

# 番茄红素生物学功能研究进展

朱原,张永英,朱海波,岳利敏,宋紫玥,吴瑞华,刘冠慧\*  
(河北工程大学 生命科学与食品工程学院,河北 邯郸 056038)

**摘要:**番茄红素具有极强的抗氧化性,可作为食品添加剂或保健食品预防人类慢性疾病,其广泛的生物学活性对人类健康具有重要的作用。该文对番茄红素具有的独特理化性质和抗氧化、降血脂、抗癌、提高机体免疫力的生物学功能进行综述,以期对番茄红素在保健食品的研究与开发方面提供理论依据。

**关键词:**番茄红素;抗氧化;降血脂;抗癌;提高机体免疫力

## Advances in Research on Biological Functions of Lycopene

ZHU Yuan, ZHANG Yong-ying, ZHU Hai-bo, YUE Li-min, SONG Zi-yue, WU Rui-hua, LIU Guan-hui\*  
(College of Life Sciences and Food Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, Hebei, China)

**Abstract:** Lycopene has extremely strong antioxidant properties, can be used as a food additive or health product to prevent chronic diseases in humans. Its extensive biological activity plays an important role in human health. This article reviewed the unique physicochemical properties of lycopene and the biological functions of antioxidation, hypolipidemic, anticancer and immunity enhancement, in order to provide a theoretical basis for the research and development of lycopene in health food.

**Key words:** lycopene; antioxidation; hypolipidemic; anticancer; immunity enhancement

引文格式:

朱原,张永英,朱海波,等. 番茄红素生物学功能研究进展 [J]. 食品研究与开发, 2020, 41(18):202-207

ZHU Yuan, ZHANG Yongying, ZHU Haibo, et al. Advances in Research on Biological Functions of Lycopene [J]. Food Research and Development, 2020, 41(18):202-207

番茄红素(lycopene)主要存在于红色果蔬中。番茄红素在成熟番茄中的含量为 0.03 mg/g ~ 0.14 mg/g,素有“藏在番茄里的黄金”之美称,并且番茄红素含量与番茄的成熟度呈正相关<sup>[1]</sup>。番茄红素是目前自然界中抗氧化能力极强的类胡萝卜素,其抗氧化活性是维生素 E 的 100 倍,是  $\beta$ -胡萝卜素的 2 倍多<sup>[2]</sup>。通过人们对番茄红素生物学功能的持续研究,表明番茄红素的生物活性强于其他类胡萝卜素,如抗氧化<sup>[3]</sup>、降血脂<sup>[4]</sup>、抗癌<sup>[5]</sup>、提高机体免疫力<sup>[6]</sup>等重要生物学功能。

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(31802150);河北省自然科学基金(C2017402108)

作者简介:朱原(1996—),女(满),在读硕士研究生,研究方向:食品加工与安全。

\* 通信作者:刘冠慧(1986—),女(汉),副教授,博士,研究方向:动物营养与健康。

## 1 番茄红素的理化特性

番茄红素分子式为  $C_{40}H_{56}$ ,相对分子质量 536.88,熔点 176 °C,分子中含有 11 个共轭键和 2 个非共轭的碳-碳双键,如图 1 所示<sup>[7]</sup>。

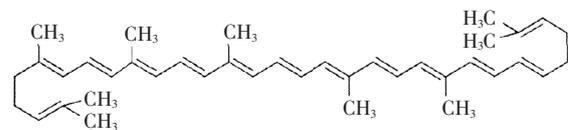


图 1 番茄红素的化学结构

Fig.1 Chemical structure of lycopene

番茄红素化学结构中的羰基,决定了其不溶于水,难溶于强极性溶剂(甲醇、乙醇),易溶于氯仿和苯,可溶于脂类和非极性溶剂,是脂溶性色素<sup>[8]</sup>。番茄红素的溶解度随温度升高而增大,且纯度越高,越不易溶解。研究发现,番茄经过烹饪后,能提高番茄及番茄制

品中番茄红素的利用率,所含的番茄红素能较好地被人吸收,主要原因在于番茄红素易发生异构化,由反式异构变为顺式异构<sup>[9]</sup>。此外,番茄红素的稳定性较差,易被氧化降解并发生顺反异构反应,对光、氧、酸、热、氧化剂以及 $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ 等金属离子敏感,日光照射12 h,番茄红素基本损失殆尽<sup>[10]</sup>。加工和储存不当会改变番茄红素含量或完全降解番茄红素,使消费者食用后的效果减弱。为了防止番茄红素氧化和异构化,实验室保存时会加入抗氧化剂和惰性气体,并将其置于棕色试剂瓶中保存于阴凉处;商业化加工时通常使用微胶囊化技术、脂质体技术、纳米分散体技术、包埋技术和乳化技术等,可有效改善番茄红素稳定性差、脂溶性导致其生物利用度低的问题<sup>[11]</sup>。

