

天然胡萝卜素开发利用状况和设想

王新超, 杨亚军, 陈亮*, 姚明哲, 赵丽萍

(中国农业科学院茶叶研究所农业部茶叶化学工程重点实验室, 浙江杭州 310008)

摘要: 近年来, 胡萝卜素的药理作用研究日益深入, 大量研究表明胡萝卜素是维生素 A 的重要来源, 具有抗氧化、抗癌、抗辐射、增强免疫力等生理和药用价值。不同植物种类之间和品种之间存在显著差异, 通过育种途径来提高植物中胡萝卜素的含量是可行的。提出了开发利用高胡萝卜素含量植物——茶树的设想。

关键词: 胡萝卜素; 药理; 育种; 茶树; 开发利用

中图分类号: Q945.49 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2006)03-0334-04

The exploitation and utilization of natural carotenes in plants

WANG Xin-chao, YANG Ya-jun, CHEN Liang*, YAO Ming-zhe, ZHAO Li-ping

(Key Lab of Tea Chemical Engineering, Ministry of Agriculture, Tea Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310008, China)

Abstract: In recent years, studies on pharmacological functions of carotenes deepen increasingly. A great number of research results indicated that carotenes had some physiological and pharmacological functions, such as anti-oxidation, anti-cancer, anti-radiation, enhanced immunity etc. And carotenes, especially beta-carotene, were the important resource of vitamin A. The carotenes from different plant species and different varieties were significantly different, and it was feasible to increase plant carotenes content through breeding. A tentative plan to utilize carotene-riched plant-tea plant was put forward.

Key words: carotene; pharmacological function; breeding; tea plant; exploitation and utilization

植物胡萝卜素是镶嵌于叶绿体和有色体膜中的脂溶性色素, 具有共轭复烯烃类结构, 依结构可以分为 α -、 β -、 γ -胡萝卜素等 160 多种。它们是很多花、果实及胡萝卜根呈现黄色、橙红色至红色的原因。不少胡萝卜素具有 V_A 原和抗癌活性, 因而是人和动物食物中不可缺少的成分。胡萝卜素也是植物生存所必不可少的。所有植物均能合成胡萝卜素。对其生物合成途径的研究近年来取得巨大进展, 关键基因先后得到克隆, 并已初步实现通过基因工程调控类胡萝卜素合成。有关胡萝卜素的生物合成及其

调控徐昌杰等(2000)已有专文综述, 本文侧重介绍植物胡萝卜素特别是 β -胡萝卜素的生理和营养价值以及开发利用高胡萝卜素资源——茶树的设想。

1 胡萝卜素的生理功能与药用价值

1.1 维生素 A 的重要来源

V_A 是动物体必需的维生素, 缺乏 V_A 会影响到上皮细胞、眼、呼吸道、消化道、泌尿系统及生殖器官的正常功能。动物体内无法合成 V_A , 必须通过饮食

收稿日期: 2005-02-25 修回日期: 2005-08-15

基金项目: 浙江省分析测试基金项目资助(04027)[Analyzing and Measuring Foundation of Zhejiang Province(04027)]

作者简介: 王新超(1975-), 男, 安徽霍邱人, 助理研究员, 硕士, 主要从事茶树资源育种与分子生物学研究。

* 通讯作者(Author for correspondence, E-mail: Liangchen@mail.tricaas.com)

来补充。其中除直接获得 V_A 外,将摄入体内的胡萝卜素通过一定的途径转化为 V_A 是一条非常重要的途径,特别是 β -胡萝卜素,一分子可以转化为两分子 V_A 。据报道,全世界特别是发展中国家人体所需 V_A 的 60%~70% 来源于食物中的 β -胡萝卜素(李全顺, 2002)。

