

· 热点评 ·

## 虾青素功能米：生物强化新思路，优质米培育新资源

朱丽，钱前\*

中国水稻研究所水稻生物学国家重点实验室，杭州 311401

**摘要** 虾青素是一种红色的类胡萝卜素，与其它类胡萝卜素或维生素E相比具有更强的抗氧化活性，在延缓衰老、提高免疫力、防治糖尿病和心血管疾病等方面均有功效，目前已广泛应用于制药、保健和日化等行业。但其合成必需基因**BKT**仅存在于部分微藻、细菌和酵母中，大多数高等动、植物中并不存在。人类仅可以从三文鱼、贝类和鳕鱼等海洋生物中少量摄取虾青素。水稻(*Oryza sativa*)作为世界上最重要的粮食作物，是全世界近1/2 (我国2/3)人口的主粮。稻米中缺乏类胡萝卜素前体，因此无法自主合成虾青素，且多年来在水稻中人工合成虾青素的尝试均未获得成功。近期，中国科学家首次利用自创的多基因垛叠表达系统，成功获得了富含 $\beta$ -胡萝卜素的黄金米，富含角黄素的角黄素米和富含虾青素的赤晶米，实现了从前体、中间产物到终产物的精准合成。

**关键词** 虾青素，生物强化，多基因转化，水稻

朱丽，钱前 (2019). 虾青素功能米：生物强化新思路，优质米培育新资源. 植物学报 54, 4–8.

氧化胁迫是生物体内最常见的一种胁迫现象。生理状态下，细胞利用其内部复杂的调控网络，清除生物体产生的有毒和有害副产品，保持代谢平衡。但当外部环境胁迫加剧或细胞内部出现衰老等情况时，代谢毒副产品与清除物间的平衡被打破，毒副产品积累进而导致细胞毒性(Harman, 1956; Valko et al., 2007; Salim, 2017; Bjørklund and Chirumbolo, 2017)。活性氧(ROS)/活性氮(RNS)与生物体抗氧化防御系统间的不平衡是产生氧化胁迫/氧化应激的主要原因。ROS在细胞中的积累会造成DNA、蛋白质及脂质的损伤，并进一步损害组织和器官(Noctor et al., 2015; Staerck et al., 2017; Andrisic et al., 2018)。作为高耗氧组织的人类大脑，富含各种脂类物质，对氧化胁迫尤为敏感(Salim, 2017)。近年来，越来越多的研究表明，人体中的氧化应激反应与众多衰老及中枢神经性疾病的发生密切相关，如帕金森综合症(Kim et al., 2018; Macedo et al., 2018)、慢性进行性舞蹈病(Gil-Mohapel et al., 2014; Franco-Iborra et al., 2018; Zheng et al., 2018)及阿尔茨海默病等(Sorce and Krause, 2009; Salim, 2017)。因此，如何提高机体细胞内源的抗氧化能力，已日益成为预防和治疗的新的研究方向(Irwin et al., 2016; 李立科等, 2017)。类胡萝卜素作为一种天然的植物源四萜类化

合物，除可使植物呈现不同的颜色外，还具有抗氧化特性(Sun et al., 2018)。脂溶性类胡萝卜素——虾青素(astaxanthin) (学名3, 3'-二羟基-4, 4'-二酮基 $\beta$ -胡萝卜素)，比其它类胡萝卜素或维生素E具有更强的抗氧化活性，可延缓衰老、提高免疫力、防治糖尿病和心血管疾病等，已广泛用于制药、营养品、化妆品和水产养殖等行业(Naguib, 2000; Pashkow et al., 2008; Zhu et al., 2009; Nogueira et al., 2017)。自然界中，虾青素仅在一些微藻、细菌和酵母中合成，大多数高等植物和动物中未见存在。部分海洋生物(如虾类、贝类、鲑鱼和鳕鱼等)通过吞食这些微藻和细菌在体内积累虾青素，人类则主要从这些海洋食物中摄取(或提取)虾青素(Chen et al., 2015)。因此，利用高等植物尤其是重要农作物合成虾青素是生物强化工程的极佳策略。

