

# ‘三季梨’果实后熟过程中的生理生化变化及其相关性分析

马凤丽<sup>1</sup>, 贾晓辉<sup>1</sup>, 王志华<sup>1</sup>, 李艳<sup>2</sup>, 杜艳民<sup>1</sup>,  
佟伟<sup>1</sup>, 孙平平<sup>1</sup>, 崔建潮<sup>1</sup>, 王阳<sup>1</sup>, 王文辉<sup>1\*</sup>

(<sup>1</sup>中国农业科学院果树研究所, 辽宁兴城 125100; <sup>2</sup>北京市大兴区园林绿化局, 北京 102600)

**摘要:**【目的】明确西洋梨果实后熟过程中生理生化变化规律及各生理指标间的相关性, 找到反映果实后熟进程的特征指标, 实现西洋梨果实后熟程度的快速无损检测。【方法】以‘三季梨’果实为试材, 比较果实不同后熟时间的生理生化指标, 并进行各生理指标间的相关性分析。【结果】在‘三季梨’果实后熟过程中, 果皮色泽由绿转黄, 亮度逐渐增加; 叶绿素光化学效率( $F_v/F_m$ )前6 d无明显变化, 后2 d迅速下降, 叶绿素a、叶绿素b及总叶绿素含量呈下降趋势; 硬度、可滴定酸含量、维生素C含量呈逐渐下降趋势, 可溶性固形物含量呈先增加后下降趋势; 淀粉指数(SI)升高, 酶含量降低, 后熟6 d时出现乙烯和呼吸跃变峰。果实的后熟软化伴随着果皮叶绿素含量、 $h^{\circ}$ 值和叶绿素荧光参数中的 $F_0$ 、 $F_v$ 等指标的下降。通过相关性分析表明, 果实硬度分别与叶绿素a、叶绿素b、总叶绿素含量、 $h^{\circ}$ 值、 $F_m$ 和 $F_v$ 等表征果皮颜色的指标以及与淀粉含量、纤维素酶活性等软化指标呈极显著正相关, 与 $F_0$ 和 $F_v/F_m$ 呈显著正相关。同时发现, 果皮颜色 $h^{\circ}$ 值与叶绿素a、叶绿素b、总叶绿素、叶绿素荧光参数 $F_0$ 、 $F_v$ 、 $F_m$ 和 $F_v/F_m$ 呈极显著正相关, 与 $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 呈极显著负相关。【结论】西洋梨果实后熟主要是由于淀粉含量下降、纤维素酶活性变化引起果实硬度下降以及果皮叶绿素降解导致果面由绿转黄, 最终完成果肉软化、果皮转黄的后熟过程。另外, 以硬度下降至3 kg·cm<sup>-2</sup>时作为果实最佳食用期, 后熟过程中可通过果皮颜色或叶绿素荧光参数来对果实最佳食用期进行无损判断, 当测定 $h^{\circ}$ 值低于105或 $L^*$ 值高于70时, 或 $F_v/F_m$ 低于0.7时, 果实达到最佳食用期。

**关键词:** ‘三季梨’; 后熟; 果皮颜色; 生理生化; 相关性

中图分类号: S661.2

文献标志码: A

文章编号: 1009-9980(2018)06-0718-11

## Physiological and biochemical changes during postharvest ripening in ‘Docteur Jules Guyot’ pear and their correlations

MA Fengli<sup>1</sup>, JIA Xiaohui<sup>1</sup>, WANG Zhihua<sup>1</sup>, LI Yan<sup>2</sup>, DU Yanmin<sup>1</sup>, TONG Wei<sup>1</sup>, SUN Pingping<sup>1</sup>, CUI Jianchao<sup>1</sup>, WANG Yang<sup>1</sup>, WANG Wenhui<sup>1\*</sup>

(<sup>1</sup>Research Institute of Pomology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xingcheng 125100, Liaoning, China; <sup>2</sup>Beijing Daxing District Landscaping Bureau, Beijing 102600, China)

**Abstract:** 【Objective】 ‘Docteur Jules Guyot’, a representative European pear (*Pyrus communis* L.) cultivar was used in this study to investigate the changes in various physiological and biochemical indexes and analyze their correlations during the postharvest ripening of European pear. 【Methods】 Loss of fruit firmness is an obvious change in the after ripening of ‘Docteur Jules Guyot’ pear. Fruit were transported to the laboratory and precooled at (0±0.5) °C for 24 h. Uniform sized fruit without lesions were selected as the materials. The precooled fruit were packed with PE bags (the thickness: 0.02 mm) and stored at room temperature (20±1 °C). The fruit in the bags were sampled every day until the fruit firm-

收稿日期: 2017-12-07 接受日期: 2018-02-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0400903-06); 国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-29-19); 中国农业科学院科技创新工程(CAAS-ASTIP)

作者简介: 马凤丽, 女, 在读硕士研究生, 主要从事果实品质生理研究。Tel: 15533816736, E-mail: 2689466330@qq.com

\*通信作者 Author for correspondence. Tel: 0429-3598188, E-mail: wangwenhui@caas.cn

ness reduced to  $2.0 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ . Three biological replicates were performed each with 10 fruit. Chromatic aberration, chlorophyll fluorescence, soluble solids, titratable acid content, vitamin C content, pulp firmness, fruit respiration intensity, ethylene release, starch staining, starch content and various enzymes were measured for investigating the physiological and biochemical changes. 【Results】During the storage of ‘Docteur Jules Guyot’ fruit, the skin color changed from green to yellow, with  $L^*$  value increasing gradually. Photochemical efficiency ( $F_v/F_m$ ) showed no significant change in the first 6 d but decreased rapidly later, and the contents of chlorophyll a, chlorophyll b and total chlorophylls decreased with the after-ripening and softening of the fruit.  $h^\circ$  value of the ‘Docteur Jules Guyot’ declined with the prolongation of storage time at room temperature. When the firmness reduced to  $1.64 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$  (less than  $2.0 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ ),  $h^\circ$  value was 95.50 and the peel turned completely yellow. Chlorophyll fluorescence detection indicated that chlorophylls were activated by light. With the ripening of ‘Docteur Jules Guyot’ at room temperature,  $F_v/F_m$  declined continuously, and the lowest value of 0.3 appeared at the 8<sup>th</sup> day. The coordinated changes in chlorophyll content and fruit color suggested that a high content of soluble sugar played an important role in the regulation of chloroplast thylakoid disintegration and chlorophyll degradation. In this experiment, the chlorophyll content showed continuous decline with storage time. There was a significant negative linear correlation between starch dyeing index and fruit firmness ( $r = 0.92^{**}$ ). In this study, we found that the amylose content decreased with storage time from  $44.91 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$  to  $24.89 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ . Amylase activity increased at the beginning and then decreased, and reached its maximum value of  $6.60 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$  at the 4<sup>th</sup> day. The cellulase activity decreased gradually, and the cellulase activity decreased rapidly from harvest to day 5, after which, the cellulase activity decreased to the lowest value of  $0.36 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$  and maintained this low value thereafter. Polygalacturonase (PG) activity was  $1.31 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$  at the 5<sup>th</sup> day, and then decreased to its lowest value of  $0.67 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ . The content of soluble sugars increased continuously, and in contrast, titratable acid content decreased continuously. Vitamin C content decreased slowly to  $2.30 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ . The values of respiratory intensity and ethylene release both reached their highest values on the 6<sup>th</sup> day, which were  $155.76 \mu\text{L} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$  and  $91.14 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ , respectively. 【Conclusion】During the after-ripening of European pear fruit, starch content and firmness of fruit decreased gradually and the skin color changed from green to yellow. Fruit with a firmness of  $3.0 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$  had the best taste. During the after-ripening and softening of the fruit, the skin color and chlorophyll fluorescence parameters could be used as the standards for judging the fruit status with the best taste. In the case of ‘Docteur Jules Guyot’, the best eating quality was attained when fruit  $h^\circ$  value was below 105,  $L^*$  value above 70 and  $F_v/F_m$  below 0.7.

