许微, 孔庆富, 王学强, 等. 甘薯蛋白和肽成分、生物活性及其提取工艺的研究进展 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(24): 377−386. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023120135

XU Wei, KONG Qingfu, WANG Xueqiang, et al. Progress of the Composition, Biological Activity and Extraction Technology of Sweet Potato Protein and Peptide[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(24): 377−386. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023120135

· 专题综述 ·

甘薯蛋白和肽成分、生物活性及其提取工艺的研究进展

许　微[1], 孔庆富[2], 王学强[2], 李广华[2], 彭立增[1,*], 彭春娥[1,*]

（1.山东省农业科学院农产品加工与营养研究所, 山东济南 250100;
2.泗水利丰食品有限公司, 山东济宁 273215）

摘　要: 甘薯是一种重要的农作物，其蛋白和肽资源具有较大的开发潜力。甘薯蛋白包括甘薯贮藏蛋白和糖蛋白，其中甘薯贮藏蛋白占主导地位，糖蛋白含量较少，经酶解或化学水解可得到不同分子量的甘薯肽。甘薯蛋白和肽富含 18 种人体所需氨基酸，氨基酸多样的组成结构赋予其独特的营养价值和生物活性，在预防和治疗癌症、高血压、肥胖等疾病上发挥重要作用。我国大部分甘薯用于生产淀粉、粉丝等食品，生产过程中产生大量废水造成环境污染，而且浪费了其中丰富的蛋白资源，因此废浆水中甘薯蛋白的提取和应用十分重要。目前提取纯化甘薯蛋白和肽，常用的方法包括碱提酸沉法、酶解法和超滤法等，这些方法效果显著，但技术仍需不断优化和创新来提高提取率和纯度，以满足各领域需求。未来研究可结合现代生物技术和信息技术手段深入探讨甘薯蛋白和肽结构与功能的关系，发掘其更多生物活性和应用潜力。该文系统综述了甘薯蛋白和肽的组成结构、理化性质、提取纯化和生物活性等方面的研究现状，以期为其工业生产提供可靠依据，推动甘薯蛋白和肽的可持续发展。

关键词: 甘薯蛋白, 甘薯肽, 生物活性, 糖蛋白, 提取

中图分类号: TS201.2　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2024)24−0377−10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023120135　　本文网刊:

Progress of the Composition, Biological Activity and Extraction Technology of Sweet Potato Protein and Peptide

XU Wei[1], KONG Qingfu[2], WANG Xueqiang[2], LI Guanghua[2], PENG Lizeng[1,*], PENG Chune[1,*]

（1.Institute of Food & Nutrition Science and Technology, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, China;
2.Sishui Lifeng Food Co., Ltd., Jining 273215, China）

Abstract: Sweet potato is an important crop, and rich in protein and peptide which have great development potential. Sweet potato protein mainly includes dominant storage protein and small amount glycoprotein, different molecular weight sweet potato peptide can be obtained from protein by enzymatic or chemical hydrolysis. Sweet potato protein and peptide contain 18 types of amino acids that are essential for human body, and its diverse composition of amino acids provides unique nutritional value and its biological activity possess prominent role in the prevention and treatment of cancer, hypertension, obesity and other diseases. Sweet potato is usually used to produce starch, vermicellis and other foods, whereas, huge wastewater was produced during the production process, causing environmental pollution and wastage of protein resource. Therefore, the extraction and application of sweet potato protein from waste water is crucial. Currently, effective extraction and purification methods of sweet potato protein and peptide are commonly used, such as alkaline extraction and acid

收稿日期: 2023−12−14

基金项目: 中央引导地方科技发展资金（YDZX2022151）; 国家自然科学基金青年科学基金项目（32101035）; 山东省自然科学基金（ZR2021QC025）。

作者简介: 许微（1998−）, 女, 硕士, 研究方向: 新食品加工, E-mail: 18182808023@163.com。

*** 通信作者:** 彭立增（1976−）, 男, 博士, 研究员, 研究方向: 新食品加工, E-mail: penglizeng@sdnu.edu.cn。

彭春娥（1986−）, 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 新食品加工, E-mail: pengchune@saas.ac.cn。

precipitation, enzymatic digestion, ultrafiltration and so on, but still need optimization and innovation to improve the extraction rate and purity to meet the needs of various fields. Future research can combine modern biotechnology and information technology to study the structure-function relationship, and explore more biological activities and application potentials of sweet potato protein and peptide. The current research status of sweet potato protein and peptide are reviewed in terms of structure composition, physicochemical properties, extraction, purification and biological activity in this paper. This review provides a reliable basis for the industrial production of sweet potato protein and peptide, and promotes the sustainable development of sweet potato protein and peptide.

Key words: sweet potato protein; sweet potato peptide; biological activity; glycoprotein; extraction

甘薯(*Ipomoea batatas*(L.)Lam.)是旋花科(Convolvulaceae)甘薯属(*Ipomoea*)无性繁殖作物,是我国一种重要的杂粮作物,原产于南美洲[1]。甘薯中富含淀粉、可溶性糖、蛋白质、脂肪酸、维生素等营养物质[2],其中甘薯蛋白和肽对甘薯的营养特性、保健作用及药用活性起着重要作用。

甘薯蛋白是一种从甘薯中提取的蛋白质,具有多种营养价值和功能,富含各种氨基酸,包括天冬氨酸、缬氨酸和丝氨酸等 18 种氨基酸,其中赖氨酸和色氨酸等限制性氨基酸含量较高[3−4]。这些氨基酸的种类、数量和排列顺序决定了甘薯蛋白和肽的特定结构和功能。除此之外,甘薯蛋白和肽具有多种生物活性,包括抗氧化、免疫调节和抗肿瘤等作用[5−6]。这些作用使得甘薯蛋白和肽在食品和保健品等领域具有广泛的应用前景。目前甘薯蛋白和肽最常用的提取方式有碱提酸沉法和酶解法,前者操作简单,成本低,适用于大规模生产,但提取的蛋白纯度较低,需进一步纯化。后者更为温和,提取的蛋白质纯度较高,且能更好地保留其天然结构和活性,但需要较高的技术水平和设备条件,成本也相对较高。研究者们也在不断通过例如超声、微波等新技术提高提取率并降低成本。这些技术的不断发展,将为蛋白质提取领域带来更多的可能性。

近年来,国内外对甘薯蛋白和肽的研究不断深入,其保健作用和药用价值得到广泛关注。本文通过对甘薯蛋白和肽的研究现状包括组成结构、理化性质、提取工艺和生物活性进行论述,为甘薯蛋白和肽的产业高值化发展提供科学参考。

1 甘薯蛋白的组成结构及理化性质

甘薯干基中约含有 2.24%~12.21% 的甘薯粗蛋白,比日常食用的大米和面粉蛋白含量还要高[7]。甘薯蛋白包括贮藏蛋白和糖蛋白,其中甘薯贮藏蛋白的含量占 90% 左右[8],通过酶解等方式还可制成蛋白肽。

1.1 甘薯贮藏蛋白

1.1.1 甘薯贮藏蛋白的组成结构 国内外对甘薯贮藏蛋白(Sporamin)的组成及结构已有广泛的研究。Sporamin 是一种可溶性蛋白,分为 SporaminA 和 SporaminB 两种[9]。SporaminA 是 SporaminB 的两倍,通过 SDS-PAGE 电泳发现两种蛋白质的分子量分别为 22 kDa 和 31 kDa[10]。田军等[11]用 DEAE-Sepharose4BFF 阴离子交换柱层析纯化得到胰蛋白酶抑制剂,发现其中至少有 4 种组分,分子量在 2~2.5 kDa 之间,等电点在 pH5.0~6.6 之间。甘薯蛋白富含 18 种氨基酸,其中必需氨基酸含量高达 39%,如表 1 所示,甘薯蛋白氨基酸含量与大豆、花生、核桃蛋白氨基酸比较发现,甘薯蛋白的必需氨基酸含量明显更高。

表 1 甘薯蛋白质与其它植物蛋白质氨基酸组成比较[3,12−14]

Table 1 Comparison of amino acid composition of sweet potato proteins with other plant proteins[3,12−14]

