

# 底物浓度对酸性蛋白酶 水解面筋流变特性的影响

张少敏<sup>1</sup> 钱杨鹏<sup>2</sup> 刘慧燕<sup>1</sup> 沈会平<sup>1</sup> 余 权<sup>1</sup> 崔 春<sup>2,\*</sup> 董可明<sup>3</sup>

(1.广东环境保护工程职业学院食品工程系,广东佛山 528216;

2.华南理工大学食品科学与工程学院,广东广州 510640;

3.广东巍微生物科技有限公司,广东广州 511400)

**摘要:** 本文较系统地研究了 PR23 酸性蛋白酶催化不同浓度小麦面筋蛋白水解过程中酶解产物的表现现象、表现粘度、剪切应力和流变特性。研究表明:酶解体系中小麦面筋的浓度越高,反应液的 pH 上升越多,水分活度下降幅度越大。在整个酶解反应过程中,低底物浓度(8%~32%)酶解产物的表现粘度和剪切应力均会随着酶解时间的延长呈先升高后降低趋势;高底物浓度(40%)酶解产物的表现粘度和剪切应力均随着酶解时间的延长呈降低趋势。Ostwald-de waele 模型可以很好的拟合酸性蛋白酶催化不同固形物浓度小麦面筋蛋白酶解产物。

**关键词:** 小麦面筋蛋白 固形物浓度 流变特性

## Effects of solid concentrations on rheological property of wheat gluten protein hydrolyzed by acid protease

ZHANG Shao-min<sup>1</sup> QIAN Yang-peng<sup>2</sup> LIU Hui-yan<sup>1</sup> SHEN Hui-ping<sup>1</sup>,

YU Quan<sup>1</sup> CUI Chun<sup>2,\*</sup> DONG Ke-ming<sup>3</sup>

(1.Department of Food Engineering,Guangdong Polytechnic of Environmental Protection Engineering,Foshan 528216,China;

2.College of Food Science and Engineering,South China University of Technology,Guangzhou 510640,China;

3.Guangdong WeiWei Biotechnology Limited Corporation,Guangzhou 511400,China)

**Abstract:** Apparent viscosity shear stress and rheological properties of wheat gluten hydrolysates catalyzed by PR23,an acid protease,at different solid concentration were studied. Results showed that the increased solid concentrations of Glutenhydrolysates resulted in higher pH and lower water acitivity.Apparent viscosity and shear stress of wheat hydrolysates increased after 12 h of hydrolysis,and then decreased for solid concentration of 8% ,16% ,24% and 32% .The apparent viscosity and shear stress decreased with the reaction time for solid concentration of 40% during the whole hydrolysis process. Ostwald-de waele model can fit the wheat protein hydrolysis process for all solid concentration.

**Key words:** wheat gluten; solid concentration; rheological property

中图分类号: TS201.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2017)09-0066-05

doi: 10. 13386/j. issn1002 - 0306. 2017. 09. 004

谷朊粉,又名小麦面筋蛋白,是小麦加工所产生的副产品,具有蛋白质含量高、脂肪含量低等特点,是我国大宗食物蛋白资源之一<sup>[1]</sup>。由于小麦面筋蛋白中含有大量的谷氨酰胺、脯氨酸和其他非极性氨基酸,这会导致面筋蛋白结构中疏水区较多,在水中分散性差,严重阻碍其功能性的发挥,限制了小麦面筋在食品领域的应用<sup>[2-3]</sup>。以小麦面筋蛋白为原料,通过控制酶解技术可制备呈味基料、功能性肽和改性面筋蛋白等系列高附加值产品,是小麦面筋蛋白精深加工的重要途径之一。蛋白质酶法水解具有反

