# 牡丹花不同发育时期脂质过氧化代谢的相关性研究

史国安1.2,郭香凤2,包满珠1

(1华中农业大学 园艺林学学院 园艺植物生物学教育部重点实验室,湖北 武汉 430070;2河南科技大学 农学院 洛阳市牡丹生物学重点实验室,河南 洛阳 471000)

[摘 要]【目的】研究牡丹开花和衰老期间活性氧含量和清除活性氧酶类活性的变化情况。【方法】测定"洛阳红"和"胡红"2个牡丹品种开花和衰老过程中花瓣膜脂过氧化产物丙二醛(MDA)、超氧自由基( $O_2^-$ )、过氧化氢( $H_2O_2$ )的含量及超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、抗坏血酸过氧化物酶(AsA-POD)、过氧化氢酶(CAT)、多酚氧化酶(PPO)的活性,并采用简单相关分析、逐步回归分析和通径分析等方法研究 MDA 含量与其他指标的关系。【结果】牡丹开花和衰老过程中,花瓣 MDA 增加导致细胞膜透性持续升高,2个牡丹品种花瓣脂质过氧化代谢有一定差异。"洛阳红"花瓣中  $O_2^-$ 、 $H_2O_2$ 含量与 MDA 含量呈极显著的正相关,"胡红"花瓣中  $O_2^-$ 含量与 MDA 呈显著 正相关。 $O_2^-$ 对细胞膜脂过氧化有较大的正向直接效应,而  $H_2O_2$ 、AsA-POD、CAT 和 PPO 在 2 个牡丹品种中的效应 表现不同。【结论】牡丹开花和衰老的过程是膜脂过氧化加剧引起细胞膜损伤的过程, $O_2^-$ 是影响牡丹开花和衰老过 程中花瓣内膜脂过氧化作用的最主要因素。

[关键词] 牡丹花;洛阳红;胡红;开花和衰老;脂质过氧化 [中图分类号] S685.11 [文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2008)08-0183-07

## Correlation analysis of lipid peroxidation metabolism during florescence and flower senescence of peony

SHI Guo-an<sup>1,2</sup>, GUO Xiang-feng<sup>2</sup>, BAO Man-zhu<sup>1</sup>

(1 College of Horticultural and Foretry Science, Key Laboratory of Horticultural Plant Biology, Ministry of Education, Huazhong Agricultural University, Wuhan, Hubei 430070, China; 2 College of Agriculture, He'nan University of Science and Technology, Luoyang Key Laboratory of Peony Biology, Luoyang, He'nan 471000, China)

**Abstract:** [Objective] The paper studied the changes of active oxygen species(AOS) and related enzymes activities in petal during different stages of two peony tree cultivars. [Method] The  $O_2^-$  production rate,  $H_2O_2$  content, superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD), ascorbate peroxidase(AsA-POD), catalase(CAT) and polyphenol oxidase(PPO) and MDA content of petal of two tree peony cultivars 'Luoyanghong' and 'Huhong' during florescence and flower senescence were detected by the methods of conuentional biochemistry. The relationships among MDA content and others index were analyzed by the simple correlation coefficient, stepwise regression and the path-coefficient. [Result] The results showed that a rapid accmulation of MDA content induced continue to increase petal cell membrance permeability during florescence and flower senescence, there were some differences of lipid peroxidation metabolisam in 'Luoyanghong' and 'Huhong'. Significantly positive correlation existed between  $O_2^-$  production and  $H_2O_2$  and MDA

<sup>\* [</sup>收稿日期] 2007-09-05

<sup>[</sup>基金项目] 国家自然科学基金项目(30740013);河南省自然科学基金项目(0611030600);河南省重大科技攻关项目(991050048, 0524030004)

<sup>[</sup>作者简介] 史国安(1963-),男,河南伊川人,教授,博士,主要从事植物采后生理生化与分子生物学研究。 E-mail:gashi1963@163.com

content in 'Luoyanghong', so did between  $O_2^-$  production and MDA content in 'Huhong'. Also,  $O_2^-$  production had positivl amost direct effect on MDA content, but other main factors as  $H_2O_2$ , AsA-POD, CAT and PPO had different effect on two peony trees. [Conclusion] The active oxygen turned into imbalance resulting in lipid peroxidation during florescence and flower senescence of two peony trees. It implied that  $O_2^$ production was the key factor affecting the membrane lipid peroxidation metabolism in two peony trees during florescence and flower senescence.

