

植物基肉制品营养品质研究现状

刘浩栋, 张金闯, 陈琼玲, 张玉洁, 李同庆, 王强*

(中国农业科学院农产品加工研究所/农业农村部农产品加工综合性重点实验室 北京 100193)

摘要 植物基肉制品产业发展对于有效缓解因人口增加而带来的动物肉短缺,改善居民营养健康,减少环境污染等具有重要意义,并将成为碳达峰和碳中和的新先锋。健康是消费者选择植物基肉制品的最主要原因,植物基肉制品的蛋白质含量可高达 30%以上(猪肉的 3 倍),是一种高蛋白、低脂肪的营养健康食品。然而,目前植物基肉制品与动物肉相比还存在一些营养方面的差距,如 B 族维生素、硒元素、锰元素等微量营养素含量低,锌元素、铁元素及其它维生素仍需进一步均衡、强化,消化吸收特性尚不明确。本文概述植物基肉制品产业发展现状,通过分析植物基肉制品营养品质及其影响因素,提出改良对策,为其营养品质评价与提升提供参考。

关键词 植物基肉制品; 营养品质; 评价方法; 影响因素; 改良提升

文章编号 1009-7848(2023)08-0428-12 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2023.08.042

植物基肉制品(Plant-based meat substitutes)是以豆类、谷物类等植物原料(包括藻类及真菌类等)或其加工品作为蛋白质、脂肪的来源,添加或不添加其它辅料、食品添加剂(含营养强化剂),经加工制成的具有类似畜、禽、水产等动物肉制品质构、风味、形态等特征的食品^[1]。植物基肉制品的生产过程与传统动物肉生产过程相比更加环保^[2-3]。有数据^[4]表明每生产 1 kg 植物基肉制品,要比生产 1 kg 动物肉制品节约 93%的土地资源,避免 99%的水资源浪费,并减少 93%的温室气体排放。因此,植物基肉制品产业发展对于有效缓解因人口增加而带来的动物肉短缺,改善居民营养健康,减少环境污染等具有重要意义^[2,5-7]。近几年,植物基肉制品行业发展迅速,2020 年全球植物基肉制品市场规模达到 139 亿美元,并将持续增长,预计到 2025 年全球市场规模将到达 279 亿美元(图 1),而中国作为人口基数较大的国家将逐渐成为植物基肉制品的主要消费市场,到 2023 年市场规模可达到全球市场规模的 50%以上^[4]。

植物基肉制品主要以花生蛋白、大豆蛋白、小麦蛋白、豌豆蛋白等植物蛋白为主要原料,主要加工技术为挤压技术^[8-9],又可分为低水分挤压技术和高水分挤压技术 2 种^[10-11]。将挤压后的产品称之为组织化/拉丝蛋白,经过一系列加工处理后制成的产品称为植物基肉制品。低水分挤压技术具有原料获取方便、工艺条件成熟、产品柔韧性强、易贮藏等优势,通常用于碎肉制品,但需要复水(非即食性),且后续工艺复杂、费时,还存在污水排放等问题。目前在欧美、日本和中国等国家和地区均有销售,已广泛应用于肉制品、冷冻食品、方便食品、休闲食品等中^[11]。国内年需求量在 50 万 t 以上,产值超过 50 亿元。近几年,高水分挤压技术制备的植物基肉制品组织化程度高、营养成分损失少^[12],且质地、结构可与动物肉媲美,具有即食、即用的特点,是比较理想的动物蛋白部分替代产品^[11]。然而,由于高水分挤压技术对原料要求严格,并且对设备的要求较高,需要较长的模具冷却成型等原因,目前尚无上市产品,仍然处于试验摸索阶段^[10,13]。市售植物基肉制品都是通过低水分挤压技术及后续加工处理制作的植物基肉制品,包括素肉饼、素肠、素午餐肉、素牛肉丸、素牛排、素鸡块等多种产品等。

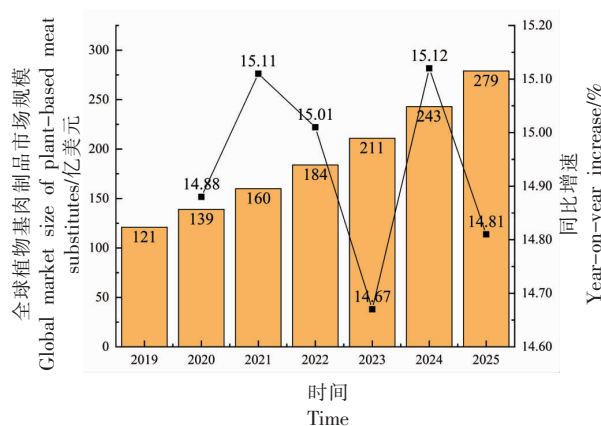
针对植物基肉制品消费者的调查显示,高收入、高学历群体为代表的新中产和新锐白领为第一消费者梯队,其次是以 95 后和 00 后为代表的学生党、追星族等年轻消费者,中老年人消费者比

收稿日期: 2022-08-28

基金项目:“十四五”国家重点研发计划项目(2021YFC2101402);国家农业科技创新工程(CAAS-ASTIP-Q2022-IFST-05);国家自然科学基金青年科学基金项目(31901608)

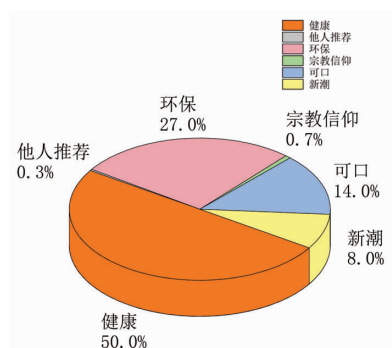
第一作者:刘浩栋,男,硕士生

通信作者:王强 E-mail: wangqiang06@caas.cn

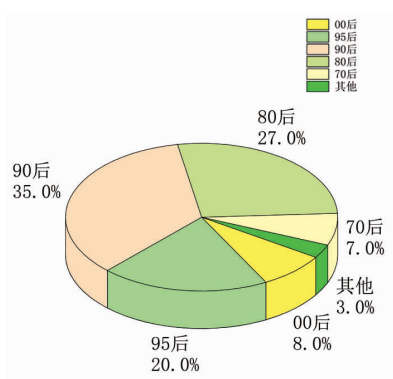
图 1 全球植物基肉制品市场规模^[4]Fig.1 Global market size of plant-based meat substitutes^[4]

