

文章编号:1673-2383(2019)02-0062-07

网络出版网址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1378.N.20190419.0945.020.html

网络出版时间:2019-4-19 9:45:55

## 3 种不同来源蛋白质的氨基酸组成 及体外动态消化研究

陈智仙,张海波,张双庆,张彦\*

(酵母功能湖北省重点实验室,湖北 宜昌 443003)

**摘要:**乳清蛋白、大豆分离蛋白和酵母浓缩蛋白分别是动物来源、植物来源和微生物来源的 3 种蛋白,同时研究 3 种蛋白的氨基酸组成和体外消化吸收规律有助于人们对不同来源的蛋白的营养特性有更进一步的了解。以这 3 种蛋白为原料,利用氨基酸分析仪进行氨基酸组成分析和比较,并应用人肠微生物生态系统模拟器分析比较 3 种蛋白的消化率和吸收率。氨基酸分析结果表明:3 种蛋白均含有人体所必需的 8 种氨基酸,且组成比例接近 FAO/WHO 推荐模式。体外模拟消化结果表明:酵母浓缩蛋白、乳清蛋白、大豆分离蛋白的胃消化率分别为  $12.1\% \pm 3.8\%$ 、 $33.9\% \pm 1.7\%$ 、 $23.1\% \pm 5.1\%$ ,小肠末端消化率分别为  $92.5\% \pm 2.5\%$ 、 $95.9\% \pm 2.5\%$ 、 $93.5\% \pm 0.3\%$ ,3 组通过透析方法测得被吸收的蛋白质百分比分别为  $57.3\% \pm 2.2\%$ 、 $59.0\% \pm 1.8\%$ 、 $58.9\% \pm 0.4\%$ 。酵母浓缩蛋白胃消化率显著低于其他两种蛋白( $P < 0.05$ ),最终的消化率乳清蛋白最高( $P < 0.05$ ),大豆分离蛋白和酵母蛋白二者消化率无显著性差异( $P > 0.05$ );3 种蛋白吸收率无显著性差异( $P > 0.05$ )。

**关键词:**乳清蛋白;大豆分离蛋白;酵母蛋白;体外消化;SHIME;氨基酸组成

**中图分类号:**TS201.2

**文献标志码:**B

### 0 引言

目前商品化的蛋白(包括分离蛋白和浓缩蛋白)主要来源于动物和植物,比如乳清蛋白、酪蛋白、大豆分离蛋白、豌豆蛋白等。而基于微生物来源的蛋白目前尚未完全实现产业化。酵母是迄今为止在食品工业中应用最为广泛的微生物,由于蛋白含量高且必需氨基酸种类齐全<sup>[1]</sup>,体内氮消化率和保留率高<sup>[2]</sup>。因此,以此为原料加工开发高蛋白质含量的蛋白食品原料,非常有必要且应用前景广阔。

本研究用酵母浓缩蛋白采用发明专利方法而得<sup>[3]</sup>,虽然反应条件较温和,对蛋白及氨基酸的

破坏较小,但是加工过程不可避免会导致蛋白的一些损失和热变性,而经过加工后蛋白质的氨基酸组成或者其他营养特性是否发生了变化尚未见研究和报道。

蛋白体外消化模型按照是否模拟了消化的动态过程,可分为体外静态模型和体外动态模型;按照消化腔室的多少,可分为单室消化模型和多室消化模型<sup>[4]</sup>。在已有的实验报道中,静态模型是使用最广泛的消化模型,但相对于单室模型和静态消化模型,动态的多室模型更接近人体正常消化过程<sup>[5]</sup>。动态多室模型有人体胃模拟器<sup>[6]</sup>、TNO 胃肠道消化模型<sup>[7-8]</sup>以及 Molly 等<sup>[9]</sup>所述的肠道微生态模拟系统(SHIME)。

以乳清蛋白和大豆分离蛋白为代表的动植物来源的蛋白的营养研究较多,包括氨基酸的组成<sup>[10-11]</sup>和体外模拟消化方面,但是周志红等<sup>[12]</sup>和江连洲等<sup>[13]</sup>对大豆分离蛋白的体外模拟消化主要是基于胃蛋白酶,模拟人体胃部消化环境进行的,缺乏对小肠消化过程的考察。何光华等<sup>[14]</sup>对乳清蛋白模拟了胃肠两个部位的消化,但是这些模型均是一种静态的消化模型,不能完全模拟体内消化过程的动态

