

花青素生理功能研究进展及其应用前景

钟兰兰, 屠迪, 杨亚, 刘进辉*

湖南农业大学动物医学院, 长沙 410128

摘要:花青素是一类植物水溶性色素,由于具有独特的生理功能而广泛受到关注。本文综述了花青素的生物合成途径相关酶,及其抗氧化、肝功能保护、改善血液循环、抗癌、抑制炎症、抗过敏及视力保护等生理功能及作用机制的研究进展,并对其在医药、食品和化妆品等行业的应用前景进行了展望。

关键词:花青素;抗氧化;生理功能;应用前景

DOI:10.3969/j.issn.2095-2341.2013.05.07

Research Progress on Physiological Functions of Anthocyanins and their Application Prospects

ZHONG Lan-lan, TU Di, YANG YA, LIU Jin-hui*

College of Veterinary Medicine, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China

Abstract:Anthocyanins are a kind of water-soluble plant pigments with some special unique physiological functions, so as to have big attentions. This paper reviews the biosynthetic pathway of anthocyanin and related enzymes, focuses on the physiological functions and mechanisms of anthocyanins, such as antioxidant, liver function protection, cardiovascular disease prevention, anti-cancer, anti-inflammatory, anti-infection and eye protection, and so on. Finally, it makes an prospects on the application of anthocyanins in medicine, food and cosmetics industries in the future.

Key words:anthocyanin; antioxidant; physiological functions; application prospects

花青素是一种植物水溶性色素,由于其来源广、无毒性、安全性高,且具有抗氧化、改善血液循环、抑制炎症与过敏、抗癌等生理功能和其他一些特殊保健功能,深受科学家与民众的青睐。花青素作为一类广泛存在于自然界的天然食用色素,通常在酸性条件具有较好的稳定性,而在中性环境下不稳定且易降解^[1]。国内外对花青素的提取工艺、化学结构、生物活性、生理功能的研究较深入;当前的研究重点在于花青素的营养保健功能和特殊药理作用两方面。本文重点就花青素的生物合成途径、生理作用及其作用机理研究进展进行综述,并对其应用前景进行展望。

1 花青素概述

二战期间,法国波尔多大学博士杰克·马斯魁勒在花生脚料中发现一种味道苦涩的神秘物质,后命名为原花青素,它是一大类多酚化合物的总称,其在酸性条件下加热可转化为花青素^[2]。随后在许多植物中发现花青素的存在,如:越橘、紫甘薯、葡萄、茄子皮、樱桃、草莓、桑葚、山楂皮、紫苏、苹果、黑(红)米和茶叶等^[3]。自然条件下,花青素一般不以单体形式存在,大部分通过糖苷键与单糖或多糖形成稳定的花色素苷,结构见图1。目前自然界已知的花色素有23种,而在植

收稿日期:2013-05-02; 接受日期:2013-07-23

基金项目:湖南农业大学动物保健工程中心绿叶基金项目(1017;DS012b)资助。

作者简介:钟兰兰,硕士研究生,研究方向为动物生理生化与脂肪代谢相关研究。E-mail:zhonglanlan158@126.com。*通信作者:刘进辉,教授,主要从事动物生化制药与动物保健研究。E-mail:ljh651209@163.com

物体内常见的有天竺葵色素、矢车菊色素、飞燕草色素、芍药色素、牵牛花色素和锦葵色素等 6 种^[4]。花青素是一类多羟基酚类物质,它具有 2-苯基苯并吡喃阳离子结构,一般拥此结构的物质,随着分子结构羟基数目增加其稳定性会降低。目前花青素的含量测定主要有比色法、pH 示差法、薄层色谱法和高效液相色谱法等方法,其中高效液相色谱法是目前应用最广泛的方法^[5]。

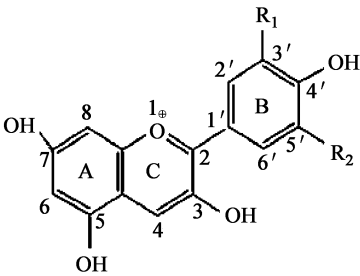


图 1 花色素苷的基本结构

Fig.1 The basic structure of anthocyanins.

