油脂营养

DOI: 10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.250151

不同类型植物甾醇的生理功能及其在食品中应用的研究进展

王盈盈[1,2,3],程开丽[1],韩羽轩[1],张艺元[1],肖　洋[1],
周晓婷[3],常　明[4],张　涛[1,3]

(1.华中农业大学 食品科学技术学院,武汉 430070;2.湖北联合轻工业设计工程有限公司,武汉 430000;
3.武汉食品化妆品检验所,国家市场监督管理总局重点实验室(食用油质量与安全),武汉 430012;
4.江南大学 食品学院,江苏 无锡 214122)

摘要:植物甾醇是一类广泛存在于植物油、坚果及谷物中的天然活性成分,具有诸多生理功效。旨在为基于植物甾醇分子特性的功能性食品开发提供依据,对植物甾醇的类型进行了介绍,并详细阐述了不同类型植物甾醇的生理功能及其在食品中的应用。根据C-4位甲基化程度,植物甾醇可分为4-无甲基甾醇、4-单甲基甾醇和4,4-二甲基甾醇三类。4-无甲基甾醇具有降胆固醇、抗癌及类激素功能,并且相关作用机制已被广泛报道;4,4-二甲基甾醇在改善脂质代谢、调节内源性大麻素系统和神经系统中展现出特殊的活性。植物甾醇在食品中使用的安全性已经得到了多个国家或组织的认可,目前主要应用于植物油、乳制品、巧克力等产品中。未来研究应着重于阐明植物甾醇的改性工艺和功效机制,并开发适应我国居民膳食结构的植物甾醇食品,以充分发挥其营养健康价值。

关键词:植物甾醇;生理功能;植物油;法规

中图分类号:TS229;TQ645　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1003-7969(2025)12-0074-09

Research progress on physiological functions of different types of phytosterols and their applications in foods

WANG Yingying[1,2,3], CHENG Kaili[1], HAN Yuxuan[1], ZHANG Yiyuan[1],
XIAO Yang[1], ZHOU Xiaoting[3], CHANG Ming[4], ZHANG Tao[1,3]

(1. College of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. Hubei United Light Industry Design Engineer Co., Ltd., Wuhan 430000, China; 3. Key Laboratory of Edible Oil Quality and Safety of State Administration for Market Regulation, Wuhan Institute for Food and Cosmetic Control, Wuhan 430012, China; 4. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China)

Abstract: Phytosterols are a class of natural active ingredients widely found in vegetable oils, nuts, and grains, possessing numerous physiological benefits. To provide a basis for developing functional foods based on the molecular characteristics of phytosterols, the types of phytosterols were summarized, and the physiological functions of different types of phytosterols and their applications in food were elaborated in detail. Based on the degree of methylation at the C-4 position, phytosterols are classified into three categories: 4-desmethylsterols, 4-monomethylsterols, and 4,4-dimethylsterols. 4-Desmethylsterols exhibit cholesterol-lowering,

收稿日期:2025-03-21;**修回日期**:2025-09-15

基金项目:国家自然科学基金(32402082);国家市场监督管理总局重点实验室(食用油质量与安全)开放课题重点项目(SYYKF202403);中央高校基本科研业务费专项(2662024SPQD001)

作者简介:王盈盈(1991),女,硕士,研究方向为油脂及植物蛋白工程(E-mail)vivian_wang0727@hotmail.com。

通信作者:张　涛,副教授,博士(E-mail)t.zhang@mail.hzau.edu.cn。

anticancer, and hormone – like functions, and the related mechanisms have been widely reported. 4,4 – Dimethylsterols demonstrate unique activities in improving lipid metabolism, regulating endocannabinoid system and nervous system. The safety of phytosterols in food applications has been recognized by multiple countries and institutions worldwide, and they are primarily used in vegetable oils, dairy products, chocolate, and other foods. Future research should focus on elucidating the modification techniques and efficacy mechanisms of phytosterols, as well as developing phytosterol – enriched foods tailored to China′s population dietary structure, to fully leverage their nutritional and health benefits.

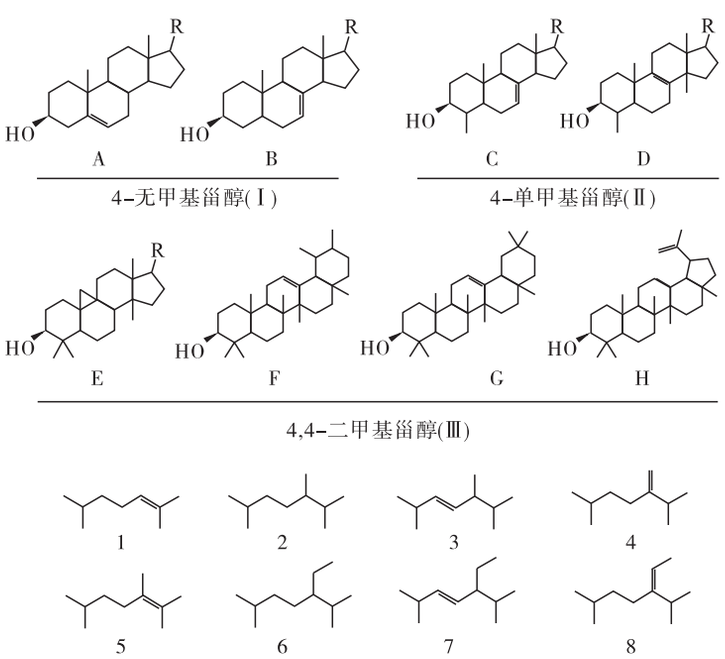
Key words: phytosterols; physiological functions; vegetable oil; regulations

