

# 植物甾醇的生物学功能 及其在动物生产中的应用

■ 南京农业大学动物科技学院 / 王恬 周岩民 顾莞婷

**摘要** 植物甾醇是我国农业部2008年批准的一种新型功能性饲料添加剂。该文简述了植物甾醇的性质和来源、提取与精制,比较全面地介绍了植物甾醇对胆固醇代谢的影响、抗氧化作用、类激素功能、抗癌作用、免疫调节功能、抗炎作用与调节生长作用等生理功能,对植物甾醇的吸收、分布和转化及其在动物生产中的应用进行了综述。

**关键词** 植物甾醇;生理功能;饲料;添加剂;动物

**Abstract** The phytosterols is one kind of new feed additives approved by Ministry of Agriculture in China in 2008. The paper summarized the characteristic and origin of plant sterols, the extract and refined of phytosterols in industry manufacture. It was reviewed that the physiological actions of phytosterols, such as effects of phytosterols on cholesterol metabolism, oxidation resistance, hormonelike actions, anti-carcinoma functions, immunity regulation actions, inflammation resistance, and growth regulation in vivo. The absorption, distribution, transform of phytosterols in vivo and its applications in animal production were discussed.

**Key words** phytosterols; physiological actions; feedstuff; additive; animal

植物甾醇是植物细胞的重要组成部分。20世纪50年代以来,在大量临床试验和动物试验中,植物甾醇及其制品在调节胆固醇、预防心血管疾病等方面均表现出良好的效果,并具有极高的安全性。目前已开发出多种含有植物甾醇的功能性食品,美国FDA也已批准添加植物甾醇或甾烷醇酯的食品可使用“有益健康”的标签。特别是近年来的研究发现,植物甾醇还有具有抗氧化、抗癌、促进生长等作用,深入研究与探讨植物甾醇的作用机理和相关功能引起广泛关注。2007年,植物甾醇获我国农业部颁发的饲料添加剂新产品证书。

植物甾醇,又称植物固醇(phytosterols, plant sterols),属于植物性甾体化合物,它是植物细胞的重要组成部分,也是一种植物

## 1 植物甾醇的性质和来源

植物甾醇,又称植物固醇(phytosterols, plant sterols),属于植物性甾体化合物,它是植物细胞的重要组成部分,也是一种植物

活性成分<sup>[1]</sup>。植物甾醇的结构与动物性甾醇(如胆固醇)的结构基本相似,均以环戊烷全氢菲为骨架,属于4-无甲基甾醇,具有相同的手性结构。它们在结构上唯一不同之处是侧链,即C4位所连甲基数目不同及C11位上侧链长短、双键数目的多少和位置等的差异<sup>[2]</sup>,但正是这些侧链上的微小差异导致了它们生理功能的极大不同。

大部分高等植物所含的甾醇是 $\Delta^5$ 键的,其中典型的是 $\beta$ -谷甾醇( $\beta$ -sitosterol),一些高等植物还含有 $\Delta^7$ 键。植物甾醇双键被饱

江苏省科技攻关项目(BE2006332);江苏省农业三项工程项目(X(2007)072)资助。  
本论文已被《动物营养研究进展》(中国农业科技出版社,2008)收录。

和后称为甾烷醇，羟基被酯化后称为甾醇酯<sup>[3]</sup>。结构示意图 1。

自然界中存在的植物甾醇有游离型和酯化型两种。酯化型的植物甾醇主要是甾醇在酶的作用下与酰基供体酯化、酯交换合成植物甾醇酯而得到的<sup>[5]</sup>，常见的酯化型植物甾醇主要有甾醇硬脂酸酯、甾醇乙酸酯、甾醇油酸酯等，主要存在于谷类食物中。游离型的植物甾醇在坚果和豆类植物中含量较多，最常见的包括  $\beta$ -谷甾醇、菜油甾醇 (campesterol)、菜籽甾醇 (brassicasterol) 和豆甾醇 (stigmasterol) 等<sup>[6]</sup>。到目前为止，从植物中至少已经确认鉴定出了 40 多种植物甾醇。几种常见植物性食物中植物甾醇的含量如表 1 所示。