## 2 番茄红素的生物学功能

### 2.1 抗氧化功能

番茄红素是目前自然界中发现抗氧化能力极强的类胡萝卜素,它的多不饱和和双键结构能使其快速淬灭单线态氧和过氧化自由基,一个番茄红素分子可清除数千个单线态氧,进而有效抑制机体有害氧化反应的发生<sup>[2]</sup>。番茄红素可通过调节超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、谷胱甘肽过氧化物酶(glutathione peroxidase, GSH-Px)、过氧化氢酶(catalase, CAT)3种抗氧化酶的活性来清除体内产生过量的活性氧(reactive oxygen species, ROS),也可通过加成反应有效地清除羟基自由基<sup>[12]</sup>。研究证实,增加番茄红素的摄入量可有效抑制脂质、DNA和蛋白质的氧化作用,提高肝脏和血浆抗氧化酶的活性,使血清中丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量明显减少<sup>[13-14]</sup>。范远景等<sup>[15]</sup>研究发现,连续4 d(2次/d)灌胃30 mg/kg番茄红素,雌鼠血清中SOD、GSH-Px和CAT的活性显著升高,MDA含量降低,表明番茄红素在体内抗氧化作用与内源性抗氧化酶体系的活性激活有关。刘重斌等<sup>[16]</sup>研究发现,番茄红素可通过提高帕金森小鼠血清中SOD、GSH-Px和CAT酶活力,进而对神经元产生保护作用,缓解老年痴呆症状。Zhao等<sup>[17]</sup>研究发现,在大脑局部缺血/再灌注的小鼠试验中,连续2周饲喂6 mg/kg番茄红素,MDA含量显著降低,进而减轻大脑局部缺血导致的氧化损伤。Prakash等<sup>[18]</sup>研究表明,在秋水仙碱引起小鼠线粒体氧化损伤模型中,添加番茄红素能显著上调烟酰胺腺嘌呤二核苷酸脱氢酶、琥珀酸脱氢酶和细胞色素氧化酶的活性,从而改善线粒体功能。此外,番茄红素可以通过提高机体总抗氧化能力和高密度脂蛋白(high-density lipoprotein, HDL)活性,下调血浆中炎症

因子的表达缓解脂多糖(lipopolysaccharide, LPS)诱导的氧化应激<sup>[19]</sup>。

在生产养殖中,番茄红素常作为饲料添加剂来发挥其着色和抗氧化功能。日粮中添加400 mg/kg番茄红素能显著增加Ross 308肉鸡血清中GSH-Px和SOD水平,降低MDA含量,进而能缓解循环热应激所致的氧化应激现象<sup>[20]</sup>。番茄红素作为一种着色剂,还可增加蛋黄的颜色及营养价值。日粮中添加200 mg/kg的番茄红素饲喂蛋鸡21 d,可以改善蛋黄的颜色,由于番茄红素Z异构体具有较高的生物利用度,会被蛋鸡有效吸收并转移到蛋黄中,从而增加蛋黄中的番茄红素浓度,改善蛋黄颜色<sup>[21]</sup>。番茄红素作为饲料添加剂也可用于改善肉品质。通过增加羔羊肉的红度以及维生素A、维生素E含量,延缓储藏期间肉蛋白和脂类氧化过程<sup>[22]</sup>。基础日粮中添加200 mg/kg番茄红素,可有效改善熟化期羊肉的嫩度<sup>[23]</sup>。3月龄湖羊公羔饲料中添加200 mg/kg番茄红素,连续饲喂110 d后,可提高血清中SOD、CAT和GSH-Px的活性,进而提高动物生长性能<sup>[24]</sup>。连续14 d饲喂含5%番茄皮渣(含番茄红素708 mg/kg)的日粮,可增加42日龄肉鸡血清中GSH-Px和SOD含量,降低MDA含量,增强肉鸡的抗氧化能力<sup>[25]</sup>。