氨基酸	甘薯蛋白质含量(%)		大豆蛋白质含量(%)	花生蛋白质含量(%)	核桃蛋白质含量(%)
	Sporamin A	Sporamin B			
天门冬氨酸(Asp)	16.1	16.2	11.1	13.9	9.1
缬氨酸(Val)	8.5	9.1	5.0	5.2	4.6
丝氨酸(Ser)	8.3	8.8	5.2	5.2	5.3
甘氨酸(Gly)	8.0	7.7	4.2	6.6	4.9
亮氨酸(Leu)	7.0	5.6	7.1	7.9	7.8
苏氨酸(Thr)	7.0	6.8	4.0	2.9	3.0
丙氨酸(Ala)	6.9	6.1	4.2	4.5	4.7
谷氨酸(Glu)	6.0	7.9	19.5	23.5	21.0
苯丙氨酸(Phe)	5.3	5.7	4.6	6.2	4.6
异亮氨酸(Ile)	4.8	5.9	4.7	4.3	4.0
赖氨酸(Lys)	4.2	4.1	6.4	3.6	2.7
精氨酸(Arg)	3.6	4.5	7.8	13.1	13.8
酪氨酸(Tyr)	3.6	3.8	3.6	4.9	3.6
脯氨酸(Pro)	3.6	3.3	5.8	5.7	5.5
蛋氨酸(Met)	2.2	1.2	1.5	1.1	2.1
半胱氨酸(Cys)	2.1	1.9	1.5	1.1	0.5
组氨酸(His)	1.9	0.7	2.4	2.4	2.4
色氨酸(Trp)	0.9	0.7	1.2	1.2	0.6
必需氨基酸	39.9	39.1	34.6	32.4	29.7

Sporamin 是在甘薯块根中特异表达的一类特殊贮藏蛋白,是一个球形蛋白。Sporamin 共有两组 S-S 键连接:存在于分子内第 45 和第 94 半胱氨酸(Cys45~Cys94)、第 153 和 160 半胱氨酸(Cys153~Cys160)之间,在维持蛋白质的稳定性和活性方面发挥作用,是 Kunitz 型胰蛋白酶抑制剂中的两个保守的二硫键[15]。Yeh 等[16]研究表明 Sporamin 除了作为一种贮藏蛋白外,还可能作为一种蛋白酶抑制剂发挥防御作用。Sporamin 主要存在于甘薯的根块中,茎、叶等部位几乎没有[17],其主要位于细胞的液泡中,是前体合成的部位,在细胞中发挥重要作用[18]。

目前有研究发现甘薯贮藏蛋白不是一种糖蛋白[19]。

1.1.2　甘薯贮藏蛋白的功能特性　甘薯蛋白具有多种功能特性，如起泡性、稳定性、凝胶性等，这些特性使其在食品配方中具有较高的灵活性，可以应用于各种食品加工过程中[20]。起泡性是指表面活性剂溶液在外力作用下产生泡沫的难易程度，甘薯蛋白具有良好的起泡性，可以作为起泡剂应用到食品加工中。蛋白质的发泡能力与溶解度有一定的关系。当溶液的 pH 接近甘薯蛋白质的等电点附近时，蛋白质具有较低的发泡性[21]。甘薯蛋白在 37 ℃，pH2~11 时相对稳定且耐热[9]，能在高温、高湿等恶劣环境下保持其结构和功能。除此之外，甘薯蛋白具有较好的凝胶性，能在适当的条件下形成凝胶状物质。这种特性使得甘薯蛋白可用于制备各种凝胶食品，如果冻、布丁和肉制品等。此外，甘薯蛋白凝胶还具有良好的生物相容性，可用于生物医学领域的载体和支架材料[22]。

1.2　甘薯糖蛋白的组成结构及理化性质

糖蛋白是寡糖链与多肽链以共价键相连所构成的复合糖，总体性质更接近于蛋白质[23]。甘薯糖蛋白（Sweet–potato glycoprotein, SPG）是一种独特的粘蛋白，对人体有特殊的保护作用，维持消化道、呼吸道等的润滑功能，保持血管弹性，还可抑制胆固醇的积累、提升器官系统免疫力、降低高血压发病率等显著生理功效[24]。

目前对于其单糖组成、连接方式、分子量和氨基酸组成已有大量研究[25]。甘薯糖蛋白的糖链部分其单糖组成包括岩藻糖、阿拉伯糖、甘露糖、葡萄糖、鼠李糖和半乳糖[26−27]。对于其连接方式研究发现甘薯糖蛋白是以共价键连接而成的结合蛋白，在甘薯糖蛋白一级结构中发现了 O-糖肽键，是以 α-1,6 键连接的糖链，以吡喃型为主要糖苷类型并且含有 β-糖苷键和典型酰胺羰基结构[26−28]。甘薯糖蛋白分子量的研究各不相同，大约在 2~9 kDa。李亚娜等[26] 采用柱层析法分离纯化出分子量约为 6.2 kDa 的甘薯糖蛋白。蔡自建[28] 分离纯化得到 4 个级分的甘薯糖蛋白，分子量分别为 5.1、2.9、1.1、8.6 kDa。Kusano 等[29] 从白皮甘薯中提取出糖蛋白分子量为 2.2 kDa。赵梅等[30] 测出甘薯糖蛋白分子量为 5.8 kDa。并且采用差示扫描量热技术发现甘薯糖蛋白的热变性温度为 106.67 ℃，而去糖基后的热变性温度为 66.84 ℃，说明糖蛋白上的寡糖链有很好的稳定作用，具有增强糖蛋白抗变性功能。甘薯糖蛋白中的氨基酸种类繁多，如赖氨酸、色氨酸、天冬氨酸和谷氨酸等，这些氨基酸对生长发育、免疫功能等方面具有重要意义，与合成肌肉蛋白、调节神经递质等密切相关[31]。程坷伟等[32] 纯化得到的甘薯糖蛋白中天冬氨酸含量最高，其次是谷氨酸和亮氨酸，分别占重量的 13.59%、7.75% 和 7.27%。甘薯糖蛋白的结构和组成与其营养价值、口感和功能密切相关，通过改变结构，可以调节其生物活性，从而开发出更多具有特定功能的食品。

1.3　甘薯蛋白肽的结构与理化性质

甘薯蛋白肽是由多个氨基酸通过肽键连接而成的长链多肽，具有一定的空间结构。甘薯蛋白肽分子中存在糖基、磷酸基、脂基等多种修饰基团。这些基团对多肽的生物活性和功能具有调节作用。此外，修饰基团还可以影响多肽的溶解性、稳定性和溶解度等物理化学性质。甘薯蛋白通过酶解或发酵生成肽，其生物活性和稳定性发生变化[33]，从而在食品和医药应用方面变得更安全。目前蛋白肽的分子量大约在 0.5~30 kDa 之间，Gao 等[34] 用碱性蛋白酶制备甘薯蛋白肽，发现其分子量在 10~30 kDa 之间。

甘薯蛋白肽具有良好的乳化性。与天然蛋白质相比，蛋白酶解肽暴露的游离氨基，能促进肽向乳化液界面扩散，降低界面张力[35]。崔珊珊等[36] 发现甘薯蛋白肽的乳化特性与 NaCl 浓度和 pH 密切相关，添加 ≥0.2 mol·L^{-1} NaCl 降低了甘薯蛋白肽的乳化活性和稳定性，pH 越大，甘薯蛋白肽的乳化活性越强；甘薯蛋白肽还可以强化海藻酸钠凝胶的内部结构，促进钙交联作用，使其形成更为紧密的三维网络凝胶，进而改善其凝胶的质构等特性[37]。甘薯蛋白肽还可以作为一种天然食品来源的冷冻保护剂，用于改善冷冻面团的质量和营养。Chen 等[38] 的研究表明甘薯蛋白肽能延缓冷冻面团的品质劣变，且添加量越大效果越好。除此之外，甘薯蛋白酶解物还具有起泡性，比如 Gao 等[39] 研究发现碱性蛋白酶制备的甘薯蛋白酶解物的发泡膨胀率要明显高于甘薯蛋白。

