

天然抗氧化剂及其协同作用

高 静*

(中国石油化工股份有限公司北京化工研究院, 北京 100013)

摘 要: 抗氧化剂是指能够减缓或者消除氧化反应的一类物质, 根据来源不同, 分为天然和合成两大类, 常见的天然抗氧化剂有茶多酚、维生素 E、槲皮素、虾青素等。研究发现, 合成抗氧化剂存在一定的安全问题, 而且单一的天然抗氧化剂活性比较低, 因此具有高活性以及低细胞毒性的复配抗氧化剂是最近研究的热点。本文对天然抗氧化剂之间复配的机制及研究进展进行了阐述, 以期能够对其发展提供一定的参考价值。

关键词: 天然抗氧化剂; 协同作用; 复配抗氧化剂

Natural antioxidants and synergistic effects

GAO Jing*

(Beijing Research Institute of Chemical Industry, Sinopec, Beijing 100013, China)

ABSTRACT: Antioxidants is substances that can slow down or eliminate the oxidation reaction. They are classified into natural and synthetic types according to different sources. Common natural antioxidants include tea polyphenols, vitamin E, quercetin and astaxanthin, etc. Studies have found that there are certain safety issues with synthetic antioxidants, but the single natural antioxidant activity is relatively low. So researchers turn to explore complex antioxidants with high activity and low cytotoxicity. This article explained the mechanism and research progress of compound antioxidants, hoping to provide some reference value for its development.

KEY WORDS: natural antioxidants; synergistic effects; compound antioxidants

1 引 言

随着技术的发展以及社会的进步, 抗氧化剂在当代人的生活中占有重要的地位, 能够有效地避免油脂类食品在运输、储藏过程中的酸败、褐变等现象, 在生活、工业等各个领域均有着广泛的使用, 按其来源通常可分为天然和合成 2 大类。由于合成抗氧化剂的活性普遍高于天然抗氧化剂, 工业生产中使用较多, 常用的有二丁基羟基甲苯(butylated hydroxytoluene, BHT)、丁基羟基茴香醚(butyl hydroxyanisole, BHA)、特丁基对苯二酚(tert-butylhydroquinone, TBHQ)等, 但是随着人们认识水平的提高, 逐渐意识到合成抗氧化剂具有潜在的毒性和致癌作用, 长期使用会对生命安全造成一定的威胁, 而天然抗

氧化剂则更为绿色安全。

研究发现, 不同天然抗氧化剂之间存在一定的协同效应, 即按不同比例将单一的抗氧化组分混合可以得到活性更高的复配抗氧化剂, 不仅保证了其应用在食品工业中的安全性, 同时又能达到比较理想的抗氧化效果。本文介绍了常见的天然抗氧化剂以及之间的协同作用机制, 并对近年来国内外的相关研究做一综述, 以期为更深入的研究提供参考。

2 抗氧化作用

除厌氧生物外, 氧气几乎与所有生物的生命活动密切相关, 在其代谢过程中, 电子的转移会导致形成活性氧, 产生氧自由基。正常情况下, 生物体内自由基的产生和消除是平衡^[1,2]的, 一旦自由基产生过多, 抗氧化体系出现紊

*通讯作者: 高静, 高级工程师, 主要研究方向为食品添加剂及化工助剂相关研究。E-mail: gaoj.bjhy@sinopec.com

*Corresponding author: GAO Jing, Senior Engineer, Beijing Research Institute of Chemical Industry, Sinopec, No.14, North Third Ring East Road, Chaoyang District, Beijing 100013, China. E-mail: gaoj.bjhy@sinopec.com