1.2 抗氧化作用

在人体正常的新陈代谢过程中或受到强烈的紫外线照射后,会产生大量的自由基,对核酸、蛋白质、细胞膜、细胞等产生损伤,导致细胞突变或死亡。胡萝卜素的抗氧化活性可以清除自由基,减轻自由基对细胞造成的损害。如 Keaney 等(1993)发现,摄入 β -胡萝卜素可以增加血管组织中的抗氧化能力,维护血管的扩张功能,缓解动脉粥样硬化症状。马爱国等(1999)的结果认为 β -胡萝卜素可以有效降低 H_2O_2 所致的 DNA 损伤。叶琳等(2003)发现 β -胡萝卜素可以降低烹调油烟所导致的肺脂质过氧化,保护肺泡巨噬细胞膜免受损伤。

1.3 抗癌作用

胡萝卜素能够抑制癌细胞增殖,损伤癌细胞 DNA,调控癌细胞基因的表达,达到防癌抗癌的目的。如 Prakash 等(2002)通过培养肺癌细胞株 NCI-H69 发现,添加 $20 \mu\text{mol/L}$ β -胡萝卜素的处理可以比对照显著降低 NCI-H69 增殖率。许彦枝等(2001)发现胡萝卜素能够逆转由 DMBA(二甲基苯并蒽)诱发的动物口腔癌前病变。李忠等(2003)利用基因芯片技术,比较了 β -胡萝卜素处理前后乳腺癌细胞基因表达的差异,筛选出 21 个差异表达基因,涉及细胞凋亡、细胞信号转导、蛋白翻译合成、免疫等。说明 β -胡萝卜素可能通过诱导细胞凋亡、阻断细胞信号转导、蛋白翻译合成等途径抑制癌细胞的增殖。

1.4 增强免疫力

胡萝卜素具有提高免疫力的功效。Michal 等(1994)认为, β -胡萝卜素可通过增效机体内淋巴细胞和巨噬细胞的功能来提高免疫力,降低病变发生的几率。Dayid(1995)发现,每天口服 β -胡萝卜素 180 mg 的 HIV 感染病人的白细胞总数和 T 辅助细胞数明显上升,灌胃天然 β -胡萝卜素丸的小白鼠,其免疫器官胸腺脾的重量增加,单核巨噬细胞的吞噬指数提高,使血浆溶血素抗体升高。Chew 等(2000)比较了饲喂与不饲喂 β -胡萝卜素的两组狗血浆中的成分,发现 β -胡萝卜素可提高血浆中 IgG 的含量,增强免疫力。

1.5 抗辐射作用

胡萝卜素的抗辐射作用机制主要表现在能够淬灭由射线诱发生成的自由基,修复射线对细胞的损伤。Umegaki 等(1997)研究表明,饲喂胡萝卜素可以通过它的抗氧化活性和/或 V_A 活性来阻止 X-射线引起的损伤。张世平等(2000)认为, β -胡萝卜素能直接抑制和淬灭由射线所引起的活性单线态氧,阻断过氧化应激状态,促进 SOD、 H_2O_2 酶的释放,减轻辐射所引起的不适。