已有很多关于天然植物如枸杞(*Lycii fructus*)(富含枸杞多糖、枸杞色素、类黄酮及甜菜碱等)、山楂(*Crataegus pinnatifida*)(富含熊果酸、皂苷、有机酸、色素及黄酮类物质等)和山药(*Dioscoreae rhizoma*)(富含山药多糖和皂苷类物质等)，所含有效成分在人体抗氧化、抗衰老及缓解衰老相关疾病等方面作用的报道(魏安池等, 2003; Wong et al., 2006; 刘海英等, 2009; 薛立英等, 2017)。但是这些动植物资

收稿日期: 2018-10-11; 接受日期: 2018-12-10

\* 通讯作者。E-mail: qianqian188@hotmail.com

源绝大部分来自自然进化, 所含成分复杂且有效成分占比少, 如果大量食用, 非有效成分产生副作用的可能性较大。因此, 开发新的有效成分占比高且特异性好的功能型、营养型食材已成为研究热点。生物强化是指通过常规育种或基因工程手段在作物中增加微量营养素或植物营养素。事实证明, 这种方法可极大地改善人类营养状况和促进身体健康(Bouis and Saltzman, 2017)。经过多年的努力, 科研人员目前已开发出一系列富含营养素的生物强化作物, 如富含胡萝卜素的金稻2号(Paine et al., 2005)、富含叶酸的水稻(Blancquaert et al., 2015)、富含维生素B<sub>6</sub>的木薯(*Manihot esculenta*) (Li et al., 2015)和富含花青素的紫晶米(Zhu et al., 2017)等。这些功能性作物的开发和利用将有助于提高人类的健康水平。

虾青素是一种红色的类胡萝卜素, 其抗氧化活性是维生素E的550倍, 由 $\beta$ -胡萝卜素羟化酶(BHY)和 $\beta$ -胡萝卜素酮化酶(BKT)催化合成(Higuera-Ciapara et al., 2006)。BHY基因在高等植物中广泛存在而BKT基因则仅存在于部分微藻、细菌和酵母中, 大多数高等动、植物中都没有该基因, 因此无法产生酮类胡萝卜素(Cunningham and Gantt, 2005)。水稻作为世界上最重要的粮食作物, 是全世界近1/2 (我国2/3)人口的主粮。然而稻米中缺乏类胡萝卜素前体无法自主合成虾青素, 而且多年来在水稻中人工合成虾青素的尝试均未获得成功(Bai et al., 2017)。多个基因反复转化或多个转基因材料杂交, 都可以达到多基因垛叠表达的效果, 但前者受制于选择标记的匮乏, 后者则需要更长的研究周期(朱丽和钱前, 2017)。利用多基因串联的单载体转化、2个或2个以上载体共转化同一受体细胞的方法虽然可以解决这些问题, 但受限于载体容量和表达效率, 5个以上基因的表达一直是多基因转化和表达的瓶颈(Hamilton et al., 1996; Liu et al., 1999, 2002; Farhi et al., 2011)。2017年, 华南农业大学刘耀光研究团队首次利用自创的TGSII系统, 成功在水稻胚乳中表达了8个花青素合成及调控相关的外源基因, 突破了多基因转化的技术壁垒, 获得了无标记且胚乳高效合成花青素的水稻新种质(Zhu et al., 2017)。在此基础上, 2018年刘耀光研究团队再次利用TGSII系统, 成功在水稻胚乳中表达了4个虾青素合成相关的外源基因, 创制了无选择标记且胚乳高效合成虾青素的功能米(Zhu et al., 2018)。

