李云亮, 王晓静, 阮思煜, 等. 玉米多肽制备方法及其功能活性研究进展 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(2): 434−441. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020120251

LI Yunliang, WANG Xiaojing, RUAN Siyu, et al. Research Progress on Preparation and Functional Activity of Corn Polypeptides[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(2): 434−441. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020120251

玉米多肽制备方法及其功能活性研究进展

李云亮, 王晓静, 阮思煜, 刘晓霜, 徐雅宣, 黄姗芬, 马海乐*

（江苏大学食品与生物工程学院, 江苏镇江 212013）

摘　要: 玉米蛋白粉是玉米湿磨生产淀粉中的主要副产品，其低水溶性、必需氨基酸缺陷等因素限制了其在食品工业中的应用。水解玉米蛋白粉制备玉米多肽是其高附加值利用方式之一，可以极大提高玉米蛋白粉的功能性和生物活性。本文重点介绍了玉米多肽的主要制备方法以及玉米多肽在抗氧化、抗血糖、抗高血压、醒酒护肝等方面的生物学功能，归纳总结了现有研究存在的问题及未来的发展前景，对食品企业高效利用玉米蛋白粉开发生物活性肽、提升行业经济效益具有重要意义。

关键词: 玉米多肽, 制备, 生物活性功能

中图分类号: TS213.4　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2022)02−0434−08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2020120251

本文网刊:

Research Progress on Preparation and Functional Activity of Corn Polypeptides

LI Yunliang, WANG Xiaojing, RUAN Siyu, LIU Xiaoshuang, XU Yaxuan, HUANG Shanfen, MA Haile*

（School of Food and Biological Engineering, Jiangsu Univercity, Zhenjiang 212013, China）

Abstract: Corn gluten meal is a major by-product of corn wet-milling process in the starch industry. The low water solubility and deficiency of essential amino acids of corn gluten meal limits its application in the food industry, while corn polypeptides after enzymatic hydrolysis can greatly improve its functions and biological activities, it is one of the high value-added utilization methods. This review encompasses the studies reported to date on the main preparation methods of corn polypeptides, and also describes its bioactivities including antioxidant, antiglycemia, antihypertensive, hepatoprotective, pointing out the existing problems and future development prospects. The paper is of great significance for food enterprises to utilize corn gluten meal efficiently to develop bioactive peptides and improve economic benefits of the industry.

Key words: corn polypeptides; preparation; biological activities

玉米是世界上不可缺少的粮食作物和经济作物[1], 也是我国传统的农作物。玉米蛋白粉是玉米籽粒湿磨法生产淀粉中的副产品, 也称为玉米黄粉、玉米麸质粉, 含有大量的蛋白质、淀粉、纤维素等营养物质, 粗蛋白含量约占 60%, 其中玉米醇溶蛋白约为 68%, 谷蛋白约为 28%, 还有极少量的球蛋白和白蛋白[2−3]。但由于玉米蛋白粉水溶性差, 且缺少人体必需的赖氨酸和色氨酸, 导致其生物利用率低, 长期以来主要作为廉价饲料原料或当作废弃物向环境中排放, 造成资源浪费、环境污染等问题[4]。

为提高玉米蛋白粉的附加值, 以玉米蛋白粉为原料, 利用现代生物技术改变蛋白质的结构解决其水溶性差的问题, 用以制备多种生物活性肽, 对发展新食品资源、保护环境具有重要意义。此外, 类蛋白反应在修饰蛋白质、改善蛋白功能性方面展现出巨大的优势, 目前是学者研究蛋白质的新热点[5−6], 该反应可以将限制性氨基酸补充到多肽中, 提高蛋白质的营养价值[7]。国内外关于类蛋白的研究很多, 但关于改

收稿日期: 2020−12−28

基金项目: 国家自然科学基金-青年项目（31701538）; 江苏省高等学校自然科学研究面上项目（17KJB550001）; 江苏省研究生科研与实践创新计划项目（KYCX18_2279）。

作者简介: 李云亮（1986−）, 男, 博士, 讲师, 研究方向: 食品物理加工技术、生物活性物质开发、农产品精深加工, E-mail: liyunliang@ujs.edu.cn。

*** 通信作者:** 马海乐（1963−）, 男, 博士, 二级教授, 研究方向: 食品物理加工技术、食品生物制造（酶解、发酵、提取）、农产品初加工（清洗、干燥、杀菌）、加工装备及其智能化, E-mail: mhl@ujs.edu.cn。

造玉米蛋白的类蛋白反应研究较少，国内有学者[8]将玉米蛋白和大豆蛋白进行类蛋白反应，生成的物质同时具有玉米蛋白和大豆蛋白中的所有氨基酸，该研究为今后利用类蛋白反应改善玉米蛋白的生物效价和功能特性，综合利用玉米资源提供了新思路。

玉米多肽是玉米蛋白粉的水解产物，具有营养丰富、食用安全性高、易于消化吸收等特点[9]。目前，利用蛋白酶的特异性水解玉米蛋白粉是比较通用的制备玉米多肽的方法，此外，化学降解和微生物发酵也是玉米多肽的制备方法。已有研究发现玉米多肽具有多种生物活性功能，如抗氧化、降血糖、降血压、醒酒护肝等[10]，拥有很大的开发潜力。本文重点介绍了玉米多肽的制备和生物学功能两方面的研究现状，并提出了现有研究的问题及未来的发展前景，对当前玉米淀粉加工企业转型优化升级，利用玉米蛋白粉开发高附加值玉米生物活性肽产品，提升行业经济效益、促进科技进步具有重要意义。

1　玉米多肽的制备

1.1　蛋白酶解法

蛋白酶解法是利用酶的特异性，与底物在温和的条件下进行反应，不仅能在特定的环境中通过定位水解蛋白质形成目标肽类，而且也能更有效地控制其水解程度，更好地满足实际的生产要求。