**Key words:** ‘Docteur Jules Guyot’; Ripening; Physiological and biochemical changes; Correlation

西洋梨(*Pyrus communis* L.)是与东方梨齐名的世界两大栽培梨类型之一<sup>[1]</sup>,目前,我国西洋梨种植面积也在不断扩大,在山东、辽宁、河南、河北、北京等地均有栽培,越来越多的人喜爱食用西洋梨。但西洋梨不同于白梨和砂梨品种,果实需经后熟方可达到软溶多汁、香气浓郁的最佳食用状态。西洋梨果实货架期一般为7~10 d,最佳食用期一般为2~3 d,因此,对于最佳食用期的准确判断尤为重要。

果肉质地是西洋梨果实后熟程度的主要特征指标之一<sup>[2]</sup>,可用来判断果实是否达到最佳食用状态。

果实后熟软化是一个复杂的生理生化过程,涉及糖酸组分、果实质地、果皮色泽、香气成分以及风味物质等变化<sup>[3]</sup>。目前,果实软化的研究主要集中在细胞壁多糖降解及其相关水解酶活性变化对果实软化的影响以及膜质过氧化作用和保护酶系统与果实衰老的关系方面<sup>[4-7]</sup>。关于梨果采后后熟软化已有众多学者进行报道,如‘京白梨’<sup>[8-12]</sup>、‘南果梨’<sup>[13-14]</sup>、‘花盖梨’<sup>[15]</sup>等,且仅见到果皮颜色与叶绿素荧光之间的关系<sup>[16]</sup>,但有关果皮颜色、叶绿素荧光参数以及果实后熟软化等相关指标的相关性研究尚未

见报道。另外,能够快速高效对果实品质进行无损检测是目前乃至今后很长一段时间果实采后品质研究的热点问题,通过果皮颜色、叶绿素荧光参数等相关指标来判断果肉质度,进而实现对果实后熟程度的快速无损检测,目前尚未见报道。笔者以我国主栽的早熟西洋梨品种‘三季梨’果实为试材,研究20℃条件下果实后熟过程中的生理生化指标变化并进行相关性分析,以期了解果实软化过程中各生理指标变化,找到反映果实后熟进程的特征指标,实现西洋梨果实后熟程度的快速无损检测,为解决‘三季梨’果实采后迅速软化、无损伤判断货架期品质等提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验材料与处理

试验所用‘三季梨’均于商业成熟期采自辽宁省绥中县李家乡,果园管理中上等,砂壤土,树龄15 a(年)。果实采后当天(2016年8月5日)立即运至中国农业科学院果树研究所,于(0±0.5)℃预冷24 h。选取大小均匀、成熟度相对一致、无病虫害及机械伤的健康果实作为试验材料。置于挽口的PE食品袋(厚度0.02 mm)内常温(20±1℃)贮藏,每天取样,直到果实硬度降至2.0 kg·cm<sup>-2</sup>以下时停止测定,用于观察和测定相关生理生化指标,分别标记为1、2、3、4、5、6、7、8 d样品。试验进行3个生物学重复,每个重复用果量为10个。

### 1.2 试验设备

CR-400色差计、GS-15水果质地分析仪、PR-101α折光仪、Metrohm 808 Titrando全自动电位滴定仪、SP-7890气相色谱仪。

### 1.3 试验方法

1.3.1 果实硬度、可溶性固形物含量测定 采用GS-15水果质地分析仪(8 mm测头)测定果实(去皮)硬度,单位为kg·cm<sup>-2</sup>。

使用PR-101α糖量仪测定可溶性固形物含量,单位为%。

1.3.2 可滴定酸、维生素C含量测定 用Metrohm 808 Titrando电位滴定仪测定可滴定酸和维生素C含量,单位分别为%和mg·100 g<sup>-1</sup>。

1.3.3 果实呼吸强度以及乙烯释放量测定 采用SP-7890气相色谱仪对果实呼吸强度和乙烯释放量同时进行测定。单位分别是mg·kg<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup>和μL·kg<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup>。

测定具体条件为:用高纯N<sub>2</sub>作为载气,控制其流速在55~58 mL·min<sup>-1</sup>范围内,燃气采用H<sub>2</sub>和空气,其中H<sub>2</sub>压力为0.2 MPa,空气为0.1 MPa;转化炉温度360℃;填充柱采用不锈钢材质,柱温为120℃;用温度为140℃的FID检测器检测;取挑选出的果实12个,分别置于2.25 L的3个可密封塑料盒内,密封60 min后,用注射器取进样量1 mL进行测定。

1.3.4 淀粉染色 果实淀粉染色指数参照王瑞庆等<sup>[17]</sup>的标准共分6级:Ⅰ级,果实横切面全部着色;Ⅱ级,2/3以上染色;Ⅲ级,1/2~2/3染色;Ⅳ级,1/3~1/2染色;Ⅴ级,1/3以下染色;Ⅵ级,不变色。

淀粉染色指数计算公式为:淀粉染色指数=Σ(淀粉染色指数×各级果实个数)/(6×果实总数)。

1.3.5 果皮底色 采用日本美能达CR-400色差仪测定,采用D<sub>65</sub>光源,其中在Lab色空间中,测定的指标有L\*值、a\*值、b\*值、c\*值和h°值等。L\*值(亮度)越大表示所测样品的表面越亮,0表示黑色,100表示白色;a\*值(红绿色差)正值为红色,负值为绿色,绝对值越大,红色或绿色越深;b\*值(黄蓝色差),其正值为黄色,负值为蓝色,绝对值越大,黄色或蓝色越深;c\*值(c\*= $\sqrt{a^2+b^2}$ )表示颜色的彩度,其值越大,颜色越纯;h°值(当a>0,b>0时,h=arctan a/b;当a<0,b>0时,h=180°+arctan a/b)为色度角,变化范围为0°~180°,颜色变化依次为紫红、红、橙红、橙、黄、黄绿、绿和蓝绿,当h=0°时为紫红色,h=90°时为黄色,h=180°时为绿色,h>100°时,h值越大,果实绿色越深,h<50°时,h值越小,果实红色越深。

1.3.6 淀粉含量及酶测定方法 淀粉含量参考杨美玲等<sup>[18]</sup>的方法测定。淀粉酶(AM)活性测定:以可溶性淀粉为底物,37℃反应20 min,用DNS终止反应,沸水浴5 min,冷却,测定OD<sub>520</sub>值;以失活酶液做空白对照。纤维素酶活性测定按照Andrews等<sup>[19]</sup>和Lin等<sup>[20]</sup>的方法,底物为羧甲基纤维素(CMC,Sigma公司),以D-葡萄糖为标样,以37℃下每g鲜样每min分解CMC产生1 μg葡萄糖为1个酶活力单位(U)。多聚半乳糖醛酸酶(PG)活性的测定参照Gross<sup>[21]</sup>的方法,底物为多聚半乳糖醛酸(Sigma公司),以D-(+)半乳糖醛酸为标样,以37℃下每g鲜样每min分解产生1 μg游离半乳糖醛酸为1个酶活力单位(U)。

