

3 种蚕豆不同可食阶段主要营养素含量及超微结构的变化

高春燕¹, 李望², 李媛丽², 卢跃红^{1*}

(¹北方民族大学生物科学与工程学院 银川 750021

²大理大学公共卫生学院 云南大理 671000)

摘要 为探究蚕豆在采收过程中主要营养素及微观结构的变化规律,采用分光光度计、火焰原子吸收分光光度计、氨基酸分析仪、自动凯氏定氮仪、扫描电镜等研究了 3 个蚕豆品种(FD6、FD13 和 FD17)在 3 个可食阶段(S1、S2 和 S3)的还原糖、总糖、蛋白质、矿物质、氨基酸组成以及胚的微观结构。结果显示,3 种的蚕豆还原糖含量范围为 1.16~2.41 g/100 g,总糖含量范围为 35.87~53.46 g/100 g,蛋白质含量范围为 25.44%~27.45%;K、Mg、Ca 和 Zn 是蚕豆中的主要矿物质元素,种皮和胚中不同矿物质元素在可食过程中的变化呈现多样性;蚕豆总氨基酸含量范围为 19.59~88.14 g/100 g 蛋白质,必需氨基酸含量为 2.90~28.54 g/100 g 蛋白质;以氨基酸总含量为评价指标时,FD6 和 FD17 在可食阶段 S3 品质较高,而在可食阶段 S1 品质较低。相关性分析结果显示,在蚕豆胚和种皮中,矿物质含量与氨基酸水平的相关性存在差异。扫描电镜观察结果表明,不同品种间、不同可食阶段淀粉颗粒存在差异。整体而言,蚕豆的种皮和胚都含有丰富的营养素。

关键词 蚕豆; 可食阶段; 营养成分; 超微结构

文章编号 1009-7848(2024)05-0441-12 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2024.05.037

蚕豆(*Vicia faba* L.)又名南豆、胡豆等,为一年生或越年生草本植物,隶属于豆科、野豌豆属。全球种植蚕豆的国家约有 45 个,以亚洲种植面积最大,其次为非洲和欧洲。蚕豆在我国有 2 000 多年的种植历史,产量约占世界总产量的 2/3,主要在云南、青海、四川、湖南、湖北、江苏、浙江等省生长^[1]。我国蚕豆种植面积最大的省份是云南省,每年的种植面积达到 35 万 hm²,约占全国种植面积的 23.7%^[2]。蚕豆中的蛋白质含量达 25%~35%,是优质蛋白质的重要食物来源。此外,蚕豆还含有丰富的糖类、矿物质、维生素等营养素和多酚、三萜酸、左旋多巴等多种生物活性物质^[3]。

云南省作为我国鲜食蚕豆的主产区,在当地未完全成熟的蚕豆种子作为一种鲜食蔬菜被广泛食用。然而,鲜食蚕豆在不同可食阶段其营养组成鲜见报道。本研究以大理州农业科学院蚕豆研究室培育的优质、高产、菜用型蚕豆品种——凤豆 6 号(FD6)、凤豆 13 号(FD13)和凤豆 17 号(FD17)为原料,测定其在 3 个可食阶段种皮和胚中的矿

物质含量,整粒还原糖、总糖、蛋白质含量和氨基酸组成,观察胚的微观结构,揭示不同品种蚕豆采收过程中主要营养素含量及胚的微观结构变化规律,以期根据不同需求合理收获蚕豆提供理论依据。同时,为蚕豆鲜食品种的培育提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

蚕豆,根据蚕豆籽粒的饱满度,分别于播种后的第 138 天(S1)、第 156 天(S2)和第 173 天(S3)采集于大理州农业科学院蚕豆研究基地;3 个蚕豆品种相关信息见表 1。

钙、镁、钾、铁、锌、锰、铜、铬标准溶液(1 000 μg/mL),国家标准物质研究中心;氨基酸标准品,北京谱析标准技术有限公司;硝酸、盐酸(优级纯),西陇科学股份有限公司;3,5-二硝基水杨酸,北京索莱宝科技有限公司。

1.2 仪器与设备

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 Shimadzu 公司;RJM-28-10 马弗炉,湖南长沙市华光电炉厂;RE-3000 旋转蒸发器,上海亚荣生化仪器厂;L-8900 氨基酸分析仪,日本 Hitachi 公司;SKD-200 自动凯氏定氮仪,上

收稿日期: 2023-05-15

基金项目: 青年人才培育项目(2021KYQD37);宁夏自然科学基金项目(2022AAC03263)

第一作者: 高春燕,女,博士,教授

通信作者: 卢跃红 E-mail: 78645515@qq.com

表1 3个蚕豆品种相关信息

Table 1 Related information of three broad bean varieties

品种	杂交育种		籽粒类型	干籽粒营养成分含量/%			参考文献
	母本	父本		粗蛋白	粗脂肪	总淀粉	
FD6	凤豆一号	Feb-82	大粒型	26.7	0.71	46.99	[4],[5]
FD13	法国豆	Mar-82	阔厚型	30.4	1.62	40.60	[6]
FD17	凤豆三号	85173-11-935	中厚型	26.9	-	36.69	[7]

注：“-”表示无相关信息。

海沛欧分析仪器有限公司;Quanta 200型环境扫描电子显微镜,荷兰FEI公司。

1.3 试验方法

1.3.1 蚕豆样品前处理 将蚕豆去除豆荚后冷冻干燥获得整粒干燥种子,并手工分离种皮和胚;分别将整粒种子、种皮、胚粉碎过60目筛,储存至-30℃用于进一步测定分析。

1.3.2 总糖和还原糖含量的测定 参照张珣等^[8]的方法,采用DNS法测定总糖和还原糖含量。

1.3.2.1 标准曲线的绘制 分别吸取0,0.2,0.4,0.6,0.8,1.0,1.2 mL 1 mg/mL葡萄糖标准溶液置于25 mL具塞试管中,超纯水补至2 mL,加入DNS试剂1.5 mL,混匀,沸水浴5 min后,冷却到室温,超纯水定容25 mL刻度处,混匀,于波长540 nm处测定吸光度值。以葡萄糖质量为横坐标,吸光度值为纵坐标,绘制标准曲线为 $Y = 0.5365x - 0.018$ ($R^2 = 0.9963$)。

1.3.2.2 还原糖含量的测定 准确称取整粒蚕豆粉各1.0 g,加入40 mL蒸馏水,于50℃恒温水浴中保温20 min过滤,收集滤液并定容50 mL。还原糖含量通过标准曲线计算,结果以g/100 g表示。

1.3.2.3 总糖含量的测定 准确称取整粒蚕豆粉各1.0 g,依次加入10 mL 6 mol/L的盐酸和15 mL超纯水,搅拌均匀后在沸水浴中加热0.5 h,冷却后,加1滴酚酞指示剂,用6 mol/L氢氧化钠溶液中和至微红色,过滤后收集滤液并定容100 mL,用于总糖含量的测定。总糖含量通过标准曲线计算。结果以g/100 g表示。

1.3.3 蛋白质含量的测定 根据《食品安全国家标准 食品中蛋白质测定的方法》(GB 5009.5-2016),采用自动凯氏定氮法进行测定。

1.3.4 矿物质元素含量的测定 参照Lu等^[9]的方法,具体操作流程如下:准确称取0.5 g蚕豆种皮

和胚粉末,先用电炉炭化,然后使用马弗炉于(500±50)℃下灰化4 h,冷却,以10%硝酸10 mL溶解、过滤,采用火焰原子吸收分光光度计测定矿物质元素含量,测定结果以mg/100 g表示。

