DOI:10.12441/spyswjs.20241111001 [文章编号] 1673-1689(2025)08-0014-08

植物甾醇(酯)的研究进展及其在食品中的应用

梅 爽[1,2] 罗会兵[3] 甘 甜[1,2] 祁勇刚[1,4] 李春美[4] 汪 超[1,2,3] 刘 枣[1*]

(1. 湖北工业大学生命科学与健康工程学院,湖北 武汉,430070; 2. 武汉一元堂生物科技股份有限公司,湖北 武汉,430070; 3. 宝得瑞(湖北)健康产业有限公司,湖北 荆门,431821; 4. 华中农业大学食品科学技术学院,湖北 武汉,430068)

摘要:植物甾醇酯是一种通过植物甾醇与脂肪酸发生酯化反应制得的化合物。为明确植物甾醇(酯)的研发与应用,作者概述了植物甾醇(酯)的结构特点、合成方法及生理功能,并阐明了植物甾醇(酯)作为一种功能性食品原料,在降低人体胆固醇水平、抗氧化等方面具有重要作用。通过深入了解植物甾醇(酯)的生物活性,以及深化人们对其营养价值的认知,对其在食品中的研究与应用前景进行展望,为其在功能性食品中的应用提供理论依据。

关键词:植物甾醇(酯);功能性食品;应用

Research Progress in Phytosterols (Esters) and Their Application in Food

MEI Shuang[1,2] *LUO Huibing*[3] *GAN Tian*[1,2] *QI Yonggang*[1,4] *LI Chunmei*[4]
WANG Chao[4] *LIU Zao*[1*]

(1. School of Life and Health Sciences, Hubei University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Wuhan Yiyuantang Biotechnology Co., Ltd., Wuhan 430070, China; 3. Baoderui (Hubei) Health Industry Co., Ltd., Jingmen 431821, China; 4. College of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430068, China)

Abstract: Phytosterols esters are a type of compound synthesized through the esterification reaction between phytosterols and fatty acids. To clarify the research and application of phytosterols (esters), the author provided an overview of their structural characteristics, synthesis methods, and physiological functions. Additionally, it was elucidated that phytosterols (esters), as functional food ingredients, play a significant role in reducing cholesterol levels and exhibiting antioxidant properties in the human body. By delving into the bioactivity of phytosterols (esters) and enhancing people's awareness of their nutritional value, this study makes an outlook on the research and application prospects of phytosterols (esters) in food, thereby providing a crucial theoretical basis for the application of functional foods.

Keywords: phytosterol (ester); functional food; application

随着生活质量的提升与饮食结构的调整,人们摄入的高胆固醇、高脂肪食物较多,使得心血管疾病成为了威胁人类健康的"头号杀手",从食物和天然产物中寻找更加安全、有效的降脂途径,是目前防治心脑血管疾病的方向之一[1-2]。植物甾醇酯是一类由脂肪酸和植物甾醇经过一系列酯化交联反应制备的产物,作为一种新型、安全的高效降脂类原料,植物甾醇酯具有稳定的高脂溶性,有助于降低人体血清脂蛋白胆固醇水平。在食品和药品领域,植物甾醇(酯)的应用日益增多,作为一种功能性食品原料,已在食品市场中占据一席之地[3-6]。国内外大量研究表明,植物甾醇(酯)及其

基金项目:国家"十四五"重点研发计划项目(2024YFF1106100)。
通信作者:刘枣(1982—),女,硕士,实验师,主要从事生物化学和酶工程研究。E-mail:24825848@qq.com
收稿日期:2024-11-11 **修回日期:**2025-02-19

复方产品的生物活性成分在降血脂[7]方面具有显著功效，但关于复方产品对高血脂人群的降脂效果和作用机制仍需深入探究。

1　植物甾醇(酯)的结构特点

植物甾醇是一种由众多脂肪族的六元环与五元环构成的桥环化合物，核心骨架一般包括环戊烷基和甾体骨架。在甾体类化合物中，常见的存在形式包括甾醇、甾醇烷酸酯以及甙类酯这3种，它们往往相伴而生。在较低的皂化温度影响下，甾醇的烷酸酯形态和甙形态能够彻底裂解，进而转化为游离的植物甾醇形态[2,8-9]。由图1可知，甾醇分子中的第3个碳原子连接1个醇羟基，第17个碳原子则连接5种不同类型的取代基R。由于醇羟基所在碳原子的空间异构性质及取代基R的不同异构体，形成了不同的物质种类。在这些种类中，只有当第5个碳原子完全饱和时，才能确切地鉴定该分子为甾醇或甾烷醇。常用的5种谷甾醇为β-谷甾醇、豆甾醇、菜油甾烷醇、菜油甾醇和胆甾醇。其中，前4种均为植物甾醇，第5种的胆甾醇即胆固醇。当甾醇羟基与饱和脂肪酸羟基进行交联反应时，即可转化形成所对应类型的植物甾醇酯。

