

未成熟蚕豆中矿物质含量、 氨基酸组成和微观结构的研究

陈友霞,刘珍珍,杨文艺,孔 霄,林 琳,高春燕*

(大理大学公共卫生学院,云南大理 671000)

摘 要:研究了两个品种(凤豆 15 和 18 号)未成熟蚕豆三个食用阶段(S1、S2 和 S3)的种皮和胚中的矿物质(Ca、Mg、K、Fe、Zn、Mn、Cu 和 Cr)含量、整粒蚕豆蛋白的氨基酸组成以及胚的微观结构变化。结果表明,所有蚕豆样品中矿物质含量均表现为 $K > Mg > Ca > Zn$,并均能检测到少量的 Fe、Cu 和 Mn,均未检测到 Cr,且大部分矿物质在种皮中的含量高于胚中;蚕豆蛋白中的主要氨基酸为谷氨酸(Glu)、天冬氨酸(Asp)、精氨酸(Arg)和亮氨酸(Leu),蛋氨酸(Met)和半胱氨酸(Cys)为其限制性氨基酸,必需氨基酸占总氨基酸含量的 12.80%~37.35%,总氨基酸含量随着食用阶段的延后均呈显著上升趋势($P < 0.05$),且凤豆 18 号的总氨基酸含量显著高于凤豆 15 号($P < 0.05$);扫描电镜观察结果表明,随着食用阶段的延后蚕豆胚中的淀粉颗粒逐渐增大,且在凤豆 15 号中以多角形为主,而在凤豆 18 号中椭圆形或圆形占多数;相关性分析结果显示,两个品种的未成熟蚕豆中氨基酸的合成与矿物质的吸收富集没有明显的相互作用。

关键词:蚕豆,未成熟,矿物质,氨基酸,微观结构,食用阶段

Mineral Content, Amino Acid Composition and Microstructure of Immature *Vicia faba*

CHEN You-xia, LIU Zhen-zhen, YANG Wen-yi, KONG Xiao, LIN Lin, GAO Chun-yan*

(College of Public Health, Dali University, Dali 671000, China)

Abstract: The contents of minerals (Ca, Mg, K, Fe, Zn, Mn, Cu and Cr) in seed coat and embryo and the microstructure of the embryo were studied in three edible stages (S1, S2 and S3) of two immature *Vicia faba* (broad bean) varieties (Fengdou15 and 18). The results showed that the mineral contents of all broad bean samples were in order of $K > Mg > Ca > Zn$, and a small amount of Fe, Cu and Mn was detected, while Cr was not detected. The content of most minerals in the seed coat was higher than that in embryo. The main amino acids in broad bean protein were glutamate (Glu), aspartic acid (Asp), arginine (Arg) and leucine (Leu), while methionine (Met) and cysteine (Cys) were the limiting amino acids. Essential amino acids were accounted for 12.80%~37.35% of the total amino acid, and the total amino acid content increased gradually with the delay of edible stage ($P < 0.05$). The total amino acid content of Fengdou 18 was significantly higher than that of Fengdou 15 ($P < 0.05$). Scanning electron microscope micrographs showed that the starch granules in the embryo of broad bean gradually increased with the delay of the edible stage, and the polygonal shape was dominant in Fengdou 15, while the oval or round shape was dominant in Fengdou 18. Correlation analysis showed that there was no significant interaction between the synthesis of amino acids and the absorption and enrichment of minerals in the immature broad beans of the two varieties.

Key words: *Vicia faba*; immature; mineral; amino acid; microstructure; edible stage

中图分类号: TS201.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2020)01-0310-05

doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020.01.051

引文格式: 陈友霞, 刘珍珍, 杨文艺, 等. 未成熟蚕豆中矿物质含量、氨基酸组成和微观结构的研究[J]. 食品工业科技, 2020, 41(1): 310-314.

蚕豆(*Vicia faba* L.)又名罗汉豆、胡豆或佛豆,在豆科作物中占有举足轻重的地位,长期以来一直是发展中国家(主要是亚洲和非洲)的主要粮食作物^[1-3]。我国是世界蚕豆种植面积最大的国家,种植地区主要分布于青海、甘肃和云南等省份,常年播种

面积达到 2500 km²,总产量达 35 万吨^[4]。蚕豆含有丰富的营养成分,含有 22.4%~36.0% 的蛋白质、57.8%~61.0% 的碳水化合物、12.0% 的膳食纤维和 1.2%~4.0% 的脂质^[5]。此外,蚕豆是维生素、矿物质和生物活性化合物的良好来源,如酚类化合物,包括

