

采前果面喷施钙制剂对苹果果实品质的影响

孟智鹏¹, 杨舜博¹, 闫雷玉¹, 李娅楠¹, 王珣璠¹, 赵政阳^{1,2*}

(1 西北农林科技大学 园艺学院, 陕西杨陵 712100; 2 陕西省苹果工程技术研究中心, 陕西杨陵 712100)

摘 要:以‘富士’、‘金冠’和‘粉红女士’3个苹果品种为试验材料,并用氯化钙、硝酸钙和氨基酸钙3种钙制剂在采前30 d对果实进行喷施处理,采用常规方法测定基本果实品质指标,应用顶空固相微萃取及气相色谱质谱联用技术等测定果实香气等13项品质指标,并结合主成分分析和线性加权求和等方法对钙制剂处理的果实品质进行综合评价,以探究比较钙制剂对不同品种苹果果实品质的改进效果,为提高苹果果实品质和品种改良提供理论依据。结果表明:(1)采前钙处理对‘富士’和‘金冠’的单果重影响不显著,但‘粉红女士’采用氯化钙和氨基酸钙处理后单果重显著上升。(2)采前用氯化钙处理显著提高了苹果果实的糖酸比和硬度等;硝酸钙处理能够显著提高果皮亮度和色泽饱和度等;氨基酸钙处理则显著提升了果实的各类香气物质含量。(3)主成分分析和综合评价结果显示,经氯化钙、硝酸钙和氨基酸钙处理后,各品种苹果果实品质的综合得分均高于对照,且以氨基酸钙处理后果实的品质综合得分最高。研究发现,采前30 d钙处理可有效提升苹果果实的色泽、糖酸比、硬度以及香气等品质,且以氨基酸钙的处理效果最佳,而且对‘粉红女士’苹果果实品质的提升效果最为明显。

关键词:苹果;钙制剂;果实品质;香气物质;主成分分析

中图分类号:Q945.6⁺4; S661.1

文献标志码:A

Effect of Different Calcium Treatments on Fruit Quality of Three Apple Varieties

MENG Zhipeng¹, YANG Shunbo¹, YAN Leiyu¹, LI Ya'nan¹,
WANG Yufan¹, ZHAO Zhengyang^{1,2*}

(1 College of Horticulture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 Apple Engineering and Technology Research Center of Shaanxi Province, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to explore the influences of different calcium treatments on apple fruit quality, in this study, we used three apple varieties of ‘Fuji’, ‘Golden Delicious’ and ‘Pink Lady’ as plant materials, and the fruits were sprayed with three calcium treatments, calcium chloride, calcium nitrate and calcium amino acid, 30 days before harvest. The basic fruit quality indicators were detected by conventional methods, and the aroma compounds of fruit were determined by headspace solid-phase microextraction and gas chromatography-mass spectrometry. Comprehensive evaluation of 13 fruit quality indexes after calcium treatments used principal component analysis and linear weighted summation. This study explored and compared the effect of calcium treatments on improving the fruit quality of different apple varieties, so as to provide a theoretical basis for improving the fruit quality of apple. The results showed that: (1) pre-harvest spraying calcium treatments had no significant effect on the single fruit weight of ‘Fuji’ and

收稿日期:2022-01-15;修改稿收到日期:2022-06-24

基金项目:财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系(CARS-27)

作者简介:孟智鹏(1997—),男,在读硕士研究生,主要从事苹果品质改良及遗传育种研究。E-mail:1004783324@qq.com

* 通信作者:赵政阳,教授,博士生导师,主要从事苹果育种与遗传改良研究。E-mail:zhaozy@nwsuaf.edu.cn

‘Golden Delicious’, but the single fruit weight of ‘Pink Lady’ increased significantly after calcium chloride and calcium amino acid treatment. (2) Pre-harvest calcium chloride treatment had the most significant increase on the sugar-to-acid ratio and the hardness of the fruit; The calcium nitrate treatment had the most significant effect on improving the brightness and color saturation of peels. After the calcium amino acid treatment, the content of aroma components of the apple fruits had been greatly improved. (3) Principal component analysis and comprehensive score chart showed that the comprehensive index of fruit quality are all better than the control after being treated with three calcium treatments. The comprehensive score of fruit quality was the highest by treating with calcium amino acid. The study found that 30 days before harvest calcium treatment can effectively improve the color, sugar and acidity, hardness and aroma of apple fruit and among them, the treatment effect of amino acid calcium was the best, and it was the most effective in improving the fruit quality of ‘Pink Lady’ apples.

Key words: apple; calcium treatments; fruit quality; aroma components; principal component analysis

苹果(*Malus × domestica* Borkh.)是中国的重要经济型水果之一^[1],并且在各地被广泛栽培。苹果果实品质包括内在品质和外观品质,内在品质主要包括可溶性糖、可滴定酸、糖酸比、硬度、香气物质等,外观品质主要包括色泽、纵横径和单果重等。随着经济的发展、社会的进步,苹果消费已成为人们日常支出的重要一部分,人们对苹果果实品质的要求也进一步提高,因此苹果果实不仅要有酸甜适中的糖酸比、风味浓郁的香气物质,也需要具备优质的外观品质。

钙不仅是信号传导的信使,更是植物所必需的矿质养分,对植物的生长发育和生理生化代谢有着重要的作用,钙离子对超氧化物歧化酶、过氧化物酶等抗氧化酶的活性具有调节作用,从而影响果实品质^[2]。相关研究发现:在桃果实发育的后期,果实中钙含量会影响果实的品质和贮藏^[3-4],且苹果采前氯化钙处理可以有效提高果实品质^[5];桃果实喷施硝酸钙后,糖酸比下降、香气物质减少,但果实维生素C含量提高^[6];在‘寒富’苹果采前各钙处理中,氨基酸钙提高果实可溶性固形物含量和风味品质的效果最佳^[7]。喷施氯化钙和硝酸钙可以提高‘红富士’苹果果实的可溶性固形物和可滴定酸含量,并提高其耐贮性^[8]。采前进行氯化钙处理会改变‘南果梨’果皮的微观结构,并且促进果实香气的释放,增加果实香气物质含量^[9]。目前苹果采前钙处理研究较少,且多集中在氯化钙和‘富士’苹果方面,对于溶解度更大的硝酸钙和有机小分子螯合的氨基酸钙研究较少,而有关不同钙制剂影响效果的对比、不同苹果品种间影响差异的研究更是鲜有报道。

‘富士’苹果具有晚熟、果个大等特点,在中国各苹果产区被广泛栽培;‘金冠’是苹果中少有的黄色苹果品种,具有光泽鲜亮,肉质细密等特点;‘粉红女

士’是一个果形端正且高桩的苹果品种,具有抗逆性强、果实优质等优点。本试验以‘富士’、‘金冠’和‘粉红女士’3个苹果品种为试验材料,选用氯化钙、硝酸钙和氨基酸钙3种钙制剂进行采前果面喷施处理,并比较分析钙处理后果实外观品质、内在品质,特别是香气物质的变化及品种间差异,以期为进一步探究钙制剂对果实品质的影响、提高果实品质以及苹果品种改良提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 材料

试验供试3种钙制剂分别为氯化钙(CaCl_2 ,分析纯)、硝酸钙 $[\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}]$ 、氨基酸钙(钙盐、小分子氨基酸螯合)。参试的3个苹果品种分别为‘富士’、‘金冠’和‘粉红女士’,均于2020年取自西北农林科技大学白水苹果试验站。所有试验树均为7年生,行距为 $1.5\text{ m} \times 4\text{ m}$,以M26为自根砧,长势良好,且生态环境、栽培管理均保持一致,均采用果实无套袋栽培。

1.2 仪器与设备

试验仪器和设备主要包括:精确度为 0.1 g 电子天平;Minolta CR-400型色差计(日本);ATAGO(PAL-1)手持数显折光仪(日本爱拓公司);Fruit Acidzty Meter GMK-835型酸度计(韩国G-WON公司);FTA-GS-15水果质地分析仪(南京铭奥仪器公司); $50/30\text{ }\mu\text{m}$ DVB/CAR/PDMS萃取头和固相微萃取手柄(美国Supleco公司);Trace GC/MS气相色谱质谱联用仪(美国Thermo Scientific公司)。

1.3 试验设计

前人研究表明^[10]:钙元素的浓度为2%时处理效果最好,故本试验将所有钙制剂用水进行稀释,使最终钙元素的浓度为2%。

所有试验树生态环境、栽培管理均保持一致,于果实采收前 30 d,对不同苹果品种(‘富士’、‘金冠’、‘粉红女士’)果实进行清水(对照)、氯化钙、硝酸钙和氨基酸钙处理,每隔 10 d 喷施 1 次,共计 3 次。钙处理参照孙英杰^[11]的方法,处理时间选在早晨 10:00 之前,且无大风情况下进行,若在喷施后 3 h 内有降雨,进行补喷 1 次;每次喷施以果面形成均匀水珠,并开始滴水为宜。每种钙处理 9 棵树(3 个苹果品种×3 次生物学重复)。根据感官评价以及淀粉染色综合确定果实的成熟度。分别于各处理每棵树的中部,随机选择 10 个大小一致、着色均匀、且无病虫害和机械损伤的成熟果实,进行相关指标的测定。