植物甾醇是以环戊烷多氢菲为主体骨架的三萜类化合物,其作为一种天然活性成分广泛存在于植物油、坚果、谷物和水果等食物中,被誉为“生命的钥匙”。目前已鉴定出的植物甾醇多达 250 余种。植物甾醇无法由人体自身合成,因此关于植物甾醇的研究一直是食品营养研究的热点领域。随着现代人们饮食结构改变和慢性疾病高发,深入解析植物甾醇的结构 – 功能关系对开发精准营养干预策略具有重大意义。根据植物甾醇母核 A 环结构 C – 4 位上甲基的数目,可将其分为三大类:4 – 无甲基甾醇、4 – 单甲基甾醇和 4,4 – 二甲基甾醇。目前,学界已经从结构、功能、改性和应用等方面对 4 – 无甲基甾醇进行了综述[1],但对不同类型植物甾醇生理功能的关注较少。植物甾醇 A 环的可塑性是控制其疏水作用和底物分子识别的关键,尤其是 A 环上的甲基基团,其在生物体内源性或外源性有机物分子的识别过程中起着十分重要的作用[2-3]。近年研究发现不同类型植物甾醇在代谢调控、免疫调节等方面的功效差异显著,这一发现为个性化营养干预提供了新思路。

不同类型植物甾醇因 A 环甲基基团的差异具有不同的生理功能,现有报道主要集中于植物甾醇的整体功能或应用,并未分别概述各类型植物甾醇的生理功能。因此,为针对性应用不同类型的植物甾醇,本文就不同类型植物甾醇的生理功能及其在食品工业中的应用进行综述,以期为开发基于植物甾醇分子特性的功能性食品提供依据。

1　植物甾醇的类型

植物甾醇的基本结构特征如图 1 所示。



A3.菜籽甾醇(Ⅰ)
A2.菜油甾醇(Ⅰ)
A7.豆甾醇(Ⅰ)
A6.谷甾醇(Ⅰ)
A8.Δ5–燕麦甾醇(Ⅰ)
B6.豆甾烯醇(Ⅰ)
B8.Δ7–燕麦甾醇(Ⅰ)

C6.24–乙基洛飞烯醇(Ⅱ)
C4.禾本甾醇(Ⅱ)
C8.柠檬二烯醇(Ⅱ)
D4.钝叶醇(Ⅱ)

E1.环阿屯烯醇(Ⅲ)
E4.24–亚甲基环阿屯烷醇(Ⅲ)
E5.24–甲基环阿屯烯醇(Ⅲ)
F.α–香树脂醇(Ⅲ)
G.β–香树脂醇(Ⅲ)
H.羽扇豆醇(Ⅲ)

图 1　不同类型植物甾醇的结构和名称

Fig. 1　Structures and names of different types of phytosterols

植物甾醇分子结构的关键特征包括 C – 3 位羟基和 C – 17 位 9 ~ 11 碳侧链(R 基团)。根据 C – 4 位甲基化程度,植物甾醇可分为三大类:4 – 无甲基甾醇(如菜籽甾醇、菜油甾醇、豆甾醇等),主要存在

于植物油;4 – 单甲基甾醇(如 24 – 乙基洛飞烯醇、禾本甾醇等),主要分布于植物花粉;4,4 – 二甲基甾醇(如环阿屯烯醇、24 – 亚甲基环阿屯烷醇等),主要富集于植物树脂。研究表明,植物油是膳食植物甾醇的主要来源,其在不同国家的膳食摄入中占比存在显著差异。从分子特性来看,植物甾醇的极性呈现 4 – 无甲基甾醇 >4 – 单甲基甾醇 >4,4 – 二甲基甾醇的规律。C – 3 位羟基赋予植物甾醇两亲性特征,使其具有调控膜流动性的独特功能。此外,该羟基还可与脂肪酸、阿魏酸和单糖等形成多种生物活性衍生物,如甾醇脂肪酸酯、甾醇阿魏酸酯和甾醇糖苷等,拓展了其功能多样性。

2 植物甾醇的生理功能

2.1 4 – 无甲基甾醇的生理功能

2.1.1 降胆固醇

4 – 无甲基甾醇的降胆固醇作用机制研究始于 20 世纪中期。1951 年,Peterson 等[4]首次在动物模型中发现谷甾醇和豆甾醇具有降低血清胆固醇的作用,随后 Pollak[5]于 1953 年通过临床研究证实,每日摄入 5 ~ 10 g 谷甾醇可显著降低人体总胆固醇水平。尽管相关研究在近 20 年达到高峰,但 4 – 无甲基甾醇至今仍未实现药物化。当前食品营养的研究主要聚焦于不同食品基质对 4 – 无甲基甾醇功效的影响及 4 – 无甲基甾醇酯的功能差异(表 1)。

研究表明,载脂体系的脂肪酸组成显著影响 4 – 无甲基甾醇的生物活性,富含单不饱和脂肪酸(MUFA)或 ω – 3 多不饱和脂肪酸(PUFA)的载体更有利于其降胆固醇作用的发挥。Jacobs 等[6]研究证实,4 – 无甲基甾醇与鱼油复配的低脂涂抹酱可使高胆固醇血症患者的低密度脂蛋白胆固醇和甘油三酯水平降低 9% ~ 16%。Ferguson 等[7]进一步指出,以菜籽油为载体不仅可增强 4 – 无甲基甾醇脂肪酱的降胆固醇效果,其富含的 MUFA 和 ω – 3 PUFA 也表现出协同作用。在人造黄油、酸奶、奶油芝士酱和谷物棒等产品中,通过酯化可有效提高 4 – 无甲基甾醇的溶解度,但其降脂功效易受膳食背景因素干扰。

表 1 不同形式 4 – 无甲基甾醇的降胆固醇效果

Table 1 Cholesterol lowering effect of different forms of 4 – desmethylsterols

形式	实验设计	降胆固醇效果	文献
不同酯化形式	游离形式、月桂酸酯化	无显著差异	[8]
	游离形式、大豆油脂肪酸酯化	无显著差异	[9]
	游离形式、油酸酯化、硬脂酸酯化	油酸酯化与游离形式无显著差异,均显著优于硬脂酸酯化	[10]
	葵花籽油酯化、菜籽油酯化	无显著差异	[11]
	牛油酯化、大豆油酯化、硬脂酸酯化	牛油酯化与硬脂酸酯化无显著差异,均显著优于大豆油酯化	[12]
	鱼油酯化、葵花籽油酯化	鱼油酯化显著优于葵花籽油酯化	[13]
	鱼油酯化、葵花籽油酯化、橄榄油酯化	葵花籽油酯化与橄榄油酯化无显著差异,均显著弱于鱼油酯化	[14]
不同食品体系	无脂肪体系、低脂肪体系	无显著差异	[15]
	不同剂量的鱼油体系	随鱼油剂量升高,效果越明显	[16]
	面包、麦片、牛奶、酸奶	牛奶显著优于其他 3 种体系	[17]
	酸奶、牛奶	酸奶和牛奶中的效果相当	[18]