例较低不超过 10%。在消费者中,80~95 后的年轻群体为主要消费人群,且女性消费者占比更大,约为 63%,是男性消费者的 1.7 倍。消费者选择植物基肉制品的原因^[4,10](图 2)包括健康、环保、可口、新潮、宗教信仰等,其中健康是主要因素^[14],这与其高蛋白、低脂肪、零胆固醇等健康优势有关。

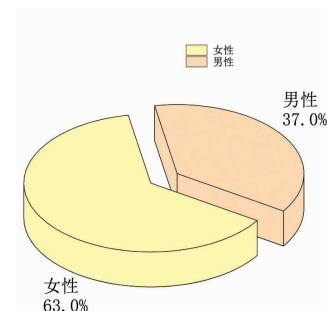
针对植物基肉制品消费者的调查显示,高收入、高学历群体为代表的新中产和新锐白领为第一消费者梯队,其次是以 95 后和 00 后为代表的学生党、追星族等年轻消费者,中老年人消费者比例较低不超过 10%。在消费者中,80~95 后的年轻群体为主要消费人群,且女性消费者占比更大,约为 63%,是男性消费者的 1.7 倍。消费者选择植物基肉制品的原因^[4,10](图 2)包括健康、环保、可口、新潮、宗教信仰等,其中健康是主要因素^[14],这与其高蛋白、低脂肪、零胆固醇等健康优势有关。



(a) 消费者购买原因



(b) 消费者年龄组成



(c) 消费者性别组成

图 2 植物基肉制品消费者分析^[4]Fig.2 Consumer analysis of plant-based meat substitutes^[4]

本文通过查阅多种食品营养品质评价方法,对市售植物基肉制品营养品质进行分析,进而立足植物基肉制品原料及加工工艺,分析其营养品质的影响因素,最终提出植物基肉制品营养品质改良对策,为其营养品质评价及改良提升提供参考。

1 植物基肉制品营养品质

植物基肉制品主要成分包括组织化的植物蛋白、非组织化的植物蛋白、碳水化合物、脂肪、调味

料、着色剂及营养强化剂等,具有零胆固醇、零激素、零抗生素等优点,富含人体必需氨基酸。根据文献报道^[15]及美国农业部统计数据(表 1)显示^[4],植物基牛肉在蛋白质、脂肪、膳食纤维等营养素含量上优于动物牛肉,更接近每日营养素参考摄入量^[6](表 2),更符合人们对饮食的营养健康需求。

1.1 蛋白质

植物基肉制品中的蛋白质含量高,有数据表明^[15]每 100.00 g 植物基牛肉制品中约含有 25.00 g 蛋白质,相当于成人每日推荐参考摄入量^[16]的

表1 植物基牛肉与动物牛肉营养素含量对比

Table 1 Comparison of nutrient content between plant-based beef and animal beef

营养素	植物基牛肉	动物牛肉
蛋白质/g	25.00	17.17
脂肪/g	7.81	20.00
胆固醇/mg	0.00	17.17
饱和脂肪/g	0.78	7.58
碳水化合物/g	12.50	0.00
膳食纤维/g	6.25	0.00
卡路里/kJ	849.90	1 062.74

表2 每日能量及营养素参考摄入量

Table 2 Daily reference intake of energy and nutrients

营养素	每日参考摄入量	营养素	每日参考摄入量
能量/kJ·d ⁻¹	9 414.00	钙/mg·d ⁻¹	650.00
脂肪/g	62.50	钾/mg·d ⁻¹	2 000.00
蛋白质/g	60.00	磷/mg·d ⁻¹	600.00
碳水化合物/g	361.90	钠/mg·d ⁻¹	1 500.00
膳食纤维/g	25.00	镁/mg·d ⁻¹	280.00
维生素 A/μg	560.00	铁/mg·d ⁻¹	9.00
维生素 B ₁ /mg	1.20	锌/mg·d ⁻¹	10.40
维生素 B ₂ /mg	1.20	硒/μg·d ⁻¹	50.00
烟酸/mg	12.00	铜/mg·d ⁻¹	0.60
维生素 C/mg	85.00	锰/mg·d ⁻¹	4.50
维生素 E/mg	14.00		

41.6%。在市售的植物基肉制品中,原料主要以大豆蛋白、豌豆蛋白和小麦蛋白为主,少数产品中还含有马铃薯蛋白、米蛋白等。这些蛋白质可为人体提供必需氨基酸,其中大豆蛋白是植物蛋白质中最理想的氨基酸来源,接近 WHO/FAO 推荐标准。Samard 等^[17]研究发现大豆蛋白中谷氨酸、天冬氨酸、赖氨酸和亮氨酸含量可与动物肉相当,而含硫氨基酸含量低。另有研究表明^[18]谷物蛋白氨基酸组成不理想,缺乏赖氨酸和苏氨酸。因此,为了使植物基肉制品氨基酸组成更均衡,会添加不同来源的功能性蛋白质,包括大米蛋白、花生蛋白、火麻仁蛋白等。有研究发现^[18],由多种植物蛋白制备的植物基肉制品在消化率、过敏性、质地、风味等方面更具有优势,如武宁杰等^[19]以大米蛋白、豌豆

蛋白和大米淀粉为原料制备的高水分植物基肉制品,其过敏性低,纤维结构明显,豆腥味小^[20];王钰霖等^[21]以火麻仁蛋白、大豆血红蛋白、马铃薯淀粉为原料制备植物基肉饼,其色泽及黏弹性更接近肉类,无豆腥味;王强等^[11]以花生蛋白、大豆蛋白、豌豆蛋白为原料制备植物基手撕肠^[22]、植物基风干牛肉等产品^[23],其必需氨基酸含量、组织化度及消化率比单一大豆蛋白挤压制品更高^[10,18]。

1.2 脂肪

曾艳等^[24]指出,植物油脂是评价植物基肉制品营养品质的重要组分。目前植物基肉制品中脂肪主要来源于椰子油、葵花籽油、玉米油、菜籽油、棕榈油和大豆油等植物油脂^[15,25]。不同来源植物油脂的脂肪酸组成不同,大豆油、黑豆油、菜籽油、葵花籽油和玉米油中不饱和脂肪酸含量分别为 79.52%、76.98%、91.42%、80.00%和 85.71%,其不饱和脂肪酸包括亚油酸、亚麻酸和花生四烯酸等必需脂肪酸,具有降血压、调节胆固醇含量、改善脂代谢等多重生理功能^[26]。研究发现,植物基肉制品不含胆固醇,脂肪含量低,可减少心脑血管疾病发生率^[15,27]。