### 1.4 数据处理

用Excel软件进行数据计算和绘图,采用SAS

9.4 软件进行方差和相关性分析,并利用 Duncan 多重比较,进行差异显著性分析。所有数据均为3次重复的平均值。

## 2 结果与分析

### 2.1 ‘三季梨’果实后熟过程中硬度的变化

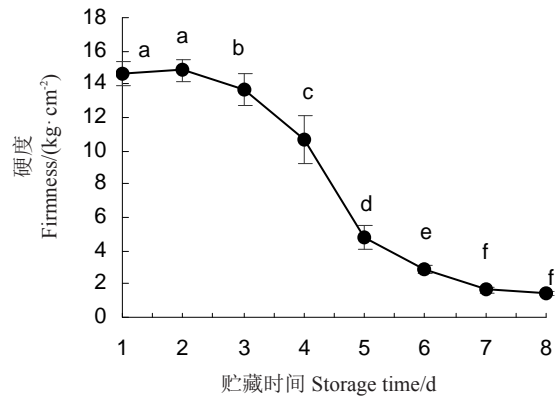
硬度是反映‘三季梨’果实成熟度最直观的标志。如图1所示,常温下‘三季梨’果实硬度变化可分为3个阶段,即从采收至3 d为缓慢软化期,3~7 d为快速软化期,7 d后其硬度下降趋势缓慢,此时果实柔软多汁,达到完熟状态。其中,7 d的硬度为 $1.64 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ ,显著低于贮藏初期(1 d)。

### 2.2 ‘三季梨’果实后熟过程中果皮颜色相关指标的变化

2.2.1 果皮叶绿素含量的变化 如图2所示,叶绿素a含量随着贮藏时间的延长而呈现下降趋势。叶绿素a含量在采后不同贮藏时间变化不同,1~8 d缓慢下降,叶绿素a含量( $\omega$ ,后同)由最初的 $0.055 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,降为 $0.012 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。叶绿素b含量在贮藏期间,总体呈下降趋势。叶绿素b含量由最初的 $0.039 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 降为 $0.001 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。统计分析表明,贮藏1 d的含量显著高于其他时间。总叶绿素含量在贮藏期间呈下降趋势,贮藏1 d时显著高于其他贮藏时间,为 $0.094 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

2.2.2 果皮色泽的变化 果皮色泽是衡量梨果实商品价值的重要外观指标,且可反映果实后熟程度。如图3所示,随着后熟时间的延长,果皮 $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 和 $c^*$ 值逐渐升高,但在前4 d变化平缓,不同后熟时间各指标差异均不显著, $L^*$ 值贮藏8 d时果皮亮度显著高于其他时间。随着贮藏时间的延长,果皮 $a^*$ 值由负值逐渐接近于零,表明果皮颜色由绿逐渐转黄。随着后熟时间的延长,果皮 $h^\circ$ 值逐渐下降,但在前4 d下降平缓,5 d后快速下降。

2.2.3 果皮叶绿素荧光参数的变化  $F_0$ 表示初始荧光参数,是由PS II补光叶绿素蛋白复合物发出,与光合作用反应无关,与果皮叶绿素含量有关,荧光强度保持相对稳定,用来表示PS II反应中心可逆转程度。果皮叶绿素荧光参数的变化如图4所示。从图4-A可以看出, $F_0$ 呈逐渐下降的趋势,最低值为82.06,贮藏8 d时比贮藏1 d下降了34.35%,PS II反应不具备可逆性。据统计分析表明,贮藏7、8 d的数据显著低于其他贮藏时间。



不同小写字母表示差异显著( $p < 0.05$ )。下同。

Different small letters indicate significant difference at  $p < 0.05$ . The same below.

图1 ‘三季梨’果实后熟过程中硬度的变化

Fig. 1 Changes in flesh firmness of ‘Docteur Jules Guyot’ pear during postharvest ripening

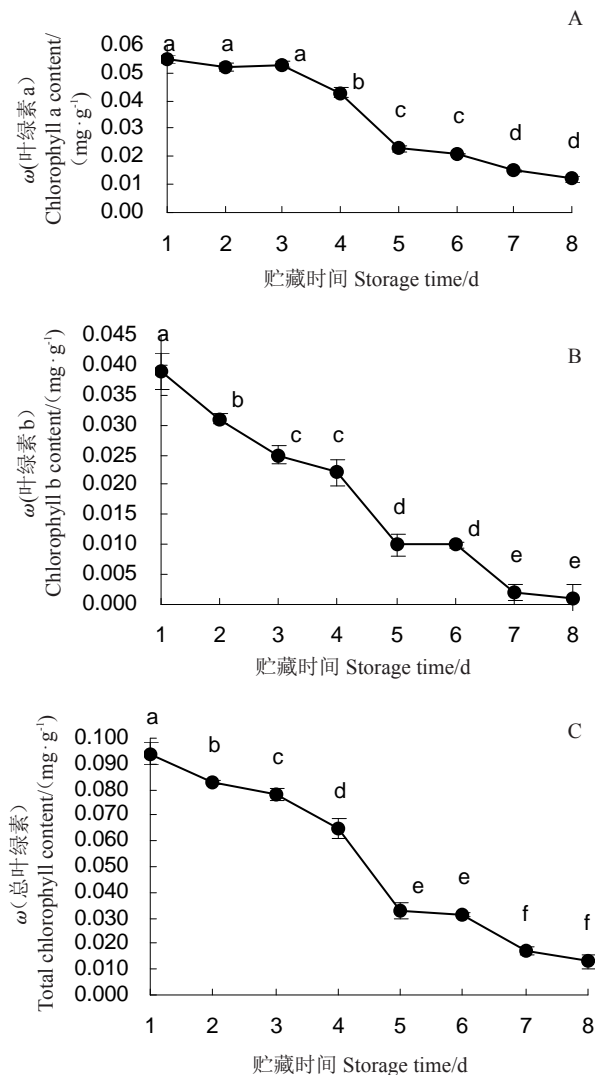


图2 ‘三季梨’果实后熟过程中叶绿素含量的变化

Fig. 2 Changes in chlorophyll contents of ‘Docteur Jules Guyot’ pear during postharvest ripening

