

1-甲基环丙烯在果实贮藏保鲜上的应用研究现状与展望

朱向秋, 王学军*, 魏建梅, 刘长江, 袁军伟 (河北省农林科学院昌黎果树研究所, 河北 昌黎 066600)

摘要: 1-甲基环丙烯 (1-MCP) 是一种新型的乙烯抑制剂, 能有效抑制内源和外源乙烯对植物的作用, 抑制乙烯释放量和呼吸强度, 调节果实成熟与衰老相关基因的表达, 延缓果实衰老, 延长货架寿命, 对果实的营养成分和风味物质也产生影响。综述了 1-MCP 的作用机理、应用现状和最新研究进展。
关键词: 1-甲基环丙烯; 乙烯; 果实; 贮藏保鲜; 成熟; 衰老
中图分类号: S609+.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-1631 (2009) 02-0019-03

Present Situation and Prospect of the Study and Application of 1-methylcyclopropene for Storage and Preservation of Fruits

ZHU Xiang-qiu, WANG Xue-jun*, WEI Jian-mei, LIU Chang-jiang, YUAN Jun-wei
(Changli Institute of Pomology, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Changli 066600, China)

Abstract: 1-methylcyclopropene (1-MCP) is a new ethylene inhibitor, which inhibits effectively the action of endogenous or exogenous ethylene on plants and ethylene release and respiration rate on many fruits, regulates the expression of gene related to maturation and ripening of fruits, delays fruits senescence, prolongs shelf-life, affects nourishment composition and flavor compounds of fruits. The mechanism, application status and prospect of 1-MCP are reviewed.
Key words: 1-methylcyclopropene (1-MCP); Ethylene; Fruit; Storage and preservation; Ripening; Senescence

研究发现, 园艺产品的成熟与衰老受乙烯控制。因此, 阻止果蔬内源乙烯的产生或抑制其相关的生化反应, 则可推迟果蔬成熟与衰老的进程。20 世纪 90 年代 Sisler 等^[1]在研究 DACP (重氮基环戊二烯) 阻止乙烯的作用时发现, 其光解产物对乙烯的作用效果更好, 在分析这些光解产物时, 发现含有环丙烯 (cyclopropene, CP)、1-甲基环丙烯 (1-methylcyclopropene, 1-MCP)、3,3-二甲基环丙烯 (3,3-dimethylcyclopropene, 3,3-DMCP) 等, 这些环丙烯类化合物都能阻止乙烯的作用, 其中 CP 和 1-MCP 的作用浓度约是 3,3-DMCP 作用浓度的 1/1000, 由于 1-MCP 的化学性质比 CP 稳定, 更适合于商业应用。因此, 1-MCP 作为 1 种新型的高效乙烯作用抑制剂备受关注, 并首先在美国被开发成商品应用。2005 年国内引入生产技术并开始建厂。由于 1-MCP 具有无毒、高效和使用简便等优点, 被广泛应用于鲜切花和果蔬等园艺产品的商业化保鲜。1-MCP 的发现, 为延缓果蔬衰老和提高保鲜水平开辟了一条新途径。

1 1-MCP 的作用机理

1-MCP 属环丙烯类小分子化合物, 常温下为气态, 无异味, 沸点约 10℃, 在液体状态下不太稳定。1-MCP 通过与乙烯受体蛋白的金属离子结合, 使乙烯作用信号的传导和表达受阻^[1], 因此, 1-MCP 是乙烯受体的竞争

抑制剂, 且竞争力较强, 一经结合, 则不易脱落, 从而形成不可逆的竞争性抑制。1-MCP 所具有的较强竞争力来源于 1 碳位上的氢离子被甲基所取代, 使得整个分子呈平面结构, 形成比乙烯更高的双键张力和化合能^[2]。Nakatsuka 等和 Mullins 等研究认为, 1-MCP 可以通过调节乙烯生物合成途径中的 ACS 基因和 ACO 基因的表达来调节乙烯的生物合成, Nakatsuka 用 1-MCP 处理番茄时发现乙烯合成和传导中的 *LE-ACS₂*、*LE-ACS₄* 和 *LE-ACO₁*、*LE-ACO₄* 以及 *NR* 基因的表达完全受到抑制^[3~5]。由此可以认为, 1-MCP 是通过与乙烯竞争受体蛋白和抑制乙烯生物合成的基因表达 2 条途径, 来实现延缓果蔬衰老的作用机制。