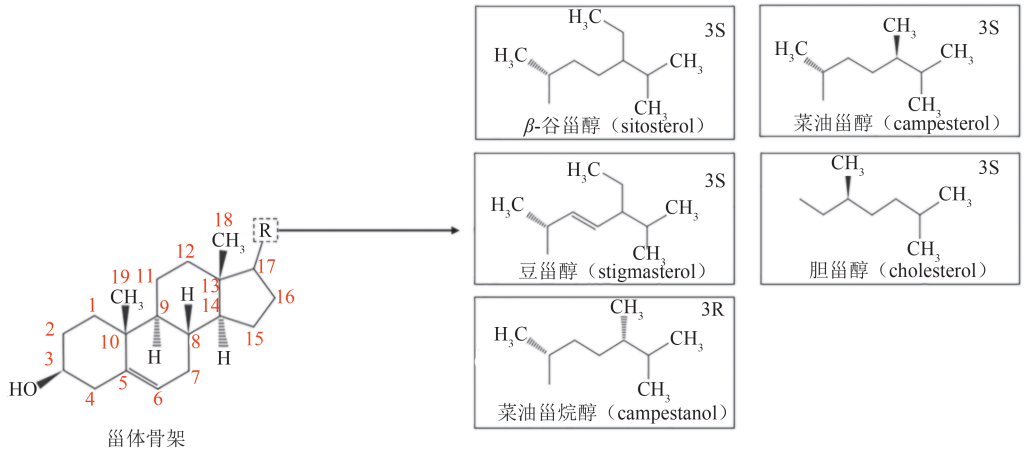

图1　植物甾醇的结构

Fig. 1　Structures of phytosterols

2　植物甾醇酯的合成方法

作为一种新兴的有效降血脂成分，植物甾醇酯的开发利用引起了广泛关注。我国拥有丰富的天然植物甾醇资源，有助于推动植物甾醇酯产品的技术进步和市场拓展。鉴于此，不断探索和设计符合国内工业生产需求，既经济实惠又符合绿色环保标准，同时能高效生产植物甾醇酯的制备工艺，成为了植物甾醇酯领域的研究热点[10-11]。

2.1　化学法

通过化学法合成植物甾醇酯在国内的应用较为普遍，关键步骤在于催化剂的筛选与性能优化[12-14]，常用的化学催化剂包括十二烷基硫酸钠溶液、氧化钙、氧化铝镁等。另外，脱水剂(如二甲苯、4A分子筛)的用量也对反应进程有着重要影响。

化学法具有制备流程简便、原料成本较低且易获取、反应结果可靠、易于实现自动化监控与操作、产品品质均一以及适于工业化大批量生产等优势。在研究中，对催化剂和脱水剂用量的筛选是提升反应效率和产物品质的核心环节。鉴于植物甾醇需要与多种特定条件的弱酸进行混合反应，且该反应缺乏统一规则，必须根据不同酸性混合物的特性对植物甾醇的反应参数进行相应优化和调整[15]。

在化学合成过程中，温度波动幅度较大及碱性催化剂的介入，易引发不必要的副反应，例如多不饱和脂肪酸的氧化裂解现象。因此，如何通过控制反应温度减少副反应的发生并提高合成效率，是当前需要解决的问题。随着相关研究的不断深入，化学法合成植物甾醇酯的技术将不断优化，以提高生产效率与产品质量并满足市场需求，同时也需要关注并解决该过程中可能产生的副反应问题，确保产品的安全性和稳定性。

2.2 酶法

作为一种卓越的生物活性促进剂，酶相较于传统催化剂及制成品展现出更为突出的应用潜力，因此已广泛应用于医疗健康和食品加工行业。酶不仅具备高效的催化功能，还拥有持久稳定的催化效能。在生物酶学领域的相关研究中，酶催化反应主要在含水体系中进行，在生物化学研究领域中，酶是开展各类生化反应研究的重要载体之一[16-19]。在酶催化反应中，整个工艺过程实际温度较低且波动幅度极小，反应环境中几乎无交叉污染，且不需要排放废物，因此可有效降低成本。此外，酶本身性质温和，可避免其他毒性副反应的发生，因此酶在农业、医药、环保、化工以及食品工业领域中有较高的商业应用价值[20-21]。如表1所示，酶法合成植物甾醇酯主要基于脂肪酶的催化作用，具体可分为2种途径：1）直接酯化途径，该途径利用脂肪酶催化植物甾醇分子链与低级游离脂肪酸发生直接酯化反应，实现植物甾醇酯的合成；2）间接酯交换与聚合途径，此途径中脂肪酶作用于高级脂肪酸甲酯，利用其中低级脂肪酸酯键的特性，通过酯交换与聚合等化学反应完成植物甾醇酯的合成。