酶解法包括单一酶解法和复合酶解法。于亚莉等[11]以玉米胚芽粕醇溶蛋白为原料，分别采用酸性蛋白酶、中性蛋白酶、碱性蛋白酶水解玉米胚芽粕蛋白，结果发现碱性蛋白酶的酶解产物抗氧化活性最好，是制备抗氧化肽的最佳蛋白酶。李艳娟等[12]采用复合酶解法制备玉米多肽，将碱性蛋白酶和木瓜蛋白酶按 1∶1 比例混合后酶解玉米胚蛋白，在最佳酶解条件下制备的玉米多肽还原力为 0.299，水解速率较单一酶解法快。Wang 等[13]提出了用海藻酸钠-壳聚糖载体固定化双酶制备玉米活性肽的新方法，该方法制得的玉米多肽具有良好的抗氧化能力，在乙醇溶液中，玉米蛋白中的醇溶蛋白更易溶解到反应体系中，水解度高于常规方法，该研究对玉米多肽的制备和工业应用十分有价值。

酶解法因其优点、多肽得率高而越来越受关注，近年来，超声、微波等物理加工手段也用于辅助酶解制备玉米活性多肽[14−15]。赵凤影等[16]在用酶解法制备玉米抗氧化多肽时，将玉米蛋白粉加水溶解后，先用微波预处理 2 min，晾凉后再加入碱性蛋白酶进行水解，此操作可以有效提高玉米蛋白的水解度，缩短水解时间，通过实验设计得到微波协同酶解法制备玉米多肽的最佳工艺条件为：微波功率 400 W，微波时间 2 min，酶添加量为 9000 U/g，酶解时间 2.5 h，温度 45 ℃，pH 为 8.9。Zhou 等[17]证明了单频超声预处理玉米蛋白粉，酶解反应速率比未进行超声预处理的对照组提高了 10.98%。王珂等[18]发现超声波预处理玉米胚芽蛋白可以显著提高产物多肽的转化率和 ACE 抑制活性，使用其实验室自主研发的聚能逆流双频、发散三频和双频超声设备预处理玉米胚芽粕，得到最佳超声工作模式为 20/40 kHz 交替双频聚能逆流式超声，通过优化超声预处理参数得到最佳酶解条件，此条件下蛋白转化率和产物多肽的 ACE 抑制活性均高于未超声预处理组。然而，大多数研究都是在酶解前利用超声对玉米蛋白粉进行预处理，而鲜少将超声处理与酶解过程同步进行，因此 Qu 等[19]引用固定化酶技术，研究了三频超声同步酶解处理对玉米蛋白粉性能、动力学和热力学的影响，结果表明，在最佳条件下，与未经过超声的对照组相比，三频超声处理后的水解度、肽浓度、ACE 抑制活性和相对酶活性分别提高了 20.6%、34.4%、24.1% 和 25.8%。但是目前尚未有研究表明，超声、微波等物理加工手段用于辅助制备玉米多肽时，与酶解过程同步操作和酶解前预处理操作两者哪个效果更佳。

1.2　微生物发酵法

微生物发酵法是指在微生物发酵生长过程中，利用其产生的微生物蛋白酶系直接降解蛋白质，制备玉米多肽。此方法与传统酶解方法相比，可以有效降低玉米多肽的苦味，简化操作流程，降低生产成本。牟金秀[20]采用微生物发酵法制备玉米多肽，从玉米加工厂附近的土壤中分离出发酵菌种枯草芽孢杆菌，对其进行驯化后证实该菌种能够生产玉米多肽，最佳发酵时间为 85 h，并且在最佳水解条件下玉米多肽的得率可达 23%，高于最初转化率。祁尼娜等[21]利用纳豆杆菌，在对玉米黄粉进行碱性预处理后，发酵制得玉米多肽，肽转化率为 22.06%。陈丹阳等[22]利用枯草芽孢杆菌发酵玉米黄粉制得玉米多肽，对发酵参数进行优化后，获得的可溶性玉米多肽的含量提高了 13.3 倍，该多肽中分子质量小于 1000 Da 的低聚肽占有 76.36%，具有较高的抗氧化性。Jiang 等[23]以玉米蛋白粉为原料，用枯草芽孢杆菌固态发酵生产生物活性肽，在优化的发酵条件下，每克初始干玉米蛋白粉可获得玉米多肽的量最高达到 369.4 mg，通过注射 D-半乳糖建立的大鼠衰老模型证实，该玉米多肽具有很好的体内抗氧化能力，此研究为固态发酵最大限度生产玉米多肽提供了数据参考。

目前微生物发酵法生产玉米多肽的技术缺陷在于，微生物在培养过程中会利用一部分的多肽用于自身的新陈代谢造成多肽得率无法进一步提高，某些微生物的氨基酸脱氨酶的活性较高会产生较大的异味，所以该技术对微生物菌种的选择依赖性较大，国内使用此方法制备玉米多肽的研究较少，因此从自然界中筛选或者定向进化出优良发酵菌株的研究具有重要意义。

1.3　其他方法

化学降解法又称酸碱降解法，是在酸碱条件下对蛋白质进行水解，虽然工艺简单，但是反应过程不易控制。因该方法过程中使用的酸碱容易破坏玉米

蛋白本身的营养成分，而且可能会产生类似 Lys-Ala 的有毒物质[24]，所以该方法较少使用，目前已有研究发现亚临界水可作为一种新的样品处理技术制备玉米多肽。

亚临界水是指比水临界温度（374.2 ℃）和临界压力（22.1 MPa）稍微低一些的低温压下成液体状态的水，与普通的水相比，亚临界水具有酸、碱催化剂的催化功能，可以作为一种绿色高效的提取溶剂，用于提取原料中的多肽和蛋白质，同时，亚临界水的性质随温度和压力不同而发生相应变化，可以调节控制提取过程[25−26]。陈晋阳[27] 利用亚临界水的高活性制备玉米多肽，将玉米渣和去离子水加到水热高压反应釜中水解，水解完成后抽滤得到多肽水解液并进行脱色处理，脱色后的多肽水解液再经超滤分离、浓缩干燥即可得到玉米多肽，多肽得率最大可达到 34%。这种方法在只加入水的条件下即可短时间（一般在 1 h 以内）水解制得玉米多肽，有效利用玉米资源，操作简单且不会污染环境。因该方法是在高温高压状态下操作，对设备及原料的要求较高，目前国内外利用该技术制备蛋白、多肽类物质的研究多集中于大豆蛋白[28−30]、核桃粕蛋白[31] 等。

