

植物甾醇酯的研究与分析

刘虹蕾, 缪 铭, 江 波*, 张 涛

(江南大学食品科学与技术国家重点实验室, 江苏无锡 214122)

摘 要:植物甾醇酯作为一类特殊的新型健康食品配料, 长期以来世界各国都十分重视其开发利用研究, 目前已成为食品科技工作者和生产厂商的研发热点。本文综述了近年来国内外植物甾醇酯的最新研究进展, 并简要概述了植物甾醇酯的性质、功能以及其在食品工业中的应用, 并对其应用前景进行了展望。

关键词:植物甾醇酯, 植物甾醇, 功能性食品

Research and analysis of phytosterol esters

LIU Hong-lei, MIAO Ming, JIANG Bo*, ZHANG Tao

(State Key Laboratory of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Phytosterol ester as a novel food ingredient is becoming the research focus on food science field for its unique functional properties and its potential enhancement properties for the processed food. In this review, the process of research on phytosterol ester was summarized. The character, function and application of phytosterol ester were introduced. The prospective application of phytosterol ester in the food area and their research were also pointed out.

Key words: phytosterol esters; phytosterol; functional food

中图分类号: TS218

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2012)04-0434-05

随着生活和医疗水平的提高, 人类平均寿命得到了延长, 老龄疾病的发生率也随之大幅增加, 特别是像冠心病, 高血压等疾病。冠心病是全世界引起死亡率最高的疾病, 在我国每年死于各种冠心病的人数超过 100 万。因此, 老龄人口的健康和老龄化疾病的防治备受关注, 而人们也越来越重视功能性食品在这方面所能发挥的巨大作用。目前, 市场上最被人们接受和认可的功能性食品之一就是植物甾醇及其酯类衍生物。植物甾醇具有和胆固醇相似的化学结构, 在人体小肠中能够抑制胆固醇的吸收^[1-2], 从而可以有效地防治冠心病的疾病, 是食品中天然存在的一种微量活性成分。植物甾醇天然存在于水果, 蔬菜, 坚果, 种子, 谷物, 豆类, 蔬菜油及其他植物性食品中。饮食中最常见的植物甾醇有 β -谷甾醇, 菜油甾醇和豆甾醇。其他更罕见的甾醇有菜籽甾醇和燕麦甾醇, 它们仅在一些特定的食物中占有很少的比例。典型的西方饮食每天所包含的植物甾醇有 160mg, 而素食和日本饮食每天所含的植物甾醇在 345~400mg 之间^[3], 目前尚没有关于典型中国饮食中所含植物甾醇量的报道。然而,

植物甾醇熔点较高, 常温下为结晶形式, 在人体中的溶解性和生物可利用性较差, 不溶于水, 在油脂中的溶解度也很小, 使其应用于食品工业较为困难^[4]。植物甾醇酯是植物甾醇的衍生物, 具有和植物甾醇相同甚至更优的生理活性功能^[5], 其熔点更低, 油溶性更好, 能够解决植物甾醇在食品应用中的限制问题。

1 植物甾醇酯性质

植物甾醇酯一般由植物甾醇与脂肪酸通过酯化反应或转酯化反应制得。由于可以用于制造植物甾醇酯的甾醇和脂肪酸种类都较多, 因此可以得到多种不同理化性质的植物甾醇酯, 三种主要植物甾醇酯结构通式如图 1 所示。用于植物甾醇酯合成的甾醇主要包括 β -谷甾醇, 豆甾醇, 菜油甾醇, 及其相应的甾烷醇或者上述几种甾醇的混合物; 而可以用于合成植物甾醇酯的脂肪酸包括饱和脂肪酸如硬脂酸、软脂酸、月桂酸, 不饱和脂肪酸如油酸、亚油酸、共轭亚油酸、亚麻酸、EPA 和 DHA, 以及各种脂肪酸不同比例的混合物和葵花籽油等食用油脂。