类胡萝卜素/酮类胡萝卜素/虾青素的生物合成受多基因控制, 不同的基因在合成过程中各司其职, 缺一不可, 但参与这一过程的基因以及各基因编码蛋白的分工均不明确。Bai等(2017)在水稻中共转化PSY(八氢番茄红素合酶)、CrtI(八氢番茄红素脱氢酶)和BKT三个基因, 但并未获得虾青素积累的转基因水稻(Bai et al., 2017)。因此, 要获得虾青素积累的水稻, 明确其生物合成机制是关键。为此, 研究人员通过转基因方法, 系统分析和总结了类胡萝卜素/酮类胡萝卜素/虾青素的生物合成途径, 明确了合成途径中必需的基因及其编码蛋白的各自分工。水稻有不同的组织器官, 如根、茎、叶、鞘和穗, 而我们仅食用稻米的胚乳部分。如何使外源基因特异地在胚乳中表达并在其中积累虾青素是需要解决的又一个难题。Sato等(2013)通过分析公共转录组数据, 发现水稻胚乳内源类胡萝卜素合成基因(包括OsBHY)发生了沉默或表达水平极低, 因此无法自主合成类胡萝卜素前体。成功培育富含 $\beta$ -胡萝卜素的金稻2号, 为胚乳中积累虾青素解决了前体合成问题(Paine et al., 2005)。基于此, 研究人员推测, 水稻胚乳中虾青素的有效生物合成可能需要引进和表达BKT、BHY、PSY及CrtI基因。通过密码子优化, 他们分别合成了玉米(*Zea mays*)的sZmPSY1、菠萝泛菌(*Pantoea ananatis*)的sPaCrtI、莱茵衣藻(*Chlamydomonas reinhardtii*)的sCrBKT和雨生红球藻(*Haematococcus pluvialis*)的sHpBHY基因。由于类胡萝卜素合成的中间产物以及最终产物均在质体中合成, 研究人员又在这些合成基因编码蛋白质氨基酸序列的N端融合了豌豆(*Pisum sativum*) Rubisco小亚基的质体转运肽序列(Coruzzi et al., 1984)。利用水稻球蛋白基因Glb1以及水稻谷蛋白基因GluB4、GluC和GluB1中胚乳特异性启动子分别与sZmPSY1、sPaCrtI、sCrBKT和sHpBHY构建了4个供体载体表达盒, 通过TGSII系统的组装, 最终获得了多基因表达载体pYLAC380MF-BhBkPC, 它可以携带4个虾青素合成基因(转化株系AR系)。同时, 研究人员还制备了2个对照载体, 即包含sZmPSY1和sPaCrtI基因的pYLAC380MF-PC载体(转化株系GR系)以及包含sZmPSY1、sPaCrtI和sCrBKT基因的pYLAC380MF-BkPC载体(转化株系CR系)。pYLAC380MF-PC载体的转化预计可以获得类似金稻2号的黄金米(Paine et al., 2005), 而pYLAC380-

MF-BkPC载体的转化可以检测在缺失*BHY*基因的条件下,水稻胚乳内源*OsBHY*的表达量是否足以支撑虾青素的合成。如果内源*OsBHY*的表达量不足,pYLAC380MF-BkPC转化的稻米中则仅有角黄素合成。利用农杆菌介导法将这些载体分别转化籼稻品种华光1号,转基因株系分析表明,AR系中均富集了虾青素,稻米呈晶莹剔透的红色,故又称“赤晶米”,GR系获得了类似金稻2号的黄金米,CR系则富含角黄素。