2 玉米多肽的生物学功能

2.1 抗氧化活性

玉米多肽的抗氧化活性主要是通过抑制生物大分子过氧化或清除体内羟基自由基·OH 和超氧阴离子自由基·O^{2-}等自由基产物而实现的[32]。Zhou 等[33] 证实了用微生物蛋白酶制备的玉米蛋白水解物可以有效抑制脂质氧化。Wang 等[34] 研究了玉米多肽的体外和细胞内自由基清除能力，发现不同分子量的多肽段均具有良好的羟基自由基、超氧阴离子自由基、ABTS 自由基和氧自由基清除能力，对细胞均表现出明显的保护作用和细胞内活性氧清除能力，而且小分子量的玉米多肽抗氧化活性高于大分子量的玉米多肽，通过 MALDI-TOF/TOF 质谱分析鉴定出一种抗氧化肽序列 Tyr-Phe-Cys-Leu-Thr，该序列对 ABTS 自由基清除能力良好，EC_{50} 值为 37.63 μmol/L，远低于抗氧化剂 Trolox。此外，张淼[35]、胡佳丽[36] 的研究也说明玉米多肽具有抗氧化活性，可以用作天然抗氧化剂替代合成抗氧化剂。已有研究表明，肿瘤、关节炎、心脑血管病等多种疾病的发生都与过剩自由基损害有关，玉米多肽所表现的抗氧化活性，在应对人体老化现象的优势已初步显露，在未来的医药和食品工业中有重要意义。

2.2 降血糖活性

胰高血糖素样肽-1（glucagons-like peptide-1，GLP-1）是由胰高血糖素基因表达，并由肠道 L 细胞分泌的一种肽类激素，具有促进胰岛素的生物合成和分泌、抑制胰高血糖素的分泌、抑制食欲及摄食、延缓胃内容物排空等功能。利用这些功能，通过对清醒大鼠进行 IP 葡萄糖耐量试验（IPGTT），将玉米蛋白水解物注射入大鼠回肠中，刺激大鼠肠道 L 细胞分泌 GLP-1，证明了玉米蛋白水解物对葡萄糖引起的高血糖有明显的抑制作用[37]。另外，Higuchi[38] 研究了口服玉米醇溶蛋白是否可以通过刺激 GLP-1 和葡萄糖依赖性促胰岛素多肽（GIP）分泌来改善葡萄糖耐受性，对正常雄性大鼠和糖尿病模型大鼠进行了 IPGTT，发现正常雄性大鼠口服玉米醇溶蛋白可显著抑制血糖反应，同时血浆 GLP-1 和 GIP 水平立即升高，口服玉米醇溶蛋白也能诱导糖尿病模型大鼠的 GLP-1 分泌和降低血糖反应，即在正常和糖尿病情况下，口服玉米醇溶蛋白均可通过刺激肠促胰岛素分泌来降低血糖。这些研究表明，玉米多肽具有明显的降血糖作用，口服类降血糖产品一直有巨大的市场需求，未来可用于研发具有降血糖功能的玉米多肽产品。

2.3 降血压活性

近年来，高血压已成为世界上最常见且最严重的慢性健康问题之一，并伴有脑血管、心脏和肾脏衰竭等并发症，最常见的降压作用机制是抑制血管紧张素转化酶（Angiotension Converting Enzyme，ACE）的活性，一些 ACE 抑制剂如卡托普利、依那普利、赖诺普利等对降低血压有明显效果，但同时有一定程度的毒副作用，引发头疼、味觉异常、肝脏损失等问题[39−40]。

大量研究表明，玉米蛋白水解物含有的多肽类物质可以抑制体内 ACE 的活性从而达到降低血压的目的，是很好的 ACE 抑制剂，且与人工合成的 ACE 抑制剂相比，具有安全、无毒副作用等特点[41−42]。早在 1993 年就有日本学者[43] 发现从 α-玉米醇溶蛋白酶解物中得到的三肽（Leu-Pro-Pro）具有显著的 ACE 抑制活性，其作用效果与降血压药物卡托普利相当，在此之后越来越多人关注玉米多肽的降血压活性。王丽萍[44] 以食用玉米蛋白为原料酶解得到活性多肽，发现与其他蛋白水解物相比，玉米蛋白水解肽对 ACE 的抑制作用更明显，而且杂质少、制备工艺简单。李世敏等[45] 研究了玉米多肽对原发性高血压大鼠的降血压作用及其机制，发现从玉米蛋白分离出来的活性多肽经灌胃后均能显著降低原发性高血压大鼠的血压，并且血液中的 ACE 活性、血管紧张素Ⅱ水平与降血压程度呈明显相关性，说明玉米活性多肽的降血压作用是通过抑制体内 ACE 活性、降低血管紧张素Ⅱ水平完成的。梁秋芳等[46] 在酶解玉米醇溶蛋白制备 ACE 活性多肽的研究中，鉴定出两种玉米多肽，其氨基酸序列分别为 Ala-Leu-Tyr、Phe-Tyr-Gln，通过模拟胃肠道消化和小肠内壁吸收后，该多肽仍具有良好的 ACE 抑制效果。这类具有抗胃肠蛋白酶消化的 ACE 抑制肽具有很好的应用价值。