Key words: Paeonia suffruticosa; Luoyanghong; Huhong; florescence and flower senescence; lipid peroxidation

植物花的开放和衰老是一个十分复杂的生理生 化过程。自由基学说认为,植物衰老过程是活性氧 大量积累与代谢失调的过程[1]。超氧阴离子自由基  $(O_2^-)$ 是重要的活性氧,在有氧条件下, $O_2^-$  被认为 是导致细胞损伤和细胞膜结构破坏的关键因子[2]。 在植物细胞内, O2 获得一个电子就可成为 O2, 在  $H^+$ 存在下可转变为  $H_2O_2$ ,也可歧化产生  $H_2O_2$ 。 植物具有将体内产生的过氧化物尽快转化为无毒和 低毒物质的重要生理作用机制。超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)和 抗坏血酸过氧化物酶(AsA-POD)是植物细胞中清 除活性氧的主要酶类, SOD 专一催化  $O_2^-$  转变成  $H_2O_2 \cap O_2$ ,保护细胞不受  $O_2^-$  的伤害,维护细胞膜 的结构和功能; CAT、AsA-POD 和 POD 可将 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>转变成H<sub>2</sub>O,起到解毒作用。在正常情况下, SOD、CAT、AsA-POD 和 POD 4 种酶协同作用,使 机体内的活性氧处于较低水平[3]。牡丹花是原产于 我国的名贵花卉,花大色艳,具有重要的经济和观赏 价值,但存在花朵寿命较短的问题[4]。有研究表明, 牡丹[4]、百合[5]和叶子花[6]开花与衰老过程是脂质 过氧化代谢失调的过程。为了延长牡丹切花的瓶插 寿命,本试验研究了不同发育等级牡丹花开放和衰 老期间活性氧与清除活性氧酶类的变化情况,并用 定量分析方法评价了膜脂过氧化代谢的主从关系, 现将结果报道如下。

1 材料与方法

## 1.1 材料

1.1.1 牡 丹 牡丹(Paeonia suffruticosa)品种 "洛阳红"和"胡红",采于洛阳土桥花木有限公司苗 圃。

1.1.2 试 剂 甲硫氨酸(Met)、核黄素(VB<sub>2</sub>)、氮 蓝四唑(NBT)、乙二胺四乙酸钠(EDTA-Na)、四氯 化钛、过氧化氢、愈创木酚、盐酸羟胺、丙酮、硫酸、盐 酸、硫代巴比妥酸等,均为国产分析纯试剂。

## 1.2 牡丹花瓣样品的制备

牡丹开花与衰老过程中,花朵发育时期可划分 为露色期(Ⅰ)、绽口期(Ⅱ)、初开期(Ⅲ)、半开期 (Ⅳ)、盛开期(Ⅴ)和开始衰败期(Ⅵ)<sup>[7]</sup>。从同一花 圃地5年株龄牡丹植株上采切不同发育时期的花枝 各30枝,保湿运回实验室,插在盛有自来水的桶中 恢复1h,在保留花枝长度15 cm(带2片复叶)条件 下,分别测定花枝重和花朵直径,然后立即剥去花萼 和最外一层花瓣,取内层花瓣称重后,经液氮速冻贮 存于-80℃超低温冰箱中,用于各项生理指标的测 定。

#### 1.3 测定指标及方法

取1g待测牡丹花瓣,加0.08g聚乙烯吡咯啉 酮(PVP)和8mLPBS(pH7.8),冰浴中研磨成匀 浆。取牡丹花瓣匀浆,于4℃下12000r/min离心 15min,取上清液作为粗酶液,置于4℃冰箱备用。

丙二醛(MDA)含量、SOD、POD、AsA-POD及 CAT活性按赵世杰等<sup>[8]</sup>的方法测定;O<sub>2</sub><sup>-</sup>产生速率 用羟胺氧化法测定<sup>[9]</sup>;H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>含量按史国安等<sup>[10]</sup>的 方法测定;PPO活性用邻苯二酚氧化法测定<sup>[11]</sup>;细 胞膜相对透性用电导法测定<sup>[8]</sup>。所有试验重复 3 次,结果取平均值。

## 1.4 定量分析

参照莫惠栋<sup>[12]</sup>的方法,用 DPS3.0 软件进行数 据处理。用简单相关分析反映 O<sub>2</sub><sup>-</sup>、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>、SOD、 POD、AsA-POD、CAT、PPO(自变量)与 MDA 含量 (因变量)间的关系。采用逐步回归方法,淘汰不显 著自变量,筛选出影响 MDA 含量的显著因子。用 通径分析方法评价显著因子对 MDA 含量的直接效 应与间接效应。