## 2 植物甾醇的提取与精制

从油脂下脚中提取甾醇通常分两步进行。先从原料中提取甾醇为主的不皂化物(粗甾醇)，然后从不皂化物中精制甾醇。

### 2.1 植物甾醇的提取

植物甾醇在各种油料种子中含量较高。制取油脂时，植物甾醇从油料种子进入到毛油中，精炼植物油时，植物甾醇在物理的、化学的或两者共同作用下存留于脱胶废水、碱炼皂脚、

脱色白土、脱臭馏出物和物理精炼馏出物等副产品和废液中。在以皂脚或油脂制取脂肪酸时，甾醇又绝大部分进入蒸馏黑脚，因而油脂下脚富集大量甾醇。皂脚、脱臭馏出物、谷维素

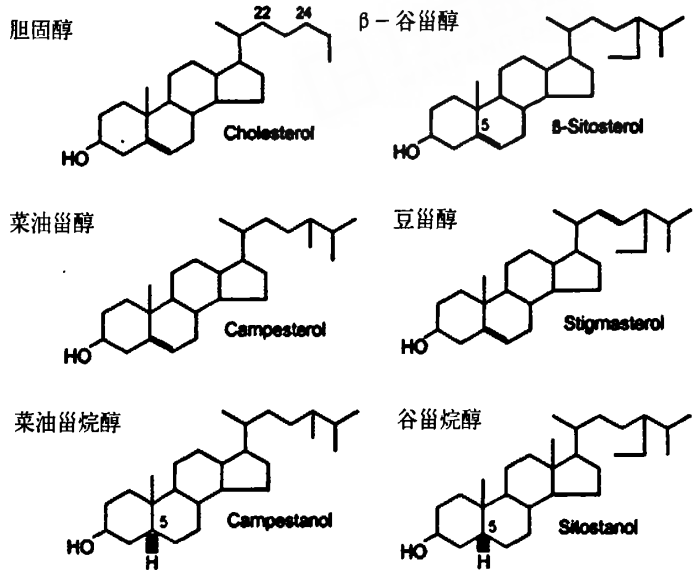


图 1 胆固醇、植物甾醇和甾烷醇的结构

Figure 1 Structures of cholesterol,  $\Delta^5$ -phytosterols and phytostanols

注：来源于 Moghadasian, 2000<sup>[4]</sup>

表 1 常见食物中植物甾醇的含量和组成 (mg/kg)

Table 1 Phytosterols content in common vegetable and fruit (mg/kg, fresh weight)

种类 Sorts	总甾醇 Total PS	游离甾醇:酯型甾醇 Free sterols:Stanols	谷甾醇 Sitosterol	菜油甾醇 Campesterol	豆甾醇 Stigmasterol
芝麻 Sesame	714.0	1:0.78	100	20.6	17.5
葵花籽 Sunflower seed	534.0	1:1.39	100	17.7	21.6
菜籽 Rapeseed	308.0	1:0.85	100	46.3	—
花生 Peanut	220.0	1:0.51	100	16.5	16.3
大豆 Soybean	1607	1:0.78	100	25.5	44.2
毛豆 Green soy bean	497	—	100	13.0	61.3
绿豆 Mung bean	232	1:0.82	100	13.0	61.3
小麦 Wheat	68.8	1:1.74	100	66.1	—
玉米 Corn	177.6	1:1.60	100	26.8	17.4
甘薯 Sweet Potato	12.1	1:0.14	100	31.0	9.3
马铃薯 Potato	4.8	1:0.59	100	1.7	21.5
萝卜 Radish	34.4	1:0.18	100	25.8	—
西红柿 Tomato	6.77	1:1.22	100	16.5	107.4
葡萄 Grape	3.31	—	100	16.7	31.1
苹果 Apple	12.7	—	100	2.8	—
草莓 Strawberry	12.1	—	100	1.5	1

注：其中谷甾醇、菜油甾醇、豆甾醇含量为其比例关系 (来源于韩军花 2001<sup>[2]</sup>)

生产下脚以及脂肪酸蒸馏黑脚等各种油脂下脚均是制取甾醇较好的原料。特别是大豆油、菜籽油、花生油、玉米油、葵花子油等的脱臭物中的甾醇含量一般在10%~30%。另外,造纸工业副产品木浆油也是制取植物甾醇的原料<sup>[7]</sup>。

目前,国内的植物甾醇产品主要来源于植物油精炼过程中的脱臭馏出物,大多是各种植物甾醇的混合物,根据植物来源的不同,植物甾醇产物组成不同。国外多将植物甾醇进一步分离成谷甾醇和豆甾醇两部分。谷甾醇(含菜油甾醇)用于发酵法生产雄甾-4-烯-3,17-二酮(4AD)和雄甾-1,4-二烯-3,17-二酮(ADD)。豆甾醇通过化学法从C-22双键处切断,再进行结构修饰后可制造出多种甾体皮质激素药物<sup>[7]</sup>。