2　甘薯蛋白及多肽的提取

2.1　甘薯蛋白的提取

研究者对甘薯蛋白的提取技术进行了深入研究，以期提高蛋白质提取率和纯度。传统的提取方法包括水浸提、醇沉、酸碱提等。李郁等[40] 用不同的溶剂提取甘薯蛋白时发现，蒸馏水比 NaCl 和 NaOH 溶液更适合提取甘薯蛋白。工业上生产淀粉产生的大量废水经自然发酵后酸沉，但是自然发酵的缺点是耗时长，占空间，并且产出的蛋白颜色较深，浓度低，蛋白质功能部分丧失，大多用于动物饲料，经济效益低。因此研究出高蛋白质得率，适合于工业生产的工艺是至关重要的。在研究蛋白质得率的过程中，科学家们探索了许多方法和技术。李鹏高[41] 采用泡沫分离法 25 ℃ 室温自然发酵提取蛋白质，发现，发酵 4~7 d 后蛋白质得率最佳，此方法具有工艺简单且成本低廉的特点。此外，为了优化提取工艺，许多研究者还对甘薯蛋白的提取条件进行了系统的探究。甘薯蛋白的提取率受料液比、浸提温度、浸提时间、pH 等多方面的影响。师超等[42] 研究发现影响因素由主到次依次为物料粒度、时间、pH、温度。而创新性的提取方法如超声波辅助提取、微波辅助提取和酶法提取等也得到了广泛应用。何春玫等[43] 通过响应面法优化超声辅助提取甘薯蛋白发现提取率受各

因素的影响大小顺序依次为料液比、超声功率、超声时间，优化后的甘薯蛋白得率明显升高，这为之后甘薯蛋白工厂化生产和应用提供了一定的理论依据。酸沉法提取甘薯蛋白方法简单易操作，但提取的蛋白颜色较深，为了解决这一问题，研究者通过去皮或者添加氯化钠、亚硫酸氢钠等进行护色，如表 2 所示。

2.2 糖蛋白提取

糖蛋白是一种大分子亲水性物质，难溶于一定浓度的乙醇，因此甘薯糖蛋白提取的常用方法是水提醇沉法，水提醇沉过程中溶液初始浓度、温度、乙醇的使用量等都对糖蛋白最后的成品和得率有一定的影响。目前已有多项研究从物料粒度、料液比、提取时间、提取温度、超声辅助提取等多方面优化甘薯糖蛋白的提取工艺。如表 3 所示，甘薯糖蛋白的提取多为水浸提后，75% 终浓度醇沉，Sevage 法除游离蛋白后得糖蛋白粗品。糖蛋白得率在 1% 左右，通过优化提取时间、提取次数和超声辅助等方式，糖蛋白得率上升。目前糖蛋白的纯化主要是通过 DEAE-52 纤维素柱不同浓度碳酸氢钠和凝胶柱不同缓冲液洗脱得纯化糖蛋白。

2.3 蛋白肽的制备

目前蛋白肽的提取方法主要是通过酶解法和微生物发酵法制备，酶解法最重要的则是蛋白酶的选用。通过单酶或多酶法来处理甘薯蛋白后利用超滤截留不同分子量的水解物再进行进一步的研究。蛋白酶的选择主要包括碱性蛋白酶、木瓜蛋白酶、胃蛋白酶等，不同的酶有不同的最适温度和 pH，不同的酶制备的蛋白肽也不同。碱性蛋白酶 pH 为 8，温度为 50 ℃[53]；木瓜蛋白酶 pH7，温度 55 ℃；枯草杆菌蛋白酶 pH7，温度 55 ℃；中性蛋白酶 pH6，温度 50 ℃；蛋白酶 K pH7，温度 37 ℃[54]；胃蛋白酶 pH2，温度 37 ℃[55]。王硕[55] 研究确定了胃蛋白酶水解甘薯蛋白的最适条件为：底物浓度 2.3%、酶与底物浓度比 3.7%、pH2.3、温度 37 ℃、时间 8 h，用该优化工艺，得到 ACE 抑制率最大为 78.37% 的水解产物。酶解后通过不同分子量的超滤膜处理，达到除盐并得到不同分子量的甘薯蛋白肽的目的。张勉羚等[37] 依次用截留分子质量为 1000、2000、3000、8000 Da 的超滤

表 2 甘薯蛋白质酸沉法不同提取工艺

Table 2 Different extraction processes of sweet potato protein by acid precipitation method

作者	料液比	保色	提取温度和时间	pH	其他处理和结果
段宝鑫[21]	1∶8	去皮	1.3 h	碱提pH10.0的氢氧化钠溶液 酸沉pH4.0 回调pH7.0	富硒甘薯蛋白质的提取率为46.5%
费扬等[44]		去皮后0.01% $NaHSO_3$		酸沉pH4.0 回调pH8.0的Tris-HCl	预加热处理(5~10 min, 90 ℃)改善甘薯蛋白的乳化稳定性，但会弱化乳化活性
崔珊珊等[45]	1∶1	0.01% NaCl		碱提pH8.0 酸沉pH4.0 回调pH7.0	回溶并过10 kDa膜超滤，纯度达88.28%
师超[42]			40 ℃/2 h	碱提pH9.0	物料粒度为80目，提取次数为2
何春玫等[43]	1∶11	去皮	超声时间81 min		切片烘干过40目筛，超声辅助提取：超声功率300 W，预测提取率为1.003%
侯利霞等[46]	1∶2		60 ℃/1.5 h	碱提pH8.0 酸沉pH4.5	碱提、添加菌液发酵至pH4.5，得最大提取率40.81%，蛋白纯度为67.26%； 碱提、1 mol/L HCl至pH4.5，得提取率为34.04%，纯度为73.68%

表 3 甘薯糖蛋白提取和纯化的方法和结果

Table 3 Methods and results of extraction and purification of sweet potato glycoprotein

作者	提取方法	提取优化结果	纯化方式
孟宪军等[47]	新鲜甘薯-水浸离心-上清硫酸铵沉淀-Sevage法除蛋白(氯仿∶正丁醇3∶1)-透析真空干燥。	得到4个级分的甘薯糖蛋白纯品，通过SDS-PAGE得一条带，说明甘薯糖蛋白得到纯化。	DEAE-52纤维素柱:碳酸氢钠丙烯葡聚糖凝胶S300柱：0.02 mol/L Tris-HCl缓冲液洗脱
师超等[48]	黄肉甘薯-护色(1%柠檬酸浸泡1 h)−40 ℃烘干磨粉、过筛-水浸离心-乙醇沉淀，75%-Sevage法除蛋白-透析冷冻干燥。	物料粒度80目，浸提时间1 h，浸提温度50 ℃，料液比1∶15，浸提次数1次，得率1.773%。	
刘倩倩[49]	甘薯淀粉渣-温水浸泡添加一定浓度的盐溶液超声波提取离心-上清真空浓缩-乙醇沉淀75%-真空干燥。	物料粒度60目，提取液质量浓度0.6g/L，提取时间2.5 h，料液比1∶18，超声波功率300 W，提取次数2次，得率1.678%。	
郭素芬[50]	甘薯(山东产北京2号)−60 ℃烘干磨粉-水浸离心-乙醇沉淀75%-丙酮、乙醚洗涤沉淀-Sevage法除蛋白-透析冻干。	提取次数2次，纯化后糖蛋白中蛋白质含量约为11.04%，糖含量约为79.67%，得率0.47%。	DEAE-52纤维素柱 SephadexG-100柱层析
秦宏伟[51]	北京533号甘薯-水浸离心-上清乙醇沉淀-Sevage法除蛋白后透析。	室温条件下水浸提，料液体积比为1∶6，提取时间为1 h，提取次数3次。	DEAE-52纤维素柱；碳酸氢钠 SephadexG-100柱层析
罗秋水[52]	新鲜紫红薯-超声过滤离心-乙醇沉淀75%(3次)-Sevage法除蛋白(3次)-真空冷冻干燥。	超声功率150 W，料液比1∶10，提取次数3次，超声时间30 min。	DEAE-52纤维素柱；碳酸氢钠 SephadexG-75柱层析
田璐[23]	新鲜甘薯-60 ℃干燥12 h-匀浆水浸离心-上清乙醇沉淀75%-Sevage法除蛋白-无水乙醇沉淀过夜-低温干燥。	提取温度40 ℃，提取时间80 min，功率205 W，料液比1∶20，得率1.016%。	

