

## “全谷物食品的营养与健康” 特约专栏文章之三

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2022.02.003

周素梅, 李若凝, 唐健, 等. 绿豆营养功能特性及其在植物基食品开发中的应用[J]. 粮油食品科技, 2022, 30(2): 16-23.

ZHOU S M, LI R N, TANG J, et al. Nutritional components and health functions of mung bean and its application in the development of plant-based food[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2022, 30(2): 16-23.

# 绿豆营养功能特性及其在植物基食品开发中的应用

周素梅, 李若凝, 唐健, 侯殿志, 芦晶

(北京工商大学 食品与健康学院, 北京 100048)

**摘要:** 绿豆是我国特色杂粮杂豆作物和传统的药食同源食材, 全球重要的干籽粒豆类作物。绿豆高蛋白、高淀粉以及富含多酚、黄酮、非淀粉多糖等营养特性使其成为粮食作物领域重要的健康食品和功能活性研究对象。对近年来国内外在绿豆的营养组成、功能因子(多酚、多糖、功能性蛋白或肽)以及抗氧化、降脂、降糖等健康功效方面的研究进展进行了回顾。同时, 对绿豆在新型植物基食品中的研究和产业化应用作一介绍, 旨在为现代营养和食品科学理论框架下的绿豆研究及其在未来食品中的应用提供借鉴。

**关键词:** 绿豆; 营养组成; 功能因子; 健康功效; 植物基食品; 应用

中图分类号: S522 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2022)02-0016-08

网络首发时间: 2022-02-18 09:26:43

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3863.TS.20220217.1812.006.html>

## Nutritional Components and Health Functions of Mung Bean and its Application in the Development of Plant-based Food

ZHOU Su-mei, LI Ruo-ning, TANG Jian, HOU Dian-zhi, LU Jing

(School of food and health, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

**Abstract:** Mung bean is a characteristic minor grain crop and a traditional medicine and food homologous material in China, and an important dry pulse in the world. Mung bean is high in protein and starch and rich in non-starch polysaccharides, polyphenols, flavonoids and other nutritional components, making it a popular research object of healthy food and functional activity among grain crops. This paper reviewed the research progress of nutritional components, functional ingredients (polyphenols, polysaccharides, functional proteins or peptides) and health functions such as antioxidant, lipid-lowering and hypoglycemic activities of mung bean at home and abroad in recent years. Meanwhile, the research and industrial application of mung bean in new plant-based food were introduced, aiming to provide reference for mung bean research and application in the future under the theoretical framework of modern nutrition and food science.

收稿日期: 2021-12-26

基金项目: 财政部和农业农村部-国家现代农业产业技术体系-食用豆(CARS-08)

Supported by: China Agriculture Research System of MOF and MARA-Food Legumes (No.CARS-08)

作者简介: 周素梅, 女, 1971年出生, 博士, 教授, 研究方向为新型谷物营养健康食品研发。E-mail: zhousumei1001@163.com.

**Key words:** mung bean; nutritional components; functional ingredients; health functions; plant-based foods; application

绿豆 (*Vigna radiata* (Linn.) Wilczek) 是豆科蝶形花亚科、菜豆族豇豆属品种, 是全球干籽粒食用豆 (pulses & beans) 家族的重要成员<sup>[1]</sup>。绿豆原产于中国, 在我国已有 2000 多年栽培历史, 南北朝时代的农书《齐民要术》(公元 535—557) 中即有绿豆栽培经验的记载。绿豆富含淀粉 (~50%), 其在饮食结构中的作用与谷物类作物相当, 因此常被列入粮食作物行列。但其营养和功能远非一般粮食作物可比, 在我国传统医学典籍中, 绿豆被认可具有“清热解暑、利尿消肿、润喉止渴、明目降压”等功效。在中国百姓的认知中, 绿豆就是炎热夏季的“消暑神器”。而且绿豆皮和绿豆仁的功效也有所区分, 绿豆皮的清热功效比绿豆仁强, 绿豆仁更为突出的则是消肿功效<sup>[2]</sup>。我国古人虽然从实证经验中总结出不少绿豆的营养功效, 但受科学研究和分析手段的局限, 并未能揭示其中的缘由或机理。

近年来, 国内外不少研究者利用现代食品科学、营养学及医学研究的手段, 有关绿豆中营养物质、功能因子以及生理活性的研究得以揭示, 其中以牡荆素和异牡荆素为代表的多酚类黄酮化合物被认为是绿豆活性表现的主要功能因子<sup>[3-4]</sup>。绿豆在抗氧化、预防心血管疾病、辅助降血糖及抗癌等方面的功效也被越来越多的研究者关注并揭示<sup>[5]</sup>。

此外, 作为一种富含蛋白质 (22%~26%) 的食材, 绿豆可弥补一般粮食作物蛋白质不足的营养缺陷。尤其是在近几年兴起的植物基食品风潮中, 来自食用豆的蛋白质可较好地替代动物源蛋白, 以满足人类因环保、低碳、动物福利等要求而发起的食物结构转型革命<sup>[6]</sup>, 绿豆或绿豆蛋白原料在植物基肉蛋奶制品的发展潜力已初现端倪<sup>[7]</sup>。

本文将结合近年来国内外在绿豆营养功能性研究方面的研究进展、绿豆在植物基食品中的应用动态, 对绿豆这一发源中国的古代作物进入 2020s 前后的科学研究和产业发展状况做一梳理和总结, 以期进一步发掘绿豆的营养和利用价值, 为新型绿豆产品及未来植物基产发展提供参考和