## 2.2 植物甾醇的精制

近年来植物甾醇(特别是谷甾醇)在医药工业上的进一步应用对其纯度提出了更高的要求。如何将混合植物甾醇分离成为单一的甾醇产品,并提高其纯度和得率,是当前甾醇分离精制的关键。植物甾醇工业精制有溶剂结晶法、络合法、或两种方法结合,还有采用湿润剂乳化分离法。实验室精制采用吸附法、酶法、分子蒸馏分离法等<sup>[9]</sup>。粗甾醇和精制甾醇的划分极难,各文献报道很不一致,产

品质量要求和规格也不统一<sup>[8]</sup>。各国的标准也不相同,前苏联把甾醇产品分为三类,见表2。

纯化的植物甾醇混合物为片状或粉末状白色固体,经溶剂结晶处理呈白色鳞片状或针状晶体。植物甾醇主要表现为疏水性,但因其结构上带有羟基基团,因而又具有一定的亲水性,侧链越大,甾醇的疏水性越强。植物甾醇比重略大于水,不溶于水,可溶于多种有机溶剂。为了提高它们的溶解度,精制和纯化后的植物甾醇经氢化后制得植物甾醇醇,再与食用脂肪酸酯化制成甾醇醇酯。

## 2.3 植物甾醇的分析测定

测定甾醇的方法较多,目前主要采用以下几种比较方便、快捷的方法对甾醇进行分离分析<sup>[9,10]</sup>。①可见光比色法。采用改进的Liebermann-Burchard比色法测定甾醇产品中总甾醇的含量简单快速。②薄层层析法。利用薄层色谱分析甾醇已有较长的历史。在硅胶G板上分离甾醇、甾醇酯、游离脂肪酸等不同组分均可通过TLC达到良好分离,根据斑点的大小、颜色的深浅可以直接判断它们之间的大约比例关系。将上述薄板在CS-910薄板扫描仪上,在参比波长700nm、样品波长550nm的条件下进行双波长扫描,即可得到标准扫描图进而得到标准扫描曲线,从而

测知产品中甾醇与甾醇酯的含量。③气相色谱法。气相色谱的应用对甾醇的分析推动很大,采用气相色谱法能很好地解决甾醇的含量与组成同时分析的问题。但必须将甾醇转化为适当的衍生物<sup>[11]</sup>,增加其挥发性和稳定性,降低气化点。此分析方法操作简单,费用较低,衍生化很容易完全,是一种值得推广的技术。④高效液相色谱法。采用HPLC分离分析甾醇,样品不需要衍生化即可直接进样,操作简便,精确度高,重现性好,若采用其制备色谱还可收集分离到各单一甾醇的标准品<sup>[12]</sup>。样品在分离前与分离后均能保持本来面目,没有遭到任何破坏,更能反映实际情况,有其独特的优越性。

## 3 植物甾醇的生理功能

### 3.1 对胆固醇代谢的影响

植物甾醇的研究已有百年历史。20世纪50年代,人们发现从膳食中摄入植物甾醇越多,胆固醇的吸收率就越低,血清中的胆固醇水平也越低,近年来植物甾醇的降低胆固醇功能再度引起了人们的兴趣。大量动物试验和人体实验研究证明,补充植物甾醇和甾醇醇能明显降低血液中总胆固醇(TC)和低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)的含量。这种降低血液中胆固醇的效果可能不仅与肠道胆固

表2 中国、日本与前苏联工业用植物甾醇部分技术参数

Table 2 Several technical parameters of phytosterols in industry of China and Japan

标准	技术参数				
中国医药用粗甾醇	不皂化物≥90%	甾醇≥60%	挥发失重<2.0%	酸值≤5	皂化值≤10
中国添加剂企业标准	总甾醇≥90%	β-谷甾醇≥40.0	菜油甾醇≥20.0%	豆甾醇≥17.0%	菜籽甾醇<5.0%
日本化妆品工业用	熔点131~141℃	干燥失重≤3.0%	灼烧残份≤0.10%	酸值≤0.5	—
前苏联医药和化妆品工业	—	甾醇60%~70%	脂肪醇10%~20%	固体皂20%~30%	—
前苏联合成甾体激素的“精制甾醇”	—	甾醇≥97%	脂肪醇≤3%	—	—
前苏联合成甾体激素的“β-谷甾醇”	—	甾醇≥80%	脂肪醇≤20%	—	—

注:据彭莺,2001<sup>[13]</sup>编制。

醇的吸收被抑制有关,亦可能源于植物甾醇影响了肝/肠胆固醇代谢的其他方面。植物甾醇和甾烷醇能降低血液中胆固醇的功效已为公认,但其作用机理仍不明确,不同学者提出了多种不同的机制。基于以上所述胆固醇和植物甾醇吸收代谢的机理,可以概括出植物甾醇对消化道吸收胆固醇在三个层次上的影响<sup>[13]</sup>,如图2所示。