收稿日期:2018-10-18

基金项目:湖北省自然科学基金项目(2017CFB572,2018CFB612);宜昌市科技研究与开发项目(A17-101)

作者简介:陈智仙(1985—),女,湖南醴陵人,工程师,研究方向为营养健康食品。

\*通信作者:张彦,教授级高工,E-mail:zhangyan@angelyeast.com

变化,比如胃排空、蠕动运动以及 pH 值变化等。

本研究采用 SHIME 模型,首次比较了酵母浓缩蛋白(YPC)、大豆分离蛋白(SPI)和乳清浓缩蛋白(WPC)的胃肠道消化吸收情况。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 材料与试剂

YPC:安琪酵母股份有限公司,批号 2017080601;WPC:戴维林国际贸易公司,批号 20171218;SPI:杜邦中国集团有限公司,批号 20170414。

### 1.2 仪器与设备

L-8800 型氨基酸分析仪:日立公司;体外模拟反应器 SHIME 系统:比利时 Prodigest 公司。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 氨基酸组成分析及评价

参照 GB 5009.124—2016《食品安全国家标准食品中氨基酸的测定》方法对 YPC、WPC 和 SPI 的氨基酸组成进行测定<sup>[15]</sup>。检测 2 次求平均值。以 FAO/WHO 于 1973 年提出的氨基酸评分模式和中国预防医学科学营养与食品卫生研究所提出的全鸡蛋蛋白模式为依据比较 3 种蛋白原料,氨基酸评分(AAS)和化学评分(CS)按公式(1)、(2)求得。

$$AAS = \frac{\text{试验样品氨基酸质量}}{\text{FAO/WHO 评分标准模式中同种氨基酸含量}}, \quad (1)$$

$$CS = \frac{\text{试验样品氨基酸质量}}{\text{鸡蛋中同种氨基酸含量}}。 \quad (2)$$

#### 1.3.2 3种蛋白原料蛋白质含量测定

参照 GB 5009.5—2016《食品安全国家标准食品中蛋白质的测定》中第一法:凯氏定氮法对 3 种蛋白的蛋白质含量进行测定<sup>[16]</sup>。

#### 1.3.3 体外模拟消化吸收

根据 Molly 等<sup>[9]</sup>描述的方法以及 Possemiers 等<sup>[17]</sup>描述的接种物制备,保留时间、pH、温度设定和反应器进料组成,本研究在参考 InfoGest 共识性的体外消化方法<sup>[18]</sup>的基础上,对相同质量的 3 种蛋白原料设置的消化条件总结如下。

胃相(进食状态):在 37 ℃下消化 2 h,同时通过搅拌混合,按 S 形曲线降低 pH;通过测量血红蛋白(参考蛋白)经三氯乙酸(TCA)消化后的可溶性产物在 280 nm 处的吸光度,提供标准化胃蛋白酶活性;加入磷脂酰胆碱、SHIME 营养培养基、氯化钠和氯化钾。

小肠期(进食状态):在 37 ℃下消化 3 h,同时通过搅拌混合,pH 增加至 7.4;所添加的胰酶为动

物胰腺提取物,所添加的胆汁盐为 0.01 mol/L 牛胆汁提取物(就牛磺酸和甘氨酸而言,牛胆汁比猪胆汁更接近于人胆汁);此外,在消化过程中,稀释胆汁盐以模拟十二指肠、空肠和回肠中发生的情况。

消化结束时使用纤维素膜的静态透析(截止值=14 kDa)用于模拟小肠水平的吸收过程。通过在透析管内引入小肠悬浮液,逐渐从胃肠上段基质中除去消化的氨基酸等小分子,优化消化条件(pH 曲线、消化时间)以模拟体内胃肠道的不同区域,所有测试都进行 3 次。