在药物营养协同作用研究领域,多项临床研究表明 4 – 无甲基甾醇与他汀类药物具有显著的协同降胆固醇效应。一项纳入 15 项随机对照实验的 Meta 分析显示,对于他汀单药治疗未达标的高胆固醇血症患者,联合摄入富含 4 – 无甲基甾醇的饮食可显著改善患者血脂谱,使血清总胆固醇和低密度脂蛋白胆固醇水平进一步降低,但对高密度脂蛋白胆固醇和甘油三酯水平无显著影响[19]。剂量效应研究表明,每日补充 2 g 4 – 无甲基甾醇的降胆固醇效果相当于 20 ~ 40 mg 他汀类药物的疗效[20]。此外,当 4 – 无甲基甾醇与胆固醇吸收抑制剂依泽替米贝联用时,可通过双重作用机制更有效地抑制肠道对胆固醇的吸收并促进排泄[21]。从作用机制来看,虽然 4 – 无甲基甾醇和依泽替米贝均作用于肠道对胆固醇的吸收过程,但二者的分子机制存在显著差异:4 – 无甲基甾醇主要通过竞争性取代小肠混合胶束中的胆固醇分子来减少吸收,而依泽替米贝则特异性作用于尼曼匹克 C1 型类似蛋白 1 转运体,在后续吸收阶段发挥抑制作用。

2.1.2 抗癌

诸多证据表明 4 – 无甲基甾醇可以抑制肿瘤细胞生长和转移。关于 4 – 无甲基甾醇抗癌作用的研究集中于体外癌细胞系或者啮齿动物癌症模型。流行病学研究显示,摄入 4 – 无甲基甾醇有助于降低肺癌、乳腺癌、食道癌、胃癌和卵巢癌等癌症的发病风险[22]。较高的 4 – 无甲基甾醇摄入量与卵巢癌

患者的生存率呈正相关[23]。在一项 4 - 无甲基甾醇摄入与西方卵巢癌发生的相关性研究中发现，β - 谷甾醇、菜油甾醇和豆甾醇的摄入与卵巢癌的发病率呈负相关[24]，并且 4 - 无甲基甾醇的摄入总量与胃癌发生风险呈负相关[25]。一项中国人群饮食中 4 - 无甲基甾醇摄入量与大肠癌风险关系的调查表明，中国人群中 4 - 无甲基甾醇的摄入总量与大肠癌风险呈负相关。其中 β - 谷甾醇、菜油甾醇和菜籽甾醇的摄入与结直肠癌的风险呈负相关，但豆甾醇摄入与女性群体大肠癌风险呈正相关，而 β - 谷甾烷醇和结直肠癌风险之间未发现统计学上的显著关联[26]。4 - 无甲基甾醇的抗癌机制研究仍未完全阐明，目前初步确定的机制包括：①诱导肿瘤细胞凋亡；②下调炎症反应和氧化应激；③影响细胞信号转导途径，抑制癌细胞转移；④抑制血管新生和细胞增殖。

2.1.3　类激素功能

4 - 无甲基甾醇在化学结构上属于甾体化合物，作为类固醇激素的合成前体，4 - 无甲基甾醇经人体吸收转化后亦能表现出类激素的功能，影响机体生化指标和激素水平，在机体生长发育中发挥着重要作用。

β - 谷甾醇可以改善繁殖性能，增加哺乳动物受孕概率。研究表明，50 mg/(kg·d)的 β - 谷甾醇连续饲喂水貂 10 个月后，不孕的雌性水貂数目减少，并且成功繁殖的雌性水貂显著增加[27]。转基因细胞实验结果表明，β - 谷甾醇具有雌激素样作用，并且证实 β - 谷甾醇倾向与雌激素受体 β 结合[28]。此外，利用 β - 谷甾醇对糖尿病大鼠模型进行治疗，可使大鼠的血清胰岛素和睾酮水平正常化[29]。富含 β - 谷甾醇的棕榈油在治疗大鼠前列腺增生并发症方面也有积极作用，β - 谷甾醇可显著降低前列腺质量与体质量比以及改善血清睾酮水平和前列腺组织增生[30]。每天皮下注射 0.5 ~ 5.0 mg/kg 的 β - 谷甾醇，可使 β - 谷甾醇在大鼠体内转化为类雌激素物质，对生殖系统产生影响[31]。

2.2　4,4 - 二甲基甾醇的生理功能

2.2.1　改善脂质代谢

4,4 - 二甲基甾醇对脂质代谢具有积极的调节作用。动物实验中关于 4,4 - 二甲基甾醇改善脂质代谢的相关研究报道较多，但临床实验报道较少。高脂饮食诱导的肥胖模型实验结果表明，α - 香树脂醇和 β - 香树脂醇可以显著降低血清中总甘油三酯、总胆固醇、低密度脂蛋白胆固醇和极低密度脂蛋白胆固醇水平，同时提高高密度脂蛋白胆固醇的水平[32]。后续研究证实，α - 香树脂醇和 β - 香树脂醇对血脂的改善涉及对肝脏 β 细胞的保护，通过调节鸟苷酸环化酶 K^+ 通道途径改善胰岛素抵抗、血脂异常和内皮功能障碍[33]。α - 香树脂醇和 β - 香树脂醇还可以通过调节脂肪酶活性、激素水平和炎症反应，有效改善高脂饮食诱导的肥胖及相关代谢紊乱[34]。