2 结果与分析

# 2.1 牡丹花开放和衰老期间 MDA 含量与细胞膜 透性的变化

丙二醛(MDA)含量是反映细胞膜膜脂过氧化

程度的重要指标<sup>[3]</sup>。由图 1 可以看出,牡丹花瓣中 MDA 含量从露色期(Ⅰ)到初开期(Ⅲ)增加相对平 稳,初开期(Ⅲ)后快速升高,至盛开期(Ⅴ)"洛阳红" 和"胡红"花瓣中 MDA 含量分别比露色期升高 160.3%和 340.5%,开始衰败期 MDA 含量仍然维 持在较高水平。膜脂过氧化产物 MDA 的积累,直 接对细胞造成毒害,引起细胞膜的不可逆损伤,使得 牡丹花初开期(Ⅲ)后细胞膜相对透性迅速升高,"胡 红"品种发生氧化损伤的时期早于"洛阳红"。说明, 牡丹开花与衰老的过程是细胞膜脂过氧化加剧的过 程。



图 1 牡丹花开放和衰老期间花瓣中 MDA 含量与细胞膜透性的变化

Fig. 1 Changes of MDA content and membrance permeability in petal during developmental Period of peonies

#### 2.2 不同发育时期牡丹花活性氧代谢的变化

要的活性氧。本试验2个牡丹花品种不同发育时期 脂质过氧化代谢情况见表1和表2。

牡丹开花和衰老过程中, $O_2^-$ 和  $H_2O_2$  是 2 种重

表 1 "洛阳红"花不同发育时期脂质过氧化代谢的变化

Table 1 Changes of lipid peroxidation metabilism in petal during developmental period of 'Luoyanghong'

发育时期 Flower stage	$O_2^-$ 产生速率/ ( $\mu$ mol·g <sup>-1</sup> · min <sup>-1</sup> ) $O_2^-$ production	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 含量/ (mmol・g <sup>-1</sup> ) H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> content	SOD 活性/ (U・g <sup>-1</sup> ・ min <sup>-1</sup> ) SOD activity	POD 活性/ (U・g <sup>-1</sup> ・ min <sup>-1</sup> ) POD activity	AsA- POD 活性/ (U・g <sup>-1</sup> ・min <sup>-1</sup> ) AsA- POD- activity	CAT 活性/ )(U・g <sup>-1</sup> ・ min <sup>-1</sup> ) CAT activity	PPO 活性/ (U・g <sup>-1</sup> ・ min <sup>-1</sup> ) PPO activity	MDA 含量/ (µmol・g <sup>-1</sup> ) MDA content
Ι	0.18	0.76	13.67	12.93	31.20	21.30	34.24	41.79
П	0.24	0.98	18.50	14.17	33.13	22.50	46.25	53.18
Ш	0.23	1.44	13.85	14.00	27.81	35.00	34.61	54.46
IV	0.29	1.40	15.93	14.97	28.97	32.99	39.83	75.82
V	0.52	1.94	30.15	59.38	52.69	27.69	75.38	108.77
VI	0.43	1.74	53.89	137.03	23.60	24.39	338.86	88.24

表 2 "胡红"花不同发育时期脂质过氧化代谢的变化

Table 2 Changes of lipid peroxidation metabilism in petal during developmental period of 'Huhong'

发育时期 Flower stage	O <sub>2</sub> <sup>-</sup> 产生速率/ (µmol・g <sup>-1</sup> ・ min <sup>-1</sup> ) O <sub>2</sub> <sup>-</sup> production	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 含量/ (mmol・g <sup>-1</sup> ) H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> content	SOD 活性/ (U・g <sup>-1</sup> ・ min <sup>-1</sup> ) SOD activity	POD 活性/ (U・g <sup>-1</sup> ・ min <sup>-1</sup> ) POD activity	AsA- POD 活性/ (U・g <sup>-1</sup> ・ min <sup>-1</sup> ) AsA- POD activity	CAT 活性/ (U・g <sup>-1</sup> ・ min <sup>-1</sup> ) CAT activity	PPO 活性/ (U・g <sup>-1</sup> ・ min <sup>-1</sup> ) PPO activity	MDA 含量/ (µmol・g <sup>-1</sup> ) MDA content
Ι	0.05	0.62	11.69	15.23	21.35	12.31	22.69	4.35
П	0.08	1.55	14.00	17.04	22.26	12.17	23.21	8.17
III	0.12	1.70	20.70	33.93	20.92	17.50	37.66	11.85
$\mathbf{I} \mathbf{V}$	0.11	1.12	13.39	15.98	22.45	6.09	23.21	17.84
V	0.12	1.00	14.46	9.85	21.15	9.23	25.77	19.16
VI	0.14	1.17	9.23	8.62	19.23	18.46	19.23	16.70