乱,体内的氧自由基代谢就会失去平衡。抗氧化剂是指能够清除自由基,以达到抑制、消除或减缓氧化反应效果的一类物质,按作用机制可将其分为(1)自由基清除剂,是在自由基形成起始阶段的抑制剂和断裂传播阶段的断链剂;(2)单线态氧淬灭剂,使氧气达到基态;(3)抗氧化剂增效剂,增加混合物中其他抗氧化剂的活性;(4)脂氧合酶抑制剂,使氧化酶失去原有的活力;(5)金属螯合剂,可以将金属离子转化为不能用于电子转移的稳定形态;(6)还原剂,向其他可氧化的化合物提供电子^[3]。根据来源不同,可将抗氧化剂分为内源性和外源性抗氧化剂,而外源性抗氧化剂又有天然和工业合成 2 大类^[4,5]。20 世纪 80 年代,有研究人员通过动物实验发现合成抗氧化剂具有一定的毒性和致癌作用,美国、欧盟等国已禁止使用^[6]。因此天然抗氧化剂,特别是植物来源的,因其具有来源广泛、提取率高、抗氧化性强、与机体亲和力强和安全性高等优点,越来越受到人们的青睐^[7-9]。但是单一成分的天然抗氧化剂活性较弱,人们开始重视对抗氧化活性成分之间协同作用的研究,即具有高抗氧化活性及低细胞毒性的复配抗氧化剂。所谓复配抗氧化剂,就是从两种或两种以上天然动植物或代谢物中提取出来的通过协同作用表现出更强抗氧化性的复合物^[2],其添加量低且成本效益高,在食品中也起着重要作用^[10]。常见天然复配抗氧化剂的成分有黄酮类、多酚类、类胡萝卜素类、维生素类、活性多糖类等。

3 天然抗氧化剂之间协同作用的类型

不同类天然抗氧化剂发挥抗氧化作用的机制是不一样的,所以之间的协同、加和以及拮抗相互作用也是不同的,其中协同作用最受关注,概括起来主要包括以下 5 种:(1)修复再生,抗氧化剂之间存在明显的互补作用,通过电子转移等方式提供和维持还原剂水平;(2)偶联氧化,一方面降低直接反应的两种抗氧化物间的电位落差,使反应易于进行,另一方面,偶联的抗氧化油水分分配系数互为补充,在某一体系中合理分布,充分发挥每一种抗氧化剂的抗氧化功能;(3)吸收氧气,在反应体系中,某种抗氧化剂可以直接与氧气反应,降低氧浓度,从而降低其他抗氧化剂与氧反应生成的过氧化自由基;(4)改变酶的活性,通过改变氧化酶或促氧化酶的活性起到协同作用;(5)络合金属离子,抗氧化剂中的某种与氧化体系中的金属离子形成螯合物,降低金属离子对体系氧化的催化作用^[11,12],从而达到抗氧化的目的。常见天然抗氧化剂根据其结构性质的不同,发挥抗氧化作用的机制也有所差别。

4 常见的天然抗氧化剂

4.1 黄酮类

黄酮类化合物又称生物类黄酮,是一类低分子天然

植物成分,以黄酮为母核的黄色色素,多存在于一些有色植物中,人体不能合成,需从外界摄入。由于分子中含有酚羟基,所以显酸性,一般易溶于水、乙醇,难溶于氯仿、苯等有机溶剂^[13]。黄酮类化合物的抗氧化机制有两类:一类是清除自由基,它所提供的氢原子能与过氧化物自由基 ROO· 反应,生成稳定的氢过氧化物(hydroperoxide, ROOH),而且分子中的酚羟基与氧自由基反应,形成共轭稳定的半醌式自由基,中断游离自由基链式反应;另一类是络合具有促进氧化作用的金属离子,可以与金属离子形成螯合物,降低金属离子的催化活性,阻碍了氧化反应的发生,并且能够良好地清除活性氧(reactive oxygen species, ROS)和活性氮物质^[14]。常见的黄酮类抗氧化剂有槲皮素、杜鹃素、黄酮醇苷等,其中最广为人知的是槲皮素^[15]。Tian 等^[16]研究了葵藜叶中黄酮类成分的抗氧化活性,证明其具有清除 DPPH 和 2,2'-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐 [2,2'-Azinobis-(3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonate), ABTS)] 自由基的能力,并能够有效还原 Fe^{2+} 表现出良好的抗氧化活性。Zheng 等^[17]从莲子中提取出黄酮类化合物,对其结构进行了鉴定,得到 38 种类黄酮化合物,并进行了抗氧化活性的测定,证明提取物中黄酮类化合物的含量能够显著提升总抗氧化能力。

