梯度降温对鸭梨采后果肉膜脂过氧化及褐变的影响

梁丽雅，闫师杰*，何庆峰，崔 艳
(天津农学院食品科学系，天津 300384)

摘 要：以不同成熟度鸭梨为试材，采用每2.5d降1℃，30d降至(0±1)℃的梯度降温方法，探讨梯度降温对鸭梨果肉膜脂过氧化及褐变的影响。结果表明：鸭梨采后果肉褐变指数与丙二醛(MDA)含量、自由基含量呈显著的正相关，与还原性物质含量、保护酶活性呈显著的负相关。梯度降温提高了早采果果肉超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)和过氧化物酶(POD)活性，一定程度上延缓了VC、还原性谷胱甘肽(GSH)含量的下降，抑制了过氧化氢(H_2O_2)、超氧阴离子自由基(O_2^-·)的积累，降低了MDA含量和膜渗透率，从而抑制了鸭梨果肉褐变。与早采鸭梨相比，晚采鸭梨果肉中VC和GSH含量高但下降快，O_2^-·、H_2O_2和MDA积累量高，SOD和POD活性较低，梯度降温促进了晚采果果肉的膜脂过氧化和褐变。所以，适时采收结合梯度降温可以很好抑制鸭梨采后果肉褐变。

关键词：鸭梨；果肉；梯度降温；褐变；膜脂过氧化

Effect of Gradient Cooling on Membrane Lipid Peroxidation and Browning of Yali Pear Flesh after Harvest

LIANG Li-ya，YAN Shi-jie*，HE Qing-feng，CUI Yan
(Department of Food Science, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China)

Abstract：The effect of gradient cooling (storage at 12 ℃ and cooling them to (0 ± 1) ℃ over 30 days at a gradual interval of 1 ℃ every 2.5 days) on membrane lipid peroxidation and browning of Yali pear flesh with different maturity was explored. The results showed that flesh-browning index had significantly positive correlation with MDA and radical content, and significantly negative correlation with reducing substance and protective enzyme. Gradient cooling improved the activities of SOD, CAT and POD, delayed the decrease of vitamin C and GSH contents to a certain extent, inhibited the accumulation of H_2O_2, O_2^-• free radicals, reduced MDA content and membrane permeability, and retarded flesh browning of Yali pears at the early stage after harvest. In contrast, the contents of vitamin C and GSH in the flesh of Yali pears at the late stage after harvest were obvious higher and revealed a fast decrease during storage. Meanwhile, higher contents of O_2^-·, H_2O_2 and MDA, and lower activities of SOD and POD were also determined. Therefore, gradient cooling can accelerate membrane lipid peroxidation and flesh browning of Yali pears at the late stage after harvest. Timely harvesting combined with gradient cooling can efficiently inhibit the flesh browning of Yali pears during storage.

Key words：Yali pear；flesh；gradient cooling；browning；membrane lipid peroxidation
中图分类号：TS255.3；S661.2 文献标志码：A 文章编号：1002-6630(2013)06-0247-06

鸭梨(*Pyrus bretschneideri* Rehd cv. Yali)贮藏中的主要生理病害是果实褐变，首先是近果心局部变褐，然后逐步发展，整个果心，有的甚至果肉变褐[1]。有研究认为这种褐变与采收成熟度有关，采收早，发病迟，发病率低；采收晚，发病早，发病率高[2-3]。也有人认为膜脂过氧化加剧是鸭梨衰老褐变的一个重要因素，鸭梨采后衰老时，硬度下降，膜脂过氧化产物丙二醛含量增加，膜透性增大[4]。近年来，研究者采用壳聚糖[5]、微孔膜[6]、1-MCP[7]等处理来抑制鸭梨果实褐变。生产上普遍采用缓慢降温的方法抑制其褐变，关于其机理，有人认为适时早采结合缓慢降温可以增强鸭梨采后抗冷性[8]，也有报道认为缓慢降温提高了早采鸭梨果肉的亚麻酸和亚油酸相对含量及不饱和脂肪酸和饱和脂肪酸比值(U/S)，降低了膜相变温度，抑制果肉褐变[9]。