PCR分析证实,外源基因在不同世代的转基因水稻中稳定遗传,且CRE/LoxP功能正常。对筛选标记进行精准切除,确保所有转基因阳性株中均不含筛选标记。除籽粒颜色外,虾青素转基因植株的其它农艺性状并未发生改变。后续,研究人员通过高效液相色谱法和定量分析法进一步测定了不同转基因系中 $\beta$ -胡萝卜素、角黄素及虾青素的成分及含量,发现AR-H8株系中虾青素的含量最高( $16.23 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  DW),约占类胡萝卜素总量( $21.94 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  DW)的74%。GR-H1株系中富集的 $\beta$ -胡萝卜素为 $24.73 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  DW,约占类胡萝卜素总量( $27.56 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  DW)的80%,与金稻2号中的含量相近(Paine et al., 2005)。而CR-H2株系中富集的角黄素为 $25.8 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  DW,占类胡萝卜素总量( $31.4 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  DW)的82%,远高于Bai等(2017)获得的转基因株系。由于AR系中虾青素/类胡萝卜素的比值达0.60–0.74,证明*sHpBHY*的活性不是虾青素生物合成的限制因素。此外,研究者推断,在现有基因基础上,通过增加表达上游2C-甲基-D-赤藓糖醇4-磷酸(MEP)通路的一些关键基因,如1-脱氧-D-木糖-5-磷酸合成酶编码基因*DXS*和八氢番茄红素合成调控基因*OR*,将有助于进一步促进转基因水稻中虾青素的积累(Giuliano, 2014; Zhou et al., 2015; Bai et al., 2016; Zhu et al., 2018)。虾青素的主要作用是抗氧化,因此研究人员利用氧自由基吸收能力测定法测定了不同转基因株系的抗氧化能力。结果表明,AR系在3种转基因株系中的抗氧化能力最强,GR系与CR系差别不大,CR系略低。AR系中虾青素的抗氧化能力高于其它类型的类胡萝卜素。袁超和金征宇(2010)研究表明,在加热的条件下,虾青素的分解温度为 $250^{\circ}\text{C}$ 。因此,AR系稻米中的虾青素并不会因蒸煮造成降解和失活。虾青素功能米不仅可作为日常的保健膳食,还可用于浓缩和提取虾青素,在食品、制药、

饲料和日化等领域具有广阔的应用前景。

另外,一系列的实验还证明,胚乳特异性启动子驱动下的2个(*sZmPSY1*和*sPaCrtI*)、3个(*sZmPSY1*、*sPaCrtI*和*sCrBKT*)或4个(*sZmPSY1*、*sPaCrtI*、*sCrBKT*和*sHpBHY*)基因表达盒,可以在水稻胚乳中稳定构建类胡萝卜素/酮类胡萝卜素/虾青素的生物合成途径。同时也证明了至少有4种基因(*sZmPSY1*、*sPaCrtI*、*sCrBKT*和*sHpBHY*)参与虾青素的生物合成。这一研究不仅是多基因转化技术体系的进一步完善,也是虾青素在水稻胚乳中从头合成技术壁垒的首次突破。通过该项研究,刘耀光研究团队分别获得了富含 $\beta$ -胡萝卜素的黄金米、富含角黄素的角黄素米和富含虾青素的赤晶米,实现了从前体、中间产物到终产物的精准合成,为更多功能性稻米的开发提供了新思路 and 重要依据,也为合成生物学中复杂代谢工程的解析及植物多基因调控农艺性状的改良提供了有益参考。

