

油桃采后结合态香气变化规律及其与可溶性糖的关联性

张 琴, 周丹丹, 彭 菁, 潘磊庆, 屠 康*
(南京农业大学食品科学技术学院, 江苏 南京 210095)

摘 要: 以‘瑞光1号’油桃为研究对象, 研究其采后常温(20 ℃)和低温(1 ℃)贮藏下游离态和结合态香气物质变化规律。采用酶解法释放结合态香气物质, 利用顶空固相微萃取法结合气相色谱-质谱联用对油桃游离态和结合态香气物质分别进行定性和定量分析, 并研究结合态香气物质与可溶性糖之间的相关性。结果表明, 油桃果实常温 and 低温贮藏条件下游离态和结合态香气物质种类存在很大差异。常温贮藏下检测到油桃中游离态香气物质37种, 结合态香气物质30种, 其中8种物质以游离态和结合态2种形式存在。游离态香气物质第4天下降至最低值后第6天有所上升, 第8天含量有所下降, 结合态香气物质第6天降至最低值后第8天有所上升。低温贮藏下检测到游离态香气物质21种, 结合态香气物质32种, 其中7种物质以游离态和结合态2种形式存在。随着低温贮藏时间延长, 游离态香气物质含量下降, 结合态香气物质呈现先上升后下降的趋势。相关性分析表明结合态香气物质含量与果实中可溶性糖含量之间显著相关, 与蔗糖的相关系数最高。

关键词: 油桃; 游离态香气物质; 结合态香气物质; 可溶性糖; 气相色谱-质谱联用

Changes of Bound Aroma Compounds and Their Relationship between Soluble Sugars in Nectarines during Postharvest Storage

ZHANG Qin, ZHOU Dandan, PENG Jing, PAN Leiqing, TU Kang*
(College of Food Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Changes of free and glycosidically bound aroma compounds in ‘Ruiguang 1’ nectarines were investigated during postharvest storage at room temperature (20 ℃) or low temperature (1 ℃). Enzymatic hydrolysis was used to release the bound aroma compounds. Headspace solid-phase microextraction (HS-SPME) combined with gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) was used for qualitative and quantitative analysis of the free and bound aroma compounds in nectarines. The correlation between bound aroma compounds and soluble sugars was studied. Results showed that the compositions of free and bound aroma compounds were significantly different in nectarines stored at 20 ℃ and 1 ℃. In nectarines storage at 20 ℃, a total of 37 free aroma compounds and 30 bound ones were identified, of which, 8 compounds were detected in both free and bound forms. The free aromas decreased until day 4 and then increased until day 6 but decreased again on day 8. The bound aromas decreased to the minimum on day 6 then increased on day 8. In nectarines stored at 1 ℃, a total of 21 free aroma compounds and 32 bound ones were identified, of which, 7 compounds existed in both free and bound forms. The free aromas decreased with storage time, while the bound aromas increased at the beginning and then decreased. Correlation analysis showed a significant correlation between the bound aromas and the soluble sugars, especially sucrose, showing the highest correlation coefficient.

Keywords: nectarine; free aroma compounds; bound aroma compounds; soluble sugar; gas chromatography-mass spectrometry

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20200317-261

中图分类号: TS255.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2021)06-0206-09

收稿日期: 2020-03-17

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(32072269); 江苏省2018年研究生研究与实践创新计划项目(KYCX18_0723)

第一作者简介: 张琴(1995—)(ORCID: 0000-0002-9739-5955), 女, 硕士, 研究方向为农产品贮藏与加工。

E-mail: 2018108049@njau.edu.cn

*通信作者简介: 屠康(1968—)(ORCID: 0000-0003-4314-2896), 男, 教授, 博士, 研究方向为农产品贮藏与加工。

E-mail: kangtu@njau.edu.cn

引文格式:

张琴, 周丹丹, 彭菁, 等. 油桃采后结合态香气变化规律及其与可溶性糖的关联性[J]. 食品科学, 2021, 42(6): 206-214.

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20200317-261. <http://www.spkx.net.cn>

ZHANG Qin, ZHOU Dandan, PENG Jing, et al. Changes of bound aroma compounds and their relationship between soluble sugars in nectarines during postharvest storage[J]. Food Science, 2021, 42(6): 206-214. (in Chinese with English abstract)

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20200317-261. <http://www.spkx.net.cn>

果实在生长发育过程中形成多种香气物质, 对果实风味品质有很大影响。水果中香气物质一般以游离态和结合态2种形式存在。游离态香气物质具有挥发性, 嗅觉容易感知。结合态香气物质也称键合态香气物质, 是一类不具有挥发性的香气前体物质, 一般与糖类物质通过糖苷键结合, 以糖苷形式存在^[1]。大多数香气物质可作为结合态香气物质形成的糖苷配基, 主要是含有羟基的香气物质, 如萜烯类物质、C₁₃-降异戊二烯类物质、苯的衍生物、羟基酯类以及一些C₆醇类物质^[2], 在糖基转移酶的作用下与糖分子结合形成糖苷键。在果实发育过程中, 结合态香气物质不断积累, 在成熟阶段达到最高值。Gao Jie等^[3]研究不同成熟阶段摩萨柑橘结合态香气物质的区别, 结果表明柑橘在开花后150 d结合态香气物质的浓度增加, 开花后190 d到达峰值, 在成熟阶段含量下降。Lalel等^[4]研究结果表明芒果果肉中大多数结合态香气物质在成熟过程中增加。另一方面, 在糖苷酶作用下糖苷的水解也可能在果实成熟发育过程中发生, 释放可增强水果风味的挥发性化合物^[5]。糖苷配基与糖分子形成的结合态香气物质贮存在植物液泡内, 在生长发育过程或受到外界刺激时, 会被酸解或被糖苷水解酶催化, 使糖苷键断裂, 分解为具有挥发性的游离态形式进而释放^[6]。果实成熟后, 细胞壁的完整性会随着果实的软化而下降, 贮藏果实液泡中的结合态香气物质与β-葡萄糖苷酶接触, β-葡萄糖苷酶可以催化水解芳基或烃基与糖基原子团之间的糖苷键生成葡萄糖, 将结合态香气转变成游离态释放出来。也有研究者认为β-葡萄糖苷酶的活性在果实成熟期间会上升, 导致糖苷中的挥发物释放^[7]。

结合态香气物质的形成是糖基转移酶催化的糖基化反应, 结合态香气物质的糖基部分一般为β-D-葡萄糖苷或双糖苷。奕志英等^[8]采用高效液相色谱(high performance liquid chromatography, HPLC)分析检测到石榴汁中游离单糖以葡萄糖和果糖为主, 石榴汁经过酶解后, 葡萄糖和果糖的含量都有所增加, 实验结果也表明可溶性糖和结合态香气物质之间可能具有关联性。萜烯类物质包括单萜、倍半萜和倍半萜等, 是容易形成结合态香气的糖苷配基。油桃果实香气物质合成途径中异戊二烯途径是形成桃果实“花香型”香气物质的主要途径, 该途径可以合成芳樟醇、萜烯醇、萜品烯等萜类和β-紫罗兰酮等C₁₅-脱辅基类胡萝卜素类香气物质^[9]。油桃

果实中萜类物质丰富, 这些物质易与糖苷结合形成结合态香气物质。目前的研究多关注果实发育过程中结合态香气物质变化, 油桃果实采后结合态香气变化研究较少, 可溶性糖与结合态香气物质之间的关联机制尚不清楚。

实验以‘瑞光1号’油桃为研究对象, 对其游离态和结合态香气物质进行定性定量分析, 研究油桃采后常温和低温贮藏下游离态和结合态香气物质变化的规律与差异性, 并利用HPLC技术研究油桃果实采后可溶性糖的变化, 探讨结合态香气物质和可溶性糖之间的关联机制。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

‘瑞光1号’油桃(*Prunus persica* L. Batsch cv. Ruiguang 1), 摘自南京六合区新篁镇经济林果基地; SPE LC-18固相萃取柱(500 mg/6 mL) 德国CNW公司; β-葡萄糖苷酶, 葡萄糖、果糖、蔗糖标准品 上海源叶生物科技有限公司; 甲醇、二氯甲烷、丙酮、正己烷、无水乙醇等均为国产分析纯。