1.4 测定指标及方法

1.4.1 单果重 每个苹果品种每个钙处理分别选取 10 个果实,使用精度为 0.1 g 的天平进行单果重测定,求其平均值。

1.4.2 色泽 使用 Minolta CR-400 型色差计对果实的 L* 值、a* 值和 b* 值进行测定,根据相关公式计算色度角 h 和饱和度 C*^[12],当 a* < 0, b* > 0 时, $h = 180^\circ + \arctan(b^*/a^*)$; $C^* = [(a^*)^2 + (b^*)^2]^{1/2}$ 。每个苹果品种每个钙处理分别选取 10 个着色均匀的果实,求其平均值。

1.4.3 可溶性固形物含量 使用 PAL-1 手持数显折光仪进行测定,每个苹果品种每个钙处理分别选取 10 个果实进行测定,求其平均值。

1.4.4 可滴定酸含量 使用 Fruit Acidzty Meter GMK-835 型酸度计进行测定,每个苹果品种每个钙处理分别选取 10 个果实进行测定,求其平均值。

1.4.5 果实硬度 使用 FTA-GS-15 水果质地分析仪(南京 铭奥仪器公司)进行测定,每个苹果品种每个钙处理分别选取 10 个果实进行测定,求其平均值。

1.4.6 香气物质组分及其含量 参照邓瑞等^[13]方法,使用 Trace GC/MS 气相色谱质谱联用仪、HP-INNOWax 毛细管色谱柱(60 m×0.25 mm×0.25 μm)、高纯氦气(1.0 mL·min⁻¹)进行测定。进样采用分流方式(240℃),柱温使用程序升温:起始 40℃,并保持 3 min;以 5℃·min⁻¹ 升温至 150℃,10℃·min⁻¹ 升至 220℃后,保持 5 min。质谱条件:采用 70 eV 的电子轰击能量、240℃的离子源温度和传输线温度。3 次重复,取其平均值。定性分析:通过检索 NIST 2014 标准谱库,并参考正反匹配度、保留时间和张鹏等^[14]、万鹏等^[15] 苹果香气物质研究结果,多方面对比分析。定量分析:各成分相对含量采用峰面积归一化法计算,以 3-壬酮为内标计

算各成分含量。

1.5 数据处理

试验数据采用 Microsoft Excel 2010 进行汇总和处理;使用 IBM SPSS Statistics 26.0 软件对数据进行多重差异显著性分析;运用 Origin 2018 软件进行绘图。

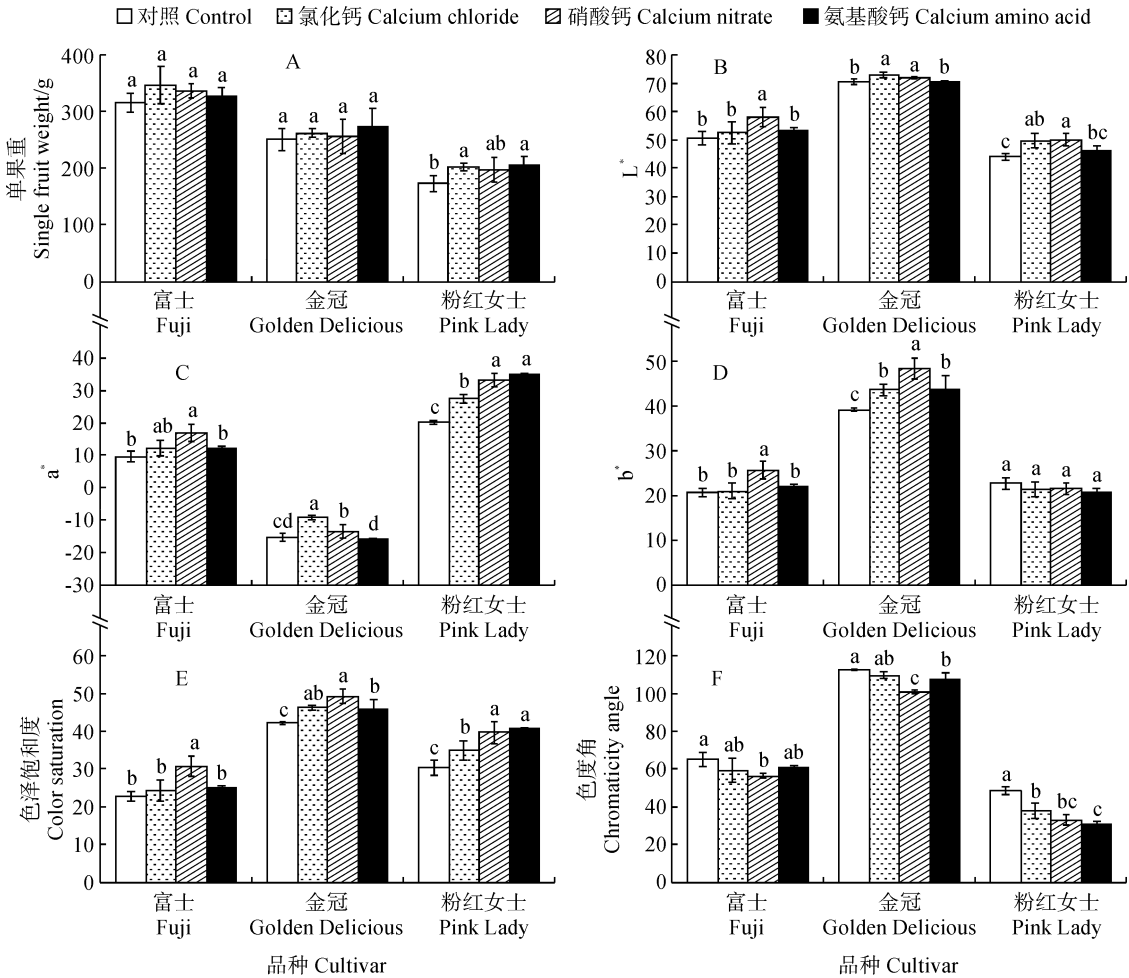
2 结果与分析

2.1 不同钙制剂对苹果单果重和色泽的影响

首先,各苹果品种的单果重在 3 种钙制剂处理后均比对照有不同程度的增加,但‘富士’和‘金冠’的单果重增幅均未达到显著水平;‘粉红女士’的单果重在硝酸钙处理后增幅也不显著,在氯化钙和氨基酸钙处理后分别比对照显著增加 17.02% 和 19.47%(图 1,A)。

其次,各苹果品种果实的 L* 值在 3 种钙制剂处理后均比对照有不同程度的增加,但仅部分处理达到显著水平。其中,‘富士’的 L* 值仅在硝酸钙处理后比对照显著增加 17.80%,‘金冠’的 L* 值在氯化钙和硝酸钙处理后分别比对照显著提升 3.30% 和 1.87%,‘粉红女士’的 L* 值在氯化钙和硝酸钙处理后则分别比对照显著提升 12.55% 和 13.55%;各品种果实的 L* 值在氨基酸钙处理后均无显著变化(图 1,B)。

再次,图 1,C~F 显示,‘富士’果实的 a* 值、b* 值、色泽饱和度和色度角都仅在硝酸钙处理后与对照有显著差异,前三者分别比对照显著提高 75.34%、23.86%、34.37%,而色度角比对照显著降低 13.52%。‘金冠’果实的 b* 值在氯化钙、硝酸钙和氨基酸钙处理后分别比对照显著增加 11.46%、23.57%、11.44%,色泽饱和度分别比对照显著增加 9.47%、16.38%、8.21%;其 a* 值在氯化钙、硝酸钙处理后分别比对照显著增加 40.62% 和 11.77%,在氨基酸钙处理后无显著变化;其色度角在硝酸钙和氨基酸钙处理后分别比对照显著降低 10.27%、4.22%,在氯化钙处理后无显著变化。‘粉红女士’的色泽饱和度在氯化钙、硝酸钙和氨基酸钙处理后分别比对照显著增加 14.92%、30.31% 和 33.60%,其 a* 值则分别比对照相应显著提高 36.13%、64.22%、72.51%,其色度角则分别比对照相应显著降低 21.64%、31.77% 和 36.62%,而其 b* 值在各钙制剂处理下均与对照无显著差异。以上结果说明在提高果皮亮度和色泽饱和度等果实外观指标方面,硝酸钙处理最为有效。