然而，通过酶法合成植物甾醇酯的成本较高，限制了其产业化发展。目前，国内外持续开展植物酶催化合成化合物的研究，旨在挖掘更加高效、环保的新型催化剂，以期开发出一种能够快速且高效构建新型植物甾醇酯合成体系的最佳方案。

表1 通过酶法合成植物甾醇酯的方法

Table 1 Method for synthesis of phytosterol esters by enzymatic method

脂肪酶	脂肪酶添加质量分数/%	反应介质	时间/h	温度/℃	转化率/%	参考文献
南极假丝酵母脂肪酶A	5~10	正己烷	6	40~50	93~98	[22]
南极假丝酵母脂肪酶B	2	Fe_3O_4/SiO_X-g-P（GMA）	3	50	86.2	[23]
	10	GMA	72	50	85.7	[24]
皱纹假丝酵母	7.2	丙酮-甲醇	25.3	45.3	71.95	[25]
	8~10	石油醚	16	45	94.42~97.33	[26]
	11	异辛烷	5.8	30	96.1~98.5	[27]
	10		1.5	60	93	[28]
皱纹假丝酵母脂肪酶AY30	10	[Bmim]PF_6/Tween-20/H_2O	48	50	95.1	[29]
	18	H_2O/AOT/RM	48	47	87.33~88.91	[30]
念珠菌脂肪酶	10	环己烷	6	40	81	[31]
诺维信脂肪酶435	3	超临界CO_2	41	78	93.2	[32]
诺维信固定化米赫根毛霉脂肪酶、诺维信脂肪酶435	1	真空度3 kPa	48	80	97.65	[33]

2.3 离子液体法

离子液体常应用于药物合成、电化学等多个领域，且它在生物有机药物合成中有较大应用潜力。离子液体是一种在室温下稳定且纯度高的离子溶液，由阴、阳离子组成，也称金属阴离子低温熔融盐[34]。离子液体可直接与周围有机物分离形成两相，兼具催化剂和酶溶剂反应载体功能。超临界离子液体在新型绿色化工产品合成中也发挥着重要作用[35-36]。离子液体在植物甾醇酯合成方面应用的报道较少，但离子液体的低蒸气压、高热稳定性和可设计性等特点，使其成为理想的绿色溶剂。在植物甾醇酯的提取与转化中，离子液体能实现植物甾醇酯的高效分离与纯化，提高产率和选择性。

尽管离子液体在植物甾醇酯合成领域的应用处于探索阶段，但它的高效性和可循环性为该领域的发展带来了新机遇。目前关于离子液体的研究主要集中于离子液体的筛选优化及其作用机制探索。随着科学技术的不断发展，离子液体有望在未来植物甾醇酯的合成中实现更大规模的推广应用。总之，在环境科学与可持续发展背景下，离子液体法为植物甾醇酯的绿色合成提供了新的解决方案，有助于提升产品附加值，符合绿色化学和循环经济发展趋势。

2.4 无溶剂直接酯化法

无溶剂直接酯化法作为一种新型且环保的合

成途径，为植物甾醇酯的合成提供了新思路。该方法因环境友好性和操作简便性，在化合物合成领域引起了广泛关注。尽管无溶剂直接酯化法在常温条件下对特定结构的羧酸类化合物展现出优异的酯化效率，但其应用范围受限于底物分子中必须存在共轭双键或*α*，*β*-不饱和结构等活性官能团[37]。对于高不饱和脂肪酸及其他特定类型的植物甾醇酯，无溶剂直接酯化法尚未得到充分研究，高温下的反应行为、产物选择性以及潜在的副反应机制等关键问题亟待解决。此外，如何确保在无溶剂环境中实现高效、专一的酯化反应，同时获得高纯度、高产率的目标产物，是当前研究的核心挑战。尽管无溶剂直接酯化法在植物甾醇酯合成方面展现出巨大潜力，但其应用前景仍需通过进一步研究来验证，未来研究应聚焦于优化反应条件、提高合成效率，同时探索更广泛的原料适应性，以推动该方法在植物甾醇酯合成领域的应用发展。

综上所述，化学法合成植物甾醇酯虽转化效率高且技术成熟，却面临着环保性与安全性较低的双重挑战；酶法以其绿色、精准的特性脱颖而出，但成本和特定条件的约束限制了其规模化应用；离子液体法展现出了出色的溶解性和循环利用潜能，但仍需克服成本与生态毒性的问题；无溶剂直接酯化法具有环保优势与节能潜力，但其较高的技术难度和特殊设备的依赖性导致其在工业化应用中面临重大挑战。4种方法各具优势，也各有局限，构建了植物甾醇酯合成领域多维度的技术图景，将持续推动该领域朝着更高效、节能、绿色的方向发展。

3　植物甾醇（酯）的生理功能

近年来，国内外研究表明，植物甾醇具有多种生理功能，但植物甾醇的溶解速率低等问题阻碍了其研究进展。植物甾醇酯类能够快速、有效调控人体脂质细胞代谢，还可以降低动物血清、血脂中的总胆固醇和低密度脂蛋白胆固醇水平，从而发挥预防心血管疾病的作用[38]。此外，植物甾醇酯还具有抗炎[39]和抗氧化功能，能够提升机体免疫应答、对抗氧化应激以及预防慢性疾病发生。