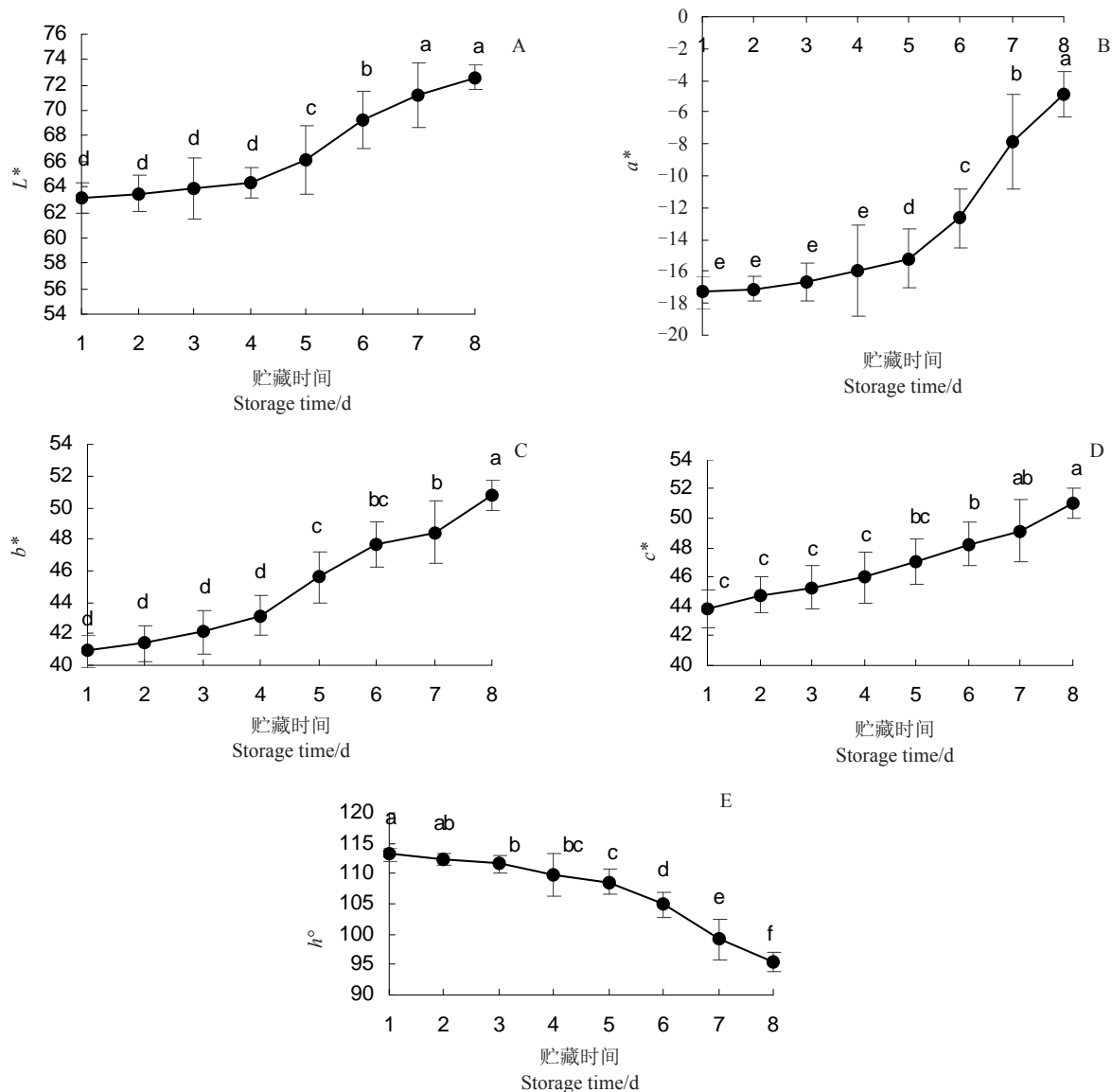


图3 ‘三季梨’果实后熟过程中果皮颜色的变化

Fig. 3 Changes in pericarp color indexes of ‘Docteur Jules Guyot’ pear during postharvest ripening

$F_m$ 表示最大荧光参数,从图4-B可以看出,随着贮藏时间的延长,‘三季梨’ $F_m$ 呈现逐渐下降的趋势,表明果皮细胞活性逐渐降低,叶绿素含量逐渐降低。其中最低值为118.06,贮藏8 d时比贮藏1 d下降了83.68%。据统计分析表明,贮藏7、8 d数据显著低于其他贮藏时间。

从图4-C可以看出, $F_v$ 随着贮藏时间的延长,也呈现逐渐下降的趋势,其中最低值为36,贮藏8 d时比贮藏1 d下降了93.88%,下降幅度最大。据统计分析表明,贮藏7、8 d的数据显著低于其他贮藏时间。

$F_v/F_m$ 表示PS II最大光能转化效率,从图4-D可以看出,随着贮藏时间的延长, $F_v/F_m$ 呈现逐渐下降的趋势,其中最低值为0.3,贮藏8 d时比贮藏1 d下

降了65.12%。据统计分析表明,贮藏8 d的数据显著低于其他贮藏时间。

### 2.3 ‘三季梨’果实后熟过程中软化相关指标的变化

如图5所示,果实中淀粉转化为糖的速率逐渐增大,促进了果实成熟,淀粉染色指数呈现缓慢上升趋势。其中,贮藏4~8 d出现迅速上升趋势,最大值为98.3,显著高于其他时期(图5-A)。如图5-B所示,‘三季梨’在贮藏过程中随着贮藏时间的延长,淀粉含量( $\omega$ ,后同)呈逐渐下降趋势,由最初时的 $44.91 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 一直降到 $24.89 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。统计分析表明,贮藏1 d的淀粉含量是贮藏8 d的1.8倍,差异显著。淀粉酶活性随着贮藏时间的延长呈先升后降趋势,贮藏4 d时,其淀粉酶活性达到最大值( $6.60 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ ),比贮藏

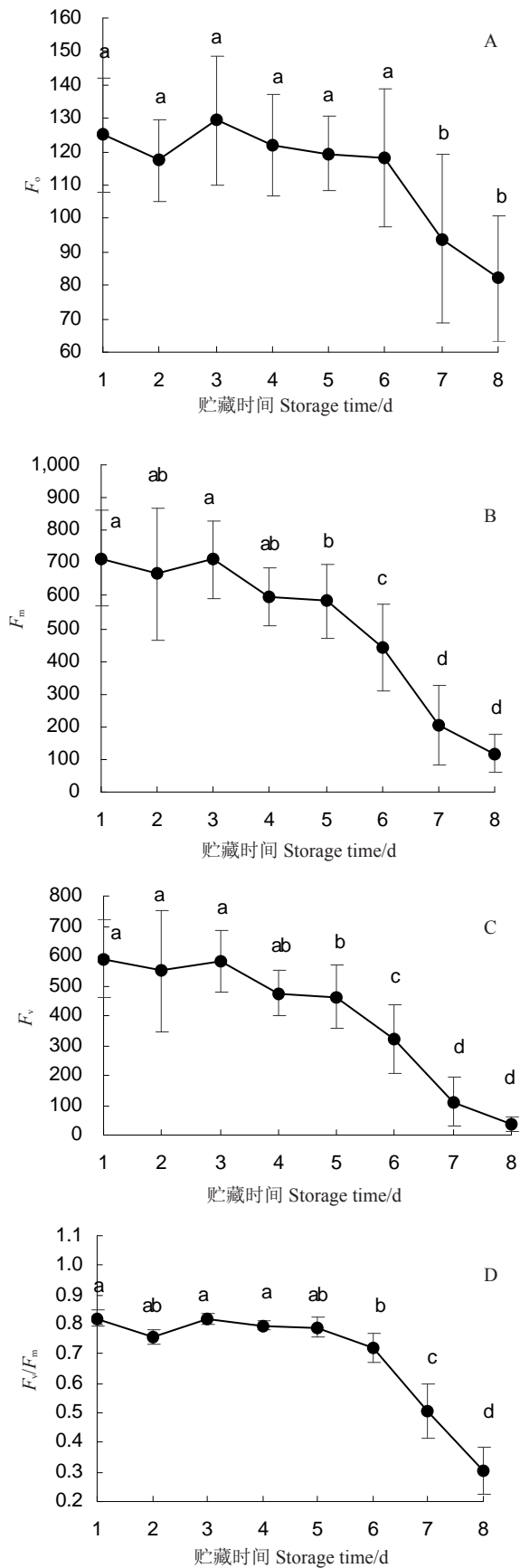


图4 ‘三季梨’果实后熟过程中叶绿素荧光的变化  
Fig. 4 Changes in chlorophyll fluorescence of ‘Docteur Jules Guyot’ pear during postharvest ripening

