

# 微胚乳玉米醇溶蛋白的提取及氨基酸组成分析

张泽英<sup>1</sup>, 付思晗<sup>2</sup>, 谢军波<sup>2</sup>

(1. 武昌工学院 食品与健康研究所, 武汉 430065; 2. 武汉轻工大学 食品科学与工程学院, 武汉 430023)

**摘要:**为促进微胚乳玉米醇溶蛋白的开发和应用,以微胚乳玉米为原料,分别采用乙醇浸提法和超声波辅助乙醇浸提法提取玉米醇溶蛋白,通过单因素实验优化工艺条件,并对微胚乳玉米醇溶蛋白的氨基酸组成进行分析。结果表明:乙醇浸提法提取微胚乳玉米醇溶蛋白的最优工艺条件为提取温度 50℃,提取时间 2.0 h,乙醇体积分数 80%,料液比 1:12;超声波辅助乙醇浸提法提取微胚乳玉米醇溶蛋白的最优工艺条件为乙醇体积分数 80%,超声时间 40 min,料液比 1:20,超声功率 500 W。在各自最优条件下,超声波辅助乙醇浸提法所得微胚乳玉米醇溶蛋白提取率和蛋白质含量分别为 45.88% 和 82.1%,显著优于乙醇浸提法的 32.61% 和 79.2%。微胚乳玉米醇溶蛋白的非极性氨基酸占比为 59.11%,高于普通玉米醇溶蛋白的 53.38%。综上,与乙醇浸提法相比,超声波辅助乙醇浸提法具有较强的优越性;微胚乳玉米醇溶蛋白较普通玉米醇溶蛋白显示出更强的疏水性。

**关键词:**微胚乳玉米;玉米醇溶蛋白;乙醇浸提法;超声波辅助乙醇浸提法;氨基酸组成

中图分类号:TS229;TS210.9 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2022)12-0058-06

## Extraction and amino acid composition analysis of zein from micro-endosperm maize

ZHANG Zeying<sup>1</sup>, FU Sihan<sup>2</sup>, XIE Junbo<sup>2</sup>

(1. Institute of Food and Health, Wuchang Institute of Technology, Wuhan 430065, China;

2. School of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China)

**Abstract:** To promote the development and application of zein from micro-endosperm maize, zein was extracted from micro-endosperm maize by ethanol extraction method and ultrasonic assisted ethanol extraction method. The process conditions were optimized by single factor experiments, and the amino acid composition of zein from micro-endosperm maize was analyzed. The results showed that the optimal conditions for ethanol extraction method were obtained as follows: extraction temperature 50℃, extraction time 2.0 h, ethanol volume fraction 80% and solid-liquid ratio 1:12. The optimal conditions for ultrasonic assisted ethanol extraction method were obtained as follows: ethanol volume fraction 80%, ultrasonic time 40 min, solid-liquid ratio 1:20 and ultrasonic power 500 W. Under these optimal conditions, the extraction rate and protein content of zein from micro-endosperm maize extracted by ultrasonic assisted ethanol extraction method were 45.88% and 82.1%, respectively, which were significantly better than 32.61% and 79.2% extracted by ethanol extraction method. The non-polar amino acid proportion of zein from micro-endosperm maize was 59.11%, which was higher than 53.38% of common zein. In conclusion, compared with ethanol extraction method, ultrasonic assisted ethanol extraction method has stronger advantages, and zein from micro-endosperm maize shows stronger hydrophobicity than common zein.

**Key words:** micro-endosperm maize; zein; ethanol extraction method; ultrasonic assisted ethanol extraction method; amino acid composition

收稿日期:2021-10-20;修回日期:2022-08-21

基金项目:湖北省技术创新专项(重大项目)(2019ABA105)