2 1-MCP 的生理效应

2.1 对乙烯释放量和呼吸的影响

由于 1-MCP 抑制了乙烯的生物合成及其与果实成熟相关的生化反应, 从而抑制果实的呼吸强度, 延迟呼吸高峰的到来。陈莉等^[6]用浓度为 1 μL/L 的 1-MCP 处理红富士苹果 18 h, 明显抑制了果实乙烯的产生, 降低了果实的呼吸强度, 且在 1 个月的贮藏期内呼吸强度一直呈平缓较低的水平, 没有明显的呼吸高峰出现。王赵改等^[7]在 20℃ 条件下用浓度为 500 nL/L 的 1-MCP 处理粉红女士苹果 24 h, 然后放在 0℃ 条件下贮藏, 结果在 150 d 的保鲜期内乙烯生成率几乎为 0, 果实的呼吸强度也明显低于对照。魏建梅等^[8]用浓度 500 nL/L 的 1-MCP 处理金冠苹果, 也得到了类似结果。1-MCP 对非跃变型果实的处理效果因试验材料不同而有差异。Tian^[9]证明

收稿日期: 2008-12-26
作者简介: 朱向秋 (1955 -), 男, 河北滦南人, 研究员, 主要从事果蔬产品保鲜研究。
通讯作者: 王学军副研究员。

1-MCP能够抑制早采草莓果实的呼吸强度,而 Porat 等^[10]却发现 1-MCP不能抑制柑橘在贮藏过程中的呼吸强度。吴振先等^[11]用 1-MCP处理青花菜后却增加了乙烯的释放量。因此,1-MCP对不同果实乙烯释放量及其呼吸强度的抑制规律还需进一步研究。

2.2 对 SOD、POD 和 CAT活性的影响

超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)都具有清除细胞内活性氧的功能,从而使细胞膜免受伤害,延迟果实细胞的衰老进程。用 1-MCP处理的果实,均可保持较高的 SOD、POD 和 CAT 活性水平。李志强等^[12]分别用 0.6 $\mu\text{L/L}$ 和 0.9 $\mu\text{L/L}$ 的 1-MCP处理草莓,其 SOD 的活性明显高于对照,第 7 d 活性开始下降,第 9 d 后与对照无明显差异,而超氧阴离子则一直保持较低的水平。白华飞等^[13]用 250 nL/L 的 1-MCP处理台湾青枣,明显诱导了贮藏前期 SOD 活性的升高,到贮藏后期与对照差异不明显,同时 1-MCP 还诱导了果皮 POD 活性的升高,并在整个贮藏过程中均维持较高的水平。李学文等^[14]用 0.25 $\mu\text{L/L}$ 的 1-MCP 处理蟠桃,结果显示 CAT 活性一直呈缓慢上升的趋势。陈金印等^[15]用 1-MCP处理猕猴桃后, CAT 保持较高的活性。由此可知,用一定量的 1-MCP处理不同类型的果实,可以诱导 SOD、POD 和 CAT 活性的提高,有利于延迟果实的衰老进程。

2.3 对 ACC 合成酶和 ACC 氧化酶的影响

研究表明,ACC 合成酶(ACS)催化 SAM 转化成 ACC,ACC 在 ACC 氧化酶(ACO)的作用下转化成乙烯。因此,ACS 和 ACO 是乙烯生物合成过程中最重要的 2 种调控酶。李富军等^[16]用 1-MCP处理苹果果实,结果提高了 ACC 的积累量,延迟了 ACO 活性高峰的出现,并抑制了果实乙烯跃变期间蛋白激酶活性的提高。关于 1-MCP 对 ACS 和 ACO 的影响,国内目前研究的还比较少,在调控机理方面尚不清楚,有待进一步研究。

2.4 对 LOX、PPO 和 PG 活性的影响

脂氧和酶(LOX)、多酚氧化酶(PPO)和多聚半乳糖醛酸酶(PG)的活性高低与果实成熟衰老的程度有关,是果实成熟、衰老的副产物,其活性高峰过后,果实即进入衰老期或过熟期。李志强等^[12]用 0.6 $\mu\text{L/L}$ 1-MCP处理草莓果实,明显抑制了 LOX 的活性及其峰值。魏建梅等^[8]用 500 nL/L 的 1-MCP处理红富士、金冠和嘎拉 3 个苹果品种的果实,结果显示 LOX 的活性明显被抑制,且没有出现明显的峰值。李富军等^[16]用 1-MCP处理肥城桃也得到了类似的结果。