1.3 碳水化合物

碳水化合物是植物基肉制品的重要组成成分,含量仅次于蛋白质,常见的有淀粉、纤维素、膳食纤维和功能性多糖等。市售植物基肉制品中碳水化合物来源多样,如添加了甲基纤维素、马铃薯淀粉、小麦淀粉、蔗糖、食用葡萄糖、阿拉伯胶、瓜尔豆胶等^[18,28]。这些成分不仅提供了丰富的营养物质,还对产品的质地、黏稠度和感官品质具有重要的改善作用。淀粉、蔗糖等经过人体消化道酶降解成单糖后可为人体正常生理代谢提供能量。此外,膳食纤维、纤维素和多糖胶体可作为脂肪替代品加入,因其黏性与凝胶性可产品纤维结构的稳定性,更好地模拟动物肉的质地、口感。膳食纤维食入后还可增加饱腹感以帮助减肥,有益于肠道益生菌的增殖,预防消化道疾病、糖尿病、结肠癌等。

1.4 维生素和矿物质

植物基肉制品中的维生素和矿物质主要来源于生产过程中添加的食品添加剂包括着色剂、调味料和营养强化剂等,不仅能使植物基肉制品在颜色、味道和风味组成上更加接近动物肉,还能提

供维生素和矿物质。目前市售植物基肉制品中着色剂包括大豆血红蛋白、番茄红素、甜菜汁提取物、胡萝卜素等,其中大豆血红蛋白含有铁元素,胡萝卜素可为人体提供维生素 A。调味料主要包括食盐、酵母提取物、辣椒粉、糖等,其中食盐含有钠元素,酵母提取物含有 B 族维生素,辣椒粉含有维生素 C。营养强化剂主要包括生育酚(维生素 E)、葡萄糖酸锌、盐酸硫胺素、抗坏血酸钠、乳酸钙等,是植物基肉制品补充维生素和矿物质的重要手段。Curtain 等^[29]研究发现,市售的 137 种植物基肉制品中有 18% 的产品添加了锌强化剂,20% 的产品添加了铁强化剂,24% 的产品添加了维生素 B₁₂ 强化剂。Gonowrie^[30]研究发现,市售的植物基肉制品中含有丰富的矿物质和 B 族维生素,铁元素含量接近甚至超过动物肉,钙元素、维生素 B₁₂、维生素 B₆ 含量平均值都高于动物肉。

此外,矿物质和维生素含量大小与植物蛋白原料也有关,相关研究发现^[31],以大豆为原料制备的植物基肉制品不仅含有更多的膳食纤维,铁元素、锌元素、维生素 B₁、维生素 B₂ 以及叶酸的含量也更高,而以坚果为原料制备的植物基肉制品其单不饱和脂肪酸与烟酸的含量更高。参考《中国居民膳食指南》推荐的每日营养素推荐摄入量^[16](表 2),植物基肉制品缺少硒元素、锰元素等微量营养素,仍需在制备过程中进行针对性的补充,使维生素和矿物质含量更均衡更全面。

2 植物基肉制品营养品质评价方法

食品营养品质评价主要包括 2 种手段:一是利用食品营养学评价方法从食品营养素种类、含量和生物利用度方面进行评价(表 3),而这些方法只针对某种特定营养素,并不能综合体现食品的营养品质高低;二是营养学度量法(Nutrient profiling),该方法能综合全面地评价食品的营养品质,是目前国际上接受度最高的食品营养品质评价方法^[32],主要通过数学关系来体现食品中多种营养成分的交互作用。目前在全球已有 20 余种营养素度量法^[33],本文对一些营养素度量法模型进行了(表 4)总结^[34]。

在营养学度量法中使用最多的是营养质量指数法(Index of nutritional quality, INQ),该方法

能够反映食品中某营养素的欠缺程度,当 INQ=1 时,表示人体在某食品中获取充足能量后,该营养素摄入量合理;当 INQ>1 时,表示人体在食品中获取充足能量后,该营养素摄入过多;当 INQ<1 时,表示人体在食品中获取充足能量后,该营养素摄入过少。

其计算方法如下:

营养素密度=100 g 食物中某营养素含量/指定人体每日所需该营养素量 (1)

热量密度=100 g 食物的热量/指定人体每日所需热量 (2)

INQ=100 g 食物中某营养素密度/100 g 食物热量密度 (3)

此外,徐海泉等^[16]建立了新的营养学度量法模型评价模型——营养当量法(Nutrition equivalent unit, NEU),是以各营养素密度和能量密度的算数均数来计算的(结合表 2 营养素密度指标数和能量密度指标数为 21),该方法能综合评价食品中营养素的综合供给能力,其营养当量值越大表明其营养品质越高。

其计算方法如下:

营养素密度=100 g 食物中某营养素含量/该营养素参考摄入量标准 (4)

能量密度=100 g 食物所产生能量/能量参考摄入量标准 (5)

营养当量= \sum 营养素密度(或能量密度)/*n* (6)

式中,*n*=21。

研究人员已采用上述营养品质评价方法对植物基肉制品营养品质进行评价,发现这些评价方法能够有效地反映植物基肉制品的营养品质^[35]。Reynaud 等^[36]通过常用的 DIAAS 评分模式来评价植物基肉制品的可消化率和必需氨基酸的消化率,借此对比不同蛋白原料制备的产品消化率高低。Drewnoski^[37]研究的富营养食品指数(Nutrient rich food index, NRF)也能有效评价植物基肉制品的营养品质。Vatanparast 等^[38]已将 NRF 评分模式用来评价植物基肉制品与动物肉的差异大小,阐述了动物肉与植物基肉制品的优缺点。Van Vliet 等^[39]用代谢组学的方法对植物基肉制品与动物肉的营养成分及代谢产物进行分析,发现二者

表3 食品营养学评价方法及指标^[33]Table 3 Evaluation methods and indexes of food nutrition^[33]