注:R₁和R₂是H、OH或者O。

2 花青素生物合成途径中的相关酶

花青素的合成通过一系列的酶促反应完成,

并借助不同的官能团如羟基、糖基、甲基和酰基提高自身稳定性。苯丙氨酸是花青素代谢途径的起始物质,并在苯丙氨酸酶、查尔酮合成酶、查尔酮异构酶、黄烷酮-3'-羟化酶、二氢黄酮醇-4-还原酶等相关酶的催化作用下,经过苯基丙酸类合成和类黄酮生合成两条途径形成稳定的花青素,花青素生物合成途径见图 2^[6]。

查尔酮合成酶(CHS)是花青素合成的第一个关键酶,研究人员最早在苔藓植物中发现该基因,目前学者从许多植物中如高粱、金鱼草和玉米等中克隆出这种酶^[7],并通过基因工程手段对其进行修饰而改造植物的多样性,并使其呈现不同的颜色^[8]。查尔酮异构酶(CHI)是一种分子量相对较小的蛋白质,最早在豌豆中克隆到该酶的编码基因^[9],后陆续在许多常见植物中也分离到查尔酮异构酶,CHI 基因缺失或突变会引起植物从原色变为另一种颜色,如 2004 年, Kim 等^[10]通过改变洋葱中 CHI 基因,使洋葱由红色变成了黄色。黄烷酮-3'-羟化酶是一个分子质量为 42 kDa 的单体蛋白,它最先是在金鱼草中克隆得到,目前从玉米、矮牵牛、拟南芥等许多植物中均克隆到相应的基因^[11],该酶在花青素合成调节中起着重

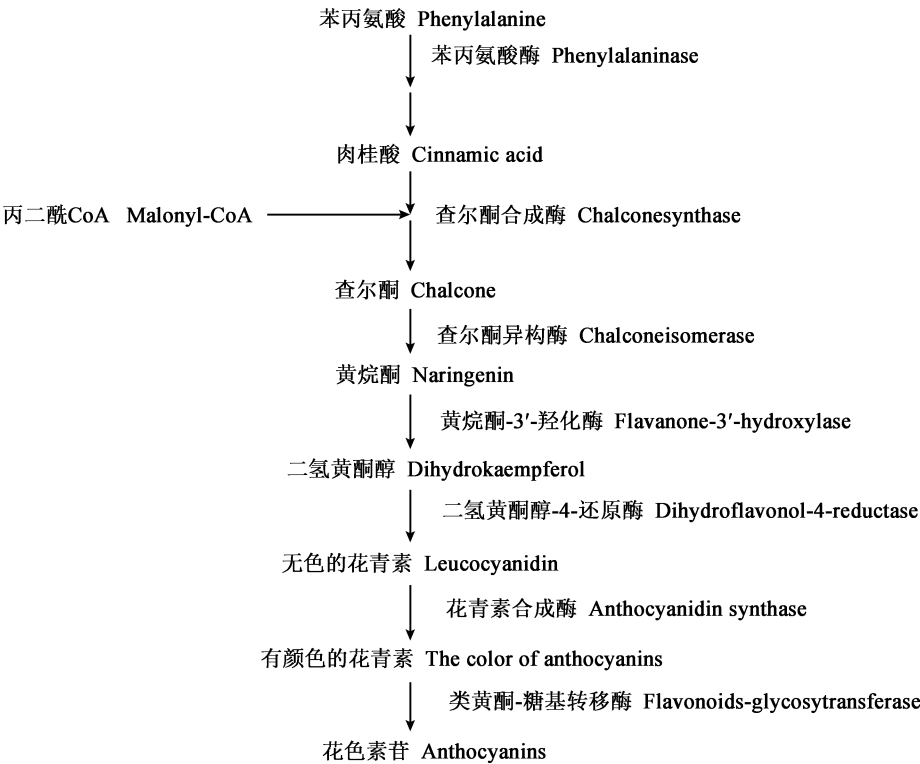


图 2 花青素合成途径及相关酶^[6]

Fig.2 The biosynthesis pathway of anthocyanins and related enzymes^[6].