总之，关于鸭梨果实褐变与膜脂过氧化的关系国内已有报道，但经梯度降温后不同采收期鸭梨果肉膜脂过

收稿日期：2012-08-07
基金项目：国家自然科学基金面上项目(31171767)
作者简介：梁丽雅(1971—)，女，副教授，博士，研究方向为农产品贮藏与加工。E-mail：liangliya@126.com
*通信作者：闫师杰(1971—)，男，教授，博士，研究方向为农产品贮藏与加工。E-mail：yanshijie@126.com

氧化与褐变关系，以及晚采鸭梨容易褐变是否与膜脂过氧化有关还鲜见报道。本实验拟对此进行研究，探索梯度降温对两个不同采收期鸭梨果肉膜脂过氧化及褐变的影响，以期进一步完善鸭梨褐变机理，为实际生产中采取适宜措施防止鸭梨褐变，保持贮藏品质奠定理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料及处理

实验用鸭梨采自北京大兴安定镇，分别于2008年9月6日和9月26日采摘，套果实套网后用纸箱包装运抵实验室进行处理。梯度降温处理组是将梨果放12℃预冷12h后，每2.5d降1℃，用30d时间将温度降至(0±1)℃贮藏；对照组是直接将梨果放入(0±1)℃冷库中贮藏。降温结束后将衬垫在纸箱内的PE膜掩扎，封闭纸箱上盖，控制冷库RH80%～85%。每个处理设3个重复，每个重复装4箱，每箱约30个果。

1.2 试剂与仪器

2,6-二氯酚靛酚(分析纯) 瑞士Fluka公司；5,5-二硫代双-2-硝基苯甲酸、盐酸羟胺、硫代巴比妥酸(均为分析纯) 国药集团化学试剂有限公司；对氨基苯磺酸、α-萘胺(均为分析纯) 上海海曲化工有限公司；过氧化氢(分析纯) 天津市化学试剂三厂；氮蓝四唑、蛋氨酸(均为分析纯) 北京恒业中远化工有限公司；还原型谷胱甘肽、氧化型谷胱甘肽、还原型辅酶Ⅱ(均为分析纯) 美国Sigma公司。

UV 3802紫外-可见分光光度计 上海尤尼柯仪器有限公司；DDS-Ⅱ型电导率仪 上海雷磁仪器厂。

1.3 测定指标及方法

每隔一定时间，从不同箱内随机取8个果，选取果心线外侧果肉部分进行相关指标的测定。细胞膜渗透率和VC含量用新鲜样测定，其余指标均采用冻样测定。迅速将果肉切成小块，用液氮急冻后放－18℃冰柜中保存。测定时每个样品重复测定3次。各处理样品缩略名为：早采对照：Z-CK，早采梯度降温：Z-T，晚采对照：W-CK，晚采梯度降温：W-T。

1.3.1 果肉褐变指数、丙二醛(MDA)含量、细胞膜渗透率测定

果肉褐变指数测定：每次冻样前对样品果实沿果实赤道部位横切，对果心线外侧的果肉部位褐变情况进行观察，参照梁丽雅等[2]方法进行统计和计算；丙二醛含量测定参考汤章城[10]方法，以nmol/mg表示。细胞膜渗透率的测定：用φ0.8cm打孔器打取1.0mm厚的果肉小圆片，准确称取2.00g，参考曹建康等[11]方法，用电导率仪测定。

1.3.2 VC和还原性谷胱甘肽(GSH)含量的测定

VC含量测定：称取5.0g鲜样采用2,6-二氯酚靛酚法[11]测定，用mg/100g表示；还原性谷胱甘肽(GSH)含量测定：称取3.0g冻样参照Guri[12]方法，以ΔOD_{412}/g表示。

1.3.3 O_2^-·产生速率和H_2O_2含量的测定

分别取5.0g冻样测定。O_2^-·产生速率：参照王爱国等[13]方法，以nmol/mg表示；H_2O_2含量：参考Patterson等[14]方法，以μmol H_2O_2/mg表示；蛋白质含量测定：以BSA为标准蛋白，参照Bradford[15]方法。