营养素	绝对含量	相对含量	生物利用
蛋白质	总含量	氨基酸评分 DIASS/AAS	消化吸收率测定 蛋白质功效比值(PER)测定 蛋白质生物价(BV)测定 蛋白质净利用率(NPU)测定 净蛋白质比值(NPR)测定 氮平衡指数(NBI)测定
脂肪		脂肪酸比例 饱和、单不饱和、多不饱和脂肪酸比例、 W-3 和 W-6 脂肪酸的比例	消化吸收率测定
碳水化合物		还原糖种类、含量及相对比例 非还原糖种类、含量及相对比例	血糖生成指数
维生素		脂溶性维生素(A/D/E/K)和水溶性维生素 种类(B ₁ /B ₂ /VC)、含量及相对比例	消化吸收率测定
矿物质		Fe、Zn、Na、K 种类、含量及相对比例	消化吸收率测定

表4 常见营养素度量法模型^[34]Table 4 Normal nutrient profiling model^[34]

评分和标准	计算公式	说明
营养质量指数(INQ)	INQ = 营养素密度/能量密度	每个营养素分别计算
营养热量指数(CFN)	CFN = 能量密度/13种常见营养素推荐摄入量均值	能量密度除以13种常见营养素密度的百分数均值,以100g食物为单位
推荐量与限制量比例(RRR)	RRR = $\sum(\text{推荐营养素摄入量}/6)/\sum(\text{限制性营养素含量}/5)$	以食物标签上所列营养素为基础的比例分
天然富含营养素(NNR)	NNR = $\sum_{1-15}(15\text{种不同营养素}/\text{各营养素推荐摄入量}) \times 100\%$ /15	天然含有的15种营养素分别除以推荐摄入量后的平均值
营养素密度评分(NDS16、NDS23)	NDS $n = (\text{食品中 } n \text{ 种营养素总和}/\text{能量密度}) \times 100, n=16 \text{ 或 } 23$	食物中16种或23种营养素总和除以能量密度
限量营养素评(LIM)	LIM = $\sum_{1-3}(\text{能量摄入推荐值}/3 \text{ 种负作用营养素摄入的最大推荐})/3 \times 100\%$	以100g食物中的3种负作用营养素的推荐值和能量摄入推荐值来计算
富含营养素食物(NRF n)	NRF $n = (\sum_{1-n}((\text{各营养素含量}/\text{每日推荐值}) \times 100\%)/n)/\text{能量密度}$	食品中 n 种营养素每日推荐值的百分比的数学平均值与能量密度的比值
供能量的营养(NFC)	NFC = $\sum_{1-11}(11 \text{ 种正作用营养素含量}/\text{每日推荐值})/11 - \sum_{1-3}(3 \text{ 种副作用营养素含量}/\text{每日推荐值})/3$	11种正作用营养素的和减去3种负作用营养素的和

共同食用时在一定程度上有营养互补的作用。

3 市售植物基肉制品营养品质分析及影响因素

为充分了解市售植物基肉制品的营养品质现

状,抽调了国内外26种不同植物基肉制品并对其进行能量分析、营养素种类及含量分析^[15](表5),主要包括蛋白质含量、脂肪含量、碳水化合物含量、钠元素含量、膳食纤维含量等,信息来源为市售产品的营养标签及外文文献报道。通过数据分

析和对比,发现 26 种植物基肉制品中所含能量最大值为 1 087.40 kJ,最小值为 142.33 kJ,平均值为 676.30 kJ,有 15 种产品所含能量超过平均值。蛋白质含量最大值为 25.00 g,最小值为 10.00 g,平均值为 14.52 g,有 12 种产品蛋白质含量超过平均值。脂肪含量最大值为 22.00 g,最小值为 1.00 g,平均值为 11.89 g,有 15 种产品脂肪含量超过平均值。碳水化合物含量最大值为 24.58 g,最小值为 1.40 g,平均值为 8.31 g,有 12 种产品碳水化合物含量超过平均值。钠元素含量最大值为 1 080.00 mg,最小值为 313.00 mg,平均值为 636.58 mg,有 12 种产品钠元素含量超过平均值。此外,在品牌 20 和品牌 26 的产品中分别含有钙元素 21.00 mg 和 54.00 mg; 品牌 3、18、19、20、22、23、24、25、26

这 9 种产品中还含有膳食纤维和铁元素,膳食纤维含量分别为 3.33、5.93、0.93、4.30、1.77、2.65、6.25、5.63、4.50 g,最大值为 6.25 g,最小值为 0.93 g,平均值为 3.92 g,有 5 种产品膳食纤维含量超过平均值;铁元素含量分别为 8.33、0.72、1.76、2.50、3.72、3.72、1.72、2.39、2.00 mg,最大值为 8.33 mg,最小值为 0.72 mg,平均值为 2.98 mg,有 3 种产品铁元素含量超过平均值。总体来看,市售植物基肉制品营养品质参差不齐,营养素含量差异较大,部分产品还存在蛋白质含量低、脂肪含量高、微量元素缺乏或不均衡等营养方面的不足,与动物肉相比营养素种类(如 B 族维生素、硒元素、锰元素等微量营养素)还不全面。

表 5 国内外市售植物基肉制品(每 100 g)营养成分表

Table 5 Nutrients of commercial plant-based meat (per 100 g) substitutes

序号	产品类别	营养成分				
		能量/kJ	蛋白质/g	脂肪/g	碳水化合物/g	钠/mg
品牌 1	素肉丸	917.63	12.10	16.40	5.60	843.00
品牌 2	素肉丸	539.69	10.00	8.00	4.00	353.00
品牌 3	素肉丸	168.44	15.56	7.78	10.00	355.56
品牌 4	素肉丸	1 051.00	12.20	15.00	16.30	678.00
品牌 5	素肠	836.80	15.20	13.20	4.80	926.00
品牌 6	素肠	673.08	16.00	1.00	4.00	353.00
品牌 7	素肠	967.17	14.90	15.20	6.60	925.00
品牌 8	素肠	799.39	23.00	8.50	5.00	980.00
品牌 9	素肉片	830.73	14.20	13.10	5.50	1 080.00
品牌 10	素肉片	666.00	17.40	8.00	4.00	353.00
品牌 11	素肉	917.63	10.50	15.20	9.80	920.00
品牌 12	素肉	931.81	10.20	15.60	10.10	950.00
品牌 13	素肉	920.68	10.20	15.80	9.00	960.00
品牌 14	素肉	913.61	10.50	15.00	10.00	950.00
品牌 15	素鸡块	1 051.00	12.20	15.00	16.30	678.00
品牌 16	素鸡块	1 043.90	12.00	21.00	1.40	585.00
品牌 17	素鸡块	1 077.30	12.00	22.00	1.40	685.00
品牌 18	素鸡块	205.55	10.17	8.47	24.58	449.15
品牌 19	素鸡肉	205.85	20.37	5.56	18.52	592.59
品牌 20	素牛肉	679.14	15.00	8.10	4.90	417.00
品牌 21	素牛肉	1 087.40	13.60	18.00	10.50	430.00
品牌 22	素牛肉	223.59	17.70	15.93	2.65	345.13
品牌 23	素牛肉	214.63	16.81	12.39	7.96	327.43
品牌 24	素牛肉	205.30	25.00	7.81	12.50	609.38
品牌 25	素牛肉	142.33	18.31	5.63	8.45	492.96
品牌 26	素猪肉	314.30	12.50	1.30	2.20	313.00