要作用。二氢黄酮醇-4-还原酶是影响植物呈色及果实多样性的关键酶,与其结合的底物具有特异性,针对该酶编码基因的改造和修饰研究较多,如通过改造该酶和查尔酮合成酶并一起导入蓝猪耳,最终获得白花猪^[12]。花青素合成酶的作用是将无色的花青素转变为呈色的花青素,花青素合成途径中第一个显色化学物在此阶段形成,一旦花青素合成酶的活性受到抑制,或表达它的基因缺失,就会引起花色的变化。合成途径最后借助类黄酮-糖基转移酶将呈色的花青素转变为稳定的花青素苷。

3 花青素的生理功能及作用机理

花青素广泛存在于许多食物中,如:紫薯、葡萄、桑葚、草莓、蔓越橘等,因其具有众多生理活性备受各界的关注,据有关文献报道,已发现其拥有抗氧化、改善肝功能、预防心血管疾病、抗癌、抗炎和保护视力等多种生理作用。

3.1 抗氧化作用

花青素是目前为止所知晓的最有效的天然自由基清除剂,它清除自由基的能力明显强于维生素C和维生素E^[13]。花青素通过以下方面来减少机体内的自由基产生,一是通过阻止与过氧根离子反应;二是螯合机体内某些特定的金属离子,从而阻止羟基的产生;三是抑制脂质过氧化反应如丙二醛的生成,研究发现,它抑制丙二醛的能力明显强于另外两种天然抗氧化剂白藜芦醇和抗坏血酸^[14];四是与胶原蛋白作用形成保护屏障,隔离组织与外界自由基的接触^[15,16]。Ogawa等^[17]对各种莓中花色苷的抗氧化能力进行了对比实验,发现红莓中花青素清除自由基的能力最强。紫甘薯中含有丰富的花青素,陈伟平等^[18]给患高脂症的SD雄性大鼠饲喂甘薯,结果显示饲喂甘薯能够显著降低高脂大鼠中脂肪含量,同时还能减弱肝脏的氧化应激。

从化学结构上看,花青素是一类多羟基物质,邻位上的羟基是决定其抗氧化能力强弱的关键部位,一旦该部位发生糖基化或酰基化,其抗氧化能力就会受到影响。Yoshinaga等^[19]给大鼠灌以紫薯中酰基化的花色苷后,发现其抗氧化能力明显得到提高。当花青素所处环境发生变化时,其抗

氧化能力会受到影响,日本学者 Tamura 等^[20]研究了马斯喀特贝利葡萄中花青素的抗氧化能力,发现在 pH 7.4 条件下其抗氧活性最强。临床医学上报道许多重大疾病如癌症、心血管疾病、艾滋病、非典等都伴有自由基的参与^[21],花青素具有强大的清除自由基的能力,对预防这些疾病有着重要的意义。

3.2 改善肝功能损伤

研究发现,紫薯中的花青素对肝损伤具有较好的修复功效。Corrales等^[22]用它治疗患糖尿病大鼠,结果显示实验组大鼠中肝脏脂肪变性明显减弱,血清中谷草转氨酶和谷丙转氨酶活性均比模型组有所下降,这两种酶水平的高低可以直接反映出机体中肝受损的程度,说明花青素在一定程度上能修复肝损伤。2011年,Hwang等^[23]进行了关于紫甘薯中花青素抵抗叔丁基氧化产物诱导肝毒性的保护机制的大鼠体外实验,通过对丙二醛、谷胱甘肽的评价及肝脏组织病理学观察,证明花青素能够降低大鼠肝损伤发生的概率。Taylor等^[24]从信号通路方面解释了花青素保护肝的作用机制,即花青素通过激活 Akt 和 ERK1/2/Nrf2 信号通路,清除机体内过多的活性氧,并调节抗氧化酶中的血红素氧化酶活性,最终达到护肝效果。闫倩倩等^[25]从紫薯中提取花青素进行了小鼠急性乙醇性肝损伤实验,发现花青素对肝脏具有较好的保护作用。除紫甘薯外,蓝莓中花青素也对由四氯化碳诱导的小鼠急性肝损伤具有保护作用^[16,26]。