借鉴。

## 1 绿豆的营养特性

具有高淀粉、高蛋白组成特点的食用豆作物是人类饮食中重要的能量和蛋白质来源, 绿豆的营养功能亦主要体现于此。此外, 与现代人营养需求相吻合的是, 绿豆还具有高纤维、低脂肪的特点, 绿豆皮中含有丰富的植物化学物质 (总多酚、总黄酮、牡荆素和异牡荆、非淀粉多糖)、维生素、矿物质等, 这些共同构成了绿豆的营养组成 (如表 1 所示)<sup>[8]</sup>。

表 1 绿豆基本营养组成表<sup>[8]</sup>  
Table 1 Nutritional composition of mung bean

100 g					
指标	数值	指标	数值	指标	数值
热量/kcal	316	钙/mg	81	钠/mg	3.2
脂肪/g	0.8	镁/mg	125	硒/ $\mu$ g	4.2
蛋白质/g	21.6	铁/mg	6.5	维生素 E/mg	10.9
碳水化合物/g	55.6	锰/mg	1.1	维生素 A/ $\mu$ g	22.0
膳食纤维/g	6.4	锌/mg	2.1	胡萝卜素/ $\mu$ g	3.3
烟酸/mg	2.0	铜/mg	1.0	视黄醇当量/ $\mu$ g	12.3
硫胺素/mg	0.3	钾/mg	787		
核黄素/mg	0.1	磷/mg	337		

### 1.1 绿豆的基本营养组成

绿豆籽粒中的蛋白质含量一般在 20% 以上 (21%~27%), 该指标与绿豆品种、产地及生产均有一定关系<sup>[9]</sup>。由表 1 提供数据显示, 该绿豆原料的蛋白质含量 21.6%, 在国内绿豆原料中属于蛋白质含量偏低的品种, 但已是大米 (~7%) 的 3.1 倍、小米 (~9%) 的 2.4 倍、小麦面粉 (~11%) 的 2.0 倍、玉米面粉 (~8%) 的 2.7 倍, 超出谷物类食材 2~3 倍。绿豆的蛋白质组分构成中以清蛋白为主 (49.1%), 其它的依次为球蛋白 (23.6%)、谷蛋白 (19.42%)、醇溶蛋白 (7.5%)<sup>[10]</sup>。球蛋白的溶解性通常较好, 这也是绿豆在植物基代乳产品开发中的潜力所在。另绿豆蛋白中含有人体必需的 8 种氨基酸, 但其含硫氨基酸 (蛋氨酸+半胱氨酸) 偏低, 为第一限制性氨基酸; 赖氨酸则相对丰富, 超过 FAO 推荐标准 20% 左右, 与谷

物蛋白的必需氨基酸组成可以形成互补<sup>[9]</sup>。

绿豆籽粒中的总碳水化合物含量在 55%~60%，其中有 10%左右的是小分子的可溶性糖，包括果糖、葡萄糖、蔗糖、蜜二糖、棉籽糖、水苏糖及毛蕊花糖，其中含量最多的是毛蕊花糖（37.50%）、蔗糖（25.42%）、水苏糖（20.37%）<sup>[11]</sup>。绿豆中淀粉是其主要的贮存多糖和能量物质，平均含量在 50%左右，略低于大米、小麦等谷物原料（65%~70%）。绿豆淀粉具有高直链淀粉含量的特点，直链淀粉含量在 30%左右，不同品种间亦存在较大差距（24%~34%）<sup>[12]</sup>。加上绿豆中较高的蛋白阻碍作用，绿豆中的淀粉较谷物淀粉更不易被消化，也因此导致了较高的抗性淀粉含量，包括绿豆在内的食用豆通常具有低血糖生成指数（GI）食品的营养特点。

绿豆中膳食纤维含量为 6.4%（如表 1 所示），且主要来源于绿豆皮（65.8%）。绿豆皮里的膳食纤维（DF）包括可溶（SDF）、不可溶（IDF）两类，其中 IDF 的含量达 61.7%，SDF 只有 3.7%。在绿豆皮膳食纤维的组成中，纤维素和木质素含量分别为 31.76%，14.13%，而水溶和水不溶性的非淀粉、非纤维素多糖含量相当，分别为 8.83%和 8.82%。而脱皮后的绿豆籽仁中膳食纤维含量较低（10.75%），其中 SDF 占 1.34%，IDF 占 8.67%<sup>[13]</sup>。

绿豆中的脂肪含量虽然非常低（0.8%），但其脂溶性维生素，如维生素 E（10.9 mg/100 g）、维生素 A（22.0 μg/100 g）的含量并不低，相比稻米、小麦等谷物原料高出数十倍。另外，由表 1 可见，绿豆中钾元素含量相当高（787 mg/100 g），分别为稻米（103 mg/100 g）和小麦面粉（190 mg/100 g）的 7 倍与 4 倍<sup>[8]</sup>，这可能是绿豆“消肿利尿、降压”功效的营养亮点之一。