1.3.5 氨基酸组成的分析 参照Gao等^[10]的方法,采用等电点沉淀法制备整粒蚕豆蛋白。整粒蚕豆粉末以NaOH(pH 10.0)室温振荡提取3 h后抽滤,滤液加盐酸至pH=4,离心(12 000 r/min,10 min)收集沉淀的蛋白质,冷冻干燥得蚕豆蛋白提取物。准确称取100 mg蚕豆蛋白提取物,以10 mL 6 mol/L盐酸于110℃氮气下加热水解24 h,减压浓缩,以柠檬酸钠缓冲液(0.02 mol/L,pH 2.2)定容5 mL,0.22 μm滤膜过滤后,采用氨基酸分析仪测定氨基酸含量,结果以g/100 g蛋白质表示。

1.3.6 超微结构观察 将干燥的蚕豆胚颗粒均匀地分散于粘有导电双面胶的铜柱上,并固定在载物台上,采用环境扫描电子显微镜,在低真空模式下(20.0 kV,50 Pa)观察其微观结构。

1.3.7 数据处理 数据用($\bar{x} \pm s$)表示,采用SPSS 25.0统计软件进行显著性检验、相关性分析、主成分分析和聚类分析, $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。采用Origin 2021进行作图。

2 结果与分析

2.1 还原糖、总糖及蛋白质含量的测定

3个蚕豆品种不同可食阶段还原糖、总糖及蛋白质含量的测定结果见表2。就还原糖而言,其含量范围为1.16~2.41 g/100 g,且随着可食阶段的延后,FD6、FD13和FD17还原糖含量都呈逐渐下降的趋势。同一可食阶段,不同品种间含量存在差异,在可食阶段S1,FD6含量最高,FD13含量最低;在S2和S3阶段,FD17与FD6之间差异无统计学意义,且均显著高于FD13。就总糖而言,其含

量范围为 35.87~53.46 g/100 g, 与还原糖含量相反,随着可食阶段的延后,3个品种总糖含量均呈逐渐升高的趋势,且同一可食阶段,不同品种间含量也存在差异。在可食阶段 S1,FD13 含量最高,

FD6 含量最低。在 S2,3个品种间含量无差异($P>0.05$)。在 S3 阶段,FD6 含量最高,FD13 含量最低。就蛋白质而言,其含量范围为 25.44%~27.45%,且3个品种不同可食阶段间差异均无统计学意义。

表2 不同可食阶段3种蚕豆的还原糖、总糖及蛋白质含量

Table 2 Contents of reducing sugar, total sugar and protein of three types of broad bean at different edible stages

品种	可食阶段	还原糖/g·(100 g) ⁻¹	总糖/g·(100 g) ⁻¹	蛋白质/%
FD6	S1	2.41 ± 0.25 ^{aA}	35.87 ± 0.61 ^{aA}	27.15 ± 0.57 ^{aA}
	S2	1.61 ± 0.03 ^{bA}	45.49 ± 1.64 ^{bA}	26.01 ± 0.13 ^{aA}
	S3	1.32 ± 0.07 ^{bA}	53.46 ± 0.56 ^{cA}	25.44 ± 0.42 ^{aA}
FD13	S1	1.43 ± 0.03 ^{ab}	45.22 ± 0.49 ^{ab}	27.34 ± 0.47 ^{aA}
	S2	1.37 ± 0.01 ^{hb}	45.97 ± 1.35 ^{aA}	27.45 ± 0.48 ^{ab}
	S3	1.16 ± 0.04 ^{cb}	50.94 ± 0.45 ^{hb}	26.96 ± 0.85 ^{ab}
FD17	S1	1.92 ± 0.05 ^{ac}	38.58 ± 0.26 ^{ac}	26.11 ± 0.27 ^{aA}
	S2	1.63 ± 0.08 ^{bA}	45.03 ± 1.10 ^{bA}	26.47 ± 0.65 ^{ab}
	S3	1.32 ± 0.01 ^{cA}	52.93 ± 0.74 ^{cA}	25.77 ± 0.92 ^{ab}

注:同列不同小写字母表示同一蚕豆品种不同可食阶段的差异具有统计学意义($P<0.05$);同列不同大写字母表示同一可食阶段不同蚕豆品种间的差异具有统计学意义($P<0.05$);下同。

2.2 矿物质元素含量的测定

3个蚕豆品种不同可食阶段种皮和胚中矿物质含量的测定结果见表3。结果显示,种皮和胚中矿物质的组成存在差异。大体上而言,种皮中含量最丰富的矿物质是K(472.23~983.10 mg/100 g),其次是Mg(45.08~61.94 mg/100 g)、Ca(17.27~82.25 mg/100 g)、Zn(2.05~7.10 mg/100 g)、Cu(0.53~3.71 mg/100 g)、Mn(0.51~1.38 mg/100 g)和Fe(0.12~1.84 mg/100 g);胚中含量最丰富的矿物质是K(544.66~771.87 mg/100 g),其次是Mg(39.42~48.77 mg/100 g)、Ca(2.43~21.34 mg/100 g)、Zn(4.27~6.80 mg/100 g)、Fe(2.09~5.14 mg/100 g)、Cu(0.74~1.38 mg/100 g)和Mn(0.48~1.04 mg/100 g);且所有样品中均未检出Cr。由此可见,K、Mg、Ca和Zn是蚕豆中的主要矿物质元素。与常见蔬菜^[11]相比,可食阶段S1和S2的蚕豆种皮及3个可食阶段胚中的Zn含量显著高于菠菜(3.91 mg/100 g),且大体上讲Cu含量高于白菜(0.87 mg/100 g),表明蚕豆是Zn和Cu良好的食物来源。

同一矿物质元素在种皮和胚中的含量存在差异。Mg和Ca在3个可食阶段均表现为种皮中含量高于胚,而Fe正好与之相反,表现为胚中含量

高于种皮;Cu和Mn在可食阶段S1和S2均表现为种皮中含量高于胚,而在S3表现为胚中含量高于种皮;就K而言,FD6表现为在3个可食阶段种皮中含量均高于胚,FD13和FD17表现为在可食阶段S1和S2种皮中含量高于胚,而在S3种皮中含量低于胚;就Zn而言,FD6表现为在3个可食阶段胚中含量均高于种皮,FD13和FD17表现为在可食阶段S1和S2种皮中含量高于胚,而在S3种皮中含量低于胚。

蚕豆种皮和胚中不同矿物质元素在可食过程中的变化呈现多样性。从可食阶段S1~S3,K表现为在种皮和胚中的含量均逐渐降低;Ca表现为在种皮中的含量逐渐升高,而在胚中的含量逐渐降低;Mg、Zn和Cu均表现为在种皮中的含量逐渐降低,而在胚中的含量逐渐升高;Mn表现为在种皮中的含量先升高后降低,而在胚中的含量逐渐升高;Fe表现为在种皮中的含量逐渐降低,而在胚中不同品种间存在差异。

综上,3个品种的蚕豆种皮和胚中均含有丰富的必需的人体必需常量元素K、Mg、Ca和少量必需的微量元素Zn、Fe、Cu、Mn,且不同品种、不同部位、不同可食阶段其含量不同,这与其他学者^[12-14]的

研究结果一致,即植物体内的矿物质含量受植物品种、土壤、季节等因素的影响,且植物对不同矿物质的富集能力存在差异。此外,蚕豆的种皮也含有丰富的矿物质,应加以开发与利用,而不是丢弃;同时,不同可食阶段各矿物质元素含量不同。

表3 不同可食阶段蚕豆种皮和胚中的矿物质含量(mg/100 g)