3.3 对心血管疾病的影响

心血管疾病是威胁人类健康的主要杀手之一,近年来动脉硬化在我国的发病率呈上升趋势,而低密度脂蛋白的氧化和血小板的聚集是引发动脉粥样硬化的主因。动脉硬化的发生往往会诱发相应器官受损或导致疾病的发生,主要以冠心病、心绞痛和脑栓塞最为常见和严重。体外和体内实验均表明,蔓越莓中花色苷可以抑制低密度脂蛋白氧化、血小板聚集和粘附^[27],通过阻止平滑肌细胞增生和内移吞噬脂质减少泡沫细胞的形成,可以实现预防动脉粥样硬化的效果;还可通过抑制内皮细胞增殖降低粥样硬化发生的概率。法国人日常摄取的食物中富含高饱和脂肪酸,但他们的冠心病、高血压发病率不高,调查发现这与法国

人爱喝葡萄酒有着密切关系,因为葡萄皮中富含花青素,能够减少低密度脂蛋白在机体内的蓄积,通过调节血管内皮细胞及控制平滑肌收缩的细胞转导信号通路来预防“三高”^[28]。另外动物试验也得到类似的结论,姜慧芳等^[29]给患糖尿病的大鼠饲喂不同剂量的紫薯,发现实验大鼠血清中总胆固醇、甘油三酯及低密度脂蛋白胆固醇含量明显降低。Ju 等^[30]通过体外实验研究了紫甘薯花青素对 3T3-L1 脂肪细胞的作用,结果表明它可抑制脂肪的形成并能帮助机体分解多余的脂肪,达到降脂效果。Hwang 等^[31]分析了紫甘薯中花青素减少脂质在体内蓄积的作用机制,发现花青素是通过激活磷酸腺苷活化蛋白酶来减少脂质在肥胖小鼠体内的蓄积。另外,研究发现花青素-3-O- β -葡萄糖苷可通过 AMP 蛋白激酶来维持肝内脂质的稳定^[32];黑米中花青素可以下调视黄醇结合蛋白-4 基因的表达,从而降低胰岛素耐受性,有利于改善肥胖症和 II 型糖尿病^[33],这些研究成果为预防、治疗非酒精性脂肪肝病提供了科学依据。

3.4 抗癌作用

癌症是人类健康的“第二”大杀手,而目前治疗癌症的方法主要依靠手术和物理化学方法,但患者在接受物理化学治疗时会出现许多不良反应。因此,开发新的、天然的、无副作用的抗癌药物成为医学界亟需研究的重大课题。现在已有许多研究证实花青素具有抗癌作用。如:紫薯中的花青素能抑制宫颈癌细胞和肝癌 HepG(2) 细胞增殖^[34,35];蔓越橘汁中花青素对结肠癌细胞的增殖扩散具有较好的抑制效果^[36];草莓中的花青素对乳腺癌也能起到一定防治作用,能够通过抑制癌细胞增殖、转移最终引发乳腺癌细胞凋亡^[37];还有报道,花青素对食道癌、结肠癌、皮肤癌、肺癌也有预防和治疗的功效^[38~40]。

目前,关于花青素抗癌的作用机制有以下几种推测。一是,在转录时,通过调节细胞凋亡的基因表达和信号途径,促进癌细胞向凋亡进化;二是,在癌细胞进行分裂时,降低其周期蛋白和周期依赖激酶的表达量,减缓癌细胞无限增殖的进程并使其分化;三是,破坏表皮生长因子受体与癌细胞的配体结合,减少它的高通表达量,防止癌细胞发生转移和侵袭周边器官;四是,不给予癌细胞所需营养基质,使其长时间处于一种“饥饿”状态,