#### 1.3.4 背景蛋白质含量的测定

在该研究中添加对照组,通过凯氏定氮法测定用于模拟上消化道的不同成分的背景蛋白质的含量,并进行校正。

#### 1.3.5 蛋白质消化吸收率分析

通过定量非蛋白氮(NPN)测定法来确定蛋白水解程度。NPN 可通过用 TCA 处理样品来确定,其导致蛋白质沉淀,然后过滤。滤液中的蛋白质来自游离氨基酸和在消化蛋白质时形成的小肽(并且还可以用分光光度计选择性地检测)。通过对初始和 TCA 沉淀的样品的总凯氏定氮分析测定蛋白质含量,从而区分消化的和未消化的蛋白质组分。收集以下不同时点样品分析蛋白质的消化率或吸收率:(1)初始产品(ST 0);(2)胃消化末期(ST end);(3)小肠消化 30 min 后(SI 30);(4)小肠消化末期(SI end);(5)1 h、2 h、3 h 时透析混合物悬液(吸收的蛋白组分)。

$$\text{消化率} = (X - X_1) / X, \quad (3)$$

$$\text{吸收率} = X_2 / X, \quad (4)$$

式中: $X_1$ 为 TCA 沉淀蛋白的氮含量,%; $X_2$ 为透析液中的总氮含量,%; $X$ 为收集的某份样品的总氮含量,%。

#### 1.3.6 数据分析

采用 Excel 进行数据及统计学分析。

## 2 结果与amp;讨论

### 2.1 3种蛋白氨基酸组成分析及营养评价

由表 1 可以看出,YPC 含有 18 种氨基酸,包括人体必需的 8 种氨基酸和 2 种半必需氨基酸,氨基酸种类齐全,属于完全蛋白质。由于有关乳清蛋白和大豆分离蛋白的研究相对较多,而此前对酵母中蛋白质的氨基酸组成分析是基于酵母,而非提取后的酵母浓缩型蛋白,所以重点对其进行分析。

根据 AAS 评分看,WPC 是最接近 FAO/WHO

提出的氨基酸模式的蛋白原料, YPC 和 SPI 其次。酵母蛋白的限制性氨基酸为含硫氨基酸, 略低于乳清蛋白, 但是优于大豆蛋白, 大豆分离蛋白的限制性氨基酸依次为含硫氨基酸(主要是蛋氨酸)、缬氨酸和苏氨酸, 从化学评分看也是如此。

根据 FAO/WHO 提出的氨基酸模式, 必需氨基酸总量应达到氨基酸总量的 40% 以上, 必需氨基

酸总量与非必需氨基酸总量的比值应在 0.6 以上。某种蛋白质的氨基酸组成与 FAO/WHO 理想模式接近的基础上, 这个比值越高, 说明蛋白营养价值越高。YPC 的氨基酸组成与理想模式接近, 且必需氨基酸与非必需氨基酸的比例达到 0.86, 从这点看, 酵母蛋白不逊于乳清蛋白和大豆分离蛋白。

表1 3种蛋白质的氨基酸组成、氨基酸评分和化学评分

Table 1 Comparison of amino acids, AAS and CS of YPC, WPC and SPI

氨基酸	FAO/WHO 模式	鸡蛋/ (mg·g <sup>-1</sup> )	YPC/ (mg·g <sup>-1</sup> )	WPC/ (mg·g <sup>-1</sup> )	SPI/ (mg·g <sup>-1</sup> )	AAS			CS			
						YPC	WPC	SPI	YPC	WPC	SPI	
必需 氨基酸	Ile	40	66	57.44	50.74	42.91	1.44	1.27	1.07	0.87	0.77	0.65
	Leu	70	88	92.20	109.88	71.59	1.32	1.57	1.02	1.05	1.25	0.81
	Lys	50	64	94.83	97.76	61.75	1.90	1.96	1.24	1.48	1.53	0.96
	Met	35	55	23.68	20.69	7.17	1.00	1.05	0.75	0.63	0.67	0.48
	Cys			11.19	16.17	19.12						
	Phe	60	100	53.58	36.87	49.56	1.65	1.26	1.39	0.99	0.75	0.83
	Tyr			45.24	38.45	33.62						
	Thr	40	51	54.59	51.41	37.33	1.36	1.28	0.93	1.07	1.01	0.73
	Trp	10	16	10.43	19.48	14.77	1.04	1.95	1.48	0.65	1.22	0.92
Val	50	73	51.13	49.84	43.96	1.02	1.00	0.88	0.70	0.68	0.60	
非必需 氨基酸	Asp			109.18	110.82	109.00						
	Arg			58.03	25.57	71.07						
	Ser			51.52	44.74	50.12						
	Glu			113.10	174.04	190.95						
	Gly			45.09	16.74	38.85						
	Ala			60.28	45.66	43.31						
	His			25.99	21.34	26.12						
Pro			29.46	43.16	44.10							
总氨基酸			986.96	973.36	955.30							