1.3.4 POD、CAT、SOD活性测定

POD和CAT活性测定：分别取3.0g冻样，参考Venisse等[16]、Bailly等[17]方法，酶活以每分钟内OD值变化0.01为1个活性单位U，酶比活力均以U/mg表示；SOD活性测定：取5.0g冻样，参考Giannopolitis等[18]方法，以抑制NBT光化还原的50%为一个酶活性单位U，比活力用U/mg表示。

1.4 数据处理

用Excel 2003 制图，用SPSS 11.0软件进行方差分析及显著性检验。

2 结果与分析

2.1 梯度降温对鸭梨采后果肉褐变的影响

鸭梨采后贮藏中果肉褐变情况如图1所示，贮藏前期果肉没有褐变，后期果肉褐变指数呈现逐渐升高趋势变化。早采对照果在采后80d出现褐变，后期褐变加快；而早采梯度降温果从采后100d才开始出现褐变，到贮藏末期，对照和梯度降温果褐变指数分别只有0.29和0.19。从图1还可知，晚采果在采后60d果肉开始出现褐变，且褐变速度较快，梯度降温果褐变指数在贮藏期间普遍高于对照果，到采后180d梯度降温和对照果果肉褐变指数分别是0.51和0.42，说明梯度降温促进了晚采果果肉的褐变。在整个贮藏期间，早采果果肉褐变指数要显著低于晚采果($P<0.01$)，而早采梯度降温果褐变指数显著低于早采对照果($P<0.01$)，说明梯度降温可以很好抑制早采鸭梨采后果肉的褐变，而对晚采果果肉褐变起促进作用。

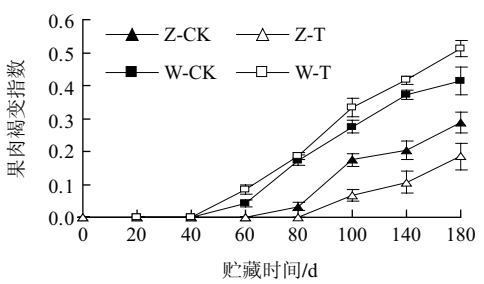


图1 梯度降温对鸭梨采后果肉褐变指数的影响

Fig.1 Effect of gradient cooling on browning index of Yali pear flesh after harvest

2.2 梯度降温对鸭梨采后果肉细胞膜渗透率和丙二醛(MDA)含量的影响

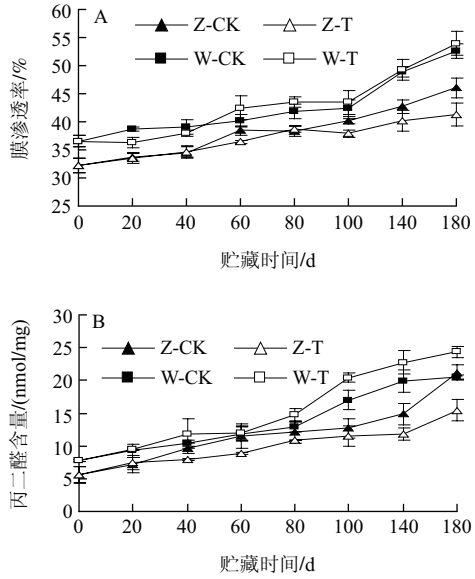


图2 梯度降温对鸭梨采后果肉细胞膜渗透率(A)和丙二醛含量(B)的影响

Fig.2 Effect of gradient cooling on membrane permeability (A) and MDA content (B) of Yali pear flesh after harvest

鸭梨采后果肉细胞膜渗透率变化如图2A所示。早采和晚采鸭梨果肉刚采收时膜渗透率分别为32.2%和36.5%，晚采果果肉膜透性高于早采果。早采梯度降温果与对照果的膜渗透率于贮藏中前期差异不显著，中后期显著低于对照果($P<0.05$)，贮藏末期，早采梯度降温果和早采对照果膜渗透率分别为41.3%和46.1%，说明梯度降温处理有效抑制了早采果果肉贮藏后期膜通透性的增加，较好地保护了细胞膜。从图2还可知，整个贮藏期间，晚采果膜渗透率显著高于早采果($P<0.05$)，说明推迟采收使得果实衰老加剧、果肉膜透性提高，晚采梯度降温果、晚采对照果膜渗透率分别为54.0%、52.5%，但降温方法对晚采果膜透性的影响差异不显著($P>0.05$)。