逐渐会因缺乏“食物”被饿死^[41]。目前花青素抗癌作用的研究还处于初级阶段,但因其独特的生物活性引起学者的极大兴趣,这将是一个很有潜力的研究方向。

3.5 抗炎抗感染作用

花青素具有抗炎抗感染的作用。Rossi 等^[42]利用黑莓中花青素来治疗卡拉胶诱导大鼠的急性肺炎,结果表明,它能帮助机体下调炎症因子的表达,减少炎症物质渗出及中性粒细胞剧增,实现抗炎效果。Tall 等^[43]从酸樱桃分离出花青素,探索了其大鼠炎症引起的疼痛行为的影响,实验显示,酸樱桃中花青素可以减轻实验大鼠的炎症性疼痛。另有报道蔓越橘可以抑制肠道中大肠杆菌的附着,对幽门螺旋杆菌也较好的抑制作用,还有益于人体清除口腔内的有害细菌^[44]。

目前,关于花青素抗炎作用机制有两种解释,一种是通过 PPAR γ 减弱 THP-1 细胞在炎症反应过程中的负作用实现^[45];另一种是通过激活 NF- κ B 和 MAPK 的表达从而表现出极强的抗炎作用^[46]。在临床上治疗感染的药物主要为抗生素类,常见有克拉霉素、甲硝唑、阿莫西林和四环素等,长期使用此类药物会增强菌株的耐药性,因此充分发挥花青素抗炎抗感染作用,将是医学工作者的一个重要研究课题。

3.6 保护视力

联合国粮农组织把富含花青素的蓝莓列为“人类五大健康食品之一”,并因其拥有活化视网膜的作用,被誉为“飞行员的早餐”,说明它在改善视力有着非比寻常的效果。目前有关花青素保护视力的报道越来越多,对其能改善近视的作用机制成为研究花青素的一大热点。研究发现,花青素可以启动视网膜酶,帮助机体激活和提高视紫红质的再生能力,使夜间作业人员能够尽快适应黑暗环境。刘春民等^[47]曾给近视青少年治疗组口服一定量的花青素,一个月后,发现青少年的视力得到明显改善。因为花青素能有效缓解因疲劳引起的视觉模糊,尤其对患糖尿病者的视网膜具有良好的治疗效果^[48]。花青素具有保护视力的作用,这与其拥有强抗氧化能力有着密切关系,它能加快微血管循环减轻眼睛受自由基的攻击。体外实验发现花青素可让各类视网膜细胞逃脱氧化应激的“毒害”,起到保护视力的效果^[49]。

4 花青素的应用前景

花青素是一种来源广、种类多、无毒性、安全性高的天然色素,具备抗氧化、降脂、降血压、抗癌、抗炎等特殊的生理功能,在医药、食品、化妆行业有着重要的应用。

4.1 花青素在医药行业上的应用前景

花青素具有抗氧化、改善血液循环、抑制炎症与过敏、抗癌和其他一些特殊的药理作用,在保健品市场受到重视。尽管市场上还没有花青素纯品销售,但与花青素相关的保健品众多,以胶囊、片剂、口服液等形式出售。临床上还将花青素添加到某些药物中,利用其在不同 pH 条件下显现不同颜色的特征,帮助病人区分药物。但是,由于花青素溶解度较小,在机体内的生物利用度低,且目前药物研发成本较高,花青素在医药方面的应用受到一定限制,但其拥有特有的、强大的生理功效使之注定拥有广阔的前景。

4.2 花青素在食品行业上的应用前景

花青素在食品行业主要有两方面应用,一是直接开发为健康食品,二是作为食品添加剂使用。

目前,人们十分重视养生,希望机体时刻都处于最佳状态,因此日常通过食补摄取一定量的花青素可以增强机体抵抗力。富含花青素的食物包括:茄子、桑葚、紫薯、草莓、葡萄和紫玉米等,都是极富营养价值的食物,对身体健康有益。花青素还能制成各种食品饮料,市场上能见到如紫薯牛奶、紫薯酒、紫薯汁、紫薯饼、葡萄酒等。目前有关紫薯的产品较多,其中紫薯和大米为主要原料压榨酿出的紫薯酒,其体外抗氧化性强于葡萄酒^[49]。

