

玉米黄素提取及应用研究进展

邱涛涛¹, 黄明发¹, 陈颜虹², 王华^{3*}

(1. 西南大学 食品科学学院, 重庆 400716; 2. 西南大学 农业部蚕桑学重点实验室, 重庆 400716; 3. 西南大学柑桔研究所, 重庆 400712)

摘要: 玉米黄素是一种天然类胡萝卜素。大量研究表明, 它具有预防老年性黄斑病变、白内障、心血管疾病以及抗癌等功效, 和人类健康密切相关。文章综述了玉米黄素的性质、提取方法、生理功能以及在食品方面的应用, 并对其应用前景进行了展望。

关键词: 玉米黄素; 提取; 生理功能; 应用

中图分类号: TS201 文献标识码: A 文章编号: 1000-9973(2008)11-0018-06

Progress of research on utilization and extracting of zeaxanthin

QIU Tao-tao¹, HUANG Ming-fa¹, CHEN Yan-hong², WANG Hua^{3*}

(1. College of Food Science, Southwest University, Chongqing 400716, China; 2. Key Sericultural Laboratory of Agriculture Ministry, Southwest University, Chongqing 400716, China; 3. Citrus Research Institute, Southwest University, Chongqing 400712, China)

Abstract: Zeaxanthin is a natural carotenoid existing. Lots of research results show that zeaxanthin has efficiencies like prevention from senile maculopathy, cataracta, cardiovascular diseases and anticancer etc. It is closely to the people health. This paper introduces the main properties, technologies of extraction, physiological functions of zeaxanthin and the applications in food. The prospect of application were discussed as well.

Key words: zeaxanthin; extraction; physiological function; application

玉米黄素(zeaxanthin)是玉米黄色素的主要成分之一,也是人类血液和组织中的主要类胡萝卜素(carotenoids)。流行病学表明,玉米黄素具有诸多生理功能,它可有效地阻断体内的链式自由基反应,抑制自由基的产生,阻止脂质过氧化,延缓衰老和预防癌症,因而被认为是预防和治疗由自由基引起的许多疾病的理想药物。在食品工业中,玉米黄素作为天然食用色素,正在逐渐取代柠檬黄、日落黄等合成色素,而研究开发以玉米黄素为主要功能成分的保健品将具有广阔的市场前景。

1 玉米黄素的结构与性质

玉米黄素(3, 3', -二羟基-β胡萝卜素),又名

玉米黄质,其分子式为 C₄₀H₅₆O₂,分子量为 568.85,带有羟基的类胡萝卜素,属于萜烯类不饱和化合物。其分子结构存在全反式(如图 1)和多种立体异构体。

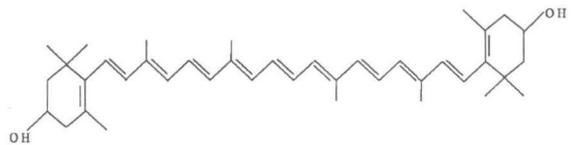


图 1 玉米黄素的全反式结构

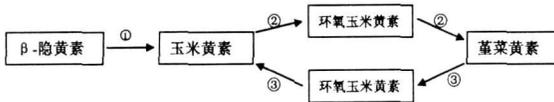
玉米黄素是一种天然的脂溶性色素,易溶于乙醚、丙酮、石油醚、酯类等有机溶剂;玉米黄素 1% 溶液为柠檬黄色,10℃以上为血红色油状液体,10℃以下为黄色半凝固油状物;具有较好耐氧化性、耐酸性;高温短时处理基本稳定,长时间则

不稳定;低温则较稳定;对 Fe^{3+} 和 Al^{3+} 的稳定性较差,但对其它离子、酸、碱及还原剂 Na_2SO_3 等较稳定;存在于固体食品中的玉米黄素,在常温 and 自然光条件下较稳定,1% 溶液对太阳光较敏感。