膜进行超滤，陈嘉茹等[53]通过超滤膜截留脱盐 500、1000、2000、3000 Da，制得了不同分子质量的甘薯蛋白水解物。通过超声-微波辅助酶解可显著提高甘薯蛋白酶解产物的水解度、表面疏水性和乳化性能[56]。崔珊珊[54]在超高压下酶解甘薯蛋白，发现超高压下酶解后溶液乳化稳定性指数均比常压下提高，其中木瓜蛋白酶在 300 MPa 下处理 6 min，酶解产物的乳化稳定性指数和活性指数均达到最大值。张苗等[57]在研究预热处理对甘薯蛋白酶解特性影响时发现预热处理显著影响碱性蛋白酶酶解甘薯蛋白的水解度和三氯乙酸氮溶解指数。通过多酶酶切方式可以影响产物的功能特性，窦刚[58]先用木瓜蛋白酶单酶切后再用碱性蛋白酶进行双酶切发现不同酶切产物对自由基的清除能力大小均不相同，石雨等[59]也通过相同的酶处理甘薯蛋白，研究表明木瓜蛋白酶和碱性蛋白酶最佳水解条件分别为：pH8.0，温度 55 ℃，pH11.0，温度 50 ℃。甘薯蛋白肽的制备已有初步研究，但其专有酶的选择和降解条件还需继续深入探究。

3　甘薯蛋白的生物活性

甘薯蛋白不仅是甘薯的主要营养成分，而且具有较强的抗氧化性、脱氧抗坏血酸还原酶活性和单脱氧抗坏血酸还原酶活性[60]，说明甘薯蛋白能够作为一种抗衰老物质应用于医药和保健领域。除此之外，甘薯蛋白和肽具有增强免疫力、降血脂、降血糖和抗肿瘤等功效，还有防治糖尿病、白血病等多种疾病的作用，目前甘薯蛋白生物活性的研究主要集中在抗氧化、抗肿瘤、免疫调节和降血压活性等。

3.1　抗氧化活性

许多疾病例如常见的癌症、动脉硬化、糖尿病、白内障、心血管病、老年痴呆、关节炎等都与产生过量的自由基有关。甘薯蛋白具有较好的体内外抗氧化活性和多种自由基清除能力。多项研究发现甘薯蛋白对 DPPH 自由基清除能力与甘薯贮藏蛋白的含量呈正相关[61−62]，其中色氨酸残基主要有助于清除羟基自由基，而半胱氨酸残基主要有助于清除 DPPH 自由基[63]。

甘薯多肽对 DPPH 自由基，超氧自由基和羟自由基都具有较高的清除活性，并且针对不同的自由基，蛋白多肽的清除率各不相同[58]。Wu 等[64]用胃蛋白酶降解甘薯蛋白发现分子量大于 10 kDa 的蛋白肽具有一定的抗氧化能力。王勇等[65]采用复合菌共生发酵法制备甘薯蛋白肽发现，小分子肽类物质具有一定的 DPPH 自由基清除能力以及还原能力。甘薯糖蛋白也具有较高的自由基清除能力，对邻苯三酚自氧化产生的·OH 和 H_2O_2 具有较高的清除活性[66-67]。刘主等[68]研究发现甘薯糖蛋白（Sweet potato glycoprotein，SPG）对四氧嘧啶诱导的糖尿病小鼠明显的体内抗氧化活性。甘薯贮藏蛋白、蛋白肽和糖蛋白都具有较强的抗氧化作用，通过摄入甘薯蛋白，可以有效提高体内的抗氧化能力，预防自由基对人体造成的损害，从而维护身体健康。

3.2　抗肿瘤活性

恶性肿瘤是威胁人类生命安全的重大难题之一，目前癌症已经成为人类第二大死亡原因。近半个世纪以来，虽然化疗成为数百万癌症患者的选择，但随之产生的耐药性和副作用对于患者是无限痛苦的来源[69]。因此许多天然产物对于抗肿瘤药物的研发尤为重要，甘薯蛋白是一种可以通过调节癌细胞中生长因子的表达和分泌从而有效抑制癌细胞的增殖，并诱导癌细胞凋亡的天然产物。

甘薯蛋白及多肽对人结肠癌、肝癌、乳腺癌、胰腺癌和口腔癌等均具有一定的抑制作用。多项研究表明甘薯蛋白体外和体内对结直肠癌均具有显著抑制作用[70]，通过下调肝脏 β-连环蛋白和血管内皮生长因子，结直肠癌细胞肿瘤中 IGF1R、COX2、VEGFA、β-catenin 的表达和分泌，有效抑制小鼠直肠癌结节的生长[71−72]。张苗等[73]研究发现甘薯蛋白酶解肽具有一定的抑制结肠癌细胞 HT-29 增殖及转移活性，通过诱导促凋亡蛋白 Bax 的上调表达和抗凋亡蛋白 Bcl-2 的下调表达，来激活线粒体途径，从而诱导细胞凋亡，还可抑制细胞迁移。甘薯蛋白在体外对人肝癌 HepG2 细胞、人乳腺癌 BCAP-37 细胞、人结肠癌 HT-29 细胞及两种人胰腺癌细胞系 PANC-1 和 BxPC-3 的活力和增殖活性均有显著抑制作用，通过抑制肿瘤血管生成及诱导癌细胞凋亡，最终发挥抑制癌细胞增殖、侵袭及血管生成的作用[41,74]。Yao 等[75]研究表明甘薯蛋白还可以抑制口腔癌细胞的增殖并诱导其凋亡。

甘薯糖蛋白由于其独特的抗肿瘤作用和低毒副作用，在肿瘤治疗中具有广阔前景。目前，研究人员正在开展甘薯糖蛋白抗肿瘤的临床前和临床研究，以期将其发展成为一种新型、高效的肿瘤治疗药物。程坷伟等[32]通过小鼠肿瘤试验表明甘薯糖蛋白具有较强的抗肿瘤生物活性，Tian 等[76]分离出一种具有潜在抗结直肠癌活性的新型小分子糖蛋白 SPG-8700，通过调节 Bcl-2 和 Bax 的表达来促进 HCT-116 细胞的凋亡，而对正常细胞的生长无影响。研究发现甘薯口服糖蛋白 SPG-56 显著抑制了 MCF-7 肿瘤细胞的发育，并且可以抑制 MCF-7 和 4T1 乳腺癌细胞的转移，动物实验表明其还明显抑制体内肿瘤的生长，如 SPG-56 能延迟结肠癌的发展[77−78]。

癌症的高发对于人类来说是一场灾难，其病因也尚未完全了解，不同外源性和内源性的因素都可导致癌症的发生，因此对于预防和治疗恶性肿瘤，甘薯蛋白可以作为一种药物和治疗手段，通过调控一些基因的表达从而达到抑制癌细胞生长的目的。然而，尽管甘薯蛋白在抗肿瘤治疗中具有显著的疗效，但其作用机制尚不完全明确，仍需进一步研究。此外，如何提高甘薯蛋白的生物利用度和稳定性，以及优化给药

途径和剂量，也是未来发展的必经之路。

3.3 免疫调节活性

免疫调节是对抗病原体和体内出现的异常细胞的重要一环，其在慢性疾病的预防和控制起着重要的作用[79]。甘薯糖蛋白免疫调节的作用十分显著，能够提高吞噬细胞将抗原呈递给 T 淋巴细胞的能力，从而激活免疫系统，使人体更好地对抗外来病原体，促进免疫细胞之间的相互作用，维持免疫平衡。甘薯糖蛋白在一定浓度下可促进脂肪酸羟化酶（Polyhydroxy alkanoates，PHA）人外周血淋巴细胞转化，促进小鼠腹腔巨噬细胞的吞噬功能，并且发现甘薯糖蛋白与脾淋巴小结和胸腺 T 细胞线粒体的增多呈正相关[80]。刘主等[81] 也通过研究发现甘薯糖蛋白 SPG-1 增加了小鼠脾脏和胸腺指数，明显增强小鼠腹腔巨噬细胞活性，增强免疫力。除此之外，对甘薯糖蛋白进行适度乙酰化后也可以增强其免疫调节活性[82]。对于甘薯蛋白和肽免疫调节作用的研究较少，应进一步研究甘薯蛋白和肽的生物学功能和抗病分子机制，将有助于开发新型药物和治疗方法，为防治相关疾病提供新的途径。