在细胞内,PPO 是一种高度定位酶,随着果实的成熟、衰老,膜透性的增加,PPO 活性也随之增强。钟秋平等^[17]用 1-MCP处理油梨,在一定程度上抑制了 PPO 和 PG 的活性。而李学文等^[14]分别用 0.25 $\mu\text{L/L}$ 和 1.5 $\mu\text{L/L}$ 的 1-MCP处理蟠桃果实后,对 PPO 活性没有明显的抑制,这也可能与 PPO 不是果实成熟、衰老的

关键酶有关。而 PG 活性在处理第 3 d 出现峰值,且明显低于对照,但到第 5 d 迅速下降,且活性高于对照。田长河等^[18]用 10 mg/L 的 1-MCP处理柿果,明显延迟了 PG 的峰值出现时间,其最大峰值仅为对照的 71%。

2.5 对果实内外品质的影响

1-MCP可减缓果实有机酸的下降和叶绿素的降解,而对可溶性固形物的影响则不明显。陈莉等^[6]用 1-MCP 处理红富士苹果,明显抑制了叶绿素的降解,直到货架期才出现下降,并保持了较高的有机酸含量,从而保持了较好的果实风味。多数研究表明,1-MCP处理可减缓果实硬度的下降,延迟果实衰老进程。王赵改等^[7]用 1-MCP处理红粉女士苹果,贮藏至 150 d 时对照果实的硬度下降了 2.9 kg/cm^2 ,而 1-MCP处理的果实硬度仅下降了 0.6 kg/cm^2 ,使贮藏品质得到了很大提高。陈延等^[19]分别用 0.3 mg/L 和 0.5 mg/L 的 1-MCP处理冬枣,很好地保持了果实硬度,与对照相比差异达极显著水平。

3 影响 1-MCP作用效果的因素

1-MCP作为 1 种新型的乙烯作用抑制剂,已被广泛应用于水果、蔬菜和花卉等各种园艺产品的保鲜。但是,由于 1-MCP的作用效果受果实成熟度、处理温度、处理时间、处理浓度以及果蔬种类等多种因素的影响,因此,针对某种园艺产品要正确掌握处理方法,以期获得最佳的处理效果。

3.1 果实种类和成熟度

1-MCP对不同果实种类和相同种类不同成熟度的果实作用效果不同。对于跃变型果实应在跃变前进行处理,果实进入跃变期再处理,作用很小或者无效果。苏小军等^[20]研究发现,香蕉用乙烯处理后再用 1-MCP 处理,果实的后熟仅部分受抑制,而果实用乙烯处理 2 ~ 3 d 后再用 1-MCP 处理,果实的后熟进程不受影响。说明果实后熟已经进入不可逆的阶段。内源乙烯催化的后熟一旦进行到一定程度,1-MCP 便会失去抑制效果。因此实际应用中要注意果实的采收成熟度,对于成熟度过高的果实,1-MCP 不能发挥应有的效果;对于成熟度较低的果实,1-MCP 会抑制总挥发性物质的产生,深度抑制后使其不能正常后熟,影响果实风味物质的产生,降低品质。1-MCP 对柑桔类果实的处理效果欠佳,其原因有待进一步研究。

3.2 处理温度

1-MCP的处理效果与温度有关。在一定温度范围内,温度越高,处理效果越好。一般认为在室温条件下 1-MCP的作用效果较佳。赵迎丽等^[21]用 1-MCP处理猕猴桃,结果在 0 $^{\circ}\text{C}$ 下几乎没有作用效果,而在 20 $^{\circ}\text{C}$ 下效果明显。Sisler 等^[22]认为,在低温条件下,1-MCP 与受体结合减少,这可能与低温下膜上受体蛋白的构象改变有关。也有人认为 1-MCP 在低温下的处理效果降低,是因为在低温下 1-MCP 气体渗入植物组织的能力降低,