2.4 护肝作用

玉米多肽因其具有良好的抗氧化能力，可以抑制肝脏细胞内的氧化应激，而且玉米多肽可以促进人

肝细胞 DNA 的合成，加快细胞增殖分裂，提高细胞活力，一定程度上可以起到修复肝细胞、保护肝脏的作用[47]。

目前已有研究表明，玉米多肽在化学性肝损伤[48]、免疫性肝损伤[49] 和酒精性肝损伤[50−52] 等方面有明显抑制效果。Yu 等[53] 研究了玉米多肽对四氯化碳(CCl_4)致小鼠肝损伤的保护作用，经喂食玉米多肽的小鼠血清中的天冬氨酸转氨酶与丙氨酸转氨酶的活性和肝脏中丙二醛水平显著降低，超氧化物歧化酶活性和谷胱甘肽水平显著升高，生化检查结果辅以肝脏切片的组织病理学检查得出玉米多肽对减轻 CCl_4 诱导的肝细胞损伤具有显著的保护作用，其保护机制是由于玉米多肽具有的抗氧化能力和高 F 值（支链氨基酸与芳香族氨基酸含量的摩尔浓度比值）。Guo 等[49] 以玉米蛋白水解液为原料，研究了玉米多肽对卡介苗/脂多糖诱导的小鼠免疫性肝损伤的保护作用，结果表明，玉米多肽对卡介苗/脂多糖诱导的肝细胞损伤具有显著的保护作用，玉米多肽的剂量为 600 mg/kg bw 时效果最佳，并指出玉米多肽保护肝脏的潜在机制可能是因为其抗氧化能力、清除自由基能力、降低 NO 生成和激活抗氧化酶的能力。Zhang 等[54] 和林兵等[55] 通过对大鼠喂食玉米多肽，证实了玉米多肽对酒精性肝损伤具有一定的抑制作用。刘雪姣[56] 针对玉米多肽的保肝活性，从细胞和动物水平深入研究了其作用机制，结果显示玉米多肽能够通过调节凋亡蛋白的表达，促进肝细胞增殖，并且通过影响肝细胞的能量代谢为细胞提供能量，由此保护肝脏健康。

此外魏康[57] 建立了高脂食诱导的非酒精性脂肪肝损伤大鼠模型和高浓度果糖处理的肝细胞模型，发现玉米多肽可以有效降低模型中脂质堆积的情况，缓解肝损伤，对非酒精性肝损伤的预防效果优于治疗效果，同时玉米多肽可以增强肝细胞的能量代谢和脂质代谢水平，抑制细胞凋亡，保护线粒体的功能完整性，以达到肝保护的作用。

2.5　醒酒作用

乙醇主要由乙醇脱氢酶代谢为乙醛，再由乙醛脱氢酶氧化为乙酸，乙醇脱氢酶和乙醛脱氢酶可以有效调节饮酒后血液中的乙醇和乙醛浓度，加快乙醇在体内的代谢，从而降低醉酒程度和解酒。Yamaguchi 等[58] 以玉米蛋白粉为原料制备玉米多肽，研究其对自发性高血压大鼠酒精代谢的影响，结果发现玉米多肽可使大鼠血液中乙醇和乙醛含量降低。通过对成年男性摄食玉米多肽后酒精代谢的研究进而发现，摄食玉米多肽后血液中丙氨酸和亮氨酸的含量显著升高，产生稳定的 NAD+，即表明玉米多肽对血液中乙醇水平的升高有一定的抑制作用[59]。玉米多肽还可显著激活小鼠肝脏中乙醇脱氢酶的活性，小鼠摄入的玉米多肽含量与体内乙醇含量存在明显的剂量-效应关系，可以显著抑制乙醇含量的升高[60−61]。Yu 等[62] 通过激活乙醇脱氢酶活性，研究玉米多肽促进乙醇代谢的能力，结果显示，分子量小于 1000 Da 的玉米多肽，乙醇脱氢酶的体外活化活性最高，分子量低于 5000 Da 的玉米多肽，可以显著降低小鼠血液中的乙醇浓度。Sun 等[63] 采用超滤法和 Sephadex G-15 对玉米蛋白酶解制备的混合水解物进行分离，并经反向高效液相色谱法进一步分离得到两种玉米多肽，其氨基酸序列分别为 Val-Leu 和 Gly-Met-Leu，通过灌胃实验评价其在体内的酒精代谢活性，结果显示，口服玉米多肽对预防急性酒精中毒有显著效果，玉米多肽能加速酒精在肝脏中的代谢，减轻急性酒精中毒引起的氧化损伤，可作为急性酒精中毒的预防剂。

2.6　其他功能活性

除以上功能活性外，玉米多肽还具有其他方面的活性。玉米多肽具有抗疲劳和提高机体运动能力的功效，将玉米多肽灌胃到小鼠体中，可显著提升小鼠肝糖原含量、降低血浆尿素氮含量和延长小鼠负荷游泳时间[64]。玉米多肽具有抗炎活性[65]，可以显著降低炎症因子 TNF-α 诱导的 Caco-2 细胞产生引起的环氧化酶-2、诱导型一氧化氮合酶和促炎症细胞因子 IL-8 的表达功能，改善炎症反应。Margarita 等[66] 研究发现从优质玉米蛋白分离出来的肽段对人肝癌细胞 HepG2 具有增殖抑制作用，该肽段可以促进凋亡因子的表达，从而诱导癌细胞凋亡。此外还有研究显示，玉米多肽对 ^{60}Co-γ 射线、X 射线、微波具有抗辐射功能[67−69]。