番茄红素的强抗氧化性在提高动物生长性能、增加蛋黄营养和改善肉品质方面的显著效果已成为不争的事实。番茄红素发挥抗氧化作用主要依赖于核转录因子E2相关因子(nuclear factor erythroid-2 related factor 2, Nrf2)-抗氧化反应元件(antioxidant response element, ARE)途径。番茄红素可以上调抗氧化剂亲电性化学反应元件(electrophile response element, EPRE)、ARE和Nrf2表达,从而刺激II相解毒抗氧化酶的产生,保护细胞免受活性氧和其他亲电性分子的损伤<sup>[26]</sup>。据Dai等<sup>[27]</sup>报道,在黏菌素诱导小鼠肾毒性模型中,饲料中添加番茄红素可下调核因子- $\kappa$ B(nuclear factor kappa B, NF- $\kappa$ B)mRNA的表达,上调Nrf2和血红素加氧酶-1(heme oxygenase 1, HO-1)mRNA的表达。番茄红素能够诱导Nrf2基因转录,并抑制NF- $\kappa$ B和caspase-3mRNA的表达,进而发挥清除氧自由基作用<sup>[28]</sup>。此外,番茄红素可通过激活Nrf2/NF- $\kappa$ B信号通路缓解氧化应激诱导的神经炎症和认知损伤<sup>[29]</sup>。在BV2小神经胶质细胞中,番茄红素可通过激活Nrf2信号通路降低LPS诱导的神经炎症和氧化应激反应<sup>[30]</sup>。Sahin等<sup>[20]</sup>发现,日粮中添加400 mg/kg番茄红素可通过抑制肌肉中Kelch样环氧氯丙烷相关蛋白1(Kelch-like ECH-associated protein 1, Keap1)mRNA表达,增加Nrf2

mRNA 表达,进而增强肉鸡胸肌中抗氧化酶 GSH-Px、SOD 的活性。因此番茄红素可通过 Nrf2 发挥其抗氧化功能,能够保护机体免受氧化损伤,进而提高动物的生长性能。

## 2.2 降脂功能

番茄红素属于脂溶性物质,通过降血脂调节脂质代谢。番茄红素主要存在于细胞膜和脂蛋白中,并且多集中于低密度脂蛋白(low density lipoprotein, LDL)和极低密度脂蛋白(very low-density lipoprotein, VLDL)<sup>[31]</sup>。Jiang 等<sup>[32]</sup>研究发现,血浆中番茄红素水平与颈动脉和主动脉血管壁的厚度及损伤具有负相关性,可有效预防动脉粥样硬化的形成。LDL 氧化是动脉粥样硬化发展过程中的关键因子,番茄红素具有极强的抗氧化能力,因此番茄红素降血脂作用与番茄红素能抑制 DNA 和脂蛋白氧化,以及阻止 LDL 胆固醇氧化产物的形成有关。

番茄红素对动脉粥样硬化的血脂和脂蛋白代谢紊乱具有调节作用。覃伟等<sup>[33]</sup>研究中选用 50 mg/kg 番茄红素连续 40 d 灌胃高脂饮食致动脉粥样硬化的家兔模型,可显著抑制家兔主动脉和心脏低密度脂蛋白受体 mRNA 的表达,降低血清中甘油三酯(triglyceride, TG)水平,有效减轻动脉粥样病变。唐湘宇等<sup>[34]</sup>研究发现,在高脂饲料中添加番茄红素,每兔每天每公斤体重给予 6% 番茄红素粉剂,可以减缓兔主动脉脂质过氧化造成的损伤,同时降低 TG 水平,保护兔的血管内皮功能,减轻高脂兔动脉粥样硬化的病变发生,具有良好的抗动脉粥样硬化作用。番茄红素在调节脂质代谢紊乱具有显著效果,肥胖大鼠连续 12 周灌服 10 mg/kg 番茄红素,肝脏组织中的血清总胆固醇(serum total cholesterol, TC)、TG 和 LDL 以及动脉粥样硬化参数显著降低<sup>[35]</sup>。在铜诱导的肉鸡氧化模型中,番茄红素的添加可显著降低血浆中 TC 和 LDL 含量,显著延缓 LDL 氧化速率,推测番茄红素可能通过渗入 LDL 发挥抗氧化作用<sup>[36]</sup>。在反式脂肪酸染毒小鼠肾脏损伤模型中,灌胃 20 mg/kg 番茄红素可显著降低小鼠血清中 TG、TC、LDL 含量,增加 HDL 含量<sup>[37]</sup>。由此可知,番茄红素降低肝组织脂代谢紊乱的机制是通过增加高密度脂蛋白胆固醇的表达,减少 TC、TG、LDL 在肝组织中的蓄积,进而调节肝组织脂代谢紊乱。此外,Zeng 等<sup>[38]</sup>发现,在高脂饮食饲喂小鼠模型中,添加番茄红素可降低肝脏中 TG、TC、LDL 含量,提高 HDL 含量,其机制是番茄红素阻止了胰岛素抗性以及通过抑制信号传导与转录激活因子 3(signal transducer and activator of transcription 3, STAT3)的活性,缓解了脂质代