收稿日期: 2019-03-11

作者简介: 陈友霞(1993-),女,硕士研究生,研究方向: 营养因素与慢性疾病控制, E-mail: cyx079303@163.com。

* 通讯作者: 高春燕(1981-),女,博士,教授,研究方向: 营养与食品卫生学, E-mail: gcyxixi@163.com。

生育酚以及三萜酸^[6-8]。目前大量的研究关注于成熟或干燥蚕豆的组成和功能活性,对未成熟蚕豆营养成分的研究较少。然而在一些地区,例如智利^[5]和中国^[9]对新鲜和未成熟蚕豆的食用需求很大。近年来云南省鲜食蚕豆的生产规模发展迅速,年播种面积和总产量均居全国之首,是全国最大的鲜食蚕豆主产区^[10]。

矿物质和氨基酸是人体维持正常生理功能所必需的营养物质,且矿物质和必需氨基酸摄入过量或不足均会影响人体健康^[11-14]。食物中氨基酸的种类、含量及各组分所占的比例是评价其蛋白质优良程度的决定性指标^[15-17]。已有研究证实,成熟蚕豆种子中矿物质和氨基酸含量极为丰富^[18-21],然而关于未成熟蚕豆中的矿物质含量、氨基酸组成以及微观结构的动态变化还未见报道。本研究以大理州农业科学院培育出的高产、抗锈新品种凤豆 15 号和凤豆 18 号为原料,对其三个不同食用阶段种皮和胚中的矿物质含量、整粒蛋白的氨基酸组成和胚的微观结构变化进行研究,以期蚕豆新品种的培育、推广及消费者科学地选购蚕豆提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

两个蚕豆品种 分别为凤豆 15 号(FD15)和凤豆 18 号(FD18),于 2016 年 10 月 19 日种植于大理农业科学院蚕豆研究基地(北纬:100°24',东经:25°45',海拔 2090 m)。FD15 的全生育期为 166~170 DAS,FD18 的全生育期为 172~179 DAS,本实验分三个食用阶段 S1(138 DAS)、S2(156 DAS)和 S3(173 DAS)进行随机采收,其中 S3 阶段已达到成熟期(DAS:Days after seeding,播种后的天数);钙、镁、钾、铁、锌、锰、铜、铬标准溶液(1000 μg/mL) 国家标准物质研究中心;硝酸、盐酸(优级纯) 西陇科学股份有限公司;氢氧化钠(分析纯) 天津市福晨化学试剂厂;盐酸、柠檬酸钠(分析纯) 天津市风船化学试剂科技有限公司。

Scientz-ND 型系列真空冷冻干燥机 宁波新芝生物科技股份有限公司;AA-6200 火焰原子吸收分光光度计 日本岛津公司;RJM-28-10 马弗炉 湖南长沙市华光电炉厂;DK-98-II 电炉 天津市泰斯特仪器有限公司;DFY-600 摇摆式高速万能粉碎

机 温岭市林大机械有限公司;RE-3000 旋转蒸发器 上海亚荣生化仪器厂;L-8900 自动氨基酸分析仪 日本日立公司;扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscopy, SEM) 荷兰皇家飞利浦电子有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 蚕豆样品的制备 将三个食用阶段的未成熟蚕豆手工去除豆荚并冷冻干燥(-51 ℃,12 h),手工分为整粒种子、种皮和胚三部分,粉碎过 60 目筛,储存至-20 ℃备用。

1.2.2 矿物质含量的测定 参照 Lu 等^[22]的方法,采用干灰化法消化样品(称取 0.5 g 蚕豆种皮和胚的冻干粉末,首先在电炉上碳化,然后置于马弗炉中在(500±25) ℃下灰化 4 h),然后溶解在 10 mL 10% 硝酸(V/V)中。最后,采用火焰原子吸收分光光度计测定 K、Mg、Ca、Zn、Fe、Cu、Mn 和 Cr 的含量,结果表示为 mg/100 g 干重。火焰原子吸收分光光度计工作参数见表 1。

1.2.3 氨基酸组成分析 根据 Gao 等^[23]的方法,取整粒干燥的蚕豆整粒种子粉末溶解于 NaOH(pH10.0)溶液中,室温下振荡提取 3 h,12000 r/min 离心 10 min,取上清液滴加盐酸将其酸化至 pH=4 沉淀蛋白质,再以 12000 r/min 离心 10 min 回收沉淀的蛋白质,并冷冻干燥(-51 ℃,12 h)。随后,精密称取 100 mg 冷冻干燥所得的蛋白提取物在氮气下于 110 ℃用 10 mL 6 mol/L HCl 水解 22 h,然后用旋转蒸发器(50 ℃,200 r/min)浓缩水解产物,再用柠檬酸钠缓冲液(0.02 mol/L,pH2.2)溶解并定容至 5 mL。最后,将所得样品通过 0.22 μm 聚四氟乙烯微孔滤膜(PTFE)过滤,并采用氨基酸分析仪测定除色氨酸外的 17 种氨基酸含量,即天冬氨酸(Asp)、苏氨酸(Thr)、丝氨酸(Ser)、谷氨酸(Glu)、甘氨酸(Gly)、丙氨酸(Ala)、半胱氨酸(Cys)、缬氨酸(Val)、蛋氨酸(Met)、异亮氨酸(Ile)、亮氨酸(Leu)、酪氨酸(Tyr)、苯丙氨酸(Phe)、赖氨酸(Lys)、组氨酸(His)、精氨酸(Arg)和脯氨酸(Pro)。