植物甾醇酯与游离型植物甾醇相比, 最明显的改变是熔点的降低。通常, 甾烷醇形成的酯熔点较甾醇酯高, 而饱和脂肪酸形成的甾醇酯较不饱和脂肪酸形成的甾醇酯熔点更高。表 1 列出了一些甾醇酯和游离型甾醇熔点的比较。酯化后, 发生显著改变的还包括植物甾醇和植物甾烷醇的溶解度, 如植物甾烷醇酯在食用油和脂肪中溶解度高达 35%~40% (w/w), 游离甾醇则仅为 2%^[6]。

收稿日期: 2010-12-23 * 通讯联系人

作者简介: 刘虹蕾(1987-), 女, 硕士研究生, 主要从事应用酶技术方面的研究。

基金项目: 国家自然科学基金项目(20976073); 江苏省自然科学基金创新学者攀登项目(BK2008003); 江南大学食品科学与技术国家重点实验室目标导向资助项目(SKLF-MB-200804)。

表1 不同植物甾醇酯与相应植物甾醇溶点比较

Table 1 Different plant sterol ester and corresponding plant sterol melting point comparison

名称	β-谷甾醇					豆甾醇					
	游离型	棕榈酸酯	油酸酯	亚油酸酯	亚麻酸酯	游离型	棕榈酸酯	油酸酯	亚油酸酯	亚麻酸酯	DHA/EPA 酯
溶点(℃)	140	86.5	52	43	36	170	99.5	57	38	38	<-20

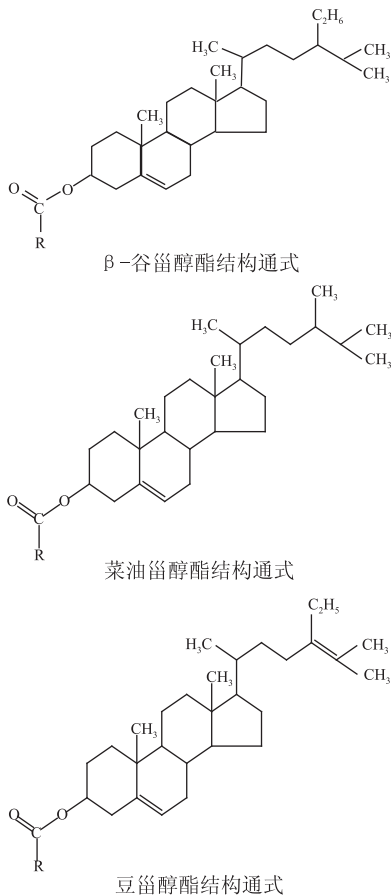


图1 三种主要植物甾醇酯的结构通式

Fig.1 The structures of three kinds of plant sterol esters

2 甾醇酯的使用法规变化

植物甾醇酯的安全性已经得到了包括我国在内的世界多个国家和地区的认可。1999年,美国食品药品监督管理局(FDA)就已经批准添加植物甾醇及酯的食品可使用“有益健康”标签。2000年,美国FDA发布的健康公告称:“植物甾醇及酯、植物甾烷醇及酯,能通过降低血中胆固醇水平而有助于减少冠心病的危险。每天从膳食中摄入1.3g植物甾醇或3.4g植物甾烷醇能达到明显降低胆固醇的作用”。2003年2月,美国FDA批准了佳吉公司植物甾醇有利于心脏健康的健康声称,正式给予植物甾醇市场“合法地位”。

1999年,日本农林省也批准植物甾醇、植物甾醇酯、植物甾烷醇、植物甾烷醇酯为调节血脂的特定专用保健食品FOSHU的功能性添加剂。

2004年,欧盟委员会批准植物甾醇和植物甾醇酯在几类特定食品中使用,如黄油涂酱、牛奶类产品及优酪乳类产品。2007年2月,英国食品标准局在遵照欧盟新食品法规的同时,给予植物甾醇健康成分的审批。