1.2 仪器与设备

7890A-5975C MSD气相色谱-质谱联用仪、Model 1260 HPLC系统、HP-5色谱柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm) 美国Agilent公司; CTHI-250B型恒温恒湿箱 施都凯仪器设备(上海)有限公司; HH-4数显恒温水浴锅、BS-1E型振荡培养箱 常州国华电器有限公司; UV1800紫外-可见分光光度计 日本岛津公司; CR-10型便携式色差仪 日本Minolta公司; TMS-Pro质构仪 美国FTC公司; YY-N100-1氮吹仪 上海允延仪器有限公司; RE-2000A旋转蒸发器 上海亚荣生化仪器厂; 3K15冷冻离心机 德国Sigma公司。

1.3 方法

1.3.1 油桃品质指标测定

油桃选择生理成熟度一致、无病害和无机械损伤的八成熟果实300个, 散除田间热后将样品分别在常温(20±0.5)℃(模拟货架期)和低温(1±0.5)℃贮藏, 常温贮藏8 d, 每隔2 d取样。低温贮藏35 d, 每隔7 d取样。每组3个重复, 每个重复10个油桃果实。取样时果肉切碎后立即用液氮研磨, 置于-80℃超低温冰箱。

L^* 、 a^* 和 b^* 值采用便携式色差仪测定,选取油桃赤道部位对称的3个点进行测定,每组测10个果实,其中 L^* 值代表亮度, a^* 值代表红绿, b^* 值代表黄蓝;硬度采用TMS-Pro质构仪测定,选用直径6 mm的圆柱探头,测试速率为1 mm/s,穿刺深度为5 mm,每组测10个果实,每个果实测3次;可溶性固形物(soluble solid content, SSC)含量采用PAL-1型数显折光仪测定;可滴定酸(titratable acid, TA)含量采用酸度计测定;VC含量采用分光光度法测定^[10];类胡萝卜素含量参考Peng Jing等^[11]的方法测定。

1.3.2 油桃果实可溶性糖含量测定

采用Zhou Dandan等^[12]方法测定并稍作修改。称取2 g液氮中研磨成的粉末,加入30 mL蒸馏水混匀后80 °C水浴提取1 h,悬液恢复室温后8 000 ×g离心20 min。上清液0.45 μm微孔膜过滤,过滤后的溶液用于可溶性糖分析。可溶性糖采用配备有蒸发光散射检测器的HPLC仪测定,进样20 μL,经过氨基柱分离(柱温40 °C)后于检测器进行测定。流动相采用乙腈-超纯水(75:25, V/V),流速0.8 mL/min。

1.3.3 油桃果实中游离态香气物质的萃取

参考Zhou Dandan等^[13]方法并稍作修改。称取液氮研磨后的油桃粉末5 g放入20 mL的顶空瓶中,加入1 g NaCl以促进香气挥发,再加入10 μL内标物3-辛醇,立即用聚四氟乙烯/硅橡胶隔垫密封。置于45 °C的水浴锅内平衡5 min后使用预先老化的萃取头插入顶空瓶上方萃取45 min,缩回纤维头,立即插入进样口解吸5 min。

1.3.4 油桃果实中结合态香气物质的提取

采用Gao Jie等^[3]的方法并稍作修改。称取液氮研磨后的油桃粉末20 g至装有100 mL蒸馏水的烧杯,匀浆后4 °C、10 000 r/min离心20 min,得到上清液。量取25 mL上清液流经用10 mL甲醇和10 mL蒸馏水处理过的固相萃取柱,接着用30 mL蒸馏水洗去可溶性糖、酸以及其他低分子质量的极性化合物。然后用35 mL二氯甲烷洗脱游离态香气物质,接着用35 mL甲醇洗脱吸附在柱子上的结合态香气物质,收集甲醇部分,在旋转蒸发器上(水浴温度35 °C)浓缩至1~2 mL,接着氮吹至干。用1.8 mL柠檬酸-磷酸盐缓冲液(pH 5, 0.2 mol/L)溶解,再用9 mL二氯甲烷分5次萃取以除去可能残余的游离态香气物质,水相备用。

1.3.5 油桃中结合态香气物质的酶解释放

准确称取15 mg β-葡萄糖苷酶(15 U/mg),然后注入上述得到的水相,立即用聚四氟乙烯/硅橡胶隔垫密封,置于37 °C水浴锅中保温水解48 h,结合态香气物质转化为游离态形式。加入10 μL的3-辛醇作为内标。将释放后的游离挥发物萃取后进行气相色谱-质谱分析。

1.3.6 气相色谱-质谱分析

气相色谱条件:HP-5石英毛细柱(30 m×0.25 mm,

0.25 μm);升温程序:起始温度40 °C,保持2 min,以3 °C/min升至150 °C,保持2 min,再以10 °C/min升至250 °C,保持2 min;载气(He)流量为1.0 mL/min;采用不分流模式进样。

质谱条件:电子电离源;电子能量70 eV;离子源温度250 °C;四极杆温度150 °C;辅助加热温度250 °C;质量扫描范围 m/z 30~450。

1.3.7 香气物质的定性定量分析

定性:将化合物的质谱图与NIST文库(NIST 2008)进行比较,并结合人工图谱分析以确定各化学成分。

定量:采用内标法。以3-辛醇作为内标,按下式计算含量:

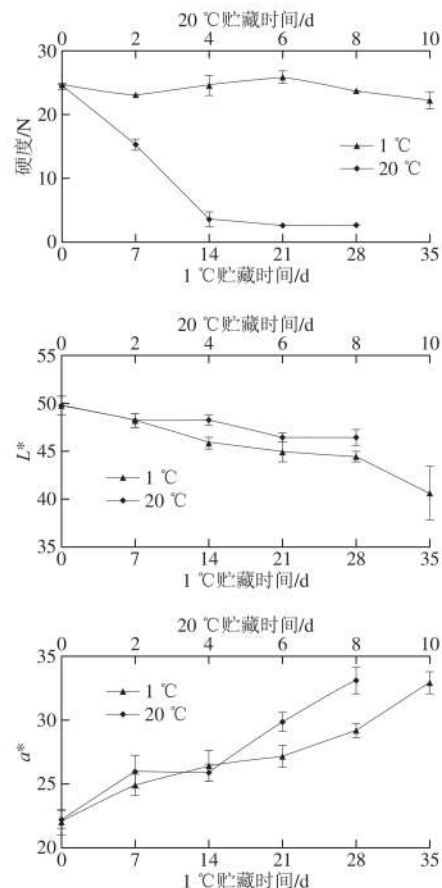
$$\text{各挥发性成分含量}/(\mu\text{g}/\text{kg}) = \frac{\text{各组分峰面积} \times \text{内标物质量}/\mu\text{g}}{\text{内标峰面积} \times \text{样品质量}/\text{kg}}$$

1.4 数据处理

实验数据采用SAS 9.2软件进行统计处理,差异显著性采用Duncan多重比较检验, $P < 0.05$,差异显著。利用Pearson相关系数进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 油桃品质指标变化