作者简介:张泽英(1980),女,教授,博士,研究方向为食品科学(E-mail)qianyezzy@163.com。

玉米蛋白是一类重要的植物蛋白,包括醇溶蛋白、谷蛋白、清蛋白和球蛋白<sup>[1]</sup>。其中,玉米醇溶蛋

白是玉米蛋白的主要成分,富含谷氨酸和亮氨酸、脯氨酸、丙氨酸等疏水性氨基酸,缺乏碱性氨基酸,尤其缺乏色氨酸与赖氨酸<sup>[2-3]</sup>。独特的氨基酸组成使得玉米醇溶蛋白具有很多特殊的功能性质,如成膜性、包埋性、自组装特性等<sup>[4-6]</sup>。提取玉米醇溶蛋白对促进其在食品等领域的应用具有重要作用。玉米醇溶蛋白在乙醇、异丙醇、丙酮等有机溶剂中具有很好的溶解性。根据玉米醇溶蛋白的溶解性,目前有机溶剂提取法<sup>[7]</sup>、物理和生物技术辅助有机溶剂提取法<sup>[8-9]</sup>是主要的提取方法,乙醇是最主要的提取溶剂。超声波应用到液体提取介质中可产生热效应、机械效应和空化效应,达到增溶、搅拌及提高目标物提取率的效果<sup>[10]</sup>。

微胚乳玉米籽粒胚乳少、胚大,含油率和蛋白质含量均高,是一种新型油料作物,具有很好的开发前景<sup>[11-12]</sup>。微胚乳玉米作为一种新型高油玉米,是我国油料资源的重要补充。目前,关于微胚乳玉米的研究集中于育种技术,以改良品质性状和提高含油率<sup>[13]</sup>,而对其蛋白质的相关研究有限。因此,开展微胚乳玉米中醇溶蛋白的高效提取方法和氨基酸组成研究,对后续产业化开发和应用具有重要意义。

本研究以微胚乳玉米为原料,对比研究了乙醇浸提法和超声波辅助乙醇浸提法对微胚乳玉米醇溶蛋白提取率的影响,确定了最优提取工艺,并分析了微胚乳玉米醇溶蛋白的氨基酸组成,以期为微胚乳玉米醇溶蛋白的高效提取及其在食品领域应用奠定一定的理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

#### 1.1.1 原料与试剂

微胚乳玉米,广西益宝油料玉米开发有限公司;正己烷、无水乙醇、碘,国药集团化学试剂有限公司; $\alpha$ -淀粉酶(30 U/mg),北京索莱宝科技有限公司。

#### 1.1.2 仪器与设备

Alpha 1-2 LD plus 冷冻干燥机,德国 Christ 公司;FiveEasy 20 pH 计,瑞士 Mettler Toledo 公司;GZX-9070MBE 数显鼓风干燥箱,上海博讯实业有限公司;F-4600 荧光分光光度计、L-8900 氨基酸分析仪,日本日立公司;KDN-103F 自动定氮仪,上海纤检仪器有限公司。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 微胚乳玉米成分分析

水分含量测定,参照 GB 5009.3-2016 中的直接干燥法;粗脂肪含量测定,参照 GB 5009.6-2016

中的索氏抽提法;灰分含量测定,参照 GB 5009.4-2016;淀粉含量测定,参照 GB 5009.9-2016 中的酶水解法;粗纤维含量测定,参照 GB/T 5009.10-2003;粗蛋白质含量测定,参照 GB 5009.5-2016 中的凯氏定氮法(蛋白质换算系数为 6.25)。

#### 1.2.2 微胚乳玉米醇溶蛋白提取前处理

##### 1.2.2.1 微胚乳玉米中淀粉的脱除

将微胚乳玉米粉碎,过 0.250 mm(60 目)筛,取筛下物放入烧杯并按料液比 1:10 加入去离子水,在 60℃ 下加热糊化 15 min,加入 1.5% 淀粉酶酶解,搅拌。利用碘液检测溶液中是否残存淀粉,直至碘液不变蓝,水洗分离,沉淀在 50℃ 下真空干燥 10 h。

##### 1.2.2.2 微胚乳玉米粉中油脂的脱除

将脱除淀粉的微胚乳玉米粉放入烧杯,按料液比 1:5 加入正己烷,在 50℃ 下搅拌 1 h,减压抽滤脱除溶剂,重复萃取,直至残油低于 1%。

#### 1.2.3 微胚乳玉米醇溶蛋白的提取

##### 1.2.3.1 乙醇浸提法

取前处理后的微胚乳玉米粉 5 g,与一定体积分数的乙醇溶液混合,磁力搅拌器搅拌,于一定温度下提取一定时间,静置后 4 000 r/min 离心 15 min,将上清液与 4℃ 冷水混合稀释至乙醇体积分数 40%,4℃ 冰箱静置 12 h,4 000 r/min 离心,用蒸馏水反复洗涤沉淀后将沉淀冷冻干燥,得到微胚乳玉米醇溶蛋白。

