

两个早熟苹果品种不同成熟阶段果实香气成分的变化

王海波, 陈学森*, 张春雨, 刘崇琪, 吴传金, 田长平, 王超

(山东农业大学, 作物生物学国家重点实验室, 山东泰安 271018)

摘要: 采用静态顶空和气相色谱-质谱联用技术, 研究了不同成熟阶段苹果早熟品种‘泰山早霞’和‘辽伏’果实的香气成分。结果表明: ‘泰山早霞’果实特征香气成分为乙酸丁酯、乙酸-2-甲基-1-丁酯、乙酸己酯、丁酸乙酯、2-甲基丁酸乙酯、丁酸丙酯、2-甲基丁酸丁酯和己酸乙酯等8种, ‘辽伏’果实特征香气成分为己醛、(E)-2-己烯醛、乙酸己酯、丁酸乙酯、2-甲基丁酸乙酯和己酸乙酯等6种; 两品种香气成分分别以酯类和醇类为主; ‘泰山早霞’含量最高的酯类为乙酸酯, ‘辽伏’为丁酸酯; 两品种的醇类与酯类含量随果实的成熟显著升高, 但‘泰山早霞’酯类含量在花后45 d即显著高于同期的其它成分, 并高于‘辽伏’的酯类含量, 表明‘泰山早霞’酯类合成启动较早, ‘辽伏’与‘泰山早霞’醇类增加较快的时期分别为花后45~60 d与花后60~75 d, 表明‘辽伏’醇类成分的合成早于‘泰山早霞’。

关键词: 苹果; 早熟品种; 果实; 成熟阶段; 香气成分

中图分类号: S 661.1 文献标识码: A 文章编号: 0513-353X (2008) 10-1419-06

Changes of Aroma Components During Fruit Maturation of Two Early Apple Cultivars

WANG Hai-bo, CHEN Xue-sen*, ZHANG Chun-yu, LU Chong-qi, WU Chuan-jin, TAN Chang-ping, and WANG Chao

(State Key Laboratory of Crop Biology, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China)

Abstract: The aroma components during fruit maturation of two early apple cultivars (‘Taishan Zaoxia’ and ‘Liaofu’) were analyzed by static headspace and gas chromatography-mass spectrometry. Results showed that eight character impact components (CICs) were identified in Taishan Zaoxia, including butyl acetate, 2-methyl-1-butyl acetate, hexyl acetate, ethyl butanoate, ethyl 2-methylbutanoate, propyl butanoate, butyl 2-methylbutanoate and ethyl hexanoate. Meanwhile, six CICs were found in Liaofu and they were hexanal, (E)-2-hexenal, hexyl acetate, ethyl butanoate, ethyl 2-methylbutanoate and ethyl hexanoate. The quantitatively significant components were esters in Taishan Zaoxia and alcohols in Liaofu during fruit maturation, respectively. It showed difference in ester types between two cultivars that the major ester components were acetate esters in Taishan Zaoxia and butanoate esters in Liaofu. It was also observed that the contents of esters and alcohols in two cultivars increased significantly during fruit maturation. The total content of esters in Taishan Zaoxia at 45 days after full bloom (DAFB) was obviously higher than the contents of other components and the esters in Liaofu, which implied the starting of ester synthesis in Taishan Zaoxia was earlier. However, the stage of alcohol synthesis largely in Liaofu was from 45 to 60 DAFB, earlier than the stage from 60 to 75 DAFB in Taishan Zaoxia, which indicated the difference between apple cultivars.

Key words: apple; early cultivar; fruit; maturation; aroma component

收稿日期: 2008-05-05; 修回日期: 2008-08-18

基金项目: 国家自然科学基金项目 (30871679); 国家‘863’计划重点项目 (2006AA100108); 山东省农业良种工程项目

* 通讯作者 Author for correspondence (E-mail: chenxs@sdau.edu.cn)

目前我国栽培苹果中晚熟品种所占比例过高,早熟品种比例偏低。生产上采用的早熟苹果品种大多存在外观品质较差,风味偏淡等不足。因此,选育适销对路的优质早熟品种对调整苹果品种构成和促进区域经济发展具有重要意义。