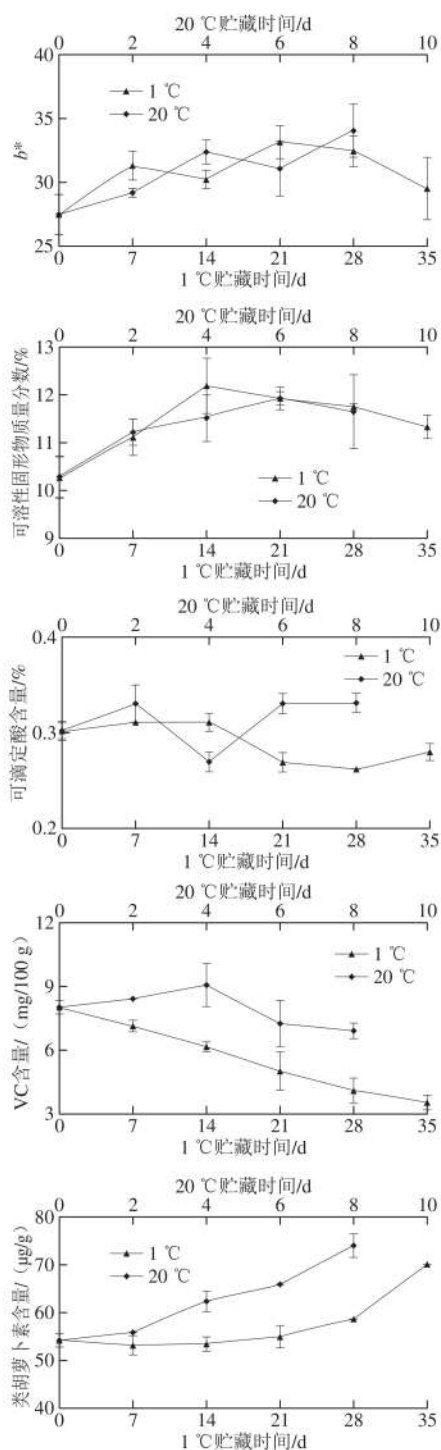


图1 油桃在常温和低温贮藏下品质变化
Fig.1 Changes in quality traits of nectarines stored at room temperature and low temperature

由图1可知,油桃常温贮藏下由于乙烯的作用迅速软化,贮藏至第4天硬度下降了22.01 N,下降幅度为86%,第4天以后硬度下降较小。低温贮藏期间软化速率很慢,贮藏前期硬度变化不大,贮藏后期硬度逐渐变小。常温和低温贮藏下色泽指标L*值均呈下降趋势,表明果皮

亮度不断下降。a*值均呈现上升趋势,随着贮藏时间延长,果皮颜色红色不断加深,常温贮藏时b*值大致呈现上升趋势,低温下第21天上升至最高值后下降。常温贮藏期间可溶性固形物含量总体呈现上升趋势,低温贮藏下可溶性固形物含量上升至第21天后呈现下降趋势。常温贮藏期间可滴定酸含量变化不大,第4天含量降至最低值,之后可滴定酸含量上升。低温贮藏期间可滴定酸含量总体呈现下降趋势,第35天微量上升。油桃VC含量在常温贮藏期间呈现先上升后下降趋势,第4天含量达到最高值9.03 mg/100 g,低温贮藏期间含量呈下降趋势。类胡萝卜素含量在常温和低温贮藏时均呈现上升趋势。

2.2 油桃果实可溶性糖含量变化

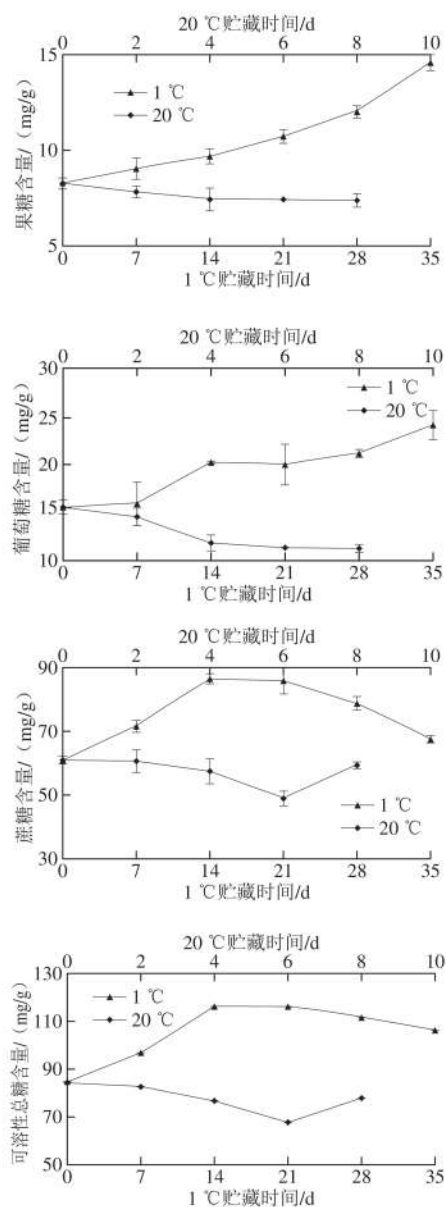


图2 油桃果实中可溶性糖含量变化
Fig.2 Changes of soluble sugars in nectarine fruit

表1 油桃常温和低温贮藏期间游离态香气物质含量变化
Table 1 Changes of free aroma compounds of nectarine during room and low temperature storage