##### 1.2.3.2 超声波辅助乙醇浸提法

取前处理后的微胚乳玉米粉 5 g,与一定体积分数的乙醇溶液混合,超声波 500 W 处理一定时间,静置后 4 000 r/min 离心 15 min,将上清液与 4℃ 冷水混合稀释至乙醇体积分数 40%,4℃ 冰箱静置 12 h,4 000 r/min 离心,用蒸馏水反复洗涤沉淀后将沉淀冷冻干燥,得到微胚乳玉米醇溶蛋白。

#### 1.2.4 微胚乳玉米醇溶蛋白中蛋白质含量测定

微胚乳玉米醇溶蛋白中蛋白质含量参考 GB 5009.5-2016 中的凯氏定氮法测定,蛋白质换算系数为 6.25。

#### 1.2.5 微胚乳玉米醇溶蛋白提取率的测定

##### 1.2.5.1 最大吸收波长的确定

参照文献[14]的方法,将 10 mg 微胚乳玉米醇溶蛋白溶解于 20 mL 80% 乙醇溶液,使用紫外可见分光光度计在 200~500 nm 波长范围内进行扫描,确定最大吸收波长( $\lambda_{\max}$ )为 278 nm。

##### 1.2.5.2 标准曲线的绘制

取含 250 mg 蛋白质的玉米醇溶蛋白溶于 80%

乙醇溶液,充分溶解后于 250 mL 容量瓶中定容,再用 80% 乙醇溶液稀释至质量浓度分别为 0.05、0.1、0.25、0.5、1 mg/mL 梯度的溶液,在 278 nm 处测定吸光度。以吸光度( $A_0$ )为纵坐标,蛋白质质量浓度( $c$ )为横坐标,拟合标准曲线,得到标准曲线方程为  $A_0 = 1.059 2c - 0.01, R^2 = 0.995 4$ 。

### 1.2.5.3 微胚乳玉米醇溶蛋白提取率计算

测定不同提取工艺上清液的吸光度,根据标准曲线计算蛋白质质量浓度。微胚乳玉米醇溶蛋白提取率( $Y$ )按下式计算。

$$Y = cV/m \times 100\% \quad (1)$$

式中: $c$  为上清液中蛋白质质量浓度,mg/mL; $V$  为上清液总体积,mL; $m$  为微胚乳玉米粉中蛋白质的质量,mg。

### 1.2.6 微胚乳玉米醇溶蛋白氨基酸组成分析

用氨基酸分析仪测定微胚乳玉米醇溶蛋白中氨基酸组成与含量。

## 2 结果与分析

### 2.1 微胚乳玉米主要成分

微胚乳玉米中主要成分含量测定结果如表 1 所示。由表 1 可知,微胚乳玉米中水分、粗脂肪、灰分、淀粉、粗纤维、粗蛋白质和其他成分含量分别为 8.2%、26.3%、4.4%、25.1%、6.8%、19.5% 和 9.7%。文献报道<sup>[15]</sup>,普通玉米中粗脂肪、淀粉、粗蛋白质含量分别为 4.0%~4.7%、71.0%~75.0%、9.6%~9.8%。由此可知,微胚乳玉米中粗脂肪含量约是普通玉米的 6 倍,表明该玉米品种为高油玉米,淀粉含量仅约为普通玉米的 1/3,粗蛋白质含量约为普通玉米的 2 倍,说明微胚乳玉米一方面显著增加了其作为油料资源的价值,另一方面较高的蛋白质含量亦可作为优良的植物蛋白质来源。

表 1 微胚乳玉米中主要成分含量 %

水分	粗脂肪	灰分	淀粉	粗纤维	粗蛋白质	其他
8.2	26.3	4.4	25.1	6.8	19.5	9.7

### 2.2 乙醇浸提法工艺优化

#### 2.2.1 提取时间的影响

在提取温度 50℃、乙醇体积分数 80%、料液比 1:10 条件下,设置提取时间分别为 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 h,考察提取时间对微胚乳玉米醇溶蛋白提取率的影响,结果如图 1 所示。