2 玉米黄素的来源

2.1 玉米黄素的合成途径

1930 年, Karrer 等首次从玉米中分离得到玉米黄素; 1944 年, Zechmeister 提出了玉米黄素的立体化学结构; 1956 年, Isler, Loeber, Ruttimann 等合成了玉米黄素; 1969 年和 1974 年 Ville 和 Hlubucek 先后报道了玉米黄素的吸收光谱数据及形状。玉米黄素像其它类胡萝卜素一样不能由人体自身合成, 必须通过饮食摄取。在植物中, 玉米黄素是由 β -隐黄素 (Cryptoxanthin) 经专一性酶 β -胡萝卜素羟化酶作用转化而成; 在植物体叶黄素循环中, 玉米黄素与环氧玉米黄素 (Antheraxanthin) 和萹菜黄素 (Violaxanthin) 三种类胡萝卜素可以发生可逆性互变(如图 2)^[1]。而在细菌中, 位于类囊体膜上的 β -胡萝卜素羟化酶能催化 β -胡萝卜素转化为玉米黄素, 如一些非光合细菌如分枝杆菌 (Mycobacterium)、欧文氏菌 (Erwinia) 和黄杆菌 (Flavobacterium)。



① β -胡萝卜素羟化酶 (BCH); ② 玉米黄素环氧酶 (ZEP); ③ 萹菜黄素脱环氧酶 (VDE)。

图 2 玉米黄素植物体中合成途径示意

2.2 玉米黄素的天然来源

目前工业生产上提取玉米黄素较理想的原料有金盏菊、玉米和柑桔皮。金盏菊中玉米黄素含量非常高且仅含少量其它类胡萝卜素, 是提取玉米黄素的理想原料之一; 玉米中玉米黄素和黄体素的含量约为 0.78×10^2 mg/g, 来源丰富, 并且价格低廉, 也是玉米黄素的良好来源; 而柑桔皮中亦含有丰富的玉米黄素, TAO Jun 等^[2] 利用 HPLC 技术对 53 个柑桔品种进行检测发现, 柑桔品种不同, 玉米黄素含量不同, 在椪柑皮中玉米黄素含量最高为 $10.38 \mu\text{g/g}$ FW, 而在本地早品种中果肉中含量最高为 $2.70 \mu\text{g/g}$ FW, 从柑桔皮中提取玉米黄素是柑桔皮深加工及综合利用的新途

径。此外, 玉米黄素还分布在一些绿色的蔬菜和水果中(如表 1)。

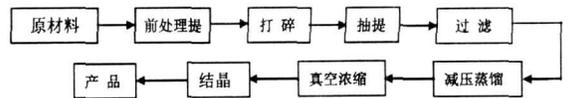
表 1 一些水果和蔬菜中主要玉米黄色素的含量

| 水果/蔬菜 | 1×10^2 (mg/g) ^[3-5] | | | |
|-------|---|--|---------------|--------------------|
| | β -胡萝卜素 β -carotene | β -隐黄素 β -cryptoxanthin | 叶黄素 Lutein | 玉米黄素 Zeaxanthin |
| 苹果 | 19.4 | 0.9 | 1.1 | 0.5 |
| 葡萄 | 24.5 | 0 | 53.4 | 2.3 |
| 甜瓜 | 7.0 | 0 | 0.9 | 0.3 |
| 桃 | 1.3 | 1.7 | 1.8 | 0.3 |
| 李子 | 43.2 | 15.8 | 16.1 | 0.4 |
| 西瓜 | 504.0 | 13.8 | 14.1 | 1.4 |
| 甘蓝(鲜) | 4.7 | 0 | 88.5 | 9.3 |
| 菠菜(鲜) | 4.1 | 0 | 133.7 | 2.7 |

3 玉米黄素分离提取

3.1 溶液直接分离提取

3.1.1 直接浸提提取工艺



有机溶剂分离提取法的主要特点是提取工序比较简单, 提取率较高, 工艺中过滤得到的滤渣可以二次浸提, 蒸馏后得到的溶剂可以回收再循环抽提利用。目前对于玉米蛋白粉中玉米黄素的提取已经比较成熟, 主要是将玉米蛋白粉烘干, 粉碎, 加入 95% 乙醇, 反复浸泡提取数次, 将蛋白粉黄色提取到无色为止, 收集浸泡液进行真空浓缩, 即得深红色液体色素产品, 用结晶化方法分离得到玉米黄素(以上操作均应在避光条件下进行)。此方法特别要对提取时间的掌握, 时间过短提取就不充分, 提取时间过长, 容易沉积其它的杂质影响纯度。张志华等^[6] 通过正交试验提出 95% 乙醇为浸提剂, 在料液比为 1: 16, 温度为 65 °C 的条件下, 浸提 4 h, 玉米黄色素浸提效果较好, 最后经结晶分离得到玉米黄素。