2010年,国内卫生部发布第3号公告批准植物

甾醇酯作为新资源食品,食用量≤3.9g/d,质量要求为植物甾醇酯含量≥90%,且使用范围不包括婴幼儿食品。

3 植物甾醇酯的生理功能

近年来,国内外大量研究表明,植物甾醇具有多种重要生理功能。人们最早认识植物甾醇的功能是从其降低胆固醇功效开始的,而随着人们对植物甾醇功能性的不断深入研究发现,甾醇在降低冠心病、动脉粥样硬化发病率,抗炎,抗氧化,抗癌,以及前列腺疾病的防治方面都有重要作用。但是,植物甾醇的溶解限制问题,使其应用受到了影响。而脂肪酸形式的植物甾醇-植物甾醇酯,具有良好的油性,同时在体内95%以上可以被水解为游离植物甾醇,因此植物甾醇酯和植物甾醇相比,具有相同甚至更优的生理功能。

3.1 防治心脑血管疾病

引起冠心病和动脉硬化等心脑血管疾病的主要原因是患者血浆总胆固醇和低密度脂蛋白胆固醇浓度过高。植物甾醇能够在小肠内通过与饮食和胆汁胆固醇的竞争性吸收而降低血液中胆固醇的浓度,从而达到防治冠心病、动脉粥样硬化等心脑血管疾病的目的^[7]。

在关于植物甾醇对胆固醇降低作用的大量研究中,植物甾醇的服用量范围为0.8~4.0g/d,能够使低密度脂蛋白浓度水平降低10%~15%^[8]。一项总结了40项临床实验的研究发现,每天服用有2g植物甾醇和甾烷醇,可以使低密度脂蛋白胆固醇浓度降低10%。而在每天服用剂量为3~4.2g的实验中,低密度脂蛋白胆固醇浓度降低的平均值为15.4%。因此,通过这些研究结果可以看出,提高服用量能够更多的降低低密度脂蛋白胆固醇的浓度。

植物甾醇对于低密度脂蛋白胆固醇水平的降低作用会因不同的患者而存在一定的差异。这种差异表现为,患者低密度脂蛋白胆固醇浓度水平越高(被定义为大于等于3.5mmol/L),植物甾醇对其的降低作用越明显^[9-11]。但是,植物甾醇对于胆固醇降低作用的影响不会受到患者血浆高密度脂蛋白胆固醇水平的限制。而胆固醇降低的程度与每天患者饮食摄入胆固醇的量无关,这可能是由于内脏产生、胆汁分泌的胆固醇的量远远超过膳食中可摄取的胆固醇——平均500mg/d^[12]。

植物甾醇的生物效受食品基质的影响,一项研究表明,当植物甾醇在高添加量(>2g/d)的情况下,将植物甾醇添加到固体食品中比液体食品中降低胆固醇的效果更好^[10]。

3.2 抗炎作用

近来,有研究发现,植物甾醇或者是植物甾醇与其他生物活性物质结合使用时对促炎细胞因子有一

定的抑制作用。近十年,在描述动脉粥样硬化过程的理论研究中,认为炎症是引起这类疾病的主要原因。促炎细胞因子,包括白介素-6(IL-6)和肿瘤坏死因子- α (TNFA)。另外,炎症指标超敏C反应蛋白(hs-CRP),已经被证实和冠心病的发病存在一定的相关性。在一项关于植物甾醇抗炎作用的研究中,低热量、富含植物甾醇的橘汁饮料能够使CRP降低12%^[13]。一项体外实验研究表明,豆甾醇对一些促炎因子有明显的抑制作用^[14]。

研究发现,植物甾醇和其他一些抗炎食品相结合食用后,能够使抗炎效果得到增强。众所周知, ω -3脂肪酸由于其抗聚合和抗炎作用而能够有效的降低心血管疾病的发生。关于植物甾醇和 ω -3脂肪酸相结合产物对于炎症指标影响的一项临床研究表明,当植物甾醇酯和 ω -3脂肪酸相结合共同作用时,CRP降低39%,TNFA降低10%,IL-6降低11%^[15],各项指标水平比单独使用 ω -3脂肪酸降低更多;另外,还有一项研究表明,当植物甾醇和燕麦- β -葡聚糖结合使用与植物甾醇或燕麦- β -葡聚糖单独使用相比,能够使血浆胆固醇水平降低的更多^[16]。