影响市售植物基肉制品营养品质的原因主要有2个方面^[7,40]：一是植物基肉制品原料主要包括植物蛋白原料、淀粉、纤维素、多糖胶体、植物油脂及食品添加剂等，二是植物基肉制品加工工艺。植物基肉制品蛋白原料的氨基酸模式是否均衡，淀粉等多糖的添加量控制以及是否含有抗性淀粉，脂肪及脂肪替代物中是否含有反式脂肪酸，食品添加剂种类及含量，各原料中矿物质和维生素的种类及含量等都直接影响产品的营养品质。通过挤压法制备植物基肉制品时会发生一系列复杂的生物化学反应，其营养成分含量会发生变化，从而影响植物基肉制品的营养品质^[10]。这些反应还受不同蛋白原料特性（如含水量、复配比例）和挤压工艺参数的影响^[28]（如温度、水分添加量、螺杆转速、模具形状等）。水分含量的高低会影响植物基肉制品的纤维结构、风味及口感，随着水分含量的增加，产品的风味物质保留率更低^[41]。挤压过程中的高温使植物基肉制品各成分（如蛋白质、油脂、糖类等）之间发生相互作用，如美拉德反应过程可能会产生丙烯酰胺、5-羟甲基-2-糠醛等不利于人体健康的物质，还会降低赖氨酸与含硫氨基酸的含量^[24,42]。植物油脂在高温下发生氧化、热分解、热聚合等过程，形成共轭烯烃，产生小分子的酯、醛、醇、酸等，也将对植物基肉制品的营养品质产生不利影响。此外，挤压温度高低和水分含量也会影响维生素的含量^[10]，温度过高将使原料中的维生素氧化分解而导致含量降低，在挤压时进料水分含量越大，硫胺素保留率越高，冷挤压时则无影响^[43]。矿物质对热比较稳定，在挤压过程中对其含量影响不大^[44]，Alonso等^[45]研究发现，双螺杆挤压蒸煮后豌豆、菜豆中铁元素含量显著增加，这是由于金属元件等发生了损耗，而其它矿物质含量并无显著影响。

4 植物基肉制品营养品质改良提升

植物基肉制品营养品质改良提升可以从原辅料配比和制备工艺2个方面考虑^[46]。在原料配比方面，首先要考虑功能性蛋白质的应用，目前植物基肉制品主要以大豆蛋白、豌豆蛋白、小麦蛋白、大米蛋白等为主要蛋白来源，而其它功能性蛋白质如菌类蛋白、藻类蛋白、羽扇豆蛋白、鹰嘴豆蛋

白等应用较少^[35,47]。菌类蛋白^[6]过敏性低，还含有维生素B₁₂、锌、硒等微量营养素，已引起国内外专家学者关注。Asgar等^[48]研究发现，部分菌类蛋白还可调节人体血糖水平，帮助治疗糖尿病，是非常有潜力的优质蛋白质来源。藻类蛋白原料常见的有螺旋藻、小球藻，富含60%~70%的藻类蛋白，也是补充蛋白质的优质来源。Palanisamy等^[49]研究发现，羽扇豆蛋白经高水分挤压技术制备的植物基肉制品具备大豆蛋白含有的必需氨基酸种类，且氨基酸模式更均衡。Jones等^[50]研究发现，鹰嘴豆蛋白制备的植物基肉制品异味更小，持水性更好，纤维组织化度也更高。豌豆蛋白由于其低过敏性受到广泛关注，与其它蛋白质复配后形成的组织蛋白可取代大豆组织蛋白^[51]。此外，可通过超过滤、高静水压等物理方法对蛋白原料进行预处理，从而提高其消化吸收率^[52]。其次，植物基肉制品在制备过程中使用的油脂种类较为单一，对于椰子油和亚麻籽油等功能性油脂的应用较少。Akyar^[53]研究发现，混合椰子油、菜籽油等来模拟大块脂肪，不仅能使植物基肉制品的质地更加柔软、咀嚼感更丰富，还能提高其必需脂肪酸含量。最后是功能性多糖的应用，包括魔芋胶、卡拉胶、膳食纤维等，改善产品的弹性、纤维结构、咀嚼感的同时也能增强人体免疫力、防止肥胖及心脑血管疾病等^[24]，Palanisamy等^[54]研究发现，高水分挤压制备植物基肉制品时加入1.5%卡拉胶能改善植物基肉制品的质地，提高其营养品质等，这与本团队前期研究结果一致^[55]。Egbert等^[56]研究发现，添加膳食纤维也有助于改善植物基肉制品营养品质与质地。动物肉是人体补充矿物质和维生素的重要食品，市售植物基肉制品虽然含有铁元素、锌元素、钙元素等，但仍缺乏烟酸、维生素B₁₂、硒、锰等，因此需要在制备过程中加入多种营养强化剂包括锌元素强化剂、铁元素强化剂、硒元素强化剂、B族维生素强化剂、维生素E强化剂等，使其矿物质和维生素组成更接近动物肉。

在制备工艺方面，高水分挤压技术与低水分挤压技术相比更具优势，高水分挤压技术生产过程能耗更低，制备出的新型植物基肉制品营养成分损失少，其纤维化结构和质地更接近动物肉，具有即食、即用的特点^[57]。因此，开发基于高水分挤

