

谷物蛋白肽对大米淀粉理化特性和体外消化特性的影响

付田田, 舒蓝萍, 徐理宏, 牛丽亚, 涂瑾, 肖建辉

(江西农业大学食品科学与工程学院, 江西南昌 330045)

摘要: 本研究以大米淀粉为原料, 探讨谷物蛋白肽的添加对大米淀粉理化性质和体外消化性能的影响。结果表明: 添加10%的小麦肽对降低体系的峰值黏度、崩解值的效果最好, 其值分别降低300 MPa·s; 相反, 5%的玉米肽使淀粉糊的终值黏度、回升值降低最大, 分别降低256 MPa·s、200 MPa·s; 谷物蛋白肽可以增大大米淀粉糊的焓变, 提高淀粉糊的热稳定性; 淀粉溶解度与谷物蛋白肽的添加量成正相关, 3种肽对淀粉膨胀度无影响; 大米肽能明显改变淀粉冻融稳定性, 添加5%、10%可以使淀粉的冻融稳定性增强, 析水率降低3%; 3种肽可降低大米淀粉中易消化淀粉的含量, 综合比较, 大米肽对降低淀粉体外消化的效果最好, 其中添加5%的玉米肽使易消化淀粉的含量降低值最大, 降低25%, 其次是添加1%的大米肽。根据谷物蛋白肽的主要氨基酸成分分析, 大米肽的碱性氨基酸含量明显要比其他两种肽的含量高, 玉米肽中的各氨基酸含量也相应的比小麦肽高; 因而, 谷物蛋白肽对淀粉的影响主要因素与各自的氨基酸含量以及分子量大小有关。

关键词: 大米淀粉; 小麦肽; 玉米肽; 大米肽; 理化特性; 体外消化

文章编号: 1673-9078(2019)010-76-84

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2019.10.012

Effects of Cereal Protein Peptides on the Physicochemical Properties and *in Vitro* Digestion Characteristics of Rice Starch

FU Tian-tian, SHU Lan-ping, XU Li-hong, NIU Li-ya, TU Jin, XIAO Jian-hui

(School of Food Science and Engineering, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China)

Abstract: In this study, rice starch was used as the raw material to investigate the effects of addition of cereal protein peptides on the physicochemical properties and *in vitro* digestion of rice starch. The results showed that the addition of 10% wheat peptides led to the greatest reduction of the peak viscosity and disintegration value of starch paste (which were respectively reduced by 300 MPa·s); On the contrary, the addition of 5% corn peptide caused the greatest decreases in the final viscosity and recovery value (which were reduced by 256 MPa·s and 200 MPa·s). The cereal protein peptides could increase the enthalpy and improve the thermal stability of the starch paste. The solubility of the starch was positively correlated with the amount of the added cereal protein peptides, although these peptide had no effect on starch swelling. The rice peptide could obviously change the freeze-thaw stability of starch, with its addition at 5% or 10% enhancing the freeze-thaw stability of starch while reducing the syneresis rate by 3%. The three kinds of peptides could reduce the content of the rapidly digestible starch in the rice starch. On the basis of comparisons, the rice peptide lowered the *in vitro* digestibility of starch the most. Adding 5% corn peptide could cause the greatest decrease (by 25%) in the content of rapidly digestible starch, followed by adding 1% rice peptide. According the analysis of the main amino acid components in the cereal protein peptides, the content of basic amino acids in the rice peptide was significantly higher than those of the other two kinds of peptides, and the contents of amino acids in the corn peptides were correspondingly higher than those of wheat peptides. Thus, the main factors associated with the impact of the cereal peptides on the starch were related to their respective amino acid contents and molecular weights.

Key words: rice starch; wheat peptide; corn peptide; rice peptide; physicochemical properties; *in vitro* digestion

收稿日期: 2019-03-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(31860444); 中国博士后项目(2017M612152)

作者简介: 付田田(1994-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 低聚肽与淀粉相互作用

通讯作者: 肖建辉(1983-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 功能食品短肽配料的创制及其产品开发利用

大米淀粉的组成成分、内部结构、理化特性与其他谷物淀粉不一样,主要表现有分子量、聚合度和结晶度以及直链淀粉/支链淀粉的比例^[1,2];大米淀粉的颗粒粒径最小,大小均一,呈多角形^[1,3,4];易被人体吸收,且能够引起的过敏反应很小等^[5],故在食品工业中备受青睐^[6]。大米淀粉被公开认为是世界中存在的可再生能源,在实际应用中,一些国家已经通过研发一类具备高附加值的大米变性淀粉及其深加工产品,去拓宽大米淀粉的应用范围^[7,8]。

低聚肽的功能已被证实优于蛋白质和氨基酸^[9-11]。除去一些基本的营养作用,它不仅具有良好的生理功能,如抗氧化、抗菌、增强免疫力等^[12],可用于营养功能保健食品等多类特别食品中^[13-15];同时,低聚肽还具有良好的加工特性,其特殊的结构,如分子链上的氨基酸序列、氨基酸构型及末端氨基酸、电荷、两性性等,为其与其他物质之间相互作用,可以提供广阔的位点^[16]。罗舜菁等曾研究发现带正电、带负电及不带电的三种氨基酸可以改变大米淀粉的糊化性质及流变性质^[17],据长霄等发现胶原蛋白可以和淀粉发生酯化交联,破坏淀粉的晶型结构,改善淀粉的热稳定性制以及降低淀粉的体外消化性能,增加抗性淀粉的含量^[18],汤晓智等曾研究表明乳清蛋白与大米淀粉分子间的相互作用可以增强复合产物的凝胶特性^[19]。因此,深入研究低聚肽与其他食品组分间的相互作用,尤其是与淀粉分子之间的交互作用,对于淀粉改性及低聚肽应用范围的扩大是个新的尝试和突破。

