

‘丰香’草莓果实发育过程中抗氧化物质与活性氧代谢研究

罗 娅, 汤浩茹*

(四川农业大学园艺学院, 四川雅安 625014)

摘 要: 以草莓栽培品种‘丰香’(*Fragaria × ananassa* ‘Toyonaka’)为试材, 探讨其果实发育过程中抗氧化物质与活性氧的变化。结果表明, 在果实发育过程中, 果实产生的超氧阴离子(O_2^-)逐渐增加, 超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)和抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性, 维生素 E、总酚、类黄酮含量以及抗氧化能力显著降低, MDA 含量增加。其中, 维生素 E、总酚和类黄酮是草莓果实发育过程中主要的抗氧化物质, 与草莓果实的抗氧化能力密切相关, 并在抑制 O_2^- 和 H_2O_2 的产生方面起着重要作用, 而花青素和抗坏血酸在草莓发育过程中所起的抗氧化作用较小。

关键词: 草莓; 果实; 发育阶段; 抗氧化物质; 活性氧

中图分类号: S 668.4

文献标识码: A

文章编号: 0513-353X (2011) 08-1523-08

Research of Antioxidants and Active Oxygen Metabolism During ‘Toyonaka’ Strawberry Fruit Ripening

LUO Ya and TANG Hao-ru*

(Horticultural College, Sichuan Agricultural University, Ya'an, Sichuan 625014, China)

Abstract: Fruits of strawberry (*Fragaria × ananassa* ‘Toyonaka’) were used to investigate the changes of reactive oxygen and antioxidants during strawberry fruit ripening. The results showed that the production rate of superoxide anion(O_2^-) increased gradually, the activities of catalase(CAT) and ascorbate peroxidase (APX), and the contents of vitamin E, total polyphenol and total flavonoids decreased significantly during strawberry fruit ripening, which is the main cause of accumulation of reactive oxygen and MDA content. Meanwhile, the main antioxidant of strawberry fruit were vitamin E, total phenols and flavonoid, which were correlated with the antioxidant capacity closely and played an important role to inhibit the production of O_2^- and H_2O_2 , but not the anthocyanins and ascorbate acid.

Key words: strawberry; fruit; development stage; antioxidant; reactive oxygen

草莓(*Fragaria × ananassa* Duch.)果实成熟后极易衰老与腐烂, 调控草莓果实成熟衰老具有重要意义。

大量研究表明, 活性氧的代谢失调与积累是果实成熟衰老的重要原因(关军锋和束怀瑞, 1996;

收稿日期: 2011-05-31; 修回日期: 2011-07-19

基金项目: 四川省教育厅重点项目(07ZZ023, 09ZB050)

* 通信作者 Author for correspondence (E-mail: htang@sicau.edu.cn)

关军锋 等, 2002; 阮英 等, 2006)。植物在产生活性氧的同时也存在清除活性氧的多种抗氧化物质, 如超氧化物歧化酶 (SOD), 过氧化氢酶 (CAT)、抗坏血酸过氧化物酶 (APX), 抗坏血酸 (AsA), 总酚, 类黄酮, 花青素和维生素 E 等 (Rapisarda et al., 1999; Fang et al., 2002)。前人的相关研究多集中在抗氧化酶在果实或叶片成熟衰老过程中的调节机理 (陈惠萍 等, 2002; 安华明 等, 2005; 金昌海 等, 2006; 阮英 等, 2006; 孙艳 等, 2008; 张志刚 等, 2009; 陈丽璇 等, 2010; 李慧 等, 2010), 而关于这些抗氧化剂的响应和调节机理则鲜有报道。本试验中以草莓果实为试材, 从抗氧化的角度研究果实发育过程中活性氧与主要抗氧化酶和抗氧化剂之间的关系, 探讨成熟衰老机理, 以期在生产实践中调控草莓果实成熟衰老提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 材 料

试验材料为‘丰香’草莓 (*Fragaria × ananassa* ‘Toyonaka’), 于 2009 年 4 月取自四川农业大学教学科研园区塑料大棚内。自同一单株 (共 200 个单株左右) 采集不同成熟度的果实, 按照果实发育程度分为 7 个阶段 (Ferreira et al., 2007): 小绿 (SG, 坐果后约 7 d)、大绿 (LG, 坐果后约 20 d)、白熟 (W, 果实个体已转白)、25%红 (25% Red)、50%红 (50% Red)、75%红 (75% Red) 和全红 (100% Red)。采后立即运回实验室, 从不同成熟阶段的果实中选择大小一致, 无病虫害, 无损伤挤压的果实为试材。取样时, 每个阶段分别随机取 25 个果, 用液氮速冻并研磨成粉, 混合均匀, 贮于 -80 °C 超低温冰箱中备用。