## 1.2 绿豆中的功能因子

### 1.2.1 多酚类物质

多酚类化合物是指分子结构中含有多个酚性羟基的化合物总称，包括黄酮类、单宁类、酚酸类以及花色苷类等多种植物化合物。绿豆中的多酚类化合物主要有酚酸、黄酮类化合物，还有少量的单宁类物质<sup>[14]</sup>。绿豆中的代表性黄酮类化合物是牡荆素（Vitexin）和异牡荆素（Isovitexin），分别占到绿豆总黄酮含量的 51.99%和 45.42%，

且这两种绿豆黄酮 95%以上来自绿豆种皮<sup>[15]</sup>。另从定量分析结果看，种皮中的牡荆素和异牡荆素含量分别达到 37.43 mg/g 和 47.18 mg/g<sup>[5]</sup>，此亦为我国传统消暑佳品绿豆汤中的主要功能成分<sup>[3]</sup>。

罗磊等<sup>[16]</sup>采用微波辅助提取绿豆皮中的黄酮类物质，并对其进行抗氧化活性研究，发现绿豆皮中的黄酮类物质有较强的自由基清除能力和还原能力，且经过大孔吸附树脂（NKY-9）纯化后的黄酮类物质的抗氧化能力得到进一步提高。刘晓娜<sup>[17]</sup>等对小鼠急性酒精性肝损伤模型的研究发现，绿豆黄酮能够降低模型小鼠血清中天门冬氨酸氨基转移酶（AST）、谷丙转氨酶（ALT）含量，增强肝组织超氧化物歧化酶（SOD）活力，降低肝组织丙二醛（MDA）水平，并缓解肝细胞空泡变性及坏死现象，绿豆黄酮表现出了较好的保肝、护肝功能。Yang 等研究发现，富含牡荆素和异牡荆素的绿豆提取物对参与黑色素合成的酪氨酸酶有很强的抑制活性，此为绿豆黄酮提取物的美白功能找到了佐证<sup>[18]</sup>。

绿豆中的酚酸主要包括原儿茶酸、没食子酸、阿魏酸、绿原酸及黄酮类物质<sup>[15]</sup>。Valmor Ziegler<sup>[19]</sup>通过研究贮藏和加工条件对绿豆酚类化合物含量的影响，得出如下结论，绿豆的蒸煮时间与其酚类化合物总含量成反比，蒸煮时间越长，酚类含量越少，由此说明绿豆中的酚酸类化合物热稳定性相对较差。酚酸和黄酮类化合物均属于绿豆生长发育中的次级代谢产物，发芽和发酵处理则可显著提高绿豆中多酚类化合物的含量<sup>[5]</sup>。有研究表明，发芽后绿豆芽中的酚酸和黄酮（牡荆素和异牡荆素）含量可提高 4.5 和 6.8 倍<sup>[20]</sup>。

### 1.2.2 多糖

随着营养学的深入发展以及人们对饮食健康与预防未病的需求，绿豆多糖作为活性多糖的一种也受到本领域研究者的广泛关注。绿豆多糖在抗氧化、辅助降血脂与胆固醇，预防心血管疾病、降低血糖，调节肠道微生态，免疫调节、预防肿瘤等方面也有一定的功能表现。绿豆中功能活性表现较为突出的是水溶性多糖，其含量约为 8.45%<sup>[21]</sup>。绿豆皮中的多糖含量要高于籽仁。水热法提取绿豆皮和绿豆籽仁多糖，二者得率分别达到 6.22%、4.61%<sup>[22]</sup>。近年来，有关绿豆多糖提

取、结构及生物学活性研究的报道较多(如表 2 所示),所提取的多糖多为组成和结构较为复杂的杂多糖<sup>[23]</sup>。在单糖组成中,有果糖(Fuc)、阿拉伯糖(Ara)、木糖(Xyl)、甘露糖(Man)、半乳糖(Gal)、葡萄糖(Glc)、鼠李糖(Rha)等,绿豆多糖通常至少有其中 3 种以上的单糖构成(表 2),其中含量较多的有 Ara、Gal、Man。多糖的分子量也与不同组织来源、提取方法等有关,从 10 kDa 到 1 800 kDa 不等,不过多集中在 50~

100 kDa(如表 2 所示)。

另外, Lian Jiang<sup>[21]</sup>等还采用纤维素酶辅助提取法和热水提取法从绿豆皮中提取纯化出 2 种水溶性多糖—MBP-1 和 MBP-2,二者均表现出较强的抗氧化活性及针对病原微生物的抗菌活性,且后者比前者具有更稳定的结构。Ketha<sup>[24-25]</sup>等从绿豆半纤维素中进一步分离出酸性的阿拉伯半乳糖聚糖(AGP-2),并证实了该多糖显著的免疫调节活性。