本课题组前期研究发现豌豆肽和大豆肽能与大米淀粉分子发生相互作用,并且可以改变大米淀粉的一些理化性质,其中大米淀粉的糊化性质和消化性能明显得到改善,同时发现由于组成的氨基酸含量以及分子量的不同,大豆肽和豌豆肽对淀粉性质的改变程度也不尽相同。为进一步分析比较低聚肽对大米淀粉的影响,本实验选择谷物蛋白肽(大米肽、玉米肽、小麦肽)作为研究对象,重点是要深入探究其对大米淀粉糊化性质和消化性能的影响,为低聚肽作为一种新型原料应用于功能性食品提供更多的选择依据。

1 材料和方法

1.1 实验材料与试剂

大米淀粉、小麦肽粉、大米肽粉、玉米肽粉,江西金农生物科技有限公司;猪胰淀粉酶,阿拉丁试剂(上海)有限公司;糖化酶、DNS试剂,北京索莱宝科技有限公司;其余试剂均购自西陇科技股份有限公司。

1.2 主要仪器

FE28型pH计,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;RVA-4快速黏度分析仪,澳大利亚Newport Scientific公司;差示扫描热仪(DSC, Diamond-I),Perkin Elmer instruments公司。

1.3 实验方法

1.3.1 实验设计

本实验设计选用分子量不同的大米肽、玉米肽、小麦肽:以大米淀粉为基准,按质量分数(0%、1%、5%、10%)分别在大米淀粉中加入三种低聚肽,配制淀粉乳。每次测定重复三次,数据结果取平均值进行分析。

1.3.2 大米淀粉糊化特性的测定

用快速黏度分析仪测定。根据美国谷物化学协会(AACC)的标准程序2进行测试^[8]。糊化参数由软件自动计算,包括糊化时间、峰值黏度、最终黏度、崩解值及回复值。

1.3.3 大米淀粉热力学特征的测定

利用DSC测定大米淀粉的热力学特性。参数:温度范围30~120℃,升温速率为10℃/min,以空盘作为参比,得到样品的DSC曲线。每个样品重复做三次。使用Proten Analysis软件对曲线进行分析,得到吸热峰的起始温度(T_0)、峰值温度(T_p)、终值温度(T_c)以及糊化焓(ΔH)。

1.3.4 大米淀粉溶解性和膨胀度的测定

按照前期实验的方法^[20],测定大米淀粉的溶解性和膨胀度。溶解度(S)和膨胀度(B)根据如下公式计算:

$$S/\% = \frac{m_1}{m_2} \times 100\% \quad (1)$$

$$B/\% = \frac{m_3}{m_2} \times (100 - S) \times 100\% \quad (2)$$

式中: m_1 为上清液蒸干至恒质量后的淀粉质量/g; m_2 为淀粉的质量/g; m_3 为离心后淀粉糊的质量/g。

1.3.5 大米淀粉冻融稳定性的测定

按照前期实验的方法^[20]进行大米淀粉的冻融稳定性的测定。析水率的公式如下:

$$R/\% = \frac{m_2}{m_1} \times 100\% \quad (3)$$

式中: m_1 为解冻后样品总质量/g; m_2 为离心后上清液质量/g。

1.3.6 大米淀粉体外消化性能的测定

按照前期实验的方法^[20],称取大米淀粉0.2g,加

入 0.1 M 的醋酸缓冲液 15 mL, 摇匀后进行 30 min 的糊化; 流动水冷却至室温, 再加入 10 mL 的酶液 (猪胰淀粉酶/g: 糖化酶/g=20:1) 开始反应, 酶解一定时间后, 沸水灭酶, 采用 DNS 法在波长 540 nm 处比色得出葡萄糖量。

快消化淀粉:

$$RDS/\% = (G_{20} - FG) \times \frac{0.9}{TS} \times 100\% \quad (4)$$

慢消化淀粉:

$$SDS/\% = (G_{120} - G_{20}) \times \frac{0.9}{TS} \times 100\% \quad (5)$$

抗消化淀粉:

$$RS/\% = \frac{[TS - (RDS + SDS)]}{TS} \times 100\% \quad (6)$$

式中: G_{20} 表示 20 min 后水解生成的葡萄糖量(mg); FG 表示水解前淀粉中葡萄糖量(mg); G_{120} 表示 120 min 后水解生成的葡萄糖量(mg); TS 为总淀粉量(mg)。

1.4 数据分析

实验数据采用 Origin 8.0 软件作图, 用 SPSS 2.0 软件对数据进行处理分析和多重比较。以 $p < 0.05$ 为显著性检验标准。

2 结果与分析

2.1 低聚肽的氨基酸成分及分子量

氨基酸是低聚肽的基本组成成分, 并且多数研究表明带不同电荷的氨基酸对淀粉的糊化和回生性能有显著影响, 因此对各低聚肽的氨基酸含量及分子量大小进行分析是必不可少的。五种低聚肽的氨基酸成分差别以及分子量大小如表 1 所示, 主要分析三种碱性氨基酸、两种酸性氨基酸, 和部分中性氨基酸。豆类蛋白肽与谷物蛋白肽的主要差异在于碱性和酸性氨基酸; 豆类蛋白肽的氨基酸含量基本一致, 大米肽与与玉米肽、小麦肽的各种氨基酸含量存在差别。

2.2 谷物蛋白肽对大米淀粉黏度特性的影响

谷物蛋白肽对大米淀粉黏度的影响效果趋势如图 1 和表 2 所示。在相同条件下, 向大米淀粉中分别加入小麦肽、玉米肽和小米肽, 体系中的峰值黏度、最终黏度、崩解值、及回生值均有不同程度降低, 与前期实验的结果“大豆肽、豌豆肽使这些特征值显著降低”一致。其中 10% 的小麦肽对降低体系的峰值黏度、崩解值的效果最好, 降低 300 MPa·s, 其次 10% 的大米肽, 降低 270 MPa·s。从对体系的最终黏度、回生