4.2 多酚类

多酚类化合物是一组植物中化学物质的统称,因具有酚基团而得名^[18]。可分为 2 大类,一类是多酚单体,包括绿原酸、鞣花酸以及一些含有糖苷的复合类多酚化合物;另一类是多酚单体聚合而成的低聚体或多聚体,统称为单宁类物质^[19]。茶多酚是一类活性较高的以儿茶素为主体的多酚类,其抗氧化能力是维生素 E 的 10~20 倍,抗坏血酸的 100 倍^[20],其抗氧化作用主要体现在清除自由基,其所携带的 H^+ 与自由基结合,使之还原为惰性化合物或较稳定的自由基。研究证明,儿茶素能够捕获活性氧物质,例如超氧自由基,单线态氧,羟基自由基,过氧自由基,一氧化氮,二氧化氮和过氧亚硝酸盐,减少它们对无细胞系统中的脂质膜,蛋白质和核酸的损害^[21]。Yan 等^[22]对莲子中的多酚进行亚临界水萃取,并对其抗氧化活性进行了研究,结果表明,多酚类具有良好的还原能力和清除 DPPH· 以及 ABTS⁺ 和 NO_2^- 的能力。Abdelfattah 等^[23]从苦参中提取出多酚化合物,通过 DPPH 的捕获能力测试,发现根提取物的抗氧化活性接近 BHT,证明其具有重要的抗氧化能力。

4.3 类胡萝卜素

类胡萝卜素广泛存在于自然界中,是一类脂溶性的植物色素,这些化合物是含有至少 40 个碳的烃,具有广泛的共轭双键体系^[24],是四萜类碳氢化合物^[25]。首次发现是从胡萝卜根中提取出来的,所以命名为“胡萝卜素”,随着技术的发展,人们分离出一系列与其结构相似的天然色素,

统称为“类胡萝卜素”, 目前, 已经发现的大约有 700 余种, 且大多数具有较强的抗氧化活性。其中, α -胡萝卜素, β -胡萝卜素和番茄红素是主要的非极性功能性类胡萝卜素, 叶黄素是主要的极性功能性类胡萝卜素。通常, 类胡萝卜素与自由基的反应主要设计 4 个机制: 氧化, 还原, 氢提取和加成反应^[26], 其抗氧化活性受以下因素的影响: (1)共轭双键的数量; (2)端基的种类; (3)含有环状端基的类胡萝卜素中的取代基的性质。常见类胡萝卜素抗氧化活性的顺序通常为番茄红素> β -胡萝卜素, 玉米黄质>异黄嘌呤>虾青素>角黄素^[24]。研究证明, 类胡萝卜素可以预防与衰老有关的疾病, 增强免疫系统功能和降低患退行性慢性疾病的风险, 例如年龄相关性黄斑变性, 2 型糖尿病, 肥胖, 某些类型的癌症(乳腺癌, 宫颈癌, 卵巢癌, 结肠直肠癌)和心血管疾病等^[27]。Effat 等^[28]从番茄中提取到类胡萝卜素(主要为番茄红素), 利用 Rancimat 方法对其自由基清除活性(radical scavenging activity, RSA)和还原铁抗氧化能力(ferric reducing antioxidant power, FRAP)进行测试, 结果表明, 类胡萝卜素含量的增加使得 RSA 和 FRAP 均提高, 说明其能够有效地清除自由基, 具备较强的还原性抗氧化能力。Chattip 等^[29]从泰国丝绸肥料中提取得到类胡萝卜素, 对其进行 ABTS 或 2,2'-叠氮基双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)自由基阳离子清除试验, 通过比较 IC₅₀ 的值, 发现含类胡萝卜素丝胶提取物的抗氧化活性明显较高, 说明其具有较高的抗氧化活性。

4.4 维生素及其衍生物

维生素是人体生命活动不可或缺的一种营养素, 大部分不能在体内合成, 或者合成量很少, 需从食物中摄取。现代科学的进步肯定了维生素对人体防止心脏病、抗衰老、防癌抗癌方面的功能。其中, 维生素 C、维生素 E、辅酶 Q 具有较强的抗氧化功能。维生素 E 又称生育酚, 是一类重要的生理活性物质, 有研究人员认为, 其抗氧化功能不仅体现在清除自由基, 还可以去除形成脂过氧化物的潜在来源, 抑制组织膜内围绕着细胞颗粒及红细胞的膜内多不饱和脂肪酸的氧化, 能与过氧化物反应将其转变为对细胞无害的物质, 维持细胞膜中长链多不饱和脂肪酸的完整性, 从而维持其生物活性^[30,31]。维生素 C 又称抗坏血酸, 易溶于水, 微溶于丙酮, 其抗氧化活性主要是通过清除自由基实现的, 通过逐级供给电子而转变成半脱氢维生素 C, 以达到清除 OH·、ROO·等自由基的目的, 对人体来说, 维生素 C 能够增强人体免疫力, 增加血管弹性, 帮助营养吸收, 促进人体的大脑发育^[32]。辅酶 Q₁₀ 是一种醌类化合物, 广泛存在于动物、植物、微生物等细胞内^[33], 通常含量极低, 在机体中有氧化型和还原型 2 种存在形式, 并且可以相互转化, 但是只有还原型才能发挥抗氧化作用, 主要体现在清除自由基、稳定细胞膜和抗细胞凋亡^[34]。有研究表