由图2B可知，晚采鸭梨果肉MDA含量在采收初期较低，约7.76nmol/mg，在贮藏中后期升高较快，梯度降温果中MDA含量升高要快于急降温果，到贮藏末期MDA含量高达24.33nmol/mg，说明梯度降温促进了晚采果膜脂过氧化产物的积累。早采果果肉MDA含量在采收初期约为5.56nmol/mg，贮藏40d后梯度降温果MDA含量升高显著低于对照果($P<0.05$)，到贮藏末期MDA含量只有15.42nmol/mg，说明梯度降温处理有效抑制了早采鸭梨果肉膜脂过氧化及产物的积累。比较各图可见，鸭梨采后果肉膜脂过氧化产物MDA含量与膜渗透率(图2A)及褐变情况(图1)变化趋势相似，在贮藏中缓慢升高，说明了膜脂过氧化与膜的完整性有关，膜的完整性与果肉褐变密切相关。

2.3 梯度降温对鸭梨采后果肉VC和还原性谷胱甘肽(GSH)含量的影响

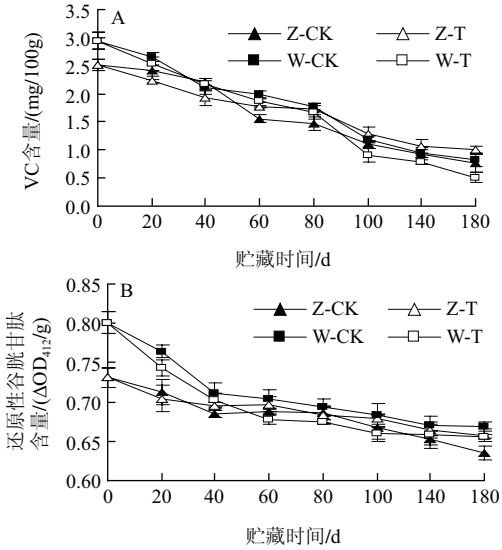


图3 梯度降温对鸭梨采后果肉VC(A)和还原性谷胱甘肽(B)含量的影响

Fig.3 Effect of gradient cooling on vitamin C (A) and GSH (B) contents of Yali pear flesh after harvest

鸭梨采后果肉VC含量如图3A所示，总体呈逐渐下降趋势变化。早采果在降温期间，对照果肉中VC含量高于梯度降温果，降温结束(40d)后总体低于梯度降温果。到贮藏结束，梯度降温和对照果中VC含量为1.00mg/100g和0.77mg/100g。晚采果采收初期果肉VC含量高于早采果，但下降速度要快于早采果，到贮藏末期，梯度降温和对照果果肉中VC含量只有0.51mg/100g和0.82mg/100g。

早采果和晚采果鸭梨刚采收时果肉GSH含量分别为0.73 ΔOD_{412}/g和0.80 ΔOD_{412}/g(图3B)，晚采果高于早采果，贮藏中呈逐渐下降趋势变化。梯度降温早采果果肉中GSH含量在贮藏中后期略高于对照果，说明梯度降温一定程度上抑制了早采果果肉GSH含量的下降；梯度降温晚采果果肉GSH含量在贮藏中后期略低于对照果，说明梯度降温促进了晚采果果肉GSH含量的下降。

2.4 梯度降温对鸭梨采后果肉超氧阴离子自由基(O_2^-·)含量和SOD酶活性的影响

鸭梨采后果肉O_2^-·含量变化规律如图4A所示，贮藏期间果肉O_2^-·含量呈逐渐升高趋势变化。采收初期早采果果肉O_2^-·含量为0.470nmol/mg，贮藏中后期，对照果氧自由基升高较快，梯度降温果O_2^-·含量低于同期对照果($P<0.05$)，说明梯度降温较好适应了低温，抑制了早采果果肉O_2^-·的积累以及膜脂过氧化反应。采收初期晚采果果肉O_2^-·含量为0.551nmol/mg，贮藏中后期，梯度降温果氧自由基升高较快，梯度降温提高了晚采鸭梨贮藏后期果肉中O_2^-·的含量，可能与晚采果成熟度高，衰老进程加速，膜脂过氧化有关。