由表 1 和表 2 可以看出,"洛阳红"花发育到达 Ⅲ期后,O<sup>-</sup><sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 开始迅速积累,于 V 期达到最 大值;"胡红"花发育到达 Ⅱ 期后,O<sup>-</sup><sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 开始 迅速积累,至 Ⅵ 期 O<sup>-</sup><sub>2</sub> 一直维持高水平,H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量 有所下降。SOD、POD、AsA-POD 和 CAT 活性受 底物诱导<sup>[13]</sup>。"洛阳红"SOD 和 POD 活性在开放和 衰老的前期变化平稳,后期持续升高;AsA-POD 活 性在 V 期出现峰值;CAT 活性在 Ⅲ 期出现峰值。 "胡红"SOD 和 POD 活性在 Ⅲ 期达到峰值后开始下 降;AsA-POD 活性变化相对平稳;CAT 活性在 Ⅲ 期 出现峰值后开始下降,至IV期降到最低,之后又迅速 升高。综合分析上述指标的变化情况可知,牡丹花 发育和衰老过程中,活性氧的产生与清除失衡,失衡 时间"洛阳红"大致出现在IV期,"胡红"大致出现在 III期之后。由表 1 和表 2 还可以看出,"洛阳红" PPO 活性在 V 期迅速升高,而"胡红"PPO 活性在 III 期出现峰值后开始下降。PPO 是细胞内氧化酚类 物质成为醌的关键酶,其活性受膜完整性和底物供 应的影响,在细胞膜发生损伤,PPO 活性升高,反过 来又加速膜的破坏。SOD、POD、AsA-POD、CAT 和 PPO 活性变化的差异,反映出"洛阳红"与"胡红" 在开花和衰老过程中,活性氧代谢的差异。

2.3 牡丹花不同发育时期脂质过氧化代谢的数学 分析

2.3.1 简单相关分析 MDA 含量的变化受植物 体内多种生理因素的影响,植物体内抗氧化保护酶

系统中的 SOD、POD、AsA-POD 和 CAT 通过改变 活性氧产生与清除之间的平衡来调控 MDA 含量。 研究表明,SOD 是防御自由基危害的第一道防线, 可以将过量的超氧自由基歧化,形成毒性较弱的过 氧化氢(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)和分子氧;而 POD、AsA-POD 和 CAT则可以清除过量的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>,减轻过量自由基积 累对植物的伤害[13]。因此,在牡丹开花和衰老过程 中, $O_2^-$ , $H_2O_2$ ,SOD,POD,AsA-POD,CAT 和 PPO 任何一种因素的改变,都将对牡丹花瓣中的 MDA 含量以及膜结构产生影响。为了明确上述因素对 MDA 含量影响的程度,本研究对其之间的关系进 行了简单相关分析。由表 3 和表 4 可知,"洛阳红" O<sub>2</sub><sup>-</sup>、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量分别与 MDA 含量极显著和显著正 相关,"胡红"O<sub>2</sub> 与 MDA 含量显著正相关。表明, 活性氧 $(O_2^-, H_2O_2)$ 与 MDA 含量关系密切。同时, 7个因素之间又存在相互影响的内在联系。

#### 表 3 "洛阳红"开花和衰老期间部分生理指标与 MDA 含量的简单相关系数

Table 3 Simple correlation coefficient of some physiogical indexs and MDA content in petal

during developmental period of "Luc	vel	elopment	al period	l of	'Lu	oyanghong	,
-------------------------------------	-----	----------	-----------	------	-----	-----------	---

指标 Index	$O_2^-$	$H_2O_2$	SOD	POD	AsA-POD	CAT	PPO	MDA
$O_2^-$	1.000 0							
$H_2O_2$	0.900 1*	1.000 0						
SOD	0.730 3	0.629 8	1.000 0					
POD	0.715 6	0.637 5	0.994 4**	1.000 0				
AsA-POD	0.553 5	0.365 2	-0.0704	-0.097 0	1.000 0			
CAT	0.031 9	0.428 6	-0.2711	-0.235 0	-0.0612	1.000 0		
PPO	0.533 5	0.481 7	0.963 1*	0.968 5**	-0.3312	-0.2639	1.000 0	
MDA	0.978 3**	0.919 2*	0.643 6	0.630 1	0.540 7	0.176 0	0.449 4	1.000 0

注:\*.表示差异显著;\*\*.表示差异极显著。下表同。

Note: \* means significant at the 0.05level, \* \* means significant at the 0.01 level. The following tables are the same.