随着合成色素的广泛使用,其安全性备受质疑,因而天然植物色素的开发利用也是食品行业一个研究方向。花青素作为一种安全性高、无毒性、纯天然的植物色素,是食品着色的最佳天然色素之一,可使食品呈现五彩缤纷的颜色,深受人们的喜爱。植物中的花青素类色素繁多,如花生衣红色素、紫玉米色素、桑葚红色素、紫苏色素和红球甘蓝色素等均可在食品工业中应用。尽管比合成色素安全可靠,但花青素也存在一些缺点。花青素易受外界温度、pH、金属离子、光照等因素的

影响,其稳定性差,要使食物拥有稳定的色泽和较好口感,就必须确保其 pH 维持在 3~5 之间。

花青素因拥有抑菌作用,还被开发成“防腐剂”代替市场上苯甲酸等合成防腐剂。众所周知,如长期摄入这类合成的防腐剂对身体有害,因此花青素作为防腐剂符合人们对食品安全的要求。

4.3 花青素在化妆行业上的应用前景

随着审美意识的增强,人们特别是女性非常注重皮肤的保养。人体皮肤会随着年龄的增长逐渐失去原来的弹性、光泽,甚至产生皱纹,这是由于人体内酶系统受自由基的侵袭,会释放胶原蛋白酶和硬弹性蛋白酶,在这两种酶的催化下,皮肤中会产生过多的胶原蛋白和硬弹性蛋白,它们相互作用导致其交联并降解,造成皮肤的弹性消失,出现令人厌烦的皱纹。人类审美观不断提升,市场对化妆护肤品的需求也日趋增多,但长期使用合成的化妆品会对机体产生许多副反应,特别是一些化学物质对人体皮肤有刺激,甚至有些对皮肤、神经、肝脏等组织或器官有毒害作用,曾报道化妆品和香水里面含有的邻苯二甲酸盐对人体具有危害性,所以开发安全、抗衰老、护肤效果佳的天然护肤品成为化妆行业重要研究课题,而花青素正好符合这些特质,它在欧洲有着“口服的皮肤化妆品”、“天然的维生素”之称,凭借其无毒性及抗氧化能力打开化妆行业的大门指日可待,并也会拥有广阔的市场。

总之,花青素由于具有医药、保健和营养价值,在实际应用中前景广阔。我们应加强对花青素生理作用的研究,运用先进的技术手段使花青素特有的营养和药理作用得到成分发挥,加快花青素功能性产品的研发,造福人类。

参 考 文 献

- [1] Tsuda T, Horio F, Uchida K, *et al.*. Dietary cyanidin 3-O- β -D-glucoside-rich purple corn color prevents obesity and ameliorates hyperglycemia in mice [J]. *J. Nutr.*, 2003, 133 (7): 125-130.
- [2] 李皓雲,段俊丽,王一尘.原花青素的功能与研究进展[J]. *国际老年医学杂志*, 2013, 34(2): 73-76.
- [3] 韩海华,梁名志,王丽,等.花青素的研究进展及其应用[J]. *茶叶期刊*, 2011, 37(4): 217-220.
- [4] 王倩,汪云,宦卫青,等.紫甘蓝色素的提取及组分的研究[J]. *天然产物研究与开发*, 2010, (22): 1057-1060.
- [5] 刘玉芹,王晓,杜金华.花色苷的分离纯化及定性定量方法