## 2.2 测试产品蛋白质含量分析

YPC、WPC 和 SPI 的蛋白质含量分别为 68.3% ± 0.9%、76.7% ± 1.2% 和 85.7% ± 1.6%。这为后续对不同蛋白体外模拟消化后的产物进行分析、计算消化率和吸收率等提供了基础条件。

## 2.3 蛋白的体外模拟消化

### 2.3.1 背景蛋白质水平的研究

如图 1 所示, 在胃消化结束时, 其中背景蛋白质含量为 22.5 mg ± 5.7 mg, 可能是由于添加了胃酶的缘故。小肠消化 30 min 后, 由于添加了原始动物提取物(胆汁盐)和胰酶, 背景蛋白质水平增加至 146.9 mg ± 20.0 mg, 在小肠消化结束时进一步增加至 209.4 mg ± 40.6 mg。由于背景蛋白质水平非常显著, 因此针对这些背景蛋白质水平进行校正。

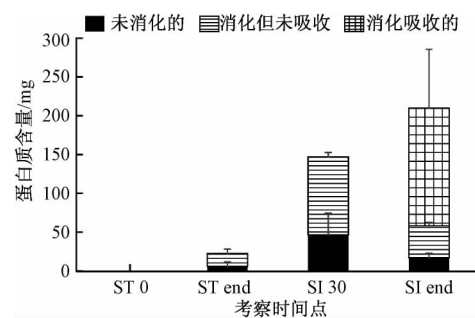


图 1 不同考察时间点背景蛋白质含量

Fig.1 Background protein contents at different time

### 2.3.2 酵母蛋白

在胃隔室中, 通过胃蛋白酶的作用, 消化的蛋白质质量从 (91.0 ± 8.0) mg 增加至 (272.0 ± 107.8)

mg(图 2),比例从  $4.5\% \pm 0.4\%$  增加至  $12.1\% \pm 3.8\%$ (图 3)。随后,在小肠中给予胰酶后继续消化,在小肠消化 30 min 后达到  $63.9\% \pm 3.4\%$  的消化水平,并且在小肠消化结束时最终水平为  $92.5\% \pm 2.5\%$ ,其中  $57.3\% \pm 2.2\%$  的蛋白通过透析吸收。

### 2.3.3 乳清蛋白

在胃隔室中,消化的蛋白质质量从  $(230.6 \pm 2.3)$  mg 增加至  $(713.9 \pm 32.8)$  mg(图 2),比例从  $10.1\% \pm 0.2\%$  增加至  $33.9\% \pm 1.7\%$ (图 3),表明与 YPC 相比,WPC 在胃中更容易消化( $P=0.01$ )。由于 WPC 的初始水平的小肽和/或氨基酸显著性更高,这些结果可以表明,与 YPC 相比,WPC 由更小的肽和/或蛋白质片段组成,使得 WPC 的蛋白质含量更易于胃消化。随后,在小肠中给予胰酶后继续消化,在小肠消化 30 min 后消化率达到  $86.1\% \pm 1.5\%$ ,在小肠消化结束时消化率达到  $95.9\% \pm 1.8\%$  的最终水平,其中  $59.0\% \pm 1.8\%$  通过透析吸收。

### 2.3.4 大豆分离蛋白

在胃隔室中,消化的蛋白质质量从  $(22.4 \pm 11.0)$  mg 增加至  $(581.3 \pm 125.6)$  mg(图 2),比例从  $0.9\% \pm 0.4\%$  增加至  $23.1\% \pm 5.1\%$ (图 3),与 WPC 相比,SPI 的胃消化程度更低( $P=0.02$ ),但优于 YPC( $P=0.04$ )。随后,在小肠中给予胰酶后继续消化,在小肠消化 30 min 后达到  $79.7\% \pm 2.3\%$  消化水平,在小肠消化结束时最终水平为  $93.5\% \pm 0.3\%$ ,其中  $58.9\% \pm 0.4\%$  通过透析吸收。