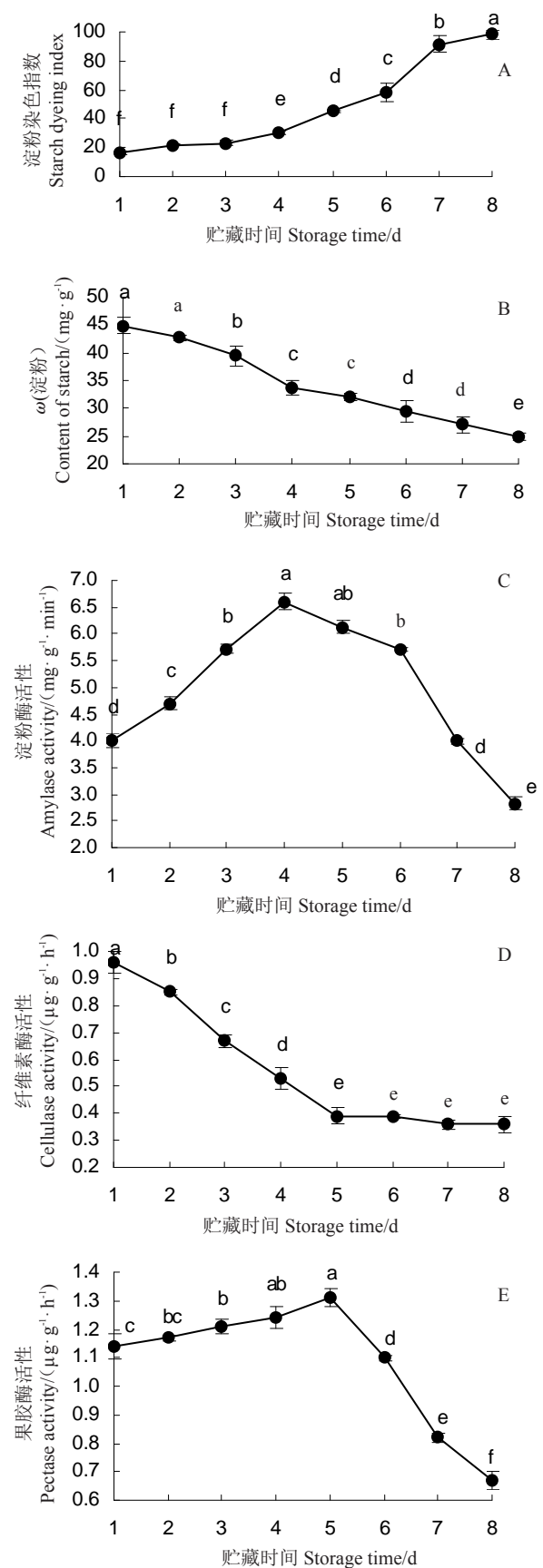


图5 ‘三季梨’果实后熟过程中软化相关指标的变化  
Fig. 5 Changes in softening related indexes of ‘Docteur Jules Guyot’ pear during postharvest ripening

1 d时显著提高了65%,比贮藏8 d时显著提高133.22% (图5-C)。纤维素酶活性下降迅速,差异显著。贮藏5 d后其纤维素酶活性降到最低且保持不变,最低值为 $0.36 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ (图5-D)。如图5-E所示,果胶酶活性随着贮藏时间的延长呈先缓慢上升后迅速下降的趋势。贮藏5 d时PG酶活性达到最大值,为 $1.31 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ,显著高于其他贮藏时期。贮藏8 d时果胶酶活性最低,为 $0.67 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ,显著低于其他贮藏时期。

#### 2.4 ‘三季梨’果实后熟过程中内在品质指标的变化

如图6所示,常温下‘三季梨’果实可溶性固形物含量呈现先增加后下降的趋势。其中,最大值出现在贮藏6 d后,为11.83%,显著高于贮藏3 d时的最小值(10.84%)(图6-A)。*‘三季梨’*果实可滴定酸

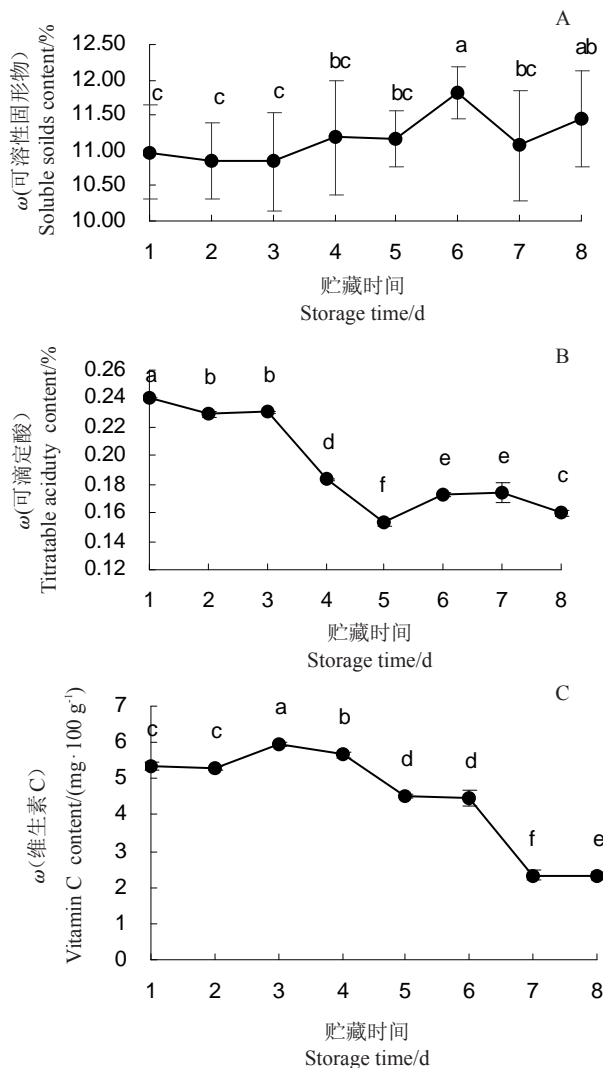


图6 ‘三季梨’果实后熟过程中可溶性固形物、可滴定酸和维生素C含量的变化

Fig. 6 Changes in the contents of soluble solids, titratable acid and vitamin C of ‘Docteur Jules Guyot’ pear during postharvest ripening

含量随着时间的延长呈现下降趋势,范围为0.15%~0.25%。贮藏后5 d达到最低值(0.15%),显著低于贮藏后1 d(图6-B)。如图6-C所示,维生素C含量呈现缓慢下降趋势,贮藏前3 d无明显变化,趋于 $5.50 \text{ mg}\cdot 100 \text{ g}^{-1}$ ,从贮藏3 d后开始下降,贮藏6~7 d出现骤降,之后果实成熟,维生素C含量不再改变,趋于 $2.30 \text{ mg}\cdot 100 \text{ g}^{-1}$ 。统计分析表明,贮藏后8 d的维生素C含量显著低于其他时期,为贮藏后1 d的42.99%。