3.1　降低胆固醇水平

李雅婷等[40]利用植物甾醇酯对长期摄入高脂饮食导致患有脂肪肝的大鼠进行干预，发现其能够抑制肠道中SCFAs水平的进一步升高，使SCFAs水平维持在与正常体质量组相近的水平。卢婧霞等[41]表明，植物甾醇能通过提高人小肠内胆*ABCG8*和肝脏*ABCA1*、*ABCG5*的mRNA表达水平，使血清胆固醇发生反向转运。Simonen等[42]发现，与对照组相比，食用植物甾醇酯可有效降低超重/肥胖且绝经的患有冠状动脉疾病妇女的血清胆固醇水平。

3.2　抗氧化活性

Li等[43]发现，豆甾醇处理可显著抑制*Ang Ⅱ*基因诱导的A7r5主动脉平滑肌肿瘤细胞的过度增殖，诱导细胞周期停滞于G1期，并促进肿瘤细胞凋亡。此外，豆甾醇能显著抑制*Ang Ⅱ*诱导的细胞中活性氧（reactive oxygen species，ROS）水平的升高，同时增强细胞中超氧化物歧化酶（superoxide dismutase，SOD）和过氧化氢酶（catalase，CAT）的酶活性，表明豆甾醇可能通过调节氧化应激相关酶的分泌功能来发挥抗肿瘤作用。

3.3　抗癌活性

王娟等[44]的研究表明，*β*-谷甾醇不仅可以促进共刺激细胞的生长增殖，还可以通过上调共刺激细胞中*PFP*、*GraB*和*IFN-γ*基因的表达水平及活化ERK信号通路，来提高肿瘤细胞中抗胃癌受体的活性。程杏安等[45]发现，*β*-谷甾醇的衍生物以及豆甾醇均能诱导B16F10黑色素瘤细胞凋亡，且这2种化合物在特定水平上均表现出对B16F10黑色素瘤细胞生长或增殖的差异性抑制效果。

3.4　抗炎活性及生物安全性

Islam等[46]发现，植物甾醇阿魏酸酯通过清除ROS和抑制ROS的产生发挥抗氧化和抗炎活性。植物甾醇酯作为一类新型生物活性物质，在营养食品开发和生化医药领域具有广泛的商业应用前景。从生物安全性来看，植物甾醇酯一般较为稳定且对人体健康无害，但是在化学改性过程中，可能会引入一些新的结构，这些结构可能会影响其生物安全性。Feng等[12]探讨了化学改性植物甾醇酯的生物安全性，发现在植物甾醇酯的合成过程中，可能会逐渐产生过量的植物甾醇氧化物，这些氧化物已在某些体内研究中被证实存在一定毒性。该研究结果表明，虽然植物甾醇酯在多数情况下是安全的，但是在进行化学改性时，需要考虑其可能带来的生物安全性问题。未来的研究应进一步关注这些潜在的风险，并探索如何通过合理的设计和优化来降低这些风险，以确保植物甾醇酯在食品和医药领域的安全应用。

4 植物甾醇(酯)在食品中的应用

植物甾醇作为一类源自自然界的珍贵化合物,广泛分布于大豆、玉米、菜籽等多种植物中,凭借独特的化学结构和多种生理功能,在食品工业中展现出广泛的应用前景,特别是在降低胆固醇、维护心血管健康方面发挥重要作用。植物甾醇酯作为植物甾醇的一种改性形式,在食品中的应用广泛且多样,其独特的生理功能为食品增添了健康属性。植物甾醇酯不仅可以快速降低人血浆总胆固醇水平和血清低密度脂蛋白胆固醇指数,还能增强天然食品中营养素的生物抗氧化性、延长食品的保质期。以人造奶油为例,植物甾醇酯的添加不仅能够显著降低产品的胆固醇含量,还能延长其保质期,并保持原有的口感和质地,这一特性使得富含植物甾醇酯的人造奶油在乳制品、焙烤制品等领域得到了广泛应用。此外,植物甾醇酯还可以添加至煎炸油脂中,以减少油脂氧化作用,提高食品的抗氧化性能。综上所述,植物甾醇酯在提升食品营养价值、改善食品品质方面具有重要作用。

1999 年,美国食品药品监督管理局(FDA)首次批准含植物甾醇及其酯类的纯有机食品标注“促进健康”,标志着该类食品的健康效益声明的合法化。根据 FDA 的规划,2006 年前可能逐步允许植物甾醇酯作为功能性成分添加至烘焙制品、乳制品替代品、植物基涂抹酱、功能性饮料等食品类别中。2010 年,我国海关总署卫生检疫司正式发布相关公告,批准植物甾醇酯作为新资源食品。如表 2 所示,植物甾醇酯已经应用于国内外的多款新产品中[47-50]。