3.3 抗氧化作用

植物甾醇还具有一定的抗氧化作用。氧化应激性可能是肥胖症并发症的发病机理。IsoPs是脂质过氧化产物,具有特殊的生物活性,会引起血管收缩与血小板聚集。不论是人体或是动物实验中,都证明IsoPs是引起氧化应激性和动脉粥样硬化的危险因素,同时也是引起肥胖患者血浆浓度升高的主要因素^[17]。因此,具有抗氧化作用的食物或药品,能够降低IsoPs的浓度,从而减少心脑血管疾病的发病率。一项研究表明,经过六周连续服用富含植物甾醇的食品,血浆中8-IsoPs的浓度随着血浆总胆固醇浓度和低密度脂蛋白胆固醇浓度的降低而显著降低^[18]。另外,有研究者发现,人体内脂质过氧化和人类动脉硬化及心脑血管疾病发病存在一定的联系。体外实验表明, β -谷甾醇、豆甾醇和菜油甾醇能够有效的抑制低密度脂蛋白的过氧化^[19]。

3.4 抗癌作用

流行病学研究数据表明,饮食中植物甾醇的浓度与一些常见癌症发病率的降低有一定的联系。这些癌症包括肺癌、胃癌、结肠癌、乳腺癌及前列腺癌。

为了研究植物甾醇的这种保护作用机制, Awad等^[20]研究了 β -谷甾醇、菜油甾醇对MDA-MB-231细胞的甲羟戊酸和促分裂原活化蛋白激酶(MAPK)途径的影响,这些路径在细胞生长凋亡中发挥一定的作用。在抑制肠癌方面:研究者们通过观察植物甾醇对小鼠结肠上皮细胞增殖的影响得出结论:植物甾醇可以显著减少胆酸引起的细胞增殖和降低细胞的有丝分裂指数。经一些实验发现 β -谷甾醇可以抑制化学致癌剂诱发的肠癌, β -谷甾醇还有抑制胆汁酸和降低胆汁酸代谢物浓度的作用。在抑制胃癌、肺癌方面:研究者们进行了大量的临床实验,结果发现总植物甾醇摄入的增加与胃癌的减少相关,并且发现,植物甾醇和 α -胡萝卜素共同摄入的增多

对减少胃癌的发生效果更加明显。

3.5 防治前列腺疾病

大量研究发现,植物甾醇对于防治男性前列腺肥大和前列腺癌等有一定的积极意义。Berges^[21]用改良Boyarsky评分法、国际前列腺症状评分法(IPSS)、尿流量和前列腺体积等指标对植物甾醇防治前列腺疾病的效果进行评价,结果发现, β -谷甾醇治疗组中,连续服用的受试者各种指标都保持良好状态,未继续服用者症状评分和残余尿量指标虽稍差于前者,但最大尿流速度没有变化。同时,他们还发现 β -谷甾醇培养可促进人类前列腺基质细胞生长因子 β 1(TGF- β 1)的表达和增强蛋白激酶C- α 的活性。VonHoltz^[22]的研究证明, β -谷甾醇培养细胞可增加鞘磷脂循环中两种关键酶:磷脂酶D(PLD)和蛋白磷酸酶2A(PP2A)的活性,促进鞘磷脂循环,抑制细胞的生长,从而有效防治男性前列腺肥大。