#### 2.5 其他生理指标

乙烯释放量和呼吸强度与果实成熟度密切相关。*‘三季梨’*属于呼吸跃变型果实,从乙烯释放和呼吸作用的角度看,乙烯释放量和呼吸强度均呈先升后降的趋势,*‘三季梨’*经历正常的后熟生理过程,均在贮藏后6 d达到最高值,分别为 $155.76 \mu\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $91.14 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

如图7-A所示,贮藏后6 d的呼吸强度显著高于贮藏初期,为其3.99倍。如图7-B所示,贮藏后6 d的乙烯释放量显著高于贮藏初期,为其49.5倍。

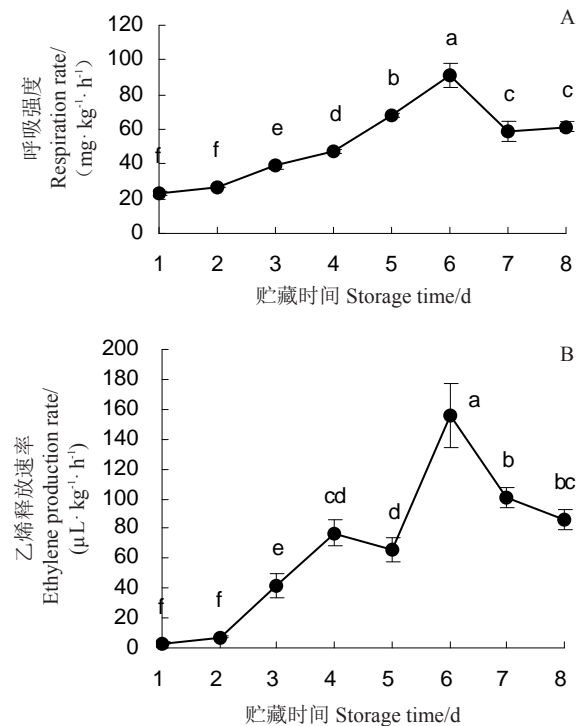


图7 ‘三季梨’果实后熟过程中呼吸强度和乙烯释放量的变化

Fig. 7 Changes in respiration rate and ethylene release of ‘Docteur Jules Guyot’ pear during postharvest ripening

#### 2.6 ‘三季梨’果实后熟过程中各生理指标间的相关性分析

通过对各生理指标进行相关分析(表1)发现,硬

表1 ‘三季梨’果实后熟过程中各生理指标的相关性分析  
Table 1 Correlation analysis of physiological indexes of ‘Docteur Jules Guyot’ pear during postharvest ripening

	果实硬度 Fruit firmness	可溶性固形物含量 Soluble solid content	维生素C含量 Vitamin C content	可滴定酸含量 Titratable acid content	乙烯释放速率 Ethylene production rate	呼吸强度 Respiration rate	叶绿素a含量 Chlorophyll a content	叶绿素b含量 Chlorophyll b content	叶绿素(a+b)含量 Chlorophyll(a+b) content	淀粉染色指数 Starch dyeing index	淀粉含量 Starch content	淀粉酶活性 Amylase activity	纤维素酶活性 Cellulase activity	多聚半乳糖醛酸酶 Polygalacturonase activity	$F_m$	$F_v$	$F_v/F_m$	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$c^*$	$h^\circ$			
果实硬度 Fruit firmness	1																								
可溶性固形物含量 Soluble solid content	-0.71*	1																							
维生素C含量 Vitamin C content	0.84**	-0.38	1																						
可滴定酸含量 Titratable acid content	0.90**	-0.66	0.64	1																					
乙烯释放速率 Ethylene production rate	0.82*	0.85**	-0.48	-0.75*	1																				
呼吸强度 Respiration rate	-0.85**	0.86**	-0.46	-0.83*	0.93**	1																			
叶绿素a含量 Chlorophyll a content	0.98**	-0.62**	0.84**	0.92**	-0.77*	-0.82*	1																		
叶绿素b含量 Chlorophyll b content	0.92**	-0.64	0.89**	0.84**	-0.64	-0.67	0.88**	1																	
叶绿素(a+b)含量 Chlorophyll(a+b) content	0.98**	-0.64	0.89**	0.90**	-0.73*	-0.77*	0.97**	0.96**	1																
淀粉染色指数 Starch dyeing index	-0.91**	0.52	-0.96**	-0.73*	0.65	0.61	-0.91**	-0.88**	0.93	1															
淀粉含量 Starch content	0.95**	-0.67	0.80*	0.91**	-0.83*	-0.81*	0.96**	0.85**	0.94	-0.91**	1														
淀粉酶活性 Amylase activity	0.24	0.01	0.67	-0.48	0.14	0.18	0.23	0.42	0.32	-0.54	0.17	1													
纤维素酶活性 Cellulase activity	0.92**	-0.64	0.66	0.94**	-0.85**	0.87**	0.94**	0.75*	0.88	-0.79*	0.96**	-0.06	1												



表1(续) Table 1(continued)

果实硬度 Fruit firmness	可溶性固形物含量 Soluble solid content	维生素C含量 Vitamin C content	可滴定酸含量 Titratable acid content	乙烯释放速率 Ethylene production rate	呼吸强度 Respiration rate	叶绿素a含量 Chlorophyll a content	叶绿素b含量 Chlorophyll b content	叶绿素(a+b)含量 Chlorophyll(a+b) content	淀粉染色指数 Starch dyeing index	淀粉含量 Starch content	淀粉酶活性 Amylase activity	纤维素酶活性 Cellulase activity	多聚半乳糖醛酸酶 Polygalacturonase activity	$F_0$	$F_m$	$F_v$	$F_v/F_m$	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$c^*$	$h^\circ$			
0.61	0.30	0.89**	0.34	-0.33	-0.22	0.60	0.67	0.65	-0.86**	0.62	0.84**	0.41	1												
0.73*	-0.32	0.95**	0.55	-0.36	-0.32	0.74*	0.79	0.79*	-0.92**	0.74*	0.73*	0.57	0.93**	1											
0.87**	-0.52	0.96	0.68**	-0.61	-0.55	0.86**	0.87**	0.89**	-0.98**	0.88**	0.58	0.74*	0.90**	1											
0.88**	-0.53	0.95**	0.69	-0.63	-0.56	0.87**	0.87**	0.90**	-0.99**	0.89**	0.57	0.75*	0.89**	1											
0.71*	-0.35	0.92**	0.52	-0.38	-0.32	0.73*	0.74*	0.75*	-0.91**	0.74*	0.56*	0.75	0.96**	1											
-0.90**	0.61	-0.95**	-0.67	0.66	0.63	-0.88**	-0.88**	-0.91**	0.97**	-0.86**	-0.60	-0.73*	-0.88**	1											
-0.82*	0.48	-0.94**	-0.61	0.56	0.48	-0.82*	-0.81*	-0.84**	0.97**	-0.85**	-0.64	-0.69	-0.93**	1											
-0.98**	0.67	-0.87**	-0.87**	0.73*	0.79*	-0.98**	-0.92**	-0.98**	0.93**	-0.94**	-0.35	-0.89**	-0.67	1											
-0.95	0.68	-0.76	-0.91	0.72	0.84	-0.96	-0.87	-0.95**	0.83*	-0.90*	-0.19	-0.89**	-0.49	1											
0.89**	-0.54	0.94**	0.72*	-0.64	-0.59	0.89**	0.86**	0.90**	-0.99**	0.90**	0.56	0.78*	0.88**	1											

注: \*\*为极显著相关(1%显著水平), \*为显著相关(5%显著水平)。

Note: \*\* indicates highly significant correlations (1% significant level), \* indicates significant correlation (5% significant level).