谢紊乱。番茄红素通过提高肝脏中过氧化物酶体增殖物激活受体  $\alpha$ 、 $\gamma$  的表达来调控脂肪的代谢,通过抑制胆固醇合成的限速酶(3-羟基-3-甲基戊二酰辅酶 A 还原酶)并促进 LDL 降解,降低胆固醇含量<sup>[39]</sup>。

## 2.3 抗癌作用

机体内过量 ROS 可与细胞内脂类、蛋白质和核酸发生随机反应,引起 DNA 氧化应激和损伤,导致激活癌基因或失活抑癌基因的突变,造成慢性疾病和癌症的发生<sup>[40]</sup>。研究证实,饮食中添加番茄红素可以降低癌症风险,抑制肿瘤的生长。抗氧化剂是对抗氧化破坏作用的第一道防线,它能将氧化剂转化为活性较低的物质,抗氧化剂的摄入可以中和内源性或外源性 ROS,减少 DNA 损伤和癌症风险<sup>[41]</sup>。

番茄红素的抗癌作用主要有两种:氧化机制和非氧化机制。在氧化机制中,番茄红素作为常见类胡萝卜素中最有效的抗氧化剂,可以抑制单线态氧( $^1O_2$ ),清除二氧化氮自由基( $NO_2\cdot$ )、硫基自由基( $RS\cdot$ )和磺酰自由基( $RSO_2\cdot$ )<sup>[42]</sup>。单线态氧淬灭过程中,能量从  $^1O_2$  转移到番茄红素分子,转化为能量丰富的三重态<sup>[43]</sup>。捕获其他 ROS、 $NO_2\cdot$  或过氧亚硝酸盐,导致番茄红素分子氧化分解。因此,番茄红素可以在体内保护机体免受脂质、蛋白质和 DNA 的氧化<sup>[44]</sup>。在非氧化机制中,番茄红素通过抑制致癌物质对调节蛋白的磷酸化作用,如 p53 和 Rb 抗癌基因,并在细胞周期的静止细胞期到 DNA 合成前期停止细胞分裂<sup>[45]</sup>。Bandeira 等<sup>[46]</sup>提出番茄红素诱导的肝脏代谢酶对细胞色素 P4502E1 的调节,是保护大鼠肝脏中致癌物诱导的肿瘤前病变的潜在机制。番茄红素可有效降低胰岛素生长因子诱导的细胞增殖现象,而胰岛素生长因子是各种癌细胞系中有效的有丝分裂原<sup>[47]</sup>。

Rowles 等<sup>[48]</sup>发现番茄及其制品的消费或番茄红素的循环水平与癌症风险呈负相关,特别是乳腺癌、结肠癌、肺癌和前列腺癌。番茄红素比  $\alpha$ -胡萝卜素和  $\beta$ -胡萝卜素更有效抑制多种人类癌症细胞系的细胞生长。相比胡萝卜素,番茄红素可更有效地使乳腺癌细胞增殖,增加细胞凋亡的作用。但只有番茄红素可以破坏细胞骨架的形成,选择性抑制细胞,从而抑制细胞周期的进展,最终抑制细胞增殖<sup>[49]</sup>。Langner 等<sup>[50]</sup>研究发现,富含番茄红素的番茄汁(17 mg/L)对大鼠结肠癌模型具有抑制作用,可降低雄性大鼠膀胱移行细胞癌的数量;饮用水中添加番茄红素(50 mg/L)对雄性小鼠肺癌的发生也具有抑制作用。番茄红素对口腔和其他黏膜的癌前病变白斑有治疗作用,在一项双盲安慰剂对照研究中,58 名口腔白斑患者每天口服 4、8 mg 番

茄红素或服用安慰剂胶囊 3 个月,结果表明,两种剂量的番茄红素均比安慰剂更有效地减轻白斑症状,并且每天服用 8 mg 的番茄红素比 4 mg 的治疗效果更好<sup>[51]</sup>。番茄红素在治疗前列腺癌中发挥潜在作用<sup>[52]</sup>,增加番茄制品和其他含番茄红素的食物的摄入量会减少前列腺癌的发生。越来越多的证据表明,每天食用一份番茄或番茄制品有助于防止 DNA 损伤,由于 DNA 损伤参与了前列腺癌的发病过程,经常食用番茄及其制品会预防前列腺癌<sup>[53]</sup>。因此,番茄红素的抗癌作用一方面与其具有较强的自由基淬灭机制有关,另一方面可以刺激淋巴细胞释放癌细胞抑制因子,若在人类中广泛应用还需要大规模动物试验进行验证。