明, 能够与泛醌(ubiquinone, UQ)位点结合并阻止 UQ 还原的电子传递链抑制剂, 消除了呼吸链底物对脂质过氧化物的抑制作用^[35]。陈明涛等^[36]研究了 BHT 和维生素 E 对菜籽油的抗氧化作用, 2 者均有明显的抗氧化效果, 且将其按 0.10%BHT 和 0.1%的比例复配使用时, 抗氧化效果达到最好。

4.5 活性多糖

多糖是一种天然高分子聚合物, 通常由超过 10 个的单糖通过直链或支链糖苷键连接起来, 分子量达几万至几百万^[37], 多糖类化合物表现出良好的自由基清除能力, 按其来源可分为植物类多糖、动物类多糖以及真菌类多糖^[38]。大量的实验研究表明, 多糖类抗氧化作用往往是多种机制相互协调共同发挥作用, 涉及清除自由基、抑制脂质过氧化物的产生、增强抗氧化酶活性以及细胞凋亡中信号转导通路的调节等。不同类型的多糖对自由基的清除能力也不相同, 研究表明人参多糖、青竹梅多糖对·OH 的有较好的清除作用, 蓝莓多糖对·OH 和 DPPH 自由基的清除作用较强, 生姜多糖对 DPPH·的清除效果好于·OH^[39]。Ling 等^[40]发现南瓜多糖对超氧阴离子和羟基自由基具有良好的清除作用。Chen 等^[41]从黄瓜中提取出活性多糖, 并对其羟自由基清除能力和还原能力进行测定, 实验表明, 其清除能力随浓度的增加而增加, 最高可达到 80%。Chen 等^[42]利用热水(hot water, HW)和超声辅助(ultrasonic-assisted, UA)工艺从姜渣中提取多糖, 并分析了其体外抗氧化活性, 发现其 DPPH 自由基清除率最高可达 76.4%, 羟自由基清除率最高可达 71.2%, 超氧化物自由基清除率最高可达 77.5%, 说明其抗氧化活性较强。

5 常见天然抗氧化剂之间的协同作用

不同类天然抗氧化剂之间协同增效的原理是有差异的, 目前研究较为集中的是维生素和多酚类之间的协同以及多糖和黄酮类之间的协同。其他类成分间的协同作用有所研究但不够深入。

5.1 维生素和酚类抗氧化剂之间的协同作用

多酚具有两性性, 既溶于水相, 也溶于油相, 同时, 其氧化还原电位介于维生素 C 和维生素 E 之间, 这种独特的物化性质使多酚与维生素类抗氧化剂之间具有良好的协同效应。研究发现维生素 C 可以再生多酚, 从而再生维生素 E。多酚与维生素 C 联合作用时, 后者可以保护多酚清除自由基的能力, 因为它可以还原分子氧和过氧化物, 避免产生过多的自由基; 同时, 它还可以与 TP·(茶多酚自由基)反应, 增强其抗氧化能力。唐煜括等^[43]研究了汉中仙毫茶多酚与维生素的抗氧化协同作用, 发现茶多酚与维生素 C 的混合物具有显著的自由基清除活性, 当二者以质量比

1:1、1:2、2:1 配比时,其 DPPH· 的清除效率明显高于茶多酚和维生素 C;且质量比为 1:1 时,混合物的 ABTS· 的清除活性高于维生素 C。钟机等^[44]研究了茶多酚与维生素 E 对鱼子油抗氧化作用的影响,发现当联合使用茶多酚和维生素 E 时,鱼子油的抗氧化能力显著增强,其效果与合成抗氧化剂 TBHQ 相当,且高于单独使用茶多酚和维生素 E,表明二者之间具有协同效应。