香气成分是构成果品品质的重要因素,国内外在苹果香气代谢与调控方面的研究取得了很大进展。Echeverra等(2004b)研究了‘富士’苹果不同成熟阶段果实香气成分及其代谢相关酶类:脂氧合酶(LOX)、丙酮酸脱羧酶(PDC)、醇脱氢酶(ADH)及醇酰基转移酶(AAT)等,表明乙酸酯类对富士苹果香味贡献最大。乜兰春等(2006)对富士、红星、乔纳金与王林等未成熟和成熟苹果果实的挥发性物质进行了研究,认为随果实成熟大量增加的挥发性物质为主要香气成分。

‘泰山早霞’是山东农业大学近期育成的苹果早熟新品种,具有成熟极早,果色艳,外观美,风味浓,品质优及早果性、丰产性强等特点(陈学森等,2008)。初步研究表明,‘泰山早霞’属于“酯香型”苹果,风味品质优于‘辽伏’和‘贝拉’(王海波等,2007a,2007b)。果实香味在成熟过程中逐渐形成,早熟苹果品种果实发育期短,香气成分的形成有其特异性。本研究中以风味浓郁的‘泰山早霞’品种与风味偏淡的‘辽伏’品种为试材,研究了果实不同成熟阶段香气成分的差异及变化,旨在为早熟苹果品质育种及香气成分的调控提供基本资料。

1 材料与amp;方法

试验于2007年在山东农业大学作物生物学国家重点实验室进行。试材为早熟苹果品种‘泰山早霞’与‘辽伏’。样品采自山东省泗水县北彭果园,两品种砧木均为平邑甜茶,树龄6~8年生,常规管理。试验地立地条件一致,土壤为黏性土,地势平坦,生长结果正常。两个品种果实发育期均为75 d。分别在花后45 d(果实未成熟,微香但不能食用)、花后60 d(果实未成熟,香味增强,可食用)及花后75 d(果实商品成熟,香味浓郁,鲜食品质好)3个成熟阶段采集果实样品,每时期每品种取样1~2 kg,用于香气成分的提取和测定。

每份样品取3~5个果实的果肉,迅速切成薄片并混匀,在10 mL样品瓶底部加入内标物3-壬酮($0.4\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$)10 μL ,准确称取6 g样品放入样品瓶中,用聚四氟乙烯丁基合成橡胶隔片密封。利用Perkin Elmer Turbo Matrix 40 Trap顶空进样器提取果实香气成分进样。条件:样品加热温度45 $^{\circ}\text{C}$,保持30 min,取样针温度80 $^{\circ}\text{C}$,传输线温度80 $^{\circ}\text{C}$,然后给瓶加压15 psi(pounds per square inch),保持5 min。捕集阱抽取挥发性成分500 μL ,待分析。

利用Shimadzu GCMS-QP2010气相色谱-质谱联用仪分析气样。色谱条件:色谱柱Restek Rtx-1(30 m \times 0.32 mm \times 1.00 μm);进样口温度200 $^{\circ}\text{C}$;柱温:初始温度35 $^{\circ}\text{C}$ 保持2 min,以8 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升至180 $^{\circ}\text{C}$ 保持4 min,然后以15 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升至230 $^{\circ}\text{C}$ 保持1 min。质谱条件:载气为He气,流量1.06 mL $\cdot\text{min}^{-1}$,电离方式EI,电子能量70 eV;扫描方式:选择离子扫描,扫描范围:45~450 amu。进样:不分流进样1 μL 。离子源温度200 $^{\circ}\text{C}$ 。

定性方法:未知化合物质谱图经计算机检索同时与NIST05质谱库相匹配,并结合人工图谱解析及资料分析(Rowan et al, 1996; Felman et al, 2000; Echeverra et al, 2004a; 乜兰春等, 2006; 王海波等, 2007a),确认香味物质的各种化学成分。定量方法:按峰面积归一化法求得各成分相对质量百分含量,并选择3-壬酮为内标进行精确定量。通过香气值确定特征香气成分,香气值为某种化合物的浓度与该化合物香气阈值的比值,香气值大于1的成分为特征香气成分。

