

植物的番茄红素及影响其形成的生理因素

王贵元 徐娟 夏仁学*

华中农业大学园艺林学学院, 武汉 430070

Lycopene in Plant and Physiological Ingredients of Effecting Its Forming

WANG Gui-Yuan, XU Juan, XIA Ren-Xue*

College of Horticulture and Forestry, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070

提要 介绍了植物番茄红素的研究历史、生理功能、自然界分布、稳定性和提取方法及生物合成方面的研究进展, 重点介绍番茄红素在植物中的生物合成。

关键词 番茄红素; 生理功能; 生物合成; 稳定性; 提取方法

番茄红素(lycopene)是类胡萝卜素(carotenoid)的一种, 为一种天然色素, 因其最早发现于番茄中且呈红色而得名。过去人们一直认为, 由于它没有 β -胡萝卜素那样的 β -苎香环结构, 所以不具有维生素A原活性, 对人体不具有生理活性而未被重视。但近年来的大量研究表明, 番茄红素具有多种生理功能, 特别是对癌症有防治作用, 因而逐渐成为国际上功能性食品成分和抗癌、防癌研究中的一个热点而被重视和开发。

番茄红素最早由Hartsen于1873年从浆果薯蓣(*Tamus communis* L. berries)中分离出来, 呈深红色晶体状。1875年, Millardet从番茄中获得含有番茄红素的粗提物, 将之称为茄红素(solanorubon)。1903年Schunck发现番茄中提取的这种色素具有与胡萝卜中提取的胡萝卜素不同的吸收光谱, 将其命名为番茄红素(lycopene)。

20世纪初, 人们开始对番茄红素的基本化学结构进行了研究。1910年, Willstatler和Escher在番茄红素的研究中指出, 它是胡萝卜素的异构体, 并首次确定其分子式为 $C_{40}H_{56}$, 其结构中含有11个共轭双键及2个非共轭碳-碳双键, 分子量为536.85^[1]; 1930年Karrer等提出番茄红素的化学结构式是由11个共轭及2个非共轭的碳-碳双键组成的非环状平面多共轭双键的结构, 并由Kuhn和Grundmann在1932年证实。

在植物中, 番茄红素是类胡萝卜素合成的重要中间物质, 并可以接受光, 保护植物不受光氧

化作用。在正常的细胞中, 番茄红素可与细胞有氧代谢所产生的高活性氧发生反应, 防止活性氧对组织细胞的破坏^[2]; 在光电子传递过程中, 番茄红素还具有阻止和扩散有毒单线态氧、三线态叶绿素和过氧化阴离子基形成的功能^[3]。

近20年来, 番茄红素在医学和保健方面的研究得到较快发展。最近许多研究表明, 番茄红素可以通过物理、化学方式猝灭单线态氧, 具有很强的清除氧自由基能力, 可以诱导细胞连接通讯, 调控肿瘤细胞增殖等^[4]。此外, 番茄红素还具防癌、抗癌和减轻皮肤受到紫外线损伤的作用^[5,6]。这些研究引起了各国的医学、营养学界的科学工作者研究和开发番茄红素生理功能的极大兴趣, 人们对番茄红素的生理活性也有了新的认识。我国自1990年以来也陆续有了关于番茄红素生理功能和提取方法的报道和介绍。

1 番茄红素在自然界中的分布

1.1 在植物中的分布 番茄红素广泛分布于各种植物中, 主要存在于细胞的有色体中, 多与蛋白质等形成复合物, 以某些植物成熟的果实中含量较高。番茄、西瓜、红色葡萄柚、红肉脐橙^[7]、木瓜及苦瓜籽、番石榴等植物中都有发现, 含量

收稿 2003-10-20 修定 2004-02-18

资助 国家科技部三峡移民科技开发专项(S200110)。

* 通讯作者(E-mail: renxuexia@mail.hzau.edu.cn, Tel:027-87281637)。

最高的是番茄果实, 可达 $3\sim 14\text{ mg}\cdot(100\text{ g})^{-1}(\text{FW})$, 一般成熟度越高, 番茄红素的含量也越多, 且含量随品种和成熟度的不同而不同, 如在普通的番茄 (*Lycopersicon esculentum*) 品种中, 含量在 $3.3\sim 7.7\text{ mg}\cdot(100\text{ g})^{-1}(\text{FW})$, 而在一些特殊的番茄 (*Lycopersicon pimpinellifoli*) 中, 番茄红素的含量可达 $40\text{ mg}\cdot(100\text{ g})^{-1}(\text{FW})$ ^[8]。值得一提的是, 最近美国农业部的科学家发现, 在秋橄榄 (*Elaeagnus umbellata*) 浆果中番茄红素的含量相当于普通番茄的18倍^[9]。