品种		Table 3 Mineral content in seed coat and embryo of broad bean at different edible stages (mg/100 g)									
可食阶段	K	Mg	Ca	Zn	Fe	Cu	Mn	Cr			
种皮	FD6	S1	983.10 ± 16.46 ^{ab}	57.29 ± 1.50 ^a	17.27 ± 0.53 ^{ab}	5.35 ± 0.03 ^{ba}	1.34 ± 0.10 ^a	1.71 ± 0.38 ^{ba}	1.28 ± 0.21 ^{ba}	nd	
		S2	813.66 ± 2.58 ^{bc}	51.51 ± 1.68 ^{ba}	42.56 ± 0.47 ^{bb}	5.32 ± 0.12 ^{ba}	0.68 ± 0.06 ^{ba}	1.23 ± 0.03 ^{aba}	1.38 ± 0.11 ^{bc}	nd	
		S3	633.86 ± 51.35 ^{ab}	45.08 ± 0.10 ^{ba}	71.18 ± 5.17 ^{ab}	2.05 ± 0.02 ^a	0.37 ± 0.03 ^a	0.53 ± 0.07 ^a	0.67 ± 0.08 ^{abc}	nd	
	FD13	S1	870.54 ± 19.73 ^{bab}	60.81 ± 0.17 ^{ba}	27.76 ± 1.17 ^{ab}	6.38 ± 2.01 ^{bb}	1.16 ± 0.13 ^{ba}	3.17 ± 0.24 ^{bb}	1.04 ± 0.16 ^{ba}	nd	
		S2	848.42 ± 4.02 ^{bc}	61.94 ± 1.00 ^{bb}	29.23 ± 0.17 ^a	7.10 ± 0.34 ^c	0.68 ± 0.07 ^a	2.61 ± 0.01 ^{bcc}	1.22 ± 0.05 ^{bcc}	nd	
		S3	480.22 ± 25.67 ^{ba}	54.88 ± 3.80 ^{bb}	82.25 ± 0.30 ^{bb}	2.21 ± 0.13 ^a	0.39 ± 0.07 ^a	0.87 ± 0.04 ^{ac}	0.51 ± 0.09 ^a	nd	
	FD17	S1	811.33 ± 20.39 ^a	57.03 ± 1.53 ^{ba}	19.80 ± 1.69 ^{ab}	5.40 ± 0.18 ^{ba}	1.84 ± 0.13 ^{ba}	2.71 ± 0.18 ^{ab}	0.74 ± 0.01 ^a	nd	
		S2	716.11 ± 24.75 ^b	54.46 ± 2.96 ^a	27.68 ± 3.16 ^a	6.12 ± 0.21 ^{bab}	1.05 ± 0.31 ^{ba}	2.45 ± 0.36 ^{bcc}	0.98 ± 0.05 ^{bab}	nd	
		S3	472.23 ± 0.25 ^a	49.77 ± 0.10 ^{bab}	64.86 ± 1.83 ^{ba}	3.48 ± 0.09 ^{ab}	0.12 ± 0.03 ^a	0.65 ± 0.09 ^{ab}	0.63 ± 0.05 ^{ab}	nd	
胚	FD6	S1	771.87 ± 15.78 ^{bb}	45.77 ± 0.61 ^{bc}	21.34 ± 0.80 ^c	5.89 ± 0.03 ^{ab}	4.93 ± 0.13 ^{ac}	0.84 ± 0.09 ^a	0.61 ± 0.01 ^{ab}	nd	
		S2	647.10 ± 3.79 ^{bc}	44.20 ± 0.17 ^{ab}	11.75 ± 0.29 ^{ab}	6.58 ± 0.04 ^{bb}	3.89 ± 0.38 ^{ac}	1.02 ± 0.10 ^a	0.74 ± 0.01 ^{ba}	nd	
		S3	611.91 ± 0.44 ^a	48.77 ± 0.31 ^{bd}	8.92 ± 0.22 ^{ac}	6.80 ± 0.09 ^{bb}	4.83 ± 0.27 ^{ab}	1.03 ± 0.03 ^a	1.04 ± 0.01 ^{cb}	nd	
	FD13	S1	632.24 ± 5.99 ^a	39.42 ± 0.07 ^{ab}	10.96 ± 0.52 ^{bb}	4.30 ± 0.06 ^a	2.29 ± 0.21 ^a	0.74 ± 0.04 ^a	0.62 ± 0.05 ^{ac}	nd	
		S2	603.97 ± 8.31 ^{bcc}	41.39 ± 0.21 ^{bc}	9.36 ± 0.07 ^{bc}	4.92 ± 0.01 ^{aba}	2.09 ± 0.55 ^{ab}	0.99 ± 0.07 ^{aba}	0.73 ± 0.05 ^a	nd	
		S3	572.26 ± 2.55 ^a	44.91 ± 0.73 ^{cd}	3.12 ± 0.34 ^a	5.10 ± 0.02 ^{ba}	2.90 ± 0.69 ^a	1.25 ± 0.02 ^{bb}	0.99 ± 0.03 ^{bc}	nd	
	FD17	S1	621.58 ± 44.93 ^a	40.08 ± 1.90 ^{ab}	14.21 ± 0.92 ^{bb}	4.27 ± 0.02 ^a	5.14 ± 0.31 ^{bc}	0.83 ± 0.08 ^a	0.48 ± 0.02 ^a	nd	
		S2	580.05 ± 14.65 ^{ab}	40.11 ± 0.60 ^{ac}	7.29 ± 0.15 ^{bb}	4.80 ± 0.05 ^a	3.51 ± 0.11 ^{ac}	1.07 ± 0.04 ^{ba}	0.64 ± 0.03 ^{ba}	nd	
		S3	544.66 ± 3.49 ^a	40.20 ± 0.98 ^{abb}	2.43 ± 0.60 ^a	5.16 ± 0.09 ^a	2.89 ± 0.18 ^a	1.38 ± 0.04 ^{bcc}	0.73 ± 0.01 ^{ba}	nd	

注:“nd”表示未检出。

2.3 氨基酸组成与含量的测定

不同可食阶段蚕豆蛋白的氨基酸色谱图及氨基酸组成、含量别见图1和表4。3个品种蚕豆总氨基酸含量范围为19.59~88.14 g/100 g蛋白质,且主要以谷氨酸、天门冬氨酸、精氨酸、亮氨酸、丙氨酸和赖氨酸为主,这与Vioque等^[5]的研究结果一致。另外,蚕豆蛋白中检出少量的蛋氨酸,而半胱氨酸均未检测到,这与Vasconcelos等^[16]和Laurena等^[17]的报道一致,即大多数豆类植物含硫氨基酸含量很少。

所测的7种必需氨基酸包括赖氨酸、亮氨酸、蛋氨酸、异亮氨酸、苯丙氨酸、苏氨酸、缬氨酸,含量范围为2.9~28.54 g/100 g蛋白质,占氨基酸总含量(E/T)的14.8%~38.53%,必需氨基酸与非必需氨基酸的比值(E/T)范围为17.38%~62.70%。结果显示,FD6在可食阶段S2、FD13在可食阶段S1和FD17在可食阶段S2的 E/T 值最接近WHO-UN标准中的理想蛋白质($E/T=40%$), E/T 值最接近WHO/FAO标准中的理想蛋白质($E/T=60%$)^[18-19]。