由图 1 可知,在提取时间 0.5~2.5 h 范围内,微胚乳玉米醇溶蛋白提取率先增大后减少,在 2.0 h 达到最大值,2.5 h 时反而下降,可能是因为随着提

取时间延长,蛋白质存在一定的热聚集效应或变性<sup>[16]</sup>,导致溶解度降低,阻碍了蛋白质的提取。因此,选择提取时间为 2.0 h。

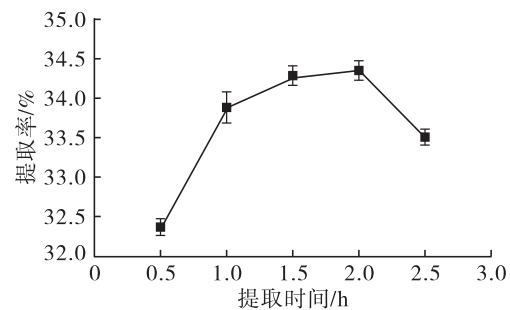


图 1 提取时间对微胚乳玉米醇溶蛋白提取率的影响

#### 2.2.2 提取温度的影响

在乙醇体积分数 80%、提取时间 2.0 h、料液比 1:10 条件下,设置提取温度分别为 30、40、50、60、70℃,考察提取温度对微胚乳玉米醇溶蛋白提取率的影响,结果如图 2 所示。

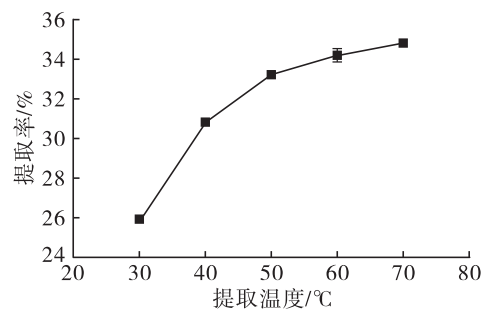


图 2 提取温度对微胚乳玉米醇溶蛋白提取率的影响

由图 2 可知,随着提取温度的升高,蛋白质在乙醇溶液中的溶解性增大,微胚乳玉米醇溶蛋白提取率亦持续增大。提取温度为 50、60、70℃ 时对应的提取率分别为 33.23%、34.17% 和 34.84%,说明在温度超过 50℃ 后蛋白质提取率的增加幅度逐渐趋于平缓。温度过高不仅易使蛋白质发生变性,而且会造成乙醇挥发、增加热量消耗,导致生产成本随之增大。因此,选择 50℃ 为最优提取温度。

#### 2.2.3 乙醇体积分数的影响

在提取温度 50℃、提取时间 2.0 h、料液比 1:10 条件下,设置乙醇体积分数分别为 60%、70%、75%、80%、85% 和 90%,考察乙醇体积分数对微胚乳玉米醇溶蛋白提取率的影响,结果如图 3 所示。

由图 3 可知,乙醇体积分数为 60% 时,微胚乳玉米醇溶蛋白提取率为 39.84%,可能是因为在乙醇体积分数较低时,提取液中含有水溶性蛋白质,故测得蛋白质提取率为水溶性蛋白和醇溶蛋白的总和,致使提取率较高。随着乙醇体积分数的增加,提取率逐渐减少,乙醇体积分数为 80% 时对应的玉米

醇溶蛋白提取率为 32.38%, 进一步提高乙醇体积分数至 90%, 提取率降低至 29.45%, 玉米醇溶蛋白的主要成分为  $\alpha$  组分和  $\beta$  组分,  $\beta$  组分不溶于高体积分数的乙醇溶液, 因而可能导致了提取率降低<sup>[5]</sup>。因此, 为了保证获得蛋白质为醇溶蛋白, 确定乙醇体积分数为 80%。