3.1.2 酶法提取

植物体中类胡萝卜素与蛋白质一般以结合的状态存在, 采用传统的直接浸提法, 浓缩后得到玉米黄色素粗制品中含有一定的醇溶蛋白, 不利于最后玉米黄素的纯化。采用酶法提取玉米黄色素, 就是利用蛋白酶使部分蛋白质水解, 拆散蛋白质的网络结构, 不仅可以提高玉米黄色素的提取

速率,而且可得到较高纯度的玉米黄色素。朱蕾等^[7]通过正交试验最终确定中性蛋白酶水解条件,中性蛋白酶的浓度为 1.2%、pH 值 7.0、温度 40 ℃条件下水解玉米蛋白粉料 6 h,离心,弃去上清液,将残渣置于 50 ℃烘箱中热液风干燥,以丙酮:石油醚为 1:1(v/v)混合溶液为提取溶剂,避光提取,至提取液无色,得到的溶液真空浓缩,即得到玉米黄色素,最后结晶化分离玉米黄素。采用酶法提取玉米黄素,在玉米蛋白粉在水解过程中,需要很好的控制底物浓度、酶浓度、pH、水解时间、水解温度。

3.1.3 超声波提取

超声波提取玉米黄素,也是在直接浸提法的基础上,以超声波为辅助,提高玉米黄素的得率。超声辐射的提取过程中,超声场声能量产生超声空化作用,大大加快了内扩散速度,同时对固体颗粒表面进行剥离、凹蚀和粉碎作用,创造了新的活性表面,使传质比表面积增大,从而提高提取速度。张秋荣等^[8]以 95%乙醇作为提取溶剂,提取温度为 50 ℃,超声提取 1.5 h,玉米黄色素的提取收率可达 8.7%。超声波提取玉米黄色素缩短了提取的时间,操作简单,所得产品质量稳定,但浸出后的物料蛋白含量较高,需要对产物进一步纯化分离得到玉米黄素。

3.1.4 超临界流体萃取

超临界流体萃取(Supercritical Fluid Extraction, SFE)装置是一种固-液或液-液的特殊分离设备,目前较常用的萃取溶剂有 CO₂ 和丙烷。张民等^[9]采用超临界丙烷萃取玉米黄色素获得成功,在压力 8.5~10.0 MPa,温度 96.8 ℃条件下,萃取时间 4 h,丙烷流量控制为 35 g/min,丙烷纯度 > 99.5%,可得到纯度较高的玉米黄色素,并且溶残含量低,这有利于进一步得到高品质的玉米黄素。采用超临界流体萃取法提取玉米黄素它不引进任何化学合成物质,其操作温度低,压力不会过高,玉米黄素亦不易降解,有利于保持玉米黄素的天然性。但由于该技术对于设备的要求较高,还不能形成大规模工业化生产,并且产出率较低。

3.1.5 膜辅助分离提取技术

膜分离作为一种新发展的高新分离技术,它利用半透膜作为障碍层,借助于膜的选择渗透作用,在能量、浓度或化学位差的作用下对混合物中

的不同组分进行分离纯化。Tsui 等^[10]采用膜技术对玉米中的叶黄素类(Xanthophyll)进行提取,将经过磨碎的玉米材料经 85%的酒精在 50 ℃下提取 30 min,得到的提取液采用超滤(U20T 和 RTM-PX 膜)进行分离得到玉米醇溶蛋白,再采用纳米过滤技术(TFG-SR1 膜)分离纯化得到叶黄素类物质(叶黄素和玉米黄素),再采用结晶化方法或层析法对叶黄素和玉米黄素进行分离得到玉米黄素,整个过程装置比较简单,同时操作方便、结构紧凑、维修费用低且方便、易于自动控制。