过氧化物酶体增殖物激活受体 - α(PPAR - α)作为一种脂肪酸负荷传感器，在脂质代谢中发挥着重要作用。α - 香树脂醇可以增加 PPAR - α 的 mRNA 转录水平和蛋白质含量，加速肝脏脂质代谢和减少脂肪沉积[35]。羽扇豆醇能降低肝脏脂质合成相关基因的 mRNA 转录水平，从而改善脂质代谢，显著降低血压[36]。此外，24 - 亚甲基环阿屯烷醇和环阿屯烯醇可以控制葡萄糖依赖性胰岛素多肽(GIP)的释放，从而降低体质量，同时可增强脂质氧化相关基因的表达，从而促进脂肪利用，并且还可以抑制脂质合成酶和固醇调节元件结合蛋白(SREBP - 1c)相关基因的表达[37]。进一步研究发现，24 - 亚甲基环阿屯烷醇和环阿屯烯醇能够降低小鼠和人类肠道的葡萄糖吸收，从而调节餐后血糖水平[38]。此外，1% 剂量的羊毛甾醇对血脂无明显改善，但增加到 2% 剂量时可显著提升高密度脂蛋白胆固醇的水平[39]。蒲公英赛醇对 2 型糖尿病的恢复也具有积极作用[40]。

2.2.2　调节内源性大麻素系统

内源性大麻素系统及其受体在人体内有广泛的生理学作用，与镇痛、免疫调节和能量代谢有关，并参与部分疾病的发生过程。内源性大麻素系统主要包括 G 蛋白偶联受体、内源性大麻素物质以及相关酶系等。大戟甾醇是首个被发现能够调节内源性大麻素系统的 4,4 - 二甲基甾醇，其可以通过一种可逆方式抑制单酰甘油脂肪酶(MAGL)活性[41]。动物模型研究发现，大戟甾醇可抑制机械性痛觉过敏，且对中枢神经系统无副作用。但是内源性大麻素受体(CB1R 和 CB2R)基因敲除或受体拮抗剂明显阻断了大戟甾醇的上述作用[42]。类似地，α - 香树脂醇和 β - 香树脂醇可以直接激活 CB1R 和 CB2R，但是受体拮抗剂或基因敲除也明显抑制了 α - 香树脂醇和 β - 香树脂醇的作用[43]。进一步研究表明，α - 香树脂醇和 β - 香树脂醇能显著抑制小鼠结肠损伤和促炎因子产生，降低 MAGL 和脂肪酸酰胺水解酶(FAAH)的基因表达，且其功效 CB1R 的激活而非 CB2R[44]。Chicca 等[45]利用细胞模型和体外化学评价法发现，与 α - 香树脂醇相比，β - 香树脂

醇可更有效地抑制内源性大麻素物质的生成,但其并不直接与内源性大麻素受体相互作用,而是通过抑制2-花生四烯酸单甘酯(2-AG)的水解实现的,该研究结果表明甾核E环中β-香树脂醇的双甲基比α-香树脂醇的邻甲基更有效,但该推论有待验证。α-香树脂醇和β-香树脂醇能显著降低MAGL活性,两者IC_{50}值低于羽扇豆醇[46]。羽扇豆醇作为另一种4,4-二甲基甾醇也可以抑制内源性大麻素系统中α/β水解酶结构域蛋白2(ABHD2)的活性,通过与ABHD2结合激活精子CatSper离子通道蛋白,从而可作为一种预防受精的避孕药[47]。

2.2.3 调节神经系统

阿尔茨海默病和帕金森病是两种常见的神经退行性疾病,目前尚无药物能完全治愈这两种疾病。乙酰胆碱酯酶(AChE)被认为是治疗阿尔茨海默病的靶点。4,4-二甲基甾醇具有调节AChE的生物学功能,以β-香树脂醇和蒲公英赛醇为例,它们均可以抑制AChE的活性[48-49],其中蒲公英赛醇能通过抑制AChE活性改善东莨菪碱和链脲佐菌素所引发的海马区记忆障碍。此外,α-香树脂醇和β-香树脂醇均能显著增强海马区记忆相关信号转导蛋白的表达,通过激活细胞外信号调节激酶1/2(ERK)和糖原合酶激酶3β(GSK-3β)信号通路调节神经系统,从而改善认知障碍[50]。自噬过程可以清除错误折叠蛋白质和受损细胞器,是一种预防帕金森病的方法。β-香树脂醇改善帕金森病的机制就涉及自噬途径,如提高自噬相关蛋白8(Atg8)的同源基因*LGG*-1的表达水平[51]。β-香树脂醇通过减少α-突触核蛋白聚集、避免多巴胺能神经元损伤来改善帕金森病的症状[52]。此外,羽扇豆醇也表现出治疗阿尔茨海默病的潜力,其可以显著抑制β-淀粉样前体蛋白裂解酶1(BACE1)的活性[53]。在糖尿病合并阿尔茨海默病大鼠模型中,羽扇豆醇可改善认知障碍、焦虑和恐惧等相关行为[54]。羊毛甾醇可能通过发挥抗帕金森病的作用保护糖尿病患者的认知功能[55]。

值得关注的是,前人研究已表明机体的胆固醇代谢与神经系统疾病存在密切联系,尤其是低密度脂蛋白胆固醇的水平。因此,4,4-二甲基甾醇的抗阿尔茨海默病和抗帕金森病活性也可能与其调节胆固醇代谢的能力有关。

2.2.4 改善白内障

4,4-二甲基甾醇还具有改善白内障的活性,其中:羽扇豆醇对白内障的改善作用与晶状体中丙二醛和活性氧含量的降低有关[56];羊毛甾醇则是通过减少蛋白质聚集,提高晶状体的抗氧化能力进而预防白内障发生[57]。