1.2.4 电子显微镜扫描 将干燥的蚕豆胚颗粒均匀分布在粘有导电双面胶的铜柱上,然后固定在载物台上,在低真空模式,20.0 kV、50 Pa 的条件下对其微观结构进行扫描电镜(1000×)观察。

表 1 火焰原子吸收分光光度计工作条件参数

Table 1 Working conditions of flame atomic absorption spectrophotometer

元素	灯电流 (mA)	波长 (nm)	狭缝 (nm)	仪器测量 模式	火焰类型	空气流量 (L·min ⁻¹)	燃气流量 (L·min ⁻¹)
K	4	166.5	0.7	吸收	空气/乙炔	8	2
Mg	4	285.2	0.7	吸收	空气/乙炔	8	2
Ca	5	422.7	0.2	吸收	空气/乙炔	8	2
Zn	6	213.9	0.2	吸收	空气/乙炔	8	2
Fe	8	248.3	0.2	吸收	空气/乙炔	8	2
Cu	10	324.8	0.7	吸收	空气/乙炔	8	2
Mn	5	279.5	0.2	吸收	空气/乙炔	8	2
Cr	5	357.9	0.2	吸收	空气/乙炔	8	2

1.3 数据处理

实验数据表示为三个独立重复实验结果的平均值 ± 标准差 ($\bar{x} \pm s$), 显著性检验采用 SPSS 17.0 统计软件进行分析, $P < 0.05$ 认为差异具有统计学意义。

2 结果与分析

2.1 不同食用阶段蚕豆的矿物质含量

两个品种三个食用阶段的未成熟蚕豆种皮和胚中矿物质含量的测定结果见表 2。结果表明, 种皮中含量最高的矿物质是 K (490.23~873.01 mg/100 g DW), 其次是 Mg (45.43~58.21 mg/100 g DW)、Ca (16.11~81.09 mg/100 g DW)、Zn (3.83~7.59 mg/100 g DW)、Cu (0.76~2.91 mg/100 g DW)、Mn (0.73~1.24 mg/100 g DW) 和 Fe (0.00~1.58 mg/100 g DW); 胚中含量最高的是 K (525.86~760.84 mg/100 g DW), 其次是 Mg (34.71~43.88 mg/100 g DW)、Ca (2.39~26.12 mg/100 g DW)、Zn (4.26~5.45 mg/100 g DW)、Fe (1.87~3.78 mg/100 g DW)、Cu (0.84~1.46 mg/100 g DW) 和 Mn (0.47~0.87 mg/100 g DW); 且 Cr 在所有蚕豆样品中均未检出。由此可见, 两个品种三个食用阶段的未成熟蚕豆种皮和胚中的主要矿物质均为 K、Mg、Ca、Zn, 且大部分能检测到少量的 Fe、Cu 和 Mn。

各矿物质元素在种皮和胚中的分布呈现多样性。例如, Mg 的含量在两个品种的 S1~S3 阶段均表现为种皮高于胚, 而 Fe 正好相反; K 和 Cu 的含量在两个品种的 S1~S2 阶段均表现为种皮高于胚, 而在 S3 阶段的含量表现为种皮低于胚。Ca、Zn 和 Mn 的含量在 FD18 中的 S1~S3 阶段均表现为种皮高于胚; 而在 FD15 中 Ca 含量在其 S1 阶段表现为种皮低于胚, 在 S2~S3 阶段种皮含量高于胚; Zn 和 Mn 在 FD15 中 S1~S2 阶段为种皮含量高于胚, 而在 S3 阶段相反。

不同矿物质元素在整个食用过程中的变化不同。例如, 随着食用阶段的延后, K 含量在两个品种

的种皮和胚中均呈现明显下降趋势; Ca 在两个品种的种皮中含量均逐渐增加, 而在胚中的含量均逐渐降低; 与 Ca 相反, Cu 在两个品种的种皮中含量逐渐降低, 而在胚中的含量逐渐升高; Mn 在两个品种的种皮中含量无显著变化 ($P > 0.05$), 而在胚中的含量均逐渐升高。随着食用阶段的延后, 不同品种的矿物质含量也存在差异, Mg 在 FD15 种皮中的含量随食用阶段的延后逐渐降低, 在胚中的含量呈先降低后升高的显著变化趋势 ($P < 0.05$), 然而在 FD18 种皮和胚中的含量均无显著变化。