从可食阶段S1到S3,3种蚕豆蛋白总氨基酸含量均呈现逐渐升高的趋势,且大体上单个氨基酸的含量在可食过程中的变化与总氨基酸含量变化一致。不同品种在同一可食阶段总氨基酸含量存在差异。在可食阶段S1,FD13含量最高,其次为FD17,FD6含量最低;在可食阶段S2,FD13含量最高,其次为FD6,FD17含量最低;在可食阶段S3,FD6含量最高,其次为FD17,FD13含量最低。不同品种在同一可食阶段单个氨基酸含量也存在差异。例如天门冬氨酸在可食阶段S1,FD13含量最高,其次为FD17,FD6含量最低;在可食阶段S2,FD13含量最高,其次为FD6,FD17含量最低;在可食阶段S3,FD6含量最高,其次为FD13,FD17含量最低。不同品种间、不同可食阶段间蚕豆蛋白氨基酸组成的不同可归因于氨基酸通透酶家族(AAP)^[20-21]、蚕豆根系分泌物^[22]、害虫^[23]、土壤性质(氮素组成及含量、酸度、结构、污染物组成及浓度等)和外界环境(温度、光照强度、二氧化碳浓度等)^[24]等因素的综合作用。

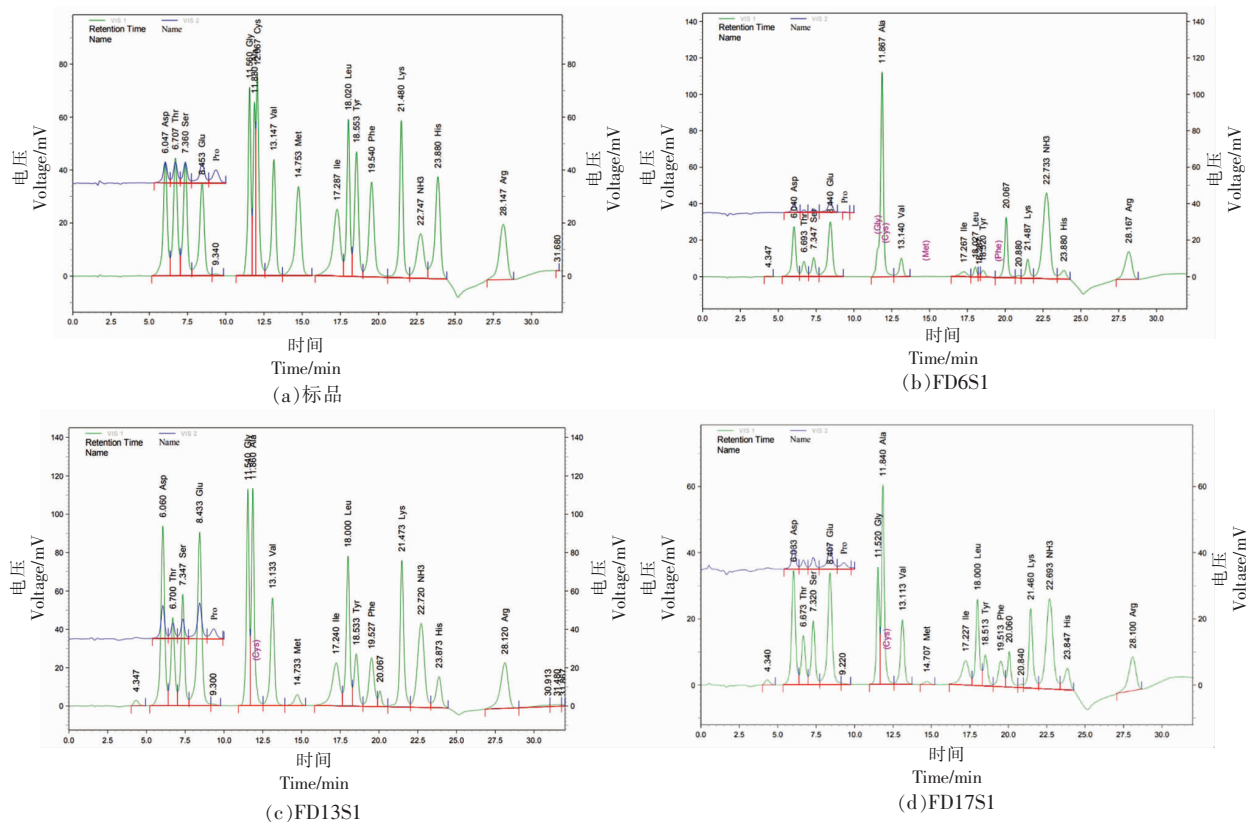
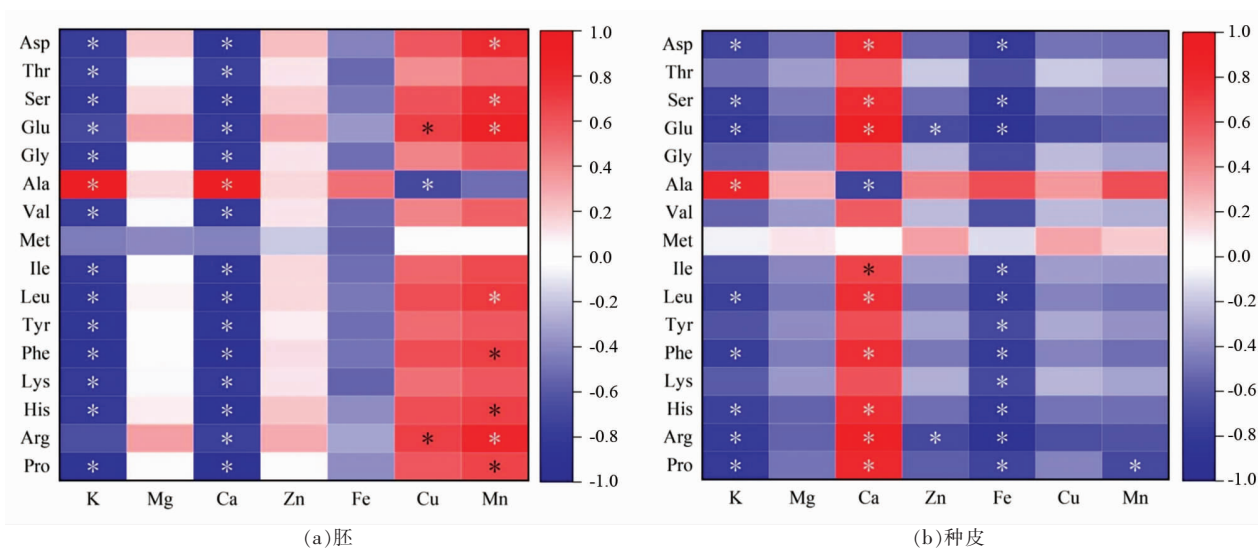


图1 代表性的氨基酸色谱图

Fig.1 Representative chromatogram of amino acid



注：“*(黑色/白色)”表示 $P < 0.05$; 蓝色表示具有负相关关系, 相关系数 < 0 ; 红色表示具有正相关关系, 相关系数 > 0 。

图2 氨基酸与矿物质之间的相关性分析

Fig.2 Correlation analysis between amino acids and minerals

氨基酸含量与矿物质含量之间的相关性分析结果见图2。就蚕豆胚而言, Mg、Zn、Fe 的含量与所测定的16种氨基酸的含量之间均无显著相关性; K和Ca的含量与丙氨酸的含量呈显著正相关关系, 与其它氨基酸(Ca除蛋氨酸, K除蛋氨酸和精氨酸)的含量呈显著的负相关关系; Cu的含量与谷氨酸和精氨酸的含量呈显著的正相关关系, 与丙氨酸的含量呈显著的负相关关系; Mn的含量与苯丙氨酸、组氨酸、脯氨酸、天门冬氨酸、丝氨酸、谷氨酸、亮氨酸和精氨酸的含量均呈显著的正相关性。就蚕豆种皮而言, Mg和Cu的含量与所测定的16种氨基酸含量之间均无显著相关性; Mn的含量只与脯氨酸的含量之间存在显著负相关关系; Zn的含量与谷氨酸和精氨酸的含量呈显著负相关关系; Ca的含量与丙氨酸的含量呈显著负相关关系, 与脯氨酸、精氨酸、组氨酸、苯丙氨酸、亮氨酸、异亮氨酸、丙氨酸、谷氨酸和丝氨酸的含量呈显著正相关关系; K的含量与丙氨酸的含量呈显著正相关关系, 与脯氨酸、精氨酸、组氨酸、苯丙氨酸、亮氨酸、丙氨酸、谷氨酸和丝氨酸的含量呈显著负相关关系; 所测定的16种氨基酸, 除苏氨酸、甘氨酸、丙氨酸、缬氨酸和蛋氨酸外, Fe的含量与其余11种氨基酸的含量均存在显著的负相关关系。以上结果提示相同部位、不同矿物质元素含量与氨基酸含量的相关性存在差异; 同时, 不同