压技术的新型植物基肉制品,也是改善植物基肉制品营养品质的重要选择。此外,不同工艺参数对产品营养品质具有重要影响,Lu 等^[58]研究发现,通过改变工艺参数可使挤出物的营养品质得以改善,这与 Tran 等^[42]研究结果一致,主要包括温度、水分含量、螺杆转速、喂料速度等。Osen 等^[59]研究发现,冷却模具温度小于 75 °C 时可使蛋白原料中营养物质和生物活性成分最大限度地保留。然而,现阶段工艺参数对其营养品质影响机制不明确,部分研究只能研究单一工艺参数的影响,并不能反映多个工艺参数的影响。因此,为提升植物基肉制品营养品质仍需探究多种工艺参数共同作用时对挤出物的影响。

5 结语与展望

综上所述,健康是消费者选择植物基肉制品的主要原因,植物基肉制品与动物肉相比,具有零胆固醇、零激素、零抗生素,富含人体必需氨基酸等优点,部分市售产品还含有膳食纤维等。然而,目前市售植物基肉制品营养品质参差不齐,营养素含量差异较大,矿物质和维生素种类少、含量少,消化吸收特性尚不明确。同时,植物基肉制品相关的营养品质评价方法及标准尚不健全,亟待建立综合全面的植物基肉制品营养品质评价方法以客观评价其营养品质。

植物基肉制品营养品质的改良提升应从以下几个方面考虑:1)从氨基酸均衡、不饱和脂肪酸的比例大小、代谢吸收等角度,考虑如何高效利用蛋白质资源,包括含有维生素 B₁₂、锌、硒等微量元素的菌类蛋白、氨基酸模式均衡的藻类蛋白等功能性蛋白质,充分考虑椰子油、亚麻籽油等功能性植物油脂,丰富植物基肉制品必需脂肪酸组成,并补充添加魔芋胶、膳食纤维等功能性多糖等,在改善植物基肉制品营养品质的同时,提升其口感和风味。2)高度重视植物基肉制品中比较缺乏的维生素、微量元素等重要营养物质,根据不同需求并参照相应动物肉制品,添加 B 族维生素、生育酚、钙、铁、锌、硒等营养强化剂,开发针对特殊人群的植物基肉制品并评价其应用效果,如针对贫血症患者可丰富其铁元素、维生素 B₁₂ 含量,针对中老年人可丰富其钙元素、维生素 D 含量等。3)创新发展

植物基肉制品制备工艺及设备,改进装备并优化工艺参数,包括降低挤压温度、适当提高水分含量、控制冷却温度、改变螺杆构型等工艺参数,最大限度减少营养物质损失,提高其生物利用度,着力探索高水分挤压技术产业化应用。

参 考 文 献

- [1] 中国食品科学技术学会. 植物基肉制品团体标准: T/CIFST 001-2020[S]. 北京: 中国食品科学技术学会, 2020: 1-7.
Chinese Institute of Food Science and Technology. Plant-based meat products: T/CIFST 001-2020[S]. Beijing: Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020: 1-7.
- [2] ISMAIL I, HWANG Y H, JOO S T. Meat analog as future food: A review[J]. *Journal of Animal Science and Technology*, 2020, 62(2): 111-120.
- [3] SCHREUDERS F K G, DEKKERS B L, BODN?R I, et al. Comparing structuring potential of pea and soy protein with gluten for meat analogue preparation [J]. *Journal of Food Engineering*, 2019, 261(1): 32-39.
- [4] 星期零. 2021 中国植物肉行业洞察白皮书[R]. (2021-01-15)[2021-11-07]. <https://www.doc88.com/p-54261707978083.html>.
STARFIELD. 2021 white paper on insight into China's plant-based meat industry[R]. (2021-01-15)[2021-11-07]. <https://www.doc88.com/p-54261707978083.html>.
- [5] DEKKERS B L, BOOM R M, VAN DER GOOT A J. Structuring processes for meat analogues[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2018, 81(2): 25-36.
- [6] KUMAR P, CHATLI M K, MEHTA N, et al. Meat analogues: Health promising sustainable meat substitutes[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2017, 57(5): 923-932.
- [7] HU F B, OTIS B O, MCCARTHY G. Can plant-based meat alternatives be part of a healthy and sustainable diet?[J]. *JAMA*, 2019, 15(14): 1547-1548.
- [8] KRINTIRAS G A, GADEA DIAZ J, VAN DER GOOT A J, et al. On the use of the couette cell technology for large scale production of textured soy-based meat replacers[J]. *Journal of Food Engineering*, 2016, 169(2): 205-213.