3　玉米多肽研究存在的问题及其发展前景

目前在玉米多肽制备方面，主要还是采用单一的酶解方法，复合酶解法和微生物发酵法很少采用。利用微生物发酵法制备玉米多肽，可以简化操作工艺，降低成本，是未来玉米多肽产业化生产的发展趋势[70]，但要解决因微生物自身代谢使多肽得率受影响以及发酵产生的异味等问题，因此研究优良发酵菌株以解决该法的缺陷十分重要。此外亚临界水法作为制备玉米多肽的新技术，值得深入研究优化。其次，玉米多肽具有的抗血压、降血糖等多种生物活性功能，已展现出巨大的开发潜力，但目前的研究大多停留在实验室阶段，而很少实际投入生产应用中，而且玉米多肽的生物活性研究多为体外或动物实验，在人体内作用机理有待考察，另外玉米多肽的生物活性是否会因为食品加工过程（高温或冷冻）而失活也有待研究。这些问题若得到解决，对人类具有重要的经济效益、社会效益。

玉米多肽的开发有很广阔的市场空间，利用玉米多肽抗炎、降血压、降血糖功能，可以研制肽类药物，改善或治疗相关疾病；玉米多肽的抗疲劳功能可以用来开发功能性食品，作为运动员的营养补给食物、运动训练食物，可以恢复运动后的疲劳感；根据玉米多肽醒酒护肝功能可以开发醒酒饮料，减少醉酒时间、降低醉酒程度，保护肝脏；玉米多肽也可以作

为添加剂加入到食品中，延缓食品氧化，延长食品货架期。玉米多肽在食品、医学领域中的重要意义已经吸引了很多研究者，国外已经研制出玉米活性肽功能性食品和添加剂并投入市场[71]，我国对玉米多肽的开发研究还有很高的发展空间。

参考文献

[1] 陆启明, 陈志成, 何爱丽. 玉米淀粉加工副产物玉米蛋白粉的应用与开发[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(3): 467−474. [LU Qiming, CHEN Zhicheng, HE Aili. Application and development of corn protein powder from corn starch processing byproduct[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2018, 9(3): 467−474.]

[2] 杨华青, 侯威, 赵磊, 等. 玉米黄粉二步酶解制备高 F 值寡肽的工艺优化[J]. 食品科学技术学报, 2019, 37(6): 100−107. [YANG Huaqing, HOU Wei, ZHAO Lei, et al. Optimization on preparation of high fischer ratio oligopeptides by two-step enzymolysis from corn yellow powder[J]. Journal of Food Science and Technology, 2019, 37(6): 100−107.]

[3] ZHOU Cunshan, HU Jiali, MA Haile, et al. Antioxidant peptides from corn gluten meal: Orthogonal design evaluation[J]. Food chemistry, 2015, 187: 270−278.

[4] 刘骥, 易春霞, 韩业东, 等. 微生物发酵玉米蛋白粉生产富肽饲料的研究[J]. 饲料工业, 2018, 39(17): 36−39. [LIU Ji, YI Chunxia, HAN Yedong, et al. Study on the production of peptide-rich feed by microbial fermentation of corn protein meal[J]. Feed Industry, 2018, 39(17): 36−39.]

[5] 朱磊, 张馨心, 谢艳英, 等. 类蛋白反应的作用机制及其对海洋源蛋白修饰的研究进展[J]. 食品工业科技, 2020, 41(9): 362−367. [ZHU Lei, ZHANG Xinxin, XIE Yanying, et al. Research progress on mechanism of plastein reactions and its modification function of marine proteins[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(9): 362−367.]

[6] 王再扬, 曹玉惠, 赵元晖, 等. 类蛋白反应修饰的牡蛎肽锌结合物的生物利用性[J]. 中国食品学报, 2020, 20(3): 46−51. [WANG Zaiyang, CAO Yuhui, ZHAO Yuanhui, et al. Bioavailability of oyster-derived zinc binding peptide modified by plastein reaction[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020, 20(3): 46−51.]

[7] 苏亚文, 魏婉璐, 赵前程, 等. 类蛋白反应研究进展[J]. 广州化工, 2019, 47(15): 25−27, 37. [SU Yawen, WEI Wanlu, ZHAO Qiancheng, et al. Research progress on plastein reaction[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2019, 47(15): 25−27, 37.]

[8] 周遵来. 玉米蛋白和大豆蛋白合成类蛋白的研究 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2006: 1−2. [ZHOU Zunlai. Studies on plastein synthesis by corn protein and soy protein[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2006: 1−2.]

[9] 王远铜. 玉米蛋白肽: 一种具有特殊生物活性的食用蛋白[J]. 食品安全导刊, 2019(15): 158−159. [WANG Yuanjian. Corn protein peptide: Edible protein with special biological activity[J]. China Food Safety Magazine, 2019(15): 158−159.]

[10] ZHU Biyang, HE Hui, HOU Tao. A comprehensive review of corn protein-derived bioactive peptides: Production, characterization, bioactivities, and transport pathways[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2019, 18(1): 329−345.

[11] 于亚莉, 王立军, 宋雪梅, 等. 生物酶解法制备玉米胚芽粕醇溶蛋白抗氧化肽的工艺研究[J]. 农业科学, 2017, 7(1): 44−53. [YU Yali, WANG Lijun, SONG Xuemei, et al. Study on preparation of antioxidant peptides from corn germ meal gliadin by biological enzymolysis[J]. Journal of Agricultural Sciences, 2017, 7(1): 44−53.]

[12] 李艳娟, 李书国. 复合蛋白酶法制备玉米胚蛋白多肽及其抗氧化活性研究[J]. 粮油食品科技, 2015, 23(2): 73−78. [LI Yanjuan, LI Shuguo. Preparation of corn germ protein polypeptide by compound protease hydrolysis and its antioxidant activity[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2015, 23(2): 73−78.]

[13] WANG Yanwei, CHEN Haixia, WANG Jia, et al. Preparation of active corn peptides from zein through double enzymes immobilized with calcium alginate-chitosan beads[J]. Process Biochemistry, 2014, 49(10): 1682−1690.