实验结果表明, 蚕豆种皮和胚中的矿物质含量均十分丰富, 各矿物质的含量与未成熟蚕豆的品种、部位和食用阶段有关, 这与柏方敏、刘建明、申小云等^[24-26]的研究结果一致, 即植物体内的矿物质含量受土壤中各化学元素的组成、含量水平及植物富集能力、植物品种等因素的影响。因此, 蚕豆种皮中也含有丰富的矿物质, 在食用过程中不要轻易舍弃种皮; 此外, 随食用阶段的延后矿物质含量变化较大, 消费者应根据食用需求合理地选购蚕豆。

2.2 不同食用阶段蚕豆的氨基酸组成

不同食用阶段蚕豆蛋白氨基酸组成见表 3。由表 3 可知, 除 Cys 未检测到外, 其余 16 种氨基酸均检测到。总氨基酸 (TAA) 含量范围为 20.71~85.44 g/100 g 蛋白质, 总的必需氨基酸 (EAA) 含量范围为 2.65~27.86 g/100 g 蛋白质, 非必需氨基酸 (NEAA) 含量范围为 18.06~57.58 g/100 g 蛋白质。含量最为丰富的氨基酸是 Glu、Asp、Arg 和 Leu, 必需氨基酸除了 Leu 外, Lys、Ile、Phe 和 Val 含量也较为丰富, 这与 Vioque 等^[1]的发现一致。

TAA 含量在两个品种的 S1~S3 阶段均显著增加 ($P < 0.05$), EAA 和大部分单个氨基酸含量与 TAA 含量变化趋势一致。TAA 和部分 EAA (Leu、Ile、Val 和 Met) 含量在三个食用阶段中均表现为 FD18 > FD15。此外, 两个品种三个食用阶段的 EAA/TAA 范围为 12.80%~37.35%, 且两个品种的 EAA 占比均

表 2 不同食用阶段蚕豆种皮、胚中的矿物质含量 (mg/100 g DW)

Table 2 Mineral content in seed coat and embryo of broad bean in different edible stages (mg/100 g DW)

品种	食用阶段	K	Mg	Ca	Zn	Fe	Cu	Mn	Cr
种皮									
风豆 15 号	S1	873.01 ± 26.13 ^{cA}	55.28 ± 0.65 ^{bA}	16.11 ± 0.82 ^{aA}	6.71 ± 0.10 ^{bA}	1.58 ± 0.44 ^{aB}	2.49 ± 0.26 ^{bA}	1.02 ± 0.26 ^{aA}	ND
	S2	742.67 ± 1.37 ^{bB}	53.01 ± 0.42 ^{bA}	27.73 ± 2.55 ^{bA}	6.87 ± 0.13 ^{bA}	0.97 ± 0.07 ^a	2.91 ± 0.01 ^{bB}	1.24 ± 0.17 ^{aB}	ND
	S3	494.17 ± 32.90 ^{aA}	45.43 ± 0.71 ^{aA}	81.09 ± 0.34 ^{cB}	3.83 ± 0.63 ^{aA}	ND	1.20 ± 0.01 ^{aB}	0.85 ± 0.04 ^{aA}	ND
风豆 18 号	S1	858.90 ± 49.12 ^{cA}	58.21 ± 3.68 ^{aA}	25.87 ± 5.99 ^{aA}	7.42 ± 0.13 ^{bB}	1.00 ± 0.10 ^{aA}	2.54 ± 0.43 ^{bA}	1.19 ± 0.25 ^{aA}	ND
	S2	615.73 ± 15.55 ^{bA}	56.66 ± 0.41 ^{aB}	31.00 ± 0.09 ^{aB}	7.59 ± 0.12 ^{bB}	ND	2.15 ± 0.18 ^{bA}	0.73 ± 0.06 ^{aA}	ND
	S3	490.23 ± 11.40 ^{aA}	56.49 ± 0.38 ^{aB}	63.82 ± 5.79 ^{bA}	6.79 ± 0.07 ^{aB}	1.06 ± 0.2 ^a	0.76 ± 0.01 ^{aA}	0.90 ± 0.06 ^{aA}	ND
胚									
风豆 15 号	S1	760.84 ± 24.27 ^{bB}	40.67 ± 0.28 ^{bB}	26.12 ± 1.78 ^{cB}	4.46 ± 0.02 ^{aB}	3.36 ± 0.28 ^{aA}	0.84 ± 0.08 ^{aA}	0.58 ± 0.03 ^{aB}	ND
	S2	612.44 ± 14.43 ^{aB}	37.92 ± 0.03 ^{aB}	11.38 ± 0.88 ^{bB}	4.67 ± 0.17 ^{aA}	3.31 ± 0.21 ^{aB}	1.02 ± 0.10 ^{aA}	0.63 ± 0.01 ^{aA}	ND
	S3	547.43 ± 54.31 ^{aA}	43.88 ± 0.49 ^{cB}	5.48 ± 0.27 ^{aB}	5.45 ± 0.38 ^{aA}	2.98 ± 0.73 ^{aA}	1.46 ± 0.02 ^{bB}	0.87 ± 0.03 ^{bB}	ND
风豆 18 号	S1	681.75 ± 8.90 ^{bA}	34.83 ± 0.37 ^{aA}	6.59 ± 0.07 ^{cA}	4.26 ± 0.09 ^{aA}	3.78 ± 0.10 ^{cB}	0.96 ± 0.02 ^{aB}	0.47 ± 0.03 ^{aA}	ND
	S2	525.86 ± 17.33 ^{aA}	34.71 ± 0.55 ^{aA}	4.93 ± 0.02 ^{aA}	4.57 ± 0.30 ^{abA}	1.87 ± 0.24 ^{aA}	1.23 ± 0.03 ^{bB}	0.59 ± 0.07 ^{abA}	ND
	S3	567.15 ± 21.53 ^{aA}	38.75 ± 2.06 ^{aA}	2.39 ± 0.27 ^{aA}	5.38 ± 0.17 ^{bA}	2.99 ± 0.10 ^{bA}	1.37 ± 0.05 ^{bA}	0.69 ± 0.01 ^{bA}	ND