1.2 在人体中的分布 番茄红素也广泛分布于人体的各种器官和组织中, 主要有血液、肾上腺、肝脏、睾丸、前列腺、乳腺、卵巢、子宫、消化道等, 其中血液、肾上腺、睾丸、肝脏等中含量较多。研究发现, 植物体中的番茄红素几乎都是反式的, 而人体内的番茄红素则是顺式异构体所占比例较大。如: 番茄和番茄酱中79%~91%为反式异构体, 9%~21%为顺式异构体; 而人体血清中番茄红素含量水平在 $0.6\sim 1.9\ \mu\text{mol}\cdot\text{mL}^{-1}$ 之间, 27%~42%为反式异构体, 58%~73%为顺式异构体; 前列腺中12%~21%是反式, 79%~88%是顺式^[10]。

2 番茄红素的稳定性和提取方法

2.1 番茄红素的稳定性及其影响因素 番茄红素是多不饱和键的碳氢化合物, 稳定性很差, 容易发生顺反异构化和氧化降解。尤其是高纯度番茄红素由于缺少其他物质的保护, 极不稳定, 易被氧化破坏。影响番茄红素稳定性的因素很多, 如光、热、金属离子、氧化剂和所处的介质等。

2.1.1 光照 已有的研究均表明, 番茄红素对光十分敏感, 尤其是日光和紫外光。日光直射下半天, 番茄中番茄红素基本上损失殆尽, 紫外线照射1个星期基本损失完, 黑暗条件下番茄红素则较稳定^[11~13]。由于光照处理后样品特征光谱中的吸收峰几乎完全消失, 因此推断光照导致番茄红素的损失可能是由于番茄红素分解所致^[12]。

2.1.2 温度 番茄红素在低温下比较稳定, 随着温度的升高番茄红素在最大吸收峰(472 nm)处的吸光值几乎呈直线下降, 推测可能是异构的结果^[12]。因为番茄经过加热后, 其中的顺构番茄红素含量即增加^[1]。但孙庆杰和丁霄霖^[11]的研究表明, 番

茄红素对热有较好的稳定性, 认为这可能是由于提取番茄红素时所用的介质不同。

2.1.3 金属离子 番茄红素对大部分金属离子都不稳定, 特别是对氧化性较强的金属离子如 Pb^{2+} 、 Fe^{3+} 和 Cu^{2+} 等, 而对具有还原性的金属离子如 Fe^{2+} 、 Zn^{2+} 和 K^{+} 等则较稳定^[11~13], 推测金属离子可能是通过氧化作用而破坏番茄红素的^[12]。

2.1.4 氧化剂和还原剂 番茄红素对氧化剂如双氧水和重铬酸盐等很不稳定, 特别是强氧化剂重铬酸盐, 浓度很低时番茄红素在短时间内就完全破坏^[12]。但孙庆杰和丁霄霖^[11]的研究表明, 番茄红素对双氧水比较稳定, 还原剂如二丁基羟基甲苯(BHT)、VE和VC等对番茄红素有较好的保护作用, 保护效应随还原剂浓度的增加而增加^[11~13]。

2.1.5 pH 酸对番茄红素有较强的破坏作用, 而碱的影响则不大, 番茄红素对碱比较稳定^[11,12], 但王学武等^[13]的研究表明极端的pH值对番茄红素的稳定性都是不利的。

2.1.6 介质 番茄红素在番茄果实以及番茄制品中比较稳定, 但在有机溶剂中, 即使是避光和加入抗氧化剂时也会随着时间的延长而发生异构化。

Minhthy等^[1]研究食品加工中的番茄红素稳定性时发现: 番茄红素在番茄制品热加工中, 比 β -胡萝卜素相对不易发生异构化; 除非在极端情况下, 热处理对番茄红素的异构化作用一般影响不大。Anguelova和Warthesen^[14]研究番茄粉中番茄红素的稳定性时发现, 光照和升温(从6℃升至室温)对番茄粉中番茄红素稳定性影响不大。