## 参考文献

- 李立科, 史良琴, 刘衡, 罗启慧, 黄超, 刘文涛, 陈晓林, 陈正礼 (2017). 左旋多巴和氯吡啶啉治疗对帕金森病猕猴血清抗氧化能力的影响. 浙江大学学报(农业与生命科学版) **43**, 371–376.
- 刘海英, 仇农学, 姚瑞祺, 穆伟航 (2009). 我国86种药食两用植物的抗氧化活性及其与总酚的相关性分析. 西北农林科技大学学报(自然科学版) **37**(2), 173–180.
- 魏安池, 代红丽, 周瑞宝 (2003). 56种植物原料抗氧化性能研究. 粮食与油脂 (7), 11–12.
- 薛立英, 高丽, 秦雪梅, 杜冠华, 周玉枝 (2017). 药食同源中药抗衰老研究进展. 食品科学 **38**, 302–309.
- 袁超, 金征宇 (2010). 虾青素的热稳定性及分解动力学. 天然产物研究与开发 **22**, 1085–1087.
- 朱丽, 钱前 (2017). 突破复杂性状多基因转化技术壁垒, 首创胚乳花青素高积累的水稻新种质. 植物学报 **52**, 539–542.
- Andrisic L, Dudzik D, Barbas C, Milkovic L, Grune T, Zarkovic N (2018). Short overview on metabolomics approach to study pathophysiology of oxidative stress in cancer. *Redox Biol* **14**, 47–58.
- Bai C, Berman J, Farre G, Capell T, Sandmann G, Christou P, Zhu CF (2017). Reconstruction of the astaxanthin biosynthesis pathway in rice endosperm reveals a metabolic bottleneck at the level of endogenous  $\beta$ -carotene hydroxylase activity. *Transgenic Res* **26**, 13–23.