2 结果与分析

2.1 两个早熟苹果品种不同成熟阶段果实特征香气成分的差异

试验得到不同成熟阶段泰山早霞与辽伏的香气成分,经过检索分析与资料比对,得到二者主要香

气成分含量及香气值 (表 1)。可以看出, 泰山早霞花后 45 d 与 60 d 未成熟果实的特征香气成分均为 3 种: 丁酸乙酯、2-甲基丁酸乙酯与己酸乙酯; 至花后 75 d 果实成熟时又增加了 5 种: 乙酸丁酯、乙酸-2-甲基-1-丁酯、乙酸己酯、丁酸丙酯与 2-甲基丁酸丁酯, 达到 8 种。辽伏花后 45 d 未成熟果实特征香气包括己醛、(E)-2-己烯醛、丁酸乙酯与己酸乙酯等 4 种, 至花后 60 d, 果实中 (E)-2-己烯醛含量与香气值有所下降, 但 2-甲基丁酸乙酯含量上升, 香气值迅速提高, 成为特征香气成分, 在花后 75 d 果实特征香气中又增加了乙酸己酯, 达到 6 种。

两品种的特征香气成分中, 在果实 3 个成熟阶段二者共有的成分分别为 2、3 和 4 种, 泰山早霞特有的特征香气为乙酸丁酯、乙酸-2-甲基-1-丁酯、丁酸丙酯与 2-甲基丁酸丁酯, 辽伏特有的特征香气为己醛与 (E)-2-己烯醛。

表 1 ‘泰山早霞’与‘辽伏’苹果不同成熟阶段(花后不同天数)果实的主要香气成分及含量

Table 1 Main aroma components in ‘Taishan Zaoxia’ and ‘Liaofu’ during fruit maturation (days after full bloom)

香气成分 Aroma component	香气阈值 /(ng·g ⁻¹) Odor threshold	品种 Cultivar	含量/(μg·g ⁻¹) Content			香气值/Uo Odor units		
			45 d	60 d	75 d	45 d	60 d	75 d
			乙醇 Ethyl alcohol	100 000 ^[a]	泰山早霞 Taishan Zaoxia 辽伏 Liaofu	0.009 0.029	0.011 0.084	0.043 0.105
2-丙醇 2-propanol		泰山早霞 Taishan Zaoxia 辽伏 Liaofu			0.040			
1-丁醇 1-butanol	500 ^[a]	泰山早霞 Taishan Zaoxia 辽伏 Liaofu		0.002 0.107	0.139 0.174		0.004 0.214	0.278 0.348
2-甲基-1-丁醇 2-methyl-1-butanol	250 ^[a]	泰山早霞 Taishan Zaoxia 辽伏 Liaofu	0.003	0.004 0.027	0.042 0.040	0.012	0.016 0.108	0.168 0.160
3-甲基-1-丁醇 3-methyl-1-butanol		泰山早霞 Taishan Zaoxia 辽伏 Liaofu		0.005			0.014	
3-甲基-2-戊醇 3-methyl-2-pentanol		泰山早霞 Taishan Zaoxia 辽伏 Liaofu			0.018			
(Z)-1-戊烯-3-醇 (Z)-1-penten-3-ol		泰山早霞 Taishan Zaoxia 辽伏 Liaofu	0.001	0.002				
1-己醇 1-hexanol	500 ^[a]	泰山早霞 Taishan Zaoxia 辽伏 Liaofu	0.004	0.086 0.267	0.088 0.222	0.008	0.172 0.534	0.176 0.444
(E)-2-己烯-1-醇 (E)-2-hexen-1-ol	6 700 ^[a]	泰山早霞 Taishan Zaoxia 辽伏 Liaofu	0.044 0.156	0.078 0.032	0.012 0.024	0.007 0.023	0.012 0.005	0.002 0.004
(Z)-2-丁烯醛 (Z)-2-butenal		泰山早霞 Taishan Zaoxia 辽伏 Liaofu			0.023 0.006			
己醛 Hexanal	10.5 ^[a]	泰山早霞 Taishan Zaoxia 辽伏 Liaofu	0.003 0.017	0.003 0.017	0.006 0.013	0.286 1.619	0.286 1.619	0.571 1.238
(E)-2-己烯醛 (E)-2-hexenal	17 ^[b]	泰山早霞 Taishan Zaoxia 辽伏 Liaofu	0.002 0.026	0.016 0.016	0.009 0.019	0.118 1.529	0.941 0.941	0.529 1.118
乙酸乙酯 Ethyl acetate	13 500 ^[a]	泰山早霞 Taishan Zaoxia 辽伏 Liaofu			0.056 0.018			0.004 0.001
乙酸丙酯 Propyl acetate	2 000 ^[a]	泰山早霞 Taishan Zaoxia 辽伏 Liaofu			0.028			0.014
乙酸丁酯 Butyl acetate	66 ^[a]	泰山早霞 Taishan Zaoxia 辽伏 Liaofu		0.005	0.347 0.010		0.076	5.258 0.152
乙酸-2-甲基-1-丁酯 2-methyl-1-butyl acetate	11 ^[a]	泰山早霞 Taishan Zaoxia 辽伏 Liaofu	0.001	0.007	0.162	0.091	0.636	14.727
乙酸戊酯 Pentyl acetate	43 ^[a]	泰山早霞 Taishan Zaoxia 辽伏 Liaofu	0.001	0.004	0.012	0.023	0.093	0.279
乙酸己酯 Hexyl acetate	2 ^[a]	泰山早霞 Taishan Zaoxia 辽伏 Liaofu			0.166 0.002			83.000 2.000
乙酸-(E)-2-己烯酯 (E)-2-hexenyl acetate		泰山早霞 Taishan Zaoxia 辽伏 Liaofu	0.309	0.399	0.005			
丁酸乙酯 Ethyl butanoate	1 ^[a]	泰山早霞 Taishan Zaoxia 辽伏 Liaofu	0.001 0.045	0.010 0.049	0.067 0.139	1.000 45.000	10.000 49.000	67.000 139.000