- [9] KRINTIRAS G A, GÖBEL J, VAN DER GOOT A J, et al. Production of structured soy-based meat analogues using simple shear and heat in a couette cell[J]. *Journal of Food Engineering*, 2015, 160(9): 34-41.
- [10] 江连洲, 张鑫, 窦薇, 等. 植物基肉制品研究进展与未来挑战[J]. *中国食品学报*, 2020, 20(8): 1-10. JIANG L Z, ZHANG X, DOU W, et al. Advance and challenges in plant-based meat[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2020, 20(8): 1-10.
- [11] 王强, 张金闯. 高水分挤压技术的研究现状、机遇及挑战[J]. *中国食品学报*, 2018, 18(7): 1-9. WANG Q, ZHANG J C. Research status, opportunities and challenges of high moisture extrusion technology[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2018, 18(7): 1-9.
- [12] CHEN Q L, ZHANG J C, ZHANG Y J, et al. Rheological properties of pea protein isolate-amylose/ amylopectin mixtures and the application in the high-moisture extruded meat substitutes[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 117(5): 106732.
- [13] OFFIAH V, KONTOGIORGOS V, FALADE K O. Extrusion processing of raw food materials and by-products: A review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2019, 59(18): 2979-2998.
- [14] 郭顺堂, 徐婧婷, 刘欣然, 等. 我国植物蛋白资源高效利用途径与技术创新[J]. *食品科学技术学报*, 2019, 37(6): 8-15. GUO S T, XU J T, LIU X R, et al. Efficient utilization and technological innovation of plant-based protein resources in China[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2019, 37(6): 8-15.
- [15] BOHRER B M. An investigation of the formulation and nutritional composition of modern meat analogue products [J]. *Food Science and Human Wellness*, 2019, 8(4): 320-329.
- [16] 徐海泉, 卢士军, 周琳, 等. 以营养当量评价食物营养价值的方法学研究[J]. *营养学报*, 2016, 38(4): 341-344. XU H Q, LU S J, ZHOU L, et al. A new method to evaluate the nutritional value of foods with nutrition equivalent unit [J]. *Acta Nutrimenta Sinica*, 2016, 38(4): 341-344.
- [17] SAMARD S, RYU G H. A comparison of physico-chemical characteristics, texture, and structure of meat analogue and meats[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2019, 99(6): 2708-2715.
- [18] 周亚楠, 王淑敏, 马小清, 等. 植物基人造肉的营养特性与食用安全性[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(11): 4402-4410. ZHOU Y N, WANG S M, MA X Q, et al. Nutritional characteristics and edible safety of plant-based artificial meat[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2021, 12(11): 4402-4410.
- [19] 武宁杰, 孙德坡, 孙红引, 等. 一种大米蛋白制备高水分低过敏原植物肉的生产方法: CN202010849804.4[P]. 2020-11-20[2002-02-28]. WU N J, SUN D P, SUN H Y, et al. A production method for preparing plant meat with high moisture and low allergen from rice protein: CN202010849804.4[P]. 2020-11-20[2022-02-28].
- [20] 刘梦然, 毛衍伟, 罗欣, 等. 植物蛋白素肉原料与工艺的研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(4): 293-298. LIU M R, MAO Y W, LUO X, et al. Research progress on materials and technologies of plant-based meat[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(4): 293-298.
- [21] 王钰霖, 刘胜贵, 蒋永昌, 等. 一种大麻仁蛋白人造肉的配方及制备方法: CN201910845567.1[P]. 2019-11-29[2022-02-28]. WANG Y L, LIU S G, JIANG Y C, et al. Formula and preparation method of hemp seed protein artificial meat: CN201910845567.1[P]. 2019-11-29[2022-02-28].
- [22] 王强, 刘丽, 张金闯, 等. 一种高水分花生拉丝蛋白及其制备方法: CN201710452463.5[P]. 2017-11-07[2022-02-28]. WANG Q, LIU L, ZHANG J C, et al. High moisture peanut silk drawing protein and its preparation method: CN201710452463.5[P]. 2017-11-07[2022-02-28].
- [23] 王强, 张金闯, 陈琼玲, 等. 一种植物蛋白基风干牛肉及其制备方法: CN202010827166.6[P]. 2020-12-08[2022-02-28]. WANG Q, ZHANG J C, CHEN Q L, et al. A plant protein based air dried beef and its preparation method: CN202010827166.6 [P] 2020-12-08[2022-02-28].
- [24] 曾艳, 郝学财, 董婷, 等. 植物蛋白肉的原料开发、加工工艺与质构营养特性研究进展[J]. *食品工业科*

- 技, 2021, 42(3): 338-345, 350.
- ZENG Y, HAO X C, DONG T, et al. Research progress on rae material development, processing technology and nutritional properties of plant based meat[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(3): 338-345, 350.
- [25] KYRIAKOPOULOU K, DEKKERS B, VAN DER GOOT A J. Plant-based meat analogues [M]// GALANAKIS C M ed. Sustainable meat production and processing. New York: Academic Press, 2019: 103-126.
- [26] 刘素素, 沙磊. 植物蛋白基肉制品的营养安全性分析[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(8): 297-303.
- LIU S S, SHA L. Nutrition and safety assessment of plant protein-based meat alternative products [J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(8): 297-303.
- [27] KUMAR P, KUMAR R R. Product profile comparison of analogue meat nuggets versus chicken nuggets [J]. Fleischwirtschaft International, 2011, 36(1): 72-74.
- [28] 欧雨嘉, 郑明静, 曾红亮, 等. 植物蛋白肉研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(12): 299-305.
- OU Y J, ZHENG M J, ZENG H L, et al. Advance in plant-based meat research [J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(12): 299-305.
- [29] CURTAIN F, GRAFENAUER S. Plant-based meat substitutes in the flexitarian age: An audit of products on supermarket shelves[J]. Nutrients, 2019, 11(11): 2603.
- [30] GONOWRIE A. Cost effectiveness comparison related to cost per product nutrient of available meat alternatives and meat products in supermarkets and health food stores of Trinidad [R]. (2014-09-28) [2022-02-28]. <https://www.doc88.com/p-210758779933.html>.
- [31] FRESÁN U, MEJIA M A, CRAIG W J, et al. Meat analogs from different protein sources: A comparison of their sustainability and nutritional content [J]. Sustainability, 2019, 11(12): 3231.
- [32] 赵佳, 杨月欣. 营养学度量法在食品包装正面营养标签中的应用[J]. 营养学报, 2015, 37(2): 131-136.
- ZHAO J, YANG Y X. Application of nutrient profile in front-of-package labeling[J]. Acta Nutrimenta Sinica, 2015, 37(2): 131-136.
- [33] 吴婷, 杨月欣, 张立实. 食物的营养学评价方法研究进展[J]. 国外医学(卫生学分册), 2009, 36(2): 97-101.
- WU T, YANG Y X, ZHANG L S. Research progress on nutritional evaluation methods of food[J]. Journal of Environmental Hygiene, 2009, 36(2): 97-101.
- [34] 张坚, 赵文华, 陈君石. 营养学度量法——一个新的食物营养评价指标[J/OL]. 营养健康新观察, (2015-05-01) [2022-02-28]. <https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=3uoqIhG8C467SBiOvrai6TdxYiSzcN0EqtMlMqZJXLeUh6QFM0rx2TqWZOrwiBFDJ0UdVihnrVzyHmEeEWhdGBZ5ZxOAK-91AWuODEI00%3d&uniplatform=NZKPT>.
- ZHANG J, ZHAO W H, CHEN J S. Nutrient measurement - A new food nutrition evaluation index[J/OL]. New Observations on Nutrition and Health, (2015-05-01) [2022-02-28]. <https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=3uoqIhG8C467SBiOvrai6TdxYiSzcN0EqtMlMqZJXLeUh6QFM0rx2TqWZOrwiBFDJ0UdVihnrVzyHmEeEWhdGBZ5ZxOAK-91AWuODEI00%3d&uniplatform=NZKPT>.
- [35] HE J, EVANS N M, LIU H, et al. A review of research on plant-based meat alternatives: Driving forces, history, manufacturing, and consumer attitudes[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2020, 19(5): 2639-2656.
- [36] REYNAUD Y, BUFFIERE C, COHADE B, et al. True ileal amino acid digestibility and digestible indispensable amino acid scores (DIAASs) of plant-based protein foods[J]. Food Chemistry, 2021, 338(6): 128020.
- [37] DREWNOWSKI A. Defining nutrient density: Development and validation of the nutrient rich foods index[J]. Journal of The American College of Nutrition, 2009, 28(4): 421S-426S.
- [38] VATANPARAST H, ISLAM N, SHAFIEE M, et al. Increasing plant-based meat alternatives and decreasing red and processed meat in the diet differentially affect the diet quality and nutrient intakes of Canadians[J]. Nutrients, 2020, 12(7): 2034.
- [39] VAN VLIET S, BAIN J R, MUEHLBAUER M J, et al. A metabolomics comparison of plant-based meat and grass-fed meat indicates large nutritional differences despite comparable nutrition facts panels [J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 13828.