国外乳制品行业中,众多添加植物甾醇酯的乳制品进入我国市场,其中复方乳制品以添加植物甾醇酯为主,这些产品的基础材料包括植物甾醇酸酯、生态牛乳、亚麻酸油等[51]。在我国,植物甾醇酯已得到了广泛研究和应用,添加了植物甾醇酯的低脂奶粉作为日常饮品,能够帮助中老年群体以及高血脂病症患者显著降低空腹状态下的血清低密度脂蛋白胆固醇和总胆固醇水平。

除含植物甾醇酯的乳制品外,蛋黄酱、甜品、饮料和食用油制品等产品目前也已面向日本、欧美等海外市场出口[52]。一般而言,富含脂肪的食品(如奶油及各类食用油)因具有显著的疏水特性,是携带植物甾醇酯等物质的绝佳天然介质。以芬兰的 Benecol 产品为例,该产品在高脂食品基质中混入了植物甾醇酯,进而加工制造出人造奶油等类似产品。

表 2 不同类型产品中植物甾醇酯的添加质量分数

Table 2 Added mass fractions of phytosterol esters in different types of products

食品类型	食品名称	品牌	添加质量分数/%
乳制品	奶粉	贝因美	1
		飞鹤	4.6
	牛奶	澳特兰	15
糖果制品	凝胶糖果	CoNat	42.37
	压片糖果	安美奇	10
	巧克力	Pute Health	0.57
糕点制品	面包		0.004 25
食用油、油脂及其制品	食用油	美乐家	4
	人造黄油	联合利华	
饮料	豆乳	金龙鱼	0.136
	乳化饮品	哈尔滨三联	3
	固体饮料	全食物日记	30
功能性食品	特殊膳食用食品	创元益健	
	保健食品	北京同仁堂	28

国内植物甾醇酯的合成及应用起步较晚,但市面上标注添加植物甾醇酯的食品较为常见。2010 年,我国正式批准植物甾醇酯可作为新资源食品。目前,含微量植物甾醇酯的功能性乳制品已面向国内外市场销售,随着对植物甾醇酯研究的不断深入,植物甾醇酯将被添加到牛角面包[53]、松饼、果汁、代餐粉[54]和压缩饼干等食品中。此外,植物甾醇作为一种功能性食品原料,本身能发挥良好且持久有效的抗氧化生物活性和抗氧化储存作用,可以通过延缓食品组分氧化劣变等途径,实现抗氧化效能的强化及产品货架期的有效延长。

5 展望

植物甾醇(酯)作为一种绿色的功能性食品添加剂,具有多种生物活性潜能,已引起食品研究人员的广泛关注。随着国内外对其生物活性及营养价值的研究不断深入,以及消费者对健康生活方式的追求日益高涨,植物甾醇(酯)的研发与应用迎来了发展机遇。

当前,植物甾醇(酯)的技术革新及其在食品行业的应用成为了全球研究热点之一,尤其是其在发酵食品与乳制品领域中的应用。然而,相较于植物

甾醇(酯)在国际市场上的蓬勃发展态势，我国关于植物甾醇(酯)的开发利用尚处于起步阶段，亟待深化基础研究与技术创新，以期与国际先进水平接轨。植物甾醇(酯)在食品中的应用价值日益凸显，无论是从改善食品品质还是提升食品的健康效益，都展现出巨大的商业潜力。随着科学研究的深入与技术的持续进步，植物甾醇酯合成技术将不断取得突破，为新产品研发提供坚实的支撑。未来，植物甾醇(酯)将凭借其独特的功能性特质，满足消费者对健康、安全、绿色食品的更高层次需求，以开辟市场空间并引领食品工业向更高标准迈进。

总而言之，植物甾醇(酯)作为一种多功能活性、高附加值的产物，其应用前景十分广阔。植物甾醇(酯)的开发和利用不仅是科技进步的体现，也是时代趋势的必然选择。它将为食品产业带来新的增长点，激发行业创新活力，进而惠及广大消费者，推动人类健康发展。展望未来，植物甾醇(酯)的市场前景广阔，其价值和作用值得食品行业内外的科研人员深入挖掘。

参考文献

[1] 黄伟雄，陈云波，潘凤，等. 植物甾醇酯的研究进展[J]. 广东化工，2017，44(22)：101-102，82.
HUANG W X，CHEN Y B，PAN F，et al. Research progress in phytosterol esters[J]. Guangdong Chemical Industry，2017，44(22)：101-102，82.(in Chinese)

[2] 王小康，陈文，张太军，等. 植物甾醇(酯)的研究与应用前景[J]. 日用化学工业(中英文)，2023，53(4)：445-452.
WANG X K，CHEN W，ZHANG T J，et al. Research and application prospect of phytosterols (esters)[J]. China Surfactant Detergent & Cosmetics，2023，53(4)：445-452.(in Chinese)

[3] DUDEKULA J B，KUMAR P R，RANGANAYAKULU D. Bioavailability problems of phytosterols：a systematic review[J]. International Journal of Applied Pharmaceutics，2022：9-17.