品种内不同小写字母表示处理间在 0.05 水平存在显著性差异 ($P < 0.05$), 邓肯检测法; 下同

图 1 不同钙制剂处理下苹果果实外观品质的变化

The different lowercase letters within same cultivar represent significant difference among different treatments at 0.05 level ($P < 0.05$), Duncan Assay; The same as below

Fig. 1 The appearance quality of apple fruit under different calcium treatments

2.2 不同钙制剂对苹果果实糖酸和硬度的影响

苹果果实可溶性固形物含量在钙制剂处理后的变化特征因品种而异, ‘富士’在氯化钙和氨基酸钙处理后分别比对照显著增加 7.97% 和 13.78%, 而 ‘金冠’则在氯化钙和硝酸钙处理后分别比对照显著增加 13.03% 和 7.64%, ‘粉红女士’则仅在硝酸钙处理后比对照显著增加 2.07%, 各品种在其余处理下均无显著变化(图 2, A); ‘富士’和 ‘粉红女士’苹果果实的可滴定酸含量在各钙制剂处理后均与对照无显著差异, ‘金冠’的可滴定酸含量也仅在氯化钙处理后与对照差异显著, 显著降低了 13.64%(图 2, B); ‘富士’、‘金冠’和 ‘粉红女士’果实的糖酸比在各钙制剂处理下均比对照不同程度提高, 但均仅在氯化钙处理后增幅达到显著水平, 分别达到 26.44%、30.40% 和 15.02%(图 2, C)。各品种果

实的硬度在各钙制剂处理下也均比对照不同程度提高, 但 ‘富士’的增幅只在氯化钙和硝酸钙处理下达到显著水平, 分别达到 9.41% 和 11.50%; ‘金冠’的增幅在各处理下均达到显著水平, 分别达到 4.8%、5.76% 和 4.8%; 而 ‘粉红女士’只在氯化钙和氨基酸钙处理后增幅显著, 分别为 10.31% 和 8.41%(图 2, D)。

2.3 不同钙制剂对不同苹果果实香气物质的影响

2.3.1 香气物质成分 首先, 各处理 ‘富士’苹果果实中共检测出 39 种香气物质, 其中酯类 21 种, 醛类 6 种, 醇类 3 种, 烯类 3 种, 烷烃类 2 种, 其他类 4 种。与对照相比, ‘富士’苹果果实经钙制剂处理后增加了丁酸戊酯、(E)-2-己烯醛、双环庚-2-烯、正十四碳烷和草蒿脑等 9 种香气物质。钙制剂和对照 ‘富士’果实共有且含量较高的香气物质有己酸丁酯、

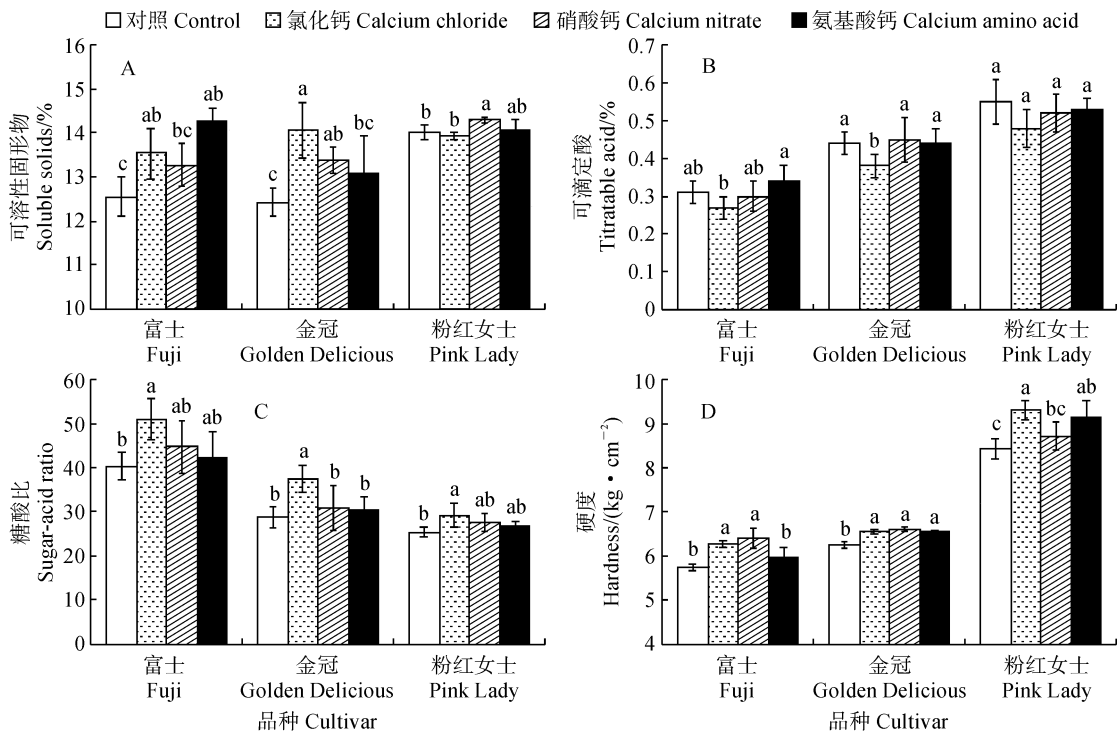


图 2 不同钙制剂处理下苹果果实内在品质的变化

Fig. 2 The intrinsic quality of apple fruit under different calcium treatments

己酸己酯、2-甲基-1-丁基乙酸酯、2-己烯醛和 α -法尼烯等,它们的含量经钙制剂处理后均有所提高(表 1)。

其次,各处理‘金冠’苹果果实中共检测出 37 种香气物质,其中酯类 18 种,醛类 8 种,醇类 4 种,烯类 3 种,烷烃类 1 种,其他类 3 种。与对照相比,‘金冠’苹果果实经钙制剂处理后增加了 13 种香气物质,包括 2-甲基丁酸酯、(E)-2-己烯醛、3-己烯醛、壬醛、双环庚-2-烯和正十四碳烷等。不同钙制剂处理和对照‘金冠’苹果果实共有且含量较高的香气物质有丙酸己酯、丁酸己酯、己酸己酯、2-甲基丁酸己酯、己醛、2-己烯醛、 α -法尼烯和草蒿脑等,它们的含量经钙制剂处理后均有所提高(表 2)。

另外,各处理‘粉红女士’苹果果实中共检测出 45 种香气物质,其中酯类 24 种、醛类 4 种、醇类 3 种、烯类 5 种、烷烃类 3 种、其他类 6 种。与对照相比,‘粉红女士’苹果果实经钙制剂处理后增加了 15 种香气物质,包括丁酸戊酯、己酸戊酯、庚酸辛酯、3-己烯醛、正-丁醇、双环庚-2-烯等。不同钙制剂和对照‘粉红女士’果实共有且含量较高的香气物质有:乙酸己酯、丙酸己酯、己酸丁酯、丁酸己酯、己酸己酯、2-甲基丁酸己酯、2-己烯醛、己醛和 α -法尼烯等,它们的含量经钙制剂处理后均有所提高(表 3)。

2.3.2 各类香气物质含量 3 个苹果品种经氯化钙、硝酸钙和氨基酸钙处理后,果实香气物质总含量

均比对照显著提高,各类香气物质含量也均与对照存在显著性差异,但各处理提高效果有所差异(表 4)。其中,‘富士’果实香气物质总含量在氯化钙、硝酸钙和氨基酸钙处理后分别是对照的 1.6 倍、1.3 倍、1.4 倍,且处理之间差异显著;果实各类香气物质含量在钙制剂处理下均不同程度高于对照,且大多达到显著水平;其酯类、醛类和其他类香气物质均以氯化钙处理显著较高,而其醇类、烷烃类、烯类香气物质均以氨基酸钙处理显著较高。‘金冠’苹果果实的香气物质总含量在氯化钙、硝酸钙和氨基酸钙处理后分别是其对照的 1.5 倍 1.2 倍和 2.2 倍,且各处理及对照之间均差异显著;果实酯类、醛类、烷烃类和其他类香气物质含量在钙制剂处理下均显著高于对照,并均以氨基酸钙处理最高,且多与其他钙制剂处理差异显著,其醇类香气物质含量仍以在氨基酸钙处理最高,并与对照差异显著,但氯化钙、硝酸钙处理却显著低于对照,而其烯类香气物质则以对照最高,并与其他钙制剂处理差异显著,且硝酸钙和氨基酸钙处理显著较低。‘粉红女士’果实的香气物质总含量在氯化钙、硝酸钙和氨基酸钙处理后则分别为其对照的 1.9 倍、2.5 倍和 3.9 倍,且与对照均差异显著;在各类钙制剂处理下,果实的各类香气物质含量除烯类外均不同程度地高于相应对照,且大多达到显著水平,并均以氨基酸钙处理最高,

表 1 不同钙制剂处理下‘富士’苹果果实香气物质组分及含量

Table 1 The content of aroma components in fruit of ‘Fuji’ apples under different calcium treatments