蛋白质在胃和小肠中的消化过程不仅取决于盐酸或蛋白酶的存在,还取决于原始蛋白质的结构。由于这种结构和组成在不同来源或由不同过程产生的蛋白质之间存在很大差异,因此,不同来源的蛋白质的消化率可能存在差异。总的来说,在本研究中,WPC 在小肠末端消化吸收水平显著高于 YPC 和 SPI( $P<0.01$ ),但 SPI 和 YPC 的整体消化率无显著性差异( $P>0.05$ );而 3 种蛋白原料吸收率两两比较,均无显著性差异( $P>0.05$ )。然而,不同的蛋白在胃腔内的消化率有所不同。与 YPC(12.1%)相比,WPC(33.9%)和 SPI(23.1%)胃消化更明显。一种可能的解释是,WPC 和 SPI 比 YPC 含有更小的蛋白质片段,且水溶性更好,使它们更容易在胃腔内发生蛋白水解降解。在某些商品化浓缩蛋白或分离蛋白生产过程中,会涉及均质、适度酶解等改性手段以获得更好的溶解性或分散性。

影响蛋白质消化率的因素除了来源不同之外,还与非蛋白成分、原料粒径、生产工艺处理过程等因素有关<sup>[19]</sup>。YPC 的蛋白质含量相对于 SPI 和 WPC 更低,其他成分主要为酵母细胞壁(酵母  $\beta$ -葡聚糖

和甘露聚糖)和少量粗脂肪,WPC 的非蛋白成分主要是乳脂和乳糖,而 SPI 的非蛋白成分比例小,主要为灰分。酵母多糖对酵母蛋白的消化率影响目前尚未见报道,但是韩菲菲等<sup>[20]</sup>研究了燕麦  $\beta$ -葡聚糖对酪蛋白体外消化的影响,结果表明当燕麦  $\beta$ -葡聚糖的添加量增加,消化体系的黏稠度增大,酪蛋白消化率降低。乔燕娟<sup>[21]</sup>也研究了燕麦  $\beta$ -葡聚糖对酪蛋白和大豆分离蛋白体外消化率的影响,发现不同添加量的燕麦  $\beta$ -葡聚糖均会对消化率产生抑制作用,这种作用机理与  $\beta$ -葡聚糖-蛋白酶之间结合形成复合物有关,而且值得注意的是,燕麦  $\beta$ -葡聚糖对胃消化阶段的影响大于肠消化阶段。酵母  $\beta$ -葡聚糖结构与燕麦  $\beta$ -葡聚糖结构类似<sup>[22]</sup>,它的存在可能也会对 YPC 的胃肠消化率造成一定的阻碍。此外,YPC 在生产过程中会产生还原糖(酶解细胞壁所致),而有报道表明美拉德反应可能不利于蛋白质的消化利用<sup>[23]</sup>。

3 种蛋白的生产过程均会涉及杀菌、喷雾干燥等热处理过程,热处理的方式、温度和时间不同会导致蛋白质结构不同程度的变化,而结构的变化亦会影响消化率<sup>[24-25]</sup>。还有研究表明天然蛋白本身可形成淀粉样原纤维<sup>[26]</sup>,而这种淀粉样原纤维会对蛋白的消化率也产生抑制作用<sup>[27]</sup>。

本研究中 3 种蛋白原料的蛋白质含量不一致,相同酶活条件下消化率势必会受到影响,但由于混杂因素较多,比如来源的不同、非蛋白成分的不同,无法简单消除蛋白质含量不同所导致的影响。作者尝试过使用更进一步分离手段得到更高蛋白质含量的酵母蛋白粉(80%~85%),但是这会导致原酵母粉中溶解性较好的蛋白的大量丢失。蛋白质含量的不同对于消化率的影响还有待更深入的研究。

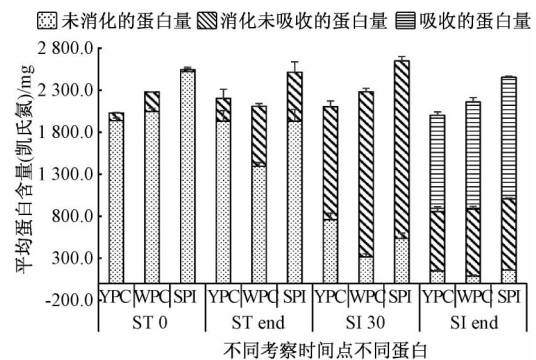


图 2 不同考察时间点 YPC, WPC 和 SPI 的平均蛋白含量

Fig.2 Average protein contents of digested or absorbed YPC, WPC and SPI at different time