2.3 4-单甲基甾醇的生理功能

4-单甲基甾醇作为一类结构独特的甾醇衍生物,其生理功能尚未完全阐明,主要是由于4-单甲基甾醇在自然界中的含量较低并且分离纯化较复杂。当前4-单甲基甾醇的相关研究集中于其在胆固醇、麦角固醇等其他植物甾醇前体物质生物合成过程中所发挥的作用。由遗传损伤或生化抑制作用引起的4-单甲基甾醇积累会干扰生物体细胞和发育表型。研究表明,4-单甲基甾醇在哺乳动物或植物中发挥减数分裂激活剂或信号分子的作用。氧化的4-单甲基甾醇(如4-羧基甾醇)在主要的生物过程中起作用,例如植物中的生长素信号传导和哺乳动物的免疫系统发育[58]。目前,有关4-单甲基甾醇的生理功效和作用机制仍有待研究,尤其是4-单甲基甾醇在调控胆固醇代谢疾病、细胞膜结构与信号传导中的作用。此外,开发高灵敏度分析方法,深入研究其在天然油脂中的分布,并利用跨学科手段揭示构效关系,将为4-单甲基甾醇的开发应用提供新的研究方向。

3 植物甾醇在食品中的应用

3.1 植物甾醇在食品中的使用法规

植物甾醇在食品中使用的安全性已经得到世界多个国家或组织的认可。早在1999年,美国食品药品监督管理局(FDA)就批准添加植物甾醇及其酯的食品可使用“有益健康”的标签,日本也批准了植物甾醇及其酯可作为调节血脂的相关功能性食品的添加剂。此后,美国FDA在2000年发布公告称“植物甾醇及其酯、植物甾烷醇及其酯,能通过降低血液中胆固醇水平而有助于减少冠心病的风险。每天从膳食中摄入1.3 g植物甾醇酯或3.4 g植物甾烷醇酯能达到明显降低胆固醇的作用”,正式给予了植物甾醇在食品市场中的“合法地位”。欧盟针对植物甾醇在食品中的使用相对谨慎,直到2004年才批准植物甾醇及其酯在几类特定食品中使用,如黄油涂抹酱、牛奶类产品及发酵乳类产品。其中,英国在2007年才实施植物甾醇健康成分的审批。2008年澳新食品标准局对于拟将植物甾醇添加到果汁及其饮料中的提案向公众征求意见,植物甾醇是从植物油中提取出来的,根据食品相关法规被分类为“新型食品”。澳新食品标准局规定,新型食品在进入市场销售之前均须由食品标准局对其进行安全评估,截至2008年,新西兰食品安全局已批准可添加

植物甾醇的食品有人造黄油、早餐谷物、低脂牛奶及低脂酸乳酪。

我国于 2010 年允许植物甾醇及其酯作为新资源食品在食品中添加，并规定，来源于大豆油、菜籽油、玉米油、葵花籽油或塔罗油的植物甾醇酯食用量需不大于 3.9 g/d，但使用范围不包括婴幼儿食品。2023 年版《中国居民膳食营养素参考摄入量》中植物甾醇和植物甾醇酯的可耐受最高摄入量分别为 2.4 g/d 和 3.9 g/d，特定建议值分别为 0.8 g/d 和 1.3 g/d。近 15 年世界各国或机构发布的植物甾醇相关食品法规内容如表 2 所示。

表 2　近 15 年世界各国或机构发布的植物甾醇相关食品法规内容

Table 2　Contents of phytosterols related food regulations issued by countries or institutions around the world in the past 15 years

年份	国家或机构	法规内容
2025	中国国家卫生健康委员会	受理植物甾醇为新食品原料
2025	欧盟食品安全局	根据拟议的规格变更，植物甾醇/植物甾烷醇作为新型食品是安全的
2024	新西兰	食品中添加植物甾醇、植物甾烷醇或其酯，需要标注提示声明
2023	中国营养学会	修订植物甾醇及其酯的特定建议值分别为 0.8 g/d 和 1.3 g/d
2022	澳新食品标准局	允许将植物甾醇添加至植物性奶替代品中（限量 2.2 g/250 mL）
2016	澳新食品标准局	允许新资源食品植物甾醇类物质添加于谷物早餐
2015	印度食品安全标准局	就植物甾醇作为食品配料的使用及标签要求征求意见
2014	欧盟	将原法规中每日摄入量范围的上限修改为 3 g
2013	中国营养学会	公布植物甾醇及其酯的特定建议值分别为 0.9 g/d 和 1.5 g/d
2013	英国食品标准局	就修订添加植物甾醇的食品标签法规征求意见
2013	欧盟	批准富含豆甾醇的植物甾醇在即冻鸡尾酒中使用
2013	欧盟	修订添加植物甾醇及其酯类的食品与配料标识规定
2012	美国食品药品监督管理局	新增了可标注心脏保健作用的植物甾醇产品种类
2012	澳新食品标准局	就取消植物甾醇强化奶酪的包装规格限制征求意见
2012	澳新食品标准局	修订植物甾醇与奶酪及奶酪类似产品相关的法规
2010	中国卫生部	允许植物甾醇及其酯作为新资源食品在食品中添加
2010	美国食品药品监督管理局	修改食品标签有助于植物甾醇及其酯的健康效应

3.2　不同形式的植物甾醇食品

随着植物甾醇的功能不断被发掘，其逐渐成为备受青睐的健康食品原料。中国、美国、荷兰、德国等 20 多个国家已许可植物甾醇在食品范围内使用，我国植物甾醇食品开发正处于迅速发展阶段。植物甾醇在功能性食品中的应用一直是产品开发的重点方向。1995 年，芬兰最早开始生产含有植物甾烷醇酯的人造奶油功能性食品。目前，市场上富含植物甾醇的食品包括巧克力、果汁、乳制品、植物油等。例如富含植物甾醇酯的功能性黑巧克力在室温下储藏时间长达 5 个月，其品质不会有明显变化[59]。植物甾醇在果汁和乳制品中的应用瓶颈主要是其水溶性不佳。此外，富含植物甾醇的食用油也深受关注，部分稻米油和玉米油中植物甾醇含量超过 10 000 mg/kg。植物甾醇作为有益脂肪伴随物，在食用油中的高效保留技术日趋成熟，其特点是通过适度加工技术最大限度地保留油脂中的游离植物甾醇或植物甾醇酯。在煎炸油中添加谷甾醇可以抑制甘油三酯的聚合作用，起到较好的抗氧化作用[60]。