应条件温和、专一性强、不损害原料中的其他营养成分等特点,已广泛应用于小麦面筋蛋白高值化利用<sup>[4]</sup>。目前工业化的面筋蛋白酶解体系中小麦面筋蛋白的常规浓度一般控制在 10%~20% 的狭小范围。然而,近年来蛋白质“常浓”酶解技术的缺点日益突出,如单位设备的生产效率低、浓缩能耗高、水消耗量大、人工成本高等。高浓度底物酶解或高浓酶解技术是针对“常浓”酶解技术不足而提出的新技术,属于绿色生产技术。相对于“常浓”体系而言,高底物浓度酶解具有许多优点:显著提高了生产设备利

收稿日期: 2016-10-21

作者简介: 张少敏(1987-),女,硕士研究生,讲师,研究方向:食品生物技术,E-mail: cherryzhang1987@163.com。

\* 通讯作者: 崔春(1978-),男,博士,教授,研究方向:食品生物技术,E-mail: CuiChun@scut.edu.cn。

基金项目: 广州市科技计划项目(201604020067);广东环境保护工程职业学院院长基金(KY201401003)。

用率,提升了单位设备的产能;单位产品产生废水更少,废水治理成本低;酶解产物的浓缩、干燥所耗能量更低<sup>[5-6]</sup>。

随着底物蛋白浓度的提高,酶解体系传热、传质和传动特性发生显著变化,因此阐明高浓酶解体系的流变特性具有重要意义。本文以小麦面筋蛋白为原料,系统研究了不同底物浓度对酸性蛋白酶水解面筋蛋白酶解产物流变特性的影响,以期小麦面筋蛋白高浓酶解的产业化奠定理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

样品及试剂 安徽省碧绿春生物科技有限公司;小麦面筋蛋白、裕立宝 PR23 酸性蛋白酶(活力为 10 万 U/g)均为食品级;浓盐酸、浓硫酸、氢氧化钠、苯酚、石油醚、溴甲酚绿、甲基红、硫酸钾、硒粉、硼酸、硫酸铜、葡萄糖等添加剂均为分析纯。

SHA-C 水浴恒温振荡器 江苏省金坛市恒农仪器有限公司;KDN-103F 微量凯式定氮仪、HYP-308 八孔消化炉 上海纤检仪器有限公司;GL-21M 高速冷冻离心机 湘仪离心机仪器有限公司;PHS-3E 数显 pH 计 上海精密科学仪器有限公司;UV-2100 紫外可见分光光度计 上海优尼科仪器有限公司;Haaka MARS III 流变仪 德国 Thermo Fisher 公司;EL204 精密电子天平 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;AquaLab Series 4Te 水分活度仪 美国 Decagon 公司;SZC-C 脂肪测定仪 上海纤检仪器有限公司。

### 1.2 实验方法

1.2.1 小麦面筋蛋白酶解物的制备 将小麦面筋蛋白按 8:92、16:84、24:76、32:68、40:60(w/w)溶于预先调好的酸溶液中,置于恒温水浴锅中振荡预热,待温度达到 50℃和 pH 达到 3.0,添加小麦面筋蛋白重量 0.2% 的酸性蛋白酶,水浴振荡,将振荡速率控制在 100~120 r/min,恒温酶解。在 6、12、18、24、30、36 h 分别取样,然后置于沸水浴中灭酶 15 min,再将酶解物置于-18℃的冷柜中冷冻保存备用。

1.2.2 小麦面筋蛋白基本成分的测定 蛋白含量的测定:参照 GB/T5511-1985,小麦面筋蛋白的换算系数为 5.7。水分含量的测定:参照 GB/T5009.3-1985。粗脂肪含量的测定:参照 GB/T5490-1985。灰分的测定:参照 GB/T5009.4-1985。多糖含量测定:采用苯酚-硫酸法测定原料中多糖含量<sup>[7]</sup>。

1.2.3 流变特性的测定 参考龙肇<sup>[8]</sup>的方法。准确移取 1 mL 样品于流变仪平台上,使用转子的型号为 P35Til Polished,设定测试参数分别为:测量温度为(25±1)℃,板间距为 1 mm,剪切速率于 120 s 内由 0 升至 60 s<sup>-1</sup>,线性选取 80 个参考点考察粘度和剪切应力与剪切速率变化的关系。使用软件 Rheowin Data Manager software Version 4.30 对表观粘度,剪切应力和剪切速率间的曲线进行分析。