鸭梨采后果肉SOD活性呈起伏变化，中期略有上升，后期下降(图4B)。梯度降温的早采果果肉SOD活性普遍高于同期对照果，延缓了果肉SOD活性的下降，如贮藏末期处理果与对照果SOD活性分别为91.19U/mg和80.73U/mg。SOD是专一性清除O_2^-·的一种酶，由于梯度降温果肉组织具有较高的SOD活性，所以清除O_2^-·的能力较高，使得早采梯度降温鸭梨果肉积累的氧自由基较少，早采梯度降温果不易褐变。由图还可知，梯度降温降低了贮藏中后期晚采鸭梨果肉中SOD活性($P<0.05$)，使得晚采梯度降温果中O_2^-·积累较多(图4A)，褐变加剧(图1)。另外，晚采果果肉SOD活性明显低于同期早采果肉($P<0.01$)，总体上导致晚采果清除O_2^-·的能力下降，膜脂过氧化加剧，晚采果肉更易于褐变。

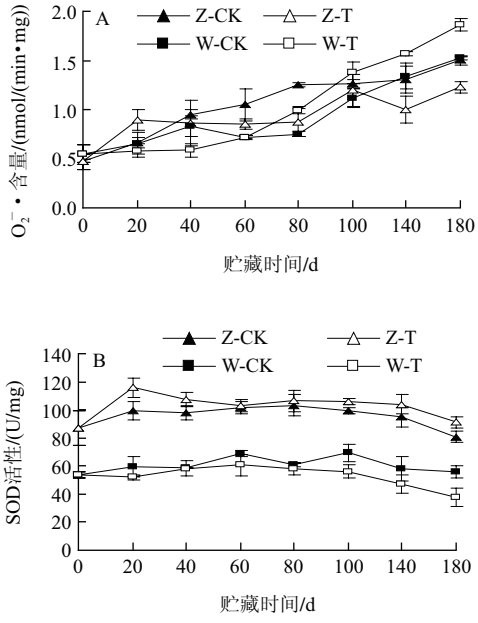


图4 梯度降温对鸭梨采后果肉超氧阴离子自由基含量(A)和超氧化物歧化酶活性(B)的影响

Fig.4 Effect of gradient cooling on O_2^-· content (A) and SOD activity (B) of Yali pear flesh after harvest

2.5 梯度降温对鸭梨采后果肉H_2O_2含量和过氧化氢酶(CAT)活性的影响

鸭梨采后果肉H_2O_2含量与MDA含量变化规律基本相似(图5A)，呈逐渐上升趋势变化。早采果采收初期果肉H_2O_2含量为0.376μmol/mg，梯度降温的早采果在贮藏中后期较同期对照果中H_2O_2含量要低，说明梯度降温处理抑制了H_2O_2的积累和膜脂过氧化。晚采果采收初期果肉H_2O_2含量为0.584μmol/mg，梯度降温处理提高了晚采果贮藏后期鸭梨果肉中H_2O_2的含量，可能是晚采果成熟度高，梯度降温时间较长，促进了晚采果自由基的积累。另外可见，晚采果果肉H_2O_2含量采后要普遍高于同期早采果，说明晚采果更容易积累较多的H_2O_2。

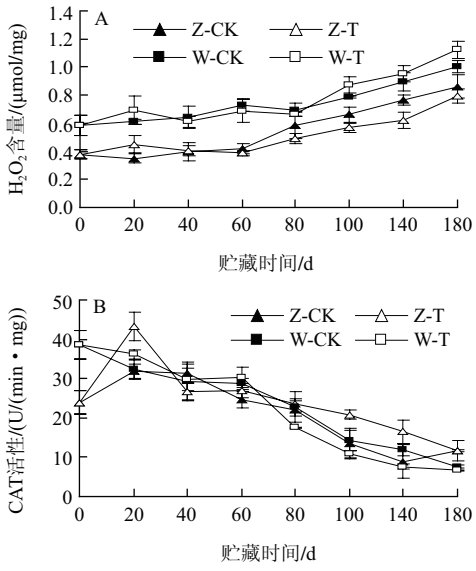


图5 梯度降温对鸭梨采后果肉过氧化氢含量(A)和过氧化氢酶活性(B)的影响

Fig.5 Effect of gradient cooling on H_2O_2 content (A) and CAT activity (B) of Yali pear flesh after harvest