4　结　语

我国植物甾醇的研究仍面临基础与应用层面的双重挑战。在基础研究层面，虽然植物甾醇的生物活性已得到证实，但单体甾醇的精确构效关系及深层作用机制仍有待系统阐明。在应用技术层面，植物甾醇存在生物利用度偏低、热加工稳定性不足以及与脂溶性营养素相互作用等问题，制约了其产业发展。目前，我国植物甾醇产品类型相对单一，主要集中在植物油强化领域，未能充分体现膳食多样性特点。未来研究应着重于深入解析单体甾醇的分子特性，开发新型递送系统以提高其稳定性与吸收率。同时需要系统研究中式烹饪工艺对植物甾醇稳定性的影响，建立科学的安全性评价体系。在产品开发方面，应结合传统饮食特点，拓展其在面制品、调味品等特色食品中的应用。借助多学科协同创新，推动植物甾醇研究从基础到应用的全面发展，为功能性食品开发提供新思路。

参考文献：

[1] SHEN M, YUAN L, ZHANG J, et al. Phytosterols: Physiological functions and potential application[J/OL]. Foods, 2024, 13(11): 1754[2025-03-21]. https://doi.org/10.3390/foods13111754.

[2] CIULLA D A, WAGNER A G, LIU X, et al. Sterol A-ring plasticity in hedgehog protein cholesterolysis supports a primitive substrate selectivitymechanism [J]. Chem Commun, 2019, 55(12): 1829-1832.

[3] BARREIRO E J, KÜMMERLE A E, FRAGA C A M. The methylation effect in medicinal chemistry[J]. Chem Rev, 2011, 111(9): 5215-5246.

[4] PETERSON D W. Effect of soybean sterols in the diet on plasma and liver cholesterol in chicks[J]. Proc Soc Exp Biol Med, 1951, 78(1): 143-147.

[5] POLLAK O J. Reduction of blood cholesterol in man[J]. Circulation, 1953, 7(5): 702-706.

[6] JACOBS D M, MIHALEVA V V, VAN SCHALKWIJK D B, et al. The effect of plant sterols and different low doses of *omega*-3 fatty acids from fish oil on lipoprotein subclasses[J]. Mol Nutr Food Res, 2015, 59(9): 1745-1757.

[7] FERGUSON J J A, STOJANOVSKI E, MACDONALD-WICKS L, et al. Fat type in phytosterol products influence their cholesterol-lowering potential: A systematic review and meta-analysis of RCTs[J]. Prog Lipid Res, 2016, 64: 16-29.

[8] HE W S, JIA C S, YANG Y B, et al. Cholesterol-lowering effects of plant steryl and stanyl laurate by oral administration in mice[J]. J Agric Food Chem, 2011, 59(9): 5093-5099.

[9] NESTEL P, CEHUN M, POMEROY S, et al. Cholesterol-lowering effects of plant sterol esters and non-esterified stanols in margarine, butter and low-fat foods[J]. Eur J Clin Nutr, 2001, 55(12): 1084-1090.

[10] KOBAYASHI M, HAMADA T, GOTO H, et al. Comparison of effects of dietary unesterified and esterified plant sterols on cholesterol absorption in rats[J]. J Nutr Sci Vitaminol, 2008, 54(3): 210-214.

[11] LIU Y W, GUAN L, ZHAO Y Y, et al. Fatty acid moieties have little effect on cholesterol-lowering potency of plant sterol esters [J]. Eur J Lipid Sci Technol, 2015, 117(5): 579-588.

[12] RASMUSSEN H E, GUDERIAN D M, WRAY C A, et al. Reduction in cholesterol absorption is enhanced by stearate-enriched plant sterol esters in hamsters[J]. J Nutr, 2006, 136(11): 2722-2727.

[13] DEMONTY I, CHAN Y M, PELLED D, et al. Fish-oil esters of plant sterols improve the lipid profile of dyslipidemic subjects more than do fish-oil or sunflower oil esters of plant sterols[J]. Am J Clin Nutr, 2006, 84(6): 1534-1542.

[14] JONES P J H, DEMONTY I, CHAN Y M, et al. Fish-oil esters of plant sterols differ from vegetable-oil sterol esters in triglycerides lowering, carotenoid bioavailability and impact on plasminogen activator inhibitor-1 (PAI-1) concentrations in hypercholesterolemic subjects [J/OL]. Lipids Health Dis, 2007, 6: 28[2025-03-21]. https://doi.org/10.1186/1476-511X-6-28.

[15] CHAREST A, VANSTONE C, ST-ONGE M P, et al. Phytosterols in nonfat and low-fat beverages have no impact on the LDL size phenotype[J]. Eur J Clin Nutr, 2005, 59(6): 801-804.

[16] RAS R T, DEMONTY I, ZEBREGS Y E M P, et al. Low doses of eicosapentaenoic acid and docosahexaenoic acid from fish oil dose-dependently decrease serum triglyceride concentrations in the presence of plant sterols in hypercholesterolemic men and women [J]. J Nutr, 2014, 144(10): 1564-1570.

[17] CLIFTON P M, NOAKES M, SULLIVAN D, et al. Cholesterol-lowering effects of plant sterol esters differ in milk, yoghurt, bread and cereal[J]. Eur J Clin Nutr, 2004, 58(3): 503-509.

[18] NOAKES M, CLIFTON P M, DOORNBOS A M E, et al. Plant sterol ester-enriched milk and yoghurt effectively reduce serum cholesterol in modestly hypercholesterolemic subjects[J]. Eur J Nutr, 2005, 44(4): 214-222.

[19] HAN S, JIAO J, XU J, et al. Effects of plant stanol or sterol-enriched diets on lipid profiles in patients treated with statins: Systematic review and meta-analysis [J/OL]. Sci Rep, 2016, 6: 31337 [2025-03-21]. https://doi.org/10.1038/srep31337.

[20] COFÁN M, ROS E. Use of plantsterol and stanol fortified foods in clinical practice[J]. Curr Med Chem, 2019, 26(37): 6691-6703.