#### 2.4 提高机体免疫力

单线态氧和氧自由基是侵害机体免疫系统的罪魁祸首。番茄红素具有非常强的清除自由基和淬灭单线态氧的能力,因此,可用于提高机体免疫功能。番茄红素提高机体免疫力主要通过两种途径,一条途径是番茄红素促进 T、B 淋巴细胞增殖,增强自然杀伤细胞(natural killer cell, NK)活性,进而提高机体免疫反应。番茄红素可以保护吞噬细胞免受自身的氧化损伤,促进 T、B 淋巴细胞增殖,对非特异性细胞免疫有明显的促进作用<sup>[54]</sup>。番茄红素还可促进 T 淋巴细胞转化和增强 NK 细胞杀伤功能,其机制都是通过保护细胞的 DNA,避免增殖过程中 DNA 复制受到损伤同时促进细胞间通信,加强细胞间相互作用<sup>[55]</sup>。另一途径是番茄红素通过促进白细胞介素(interleukin, IL)分泌,抑制肿瘤坏死因子- $\alpha$ (tumor necrosis factor- $\alpha$ , TNF- $\alpha$ )等炎症因子,阻止其对 NF- $\kappa$ B 信号通路的激活。白细胞介素 IL-2、IL-4、IL-10 均为免疫因子,通过下调炎症介质因子促进机体免疫反应。

杜宏举等<sup>[56]</sup>研究表明,番茄红素可刺激特异性 T 细胞大量增殖,增强小鼠细胞免疫和体液免疫功能。同样,陈垚等<sup>[57]</sup>研究发现,小鼠连续 30 d 口服 0.25 g/kg·bw 剂量的番茄红素后,迟发型变态反应能力、巨噬细胞吞噬鸡红细胞的能力、NK 细胞活性均出现显著增加。贺亮等<sup>[58]</sup>报道,番茄红素可通过提高杀菌活性来增强肉鸡的免疫功能。Jiang 等<sup>[13]</sup>发现来航蛋鸡连续 120 d 饲喂 100 mg/kg 番茄红素后机体免疫力显著增强。Izquierdo 等<sup>[59]</sup>研究发现,孕妇连续 14 d 每日食用番茄汁 25 g(含番茄红素 7 mg,  $\beta$ -胡萝卜素 0.3 mg),其淋巴细胞和血浆中番茄红素浓度明显增加,淋巴细胞 DNA 损伤降低约 50%。

Luo 等<sup>[6]</sup>报道,在甲基-N-硝基亚硝基胍诱导产生胃癌模型小鼠中,灌服番茄红素后,血清中 IL-2、IL-4、

IL-10 和 TNF- $\alpha$  含量显著增加,IL-6 含量显著降低,并且免疫球蛋白 G(immunoglobulin G, IgG)、免疫球蛋白 A(immunoglobulin A, IgA)和免疫球蛋白 M(immunoglobulin M, IgM)含量呈剂量依赖性增加现象。番茄红素预处理小鼠巨噬细胞 RAW264.7 后,可降低 LPS 所诱导的炎症反应,降低 IL-6、IL-1 $\beta$  和 mRNA 的表达,其机制是番茄红素通过抑制 NF- $\kappa$ B 和 C-Jun 氨基末端激酶信号通路发挥抗炎作用<sup>[60]</sup>。Sahin 等<sup>[61]</sup>研究发现,饲喂 200、400 mg/kg 番茄红素可以缓解蛋鸡自发性卵巢癌的发生,其机制是通过提高抗氧化和抗炎活性,抑制 NF- $\kappa$ B 表达以及通过活化 PIAS3 蛋白抑制信号传导蛋白和信号传导及转录激活蛋白表达。Makon 等<sup>[62]</sup>在 LPS 诱导人结肠腺癌细胞(Caco-2)炎症反应中发现,饲料中添加番茄红素通过调节环磷酸腺苷-环磷酸腺苷依赖的蛋白激酶 A 信号通路,上调了 Caco-2 中 IL-1 $\alpha$  和 IL-8 的表达并提高了基质金属蛋白酶 9 基因活性。因此番茄红素通过调节 T、B 淋巴细胞和白细胞介素的分泌,保护机体免受氧化损伤,提高机体免疫力。

### 3 展望

随着食品科技的快速发展,番茄红素的营养价值及功效被不断开发利用,如抗氧化、抗癌、降血脂、增强免疫力、保护皮肤等作用被广泛应用于保健食品,因此番茄红素制品的开发与使用,已经成为该领域研究工作者关注的热点。综合上述研究发现,番茄红素对动物机体有着诸多的益处,尽管在用量、使用方式和代谢机制上有待进一步研究探讨,但其作为保健食品原料将会是未来研究的主要方向。