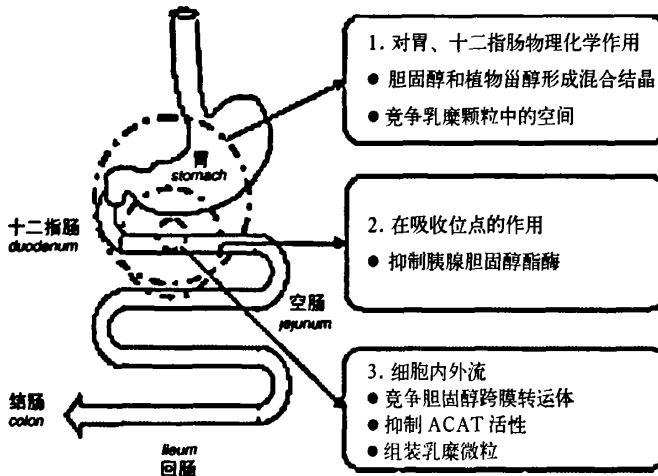


图2 植物甾醇影响胆固醇吸收作用解剖学示意图

Figure 2 Anatomic level and hypothetical area of phytosterol esters interaction with cholesterol uptake

注:来源于 Trautwein, 2003<sup>[14]</sup>

### 3.2 抗氧化作用

自由基是生命活动过程中生物化学反应的中间产物。在正常情况下,体内自由基的产生及其清除处于动态平衡之中<sup>[15]</sup>。但是,如果体内自由基产生过多或清除过慢,则自由基会在分子水平、细胞水平以及器官水平造成机体损伤。例如,自由基会损伤碳水化合物、蛋白质、脂类、核酸等生物大分子,导致功能和代谢紊乱,加快机体的衰老过程<sup>[16-18]</sup>。在畜禽生产过程中,氧化应激常常会导致动物生产性能下降与产品质量下降,甚

至发生疾病等。近来,相继有报道表明植物甾醇具有抗氧化能力。吴时敏(2002)等在体外试验中发现橄榄油、玉米胚芽油、小麦胚芽油等能使红花籽油在煎炸条件下保护其脂肪酸不发生氧化降解。特别是发现 $\Delta 5$ -燕麦甾醇、 $\Delta 7$ -燕麦甾醇、 $\alpha$ -谷甾醇和斑鸠甾醇具有阻止不饱和脂肪酸在高温加热条件下发生氧化降解的功能<sup>[1]</sup>。另用不同浓度的植物甾醇添

加到菜籽高级烹调油中进行试验结果表明,植物甾醇具有抗氧化作用,添加量不超过0.10%时,抗氧化能力随浓度增加而上升,与维生素E联合使用可增强抗氧化效果。研究还表明,植物甾醇具有较好的热稳定性,在煎炸过程的初始阶段具有抗氧化作用<sup>[19]</sup>,并使高温下菜籽高级烹调油的抗氧化、抗聚合性能得以改善<sup>[20]</sup>。刘慧琼等(2004)研究表明, $\beta$ -谷甾醇具有清除羟自由基和抑制超氧阴离子的作用,且 $\beta$ -谷甾醇的抗氧

化活性随着其在猪油中浓度的增大而增强<sup>[21]</sup>。尉芹等(2001)研究也发现,七叶树叶以70%乙醇(V/V)为溶剂的提取物(主要成分为酚类和植物甾醇)具有良好的抗氧化性能,在油脂中的添加量为0.08%时效果最佳,超过0.02%的BHT<sup>[22]</sup>。Anna-Maija和Lena等(1999)研究了豆甾醇、谷甾醇、岩藻甾醇在高温条件下对高油酸葵花籽油的抗氧化、抗聚合效果,结果表明,植物甾醇的抗氧化效果不仅与自身分子结构有关,而且还在很大程度上受氧化模型(包括脂肪酸不饱和程度、加热方式、氧张力)和食品形式的影响<sup>[23]</sup>。

体内试验发现,植物甾醇乙酸酯(PSA)和植物甾醇油酸酯(PSO)能显著提高荷瘤小鼠CAT活性,表明两种甾醇酯对小鼠机体因肿瘤造成CAT活力下降有恢复作用<sup>[24]</sup>。仙人掌(含 $\beta$ -谷甾醇、芸薹甾醇、豆甾醇等)水煎液能明显抑制和降低由四氯化碳(CCl<sub>4</sub>)所致的小鼠和大鼠肝匀浆中丙二醛(MDA)的生成和含量<sup>[25]</sup>。目前发现,具抗氧化功能的植物甾醇共同特征是分子侧链上都有一个亚乙基,能在29-烯丙基处快速形成一个自由基,此自由基随即异构化为一个叔自由基,该叔自由基比脂肪酸碳中心自由基更稳定,从而阻断了脂肪酸链的氧化反应<sup>[3]</sup>。植物甾醇的抗氧化性与其防治心血管疾病和抗癌等的效果均密切相关。