[21] LIN X, RACETTE S B, LEFEVRE M, et al. Combined effects of ezetimibe and phytosterols on cholesterol metabolism: A randomized, controlled feeding study in humans[J]. Circulation, 2011, 124(5): 596-601.

[22] BLANCO-VACA F, CEDÓ L, JULVE J. Phytosterols in cancer: From molecular mechanisms to preventive and therapeutic potentials [J]. Curr Med Chem, 2019, 26(37): 6735-6749.

[23] ZHAO J Q, HAO Y Y, GONG T T, et al. Phytosterol intake and overall survival in newly diagnosed ovarian cancer patients: An ambispective cohort study [J/OL]. Front Nutr, 2022, 9: 974367[2025-03-21]. https://doi.org/10.3389/fnut.2022.974367.

[24] MCCANN S E, FREUDENHEIM J L, MARSHALL J R, et al. Risk of human ovarian cancer is related to dietary intake of selected nutrients, phytochemicals and food groups[J]. J Nutr, 2003, 133(6): 1937 – 1942.

[25] DE STEFANI E, BOFFETTA P, RONCO A L, et al. Plant sterols and risk of stomach cancer: A case – control study in Uruguay[J]. Nutr Cancer, 2000, 37(2): 140 – 144.

[26] HUANG J, XU M, FANG Y J,et al. Association between phytosterol intake and colorectal cancer risk: A case – control study [J]. Br J Nutr,2017, 117(6): 839 – 850.

[27] NIEMINEN P, PÖLÖNEN I, MUSTONEN A M. Increased reproductive success in the white American mink (*Neovison vison*) with chronic dietary β – sitosterol supplement[J]. Anim Reprod Sci, 2010, 119(3/4): 287 – 292.

[28] GUTENDORF B, WESTENDORF J. Comparison of an array of *in vitro* assays for the assessment of the estrogenic potential of natural and synthetic estrogens, phytoestrogens and xenoestrogens[J]. Toxicology, 2001, 166(1/2): 79 – 89.

[29] PONNULAKSHMI R, SHYAMALADEVI B, VIJAYALAKSHMI P, et al. In silico and *in vivo* analysis to identify the antidiabetic activity of *beta* sitosterol in adipose tissue of high fat diet and sucrose induced type – 2 diabetic experimental rats[J]. Toxicol Mech Methods, 2019, 29(4): 276 – 290.

[30] SUDEEP H V, VENKATAKRISHNA K, AMRUTHARAJ B, et al. A phytosterol – enriched saw palmetto supercritical CO_2 extract ameliorates testosterone – induced benign prostatic hyperplasia by regulating the inflammatory and apoptotic proteins in a rat model[J/OL]. BMC Complement Altern Med, 2019, 19(1): 270 [2025 – 03 – 21]. https://doi. org/10. 1186/s12906 – 019 – 2697 – z.

[31] LING W H, JONES P J. Dietary phytosterols: A review of metabolism, benefits and side effects[J]. Life Sci, 1995, 57(3): 195 – 206.

[32] ALMEIDA SANTOS F, FROTA J T, ARRUDA B R, et al. Antihyperglycemic and hypolipidemic effects of α, β – amyrin, a triterpenoid mixture from *Protium heptaphyllum* in mice[J/OL]. Lipids Health Dis, 2012, 11: 98[2025 – 03 – 21]. https://doi. org/10. 1186/1476 – 511X – 11 – 98.

[33] ALMEIDA SANTOS F, CARVALHO K M M B, BATISTA – LIMA F J, et al. The triterpenoid *alpha*, *beta* – amyrin prevents the impaired aortic vascular reactivity in high – fat diet – induced obese mice[J]. Naunyn Schmiedeberg′s Arch Pharmacol, 2017, 390(10): 1029 – 1039.

[34] CARVALHO K M M B, DE MELO T S, DE MELO K M, et al. Amyrins from *Protium heptaphyllum* reduce high – fat diet – induced obesity in mice via modulation of enzymatic, hormonal and inflammatory responses[J]. Planta Med, 2017, 83(3/4): 285 – 291.

[35] PRABHAKAR P, REETA K H, MAULIK S K, et al. α – Amyrin attenuates high fructose diet – induced metabolic syndrome in rats[J]. Appl Physiol Nutr Metab, 2017, 42(1): 23 – 32.

[36] ARDIANSYAH, YAMAGUCHI E, SHIRAKAWA H, et al. Lupeol supplementation improves blood pressure and lipid metabolism parameters in stroke – prone spontaneously hypertensive rats[J]. Biosci Biotechnol Biochem, 2012, 76(1): 183 – 185.

[37] FUKUOKA D, OKAHARA F, HASHIZUME K, et al. Triterpene alcohols and sterols from rice bran lower postprandial glucose – dependent insulinotropic polypeptide release and prevent diet – induced obesity in mice[J]. J Appl Physiol (1985), 2014, 117(11): 1337 – 1348.

[38] OKAHARA F, SUZUKI J, HASHIZUME K, et al. Triterpene alcohols and sterols from rice bran reduce postprandial hyperglycemia in rodents and humans[J]. Mol Nutr Food Res, 2016, 60(7): 1521 – 1531.

[39] RAO C V, NEWMARK H L, REDDY B S. Chemopreventive effect of farnesol and lanosterol on colon carcinogenesis[J]. Cancer Detect Prev, 2002, 26(6): 419 – 425.

[40] KHANRA R, BHATTACHARJEE N, DUA T K, et al. Taraxerol, a pentacyclic triterpenoid, from *Abroma augusta* leaf attenuates diabetic nephropathy in type 2 diabetic rats[J]. Biomed Pharmacother, 2017, 94: 726 – 741.

[41] KING A R, DOTSEY E Y, LODOLA A, et al. Discovery of potent and reversible monoacylglycerol lipase inhibitors [J]. Chem Biol, 2009, 16(10): 1045 – 1052.