除了以上的功能外,植物甾醇及植物甾醇酯还有美容、增进健康、抑制血小板凝聚、免疫调节、调节生长和抗病毒等作用。

4 植物甾醇酯在食品工业中的应用

芬兰科学家们发现植物甾醇酯衍生物易溶于脂肪食品中,如人造奶油。植物甾醇酯被认为可被小肠酶水解,产生有生理活性的甾醇。Miettinen^[23]于2000年通过体外研究表明约有95%的甾醇酯能在小肠中被水解掉,因此可以将植物甾醇用脂肪酸酯化而使其易溶于脂性食品中。这一发现,直接推动了植物甾醇及植物甾醇酯的商品化生产,使植物甾醇酯成为功能性食品有了可能。

通常,高脂肪含量食品如黄油和食用油类由于其具有强的疏水性特征,是植物甾醇类物质的理想载体。植物甾醇作为功能性成分,主要被添加入脂肪涂抹酱、蛋黄酱、色拉酱调料、牛奶和酸奶中。然而,随着含植物甾醇产品的不断开发,其还被添加入牛角面包、松饼、橘汁、不含脂肪的饮料、压缩饼干和巧克力中。同时,植物甾醇也具有好的抗氧化和抗腐败作用,用作食品添加剂,可以提高食品的抗氧化能力,延长食品的储存货架期。

目前欧美等发达国家地区是生产和销售植物甾醇及其酯的主要市场。有报道称现在美国植物甾醇市场销售额可达到每年3400万美元。2003年,美国可口可乐公司率先开发生产出添加了植物甾醇的100%柑橘汁产品,并于同年12月开始在市场上进行销售。每天饮用这种含植物甾醇的果汁2杯(摄入植物甾醇量约为240mg),连续饮用8周,就可以使胆固醇水平降低10%左右,这种饮料的销售市场发展顺利。在日本市场上,现也已经有多种添加了植物甾醇的食品,如调味酱汁、人造黄油和蛋黄酱等。日本的佐藤食品公司创新性的将植物甾醇加入到米饭中,创造了一款名为“萨托健康米饭”的功能性快餐食品,同时,由于植物甾醇相容性好,还能防止米饭粘连,改善口感^[24]。

2004年,欧洲一些食品企业从菜籽油和豆油中提取、加工出了能够降低胆固醇的食品添加剂——植物

甾醇、植物甾醇酯。该添加剂可应用到人造黄油、酸奶、饮料、口香糖和饼干等食品中,这些添加有植物甾醇和植物甾醇酯的食品可以起到降胆固醇作用。同年,欧盟批准植物甾醇和植物甾醇酯在几类特定食品中使用,如黄油涂酱,牛奶类产品及优酪乳类产品。

2004年11月,德国化学公司科宁将其生产的植物甾醇和植物甾醇酯投放美国市场;同年,ADM公司针对饮料行业生产开发出的植物甾醇粉末开始在北美和欧洲等地的市场上进行销售。

2006年初,意大利EI公司向市场推出了一款含植物甾醇的益生菌饮料产品——Sauscol Bianco,这种益生菌饮料每瓶100g,该公司声称,每天只要喝1瓶该产品,连续数周,血液中的胆固醇含量会自然下降。

2006年2月,乐购集团在英国市场上开始销售含有从松树中提取的植物甾醇和植物甾醇酯能够降低胆固醇的乳制品。2006年3月,美国嘉吉公司在当年的上海国际食品添加剂展会期间,推出了从天然植物中提取的名为Coro-Wise的植物甾醇和植物甾醇酯,并且说明,这种产品可以添加到酸奶、饮料和果汁等食品中,产品有益于心脏的健康。添加有植物甾醇和植物甾醇酯的产品允许在食品包装上使用“有助于减少冠心病危险”的声明。

2009年5月,我国著名油脂品牌嘉里粮油公司金龙鱼首先面向市场推出含有植物甾醇的玉米油。据统计,经过近3年的推广,目前已经有300多万个中国家庭、有超过1000万人使用过这种金龙鱼植物甾醇玉米油。