5.2 多糖和黄酮类之间的协同抗氧化作用

研究表明,多糖和黄酮类抗氧化剂之间有着显著的协同效应,彼此之间可以修复再生,从而达到正协同效应,提高抗氧化活性。王鹏等^[45]研究了黑木耳中多糖和类黄酮的协同抗氧化作用,当多糖和类黄酮以 7:3(*m:m*)的比例复配时,对 DPPH 自由基的清除率高达 95%,对羟基自由基的清除率为 62%,且随着复配液浓度的增大,自由基清除能力也增强。艾志录等^[46]同样研究了枣多糖和黄酮的协同抗氧化效应,当二者的配比为 1:1(*m:m*)时,自由基清除效率高达 97.88%,比多糖清除率高 63.33%,比黄酮高 16.36%,二者协同效应显著。吴小燕等^[47]研究了小米枣黄酮和多糖的协同抗氧化作用,利用 Isobologram 分析法对其协同效应进行评定,结果显示,二者复配后有明显协同抗氧化作用,且不同配比的作用强度存在明显差异。

5.3 其他抗氧化剂之间的协同作用

李帆等^[48]研究了红枣色素与枣多糖的协同抗氧化作用,发现复配后的抗氧化剂具有较强的清除 DPPH·、ABTS⁺·、·OH、O₂⁻等自由基的能力,且抗氧化效力随着浓度的增大而增强,表明枣多糖与红枣色素复配有较强的协同抗氧化作用。任丹丹等^[49]研究了两种类胡萝卜素叶黄素和玉米黄质的协同作用,将二者以不同比例复配后呈现出不同的抗氧化效果,当叶黄素和玉米黄质以 1:2(*m:m*)的比例相配时,对 DPPH 自由基的清除能力、氧自由基吸收能力以及铁离子还原能力较高,能够发挥较好的协同抗氧化作用。肖星凝等^[50]研究了 6 种黄酮之间的协同抗氧化作用,包括 5,6,7-三羟基黄酮,6-羟基黄酮,3,7-二羟基黄酮,7-羟基黄酮,5-羟基黄酮和 3-羟基黄酮,发现之间的协同抗氧化作用同羟基位置 and 数量有关,其中,3,7-二羟基黄酮和其他 5 种黄酮都有着明显的协同作用。Zhang 等^[51]从扁豆中提取出类胡萝卜素和生育酚,并对其清除 DPPH 的能力进行了测定,发现将 2 者合并后其生物活性的浓度和 DPPH 之间的相关性显著提高,各自的 *r*² 为 0.4893 和 0.3259,合并后提高到 0.6678,表明二者之间具有协同作用。

另外抗氧化剂之间的相互作用并不都是协同效应,也存在拮抗作用,若配比不当,抗氧化活性反而会下降,应该根据其不同的抗氧化机制挑选适当的成分进行复配;单一的天然抗氧化剂除了抗氧化活性外一般都具有其他生理功效,复配后可测定除抗氧化活性外其他的生物活性,

得到功能更为综合的活性组分;当前关于复配抗氧化剂活性的研究其测试指标主要为清除各种自由基的能力,但是对复配后的安全性实验进行得不够,应该对生物安全性进行把控,多增加动物生理试验以验证其效果。

6 结 论

综上,同类或不同类的天然抗氧化剂之间普遍存在协同作用,按一定比例复配后其抗氧化活性能够显著提高,有的甚至堪比合成抗氧化剂,且安全性更高,更加环保,在食品工业等的应用中既保证了安全性又能达到较好的抗氧化效果,可作为理想的食品添加剂使用,具有广泛的应用范围以及发展前景。

但是目前研究较多的是 2 种成分之间的复配,根据“抗氧化剂复合链”理论,多种抗氧化剂可以联合作用,以构成较为完整的氧化还原系统,因此未来可研究多种抗氧化剂之间的协同,制备成分较为复杂、效力更高的复配抗氧化剂。