度与可滴定酸含量、叶绿素a含量、叶绿素b含量、总叶绿素含量、淀粉染色指数、淀粉含量、纤维素酶活性相关系数非常高,分别为0.90\*\*、0.99\*\*、0.93\*\*、0.99\*\*、-0.92\*\*、0.96\*\*、0.92\*\*;硬度与维生素C含量、呼吸强度、 $F_m$ 、 $F_v$ 、 $h^\circ$ 值相关系数次之,分别为0.85\*\*、-0.85\*\*、0.88\*\*、0.88\*\*、0.89\*\*;其他变量均与硬度呈显著相关。

### 3 讨论

果实色泽是衡量梨果实商品价值的重要外观指标<sup>[3]</sup>。在Lab色空间中, $h^\circ$ 值表示色泽,能直观地反映果皮颜色的变化, $L^*$ 随着贮藏时间的延长会越来越亮,说明果实有返糖现象; $h^\circ$ 值越小,表示果皮底色越黄。在本试验中,随着‘三季梨’在室温条件下贮藏时间的延长, $h^\circ$ 值不断下降,当硬度为1.64 kg·cm<sup>-2</sup>(低于2 kg·cm<sup>-2</sup>)时, $h^\circ$ 值为95.50,果皮底色完全变黄。

叶绿素的荧光现象说明,叶绿素能被光激发,而叶绿素分子的激发是将光能转变为化学能的第1步<sup>[6]</sup>。在本试验中,随着‘三季梨’在室温条件下贮藏时间的延长, $F_v/F_m$ 值不断下降,最低值为0.3;叶绿素含量不断下降,光抑制最明显。在本试验中,随着‘三季梨’在室温条件下贮藏时间的延长,叶绿素a含量、叶绿素b含量和总叶绿素含量均不断下降,这与果皮颜色由绿转黄相一致。

多数研究者认为,果实软化是由于细胞壁降解酶水解细胞壁,造成细胞间连接减少、细胞离散所致,其中PG和纤维素酶是重要的细胞壁降解酶,在细胞壁结构改变过程中起着重要作用<sup>[5]</sup>。本研究结果表明,随着贮藏时间的延长,‘三季梨’淀粉酶活性、纤维素酶活性、果胶酶活性均呈下降趋势,乙烯释放速率逐渐增加以致果实硬度逐渐下降,淀粉含量下降。通过SAS相关分析表明,淀粉含量与硬度呈极显著正相关( $r = 0.96^{**}$ ),乙烯释放速率与硬度呈显著正相关( $r = 0.84^*$ ),纤维素酶活性与硬度呈极显著正相关( $r = 0.92^{**}$ ),淀粉含量与纤维素酶活性呈极显著正相关( $r = 0.96^{**}$ ),淀粉酶活性与PG呈极显著正相关( $r = 0.84^{**}$ )。

可溶性固形物含量是检测果实品质的一项重要指标,在本试验中,可溶性固形物含量呈现波浪式变化,但波动幅度不大,可能是由于果实自身消耗导致其含量上升,但随着呼吸作用的持续进行,

贮藏物的消耗量大于产生量,进而导致可溶性固形物含量有所下降而呈现起伏状态。通过SAS相关分析表明,可溶性固形物含量与果实呼吸强度呈显著正相关( $r = 0.86^*$ ),呼吸强度与硬度呈极显著负相关( $r = -0.85^{**}$ )。

与硬度的相关性分析表明,果实硬度分别与叶绿素a、叶绿素b、总叶绿素含量、 $h^\circ$ 值、 $F_m$ 和 $F_v$ 等表征果皮颜色的指标以及与淀粉含量、纤维素酶活性等软化指标呈极显著正相关,与叶绿素荧光参数中的 $F_v$ 和 $F_m$ 呈极显著正相关,与 $F_0$ 和 $F_v/F_m$ 呈显著正相关。同时发现,果皮颜色 $h^\circ$ 值与叶绿素a、叶绿素b、总叶绿素含量、叶绿素荧光参数 $F_0$ 、 $F_v$ 、 $F_m$ 和 $F_v/F_m$ 呈极显著正相关,与 $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 呈极显著负相关。因此,可通过对果皮颜色 $L^*$ 值以及叶绿素荧光参数等指标的检测来判断果实硬度等指标,进而确定果实后熟程度,达到对果实后熟进程的无损检测。

## 4 结 论

在‘三季梨’果实后熟过程中,果皮色泽由绿转黄,亮度逐渐增加;叶绿素a、叶绿素b及总叶绿素含量呈下降趋势;硬度、可滴定酸含量、维生素C含量呈逐渐下降趋势,可溶性固形物含量呈先增加后下降趋势。果实的后熟软化伴随着果皮叶绿素含量、 $h^\circ$ 值、叶绿素荧光参数中的 $F_0$ 、 $F_v$ 等指标的下降。淀粉含量下降、纤维素酶活性变化引起的果实硬度下降,以及果皮叶绿素降解导致的西洋梨果面由绿转黄,使果实最终完成果肉软化、果皮转黄的后熟过程。后熟过程中可通过果皮颜色或叶绿素荧光参数对果实最佳食用期进行无损判断,当测定 $h^\circ$ 值低于105或 $L^*$ 值高于70,或 $F_v/F_m$ 低于0.7时,果实达到最佳食用期。

## 参考文献 References:

- [1] 于强,朱晓义,李公存,沙玉芬,王建萍,顾亮,李元军. 胶东地区西洋梨栽培现状与思考[J]. 山西果树,2011(3): 32-33.  
YU Qiang, ZHU Xiaoyi, LI Gongcun, SHA Yufen, WANG Jianping, GU Liang, LI Yuanjun. Current situation and thinking of pear cultivation in Jiaodong area [J]. Shanxi Fruits, 2011(3): 32-33.
- [2] 于强,苏佳明,沙玉芬,李公存,李元军. 西洋梨主要优良品种简介[J]. 烟台果树,2010(1): 28.  
YU Qiang, SU Jiaming, SHA Yufen, LI Gongcun, LI Yuanjun. Introduction of the main varieties of pear [J]. Yantai Fruits, 2010

(1): 28.