值这两方面来分析, 玉米肽的添加则优于其他两种肽, 5% 的玉米肽的添加效果最好, 最终黏度降低 300 MPa·s, 回升值降低 200 MPa·s。

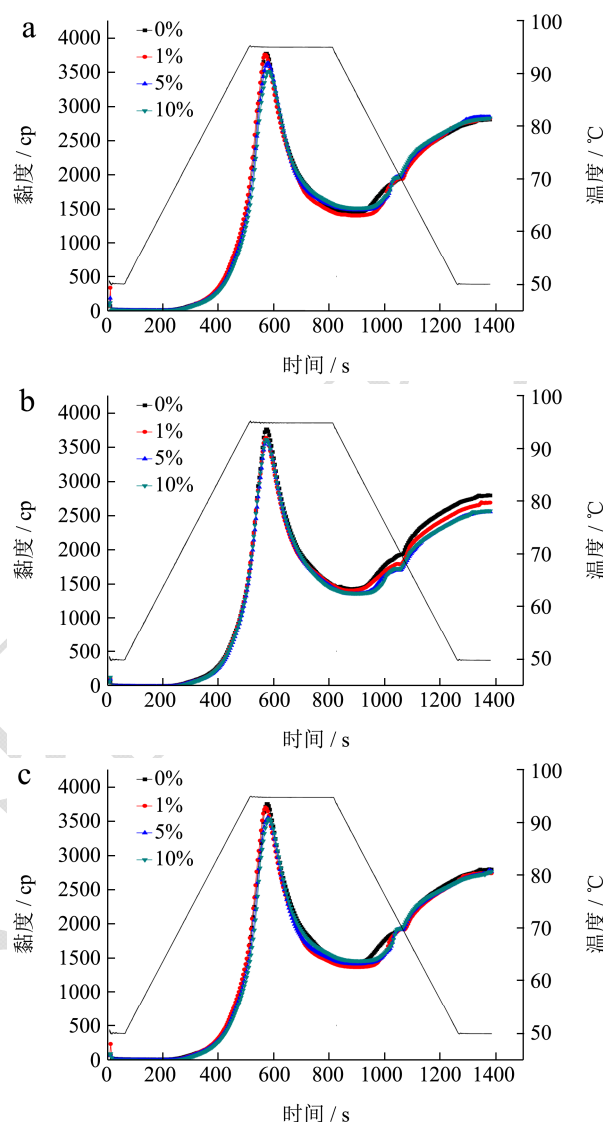


图1 谷物蛋白肽对大米淀粉黏度的影响

Fig.1 Effect of cereal protein peptides on the viscosity of rice starch

注: a: 小麦肽; b: 玉米肽; c: 大米肽。

回顾前期实验豆类肽对大米淀粉糊化的影响: 豌豆肽的分子量小于 1000, 且淀粉糊的峰值黏度降低 470 MPa·s, 崩解值降低 350 MPa·s; 大豆肽的分子量小于 2000, 使淀粉糊最终黏度降低 600 MPa·s, 回升值降低 400 MPa·s^[20]。结合表 1 进行阐述, 低聚肽分子量越小, 越有利于降低淀粉体系的峰值黏度和崩解值; 分子量大于 1000 对降低体系的最终黏度和回升值的效果越好; 同时, 低聚肽的带电氨基酸含量的不同, 导致低聚肽自身带有的净电荷对大米淀粉的静电力作用不同^[2,21]。有研究表明赖氨酸、谷氨酸等一些带电氨基酸可以提高淀粉的糊化性质等, 而中性电荷对淀

粉的性质无影响；在淀粉糊化过程中，低聚肽可与淀粉颗粒通过静电力紧密结合，在加热过程中抑制直链淀粉的溶出，由于静电力的强弱和分子量不同造成的

空间排布可以影响淀粉在糊化过程中的吸水膨胀，进而不同的低聚肽影响大米的糊化进程和糊化特性的程度不相同^[2,21-24]。

表1 五种肽氨基酸分析及分子量表

Table 1 Amino acid analysis and molecular weight table of five peptides

主要氨基酸	大豆肽	豌豆肽	大米肽	玉米肽	小麦肽
精氨酸/%	7.127	7.375	2.44	1.76	1.567
赖氨酸/%	6.515	7.867	2.44	1.08	0.844
组氨酸/%	2.328	2.354	2.83	1.45	1.493
天门冬氨酸/%	10.222	11.259	8.44	5.19	2.498
谷氨酸/%	21.987	18.474	16.1	23.94	34.396
丝氨酸/%	4.192	4.125	6.49	4.30	3.729
酪氨酸/%	3.41	3.17	7.84	3.92	2.427
苏氨酸/%	2.974	3.112	4.07	2.98	2.162
脯氨酸/%	5.503	4.335	5.73	12.25	11.705
相对分子量大小	<2000	<1000	<2000	<5000	<1000

注：以上氨基酸是部分氨基酸的含量。

表2 谷物蛋白肽对大米淀粉成糊特征值的影响

Table 2 Influence of cereal protein peptides on characteristic value of rice starch paste

项目	峰值黏度/MPa·s	崩解值/MPa·s	终值黏度/MPa·s	回生值/MPa·s	成糊温度/°C	峰值时间/min
原淀粉	3777.00±70.77 ^a	2340.00±24.13 ^b	2802.00±31.82 ^{ab}	1365.00±46.90 ^{abc}	83.30±0.63 ^a	9.00±0.04 ^{ab}
大米肽	1% 3714.70±9.50 ^{ab}	2344.70±9.07 ^b	2752.00±44.50 ^{bc}	1382.00±51.70 ^{ab}	82.00±0.05 ^{bc}	9.50±0.00 ^b
	5% 3599.30±51.60 ^{cd}	2182.30±9.07 ^d	2777.00±63.57 ^{ab}	1360.00±67.90 ^{abc}	83.10±0.68 ^{abc}	9.60±0.12 ^{ab}
玉米肽	10% 3562.00±43.47 ^{cd}	2097.30±15.50 ^c	2774.00±36.51 ^{ab}	1309.00±61.51 ^{bc}	83.30±0.66 ^{ab}	9.70±0.10 ^a
	1% 3652.00±64.38 ^{bc}	2241.00±64.26 ^c	2697.00±20.82 ^c	1286.00±65.70 ^{cd}	83.00±0.28 ^{abc}	9.00±0.07 ^{ab}
小麦肽	5% 3625.70±25.80 ^{bcd}	2262.00±10.15 ^c	2564.30±18.90 ^d	1200.70±9.61 ^d	83.70±0.55 ^a	9.60±0.07 ^{ab}
	10% 3657.30±30.10 ^{bc}	2282.30±9.71 ^c	2577.70±35.23 ^d	1202.70±39.30 ^d	83.10±0.77 ^{abc}	9.60±0.14 ^{ab}
原淀粉	1% 3797.30±71.70 ^a	2399.00±52.17 ^a	2817.00±45.90 ^{ab}	1418.30±55.60 ^a	82.00±0.23 ^c	9.50±0.10 ^b
	5% 3650.70±68.20 ^{bc}	2172.30±20.98 ^d	2839.00±58.56 ^a	1361.00±33.40 ^{abc}	83.10±0.35 ^{abc}	9.70±0.10 ^{ab}
10% 3535.30±6.51 ^d	2024.33±32.53 ^f	2825.00±19.22 ^{ab}	1314.30±18.00 ^{bc}	83.40±0.53 ^a	9.70±0.14 ^a	