3.4 其他活性

甘薯蛋白和肽具有降血脂、降血压、降血糖、预防动脉粥样硬化和治疗肥胖等多种功效。甘薯蛋白酶解肽具有预防或治疗高血压的功能，为开发安全健康和副作用低的降压药物提供更多的选择[83−84]。刘主等[85] 研究表明甘薯糖蛋白 SPG-1，对四氧嘧啶诱导的糖尿病小鼠具有明显的降血糖功能。动脉粥样硬化是冠心病、脑梗死、外周血管病的主要原因。郭素芬等[50] 在研究甘薯糖蛋白对实验性动脉粥样硬化家兔血脂和一氧化氮的影响时发现甘薯糖蛋白对动脉粥样硬化有明显的预防和治疗作用，可能与其降血脂及减少一氧化氮生成有关，并且这种作用具有一定的量效关系。多项研究发现甘薯糖蛋白能够通过提高肝脂质和卵磷脂胆固醇酰基转移酶活性来促进高密度脂蛋白血清清除胆固醇，从而有效降低高脂血症大鼠的血脂水平，有利于高血脂和冠心病的防治[86−87]。李鹏高等[88] 研究发现甘薯蛋白能够明显降低高脂饲料导致的小鼠体重增加，有预防肥胖和降低血脂的作用，且有改善肝功能的作用。肥胖是糖尿病的主要危险因素，会增加心血管疾病、脂肪肝以及关节炎的风险，还会导致自卑、焦虑、抑郁等心理问题。熊志冬等[89] 发现甘薯蛋白明显抑制 3T3-L1 前脂肪细胞的分化和增殖，具有潜在的减肥作用，可以作为一种减肥食品或药物应用到人们日常生活中。

4 结论与展望

甘薯蛋白和肽是一类绿色、高效的可持续蛋白质来源，含有丰富的氨基酸，其数量、种类和排列顺序等赋予其不同的特性和功能，同时不同生长条件和处理方式都会影响其蛋白和肽的结构和含量。我国是世界上甘薯种植面积最大的国家，在我国工业上甘薯在制备淀粉和粉丝过程中会产生大量废水，其中有丰富的蛋白资源。目前甘薯蛋白和肽的提取工艺已初步形成，但仍需不断优化和创新，可开展研究浓缩工艺、加压、多酶辅助、超声和微波等方式提高提取率和纯度，除此之外还需考虑成本、操作实施可行性等多方面因素，以确保其在不同应用场景下的表现稳定和可靠。进一步结合基因工程、蛋白质组学、代谢组学等现代生物技术和信息技术手段，深入研究甘薯蛋白和肽的生理活性、营养保健功能及作用机理，为其在食品和保健品等领域的应用提供更为坚实的理论基础和科学依据。

大量研究证实了甘薯蛋白具有抗氧化、免疫调节、降血压、降血脂、抗肿瘤和防止肥胖等多种生物活性，经修饰或酶解生成肽也可改变或增强其生物活性，在医药保健食品等领域具有较大的开发潜能。我国目前市场上国产活性肽食品较少，但近几年逐步呈现出新潮，日本、美国、欧洲已经推出了多样功能的肽食品，产业前景看好。甘薯蛋白肽是其中之一，因其具有分子量小、易吸收、种类多等优势备受关注，能极大地补充人体所需。对于甘薯蛋白肽的技术开发未来应集中在高效、专一酶的培育和筛选，复合酶共同作用机理以及开发甘薯生物活性肽功能性食品上。

甘薯蛋白和肽的物理特性和生物活性等因甘薯品种、种植区域和生长环境的不同而发生变化，生产工艺也需根据甘薯的不同情况而不断更新。因此未来甘薯蛋白的发展需不断加强基础研究，优化生产工艺，拓展应用领域，从而最大程度发挥其多样的营养特性和生物活性功能，将甘薯蛋白和肽更好地应用于食品、制药等领域，为人类提供健康环保的蛋白质来源。

© The Author(s) 2024. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 李强, 赵海, 靳艳玲, 等. 中国甘薯产业助力国家粮食安全的分析与展望[J]. 江苏农业学报, 2022, 38(6): 1484−1491. [LI Qiang, ZHAO Hai, JIN Yanling, et al. Analysis and outlook of China's sweetpotato industry in contributing to national food security [J]. Jiangsu Agricultural Journal, 2022, 38(6): 1484−1491.]

[2] 张立明, 王庆美, 王荫墀. 甘薯的主要营养成分和保健作用[J]. 中国食物与营养, 2003(7): 45−48. [ZHANG Liming, WANG Qingmei, WANG Yindei. Main nutrients and health effects of sweet potato[J]. Chinese Food and Nutrition, 2003(7): 45−48.]

[3] 孙敏杰. 甘薯蛋白的营养特性研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012. [SUN Minjie. Nutritional characterization of sweetpotato protein[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2012.]

[4] SHARMA C, AWASTHI S K. Versatility of peptide nucleic acids (PNAs): Role in chemical biology, drug discovery, and origins of life[J]. Chem Biol Drug Des, 2017, 89(1): 16.