种类	香气成分	μg/kg											
		20 °C					1 °C						
		第0天	第2天	第4天	第6天	第8天	第0天	第7天	第14天	第21天	第28天	第35天	
醇类	正己醇	17.2±4.87 ^a	26.0±7.5 ^a	48.8±1.6 ^b	62.5±8.4 ^{ab}	71.3±3.9 ^a	17.2±4.8 ^b	20.1±5.8 ^b	—	28.1±4.4 ^a	—	16.2±4.3 ^b	
	芳樟醇	68.3±12.1 ^a	39.1±5.0 ^b	21.5±1.7 ^c	16.8±1.6 ^{cd}	5.6±1.6 ^d	68.3±12.1 ^a	2.4±0.2 ^b	1.3±0.1 ^b	1.0±0.5 ^b	1.0±0.2 ^b	0.8±0.1 ^b	
	(E)-2-己烯-1-醇	7.7±1.8 ^b	3.6±0.2 ^c	6.8±0.2 ^b	9.9±0.3 ^a	10.5±0.1 ^a	7.7±1.8 ^{ab}	7.1±1.0 ^{ab}	8.1±1.0 ^a	6.8±1.6 ^{ab}	5.3±1.0 ^b	—	
	1-辛烯-3-醇	0.4±0.2 ^b	—	0.4±0.04 ^b	0.8±0.1 ^a	0.7±0.15 ^a	0.4±0.2	—	—	—	—	—	
	α-松油醇	0.3±0.1 ^b	0.7±0.0 ^a	0.5±0.1 ^b	0.4±0.0 ^b	—	0.3±0.1	—	—	—	—	—	
	2-乙基己醇	0.8±0.2 ^c	0.6±0.3 ^c	1.0±0.1 ^b	1.3±0.4 ^b	2.5±0.3 ^b	0.8±0.2	—	—	—	—	—	
	丙酮醇	—	—	2.3±0.6 ^b	9.6±1.1 ^a	11.4±1.5 ^a	—	—	—	—	—	—	
	共计	94.7	70.0	81.3	101.3	102.0	94.7	29.6	9.4	35.9	6.3	17.0	
	醛类	苯甲醛	22.9±1.7 ^a	11.0±2.4 ^d	10.6±0.8 ^e	24.9±2.5 ^d	18.6±0.8 ^b	22.9±1.7 ^b	32.1±3.7 ^b	41.4±20.0 ^b	74.5±5.1 ^a	86.9±3.4 ^a	72.4±3.4 ^a
苯乙醛		0.2±0.0 ^a	0.2±0.0 ^a	—	—	—	0.2±0.0 ^b	0.5±0.1 ^b	0.6±0.1 ^b	2.1±0.9 ^a	2.1±0.3 ^a	2.5±0.6 ^a	
正己醛		239.6±44.0 ^a	142.9±7.2 ^{ab}	130.5±12.7 ^{ab}	231.3±18.7 ^{ab}	156.7±6.7 ^b	239.6±44.0 ^a	175.6±43.4 ^{ab}	170.5±69.0 ^{ab}	157.3±18.5 ^{ab}	144.6±2.9 ^b	129.6±8.0 ^b	
2,4-己二烯醛		1.3±0.4 ^d	0.2±0.1 ^b	—	—	—	1.3±0.4 ^d	10.6±3.8 ^a	7.1±2.6 ^a	6.0±1.2 ^a	7.0±1.9 ^a	5.5±0.6 ^a	
2-己烯醛		392.0±64.5 ^a	322.8±12.8 ^b	237.3±20.0 ^b	350.2±33.0 ^a	251.1±41.6 ^b	392.0±64.5 ^a	358.7±48.8 ^a	328.6±53.3 ^{ab}	312.9±13.1 ^{ab}	250.2±31.6 ^{bc}	220.4±16.3 ^c	
反-2-辛烯醛		1.6±0.3 ^a	0.6±0.1 ^b	0.5±0.1 ^b	0.6±0.2 ^b	—	1.6±0.3 ^{ab}	1.1±0.2 ^b	1.3±0.0 ^b	2.0±0.6 ^a	2.0±0.2 ^a	1.3±0.4 ^a	
反式-2-壬醛		1.6±0.3 ^b	1.2±0.5 ^b	1.1±0.2 ^b	1.3±0.1 ^b	2.6±0.3 ^b	1.6±0.3 ^{bc}	0.8±0.2 ^c	1.3±0.7 ^{bc}	3.3±0.8 ^a	2.6±0.6 ^{ab}	1.6±0.3 ^{bc}	
反式-2,6-壬二醛		0.7±0.1 ^a	0.3±0.0 ^b	—	—	—	0.7±0.1 ^b	0.9±0.3 ^b	0.8±0.4 ^b	1.2±0.4 ^{ab}	1.9±0.6 ^a	—	
壬醛		5.1±0.4 ^a	1.4±0.3 ^c	1.4±0.0 ^d	3.0±0.5 ^b	3.5±0.0 ^b	5.1±0.4 ^a	4.0±0.9 ^{ab}	3.5±0.6 ^b	4.2±0.2 ^{ab}	3.1±0.5 ^{bc}	2.0±0.3 ^c	
癸醛		1.2±0.1 ^a	1.1±0.4 ^a	0.8±0.1 ^{ab}	0.4±0.2 ^b	—	1.2±0.1 ^{ab}	1.1±0.3 ^{ab}	1.0±0.0 ^b	1.5±0.4 ^{ab}	1.8±0.6 ^a	1.4±0.3 ^{ab}	
桃醛		1.1±0.2 ^b	0.8±0.3 ^b	1.4±0.4 ^b	6.6±1.0 ^a	—	1.1±0.2	—	—	—	—	—	
椰子醛		—	—	0.3±0.1 ^c	0.9±0.2 ^b	1.5±0.1 ^a	—	—	—	—	—	—	
5-羟甲基糠醛		—	0.9±0.0 ^f	1.3±0.2 ^e	22.5±6.3 ^b	57.2±3.5 ^a	—	—	—	—	—	—	
共计		667.3	483.4	385.2	641.7	491.2	667.3	585.4	556.1	665.0	502.2	436.7	
酯类		乙酸己酯	18.3±2.5 ^c	9.4±0.1 ^f	10.4±2.9 ^e	28.5±1.6 ^b	43.2±9.1 ^a	18.3±2.5 ^c	7.6±0.7 ^c	11.4±2.0 ^{bc}	13.6±4.1 ^{ab}	2.8±0.8 ^d	2.0±0.3 ^d
		乙酸叶醇酯	29.7±4.0 ^b	33.7±4.6 ^b	24.8±2.7 ^b	—	46.4±5.1 ^a	29.7±4.0 ^b	24.9±7.5 ^a	11.0±2.1 ^b	—	—	—
	苯甲酸甲酯	0.5±0.0	—	—	—	—	0.5±0.0 ^b	0.8±0.3 ^b	0.5±0.2 ^b	2.3±0.3 ^a	2.1±0.3 ^a	2.3±0.8 ^a	
	(E)-3-己烯-1-醇乙酸酯	—	25.5±1.8 ^e	48.5±9.2 ^b	72.1±2.7 ^a	—	—	—	—	—	—	—	
	乙酸反-2-己烯酯	25.1±5.7 ^a	29.4±3.3 ^b	23.2±4.4 ^a	15.0±2.9 ^b	17.7±3.8 ^{ab}	25.1±5.7	—	—	—	—	—	
	共计	73.6	98.0	106.9	115.6	107.3	73.6	33.3	22.9	15.9	4.9	4.3	
内酯	δ-癸内酯	1.3±0.1 ^b	3.9±0.7 ^b	16.6±2.4 ^b	75.8±16.2 ^a	49.9±4.7 ^a	1.3±0.1 ^a	0.6±0.2 ^b	—	1.8±0.2 ^a	0.5±0.3 ^b	—	
	γ-己内酯	1.6±0.2 ^c	1.6±0.0 ^f	3.4±1.1 ^b	11.2±0.6 ^a	11.3±0.4 ^a	1.6±0.2 ^b	2.4±0.6 ^{ab}	1.8±0.4 ^b	2.4±0.0 ^{ab}	3.2±0.8 ^a	2.5±0.8 ^{ab}	
	γ-癸内酯	1.8±0.8 ^c	5.5±0.2 ^a	38.3±1.0 ^f	167.5±26.0 ^a	123.8±22.6 ^b	1.8±0.8	—	—	—	—	—	
	γ-辛内酯	—	0.2±0.0 ^d	1.2±0.3 ^c	2.0±0.5 ^b	5.0±0.1 ^a	—	—	—	—	—	—	
	δ-辛内酯	—	—	0.3±0.1 ^b	1.6±0.6 ^b	2.9±0.3 ^c	—	—	—	—	—	—	
	共计	4.7	11.2	59.8	258.1	192.9	4.7	3.0	1.8	4.2	3.7	2.5	
酮类	3-辛酮	6.0±1.3 ^a	5.1±0.2 ^a	6.0±0.6 ^c	6.7±1.8 ^a	—	6.0±1.3 ^b	7.8±2.2 ^{ab}	7.5±1.0 ^{ab}	9.5±1.1 ^a	7.6±0.0 ^{ab}	2.2±1.0 ^f	
	香叶基丙酮	0.5±0.0 ^b	0.4±0.1 ^b	—	1.6±0.3 ^a	1.8±0.0 ^a	0.5±0.0 ^b	0.2±0.0 ^b	0.2±0.1 ^b	0.4±0.0 ^b	3.3±1.1 ^a	—	
	β-紫罗兰酮	0.4±0.0 ^a	0.3±0.1 ^{ab}	0.2±0.0 ^b	—	—	0.4±0.0	—	—	—	—	—	
	6-戊基-2H-吡喃-2-酮	0.3±0.1 ^d	1.6±0.9 ^d	5.1±0.1 ^c	24.3±0.0 ^a	21.4±2.4 ^b	0.3±0.1	—	—	—	—	—	
	共计	7.2	7.4	11.3	32.6	23.2	7.2	8.0	7.7	9.9	10.9	2.2	
其他	樟脑	1.5±0.4 ^d	1.8±0.2 ^a	0.6±0.1 ^b	0.6±0.2 ^b	—	1.5±0.4 ^{ab}	1.2±0.2 ^{ab}	1.1±0.3 ^b	1.7±0.3 ^{ab}	1.8±0.1 ^a	1.3±0.3 ^{ab}	
	百里酚	0.4±0.1 ^a	0.5±0.1 ^a	0.2±0.1 ^b	—	—	0.4±0.1	—	—	—	—	—	
	(Z)-7-癸烯-5-酸	—	0.4±0.0 ^b	1.3±0.3 ^b	5.8±1.1 ^a	6.4±1.4 ^a	—	—	—	—	—	—	
	共计	1.9	2.7	2.1	6.4	6.4	1.9	1.2	1.1	1.7	1.8	1.3	
总计	849.4	672.7	646.6	1155.7	923.0	849.4	660.5	599.0	632.6	529.8	464.0		

注：同行不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)；—, 未检出；表2同。

由图2可知, 油桃果实中蔗糖在所有可溶性糖组分中含量最高。每种可溶性糖的含量与果实的甜度和风味等密切相关。就甜度而言, 蔗糖阈值小, 在甜度值中的贡献率大, 是决定果实甜度风味的主要因素, 果糖的甜度最高, 葡萄糖口感最好^[14]。常温

贮藏下, 油桃果实中葡萄糖和果糖含量均呈下降趋势, 蔗糖含量第6天下降至最低值48.71 mg/g后, 第8天含量有所上升, 可溶性总糖含量呈现先下降, 到第8天含量又上升的趋势。低温贮藏下可溶性糖含量变化与常温相反, 由于果实中蔗糖水解成葡萄糖