- [3] 陈学森,宋君,高利平,冀晓昊,张宗营,毛志泉,张艳敏,刘大亮,张芮,李敏. ‘乔纳金’苹果及其脆肉芽变果实质地发育机理[J]. 中国农业科学,2014,47(4): 727-735.  
CHEN Xuesen, SONG Jun, GAO Liping, JI Xiaohao, ZHANG Zongying, MAO Zhiqun, ZHANG Yanmin, LIU Daliang, ZHANG Rui, LI Min. Developing mechanism of fruits texture in ‘Jonagold’ apple and its crisp flesh sport[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(4): 727-735.
- [4] 张佰清,刘佳,李江阔,姜树才,张平. 1-MCP和CO<sub>2</sub>双重处理因素对南果梨常温货架生理品质的影响[J]. 食品科技,2009,34(4): 67-70.  
ZHANG Baiqing, LIU Jia, LI Jiangkuo, JIANG Shucai, ZHANG Ping. Effect of 1-MCP and CO<sub>2</sub> doubled-treatment on Nanguo pears normal temperature shelf physiological quality [J]. Food Science and Technology, 2009, 34(4): 67-70.
- [5] 朴一龙,赵兰花,吴荣哲. 梨果实在贮藏过程中果胶分解酶活性的变化[J]. 北方园艺,2009(4): 50-53.  
PIAO Yilong, ZHAO Lanhua, WU Rongzhe. Change in pectin decomposition enzyme during storage of pear fruits[J]. Northern Horticulture, 2009(4): 50-53.
- [6] 张波,李鲜,陈昆松. 脂氧合酶基因家族成员与果实成熟衰老研究进展[J]. 园艺学报,2007,34(1): 245-250.  
ZHANG Bo, LI Xian, CHEN Kunsong. Physiological and molecular features of lipoxygenase gene family members in ripening fruit[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2007, 34(1): 245-250.
- [7] 杨玲,丛佩华,王强,康国栋. 不同苹果品种在贮藏过程中果实质构的变化[J]. 果树学报,2016,33(11): 1439-1446.  
YANG Ling, CONG Peihua, WANG Qiang, KANG Guodong. Texture changes of different apple varieties during storage[J]. Journal of Fruit Science, 2016, 33(11): 1439-1446.
- [8] 齐秀东,魏建梅,赵美微,彭红丽,张海娥. ‘京白梨’果实后熟软化与糖、淀粉代谢及其基因表达的关系[J]. 中国农业科学,2015,48(13): 2591-2599.  
QI Xiudong, WEI Jianmei, ZHAO Meiwei, PENG Hongli, ZHANG Haie. Relationship between fruit softening and the metabolism of sugar and starch and their related-gene expression in post-harvest ‘Jingbaili’ fruits[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(13): 2591-2599.
- [9] 魏建梅,齐秀东. 采收期对京白梨果实细胞壁代谢及货架品质的影响[J]. 食品研究与开发,2015,36(11): 12-16.  
WEI Jianmei, QI Xiudong. Effect of harvest date on cell wall metabolism and fruit quality of Jingbaili pear during shelf-life period[J]. Food Research and Development, 2015, 36(11): 12-16.
- [10] 齐秀东. 京白梨果实软化特性与贮藏保鲜技术研究进展[J]. 河北科技师范学院学报,2014,28(1): 11-14.  
QI Xiudong. Research on softening characteristics and techniques of storage and freshening in Jingbaili pear[J]. Journal of

- Hebei Normal University of Science and Technology, 2014, 28 (1): 11-14.
- [11] 魏建梅, 齐秀东, 张海娥, 冉辛拓, 乐文全. 京白梨果实采后 PG、糖苷酶和 LOX 活性变化及其基因表达特性[J]. 园艺学报, 2012, 39(1): 31-39.  
WEI Jianmei, QI Xiudong, ZHANG Haie, RAN Xintuo, YUE Wenquan. The activity and gene expression of polygalacturonase, glycosidase and lipoxygenase in postharvest 'Jingbaili' pear fruit[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2012, 39(1): 31-39.
- [12] 魏建梅, 马锋旺, 关军锋, 袁军伟, 朱向秋. 京白梨果实后熟软化过程中细胞壁代谢及其调控[J]. 中国农业科学, 2009, 42 (8): 2987-2996.  
WEI Jianmei, MA Fengwang, GUAN Junfeng, YUAN Junwei, ZHU Xiangqiu. Cell wall metabolism and its regulation in harvested *Pyrus ussuriensis* Maxim. cv. Jingbaili fruit during ripening[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(8): 2987-2996.
- [13] 张梦媛, 白琳, 吕静祎, 葛永红, 王文辉, 张俊虎, 李灿婴, 孟坤, 励建荣. 1-MCP 对采后南果梨果实软化的影响[J/OL]. 食品科学. [2017-09-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.2017-0927.1448.088.html>.  
ZHANG Mengyuan, BAI Lin, LÜ Jingwei, GE Yonghong, WANG Wenhui, ZHANG Junhu, LI Canying, MENG Kun, LI Jianrong. Effects of 1-methylcyclopropene on the softening of postharvest Nanguo pear fruit [J/OL]. Food Science. [2017-09-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20170927.1448.088.html>.
- [14] 王小平, 王文辉, 佟伟, 杜艳民. 鞍山地区冷藏库‘南果梨’软化褐变调研报告[J]. 北方果树, 2013(2): 43-45.  
WANG Xiaoping, WANG Wenhui, TONG Wei, DU Yanmin. Investigation report on softening and browning of Nanguo pear in cold storage in Anshan area [J]. Northern Fruits, 2013(2): 43-45.
- [15] 杨晓龙, 王文辉, 王志华, 王阳, 佟伟, 孙平平. 五种秋子梨果实采后品质变化及生理差异研究[J]. 保鲜与加工, 2017, 17(3): 26-31.  
YANG Xiaolong, WANG Wenhui, WANG Zhihua, WANG Yang, TONG Wei, SUN Pingping. Postharvest quality and physiological characters of five *Pyrus ussuriensis* Maxim. varieties [J]. Storage and Process, 2017, 17(3): 26-31.
- [16] 贾晓辉, 王文辉, 姜云斌, 王志华, 杜艳民, 佟伟. 采收成熟度对‘玉露香’梨果实品质和耐贮性的影响[J]. 果树学报, 2016, 33 (5): 594-603.  
JIA Xiaohui, WANG Wenhui, JIANG Yunbin, WANG Zhihua, DU Yanmin, TONG Wei. Effects of harvest maturity on fruit quality and storage life of 'Yuluxiang' pears[J]. Journal of Fruit Science, 2016, 33(5): 594-603.
- [17] 王瑞庆, 马书尚, 张继澍. 淀粉-碘染色法确定苹果成熟度[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(9): 81-86.  
WANG Ruiqing, MA Shushang, ZHANG Jishu. Starch iodine test for determining maturation of apple fruit[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2010, 38 (9): 81-86.
- [18] 杨美玲, 王博, 周渊名. 食品和肉制品中淀粉含量测定方法的比较与分析[J]. 商品与质量, 2017(15): 1-3.  
YANG Meiling, WANG Bo, ZHOU Yuanming. Food and meat products in the determination of starch content comparison and analysis [J]. Product and Quality, 2017(15): 1-3.
- [19] ANDREWS P K, LI S L. Cell wall hydrolytic enzyme activity during development of nonclimateric sweet cherry (*Prunus avium* L.) fruit[J]. Journal of Pomology & Horticultural Science, 2015, 70(4): 561-567.
- [20] LIN T P, LIU C C, CHEN S W, WANG W Y. Purification and characterization of pectinmethylesterase from *Ficus awkeotsang* Makino achenes[J]. Plant Physiology, 1989, 91(4): 1445-1453.
- [21] GROSS K C. A rapid and sensitive spectrophotometric method for assaying polygalacturonase using 2-cyanoacetamide[J]. Hort-Science, 1982, 17(6): 933-934.