1.2 方 法

O_2^- 产生速率、 H_2O_2 、丙二醛 (MDA) 和维生素 E 含量, SOD 和 CAT 活性均采用南京建成生物工程研究所提供的试剂盒进行测定。APX 活性参考 Nakano 和 Asada (1981) 的方法。酶活性采用比活力表示。

可溶性蛋白采用考马斯亮蓝 G-250 法 (熊庆娥, 2003) 进行测定。花青素、总酚、DPPH (1, 1-dipheyl-2-picrylhydrazyl, 1, 1-二苯代苦基苯肼) 自由基清除率、类黄酮、抗坏血酸 (AsA) 和脱氢抗坏血酸 (DHA) 的测定分别参照 Wu 等 (2006)、王霄霄 (2007)、杨冬梅等 (2007) 和孙园园 (2008) 的方法进行。

试验数据使用 SPSS13.0 软件进行 ANVOA 统计分析和 Pearson 相关分析。数据结果以平均数 ± 标准差 ($n = 3$) 表示, 并进行显著性检验 ($P \leq 0.05$), 试验重复 3 次。

2 结果与分析

2.1 草莓果实发育过程中 O_2^- 产生速率、SOD 活性和 MDA 含量的变化

随着草莓果实成熟度的提高, O_2^- 产生速率逐渐增大, 在全红阶段达到最大值 $0.098 U \cdot mg^{-1} protein$, 是小绿阶段的 2.07 倍 (图 1, A)。

小绿阶段的草莓果实具有较高的 SOD 活性。随着果实的发育, SOD 活性呈先降后升, 然后又下降的趋势。在白熟期最低 ($3.52 U \cdot mg^{-1} protein$), 随后在 75%红达最高 ($9.61 U \cdot mg^{-1} protein$), 而在全红又有所下降 ($9.04 U \cdot mg^{-1} protein$) (图 1, B)。

当 O_2^- 的量超过一定的“阈值”, 将会攻击膜系统, 造成膜脂过氧化产物 MDA 含量的增加, 引

起膜损伤。通常用 MDA 表示细胞膜系统结构和功能受伤害的程度。从图 1, C 可知, 大绿期草莓果实的 MDA 含量最低。从大绿期后, MDA 含量逐渐上升, 在全红时达到最大值, 是大绿期的 3.86 倍 (图 1, C), 说明膜损伤程度随果实发育而增大。

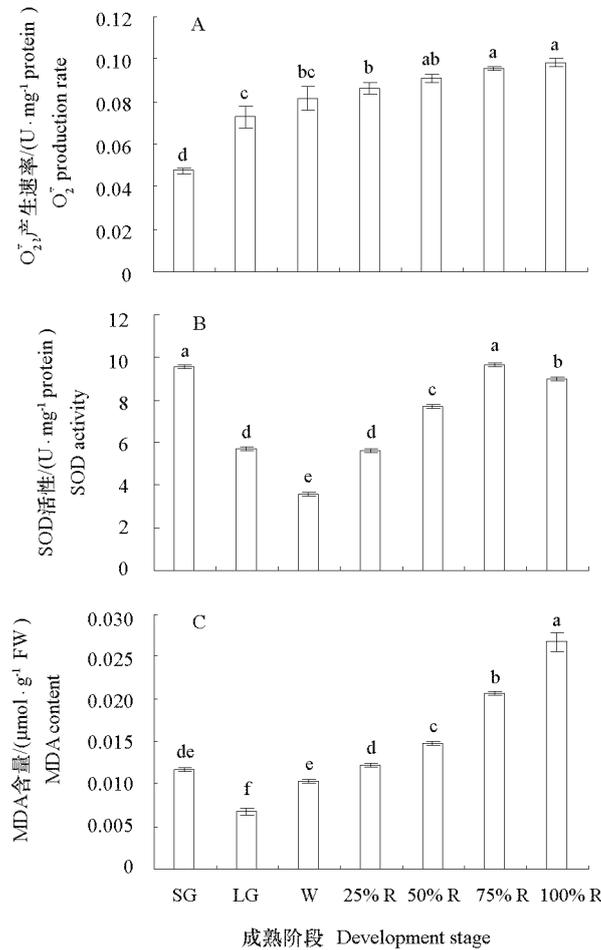


图 1 草莓果实发育过程中 O_2^- 产生速率 (A)、SOD 活性 (B) 和 MDA 含量 (C) 的变化

SG: 小绿期; LG: 大绿期; W: 白熟期; 25% R: 25%红; 50% R: 50%红;
75% R: 75%红; 100% R: 全红。 $P < 0.05$ 。

Fig. 1 Variations of O_2^- production rate (A), SOD activity (B) and MDA content (C) during strawberry fruit ripening

SG: Small green stage; LG: Large green stage; W: White stage; 25% R: 25% red;
50% R: 50% red; 75% R: 75% red; 100% R: 100% red. $P < 0.05$.