种类 Type	香气物质 Aroma component	相对含量百分比 Relative content/%			
		对照 Control	氯化钙 Calcium chloride	硝酸钙 Calcium nitrate	氨基酸钙 calcium amino acid
酯类 Esters	乙酸丁酯 Butyl acetate	1.02±0.05	0.46±0.09	0.67±0.05	0.37±0.02
	2-甲基-1-丁基乙酸酯 1-Butanol, 2-methyl-, acetate	6.24±0.33	5.15±0.31	6.32±0.73	5.91±0.51
	丙酸丁酯 Butyl Propionate	0.92±0.04	0.82±0.06	—	—
	乙酸戊酯 Amyl acetate	0.22±0.02	0.11±0.03	0.20±0.01	—
	丙酸戊酯 Propanoic acid, pentyl ester	0.31±0.01	0.57±0.05	0.36±0.04	0.57±0.07
	丁酸丁酯 Butyl butyrate	0.62±0.03	0.59±0.05	0.62±0.05	—
	2-甲基丁酸丁酯 Butyl 2-methylbutanoate	3.37±0.25	1.38±0.16	1.53±0.12	14.53±0.11
	3-甲基丁酸丁酯 3-methylbutyl ester	0.17±0.02	0.35±0.09	0.26±0.03	0.35±0.03
	乙酸己酯 Hexyl acetate	3.17±0.02	1.74±0.32	2.58±0.18	1.47±0.12
	2-甲基丁酸酯 Butanoic acid, 2-methyl-, 2-methylbutyl ester	0.92±0.15	0.93±0.08	0.75±0.03	1.13±0.21
	丁酸戊酯 Butanoic acid, pentyl ester	—	0.09±0.00	—	—
	2-甲基丁酸异戊酯 Butanoic acid, 2-methyl-, pentyl ester	0.60±0.02	0.45±0.05	0.41±0.03	0.32±0.04
	丙酸己酯 Propanoic acid, hexyl ester	1.44±0.12	2.06±0.20	1.51±0.09	1.35±0.17
	己酸丁酯 Hexanoic acid, butyl ester	3.10±0.21	4.03±0.23	3.98±0.35	3.47±0.29
	丁酸己酯 Butanoic acid, hexyl ester	1.79±0.73	5.07±0.62	4.30±0.33	3.11±0.36
	2-甲基丁酸己酯 Butanoic acid, 2-methyl-, hexyl ester	31.82±3.74	19.04±1.12	17.36±1.48	11.75±0.9
	2-甲基丁基己酸酯 Hexanoic acid, 2-methylbutyl ester	0.77±0.10	1.76±0.19	1.33±0.28	2.03±0.16
	己酸戊酯 Hexanoic acid, pentyl ester	0.72±0.11	1.75±0.17	1.32±0.26	1.36±0.12
	己酸己酯 Hexanoic acid, hexyl ester	5.67±0.56	14.54±0.97	12.53±0.95	10.28±1.24
	辛酸丁基酯 Butyl caprylate	2.05±0.56	—	—	—
醛类 Aldehyde	辛酸 2-甲基丁酯 2-Methylbutyl octanoate	0.82±0.07	1.73±0.13	1.10±0.24	1.45±0.09
	己醛 Hexanal	1.09±0.21	0.92±0.04	1.14±0.18	1.18±0.12
	2-甲基-4-戊烯醛 4-Pentenal, 2-methyl-	—	—	—	0.72±0.05
	3-己烯醛 3-Hexenal	0.24±0.04	0.57±0.08	1.14±0.09	0.57±0.04
	(E)-2-己烯醛 (E)-2-Hexenal	—	—	—	0.30±0.01
	2-己烯醛 2-Hexenal	14.53±2.26	11.75±1.67	10.24±0.17	0.38±0.01
醇类 Alcohol	壬醛 Nonanal	0.56±0.12	0.38±0.04	0.37±0.03	0.59±0.64
	2-甲基-1-丁醇 1-Butanol, 2-methyl-	0.62±0.11	0.68±0.06	—	1.10±0.85
	2-己炔-1-醇 2-Hexyn-1-ol	0.27±0.03	0.27±0.05	0.27±0.03	—
烯类 Terpenoids	正己醇 1-Hexanol	0.43±0.07	—	0.10±0.01	—
	双环庚-2-烯 Bicyclo[3.1.1]hept-2-ene, 2,6-dimethyl-6-(4-methyl-3-pentenyl)-	—	—	3.75±0.04	3.91±0.06
	反式 α-柑油烯 trans-α-Bergamotene	0.06±0.00	2.85±0.21	—	—
烷烃类 Alkanes	α-法尼烯 α-Farnesene	16.12±1.74	17.28±2.37	23.29±1.98	28.96±2.34
	正十四碳烷 Tetradecane	—	0.57±0.03	0.51±0.04	0.70±0.09
其他类 Other kind	十六烷 Hexadecane	—	—	0.11±0.01	0.18±0.01
	1-辛烯-3-酮 1-Octen-3-one	—	0.14±0.02	—	0.10±0.00
	2-甲基庚酸 2-Methylheptanoic acid	0.33±0.05	0.99±0.15	0.99±0.08	0.83±0.11
	草蒿脑 Estragole	—	0.52±0.05	0.49±0.02	0.65±0.08
	八甘醇单十二烷基醚 Octaethylene glycol monododecyl ether	—	0.47±0.06	0.49±0.04	0.37±0.04

注：—表示未检测到；下同

Note: — indication not detected; The same as below

表 2 不同钙制剂处理下‘金冠’苹果果实香气物质组分及含量

Table 2 The content of aroma components in fruit of ‘Golden Delicious’ apples under different calcium treatments

种类 Type		香气物质 Aroma component	相对含量百分比 Relative content/%			
			对照 Control	氯化钙 Calcium chloride	硝酸钙 Calcium nitrate	氨基酸钙 calcium amino acid
酯类 Esters	乙酸丁酯 Butyl acetate		1.13±0.12	0.15±0.02	0.22±0.05	0.20±0.03
	2-甲基-1-丁基乙酸酯 1-Butanol, 2-methyl-, acetate		0.95±0.42	0.76±0.08	0.90±0.14	1.59±0.97
	丙酸丁酯 Butyl Propionate		0.58±0.12	—	—	—
	乙酸戊酯 Amyl acetate		0.28±0.09	0.18±0.01	0.25±0.01	0.21±0.07
	丁酸丁酯 Butyl butyrate		0.96±0.13	0.37±0.03	0.11±0.01	0.31±0.01
	乙酸己酯 Hexyl acetate		9.81±1.79	4.02±0.11	5.63±0.46	4.26±0.27
	2-甲基丁酸酯 Butanoic acid 2-methyl-, 2-methylbutyl ester		—	0.17±0.03	0.26±0.04	0.61±0.05
	丁酸戊酯 Butanoic acid, pentyl ester		0.19±0.05	0.38±0.05	0.31±0.07	0.31±0.03
	2-甲基丁酸异戊酯 Butanoic acid, 2-methyl-, pentyl ester		0.24±0.02	0.67±0.09	0.65±0.06	1.44±0.18
	丙酸己酯 Propanoic acid, hexyl ester		2.79±0.32	2.08±0.17	3.39±0.27	3.28±0.40
	己酸丁酯 Hexanoic acid, butyl ester		2.05±0.14	0.93±0.12	0.88±0.05	0.87±0.08
	丁酸己酯 Butanoic acid, hexyl ester		8.66±0.98	9.26±1.21	8.74±1.08	8.06±0.06
	2-甲基丁酸己酯 Butanoic acid, 2-methyl-, hexyl ester		15.12±1.21	19.72±1.76	27.15±1.73	32.28±3.23
	2-甲基丁基己酸酯 Hexanoic acid, 2-methylbutyl ester		—	—	—	0.20±0.01
	缬草酸反-2-己烯酯 trans-2-Hexenyl valerate		—	—	0.27±0.01	0.57±0.08
	己酸戊酯 Hexanoic acid, pentyl ester		0.31±0.05	0.77±0.07	0.42±0.03	1.01±0.16
	己酸己酯 Hexanoic acid, hexyl ester		3.39±0.14	3.89±1.93	3.00±0.37	5.18±0.74
	硫氰酸己酯 Hexyl tiglate		0.10±0.01	0.18±0.03	0.32±0.08	0.31±0.05
醛类 Aldehyde	己醛 Hexanal		3.94±0.37	4.95±0.35	4.57±0.29	3.87±0.29
	2-甲基-4-戊烯醛 4-Pentenal, 2-methyl-		—	0.24±0.06	0.17±0.01	—
	3-己烯醛 3-Hexenal		—	0.70±0.05	0.94±0.07	0.48±0.07
	(E)-2-己烯醛 (E)-2-Hexenal		—	0.56±0.05	—	—
	2-己烯醛 2-Hexenal		25.23±2.84	37.63±2.43	32.51±2.02	26.27±2.14
	2-庚醛(Z)2-Heptenal, (Z)-		0.17±0.04	0.47±0.02	0.64±0.03	0.44±0.04
	壬醛 Nonanal		—	0.44±0.08	0.35±0.03	0.29±0.02
	(E)-2-癸烯醛(E)-2-Decenal		—	0.50±0.02	0.48±0.01	—
醇类 Alcohol	2-甲基-1-丁醇 1-Butanol, 2-methyl-		—	—	—	0.17±0.02
	2-己炔-1-醇 2-Hexyn-1-ol		0.26±0.07	—	0.61±0.05	0.47±0.06
	正己醇 1-Hexanol		1.07±0.22	0.24±0.06	—	0.42±0.05
	2-乙基-1-己醇 1-Hexanol, 2-ethyl-		0.32±0.07	—	—	—
烯类 Terpenoids	双环庚-2-烯 双环[3.1.1]hept-2-ene, 2,6-dimethyl-6-(4-methyl-3-pentenyl)-		—	0.30±0.02	—	0.65±0.12
	反式-α-柑油烯 trans-α-Bergamotene		0.44±0.11	—	—	—
	α-法尼烯 α-Farnesene		18.68±2.26	4.05±0.57	2.73±0.28	0.93±0.08
烷烃类 Alkanes	正十四碳烷 Tetradecane		—	0.31±0.05	0.42±0.06	0.46±0.04
其他类 Other kind	草蒿脑 Estragole		3.02±0.22	5.50±0.71	3.54±0.23	4.41±0.38
	八甘醇单十二烷基醚 Octaethylene glycol monododecyl ether		0.31±0.06	0.45±0.05	0.54±0.06	0.15±0.01
	2-甲基庚酯丁酸 3-Butanoic acid, 2-methyl-, heptyl ester		—	0.12±0.03	—	0.29±0.03