表2 油桃常温和低温贮藏期间结合态香气物质含量变化
Table 2 Changes of bound aroma compounds in nectarine during room and low temperature storage

种类	香气成分	20℃					1℃					μg/kg	
		第0天	第2天	第4天	第6天	第8天	第0天	第7天	第14天	第21天	第28天		第35天
醇类	苯甲醇	79.7±12.7 ^a	46.9±10.9 ^b	3.0±1.0 ^c	4.3±1.2 ^c	9.8±1.7 ^c	79.7±12.7 ^a	—	6.2±1.7 ^d	20.1±11.0 ^b	41.9±4.1 ^c	5.3±0.6 ^d	
	苯乙醇	15.6±3.4 ^b	18.7±1.1 ^b	20.0±1.8 ^b	19.8±0.9 ^b	30.2±2.5 ^a	15.6±3.4 ^b	16.1±4.1 ^{ab}	21.8±4.5 ^b	24.2±3.8 ^{ab}	31.5±2.1 ^a	19.4±2.1 ^b	
	芳樟醇	14.0±2.1 ^a	6.3±0.2 ^d	5.6±0.6 ^d	7.8±1.6 ^b	12.0±1.8 ^a	14.0±2.1 ^a	16.0±3.1 ^b	24.3±3.7 ^a	16.7±0.7 ^b	13.3±2.3 ^b	11.4±1.2 ^b	
	α-松油醇	0.5±0.1 ^b	1.1±0.5 ^{ab}	0.9±0.3 ^b	—	1.7±0.0 ^d	0.5±0.1 ^b	—	—	2.3±0.2 ^{ab}	—	3.8±1.2 ^a	
	2-乙基己醇	5.4±1.0 ^a	0.9±0.1 ^d	1.2±0.0 ^{bc}	2.8±0.2 ^b	6.8±1.2 ^a	5.4±1.0 ^a	—	—	10.2±1.0 ^b	16.4±1.8 ^a	3.4±0.5 ^c	
	异戊醇	1.9±0.8 ^a	—	—	1.0±0.2 ^a	1.9±0.1 ^a	1.9±0.8 ^a	3.0±0.7 ^{bc}	4.4±0.6 ^b	—	12.6±0.6 ^a	4.8±1.3 ^b	
	丁香醇B	17.8±5.0 ^a	15.1±4.9 ^a	—	17.2±1.9 ^a	24.7±7.0 ^a	17.8±5.0 ^a	—	—	—	—	—	
	丁香醇C	7.8±2.8 ^{ab}	—	8.3±0.1 ^a	3.0±0.6 ^b	—	7.8±2.8 ^a	—	—	—	—	—	
	叶醇	0.1±0.0 ^f	—	0.1±0.0 ^f	0.5±0.3 ^b	6.9±2.1 ^a	0.1±0.0 ^f	—	—	—	—	—	
	(Z)-芳樟醇氧化物	—	—	—	—	—	—	—	12.8±3.7 ^a	—	5.7±1.6 ^b	0.8±0.2 ^c	
	(E)-芳樟醇氧化物	8.7±0.9 ^a	—	—	—	—	8.7±0.9 ^a	4.8±1.2 ^b	5.6±0.4 ^b	4.7±1.2 ^b	2.4±0.5 ^c	2.6±0.3 ^c	
共计	151.5	89	39.1	56.4	94.0	151.5	39.9	75.1	78.2	123.8	51.5		
醛类	苯甲醛	1 085.6±60.1 ^b	1 153.2±54.5 ^{ab}	1 197.8±42.9 ^{ab}	869.0±69.8 ^c	1 033.9±42.7 ^b	1 085.6±60.1 ^b	2 002.4±156.3 ^a	2 584.9±313.9 ^a	2 095.6±242.3 ^a	2 007.6±46.5 ^a	1 600.7±154.2 ^b	
	苯乙醛	5.1±0.9 ^b	9.5±1.6 ^a	5.9±0.8 ^b	4.3±0.4 ^b	—	5.1±0.9 ^b	5.2±0.4 ^b	12.1±0.9 ^a	10.5±0.5 ^{ab}	9.2±0.9 ^{ab}	8.9±4.1 ^{ab}	
	水杨醛	3.8±0.5 ^a	2.3±0.5 ^b	3.2±0.1 ^{ab}	2.9±0.3 ^{ab}	—	3.8±0.5 ^a	—	3.1±0.4 ^a	2.5±0.6 ^a	3.5±0.6 ^a	—	
	壬醛	4.2±1.5 ^a	3.6±1.0 ^b	3.0±0.3 ^{bc}	1.0±0.3 ^c	—	4.2±1.5 ^a	8.4±3.2 ^a	14.9±0.6 ^{ab}	20.4±4.3 ^a	10.3±0.4 ^{bc}	7.0±0.0 ^c	
	癸醛	8.7±2.4 ^a	1.1±0.2 ^d	1.3±0.3 ^b	0.5±0.1 ^b	—	8.7±2.4 ^a	7.8±0.8 ^{ab}	7.2±2.4 ^{ab}	4.1±1.3 ^{bc}	1.6±0.7 ^c	2.1±0.8 ^c	
	丁香醛A	98.4±1.3 ^a	—	—	—	—	98.4±1.3 ^a	49.2±0.3 ^c	36.5±1.4 ^c	62.8±6.2 ^b	47.3±9.7 ^a	35.8±5.6 ^c	
	丁香醛B	57.8±8.7 ^b	83.8±1.7 ^a	49.8±11.8 ^b	—	—	57.8±8.7 ^b	66.3±4.5 ^a	41.3±1.3 ^b	34.8±7.7 ^{bc}	28.7±1.7 ^c	32.6±5.0 ^{bc}	
	丁香醛C	74.2±11.0 ^b	121.0±12.1 ^{ab}	137.8±11.7 ^a	133.4±30.3 ^a	116.4±16.1 ^{ab}	74.2±11.0 ^b	95.4±6.4 ^a	50±0.5 ^c	35.1±5.3 ^c	—	—	
	丁香醛D	64.3±5.5 ^b	59.5±1.3 ^a	32.4±3.3 ^c	43.1±2.1 ^{bc}	45.8±6.8 ^c	64.3±5.5 ^b	25.7±2.4 ^b	—	—	15.0±1.1 ^c	15.8±3.5 ^c	
	香叶醛	1.6±0.2 ^c	2.9±0.3 ^b	2.8±0.6 ^b	2.7±0.1 ^{bc}	5.2±0.8 ^a	1.6±0.2 ^c	3.7±1.3 ^{ab}	5.0±0.8 ^a	5.5±1.1 ^a	5.0±0.1 ^a	2.8±0.8 ^{bc}	
	橙花醛	1.5±0.7 ^c	1.3±0.2 ^c	1.7±0.2 ^{bc}	2.3±0.8 ^{ab}	2.8±0.1 ^a	1.5±0.7 ^c	1.9±0.6 ^{bc}	4.2±0.9 ^a	3.5±0.1 ^a	3.0±0.5 ^{ab}	1.1±0.2 ^c	
	庚醛	—	—	—	—	—	—	0.3±0.0 ^f	—	4.6±0.4 ^a	4.7±0.5 ^a	1.5±0.3 ^b	
	2,4-二甲基苯甲醛	—	—	—	—	—	—	5.3±0.7 ^{bc}	12.9±0.8 ^b	8.7±2.2 ^{ab}	10.5±3.1 ^a	1.6±0.1 ^c	
	共计	1 405.2	1 438.2	1 435.7	1 059.2	1 204.1	1 405.2	2 271.6	2 772.1	2 288.1	2 146.4	1 709.9	
酚类	丁香酚	1.3±0.0	—	—	—	—	1.3±0.0 ^a	—	0.8±0.1 ^b	—	0.3±0.1 ^c	0.3±0.1 ^c	
	异丁香酚	1.3±0.2 ^a	—	1.5±0.6 ^a	1.4±0.5 ^a	0.3±0.1 ^b	1.3±0.2 ^a	0.9±0.2 ^a	2.2±0.6 ^a	3.5±0.6 ^a	2.3±0.4 ^a	2.8±0.5 ^b	
	间-丁香酚	56.0±5.9 ^b	54.1±5.4 ^a	60.0±2.0 ^a	51.0±7.6 ^a	53.8±10.8 ^b	56.0±5.9 ^{bc}	35.9±6.7 ^a	72.5±12.4 ^{bc}	92.7±14.5 ^{ab}	101.8±14.7 ^a	104.1±17.1 ^a	
	反式-异丁香酚	4.1±1.0 ^a	3.9±0.3 ^a	3.2±0.7 ^a	3.8±0.3 ^a	3.7±1.3 ^a	4.1±1.0 ^a	2.9±0.4 ^a	4.9±1.1 ^a	3.7±0.8 ^a	3.6±0.3 ^a	2.9±0.3 ^a	
	胡椒酚	1.3±0.3 ^b	3.5±0.5 ^a	4.0±0.5 ^a	3.0±0.8 ^{ab}	4.4±1.9 ^a	1.3±0.3 ^c	2.2±0.4 ^c	4.5±1.9 ^{ab}	4.9±1.0 ^a	5.8±1.0 ^a	2.6±0.9 ^{bc}	
	4-乙氧基愈疮木酚	1.4±0.2 ^a	0.5±0.1 ^b	—	0.7±0.2 ^b	—	1.4±0.2 ^a	—	—	—	—	—	
	共计	65.4	62.0	68.7	59.9	62.2	65.4	41.9	84.9	104.8	113.8	112.7	
酮类	3-辛酮	7.6±1.3 ^a	6.8±0.3 ^a	8.2±0.2 ^a	6.5±0.1 ^a	7.1±1.0 ^a	7.6±1.3 ^a	5.0±0.3 ^b	5.4±0.4 ^b	—	3.0±0.6 ^c	—	
	2-十一酮	3.5±1.7 ^a	0.4±0.0 ^f	—	0.6±0.2 ^b	0.5±0.0 ^f	3.5±1.7 ^a	—	—	—	—	—	
	苯乙酮	—	—	—	—	—	—	0.3±0.0 ^f	1.2±0.1 ^a	—	1.2±0.3 ^a	—	
	共计	11.1	7.2	8.2	7.1	7.6	11.1	5.3	6.6	—	4.2	—	
其他	苯甲酸甲酯	0.4±0.1 ^a	—	0.5±0.0 ^a	0.2±0.1 ^b	—	0.4±0.1 ^b	1.3±0.4 ^a	2.7±1.0 ^a	—	1.0±0.2 ^{ab}	2.3±1.3 ^a	
	肉豆蔻酸甲酯	—	0.4±0.1 ^a	—	0.3±0.2 ^a	0.1±0.0 ^b	—	—	—	—	—	—	
	月桂酸甲酯	1.6±0.2 ^a	0.5±0.1 ^b	—	0.2±0.0 ^b	0.2±0.0 ^b	1.6±0.2 ^a	—	—	—	—	—	
	异戊酸	2.2±0.6 ^a	1.1±0.1 ^b	0.3±0.0 ^c	0.1±0.1 ^c	—	2.2±0.6 ^a	14.2±2.9 ^b	16.2±3.8 ^b	42.1±11.6 ^a	47.4±6.0 ^a	50.6±5.6 ^a	
	2-甲基丁酸	—	—	—	—	—	—	—	—	3.9±0.9 ^a	4.8±0.9 ^a	4.4±1.0 ^a	
	4-萘烯	—	—	—	—	—	—	2.7±0.4 ^a	2.0±0.3 ^{ab}	3.0±0.0 ^a	1.6±0.4 ^b	2.0±0.6 ^{ab}	
共计	4.2	2.0	0.8	0.8	0.3	4.2	18.2	20.9	49.0	54.8	59.3		
总计	1 637.4	1 598.4	1 552.5	1 183.4	1 368.2	1 637.4	2 376.9	2 959.6	2 520.1	2 443.0	1 933.4		