- 研究进展[J].中国食品添加剂,2010,(6):178-182.
- [6] 宫 硖,薛 静,张晓东.植物花青素合成途径中的调控基因研究进展[J].生物技术进展,2011,1(6):381-390.
- [7] 赵启明,李 范,李 萍.花青素生物合成关键酶的研究进展[J].生物技术通报,2012,12:25-32.
- [8] 葛翠莲,黄春辉.果实花青素生物合成研究进展[J].园艺学报,2012,39(9):1655-1664.
- [9] 杨晓娜.花色苷生物合成关键酶基因在植物基因工程中的应用[J].安徽农业科学,2013,41(7):2866-2869.
- [10] Kim S, Jones R, Yoo K S, *et al.* Gold color in onions: a natural mutation of the chalcone isomerase gene resulting in a premature stop codon[J]. Mol. Genet. Genom.,2004,272(4):411-419.
- [11] 高燕会,黄春红,朱玉球,等.植物花青素苷生物合成及调控的研究进展[J].中国生物工程杂志,2012,32(8):94-99.
- [12] Aida R, Kishimoto S, Tanaka Y, *et al.* Modification of flower color in torenia (*Torenia fournieri* Lind.) by genetic transformation[J]. Plant Sci.,2000,153(1):33-42.
- [13] 赵秀玲.蓝莓的成分与保健功能的研究进展[J].中国野生植物资源,2011,30(6):19-23.
- [14] 郭 磊.乙醇的基因毒性及原花青素的保护作用研究[D].沈阳:沈阳药科大学,博士学位论文,2008.
- [15] 赵海田,王振宇,王 路,等.花色苷类物质降血脂机制研究进展[J].东北农业大学学报,2012,43(3):139-144.
- [16] 林清华.蓝莓花青素对CCl₄诱小鼠肝损伤的保护作用及其抗氧化机制研究[D].北京:北京林业大学,硕士学位论文,2012.
- [17] Ogawa K, Sakakibara H, Iwata R, *et al.* Anthocyanin composition and antioxidant activity of the crowberry and other berries[J]. J. Agric. Food Chem., 2008, 56(12):4457-4462.
- [18] 陈伟平,毛童俊,樊 林,等.紫心甘薯对高脂血症大鼠脂质代谢及氧化应激的影响[J].浙江大学学报:医学版,2011,40(4):360-364.
- [19] Yoshinaga M, Tanaka M, Nakatani M, *et al.* Changes in anthocyanin content and composition of developing storage root of purple-fleshed sweetpotato[J]. Breed. Sci., 2000, 50: 59-64.
- [20] Tamura H, Yamagami A. Antioxidative activity of monoacylated anthocyanins isolated from Muscat Bailey A grape[J]. J. Agric. Food Chem., 1994, 42(8):1612-1615.
- [21] 郑荣梁,黄中洋.自由基生物学[M].北京:高等教育出版社,2007.
- [22] Corrales M, Toepfl S, Butz P, *et al.* Extraction of anthocyanins from grape by-products assisted by ultrasonics high hydrostatic pressure or pulsed electric fields: a comparison[J]. Innov. Food Sci. Emerg. Technol., 2008, 9:85-91.
- [23] Hwang Y P, Choi J H, Choi J M, *et al.* Protective mechanisms of anthocyanins from purple sweet potato against tert-butyl hydroperoxide-induced hepatotoxicity [J]. Food Chem. Toxicol., 2011, 49(9):2081-2089.
- [24] Taylor C. Anthocyanins in cardiovascular disease[J]. Am. Soc. Nutri., 2011, 2:1-7.
- [25] 闫倩倚,周玉珍,张雨青.紫甘薯花青素对小鼠急性乙醇性肝损伤的预防保护作用[J].江苏农业科学,2012,40(5):265-266.
- [26] 王玮琳.蓝莓提取物对酒精性肝损伤干预作用研究[D].长春:吉林大学,硕士学位论文,2011.
- [27] Reed J. Cranberry flavonoids, atherosclerosis and cardiovascular health[J]. Crit. Rev. Food Sci. Nutr., 2002, 42(3):301-316.
- [28] Renaud S, de Lorgeril M. Wine, alcohol, platelets, and the French paradox for coronary heart disease[J]. Lancet, 1992, 339(8808):1523-1526.
- [29] 姜慧芳,李向荣,唐 超.紫心甘薯黄酮提取物对糖尿病大鼠糖脂代谢的影响[J].浙江大学学报:医学版,2011,40(4):374-379.
- [30] Ju J H, Yoon H S, Park H J, *et al.* Anti-obesity and anti-oxidative effects of purple sweet potato extract in 3T3-L1 adipocytes *in vitro* [J]. J. Med. Food, 2011, 14(10):1097-1106.
- [31] Hwang Y P, Choi J H, Han E H, *et al.* Purple sweet potato anthocyanins attenuate hepatic lipid accumulation through activating adenosine monophosphate-activated protein kinase in human HepG2 cells and obese mice[J]. Nutr. Res., 2011, 31(12):896-906.
- [32] Liu G L, Zhong R M, Wang Y, *et al.* Cyanidin-3-O-b-glucoside regulates fatty acid metabolism via an AMP-activated protein kinase dependent signaling pathway in human HepG2 cells[J]. Lipids Health Dis., 2012, 11(10):1-13.
- [33] Inaguma T, Han J, Isodal H. Improvement of insulin resistance by cyanidin 3-glucoside, anthocyanin from black beans through the up-regulation of GLUT4 gene expression [J]. BMC Proceed., 2011, 5(suppl.8):15-18.
- [34] 曹东旭,董海叶,李 妍,等.紫薯花色苷对人肝癌 HepG2 作用[J].天津科技大学学报,2011,26(2):9-12.
- [35] 陈永强,刘金娟,曹成亮,等.紫甘薯汁抗肿瘤活性及诱导人肝癌 HepG2 凋亡机制的研究[J].食品科学,2013,34(1):263-267.
- [36] Kang S Y, Seeram N P, Nair M G. *et al.* Tart cherry anthocyanins inhibit tumor development in Apc(Min) mice and reduce proliferation of human colon cancer cells [J]. Cancer Lett., 2003, 194(1):13-19.
- [37] Somasagara R R, Hegde M, Chiruvella K K, *et al.* Extracts of strawberry fruits induce intrinsic pathway of apoptosis in breast cancer cells and inhibits tumor progression in mice[J]. PLoS One, 2012, 7(10):e47021.
- [38] 赵 婧,阮 红,高秋萍,等.紫心甘薯多糖的分离及组分抑癌活性研究[J].浙江大学学报:医学版,2011,40(4):365-373.
- [39] 林晓霞,朱寿民.中药花色素类成分抗癌研究进展[J].中国中药杂志,2005,30(15):1147-1150.
- [40] 丁小静.蓝莓提取物对急性化学性损伤的干预作用[D].长春:吉林大学,硕士学位论文,2010.
- [41] 彭晓莉,余小平.花青素对乳腺癌防治作用及机制研究进展[J].成都医学院学报,2011,3(1):226-229.
- [42] Rossi A, Serraino I, Dugo P, *et al.* Protective effects of anthocyanins from blackberry in a rat model acute lung