或与受体结合的能力降低有关^[23]。

3.3 处理浓度与时间

1-MCP的处理效果与其使用浓度和时间有关。一般情况下, 要达到相同的处理效果, 浓度和时间呈反比, 即浓度越高, 处理时间越短, 反之亦然。不同果实种类所要求的最佳处理浓度不同, 浓度过高时也可能加速果实的衰老和腐烂。Fan等^[24]研究认为, 苹果的最佳处理浓度为 1mg/L, 对 Anna 苹果而言, 当处理浓度为 10μg/L 时, 可抑制 50% 的乙烯生成, 当浓度达到 1mg/L 时, 可抑制 95% 的乙烯生成, 但不能抑制香气的产生。

4 1-MCP及其同类物应用前景展望

随着 1-MCP研究的不断深入和广泛应用, 近年来一些新合成的新型环丙烯类化合物不断出现, 并被用于抑制乙烯作用的研究上。如用 1-己基环丙烯 (1-Hexylcyclopropene, 1-HCP)、1-辛基环丙烯 (1-Octylcyclopropene, 1-OCP) 和 1-MCP来分别抑制乙烯对盆栽长寿花花期的影响, 结果表明, 200 nL/L 的 1-OCP比相同浓度的 1-MCP效果更好, 单花寿命延长 1/5 左右, 而且处理的时间更短, 有效作用温度的要求也更低; 而 1-HCP要求的处理浓度是 1-MCP的 5~10 倍, 作用时间稍短, 作用温度相近^[25]。Sisler等^[26,27]比较了 20 种环丙烯类化合物对香蕉保鲜的作用, 结果显示均能抑制乙烯的作用, 但其作用浓度和时间差异较大。Feng等^[28]以鳄梨和番茄为材料, 比较 1-MCP、1-ECP (1-乙基环丙烯) 和 1-PCP (1-丙基环丙烯) 的作用时得到类似的结果。这些环丙烯类化合物的性质和对乙烯受体的作用效果与其碳 1 位上的碳链长短有直接关系。

大量的研究表明, 环丙烯类化合物作为乙烯作用的抑制剂在园艺产品的贮藏保鲜中具有良好的应用前景。特别是已进入商业化操作的 1-MCP, 因具有无毒、高效等优点, 已引起更为广泛的关注。目前国内对 1-MCP的研究还处于起步阶段, 研究范围主要是应用效果研究, 其作用机理等方面的理论研究较少。在应用研究方面, 由于 1-MCP的作用效果受果蔬种类、采收成熟度、处理浓度和时间以及处理温度等多种因素的影响, 国内在贮藏保鲜领域尚缺乏统一的应用技术标准。因此, 对 1-MCP的研究, 应当注意以下 2 个方面: 第一, 应用研究和理论研究相结合, 在应用中发现问题的, 并从生理、生化和分子水平揭示其作用机理; 第二, 全面系统地研究 1-MCP对各类园艺产品的最佳使用浓度、处理方法和时间, 建立起符合生产实际的 1-MCP应用技术标准或体系。

总之, 1-MCP及其同类物在园艺产品的贮藏保鲜方面具有广泛的应用开发前景, 其推广应用将为园艺产品的保鲜事业带来新的光明。

参考文献:

[1] Sisler E C, Serek M. Inhibitors of ethylene responses in plants at receptor level: recent developments [J]. *Physiologia Plantarum*, 1997, (100): 577 - 582.

[2] Sisler E C, Serek M. Compounds controlling the ethylene receptor [J]. *Bot Bull Acad Sin*, 1999, (40): 1 - 7.

[3] Blankenship SM, Dole JM. 1-methylcyclopropene: a review [J]. *Postharvest Biology Technology*, 2003, (28): 1 - 25.

[4] Nakatsuka A, Shiomi S, Kubo Y, *et al*. Expression and internal feedback regulation of ACC synthases and ACC oxidase genes in ripening tomato fruit [J]. *Plant Cell Physiology*, 1997, (38): 1103 - 1110.

[5] Mullins E D, McCollum T G, McDonald R E. Consequences on ethylene metabolism of inactivating the ethylene receptor sites in diseased non-climacteric fruit [J]. *Postharvest Biology Technology*, 2000, (19): 155 - 164.

[6] 陈莉, 屠康, 赵艺泽, 等. 采后 1-MCP和热处理对红富士苹果生理变化和贮藏品质的影响 [J]. *果树学报*, 2006, 23 (1): 59 - 64.