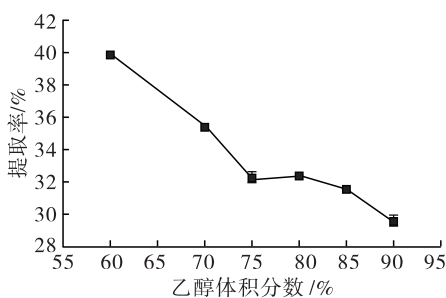


图3 乙醇体积分数对微胚乳玉米醇溶蛋白提取率的影响

#### 2.2.4 料液比的影响

在提取温度 50℃、乙醇体积分数 80%、提取时间 2.0 h 条件下, 设置料液比分别为 1:4、1:6、1:10、1:12 和 1:15, 考察料液比对微胚乳玉米醇溶蛋白提取率的影响, 结果如图 4 所示。

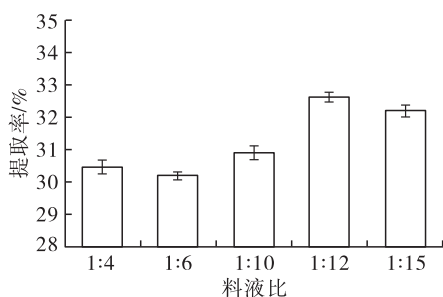


图4 料液比对微胚乳玉米醇溶蛋白提取率的影响

由图 4 可知, 随着料液比的增加, 微胚乳玉米醇溶蛋白提取率先增大后趋于平稳, 料液比为 1:12 时提取率最大(32.61%)。料液比较低时, 提取液黏度较大降低蛋白质的溶出速度, 同时提取液中蛋白质浓度较高会阻碍蛋白质的溶出, 因而提取率较低。料液比增加产生的稀释作用会降低体系黏度和蛋白质浓度, 从而增加玉米醇溶蛋白的提取率。因此, 确定料液比为 1:12。

综上, 乙醇浸提法提取微胚乳玉米醇溶蛋白的最优条件为提取温度 50℃、提取时间 2.0 h、乙醇体积分数 80%、料液比 1:12, 此条件下微胚乳玉米醇溶蛋白的提取率达 32.61%, 蛋白质含量为  $(79.2 \pm 1.4)\%$ 。

### 2.3 超声波辅助乙醇浸提法工艺优化

#### 2.3.1 超声时间的影响

在乙醇体积分数 80%、料液比 1:10 条件下, 设置超声时间分别为 10、20、30、40、50、60 min, 考察超

声时间对微胚乳玉米醇溶蛋白提取率的影响, 结果如图 5 所示。

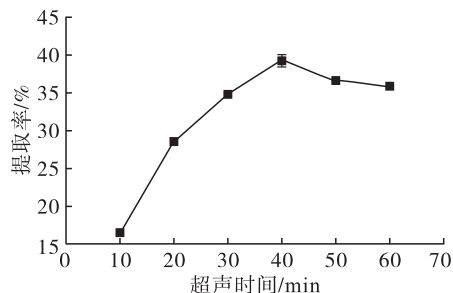


图5 超声时间对微胚乳玉米醇溶蛋白提取率的影响

由图 5 可知, 微胚乳玉米醇溶蛋白提取率随着超声时间的延长呈先升高后降低的趋势, 30 min 时提取率达到 34.82%, 40 min 时提取率达到最大(39.42%), 说明超声波的介入能在短时间内提高微胚乳玉米醇溶蛋白提取率。然而, 继续延长超声时间, 提取率反而下降, 可能是因为超声波使得体系温度升高, 时间过长导致蛋白质变性, 影响提取率<sup>[17]</sup>, 这与 2.2.1 乙醇浸提法时提取时间的影响一致。因此, 确定最优超声时间为 40 min。

#### 2.3.2 乙醇体积分数的影响

在超声时间 40 min、料液比 1:10 条件下, 设置乙醇体积分数分别为 50%、60%、70%、80% 和 90%, 考察乙醇体积分数对微胚乳玉米醇溶蛋白提取率的影响, 结果如图 6 所示。