马柏林^[15]研究食用调和油中番茄红素的稳定性时发现: 番茄红素保存率随着时间延长而下降, 随着温度升高而急剧下降; 在相同的条件下, 光照强度对番茄红素的不良影响比贮存时的温度更为显著。

氧、热、光均促使番茄红素的顺反异构化和氧化降解, 故番茄红素的提取、储存、加工及分析都应在环境因素控制的情况下进行, 不仅要尽量避免它的氧化降解, 还要防止异构化的产生。另外, 提取的番茄红素应避免暴露在光下, 可在黄、红光下进行^[1]。

从以上可以看出, 影响存在于不同形态物质中或处于特定条件下的番茄红素稳定性的主要因素

是不确定的, 光、氧、热都可能起主导作用。

2.2 提取方法 番茄红素在提取、储存及分析过程中均应注意控制环境条件以尽量减少其氧化和异构化, 尽量避光, 如需用光只能用黄光、红光和金黄色光。在萃取和溶剂分离过程中可使用如BHT之类的抗氧化剂以控制氧化异构发生。同时, 容器顶端应充入 N_2 或惰性气体以防止其与氧的接触而减少氧化程度。

番茄红素是脂溶性色素, 可采用有机溶剂提取法、超临界 CO_2 萃取法、酶法、微生物发酵法及直接粉碎法等。

采用有机溶剂提取法, 产品质量较差, 纯度低, 有异味和溶剂残留。而在诸多的有机溶剂中, 氯仿作溶剂提取番茄红素的效果最好, 提取过程中要注意温度的影响。欧洲一专利报道采用95%的乙醇作溶剂, $78^\circ C$ 下用逆流浸提5 h, 获得的色素液再经真空浓缩去溶剂后可得到粉状色素产品^[16]。

采用超临界 CO_2 萃取法提取番茄红素具有工艺简单、能耗低、萃取剂便宜、无毒、易回收等特点。孙庆杰和丁霄霖^[17]用此法提取番茄皮中的番茄红素时, 观察4个因素的影响下, 最佳提取工艺为: 温度 $40\sim 50^\circ C$, 压力 $15\sim 20$ MPa, 流速 $20\text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$, 萃取 $1\sim 2$ h。王强等^[18]用此法的结果也表明, 最佳工艺参数为温度 $50^\circ C$, 压力25 MPa, 提取时间3 h。

酶反应法是在微碱性条件下(pH 7.5~9)番茄皮中的果胶酶和纤维素酶反应后, 分解果胶和纤维素, 番茄红素的蛋白质复合物即从细胞中溶出, 这样所得到的色素为水分散性色素。赵功玲和娄天军^[19]的研究发现, 外加纤维素酶可以大幅度地提高番茄红素的提取速度和提取量, 纤维素酶的最佳浓度为0.1%, 酶作用时间为2.5 h, 提取时间为3.0 h。

一般来说, 目前比较常用的为 CO_2 超临界萃取法和有机溶剂提取法。

3 植物番茄红素的生物合成

动物不能合成自身所需的番茄红素, 需从食物中摄取, 只有高等植物和一些微生物可以合成番茄红素。在富含番茄红素的高等植物中, 番茄红素的合成有两种情况: 一种是在果实进入转色

和成熟时大量开始合成, 直到成熟时番茄红素的含量达到最高, 在这之前组织中的番茄红素几乎检测不到, 最典型的例子就是番茄^[20]; 另一种情况是植物组织在幼果期就开始合成番茄红素, 只不过速度较缓慢, 而果实转入成熟时开始大量合成, 合成速率迅速增加, 如红肉脐橙果肉中番茄红素的合成就是这种情况^[21]。这说明番茄红素的合成速率显然与不同高等植物的遗传特性及特定组织器官的发育阶段有关, 但无论是哪种情况, 其基本的合成途径都是通过植物类异戊二烯代谢途径合成。