表 2 绿豆中的多糖及其功能活性<sup>[5]</sup>

Table 2 Polysaccharides and their functional activities in mung bean

绿豆多糖	分子量/kDa	单糖组成/%, 摩尔比	功能活性	参考文献
绿豆多糖 1	83	Fuc : Ara : Xyl : Man : Gal : Glu=8.3 : 2.2 : 67.2 : 20.1 : 2.3	抗氧化活性	[26]
绿豆多糖 2	45	Rha : Fuc : Ara : Xyl : Man : Gal : Glu=31.8 : 3.5 : 16.7 : 4.6 : 11.7 : 29.1 : 2.5	抗氧化活性	[26]
MWP-10	68.4	Rha : Ara : Man : Gal=0.4 : 2.6 : 5.3 : 0.7	免疫调节活性	[27]
MWP-20	52.4	Ara : Man : Gal : Glc=0.5 : 1.4 : 2.1 : 0.4	免疫调节活性	[27]
HWSP	15~150	Rha : Ara : Xyl : Man : Gal : Glu=2.5 : 34 : 5 : 8 : 33.5 : 17	抗氧化活性	[28]
果胶	40~1 200	Rha : Ara : Xyl : Gal : Glu=2.6 : 46 : 8 : 26.4 : 17	免疫调节活性	[28]
半纤维素 A	15~350	Ara : Xyl : Man : Gal : Glc=8.5 : 23 : 2 : 9 : 57.5	免疫调节活性	[28]
半纤维素 B	100~1 800	Rha : Ara : Xyl : Gal : Glu=2.5 : 43 : 7 : 28 : 19.5	免疫调节活性	[28]
阿拉伯半乳糖	1 200	Rha : Ara : Xyl : Gal : Glu=5 : 60 : 2 : 32 : 1	巨噬细胞活化	[29]

### 1.2.3 多肽/氨基酸

绿豆蛋白除了可直接作为膳食蛋白提供营养外,还具有一定的生物活性,这主要得益于绿豆在体内或体外水解获得的多肽可提供特殊的生物学活性,如血管紧张素 I 转换酶(ACE)抑制剂、抗氧化剂和抗癌的亚油酸载体等<sup>[10]</sup>。有研究者从绿豆分离蛋白的碱性蛋白酶水解液中,分离出三种新型的、高 ACE 抑制活性肽,分别是 5、6、8 肽,氨基酸序列为:Lys-Asp-Tyr-Arg-Leu、Val-Thr-Pro-Ala-Leu-Arg 及 Lys-Leu-Pro-Ala-Gly-Thr-Leu-Phe<sup>[30]</sup>。进一步证实了 ACE 活性肽的结构特征,即 C 末端含有疏水氨基酸残基,尤其是芳香族氨基酸的肽,似乎是 ACE 首选的底物或竞争性抑制剂。也有研究表明,绿豆多肽具有较高的抗氧化活性,跟绿豆蛋白相比有明显优势<sup>[31]</sup>。且绿豆多肽分子量介于蛋白质和氨基酸中间,其在肠道更易被消化吸收。

$\gamma$ -氨基丁酸(GABA)是动物和人类体内常见的一种抑制性神经递质,有降血压、安眠、增强

记忆、防治焦虑,抵抗糖尿病、治疗神经官能症等多种功能<sup>[32-33]</sup>。有研究表明<sup>[5]</sup>,发芽、发酵处理可促进绿豆中 GABA 的生成。有研究对比了发酵前后绿豆中  $\gamma$ -氨基丁酸含量的变化,从未发酵时的 16 mg/100 g 升至 122 mg/100 g,增加了 7.6 倍。马玉玲等还对绿豆通过发芽富集 GABA 的技术途径和影响因素进行了较全面的回顾,绿豆是具有发芽优势的作物,在发芽这种生物体代谢过程中,随着酶系被激活,蛋白质进行代谢转化,GABA 是 L-谷氨酸转化降解的中间产物,并受到此过程涉及的绿豆品种、环境温度、湿度、氧浓度、微生物以及外来添加物等的控制和积累<sup>[34]</sup>。

## 2 绿豆健康功效

### 2.1 抗氧化活性

不少研究显示,绿豆蛋白、多肽、多糖均可表现出一定的抗氧化活性,但绿豆中主要发挥抗氧化活性的仍是多酚类物质。多酚有很强的清除活性氧和氧自由基的能力,可保护生物大分子,

避免自由基对其损伤。还可以与金属离子螯合,抑制金属离子对氧化反应的催化<sup>[5]</sup>。有研究表明<sup>[35]</sup>,绿豆的发芽过程会影响多酚组成及其抗氧化活性。通过提取绿豆发芽过程中的多酚化合物并测定其含量和抗氧化活性,在芽长 4~5 cm 时的绿豆芽多酚的 DPPH、羟自由基的清除及总抗氧化能力可达到最高值。绿豆皮来源的黄酮除了清除氧自由基能力,还发现其能够显著提高机体抗氧化酶的活性以及保护受损细胞的功效。通常功能因子的抗氧化活性与抗炎活性是密切相关的。Montana、Ali 等<sup>[36-37]</sup>的研究发现,绿豆发芽、发酵后的提取物均对急性炎症有较好的治疗效果,此亦归结于绿豆发芽和发酵过程中黄酮类和酚酸类的富集和转化。

## 2.2 辅助降血脂

在绿豆降脂功能的研究上,受关注比较多的组分是绿豆蛋白、绿豆多糖以及黄酮。有关绿豆蛋白的降脂研究结果显示,其降低高脂模型大鼠血清中总胆固醇(TC)、甘油三酯(TG)及低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)的作用与绿豆蛋白的摄入量呈剂量依赖性<sup>[38]</sup>。同时,研究者认为绿豆蛋白降脂作用的发挥在于它能够促进粪便中胆汁酸和甾醇的排出,由此减少了体内胆固醇的吸收和合成。绿豆多糖则被发现可增强血清中脂蛋白的酯酶活性,进而通过促进脂蛋白中甘油三酯的分解发挥降脂作用。此外,绿豆来源的牡荆素、异牡荆素以及乙醇提取物在体外和动物试验中也表现出显著的降低脂肪积累的作用,其中的机理可能与上述物质能够下调产脂基因的表达,如乙酰辅酶 A 羧化酶(脂肪合成限速酶)、可促进脂肪细胞分化和脂肪酸储存的过氧化物酶体增殖物活化受体等有关<sup>[39]</sup>。