部位、相同矿物质元素含量与氨基酸含量的相关性也存在差异。

不同可食阶段蚕豆蛋白质的氨基酸主成分分析结果见表5。在16个氨基酸组分中提取了2个主成分(特征值 > 1), 主成分1的特征值为13.95, 累积特征贡献率为87.19%, 主要影响因子为亮氨酸、苯丙氨酸、异亮氨酸, 主成分2的特征值为1.58, 累积特征贡献率为97.08%, 主要影响因子为蛋氨酸、苏氨酸、缬氨酸。将系数向量值与标准化后的数据相乘, 得出2个主成分表达式为: $F_1 = 0.262Z_{Asp} + 0.255Z_{Thr} + 0.263Z_{Ser} + 0.243Z_{Glu} + 0.26Z_{Gly} - 0.23Z_{Ala} + 0.257Z_{Val} + 0.123Z_{Met} + 0.265Z_{Ile} + 0.267Z_{Leu} + 0.264Z_{Tyr} + 0.267Z_{Phe} + 0.261Z_{Lys} + 0.262Z_{His} + 0.222Z_{Arg} + 0.256Z_{Pro}$; $F_2 = -0.14Z_{Asp} + 0.215Z_{Thr} - 0.12Z_{Ser} - 0.32Z_{Glu} + 0.162Z_{Gly} + 0.077Z_{Ala} + 0.211Z_{Val} + 0.687Z_{Met} + 0.107Z_{Ile} - 0.03Z_{Leu} + 0.13Z_{Tyr} - 0.03Z_{Phe} + 0.166Z_{Lys} - 0.11Z_{His} - 0.42Z_{Arg} - 0.16Z_{Pro}$ 。由于 F_1 、 F_2 这2个主成分从不同方面体现了不同可食阶段蚕豆蛋白的氨基酸含量水平, 而单独使用某一主成分无法对其做出综合性评价, 所以综合主成分表达式为: $F_{合} = 0.872F_1 + 0.099F_2$, 计算各样品的综合得分, 分数高低可反映不同品种不同可食阶段蚕豆样品中氨基酸综合品质的高低。由表6可知, 综合得分较高的是FD6和FD17的S3阶段, 得分较低的是FD6和FD17的S1阶段, 表明以氨基酸总含量为评价

表 4 不同可食阶段蚕豆蛋白的氨基酸组成及含量(g/100 g 蛋白质)