续表 1

香气成分 Aroma component	香气阈值 /(ng · g ⁻¹) Odor threshold	品种 Cultivar	含量 / (μg · g ⁻¹) Content			香气值 /Uo Odor units		
			45 d	60 d	75 d	45 d	60 d	75 d
丁酸丙酯 Propyl butanoate	18 ^[b]	泰山早霞 Taishan Zaoxia			0.025			1.389
		辽伏 Liaofu		0.001	0.002		0.056	0.111
丁酸丁酯 Butyl butanoate	100 ^[a]	泰山早霞 Taishan Zaoxia			0.084			0.840
		辽伏 Liaofu			0.049			0.490
丁酸己酯 Hexyl butanoate	250 ^[a]	泰山早霞 Taishan Zaoxia			0.123			0.492
		辽伏 Liaofu		0.031	0.059		0.124	0.236
丁酸 - (E) - 2 - 己烯酯 (E)-2-hexenyl butanoate		泰山早霞 Taishan Zaoxia	0.002		0.048			
		辽伏 Liaofu						
2 - 甲基丁酸甲酯 Methyl 2-methylbutanoate		泰山早霞 Taishan Zaoxia			0.019			
		辽伏 Liaofu			0.008			
2 - 甲基丁酸乙酯 Ethyl 2-methylbutanoate	0.1 ^[a]	泰山早霞 Taishan Zaoxia	0.001	0.004	0.039	10.000	40.000	390.000
		辽伏 Liaofu		0.008	0.041		80.000	410.000
2 - 甲基丁酸丁酯 Butyl 2-methylbutanoate	17 ^[a]	泰山早霞 Taishan Zaoxia			0.077			4.529
		辽伏 Liaofu		0.002	0.007		0.118	0.412
2 - 甲基丁酸己酯 Hexyl 2-methylbutanoate		泰山早霞 Taishan Zaoxia			0.001			
		辽伏 Liaofu		0.003	0.009			
戊酸 - (Z) - 3 - 己烯酯 (Z)-3-hexenyl valerate		泰山早霞 Taishan Zaoxia	0.044					
		辽伏 Liaofu						
己酸乙酯 Ethyl hexanoate	1 ^[a]	泰山早霞 Taishan Zaoxia	0.012	0.005	0.010	12.000	5.000	10.000
		辽伏 Liaofu	0.002	0.003	0.009	2.000	3.000	9.000
2 - 甲基己酸己酯 Hexyl 2-methylhexanoate		泰山早霞 Taishan Zaoxia			0.098			
		辽伏 Liaofu						
3 - 羟基 - 2 - 丁酮 3-hydroxy-2-butanone		泰山早霞 Taishan Zaoxia		0.003	0.008			
		辽伏 Liaofu		0.023	0.024			
- 法尼烯 -farnesene		泰山早霞 Taishan Zaoxia			0.012			
		辽伏 Liaofu		0.026	0.178			
乙酸 Acetic acid		泰山早霞 Taishan Zaoxia	0.027					
		辽伏 Liaofu						

注: 香气阈值参考: ^[a]Echeverr á et al, 2004a; ^[b]Aaby et al, 2002.