### 3.3 类激素功能

由于植物甾醇在化学结构上类似于胆固醇,在体内能表现出一定的激素活性,并且无激素的副作用。Ling等(1995)给大鼠皮下注射高剂量(0.5~5mg/kg·d)的 $\beta$ -谷甾醇,发现其在体内转化为类雌激



素物质<sup>[26]</sup>。Malini等(1992)比较了 $\beta$ -谷甾醇、17- $\beta$ -雌二醇和黄体酮对卵巢切除后成年大鼠子宫某些生化指标的影响,发现 $\beta$ -谷甾醇、雌激素或两者联用可引起子宫细胞内糖原浓度显著增加,葡萄糖-6-磷酸脱氢酶、磷酸己糖异构酶及总乳酸脱氢酶的活性也显著增加,但黄体酮与 $\beta$ -谷甾醇联用可部分消除 $\beta$ -谷甾醇诱导的子宫糖原浓度和葡萄糖-6-磷酸脱氢酶活性增加的效应,这些证明了 $\beta$ -谷甾醇对子宫内物质代谢有类似于雌激素的作用<sup>[27]</sup>。MacLatchy等(1995)观察了 $\beta$ -谷甾醇对金鱼激素分泌的影响,给孵出4d的金鱼腹膜内注射 $\beta$ -谷甾醇后,发现雄性金鱼的睾丸激素和11-睾丸酮含量显著降低,雌性金鱼的睾丸激素和17- $\beta$ -雌二醇水平也显著降低<sup>[28]</sup>。体外实验还发现,注射过 $\beta$ -谷甾醇的金鱼睾丸对绒毛膜促性腺激素的敏感性下降。这些结果提示 $\beta$ -谷甾醇可能通过影响胆甾醇的生物利用率或一些酶来降低性腺组织合成类固醇激素的能力。

### 3.4 抗癌作用

研究证明,植物甾醇对机体某些癌症的发生和发展有一定抑制作用,如乳腺癌、胃癌、肠癌等。Awad等(2000)用含2%植物甾醇或胆固醇的饲料饲养SCID小鼠15d后,在小鼠靠近右侧腹股沟的乳腺脂肪垫处接种肿瘤,8周后,两组动物体重和耗料量无差别,但植物甾醇组小鼠的肿瘤直径仅为胆固醇组的67%( $P < 0.01$ ),癌症的淋巴转移和肺转移也比胆固醇组少20%,因此推测植物甾醇可延缓乳腺肿瘤的生长和扩散<sup>[29]</sup>;在另一项研究中,研究者用体外培育的方法,把人类MDA-

MB-231乳腺癌细胞与16mmol/L的 $\beta$ -谷甾醇温育3d和5d后,发现与胆固醇对照培养液相比,癌细胞的生长分别被抑制66%和80%,并且在这一浓度下,植物甾醇和胆固醇均无细胞毒性(以细胞乳酸脱氢酶的释放为指标)<sup>[30]</sup>。Mellanen等(1996)根据一些体内外实验的结果,认为植物甾醇的抗乳腺癌作用可能与其具有某些雌激素活性有关<sup>[31]</sup>。摄入植物甾醇后的一个间接作用即降低胆汁分泌,可能是其抑制结肠癌发生的作用机理<sup>[32]</sup>。DeStefani等(2000)所做的病例对照研究证明,摄入较多的植物甾醇可降低胃癌发生的危险性。亦有报道显示谷甾醇可能对前列腺癌有益<sup>[33]</sup>。

### 3.5 免疫调节

Bouic等(1996)所做的人体实验证明,给马拉松长跑运动员服用 $\beta$ -谷甾醇及其糖苷混合物后,受试组( $n=9$ )血清中白细胞总数明显低于空白对照组( $n=10$ ),淋巴细胞分类方面,受试者CD3和CD4细胞上升,血清白介素-6(IL-6)水平降低,说明这些受试者在经过马拉松长跑之后,免疫抑制较轻,感染的机会较小<sup>[34]</sup>;Bouic等(1999)另一项研究也表明,谷甾醇及其糖苷(100:1)具有刺激人体外周血液中淋巴细胞增殖的功能<sup>[35]</sup>。人体摄食60mg/d谷甾醇及其糖苷4周后,T细胞水平比体外实验更高。由此认为植物甾醇可作为一种免疫调节因子。