3.2 其它制备合成玉米黄素的方法

3.2.1 生物合成法制备玉米黄素

玉米黄素是植物的次生代谢产物,可以通过重组基因技术可调控异戊二烯途径合成玉米黄素,构建高产植物或菌株。向智男报道国外研究人员采用草生欧文氏菌(*E. herbicola*)的基因簇克隆入大肠杆菌中,经修饰加工后在酿酒酵母细胞中表达。将多余的某些部分删除后,这种再构建的基因表达的牛儿焦磷酸(GGPP)成酶的活性从 6.35 增至 23.4 nmol/min,把合成番茄红素环化酶原有的起始码 GTG 更换成 ATG,并将编码六氢番茄红素合成酶基因与酿酒酵母磷酸甘油酸激酶启动子融合后用一个整合载体转化到酵母中,可产玉米黄素 5%^[11]。2000 年,研究人员等将 PSY、LycB 二个基因连接到胚乳特异表达的谷蛋白启动子上,同时将细菌八氢番茄红素降解酶基因 crtI 连接到花椰菜斑点病毒 35 S 启动子上,然后一起构成表达载体转入到一个日本水稻品种,结果在水稻胚乳中检测到玉米黄素^[12]。

3.2.2 化学方法制备玉米黄素

叶黄素分子结构在多羟基醇和碱作用下可转化成玉米黄素,利用这一性质可以进行玉米黄素的生产。用叶黄素异构化生成玉米黄素速率较快,全部过程可在常压下进行,较适合于工业化生产。Karrer 和 Jucker 报道,在乙醇钠和苯存在下,可以将叶黄素转化为玉米黄素;Andrewes 也报道在氮气中,在甲醇、甲醇钾和二甲亚砷存在下,可以将叶黄素转化为玉米黄素。美国专利报道叶黄素在无催化剂的水相体系中能异构化产生玉米黄素的方法。在该方法中,叶黄素与强碱水溶液长时间反应得到玉米黄素^[13]。

4 玉米黄素的生理作用

玉米黄素本身具有的分子结构特征,使得玉米黄素具有很强的抗氧化性,玉米黄素的分子结构中存在 11 个共轭双键,构成了一个大的共轭体系,这些共轭双键的存在使得玉米黄素能阻断自由基链式传递,从而具有很强的抗氧化活性。在生物体中玉米黄素通过降低化学活性物质如自由基单线态氧和光化学敏感剂的反应活性来起到抗氧化作用。同时玉米黄素的分子结构中末端基团上带有羟基,增强了其抗氧化能力,保护生物系统免受一些因过量氧化的过程或反应所产生的潜在的有害作用。

4.1 玉米黄素对癌细胞的抑制

Sujak 等^[14]研究得出,玉米黄素对于抑制细胞脂质的自动氧化和防止氧化带来的细胞损伤方面有一定的作用,而细胞脂质的过氧化与肿瘤的生长有关,所以玉米黄素具有减少癌症的发生发展和增强免疫功的生物功能。日本京都府立医科大学的一项研究表明,一些癌症的发生可与患者体内玉米黄素缺乏有一定关系,多食柑桔可补充玉米黄素,从而可以预防癌症。孙震等^[15]对玉米蛋白粉中玉米黄素对人口腔鳞癌细胞株 KB 增殖的抑制作用进行了研究,结果显示玉米黄素导致人口腔癌细胞 KB 的 DNA 损伤,抑制肿瘤细胞生长,在 50 $\mu\text{mol/L}$ 剂量处理的细胞经 24 h 后受到的抑制最明显。玉米黄素对腔癌 KB 细胞增殖的抑制是通过影响细胞 DNA 的合成,改变其细胞周期,阻断肿瘤细胞在 $G_1 + G_0$ 期的作用,从而干扰了肿瘤细胞的正常的增殖活动,达到抑制肿瘤生长的作用,同时使肿瘤细胞向分化细胞群转变。

4.2 玉米黄素对眼睛的保护作用

4.2.1 玉米黄素对老年黄斑性病变的影响

老年黄斑性病变(Age-related Macular Degeneration, ARMD 或 AMD)是眼睛老化所造成的疾病,严重时会造成视力缺损。Bone 等^[16]分别采用高效液相色谱(HPLC)和闪烁光度法(Flicker Photometry),检测血清中玉米黄素的浓度和黄斑色素光密度,该实验显示人体摄入玉米黄素的量,血清中玉米黄素的浓度和黄斑色素光密度存在正比关系。视网膜通过叶黄素凝结蛋白