注：同行肩标字母不同表明差别明显 ($p < 0.05$)。

表3 谷物蛋白肽对大米淀粉热力学特征值的影响

Table 3 Influence of cereal protein peptides on thermodynamic parameter of rice starch paste

项目	ΔH /(J/g)	T_p /°C	T_o /°C	T_c /°C
原淀粉	0.62±0.10 ^e	66.80±0.44 ^{cd}	65.90±1.64 ^a	70.30±1.05 ^d
玉米肽	1% 44.20±0.56 ^d	67.03±0.74 ^{cd}	54.75±0.50 ^d	73.50±1.56 ^{bcd}
	5% 76.33±3.44 ^c	64.40±0.28 ^{ef}	51.40±1.42 ^e	74.17±3.02 ^{bc}
大米肽	10% 87.69±2.40 ^c	66.70±1.48 ^{cd}	63.03±1.53 ^b	74.50±0.57 ^{bc}
	1% 3.92±1.06 ^e	68.00±0.28 ^c	65.53±1.66 ^a	78.45±0.92 ^a
小麦肽	5% 1.07±0.06 ^e	70.15±0.92 ^b	67.10±0.71 ^a	73.03±0.76 ^{bcd}
	10% 3.77±0.93 ^e	71.90±0.57 ^a	67.25±0.21 ^a	76.00±1.05 ^{ab}
原淀粉	1% 3.94±0.41 ^e	66.45±1.49 ^{cd}	62.93±0.74 ^b	73.30±0.42 ^{bcd}
	5% 225.15±20.58 ^b	65.90±0.28 ^{de}	57.55±0.21 ^c	70.85±0.07 ^{cd}
10% 388.35±28.07 ^a	63.70±0.85 ^f	58.25±1.49 ^c	72.95±3.47 ^{bcd}	

注：同列肩标字母不同表明差别明显 ($p < 0.05$)； T_o 为起始温度； T_p 为峰值温度； T_c 为终点温度； ΔH 为焓变。

2.3 谷物蛋白肽对大米淀粉热力学的影响

表3显示谷物蛋白肽对大米淀粉的热力学特征值具有显著性差异。对比原淀粉的 ΔH 、 T_p 、 T_o 以及 T_c 可以发现,谷物肽使大米淀粉糊化吸热焓发生显著的增大,且小麦肽使焓变值最高,其次是玉米肽;玉米肽和小麦肽使大米淀粉糊化的峰值温度明显降低,而大米肽却使峰值增大。

相比较而言,小麦肽对大米淀粉的热力学影响最大,使大米淀粉的焓值从0.62 J/g猛增到388.35 J/g。焓值的增加表明,需要更多的能量去解聚和熔融双螺

旋结构,这说明在糊化过程中,淀粉的结晶区发生大幅度改变,谷物肽的加入使得淀粉的双螺旋结构之间的作用力变强,变得有些紧密。说明淀粉分子和低聚肽在糊化后形成凝胶的过程当中,二者分子之间发生了相互作用,通过静电力发生分子聚集,使得淀粉与谷物肽之间形成复合凝胶体系,提高了淀粉的热稳定性^[18,25-27]。

2.4 谷物蛋白肽对大米淀粉溶解度和膨胀度的影响

表4 谷物蛋白肽对大米淀粉溶解度的影响/%

Table 4 Effect of cereal protein peptides on solubility of rice starch

温度/°C		0%	1%	5%	10%
95	小麦肽	15.40±0.50 ^c	15.70±0.20 ^c	19.00±0.80 ^b	20.20±0.02 ^a
	玉米肽	15.00±0.10 ^b	14.10±0.60 ^b	15.70±1.10 ^b	19.90±1.50 ^a
	大米肽	15.40±0.80 ^b	14.50±0.50 ^c	16.20±0.40 ^b	20.40±0.60 ^a
85	小麦肽	5.80±0.20 ^d	6.20±0.10 ^e	9.30±0.20 ^b	12.70±0.10 ^a
	玉米肽	5.30±0.50 ^e	5.70±0.10 ^e	7.50±0.50 ^b	8.90±0.90 ^a
	大米肽	5.90±0.10 ^e	6.40±0.30 ^e	9.10±0.30 ^b	12.60±0.60 ^a
75	小麦肽	4.20±0.10 ^d	4.80±0.30 ^e	8.60±0.40 ^b	13.30±0.20 ^a
	玉米肽	3.50±0.40 ^e	3.60±0.40 ^e	5.50±0.40 ^b	8.30±0.40 ^a
	大米肽	4.10±0.10 ^d	5.70±0.50 ^e	9.50±0.40 ^b	15.60±0.30 ^a
65	小麦肽	3.80±0.2 ^d	5.40±0.50 ^e	10.40±0.50 ^b	14.60±0.40 ^a
	玉米肽	3.90±0.03 ^d	4.50±0.02 ^e	5.80±0.30 ^b	8.17±0.20 ^a
	大米肽	3.10±0.03 ^d	3.70±0.08 ^e	5.60±0.30 ^b	6.90±0.03 ^a