2 通过育种途径提高植物体胡萝卜素含量的可能性

2.1 不同植物胡萝卜素的含量差异

胡萝卜素广泛分布于各种植物中,但不同品种植物的含量存在显著差异。在深色泽植物中含量较多,而在粮食作物中含量较少。表 1 列出几种常见植物胡萝卜素的含量。由表 1 看出,大部分植物的胡萝卜素含量都较低,即使胡萝卜也不例外,作为人类日常食用的粮食作物含量更低。据统计,在亚洲、非洲、拉丁美洲等发展中国家以水稻、小麦和玉米为主食的国家,每年有几百万人患有维生素 A 缺乏症,导致失明、免疫力下降和早衰(WHO, 1996)。正因为胡萝卜素有上述的功能,为了补充胡萝卜素摄入量不足,开发胡萝卜素类的保健品和药品成为一个热点。胡萝卜素的获得有 3 个渠道,一是化学合成,二是生物合成,三是从植物中提取。有研究指出,化学合成的胡萝卜素摄入量较大时,会产生较大的毒副作用,而天然胡萝卜素则不会或毒性较小。所以从开发药品和保健品的角度出发,获得天然胡萝卜素是理想途径(苏毅等, 2001)。生物合成法是通过微生物的培养,利用微生物在其体内合成胡萝卜素,然后从微生物体内分离得到胡萝卜素的方法。目前主要是利用杜氏盐藻富集胡萝卜素的特性来生物合成提取胡萝卜素。但杜氏盐藻对生活环境条件的要求较高,只能局限在特定地区。螺旋藻中胡萝卜素含量虽然较高(6.75 mg/g),但其培养成本也较高,全世界总产量 4 000 t 左右,所以限制了这一方法的推广利用,其他微生物发酵技术尚处于探索阶段(施跃峰, 2000; 杨雪莲等, 2004)。通过从高等植物中提取天然胡萝卜素正成为规模化生产胡萝卜素的一种最佳选择。利用植物资源提取天然胡萝卜素的研究尚处于起步阶段,又因高含量的资源较稀

少,所以目前还没有大规模应用。但这是一个重要的发展方向(马文平等,2002)。

表 1 几种植物的 β -胡萝卜素含量比较(单位:mg/kg 干重)
Table 1 Beta-carotene content in some plant species

植物种类 Plant species	β -胡萝卜素含量 β -carotene content
枸杞 Medlar(李忠等,1999)	1 920.0
苜蓿 Clover(丁毅等,2001)	620.0
茶叶 Tea(陈宗懋,2000)	600.0
番茄 Tomato(王强等,1997)	365.5
辣椒 Hot pepper(吴明光等,1993)	300.0
山药 Yam(张兵等,1996)	236.2
胡萝卜 Carrot(耿三省等,1996)	144.0
甘薯 Sweet potato(张立明等,2003)	117.0
南瓜 Squash(吴增茹等,1998)	71.60
玉米 Maize(吉宏武等,1998)	4.80
小麦 Wheat(Graham 等,2000)	2.00
水稻 Rice(Graham 等,2000)	1.20

2.2 提高植物胡萝卜素含量的途径

从表 1 看到,各种植物的胡萝卜素的含量比较低。如何提高植物的胡萝卜素含量?通常有两种方法:

2.2.1 转基因技术 将控制胡萝卜素合成的基因转入植物体内,培育转基因植物。通过农杆菌介导法将控制胡萝卜素合成途径的基因转入水稻,已培育出富含胡萝卜素的转基因水稻(gold-rice),其胡萝卜素含量是普通稻米的 3~4 倍(Ye 等,2000; Hoa 等,2003)。Romer 等(2000)对转基因番茄的研究发现,虽然类胡萝卜素总量没有变化,但 β -胡萝卜素含量提高了 3 倍。D'Ambrosio 等(2004)研究表明,转基因番茄到第三代后,其类胡萝卜素总量和 β -胡萝卜素含量都大幅度提高,特别是 β -胡萝卜素的含量提高显著,比对照提高 24~47 倍以上,且这一性状可稳定遗传。虽然转基因技术为提高胡萝卜素含量打开了一扇方便之门,但还处于探索阶段,离实用还有一段距离。

2.2.2 常规育种技术 已有的研究认为,胡萝卜素的含量是可遗传的数量性状。如对胡萝卜的研究认为其胡萝卜素含量性状由 3 个主基因和许多微效基因控制,番茄的胡萝卜素含量由超过 20 个的基因控制,而玉米上发现一个与胡萝卜素含量有关的主效基因为不完全显性,控制黄色位点(Graham 等,2000)。汪炳良等(1993)对番茄果实的胡萝卜素含量进行的配合力分析表明,各基因型间胡萝卜素含量存在明显差异,双亲的一般配合力效应值和组合的特殊配合力效应值与杂交后代的表现型密切相