#### 参考文献:

- [1] 祁乐乐,高岩.番茄红素的研究进展及应用[J].现代食品,2015,12(24):44-46
- [2] Torregrosa-Crespo J, Montero Z, Fuentes J L, et al. Exploring the valuable carotenoids for the large-scale production by marine microorganisms[J]. Marine Drugs, 2018, 16(6): 203
- [3] 陈垚,卢连华,吕志敏,等.番茄红素增强免疫力和抗氧化作用的研究[J].预防医学论坛,2018,24(5):393-396
- [4] 董蓬,刘春霖.番茄红素对高血脂大鼠的降血脂作用研究[J].山东化工,2019,48(3):21,32
- [5] Gajowik A, Dobrzyńska M M. Lycopene-antioxidant with radioprotective and anticancer properties. A review[J]. Roczniki Państwowego Zakładu Higieny, 2014, 65(4): 263-271
- [6] Luo C, Wu X G. Lycopene enhances antioxidant enzyme activities and immunity function in N-methyl-N'-nitro-N-nitrosoguanidine-induced gastric cancer rats[J]. International Journal of Molec-

- ular Sciences, 2011, 12(5): 3340–3351
- [7] 潘晓威, 叶剑芝, 苏子鹏, 等. 番茄红素生物学功能研究进展及应用前景[J]. 现代农业科技, 2018(1): 237–238, 240
- [8] 马芸, 姜瑞, 吴燕. 西瓜中番茄红素含量的测定方法评价[J]. 宁夏农林科技, 2013, 54(10): 88–89
- [9] El-Raey M A, Ibrahim G E, Eldahshan O A. Lycopene and lutein; A review for their chemistry and medicinal uses[J]. Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry, 2013, 2(1): 245–254
- [10] Gupta S K, Trivedi D, Srivastava S, et al. Lycopene attenuates oxidative stress induced experimental cataract development: an *in vitro* and *in vivo* study[J]. Nutrition, 2003, 19(9): 794–799
- [11] 巴宁宁, 王英明, 刘蕊, 等. 番茄红素制剂化技术研究进展[J]. 粮油食品科技, 2018, 26(3): 45–49
- [12] Pereira A C, Martel F. Oxidative stress in pregnancy and fertility pathologies[J]. Cell Biology and Toxicology, 2014, 30(5): 301–312
- [13] Jiang H Q, Wang Z Z, Ma Y, et al. Effects of dietary lycopene supplementation on plasma lipid profile, lipid peroxidation and antioxidant defense system in feedlot Bamei lamb [J]. Asian–Australasian Journal of Animal Sciences, 2015, 28(7): 958–965
- [14] Tekeli İ O, Ateşşahin A, Sakin F, et al. Protective effects of conventional and colon–targeted lycopene and linalool on ulcerative colitis induced by acetic acid in rats [J]. Inflammopharmacology, 2019, 27(2): 313–322
- [15] 范远景, 黄璐. 番茄红素吸收与体内抗氧化的机理研究[J]. 食品科学, 2007, 28(11): 545–548
- [16] 刘重斌, 王瑞, 潘慧斌, 等. 番茄红素对帕金森模型小鼠氧化应激损伤及神经行为的影响[J]. 中国应用生理学杂志, 2013, 29(4): 380–384, 390
- [17] Zhao Y S, Xin Z, Li N N, et al. Nano–liposomes of lycopene reduces ischemic brain damage in rodents by regulating iron metabolism[J]. Free Radical Biology & Medicine, 2018, 124: 1–11
- [18] Prakash A, Kumar A. Lycopene protects against memory impairment and mito–oxidative damage induced by colchicine in rats: an evidence of nitric oxide signaling[J]. European Journal of Pharmacology, 2013, 721(1/3): 373–381
- [19] Alvi S S, Ansari I A, Ahmad M K, et al. Lycopene amends LPS induced oxidative stress and hypertriglyceridemia via modulating PC–SK–9 expression and Apo–CIII mediated lipoprotein lipase activity [J]. Biomedicine & Pharmacotherapy, 2017, 96: 1082–1093
- [20] Sahin K, Orhan C, Tuzcu M, et al. Lycopene activates antioxidant enzymes and nuclear transcription factor systems in heat–stressed broilers[J]. Poultry Science, 2016, 95(5): 1088–1095