Note: Odor threshold reported by: ^[a]Echeverr á et al, 2004a; ^[b]Aaby et al, 2002.

2.2 两个早熟苹果品种不同成熟阶段果实香气成分的变化

2.2.1 醇类和醛类的变化 由表 1 可以看出, 两种苹果未成熟阶段醇类成分以 (E) - 2 - 己烯 - 1 - 醇含量较高, 随果实成熟其含量下降, 而乙醇、1 - 丁醇、1 - 己醇等随果实发育含量上升, 成为成熟果实含量较高的醇。随果实成熟两品种醇类均不断增加, 但辽伏在花后 45 ~ 60 d 即出现醇类显著增加的趋势, 说明辽伏醇类成分的大量积累期早于泰山早霞; C6 醛类含量总体水平较低, 在花后 60 ~ 75 d 均有下降的趋势。

2.2.2 酯类和其它成分的变化 两品种的乙酸酯、丁酸酯、己酸酯以及酯类总含量均在花后 60 ~ 75 d 增加最快, 但泰山早霞酯类含量在花后 45 d 即显著高于同时期的其它成分与辽伏的酯类含量, 说明其酯类合成启动较早; 乙酸酯在泰山早霞不同成熟阶段果实中显著高于其它酯类, 其次为丁酸酯, 而辽伏酯类中以丁酸酯为主。由表 1 可以看出, 泰山早霞未成熟果实中乙酸酯以乙酸 - (E) - 2 - 己烯酯含量最高, 但随果实成熟迅速下降, 其它如乙酸丁酯、乙酸己酯、乙酸 - 2 - 甲基 - 1 - 丁酯等随果实成熟逐渐产生且含量不断升高; 辽伏果实丁酸酯类中的丁酸乙酯含量呈明显上升趋势, 丁酸丁酯、丁酸己酯等成分随果实成熟逐渐产生且含量不断升高。两品种均检测到 3 - 羟基 - 2 - 丁酮与 - 法尼烯, 3 - 羟基 - 2 - 丁酮随两品种果实成熟含量缓慢升高, 而 - 法尼烯随辽伏果实成熟含量大幅上升, 成为其成熟果实含量较高的成分。

3 讨论

3.1 关于两种早熟苹果特征香气成分对果实风味的影响

本研究表明，两个早熟苹果品种特征香气成分主要为低分子酯类。据报道，苹果香气中低分子酯类占 78%~92% (Dixon & Hewett, 2000)，其中一部分甲基支链酯，如乙酸-2-甲基-1-丁酯、2-甲基丁酸乙酯、2-甲基丁酸丁酯等，具有典型的苹果香味，并且嗅感阈值极低，如 2-甲基丁酸乙酯仅为 $0.1 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ，被认为是苹果的重要香气成分 (Rowan et al, 1996)，这种成分在两种苹果未成熟阶段即具有较高的香气值，并随果实成熟不断提高，对两品种果实香味贡献最大。与辽伏相比，乙酸丁酯、乙酸-2-甲基-1-丁酯、丁酸丙酯与 2-甲基丁酸丁酯等 4 种酯为泰山早霞所特有的特征香气，这些成分中除两种甲基支链酯具有典型的苹果香味外，乙酸丁酯与丁酸丙酯的感官描述分别为调和的红苹果香味与杏、香蕉、菠萝的香味 (Young et al, 1996)，这些成分的共同作用决定了泰山早霞独特的果实风味，也是造成两品种风味差异的原因之一。

Johannes 等 (2002) 研究表明，苹果的整体香气不仅与香味物质含量有直接关系，还与其种类多少相关，由于感观互作，香气成分种类多的品种整体香气更为强烈。初步研究表明，泰山早霞整体香味优于辽伏 (王海波等, 2007b)。本研究中，泰山早霞成熟果实含有 8 种特征香气成分，而辽伏含有 6 种，可能是香气成分间的感官互作使特征香气较多的泰山早霞香味更为浓郁。