［5］ 刘慧, 张苗, 孙红男, 等. 甘薯生物活性肽研究进展及展望[J]. 江苏师范大学学报(自然科学版), 2022, 40(2): 37−41. ［LIU Hui, ZHANG Miao, SUN Hongnan, et al. Progress and prospects of sweet potato bioactive peptides[J]. Journal of Jiangsu Normal University (Natural Science Edition), 2022, 40(2): 37−41.］
［6］ 张雪梅, 张玲, 高飞虎等. 甘薯主要活性物质及其生理效应研究进展[J]. 南方农业, 2022, 16(23): 105−110. ［ZHANG Xuemei, ZHANG Ling, GAO Feihu, et al. Progress in the study of major active substances and their physiological effects in sweet potato[J]. Southern Agriculture, 2022, 16(23): 105−110.］
［7］ 王勇, 李彦军, 王楠, 等. 复合菌共生发酵法酶解甘薯蛋白制备生物活性肽的研究[J]. 农产品加工, 2016(22): 8−12. ［WANG Yong, LI Yanjun, WANG Nan, et al. Study on the preparation of bioactive peptides by enzymatic digestion of sweet potato protein by symbiotic fermentation of complex bacteria[J]. Agricultural Product Processing, 2016(22): 8−12.］
［8］ 董辉. 超高压处理对不同富硒浓度甘薯贮藏蛋白质结构及功能特性的影响[D]. 辽宁: 辽宁大学, 2024. ［DONG Hui. Effect of ultrahigh pressure treatment on the structure and functional characteristics of sporamin with different selenium enrichment concentrations[D]. Liaoning: Liaoning University, 2024.］
［9］ JONES D B, C E F GERSDORFF. Ipomcein, a globulin from sweet potatos (*Ipomoea batatas*)[J]. Biol Chem, 1931(93): 119−126.
［10］ MAESHMIA M, SASKI T, ASAHI T. Characterization of major proteins in sweet potato tuberous roots[J]. Phytochemistry, 1985(24): 1899−902.
［11］ 田军, 苏昌茂, 周先碗. 甘薯和花生胰蛋白酶抑制剂的初步研究[J]. 广西植物, 2009, 29(1): 70−73. ［TIAN Jun, SU Changmao, ZHOU Xianbao. Preliminary studies on the trypsin inhibitors in sweet potato and peanut[J]. Guangxi Plant, 2009, 29(1): 70−73.］
［12］ 孟祥勋, 胡明祥. 大豆籽粒蛋白质氨基酸组成成分的相关分析[J]. 大豆科学, 1987(3): 213−219. ［MENG Xiangxun, HU Mingxiang. An analysis on the relationship between protein and its amino acid in soybean seed[J]. Soybean Science, 1987(3): 213−219.］
［13］ LATIF S, PFANNSTIEL J, MAKKAR H P S , et al. Amino acid composition, antinutrients and allergens in the peanut protein fraction obtained by an aqueous enzymatic process[J]. Food Chemistry, 2013, 136(1), 213-217.
［14］ MAO X Y, HUA Y F, CHEN G G. Amino acid composition, molecular weight distribution and gel electrophoresis of walnut (*Juglans regia* L.) proteins and protein fractionations[J]. International journal of molecular sciences, 2014, 15(2): 2003-2014.
［15］ SENTHIKUMAR R, YEH K W. Multiple biological functions of sporamin related to stress tolerance in sweet potato (Ipomoea batatas Lam)[J]. Biotechnol Adv, 2012, 30(6): 1309−1317.
［16］ YEH K W, CHEN J C, LIN M I, et al. Functional activity of sporamin from sweet potato (*Ipomoea batatas* Lam.): A tuber storage protein with trypsin inhibitory activity[J]. Plant Mol Biol, 1997, 33(3): 565−570.
［17］ 明玥, 梁志宏. 甘薯的功能性成分及其开发利用途径[J]. 食品科技, 2020, 45(11): 174−179. ［MING Yue, LIANG Zhihong. Functional components and development and utilizationpathways of sweet potato[J]. Food Science and Technology, 2020, 45(11): 174−179.］
［18］ MATSUKA K, MATSUMOTO S, HATTORI T, et al. Vacolar targeting and posttranslational processing of the precursor to the sweet potato tuberous root storage protein in heterologous plant cells[J]. Biol Chem, 1990, 265(32): 19750−19757.
［19］ 文一, 赵国华, 阚建全, 等. 甘薯贮藏蛋白研究进展[J]. 粮食与油脂, 2003(8): 24−26. ［WEN Yi, ZHAO Guohua, KAN Jianquan, et al. The special proteins in sweet potato tuber-sporamin[J]. Grain and Fats, 2003(8): 24−26.］
［20］ 木泰华, 孙艳丽, 刘鲁林, 等. 甘薯可溶性蛋白的分离提取及特性研究[J]. 食品研究与开发, 2005(5): 18−22. ［MU Taihua, SUN Yanli, LIU Lulin, et al. Analysis of major saluble protein abstraction and purification from sweet potato roots[J]. Food Research and Development, 2005(5): 18−22.］
［21］ 段宝鑫. 富硒甘薯中蛋白质的提取纯化及其结构的初步解析[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2021. ［DUAN Baoxin. Extraction and purification of proteins from selenium-enriched sweetpotato and preliminary analysis of their structures[D]. Shenyang: Liaoning University, 2021.］
［22］ ZHAO Z K, MU T H, ZHANG M, et al. Chemical forces, structure, and gelation properties of sweet potato protein as affected by ph and high hydrostatic pressure[J]. Food and Bioprocess Technology, 2018, 11(9): 1719−1732.
［23］ 田璐, 李凌燕, 王伟青, 等. Box-Behnken 响应面法优化甘薯糖蛋白提取工艺[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(4): 169−171,178. ［TIAN Lu, LI Lingyan, WANG Weiqing, et al. Optimization of extraction process for glycoprotein from sweet potato by Box-Behnken responsae surface methodology[J]. Anhui Agricultural Science, 2018, 46(4): 169−171,178.］
［24］ 龚魁杰. 甘薯糖蛋白研究进展[J]. 食品科学, 2007(6): 359−362. ［GONG K J. Progress of sweet potato glycoproteins[J]. Food Science, 2007(6): 359−362.］
［25］ 王金亭. 甘薯糖蛋白化学结构及其生物学活性[J]. 粮食与油脂, 2010(5): 1−2. ［WANG Jinting. Chemical structure and biological activity of sweet potato glycoprotein[J]. Grain and Fats, 2010(5): 1−2.］
［26］ 李亚娜, 林永成, 佘志刚. 甘薯糖蛋白的分离、纯化和结构分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2004(9): 59−62. ［LI Yana, LIN Yongcheng, SHE Zhigang. Isolation, purification and structural analysis of sweet potato glycoprotein[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2004(9): 59−62.］
［27］ 梁婧婧, 苏锡辉, 史铁嘉, 等. 甘薯水溶性糖蛋白一级结构鉴定[J]. 食品工业科技, 2011, 32(11): 166−167. ［LIANG Jingjing, SU Xihui, SHI Tiejia, et al. The primary structure identification of sweet potato glycoprotein[J]. Food Industry Science and Technology, 2011, 32(11): 166−167.］
［28］ 蔡自建. 甘薯糖蛋白的分离纯化及其糖链结构鉴定[D]. 重庆: 西南农业大学, 2003. ［CAI Zijian. Studys on isolation, purification of sweet potato glycoprotein (*Ipomaea batatas* LAM) and elucidation of its sugar chain structure[D]. Chongqing: Southwest Agricultural University, 2003.］
［29］ KUSANO S, ABE H, TAMURA H. Isolation ofantidiabetic components from white-skinned sweet potato (*Ipomoea batatas* L.)[J]. Biosci Biotechnol Biochem, 2001, 65(1): 109−114.
［30］ 赵梅, 唐文婷, 于春娣. 甘薯糖蛋白的分离纯化及其性质研究[J]. 食品研究与开发, 2008, 152(7): 49−51. ［ZHAO Mei, TANG Wenting, YU Chundi. Study on isolation, purification and charactrization of the glycoprotein from sweet potato[J]. Food Research and Development, 2008, 152(7): 49−51.］
［31］ 孙昌平, 王贵珍. 甘薯糖蛋白分离纯化及结构分析[J]. 农产品加工, 2020(21): 55−58. ［SUN Changping, WANG Guizhen.