对于绿豆原料和食品的研究发现,经发芽或发酵加工处理后,绿豆的降脂活性会进一步增强。有研究发现,经发酵后绿豆中的 GABA 含量显著增加,GABA 也是一种潜在的降血脂功能因子<sup>[17]</sup>。YEAP 等<sup>[40]</sup>对比了血脂康、发酵绿豆和未发酵绿豆对小鼠血脂水平的影响,结果表明,在较高剂量水平下发酵绿豆的降血脂能力明显高于未发酵绿豆,而且保肝能力优于血脂康,发酵绿豆作为降血脂和保肝、护肝替代保健食物的潜力被发掘。

## 2.3 调节血糖功能

绿豆虽然是一种富含淀粉的食用豆,但因其淀粉较难被消化,属于中或低血糖指数(GI)食品,本身对于糖尿病人就是一种友好食品<sup>[41]</sup>。此外,还有不少体外或动物试验研究显示,绿豆及其提取物还具有一定的调节葡萄糖代谢的能力。绿豆的水和乙醇提取物对淀粉水解酶,如消化系统的 $\alpha$ -淀粉酶(胰腺)、 $\alpha$ -糖苷酶(肠道)均表现出一定的抑制作用<sup>[42]</sup>。这可能有助于减少糖类的肠道吸收,降低人体的血糖水平;绿豆中的牡荆素和异牡荆素被认为是上述酶抑制活性的主要功能因子<sup>[5]</sup>。绿豆的降血糖功能会受到食品加工方式的影响。Liyanage 等评估了生绿豆、煮绿豆和发芽绿豆对大鼠葡萄糖代谢的影响,结果显示,煮绿豆具有较高的降血糖和降血脂潜力,发芽绿豆的血糖调节功能要高于未发芽绿豆<sup>[43]</sup>。因此,从提升绿豆功能性的角度,选择合适的加工方法是必要的。

## 2.4 其他功能

绿豆及其所含有的功能活性物质在调节机体免疫力、抗衰老、抗肿瘤等方面也有所表现。有研究发现,绿豆皮中富含的黄酮类化合物可通过抗氧化作用而发挥免疫调节功能<sup>[16]</sup>。绿豆中的水溶性色素能够诱导 HepG2 细胞的凋亡,延缓人体正常细胞的衰老<sup>[5]</sup>。此外,喂饲含绿豆粉的饲料,可降低小鼠肺癌和肝癌诱发肿瘤的数目和大小。对从绿豆中提取的多肽和多酚类物质的体外细胞实验结果显示,这两类物质对癌细胞均有显著的增殖抑制作用<sup>[44]</sup>。从绿豆芽中分离纯化的苯丙氨酸转氨酶则在体外试验中对小鼠 L1210 白血病细胞的表现出一定的抑制作用。此外,绿豆经萌发或发酵处理后 GABA 含量会显著升高,而 GABA 是已知的降压功能因子,由此提升了绿豆在辅助降血压方面的功效<sup>[45]</sup>。

## 3 绿豆在植物基产品中的应用

近年来,处于健康、环保、动物福利等方面的考虑,植物基替代饮食受到广泛关注<sup>[45]</sup>。与代表性的动物源食品(肉蛋奶)相比,植物基饮食除了在风味、口感及质构上的模拟,在主要营养上也要尽可能接近动物源食品,蛋白质是首要考

虑的营养元素。包括大豆、花生等在内的豆类作物因富含蛋白质，是最适宜作为植物基食品原材料的作物品种，绿豆亦在此行列中。除了高蛋白的营养特性，绿豆如上所述的营养和健康调节功能更是其作为动物源替代食品的优势所在，并弥补因摄入动物源食品过多而带来的高血脂、高血糖等慢性代谢性疾病。

目前以绿豆蛋白为原料开发的植物基产品中，最知名的是来自美国 JUST 公司的植物蛋产品（JUST egg）<sup>[7]</sup>。该产品于 2018 年研发成功，2019 年推进中国市场，据称是当下最像鸡蛋的植物蛋产品。该产品以水、绿豆蛋白、菜油籽、木薯粉、大豆磷脂、食用香精、焦磷酸钠等十余种原辅料制成的一种蛋液样产品。和所有植物基乳或肉制品一样，JUST 植物蛋的价格并不便宜，在美国一瓶 355 mL 植物蛋的建议零售价为 7.99 美元，在国内的电商平台上，一瓶产品的价格大约在 70 元人民币左右，与常规的鸡蛋相比，性价比上仍有较大提升空间。不过根据 Eat Just 提供的数据，与鸡蛋的生产过程相比，植物蛋减少了 98% 的用水量、93% 的二氧化碳排放量以及 86% 的土地用量，在节水、低碳、节约土地方面未来更具发展优势。此外，从营养组成上看（表 3），植物蛋与常规鸡蛋的能量和蛋白质接近，但饱和脂肪含量低，不含胆固醇，这点上更宜被高血脂人群接受。

表 3 含绿豆蛋白的植物蛋营养组成<sup>[7]</sup>  
 Table 3 Nutritional composition of plant based egg containing mung bean protein