和果糖，葡萄糖和果糖含量不断上升，蔗糖含量在第14天达到最高值86.22 mg/g后不断下降，可溶性总糖含量呈现先上升后下降趋势，实验结果也表明，油桃果实低温贮藏下可溶性总糖含量明显高于常温贮藏下油桃果实。

2.3 油桃常温和低温贮藏期间游离态香气物质含量变化

香气是影响水果质量和风味品质的重要因素。目前已从桃果实中鉴定出100多种香气物质，从香气物质的来源看，它们主要通过脂肪酸途径、异戊二烯途径和氨基酸途径合成^[15]。在这些香气物质中，只有为数不多的特

征性香气物质对油桃香气品质具有重要作用, 主要包括C₆醛和醇、酯和内酯^[16]。C₆醛和醇属于“青香型”香气物质, 主要包括正己醛, (E)-2-己烯醛和(E)-2-己烯醇。酯和内酯属“果香型”香气物质, 阈值低则对桃果实的香味影响较大, 其中 γ -和 δ -癸内酯是油桃果实中最主要的内酯类成分, 酯类物质如(Z)-3-己烯基乙酸酯也有助于增加桃果实的香气^[17-19]。油桃果实成熟中, C₆醛和醇香气物质含量下降, 酯类、内酯和苯甲醛等含量趋于增加, 由此完成了“青香型”向“果香型”的转变^[20]。

由表1可知, 常温贮藏期间共检测到油桃果实37种游离态香气物质, 主要包括7种醇类、13种醛类、5种酯类、5种内酯和4种酮类, 还有3种其他的香气物质。在油桃果实成熟期前, “青香型”C₆醛类和醇类如正己醛、2-己烯醛、正己醇等占主要地位, 相对含量高达83%~87%。醇类物质含量在贮藏期呈现上升趋势, 其中正己醇含量在贮藏期不断升高, 在醇类物质中相对含量从第0天的18%上升到第8天的70%。以芳樟醇为主的萜类物质是桃果实重要的单萜醇, 在油桃果实中含量比较多, 具有花香、甜香和醇香, 其含量在贮藏期持续下降。由表1可知, 醛类物质占据桃果实中大部分香气物质, 结果与Zhou Dandan等^[13]研究结果一致。其在第0天含量最高, 直至贮藏第4天, 醛类物质含量一直下降, 第6天含量有所上升后第8天又下降。“青香型”香气在贮藏前期出现明显降低, 与李杨昕等^[21]研究结果一致。其中醛类物质中主要是正己醛和2-正己醛, 整个贮藏期占醛类物质含量的83%~95%。酯类被认为是“果香型”的香气物质, 在果实风味构成中具有重要作用, 酯类含量高的桃风味更好^[22]。乙酸己酯也是油桃果实重要的香气物质, 具有强烈的果香味, 在贮藏期间含量持续上升。除酯类物质之外, 人们发现内酯也是油桃香气的主要贡献化合物, 它能赋予果实“桃味”特征, 对桃果实的风味品质具有很大作用^[23]。常温贮藏下, 随着油桃果实的成熟, “果香型”内酯类香气物质含量明显增加, 尤其是 γ -内酯和 δ -内酯类成为果实主要的香气挥发性物质, 与张晓萌等^[24]实验结果一致。酮类是桃果实中最主要的“花香型”香气物质, 且阈值比较低。在贮藏期间酮类物质含量不断升高, 在第6天含量达到最高值后再次降低。以 β -紫罗兰酮及其衍生物为主的酮类在大多数桃品种中都可检测到, 这类物质大多数属于低阈值香气物质, 尽管含量较低, 但对桃香气品质的影响仍然较大^[9]。实验结果表明, β -紫罗兰酮在油桃中含量很低, 含量只有0.2~0.4 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 但其对油桃风味品质影响很大。