2.2 草莓果实发育过程中 H_2O_2 含量、CAT 和 APX 活性的变化

在草莓果实发育过程中, H_2O_2 含量变化呈先下降再上升的变化趋势。 H_2O_2 含量在小绿阶段最高 ($62.62 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$), 在 25%红最低 ($14.86 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)。其后, 随着果实的成熟, H_2O_2 的含量又开始增加, 在全红时达到 $24.85 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (图 2, A)。

CAT 与 APX 都是清除 H_2O_2 的重要酶。在草莓果实成熟衰老过程中, 两种酶的变化趋势与 H_2O_2 的含量变化有一定的相似性, 都是先降后升, 且在果实全红阶段, CAT 与 APX 活性分别只有小绿阶段的 70.28% 和 46.30% (图 2, B、C), 说明 CAT 与 APX 活性受 H_2O_2 诱导, 随着衰老进程的加剧, 细胞膜受伤害程度加大, CAT 和 APX 清除 H_2O_2 能力下降。

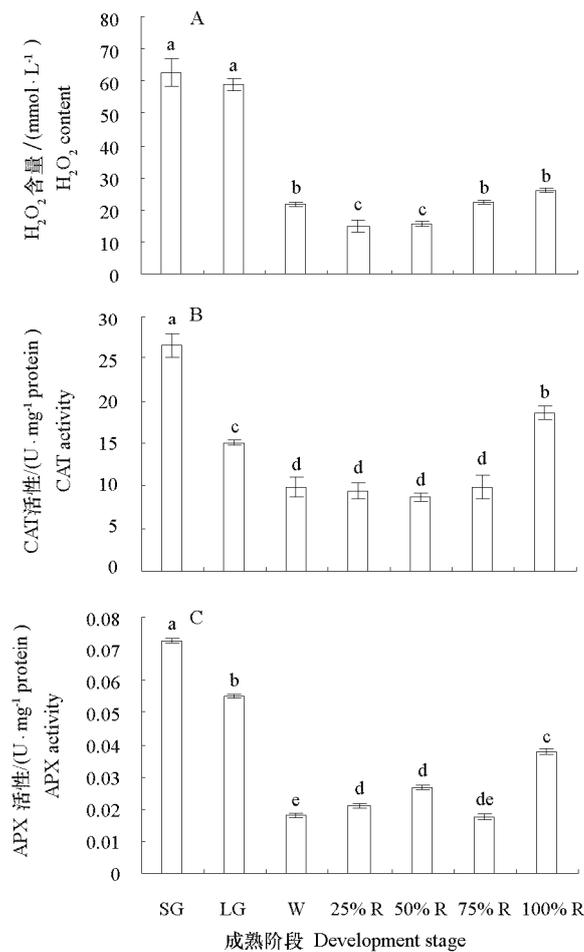


图2 草莓果实发育过程中 H₂O₂ 含量 (A)、CAT (B) 和 APX (C) 活性的变化

SG: 小绿期; LG: 大绿期; W: 白熟期; 25% R: 25%红; 50% R: 50%红;
75% R: 75%红; 100% R: 全红。P < 0.05。

Fig. 2 Variations of H₂O₂ contents (A), CAT (B) and APX (C) activities during strawberry fruit ripening

SG: Small green stage; LG: Large green stage; W: White stage; 25% R: 25% red;
50% R: 50% red; 75% R: 75% red; 100% R: 100% red. P < 0.05.