注:同行肩标字母不同表明差别明显($p<0.05$)。表5、6同。

表5 谷物蛋白肽对大米淀粉膨胀度的影响/%

Table 5 Effect of cereal protein peptides on the swelling degree of rice starch

温度/°C		0%	1%	5%	10%
95	小麦肽	17.40±0.30 ^a	17.60±0.30 ^a	18.00±1.30 ^a	18.50±1.00 ^a
	玉米肽	17.20±0.30 ^a	16.40±0.70 ^b	16.00±1.20 ^b	18.20±0.90 ^a
	大米肽	17.50±0.10 ^a	17.30±0.60 ^a	17.00±0.20 ^b	17.70±0.80 ^a
85	小麦肽	9.10±0.30 ^a	9.20±0.20 ^a	9.20±0.20 ^a	9.40±0.10 ^a
	玉米肽	9.01±0.30 ^a	9.20±0.30 ^a	8.80±0.20 ^a	8.30±1.20 ^a
	大米肽	9.20±0.10 ^a	8.98±0.20 ^b	9.00±0.10 ^{ab}	9.00±0.03 ^{ab}
75	小麦肽	6.90±0.10 ^e	6.80±0.10 ^e	7.60±0.30 ^b	8.30±0.10 ^a
	玉米肽	7.30±0.10 ^a	7.30±0.40 ^{ab}	7.30±0.20 ^{ab}	6.70±0.40 ^b
	大米肽	8.50±0.20 ^{ab}	8.30±0.10 ^b	8.40±0.30 ^{ab}	8.70±0.20 ^a
65	小麦肽	6.10±0.30 ^e	6.30±0.20 ^e	6.60±0.20 ^b	7.00±0.10 ^a
	玉米肽	6.00±0.04 ^b	6.10±0.03 ^{ab}	6.00±0.03 ^{ab}	6.10±0.05 ^a
	大米肽	5.90±0.10 ^a	5.90±0.08 ^a	6.00±0.05 ^a	5.80±0.10 ^a

由表4和表5可知,大米淀粉的溶解度和膨胀度随温度升高而增大;并且溶解度与谷物蛋白肽的添加量成正相关,增大趋势极显著;三种肽对膨胀度的影

响不显著。添加10%的大米肽,95℃温度下,使大米淀粉溶解度从15.4%增到20.4%。

高温使水分快速进入淀粉内部,无定形区的直链

淀粉受热逐渐融入水中，溶解度增大；同时淀粉分子的微晶束结构松动，极性基团暴露与水结合，膨胀度快速增大^[28]。

从表 1 中看出小麦肽的分子量最小，结合前期实验豆类肽对大米淀粉溶解度、膨胀度的影响，大豆肽的分子量且对大米淀粉的溶解度和膨胀度的作用效果要优于豌豆肽^[20]；相比谷类肽，豆类肽可以显著性提高大米淀粉的溶解度和膨胀度。有研究表明氨基酸或寡肽与淀粉存在静电作用力，而氨基酸的总净正电荷或负电荷可以显著提高淀粉的膨胀特性，但净电荷对淀粉的溶解度没有明显关系^[2,21,23,29]；也有研究表明带电氨基酸可以减低淀粉的溶解度和膨胀度^[30]；同时，有实验表明精氨酸、赖氨酸可以使淀粉的膨胀力增大^[31,32]；豆类肽与谷物肽的氨基酸成分的主要差异在于精氨酸与赖氨酸的含量，由此可以推测，精、赖氨酸的存在对淀粉的溶解度和膨胀度起决定性因素，拥有碱性氨基酸较多的低聚肽可以通过较强静电力与直链淀粉作用，促使直链淀粉的浸出。可能淀粉的来源不同以及低聚肽中多种氨基酸作用的结果，造成本实验的结果与他人的结果相左。

2.5 谷物蛋白肽对大米淀粉冻融稳定性的影响

从图 2 中可以看出，大米肽可以有效提高淀粉冻融稳定性，添加 5%、10% 的大米肽能够增强淀粉糊冻融稳定性，析水率降低 3%；小麦肽、玉米肽对淀粉冻融稳定性的影响无显著性差异。其原因可能是大米肽的存在能够降低淀粉糊的冻结冰点，且增强淀粉形成的凝胶网络结构^[33,34]。

大米肽的分子量与大豆肽的分子量相同；前期实验中豆类肽对淀粉的冻融稳定性的影响，表明低聚

肽分子量在 1000~2000 时可以显著提高淀粉的冻融稳定性，且大豆肽使析水率降低 6%，豌豆肽降低 5%^[20]；结合表 1，大米肽的中性氨基酸含量要高于其他低聚肽，说明不带电荷的氨基酸对淀粉的冻融稳定性也有一定的影响。在淀粉糊化时，低聚肽与淀粉通过静电作用形成肽-淀粉复合物，并且低聚肽具有双亲性质，水与羟基缔合使复合物的表现增溶，在冻融过程中，复合物在水中形成大分子胶团，非极性部分指向胶团内部而极性部分定向指向水环境，减少凝胶体系中可冻结水的含量^[35,36]。

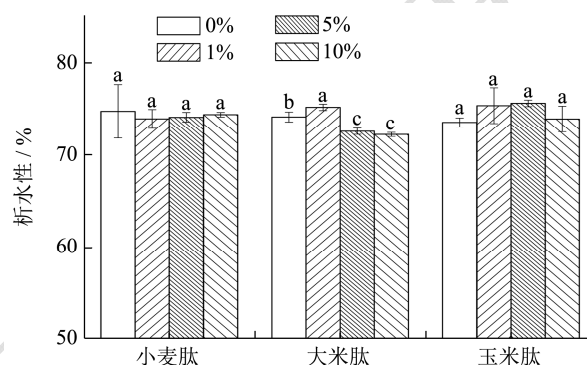


图2 谷物蛋白肽对大米淀粉冻融稳定性的影响

Fig.2 Effect of cereal protein peptides on freeze-thaw stability of rice starch

2.6 谷物蛋白肽对大米淀粉体外消化性能的影响

由表 6 比较发现：大米淀粉中的 RDS 含量 90.99%。在相同的因素下，谷物蛋白肽可以在不同程度上降低 RDS 的含量。5% 的玉米肽效果最佳，使 RDS 的含量降低 25%；其次 1% 的大米肽使其降低 16%；其他的添加量之间的作用效果无显著性差别，RDS 的降低值控制在 10% 以内。