[7] 王赵改, 马书尚, 王瑞庆, 等. 1-MCP对红粉女士苹果采后生理的影响 [J]. *西北农林科技大学学报 (自然科学版)*, 2005, 33 (5): 124 - 126.

[8] 魏建梅, 刘长江, 朱向秋, 等. 苹果果实发育成熟软化过程中脂氧合酶活性变化及采后乙烯调控 [J]. *河北农业科学*, 2008, 12 (7): 27 - 30.

[9] Tian M S, Prakash S. Responses of strawberry fruit to 1-methylcyclopropene (1-MCP) and ethylene [J]. *Plant Growth Regulation*, 2000, (32): 83 - 90.

[10] Porat R, Weiss B, Cohen L, *et al*. Effects of ethylene and 1-methylcyclopropene on the postharvest qualities of shanouti oranges [J]. *Postharvest Biol and Technol*, 1999, (15): 155 - 163.

[11] 雷建军. 园艺学进展 [M]. 广州: 广州出版社, 2002.

[12] 李志强, 王良驹, 巩文红, 等. 1-MCP对草莓果实采后生理及品质的影响 [J]. *果树学报*, 2006, 23 (1): 125 - 128.

[13] 白华飞, 杨晓堂, 吴锦铸, 等. 1-甲基环丙烯对台湾青枣采后生理效应的影响 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2004, 12 (4): 363 - 366.

[14] 李学文, 韩江, 腾康宁. 1-MCP对蟠桃采后生理效应的影响 [J]. *中国农学通报*, 2006, 22 (11): 185 - 188.

[15] 陈金印, 陈明, 甘霖. 1-MCP对冷藏“金魁”猕猴桃果实采后生理和品质的影响 [J]. *江西农业大学学报*, 2005, 27 (1): 1 - 5.

[16] 李富军, 翟衡, 杨洪强, 等. 1-MCP对苹果果实贮藏期间乙烯合成代谢的影响 [J]. *中国农业科学*, 2004, 37 (5): 734 - 738.

[17] 钟秋平, 夏文水. 1-甲基环丙烯处理延迟采后油梨果实后熟的研究 [J]. *食品与发酵工业*, 2005, 31 (5): 149 - 150.

(下转第 23 页)

好，叶较细，叶色较绿，生长速度较慢，具有耐旱性和抗热性好的突出特点。上南都、翠丽和尼佳综合评价也较好，能适应沧州地区的气候条件，可以大面积推广种植。

表 1 羊茅类草坪草种品质评价
Table 1 The quality evaluation of fescue turf grass

种	品种	出苗期 (月 - 日)	成坪期 (月 - 日)	枯黄期 (月 - 日)	返青期 (月 - 日)	叶色	质地	均匀度	观赏性	抗热性	抗病性	抗旱性	抗寒性	综合评价 (分)
高羊茅	杰克	09 - 12	10 - 16	01 - 10	02 - 27	浅绿	3.0	7.5	5.0	6.0	6.0	6.0	9.0	5.9
	爱瑞	09 - 12	10 - 16	01 - 10	02 - 27	浅绿	3.0	7.5	5.0	6.0	6.0	6.0	9.0	5.9
	卡马里罗	09 - 12	10 - 18	01 - 10	03 - 02	绿	5.0	6.5	5.0	7.0	7.0	6.0	9.0	6.1
	阿米高	09 - 12	10 - 18	01 - 10	02 - 28	绿	4.5	7.5	5.0	6.0	6.0	6.0	9.0	5.8
	皇后	09 - 12	10 - 20	01 - 10	02 - 27	深绿	6.0	7.5	5.0	8.0	7.0	6.5	9.0	6.7
	凌志	09 - 12	10 - 18	01 - 10	02 - 27	绿	5.0	6.5	5.0	6.0	6.0	6.0	9.0	5.8
	阮拉二号	09 - 12	10 - 18	01 - 10	03 - 01	绿	5.0	7.0	4.0	6.0	6.0	6.0	9.0	5.7
	贝克	09 - 12	10 - 20	01 - 10	02 - 27	绿	5.5	7.5	5.0	8.0	7.0	7.0	9.0	6.7
	阿瑞三号	09 - 12	10 - 18	01 - 10	03 - 01	深绿	6.0	5.5	5.0	6.0	6.0	7.0	9.0	5.9
	尼佳	09 - 12	10 - 18	01 - 10	02 - 28	绿	5.5	6.5	4.5	7.0	7.0	7.0	9.0	6.3
	上南都	09 - 12	10 - 18	01 - 10	02 - 27	绿	4.5	7.5	5.0	7.5	7.0	7.0	9.0	6.4
	阿拉木	09 - 12	10 - 18	01 - 10	03 - 02	深绿	5.5	6.0	4.5	7.0	7.0	7.0	9.0	6.2
	翠丽	09 - 12	10 - 18	01 - 10	03 - 02	绿	5.0	6.5	5.0	7.0	7.0	7.0	9.0	6.3
紫羊茅	派尼	09 - 11	10 - 15	01 - 15	03 - 02	黄绿	7.0	8.0	7.5	1.0	5.0	2.0	9.0	5.1
	fescue	09 - 11	10 - 15	01 - 15	03 - 02	黄绿	7.0	8.0	7.5	1.0	5.0	2.0	9.0	5.1