- [21] Honda M, Ishikawa H, Hayashi Y. Alterations in lycopene concentration and Z–isomer content in egg yolk of hens fed all–E–isomer–rich and Z–isomer–rich lycopene[J]. Animal Science Journal, 2019, 90(9): 1261–1269
- [22] Xu C C, Qu Y H, Hopkins D L, et al. Dietary lycopene powder improves meat oxidative stability in Hu lambs[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99(3): 1145–1152
- [23] 徐晨晨, 徐少庭, 刘策, 等. 饲料中添加不同抗氧化剂对熟化期羊肉嫩度的影响及动力学分析[J]. 肉类研究, 2017, 31(10): 1–5
- [24] 曲扬华, 罗海玲, 刘策, 等. 饲料中添加番茄红素对绵羊生长发育、屠宰性能和血清抗氧化指标的影响[J]. 动物营养学报, 2017, 29(4): 1257–1264
- [25] Hosseini–Vashan S J, Golian A, Yaghobfar A. Growth, immune, antioxidant, and bone responses of heat stress–exposed broilers fed diets supplemented with tomato pomace[J]. International Journal of Bio–meteorology, 2016, 60(8): 1183–1192
- [26] Palozza P, Catalano A, Simone R, et al. Lycopene as a guardian of redox signalling[J]. Acta Biochimica Polonica, 2012, 59(1): 21–25
- [27] Dai C S, Tang S S, Deng S J, et al. Lycopene attenuates colistin–induced nephrotoxicity in mice via activation of the Nrf2/HO–1 pathway[J]. Antimicrobial Agents and Chemotherapy, 2015, 59(1): 579–585
- [28] Abass M A, Elkhateeb S A, Abd El–Baset S A, et al. Lycopene ameliorates atrazine–induced oxidative damage in adrenal cortex of male rats by activation of the Nrf2/HO–1 pathway[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2016, 23(15): 15262–15274
- [29] Zhao B, Ren B, Guo R, et al. Supplementation of lycopene attenuates oxidative stress induced neuroinflammation and cognitive impairment via Nrf2/NF–κB transcriptional pathway [J]. Food and Chemical Toxicology, 2017, 109(1): 505–516
- [30] Wang J, Li L X, Wang Z, et al. Supplementation of lycopene attenuates lipopolysaccharide–induced amyloidogenesis and cognitive impairments via mediating neuroinflammation and oxidative stress[J]. The Journal of Nutritional Biochemistry, 2018, 56: 16–25
- [31] 傅喆敏, 袁杰, 黄雄伟, 等. 番茄红素的研究概况及应用前景[J]. 现代中药研究与实践, 2007, 21(1): 58–61
- [32] Jiang H Q, Wang Z Z, Ma Y, et al. Effect of dietary lycopene supplementation on growth performance, meat quality, fatty acid profile and meat lipid oxidation in lambs in summer conditions[J]. Small Ruminant Research, 2015, 131: 99–106
- [33] 覃伟, 钱妍. 番茄红素对动脉粥样硬化家兔血脂及低密度脂蛋白受体 mRNA 表达的影响[J]. 中国医院药学杂志, 2010, 30(3): 191–194
- [34] 唐湘宇, 孙文清, 王蕾, 等. 番茄红素对高脂兔血管脂质过氧化损伤的影响及机制探讨[J]. 中国临床药理学与治疗学, 2006, 11(2): 158–163
- [35] 刘启玲, 周玲, 许心青. 番茄红素预防高脂饲料大鼠脂质代谢紊乱的作用及机制探讨[J]. 西安交通大学学报(医学版), 2008, 29(1): 70–73
- [36] Lee K W, Choo W D, Kang C W, et al. Effect of lycopene on the copper–induced oxidation of low–density lipoprotein in broiler chickens[J]. Springerplus, 2016, 5: 389
- [37] 丁旭, 谢羨, 刘娟, 等. 番茄红素对反式脂肪酸致小鼠肾脏损伤的修复作用[J]. 湖南师范大学学报(医学版), 2017, 14(5): 8–12
- [38] Zeng Z H, He W, Jia Z, et al. Lycopene improves insulin sensitivity through inhibition of STAT3/Srebp–1c–Mediated lipid accumulation and inflammation in mice fed a high–fat diet[J]. Experimental