粘度模型:  $\eta = K \times \dot{\gamma}^{n-1}$

剪切模型:  $\tau = K \times \dot{\gamma}^n$

模型中  $\eta$  为表观粘度,  $\tau$  为剪切应力,  $K$  为稠度系数,  $\dot{\gamma}$  为剪切速率,  $n$  为流动指数。

1.2.4 数据处理 所有实验结果均为三个平行样的测定结果,结果表示为平均值±标准偏差,使用 SPSS 21.0 和 Excel 2007 软件进行统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 小麦面筋的基本化学组成

小麦面筋中粗蛋白含量为 80.2%±1.21%,多糖含量为 6.1%±0.25%,粗脂肪含量为 1.9%±0.32%,灰分含量为 2.2%±0.43%。不同固形物浓度条件下的酶解体系如表 1 所示。

表 1 不同浓度小麦面筋溶液的化学组成(%)

固形物浓度(%)	面筋蛋白	水分	油脂	多糖	灰分
8	6.43	92.75	0.11	0.59	0.12
16	12.85	85.50	0.23	1.18	0.24
24	19.28	78.25	0.34	1.77	0.36
32	25.71	71.00	0.46	2.36	0.47
40	32.14	63.75	0.57	2.95	0.59

### 2.2 不同固形物浓度对酶解过程中 pH 的影响

不同固形物浓度对酶解过程 pH 的影响如图 1a 和图 1b 所示,在酸性酶解过程中,在酶解反应最初的 6 h 内,固形物浓度为 8% 样品的 pH 上升到 4.0 左右,而其他 4 组样品则上升到 4.2 左右。即固形物浓度高的样品上升速度更快。到反应中后期, pH 依然维持上升的趋势,但上升速度放缓,各固形物浓度样品的 pH 的变化速率比较接近,8% 固形物浓度的样品的速率稍快,截至反应 36 h, pH 又上升了 0.33,而其他四个固形物浓度的 pH 上升幅度在 0.2~0.25 的范围内,在整个酶解反应过程中,小麦面筋蛋白溶液的 pH 随酶解液固形物浓度的提高而呈上升趋势。

在酸性蛋白酶水解过程中,固形物浓度越高的样品,水分活度越低,且水分活度下降越快,固形物浓度为 40% 的样品的水分活度从 0.9794 下降为 0.9619,下降幅度接近 2%,是固形物浓度为 8% 的小麦面筋蛋白酶解样品水分活度下降幅度的 6 倍。各固形物浓度的样品水分活度的大小始终为 40% > 32% > 24% > 16% > 8%。

小麦面筋蛋白溶解性较差,酶解过程中蛋白质分子经蛋白酶的作用形成的可溶性多肽和游离氨基酸等小分子物质溶入酶解体系中,降低水分的自由度<sup>[9]</sup>。水解 36 h 后,8% 酶解体系中 82.5% 的小麦面筋蛋白溶于水;16% 体系中 75.2% 的小麦面筋蛋白溶于水;24% 体系中 72.4% 的小麦面筋蛋白溶于水;32% 体系中 68.3% 的小麦面筋蛋白溶于水;40% 体系中 65.3% 的小麦面筋蛋白溶于水。固形物浓度越高的样品,水分活度越低可能是因为本身体系中含有的水较少,另一方面,溶出的小分子物质更多导致水分活度下降更为明显。

### 2.3 不同固形物浓度对酶解体系表观现象的影响

图 2 所示为不同固形物浓度在酶解过程中对酶解液表观现象的影响。I, II 和 III 分别为固形物浓度为 8%、16% 和 32% 的样品在反应 6、12、18、24、