[14] 姬晨曦, 杜晶芳, 王诗馨, 等. 酶解法制备玉米蛋白抗氧化肽的工艺研究[J]. 农产品加工, 2019(17): 51−55. [JI Chenxi, DU Jingfang, Wang Shixin, et al. Enzymatic hydrolysis of corn protein antioxidant peptides[J]. Farm Products Processing, 2019(17): 51−55.]

[15] REN Xiaofeng, ZHANG Xi, LIANG Qiufang, et al. Effects of different working modes of ultrasound on structural characteristics of zein and ACE inhibitory activity of hydrolysates[J]. Journal of Food Quality, 2017(2017): 1−8.

[16] 赵凤影, 关海宁, 于新月, 等. 玉米抗氧化肽制备及其对血管紧张素转化酶的抑制作用[J]. 保鲜与加工, 2017(5): 46−51. [ZHAO Fengying, GUAN Haining, YU Xinyue, et al. Preparation of antioxidant peptides from corn gluten meal and its inhibitory effects against angiotensin converting enzyme[J]. Storage and Process, 2017(5): 46−51.]

[17] ZHOU Cunshan, HU Jiali, YU Xiaojie, et al. Heat and/or ultrasound pretreatments motivated enzymolysis of corn gluten meal: Hydrolysis kinetics and protein structure[J]. LWT - Food Science and Technology, 2017, 77: 488−496.

[18] 王珂, 马海乐, 李景, 等. 超声预处理辅助酶解玉米胚芽 ACE 抑制肽的研究[J]. 食品工业科技, 2018, 39(9): 11−15. [WANG Ke, MA Haile, LI Jing, et al. Study on effects of ultrasonic pretreatment on enzymolysis preparation of ACE-inhibitory peptides from corn germ protein[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(9): 11−15.]

[19] QU Wenjuan, SEHEMU Raya Masoud, ZHANG Tian, et al. Immobilized enzymolysis of corn gluten meal under triple-frequency ultrasound[J]. International Journal of Food Engineering, 2018, 14(5−6).

[20] 牟金秀. 微生物发酵法生产玉米肽的研究 [D]. 济南齐鲁工业大学, 2015: 11−37. [MOU Jinxiu. Microbial fermentation in the production corn peptide research[D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2015: 11−37.]

［21］祁尼娜, 黄妙燕, 马洪娟. 纳豆杆菌发酵玉米粉制备玉米肽生产条件研究[J]. 青岛科技大学学报（自然科学版）, 2015, 36(S2): 84−86, 89. ［QI Nina, HUANG Miaoyan, MA Hongjuan. Conditions of corn peptide production preparation *Bacillus Natto* fermented corn flourt[J]. Journal of Qingdao University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2015, 36(S2): 84−86, 89.］

［22］陈丹阳, 张振洋, 黎剑, 等. 枯草芽孢杆菌发酵玉米黄粉制备可溶性肽[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(14): 78−83. ［CHEN Danyang, ZHANG Zhenyang, LI Jian, et al. Production of soluble peptides from corn gluten meal by *Bacillus subtilis*[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(14): 78−83.］

［23］JIANG Xin, CUI Ziqi, WANG Lihua, et al. Production of bioactive peptides from corn gluten meal by solid-state fermentation with Bacillus subtilis MTCC5480 and evaluation of its antioxidant capacity in vivo[J]. LWT- Food Science and Technology, 2020, 131: 109767.

［24］陈新, 陈庆森, 庞广昌. 酶解玉米蛋白生产生物活性多肽的研究现状及开发趋势[J]. 食品科学, 2004, 25(7): 202−205. ［CHEN Xin, CHEN Qingsen, PANG Guangchang. Present situation and tendency of preparing bioactive peptides by enzymolysising corn gluten meal[J]. Food Science, 2004, 25(7): 202−205.］

［25］RODRIGO M, ESTHER T, MARÍA T S, et al. Supercritical CO_2 and subcritical water technologies for the production of bioactive extracts from sardine (*Sardina pilchardus*) waste[J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2020, 164: 104943.

［26］KIM Dong-Shin, LIM Sang-Bin. Kinetic study of subcritical water extraction of flavonoids from citrus unshiu peel[J]. Separation and Purification Technology, 2020, 250: 117259.

［27］陈晋阳. 玉米渣亚临界水解制备玉米多肽的方法: 中国, 201510147287.5 [P]. 2015-06-24. ［CHEN Jinyang. Preparation of corn polypeptide by subcritical hydrolysis of corn residue: China, 201510147287.5 [P]. 2015-06-24.］

［28］RAMACHANDRAIAH K, BO-BAE KOH, DAVAATSEREN M, et al. Characterization of soy protein hydrolysates produced by varying subcritical water processing temperature[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2017, 43: 201−206.

［29］황윤희, 조형용, 김고래, et al. Hydrolysis of isolate soybean protein using subcritical water[J]. Korean Journal of Food Science and Technology, 2015, 47(6): 772−778.

［30］NDLELA S C, MOURA J M L N D, OLSON N K, et al. Aqueous extraction of oil and protein from soybeans with subcritical water[J]. Journal of the American Oil Chemists Society, 2012, 89(6): 1145−1153.

［31］汪正兴, 韩强, 郜海燕, 等. 响应面试验优化亚临界水提取核桃粕蛋白工艺及其氨基酸分析[J]. 食品科学, 2017, 38(20): 191−196. ［WANG Zhengxing, HAN Qiang, GAO Haiyan, et al. Optimization of subcritical water extraction of walnut meal protein by response surface methodology and amino acid analysis[J]. Food Science, 2017, 38(20): 191−196.］

［32］马伟. 玉米低聚肽的制备、分离及其生物活性研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2015: 4. ［MA Wei. Study on preparation, separation and bioactivity of corn oligopeptides[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2015: 4.］

［33］ZHOU Kequan, SUN Shi, CANNING Corene. Production and functional characterisation of antioxidative hydrolysates from corn protein via enzymatic hydrolysis and ultrafiltration[J]. Food Chemistry, 2012, 135(3): 1192−1197.