表 3 不同钙制剂处理下‘粉红女士’苹果果实香气物质组分及含量
Table 3 The content of aroma components in fruit of ‘Pink Lady’ apples under different calcium treatments

种类 Type	香气物质 Aroma component	相对含量百分比 Relative content/%			
		对照 Control	氯化钙 Calcium chloride	硝酸钙 Calcium nitrate	氨基酸钙 calcium amino acid
酯类 Esters	乙酸丁酯 Butyl acetate	0.67±0.09	0.27±0.02	0.85±0.07	0.32±0.05
	2-甲基-1-丁基乙酸酯 1-Butanol, 2-methyl-, acetate	1.40±0.16	0.63±0.05	1.20±0.94	0.72±0.07
	丙酸丁酯 Butyl Propionate	0.42±0.05	0.34±0.03	0.56±0.06	0.39±0.02
	乙酸戊酯 Amyl acetate	0.11±0.03	—	0.19±0.01	0.06±0.00
	丁酸丁酯 Butyl butyrate	0.42±0.07	0.30±0.01	0.82±0.16	0.39±0.04
	2-甲基丁酸丁酯 Butyl 2-methylbutanoate	1.73±0.20	—	1.41±0.18	1.00±0.06
	乙酸己酯 Hexyl acetate	4.95±0.22	3.86±0.29	5.62±0.54	2.66±0.20
	2-甲基丁酸酯 Butanoic acid 2-methyl-, 2-methylbutyl ester	0.19±0.07	—	0.26±0.03	0.11±0.01
	丁酸戊酯 Butanoic acid, pentyl ester	—	—	0.06±0.00	0.04±0.00
	己酸丙酯 Hexanoic acid, propyl ester	0.21±0.04	—	0.20±0.04	0.16±0.01
	2-甲基丁酸异戊酯 Butanoic acid, 2-methyl-, pentyl ester	0.19±0.06	0.12±0.00	0.30±0.00	0.17±0.01
	丙酸己酯 Propanoic acid, hexyl ester	1.76±0.67	1.73±0.16	3.77±0.28	2.39±0.23
	己酸丁酯 Hexanoic acid, butyl ester	3.24±0.33	2.37±0.16	3.23±0.29	2.95±0.12
	丁酸己酯 Butanoic acid, hexyl ester	3.65±0.29	2.60±0.24	3.56±0.23	3.81±0.36
	2-甲基丁酸己酯 Butanoic acid, 2-methyl-, hexyl ester	29.95±2.45	22.48±1.98	32.12±2.85	22.29±2.93
	2-甲基丁基己酸酯 Hexanoic acid, 2-methylbutyl este	0.34±0.13	0.24±0.03	0.32±0.02	0.26±0.01
	己酸戊酯 Hexanoic acid, pentyl ester	—	0.71±0.06	0.81±0.08	0.91±0.07
	辛酸丙酯 Propyl octanoate	0.16±0.05	—	0.11±0.00	0.13±0.00
	己酸己酯 Hexanoic acid, hexyl ester	0.84±0.08	19.65±2.38	20.33±2.23	22.43±1.64
	硫氰酸己酯 Hexyl tiglate	—	0.21±0.01	0.28±0.01	—
	2-辛酸戊酯 Octanoic acid, 2-pentyl ester	—	0.46±0.06	—	—
	2-甲基-辛酸丁酯 2-Methylbutyl octanoate	0.44±0.05	—	0.58±0.07	0.48±0.07
	庚酸辛酯 Heptanoic acid, octyl este	—	—	0.43±0.03	0.56±0.06
	辛酸己酯 Octanoic acid, hexyl ester	1.05±0.07	1.02±0.11	1.47±0.16	1.43±0.25
醛类 Aldehyde	己醛 Hexanal	0.56±0.07	0.58±0.34	0.45±0.05	0.22±0.02
	3-己烯醛 3-Hexenal	—	0.26±0.03	0.03±0.00	—
	2-己烯醛 2-Hexenal	9.38±1.31	9.68±0.84	6.60±0.68	3.72±0.28
	2-庚醛(Z)2-Heptenal, (Z)-	0.34±0.04	0.20±0.03	—	0.11±0.01
醇类 Alcohol	1-丁醇 1-Butanol	—	—	0.20±0.03	0.08±0.00
	2-己炔-1-醇 2-Hexyn-1-ol	0.08±0.00	0.16±0.01	0.06±0.00	—
	正己醇 1-Hexanol	0.58±0.09	0.22±0.03	0.43±0.3	0.22±0.03
烯类 Terpenoids	双环庚-2-烯 Bicyclo[3.1.1]hept-2-ene, 2,6-dimethyl-6-(4-methyl-3-pentenyl)-	—	—	3.05±0.32	4.32±0.04
	反式 α-柑油烯 trans-α-Bergamotene	1.98±0.18	4.09±0.51	0.37±0.29	—
	α-法尼烯 α-Farnesene	33.26±1.34	25.65±0.30	8.61±0.63	25.50±0.26
	α-愈创木烯 α-Guaiene	—	—	—	0.10±0.01
烷烃类 Alkanes	罗汉柏烯 cis-Thujopsene	0.44±0.03	—	—	—
	6-甲基正十八烷 Octadecane, 6-methyl-	—	0.08±0.000	—	0.07±0.00
	正十四碳烷 Tetradecane	0.09±0.01	0.57±0.05	0.32±0.05	0.33±0.05
	十六烷 Hexadecane	—	0.19±0.01	0.06±0.00	0.15±0.02
其他类 Other kind	草蒿脑 Estragole	1.47±0.012	0.54±0.05	0.40±0.03	0.69±0.12
	1-辛烯-3-酮 1-Octen-3-one	—	0.08±0.00	0.09±0.01	0.05±0.01
	八甘醇单十二烷基醚 Octaethylene glycol monododecyl ether	0.16±0.011	0.37±0.05	0.12±0.01	0.26±0.04
	七乙二醇单十二烷基醚 Heptaethylene glycol monododecyl ether	—	0.13±0.01	0.30±0.03	0.28±0.03
	2-甲基庚酯丁酸 Butanoic acid, 2-methyl-, heptyl ester	0.27±0.03	0.18±0.03	0.28±0.03	0.25±0.02
	2-甲基庚酸 2-Methylheptanoic acid	—	—	0.12±0.01	—