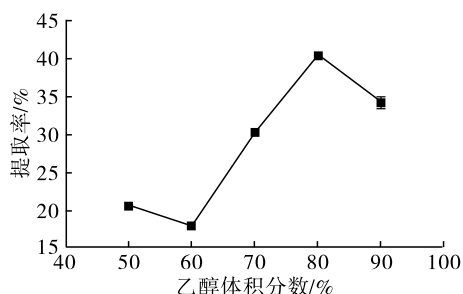


图6 乙醇体积分数对微胚乳玉米醇溶蛋白提取率的影响

由图 6 可知, 随着乙醇体积分数的增加, 微胚乳玉米醇溶蛋白提取率总体先增大后减少, 乙醇体积分数为 80% 时, 提取率达到最大。与乙醇浸提法相比, 乙醇体积分数为 60% 时提取率显著降低, 具体原因有待进一步分析。因此, 选择乙醇体积分数为 80%。

#### 2.3.3 料液比的影响

在乙醇体积分数 80%、超声时间 40 min 条件下, 设置料液比分别为 1:6、1:8、1:10、1:15、1:20, 考察料液比对微胚乳玉米醇溶蛋白提取率的影响, 结果如图 7 所示。

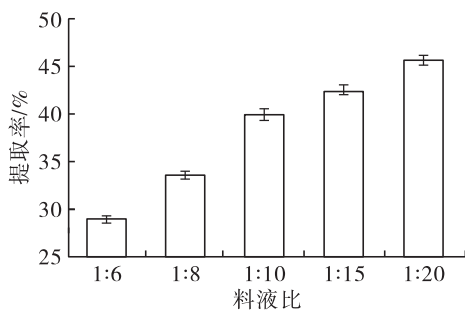


图7 料液比对微胚乳玉米醇溶蛋白提取率的影响

由图7可知,料液比的增加与蛋白质提取率呈正相关性,料液比1:20时,微胚乳玉米醇溶蛋白提取率达到45.88%。更高的料液比会同时降低提取液的黏度和提取液中蛋白质的浓度,有利于蛋白质的溶出,进而提高提取率。因此,从溶剂消耗及成本方面综合考虑,选择料液比为1:20。

综上,超声波辅助乙醇浸提法提取微胚乳玉米醇溶蛋白的最优条件为乙醇体积分数80%、超声时间40 min、料液比1:20,此条件下微胚乳玉米醇溶蛋白的提取率达45.88%,蛋白质含量为 $(82.1 \pm 0.4)\%$ 。

#### 2.4 微胚乳玉米醇溶蛋白氨基酸组成分析

玉米醇溶蛋白因缺乏赖氨酸等限制性氨基酸而不是优质的蛋白质来源,而因其疏水性和低消化速率常作为递送载体<sup>[5]</sup>。为了明确微胚乳玉米醇溶蛋白的营养价值和亲疏水性质,测定了其氨基酸组成。微胚乳玉米醇溶蛋白与普通玉米醇溶蛋白氨基酸组成如表2所示。

由表2可知,微胚乳玉米醇溶蛋白的氨基酸总量为82.73%,普通玉米醇溶蛋白的氨基酸总量为71.34%。两者含量最高的氨基酸都是谷氨酸,较高的谷氨酸含量也为玉米醇溶蛋白的改性提供了潜在作用位点。但是,微胚乳玉米醇溶蛋白中谷氨酸含量占比(20.31%)低于普通玉米醇溶蛋白的(29.42%)。微胚乳玉米醇溶蛋白的碱性氨基酸含量占比为2.83%,稍高于普通玉米醇溶蛋白的(2.44%),赖氨酸含量占比是普通醇溶玉米蛋白的5倍,可一定程度上缓解普通玉米醇溶蛋白存在的赖氨酸缺乏问题。

微胚乳玉米醇溶蛋白中非极性氨基酸占氨基酸总量的59.11%,高于普通玉米醇溶蛋白的53.38%,更高的疏水性氨基酸比例说明微胚乳玉米醇溶蛋白具有更强的疏水性。玉米醇溶蛋白作为天然疏水性蛋白质,受消化酶分解速度较慢而被广泛用于制备胶体粒子实现活性物质的包埋与递送<sup>[19-20]</sup>,微胚乳玉米醇溶蛋白更高的疏水性氨基酸比例使其可能具有

更低的分解速率及对疏水性物质更好的包埋与递送效果。微胚乳玉米不仅相较普通玉米具有更高的蛋白质含量,而且微胚乳玉米醇溶蛋白更大的疏水性为其在食品胶体领域应用提供了更多可能。