	FDI6						FDI3			FDI7			平均值
	S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3	
天门冬氨酸	2.19 ± 0.18 ^{ab}	6.64 ± 0.23 ^{ab}	9.79 ± 0.13 ^{ca}	6.45 ± 0.31 ^{bc}	7.70 ± 0.31 ^{bb}	8.39 ± 0.27 ^{ba}	4.52 ± 0.49 ^{ab}	6.04 ± 0.55 ^{ca}	8.29 ± 0.44 ^{ba}	8.29 ± 0.44 ^{ba}	6.04 ± 0.55 ^{ca}	8.29 ± 0.44 ^{ba}	6.67
苏氨酸 ^a	0.60 ± 0.08 ^{ca}	2.87 ± 0.24 ^{ba}	3.17 ± 0.42 ^{ba}	2.79 ± 0.30 ^{ab}	2.83 ± 0.24 ^{ca}	2.60 ± 0.57 ^{ca}	1.74 ± 0.34 ^{ab}	2.65 ± 0.48 ^{ca}	2.68 ± 0.30 ^{ca}	2.68 ± 0.30 ^{ca}	2.65 ± 0.48 ^{ca}	2.68 ± 0.30 ^{ca}	2.44
丝氨酸	0.68 ± 0.08 ^{ca}	3.23 ± 0.61 ^{ba}	4.97 ± 0.37 ^{ca}	3.19 ± 0.21 ^{ab}	3.96 ± 0.23 ^{ca}	4.29 ± 0.41 ^{ca}	2.04 ± 0.61 ^{ab}	3.04 ± 0.48 ^{ab}	4.30 ± 0.52 ^{ba}	4.30 ± 0.52 ^{ba}	3.04 ± 0.48 ^{ab}	4.30 ± 0.52 ^{ba}	3.30
谷氨酸	3.44 ± 0.61 ^{ca}	9.62 ± 0.55 ^{ba}	17.66 ± 2.21 ^{ca}	8.68 ± 0.49 ^{ab}	12.49 ± 1.50 ^{ab}	15.26 ± 1.53 ^{ca}	6.02 ± 0.79 ^{abc}	8.40 ± 0.85 ^{ca}	15.26 ± 1.82 ^{ba}	15.26 ± 1.82 ^{ba}	8.40 ± 0.85 ^{ca}	15.26 ± 1.82 ^{ba}	10.76
甘氨酸	nd	3.00 ± 0.71 ^{ca}	3.43 ± 0.82 ^{ca}	2.80 ± 0.31 ^{ca}	2.95 ± 0.52 ^{ca}	2.80 ± 0.45 ^{ca}	1.62 ± 0.35 ^{ca}	2.60 ± 0.59 ^{ca}	2.88 ± 0.49 ^{ca}	2.88 ± 0.49 ^{ca}	2.60 ± 0.59 ^{ca}	2.88 ± 0.49 ^{ca}	2.45
丙氨酸	5.92 ± 0.59 ^{ca}	4.56 ± 0.79 ^{ca}	4.45 ± 0.81 ^{ca}	4.75 ± 0.68 ^{ca}	4.37 ± 0.42 ^{ca}	3.76 ± 0.47 ^{ca}	4.62 ± 0.71 ^{ca}	4.67 ± 0.78 ^{ca}	4.00 ± 0.95 ^{ca}	4.00 ± 0.95 ^{ca}	4.67 ± 0.78 ^{ca}	4.00 ± 0.95 ^{ca}	4.57
半胱氨酸	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	-
缬氨酸 ^a	0.75 ± 0.09 ^{ca}	3.93 ± 0.27 ^{ba}	4.15 ± 0.55 ^{ba}	3.63 ± 0.71 ^{ab}	3.71 ± 0.72 ^{ca}	3.61 ± 0.57 ^{ca}	2.29 ± 0.28 ^{ab}	3.55 ± 0.65 ^{ca}	3.65 ± 0.82 ^{ca}	3.65 ± 0.82 ^{ca}	3.55 ± 0.65 ^{ca}	3.65 ± 0.82 ^{ca}	3.25
蛋氨酸 ^a	nd	0.56 ± 0.04 ^{ab}	0.24 ± 0.04 ^{ca}	0.59 ± 0.07 ^{ab}	0.36 ± 0.06 ^{ca}	0.36 ± 0.06 ^{ab}	0.17 ± 0.03 ^{ca}	0.70 ± 0.04 ^{ab}	0.26 ± 0.01 ^{ca}	0.26 ± 0.01 ^{ca}	0.70 ± 0.04 ^{ab}	0.26 ± 0.01 ^{ca}	0.36
异亮氨酸 ^a	0.39 ± 0.08 ^{ca}	3.33 ± 0.78 ^{ba}	3.90 ± 0.49 ^{ba}	2.97 ± 0.81 ^{ab}	3.29 ± 0.71 ^{ca}	3.42 ± 0.66 ^{ca}	1.76 ± 0.35 ^{ab}	3.07 ± 0.98 ^{ca}	3.41 ± 0.65 ^{ba}	3.41 ± 0.65 ^{ba}	3.07 ± 0.98 ^{ca}	3.41 ± 0.65 ^{ba}	2.84
亮氨酸 ^a	0.33 ± 0.07 ^{ca}	5.35 ± 0.44 ^{ba}	7.13 ± 0.92 ^{ba}	4.83 ± 0.74 ^{ab}	5.63 ± 0.85 ^{ca}	6.42 ± 0.79 ^{ca}	3.04 ± 0.58 ^{ab}	4.84 ± 0.85 ^{ab}	6.53 ± 0.74 ^{ba}	6.53 ± 0.74 ^{ba}	4.84 ± 0.85 ^{ab}	6.53 ± 0.74 ^{ba}	4.90
酪氨酸	0.40 ± 0.04 ^{ca}	2.84 ± 0.71 ^{ab}	3.33 ± 0.79 ^{ab}	2.73 ± 0.55 ^a	2.80 ± 0.75 ^{ca}	2.89 ± 0.49 ^{ca}	1.73 ± 0.55 ^{ab}	2.70 ± 0.55 ^{ca}	2.99 ± 0.48 ^{ca}	2.99 ± 0.48 ^{ca}	2.70 ± 0.55 ^{ca}	2.99 ± 0.48 ^{ca}	2.49
苯丙氨酸 ^a	nd	2.93 ± 0.64 ^{ca}	4.15 ± 0.74 ^{ba}	2.85 ± 0.85 ^{ca}	3.21 ± 0.95 ^{ca}	3.78 ± 0.64 ^{ca}	1.63 ± 0.51 ^{ca}	2.84 ± 0.71 ^{ca}	3.91 ± 0.75 ^{ca}	3.91 ± 0.75 ^{ca}	2.84 ± 0.71 ^{ca}	3.91 ± 0.75 ^{ca}	2.81
赖氨酸 ^a	0.83 ± 0.10 ^{ca}	5.35 ± 0.89 ^{ba}	5.80 ± 0.47 ^{ba}	4.95 ± 0.48 ^{ab}	5.22 ± 0.65 ^{ca}	5.27 ± 0.86 ^{ca}	3.05 ± 0.72 ^{ab}	4.84 ± 0.85 ^{ca}	5.22 ± 0.76 ^{ca}	5.22 ± 0.76 ^{ca}	4.84 ± 0.85 ^{ca}	5.22 ± 0.76 ^{ca}	4.50
组氨酸	0.62 ± 0.10 ^{ca}	1.82 ± 0.72 ^{ca}	2.35 ± 0.74 ^{ca}	1.65 ± 0.51 ^{ca}	1.84 ± 0.71 ^{ca}	1.95 ± 0.86 ^{ca}	1.30 ± 0.21 ^{ca}	1.57 ± 0.28 ^{ca}	2.25 ± 0.88 ^{ca}	2.25 ± 0.88 ^{ca}	1.57 ± 0.28 ^{ca}	2.25 ± 0.88 ^{ca}	1.71
精氨酸	3.40 ± 0.47 ^{ca}	4.76 ± 0.82 ^{ab}	9.49 ± 0.89 ^{ba}	5.14 ± 0.72 ^{ca}	6.99 ± 0.18 ^{ab}	8.02 ± 0.92 ^{ba}	3.81 ± 0.75 ^{ca}	4.85 ± 0.99 ^{ca}	8.75 ± 0.86 ^{ba}	8.75 ± 0.86 ^{ba}	4.85 ± 0.99 ^{ca}	8.75 ± 0.86 ^{ba}	6.13
脯氨酸	0.04 ± 0.01 ^{ca}	2.32 ± 0.49 ^{ba}	4.13 ± 0.76 ^{ca}	2.73 ± 0.55 ^{ab}	2.78 ± 0.61 ^{ca}	3.68 ± 0.47 ^{ca}	2.12 ± 0.92 ^{ab}	2.28 ± 0.83 ^{ca}	3.81 ± 0.28 ^{ca}	3.81 ± 0.28 ^{ca}	2.28 ± 0.83 ^{ca}	3.81 ± 0.28 ^{ca}	2.65
总氨基酸	19.59 ± 2.53 ^{ca}	63.11 ± 4.92 ^{ba}	88.14 ± 5.14 ^{ca}	60.73 ± 8.29 ^{ab}	70.13 ± 6.4 ^{ab}	76.50 ± 5.01 ^{ba}	41.46 ± 4.20 ^{ab}	58.64 ± 3.45 ^{ba}	78.19 ± 6.80 ^{ca}	78.19 ± 6.80 ^{ca}	58.64 ± 3.45 ^{ba}	78.19 ± 6.80 ^{ca}	61.83

注：“nd”表示未检出；“-”表示无；“a”代表必需氨基酸；同一行不同小写字母表示同一品种不同采收期氨基酸含量差异具有统计学意义(P<0.05)；同一行不同大写字母表示不同品种在同一采收期氨基酸含量差异具有统计学意义(P<0.05)。

表 5 主成分分析

主成分	初始特征值			提取载荷平方和		
	总计	方差百分比/%	累积特征贡献率/%	总计	方差百分比/%	累积特征贡献率/%
F1	13.95	87.19	87.19	13.95	87.19	87.19
F2	1.58	9.89	97.08	1.58	9.89	97.08

表6 样品主成分得分、综合得分及其排序

Table 6 Principal component scores, comprehensive scores and their ranking of samples

组别	F1 得分	排序	F2 得分	排序	综合得分	排序
FD6S1	-8.29	9	-1.01	7	-7.33	9
FD6S2	0.77	5	1.49	2	0.82	5
FD6S3	3.97	1	-1.33	9	3.33	1
FD13S1	0.26	6	1.4	3	0.36	6
FD13S2	1.45	4	-0.05	4	1.26	4
FD13S3	2.47	3	-0.82	6	2.07	3
FD17S1	-3.29	8	-0.24	5	-2.89	8
FD17S2	-0.02	7	1.83	1	0.16	7
FD17S3	2.68	2	-1.27	8	2.21	2

指标时,FD6和FD17在可食阶段S3品质较高,而FD6和FD17在可食阶段S1品质较低。

对不同品种不同可食阶段的蚕豆蛋白进行聚类分析,结果见图3。当欧式距离为5时,全部样品被分为2大类,FD6的S1阶段和FD17的S1阶段,这2个为第1类,其余均归为第2类,这与主成分分析的结果一致。

2.4 超微结构

不同蚕豆品种在不同可食阶段胚的扫描电子显微镜超微结构观察结果见图4。可以看出,在蚕豆胚中,淀粉颗粒是最具代表性的储存成分,且淀粉颗粒的形状不一,有球形、椭圆形、多角形等,在淀粉颗粒周围环绕着清晰的蛋白质小体或在研磨过程中被破坏的蛋白质基质碎片,这与其他研究者^[25-27]的观察结果一致。由图4可以看出,从S1~S3,随可食阶段的延后,蚕豆淀粉颗粒逐渐变大。已有报道,豆科植物种子的淀粉含量随着成熟度的增加,其含量逐渐增加^[28]。因此,蚕豆淀粉含量的增加可归因于淀粉颗粒尺寸的增加。此外,不同品种之间,淀粉颗粒的形状和密度存在差异。FD6