2.3 草莓果实发育过程中抗氧化物质含量和抗氧化能力的变化

总酚、类黄酮和维生素 E 的含量随草莓果实成熟衰老进程呈下降趋势。从小绿阶段到 25%红阶段, 3 种物质的含量迅速下降, 在 25%红阶段时其含量分别仅有小绿阶段的 43.44%、11.96%和 15.99%。而从 25%红到全红阶段, 3 种物质 (除维生素 E 外) 的含量没有明显变化 (表 1)。

花青素含量的增加是草莓成熟的一个典型特征。在草莓果实发育前期 (25%红前), 花青素含量甚微或无法检出, 但随着果实的成熟, 花青素与抗坏血酸含量逐渐增加 (表 1)。从 75%红到全红以及从小绿到 25%红分别是草莓果实花青素与抗坏血酸含量迅速积累的阶段, 而脱氢抗坏血酸含量在草莓果实成熟过程中明显低于抗坏血酸含量。

DPPH 法是广泛用于测定果蔬抗氧化能力的一种方法。在草莓果实发育过程中, 抗氧化能力 (DPPH 抑制率) 是逐渐减弱的, 其中小绿阶段果实抗氧化能力最强 (87.81%), 全红阶段果实抗氧化能力最弱 (55.99%)。综上分析可知, 在草莓果实发育过程中, 果实中总酚、类黄酮、维生素 E 含量以及抗氧化能力逐渐下降, 而花青素和 AsA 含量逐渐上升。

表 1 草莓果实发育过程中抗氧化物质和抗氧化能力的变化

Table 1 Variation of antioxidant contents and antioxidant capacity during strawberry fruit ripening

成熟阶段/ Development stage	总酚/ (mg · kg ⁻¹) TP	类黄酮/ (mg · kg ⁻¹) TF	花青素/ (mg · kg ⁻¹) Anthocyanin	维生素 E/ (μg · g ⁻¹) Vitamin E	抗坏血酸/ (mg · kg ⁻¹) AsA	脱氢抗坏血酸/ (mg · kg ⁻¹) DHA	DPPH 抑制率/ %
小绿 SG	4 236.3 ± 190.5 a	97.8 ± 5.6 a	0	46.15 ± 3.15 a	118.6 ± 20.2 d	68.6 ± 11.8 a	87.81 ± 0.90 a
大绿 LG	3 974.9 ± 129.1 a	29.6 ± 1.3 b	0	35.45 ± 1.69 b	192.5 ± 5.7 c	41.6 ± 2.7 b	85.10 ± 0.52 b
白熟 W	2 972.8 ± 118.9 b	15.3 ± 0.6 c	0	20.31 ± 0.98 c	216.4 ± 10.3 c	35.8 ± 5.8 b	69.19 ± 0.40 c
25%红 25% R	1 840.1 ± 129.1 c	11.7 ± 0.1 c	3.3 ± 0.5 c	7.38 ± 0.37 d	278.2 ± 19.1 b	24.6 ± 8.6 b	67.06 ± 0.44 d
50%红 50% R	2 116.0 ± 337.8 c	11.3 ± 0.6 c	8.6 ± 0.9 c	5.91 ± 0.37 de	304.3 ± 14.9 ab	45.0 ± 2.8 b	64.50 ± 0.44 e
75%红 75% R	1 796.5 ± 101.7 c	9.8 ± 0.7 c	36.4 ± 3.1 b	4.06 ± 0.37 de	308.4 ± 18.9 ab	36.7 ± 1.9 b	59.50 ± 0.28 f
全红 100% R	1 665.8 ± 38.4 c	9.6 ± 0.3 c	101.9 ± 15.1a	2.58 ± 0.37 e	332.4 ± 4.8 a	76.6 ± 7.3 a	55.99 ± 0.32 g

Note: TP: Total polyphenol; TF: Total flavonoids; AsA: Ascorbate acid; DHA: Dehydroascorbate acid.

2.4 相关性分析

活性氧与抗氧化物质的相关性分析表明, O₂⁻的产生速率与总酚、类黄酮、抗坏血酸、维生素 E 和 DPPH 自由基清除率呈极显著相关 (r 分别为 -0.912^{**}、-0.944^{**}、0.970^{**}、-0.957^{**}和 -0.931^{**}); H₂O₂ 含量与 CAT、类黄酮、抗坏血酸和 DPPH 呈显著相关 (r 分别为 0.792^{*}、0.805^{*}、-0.817^{*}和 0.867^{*}), 与 APX、总酚和维生素 E 呈极显著相关 (r 分别为 0.935^{**}、0.894^{**}和 0.911^{**}); MDA 含量与 DPPH 自由基清除率呈显著相关 ($r = -0.787^*$), 与花青素呈极显著相关 ($r = 0.927^{**}$)。结果分析表明, 总酚、类黄酮、抗坏血酸与维生素 E 等抗氧化物质在抑制草莓果实中 O₂⁻和 H₂O₂ 的产生起着非常重要的作用, 且抗氧化能力越强, 膜脂过氧化程度越低, 草莓果实的成熟衰老程度越低。