表2 微胚乳玉米醇溶蛋白与普通玉米醇溶蛋白氨基酸组成

氨基酸	微胚乳玉米醇溶蛋白		普通玉米醇溶蛋白	
	氨基酸含量	氨基酸占比	氨基酸含量	氨基酸占比
非极性、疏水性氨基酸				
甘氨酸	1.56	1.89	0.98	1.37
丙氨酸	11.80	14.26	7.17	10.05
缬氨酸	3.01	3.64	1.80	2.52
亮氨酸	15.10	18.25	12.87	18.04
异亮氨酸	2.56	3.09	1.57	2.20
苯丙氨酸	4.04	4.88	4.48	6.28
脯氨酸	9.13	11.04	8.09	11.34
蛋氨酸	1.70	2.06	1.13	1.58
极性、中性氨基酸				
丝氨酸	5.21	6.30	-	-
苏氨酸	2.46	2.97	1.73	2.43
酪氨酸	2.72	3.29	3.71	5.20
半胱氨酸	0.16	0.19	1.10	1.54
酸性氨基酸				
天冬氨酸	4.14	5.00	3.98	5.58
谷氨酸	16.80	20.31	20.99	29.42
碱性氨基酸				
精氨酸	1.20	1.45	1.04	1.46
组氨酸	0.97	1.18	0.67	0.94
赖氨酸	0.17	0.20	0.03	0.04

注:普通玉米醇溶蛋白的氨基酸组成根据文献[18]整理;-表示未报道;甘氨酸归类存在争议,本文将其归于非极性氨基酸

### 3 结论

本文以微胚乳玉米为原料,研究了乙醇浸提法和超声波辅助乙醇浸提法提取微胚乳玉米醇溶蛋白的影响因素,分析了微胚乳玉米醇溶蛋白的氨基酸组成。研究发现微胚乳玉米中粗蛋白质含量为19.5%,约是普通玉米的2倍。最优工艺条件下,超声波辅助乙醇浸提法提取微胚乳玉米醇溶蛋白的提取率和蛋白质含量分别为45.88%和82.1%,乙醇浸提法的分别为32.61%和79.2%,表明超声波辅助乙醇浸提法具有较强的优越性。微胚乳玉米醇溶蛋白的非极性氨基酸含量占比为59.11%,高于普通玉米醇溶蛋白(53.38%),显示出更强的疏水性,而且赖氨酸含量占比是普通玉米醇溶蛋白的5倍,可一定程度缓解普通玉米醇溶蛋白中赖氨酸缺乏问题。