表6 谷物蛋白肽对大米淀粉消化性能的影响

Table 6 Effect of cereal protein source polypeptides on the digestibility of rice starch

项目	RDS/%	SDS/%	RS/%
大米淀粉	90.99±1.77 ^a	5.97±0.43 ^d	3.03±1.34 ^g
玉米肽	1% 80.04±1.95 ^{bcde}	18.42±1.25 ^a	2.17±1.03 ^g
	5% 66.43±8.84 ^f	20.53±4.98 ^a	13.05±4.17 ^b
	10% 85.96±1.66 ^{ab}	11.48±1.23 ^{bc}	2.56±0.43 ^g
小麦肽	1% 83.22±1.73 ^{bc}	8.96±1.43 ^{cd}	7.82±1.03 ^{de}
	5% 76.34±2.83 ^{de}	13.58±2.12 ^b	10.08±0.82 ^{cd}
	10% 84.46±2.42 ^{bc}	8.73±1.55 ^{cd}	6.81±0.89 ^e
大米肽	1% 74.79±0.70 ^e	7.31±1.66 ^d	17.89±0.96 ^a
	5% 81.39±3.57 ^{bcd}	13.33±2.49 ^b	5.28±1.76 ^{ef}
	10% 79.31±1.08 ^{cde}	8.13±2.59 ^{cd}	12.34±1.15 ^{bc}

在前期实验中得出豆类肽可以使大米淀粉中的RDS含量降低,其中5%的大豆肽使RDS降低31%^[20]。结合表1,可以大胆假设,同一类型的低聚肽分子量越大,强化淀粉的抗酶解能力最明显,不同类型的低聚肽因为氨基酸含量不同,抗酶解能力的大小也不同。一方面低聚肽可以在淀粉糊化的过程中,可以产生静电力与淀粉相互作用,增加淀粉颗粒的大小,粒径可以影响淀粉的消化率,粒径越小,猪胰淀粉酶水解淀粉的速度越快^[37-39];同时低聚肽对淀粉形成一种包裹作用,对使得淀粉酶与糊化淀粉难以接触,从而使淀粉水解率降低^[22]。另一方面可能是在淀粉酶解过程中,残留的低聚肽对相关酶的活性影响,有实验表明有结果表明n端含有丝氨酸、苏氨酸、酪氨酸、赖氨酸或精氨酸的3~6氨基酸残基的多肽以及靠近c端含有蛋氨酸或占据c端位置的脯氨酸残基,可以通过氢键和静电相互作用跟 α -葡萄糖苷酶、淀粉酶等发生相互作用,对酶的活性产生抑制作用^[23,40-42]。

3 结论

3.1 在大米淀粉与谷物蛋白肽共糊化过程中,谷物肽可以改善淀粉的糊化性质、热力学特性以及体外消化性能。谷物肽的加入使体系的黏度特征值大大降低;增加大米淀粉糊化的焓变,提高热稳定;同时,可以降低大米淀粉中的RDS的含量,其次谷物肽的加入也可以改善大米淀粉的一些物理性质,比如溶解度、膨胀度以及冻融稳定性等。

3.2 目前大米淀粉与低聚肽之间的具体作用机理仍在探索之中,但可以根据以上实验研究成果及前期的豆肽蛋白肽与淀粉的实验结果可以推断,低聚肽的氨基酸含量、分子量以及添加量都可以影响其与淀粉之间的相互作用效果,氨基酸是关键的因素。不同低聚肽的极性、非极性氨基酸残基的组成及含量,造成低聚肽带电程度不一,与淀粉分子结构作用时的强弱致使淀粉发生变性的结果不一样。

3.3 我们可以通过选择合适的影响因素对大米淀粉进行改性,改善大米淀粉的糊化性质,延缓其老化并增加其慢消化淀粉的含量,这对提高淀粉类食品的加工品质和营养品质有一定的辅助作用。一方面将肽与大米淀粉的复合产物应用到不同的食品领域中,生产不同性能的功能性食品,通过食疗法在日常生活中预防或改善某些疾病。比如5%的玉米肽使大米淀粉中慢消化淀粉和抗消化淀粉的总含量增加25%,可以提供给肥胖患者和糖尿病患者食用;另一方面能够普及低聚肽的应用,通过肽补充人体的所必需得氨基酸。