- and Clinical Endocrinology & Diabetes, 2017, 125(9): 610–617
- [39] Ford N A, Elsen A C, Erdman J W Jr. Genetic ablation of carotene oxygenases and consumption of lycopene or tomato powder diets modulate carotenoid and lipid metabolism in mice[J]. Nutrition Research, 2013, 33(9): 733–742
- [40] Yang Y, Zhu Y P, Xi X W. Anti-inflammatory and antitumor action of hydrogen via reactive oxygen species (Review)[J]. Oncology Letters, 2018, 16(3): 2771–2776
- [41] Rao A V, Rao L G. Carotenoids and human health[J]. Pharmacological Research, 2007, 55(3): 207–216
- [42] Kumcuoglu S, Yilmaz T, Tavman S. Ultrasound assisted extraction of lycopene from tomato processing wastes[J]. Journal of Food Science and Technology, 2014, 51(12): 4102–4107
- [43] Wertz K, Siler U, Goralczyk R. Lycopene: modes of action to promote prostate health[J]. Archives of Biochemistry and Biophysics, 2004, 430(1): 127–134
- [44] Stahl W, Sies H. Antioxidant activity of carotenoids[J]. Molecular Aspects of Medicine, 2004, 24(6): 345–351
- [45] Stojanovic J, Giraldo L, Arzani D, et al. Adherence to Mediterranean diet and risk of gastric cancer: results of a case-control study in Italy[J]. European Journal of Cancer Prevention, 2017, 26(6): 491–496
- [46] Bandeira A C B, da Silva R C, Rossoni J V Júnior, et al. Lycopene pretreatment improves hepatotoxicity induced by acetaminophen in C57BL/6 mice[J]. Bioorganic & Medicinal Chemistry, 2017, 25(3): 1057–1065
- [47] Diener A, Rohrmann S. Associations of serum carotenoid concentrations and fruit or vegetable consumption with serum insulin-like growth factor (IGF)-1 and IGF binding protein-3 concentrations in the Third National Health and Nutrition Examination Survey (NHANES III)[J]. Journal of Nutritional Science, 2016, 5(13): 1–8
- [48] Rowles J L 3rd, Ranard K M, Smith J W, et al. Increased dietary and circulating lycopene are associated with reduced prostate cancer risk: a systematic review and meta-analysis[J]. Prostate Cancer and Prostatic Diseases, 2017, 20(4): 361–377
- [49] Uppala P T, Dissmore T, Lau B H, et al. Selective inhibition of cell proliferation by lycopene in MCF-7 breast cancer cells in vitro: a proteomic analysis[J]. Phytotherapy Research, 2013, 27(4): 595–601
- [50] Langner E, Lemieszek M K, Rzeski W. Lycopene, sulforaphane, quercetin, and curcumin applied together show improved antiproliferative potential in colon cancer cells *in vitro*[J]. Journal of Food Biochemistry, 2019, 43(4): 1–12
- [51] Singh M, Krishanappa R, Bagewadi A, et al. Efficacy of oral lycopene in the treatment of oral leukoplakia[J]. Oral Oncology, 2004, 40(6): 591–596
- [52] Ilic D, Misso M. Lycopene for the prevention and treatment of benign prostatic hyperplasia and prostate cancer: a systematic review[J]. Maturitas, 2012, 72(4): 269–276
- [53] Ellinger S, Ellinger J, Stehle P. Tomatoes, tomato products and lycopene in the prevention and treatment of prostate cancer: do we have the evidence from intervention studies?[J]. Current Opinion in Clinical Nutrition and Metabolic Care, 2006, 9(6): 722–727
- [54] 柴静波, 李萍, 裴志萍. 番茄红素对荷卵巢癌大鼠免疫功能的影响及其机制研究[J]. 实用肿瘤学杂志, 2017, 31(1): 13–17
- [55] 袁曦, 魏大鹏, 廖林川, 等. 番茄红素对非特异性免疫功能的体外实验研究[J]. 食品科学, 2003, 24(4): 133–136
- [56] 杜宏举, 郑珊, 马玲, 等. 番茄红素对小鼠免疫功能的促进作用[J]. 毒理学杂志, 2014, 28(3): 211–214
- [57] 陈垚, 吕志敏, 孙川喻, 等. 番茄红素增强免疫力功能的研究[J]. 预防医学论坛, 2017, 23(5): 390–392, 395
- [58] 贺亮, 贺峻琳, 徐乾琨, 等. 番茄红素在动物生产中的应用研究进展[J]. 中国饲料, 2016(21): 9–11, 17
- [59] Izquierdo-Vega J A, Morales-González J A, SánchezGutiérrez M, et al. Evidence of some natural products with antigenotoxic effects. Part 1: fruits and polysaccharides[J]. Nutrients, 2017, 9(2): 102
- [60] Zou J, Feng D, Ling W H, et al. Lycopene suppresses proinflammatory response in lipopolysaccharide-stimulated macrophages by inhibiting ROS-induced trafficking of TLR4 to lipid raft-like domains[J]. The Journal of Nutritional Biochemistry, 2013, 24(6): 1117–1122
- [61] Sahin K, Yenice E, Tuzcu M, et al. Lycopene protects against spontaneous ovarian cancer formation in laying hens[J]. Journal of Cancer Prevention, 2018, 23(1): 25–36
- [62] Makon-Sébastien N, Francis F, Eric S, et al. Lycopene modulates THP1 and Caco2 cells inflammatory state through transcriptional and nontranscriptional processes[J]. Mediators of Inflammation, 2014, 2014(2): 507272

收稿日期:2019-11-23