需求研究——基于消费者购买意愿的调研[D]. 保定: 河北农业大学, 2019.
- [4] 吴燕丽. 广东省鲜食玉米产业发展现状与对策研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2008.
- [5] 司洋. 浅谈甜玉米产业的发展动向[J]. 农业科技通讯, 2019(1): 12-14.
- [6] REHMAN Z U, HABIB F, ZAFAR S I. Nutritional changes in maize (*Zea mays*) during storage at three temperatures[J]. *Food Chemistry*, 2002, 77(2): 197-201.
- [7] HUYGHEBAERT G, SCHÖNER F J. Influence of storage and addition of enzyme on metabolisable energy content of wheat 1: Impact of storage and enzyme addition[J]. *Archiv fuer Gefluegelkunde*, 1999, 63(1): 13-20.
- [8] 张进忠, 王金水, 周长智, 等. 不同储藏条件下小麦蛋白质变化研究[J]. 郑州粮食学院学报, 1997, 18(4): 72-76.
- [9] LAMA K, ALKALAI-TUVIA S, PERZELAN Y, et al. Nutritional qualities and aroma volatiles of harvested red pepper fruits stored at suboptimal temperatures[J]. *Scientia Horticulturae*, 2016, 213: 42-48.
- [10] LIU B, JIAO W, WANG B, et al. Near freezing point storage compared with conventional low temperature storage on apricot fruit flavor quality (volatile, sugar, organic acid) promotion during storage and related shelf life[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 249: 100-109.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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: 南京师范大学, 2013.
- [14] KUMAR R, SINGH R. Levels of free sugars, intermediate metabolites and enzymes of sucrose-starch conversion in developing wheat grains[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1984, 32(4): 806-808.
- [15] SOUTH J B, MORRISON W R, NELSON O E. A relationship between the amylose and lipid contents of starches from various mutants for amylose content in maize[J]. *Journal of Cereal Science*, 1991, 14(3): 267-278.
- [16] ONIGBINDE A O, AKINYELE I O. Biochemical and nutritional changes in corn (*Zea mays*) during storage at three temperatures[J]. *Journal of Food Science*, 1988, 53(1): 117-119.
- [17] 张鹏, 陈帅帅, 李江阔, 等. 不同品种苹果采后品质和挥发性物质的差异分析[J]. 食品工业科技, 2019, 40(13): 154-160.
- [18] 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.
- [19] PÉREZ-ENCISO M, TENENHAUS M. Prediction of clinical outcome with microarray data: A partial least squares discriminant analysis (PLS-DA) approach[J]. *Human genetics*, 2003, 112(5/6): 581-592.
- [20] CHEN C, CHEN H, ZHANG Y, et al. TBtools: An integrative toolkit developed for interactive analyses of big biological data[J]. *Molecular Plant*, 2020, 13(8): 1194-1202.
- [21] 施婷婷, 杨秀莲, 王良桂. 3 个桂花品种花香组分动态特征及花被片结构解剖学观测[J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2020, 44(4): 12-20.
- [22] 郝麒麟, 黄先智, 贺燕, 等. 基于主成分分析法评价巫山脆李食用品质[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(19): 251-257.
- [23] 邱利娜, 刘学琦, 廖明安, 等. 22 个脆李资源果实性状比较研究[J]. 中国果树, 2015(5): 28-31.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 金荷仙, 郑华, 金幼菊, 等. 杭州满陇桂雨公园 4 个桂花品种香气组分的研究[J]. *林业科学研究*, 2006, 19(5): 612-615.
- [27] 邹晶晶, 蔡璇, 曾祥玲, 等. 桂花不同品种开花过程中香气活性物质的变化[J]. 园艺学报, 2017, 44(8): 1517-1534.
- [28] 高基朋, 李丹丹, 秦岭, 等. 3 种香薷属植物叶花果挥发性成分比较分析[J]. 北京农学院学报, 2020, 35(4): 108-114.
- [29] AUBERT C, CHALOT G, LUROL S, et al. Relationship between fruit density and quality parameters, levels of sugars, organic acids, bioactive compounds and volatiles of two nectarine cultivars, at harvest and after ripening[J]. *Food Chemistry*, 2019, 297: 124954. doi: 10.1016/j.foodchem.2019.124954.
- [30] ZHANG B, TIEMAN D M, JIAO C, et al. Chilling-induced tomato flavor loss is associated with altered volatile synthesis and transient changes in DNA methylation[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(44): 12580-12585.