表 4 不同钙制剂处理下 3 个苹果品种果实香气物质含量的变化

Table 4 Contents of aroma components in fruit of three apple varieties treated by different calcium treatments					
品种 Variety	种类 Type	香气物质含量 Aroma component content/($\mu\text{g/kg}$)			
		对照 Control	氯化钙 Calcium chloride	硝酸钙 Calcium nitrate	氨基酸钙 Calcium amino acid
富士 Fuji	酯类 Esters	2 578.14 $\pm$ 216.49c	3 928.91 $\pm$ 224.65a	2 980.62 $\pm$ 337.09bc	3 317.67 $\pm$ 227.02b
	醛类 Aldehyde	644.17 $\pm$ 30.24c	854.56 $\pm$ 41.93a	672.06 $\pm$ 49.81b	209.54 $\pm$ 27.98b
	醇类 Alcohol	51.94 $\pm$ 3.49b	59.30 $\pm$ 5.42a	56.45 $\pm$ 3.96ab	61.49 $\pm$ 4.89a
	烷烃类 Alkanes	0.00 $\pm$ 0.00c	35.80 $\pm$ 2.32b	32.28 $\pm$ 4.52b	49.27 $\pm$ 3.20a
	烯烃类 Olefins	634.55 $\pm$ 30.37c	1 262.60 $\pm$ 142.15b	1 410.61 $\pm$ 168.08b	1 834.53 $\pm$ 191.48a
	其他类 Other kind	12.90 $\pm$ 2.31c	132.54 $\pm$ 18.35a	102.41 $\pm$ 10.03b	108.96 $\pm$ 18.63ab
	总含量 Total	3 921.69 $\pm$ 270.14c	6 273.71 $\pm$ 227.55a	5 254.43 $\pm$ 197.59b	5 581.47 $\pm$ 306.48b
金冠 Golden Delicious	酯类 Esters	1 542.62 $\pm$ 206.09c	2 147.54 $\pm$ 194.33b	2 087.09 $\pm$ 223.78b	4 462.43 $\pm$ 222.72a
	醛类 Aldehyde	972.03 $\pm$ 112.51c	2 244.95 $\pm$ 273.35a	1 576.16 $\pm$ 248.81b	2 305.16 $\pm$ 194.55a
	醇类 Alcohol	54.52 $\pm$ 3.16b	11.89 $\pm$ 0.87d	24.27 $\pm$ 2.13c	78.44 $\pm$ 3.63a
	烷烃类 Alkanes	0.00 $\pm$ 0.00c	15.14 $\pm$ 13.2b	16.73 $\pm$ 1.97b	33.71 $\pm$ 2.38a
	烯烃类 Olefins	633.80 $\pm$ 38.74a	214.38 $\pm$ 30.38b	108.51 $\pm$ 12.88c	116.05 $\pm$ 13.11c
	其他类 Other kind	110.23 $\pm$ 12.63d	299.57 $\pm$ 20.12b	162.29 $\pm$ 15.38c	356.38 $\pm$ 25.48a
	总含量 Total	3 313.20 $\pm$ 214.36d	4 933.48 $\pm$ 229.39b	3 975.05 $\pm$ 221.57c	7 352.16 $\pm$ 390.64a
粉红女士 Pink Lady	酯类 Esters	5 353.57 $\pm$ 507.54d	11 129.33 $\pm$ 1 485.31c	19 992.88 $\pm$ 2 035.83b	35 780.11 $\pm$ 2 331.46a
	醛类 Aldehyde	1 028.94 $\pm$ 90.75b	2 094.82 $\pm$ 236.99a	1 802.94 $\pm$ 233.16a	2 271.71 $\pm$ 207.83a
	醇类 Alcohol	67.88 $\pm$ 8.55b	72.91 $\pm$ 3.56b	178.08 $\pm$ 27.26a	169.90 $\pm$ 21.37a
	烷烃类 Alkanes	9.58 $\pm$ 1.09d	164.01 $\pm$ 19.21b	99.06 $\pm$ 16.02c	310.94 $\pm$ 25.13a
	烯烃类 Olefins	3 691.13 $\pm$ 286.32c	5 807.40 $\pm$ 366.31b	3 065.15 $\pm$ 165.50c	16 819.01 $\pm$ 1611.81a
	其他类 Other kind	197.05 $\pm$ 26.64c	254.77 $\pm$ 22.50c	335.84 $\pm$ 30.02b	859.40 $\pm$ 49.95a
	总含量 Total	1 0348.14 $\pm$ 1 274.86c	19 523.24 $\pm$ 2 133.12b	25 473.94 $\pm$ 2 527.78b	56 211.09 $\pm$ 3 242.41a

也多与其余钙制剂处理差异显著;其烯烃类香气物质含量在氯化钙和氨基酸钙处理下仍显著高于对照,且仍以氨基酸处理最高,但硝酸钙处理稍低于对照。可见,各钙制剂处理均对苹果品种‘粉红女士’果实的香气物质总含量的促进效应最大,其中又以氨基酸钙处理效果最佳。

2.3.3 各类香气物质占比 3 个苹果品种果实各类香气物质所占的比例经钙处理后发生明显变化(图 3)。其中,‘富士’果实的香气物质组成在各钙制剂处理下均以酯类为主,占比在 57%~66%之间,各处理间及其与对照之间均无显著差异;其次是烯烃类,占比在 16%~33%之间,硝酸钙和氨基酸钙处理显著高于对照和氯化钙处理,并以氨基酸钙处理最高;再次是醛类,占比在 4%~16%%之间,以对照最高,各钙制剂处理显著低于对照(图 3,A)。
‘金冠’果实的香气物质组成在各钙制剂处理下仍均以酯类为主,占比在 44%~61%之间,并以氨基酸

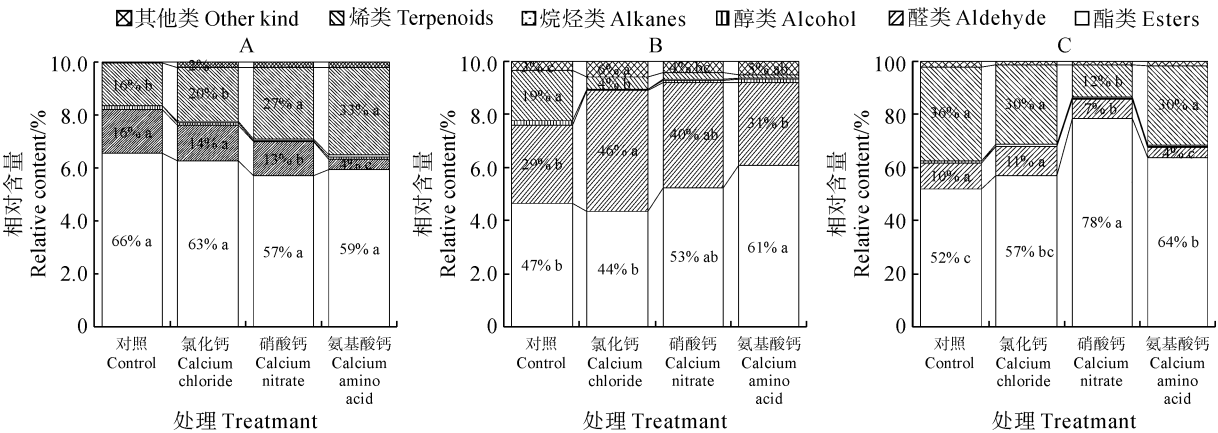
钙处理最高,显著高于对照和氯化钙处理,而氯化钙、硝酸钙处理间及其与对照之间均无显著差异;其次是醛类香气物质,占比在 29%~46%之间,并以氯化钙处理最高,显著高于对照和氨基酸钙处理,而氨基酸钙、硝酸钙处理间及其与对照之间均无显著差异;再次是烯烃类物质,占比在 4%并以对照最高,各钙制剂处理均显著低于对照;其他类香气物质所占比例在 3%~6%之间,钙制剂处理后有增加趋势,增幅在 1%~3%之间(图 3,B)。
‘粉红女士’果实的香气物质组成在各钙制剂处理下仍均以酯类为主,占比在 44%~61%之间,并以氨基酸钙处理最高,显著高于对照和氯化钙处理,占比在 52%~78%之间,并以硝酸钙处理最高,并与其余处理和对照之间差异显著,而氯化钙处理与对照之间相近;其次是烯类香气物质,占比在 12%~36%之间,并以对照最高,但仅硝酸钙处理与对照差异显著;再次是醛类香气物质,占比在 4%~11%之间,并以氯化钙

处理最高,但与对照(10%)无显著差异,而硝酸钙和氨基酸钙处理均显著低于对照(图 3,C)。

2.4 各钙制剂处理苹果果实品质主成分分析和综合评价

主成分分析可以通过降维的方式,使多个变量间关系更加清晰^[16]。故对不同钙制剂处理、不同苹果品种的果实品质进行主成分分析,将 13 项果实品质指标转化为 2 个主成分。结果表明:两个主成分特征值均大于 1,且贡献率分别是 49.7%和 33.5%,累计贡献率达 83.2%,故这 2 个主成分可以代表各指标大多数信息。第一主成分综合了硬度、a* 值、可溶性固形物、酯类和烯类香气物质 5 个指标,主要反映果实内在品质,第二主成分综合了 L* 值、b* 值、色泽饱和度和醛类香气物质 4 个指标,主要反映果实外观品质(图 4,A、B)。