质介导吸收玉米黄素,能选择性地在眼部进行黄斑积累,并提供黄斑色素;同时玉米黄素可作为光过滤器,捕获因高能量的蓝光通过角膜并照射到视网膜上而产生的自由基,从而可以延缓、预防和改善老年性视黄斑病变。最新报道显示,适量摄入玉米黄素和叶黄素可以改善老年黄斑性病患者的视力^[17, 18]。

叶黄素和玉米黄素在正常人眼视网膜色素浓度为 0.1~1 mmol/L 之间,对于玉米黄素的摄取必须适量,研究显示正常人摄入玉米黄素可以起到预防 AMD 的作用,然而 AMD 病人摄入过量的玉米黄素,则会产生类胡萝卜素醛(Carotenoid-derived Aldehydes, CDA)增加氧化应激,导致细胞的氧化-还原电势不平衡,使细胞死亡,以及消耗掉大量的亚麻仁油酸,对人体造成有害影响^[19]。

4.2.2 玉米黄素对白内障的预防作用

白内障(Cataract)是老年人中普遍存在的疾病,其形成与紫外线、自由基和氧化剂有关。研究人员 Taber 等在 1980~1992 年对 77466 位年龄在 45-71 岁的妇女的白内障摘除手术进行调查,结果发现,平时摄入玉米黄素和叶黄素较高的妇女,其进行手术的危险性要比摄入量少的低 22%。玉米黄素通过淬灭单线态氧,来防止眼球晶状体中蛋白和脂类的氧化,从而间接地减少晶状体蛋白的氧胁迫,起到预防白内障的病发的作用。

4.3 预防心血管疾病

有研究报道日常摄入类胡萝卜素多的人群患心血管疾病(Angiocardopathy)的危险性较低。研究者发现在体外条件下玉米黄素能对低密度脂蛋白(LDL)氧化有抑制作用;Trieschmann 等^[20]已经证实高密度脂蛋白(HDL)与摄入的玉米黄素具有显著的正相关性,它有助于减缓动脉硬化的进程。Stahelin 等证实血液类胡萝卜素水平与局部缺血型心脏病之间存在反比关系。Street 和 Carpenter 的研究表明,玉米黄素可显著地降低心肌梗塞的发病率,有助于减缓动脉硬化进程。Iribarren 等研究了血液部分类胡萝卜素对颈总动脉内膜血管中层增厚的影响,其中黄体素和玉米黄素降低颈总动脉内膜血管中层增厚的能力最强。

4.4 对受损细胞和受紫外线照射细胞的影响

紫外线辐射某些细胞株能诱导产生细胞光毒性,造成细胞膜破裂、DNA 丝条断裂、嘧啶二聚体内旋,以及蛋白质和酶类物质破坏。目前研究者更加关注紫外线辐射对细胞 DNA 分子水平上的影响,特别是辐射产生的活性氧簇(Reactive Oxygen Species, ROS)对细胞 DNA 分子水平上影响。Santocono 等^[21]采用化学发光技术对玉米黄素在受紫外线照射人神经母细胞瘤细胞和上皮细胞的抗氧化活性进行了分析,结果显示玉米黄素可以防止紫外线照射对上皮细胞的 DNA 破坏,而在人神经母细胞瘤细胞中发现许多外在因素(紫外线照射的时间,玉米黄素的浓度,细胞种类,细胞的状态,其它抗氧化剂作用)的影响可以导致类胡萝卜素的组分从抗氧化剂变成促氧化剂。

4.5 其他的生理作用

Richard 等研究显示类胡萝卜素(β -胡萝卜素、 α -胡萝卜素、叶黄素和玉米黄素)能通过猝灭单线态氧、清除自由基、减少活性氧簇产生的破坏,以及调节氧化还原敏感性转录因子,从而延缓肌肉纤维萎缩和肌肉强度的老化,并且可以减少炎症的发生^[22]。