注: ND 代表没有检测到; 同列不同小写字母表示相同蚕豆品种不同食用阶段差异显著 ($P < 0.05$); 同列不同大写字母表示相同食用阶段不同蚕豆品种间差异显著 ($P < 0.05$); 表 3 同。

表3 不同食用阶段蚕豆蛋白的氨基酸组成(g/100 g 蛋白质)
Table 3 Amino acid composition of broad bean protein in different edible stages(g/100 g protein)

品种	食用阶段	Asp	Thr ^a	Ser	Glu	Gly	Ala	Cys	Val ^a	Met ^a
凤豆 15号	S1	2.14 ± 0.44 ^{aA}	0.60 ± 0.09 ^{aA}	0.71 ± 0.08 ^{aA}	3.69 ± 0.45 ^{aA}	ND	6.11 ± 1.41 ^{aB}	ND	0.73 ± 0.21 ^{aA}	ND
	S2	6.28 ± 0.16 ^{bA}	2.75 ± 0.37 ^{bA}	3.10 ± 0.42 ^{bA}	8.56 ± 1.75 ^{aA}	2.70 ± 0.40 ^{aA}	4.89 ± 0.45 ^{aA}	ND	3.62 ± 0.71 ^{bA}	0.53 ± 0.03 ^{aA}
	S3	9.15 ± 0.52 ^{cA}	2.93 ± 0.48 ^{bA}	4.68 ± 0.42 ^{cA}	16.47 ± 1.07 ^{bA}	3.21 ± 0.44 ^{aA}	4.32 ± 0.98 ^{aA}	ND	3.91 ± 0.61 ^{bA}	0.35 ± 0.06 ^{bA}
凤豆 18号	S1	5.50 ± 0.30 ^{aB}	2.30 ± 0.42 ^{aB}	2.66 ± 0.33 ^{aB}	7.88 ± 0.66 ^{aB}	2.16 ± 0.69 ^a	4.48 ± 0.58 ^{aA}	ND	3.02 ± 0.58 ^{aB}	0.31 ± 0.07 ^a
	S2	7.17 ± 0.21 ^{abB}	3.05 ± 0.27 ^{aB}	3.73 ± 0.37 ^{abB}	10.33 ± 1.58 ^{aB}	3.07 ± 0.57 ^{aB}	5.08 ± 0.71 ^{aB}	ND	4.04 ± 0.71 ^{aB}	0.65 ± 0.06 ^{bB}
	S3	9.14 ± 0.91 ^{bA}	2.98 ± 0.31 ^{aA}	4.67 ± 0.28 ^{bA}	16.39 ± 1.94 ^{bA}	3.13 ± 0.92 ^{aA}	4.52 ± 0.74 ^{aB}	ND	4.00 ± 0.88 ^{aB}	0.54 ± 0.03 ^{bB}
品种	食用阶段	Ile ^a	Leu ^a	Tyr	Phe ^a	Lys ^a	His	Arg	Pro	TAA
凤豆 15号	S1	0.35 ± 0.09 ^{aA}	0.26 ± 0.06 ^{aA}	0.31 ± 0.04 ^{aA}	ND	0.71 ± 0.08 ^{aA}	0.49 ± 0.14 ^{aA}	4.29 ± 0.69 ^{aB}	0.32 ± 0.03 ^{aA}	20.71 ± 3.85 ^{aA}
	S2	2.96 ± 0.83 ^{bA}	4.93 ± 0.34 ^{bA}	2.67 ± 0.44 ^{bA}	2.79 ± 0.85 ^{aA}	4.65 ± 0.52 ^{bA}	1.61 ± 0.57 ^{abA}	4.75 ± 0.99 ^{aA}	2.73 ± 0.40 ^{bA}	59.52 ± 4.22 ^{bA}
	S3	3.61 ± 0.57 ^{bA}	6.90 ± 0.75 ^{bA}	3.26 ± 0.86 ^{bA}	4.20 ± 0.95 ^{aA}	5.76 ± 0.81 ^{bB}	2.56 ± 0.48 ^{bB}	9.30 ± 0.96 ^{bA}	4.34 ± 0.62 ^{bB}	84.95 ± 7.58 ^{cA}
凤豆 18号	S1	2.39 ± 0.52 ^{aB}	4.14 ± 0.75 ^{aB}	2.21 ± 0.78 ^{aB}	2.31 ± 0.64 ^a	3.86 ± 0.72 ^{aB}	1.33 ± 0.64 ^{aB}	3.97 ± 0.37 ^{aA}	2.47 ± 0.72 ^{aB}	50.99 ± 4.71 ^{aB}
	S2	3.39 ± 0.40 ^{aB}	5.70 ± 0.91 ^{aB}	3.04 ± 0.85 ^{aB}	3.40 ± 0.41 ^{aB}	5.84 ± 0.55 ^{aB}	2.01 ± 0.96 ^{aB}	5.72 ± 0.71 ^{aB}	3.61 ± 0.64 ^{aB}	69.83 ± 3.86 ^{bB}
	S3	3.76 ± 0.51 ^{aB}	6.94 ± 0.95 ^{aA}	3.38 ± 0.44 ^{aB}	4.20 ± 0.65 ^{aA}	5.44 ± 0.81 ^{aA}	2.38 ± 0.85 ^{aA}	10.09 ± 1.31 ^{bB}	3.88 ± 0.79 ^{aA}	85.44 ± 7.11 ^{cB}