同时,3 个苹果品种经钙制剂处理后,代表对照和钙处理的点均呈现出从左到右的规律,同时代表‘金冠’和‘粉红女士’苹果对照及钙处理的点呈现出从下到上的规律,表明 3 个苹果品种经钙制剂处理后,第一主成分代表的品质指标变化明显,‘金冠’和‘粉红女士’中第二主成分代表的品质指标也变化明显,且不同苹果品种在主成分得分图的不同区域有明显聚类(图 5,A)。以 2 个主成分的方差贡献率为权重,将各处理主成分得分进行线性加权求和,计算各处理的综合评价得分。经氯化钙、硝酸钙和氨基酸钙处理后,3 个苹果品种(除氯化钙处理的‘富士’外)综合得分均高于对照,且氨基酸钙处理的果实品质综合得分最高(图 5,B),表明对苹果进行采前钙处理可以有效提高果实综合品质,并以氨基酸钙处理效果最佳。



A. 富士;B. 金冠;C. 粉红女士;小于 2%的数据标签未显示
图 3 不同钙制剂处理下苹果果实各类香气物质相对含量的变化

A. Fuji; B. Golden delicious; C. Pink Lady; Less than 2% of data labels are not displayed

Fig. 3 The relative contents of various aroma components in fruit of apple under different calcium treatments

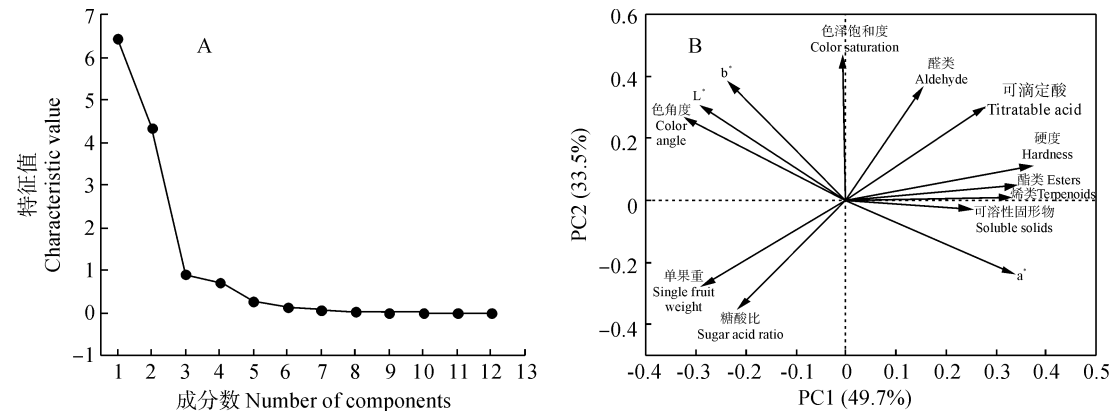


图 4 苹果果实品质主成分分析的碎石图(A)与因子载荷图(B)

Fig. 4 Scree polt (A) and factor load diagram (B) of principal component analysis of apple fruit quality

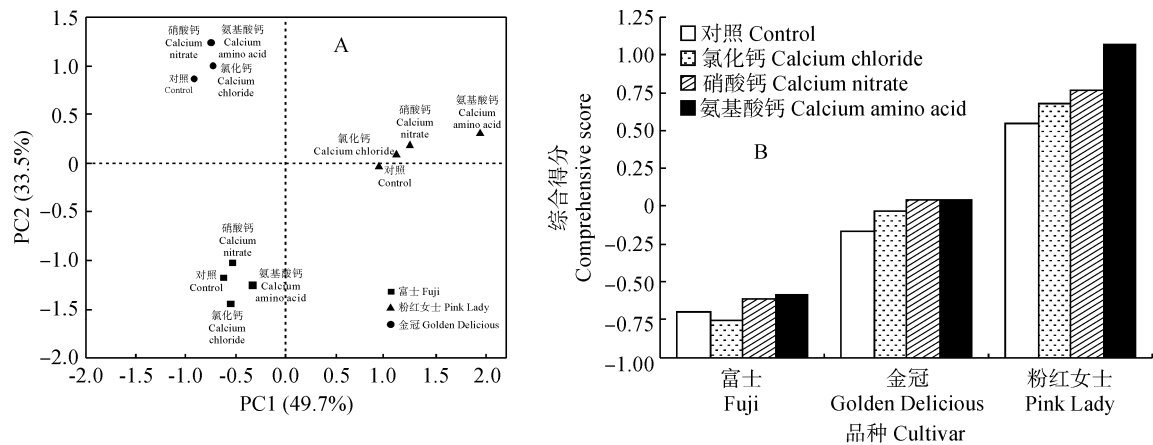


图 5 不同钙处理苹果果实品质的主成分得分图(A)与综合得分图(B)

Fig. 5 Principal component score chart (A) and comprehensive score chart (B) of apple fruit quality under different calcium treatments

3 讨 论

苹果的果实品质主要包括外观和内在品质,外观品质中以果型大小和果实色泽最为重要^[17],内在品质中以糖酸含量和香气物质最为关键。王晓佳等^[18]和牛晓琳等^[19]分别对苹果和金丝小枣进行钙处理后,发现苹果和金丝小枣果实单果重均显著升高。本试验中‘粉红女士’苹果采前 30 d 经 3 种钙制剂处理后,单果重均有效升高,与前人的研究结果一致,但仅‘粉红女士’苹果单果重经氯化钙和氨基酸钙处理后的提升达到显著水平,‘富士’和‘金冠’苹果单果重经 3 种钙制剂处理后的提升效果均不显著。可见,采前钙处理对不同苹果品种单果重的影响效果不同,且‘粉红女士’苹果的单果重更容易被提升,但具体原因需进一步探究。果实色泽评价使用最多的是 CIELAB 评价体系, L* 值代表亮度; a* 值代表红绿,正值表示红色,负值表示绿色; b* 值代表黄蓝,正值表示黄色,负值表示蓝色,绝对值越大,其所代表的颜色越深^[12]。本试验中经 3 种钙制剂处理后,大多数苹果果实的色泽指标均高于对照组,表明钙处理有助于提高果实的亮度和色泽饱和度等指标。这可能是采前钙处理使苹果果实花青苷含量升高,叶绿素含量下降^[8,20],从而促进了果实着色,使得苹果果实的色泽指标升高。

同时,前人研究还发现:钙处理有助于果实内在品质的提升^[21]。欧志锋^[8]对‘红富士’苹果进行钙处理后发现,果实可溶性固形物和可滴定酸含量均有效提高;王晓佳等^[18]对‘金冠’苹果进行钙处理后发现,果实可溶性固形物含量显著增加;和银霞^[22]等对欧李进行采前钙处理发现,果实苹果酸和柠檬

酸等含量显著上升。本研究中钙制剂处理苹果果实的可溶性固形物含量的表现与前人研究相一致,但可滴定酸含量表现与其研究结果略有不同,在本试验中‘富士’和‘金冠’苹果经氯化钙采前处理后,果实可滴定酸含量显著下降,其他处理影响效果均不显著。相关研究表明,在商熟期前对‘南果梨’进行氯化钙处理,果实有机酸含量上升,商熟期后处理则有机酸含量下降^[23];桃果实糖酸比在喷施硝酸钙后下降,在喷施氨基酸钙后上升^[6]。可见,不同钙制剂、不同处理时间、不同物种或品种会对果实可滴定酸含量和糖酸比产生不同的影响,在本研究中 3 个苹果品种经不同钙制剂处理后糖酸比均有所上升,且在采前 30 d 经氯化钙处理后对苹果果实可滴定酸含量和糖酸比影响效果最佳。此外,车玉红和 Liu 等^[24-25]发现,提高果实中钙的含量,果实硬度会相应提高。本试验通过采前钙处理后,苹果果实硬度也明显提高,推测是采前钙处理增加了果实中钙的含量,促进了果实中纤维素的含量,或者是降低了果实软化相关酶的活性,抑制了细胞壁多糖物质的降解,从而使果实的硬度增强。

随着 GC-MS 技术的成熟,香气已成为评价果实品质的重要内在指标^[26],苹果中现已测出的香气物质主要是酯类、醛类和烯类等,常见的香气物质有乙酸己酯、己酸己酯、2-甲基丁酸己酯、2-己烯醛和 α-法尼烯等^[10,15]。这些物质在本试验 3 个苹果品种果实中均被检测出,并且研究发现经钙处理后这些香气物质的含量均高于对照组,根据相关研究结果^[23]推测这可能是采前钙处理后,提高了果实中亚油酸和亚麻酸等相关代谢底物的含量,并且提高了香气物质合成关键酶的活性,从而增加了果实香气