3.1 合成途径 植物体内很多重要的次生代谢物质, 包括番茄红素, 都是通过植物类异戊二烯途径合成的, 这是植物次生代谢中的一个重要途径^[22, 23]。从光合作用的最初产物葡萄糖开始, 经过一系列过程合成异戊烯基焦磷酸(IPP)。高等植物体内IPP的合成有细胞质和质体两种途径, 它是类异戊二烯途径中第一个较为直接的前体物质, 植物类胡萝卜素的合成是在植物细胞质体中完成的。而后IPP在IPP异构酶的催化下异构成3, 3-二甲基丙烯基焦磷酸(DMAPP), DMAPP依次与3分子的IPP在GGPS(GGPP合成酶)的作用下相继缩合成牻牛儿基焦磷酸(GPP)、法呢基焦磷酸(FPP)和牻牛儿基牻牛儿基焦磷酸(GGPP)——类胡萝卜素合成中第一种类胡萝卜素(八氢番茄红素)的直接前体。此后, GGPP分别在八氢番茄红素合成酶(PSY)、八氢番茄红素脱饱和酶(PDS)和 ξ -胡萝卜素脱饱和酶(ZDS)的催化下依次生成八氢番茄红素(phytoene)、六氢番茄红素(phytofluene)、 ξ -胡萝卜素(ξ -carotene)、链孢红素(neurosporene)和番茄红素^[24~26]。可以说, 番茄红素是植物类胡萝卜素生物合成中的较早产物之一。

3.2 影响番茄红素生物合成的因子 番茄红素的生物合成受遗传和环境因子的共同调控, 也受一些内源物质如光敏色素、植物激素等的调节^[27]。以下主要介绍影响番茄中番茄红素形成的因素。

3.2.1 温度 番茄红素形成主要与温度和光有关, 环境条件适合番茄果实成熟时, 番茄红素便大量合成^[28]。

番茄红素的形成由脱氢酶的作用完成, 受温度的影响最显著。在 $25^\circ C$ 以下, 温度升高, 酶

的活性增加, 色素的转变也愈快; 但当温度升高到 25℃ 以上时, 番茄红素的形成就减缓; 如果温度达到 30℃ 以上时, 番茄红素难于形成; 如果温度升高到 35℃ 时, 番茄红素不能生成; 温度再高时甚至已形成的番茄红素还会分解^[29]。

番茄红素合成在温度高于 30~32℃ 时即受抑, 而其他类胡萝卜素的合成则是在高于 30℃ 的温度下进行的, 因此, 如果一直持续较高的温度, 番茄就会呈现出黄色^[28]。

3.2.2 光照 适度的光照有利于植物组织中类胡萝卜素的合成。Harding 和 Shorpshire^[30] 的研究表明, 光促进成熟时的番茄果实中类胡萝卜素(主要是番茄红素)合成。Thompson 和 White^[31] 的研究也表明, 光可诱导光合作用复合体的形成, 间接促进番茄红素的形成。Rau^[32] 也发现, 光敏色素影响叶子和果实中类胡萝卜素的生物合成。Alba 等^[27] 用红光照射番茄果实后, 番茄红素积累增加, 这可为嗣后的远红光逆转。这表明番茄果实中番茄红素的积累受果实中光敏色素调控。

虽然充足的光照有利于番茄果实中番茄红素大量合成, 但在黑暗条件下, 只要保持通气和适宜的温度, 番茄红素仍能形成^[20]。表明番茄红素的生成对于光的要求不是完全必要的。

3.2.3 某些化学物质 已有的研究表明, PSY 催化八氢番茄红素的形成依赖 Mn^{2+} ^[33]。 Mn^{2+} 是决定 GGPP 用来合成类胡萝卜素还是其它类异戊二烯产物的关键性调控因子, 对植物类胡萝卜素的合成至关重要。PDS 抑制剂如 2, 6-二苯基吡啶和达草灭等抑制有色类胡萝卜素的合成^[34], 从而抑制番茄红素的合成。三乙基胺类物质 2-(4-硫代氯苯)-三乙基胺盐酸盐(CPTA) 等可抑制番茄红素 β -环化酶(LYC) 的活性, 诱导柑橘和番茄等果实积累番茄红素^[35~37]。岑宁等^[38] 将采后的黄色宽皮柑橘果实以胺类化合物处理后, 果皮中番茄红素的含量明显增加。

乙烯在番茄红素的合成中也有影响。番茄果实中番茄红素合成依赖于乙烯。12℃ 下气调贮藏的番茄果实无乙烯生成, 也检测不到番茄红素; 而当果实移入室温并置于正常大气中, 随后乙烯即生成, 番茄红素也开始合成^[39]。这是因为乙烯可促进 PSY 基因表达^[40, 41]。