5 展望

植物甾醇具有多种对人体有益的生理功能,但是由于溶解性较小,给其应用带来了一定的限制。而植物甾醇酯的开发利用大大提高了植物甾醇的生理作用效果和脂溶性,使其添加到食品或者作为功能性食品成为了可能。目前,含有植物甾醇及甾醇酯类添加剂的食品已经广泛在欧美市场销售。但含有甾醇及甾醇酯类的食品在国内尚不多见,但是随着人们对植物甾醇酯功能性的研究和认识,植物甾醇酯必定会成为重要的功能性食品,市场前景广阔。

参考文献

- [1] Mattson F H, Grundy S M, Crouse J R. Optimizing the effect of plant sterols on cholesterol absorption in man[J]. *Am J Clin Nutr*, 1982, 35: 697-700.
- [2] Jogchum P, Ronald P Mensink. Plant stanol and sterol esters in the control of blood cholesterol Levels: Mechanism and safety aspects[J]. *Am J Cardiol*, 2005, 96: 15-22.
- [3] Berger A, Jones PJ, AbuMweis SS. Plant sterols: factors affecting their efficacy and safety as functional food ingredients[J]. *Lipids Health Dis*, 2004(3): 5.
- [4] Hicks K B, Moreau R A. Phytosterols and phytosterols: functional food cholesterol busters[J]. *Food Technol*, 2001, 55(1): 63-67.
- [5] Villeneuve P, Turon F, et al. Lipase-catalyzed synthesis of canola phytosterols oleate esters as cholesterol lowering agents[J]. *Enzyme and microbial Technology*, 2005, 37: 150-155.
- [6] Jandack R J, Webb M R, Mattson F H, et al. Effect of an aqueous phase on the solubility of cholesterol in an oil phase[J]. *Lipid Res*, 1997, 18: 203-210.
- [7] Celia Bañuls, María L. Martínez-Triguero, et al. Evaluation of cardiovascular risk and oxidative stress parameters in hypercholesterolemic subjects on a standard healthy diet including low-fat milk enriched with plant sterols[J]. *Journal of Nutritional Biochemistry*, 2010, 21: 881-886.
- [8] Katan MB, Grundy SM, Jones P, et al. Efficacy and safety of plant stanols and sterols in the management of blood cholesterol levels[J]. *Mayo Clin Proc*, 2003, 78: 965-978.
- [9] AbuMweis SS, Barake R, Jones PJ. Plant sterols/stanols as cholesterol lowering agents: a meta-analysis of randomized controlled trials[J]. *Food Nutr Res*, 2008: 52.
- [10] Demonty I, Ras RT, van der Knaap HC, et al. Continuous dose-response relationship of the LDL-cholesterol-lowering effect of phytosterol intake[J]. *J Nutr*, 2009, 139: 271-284.
- [11] Seppo L, Jauhiainen T, Nevala R, et al. Plant stanol esters in low-fat milk products lower serum total and LDL cholesterol[J]. *Eur J Nutr*, 2007, 46: 111-117.
- [12] Jones PJ, Ntanios FY, Raeini-Sarjaz M, et al. Cholesterol lowering efficacy of a sitostanol-containing phytosterol mixture with a prudent diet in hyperlipidemic men[J]. *Am J Clin Nutr*, 1999, 69: 1144-1150.
- [13] Devaraj S, Autret BC, Jialal I. Reduced-calorie orange juice beverage with plant sterols lowers C-reactive protein concentrations and improves the lipid profile in human volunteers[J]. *Am J Clin Nutr*, 2006, 84: 756-761.
- [14] Gabay O, Sanchez C, Salvat C, et al. Stigmasterol: a phytosterol with potential anti-osteoarthritic properties[J]. *Osteoarthritis Cartilage*, 2010, 18(1): 106-116.
- [15] Micallef MA, Garg ML. Anti-inflammatory and cardioprotective effects of n-3 polyunsaturated fatty acids and plant sterols in hyperlipidemic individuals[J]. *Atherosclerosis*, 2009, 204: 476-482.
- [16] Theuwissen E, Plat J, Mensink RP. Consumption of oat beta-glucan with or without plant stanols did not influence inflammatory markers in hypercholesterolemic subjects[J]. *Mol Nutr Food Res*, 2009, 53: 370-376.
- [17] Morrow JD. Quantification of isoprostanes as indices of oxidant stress and the risk of atherosclerosis in humans[J]. *Arterioscler Thromb Vasc Biol*, 2005, 25: 279-286.
- [18] Mannarino E, Pirro M, Cortese C, et al. Effects of a phytosterol-enriched dairy product on lipids, sterols and 8-isoprostane in hypercholesterolemic patients: a multicenter Italian study[J]. *Nutr Metab Cardiovasc Dis*, 2009, 19: 84-90.
- [19] Ferretti G, Bacchetti T, Masciangelo S, Bicchiera V. Effect of phytosterols on copper lipid peroxidation of human low-density lipoproteins[J]. *Nutrition*, 2010, 26(3): 296-304.
- [20] Awad AB, Chen YC, Fink CS, Hennessey T. beta-sitosterol inhibits HT-29 human colon cancer cell growth and alters membrane lipids[J]. *Anticancer Res*, 1996, 16(5): 2797-2804.