参考文献

- [1] 罗成,周达,鲁晓翔.天然产物抗氧化机理的研究进展[J].食品工业科技.2009,(4):335-339.
Luo C, Zhou D, Lu XX. Research progress in antioxidant mechanism of natural products [J]. Sci Technol Food Ind, 2009, (4): 335-339.
- [2] 章佳妮,侯建平,翁新楚.酚类抗氧化机理的进一步探讨[J].粮油加工,2009,(4):58-63.
Zhang JN, Hou JP, Wong XC. Further discussion on antioxidant mechanism of phenols [J]. Cereals Oils Process, 2009, (4): 58-63.
- [3] 黄盛蓝,何航,周玲.复配天然抗氧化剂在肉类制品中的应用现状[J].肉类工业,2015,(2):43-46.
Huang SL, He H, Zhou L. Application status of natural antioxidant compound in meat products [J]. Meat Ind, 2015, (2): 43-46.
- [4] Neha K, Haider MR, Pathak A, et al. Medicinal prospects of antioxidants: A review [J]. European J Med Chem, 2019, 178: 687-704.
- [5] 高子飞.樱桃中几种多酚类物质清除自由基机理研究[D].烟台:烟台大学,2019.
Gao ZF. Study on free radical scavenging mechanism of several polyphenols from cherry [D]. Yantai: Yantai University, 2019.
- [6] 卢静琼,石文平,靳利娥,等.天然抗氧化物抗氧化协同效应研究进展[J].食品工程.2009,(4):11-13.
Lu JQ, Shi WP, Jin LE, et al. Progress of synergistic anti-oxidative effects based on natural anti-oxidants [J]. Food Eng, 2009, (4): 11-13.
- [7] 龚艳振,徐亚健,刘华巍,等.天然抗氧化剂复配研究进展[J].食品科技,2012,(6):264-267.
Gong YZ, Xu YJ, Liu HW, et al. Progress of synergistic antioxidant effects of natural antioxidants [J]. Food Sci Technol, 2012, (6): 264-267.
- [8] Ribeiro JS, Santos MJMC, Silva LKR, et al. Natural antioxidants used in meat products: A brief review [J]. Meat Sci, 2019, 148: 181-188.
- [9] Nirmala C, Bisht MS, Bajwa HK, et al. Bamboo: A rich source of natural antioxidants and its applications in the food and pharmaceutical industry (Review) [J]. Trends Food Sci Technol, 2018, 77: 91-99.