### 3.6 抗炎作用

植物甾醇的抗炎作用也是较早被发现的功能之一<sup>[2]</sup>。研究证明 $\beta$ -谷甾醇有类似于氢化可的松和强的松等的较强的抗炎作用,豆甾醇也有一定的消炎功能,但均无可的松类的副

作用,因而可作为辅助抗炎药物而长期使用。还有类似于阿司匹林类的退热镇痛作用,这些在临床上都已引起广泛关注。

### 3.7 调节生长

韩军花(2001)综述中认为植物甾醇对大鼠生长有调节作用,可以调节应激条件下动物的生长,并用此来解释植物甾醇的许多其它功能<sup>[2]</sup>。周宝兰(1992)报道,植物甾醇(主要是谷甾醇)、植物生长激素与能在水中形成分子膜的脂质结合,制成的植物甾醇核糖核蛋白复合体,具有促进动物蛋白质合成的功能,有利于动物的健康生长,而且其不受温度的影响,不受酶的分解,是一种新型的动物促生长剂<sup>[36]</sup>。

## 4 植物甾醇在动物生产中的应用

### 4.1 植物甾醇的吸收代谢

4.1.1 植物甾醇的吸收 动物机体不能内源合成植物甾醇,只能通过食物摄入并经肠道吸收合成。进入肠道乳糜微粒是植物甾醇到达吸收位点被吸收的先决条件。并且将植物甾醇从乳糜微粒转运至肠细胞中的转运体(ABCG5、ABCG8、ABCA1和NCPIL1)也与转运胆固醇的相同<sup>[37]</sup>。在细胞中,植物甾醇与CM结合并随之分泌进入循环之前也必须被ACAT酯化<sup>[38]</sup>。有研究表明,动物对植物甾醇的吸收率极低,与胆固醇超过40%的吸收率相比,人和其他哺乳动物对植物甾醇的吸收率很低(0.4%~3.5%),植物甾醇的吸收更低(0.02%~0.3%)<sup>[39]</sup>。而且植物甾醇酯的吸收会降低植物甾醇的吸收,反之亦然<sup>[40]</sup>。可能是因为植物甾醇对ACAT的低亲和力

导致其酯化率低<sup>[41]</sup>，随之表现为在循环系统中的低浓度。

不同种类的植物甾醇和甾烷醇在肠道中的吸收率不同，大量人体和动物实验的结果表明，菜油甾醇比 $\beta$ -谷甾醇更容易吸收，而豆甾醇的吸收比前二者差，谷甾醇几乎不吸收<sup>[4]</sup>。相关研究证据表明各种植物甾醇和甾烷醇在肠道中吸收率的不同主要受以下几方面因素影响：①是否容易被酯化，酯化是被肠道吸收的基础，植物甾醇要溶于乳糜微粒中才能被有效吸收<sup>[42]</sup>；②化学结构，侧链长度的变化和5- $\alpha$ 位双键被饱和与否可影响其从肠绒毛膜细胞和刷状缘细胞的吸收<sup>[43]</sup>；③性别因素，雌性动物比雄性动物的吸收更好<sup>[44]</sup>；④其他因素，例如 ABCG5 和 ABCG8 基因的变异和多态性也可能改变肠道对植物甾醇和甾醇酯的吸收，因 ABCG5 和 ABCG8 基因变异引起的罕见的遗传性谷甾醇血症患者体组织中植物甾醇和胆固醇大量累积<sup>[45,46]</sup>，表现为血浆胆固醇和植物甾醇水平增高，产生腱和结节性黄瘤以及过早的动脉硬化和冠心病。

4.1.2 植物甾醇的分布和转化 同胆固醇类似，吸收后的植物甾醇与脂蛋白一起在血液中运输，然后选择性地分布到身体各部位。在大鼠中，高密度脂蛋白是主要的运输载体<sup>[47]</sup>，而人的主要运输载体是低密度脂蛋白<sup>[48,49]</sup>。有报道表明卵磷脂胆固醇酰基转移酶 (LCAT) 能催化植物甾醇的酯化，与胆固醇相比，菜油甾醇、谷甾醇和豆甾醇的酯化率分别为 89%、79% 和 34%<sup>[50]</sup>。未被吸收或体内代谢后的植物甾醇则可经肠道菌群转化，形成一系列代谢产物如类甾醇和类甾酮等排出体外。检