本试验中发现，己醛与 (E)-2-己烯醛等 C₆ 醛类虽然在辽伏成熟阶段含量较低且有下降趋势，但由于二者阈值较低，在其成熟果实中香气值仍大于 1，所以二者属于辽伏的特征香气。这与乜兰春等 (2006) 的报道不同，他们认为这两种醛不是苹果的主要香气成分。这可能与选用品种不同有关。有研究报道己醛与 (E)-2-己烯醛等 C₆ 醛类具有绿苹果 (green apple) 和青草样 (grass like) 香味 (Dixon & Hewett, 2000)，这与辽伏果实风味的感官鉴定结果是吻合的。

3.2 关于两种早熟苹果果实中酯类和醇类成分的变化

本研究在泰山早霞果实发育早期 (花后 45 d) 检测到乙酸酯类含量显著高于其它成分，且随果实成熟含量大幅上升，这在富士苹果上也有报道 (Fellman et al, 2000; Echeverría et al, 2004b; 乜兰春等, 2006)，同时这一结果也验证了泰山早霞属于“酯香型”苹果中“乙酸酯型”的结论 (王海波等, 2007a)。

本试验在花后 45 d 泰山早霞果实中检测出大量酯类成分，可能是 AAT 活性在果实发育早期即迅速提高，导致早期酯类的大量合成 (乜兰春等, 2005)。但泰山早霞酯类合成的高峰期出现在花后 60~75 d，可能与 LOX 在这一时期活性升高有关，据报道，在果实成熟和衰老阶段，脂肪酸也可通过 LOX 直接氧化，为酯类合成提供底物 (de Pooter et al, 1983)。泰山早霞果实成熟过程中香气成分始终以酯类为主，说明泰山早霞存在高效的酯类合成机制，将其作为杂交亲本用于苹果育种研究，对于定向培育富含酯类的早熟苹果品种具有重要意义。对转基因‘绿袖’苹果的研究表明，ADH 的表达水平与活性几乎不受乙烯调控 (Defilippi et al, 2005)。本研究中，醇类大量形成的时期在品种间存在差异，辽伏与泰山早霞分别为花后 45~60 d 和花后 60~75 d，辽伏醇类成分形成的时期早于呼吸跃变期，而且含量较高，说明辽伏品种 ADH 活性可能较泰山早霞高，且不受乙烯调控。

3.3 关于两种早熟苹果果实中 1-法尼烯的变化

本试验在两种早熟苹果中均检测到 1-法尼烯，在辽伏果实中其含量随果实成熟迅速升高，据报道，‘Boskoop’与‘Jacques lebel’苹果也含有较多的 1-法尼烯 (Dirinck & Schamp, 1989)，但 1-法尼烯是苹果虎皮病发生的重要诱因 (Zhang & Shu, 2003)，同时也是苹果蠹蛾幼虫与成虫的引诱剂 (Bradley & Suckling, 1995)，因此，过高的 1-法尼烯含量对辽伏果实是有害的。