如图5B所示，采后鸭梨果肉的CAT活性总体呈缓慢下降趋势变化，说明随着贮藏时间的延长，果肉组织的自身清除H_2O_2的能力总体下降，这与H_2O_2含量的逐渐升高(图5A)是对应的。CAT活性与H_2O_2含量之间关系密切，相关分析表明二者呈显著的负相关关系，早采对照果、早采梯度降温果、晚采对照果和晚采梯度降温果果肉CAT活性与H_2O_2含量的相关系数r分别为−0.923、−0.676、−0.943、−0.853。贮藏中早采果梯度降温果肉组织的CAT活性要总体上高于对照果($P<0.05$)，说明梯度降温提高了果肉清除H_2O_2的能力，从而减缓了组织褐变。梯度降温降低了晚采果果肉的CAT活性，使得晚采果贮藏中积累了较多的H_2O_2(图5A)，比对照果褐变严重。

2.6 梯度降温对鸭梨采后果肉过氧化物酶(POD)活性的影响

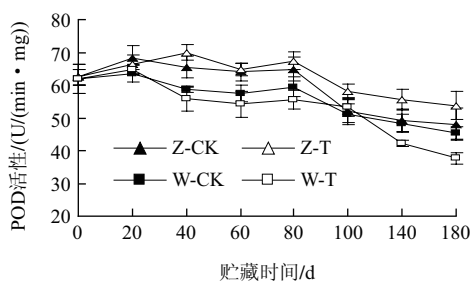


图6 梯度降温对鸭梨采后果肉过氧化物酶活性的影响

Fig.6 Effect of gradient cooling on POD activity of Yali pear flesh after harvest

如图6所示，鸭梨采后果肉POD活性在贮藏初期有一个缓慢升高后呈现缓慢下降趋势变化，与图5A中H_2O_2含量的逐渐升高是对应的，说明随着果肉组织的成熟衰

老，POD酶活性下降，氧化和清除H_2O_2自由基的能力降低。早采梯度降温果果肉POD活性在贮藏中后期高于对照果($P<0.05$)，到贮藏末期活性保持在53.70U/mg，而对照果为48.06U/mg，说明梯度降温减缓了早采果肉POD活力的下降，使H_2O_2在组织中积累少，果肉褐变轻。对于晚采果来说，梯度降温果肉贮藏中后期POD活性要低于对照果，说明梯度降温处理降低了晚采果果肉POD活性，造成晚采梯度降温果H_2O_2的积累，膜脂过氧化加剧，比对照果褐变严重(图1)。

总体来看，POD、CAT和SOD活性较低的果肉组织中，O_2^-·和H_2O_2含量较高，对应的还原性的VC和GSH含量较低(图3)，膜脂过氧化严重，过氧化产物MDA含量和细胞膜渗透性较高(图2)，从而造成了果肉组织褐变指数较高(图1)，说明鸭梨果肉褐变与果肉中自由基含量、还原性物质的含量、活性氧自由基清除酶活性有关。

2.7 鸭梨采后保护酶、自由基、还原性物质、细胞膜渗透率、MDA含量与果肉褐变之间的相关性

表1 保护酶、自由基、还原性物质、细胞膜渗透率、MDA含量与果肉褐变指数之间的相关系数

Table 1 Correlation coefficients between protective enzymes, free radicals, reducing substances, membrane permeability, MDA content and flesh browning index of Yali pears after harvest