抗氧化能力与抗氧化物质的相关性分析表明, 维生素 E、总酚、类黄酮含量与 DPPH 抑制率相关 (r 分别为 0.968^{**}、0.962^{**}和 0.791^{*}), 抗坏血酸与 DPPH 抑制率之间存在显著负相关 ($r = -0.946^{**}$), 花青素与 DPPH 抑制率的相关性相对较低 ($r = -0.669$)。说明维生素 E、总酚和类黄酮是草莓发育过程中主要的抗氧化物质, 抗坏血酸与花青素所起的作用相对较小。

3 讨论

活性氧的代谢失调与积累是果实成熟衰老的重要原因 (关军峰和束怀瑞, 1996; 关军锋 等, 2002; 阮英 等, 2006), 该过程伴随着 MDA 的产生和蛋白质的降解, 从而对质膜产生伤害。MDA 积累量的变化反映了植物对活性氧、自由基的清除能力 (高小丽 等, 2008)。本研究表明, 草莓果实发育过程中, 果实产生的 O₂⁻逐渐增加, SOD、CAT 与 APX 较发育初期均有所下降, 从而不能有效清除过多的活性氧, 致使 MDA 含量增加。

SOD 是植物体内清除 O₂⁻的重要酶之一。本研究中, SOD 活性持续下降, 白熟期下降到最小值后开始上升, 到 75%红期其酶活性又开始下降。通常 SOD 酶活性在果实成熟过程中的变化趋势主要有上升 (Du & Bramlage, 1994; 金昌海 等, 2006), 下降 (Rabinowich, 1982), 先升后降 (余文琴 等, 2009) 以及先降后升 (刘炳辉 等, 2008) 等 4 种变化趋势, 其变化差异的原因可能是由于物种与品种的差异所致。

SOD 歧化 O₂⁻生成 H₂O₂ 和 O₂, H₂O₂ 的清除则由 CAT、APX、GR 等酶的反应完成。在本研究中, CAT 和 APX 活性变化与 H₂O₂ 的含量变化显著相关, H₂O₂ 含量增加, CAT 和 APX 活性也随之增加, 从而进一步证明 CAT 和 APX 活性受 H₂O₂ 诱导 (阮英 等, 2006)。

保持植物体内较高的活性氧清除酶活性和非酶抗氧化物质含量, 可减少活性氧的积累, 延缓衰老 (李英华 等, 2010)。因此, 在草莓果实发育过程中, 总酚、类黄酮和维生素 E 含量下降, 抗氧

化能力逐渐降低也是草莓果实活性氧过多积累的原因之一。抗氧化能力与非酶抗氧化物质的相关性分析表明, 维生素 E、总酚和类黄酮含量是决定草莓果实抗氧化能力强弱的主要物质, 而抗坏血酸和花青素的作用相对较小, 这与 Shin 等 (2008) 的研究结果相一致。目前, 已有大量研究报道认为总酚和类黄酮与植物抗氧化能力紧密相关 (Pyo et al., 2004; Ferreyra et al., 2007; Hüseyin et al., 2008), 然而抗坏血酸与花青素在植物抗氧化能力方面的作用却有不同观点。Proteggente 等 (2002)、Wang 和 Lin (2000) 研究认为草莓果实中花青素含量与果实抗氧化能力密切相关。Olsson 等 (2004)、da Silva Pinto 等 (2008) 和 Eberhardt 等 (2000) 研究认为抗坏血酸在草莓和苹果果实中所起的抗氧化作用并不大, 而 Ferreyra 等 (2007) 认为草莓成熟过程中抗氧化能力的变化主要是由总酚和抗坏血酸含量变化所引起, 而不是花青素。样品成熟度选择的差异可能是得出不同结论的原因 (Shin et al., 2008), 如 Wang 和 Lin (2000) 仅取绿果期, 粉色期和成熟期 3 个阶段的草莓果实进行抗氧化能力的分析; 而 Ferreyra 等 (2007) 用小绿、大绿、白熟、5%红、25%红、50%红、75%红、100%红、鲜红和紫红等 10 阶段分析草莓果实的抗氧化能力。

草莓果实成熟衰老是一个不可逆转的过程, 伴随着总酚含量的降低和花青素含量的增加。其原因可能是合成酚类物质的底物向合成花青素方向发展 (冯晨静 等, 2003; Castrejón et al., 2008)。温度与光照是影响草莓花青素积累的两个重要因素, 若能在生产中从温度和光照两方面来调控草莓果实发育过程中花青素含量的增加将有可能延缓草莓果实的成熟与衰老, 其可行性试验有待进一步研究。