	Just egg 植物蛋	常规鸡蛋
能量/kJ	640	648
总蛋白/g	12.2	12.6
总脂肪/g	9.6	10.6
饱和脂肪/g	1.0	3.3
胆固醇/mg	0	373

另在植物基代乳产品的发展上，绿豆因富含可溶性球蛋白<sup>[46]</sup>，比较适合制作植物蛋白饮品。不过目前国内外比较多的植物基代乳主要是以大豆、豌豆为原料的产品，如国内市场上新兴的豆奶类产品 and 品牌（植选植物奶、豆本豆豆奶、植朴磨坊、农夫山泉植物酸奶等）。国外同类产品中

除大豆豆奶外，比较常见的是豌豆、鹰嘴豆奶。不过，现在有关绿豆或绿豆蛋白为原料开发植物蛋白饮料、植物基酸奶的研究还比较多<sup>[47]</sup>，在绿豆蛋白乳液稳定剂、发酵酸奶的适宜菌剂的选择上，已取得一些研究经验，产品的产业化方面还需要再推进。

在植物肉的研究和产品开发方面，目前主要是以大豆、豌豆、小麦等作物中提取的植物蛋白为原料，首先仍是纯度较高的植物浓缩或分离蛋白的提取，然后再经过调质、挤压、冷却、定型、调味等一系列步骤，使其成为拉丝蛋白并具有动物肉制品的质地和口感。有关绿豆蛋白在此方面的研究和产业化应用尚且不足，更多的可能是出于原料经济性的考虑。

#### 4 展望

绿豆在我国有悠久的食用传统和营养功效的良好认知，随着现代食品科学与营养学的发展，有关绿豆的功能因子和作用机制也已得到更多认识和揭示。但受到我国食品、保健食品相关法规的限制，绿豆的营养健康功能虽然在我国民间得到广泛认知，但是与燕麦、大豆等拿到美国 FDA 官方健康宣称（health claim）的原料相比，绿豆在未病预防方面的科学和权威性还需要得到更多研究数据的支撑。此外，针对当下我国“三高”、肿瘤等慢性代谢病高发的公共健康问题，从目前绿豆营养功能的研究结果上看，大力发展绿豆基营养健康食品，尤其是包含种皮在内的全籽粒产品是非常必要的。

另外，从植物基饮食的发展态势和路径上看，除了突出高蛋白这一概念，还要兼顾其它营养物质（多糖、膳食纤维、矿物质）的需求和概念。这样也就在动物源食品的替代上，真正做到色香味形及营养的兼顾。此外，目前国内外市场上的植物基替代产品在产品质量上仍存在一些不足。比如前面提到的植物蛋，产品配方较为复杂，所用的原辅料数量超过 15 种，其中添加剂的品种就有 7 种。在美国心脏病协会（AHA）发布的《2021 年改善心血管健康的饮食指南》中，指出应该主选以植物为来源的蛋白质，例如豆类和坚果类等。其中，豆类蛋白包括大豆、以及和绿豆同属淀粉

基豆类的扁豆、鹰嘴豆、豌豆等食用豆。但是, AHA 对于市场上出现的“植物肉”产品的功效和健康性提出了部分警告, 称目前这些产品仍属于超加工和含有一些不健康成分的食品, 如糖、饱和脂肪、盐、防腐剂和稳定剂, 未必是更健康的选择。未来植物基饮食可能会更多地向少加工、少添加剂、更多天然素材的食品研发方向发展。

参考文献:

- [1] 田静, 程须珍, 范保杰, 等. 我国绿豆品种现状及发展趋势[J]. 作物杂志, 2021, 6: 15-21.  
TIAN J, CHENG X Z, FAN B J, et al. Current situation and development trend of mung bean varieties in China[J]. Crop magazine, 2021, 6: 15-21.
- [2] 邓志汇, 王娟. 绿豆皮与绿豆仁的营养成分分析及对比[J]. 现代食品科技, 2010, 26(6): 656-659.  
DENG Z H, WANG J. Analysis and comparison of nutritional components between mung bean skin and mung bean kernel[J]. Modern food technology, 2010, 26(6): 656-659.
- [3] 王明海, 徐宁, 包淑英, 等. 绿豆的营养成分及药用价值[J]. 现代农业科技, 2012(6): 341-342.  
WANG M H, XU N, BAO S Y, et al. Nutritional components and medicinal value of mung bean[J]. Modern agricultural science and technology, 2012(6): 341-342.
- [4] LUO J, CAI W, WUA T, et al. Phytochemical distribution in hull and cotyledon of adzuki bean (*Vigna angularis* L.) and mung bean (*Vigna radiata* L.), and their contribution to antioxidant, anti-inflammatory and anti-diabetic activities[J]. Food Chem., 2016, 201: 350-360.
- [5] HOU D Z, YOUSAF L, XUE Y, et al. Mung bean (*vigna radiata* L.): bioactive polyphenols, polysaccharides, peptides, and health benefits[J]. Nutrients, 2019, 11(6): 1238.
- [6] SCHIERMEIR Q. Eat less meat: UN climate-change panel tackles diets[J]. Nature, 2019, 572: 291-292.
- [7] <https://www.ju.st/eat/just-egg>
- [8] <https://yingyang.911cha.com/MTV1.html>
- [9] 曾志红, 王强, 林伟静, 等. 绿豆蛋白营养及功能特性分析[J]. 中国粮油学报, 2012, 27(6): 51-55.  
ZENG Z H, WANG Q, LIN W J, et al. Analysis of nutritional and functional characteristics of mung bean protein[J]. Chinese Journal of grain and oil, 2012, 27(6): 51-55.
- [10] 杜梦霞, 李璇, 谢建华, 等. 绿豆蛋白与多肽理化性质及其生物活性研究进展[J]. 食品工业科技, 2016, 37(21): 363-367.  
DU M X, LI X, XIE J H, et al. Research progress on physicochemical properties and bioactivity of mung bean proteins and peptides[J]. Food industry technology, 2016, 37(21): 363-367.
- [11] 苏娣. 绿豆中毛蕊花糖的分离纯化、肠道益生和免疫调节活性研究[D]. 南京农业大学硕士学位论文, 2013.  
SU D. Isolation, purification, intestinal prebiotic and immunomodulatory activity of Mullein from mung bean[D]. Master's thesis of Nanjing Agricultural University, 2013.
- [12] 林伟静, 曾志红, 钟葵, 等. 不同品种绿豆的淀粉品质特性研究[J]. 中国粮油学报, 2012, 27(7): 47-51.  
LIN W J, ZENG Z H, ZHONG K, et al. Study on starch quality characteristics of different mung bean varieties[J]. Chinese Journal of grain and oil, 2012, 27(7): 47-51.
- [13] 王雅琪. 绿豆皮可溶性膳食纤维的制备及其性质研究[D]. 河南科技大学, 2017.  
WANG Y Q. Preparation and properties of soluble dietary fiber from mung bean peel[D]. Henan University of science and technology, 2017.
- [14] SINGH B, SINGH J P, KAUR A, et al. Phenolic composition and antioxidant potential of grain legume seeds: A review[J]. Food Res. Int., 2017, 101: 1-16.
- [15] DAHIYA P K, LINNEMANN A R, van BOEKEL M A J S, et al. Mung bean: Technological and nutritional potential[J]. Crit. Rev. Food Sci. Nutr., 2015, 55: 670-688.
- [16] 罗磊, 姬青华. 绿豆皮黄酮的提取纯化及其抗氧化研究[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(9): 109-115.  
LUO L, JI Q H. Extraction, purification and antioxidation of Flavonoids from mung bean peel[J]. Chinese Journal of grain and oil, 2017, 32(9): 109-115.
- [17] 刘晓娜. 绿豆黄酮对小鼠急性酒精性肝损伤的干预作用[J]. 沈阳药科大学学报, 2015, 1(32): 55-58.  
LIU X N. Intervention effect of mung bean flavonoids on acute alcoholic liver injury in mice[J]. J Shenyang Pharm Univ, 2015, 1(32): 55-58.
- [18] YANG Y, REN G X. Mushroom tyrosinase inhibitors from mung bean (*Vigna radiata* L.) extracts[J]. Int J Food Sci Nut, 2012, 63(3): 358-361.
- [19] VALMOR Z, IASMIM DE ALMEIDA V, MARIANE L U, et al. Effects of storage period and temperature on the technological properties, starch digestibility, and phenolic compounds of mung beans (*Vigna radiata* L.)[J]. Journal of Stored Products Research, 2020, 89: 1-11.
- [20] GUO X, LI T, TANG K, et al. Effect of germination on phytochemical profiles and antioxidant activity of mung bean sprouts (*Vigna radiata*) [J]. J. Agric. Food Chem., 2012, 60, 11050-11055.
- [21] JIANG L, WANG W J, WEN P W, et al. Two water-soluble polysaccharides from mung bean skin: Physicochemical characterization, antioxidant and antibacterial activities[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 100(C): 105-412.
- [22] Technology-Food Technology, Reports from Jiangnan University Advance Knowledge in Food Technology (Effects of Carboxymethylcellulose and Soybean Soluble Polysaccharides On the Stability of Mung Bean Protein Isolates In Aqueous Solution)[J]. Agriculture Week, 2020: 1-9.