处理	MDA	膜渗透率	CAT	POD	SOD	H_2O_2	O_2^-·	VC	GSH
Z-CK	0.880**	0.903**	−0.897**	−0.961**	−0.561	0.958**	0.779*	−0.865**	−0.876**
Z-T	0.873**	0.789*	−0.740*	−0.895**	−0.389	0.966**	0.723*	−0.833**	−0.798**
W-CK	0.986**	0.931**	−0.967**	−0.936**	−0.023	0.940**	0.939**	−0.938**	−0.784*
W-T	0.987**	0.942**	−0.959**	−0.908**	−0.706*	0.949**	0.998**	−0.958**	−0.745*

注：*. 显著，$P<0.05$；**. 极显著，$P<0.01$。

鸭梨采后贮藏中，保护酶活性、自由基含量、还原性物质含量、细胞膜渗透率、MDA含量与果肉褐变之间的相关性如表1所示，从表1可以看到，无论是早采和晚采果，还是对照果与梯度降温果，鸭梨采后果肉褐变指数与膜脂过氧化产物MDA含量、膜渗透率、O_2^-·和H_2O_2含量都呈显著的正相关关系，与VC含量、GSH含量、POD活性、CAT活性都呈显著的负相关关系，一些相关性达到极显著水平。通过对数据进行主成分及相关性分析得知与鸭梨果肉褐变指数相关的主成分有3个，其中第一主成分的方差百分比为64.59%，从主成分的载荷表可看出，VC含量、O_2^-·和H_2O_2含量、MDA含量、CAT活性和膜渗透率与第一主成分的相关系数较高($r>0.900$)，说明鸭梨采后果肉褐变与还原性非酶清除物质VC含量、O_2^-·和H_2O_2含量、膜脂过氧化产物MDA含量、自由基清除酶CAT活性、细胞膜渗透率之间关系非常密切，它们是影响果肉褐变的主要因素。果肉褐变指数与晚采梯度降温果的SOD活性呈显著负相关，而与其他处理果之间相关性不大，可能与SOD在植物体内催化O_2^-·的歧化反应有关。

自由基学说认为，首先SOD通过歧化反应清除O_2^-·生成无毒的O_2和毒性较低的H_2O_2，后者再被CAT、POD 或APX还原为H_2O，从而限制O_2^-·与H_2O_2反应生成毒性更强的·OH[19]。抗坏血酸是O_2^-·和OH·的有效清除剂，而GSH具有抑制自由基生成的作用[20]。在逆境胁迫或衰老过程中，这些物质对维持自由基、活性氧平衡具有重要作用，一旦这些保护酶活性下降，具有还原性的自由基清除物质减少，细胞内的自由基、活性氧、过氧化氢等浓度就会升高，造成膜系统受损[21]，MDA是膜脂过氧化作用的产物，可使生物膜中酶蛋白发生交联、失活，致使膜产生空隙，透性增加，各种功能受损，从而引起褐变的发生。

本研究认为，采后随着贮藏时间的延长，鸭梨果肉O_2^-·、H_2O_2含量呈逐渐上升趋势，较高含量的O_2^-·会刺激产生较高活性的SOD来消除之，SOD作用产生H_2O_2，但如果果肉中O_2^-·产生太多，加上CAT、POD活性较低，H_2O_2含量也积累较多，具有清除作用的还原性VC及GSH含量下降，导致果肉容易发生脂质过氧化反应，产生更多的MDA，最终导致膜破坏，膜内外物质交换增多，导致多酚氧化酶与底物接触果肉发生褐变反应。

3 结 论

鸭梨采后果肉褐变指数与膜脂过氧化产物MDA含量、膜渗透率、O_2^-·和H_2O_2含量呈显著的正相关关系，与VC含量、GSH含量、POD活性、CAT活性呈显著的负相关关系。梯度降温处理提高了早采鸭梨果肉的SOD、POD和CAT等活性氧自由基清除酶的活性，一定程度上延缓了贮藏后期VC和GSH含量的下降，减缓了O_2^-·和H_2O_2的积累，抑制了膜脂氧化产物MDA的积累以及细胞膜渗透率的升高。晚采鸭梨果肉中VC、GSH含量较高，但在贮藏中下降较快，SOD和POD活性明显低于早采果，O_2^-·、H_2O_2等含量积累高于早采果，膜脂过氧化严重，产生了较多的MDA，导致晚采果褐变较快。梯度降温降低了晚采果果肉的抗氧化能力，促进了自由基的积累，导致晚采果膜脂过氧化和褐变严重。因此适时早采结合梯度降温可以有效抑制鸭梨果肉膜脂过氧化和褐变。

参考文献：

[1] 闫师杰, 梁丽雅, 陈计峦, 等. 降温方法对不同采收期鸭梨采后果心褐变和膜脂组分的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 356-362.