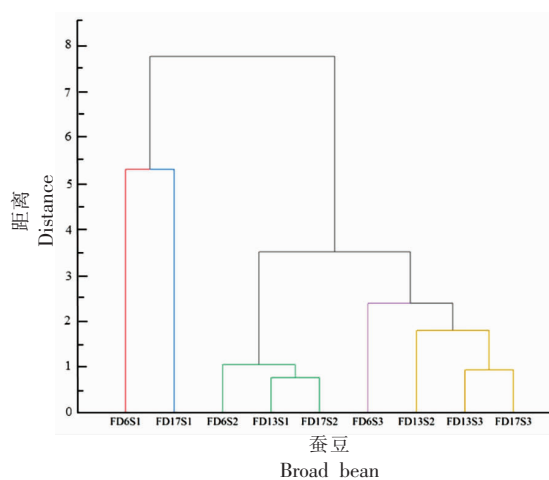
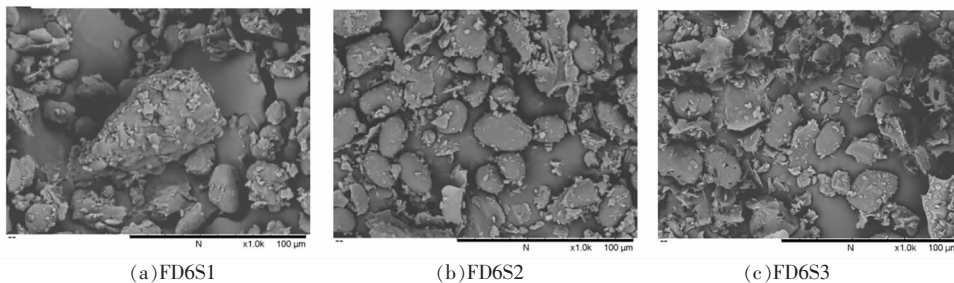


图3 聚类分析

Fig.3 Cluster analysis

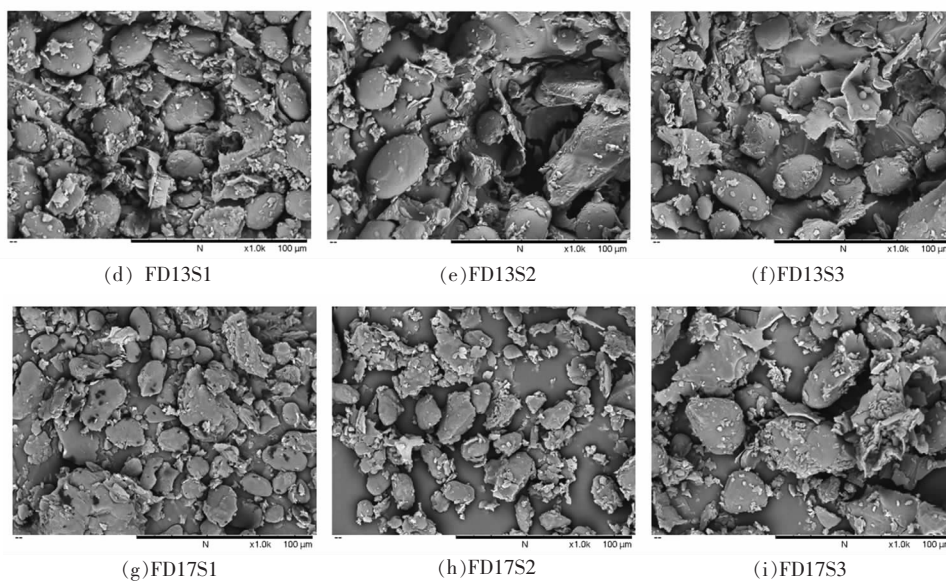
和FD13以卵形或圆形为主(较大者为卵形,较小者为圆形),而FD17以多角形为主,且FD13和FD17淀粉颗粒的密度大于FD6。这些差异可归因于胚乳淀粉体的发育与充实、遗传、蛋白质含量、生长期间遭受的压力及外界环境的不同^[29-31]。



(a)FD6S1

(b)FD6S2

(c)FD6S3

图4 不同可食阶段蚕豆胚的超微结构($\times 1\ 000$)Fig.4 Ultrastructure of broad bean embryos at different edible stages ($\times 1\ 000$)

3 结论

3种蚕豆在食用过程中还原糖含量范围为1.16~2.41 g/100 g,总糖含量范围为35.87~53.46 g/100 g,蛋白质含量范围为25.44%~27.45%,随着可食阶段的延后,还原糖含量逐渐降低,总糖含量逐渐增加,蛋白质含量无变化。蚕豆种皮和胚中均含有丰富的K、Mg、Ca、Zn和少量的Fe、Cu、Mn,且大部分矿物质在种皮中的含量高于胚中,应加强对种皮的开发与利用。蚕豆蛋白总氨基酸(TAA)含量范围为19.59~88.14 g/100 g蛋白质,必需氨基酸含量为2.9~28.54 g/100 g蛋白质,占氨基酸总含量(E/T)的14.8%~38.53%,必需氨基酸与非必需氨基酸的比值(E/N)范围为17.38%~62.70%;FD6的S3阶段和FD17的S3阶段氨基酸品质较高。此外,在蚕豆胚和种皮中,矿物质含量与氨基酸含量的相关性存在差异。不同品种间、不同可食阶段淀粉颗粒存在差异。整体而言,蚕豆的种皮和胚都含有丰富的营养素。

参 考 文 献

- [1] 余浪, 阚建全. 传统豆瓣的研究进展[J]. 中国调味品, 2008(5): 26-31.
YU L, KAN J Q. The research progress on tradi-

tional broad-bean sauce[J]. China Condiment, 2008 (5): 26-31.

- [2] 沈乾芳, 冯灿. 清代至民国云南豆类规模种植及其原因探析——兼及本土知识的价值[J]. 原生态民族文化学刊, 2018, 10(3): 26-35.
SHEN Q F, FENG C. A study on the scale planting of legumes and causes in Yunnan from the Qing dynasty to the republic of china: On the value of local knowledge[J]. Journal of Ethnic Culture, 2018, 10(3): 26-35.
- [3] HASSANEIN R A, HASHEM H A, KHALIL R R. Stigmasterol treatment increases salt stress tolerance of faba bean plants by enhancing antioxidant systems [J]. Plant Omics, 2012, 5(5): 476-485.
- [4] 陈国琛. 优质高产蚕豆新品种——凤豆六号[J]. 农村百事通, 2017(23): 25.
CHEN G C. A new broad bean variety with high quality and high yield—Fengdou6[J]. Rural Baisong-tong, 2017(23): 25.
- [5] 陈国琛. 蚕豆品种“凤豆六号”高产稳产性及产量构成因素的分析[J]. 西南农业学报, 2004(S1): 252-254.
CHEN G C. The yield potential and stability of broad bean variety 'Fengdou6' and its yield components[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2004(S1): 252-254.