References

- An Hua-ming, Chen Li-geng, Fan Wei-guo, Liu Qing-lin. 2005. Ascorbate contents and activities of some antioxidant enzymes during senescence of *Rosa roxburghii* leaves. *Acta Horticulturae Sinica*, 35 (6): 994 - 997. (in Chinese)
- 安华明, 陈力耕, 樊卫国, 刘庆林. 2005. 刺梨叶衰老过程中维生素 C 含量和部分抗氧化酶活性的变化. *园艺学报*, 35 (6): 994 - 997.
- Castrejón A D R, Eichholz I, Rohn S, Kroh L W, Huyskens-Keil S. 2008. Phenolic profile and antioxidant activity of highbush blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) during fruit maturation and ripening. *Food Chemistry*, 109 (3): 564 - 572.
- Chen Hui-ping, Chen Xiao-min, Cai Shi-ying. 2002. The changes of active oxygen metabolism during the ripening of banana fruit. *Acta Horticulturae Sinica*, 27 (5): 369 - 370. (in Chinese)
- 陈惠萍, 陈晓敏, 蔡世英. 2002. 香蕉果实后熟过程中活性氧代谢的变化. *园艺学报*, 27 (5): 369 - 370.
- Chen Li-xuan, Liu Fu-ping, Cai Xiao-dong, Chen Chun, Guo Ying. 2010. Physiological research on changes of metal elements during the fruits development of lemon shaddock. *Acta Horticulturae Sinica*, 37 (12): 1893 - 1900. (in Chinese)
- 陈丽璇, 刘福平, 蔡晓东, 陈淳, 郭莺. 2010. 柠檬柚果实发育过程中金属营养元素含量变化及活性氧代谢研究. *园艺学报*, 37 (12): 1893 - 1900.
- da Silva Pinto M, Lajolo F M, Genovese, M I. 2008. Bioactive compounds and quantification of total ellagic acid in strawberries (*Fragaria × ananassa* Duch.). *Food Chemistry*, 107 (4): 1629 - 1635.
- Du Z, Bramlage W J. 1994. Superoxide dismutase activities in senescencing apple fruit (*Malus domestica* Borkh.). *Journal of Food Science*, 59: 581 - 584.
- Eberhardt M V, Lee C Y, Liu R H. 2000. Nutrition: Antioxidant activity of fresh apples. *Nature*, 405 (6789): 903 - 904.
- Fang Y Z, Yang S, Wu G. 2002. Free radicals, antioxidants and nutrition. *Nutrition*, (18): 872 - 879.
- Ferreyra R M, Vina S Z, Mugrider A, Chaves A R. 2007. Growth and ripening season effects on antioxidant capacity of strawberry cultivar Selva. *Scientia Horticulturae*, 112: 27 - 32.
- Feng Chen-jing, Guan Jun-feng, Yang Jian-min, Zhang Yuan-hui, Zhao Shu-tang, Wang Yu-tao. 2003. Changes of the content of anthocyanin, phenolic and flavonoid compounds in strawberries during the maturation. *Journal of Fruit Science*, 20 (3): 199 - 201. (in Chinese)