- inflammation[J]. *Free Rad. Res.*, 2003, 37(8):891–900.
- [43] Tall J M, Seeram N P, Zhao C, *et al.*. Tart cherry anthocyanins suppress inflammation-induced pain behavior in rat[J]. *Behav. Brain Res.*, 2004, 153(1):181–188.
- [44] 钟文君. 蔓越莓的保健功能[J]. 国外医学卫生学分册, 2004, 31(6):370–373.
- [45] Wang Q, Xia M, Liu C, *et al.*. Cyanidin-3-O-beta-glucoside inhibits iNOS and COX-2 expression by inducing liver X receptor alpha activation in THP-1 macrophages[J]. *Life Sci.*, 2008, 83(5-6):176–184.
- [46] Min S W, Ryu S N, Kim D H. Anti-inflammatory effects of black rice, cyanidin-3-O-beta-D-glycoside, and its metabolites, cyanidin and protocatechuic acid [J]. *Int. Immunopharm.*, 2010, 10(8):959–966.
- [47] 刘春民, 王抗美, 邹玲. 花青素对近视青少年视疲劳症状及视力的影响[J]. 中国实用眼科杂志, 2005, 23(6):607–609.
- [48] Perossini E, Guidi G, Chiellini S, *et al.*. Diabetic and hypertensive retinopathy therapy with *Vaccinium myrillus* anthocyanoside (Tegens). A double blind placebo-controlled clinical trial[J]. *Ann. Ottalmol. Clin. Ocul.*, 1987, 113:1173–1176.
- [49] Kalt W, Hanneken A, Milbury P, *et al.*. Recent research on polyphenolics in vision and eye health [J]. *J. Agric. Food Chem.*, 2010, 58(7):4001–4007.