- [6] 陈国琛, 陈爱娜, 尹雪芬, 等. 优质、大粒、高产蚕豆新品种“凤豆 13 号”的选育及栽培技术[J]. 云南农业科技, 2012(1): 61–62.
CHEN G C, CHEN A N, YIN X F, et al. Selection and cultivation of a new broad bean variety ‘Fengdou 13’ with high quality, large grain and high yield [J]. Yunnan Agricultural Science and Technology, 2012(1): 61–62.
- [7] 陈国琛, 王桂平, 陈爱娜, 等. 优质多抗高产蚕豆新品种凤豆 17 号的选育及栽培技术[J]. 农业科技通讯, 2014(9): 233–235.
CHEN G C, WANG G P, CHEN A N, et al. Breeding and cultivation techniques of a new broad bean variety Fengdou17 with high quality, multi-resistance and high yield[J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 2014(9): 233–235.
- [8] 张珣, 王婧, 丁华, 等. DNS 法测定茶叶中掺杂蔗糖含量[J]. 湖北农业科学, 2021, 60(21): 107–111.
ZHANG X, WANG J, DING H, et al. Study on the DNS method for measuring the content of doped sucrose in tea[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2021, 60(21): 107–111.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 中国疾病预防控制中心营养与食品安全所. 中国食物成分表 (第二版)[M]. 北京: 北京大学医学出版社, 2009: 39–41.
National Institute of Nutrition and Food Safety, Chinese Center for Disease Control and Prevention. Chinese food composition (2nd Edition)[M]. Beijing: Peking University Medical Press, 2009: 39–41.
- [12] HANSON P, YANG R Y, CHANG L C, et al. Carotenoids, ascorbic acid, minerals, and total glucosinolates in choysum (*Brassica rapa* cvg. *parachinensis*) and kailaan (*B. oleraceae* Alboglabra group) as affected by variety and wet and dry season production[J]. Journal of Food Composition & Analysis, 2011, 24(7): 950–962.
- [13] SARKER U, OBA S. Response of nutrients, minerals, antioxidant leaf pigments, vitamins, polyphenol, flavonoid and antioxidant activity in selected vegetable amaranth under four soil water content[J]. Food Chemistry, 2018, 252: 72–83.
- [14] 玉梅. 不同季节荒漠草原放牧绵羊矿物质营养盈亏平衡研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021.
YU M. Study on the balance of mineral nutrition of sheep grazing in desert steppe in different seasons [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021.
- [15] VIOQUE J, ALAIZ M, GIRON-CALLE J. Nutritional and functional properties of *Vicia faba* protein isolates and related fractions [J]. Food Chemistry, 2012, 132(1): 67–72.
- [16] 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, 2010, 23(1): 54–60.
- [17] 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.
- [18] Food and Agriculture Organization of the United Nations/World Health Organization. Energy and protein requirements [C]// FAO Nutrition Meeting Report Series. Roma: FAO, 1973: 52–63.
- [19] 杨林, 池福敏, 冯建英, 等. 西藏林芝地区五种野生食用菌氨基酸主成分分析与综合评价[J]. 食品工业科技, 2019, 40(16): 260–265, 273.
YANG L, CHI F M, FENG J Y, et al. Principal component analysis and comprehensive evaluation of amino acids of five wild edible mushrooms collected from Nyingchi Region of Tibet[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(16): 260–265, 273.
- [20] BERG J A, HERMANS F W K, BEENDERS F, et al. The amino acid permease (AAP) genes *CsAAP2A* and *SlAAP5A/B* are required for oomycete susceptibility in cucumber and tomato [J]. Molecular Plant Pathology, 2021, 22(6): 658–672.
- [21] 代洪苇, 周盈盈, 郑姝婷, 等. 茶树脯氨酸转运蛋白基因鉴定及表达分析[J]. 西北植物学报, 2020, 40(6): 937–948.

- DAI H W, ZHOU Y Y, ZHENG S T, et al. Identification and expression profiling analysis of *CsProTs* gene family in tea plant[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2020, 40(6): 937-948.
- [22] 王亚, 冯发运, 葛静, 等. 植物根系分泌物对土壤污染修复的作用及影响机理[J]. *生态学报*, 2022, 42(3): 829-842.
- WANG Y, FENG F Y, GE J, et al. Effects and mechanisms of plant root exudates on soil remediation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(3): 829-842.
- [23] 武杰瑞, 刘秉毅, 特木尔布和, 等. 蓟马取食对苜蓿氨基酸组成及含量的影响[J]. *草地学报*, 2022, 30(1): 62-68.
- WU J R, LIU B Y, TE M E B H, et al. Effects of thrips infesting on amino acid composition and content of Alfalfa[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(1): 62-68.
- [24] 全智, 刘轩昂, 刘东. 土壤可溶性有机氮研究进展[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(1): 277-288.
- QUAN Z, LIU X A, LIU D. Research progress on soil soluble organic nitrogen[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(1): 277-288.
- [25] AGUILERA Y, ESTEBAN R M, BENÍTEZ V, et al. Starch, functional properties, and microstructural characteristics in chickpea and lentil as affected by thermal processing [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2009, 57(22): 10682-10688.
- [26] ZHEN M, 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*, 2011, 44(8): 2534-2544.
- [27] ROMANO A, GIOSAFATTO C, 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.
- [28] 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, 36(1): 97-100.
- ZHANG S P, LIU S Q, GU W G, et al. Changes of principal nutrient contents in the pod of vegetable soybean during development[J]. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2005, 36(1): 97-100.
- [29] 王曼曼. 关于淀粉体形态和发育的研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2009.
- WANG M M. The study about the morphology and development of amyloplast[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2009.
- [30] 杨阳. 施氮对稻麦胚乳发育及淀粉理化性质的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2021.
- YANG Y. Effects of nitrogen application on the development of rice and wheat endosperm and the physicochemical properties of starch[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2021.
- [31] 闵晶晶. 四种元麦胚乳淀粉体发育、消亡及淀粉理化性质的比较研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2020.
- MIN J J. Comparison of development and degradation of starch granule in endosperm and physicochemical properties of starches from four kinds of naked barley [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2020.

Changes in Main Nutrients and Ultrastructure of Three Types of Broad Beans at Different Edible Stages

Gao Chunyan¹, Li Wang², Li Yuanli², Lu Yuehong^{1*}

¹College of Biological Science and Engineering, North Minzu University, Yinchuan 750021

²College of Public Health, Dali University, Dali 671000, Yunnan)

Abstract In order to explore the changes of main nutrients and microstructure of broad bean (*Vicia faba*) during the process of harvesting. The composition of reducing sugar, total sugar, protein, minerals, protein amino acid composition and the microstructure of embryo of three broad bean varieties (FD6, FD13 and FD17) at three edible stages (S1, S2 and S3) were studied using the spectrophotometer, flame atomic absorption spectrophotometer, amino acid analyzer, automatic nitrogen determination analyzer and scanning electron microscope. The results showed that the content of reducing

sugar, total sugar and protein of three broad bean varieties was in the range of 1.16–2.41 g/100 g, 35.87–53.46 g/100 g and 25.44%–27.45%. K, Mg, Ca and Zn were the major mineral elements in broad bean. Moreover, the changes of different mineral elements in seed coat and embryo during the edible process were diverse. The content of total amino acid, essential amino acid and medicinal amino acid of broad bean ranged from 19.59 to 88.14, 2.90 to 28.54 and 10.58 to 61.59 g/100 g protein, respectively. When taking amino acid content as the evaluation index, the qualities of FD6 and FD17 at S3 were higher than those of S1 stage. The result of correlation analysis showed that the interaction between mineral absorption and enrichment and amino acid synthesis of broad bean embryo was different from that of seed coat. Scanning electron microscope micrographs showed that there were differences in starch granules between different varieties and different edible stages. On the whole, the seed coat and embryo of broad bean are rich in nutrients.

Keywords broad bean; edible stages; nutrients; ultrastructure