注:a代表必需氨基酸;TAA代表总氨基酸。

为S2阶段最高。氨基酸评分结果显示, Met在两个品种的各食用阶段中氨基酸评分(AAS)均最低(8.9~18.6), 且Cys在所有蚕豆样品中均未检出, 这与先前的相关报道^[27-28]一致, 即大多数豆科种子缺乏含硫氨基酸。不同品种及各食用阶段蚕豆蛋白氨基酸含量的差异及变化可归因于氨基酸通透酶家族(AAP)、植物根际微生物、土壤质地和外界环境等因素的影响所致^[29-30]。

氨基酸与矿物质之间的相关性分析结果显示, FD15中Mg和Ile、Leu、Tyr、Lys具有显著的负相关性($r = -0.999, P < 0.05$; $r = -0.998, P < 0.05$; $r = -0.999, P < 0.05$; $r = -1.000, P < 0.05$), Fe与Glu也具有显著的负相关性($r = -0.999, P < 0.05$)。FD18中Zn和Gly、Val之间具有显著的正相关性($r = 0.999, P < 0.05$; $r = 0.999, P < 0.05$), K和Pro具有显著的负相关性($r = -1.000, P < 0.05$), 其他矿物质与氨基酸之间均无相关性。这说明蚕豆在成熟过程中对矿物质的吸收、富集与氨基酸的合成之间没有明显的相互作用。

2.3 不同食用阶段蚕豆的显微结构

为了研究不同食用阶段蚕豆胚的微观结构变化, 采用扫描电子显微镜对其微观结构进行了观察, 结果见图1。图1中观察到的从卵形到球形不同形状的颗粒是淀粉颗粒。附着在淀粉颗粒上的非均匀不规则的颗粒, 它们代表蛋白质体或蛋白质基质、矿物质和纤维成分的碎片, 这与Ma等^[31-32]在不同豆科植物中所报道的一致。众所周知, 豆科植物种子在成熟过程中淀粉含量不断增加^[33]。从图1中可以看出, 蚕豆淀粉颗粒的大小随食用阶段的延后逐渐增加, 这表明蚕豆胚中淀粉含量的增加可能是由于淀粉颗粒大小的增加。此外, 淀粉颗粒的形状和密度在不同品种之间是不同的, FD15中多角形占多数, 而FD18中椭圆形或圆形占多数, 且凤豆18号中淀粉颗粒的密度大于凤豆15号。这可能与遗传因素、胚乳的充实程度、蛋白质含量及外界环境有关^[34-35]。