(下转第441页)

3 展望

动植物蛋白质在为人们提供营养的同时,更多的功能特性被开发出来用于营养物质的运送系统。作为天然的食物组分它们更容易被消化酶分解,具有公认的安全性、良好的粘附性、生物相容性和生物可降解性^[25]。以上研究表明,利用可食性蛋白质独特的功能性质可以开发出众多新颖又安全的运送系统,对营养物质进行保护的同时,控制其释放速率,提高生物利用率。

可食性蛋白质作为营养物质的运送载体有很多优势和很好的应用潜力,但同时也存在着一些问题需要解决。有些天然的蛋白载体的组装机理需要更深入的研究,作为载体与营养成分的相互作用需要更多的了解,还要进一步解决载体在运送过程中的稳定性问题。另外,有关这类体系的消化和吸收机制和潜在的安全性问题也是不容忽视的问题。相信随着科学技术的发展,会有更多的新方法新技术应用在以可食性蛋白质为载体的营养物质运送上,基于可食性蛋白质的 NDS 在提高营养物质的吸收效率方面将发挥更重要的作用。

参考文献

[1] Zimet P, Rosenberg D, Livney YD. Re-assembled casein micelles and casein nanoparticles as nano-vehicles for ω -3 polyunsaturated fatty acids[J]. Food Hydrocolloids, 2011, 25(5): 1270-1276.

[2] Livney YD. Milk proteins as vehicles for bioactives[J]. Current Opinion in Colloid & Interface Science, 2010, 15(1-2): 73-83.

[3] Holt C, de Kruif CG, Tuinier R, et al. Substructure of bovine casein micelles by small-angle X-ray and neutron scattering[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2003, 213(2-3): 275-284.

[4] Huang QR, Given P, Qian M. Micro/Nanoencapsulation of Active Food Ingredients [M]. Washington, DC: ACS, 2009: 131-142.

[5] 高学飞, 王志耕. Beta-乳球蛋白应用研究进展[J]. 乳品工业, 2005(5): 41-44.

[6] Kontopidis G, Holt C, Sawyer L. Invited review: Beta-lactoglobulin: Binding properties, structure, and function [J]. Journal of Dairy Science, 2004, 87(4): 785-796.

[7] Zimet P, Livney YD. Beta-lactoglobulin and its nanocomplexes with pectin as vehicles for ω -3 polyunsaturated fatty acids[J]. Food Hydrocolloids, 2009, 23(4): 1120-1126.

[8] 薛新顺, 罗发兴, 何小维, 等. 胶原蛋白作为给药系统载体的研究进展[J]. 医药导报, 2006, 25(12): 1297-1299.

[9] 库马尔, 梁伟等(译). 药用生物纳米材料[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 109-124.