测经植物甾醇处理的 Apo-E 敲除小鼠粪便，也能证明肠道微生物的生物转化过程<sup>[51]</sup>。健康成年人在正常膳食条件下，血清中植物甾醇的含量为  $7\mu\text{mol/L} \sim 24\mu\text{mol/L}$ ，还不到血清总甾醇浓度的 1%，但在摄入量增多的情况下，如摄入强化植物甾醇的人造奶油，血清中的含量可增加一倍<sup>[26]</sup>。在动物试验中，一般肝脏、肾上腺、卵巢、睾丸等脏器中植物甾醇含量很高<sup>[52]</sup>。这些发现暗示植物甾醇和合成甾类的组织有高度亲和性，植物甾醇可能被用作甾类激素的前体。已有研究报道，人或大鼠的内分泌组织可以利用植物甾醇合成氢化可的松和性激素<sup>[53,54]</sup>，还有研究证明，昆虫和对虾可将体内的植物甾醇转化为胆甾醇，并进一步用来合成固醇类激素<sup>[2]</sup>。

#### 4.2 植物甾醇在动物生产中的应用研究

植物甾醇具有增进动物蛋白质合成、促进动物生长和健康的功能。有关植物甾醇调节生长功能的研究报道不多。周宝兰认为，植物甾醇（主要是谷甾醇）、植物生长激素与能在水中形成分子膜的脂质结合，制成的植物甾醇核糖核蛋白，具有促进动物蛋白质合成的功能，是一种新型的动物促生长剂<sup>[5]</sup>。对植物甾醇的安全性进行了大量的研究，尚未见对人体和其他动物有毒副作用的报道。动物经口服植物甾醇 90d 亚急性毒性实验中，饲料中 8.1% 的植物甾醇可作为无可见副作用水平<sup>[6]</sup>。美国 FDA (2000) 已经批准，添加了植物甾醇或甾烷醇酯的食品可以使用“有益健康”的标签<sup>[7]</sup>。2007 年植物甾醇获我国农业部颁发的饲料添加剂新产品证书。

20 世纪 60 年代，日本发现植

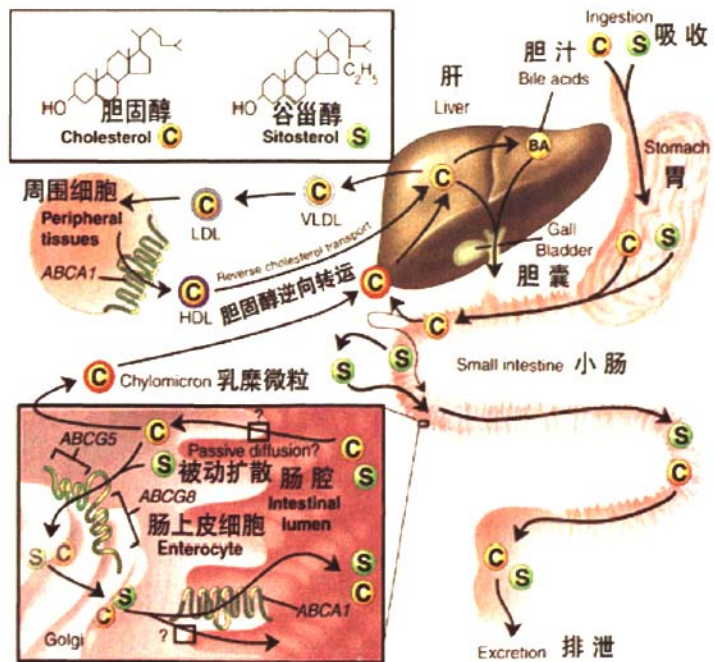


图3 胆固醇和植物甾醇体内代谢示意图

Figure 3 Metabolism of cholesterol and phytosterols in the body

注：来源于 Allayec, 2000<sup>[41]</sup>

物甾醇对家蚕有显著的促进咀嚼和吞咽作用,并兼有一定的摄食作用后,开始将甾醇添加于正在开发的人工养蚕饲料中获得成功。贾代汉等(2005)在日粮中分别添加0mg/kg、5mg/kg、10mg/kg、20mg/kg、40mg/kg和80mg/kg植物甾醇,研究其对肉仔鸡生产性能的影响。结果表明,20mg/kg、40mg/kg植物甾醇添加组能提高前期(0~21d)日增重,其中40mg/kg组达显著水平( $P<0.05$ )。5mg/kg、10mg/kg、40mg/kg和80mg/kg组均可表现提高后期(22~42d)和全期(0~42d)日增重( $P>0.05$ )。20mg/kg、40mg/kg组能提高前期平均重,其中40mg/kg组达极显著水平( $P<0.01$ );5mg/kg、10mg/kg、40mg/kg和80mg/kg添加组均能提高后期平均重( $P>0.05$ )。40mg/kg植物甾醇添加组有提高前期、后期及全期饲料转化效率的趋势( $P>0.05$ )。各组间死亡率差异均不显著( $P>0.05$ )。从增重和饲料转化效率来看,肉仔鸡饲料中添加40mg/kg的植物甾醇效果最好<sup>[53]</sup>。贾代汉等(2005)在日粮中分别添加0mg/kg、15mg/kg和30mg/kg的植物甾醇,研究植物甾醇对生长猪生产性能的影响发现,与对照组相比较,添加15mg/kg和30mg/kg植物甾醇使平均日增重分别提高12.16%和7.14%,饲料转化率分别提高2.56%和7.10%。经济效益分析表明,15mg/kg和30mg/kg试验组的利润分别比对照组提高24.38%和25.97%。植物甾醇在15mg/kg和30mg/kg的添加范围内均可有效改善生长猪的生产性能<sup>[56]</sup>。