- [23] LEI S. Bioactivities, isolation and purification methods of polysaccharides from natural products: A review[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2016, 92: 2417-3122.
- [24] KETHA K, GUDIPATI M. Immunomodulatory activity of non starch polysaccharides isolated from green gram (*Vigna radiata*) [J]. *Food Res. Int.*, 2018, 113: 269-276.
- [25] KETHA K, GUDIPATI M. Purification, structural characterization of an arabinogalactan from green gram (*Vigna radiata*) and its role in macrophage activation[J]. *J. Funct. Foods*, 2018, 50: 127-136.
- [26] LAI F, WEN Q, LI L, et al. Antioxidant activities of water-soluble polysaccharide extracted from mung bean (*Vigna radiata* L.) hull with ultrasonic assisted treatment[J]. *Carbohydr. Polym.*, 2010, 81: 323-329.
- [27] YAO Y, ZHU Y, REN G. Immunoregulatory activities of polysaccharides from mung bean[J]. *Carbohydr. Polym.*, 2016, 139: 61-66.
- [28] FERREIRA S S, PASSOS C P, MADUREIRA P, et al. Coimbra, M.A. Structure-function relationships of immunostimulatory polysaccharides: A review[J]. *Carbohydr. Polym.*, 2015, 132: 378-396.
- [29] KIRANMAYI K, MURALIKRISHNA G. Purification, structural characterization of an arabinogalactan from green gram (*Vigna radiata*) and its role in macrophage activation[J]. *Journal of Functional Foods*, 2018, 50: 127-136.
- [30] LI G H, WAN J Z, LE G W, et al. Novel angiotensin i-converting enzyme inhibitory peptides isolated from alcalase hydrolysate of mung bean protein[J]. *J. Pept. Sci.*, 2006, 12: 509-514.
- [31] 杨闯. 生物活性肽在营养保健中的应用[J]. *食品科学*, 2003(12): 153-154.  
 YANG C. Application of bioactive peptides in nutrition and health care[J]. *Food science*, 2003(12): 153-154.
- [32] HAN S, LIU H, HAN Y, et al. Effects of calcium treatment on malate metabolism and  $\gamma$ -aminobutyric acid (GABA) pathway in postharvest apple fruit[J]. *Food Chemistry*, 2021, 334: 127-479.
- [33] DING J, YANG T, FENG H, et al. Enhancing contents of  $\gamma$ -aminobutyric acid (GABA) and other micronutrients in dehulled rice during germination under normoxic and hypoxic conditions [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 64(5): 1094-1102.
- [34] 马玉玲, 罗可大, 佟立涛, 等. 绿豆发芽富集GABA及产品开发研究进展[J]. *中国粮油学报*, 2018, 33(5): 119-127.  
 MA Y L, LUO K D, TONG L T, et al. Research progress on GABA enrichment by mung bean germination and product development[J]. *Chinese Journal of grain and oil*, 2018, 33(5): 119-127.
- [35] 魏美霞, 梁雪梅, 林欣梅, 等. 绿豆发芽过程中多酚组成及抗氧化活性的变化[J]. *中国粮油学报*, 2021, 36(2): 27-33.  
 WEI M X, LIANG X M, LIN X M, et al. Changes of polyphenol composition and antioxidant activity during mung bean germination[J]. *Chinese Journal of grain and oil*, 2021, 36(2): 27-33.
- [36] MOTHANA R A A, AL SAID M S, AL REHAILY A J, et al. Anti-inflammatory, antinociceptive, antipyretic and antioxidant activities and phenolic constituents from *Loranthus regularis* Steud. ex Sprague[J]. *Food Chemistry*, 2012, 130(2): 344-349.
- [37] ALI N M, MOHD Y H, YEAP S K, et al. Anti-Inflammatory and antinociceptive activities of untreated, germinated, and fermented mung bean aqueous extract[J]. *Evidence-Based Complementry and Alternative Medicine*, 2014, 2014(12): 1-6.
- [38] YAO Y, ZHU Y, REN G. Mung bean protein increases plasma cholesterol by up-regulation of hepatic hmg-coareductase, and cyp7a1 in mrna levels[J]. *J. Food Nutr. Res.*, 2014, 2: 770-775.
- [39] INHAE K, SEOJIN C, JOUNG H T, et al. Myoungsook, L. Effects of mung bean (*Vigna radiata* L.) ethanol extracts decrease proinflammatory cytokine-induced lipogenesis in the kk-ay diabese mouse model[J]. *J. Med. Food*, 2015, 18: 841-849.
- [40] YEAP S K, BEH B K, HO W Y, et al. In vivo antioxidant and hypolipidemic effects of fermented mung bean on hypercholesterolemic mice[J]. *Evid.-Based Complement. Altern. Med.*, 2015: 11-13.
- [41] NOAKES M, BRINKWORTH G D, LUSCOMBE-MARSH N D, et al. Jr. Comparison of low- and high-carbohydrate diets for type 2 diabetes management: A randomized trial[J]. *Am. J. Clin. Nutr.*, 2015, 102: 780-790.
- [42] BAI Y, XU Y, CHANG J, et al. Bioactives from stems and leaves of mung beans (*Vignaradiata* L.)[J]. *J. Funct. Foods*, 2016, 25: 314-322.
- [43] LIYANAGE R, KIRAMAGE C, VISVANATHAN R, et al. Hypolipidemic and hypoglycemic potential of raw, boiled, and sprouted mung beans (*Vigna radiata* L. Wilczek) in rats[J]. *J. Food Biochem.*, 2018, 42(1): 428-438.
- [44] IWASAKI A, MEDZHITOV R. Control of adaptive immunity by the innate immune system[J]. *Nat. Immunol.*, 2015, 16(4): 87-124.
- [45] ZHU H G, TANG H Q, CHENG Y Q, et al. Potential of preparing meat analogue by functional dry and wet pea (*Pisum sativum*) protein isolate[J]. *LWT*, 2021, 148: 1-9.
- [46] 张海均, 贾冬英, 姚开. 绿豆的营养与保健功能研究进展[J]. *食品与发酵科技*, 2012, 48(1): 7-10.  
 ZHANG H J, JIA D Y, YAO K. Research progress on nutrition and health care function of mung bean[J]. *Food and fermentation technology*, 2012, 48(1): 7-10.
- [47] YANG M, LI N N, TONG L T, et al. Comparison of physicochemical properties and volatile flavor compounds of pea protein and mung bean protein-based yogurt[J]. *LWT*, 2021, 152: 1-11.
- [48] ALICE H L, LAWRENCE J A, MAYA V, et al. 2021 Dietary guidance to improve cardiovascular health: a scientific statement from the american heart association[J]. *Circulation*, 2021, 144: 472-487. 