## 参考文献:

- [1] 曲悦, 王晓杰, 刘晓栏, 等. *D*-氨基半乳糖修饰对玉米醇溶蛋白结构性质及生物活性的影响[J]. 中国油脂, 2019, 44(7): 75-80.
- [2] 王香丽, 刘杰, 吕宁, 等. 玉米醇溶蛋白在食品中的应用[J]. 粮食与饲料工业, 2018(1): 33-36.
- [3] HAO L, LIN G Q, CHEN C Y, et al. Phosphorylated zein as biodegradable and aqueous nanocarriers for pesticides with sustained-release and anti-UV properties[J]. J Agric Food Chem, 2019, 67(36): 9989-9999.
- [4] PATEL A R, VELIKOV K P. Zein as a source of functional colloidal nano- and microstructures[J]. Curr Opin Colloid In, 2014, 19(5): 450-458.
- [5] KASAAI M R. Zein and zein-based nano-materials for food and nutrition applications: a review[J]. Trends Food Sci Tech, 2018, 79: 184-197.
- [6] ZHANG Y, CUI L L, CHE X X, et al. Zein-based films and their usage for controlled delivery: origin, classes and current landscape[J]. J Control Release, 2015, 206: 206-219.
- [7] DICKEY L C, PARRIS N, CRAIG J C, et al. Ethanolic extraction of zein from maize[J]. Ind Crop Prod, 2001, 13(1): 67-76.
- [8] 张明珠, 张丽芬, 陈复生, 等. 玉米醇溶蛋白提取技术及在食品中应用研究[J]. 食品科技, 2021, 46(2): 205-209.
- [9] 张明珠, 张丽芬, 陈复生, 等. 玉米醇溶蛋白的超声辅助酶法提取工艺及不同提取方法对其结构和功能特性的影响[J]. 中国油脂, 2021, 46(4): 26-32.
- [10] 陈秋冰, 熊双丽, 李安林, 等. 超声波辅助浓香菜籽油水化脱胶工艺优化[J]. 中国油脂, 2021, 46(2): 5-10.
- [11] 吴子恺. 新型超高油玉米种质的选育[J]. 作物学报, 2004, 30(8): 751-756.
- [12] 盛玉萍, 黄其椿, 吴子恺, 等. 微胚乳玉米8个主要形状的研究[J]. 中国农业科学, 2008, 41(9): 2850-2858.
- [13] 戴罗杰, 郭春雨, 李飞宇, 等. 微胚乳超高油玉米的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2010, 37(19): 8925-8927.
- [14] 赵文扬. 玉米蛋白粉中玉米黄色素和醇溶蛋白的提取技术研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2015.
- [15] 时小红. 河南省普通玉米品种品质变化规律分析[J]. 河南农业科学, 2010, 39(9): 37-41.
- [16] 畅鹏, 杜鑫, 杨东晴, 等. 蛋白质热聚集行为机理及其对蛋白质功能特性影响的研究进展[J]. 食品工业科技, 2018, 39(24): 318-325.
- [17] NIKOLAIDIS A, ANDREADIS M, MOSCHAKIS T. Effect of heat, pH, ultrasonication and ethanol on the denaturation of whey protein isolate using a newly developed approach in the analysis of difference-UV spectra[J]. Food Chem, 2017, 232: 425-433.
- [18] 孙长华, 张华, 刘峰, 等. 玉米醇溶蛋白水解氨基酸组成分析及其功能性测定[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2011, 54(24): 103-104.
- [19] FENG Y, LEE Y. Surface modification of zein colloidal particles with sodium caseinate to stabilize oil-in-water pickering emulsion[J]. Food Hydrocolloid, 2016, 56: 292-302.
- [20] CHEN H Q, ZHONG Q X. A novel method of preparing stable zein nanoparticle dispersions for encapsulation of peppermint oil[J]. Food Hydrocolloid, 2015, 43: 593-602.
- (上接第40页)
- [7] 周盛敏. 中长链脂肪酸结构脂的酶法合成、安全性评价及减肥功能研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
- [8] 刘琛, 王卫飞, 廖森泰. 酶催化桑蚕蛹油酯交换制备中长链脂肪酸甘油酯[J]. 中国油脂, 2021, 46(4): 120-123.
- [9] 陆继源. 酶法酯交换合成中长碳链结构甘油酯[D]. 江苏 无锡: 江南大学, 2017.
- [10] XU X, FOMUSO L B, AKOH C C. Synthesis of structured triacylglycerols by lipase-catalyzed acidolysis in a packed bed bioreactor[J]. J Agric Food Chem, 2000, 48: 3-10.
- [11] AKOH C C, YEEL N. Enzymatic synthesis of position-specific low-calorie structured lipids[J]. J Am Oil Chem Soc, 1997, 74(11): 1409-1413.
- [12] 杨凯舟, 毕艳兰, 马素敏, 等. 响应面优化脂肪酶催化合成中长碳链甘油酯[J]. 中国油脂, 2012, 37(2): 51-55.
- [13] 胡蒋宁, 张超, 邓泽元, 等. Lipozyme RM IM 脂肪酶催化苦瓜子油和癸酸合成功能性油脂[J]. 食品科学, 2011, 32(24): 92-97.
- [14] 丁双, 杨江科, 闫云君. 酶法改良大豆油制备质构脂质的研究[J]. 食品科学, 2008, 29(1): 173-176.
- [15] 戚以政, 汪叔雄. 生化反应动力学与反应器[M]. 2版. 北京: 化学工业出版社, 1999: 58-64.
- [16] HOSSEN M, HERNANDEZ E. Enzyme-catalyzed synthesis of structured phospholipids with conjugated linoleic acid[J]. Eur J Lipid Sci Tech, 2005, 107: 730-736.