- Bai C, Capell T, Berman J, Medina V, Sandmann G, Christou P, Zhu CF** (2016). Bottlenecks in carotenoid biosynthesis and accumulation in rice endosperm are influenced by the precursor-product balance. *Plant Biotechnol J* **14**, 195–205.
- Bjørklund G, Chirumbolo S** (2017). Role of oxidative stress and antioxidants in daily nutrition and human health. *Nutrition* **33**, 311–321.
- Blancquaert D, Van Daele J, Strobbe S, Kiekens F, Storozhenko S, De Steur H, Gellynck X, Lambert W, Stove C, Van Der Straeten D** (2015). Improving folate (vitamin B<sub>9</sub>) stability in biofortified rice through metabolic engineering. *Nat Biotechnol* **33**, 1076–1078.
- Bouis HE, Saltzman A** (2017). Improving nutrition through biofortification: a review of evidence from HarvestPlus, 2003 through 2016. *Glob Food Sec* **12**, 49–58.
- Chen GQ, Wang BB, Han DX, Sommerfeld M, Lu YH, Chen F, Hu Q** (2015). Molecular mechanisms of the coordination between astaxanthin and fatty acid biosynthesis in *Haematococcus pluvialis* (Chlorophyceae). *Plant J* **81**, 95–107.
- Coruzzi G, Broglie R, Edwards C, Chua NH** (1984). Tissue-specific and light-regulated expression of a pea nuclear gene encoding the small subunit of ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylase. *EMBO J* **3**, 1671–1679.
- Cunningham FX Jr, Gantt E** (2005). A study in scarlet: enzymes of ketocarotenoid biosynthesis in the flowers of *Adonis aestivalis*. *Plant J* **41**, 478–492.
- Farhi M, Marhevka E, Ben-Ari J, Algamas-Dimantov A, Liang Z, Zeevi V, Edelbaum O, Spitzer-Rimon B, Abeliovich H, Schwartz B, Tzfira T, Vainstein A** (2011). Generation of the potent anti-malarial drug artemisinin in tobacco. *Nat Biotechnol* **29**, 1072–1074.
- Franco-Iborra S, Vila M, Perier C** (2018). Mitochondrial quality control in neurodegenerative diseases: focus on Parkinson's Disease and Huntington's Disease. *Front Neurosci* **12**, 342.
- Gil-Mohapel J, Brocardo PS, Christie BR** (2014). The role of oxidative stress in Huntington's disease: are antioxidants good therapeutic candidates? *Curr Drug Targets* **15**, 454–468.
- Giuliano G** (2014). Plant carotenoids: genomics meets multi-gene engineering. *Curr Opin Plant Biol* **19**, 111–117.
- Hamilton C, Frary A, Lewis C, Tanksley SD** (1996). Stable transfer of intact high molecular weight DNA into plant chromosomes. *Proc Natl Acad Sci USA* **93**, 9975–9979.
- Harman D** (1956). Aging: a theory based on free radical and radiation chemistry. *J Gerontol* **11**, 298–300.
- Higuera-Ciajara I, Felix-Valenzuela L, Goycoolea FM** (2006). Astaxanthin: a review of its chemistry and applications. *Crit Rev Food Sci Nutr* **46**, 185–196.
- Irwin MH, Moos WH, Faller DV, Steliou K, Pinkert CA** (2016). Epigenetic treatment of neurodegenerative disorders: Alzheimer and Parkinson diseases. *Drug Dev Res* **77**, 109–123.
- Kim H, Perentis RJ, Caldwell GA, Caldwell KA** (2018). Gene-by-environment interactions that disrupt mitochondrial homeostasis cause neurodegeneration in *C. elegans* Parkinson's models. *Cell Death Dis* **9**, 555.
- Li KT, Moulin M, Mangel N, Albersen M, Verhoeven-Duif NM, Ma QX, Zhang P, Fitzpatrick TB, Grisse W, Vanderschuren H** (2015). Increased bioavailable vitamin B<sub>6</sub> in field-grown transgenic cassava for dietary sufficiency. *Nat Biotechnol* **33**, 1029–1032.
- Liu YG, Shirano Y, Fukaki H, Yanai Y, Tasaka M, Tabata S, Shibata D** (1999). Complementation of plant mutants with large genomic DNA fragments by a transformation-competent artificial chromosome vector accelerates positional cloning. *Proc Natl Acad Sci USA* **96**, 6535–6540.
- Macedo D, Jardim C, Figueira I, Almeida AF, McDougall GJ, Stewart D, Yuste JE, Tomás-Barberán FA, Tenreiro S, Outeiro TF, Santos CN** (2018). (Poly) phenol-digested metabolites modulate alpha-synuclein toxicity by regulating proteostasis. *Sci Rep* **8**, 6965.
- Naguib YM** (2000). Antioxidant activities of astaxanthin and related carotenoids. *J Agric Food Chem* **48**, 1150–1154.
- Noctor G, Lelarge-Trouverie C, Mhamdi A** (2015). The metabolomics of oxidative stress. *Phytochemistry* **112**, 33–53.
- Nogueira M, Enfissi EMA, Valenzuela MEM, Menard GN, Driller RL, Eastmond PJ, Schuch W, Sandmann G, Fraser PD** (2017). Engineering of tomato for the sustainable production of ketocarotenoids and its evaluation in aquaculture feed. *Proc Natl Acad Sci USA* **114**, 10876–10881.
- Paine JA, Shipton CA, Chaggar S, Howells RM, Kennedy MJ, Vernon G, Wright SY, Hinchliffe E, Adams JL, Silvesterstone AL, Drake R** (2005). Improving the nutritional value of Golden Rice through increased pro-vitamin A content. *Nat Biotechnol* **23**, 482–487.
- Pashkow FJ, Watumull DG, Campbell CL** (2008). Astaxanthin: a novel potential treatment for oxidative stress and inflammation in cardiovascular disease. *Am J Cardiol* **101**, S58–S68.