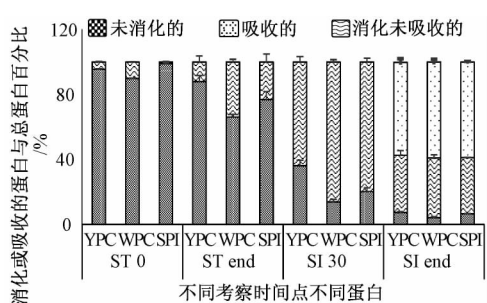


图 3 不同考察时间点 YPC、WPC 和 SPI 的消化或吸收的百分比

Fig.3 Average protein percentage of digested or absorbed YPC, WPC and SPI at different time

### 3 结论

本研究通过检测分析了酵母浓缩蛋白、乳清蛋白和大豆分离蛋白中的氨基酸组成, 确认了酵母经加工浓缩后得到的酵母蛋白(体外消化实验中表明其蛋白质含量 70%左右)含有丰富完整的必需氨基酸, 且 3 种蛋白的氨基酸组成模式均接近 FAO/WHO 推荐模式。3 种蛋白中, 含量最高的两种氨基酸均为天冬氨酸和谷氨酸, 这两种氨基酸能与氯化钠发生反应, 生成食物鲜味物质<sup>[28]</sup>。从氨基酸评分看, 乳清蛋白几乎没有限制性氨基酸, 酵母蛋白和大豆分离蛋白的第一限制性氨基酸均为含硫氨基酸, 大豆分离蛋白的第二限制性氨基酸为缬氨酸。缬氨酸是支链氨基酸的一种(其他两种为异亮氨酸、亮氨酸), 支链氨基酸能更快地分解转化为葡萄糖, 防止肌肉损失, 促进运动后的肌肉恢复<sup>[29-30]</sup>。

世界人口在不断增长, 预计到 2050 年将达到 98 亿人<sup>[31]</sup>。因此, 对可持续的、环境友好的和营养丰富的食品的需求显得越来越重要。酵母蛋白含有的氨基酸具备的特点是一般植物蛋白所无法比拟的。如花生蛋白中必需氨基酸组成不均衡, 限制氨基酸较多, 存在营养缺陷; 常见的谷类蛋白为不完全蛋白, 其氨基酸组成都缺少一种或几种人体生长所必需的氨基酸, 比如大米蛋白缺乏赖氨酸, 从而限制了谷类食物的营养价值。

尽管本研究中的 3 种蛋白从氨基酸组成上看均可以称为优质蛋白, 但整体消化率有一定差异。蛋白质的消化率会影响蛋白质的代谢, 以及氨基酸如何支持组织的蛋白质合成<sup>[32]</sup>。本研究支持了此前对乳清蛋白与大豆蛋白相比是一种高质量的“快速可消化”蛋白来源的评价<sup>[32-35]</sup>, 而消化率相对慢的蛋白可能更有利于带来饱腹感<sup>[36]</sup>。

目前酵母浓缩蛋白刚投放市场不久, 对其研究开发还较少。本文首次对其氨基酸组成进行了检测分析, 并与应用比较成熟的大豆分离蛋白和乳清蛋白做比较。此外, 本研究首次利用动态连续的体外模拟消化模型, 比较了 3 种优质蛋白质原料的体外消化和吸收情况, 无论是从氨基酸组成还是从体外模拟总体消化率看, 酵母蛋白与作为优质植物蛋白代表的大豆蛋白相比营养价值是相当的, 当然蛋白质的质量或者说营养价值, 不仅与氨基酸组成和消化率有关, 还与它们代谢利用的效率有关, 是否能满足机体蛋白质生长和更新对氮和氨基酸的需求<sup>[37]</sup>。酵母浓缩蛋白在体内的消化吸收情况如何还有待于动物实验和人体实验的验证, 其他非蛋白成分对其消化吸收的影响也有待于进一步研究。