4 结语

番茄红素作为一种抗氧化能力较强的类胡萝卜素, 可有效地抑制生物体内有害的氧化作用发生。现已初步证实它具有延缓衰老、预防癌症等功能, 是一种有保健功能的天然色素。番茄红素经提取纯化可作为食品营养补充剂和食用色素使用, 它的提取方法及与其它食品成分的配比方法正在逐步完善。国外已有许多国家, 特别是美国、以色列和日本等, 已经实现了番茄红素的商业化生产^[42, 43]。

对于目前国内外对番茄红素生理功能的关注和有关生物合成的研究成果, 我们认为今后可加强以下几个方面的研究: (1) 利用现有的变异品种或遗传育种方法, 特别是采用转基因手段调控番茄红素的合成, 选育高番茄红素含量的番茄品种或其它经济作物, 扩大番茄红素的来源; (2) 进一步研究环境条件对番茄红素生物合成的影响, 寻找提高番茄红素的途径; (3) 目前我国 β -胡萝卜素的生产虽然已实现工厂化, 并运用在食品添加剂和饮料行业中, 但为了更好地应用番茄红素, 其工业化生产技术尚应进一步改进。目前, 我国的番茄红素还依靠进口, 但国外的番茄红素价格昂贵, 所以, 研究出一种简便制备高纯度番茄红素的方法并进行工厂化生产势在必行。

相信随着从分子水平上研究植物体内番茄红素合成及其调节过程的日益深入, 以及基因工程操作技术的进一步成熟^[44], 番茄红素的开发利用前景会更加广阔。

参考文献

- 1 Minhty L, Nguyen, Steven J et al. Lycopene: chemical and biological properties. *Food Technol*, 1999, 53(2): 38~45
- 2 杨鸣娟, 张坤生. 番茄红素的化学及生物学性质. *中外食品*, 2003, 1: 40~41
- 3 Koyama Y. Structures and functions of carotenoids in photosynthetic systems. *J Photochem Photobiol B Biol*, 1991, 9: 265~280
- 4 Siefermann-Harms D. The light-harvesting and protective function of carotenoid in photosynthetic membranes. *Physiol Plant*, 1987, 69: 561~568
- 5 孙庆杰, 丁霄霖. 番茄红素的保健作用与开发. *食品与发酵工业*, 1997, 23(4): 72~75
- 6 Ribaya-Mercado JD, Garmyn M, Gilchrest BA et al. Skin lycopene is destroyed preferentially over β -carotenoid during ultra-