(2) 紫羊茅 2 个品种秋、冬和春季表现均很好，密度高，叶质地、均一性以及观赏性也都很好，但抗热性和抗旱性太差，越夏易枯死，不适应沧州地区的气候条件，所以不可推广种植。

参考文献：

[1] 任继周，张自和 . 草地与人类文明 [J]. 草原与草坪，2000，(1)：5 - 9.

[2] 谭继清 . 草坪与地被栽培技术 [M]. 北京：科学技术文献出版社，2000. 51 - 64.

[3] 孙吉雄 . 草坪学 [M]. 北京：中国农业出版社，1995. 1 - 20，134 - 140.

[4] 白史旦，韩烈保，肖 颢 . 国外冷季型草坪草种在成都引种适应性评价 [J]. 草坪与草原，2000，(1)：23 - 25.

[5] 洪绂曾，王槐三，等 . 中国多年生栽培草种区划 . 北京：中国农业科技出版社，1989，122 - 152.

(上接第 21 页)

[18] 田长河，饶景萍，冯 炜 . 1-MCP 处理对柿果实采后生理效应的影响 [J]. 干旱地区农业研究，2005，23 (5)：122 - 123.

[19] 陈 延，饶景萍，左 俊，等 . 1-MCP 处理对冬枣冷藏中生理变化及保鲜效果的研究 [J]. 西北农业科学，2006，15 (3)：157 - 161.

[20] 苏小军，蒋月明，李月标 . 1-MCP 对香蕉果实货架期的影响 [J]. 亚热带植物科学，2003，32 (1)：1 - 3.

[21] 赵迎丽，李建华，石建新，等 . 不同温度下 1-MCP 处理对猕猴桃果实贮藏效果的影响 [J]. 山西农业大学学报，2005，25 (2)：153 - 156.

[22] Macnish A J, Simons D H, Joyce D C. 1-methylcyclopropene treatment efficacy in preventing ethylene perception in banana fruit and grevillea and wax flower flowers [J]. Australian Journal of Experimental Agriculture, 2000，40 (3)：471 - 481.

[23] 吴振先，张延亮，陈永明，等 . 1-甲基环丙烯处理对不同成熟阶段香蕉果实后熟的影响 [J]. 华南农业大学学报，2001，22 (4)：15 - 18.

[24] Fan X T, Mattheis J P. Impact 1-methylcyclopropene and methyl jasmonate on apple volatile production [J]. Journal of Agricultural Food Chemistry, 1999，(47)：2847 - 2853.

[25] Kebenei Z, Sisler E C, Winkelmann T, et al. Efficacy of new inhibitors of ethylene perception in improvement of display life of kalancho (*Kalanchoe blossfeldiana* Poelln.) flowers [J]. Postharvest Biol Technology, 2003，(27)：1 - 8.

[26] Sisler E C, Serek M, Ron K A, et al. The effect of chemical structure on the antagonism by cyclopropenes of ethylene responses in banana [J]. Plant Growth Regular, 2001，(33)：107 - 110.

[27] Sisler E C, A lwan T, Coren R, et al. 1-substituted cyclopropenes: effective blocking agents for ethylene action in plants [J]. Plant Growth Regular, 2003，(40)：223 - 228.

[28] Feng X, Apelbaum A, Sisler E C, et al. Control of ethylene activity in various plant systems by structural analogues of 1-methylcyclopropene [J]. Plant Growth Regular, 2004，(42)：29 - 38.