- 冯晨静, 关军锋, 杨建民, 张元慧, 赵树堂, 王玉涛. 2003. 草莓果实成熟期花青苷、酚类物质和类黄酮含量的变化. 果树学报, 20 (3): 199 - 201.
- Guan Jun-feng, Shu Huai-rui. 1996. Relationship between senescence and active oxygen metabolism in apple fruits. *Acta Horticulturae Sinica*, 23 (4): 326 - 328. (in Chinese)
- 关军锋, 束怀瑞. 1996. 苹果果实衰老与活性氧代谢的关系. 园艺学报, 23 (4): 326 - 328.
- Guan Jun-feng, Gao Min, Fan Xiu-cai, Gu Cai-qin, Li Guang-min, Zhang Ji-shu. 2002. Relationship between maturation, senescence and Ca^{2+} , CaM content, Ca^{2+} -ATPase activity, and active oxygen metabolism in strawberry fruits. *Scientia Agricultura Sinica*, 35 (11): 1385 - 1389. (in Chinese)
- 关军锋, 高敏, 樊秀彩, 顾采琴, 李广敏, 张继澍. 2002. 草莓果实成熟衰老与 Ca^{2+} 、CaM、 Ca^{2+} -TAPase 和活性氧代谢的关系. 中国农业科学, 35 (11): 1385 - 1389.
- Gao Xiao-li, Sun Jian-min, Gao Jin-feng, Feng Bai-li, Chai Yan, Jia Zhi-kuan. 2008. Leaf aging and reactive oxygen metabolism in different genotypes of mung bean. *Scientia Agricultura Sinica*, 41 (9): 2873 - 2880. (in Chinese)
- 高小丽, 孙健敏, 高金峰, 冯佰利, 柴岩, 贾志宽. 2008. 不同基因型绿豆叶片衰老与活性氧代谢研究. 中国农业科学, 41 (9): 2873 - 2880.
- Hüseyin C, Mustafa Ö, Sedat S, Cemal K. 2008. Phytochemical accumulation and antioxidant capacity at four maturity stages of cranberry fruit. *Scientia Horticulturae*, 117 (4): 345 - 348.
- Jin Chang-hai, Kan Juan, Wang Hong-mei, Suo Biao, Wang Zhi-jun. 2006. Changes of active oxygen metabolism during the ripening of peach fruit. *Journal of Yangzhou University: Agricultural and Life Science Edition*, 27 (4): 85 - 89. (in Chinese)
- 金昌海, 阚娟, 王红梅, 索标, 汪志君. 2006. 桃果实成熟过程中活性氧代谢的变化. 扬州大学学报: 农业与生命科学版, 27 (4): 85 - 89.
- Li Hui, Cong Yu, Wang Hong-wei, Chang You-hong, Sheng Bao-long, Lin Jing, Wang Zhong-hua. 2010. Effects of cadmium stress on oxygen enzyme system and genome DNA polymorphism in the root tips of strawberry plants. *Acta Horticulturae Sinica*, 37 (5): 721 - 730. (in Chinese)
- 李慧, 丛郁, 王宏伟, 常有宏, 盛宝龙, 蔺经, 王中华. 2010. 镉对草莓幼苗根尖氧化系统和基因组 DNA 损伤的影响. 园艺学报, 37 (5): 721 - 730.
- Li Ying-hua, Yuan Hai-ying, Zhang Hui, Wang Lei, Hu Xiu-lan. 2010. Effect of postharvest 1-hexanol treatment on active oxygen metabolism and senescence of strawberry fruits. *Food Science*, 31 (4): 272 - 275. (in Chinese)
- 李英华, 袁海英, 张辉, 王磊, 胡秀兰. 2010. 采后正己醇处理对草莓果实活性氧代谢和衰老的影响. 食品科学, 31 (4): 272 - 275.
- Liu Bing-hui, Dong Xiao-ying, Li Zhi-jun, Li Pei-huan. 2008. Changes in several physiological indexes related to fruit softening of crisp peach fruits before and after ripening. *Plant Physiology Communications*, 44 (5): 887 - 890. (in Chinese)
- 刘炳辉, 董晓颖, 李志军, 李培环. 2008. 硬肉桃果实成熟前后几种与果实软化相关的生理指标的变化. 植物生理学通讯, 44 (5): 887 - 890.
- Nakano Y, Asada K. 1981. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplast. *Plant Cell Physiology*, 22 (5): 867 - 880.
- Olsson M E, Ekvall J, Gustavsson K E, Nilsson J, Pillai D, Sjöholm I, Svensson U, Akesson B, Nyman M G L. 2004. Antioxidants, low molecular weight carbohydrates, and total antioxidant capacity in strawberries (*Fragaria × ananassa*): Effects of cultivar, ripening and storage. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52 (9): 2490 - 2498.
- Proteggente A R, Pannala A S, Paganga G, Van Buren L, Wagner E, Wiseman S, Van De Put F, Dacombe C, Rice-Evans C A. 2002. The antioxidant activity of regularly consumed fruit and vegetables reflects their phenolic and vitamin C composition. *Free Radicals Research*, 36 (2): 217 - 233.
- Pyo Y H, Lee T C, Logendra L, Rosen R T. 2004. Antioxidant activity and phenolic compounds of Swiss chard (*Beta vulgaris* subspecies *cykla*) extracts. *Food Chemistry*, 85 (1): 19 - 26.
- Rabinowich H D, Sklan D, Budowski P. 1982. Photo-oxidative damage in the ripening tomato fruit: Protective role of superoxide dismutase.