参考文献

- [1] 韩雪,井雪萍,张莉丽,等.大米淀粉回生特性及控制技术研究进展[J].哈尔滨工业大学学报,2016,48(2):126-130
HAN Xue, JING Xue-ping, ZHANG Li-li, et al. Progress in research on retrogradation characteristics and control technology of rice starch [J]. Journal of Harbin University of Technology, 2016, 48(2): 126-130
- [2] Lu J, Luo Z, Xiao Z. Effect of lysine and glycine on pasting and rheological properties of maize starch [J]. Food Research International, 2012, 49(1): 612-617
- [3] 顾正彪,李兆丰,洪雁,等.大米淀粉的结构、组成与应用[J].中国粮油学报,2004,19(2):21-27
GU Zheng-biao, LI Zhao-feng, HONG Yan, et al. Structure, composition and application of rice starch [J]. Chinese Journal of Cereals and Oils, 2004, 19(2): 21-27
- [4] 陈月姣,邓学良,肖华西.酸解大米淀粉理化性质的研究[J].食品科技,2013,38(9):120-123
CHEN Yue-jiao, DENG Xue-liang, XIAO Hua-xi. Physical and chemical properties of acid-hydrolyzed rice starch [J]. Food Science and Technology, 2013, 38(9): 120-123
- [5] 周丽君,林亲录,符琼.大米淀粉物理性质研究进展[J].食品科技,2010,11:249-253
ZHOU Li-jun, LIN Qin-lu, FU Qiong. Research progress on physical properties of rice starch [J]. Food Science and Technology, 2010, 11: 249-253
- [6] 王日思,万婕,刘成梅,等.不同分子量大豆可溶性膳食纤维对大米淀粉糊化及流变性质的影响[J].食品工业科技,2016,37(6):124-127
WANG Ri-si, WAN Jie, LIU Cheng-mei, et al. Effects of soluble dietary fiber with different molecular weight on starch gelatinization and rheological properties of rice [J]. Food Industry Science and Technology, 2016, 37(6): 124-127
- [7] 盛志佳.大米淀粉的研发现状与前景[J].湖南农业大学学报(自科版),2010(s1):11-14
SHENG Zhi-jia. Research and development status and prospects of rice starch [J]. Journal of Hunan Agricultural University (Since the Branch Edition), 2010(s1):11-14
- [8] 杨英,何璐,向忠琪,等.海藻酸钠与钙离子对大米淀粉糊化的影响[J].中国粮油学报,2017,2:37-42
YANG Ying, HE Lu, XIANG Zhong-qi, et al. Effects of sodium alginate and calcium ions on gelatinization of rice starch [J]. Chinese Journal of Cereals and Oils, 2017, 2: 37-42
- [9] 陈瑞.肽产品下凡[J].知识经济(中国直销),2018,11:95-99

- CHEN Rui. Introduction of peptide products [J]. Knowledge Economy (China Direct Selling), 2018, 11: 95-99
- [10] 陈杰.三生引领肽产业[J]. 知识经济(中国直销), 2018,9:30-31
- CHEN Jie. San sheng leads peptide industry [J]. Knowledge Economy (China Direct Selling), 2018, 9:30-31
- [11] 杨建刚,王延圣,王月明,等.多肽的生物活性及产品开发研究进展[J].农产品加工,2018,12:79-81
- YANG Jian-gang, WANG Yan-sheng, WANG Yue-ming, et al. Research progress in bioactivity and product development of polypeptides [J]. Agricultural Products Processing, 2018, 12: 79-81
- [12] 于笛,赵泽龙,张丽萍.复合酶法制备小麦低聚肽的工艺研究[J].中国食品添加剂,2017,6:170-177
- YU Di, ZHAO Ze-long, ZHANG Li-ping. Preparation of wheat oligopeptide by complex enzymatic method [J]. China Food Additives, 2017, 6: 170-177
- [13] 丛峰松.神奇的小分子活性肽[M].上海交通大学出版社, 2015
- CONG Feng-song. Magic Small Molecule Active Peptide [M]. Shanghai Jiaotong University Press, 2015
- [14] 王佳,孙德群.小分子多肽类似物研究进展[J].药学学报,2015, 8:931-944
- WANG Jia, SUN De-qun. Progress in the study of small molecule polypeptide analogues [J]. Chinese Journal of Pharmacy, 2015, 8: 931-944
- [15] Tsou M J, Lin W T, Lu H C, et al. The effect of limited hydrolysis with neutrase and ultrafiltration on the anti-adipogenic activity of soy protein [J]. Process Biochemistry, 2010, 45(2): 217-222
- [16] Chuah J A, Matsugami A, Hayashi F, et al. Self-assembled peptide-based system for mitochondrial-targeted gene delivery: functional and structural insights [J]. Biomacromolecules, 2016,17(11):3547-3557
- [17] 罗舜菁,李燕,杨榕,等.氨基酸对大米淀粉糊化和流变性质的影响[J].食品科学,2017,15:178-182
- LUO Shun-qing, LI Yan, YANG Rong, et al. Effects of amino acids on Gelatinization and rheological properties of rice starch [J]. Food Science, 2017, 15: 178-182
- [18] 琚长霄.胶原蛋白与淀粉作用产物及其消化特性的研究[D].广州:华南理工大学, 2011
- JU Chang-xiao. Study on the interaction products of collagen and starch and their digestive characteristics [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011
- [19] 汤晓智,尹方平,扈战强,等.乳清蛋白-大米淀粉混合体系动力学流变学特性研究[J].中国粮油学报,2016,31(2):28-32
- TANG Xiao-zhi, YIN Fang-ping, HU Zhan-qiang, et al. Dynamic rheological properties of whey protein-rice starch mixture [J]. China Journal of Cereals and Oils, 2016, 31(2): 28-32
- [20] 付田田,靳凤芳,牛丽亚,等.大豆肽和豌豆肽对大米淀粉理化性质的影响[J].中国粮油学报, 2019
- FU Tian-tian, JIN Feng-fang, NIU Li-ya, et al. Effects of soybean and pea peptides on physicochemical properties of rice starch [J]. China Journal of Cereals and Oils, 2019
- [21] Azusa I, Makoto H, Tadashi Y, et al. Contribution of the net charge to the regulatory effects of amino acids and epsilon-poly (L-lysine) on the gelatinization behavior of potato starch granules [J]. Bioscience Biotechnology & Biochemistry, 2006, 70(1): 76-85
- [22] 崔亚楠,张晖,王立,等.蛋白质、脂肪对豆类理化特性及体外消化特性的影响[J].中国粮油学报,2018, 33(2):12-17
- CUI Ya-nan, ZHANG Hui, WANG Li, et al. Effects of protein and fat on physicochemical properties and *in vitro* digestive characteristics of legumes [J]. China Journal of Cereals and Oils, 2018, 33(2): 12-17
- [23] Stefano E D, Oliviero T, Udenigwe C C. Functional significance and structure-activity relationship of food-derived α -glucosidase inhibitors [J]. Current Opinion in Food Science, 2018: S646870576
- [24] 肖满凤,徐晓辉,李宏升,等.大米蛋白对大米淀粉糊化特性及鲜湿米粉品质影响的研究[J].食品科技, 2016,41(4):168-172
- XIAO Man-feng, XU Xiao-hui, LI Hong-sheng, et al. Study on the effect of rice protein on the gelatinization properties of rice starch and the quality of fresh and wet rice flour [J]. Food Science and Technology, 2016, 41(4): 168-172
- [25] 周中凯,杨星月,张惠媛,等.魔芋葡甘聚糖水解物对淀粉消化性及糊化热力学性质的影响[J].粮食与油脂,2018,31(3):25-29
- ZHOU Zhong-kai, YANG Xing-yue, ZHANG Hui-yuan, et al. Effects of konjac glucomannan hydrolysate on starch digestibility and gelatinization thermodynamic properties [J]. Grain and Oil, 2018, 31(3): 25-29
- [26] 符珍,贾燕君,林莹,等.玉米醇溶蛋白对木薯淀粉理化性质的影响[J].粮食与饲料工业,2018,378(10):26-29
- FU zhen, JIA Yan-jun, LIN Ying, et al. Effects of zein on physicochemical properties of cassava starch [J]. Food and Feed Industry, 2018, 378(10): 26-29
- [27] 王晨,谢岩黎,南永远.阿魏酸对小麦淀粉理化特性的影响[J].食品工业科技,2018,39(18):12-16