- [10] Wang K, Zheng ZJ, Liu CH, *et al.* Identification and quantification of synergetic antioxidants and their application in sunflower oil [J]. LWT, 2020, 118: 108726.
- [11] 刘岭, 陈复生, 薛静玉. 复配抗氧化剂的研究进展[J]. 中国食品添加剂, 2012, (2): 172–176.
Liu L, Chen FS, Xue JY. Research progress on complex antioxidants [J]. China Food Addit, 2012, (2): 172–176.
- [12] 盛雪飞, 彭燕, 陈健初. 天然抗氧化剂之间的协同作用研究进展[J]. 食品工业科技. 2010, (7): 414–417, 421.
Sheng XF, Peng Y, Chen JC. Research progress in synergistic effect between natural antioxidants [J]. Sci Technol Food Ind, 2010, (7): 414–417, 421.
- [13] El AY, Aouam I, Taroq A, *et al.* Total phenolic and flavonoid contents and antioxidant activities of extracts from *Teucrium polium* growing wild in Morocco [J]. Materials Today: Proceed, 2019, 13: 777–783.
- [14] Chen GL, Fan MX, Wu JL, *et al.* Antioxidant and anti-inflammatory properties of flavonoids from lotus plumule [J]. Food Chem, 2019, 277: 706–712.
- [15] Caddeo C, Gabriele M, Fernández-Busquets X, *et al.* Antioxidant activity of quercetin in *Eudragit-coated* liposomes for intestinal delivery [J]. Int J Pharm, 2019, 565: 64–69.
- [16] Tian CL, Chang Y, Zhang ZH, *et al.* Extraction technology, component analysis, antioxidant, antibacterial, analgesic and anti-inflammatory activities of flavonoids fraction from *Tribulus terrestris* L. leaves [J]. Heliyon, 2019, 5(8): e02234.
- [17] Zheng JX, Tian WY, Yang C, *et al.* Identification of flavonoids in *Plumula nelumbinis* and evaluation of their antioxidant properties from different habitats [J]. Ind Crops Products, 2019, 127: 36–45.
- [18] 左玉, 张国娟, 惠芳, 等. 食品抗氧化剂的研究进展[J]. 粮食与油脂, 2018, 31(5): 1–3.
Zuo Y, Zheng GJ, Hui F, *et al.* Research progress of food antioxidants [J]. Cereals Oils, 2018, 31(5): 1–3.
- [19] Xiang R, Cheng JR, Zhu MJ, *et al.* Effect of mulberry (*Morus alba*) polyphenols as antioxidant on physiochemical properties, oxidation and bio-safety in Cantonese sausages [J]. LWT, 2019, 116: 108504.
- [20] Li Y, Jiang XG, Hao JQ, *et al.* Tea polyphenols: The application in oral microorganism infectious diseases control [J]. Arch Oral Biol, 2019, 102: 74–82.
- [21] Khan N, Mukhtar H. Tea polyphenols for health promotion [J]. Life Sci, 2007, 81(7): 519–533.
- [22] Yan Z, Zhang HH, Dzah CS, *et al.* Subcritical water extraction, identification, antioxidant and antiproliferative activity of polyphenols from lotus seedpod [J]. Separ Purific Technol, 2019: 116217
- [23] Moussaoui AEL, Jawhari FZ, Almehti AM, *et al.* Antibacterial, antifungal and antioxidant activity of total polyphenols of *Withania frutescens*. L [J]. Bioorganic Chem, 2019: 103337.
- [24] Ribeiro D, Freitas M, Silva AMS, *et al.* Antioxidant and pro-oxidant activities of carotenoids and their oxidation products [J]. Food Chem Toxic, 2018, 120: 681–699.
- [25] Kljak K, Grbeša D. Carotenoid content and antioxidant activity of hexane extracts from selected Croatian corn hybrids [J]. Food Chem, 2015, 167: 402–408.
- [26] Jomova K, Valko M. Health protective effects of carotenoids and their interactions with other biological antioxidants [J]. Eur J Med Chem, 2013, 70: 102–110.
- [27] Rodriguez-Concepcion M, Avalos J, Bonet ML, *et al.* A global perspective on carotenoids: Metabolism, biotechnology, and benefits for nutrition and health [J]. Progress Lipid Res, 2018, 70: 62–93.
- [28] Rizk EM, El-Kady AT, El-Bialy AR. Characterization of carotenoids (lyco-red) extracted from tomato peels and its uses as natural colorants and antioxidants of ice cream [J]. Annals Agric Sci, 2014, 59(1): 53–61.
- [29] Prommuak C, De-Eknamkul W, Shotipruk A. Extraction of flavonoids and carotenoids from Thai silk waste and antioxidant activity of extracts [J]. Separ Purific Technol, 2008, 62(2): 444–448.
- [30] Traber MG, Atkinson J. Vitamin E, antioxidant and nothing more [J]. Free Radical Biol Med, 2007, 43(1): 4–15.
- [31] 高泉坚. 维生素类油脂抗氧化剂[J]. 中国食品工业, 1999, (9): 36–37.
Gao QJ. Vitamins-anti-oxidants of fat and oils [J]. China Food Ind, 1999, (9): 36–37.
- [32] 樊伟伟, 何进武, 侯萍. 野生灰条菜中维生素 C 提取及其抗氧化活性研究[J]. 食品工业, 2018, 39(3): 1–4.
Fan WW, He JW, Hou P. Study on extraction of vitamin C from wild chenopodium album and its antioxidant activity [J]. Food Ind, 2018, 39(3): 1–4.
- [33] Alkholy UM, Abdalmonem N, Zaki A, *et al.* The antioxidant status of coenzyme Q10 and vitamin E in children with type 1 diabetes [J]. J de Pediatria (Versão em Português), 2019, 95(2): 224–230.
- [34] 李小君, 李春明, 马麟娟, 等. 辅酶 Q10 的抗氧化性及其对卵巢功能的影响[J]. 中华生殖与避孕杂志, 2018, 38(7): 606–609.
Li XJ, Li CM, Ma LJ, *et al.* Antioxidant of coenzyme Q10 and its effect on the function of ovary [J]. Chin J Reprod Contrac, 2018, 38(7): 606–609.
- [35] Wang Y, Hekimi S. Understanding ubiquinone [J]. Trends Cell Biol, 2016, 26(5): 367–378.
- [36] 汤霄霞, 陈明涛, 阙晓莉. 抗氧化剂 BHT 和维生素 E 对菜籽油的抗氧化研究[J]. 中国食品添加剂. 2011, (4): 59–62.
Tang WX, Chen MT, Que XL. Antioxidant effect of BHT and vitamin E on canola oil [J]. China Food Addit, 2011, (4): 59–62.
- [37] Yu Y, Shen M, Song Q, *et al.* Biological activities and pharmaceutical applications of polysaccharide from natural resources: A review [J]. Carbohydrate Polym, 2017, 183: 91–101.
- [38] 张海涛. 多糖类化合物抗氧化作用及其机制的研究进展[J]. 天津药学, 2017, 29(3): 60–63.
Zhang HT. Advances in research on antioxidation and mechanism of polysaccharides [J]. Tianjin Pharm, 2017, 29(3): 60–63.
- [39] 马利华, 秦卫东. 生姜多糖抗氧化性及其组分的研究[J]. 中国食品添加剂, 2010, (3): 113–118.
Ma LH, Qin WD. Study on the antioxidant and monosaccharide composition of zingiber officinal roscoe [J]. China Food Addit, 2010, (3): 113–118.
- [40] Ling C, Gangliang H. Extraction, characterization and antioxidant activities of pumpkin polysaccharide [J]. Int J Biol Macromol, 2018, 118: 770–774.
- [41] Chen SH, Huang HL, Huang GL. Extraction, derivatization and antioxidant activity of cucumber polysaccharide [J]. Int J Biol Macromol, 2019, 140: 1047–1053.
- [42] Chen GT, Yuan B, Wang HX, *et al.* Characterization and antioxidant