3 结论

两个未成熟蚕豆品种中含量最高的矿物质均为K、Mg、Ca、Zn, 并均能检测到少量的Fe、Cu和Mn, 均未检测到Cr, 且大部分矿物质在种皮中的含量高于

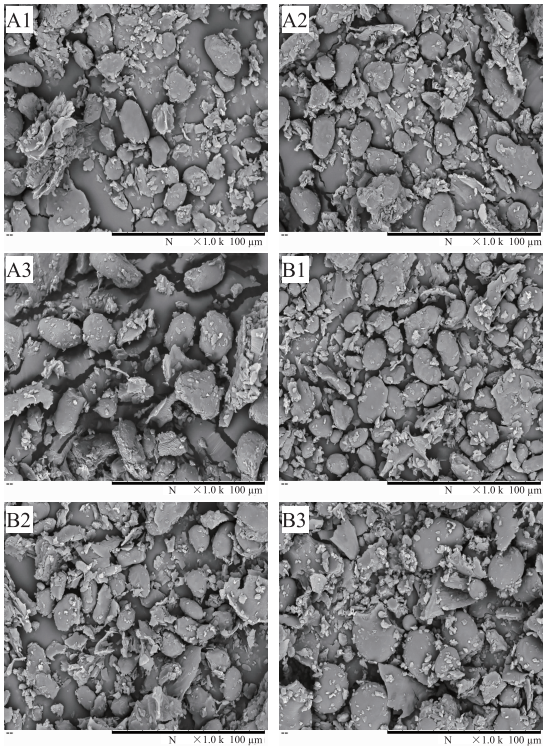


图1 不同食用阶段蚕豆的扫描电子显微照片(1000×)

Fig.1 Scanning electron micrograph of broad bean in different edible stages(1000×)

注:A1~A3表示凤豆15号的S1~S3阶段;
B1~B3表示凤豆18号的S1~S3阶段。

胚中;大体而言,矿物质含量在两个未成熟蚕豆品种的种皮和胚中均随食用阶段的延后逐渐降低;蚕豆蛋白中氨基酸种类及含量丰富,其中总EAA含量范围为2.65~27.86 g/100 g 蛋白质,占TAA含量的12.80%~37.35%;大部分单个氨基酸和TAA含量随着食用阶段的延后不断增加,且FD18中TAA含量和大部分EAA(Leu、Ile、Val和Met)的含量高于FD15, Met和Cys为限制性氨基酸;由相关性分析结果表明,未成熟蚕豆中氨基酸与矿物质之间没有明显的相互作用;微观结构观察结果显示了蚕豆淀粉颗粒在不同食用阶段过程中的变化,蚕豆淀粉颗粒的大小随食用阶段的延后逐渐增加,这表明蚕豆胚中

淀粉含量的增加可能是由于淀粉颗粒大小的增加。此外,淀粉颗粒的形状和密度在不同品种之间是不同的,FD15 中多角形占多数,而 FD18 中椭圆形或圆形占多数,且凤豆 18 号中淀粉颗粒的密度大于凤豆 15 号。