[4] JIANG C，DONG Z，MENG Z. Artificial preparation，biosynthetic，health effects，and applications of phytosterol and phytosterol ester：a review[J]. Food Bioscience，2024，59：104023.

[5] 陈卫. 功能食品与膳食健康[J]. 食品与生物技术学报，2024，43(4)：1-7.
CHEN W. Functional foods and dietary health[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2024，43(4)：1-7.(in Chinese)

[6] 张群. 功能性油脂开发关键技术研究[J]. 食品与生物技术学报，2022，41(6)：112.
ZHANG Q. Study on key technologies of functional oil development [J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2022，41(6)：112.(in Chinese)

[7] HE W S，PAN R R，LI L L，et al. Combined lowering effect of phytosterol esters and tea extracts on lipid profiles in SD rats[J]. Food Science and Technology Research，2018，24(5)：875-882.

[8] 张沙，邓圣庭，方成堃，等. 植物甾醇的性质、生理功能及其在动物生产中的应用研究[J]. 湖南饲料，2022(1)：43-48.
ZHANG S，DENG S T，FANG C K，et al. Study on the properties，physiological functions and application of phytosterols in animal production[J]. Hunan Feed，2022(1)：43-48.(in Chinese)

[9] 侯丽芬，宗珊盈，张海臣，等. β-谷甾醇乙酸酯对脂质膜结构稳定性的影响[J]. 食品与机械，2019，35(9)：20-25.
HOU L F，ZONG S Y，ZHANG H C，et al. Effect of β-sitosterol acetate ester on the structural stability of lipid membrane[J]. Food & Machinery，2019，35(9)：20-25.(in Chinese)

[10] 王舒舒，张幸，吴正章，等. 植物甾醇酯合成研究进展[J]. 生物加工过程，2023，21(2)：210-219，236.
WANG S S，ZHANG X，WU Z Z，et al. Research progress in the synthesis of phytosterol esters[J]. Chinese Journal of Bioprocess Engineering，2023，21(2)：210-219，236.(in Chinese)

[11] 赵岩，唐国胜，侯莹莹，等. 植物甾醇酯合成工艺研究进展[J]. 食品安全质量检测学报，2015，6(2)：585-590.
ZHAO Y，TANG G S，HOU Y Y，et al. Research on synthesis technology of phytosterol esters[J]. Journal of Food Safety & Quality，2015，6(2)：585-590.(in Chinese)

[12] FENG S M，WANG L L，SHAO P，et al. A review on chemical and physical modifications of phytosterols and their influence on bioavailability and safety[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition，2022，62(20)：5638-5657.

[13] 王媛媛，马改琴，李跃凡，等. 植物甾醇提取纯化方法研究进展[J]. 中国油脂，2024，49(2)：114-122.
WANG Y Y，MA G Q，LI Y F，et al. Research progress on extraction and purification methods of phytosterols[J]. China Oils and Fats，2024，49(2)：114-122.(in Chinese)

[14] 刘彦君，潘丽，常振刚，等. 植物甾醇α-亚麻酸酯的制备及在负载虾青素脂质体中的应用[J]. 食品与机械，2022，38(12)：133-138，144.
LIU Y J，PAN L，CHANG Z G，et al. Preparation of phytosterol α-linolenic acid ester and its application in astaxanthin-loaded liposomes[J]. Food & Machinery，2022，38(12)：133-138，144.(in Chinese)

[15] BAI G，MA C G，HU Y Y，et al. Chemical conversions of free phytosterols during the bleaching of corn oil[J].