Study on isolation purification and identification of sweet potato glycoprotein[J]. Agricultural Product Processing, 2020(21): 55−58.]
[32] 程坷伟, 许时婴, 王璋. 甘薯淀粉生产的废液中提取糖蛋白的超滤工艺研究[J]. 食品工业科技, 2003(10): 109−111. [CHENG Kuowei, XU Shiying, WANG Zhang. Ultrafiltration process for glycoprotein extraction from the waste liquid of sweet potato to starch production[J]. Food Industry Science and Technology, 2003(10): 109−111.]
[33] ZHANG M, MU T H, SUN M J. Purification and identification of antioxidant peptides from sweet potato protein hydrolysates by Alcalase[J]. J Funct Foods, 2014, 7(1): 191−200.
[34] GAO J, TANG Z S, HE S, et al. The foaming properties of sweet potato protein hydrolysates produced by alcalase and ficin[J]. Sci Food Agric, 2023, 103(8): 4157−4163.
[35] FALADE O E. 超声波—微波和高静水压对甘薯蛋白肽乳化液界面稳定性的影响研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2022. [FALADE O E. Interfacial stability of sweet potato protein peptides emulsion influenced by ultrasound microwave and high hydrostatic pressure[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2022.]
[36] 崔珊珊, 木泰华, 孙红男, 等. NaCl 浓度和 pH 对甘薯蛋白肽乳化特性的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(9): 1778−1786. [CUI Shanshan, MU Taihua, SUN Hongnan, et al. Effect of NaCl concentration and pH on emulsification characteristics of sweet potato protein peptides[J]. Chinese Agricultural Science, 2016, 49(9): 1778−1786.]
[37] 张勉羚, 肖建辉, 孙超, 等. 甘薯蛋白水解物对钙离子诱导下海藻酸钠凝胶形成的影响[J]. 食品科学技术学报, 2023, 41(4): 67−81. [ZHANG Mianling, XIAO Jianhui, SUN Chao, et al. Effects of sweet potato protein hydrolysates on formation of calcium ion-induced sodium alginate gel[J]. Journal of Food Science and Technology, 2023, 41(4): 67−81.]
[38] CHEN J R, XIAO J H, TU J, et al. The alleviative effect of sweet potato protein hydrolysates on the quality deterioration of frozen dough bread in comparison to trehalose[J]. LWT, 2023, 175(2): 114505.
[39] GAO J R, TANG Z S, HE S, et al. The foaming properties of sweet potato protein hydrolysates produced by Alcalase and Ficin[J]. J Sci Food Agric, 2023, 103(8): 4157−4163.
[40] 李郁, 木泰华, 孙艳丽, 等. 不同溶剂和超滤浓缩倍率对甘薯蛋白提取及纯度的影响[J]. 食品研究与开发, 2007, 139(6): 1−4. [LI Yu, MU Taihua, SUN Yanli, et al. Effect of different solvents and ultrafiltration on the extraction and purity of sweet potato protein[J]. Food Research and Development, 2007, 139(6): 1−4.]
[41] 李鹏高. 甘薯贮藏蛋白的抗癌活性及其机制研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012. [LI Penggao. Anti-cancer activities of the storage protein of the sweet potatoes and its underlying mechanisms[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2012.]
[42] 师超, 卞科. 黄肉甘薯可溶性蛋白提取工艺的研究[J]. 安徽农学报, 2013, 19(21): 77−78,89. [SHI Chao, BIAN Ke. Extraction technology of soluble protein from yellow flesh sweet potato[J]. Anhui Journal of Agriculture, 2013, 19(21): 77−78,89.]
[43] 何春玫, 李润峰, 覃水琳. 响应面法优化超声辅助提取红薯粗蛋白工艺研究[J]. 广西农学报, 2020, 35(2): 32−36,42. [HE Chunmei, LI Runfeng, QIN Shulin. Optimize ultrasonic-assisted extraction process of crude protein from sweet potato by response surface methodology[J]. Guangxi Journal of Agriculture, 2020, 35(2): 32−36,42.]
[44] 费扬, 张吴昊, 霍艳荣, 等. 预加热处理对甘薯蛋白乳化特性的影响[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(5): 88−95. [FEI Yang, ZHANG Wuhao, HUO Yanrong, et al. Effects of pre-heat treatment on emulsifying properties of sweet potato protein[J]. Chinese Journal of Cereals and Oils, 2023, 38(5): 88−95.]
[45] 崔珊珊, 木泰华, 孙红男, 等. 超高压下酶解处理对甘薯蛋白乳化特性的影响[J]. 核农学报, 2016, 30(6): 1117−1125. [Cui Shanshan, Mu Taihua, Sun Hongnan, et al. Effect of enzymatic treatment under high hydrostatic pressure on the emulsifying properties of sweet potato protein[J]. Journal of Nuclear Agriculture, 2016, 30(6): 1117−1125.]
[46] 侯利霞, 赵舒畅, 王彦波, 等. 甘薯淀粉生产废液中蛋白质不同提取方法的比较研究[J]. 粮油加工, 2010(12): 105−108. [HOU Lixia, ZHAO Shuchang, WANG Yanbo, et al. Comparative study on different extraction methods of protein from the waste liquid of sweet potato starch production[J]. Grain and Oil Processing, 2010(12): 105−108.]
[47] 孟宪军, 包红娜, 梁婧婧. 甘薯糖蛋白的氨基酸组成分析[J]. 食品工业科技, 2009, 30(8): 303−305. [MENG Xianjun, BAO Hongna, LIANG Jingjing. Amino acid analysis of sweet potato glycoprotein[J]. Food Industry Science and Technology, 2009, 30(8): 303−305.]
[48] 师超, 何雅蔷, 卞科. 黄肉甘薯糖蛋白提取工艺的研究[J]. 安徽农学通报, 2013, 19(19): 119−121. [SHI Chao, HE Yaqiang, BIAN Ke. Study on the extraction technology of glycoprotein from yellow flesh sweet potato[J]. Anhui Agricultural Bulletin, 2013, 19(19): 119−121.]
[49] 刘倩倩. 正交优化甘薯淀粉渣中糖蛋白提取工艺[J]. 山东化工, 2015, 44(13): 25−26,30. [LIU Qianqian. Optimization of extraction technology for glycoprotein from sweet potato residues by orthogonal optimization experiment[J]. Shandong Chemical Industry, 2015, 44(13): 25−26,30.]
[50] 郭素芬, 唐晓云, 王玉梅, 等. 甘薯糖蛋白对动脉粥样硬化家兔血脂和一氧化氮影响的实验研究[J]. 牡丹江医学院学报, 2005(6): 4−8. [GUO Sufen, TANG Xiaoyun, WANG Yumei, et al. Reserch on effect of batata glycoprotein on blood lipids and no in atherosclerotic rabbits[J]. Journal of Mudanjiang Medical College, 2005(6): 4−8.]
[51] 秦宏伟, 杨红花, 王明林. 甘薯糖蛋白分离纯化工艺研究[J]. 粮食与油脂, 2006(2): 27−29. [QIN Hongwei, YANG Honghua, WANG Minglin. Study on extraction technology of sweet potato glycoprotein from sweet potato[J]. Grain and Oil, 2006(2): 27−29.]
[52] 罗秋水, 上官新晨, 蒋艳, 等. 紫红薯糖蛋白体外抗氧化活性研究[J]. 江西农业大学学报, 2012, 34(4): 809−813. [LUO Q S, SHANGGUAN X C, JIANG Y, et al. Antioxidant activity of glycoprotein from the purple sweet potato[J]. Journal of Jiangxi Agricultural University, 2012, 34(4): 809−813.]
[53] 陈嘉茹, 牛丽亚, 周庆红, 等. 不同分子质量甘薯蛋白水解物对冷冻面团和面包品质的影响[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(10): 76−83. [CHEN Jiaru, NIU Liya, ZHOU Qinghong, et al. Effects of sweet potato protein hydrolysates with different molecular weights on quality of frozen dough and bread[J]. Chinese Journal of Cereals and Oils, 2022, 37(10): 76−83.]
[54] 崔珊珊. 超高压处理甘薯蛋白酶解产物乳化特性的研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2016. [CUI Shanshan. The study on emulsifing properties of sweet potato hydrolysates with high pressure treatment[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2016.]