由表1可知, 低温贮藏期间检测到油桃游离态香气物质21种, 包括3种醇类、10种醛类、3种酯类、2种内酯和2种酮类, 还有1种其他香气物质。与常温相比, 低

温下挥发性物质种类较少。低温贮藏下醇类物质中只检测到芳樟醇、正己醇和(E)-2-己烯-1-醇, 且含量均低于常温贮藏。低温贮藏期间, 醛类物质贮藏第7天后下降, 第21天达到最低值后又有所增加, 第28天达到较高值后又有所降低。其中正己醛、2-己烯醛的含量呈一直下降趋势, 且含量与常温贮藏相当。低温贮藏时酯类物质的合成明显受到抑制, 只检出乙酸己酯和乙酸叶醇酯, 乙酸叶醇酯含量持续下降, 在贮藏中后期浓度低于检测限而无法检出。低温下大多数内酯的合成受阻, 特征香气 γ -癸内酯未检出, 检测到的内酯只有 δ -癸内酯和 γ -己内酯, 且含量远低于常温贮藏。说明低温影响油桃果实特征香气的形成, 对果实风味品质有不利影响。低温贮藏过程中, 总挥发物的含量趋于下降趋势, 这与先前对桃果实的研究一致^[25], 总挥发物含量从第0天的849.4 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 降至贮藏末期的464.0 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 约为第0天游离态香气总量的一半。

2.4 油桃常温和低温贮藏期间结合态香气物质含量变化

由表2可知, 常温贮藏下检测到油桃果实中结合态香气物质30种, 包括9种醇类物质、10种醛类物质、5种酚类物质、2种酮类物质和4种其他的香气物质。常温贮藏下油桃果实游离态和结合态香气物质存在较大差异, 以游离态和结合态形式共存的物质检测到8种。常温贮藏下, 醇类物质含量在第4天下降至最低值后又上升。第0天检测到的结合态芳樟醇含量接近游离态的5倍, 结合态芳樟醇含量在第4天下降至最低值5.6 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 后开始有所上升, Wu Boping等^[26]已鉴定出调控结合态芳樟醇形成的相关基因UGT8542。在总的结合态香气物质中, 醛类物质种类最丰富、含量最高, 在贮藏期相对含量达85%~92%。其中苯甲醛含量很高, 为游离态含量的40~50倍。萜烯醛香叶醛和橙花醛是顺反异构体, 两者均在贮藏前期变化不大, 末期含量有所上升。酚类物质在常温贮藏下变化不大, 如间-丁香酚、反式-异丁香酚含量都比较稳定。总结合态香气含量第6天降至最低之后第8天含量有所上升, 主要是苯甲醛第8天含量有所上升。

低温贮藏时, 检测到油桃果实中结合态香气物质共32种, 包括8种醇类物质、13种醛类物质、5种酚类物质、2种酮类物质和4种其他的香气物质。低温贮藏下油桃果实游离态和结合态香气物质也存在很大差异, 以游离态和结合态形式共存的物质检测到6种。醇类物质中, 苯甲醇、苯乙醇和芳樟醇含量较高, 其中单萜醇芳樟醇第14天含量达到最高值后呈现下降趋势。此外还检测到另外2种单萜醇, 即芳樟醇氧化物的正反异构体, 两者在低温贮藏时均呈现下降趋势。醛类物质中苯甲醛、丁香醛A、丁香醛B、丁香醛C和丁香醛D含量较高, 苯甲醛占总的结合态香气物质含量的77%~94%, 苯甲醛含量第14天达到最高值后一直呈现下降趋势, 4种丁香醛含量均呈现下降的趋势。萜烯醛橙花醛和香叶醛含量都呈现先

上升后下降的趋势。酚类物质中,检测到常温中未检测到的具有丁香气味的丁香酚,在贮藏期也大致呈下降趋势。低温贮藏下总的结合态香气物质第14天含量达到最高值2 959.6 $\mu\text{g}/\text{kg}$,后期一直逐渐下降。有研究人员提出果实达到成熟阶段后结合挥发物含量的减少可能反映出葡萄糖苷酶的活性增加或糖基转移酶的活性降低^[27]。

2.5 油桃果实结合态香气物质和可溶性糖含量关联性分析

表3 不同贮藏温度结合态香气物质和可溶性糖含量关联性分析
Table 3 Correlation analysis between the contents of bound aromas and soluble sugars in nectarine fruit

贮藏温度/ $^{\circ}\text{C}$	相关系数 R^2			
	果糖	葡萄糖	蔗糖	可溶性总糖
20	0.046	0.517	0.977*	0.906*
1	0.800	0.318	0.927*	0.845*

注: *显著相关($P<0.05$)。

由图2和表2可知,常温贮藏下,油桃果实结合态香气物质总量、蔗糖含量和可溶性总糖含量均在第6天下降至最低值,第8天含量上升。低温贮藏下,油桃结合态香气物质总量、蔗糖含量均在第14天达到最高值,可溶性总糖含量第14天达到最高值后下降。由表3可知,相关性分析结果表明结合态香气物质总量和蔗糖含量、可溶性总糖含量呈现显著正相关。常温和低温贮藏下,结合态香气物质总量与蔗糖含量相关性系数分别为0.977($P<0.05$)和0.927($P<0.05$),结合态香气物质总量与可溶性总糖含量相关性系数分别为0.906($P<0.05$)和0.845($P<0.05$)。结果表明,结合态香气物质的变化可能与糖含量有关,糖含量上升促进结合态香气物质的形成。

3 讨论与结论

香气是油桃果实风味的重要组成部分,具有挥发性的游离态香气是形成桃果实香味浓郁的重要因素。常温贮藏期间检出游离态香气37种,总含量在第4天降至最低值后第6天上升至最高值,第8天含量有所下降,其中酯类和内酯物质均在第6天达到最高值。低温贮藏下果实出现果心褐变,风味丧失等冷害症状,只检出游离态香气物质21种,贮藏期间游离态香气物质含量不断下降,与Christophe等^[28]研究结果相似。

结合态香气物质是果实重要的潜在香气来源,在酶解或酸解的作用下释放出来,起到增香的作用。目前,对结合态香气物质的研究主要集中在果实不同成熟阶段和不同品种果实之间结合态香气物质种类与含量的差别。Ubeda等^[29]分析了4个草莓品种的结合态香气,研究发现不同品种草莓结合态香气含量、种类和特征香气物质存在很大区别。Yang Yini等^[30]研究了绿熟期、转色期和成熟期悬钩子中结合态香气物

质的变化,结果表明成熟过程中,果实中结合态醇、醛、萜、酯和酚总含量降低。目前对油桃结合态香气物质研究很少,Aubert等^[31]研究了油桃成熟过程中不同阶段结合态香气物质变化,结果表明单萜类和 C_{13} -降异戊二烯类随着果实成熟含量增加。其中 δ -癸内酯是发现的唯一酯类,含量远低于其游离形式。而本研究未检出结合态内酯类物质。检出油桃采后常温贮藏下结合态香气物质30种,总含量第6天降至最低值1 183.4 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 后第8天有所上升。果实采后结合态香气物质变化研究甚少,吴伯萍^[32]研究了“湖景蜜露”水蜜桃发育过程中及桃果实成熟后在常温贮藏下达到完熟过程中结合态香气物质变化,结果表明不同物质变化趋势不同,例如萜类物质中芳樟醇和 α -萜品醇在达到完熟过程中呈现先上升后下降趋势,橙花醛则呈上升趋势,总结合态香气物质呈现先上升后下降趋势。本研究低温下检出结合态香气物质32种,总含量在第14天达到最高值后不断下降,与常温下结合态香气变化趋势相反。

结合态香气物质与可溶性糖相关性分析表明,结合态香气物质与可溶性糖呈现正相关,与蔗糖相关系数较高。说明随着糖含量的上升,结合态香气物质含量可能上升。李爱华等^[33]研究表明在葡萄成熟期间香气糖苷总量随着含糖量的增加不断上升,在浆果含糖量增加到一定值后趋于稳定,与本研究结果大致相符。

综上,不同贮藏温度下油桃果实香气变化有差异。常温贮藏前期游离态醛类物质丰富,贮藏中后期酯类和内酯类物质含量不断上升,使果实具有浓郁的果香味。同时由于果实迅速软化,贮藏在果实液泡内的结合态香气被 β -葡萄糖苷酶水解,结合态香气含量持续下降,第8天可能因糖基转移酶活性上升,结合态香气含量有所上升。低温贮藏时,游离态香气含量下降,油桃风味变淡。贮藏前14 d可能由于糖基转移酶活性上升结合态香气含量有所上升。随着贮藏时间延长,结合态香气物质与 β -葡萄糖苷酶接触从而被水解,第14天后结合态香气含量下降。同时,相关性分析表明结合态香气物质总量与蔗糖含量有很好的相关性,随着蔗糖含量的上升而增加。

参考文献:

- [1] 孔慧娟. 六种水果中糖苷键合态香气成分的提取、分离与表征[D]. 杭州: 浙江大学, 2016: 12-13.
- [2] 范刚, 王可兴, 潘思轶. 水果中糖苷键合态香气物质的研究进展[J]. 中国农业科学, 2010, 43(24): 5100-5111. DOI:10.3864/j.issn.0578-1752.2010.24.014.
- [3] GAO J, WU B P, GAO L X, et al. Glycosidically bound volatiles as affected by ripening stages of Satsuma mandarin fruit[J]. Food Chemistry, 2017, 240: 1097-1105. DOI:10.1016/j.foodchem.2017.07.085.
- [4] LABEL H J D, SINGH Z, TAN S C. Glycosidically-bound aroma volatiles in the skin and pulp of 'Kensington Pride' mango fruit at different stages of maturity[J]. Postharvest Biology and Technology, 2003, 29(2): 205-218. DOI:10.1016/S0925-5214(02)00250-8.