的释放,具体原因还需利用代谢组学等技术方法进一步研究验证。魏树伟等^[9,27]研究发现:‘南果梨’经氯化钙处理后,果实中的香气物质总含量显著提升,本试验中 3 个苹果品种钙处理后果实的香气物质总含量显著提升,但提升程度不同;就具体钙制剂而言,苹果果实香气物质经氨基酸钙处理后的提升效果最佳;就具体品种而言,‘粉红女士’苹果经 3 种钙制剂处理后的提升效果最为显著。可见,处理采用的钙制剂和品种的差异均会对苹果果实香气物质产生不同的影响,其具体机理还需进一步研究。本研究进一步将 3 种钙制剂处理的主成分得分进行线性加权求和后发现,氨基酸钙处理后果实的综合得分最高,这可能是有机钙更有利于果实的吸收,或者是螯合钙不仅溶解度较大,而且具有明显的移动优

势^[28],从而使钙离子更容易吸收,果实品质得到有效提高。

4 结 论

采前钙处理可有效提高苹果果实品质。硝酸钙处理后,果皮亮度和色泽饱和度显著提高,氯化钙处理后,果实的糖酸比和硬度显著提升,氨基酸钙处理后,果实的香气物质显著提高,且‘粉红女士’苹果经钙处理后提升效果最明显。主成分分析和综合评价结果显示,氨基酸钙采前处理后果实的综合得分最高,处理效果最好。本试验通过对比 3 种钙制剂处理后果实外观品质、内在品质、特别是香气物质的差异性变化,为今后利用适宜钙制剂进行苹果风味提升和品种改良提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 翟 衡, 赵政阳, 王志强, 等. 世界苹果产业发展趋势分析[J]. 果树学报, 2005, **22**(1): 44-50.
ZHAI H, ZHAO Z Y, WANG Z Q, *et al.* Analysis of the development trend of the world apple industry[J]. *Journal of Fruit Science*, 2005, **22**(1): 44-50.
- [2] 檀龙颜, 马洪娜. 植物响应钙离子胁迫的研究进展[J]. 植物生理学报, 2017, **53**(7): 1 150-1 158.
TAN L Y, MA H N. Advance in the research of plant in response to calcium ions stress[J]. *Plant Physiology Journal*, 2017, **53**(7): 1 150-1 158.
- [3] GULLO G, MOTISI A, ZAPPIA R, *et al.* Rootstock and fruit canopy position affect peach [*Prunus persica* (L.) Batsch](cv. Rich May) plant productivity and fruit sensorial and nutritional quality [J]. *Food Chemistry*, 2014, **153**: 234-242.
- [4] BUCZKOWSKA H, MICHAŁOJC Z, NURZYŃSKA-WIERDAK R. Yield and fruit quality of sweet pepper depending on foliar application of calcium[J]. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 2016, **40**: 222-228.
- [5] RANJBAR S, RAHEMI M, RAMEZANIAN A. Comparison of nano-calcium and calcium chloride spray on postharvest quality and cell wall enzymes activity in apple cv. Red Delicious[J]. *Scientia Horticulturae*, 2018, **240**: 57-64.
- [6] 王 雷. 喷施钙肥对肥城蜜桃动态及果实品质的影响[D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2015.
- [7] 裴健翔. 外源钙对‘寒富’苹果果实钙代谢及果实品质影响的研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.
- [8] 欧志锋. 钙处理对红富士苹果果实品质及贮藏性的影响[D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2014.
- [9] 魏树伟. 钙调控‘南果梨’果实香气形成及释放的生理机制与 PuADH1 基因功能的初步研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2016.
- [10] 贺芬芬, 刘成连, 原永兵, 等. 采后不同钙浓度处理对贮藏期间苹果硬度及果胶含量的影响[J]. 北方园艺, 2014, (9): 147-150.
HE F F, LIU C L, YUAN Y B, *et al.* Effect of various calcium concentrations dip treatment on firmness and pectin content during post-harvest of apple[J]. *Northern Horticulture*, 2014, (9): 147-150.
- [11] 孙英杰. 钙和赤霉素对寒富苹果果实品质发育和贮藏性影响的研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019.
- [12] 孟 蕊. 苹果果皮色泽遗传特性及花青苷合成相关基因的表达分析[D]. 陕西杨陵: 西北农林科技大学, 2017.
- [13] 邓 瑞, 袁仲玉, 夏 雪, 等. 套袋对‘瑞雪’苹果果实品质的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2018, **46**(7): 117-123.
DENG R, YUAN Z Y, XIA X, *et al.* Influence of bagging on quality of “Ruixue” apple[J]. *Journal of Northwest A & F University* (Natural Science Edition), 2018, **46**(7): 117-123.
- [14] 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.
ZHANG P, CHEN S S, LI J K, *et al.* Difference analysis of postharvest quality and volatile substance in different varieties of apple cultivars[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, **40**(13): 154-160.

[15] 万 鹏,梁国平,马丽娟,等. 19 个苹果品种果实香气成分的 GC-MS 分析[J]. 食品工业科技, 2019,**40**(14): 227-232.
WAN P, LIANG G P, MA L J, *et al.* GC-MS analysis of fruit aroma components in 19 apple varieties[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019,**40**(14): 227-232.

[16] CHEN L P, YU F, SUN S H, *et al.* Evaluation indicators of *Ruditapes philippinarum* nutritional quality[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2021,**58**(8): 2 943-2 951.

[17] 王海波,李林光,陈学森,等. 中早熟苹果品种果实的风味物质和风味品质[J]. 中国农业科学, 2010,**43**(11): 2 300-2 306.
WANG H B, LI L G, CHEN X S, *et al.* Flavor compounds and flavor quality of fruits of mid-season apple cultivars[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010,**43**(11): 2 300-2 306.

[18] 王晓佳,贾永华,王春良. 不同钙肥处理对金冠苹果品质的影响[J]. 安徽农业科学, 2015,**43**(35): 62-64.
WANG X J, JIA Y H, WANG C L. Effect of different calcium fertilizer treatment on the quality of Golden Delicious apples[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2015,**43**(35): 62-64.

[19] 牛晓琳,马文凤,陈桂敏,等. 叶面喷钙对金丝小枣矿质养分变化规律研究[J]. 经济林研究, 2018,**36**(1): 141-146.
NIU X L, MA W F, CHEN G M, *et al.* Effects of foliar spraying calcium fertilizer on mineral elements contents in gold silk jujube[J]. *Nonwood Forest Research*, 2018,**36**(1): 141-146.

[20] 朱晓阳. 钙肥对‘烟富 3 号’红富士苹果果实发育的影响[J]. 农业科技与信息, 2014,(11): 22-24.
ZHU X Y. Effect of calcium fertilizer on fruit development of ‘Yanfu No. 3’ Red Fuji apple[J]. *Information of Agricultural Science and Technology*, 2014,(11): 22-24.

[21] BUCZKOWSKA H, MICHAŁOJ Ć Z, NURZY ŃSKA-WIERDAK R. Yield and fruit quality of sweet pepper depending on foliar application of calcium[J]. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 2016,**40**: 222-228.

[22] 和银霞,李卫东,叶丽琴,等. 采前喷钙对贮藏期欧李果实腐烂率及糖酸含量的影响[J]. 食品科学, 2016,**37**(14): 247-252.
HE Y X, LI W D, YE L Q, *et al.* Effects of preharvest calcium spray on decay incidence and the contents of sugar and organic acid in Chinese dwarf cherry [*Cerasus humilis* (Bge.) Sok.] during storage[J]. *Food Science*, 2016,**37**(14): 247-252.

[23] 魏树伟,王少敏,童 瑶,等. 钙处理对‘南果梨’果实香气合成底物及关键酶活性的影响[J]. 植物生理学报, 2020,**56**(12): 2 745-2 754.
WEI S W, WANG S M, TONG Y, *et al.* Effects of calcium treatment on substrates and key enzyme activities related to aroma synthesis in ‘Nanguoli’ pear fruits[J]. *Plant Physiology Journal*, 2020,**56**(12): 2 745-2 754.

[24] 车玉红. 钙肥对红富士苹果果实品质及生理生化特性影响的研究[D]. 陕西杨陵: 西北农林科技大学, 2005.

[25] LIU H, CHEN F S, LAI S J, *et al.* Effects of calcium treatment and low temperature storage on cell wall polysaccharide nanostructures and quality of postharvest apricot (*Prunus armeniaca*)[J]. *Food Chemistry*, 2017,**225**: 87-97.

[26] MANNUCCI A, SERRA A, REMORINI D, *et al.* Aroma profile of Fuji apples treated with gelatin edible coating during their storage[J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2017,**85**: 28-36.

[27] WEI S W, TAO S T, QIN G H, *et al.* Transcriptome profiling reveals the candidate genes associated with aroma metabolites and emission of pear (*Pyrus ussuriensis* cv.)[J]. *Scientia Horticulturae*, 2016,**206**: 33-42.

[28] 沈 欣,袁 亮,李燕婷,等. 小分子有机物质螯合钙肥的应用效果[J]. 中国土壤与肥料, 2016,(3): 87-92.
SHEN X, YUAN L, LI Y T, *et al.* Application effect of small molecular organics chelated calcium fertilizer[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2016,(3): 87-92.

(编辑:裴阿卫)