关。Iglesias 等(1997)对 632 份木薯种质的胡萝卜素含量进行测定的结果发现,不同类型种质间差别显著。对胡萝卜素含量的遗传学研究表明,木薯中的两个基因对其胡萝卜素含量的作用很大, Y_1 完全显性,控制着胡萝卜素向根部的运输, Y_2 为部分显性,控制根部胡萝卜素的积累,且 Y_1 对 Y_2 具有上位性,还有其它的一些微效基因参与调控。谢一芝等(1998)认为,甘薯基因型间的胡萝卜素含量差异可达 0~25 mg/100g 鲜薯,且该性状遗传力高,后代有超亲现象,使高胡萝卜素含量品种选育成为可能。Wong 等(2004)在玉米上发现与控制玉米子粒类胡萝卜素积累的 2 个候选基因 *yellow1* 和 *viviparous 9* 紧密连锁的 QTL 标记,可以为玉米类胡萝卜素含量的遗传改良提供有效的分子辅助选择手段。以上研究表明,利用育种方法是可以提高植物胡萝卜素含量的。目前,由国际热带农业研究中心(CIAT)与国际食物政策研究所(IFPRI)组织的 Harvest Plus Program 正在发展中国家开展提高粮食作物微量营养素含量的研究计划,其中一个重要的内容就是通过育种等手段提高粮食作物的 β -胡萝卜素含量,以补充人们 V_A 摄入量的不足。

3 开发利用高胡萝卜素茶树资源的设想

茶树上的胡萝卜素主要分布于叶片中,主要包括 α -、 β -、 γ -胡萝卜素、 β -玉米胡萝卜素及它们的氧化物。1965 年首次从茶树新梢中分离鉴定出胡萝卜素各种组分,在茶叶中一般含量为 0.06%,成熟叶比嫩叶含量多,其中,主要组分 β -胡萝卜素约占总量的 80%。茶变种(*Camellia sinensis* var. *sinensis*)胡萝卜素含量为阿萨姆变种(*C. sinensis* var. *assamica*)的 2~3 倍,但阿萨姆变种具有较高的 β -玉米胡萝卜素。胡萝卜素类作为茶叶脂溶性色素的主要组成成分,在茶叶叶底色泽和外形色泽中起重要作用。在茶叶制造过程中,尤其是红茶制造中,胡萝卜素类色素大量氧化降解形成紫罗酮系列化合物,如 α -、 β -紫罗酮等。对红茶香气的形成起重要作用(陈宗懋,2000)。

与其他植物相比较而言,茶叶(特别是绿茶)中的胡萝卜素含量很高,特别是高生物活性的 β -胡萝卜素含量很高,是一种有极大开发利用价值的胡萝卜素提取资源(表 1)。遗憾的是,有关茶叶生物活

性物质的研究利用多集中于茶多酚类物质,而忽略了胡萝卜素类物质的研究和开发利用。但就上面所提及的研究看,开发茶叶的胡萝卜素大有可为:一是我国的茶园面积大(世界第一),绿茶产量高,大宗茶总量比重大,价格便宜,原料成本低;二是可以利用夏秋季的粗老叶和修剪叶为原料,因为老叶中的胡萝卜素含量比嫩叶中的高。我国作为茶树的原产地,拥有世界上最丰富的种质资源。对这些资源进行深入研究,必定能发掘出高胡萝卜素含量的资源,供工业化提取胡萝卜素利用。当前,主要工作目标一是从现有资源中筛选高胡萝卜素种质,二是将选育高胡萝卜素品种和选育高茶多酚、高咖啡碱、高茶氨酸新品种结合起来。因为这些功能性成分已实现了工业化的提取生产,可以综合利用。目前,我们实验室正在进行第一个方面的研究工作。

参考文献:

- 马文平,叶力勤. 2002. 利用枸杞开发 β -胡萝卜素[J]. 中药材,25(12):861-863.
- 陈宗懋. 2000. 中国茶叶大辞典[M]. 北京:中国轻工业出版社:335.
- 张兵,谢九皋. 1996. 山药营养成分的研究[J]. 湖北农业科学,6:56-58.
- 张世平,张颖,粟学军,等. 2000. β -胡萝卜素和维生素E抗辐射作用的临床研究[J]. 白求恩医科大学学报,26(5):509-510.
- 施跃峰. 2000. 天然 β -胡萝卜素研究开发动态[J]. 食品研究与开发,21(2):13-16.
- 耿三省,张平,王健萱. 1996. 胡萝卜中胡萝卜素含量测定方法[J]. 北京农业科学,14(2):24-26.
- 谢一芝,邱瑞濂,戴起伟,等. 1998. 甘薯胡萝卜素含量的变化及高胡萝卜素育种[J]. 国外农学—杂粮作物,18(4):43-46.
- Baron JA, Cole BF, Mott L, et al. 2003. Neoplastic and antineoplastic effects of β -carotene on colorectal adenoma recurrence: results of a randomized trial[J]. *Journal of National Cancer Institute*, 95(10):717-722.
- Chew BP, Park JS, Wong TS, et al. 2000. Dietary β -carotene stimulates cell-mediated and humoral immune response in dogs[J]. *J Nutr*, 130:1910-1913.
- D'Ambrosio C, Giorio G, Marino I, et al. 2004. Virtually complete conversion of lycopene into β -carotene in fruits of tomato plants transformed with the tomato lycopene β -cyclase (tlcy-b) cDNA[J]. *Plant Sci*, 166:207-214.
- Dayid AF. 1995. The effect of supplemental beta-carotene on immunologic in dose in patients with IS, a pilot study[J]. *Yale Biol Med*, 68(1):19.
- Ding Y(丁毅), Liu XY(刘晓颖), Ding ZF(丁在富), et al. 2001. Determination of β -carotene in alfalfa(苜蓿中 β -胡萝卜素的含量测定)[J]. *Chin J Biochem Pharm*(中国生化药物杂志), 22(1):37-38.
- Graham RD, Rosser JM. 2000. Carotenoids in staple foods: Their potential to improve human nutrition[J]. *Food and Nutrition Bulletin*, 21(4):404-409.
- Hoa TT, Al-Babli S, Schaub P, et al. 2003. Golden Indica and Japonica rice lines amenable to deregulation[J]. *Plant Physiol*, 133:161-169.
- Iglesias C, Mayer J, Chavez L, et al. 1997. Genetic potential and stability of carotene content in cassava roots[J]. *Euphytica*, 94:367-373.
- Ji HW(吉宏武), Wang ZS(王增盛), Shi ZP(施兆鹏). 1998. Separation and determination of carotenoids in corn grain by HPLC(高效液相色谱分离测定玉米类胡萝卜素)[J]. *J Hubei Agri Coll*(湖北农学院学报), 18(3):209-212.