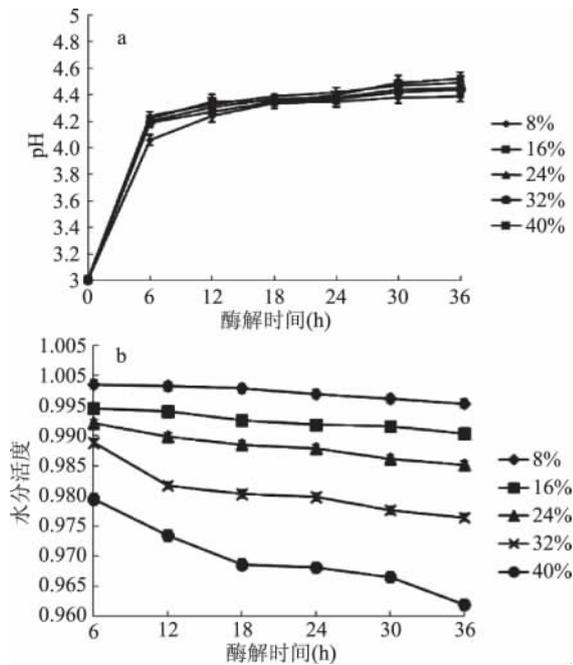


图1 酸性蛋白酶催化小麦面筋蛋白酶解过程中 pH(a) 和水分活度(b) 的变化

Fig.1 Changes of pH and water activity in PR23 catalyzed gluten hydrolysis

30、36 h 时溶解液静置 5 min 后的照片,由于固形物浓度 24% 与 16% 的酶解样品表现现象相似;固形物浓度 40% 与 32% 的酶解样品的表现现象相似,故并未列出。IV、V 和 VI 为 8%、16%、24%、32% 和 40% 固形物浓度在 6、12、36 h 时溶液静置 5 min 后的照片。

由图 2 可知,8% 的样品在整个酶解反应过程中均有明显的分层现象,且上层液基本保持澄清透明的状态,16% 的样品随着酶解反应的进行,上层清液含量不断下降,至反应第 36 h 时不再有明显分层现象。32% 的样品则在整个过程中始终保持为均匀分散状态。浓度 24% 的样品在 6 h 时还有明显分层现象,但当酶解反应进行到 12 h 时即不再出现分层现象。

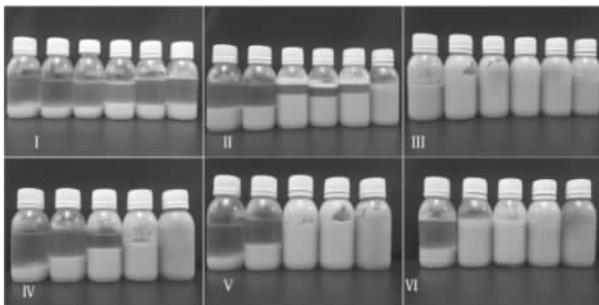


图2 酸性酶酶解体系在酶解过程中表现现象的变化

Fig.2 Changes of apparent phenomenon in PR23 hydrolysis system

在酶解反应过程中,原本出现分层的样品,随着时间的推移,上层清液的量不断减少,直至不再出现分层,或者开始逐渐变浑浊,这可能是因为随着反应的进行,蛋白酶分解面筋蛋白,不断产生亲水性物质

与水分子结合,导致静置后分层现象不再明显。这表明高浓酶解有利于提高小麦面筋蛋白的分散性能,这与王章存等人的研究结果相似<sup>[10]</sup>。

#### 2.4 不同固形物浓度对表观粘度和剪切应力的影响

水在酶解体系中既是反应介质,更是运输介质和润滑剂。在固形物浓度偏低时,水分含量比较高,水的运输和润滑功能显现不明显,当固形物含量上升后,水分更多的吸附在底物上,有效水含量越少,造成酶解物粘度越高,就会造成严重的传质困难。当粘度升高时,物料更难混匀,搅拌则需要做更多功。本实验中,以 10 为底数对剪切速率为  $2 \text{ s}^{-1}$  时的粘度和剪切应力求对数,以该值为 Y 轴建立坐标系,所得不同固形物浓度在酶解过程粘度和剪切应力的变化如图 3a 和图 3b 所示。