#### 表 4 "胡红"开花和衰老期间部分生理指标与 MDA 含量的简单相关系数

Table 4 Simple correlation coefficient of some physiogical indexs and MDA content in

```
petal during developmental period of 'Huhong'
```

指标 Index	$O_2^-$	$\mathrm{H}_2\mathrm{O}_2$	SOD	POD	AsA-POD	CAT	PPO	MDA
$O_2^-$	1.000 0							
$H_2O_2$	0.411 6	1.000 0						
SOD	0.101 5	0.642 0	1.000 0					
POD	-0.0389	0.638 1	0.889 1*	1.000 0				
AsA-POD	-0.541 7	0.050 9	0.289 2	0.203 5	1.000 0			
CAT	0.287 4	0.378 5	0.087 8	0.302 7	-0.7815	1.000 0		
PPO	0.189 8	0.549 8	0.949 6**	0.892 1*	0.253 3	0.039 4	1.000 0	
MDA	0.855 6*	0.088 9	-0.0484	-0.314 5	-0.224 1	-0.225 9	0.068 2	1.000 0

2.3.2 逐步回归分析 为了从复杂的7个因素中 筛选出对 MDA 含量影响显著的因子,本研究对试 验数据进行了逐步回归分析。在95%的显著水平 下,逐个淘汰不显著的自变量,选出偏回归系数达到 显著或极显著水平的因子,进入 MDA 含量的回归 方程(表 5)。由表 5 可知,"洛阳红"MDA 含量的逐 步回归方程中,保留了  $O_2^-$ 、 $H_2O_2$ 、CAT 和 PPO 4 个因子,其他 3 个不显著因子被剔除,表明在"洛阳 红"开花和衰老过程中, $O_2^-$ 、 $H_2O_2$ 、CAT 和 PPO 对 细胞膜脂质过氧化起着主要作用。在"胡红"MDA 含量的逐步回归方程中,保留了  $O_2^-$ 、AsA-POD 和 CAT 3个因子,其他 4个不显著因子被剔除,表明 在"胡红"开花和衰老过程中, $O_2^-$ 、AsA-POD 和 CAT 对细胞膜脂质过氧化起着主要作用。表 5 中 各方程的 F 值及复相关系数均达到极显著水平,表 明所拟合的各方程与相应数据的变化规律相符。由 此可知,不同牡丹品种在开花和衰老过程中,脂质过 氧化代谢有明显差异,O<sup>2</sup> 对细胞膜脂质过氧化的 影响有共同之处。

#### 表 5 牡丹开花和衰老期间部分生理指标与 MDA 含量的逐步回归

Table 5 Stepwise regression equation of MDA content with some physiogical

indexs in petal during developmental period of peonies

品种 Cultivar	逐步回归方程 Stepwise regression equation of MDA content	F值 Fvalue	复相关系数 Correlation coefficient
洛阳红 Luoyanghong	$MDA = -46.771 + 415.631[O_2^-] - 83.921[H_2O_2] + 3.569[CAT] + 0.045[PPO]$	24 999.81**	1.000 0**
胡红 Huhong	MDA=39.496+163.053[O <sub>2</sub> <sup>-</sup> ]-1.511[AsA-POD]- 0.892[CAT]	693.49*	0.999 5**

2.3.3 通径分析 上述分析结果已经证实,牡丹开 花和衰老过程中,"洛阳红"的  $O_2^-$ 、 $H_2O_2$ 、CAT 和 PPO 及"胡红"的  $O_2^-$ 、AsA-POD 和 CAT 是 MDA 含量的主要贡献者,并且各因子之间可能存在相互 依存、相互制约的内在联系。因此,本研究采用通径 分析探讨了各主要因子的贡献及互作关系。由表 6 可知,在"洛阳红"开花和衰老过程中, $O_2^-$ 、 $H_2O_2$ 、 CAT 和 PPO 4 个因子对 MDA 含量的直接影响力 大小顺序依次为  $O_2^-$  > CAT > PPO >  $H_2O_2$ ,其中  $H_2O_2$ 的通径系数最小为 - 1.480,而相关系数为 0.919 18,显然  $H_2O_2$  的作用被其他因子的间接影 响力显著扩大了,而  $O_2^-$ 和 CAT 的作用被其他因子 的间接影响力所削弱。表 7表明,"胡红"开花和衰 老过程中, $O_2^-$ 、AsA-POD 和 CAT 对 MDA 含量的 直接影响力大小顺序依次为  $O_2^- >$  AsA-POD> CAT,其中 CAT 的作用被其他因子的间接影响力 显著扩大了。本研究结果表明,2个牡丹品种开花 和衰老过程中, $O_2^-$ 是细胞膜脂质过氧化作用中最 主要的影响因子,产生了较大的直接影响,并且可以 通过其他因子对细胞膜脂质过氧化作用产生间接影 响。

#### 表 6 "洛阳红"开花和衰老期间部分生理指标与 MDA 含量的通径分析

Table 6 Path-coefficient of among some physiogical indexs and MDA content in petal