### 参考文献:

- [1] 黄玲. 食用酵母蛋白质的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 1992(1): 56-62.
- [2] SPARK M, PASCHERTZ H, KAMPHUES J. Yeast (different sources and levels) as protein source in diets of reared piglets: effects on protein digestibility and N-metabolism[J]. Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition, 2005, 89: 184-188.
- [3] 张彦, 俞学锋, 李知洪, 等. 一种酵母蛋白及其制法: 以该蛋白为原料的食品及其制法: 201110342132.9[P]. 2013-05-08.
- [4] 陈贵, 贾慧. 体外消化模型的研究进展[J]. 农产品加工, 2017(5): 61-65.
- [5] 游义娇, 佟平, 袁娟丽, 等. 食物蛋白质体外消化模型研究进展 [J]. 食品工业科技, 2017, 38(6): 381-385.
- [6] KONG F, SINGH R P. A human gastric simulator (HGS) to study food digestion in human stomach[J]. Food Science, 2010, 75: 627-635.
- [7] MINEKUS M, MARTEAU P, HAVENAAR R. Multicompartmental dynamic computer - controlled model simulating the stomach and small intestine [J]. Alternatives to Laboratory Animals, 1995, 23: 197-209.
- [8] 刘晓为, 张海峰, 王蔚, 等. 芯片实验室技术及其应用 [J]. 测试技术学报, 2006, 6: 471-479.
- [9] MOLLY K. Development of a 5-step multi-chamber reactor as a simulation of the human

- intestinal microbial ecosystem[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1993, 39(2): 254-258.
- [10] 肖潇,尹胜,王成涛,等. 四种植物蛋白的成分与营养学特性分析[J]. *食品科学技术学报*, 2016, 34(3): 61-66.
- [11] 李莹,林晓明. 乳清蛋白营养特点与功能应用[J]. *中国食物与营养*, 2008, 6: 62-64.
- [12] 周志红,唐传核,杨晓泉. 大豆蛋白的体外模拟消化过程及热处理的影响[J]. *食品科学*, 2006, 27(1): 37-40.
- [13] 江连洲,王瑞,李秋慧,等. 体外模拟消化过程中大豆蛋白的亚基组成及分子质量分布[J]. *中国食品学报*, 2015, 15(10): 65-72.
- [14] 何光华,黄俊,尤玉茹,等. 乳清蛋白的体外模拟消化过程及热处理的影响[J]. *中国食品学报*, 2012, 12(4): 25-29.
- [15] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会,国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中氨基酸的测定:GB 5009.124—2016 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [16] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会,国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定:GB 5009.5—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [17] POSSEMIERS S, VERTHE K, UYTENDAELE S, et al. PCR-DGGE-based quantification of stability of the microbial community in a simulator of the human intestinal microbial ecosystem [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2004, 49(3): 495-507.
- [18] MACKIE A, BAJKA B, RIGBY N. Roles for dietary fibre in the upper GI tract: The importance of viscosity[J]. *Food Research International*, 2015, 88: 234-238.
- [19] 袁磊,唐瑜,刘晓庚. 蛋白质消化率的影响因素研究[J]. *粮食科技与经济*, 2015, 40(3): 43-61.
- [20] 韩菲菲,乔燕娟,徐春兰,等. 燕麦 $\beta$ -葡聚糖对酪蛋白体外消化的影响[J]. *营养学报*, 2016, 38(6): 561-565.
- [21] 乔燕娟. 燕麦 $\beta$ -葡聚糖对蛋白质体外消化的影响[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2017.
- [22] BASHIR K M, CHOI J S. Clinical and physiological perspectives of  $\beta$ -glucans: the past, present, and future [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2017, 18(9): 1906.
- [23] 赵谋明,刘雷,赵亚琦,等. 美拉德反应对花生分离蛋白体外消化特性的影响[J]. *四川大学学报(自然科学版)*, 2017, 54(5): 1101-1106.
- [24] 郭蔚波,徐明生,涂永刚,等. 不同处理方式下蛋白质结构变化与体外消化性关系研究进展[J/OL]. *食品科学*, 2018, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20181009.1514.076.html>.
- [25] ORIA M P, HAMAKER B R, SCHULL J M. In vitro protein digestibility of developing and mature sorghum grain in relation to  $\alpha$ -,  $\beta$ - and  $\gamma$ -kafirin disulfide crosslinking[J]. *Journal of Cereal Science*, 1995, 22(1): 85-93.
- [26] LOVEDAY S M, SU J, RAO M A, et al. Effect of calcium on the morphology and functionality of whey protein nanofibrils [J]. *Biomacromolecules*, 2011, 12(10): 3780-3788.
- [27] MORITZ L, ULLUWISHEWA D, HEALY J, et al. Evaluation of protease resistance and toxicity of amyloid-like food fibrils from whey, soy, kidney bean, and egg white [J]. *Food Chemistry*, 2016, 192: 491-498.
- [28] 周秀琴. 氨基酸的调味功能[J]. *发酵科技通讯*, 1999, 28(2): 40-41.
- [29] CHOI S, DISILVIO B, FERNSTROM M H, et al. Oral branched-chain amino acid supplements that reduce brain serotonin during exercise in rats also lower brain catecholamines [J]. *Amino Acids*, 2013, 45(5): 1133-1142.
- [30] 胡斌,侯菊花,张立新. 运动员补糖、支链氨基酸和乳清蛋白的临床应用观察[J]. *体育科技文献通报*, 2012, 20(7): 18-20.
- [31] HUIS V, ARNOLD. Potential of insects as food and feed in assuring food security[J]. *Annual Review of Entomology*, 2013, 58(1): 563-583.
- [32] TANG J E, PHILLIPS S M. Maximizing muscle protein anabolism: the role of protein quality [J]. *Current Opinion in Clinical Nutrition and Metabolic Care*, 2009, 12(1): 66-71.
- [33] TANG J E, MOORE D R, KUJBIDA G W, et al. Ingestion of whey hydrolysate, casein, or soy protein isolate: effects on mixed muscle protein synthesis at rest and following resis-