[10] 郭云昌, 刘钟栋, 安宏杰, 等. 基于 AFM 的玉米醇溶蛋白的纳米结构研究[J]. 郑州工程学院学报, 2004, 25(4): 8-11.

[11] Zhang B, Luo YC, Wang Q. Effect of acid and base treatments on structural, rheological, and antioxidant properties of α -zein[J]. Food Chemistry, 2011, 124(1): 210-220.

[12] Dong J, Sun QS, Wang JY. Basic study of corn protein, zein, as a biomaterial in tissue engineering, surface morphology and biocompatibility[J]. Biomaterials, 2004, 25(19): 4691-4697.

[13] Chen LY, Remondetto GE, Subirade M. Food protein-based materials as nutraceutical delivery systems [J]. Trends in Food Science & Technology, 2006, 17(5): 272-283.

[14] Li L, Valerie LSL, Gabriel ER, et al. In vitro release of α -tocopherol from emulsion-loaded β -lactoglobulin gels [J]. International Dairy Journal, 2010, 20(3): 176-181.

[15] Hebrard G, Blanquet S, Beyssac E, et al. Use of whey protein beads as a new carrier system for recombinant yeasts in human digestive tract. [J]. Journal of Biotechnology, 2006, 127(1): 151-160.

[16] Maltais A, Remondetto GE, Subirade M. Soy protein cold-set hydrogels as controlled delivery devices for nutraceutical compounds [J]. Food Hydrocolloids, 2009, 23(7): 1647-1653.

[17] Liu XM, Sun QS, Wang HJ, et al. Microspheres of corn protein, zein, for an ivermectin drug delivery system [J]. Biomaterials, 2005, 26(1): 109-115.

[18] Day L, Xu M, Hoobin P, et al. Characterisation of fish oil emulsions stabilised by sodium caseinate [J]. Food Chemistry, 2007, 105(2): 469-479.

[19] Chen LY, Subirade M. Effect of preparation conditions on the nutrient release properties of alginate-whey protein granular microspheres [J]. European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics, 2007, 65(3): 354-362.

[20] Semo E, Kesselman E, Danino D, et al. Casein micelle as a natural nano-capsular vehicle for nutraceuticals [J]. Food Hydrocolloids, 2007, 21(5-6): 936-942.

[21] Giroux HJ, Houde J, Britten M. Preparation of nanoparticles from denatured whey protein by pH-cycling treatment [J]. Food Hydrocolloids, 2010, 24(4): 341-346.

[22] Ipsen R, Otte J. Self-assembly of partially hydrolysed α -lactalbumin [J]. Biotechnology Advances, 2007, 25(6): 602-605.

[23] Ron N, Zimet P, Bargarum J, et al. Beta-lactoglobulin polysaccharide complexes as nanovehicles for hydrophobic nutraceuticals in non-fat foods and clear beverages [J]. International Dairy Journal, 2010, 20(10): 686-693.

[24] Pan XY, Yu SY, Yao P, et al. Self-assembly of β -casein and lysozyme [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2007, 316(2): 405-412.

[25] Chen LY, Subirade M. Chitosan/ β -lactoglobulin core-shell nanoparticles as nutraceutical carriers [J]. Biomaterials, 2005, 26: 6041-6953.

(上接第 437 页)

[21] Berges RR, Kassen A, Senge T. Treatment of symptomatic benign prostatic hyperplasia with beta-sitosterol: an 18-month follow-up [J]. BJU Int, 2000, 85(7): 842-846.

[22] Von Holtz RL, Fink CS, Awad AB. Beta-sitosterol activates the sphingomyelin cycle and induces apoptosis in LNCaP human

prostate cancer cells [J]. Nutr Cancer, 1998, 32(1): 8-12.

[23] Miettinen T, Vanhanen H, Wester I, et al. Semm, biliary and real cholesterol and plant sterols in colectomized patients before and during consumption of stanol esters margarine [J]. Am J Clin Nutr, 2000, 71: 1095-1102.