项目		通径系数 Pat	偏相关系数	相关系数		
Item	$\rightarrow O_2^-$	$\rightarrow$ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	→CAT	→PPO	Partial correlation coefficient	coefficient
$O_2^- \rightarrow$	$2.170^{ riangle}$	-1.332	0.025	0.115	0.999 99**	0.978 31**
$H_2O_2 \rightarrow$	1.954	$-1.480^{ riangle}$	0.342	0.103	-0.999 97**	0.919 18*
CAT→	0.069	-0.634	0.798 $ riangle$	-0.057	0.999 98**	0.176 02
PPO→	1.158	-0.713	-0.211	-0.215	0.999 93**	0.449 43

during developmental period of 'Luoyanghong'

注:△为直接通径系数,其余的为间接通径系数。表7同。

Note: A are the direct path-coefficient, others are the indirect path-coefficient. Table 7 is the same.

#### 表 7 "胡红"开花和衰老期间部分生理指标与 MDA 含量的通径分析

Table 7 Path-coefficient of among some physiogical indexs and MDA content in

petal during developmental period of 'Huhong'

项目	 J	自径系数 Path-coefficie	nt	偏相关系数	相关系数	
Item	$\rightarrow O_2^-$	→AsA-POD	→CAT	Partialcorrelation coefficient	Correlation coefficient	
$O_2^- \rightarrow$	0.901 $^{ riangle}$	0.160	-0.205	0.999 10**	0.855 58*	
$AsA-POD \rightarrow$	-0.488	-0.295 $ riangle$	0.559	-0.980 86**	-0.224 11	
CAT→	0.259	0.231	$-0.716^{ riangle}$	-0.997 43**	-0.225 93	

## 3 讨 论

植物体内活性氧的产生与清除是一个十分复杂 的过程。研究人员试图通过研究植物在各种逆境下 活性氧的产生与清除的变化规律,探讨植物衰老、适 应不良环境的生理机制。但由于试验材料不同,组 织、器官和叶龄不同,胁迫程度及试验条件的差异, 许多研究并没有取得一致的试验结果。李柏林

等[14]的研究结果表明,燕麦连体与离体叶片衰老 时,CAT和 SOD 活性下降,MDA 含量迅速升高,认 为叶片衰老过程中活性氧起重要作用。李伶俐 等[15]发现,棉花幼铃脱落过程中,脱落前 MDA 含 量达到最大值,SOD活性在开花后2d显著提高,而 后下降,由此认为超氧自由基的积累及其引起的膜 脂过氧化伤害,可能是影响棉花幼铃脱落的重要因 素之一。在牡丹[4]、桂花[16-17]开花与衰老过程中,超 氧自由基含量和 SOD 活性持续升高,表明活性氧代 谢紊乱是衰老的主要原因。张木清等[18]研究表明, 干旱协迫加速了甘蔗叶活性氧的产生,并削弱了其 清除活性氧的能力,SOD 活性表现出先升高后降低 的变化趋势,SOD和CAT在清除活性氧、防止膜脂 过氧化和质膜破坏中具有协同作用。Gueta-Dahan 等[19]指出,以目前所得的数据还难以得出关于抗氧 化代谢与植物抗性之间完全一致的结论,这充分说 明了植物活性氧代谢各因素间相互作用的复杂性和 多样性。因此,在测定植物各种抗氧化代谢指标的 基础上,用数学分析的方法探讨不同条件下各个指 标之间的相互关系及其在膜脂过氧化过程中的主从 地位,对指导理论和实践研究有重要意义[18]。

本研究结果表明,对"洛阳红"而言, $O_2^-$ 、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>、 CAT和PPO4个因子对MDA含量的直接作用达 到显著水平,而SOD、POD和AsA-POD3个因子没 有达到显著水平,被剔除;对"胡红"而言, $O_2^-$ 、AsA-POD和CAT对MDA含量的直接作用达到显著水 平,而H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>、SOD、POD和PPO4个因子没有达到 显著水平,被剔除。 $O_2^-$ 和CAT是2个牡丹品种共 同因子,其中 $O_2^-$ 对MDA含量的直接作用最大,且 为正效应,而CAT的作用则相反。表明, $O_2^-$ 是牡 丹开花和衰老过程中影响膜脂过氧化的首要因子, 这一结论与作者以前的研究结果<sup>[4]</sup>相一致,提示采 用抑制超氧自由基形成的措施可能是延缓牡丹切花 衰老的重要途径。