- WANG Chen, XIE Yan-li, NAN Yong-yuan. Effects of ferulic acid on physicochemical properties of wheat starch [J]. Food Industry Science and Technology, 2018, 39(18): 12-16
- [28] 吴桂玲,李文浩,刘立品,等.脂类和颗粒结合蛋白对小麦 A、B 淀粉理化性质的影响[J].中国粮油学报,2016,31(8):17-23
- WU Gui-ling, LI Wen-hao, LIU Li-pin, et al. Effects of lipids and granular binding proteins on physicochemical properties of wheat starch A and B [J]. China Journal of Cereals and Oils, 2016, 31(8): 17-23
- [29] Ito A, Hattori M, Yoshida T, et al. Reversible regulation of gelatinization of potato starch with poly (γ -lysine) and amino acids [J]. Starch - Stärke, 2004, 56(12): 570-575
- [30] 方玲.不同氨基酸对马铃薯淀粉特性影响的研究[D].武汉:华中农业大学,2012
- FANG Ling. Study on the effect of different amino acids on potato starch properties [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2012
- [31] Jie W, Zhou G, Luo S, et al. A study of the effect of amino acids on pasting and short-term retrogradation properties of rice starch based on molecular dynamics simulation [J]. Starch-Stärke, 2017, 69(9-10):1-8
- [32] Chen W, Zhou H, Yang H, et al. Effects of charge-carrying amino acids on the gelatinization and retrogradation properties of potato starch [J]. Food Chemistry, 2015, 167: 180-184
- [33] 冷云,赵阳,陈海华,等.食盐及 pH 对水溶性多糖-马铃薯淀粉共混体系冻融稳定性的影响[J].粮油食品科技,2013,21(5): 116-121
- LENG Yun, ZHAO Yang, CHEN Hai-hua, et al. Effects of salt and pH on freeze-thaw stability of water-soluble polysaccharide-potato starch blends [J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2013, 21 (5): 116-121
- [34] 汪兰,程薇,乔宇,等.冻融循环处理对淀粉凝胶结构和性质的影响[J].食品科技,2010,2:177-182
- WANG Lan, CHENG Wei, QIAO Yu, et al. Effects of freeze-thaw cycle treatment on the structure and properties of starch gel [J]. Food Science and Technology, 2010, 2: 177-182
- [35] 龙虎,蔡自建,刘鲁蜀,等.不同添加剂对蕨根淀粉冻融稳定性影响的研究[J].西南民族大学学报(自然科学版),2007,33(1): 100-104
- LONG hu, CAI Zi-jian, LIU Lu-shu, et al. Study on the effects of different additives on freeze-thaw stability of fern root starch [J]. Journal of Southwest University for Nationalities (Natural Science Edition), 2007, 33(1): 100-104
- [36] 贾春利,黄卫宁,邹奇波,等.热稳定冰结构蛋白对小麦淀粉凝胶冻融稳定性的影响[J].食品科学,2012,33(7):83-87
- JIA Chun-li, HUANG Wei-ning, ZOU Qi-bo, et al. Effect of heat stabilized ice structure protein on freezing and thawing stability of wheat starch gel [J]. Food Science, 2012, 33(7): 83-87
- [37] 赵娜,杨超,田斌强,等.加热时间对大米淀粉特性及抗性淀粉含量的影响[J].食品科学,2010,31(15):34-38
- ZHAO Na, YANG Chao, TIAN Bin-qiang, et al. Effects of heating time on starch properties and resistant starch content in rice [J]. Food Science, 2010, 31(15):34-38
- [38] Dhital S, Shrestha A K, Gidley M J. Relationship between granule size and *in vitro* digestibility of maize and potato starches [J]. Carbohydrate Polymers, 2010, 82(2): 480-488
- [39] Ying J, Yu J. *In vitro* digestion and physicochemical characteristics of corn starch mixed with amino acid modified by heat-moisture treatment [J]. Food Hydrocolloids, 2017, 242:1-6
- [40] Li M, Xia S, Zhang Y, et al. Optimization of ACE inhibitory peptides from black soybean by microwave-assisted enzymatic method and study on its stability [J]. LWT, 2018
- [41] 赵红星.降血糖活性肽制备及抑制 α -葡萄糖苷酶活性肽纯化与鉴定[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018
- ZHAO Hong-xing. Preparation of hypoglycemic active peptide and purification and identification of α -glucosidase inhibitory peptide [D]. Harbin Harbin University of Technology, 2018
- [42] 朱玲.酶解豌豆肽的制备及其 ACE 抑制活性研究[D].郑州:河南工业大学,2014
- ZHU Ling. Preparation of enzymatic pea peptide and its ACE inhibitory activity [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2014