- Keaney JF, JR, Gaziano JM, et al. 1993. Dietary antioxidants preserve endothelium-dependent vessel relaxation in cholesterol-fed rabbits[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 90:11880-11884.
- Li QS(李全顺). 2002. Research on beta-carotene and the advancement(β -胡萝卜素的研究进展)[J]. *J Liaoning Univ*(*Nat Sci Edi*)(辽宁大学学报(自然科学版)), 29(3):203-208.
- Li Z(李志), Hu CY(胡春艳), Mo BQ(莫宝庆), et al. 2003. Effect of β -carotene on gene expression of breast cancer cells (β -胡萝卜素对乳腺癌细胞基因表达的影响)[J]. *Chin J Cancer*(癌症), 22(4):380-384.
- Li Z(李志), Peng GH(彭光华), Zhang SH(张声华). 1999. Composition and content of carotenoids in fructus lycii(枸杞子中类胡萝卜素的组成及含量)[J]. *J Plant Res Env*(植物资源与环境), 8(4):57-58.
- Ma AG(马爱国), Duthie SJ, Ross MA, et al. 1999. Effects of vitamins E, C and β -carotene on DNA damage(维生素E、C和 β -胡萝卜素对DNA损伤的影响)[J]. *Chin J Prev Med*(中华预防医学杂志), 1:16-17.
- Ma GJ(马国建), Xue KX(薛开先), Wu JZ(吴建中), et al. 1998. Antimutagenic effects of β -carotene from *Dunaliella salina*(盐藻 β -胡萝卜素抗突变效应)[J]. *Acta Pharmacologica Sin*(中国药理学报), 19(3):282-284.
- Michal JJ, Heirman LR, Wong TS, et al. 1994. Modulatory effects of dietary β -carotene on blood and mammary leukocyte function in periparturient dairy cows[J]. *J Dairy Sci*, 77:1408-1421.
- Prakash P, Manfred TG, Jackson CL, et al. 2002. β -Carotene alters the morphology of NCI-H69 small cell lung cancer cells[J]. *J Nut*, 132:121-124.
- Romer S, Fraser PD, Kiano JW, et al. 2000. Elevation of the provitamin A content of transgenic tomato plants[J]. *Nat Biotechnol*, 18(6):666-669.
- Su Y(苏毅), Luo KB(罗康碧), Li HP(李沪萍). 2001. Progress on the production of β -carotene (β -胡萝卜素的制备研究进展)[J]. *Yunnan Chem Tech*(云南化工), 28(6):5-8.
- Umegaki K, Uramoto H, Suzuki J, et al. 1997. Feeding mice palm carotene prevents DNA damage in bone marrow and reduction of peripheral leukocyte counts, and enhances survival following X-ray irradiation[J]. *Carcinogenesis*, 18(10):1943