- [5] BIRTIC S, GINIES C, CAUSSE M, et al. Changes in volatiles and glycosides during fruit maturation of two contrasted tomato (*Solanum lycopersicum*) lines[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 57(2): 591-598. DOI:10.1021/jf8023062.
- [6] 吴伯萍. 桃果实结合态芳樟醇形成相关的UGT基因家族成员鉴别与调控研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019: 19-20.
- [7] ODOUX E, ESCOUTE J, VERDEIL J L, et al. Localization of β -D-glucosidase activity and glucovanillin in vanilla bean (*Vanilla planifolia* Andrews)[J]. Annals of Botany, 2003, 92(3): 437-444. DOI:10.1093/aob/mcg150.
- [8] 奕志英, 冯涛, 李晓贝, 等. 石榴汁糖苷键合态香气前体物质的初步研究[J]. 现代食品科技, 2017, 33(1): 227-233. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2017.1.034.
- [9] 席万鹏, 郁松林, 周志钦. 桃果实香气物质生物合成研究进展[J]. 园艺学报, 2013, 40(9): 53-64. DOI:10.16420/j.issn.0513-353x.2013.09.008.
- [10] 曹建康, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2013: 39-41.
- [11] PENG J, TANG J M, LUAN D L, et al. Microwave pasteurization of pre-packaged carrots[J]. Journal of Food Engineering, 2017, 202: 56-64. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2017.01.003.
- [12] ZHOU D D, CHEN S X, XU R, et al. Interactions among chilling tolerance, sucrose degradation and organic acid metabolism in UV-C-irradiated peach fruit during postharvest cold storage[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2019, 41(6): 41-79. DOI:10.1007/s11738-019-2871-4.
- [13] ZHOU D D, SUN Y, LI M Y, et al. Postharvest hot air and UV-C treatments enhance aroma-related volatiles by simulating the lipoxygenase pathway in peaches during cold storage[J]. Food Chemistry, 2019, 292: 294-303. DOI:10.1007/s11738-019-2871-4.
- [14] 朱翠英, 付喜玲, 李玲, 等. 2个设施油桃新品种糖酸组分及香气成分研究[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2015, 46(5): 641-647. DOI:10.3969/j.issn.1000-2324.2015.05.001.
- [15] 朱运钦, 李庆伟, 曾文芳, 等. 白肉型油桃中油桃9号及其黄肉芽变的挥发性香气物质分析[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(13): 172-177. DOI:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.13.041.
- [16] 李明, 王利平, 张阳, 等. 水蜜桃品种间果香成分的固相微萃取-气质联用分析[J]. 园艺学报, 2006, 33(5): 1071-1074. DOI:10.16420/j.issn.0513-353x.2006.05.030.
- [17] 郭东花, 范崇辉, 李高潮, 等. 不同果袋对“阿布白”桃果实香气成分的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(2): 250-255. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201602041.
- [18] 王贵章. 乙烯对采后低温冷藏桃果实香气合成调控的分子机理研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2014: 3-4.
- [19] ZHANG B, SHEN J Y, WEI W W, et al. Expression of genes associated with aroma formation derived from the fatty acid pathway during peach fruit ripening[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2010, 58(10): 6157-6165. DOI:10.1021/jf100172e.
- [20] AUBERT C, GÜNATA Z, AMBID C, et al. Changes in physicochemical characteristics and volatile constituents of yellow- and white-fleshed Nectarines during maturation and artificial ripening[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2003, 51(10): 3083-3091. DOI:10.1021/jf026153i.
- [21] 李杨昕, 王贵禧, 梁丽松. ‘大久保’桃常温贮藏过程中香气成分变化及其与乙烯释放的关系[J]. 园艺学报, 2011, 38(1): 41-48. DOI:10.16420/j.issn.0513-353x.2011.01.009.
- [22] WANG Y J, YANG C X, LI S H, et al. Volatile characteristics of 50 peaches and nectarines evaluated by HP-SPME with GC-MS[J]. Food Chemistry, 2009, 116(1): 356-364. DOI:10.1016/j.foodchem.2009.02.004.
- [23] CZERNY M, CHRISTLBAUER M, CHRISTLBAUER M, et al. Re-investigation on odour thresholds of key food aroma compounds and development of an aroma language based on odour qualities of defined aqueous odorant solutions[J]. European Food Research and Technology, 2008, 228(2): 265-273. DOI:10.1007/s00217-008-0931-x.
- [24] 张晓萌, 贾惠娟. 挥发性香气物质和乙烯生产在“湖景蜜露”桃果实发育过程中的变化[J]. 植物生理与分子生物学学报, 2005, 31(1): 41-46. DOI:10.3321/j.issn:1671-3877.2005.01.006.
- [25] ZHANG B, XI W P, WEI W W, et al. Changes in aroma-related volatiles and gene expression during low temperature storage and subsequent shelf-life of peach fruit[J]. Postharvest Biology & Technology, 2011, 60(1): 7-16. DOI:10.1016/j.postharvbio.2010.09.012.
- [26] WU B P, CAO X M, LIU H R, et al. UDP-glucosyltransferase PpUGT85A2 controls volatile glycosylation in peach[J]. Journal of Experimental Botany, 2019, 70(3): 925-936. DOI:10.1093/jxb/ery419.
- [27] REN J N, YANG Z Y, TAI Y N, et al. Characteristics of β -glucosidase from oranges during maturation and its relationship with changes in bound volatile compounds[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2015, 95: 2345-2352. DOI:10.1002/jsfa.6956.
- [28] CHRISTOPHE A, PHILIPPE B, GUILLAUME C, et al. Effects of storage temperature, storage duration, and subsequent ripening on the physicochemical characteristics, volatile compounds, and phytochemicals of Western Red nectarine (*Prunus persica* L. Batsch)[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62: 4707-4724. DOI:10.1021/jf4057555.
- [29] UBEDA C, FELIPE S J, BELÉN C, et al. Glycosidically bound aroma compounds and impact odorants of four strawberry varieties[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(24): 6095-6102. DOI:10.1021/jf301141f.
- [30] YANG Y N, ZHENG F P, YU A N, et al. Changes of the free and bound volatile compounds in *Rubus corchorifolius* L. f. fruit during ripening[J]. Food Chemistry, 2019, 287: 232-240. DOI:10.1016/j.foodchem.2019.02.080.
- [31] AUBERT C, AMBID C, BAUMES R, et al. Investigation of bound aroma constituents of yellow-fleshed nectarines (*Prunus persica* L. cv. Springbright). Changes in bound aroma profile during maturation[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2003, 51(21): 6280-6286. DOI:10.1021/jf034613h.
- [32] 吴伯萍. 桃果实结合态芳樟醇形成相关的UGT基因家族成员鉴别与调控研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019: 48-53.
- [33] 李爱华, 孙玮璇, 刘玥嫻, 等. 赤霞珠葡萄 β -葡萄糖苷酶活性与成熟指标间的关联分析[J]. 中国食品学报, 2018, 18(4): 209-216. DOI:10.16429/j.1009-7848.2018.04.027.