Food Chemistry，2023，412：135512.
[16] 陈兵. 酶法合成植物甾醇酯的强化集成工艺[D]. 北京：北京化工大学，2021.
[17] RYDER N S，GOAD L J. The effect of the 3-hydroxy-3-methylglutaryl CoA reductase inhibitor ML-236b on phytosterol synthesis in *Acer pseudoplatanus* tissue culture [J]. Biochimica et Biophysica Acta，1980，619（2）：424-427.
[18] KNOCH E，SUGAWARA S，MORI T，et al. Third DWF1 paralog in Solanaceae，sterol Δ^{24}-isomerase，branches withanolide biosynthesis from the general phytosterol pathway [J]. PNAS，2018，115（34）：E8096-E8103.
[19] SHIW X，LIH Y，FUY J，et al. Preparation of functional oils rich in phytosterol esters and diacylglycerols by enzymatic transesterification[J]. Food Chemistry，2024，448：139100.
[20] TORRELO G，TORRES C F，REGLERO G. Enzymatic strategies for solvent-free production of short and medium chain phytosteryl esters[J]. European Journal of Lipid Science and Technology，2012，114（6）：670-676.
[21] ZHANG Y R，ZHANG T，ZHANG Y，et al. Microwave-assisted catalytic synthesis of phytosterol esters [J]. International Journal of Food Science & Technology，2022，57（5）：3162-3170.
[22] PANPIPAT W，XU X B，GUO Z. Improved acylation of phytosterols catalyzed by *Candida antarctica* lipase A with superior catalytic activity[J]. Biochemical Engineering Journal，2013，70：55-62.
[23] YU D Y，ZHANG X，ZOU D Z，et al. Immobilized CALB catalyzed transesterification of soybean oil and phytosterol[J]. Food Biophysics，2018，13（2）：208-215.
[24] YU D Y，YU C H，WANG T，et al. Study on the deacidification of rice bran oil esterification by magnetic immobilized lipase[J]. Catalysis Letters，2020，150（5）：1256-1267.
[25] 么婷婷. 植物甾醇酯的酶法合成[D]. 哈尔滨：哈尔滨商业大学，2017.
[26] CHANG M，ZHANG T，FENG W H，et al. Preparation of highly pure stigmasteryl oleate by enzymatic esterification of stigmasterol enriched from soybean phytosterols [J]. LWT-Food Science and Technology，2020，128：109464.
[27] LIU X L，WANG L H，LIU P，et al. Catalytic synthesis of *β*-sitosterol linolenate by Pickering emulsion-immobilized lipase[J]. E3S Web of Conferences，2019，78：02019.
[28] NO D S，ZHAO T T，LEE J，et al. Synthesis of phytosteryl ester containing pinolenic acid in a solvent-free system using immobilized *Candida rugosa* lipase[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry，2013，61（37）：8934-8940.
[29] ZENG C X，QI S J，LI Z G，et al. Enzymatic synthesis of phytosterol esters catalyzed by *Candida rugosa* lipase in water-in-[Bmim]PF_6 microemulsion[J]. Bioprocess and Biosystems Engineering，2015，38（5）：939-946.
[30] CHEN S N，LI J，FU Z J，et al. Enzymatic synthesis of *β*-sitosterol laurate by *Candida rugosa* lipase AY30 in the water/AOT/isooctane reverse micelle [J]. Applied Biochemistry and Biotechnology，2020，192（2）：392-414.
[31] CHOI N，CHO H J，KIM H，et al. Preparation of phytosteryl ester and simultaneous enrichment of stearidonic acid *via* lipase-catalyzed esterification [J]. Process Biochemistry，2017，61：88-94.
[32] YU D Y，WANG T，CHEN J，et al. Enzymatic esterification of rice bran oil and phytosterol in supercritical CO_2 [J]. Journal of Food Processing and Preservation，2019，43（9）：e14066.
[33] 胡立志，陈昊，孙立斌，等. 真空无溶剂体系中酯化和酯交换生物合成甾醇酯[J]. 东北农业大学学报，2015，46（9）：38-43.
HU L Z，CHEN H，SUN L B，et al. Synthesis of phytosteryl esters by esterification and transesterification in vacuo and without solvent using lipases [J]. Journal of Northeast Agricultural University，2015，46（9）：38-43.（in Chinese）
[34] 李静静，何文森，潘晓霞，等. 离子液体催化合成柠檬酸植物甾烷醇酯的研究[J]. 中国油脂，2013，38（4）：34-38.
LI J J，HE W S，PAN X X，et al. Synthesis of citrate phytosterol esters in the presence of ionic liquid [J]. China Oils and Fats，2013，38（4）：34-38.（in Chinese）
[35] 胡叶梅. 我国保健食品常用原料植物甾醇分析方法的建立及应用研究[D]. 合肥：安徽医科大学，2011.
[36] SHI H G，LI S，LIU J L，et al. Green and efficient synthesis of pine sterol oleate catalyzed by SO_3H-functionalized ionic liquid [J]. Journal of Chemical Technology & Biotechnology，2022，97（11）：3083-3090.
[37] 赵曼，孔珂昕，薛露，等. 植物甾醇及其衍生物的生物合成途径研究进展[J]. 中草药，2022，53（18）：5884-5898.
ZHAO M，KONG K X，XUE L，et al. Research progress on biosynthesis of phytosterols and their derivatives[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs，2022，53（18）：5884-5898.（in Chinese）
[38] EISA M，EL-REFAI H，AMIN M. Single step biotransformation of corn oil phytosterols to boldenone by a newly isolated *Pseudomonas aeruginosa* [J]. Biotechnology Reports，2016，11：36-43.
[39] ZOU X Y，XU T，ZHAO T，et al. Phytosterol organic acid esters：characterization，anti-inflammatory properties and a delivery strategy to improve mitochondrial function

[J]. Current Research in Food Science，2024，8：100702.