对植物切花生理代谢进行深入研究,并开发出 高效的保鲜剂,是改善切花品质、延长切花寿命的基 础<sup>[20]</sup>。吴岚芳等<sup>[21]</sup>研究了外源乙烯、外源活性氧对 非洲菊切花衰老的影响,指出采用以抑制活性氧为 主要成分的瓶插液能有效缓解切花衰老。另有研究 表明,使用抗氧化剂可以改善切花品质,如李永红 等<sup>[22]</sup>研究发现,用抗坏血酸和β-胡萝卜素可延缓月 季切花'Lambda'和'Blue Card'的衰老进程,延长 切花瓶插寿命。目前,含抗氧化剂、自由基清除剂的 各种综合保鲜剂的研究与应用,对延长切花寿命已 取得显著成效<sup>[23-25]</sup>,这为维持切花活性氧代谢平衡、 延长切花寿命的思路提供了实验佐证。

#### [参考文献]

- [1] 关军锋,束怀瑞.苹果果实衰老与活性氧代谢的关系 [J]. 园艺 学报,1996,23(4):326-328.
  Guan J F, Shu H R. Relationship between senescence and active oxygen metabolism in apple fruits [J]. Acta Horticulturae Sinica, 1996,23(4):326-328. (in Chinese)
- [2] Halliwell B, Gutteridge J M C. Lipid peroxidation: a redical chain reaction. In free radical in biology and medicine [M]. Oxford:Charendon Press, 1989, 188-276.
- 【3】 杜秀敏,殷文璇,赵彦修,等. 植物中活性氧的产生及清除机制
   [J]. 生物工程学报,2001,17(2):121-125.
   Du X M, Yin W X, Zhao Y X, et al. The production and scavenging of reactive oxygen species in plants [J]. Chinese Journal of Biotechnology,2001,17(2):121-125. (in Chinese)
- [4] 史国安,郭香凤,韩建国,等. 牡丹开花和衰老过程中乙烯产生 与膜脂过氧化的研究 [J]. 西北农业大学学报,1999,27(5):50-53.

Shi G A, Guo X F, Han J G, et al. A study on ethylene production and lipid peroxidization in florescence and flower senscence of *Paeonia suf fruticosa* [J]. Acta Univ Agric Boreali-occidentalis,1999,27 (5):50-53. (in Chinese)

[5] 刘雅丽,王 飞,黄 森.百合花朵不同发育期乙烯释放量与膜 脂过氧化作用的研究 [J].西北植物学报,1999,19(6):143-147.

Liu Y L, Wang F, Huang S. Study on ethylene release and the membrane lipid peroxidation in the different development stage of lilium flower [J]. Acta Bot Boreal-Occident Sin, 1999, 19 (6):143-147. (in Chinese)

- [6] 刘建新,赵国林. 叶子花衰老过程中抗氧化酶、乙烯生成速率和 多胺含量的变化 [J]. 园艺学报,2005,32(4):722-724.
   Liu J X, Zhao G L. Changes of antioxidant enzymes, ethylene production and polyamines in Bougainvillea glabra [J]. Acta Horticulturae Sinica,2005,32(4):722-724. (in Chinese)
- [7] 王荣花,刘雅莉,李嘉瑞.不同发育阶段牡丹和芍药切花开花生 理特性的研究[J].园艺学报,2005,32(5):861-865.
  Wang R H,Liu Y L, Li J R. Studies on the blossom physiology in the different development stage of peony and Chinese peony flower [J]. Acta Horticulturae Sinica,2005,32 (5):861-865. (in Chinese)
- [8] 赵世杰,史国安,董新纯. 植物生理学实验指导[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2002.
   Zhao S J,Shi G A,Dong X C. Techniques of plant physiological experiment [M]. Beijing: Chinese Agricultural Scientific Technical Press,2002,84-131. (in Chinese)
- [9] 王爱国,罗广华. 植物的超氧物自由基与羟胺反应的定量关系
  [J]. 植物生理学通讯,1990,26(6):55-57.
  Wang A G, Luo G H. Quantitative relation between the reaction of hydroylamine and superoxide anion radicals in plants
  [J]. Plant Physiology Communications, 1990,26(6):55-57. (in

Chinese)

- [10] 史国安,郭香凤,张益民,等. GA3 和乙烯利对杏果实采后活 性氧代谢的影响 [J]. 园艺学报,1997,24(1):87-88.
  Shi G A,Guo X F,Zang Y M, et al. Effect of GA3 and ethephon on active oxygen metabolism in postharvest apricot fruit
  [J]. Acta Horticulturae Sinica, 1997, 24(1):87-88. (in Chinese)
- [11] 郭香凤,史国安,张继澍. 杏果实采后色泽的转变及 GA3 的延缓作用 [J]. 西北植物学报,1999,19(1):162-165.
  Guo X F,Shi G A,Zhang J S. Effect of GA3 on color change of apricot fruit after harvest [J]. Acta Bot Boreal-Occident Sin,1999,19(1):162-165. (in Chinese)
- [12] 莫惠栋.农业试验统计 [M].上海:上海科学技术出版社, 1992:510-579.