- Salim S** (2017). Oxidative stress and the central nervous system. *J Pharmacol Exp Ther* **360**, 201–205.
- Sato Y, Takehisa H, Kamatsuki K, Minami H, Namiki N, Ikawa H, Ohyanagi H, Sugimoto K, Antonio BA, Nagamura Y** (2013). RiceXPro version 3.0: expanding the informatics resource for rice transcriptome. *Nucleic Acids Res* **41**, D1206–D1213.
- Sorce S, Krause KH** (2009). NOX enzymes in the central nervous system: from signaling to disease. *Antioxid Redox Signal* **11**, 2481–2504.
- Staerck C, Gastebois A, Vandeputte P, Calenda A, Larcher G, Gillmann L, Papon N, Bouchara JP, Fleury MJJ** (2017). Microbial antioxidant defense enzymes. *Microb Pathog* **110**, 56–65.
- Sun TH, Yuan H, Cao HB, Yazdani M, Tadmor Y, Li L** (2018). Carotenoid metabolism in plants: the role of plastids. *Mol Plant* **11**, 58–74.
- Valko M, Leibfritz D, Moncol J, Cronin MTD, Mazur M, Telser J** (2007). Free radicals and antioxidants in normal physiological functions and human disease. *Int J Biochem Cell Biol* **39**, 44–84.
- Wong CC, Li HB, Cheng KW, Chen F** (2006). A systematic survey of antioxidant activity of 30 Chinese medicinal plants using the ferric reducing antioxidant power assay. *Food Chem* **97**, 705–711.
- Zheng J, Winderickx J, Franssens V, Liu BD** (2018). A mitochondria-associated oxidative stress perspective on Huntington's Disease. *Front Mol Neurosci* **11**, 329.
- Zhou XJ, Welsch R, Yang Y, Álvarez D, Riediger M, Yuan H, Fish T, Liu JP, Thannhauser TW, Li L** (2015). Arabidopsis OR proteins are the major posttranscriptional regulators of phytoene synthase in controlling carotenoid biosynthesis. *Proc Natl Acad Sci USA* **112**, 3558–3563.
- Zhu CF, Naqvi S, Capell T, Christou P** (2009). Metabolic engineering of ketocarotenoid biosynthesis in higher plants. *Arch Biochem Biophys* **483**, 182–190.
- Zhu QL, Yu SZ, Zeng DC, Liu HM, Wang HC, Yang ZF, Xie XR, Shen RX, Tan JT, Li HY, Zhao XC, Zhang QY, Chen YL, Guo JX, Chen LT, Liu YG** (2017). Development of "Purple Endosperm Rice" by engineering anthocyanin biosynthesis in the endosperm with a high-efficiency transgene stacking system. *Mol Plant* **10**, 918–929.
- Zhu QL, Zeng DC, Yu SZ, Cui CJ, Li JM, Li HY, Chen JY, Zhang RZ, Zhao XC, Chen LT, Liu YG** (2018). From Golden Rice to aSTARice: bioengineering astaxanthin biosynthesis in rice endosperm. *Mol Plant* **11**, 1440–1448.

## Astaxanthin Functional Rice: New Idea of Biofortification, New Perspectives for High-quality Rice Breeding

Li Zhu, Qian Qian\*

State Key Laboratory of Rice Biology, China National Rice Research Institute, Hangzhou 311401, China

**Abstract** Astaxanthin, a red-colored ketocarotenoid, has stronger antioxidant activity than other carotenoids or vitamin E. It has been reported in anti-aging, improving immunity, preventing and treating several diseases and widely used in pharmaceuticals, nutraceuticals, and the aquaculture industry. However,  $\beta$ -carotene ketolase genes exist only in some species of microalgae, bacteria and yeast and not in most higher animals and plants. Humans consume astaxanthin mainly from some seafood, such as salmon, shellfish, and trout. Rice, as the most important food crop in the world, is the main grain of nearly half of the world and two thirds of China's population. However, rice lacks carotenoid precursors, and the engineered biosynthesis of astaxanthin in rice has not been successful. Recently, Chinese scientists successfully engineered sophisticated  $\beta$ -carotene, keratin and astaxanthin biosynthesis in rice endosperm by the self-made multi-gene stacking expression system, which achieved precise synthesis from precursors and intermediate to final products regulated by a complex metabolic network.

**Key words** astaxanthin, biofortification, multiple gene transformation, rice

**Zhu L, Qian Q** (2019). Astaxanthin functional rice: new idea of biofortification, new perspectives for high-quality rice breeding. *Chin Bull Bot* **54**, 4–8.

\* Author for correspondence. E-mail: qianqian188@hotmail.com

(责任编辑: 孙冬花)