［34］WANG Liying, DING Long, WANG Ying, et al. Isolation and characterisation of *in vitro* and cellular free radical scavenging peptides from corn peptide fractions[J]. Molecules, 2015, 20(2): 3221−3237.

［35］张森. 玉米蛋白及其水解物模拟体外消化产物抗氧化活性研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2016: 1−19. ［ZHANG Miao. Antioxidative activities of corn protein and corn protein hydrolysate *in vitro* digests[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2016: 1−19.］

［36］胡佳丽. 基于超声/热处理的玉米蛋白抗氧化肽制备及其特性研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2016: 1−32. ［HU Jiali. Preparation and peptides from characteristics of antioxidant corn gluten meal with the ultrasound/heat pretreatment[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016: 1−32.］

［37］MOCHIDA Taisuke, HIRA Tohru, HARA Hiroshi. The corn protein, zein hydrolysate, administered into the ileum attenuates hyperglycemia via its dual action on glucagon-like peptide-1 secretion and dipeptidyl peptidase-IV activity in rats[J]. Endocrinology, 2010, 151(7): 3094−3095.

［38］HIGUCHI Noriyuki, HIRA Tohru, YAMADA Nao, et al. Oral administration of corn zein hydrolysate stimulates GLP-1 and GIP secretion and improves glucose tolerance in male normal rats and Goto-Kakizaki rats[J]. Endocrinology, 2013, 154(9): 3089−3098.

［39］HUANG W H, SUN J, HE H, et al. Antihypertensive effect of corn peptides, produced by a continuous production in enzymatic membrane reactor, in spontaneously hypertensive rats[J]. Food Chemistry, 2011, 128(4): 968−973.

［40］LIN F, CHEN L, LIANG R, et al. Pilot-scale production of low molecular weight peptides from corn wet milling byproducts and the antihypertensive effects *in vivo* and *in vitro*[J]. Food Chemistry, 2011, 124(3): 801−807.

［41］王晓杰, 丛万锁, 刘晓兰, 等. 玉米 ACE 抑制肽的制备工艺及中试生产[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(7): 158−164. ［WANG Xiaojie, CONG Wansuo, LIU Xiaolan, et al. Preparation of ACE-inhibitory peptide from corn gluten meal and pilot-scale production[J]. Food and Fermentation Industries, 2016, 42(7): 158−164.］

［42］刘子毅, 顾丰颖, 王博伦, 等. 超高压协同碱性蛋白酶制备玉米黄粉 ACE 抑制肽[J]. 食品科学, 2020, 41(4): 222−228. ［LIU Ziyi, GU Fengying, WANG Bolun, et al. Preparation of angiotensin converting enzyme inhibitory peptides from corn gluten meal by ultra-high pressure-assisted alcalase hydrolysis[J]. Food Science, 2020, 41(4): 222−228.］