Mo H D. Statistics for agricultural experiments[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Press, 1992; 510-579. ( in Chinese)

- [13] Smirnoff N. The role of active oxygen in response of plants to water deficit and desiccation [J]. New Phytologist, 1993, 125: 27-58.
- [14] 李柏林,梅慧生. 燕麦叶片衰老与活性氧代谢的关系 [J]. 植物生理学报,1989,15(1):6-12.
  Li B L, Mei H S. Relationship between oat leaf senescence and activated oxygen metabolism [J]. Acta Photophysiologica Sinica,1989,15(1):6-12. (in Chinese)
- [15] 李伶俐,杨青华,李 文.棉花幼铃脱落过程中 IAA、ABA、 MDA 含量及 SOD、POD 活性的变化 [J].植物生理学报, 2001,27(3):215-220.

Li L L, Yang Q H, Li W. Changes of IAA, ABA and MDA contents and activities of SOD and POD in the course of abscission of young cotton bolls [J]. Acta Photophysiologica Sinica, 2001,27(3):215-220. (in Chinese)

- [16] 朱 诚,刘非燕,郭达初,等. 桂花开花和衰老过程中乙烯及脂质过氧化水平初探[J]. 园艺学报,1998,25(3):68-72.
   Zhu C, Liu F Y, Guo D K, et al. A preliminary study on ethylene production and lipid peroxidation in florescence and flower senescence of Osmanthus fragrans Lour [J]. Acta Horticulturae Sinica,1998,25(3):68-72. (in Chinese)
- [17] 朱 诚,曾广文. 桂花花衰老过程中的某些生理生化变化
   [J]. 园艺学报,2000,27(5):356-360.
   Zhu C, Zeng G W. Physiological and biochemical changesin

Flower senescence of Osmanthus fragrans Lour [J]. Acta

Horticulturae Sinica,2000,27(5):356-360. (in Chinese)

- [18] 张木清,陈如凯,佘松烈.水分胁迫下蔗叶活性氧代谢的数学 分析 [J].作物学报,1996,22(6):729-735.
  Zhang M Q,Chen R K,Yu S L. Mathematical analysis for the active oxygen metabolism in the drought-stressed leaves of sugarcane [J]. Acta Agronomica Sinica, 1996, 22(6):729-
- [19] Gueter-Dahan Y, Yaniv Z, Zilinskas. Salt and oxidative stress: similar and specific responses and their relation to salt tolerance in citrus [J]. Planta, 1997, 203, 460-469.

735. (in Chinese)

- [20] 史国安,包满珠.植物切花乙烯致衰的机理及其化学调节
  [J].河南科技大学学报,2003,23(2):1-4.
  Shi G A,Bao M Z. Senescence mechanism of ethylene on cut flowers and its chemical regulation [J]. Journal of Henan University of Science and Technology,2003,23(2):1-4. (in Chinese)
- [21] 吴岚芳,黄绵佳,蔡世英.非洲菊切花活性氧代谢的研究 [J]. 园艺学报,2002,30(1):69-73.

Wu L F, Huang J J, Cai S Y. Studies on metabolism of active oxygen during senescence of cut Gerbera [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2002, 30(1):69-73. (in Chinese)

[22] 李永红,张常青,谭 辉,等.抗氧化剂对月季切花失水胁迫耐 性和 SOD、POD 活性的影响 [J]. 中国农业大学学报,2003,8 (5):14-17.

Li Y H,Zhang C Q,Tan H, et al. Effect s of anti-oxidants on tolerance to water deficit stress and activities of SOD and POD in cut rose [J]. Journal of China Agricultural University, 2003,8(5):14-17. (in Chinese)

 [23] 高 勇,吴绍锦. 切花保鲜剂研究综述 [J]. 园艺学报,1989, 16(2):139-145.
 Gao Y,WuSJ. A review of cut flower preservatives [J]. Acta

Horticulturae Sinica, 1989, 16(2): 139-145. ( in Chinese)

- [24] 郭秀璞,史国安,李雪英.保鲜剂对牡丹切花水分状况及衰老的影响[J].经济林研究,2005,23(2):27-29.
  Guo X P,Shi G A,Li X Y. Effect of freshness-retention agent on water metabolism in peony cut flowers [J]. Economic Forest Researches,2005,23(2):27-29. (in Chinese)
- [25] 陈健辉,陈润坚,谢 鸿. 含苯甲酸钠保鲜剂对切花的保鲜效 果研究 [J].广西科学,2006,13(1):65-70.
  Chen J H, Chen R J, Xie H. Study the preservative effect of sodium benzoate on the cut flowers [J]. Guangxi Sciences, 2006,13(1): 65-70. (in Chinese)