- violet irradiation in humans. *J Nutr*, 1995, 125(7): 1854~1859
- 7 徐娟, 邓秀新. 红肉脐橙(*Citrus sinensis* L.) 果肉中特征色素提取方法探索. *果树学报*, 2002, 19(4): 23~26
- 8 冢田欣司. クレビスの最新機能研究. *食品々开发*, 2000, 35(6): 50~52
- 9 Fordham IM, Clevidene BA, Wiley ER et al. Fruit of autumn olive: a rich source of lycopene. *HortSci*, 2001, 36(6): 1136~1137
- 10 Stahl W. Cis-trans isomers of lycopene and β -carotene in human serum and tissues. *Arch Biochem Biophys*, 1992, 294(1): 173~177
- 11 孙庆杰, 丁霄霖. 番茄红素的稳定性的初步研究. *食品与发酵工业*, 1998, 24(2): 47~51
- 12 成坚, 曾庆孝, 何宇峰. 番茄红素的稳定性研究. *仲恺农业技术学院学报*, 2001, 14(2): 14~19
- 13 王学武, 夏延斌, 王克勤. 天然番茄红素的稳定性研究. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 28(1): 57~60
- 14 Anguelova T, Warthesen J. Lycopene stability in tomato powders. *J Food Sci*, 2000, 65: 67~70
- 15 马柏林. 食用调和油中的番茄红素的稳定性研究. *中国油脂*, 2000, (6): 132~133
- 16 刘立国, 吴晶. 番茄红素及生产应用研究. *食品工业科技*, 2002, 23(4): 74~75
- 17 孙庆杰, 丁霄霖. 超临界CO₂萃取番茄红素的初步研究. *食品与发酵工业*, 1998, 24(1): 3~6
- 18 王强, 吕飞杰, 赵文恩等. 番茄红素的分离提取及其对细胞周期的影响. *中国农业科学*, 2002, 35(4): 434~439
- 19 赵功玲, 娄天军. 提高粗制品番茄红素提取率的工艺. *食品工业*, 2003, 24(3): 32~33
- 20 Fruser PD, Truesdale MR, Bird CR et al. Carotenoid biosynthesis during tomato fruit development. *Plant Physiol*, 1994, 105: 405~413
- 21 徐娟, 邓秀新. 红肉脐橙果肉中主要色素的定性及色素含量的变化. *园艺学报*, 2002, 29(3): 203~208
- 22 Chappell J. Biochemistry and molecular biology of the isoprenoid biosynthetic pathway in plants. *Ann Rev Plant Physiol Plant Mol Biol*, 1995, 46: 521~547
- 23 刘涤, 胡之璧. 植物类异戊二烯生物合成途径的调节. *植物生理学通讯*, 1998, 34: 1~9
- 24 Cunningham FX Jr, Guntt E. Genes and enzymes of carotenoid biosynthesis in plants. *Annu Rev Plant Mol Biol*, 1998, 49: 557~583
- 25 Eugster CH. Recent progress in carotenoid structures. In: Krinsky NI, Mathews-Roth MM, Taylor RF (eds). *Carotenoids: Chemistry and Biology*. New York: Plenum Press, 1990. 1~20
- 26 Bartley GE, Scolnik PA. Molecular biology of carotenoid biosynthesis in plants. *Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol*, 1994, 45: 287~301
- 27 Alba R, Cordonnier-Pratt M-M, Pratt LH. Fruit-localized phytochromes regulate lycopene accumulation independently of ethylene production in tomato. *Plant Physiol*, 2000, 123: 363~370
- 28 沈德绪. 番茄研究. 北京: 科学出版社, 1957
- 29 Yang RF, Cheng TS, Shewfelt RL. The effect of high temperature and ethylene treatment on the ripening of tomato. *J Plant Physiol*, 1997, 136: 368~372
- 30 Harding RW, Shorppshire W Jr. Photocontrol of carotenoid biosynthesis. *Annu Rev Plant Physiol*, 1980, 31: 217~238
- 31 Thompson WF, White MJ. Physiological and molecular studies of light-regulated nuclear genes in higher plants. *Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol*, 1991, 42: 423~466
- 32 Rau W. Mechanism of photo regulation of carotenoid biosynthesis in plants. *Pure Appl Chem*, 1985, 57: 777~784
- 33 Dogbo O, Laferrière A, D'Harlingue A et al. Carotenoid biosynthesis: isolation and characterization of a bifunctional enzyme catalyzing the synthesis of phytoene. *Proc Natl Acad Sci USA*, 1988, 85: 7054~7058
- 34 Babczinski P, Heinemann U, Sandmann G et al. Inhibition of carotenoid biosynthesis by interaction of 2,6-diphenylpyridine derivatives with phytoene desaturation. *J Agr Food Chem*, 1992, 40: 2497~2499
- 35 陶俊, 张上隆, 张良诚等. MPTA对柑橘果皮类胡萝卜素形成的影响. *植物生理与分子生物学学报*, 2002, 28(1): 46~50
- 36 Bouvier F. Molecular analysis of carotenoid cyclase inhibition. *Arch Biochem Biophys*, 1997, 346: 53~64
- 37 Coggins CW Jr. Lycopene accumulation induced by 2-(4-chlorophenylthio)-triethylamine hydrochloride. *Science*, 1970, 168: 1589~1590
- 38 岑宁, 王杰, 谢继志. 柑橘果皮番茄红素诱导合成研究. *中国南方果树*, 1996, 25(3): 6~7
- 39 Jeffery D, Smith C, Goodenough P et al. Ethylene-independent and ethylene-dependent biochemical changes in ripening tomatoes. *Plant Physiol*, 1984, 74: 32~38
- 40 Theologis A, Oeller PW, Wong LM et al. Use of a tomato mutant constructed with reverse genetics to study fruit ripening, a complex developmental process. *Dev Genet*, 1993, 14(4): 282~295
- 41 Bartley GE, Scolnik PA. Plant carotenoids: pigments for photoprotection, visual attraction, and human health. *Plant Cell*, 1995, 7: 1027~1038
- 42 张建民. 国外番茄红素产品简介(二). *中国医药情报*, 2001, 7(5): 54~57
- 43 张建民. 国外番茄红素产品简介(一). *中国医药情报*, 2001, 7(4): 52~56
- 44 陶俊, 张上隆, 徐昌杰等. 类胡萝卜素合成的相关基因及其基因工程. *生物工程学报*, 2002, 18(3): 276~281