在对红根草继代培养过程中我们发现,继代培养与初代培养所需的 BA 浓度大不相同,初代为 0.8~1.6 mg/L,继代培养仅需 0.2 mg/L,若再升高则易出现玻璃化。此结果与黄炼栋等(1998)的研究结果有较大差异。在我们的实验中,玻璃化程度随 BA 浓度变化的现象与有关玻璃苗问题的研究结论相符合,即细胞激动素的过剩是玻璃苗发生的最初胁迫因子,及培养基中 BA 浓度与玻璃化成正相关(曹孜义等,2002)。因此红根草继代培养的 BA 浓度不能过高,以 0.2 mg/L 为佳,为了保证培养材料的质量,在继代培养中可以 MS 和 MS+BA 0.2 mg/L+NAA 0.02 mg/L 两种培养基交替使用。

本试验通过系统研究已建立起了一套完整的红根草组培快繁技术,这对今后的工厂化育苗及对有效成分的提取和利用有重要意义。

参考文献:

- 崔德才,徐培文. 2003. 植物组织培养与工厂化育苗[M]. 北京:化学工业出版社,32.
- 曹孜义,刘国民. 2002. 实用植物组织培养技术教程[M]. 兰州:甘肃科学技术出版社,68—72.
- 张 锋,张文娟. 2003. 红根草提取物对血小板膜流动性及 5-HT 释放的影响[J]. 中成药,25(7):U002.
- Zhang JS(张金生),Huang Y(黄 勇). 1995. Two new diterpenoids, prioketolactone and neopriotonite, from *Salvia prionitis* (红根草中的新二萜红根草酮内酯和新红根草酮)[J]. *Nat Product Res Development* (天然产物研究与开发),7(4):1—4.
- Yang BJ(杨保津),Huang XL(黄秀兰),Huang Y(黄 勇), et al. 1988. Study on the chemical constituents of *Salvia prionitis* (红根草化学成分的研究)[J]. *Acta Bot Sin* (植物学报),30(5):524—527.
- Huang LD(黄炼栋),Xu YZ(徐寅泽),Hu ZB(胡之璧). 1998. *In vitro* propagation of *Salvia prionitis* (红根草的离体快速繁殖)[J]. *Plant Physiol Commun* (植物生理学通讯),34(5):365.
- (上接第 337 页 Continue from page 337)
- 1 947.
- Wang BL(汪炳良),Chen ZJ(陈竹君),Li SX(李曙轩). 1993. Analysis of combining ability of lycopene and carotene contents in tomatoes (*Lycopersicon esculentum* Mill) (番茄果实内茄红素和胡萝卜素含量的配合力分析)[J]. *J Zhejiang Agri Univ* (浙江农业大学学报),19(1):82—86.
- Wang Q(王 强),Han YS(韩雅珊),Dai YQ(戴蕴青), et al. 1997. Simultaneous determination of five carotenoids in tomato by reversed-phase high performance liquid chromatography (反向高效液相色谱法同时测定番茄中 5 种类胡萝卜素)[J]. *Chin J Chromatography* (色谱),15(6):534—536.
- Wong JC, Lambert RJ, Wurtzel ET, et al. 2004. QTL and candidate genes phytoene synthase and ζ -carotene desaturase associated with the accumulation of carotenoids in maize[J]. *Thero Appl Genet*,108(2):349—359.
- World Health Organization. 1996. Trace elements in human nutrition and health[M]. Geneva:WHO.
- Wu MG(吴明光),Zhong CX(钟灿兴). 1993. Isolation and identification of the chemical constituents with biological activity in capsicum fruit (辣椒果实生物活性化学组分的分离与鉴定)[J]. *J Xiamen Univ* (Nat Sci) (厦门大学学报(自然科学版)),32(3):341—344.
- Wu ZR(吴增茹),Jin TM(金同铭). 1998. Determination of β -carotene in different pumpkin varieties by HPLC (用高效液相色谱法测定不同品种南瓜中的 β -胡萝卜素的含量)[J]. *Acta Agri Boreali-Sin* (华北农学报),13(3):141—144.
- Xu CJ(徐昌杰),Zhang SL(张上隆). 2000. Carotenoid biosynthesis and its regulation in plants (植物类胡萝卜素的生物合成及其调控)[J]. *Plant Physiol Commun* (植物生理学通讯),36(1):64—70.
- Xu YZ(许彦枝),Li SC(李少成),Wang XL(王小玲), et al. 2001. An experimental study of the effects of natural carotene on DMBA-induced oral buccal mucosa premalignant lesion in golden hamsters (天然胡萝卜素对金黄地鼠颊黏膜癌前病变逆转作用的实验研究)[J]. *J Modern Stomatol* (现代口腔医学杂志),15(3):174—175.
- Yang XL(杨雪莲),Guo JB(郭敬斌). 2004. Prospects of development and use of Spirulina (螺旋藻的开发及利用前景)[J]. *Beverage Industry* (饮料工业),7(2):5—7.
- Ye L(叶 琳),Sui CS(隋春生),Ren SP(任淑萍), et al. 2003. Protective effect of β -carotene on alveolar macrophage of rats caused by cooking oil fume (β -胡萝卜素对大鼠肺泡巨噬细胞膜的保护作用)[J]. *Chin J Public Health* (中国公共卫生),19(10):1 218—1 219.
- Ye X, Al-Babili S, Klöti A, et al. 2000. Engineering the provitamin A (β -carotene) biosynthetic pathway into (carotenoid-free) rice endosperm[J]. *Science*,287:303—305.
- Zhang LM(张立明),Wang QM(王庆美),Wang YD(王荫桦). 2003. The main nutrient components and health care function of sweet potato (甘薯的主要营养成分和保健作用)[J]. *Rain Fed Crops* (杂粮作物),23(3):162—166.