[2] 梁丽雅, 闫师杰, 陈计峦, 等. 鸭梨采后果实褐变的主要因素研究[J]. 食品与机械, 2008, 24(3): 48-51.

[3] CRISOSTO C H, GRANER DAVID, CRISOSTO G M. Late harvest and delayed cooling induce internal browning of ‘Ya Li’ and ‘Seuri’ Chinese pear[J]. Hortscience, 1994, 29(6): 667-670.

[4] 关军锋. 采后鸭梨衰老与膜脂过氧化作用[J]. 沈阳农业大学学报, 1994, 25(4): 418-421.

[5] 史振霞, 王晶. 壳聚糖对鸭梨贮藏后期微生物数量和贮藏品质的影响[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(8): 4863-4865.

[6] LI Jiazheng, BI Dapeng. Effects of micro-perforated film packaging on the quality of Yali pear fruit (*Pyrus bretschneideri* cv. Yali) during storage[J]. Journal of Fruit Science, 2010, 27(1): 57-62.

[7] 王志华, 王文辉, 佟伟, 等. 1-MCP结合降温方法对鸭梨采后生理和果心褐变的影响[J]. 果树学报, 2011, 28(3): 513-517.

[8] 张爱琳, 胡小松, 李晓丹, 等. 降温方法对鸭梨采后果肉与果心抗冷性的影响[J]. 食品与机械, 2011, 27(2): 114-118.

[9] 梁丽雅, 胡小松, 何爱红, 等. 降温方法对不同成熟度鸭梨果肉脂氧合酶活性和膜脂脂肪酸的影响[J]. 食品科技, 2012, 37(4): 35-39.

[10] 汤章城. 现代植物生理学实验指南[M]. 北京: 科学出版社, 1999.

[11] 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, 2007.

[12] GURI A. Ozone effect on glutathine and ascorbic acid in beans[J]. Can J Plant Sci, 1983, 63(3): 733-736.

[13] 王爱国, 罗广华. 植物的超氧化物自由基与羟胺反应的定量关系[J]. 植物生理学通讯, 1990(6): 55-57.

[14] PATTERSON B D, MACRAE E A, FERGUSON I B. Estimation of hydrogen peroxide in plant extracts using titanium (Ⅳ)[J]. Annal Biochem, 1984, 139(2): 487-492.

[15] BRADFORD M N. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein using the principle of protein-dye binding[J]. Annal Biochem, 1976, 72: 248-254.

[16] VENISSE J S, GULLNER G, BRISSET M N. Evidence for the involvement of an oxidative stress in the initiation of infection of pear by *Erwinia amylovora*[J]. Plant Physiol, 2001, 125(4): 2164-2172.

[17] BAILLY C, BENAMAR A, CORBINEAU F, et al. Changes in malonaldehyde content and in superoxide dismutase, catalase and glutathione reductase activities in sunflower seeds as related to deterioration during accelerated ageing[J]. Physiologia Plantarum, 1996, 97(1): 104-110.

[18] GIANNOPOLITIS C N, RIES A K. Superoxidase dismutaseI. Occurrence in higher plants[J]. Plant Physiol, 1977, 59(2): 309-314.

[19] 赵丹莹, 申琳, 于萌萌, 等. 采后番茄果实抗氧化酶活与抗冷性的关系[J]. 食品科学, 2009, 30(14): 309-313.

[20] 周春华, 刘红霞, 韦军. 活性氧与果实成熟衰老[J]. 上海交通大学学报: 农业科学版, 2002, 20(1): 77-84.

[21] 寇莉苹, 刘兴华, 赵斌, 等. 热处理对轻度加工葡萄膜脂过氧化作用的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 22(4): 170-173.