玉米黄素能与膜发生相互作用,1997 年 Wisniewska 等^[23]采用硬脂酸自旋标记电子顺磁共振波谱法检测到玉米黄素能使磷酸卵磷脂膜内部疏水性增强。Widomska 等^[24]采用不同的电子顺磁共振自旋标记法检测玉米黄素的顺式结构对二肉豆蔻酰磷脂酰胆碱(DMPC)双分子层中部不同性质的影响,结果显示以玉米黄素的顺式异结构与其全反式异结构一样位于膜内部,其顺式结构结构在增加烷基链的顺序和膜内部疏水性方面要强于其反式结构;同时都能降低饱和与不饱和膜中氧的运输值、以及膜的流动性。

5 玉米黄素在食品中的运用

5.1 食品保鲜剂

卢艳杰等^[25]将玉米黄色素(β -胡萝卜素、 β -隐黄素、叶黄素、玉米黄素)与常用的合成抗氧化剂(BHT)在抗氧化能力上进行比较,结果显示在氧化的最初一段时间内,玉米黄色素的抗氧化能力强于 BHT。玉米黄素的抗氧化活性,可防止食品

中脂质和维生素的氧化,保持食品的营养物质和风味不因氧化而破坏,延长食品的保鲜期,因而玉米黄素是一种十分理想的天然食品保鲜剂。目前生产上将玉米黄素常用于固体食品中。

5.2 天然着色剂

应用安全无毒的天然食用色素代替合成食用色素食品是工业发展的趋势。玉米黄素本身就是食物中的正常成分,玉米黄素分子中的 2 个六元碳环上的 1 个含氧基团使其具有较大的稳定性,有较强的着色能力;同时兼有营养强化或一定药理作用,调节人体代谢有积极作用,符合天然食品添加剂“天然”、“营养”、“多功能”的发展方向。但是玉米黄素作为天然色素比合成色素价格高,充分利用廉价的天然资源制取玉米黄素食用色素,降低其生产成本,才能更好推广运用天然食用色素。

王威等^[26]将玉米黄色素添加到人造奶油、硬糖、软糖中,对玉米黄色素的着色情况进行了研究。结果显示,在人造奶油中添加 0.5% 玉米黄色素,奶油呈现自然黄色;在硬糖中添加 0.26% 玉米黄色素,硬糖呈现稳定的黄色;而在 100 °C 条件下,软糖中添加量 0.4% 玉米黄色素,并在 70 °C 烘干 50 h,无明显变化,但着色后软糖色泽自然、逼真、可代替合成色素使用。

5.3 新型饮料

玉米黄素广泛存在于水果、蔬菜、花卉中,而作为类胡萝卜素的主要成分之一,它具有预防 AMD、白内障、心血管病等作用。虽然将玉米黄素作为主要功能成分的保健品开发还不够成熟,但玉米黄素天然来源丰富,开发利用玉米黄素具有广阔的前景。目前美国新奥尔良食品研究所与 Kemira 公司合作,从金盏花等植物中提取玉米黄素,共同推出含 5% 叶黄素加玉米黄素等类胡萝卜素营养成分的眼保健饮料。

6 结束语

近年来,国际上对天然色素的开发和利用日渐重视,相信玉米黄素势必会在食品行业中,特别是保健食品的生产中发挥重要的作用。目前我国是柑桔生产大国,2006 年柑桔产量达 1790 万吨,居世界第二位,而且我国玉米种植范围广、产量大,如果将柑桔和玉米作为生产玉米黄素的原料

进行深加工,延长其产业链,这必将降低玉米黄素的生产成本而带来新的产业。

参考文献:

- [1] 徐昌杰,张上隆. 植物类胡萝卜素的生物合成及其调控[J]. 植物生理学通报, 2000, 36: 64-70
- [2] TAO J, ZHANG S, ZHANG L C, et al. A analysis of Major Carotenoid composition and its content of citrus fruit[J]. Agricultural Sciences in China. 2003, 2(10): 1157-1163
- [3] Liu Y, Conrad O P, Suresh V. Comparison of three chosen vegetables with others from South East Asia for their lutein and zeaxanthin content[J]. Food Chemistry, 2007, 101: 1533-1539
- [4] Kim Y N, Giraud D W, Driskell J A. Tocopherol and carotenoid contents of selected Korean fruits and vegetables [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2007, 20(6): 458-465
- [5] 卢艳杰,姚惠源. 黄体素、玉米黄素及其生理功能研究现状[J]. 食品与发酵工业, 2003, 29(2): 81-84.
- [6] 张志华, 谯伟, 罗倩. 玉米黄色素的提取工艺探讨[J]. 中国食品添加剂, 2003(1): 27-30
- [7] 朱蕾, 陈敏, 李赫, 等. 酶法提取玉米蛋白粉中玉米黄色素的工艺研究[J]. 粮油加工与食品机械, 2005(8): 65-67
- [8] 张秋荣, 单丽红, 杜斌, 等. 超声波提取玉米黄色素的工艺研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2005, 26(2): 110-112
- [9] 张民, 冯亮, 王愚, 等. 超临界丙烷萃取玉米黄色素的研究[J]. 食品科技, 2001(3): 34-35
- [10] T sui E M, Cheryan M. Membrane processing of xanthophylls in ethanol extracts of corn[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 83(2): 590-595
- [11] 向智男, 宁正祥. 功能性色素——玉米黄质的特性、提取及其研究应用[J]. 食品与机械, 2005, 21(1): 74-77
- [12] 黄彬城, 季静, 王罡, 等. 植物类胡萝卜素的研究进展[J]. 天津农业科学, 2006, 12(3): 13-17
- [13] Rodriguez. Pigmenting Efficiency of a Natural Xanthophyll by isomerization[P]. U. S. Patent, 5973211, 1999
- [14] Sujak A, Gabrielska J, Grudzi ski W, et al. Lutein and zeaxanthin as protectors of lipid membranes against oxidative damage: the structural aspects [J]. Archives of Biochemistry and Biophysics, 1999, 371(2): 301-307
- [15] 孙震, 姚惠源. 玉米蛋白粉中玉米黄素对人口腔鳞癌细胞株 KB 增殖的抑制[J]. 食品与生物技术学报, 2005, 24(6): 34-37.
- [16] Bone R A, Landrum J T, Dixon Z, et al. Lutein and zeaxanthin in the eyes, serum and diet of human subjects[J]. Experimental Eye Research, 2000, 71(3): 239-245
- [17] 李大婧, 刘春泉, 白云峰, 等. 叶黄素、玉米黄质研究进展[J]. 核农学报, 2006, 20(1): 64-67
- [18] Schalch W, Cohn W, Barker F M, et al. Xanthophyll accumulation in the human retina during supplementation with lutein or zeaxanthin – the LUXEA (LUTEIN Xanthophyll Eye Accumulation) study [J]. Archives of Biochemistry and Biophysics, 2007, 458(2): 128-135
- [19] Kalariya N M, Ramana K V, Srivastava S K, et al. Carotenoid derived aldehydes – Induced oxidative stress causes apoptotic cell death in human retinal pigment epithelial cells [J]. Experimental Eye Research, 2007, 1016(9): 10
- [20] Trieschmann M, Beatty S, Nolan J M, et al. Changes in macular pigment optical density and serum concentrations of its constituent carotenoids following supplemental lutein and zeaxanthin: The LUNA Study [J]. Experimental Eye Research, 2007, 84(4): 718-728
- [21] Santocono M, Zurria M, Berrettini M, et al. Influence of astaxanthin, zeaxanthin and lutein on DNA damage and repair in UV A-irradiated cells [J]. Photochemistry and Photobiology, 2006, 85(3): 205-215.
- [22] Richard D, Semba, Lauretani F, et al. Carotenoids as protection against sarcopenia in older adults [J]. Biochemistry and Biophysics, 2007, 458(2): 141-145
- [23] Wisniewska A, Subczynski W K. Effects of polar carotenoids on the shape of the hydrophobic barrier of phospholipid bilayers [J]. Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Biomembranes, 1998, 1368(2): 235-246
- [24] Widomska J, Subczynski W K. Transmembrane localization of cis-isomers of zeaxanthin in the host dimyristoyl phosphatidyl choline bilayer membrane [J]. Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Biomembranes, 2007, 16(8): 21
- [25] 卢艳杰, 龚院生, 周展明, 等. 玉米黄色素抗氧化特性的初步探讨[J]. 郑州工程学院学报, 2001, 22(1): 57-59
- [26] 王威, 王春利, 闫炳宗. 天然食用玉米黄色素的研究[J]. 食品与发酵工业, 1994(2): 35-40.