[40] 李雅婷，欧阳鹏凌，曲丹，等. 植物甾醇酯对高脂饮食大鼠结肠内容物短链脂肪酸的影响[J]. 食品工业科技，2018，39(7)：292-297，302.
LI Y T，OUYANG P L，QU D，et al. Effects of phytosterol ester on short-chain fatty acids in colon content of rats fed a high fat diet[J]. Science and Technology of Food Industry，2018，39(7)：292-297，302.(in Chinese)

[41] 卢婧霞，郑祖国，徐志猛，等. 植物甾醇降血脂机制研究进展[J]. 中国中药杂志，2019，44(21)：4552-4559.
LU J X，ZHENG Z G，XU Z M，et al. Advances in research on hypolipidemic mechanism of phytosterols[J]. China Journal of Chinese Materia Medica，2019，44(21)：4552-4559.(in Chinese)

[42] SIMONEN P，ARTE E，GYLLING H. Obesity does not interfere with the cholesterol-lowering effect of plant stanol ester consumption (as part of a heart-healthy diet)[J]. Journal of Cardiovascular Development and Disease，2021，8(4)：36.

[43] LI C M，LIU Y，XIE Z，et al. Stigmasterol protects against *Ang II*-induced proliferation of the A7r5 aortic smooth muscle cell-line[J]. Food & Function，2015，6(7)：2266-2272.

[44] 王娟，刘军权，陈复兴，等. *β*-谷甾醇对人共刺激细胞杀伤胃癌SGC-7901细胞的影响及其机制的探讨[J]. 免疫学杂志，2014，30(7)：578-584.
WANG J，LIU J Q，CHEN F X，et al. The effect of *β*-sitosterol on cytotoxicity of human costimulatory cells against gastric cancer SGC-7901 cells and its mechanism[J]. Immunological Journal，2014，30(7)：578-584.(in Chinese)

[45] 程杏安，周晓武，张淑明，等. 植物甾醇对黑色素瘤细胞的生长抑制及凋亡诱导作用[J]. 广东农业科学，2014，41(10)：94-97，4.
CHENG X，ZHOU X W，ZHANG S M，et al. Effects of phytosterol on growth inhibiting and apoptosis induction of melanoma cells[J]. Guangdong Agricultural Sciences，2014，41(10)：94-97，4.(in Chinese)

[46] ISLAM M S，YOSHIDA H，MATSUKI N，et al. Antioxidant，free radical-scavenging，and NF-κB-inhibitory activities of phytosteryl ferulates：structure-activity studies[J]. Journal of Pharmacological Sciences，2009，111(4)：328-337.

[47] NARTEA A，FANESI B，PACETTI D，et al. Cauliflower by-products as functional ingredient in bakery foods：fortification of pizza with glucosinolates，carotenoids and phytosterols[J]. Current Research in Food Science，2023，6：100437.

[48] BAE H H，HA J Y，GO Y S，et al. High phytosterol levels in corn cobs point to their sustainable use as a nutritional source[J]. Applied Biological Chemistry，2022，65(1)：69.

[49] 杨天一，徐学明，金亚美，等. 不同面筋蛋白组分对面包品质的影响[J]. 食品与生物技术学报，2023，42(2)：40-44.
YANG T Y，XU X M，JIN Y M，et al. Effects of different gluten components on bread quality[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2023，42(2)：40-44.(in Chinese)

[50] 刘龙龙，王家镔，陈治同，等. 植物油脂凝胶的氧化稳定性及货架期预测[J]. 食品与机械，2021，37(11)：105-110.
LIU L L，WANG J B，CHEN Z T，et al. Study on oxidation stability and shelf life of oleogel[J]. Food & Machinery，2021，37(11)：105-110.(in Chinese)

[51] 陈伟，母智深，李洪亮，等. *α*-亚麻酸、植物甾醇酯复方牛奶降血脂人体试食研究[J]. 食品工业科技，2013，34(11)：353-355，360.
CHEN W，MU Z S，LI H L，et al. Study on the function of components *α*-lionlenic acid，plant sterol ester compound milk on the assisting blood lipids reduction on human body[J]. Science and Technology of Food Industry，2013，34(11)：353-355，360.(in Chinese)

[52] SUSIK J，PTASZNIK S. The first stage of refining of post-fermentation corn oil with a high content of free fatty acids and phytosterols：comparison of neutralisation by an ion-exchange resin without solvent and base neutralisation[J]. Food Research International，2023，164：112302.

[53] MAKRAN M，CILLA A，HAROS C M，et al. Enrichment of wholemeal rye bread with plant sterols：rheological analysis，optimization of the production，nutritional profile and starch digestibility[J]. Foods，2023，12(1)：93.

[54] 刘小杰，舒志成，赵志红，等. 调节血脂保健粥的研制[J]. 食品工业科技，2021，42(22)：240-245.
LIU X J，SHU Z C，ZHAO Z H，et al. Development of health-care porridge for regulating blood lipids[J]. Science and Technology of Food Industry，2021，42(22)：240-245.(in Chinese)

(责任编辑：闫林红)