- tance exercise in young men [J]. *Journal of Applied Physiology*, 2009, 107(3):987-992.
- [34] MORTON R W, CHRIS M G, PHILLIPS S M. Nutritional interventions to augment resistance training-induced skeletal muscle hypertrophy [J]. *Frontiers in Physiology*, 2015, 6:245.
- [35] DEVRIES M C, PHILLIPS S M. Supplemental Protein in support of muscle mass and health: advantage whey [J]. *Journal of Food Science*, 2015, 80(S1):A8-A15.
- [36] ALFENAS R de C, BRESSAN J, PAIVA A C. Effects of protein quality on appetite and energy metabolism in normal weight subjects [J]. *Arquivos Brasileiros de Endocrinologia & Metabologia*, 2010, 54(1):45-51.
- [37] YVETTE C L, MARTIN J, PETER B S, et al. Casein and soy protein meals differentially affect whole-body and splanchnic protein metabolism in healthy humans [J]. *Journal of Nutrition*, 2005, 135(5):1080-1087.

## Amino Acid Composition Analysis and *in Vitro* Dynamic Digestion of Proteins from Three Different Sources

CHEN Zhixian, ZHANG Haibo, ZHANG Shuangqing, ZHANG Yan

(The Hubei Provincial Key Laboratory of Yeast Function, Yichang, 443003, China)

**Abstract:** Whey protein, soy protein isolate and yeast protein concentrate are three kinds of proteins from animal source, plant source and microbial source, respectively. Investigation of the amino acid composition, *in vitro* digestion and absorption of the three kinds of proteins will be helpful to further understand the nutritional characteristics of proteins from different sources. Amino acid composition analysis and comparison, the digestibility and absorption rates of these three proteins were analyzed and compared by amino acid analyzer and simulator of the human intestinal microbial ecosystem (SHIME). All the three proteins contained 8 necessary amino acids for human, and the composition ratio was close to the FAO/WHO recommended model. The results of the simulated digestion *in vitro* showed that the gastric digestibility of yeast protein concentrate, whey protein and soy protein isolate was  $12.1\% \pm 3.8\%$ ,  $33.9\% \pm 1.7\%$ , and  $23.1\% \pm 5.1\%$ , and the digestibility at the end of the small intestine was  $92.5\% \pm 2.5\%$ ,  $95.9\% \pm 2.5\%$ ,  $93.5\% \pm 0.3\%$ , respectively. The percentages of proteins absorbed by dialysis in the three groups were  $57.3\% \pm 2.2\%$ ,  $59.0\% \pm 1.8\%$ ,  $58.9\% \pm 0.4\%$ , respectively. The digestibility of yeast protein concentrate in the stomach was significantly lower than the others ( $P < 0.05$ ), and the final digestibility of whey protein was the highest ( $P < 0.05$ ). There was no significant difference in digestibility between soybean protein and yeast protein ( $P > 0.05$ ), and there was no significant difference in the absorption of the three proteins ( $P > 0.05$ ).

**Key words:** whey protein; soy protein isolate; yeast protein; *in vitro* digestion; SHIME; amino acid composition