参考文献

- [1] Vioque J, Alaiz M, Girón-Calle J. Nutritional and functional properties of *Vicia faba* protein isolates and related fractions[J]. Food Chemistry, 2012, 132(1): 67-72.
- [2] Duc G. Faba bean (*Vicia faba* L.) [J]. Field Crops Research, 1997, 53(1): 99-109.
- [3] 拜占云. 蚕豆高产栽培技术[J]. 吉林农业, 2017(10): 90.
- [4] 郑敏, 欧阳满, 黄强. 蚕豆蛋白质的营养价值及利用分析[J]. 现代食品, 2017(20): 26-27.
- [5] Baginsky C, Peña-Neira Á, Cáceres A, et al. Phenolic compound composition in immature seeds of fava bean (*Vicia faba* L.) varieties cultivated in Chile [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2013, 31(1): 1-6.
- [6] Kalogeropoulos N, Chiou A, Ioannou M, et al. Nutritional evaluation and bioactive microconstituents (phytosterols, tocopherols, polyphenols, triterpenic acids) in cooked dry legumes usually consumed in the Mediterranean countries [J]. Food Chemistry, 2010, 121(3): 682-690.
- [7] Amarowicz R, Shahidi F. Antioxidant activity of broad bean seed extract and its phenolic composition [J]. Journal of Functional Foods, 2017, 38: 656-662.
- [8] Chaieb N, González J L, López-Mesas M, et al. Polyphenols content and antioxidant capacity of thirteen faba bean (*Vicia faba* L.) genotypes cultivated in Tunisia [J]. Food Research International, 2011, 44(4): 970-977.
- [9] 吴素芳. 种植鲜食蚕豆助推云南耿马农民增收致富[J]. 农业工程技术, 2018, 38(8): 80.
- [10] 陈国琛, 尹雪芬, 段银妹, 等. 优质多抗高产蔬菜专用型蚕豆新品种“凤豆十八号”选育及栽培技术[J]. 云南农业科技, 2017(1): 56-58.
- [11] 刘志楠, 王俊英, 喻东威, 等. 乳粉中矿物质检测稳定性分析研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(4): 799-802.
- [12] 匡立学, 聂继云, 李志霞, 等. 辽宁省 4 种主要水果矿物质含量及其膳食暴露评估[J]. 中国农业科学, 2016, 49(20): 3993-4003.
- [13] 邓梦雅, 朱丽, 吴东慧, 等. 蔬菜中矿物质含量测定、营养评价及风险评估[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(9): 97-102.
- [14] 徐文龙, 崔梦竹, 梁红艳, 等. 氨基酸对内质网应激影响的研究进展[J]. 国际检验医学杂志, 2019, 40(3): 273-276.
- [15] 孙向东, 兰静, 任红波, 等. 黑龙江省大豆与进口大豆品质比较[J]. 黑龙江农业科学, 2017(7): 51-58.
- [16] Sun J, Dong S N. The importance of protein in food industry [J]. Meat Res, 2009, 23(4): 66-73.
- [17] 拓云, 霍彩琴, 田福东, 等. 致敏蛋白 α 亚基缺失型大豆氨基酸组成及营养评价[J]. 食品科学, 2014, 35(9): 224-228.
- [18] 刘明, 谭洪卓, 田晓红, 等. 20 种代表性主产区蚕豆样品矿物质含量及其与烹煮品质的相关性分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(8): 2269-2273.
- [19] 王春明, 刘洋. 蚕豆组成及加工利用进展[J]. 农业机械, 2011(17): 91-93.
- [20] 王毅. 湟中县蚕豆栽培技术[J]. 农民致富之友, 2017(21): 57.
- [21] 吴春芳, 林晶晶, 卞晓春, 等. 蚕豆营养粉作为组合主食的营养价值及其应用性研究探讨(英文)[J]. Agricultural Science & Technology, 2015, 16(6): 1280-1285.
- [22] Lu Y H, Huang J H, Li Y C, et al. Variation in nutritional compositions, antioxidant activity and microstructure of *Lycopus lucidus* Turcz. root at different harvest times [J]. Food Chemistry, 2015, 183: 91-100.
- [23] Gao C Y, Lu Y H, Tian C R, et al. Main nutrients, phenolics, antioxidant activity, DNA damage protective effect and microstructure of *Sphallerocarpus gracilis* root at different harvest time [J]. Food Chemistry, 2011, 127(2): 615-622.
- [24] 柏方敏, 田大伦, 方晰, 等. 洞庭湖西岸区防护林土壤与植物微量元素含量特征[J]. 中南林业科技大学学报, 2010, 30(9): 1-9.
- [25] 刘建明, 开昭英, 刘善科, 等. 中微量元素与植物营养和人体健康的关系[J]. 化肥工业, 2016, 43(3): 85-90, 103.
- [26] 申小云, 霍宾, 闽小莹, 等. 普氏原羚自然栖息地草地矿物质营养的评价[J]. 草业学报, 2018, 27(3): 108-115.
- [27] Vasconcelos I M, Maia F M M, Farias D F, et al. Protein fractions, amino acid composition and antinutritional constituents of high-yielding cowpea cultivars [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2009, 23(1): 54-60.
- [28] Laurena A C, Rodriguez F M, Sabino N G, et al. Amino acid composition, relative nutritive value and *in vitro* protein digestibility of several *Philippine indigenous* legumes [J]. Plant Foods for Human Nutrition, 1991, 41(1): 59-68.
- [29] 范贝, 刘明晓, 李慧杰, 等. 拟南芥 AAP 基因家族的生物信息学分析[J]. 生命的化学, 2016, 36(3): 372-378.
- [30] 陈展宇, 陈天鹏, 李慧杰, 等. 植物吸收运转氨基酸的分子机制进展[J]. 分子植物育种, 2017, 15(12): 5166-5171.
- [31] Ma Z, Boye J I, Simpson B K, et al. Thermal processing effects on the functional properties and microstructure of lentil, chickpea, and pea flours [J]. Food Research International, 2010, 44(8): 2534-2544.
- [32] Romano A, Giosafatto C V L, Pierro P D, et al. Impact of transglutaminase treatment on properties and *in vitro* digestibility of white bean (*Phaseolus vulgaris* L.) flour [J]. Food Research International, 2016, 88: 239-246.
- [33] 张圣平, 刘世琦, 谷卫刚, 等. 菜用大豆荚果发育过程中主要营养组分的变化[J]. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2005(1): 97-100.
- [34] 余徐润, 邵珊珊, 于恒, 等. 3 类谷物胚乳淀粉体形态发育的比较[J]. 扬州大学学报: 农业与生命科学版, 2015, 36(2): 28-33, 67.
- [35] 王曼曼. 关于淀粉体形态和发育的研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2009.