［55］王硕. 甘薯 ACE 抑制肽的制备及其降血压活性研究[D]. 北京：中国农业科学院, 2011. ［WANG Shuo. The study on preparation of ACE inhibitory peptides from sweet potato and its antihypertensive activity[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2011. ］
［56］FALADE O E. 超声波—微波和高静水压对甘薯蛋白肽乳化液界面稳定性的影响研究[D]. 北京：中国农业科学院, 2022. ［Study on the effects of ultrasound-microwave and high hydrostatic pressure on the interfacial stability of sweet potato protein peptide emulsion[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2022. ］
［57］张苗. 甘薯蛋白酶解肽的抗氧化及结肠癌活性研究[D]. 北京：中国农业科学院, 2012. ［ZHANG Miao. Antioxidant and anti-colon cancer activity of enzymatic peptide from sweet potato protein [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2012. ］
［58］窦刚. 甘薯蛋白多肽的自由基清除活性研究[J]. 食品研究与开发, 2013, 34(3)：5−8. ［DOU Gang. Free radical scavenging activity of peptides digested from sweet potato protein[J]. Food Research and Development, 2013, 34(3)：5−8. ］
［59］石雨, 王道园, 鲁卫卫, 等. 甘薯蛋白多肽的制备及其对 DPPH 自由基清除作用[J]. 食品科技, 2010, 35(5)：168−172. ［SHI Yu, WANG Daoyuan, LU Weiwei, et al. Preparation and DPPH free radicals scavenging activity of peptides derived from sweet potato protein[J]. Food Science and Technology, 2010, 35(5)：168−172. ］
［60］吴广辉, 毕韬韬. 红薯营养价值及综合开发利用研究进展[J]. 食品研究与开发, 2015, 36(20)：189−192. ［WU Guanghui, BI Taotao. Nutritional value and comprehensive development and utilization of sweet potato[J]. Food Research and Development, 2015, 36(20)：189−192. ］
［61］HOU W C, CHEN Y C, CHEN H J, et al. Antioxidant activities of trypsin inhibitor, a 33 kDa root storage protein of sweet potato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam cv. Tainong 57)[J]. Agric Food Chem, 2001, 49(6)：2978−81.
［62］谢子玉, 王可尔, 赵雯靓, 等. 不同肉色甘薯的营养成分与生物活性[J]. 浙江农业学报, 2021, 33(2)：183−192. ［XIE Ziyu, WANG Keer, ZHAO Wenliang, et al. Nutritional components and bioactivities of sweet potatoes with different flesh colors[J]. Journal of Zhejiang Agriculture, 2021, 33(2)：183−192. ］
［63］HOU W C, HAN C H, CHEN H J, et al. Storage proteins of two cultivars of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) and their protease hydrolysates exhibited antioxidant activity *in vitro*[J]. Plant Sci, 2005, 168(2)：449−456.
［64］WU C Y, LIN K W. The antioxidative characteristics of taro and sweet potato protein hydrolysates and their inhibitory capability on angiotensin converting enzyme[J]. Food Sci Technol Res, 2017, 23(6)：845−853.
［65］王勇, 李彦军, 王楠, 等. 复合菌共生发酵法酶解甘薯蛋白制备生物活性肽的研究[J]. 农产品加工, 2016(22)：8−12. ［WANG Yong, LI Yanjun, WANG Nan, et al. The study for complex symbiotic fermentation of sweet potato protein to prepare bioactive peptides[J]. Agricultural Product Processing, 2016(22)：8−12. ］
［66］师超, 林江涛, 卞科. 黄肉甘薯糖蛋白的抗氧化作用研究[J]. 安徽农学通报, 2013, 19(18)：18−19,35. ［SHI Chao, LIN Jiangtao, BIAN Ke. Study on anti-oxidation activitys of glycoprotein extracted from yellow flesh sweet potato[J]. Anhui Agricultural Bulletin, 2013, 19(18)：18−19,35. ］
［67］刘艺苑, 何理斌, 高璐, 等. 川楝素抗肿瘤作用研究进展[J]. 新中医, 2023, 55(15)：35−39. ［LIU Yiyuan, HE Libin, GAO Lu, et al. Progress of antitumor effects of neem[J]. New Chinese Medicine, 2023, 55(15)：35−39. ］
［68］刘主, 朱必凤, 彭凌, 等. 甘薯糖蛋白降血糖与抗氧化作用研究[J]. 食品科学, 2008, 29(11)：582−584. ［LIU Zhu, ZHU Bifeng, PENG Ling, et al. Study on hypoglycemic effect and antioxidation of sweet potato glycoprotein[J]. Food Science, 2008, 29(11)：582−584. ］
［69］LI P G, MU T H, DENG L. Anticancer effects of sweet potato protein on human colorectal cancer cells[J]. World J Gastroenterol, 2013, 19(21)：3300−8.
［70］国鸽, 岳嵘, 张靖杰, 等. 甘薯蛋白对 DMH/DSS 诱导的肥胖小鼠炎症相关结肠癌的抑制作用[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(12)：4630−4637. ［GUO Ge, YUE Rong, ZHANG Jingjie, et al. Suppression of DMH/DSS induced inflammation associated colorectal cancer by sweet potato protein in obese mice[J]. Journal of Food Safety and Quality Testing, 2017, 8(12)：4630−4637. ］
［71］张靖杰, 李鹏高. 实时荧光定量 PCR 法评价甘薯蛋白对结直肠癌移植瘤荷瘤鼠肿瘤相关因子的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(18)：4781−4786. ［ZHANG Jingjie, LI Penggao. Evaluation of the effects of sweet potato protein on tumor-associated factors in the colorectal cancer cells-transplanted nude mice by real-time quantitative PCR[J]. Journal of Food Safety and Quality Inspection, 2018, 9(18)：4781−4786. ］
［72］YANG C, ZHANG J J, ZHANG X P, et al. Sporamin suppresses growth of xenografted colorectal carcinoma in athymic BALB/c mice by inhibiting liver *β*-catenin and vascular endothelial growth factor expression[J]. World J Gastroenterol, 2019, 25(25)：3196−3206.
［73］张苗, 木泰华. 预热处理对甘薯蛋白酶解特性的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(S1)：356−362,383. ［ZHANG Miao, MU Taihua. Effects of preheating treatment on enzymolysis characteristics of sweet potato protein[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2012, 28(S1)：356−362,383. ］
［74］QIAN C J, CHEN X Y, QI Y X, et al. Sporamin induces apoptosis and inhibits NF-*κ*B activation in human pancreatic cancer cells[J]. Tumour Biol, 2017, 39(7)：1010428317706917.
［75］YAO J, QIAN C J. Sporamin induce apoptosis in human tongue carcinoma cells by down-regulating Akt/GSK-3 signaling [J]. Fundam Clin Pharmacol, 2011, 25(2)：229−236.
［76］TIAN C, WANG M M, LIU S S, et al. A new glycoprotein SPG-8700 isolated from sweet potato with potential anti-cancer activity against colon cancer[J]. Nat Prod Res, 2019, 33(16)：2322−2328.
［77］LI Z X, YU Y, WANG M M, et al. Anti-breast cancer activity of SPG-56 from sweet potato in MCF-7 bearing mice in situ through promoting apoptosis and inhibiting metastasis[J]. Sci Rep, 2019, 9(1)：146.
［78］WANG M M, MA H, TIAN C, et al. Bioassay-guided isolation of glycoprotein SPG-56 from sweet potato Zhongshu-1 and its anti-colon cancer activity *in vitro* and *in vivo*[J]. J Funct Foods, 2017, 35：315−324.
［79］BOWER R H. Nutrition and immune function[J]. Nutr Clin Pract, 1990, 5(5)：189−95.
［80］阚建全, 阎磊, 陈宗道, 等. 甘薯糖蛋白的免疫调节作用研究[J]. 西南农业大学学报, 2000(3)：257−260. ［KAN Jianquan, YAN Lei, CHEN Zongdao, et al. Studies on immunomodulation function of sweet potato glycoprotein[J]. Journal of Southwest Agricultural University, 2000(3)：257−260. ］
［81］刘主, 朱必凤, 彭凌, 等. 甘薯糖蛋白 SPG-1 抗肿瘤及免疫调

节作用研究[J]. 食品科学, 2007(5): 312−316. [LIU Zhu, ZHU Bifeng, PENG Ling, et al. Experimental study of SPG-1 on antitumor and immune activity of tumor mice[J]. Food Science, 2007(5): 312−316.]
[82] XIA X J, LI G N, ZHENG J, et al. Immune activity of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) glycoprotein after enzymatic and chemical modifications[J]. Food Funct, 2015, 6(6): 2026−2032.
[83] NAZIR M A, MU T H, ZHANG M. Preparation and identification of angiotensinI-converting enzyme inhibitory peptides from sweet potato protein by enzymatic hydrolysis under high hydrostatic pressure[J]. Int J Food Sci Technol, 2020, 55(2): 482.
[84] lSHIGURO K, SAMESHIMA Y, KUME T, et al. Hypotensive effect of a sweetpotato protein digest in spontaneously hypertensive rats and purification of angiotensin I-converting enzyme inhibitory peptides[J]. Food Chem, 2012, 131(3): 774−779.
[85] 刘主, 彭凌, 朱必凤, 等. 甘薯糖蛋白 SPG-1 的分离纯化及其降血糖作用研究[J]. 食品研究与开发, 2006(11): 68−72. [LIU Zhu, PENG Ling, ZHU Bifeng, et al. Studies of SPG-1 on purification and reducing serum glucose[J]. Food Research and Development, 2006(11): 68−72.]
[86] 梁婧婧, 苏锡辉, 孟宪军, 等. 甘薯水溶性糖蛋白对大鼠脂肪肝及羟甲基戊二酸单酰辅酶 A 还原酶的影响[J]. 食品科技, 2013, 38(8): 95−97. [LIANG Jingjing, SU Xihui, MENG Xianjun, et al. Effect on fatty liver and HMG-COA reductase in rats of SPG[J]. Food Science and Technology, 2013, 38(8): 95−97.]
[87] 李亚娜, 阚建全, 陈宗道, 等. 甘薯糖蛋白的降血脂功能[J]. 营养学报, 2002(4): 433−434. [LI Yana, KAN Jianquan, CHEN Zongdao, et al. Antilipidemic effect of glycoprotein from sweet potato[J]. Journal of Nutrition, 2002(4): 433−434.]
[88] 李鹏高, 熊志冬, 木泰华. 甘薯 Sporamin 蛋白预防昆明小鼠肥胖的实验研究[C]//中国营养学会. 第十二届全国营养科学大会论文汇编, 2015: 2. [LI Penggao, XIONG Zhidong, MU Taihua. Experimental study on the prevention of obesity in Kunming mice by sweet potato Sporamin protein[C]//Chinese Nutrition Society. Proceedings of the 12 th National Conference on Nutritional Sciences, 2015: 2.]
[89] 熊志冬, 李鹏高, 邓乐, 等. 甘薯 sporamin 蛋白对 3T3-L1 前脂肪细胞分化和增殖的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(8): 2892−2898. [XIONG Zhidong, LI Penggao, DENG Le, et al. Differentiation-and proliferation-inhibitory effects of sporamin from sweet potato on 3T3-L1 preadipocytes[J]. Chinese Agricultural Science, 2009, 42(8): 2892−2898.]