- Physiologia Plantarum, 54 (3): 369 - 374.
- Rapisarda P, Tomaino A, Lo Cascio R, Bonima F, de Pasquale A, Saija A. 1999. Antioxidant effectiveness as influenced by phenolic content of fresh orange juice. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 47 (11): 4718 - 4723.
- Ruan Ying, Liu Kai-lang, Shen Lin, Tian Hui-qin, Sheng Ji-ping. 2006. Metabolism of dynamic changes of the reactive oxygen in tomato pericarp and seed tissues during fruit ripening and senescence. *Acta Horticulturae Sinica*, 33 (1): 63 - 67. (in Chinese)
- 阮 英, 刘开朗, 申 琳, 田慧琴, 生吉萍. 2006. 番茄果实成熟衰老过程中果肉和种子活性氧代谢的变化. *园艺学报*, 33 (1): 63 - 67.
- Shin Y, Ryu J A, Liu R H, Nock J F, Watkins C B. 2008. Harvest maturity, storage temperature and relative humidity affect fruit quality, antioxidant contents and activity, and inhibition of cell proliferation of strawberry fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 49 (2): 201 - 209.
- Sun Yan, Liang Yu-zhu, Chen Jing-dong, Ding Qin, Xu Wei-jun, Xu Xiang-dong. 2008. Relationships between ascorbic acid content and relative physiologic indices during senescence of cucumber leaves. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 28 (3): 512 - 516. (in Chinese)
- 孙 艳, 梁宇柱, 陈敬东, 丁 勤, 徐伟君, 徐向东. 2008. 黄瓜叶片衰老过程中抗坏血酸含量与生理指标关系的研究. *西北植物学报*, 28 (3): 512 - 516.
- Sun Yuan-yuan. 2008. The effect of nitrogen levels and nitrogen forms on AsA contents and its related metabolic activity in spinach leaves [M. D. Dissertation]. Zhejiang: Zhejiang University.
- 孙园园. 2008. 氮素营养对菠菜体内抗坏血酸含量及其代谢的影响 [硕士论文]. 浙江: 浙江大学.
- Wu L C, Hsu H W, Chen Y H, Chiu C C, Lin Y I, Ho J A. 2006. Antioxidant and antiproliferative activities of red pitaya. *Food Chemistry*, 95: 319 - 327.
- Wang Xiao-xiao. 2007. Comoparison of five Chinese bayberry on fruit qualities and antioxidant activity [M. D. Dissertation]. Zhejiang: Zhejiang University.
- 王霄霄. 2007. 不同品种杨梅果实品质和抗氧化活性的比较 [硕士论文]. 浙江: 浙江大学.
- Wang S Y, Lin H S. 2000. Antioxidant activity in fruits and leaves of blackberry, raspberry, and strawberry varies with cultivar and developmental stage. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48 (2): 140 - 146.
- Xiong Qing-e. 2003. Experimental textbook of plant physiology. Chengdu: Science and Technology Press of Sichuan: 55 - 56.
- 熊庆娥. 2003. 植物生理学实验教程. 成都: 四川科学技术出版社: 55 - 56.
- Yang Dong-mei, Jin Yue-ting, Ke Le-qin, Jiang Jian-mei, Huang Xiao-dan, Ying Tie-jin. 2007. Antioxidant activities of 12 common vegetables. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 7 (5): 24 - 29. (in Chinese)
- 杨冬梅, 金月亭, 柯乐芹, 姜健美, 黄晓丹, 应铁进. 2007. 12 种常见蔬菜抗氧化活性的比较研究. *中国食品学报*, 7 (5): 24 - 29.
- Yu Wen-qin, Pan Dong-ming, Lin He-tong. 2009. Relationship between granulation and active oxygen metabolism of juice sac in pummelo fruit during maturation. *Scientia Agricultura Sinica*, 42 (5): 1737 - 1743. (in Chinese)
- 余文琴, 潘东明, 林河通. 2009. 琯溪蜜柚果实成熟过程中汁胞粒化与活性氧代谢的关系. *中国农业科学*, 42 (5): 1737 - 1743.
- Zhang Zhi-gang, Shang Qing-mao, Wang Li-hao, Mao Sheng-li, Zhang Bao-xi. 2009. The characteristics of active oxygen metabolism in pepper leaf cells under suboptimal temperature, weak light and salt stress. *Acta Horticulturae Sinica*, 36 (11): 1603 - 1610. (in Chinese)
- 张志刚, 尚庆茂, 王立浩, 毛胜利, 张宝玺. 2009. 亚适温、弱光照及盐胁迫下辣椒叶片活性氧代谢特征. *园艺学报*, 36 (11): 1603 - 1610.