- [40] 周景文, 张国强, 赵鑫锐, 等. 未来食品的发展: 植物蛋白肉与细胞培养肉[J]. 食品与生物技术学报, 2020, 39(10): 1-8.
ZHOU J W, ZHANG G Q, ZHAO X R, et al. Future of food: Plant-based and cell-cultured meat[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2020, 39(10): 1-8.
- [41] GUO Z W, TENG F, HUANG Z X, et al. Effects of material characteristics on the structural characteristics and flavor substances retention of meat analogs [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 105 (9): 105752.
- [42] TRAN Q D, HENDRIKS W H, VAN DER POELL A F B. Effects of extrusion processing on nutrients in dry pet food[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2008, 88(9): 1487-1493.
- [43] 毕荃, 薛文通. 挤压蒸煮技术对食品营养属性影响研究进展[J]. 食品科技, 2017, 42(10): 71-75.
BI Q, XUE W T. Research progress on the effect of extrusion cooking technology on nutritional properties of food [J]. Food Science and Technology, 2017, 42(10): 71-75.
- [44] 徐树来. 挤压加工对米糠主要营养成分影响的研究[J]. 中国粮油学报, 2007, 1(3): 12-16.
XU S L. Rich bran: Extrusion processing and nutrition[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2007, 1(3): 12-16.
- [45] ALONSO R, RUBIO L A, MUZQUIZ M, et al. The effect of extrusion cooking on mineral bioavailability in pea and kidney bean seed meals[J]. Animal Feed Science and Technology, 2001, 94(1/2): 1-13.
- [46] ZHANG J C, LIU L, ZHU S, et al. Texturisation behaviour of peanut-soy bean/wheat protein mixtures during high moisture extrusion cooking[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2018, 53(11): 2535-2541.
- [47] HOOD-NIEFER S. Insights into extrusion of protein [J]. Cereal Foods World, 2017, 62(4): 148-150.
- [48] ASGAR M A, FAZILAH A, HUDA N, et al. Non-meat protein alternatives as meat extenders and meat analogs[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2010, 9(5): 513-529.
- [49] PALANISAMY M, FRANKE K, BERGER R G, et al. High moisture extrusion of lupin protein: Influence of extrusion parameters on extruder responses and product properties[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99(5): 2175-2185.
- [50] JONES O G. Recent advances in the functionality of non-animal-sourced proteins contributing to their use in meat analogs [J]. Current Opinion in Food Science, 2016, 7(7): 7-13.
- [51] SAMARD S, RYU G H. Physicochemical and functional characteristics of plant protein - based meat analogs[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2019, 43(10): 14123.
- [52] SHA L, XIONG Y L. Plant protein-based alternatives of reconstructed meat: Science, technology, and challenges[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 102(9): 51-61.
- [53] AKYAR I. Latest research into quality control [M]. Croatia: InTech, 2012: 145-176.
- [54] PALANISAMY M, TÖPFL S, AGANOVIC K, et al. Influence of iota carrageenan addition on the properties of soya protein meat analogues [J]. LWT - Food Science and Technology, 2018, 87(5): 546-552.
- [55] ZHANG J C, LIU L, JIANG Y R, et al. High-moisture extrusion of peanut protein -/carrageenan/sodium alginate/wheat starch mixtures: Effect of different exogenous polysaccharides on the process forming a fibrous structure [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 99(1): 105311.
- [56] EGBERT R, BORDERS C. Achieving success with meat analogs[J]. Food Technology, 2006, 60(1): 28-34.
- [57] ZHANG J C, LIU L, JIANG Y R, et al. Converting peanut protein biomass waste into 'double green' meat substitutes using a high -moisture extrusion process: A multiscale method to explore a process for forming a meat-like fibrous structure [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(38): 10713-10725.
- [58] LU B, YU H S, WANG Y H, et al. The change of the nutritional content after the extrusion in okara as raw materials of meat analogs products[J]. Food Research and Development, 2016, 37(8): 20-24.
- [59] OSEN R, SCHWEIGGERT-WEISZ U. High-moisture extrusion: Meat analogues[J]. Reference Module in Food Science, 2016, 8(5): 100596.

Research Status of Nutritional Quality of Plant-based Meat Substitutes

Liu Haodong, Zhang Jinchuang, Chen Qionglin, Zhang Yujie, Li Tongqing, Wang Qiang*

(Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agriculture Sciences/Key Laboratory of Agro-Products Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100193)

Abstract With the increasing population and serious challenges in food production mode and consumption, plant-based meat substitutes industry development is of great importance to effectively alleviate animal meat shortage due to the increasing population, improve resident nutritional health, and reduce environmental pollution, and will be a new pioneer in carbon peaks and carbon neutralization. Health is the leading reason for consumer choice of plant-based meat substitutes, which can be up to 30% protein (3 times that of pork), a nutritionally healthy food with high protein and low fat. However, there are still some differences in nutrition between plant-based meat substitutes and animal meat, such as B vitamins, selenium, manganese and other micronutrients. The zinc, iron and other vitamins need further equalization and enhancement, the characteristics of digestion and absorption are not clear. In this paper, the current states of industrial development of plant-based meat substitutes were outlined, and strategies for improvement of nutritional quality of plant-based meat substitutes by analyzing the nutritional quality of plant-based meat substitutes and its influencing factors were proposed, to provide references for the evaluation and improvement of nutritional quality of plant-based meat substitutes.

Keywords plant-based meat substitutes; nutritional quality; evaluation methods; influencing factors; quality-improvement