贾代汉等(2007)研究植物

甾醇对肉仔鸡生产性能、血液胆固醇、蛋白质水平和抗氧化酶活性的影响。试验日粮中分别添加0mg/kg、5mg/kg、10mg/kg、20mg/kg、40mg/kg和80mg/kg的植物甾醇,测定肉仔鸡生产性能及血液生化指标。结果表明,与对照组相比,植物甾醇在提高肉仔鸡的生产性能的同时,添加20mg/kg植物甾醇组肉仔鸡血清总胆固醇(TC)水平显著降低( $P<0.05$ ),血清低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)水平极显著降低( $P<0.01$ ),10mg/kg、40mg/kg和80mg/kg组的LDL-C水平均有显著降低( $P<0.05$ )。40mg/kg组的血清白蛋白水平显著提高( $P<0.05$ )。80mg/kg组肉鸡前期和后期的血清总超氧化物歧化酶(T-SOD)活性都有显著提高( $P<0.05$ )。研究认为,植物甾醇能显著降低肉鸡血液中胆固醇含量<sup>[57]</sup>。

顾尧婷等(2007)选用15日龄健康商品代樱桃谷肉鸭2400只,随机分成6组,每组4个重复,试验日粮中分别添加植物甾醇0mg/kg、10mg/kg、20mg/kg、40mg/kg、80mg/kg、160mg/kg,研究植物甾醇对肉鸭生产性能和血液中胆固醇含量的影响。结果表明,与对照组相比,添加植物甾醇试验组肉鸭的平均日增重、料重比和平均体重差异不显著( $P>0.05$ )。但添加植物甾醇均降低了肉鸭血浆中总胆固醇(TC)和低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)的含量,且添加量20mg/kg的组差异显著( $P<0.05$ )。此外,各试验组肉鸭的肌间脂肪含量均有提高,其中10mg/kg的组与对照组相比有显著性差异( $P<0.05$ ),结果显示,植物甾醇可能具有重新分配动物体内脂肪的效果<sup>[58]</sup>。

顾尧婷等(2008)将2000只15日龄的商品代樱桃谷肉鸭随机分成5组,每组4个重复,每个重复100只肉鸭,分别饲喂添加0mg/kg、10mg/kg、20mg/kg、40mg/kg、80mg/kg植物甾醇日粮。42日龄试验结束时,每组随机抽取公、母鸭各5只屠宰,测定各项指标。结果表明,植物甾醇对生产性能无显著影响( $P>0.05$ )。植物甾醇降低了肉鸭血清中总胆固醇(TC)和低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)的含量,当添加量为40mg/kg时差异显著( $P<0.05$ )。日粮中添加10mg/kg、20mg/kg和40mg/kg植物甾醇后,肉鸭肝脏胆固醇合成速度明显加快。添加80mg/kg植物甾醇的试验组肉鸭,血浆中总超氧化物歧化酶(T-SOD)活性显著( $P<0.05$ )升高,添加10mg/kg或40mg/kg植物甾醇组,肉鸭肝脏中T-SOD活性显著升高( $P<0.05$ )。结果显示,植物甾醇可能通过抑制低密度脂蛋白的生成来降低血脂,同时影响肝脏内源性胆固醇的合成,并且可能通过提高机体抗氧化酶活性达到抗氧化效果<sup>[59]</sup>。

近年来,也有关于植物甾醇对鱼类、虾、大鼠的生长和体内胆固醇沉积影响的报道<sup>[60~62]</sup>。植物甾醇可作为肝功能改善剂,改善受损害的肝功能状况,同时还可作为肝功能障碍的预防剂,且具有毒性低的特点。植物甾醇可作为饲料添加剂,能促进动物生长,增进健康,提高产量,对于降低成本、提高养殖经济效益有积极作用。作为一种新型功能性添加剂,植物甾醇在饲料工业中具有广阔的应用前景,其应用研究还需做大量而深入的研究。

(参考文献62篇,需者可函索) 