［43］ARIYOSHI Y. Angiotensin-converting enzyme inhibitors

derived from food proteins[J]. Trends in Food Science & Technology, 1993, 4(5): 139−144.
[44] 王丽萍. 一种降血压活性肽产品的制备: 中国, 200710148671.2 [P]. 2008-02-27. [WANG Liping. Preparation of a kind of antihypertensive active peptide: China, 200710148671.2 [P]. 2008-02-027.]
[45] 李世敏, 刘冬, 孙海燕, 等. 玉米活性多肽降血压作用及其机制的研究[J]. 营养学报, 2007, 29(2): 186−188. [LI Shimin, LIU Dong, SUN Haiyan, et al. Study on the ant-hypertension effect of corn peptide and its mechanism[J]. Acta Nutrimenta Sinica, 2007, 29(2): 186−188.]
[46] 梁秋芳, 任晓锋, 马海乐. 玉米醇溶蛋白 ACE 抑制肽及作为保健食品应用: 中国, 108003229 A[P]. 2018-05-08. [LIANG Qiufang, REN Xiaofeng, MA Haile. Zein ACE inhibitory peptide and its application as health food: China, 108003229 A [P]. 2018-05-08.]
[47] 刘艳, 林峰, 金振涛, 等. 玉米低聚肽促 HL-7702 人肝细胞增殖作用[J]. 食品与发酵工业, 2012, 38(2): 43−46. [LIU Yan, LIN Feng, JIN Zhentao, et al. Proliferation-promoting effects of corn oligopeptides on human hepatocyte line HL-7702 *in vitro*[J]. Food and Fermentation Industries, 2012, 38(2): 43−46.]
[48] LV J, NIE Z K, ZHANG J L, et al. Corn peptides protect against thioacetamide-induced hepatic fibrosis in rats[J]. Journal of Medicinal Food, 2013, 16(10): 912−919.
[49] GUO H, SUN J, HE H, et al. Antihepatotoxic effect of corn peptides against *Bacillus* calmette-guerin/lipopolysaccharide- induced liver injury in mice[J]. Food & Chemical Toxicology, 2009, 47(10): 2431−2435.
[50] LI H M , GUO P , HU X , et al. Preparation of corn (*Zea mays*) peptides and their protective effect against alcohol-induced acute hepatic injury in NH mice[J]. Biotechnology and Applied Biochemistry, 2007, 47(Pt 3): 169-174.
[51] 罗安玲. 葛根、藤茶、玉米低聚肽复合组方对小鼠的解酒保肝作用研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2019. [LUO Anling. Study on antialcoholic andhepatoprotective effect of compound of pueraria, ampelopsis grossedentata and corn oligopeptides against alcoholic liver injury in mice[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2019.]
[52] YU Yali, WANG Lijun, WANG Ying, et al. Hepatoprotective effect of albumin peptides from corn germ meal on chronic alcohol-induced liver injury in mice.[J]. Journal of Food Science, 2017, 82(12): 2997−3004.
[53] YU Guocai, LV Jie, HE Hui, et al. Hepatoprotective effects of corn peptides against carbon tetrachloride-induced liver injury in mice[J]. Journal of Food Biochemistry, 2012, 36(4): 458−464.
[54] ZHANG F, ZHANG J, LI Y. Corn oligopeptides protect against early alcoholic liver injury in rats[J]. Food and Chemical Toxicology, 2012, 50(6): 2149−2154.
[55] 林兵, 马小陶, 王亚非, 等. 玉米肽对酒精性肝损伤大鼠的作用研究[J]. 医学研究杂志, 2016, 45(3): 135−138. [LIN Bing, MA Xiaotao, WANG Yafei, et al. Effect of corn peptides on alcoholic liver injury of rats[J]. Journal of Medical Research, 2016, 45(3): 135−138.]
[56] 刘雪姣. 玉米低聚肽保肝作用的研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2016. [LIU Xuejiao. Study of corn oligopeptide on hepatoprotective effect[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016.]
[57] 魏康. 玉米肽对非酒精性脂肪肝损伤保护作用的研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2019. [WEI Kang. Study on protective effects of corn peptide on nonalcoholic fatty liver injury[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019.]
[58] YAMAGUCHi M, TAKADA M, NOZAKI O, et al. Preparation of corn peptide from corn gluten meal and its administration effect on alcohol metabolism in stroke-prone spontaneously hypertensive rats[J]. Journal of Nutritional Science and Vitaminology, 1996, 42(3): 219−231.
[59] YAMAGUCHI M, NISHIKIORI F, ITO M, et al. The effects of corn peptide ingestion on facilitating alcohol metabolism in healthy men[J]. Bioscience, Biotechnology and Biochemistry, 1997, 61(9): 1474−1481.
[60] 郭辉, 何慧, 韩樱, 等. 玉米肽对小鼠酒后肝脏乙醇脱氢酶活力的影响及醒酒机理[J]. 食品科学, 2011, 32(11): 265−269. [GUO Hui, HE Hui, HAN Ying, et al. Effect of corn peptides on alcohol dehydrogenase activity in live of mice after drinking and its anti-alcohol mechanism[J]. Food Science, 2011, 32(11): 265−269.]
[61] LI H M, WEN L K, LI S J. *In vitro* and *in vivo* effects and safety assessment of corn peptides on alcohol dehydrogenase activities[J]. Chemical Research in Chinese Universities, 2011, 27(5): 820−826.
[62] YU Guocai, LI Jiangtao, HE Hui, et al. Ultrafiltration prepration of potent bioactive corn peptide as alcohol metabolism stimulator *in vivo* and study on its mechanism of action[J]. Journal of Food Biochemistry, 2013, 37(2): 7.
[63] SUN Naxin, XU Tongcheng, LIU Yuehui, et al. Preparation of two oligopeptides from corn protein and their protective effect on acute alcohol intoxication in mice[J]. Biomedical Research, 2018, 29(7): 1284−1289.
[64] 高淑杰, 吴翊馨, 张肃. 玉米肽抗运动疲劳的实验研究// Intelligent Information Technology Application Association. Proceedings of the 2011 Second International Conference on Education and sports Education(ESE 2011 V3)[C]. Intelligent Information Technology Application Association: 智能信息技术应用学会, 2011: 4. [GAO Shujie, WU Yixin, ZHANG Su. Research of anti-sport-fatigue on corn peptid// Intelligent Information Technology Application Association. Proceedings of the 2011 Second International Conference on Education and sports Education(ESE 2011 V3)[C]. Intelligent Information Technology Application Association: Intelligent Information Technology Application Association, 2011: 4.]
[65] 梁秋芳. 玉米多肽制备技术及其抗氧化和抗炎活性的研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2018. [LIANG Qiufang. The study of corn peptide preparation technology and its antioxidant and anti-inflammatory activities[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2018.]
[66] MARGARITA Ortiz-Martinez, ELVIRA Gonzalez de Mejia, SILVERIO García-Lara, et al. Antiproliferative effect of peptide

fractions isolated from a quality protein maize, a white hybrid maize, and their derived peptides on hepatocarcinoma human HepG2 cells[J]. Journal of Functional Foods, 2017, 34: 36−48.

[67] 陈红漫, 姜大威, 阚国仕, 等. 醇溶性玉米功能肽对小鼠辐射的防护作用研究[J]. 食品研究与开发, 2008, 29(6): 8−10. [CHEN Hongman, JIANG Dawei, KAN Guoshi. et al. The protective effects of alcoholysis corn activity petides against γ-ray induced damage onmice[J]. Food Research and Development, 2008, 29(6): 8−10.]

[68] 王玲, 宋淑珍, 田亚平. 玉米活性肽对辐射防护作用的研究[J]. 军医进修学院学报, 2005(5): 340−341. [WANG Ling, SONG Shuzhen, TIAN Yaping. The protective effects of nanometer corn activity peptides against X-ray induced damage on mice[J]. Academic Journal of Chinese PLA Medical School, 2005(5): 340−341.]

[69] 罗军, 李妍, 张巍, 等. 玉米肽对微波辐照大鼠外周血象的保护作用[J]. 中国兽医杂志, 2015, 51(8): 29−31. [LUO Jun, LI Yan, ZHANG Wei, et al. Protective effect of corn peptide on peripheral blood of microwave irradiation rats[J]. Chinese Journal of Veterinary Medicine, 2015, 51(8): 29−31.]

[70] 何音华, 蔡丹, 盛悦, 等. 玉米活性肽的制备分析及其功能活性研究进展[J]. 食品工业, 2018, 39(1): 234−237. [HE Yinhua, CAI Dan, SHENG Yue, et al. Research progress on preparation and functional activity of active peptides from maize[J]. The Food Industry, 2018, 39(1): 234−237.]

[71] 陆启明. 玉米生物活性肽生产关键技术研究与开发 [D]. 郑州：河南工业大学, 2017. [LU Qiming. Research on the key technology of corn bioactive peptides[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2017.]