[42] DUTRA R C, SIMÃO DA SILVA K A B, BENTO A F, et al. Euphol, a tetracyclic triterpene produces antinociceptive effects in inflammatory and neuropathic pain: The involvement of cannabinoid system[J]. Neuropharmacology, 2012, 63(4): 593 – 605.

[43] SIMÃO DA SILVA K A B, PASZCUK A F, PASSOS G F, et al. Activation of cannabinoid receptors by the pentacyclic triterpene α, β – amyrin inhibits inflammatory and neuropathic persistent pain in mice[J]. Pain, 2011, 152(8): 1872 – 1887.

[44] MATOS I, BENTO A F, MARCON R, et al. Preventive and therapeutic oral administration of the pentacyclic

triterpene α, β – amyrin ameliorates dextran sulfate sodium – induced colitis in mice: The relevance of cannabinoid system[J]. Mol Immunol, 2013, 54(3/4): 482 – 492.

[45] CHICCA A, MARAZZI J, GERTSCH J. The antinociceptive triterpene β – amyrin inhibits 2 – arachidonoylglycerol (2 – AG) hydrolysis without directly targeting cannabinoid receptors [J]. Br J Pharmacol, 2012, 167(8): 1596 – 1608.

[46] MERALI Z, CAYER C, KENT P, et al. Sacred Maya incense, copal (*Protium copal* – Burseraceae), has antianxiety effects in animal models [J]. J Ethnopharmacol, 2018, 216: 63 – 70.

[47] MANNOWETZ N, MILLER M R, LISHKO P V. Regulation of the sperm calcium channel CatSper by endogenous steroids and plant triterpenoids[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2017, 114(22): 5743 – 5748.

[48] BERTÉ T E, DALMAGRO A P, ZIMATH P L, et al. Taraxerol as a possible therapeutic agent on memory impairments and Alzheimer′s disease: Effects against scopolamine and streptozotocin – induced cognitive dysfunctions[J]. Steroids, 2018, 132: 5 – 11.

[49] SCHWARZ S, LOESCHE A, LUCAS S D, et al. Converting maslinic acid into an effective inhibitor of acylcholinesterases[J]. Eur J Med Chem, 2015, 103: 438 – 445.

[50] PARK S J, AHN Y J, OH S R, et al. Amyrin attenuates scopolamine – induced cognitive impairment in mice[J]. Biol Pharm Bull, 2014, 37(7): 1207 – 1213.

[51] WEI C C, CHANG C H, LIAO V H. Anti – Parkinsonian effects of β – amyrin are regulated via LGG – 1 involved autophagy pathway in *Caenorhabditis elegans* [J]. Phytomedicine, 2017, 36: 118 – 125.

[52] BRAAK H, DEL TREDICI K. Invited article: Nervous system pathology in sporadic Parkinson disease [J]. Neurology, 2008, 70(20): 1916 – 1925.

[53] KOIRALA P, SEONG S H, JUNG H A, et al. Comparative molecular docking studies of lupeol and lupenone isolated from *Pueraria lobata* that inhibits BACE1: Probable remedies for Alzheimer′s disease[J]. Asian Pac J Trop Med, 2017, 10(12): 1117 – 1122.

[54] HASHMIW J, ISMAIL H, MEHMOOD F, et al. Neuroprotective, antidiabetic and antioxidant effect of *Hedera nepalensis* and lupeol against STZ + $AlCl_3$ induced rats model[J]. DARU J Pharm Sci, 2018, 26(2): 179 – 190.

[55] LIM L, JACKSON – LEWIS V, WONG L C, et al. Lanosterol induces mitochondrial uncoupling and protects dopaminergic neurons from cell death in a model for Parkinson′s disease[J]. Cell Death Differ, 2012, 19(3): 416 – 427.

[56] ASHA R, GAYATHRI DEVI V, ABRAHAM A. Lupeol, a pentacyclic triterpenoid isolated from *Vernonia cinerea* attenuate selenite induced cataract formation in Sprague Dawley rat pups[J]. Chem Biol Interact, 2016, 245: 20 – 29.

[57] ZHAO L, CHEN X J, ZHU J, et al. Lanosterol reverses protein aggregation in cataracts[J]. Nature, 2015, 523(7562): 607 – 611.

[58] DARNET S, SCHALLER H. Metabolism and biological activities of 4 – methyl – sterols [J/OL]. Molecules, 2019, 24(3): E451[2025 – 03 – 21]. https://doi.org/10.3390/molecules24030451.

[59] BOTELHO P B, GALASSO M, DIAS V, et al. Oxidative stability of functional phytosterol – enriched dark chocolate [J]. LWT – Food Sci Technol, 2014, 55(2): 444 – 451.

[60] SINGH A. Sitosterol as an antioxidant in frying oils[J]. Food Chem, 2013,137:62 – 67.

(上接第 57 页)

[13] PENG C Y, LAN C H, LIN P C, et al. Effects of cooking method, cooking oil, and food type on aldehyde emissions in cooking oil fumes [J]. J Hazard Mater, 2017, 324: 160 – 167.

[14] XU L, MEI X, CHANG J, et al. Comparative characterization of key odorants of French fries and oils at the break – in, optimum, and degrading frying stages [J/OL]. Food Chem, 2022, 368: 130581[2024 – 09 – 20]. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130581.

[15] 刘玉兰, 孙国昊, 王小磊, 等. 浓香菜籽油和精炼菜籽油氧化稳定性及挥发性成分的差异[J]. 中国油脂, 2022, 47(6): 35 – 45.

[16] 袁方博. 煎炸方便面过程中茶多酚对棕榈油及方便面氧化稳定性的影响[D]. 郑州: 河南工业大学, 2021.

[17] 温运启, 刘玉兰, 王璐阳, 等. 不同食用植物油中维生素 E 组分及含量研究[J]. 中国油脂, 2017, 42(3): 35 – 39.

[18] JUÁREZ M D, OSAWA C C, ACUÑA M E, et al. Degradation in soybean oil, sunflower oil and partially hydrogenated fats after food frying, monitored by conventional and unconventional methods [J]. Food Contr, 2011, 22(12): 1920 – 1927.