- activity of polysaccharides obtained from ginger pomace using two different extraction processes [J]. *Int J Biol Macromol*, 2019, 139: 801–809.
- [43] 唐煜括, 左聪聪, 李佳笑, 等. 汉中仙毫茶多酚与维生素 C 抗氧化及抑菌活性的协同作用[J]. *食品科学技术学报*, 2017, 35(3): 55–60.
- Tang YK, Zuo CC, Li JX, *et al*. Synergism of antioxidant and antibacterial activities between Hanzhong Xianhao tea polyphenols and vitamin C [J]. *J Food Sci Technol*, 2017, 35(3): 55–60.
- [44] 钟机, 梁鹏, 程文健, 等. 茶多酚联合维生素 E 对鱼子油抗氧化作用的研究[J]. *科学养鱼*, 2015, (7): 75–76.
- Zhong J, Liang P, Cheng WJ, *et al*. Study on antioxidation of cilan oil by tea polyphenols combined with vitamin E [J]. *Sci Fish Farm*, 2015, (7): 75–76.
- [45] 王鹏, 郭丽, 姜酷, 等. 黑木耳中多糖和类黄酮的隔氧提取及其协同抗氧化作用[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(7): 54–58, 63.
- Wang P, Guo L, Jiang K, *et al*. Synergistic antioxidation of polysaccharides and flavonoid from *Auricularia auricula* by oxygen-resistant extraction [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2018, 39(7): 54–58, 63.
- [46] 王栋梁. 枣多糖和黄酮抗氧化互作效应研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2015.
- Wang DL. Studies on the cooperative antioxidant activity of Jujube polysaccharide and flavonoid [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2015.
- [47] 吴小燕, 王仁才, 石浩, 等. 小米枣黄酮与多糖的抗氧化协同作用研究[J]. *食品与药品*, 2017, 19(6): 405–409.
- Wu XY, Wang RC, Shi H, *et al*. Study on the synergistic effect of flavonoids and polysaccharides on the antioxidant activity of jujube jujube [J]. *Food Drug*, 2017, 19(6): 405–409.
- [48] 李帆, 邢珂慧, 邵佩兰, 等. 红枣色素与枣多糖的协同抗氧化作用[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(9): 13–17, 23.
- Li F, Xing KH, Shao PL, *et al*. Synergistic Antioxidant Effects of Pigments and Polysaccharides from Jujube [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2019, 40(9): 13–17, 23.
- [49] 任丹丹, 张海丽, 王惜童, 等. 叶黄素与玉米黄质协同抗氧化活性的研究[J]. *食品工业科技*, 2017, (17): 302–305, 310.
- Ren DD, Zhang HL, Wang XT, *et al*. Studies on the synergistic antioxidant activity of lutein and zeaxanthin [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2017, (17): 302–305, 310.
- [50] 肖星凝, 徐雯慧, 左丹, 等. 6 种黄酮协同抗氧化作用及构效关系研究[J]. *食品与机械*, 2017, 33(2): 17–21.
- Xiao XN, Xu HW, Zuo D, *et al*. The synergistic antioxidant effect and structure–activity relationship of six flavonoids [J]. *Food Mach*, 2017, 33(2): 17–21.
- [51] Zhang B, Deng ZY, Tang Y, *et al*. Fatty acid, carotenoid and tocopherol compositions of 20 Canadian lentil cultivars and synergistic contribution to antioxidant activities [J]. *Food Chem*, 2014, 161: 296–304.

(责任编辑: 王 欣)

作者简介



高 静, 硕士研究生, 高级工程师, 主要研究方向食品添加剂、化工助剂的相关研究。

E-mail: gaoj.bjhy@sinopec.com