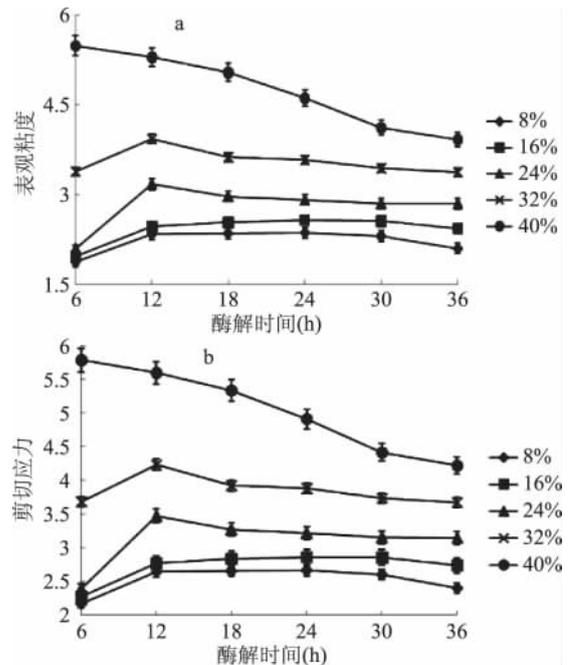


图3 酸性酶水解小麦面筋过程中表观粘度(a) 和剪切应力(b) 的变化

Fig.3 Changes of apparent viscosity and shear stress in PR23 catalyzed gluten hydrolysis

在酸性酶酶解体系中,固形物浓度 8%、16%、24% 和 32% 的酶解样品的表观粘度大致呈先上升后下降的趋势,固形物浓度 40% 的酶解样品在整个酶解过程中均呈下降趋势;剪切应力的结果同表观粘度的结果相似。在整个酶解反应过程中,面筋蛋白酶解体系中各固形物浓度的表观粘度和剪切应力的大小始终保持  $40\% > 32\% > 24\% > 16\% > 8\%$ 。固形物浓度不同,样品前期的表观粘度和剪切应力上升的时间段也有区别,固形物含量 8% 和 16% 的样品的上升时间一直持续到反应第 24 h,24% 和 32% 的样品在酶解反应开始 12 h 后粘度和剪切应力开始下降,而 40% 的样品则从反应 6 h 后就开始下降。截至反应 36 h,8%、16%、24% 和 32% 的样品的粘度和剪切应力均高于反应 6 h 时的数值。而对固形物含量 40% 酶解体系而言,在反应 36 h 后,其粘度和剪切应力均低于比反应 6 h 时的数值。

表2 固形物浓度对酸性酶酶解体系 Ostwald-de waele 模型各参数的影响

Table 2 Effects of solid concentration on parameters of Ostwald-de waele model for PR23 hydrolysis system

固形物浓度(%)		8	16	24	32	40
n(无量纲)	6 h	0.652	0.507	0.482	0.441	0.406
	12 h	0.449	0.391	0.383	0.377	0.322
	18 h	0.378	0.368	0.366	0.339	0.234
	24 h	0.368	0.313	0.308	0.304	0.229
	30 h	0.294	0.303	0.291	0.231	0.183
	36 h	0.192	0.179	0.190	0.154	0.153
K(Pa·sn)	6 h	0.328	0.677	1.82	12.3	89.1
	12 h	0.203	0.626	1.20	6.84	87.5
	18 h	0.166	0.550	1.04	6.57	73.8
	24 h	0.141	0.371	0.883	3.28	72.1
	30 h	0.130	0.341	0.846	3.23	20.0
	36 h	0.033	0.119	0.086	2.72	9.97
R <sup>2</sup>	6 h	0.965	0.948	0.994	0.996	0.996
	12 h	0.965	0.957	0.997	0.993	0.994
	18 h	0.928	0.948	0.972	0.999	0.955
	24 h	0.985	0.966	0.980	0.998	0.988
	30 h	0.984	0.946	0.968	0.995	0.997
	36 h	0.972	0.935	0.983	0.986	0.992