References

- Aaby K, Hafner K, Skrede G. 2002. Aroma quality of Gravenstein apples influenced by regular and controlled atmosphere storage. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, 35: 254 - 259.
- Bradley S J, Suckling D M. 1995. Factors influencing codling moth larvae response to α -farnesene. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 75: 221 - 227.
- Chen Xue-sen, Xin Pei-gang, Zhang Tai-yan, Zhang Yan-min, Peng Fu-tian, Zhou Chao-hua, Jiang Yuan-mao, Chen Xiao-liu, Wang Hai-bo. 2008. A new very early-ripening apple cultivar 'Taishan Zaoxia'. *Acta Horticulturae Sinica*, 35 (1): 148. (in Chinese)
- 陈学森, 辛培刚, 张太岩, 张艳敏, 彭福田, 周朝华, 姜远茂, 陈晓流, 王海波. 2008. 极早熟苹果新品种 '泰山早霞'. *园艺学报*, 35 (1): 148.
- de Pooter H L, Montens J P, Dirinck J, Willaert G A, Schamp N M. 1983. Treatment of Golden Delicious apple with aldehydes and carboxylic acids: Effect on the headspace composition. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 37: 813 - 818.
- Defilippi B G, Kader A A, Dandekar A M. 2005. Apple aroma: Alcohol acyltransferase, a rate limiting step for ester biosynthesis, is regulated by ethylene. *Plant Science*, 168: 1199 - 1210.
- Dirinck P, Schamp N. 1989. Instrumental aroma analysis for objective evaluation of the parameters influencing aroma formation in apples and for prediction of the optimum picking date. *Acta Horticulturae*, 258: 421 - 428.
- Dixon J, Hewett E W. 2000. Factors affecting apple aroma/flavor volatile concentration: A review. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 28: 155 - 173.
- Echeverra G, Fuentes T, Graell J, Lara I, Lopez M L. 2004a. Aroma volatile compounds of 'Fuji' apples in relation to harvest date and cold storage technology: A comparison of two seasons. *Postharvest Biology and Technology*, 32: 29 - 44.
- Echeverra G, Graell J, Lopez M L, Lara I. 2004b. Volatile production, quality and aroma-related enzyme activities during maturation of 'Fuji' apples. *Postharvest Biology and Technology*, 31: 217 - 227.
- Fellman J K, Miller T W, Mattinson D S, Mattheis J P. 2000. Factors that influence biosynthesis of volatile flavor compounds in apple fruits. *HortScience*, 35: 1026 - 1033.
- Johannes H F B, Hendrik N J K, Jacques P R, Estanislau D B, Alphonsi G J V, Jan H A K. 2002. Sensory evaluation of character impact components in an apple model mixture. *Chemical Senses*, 27: 485 - 494.
- Nie Lan-chun, Sun Jian-she, Chen Hua-jun, Zou Xiang-wang. 2006. Study on fruit aroma of different apple cultivars. *Scientia Agricultura Sinica*, 39 (3): 641 - 646. (in Chinese)
- 乜兰春, 孙建设, 陈华君, 邹祥旺. 2006. 苹果不同品种果实香气物质研究. *中国农业科学*, 39 (3): 641 - 646.
- Nie Lan-chun, Sun Jian-she, Di Bao. 2005. Changes in amino acid and fatty acid contents as well as activity of some related enzymes in apple fruit during aroma production. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*, 31 (6): 663 - 667. (in Chinese)
- 乜兰春, 孙建设, 邸葆. 2005. 苹果果实香气产生过程中氨基酸和脂肪酸含量及一些相关酶活性的变化. *植物生理与分子生物学学报*, 31 (6): 663 - 667.
- Rowan D D, Lane H P, Allen J M, Fielder S, Hunt M B. 1996. Biosynthesis of 2-methylbutyl, 2-methyl-2-butenyl and 2-methyl butanoate esters in Red Delicious and Granny Smith apples using deuterium-labeled substrate. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 44: 3276 - 3285.
- Wang Hai-bo, Chen Xue-sen, Xin Pei-gang, Feng Tao, Shi Jun, Ci Zhi-juan. 2007a. GC-MS analysis of volatile components in several early apple cultivars. *Journal of Fruit Science*, 24 (1): 11 - 15. (in Chinese)
- 王海波, 陈学森, 辛培刚, 冯涛, 石俊, 慈志娟. 2007a. 几个早熟苹果品种香气成分的 GC-MS 分析. *果树学报*, 24 (1): 11 - 15.
- Wang Hai-bo, Chen Xue-sen, Xin Pei-gang, Zhang Xiao-yan, Ci Zhi-juan, Shi Jun, Zhang Hong. 2007b. Study on sugar and acid constituents in several early apple cultivars and evaluation of their flavor quality. *Journal of Fruit Science*, 24 (4): 513 - 516. (in Chinese)
- 王海波, 陈学森, 辛培刚, 张小燕, 慈志娟, 石俊, 张红. 2007b. 几个早熟苹果品种果实糖酸组分及风味品质的评价. *果树学报*, 24 (4): 513 - 516.
- Young H, Gilbert J M, Murray S H, Ball R D. 1996. Causal effects of aroma compounds on Royal Gala apple flavours. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 71: 329 - 336.
- Zhang Y H, Shu H R. 2003. Relationship between ratio of α -farnesene to conjugated trienes, antioxidant activity and scald development on cool-stored apples. *Acta Horticulturae*, 628: 501 - 507.