### 2.5 不同固形物浓度对酶解体系流变特性的影响

非牛顿流体是指剪应力与剪切应变率之间不是线性关系的流体,其剪应力与剪应变率之间的关系可通过幂律函数来表示,即 Ostwald-de waele 模型。其中 K 为稠度系数(flow consistency index), n 为流动指数(flow behaviour index)。

$$\tau = K \left( \frac{dv}{dr} \right)^n = K \left( \frac{d\gamma}{dt} \right)^n = K \dot{\gamma}^n$$

固形物浓度对酸性酶酶解体系 Ostwald-de waele 模型各参数的影响如表 2 所示,由表可以看出,样品的流动特性指数 n 均小于 1,说明酶解体系是非牛顿流体中的假塑性流体,具有剪切变稀的性质<sup>[11-12]</sup>。伴随固形物浓度的提升和酶解时间的延长流动指数 n 均呈不断下降的趋势,这说明提升固形物浓度和酶解反应时间能够使剪切变稀特征更加明显。稠度系数(K)是表征样品粘稠度的指标,由表 2 可知,当固形物浓度提升,稠度系数也在上涨,说明样品的粘稠度随着固形物浓度的提升而增加,当酶解时间增长时,酶解液的稠度系数则发生下降。不同固形物浓度下,不同酶解时间制备的面筋蛋白酶解液的 Ostwald-de waele 模型拟合相关性系数(R<sup>2</sup>) > 0.9,说明该模型可以很好的拟合酸性酶酶解面筋蛋白体系。

### 3 结论

不同固形物浓度条件下的面筋蛋白酶解物的水分活度有显著区别,随着固形物浓度的提升和酶解时间的延长水分活度有下降的趋势,且随着固形物浓度的升高,水分活度下降幅度越大,下降速度越快。

不同固形物浓度条件下酸性酶酶解物的粘度和剪切应力均会随着固形物浓度的提升而提升,但随

着酶解反应的进行,8%、16%、24%和 32%酶解样品呈先增加后再降低的趋势,40%酶解样品在整个酶解过程中呈下降趋势。

Ostwald-de waele 模型可以很好的拟合酸性蛋白酶催化不同固形物浓度小麦面筋蛋白酶解产物。

### 参考文献

- [1]王亚平,安艳霞.小麦面筋蛋白组成、结构和功能特性[J].粮食与油脂,2011(1):1-4.
- [2]张海华,周惠明.小麦面筋蛋白结构及其改性研究[J].粮食与油脂,2010(9):1-3.
- [3]彭海萍,王兰.小麦面筋蛋白在食品工业中的应用[J].西部粮油科技,2002,27(2):32-33.
- [4]Cui C, Hu Q, Ren J, et al. The effect of lactic acid bacteria fermentation on the antioxidant activity of wheat gluten pancreatic hydrolysates [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2014, 49(4): 1048-1054.
- [5]Hardt N A, Goot A J V D, Boom R M. Influence of high solid concentrations on enzymatic wheat gluten hydrolysis and resulting functional properties [J]. Journal of Cereal Science, 2013, 57(3): 531-536.
- [6]Hardt N A, Janssen A E M, Boom R M, et al. Factors impeding enzymatic wheat gluten hydrolysis at high solid concentrations [J]. Biotechnology & Bioengineering, 2014, 111(7): 1304-1312.
- [7]大连轻工业学院等八大院校.食品分析[M].北京:中国轻工业出版社,1994:177-180.
- [8]龙肇.蛋白质/多糖交互作用对高乳脂乳浊液稳定性的影响及作用机理研究[D].广州:华南理工大学,2014.
- [9]Hansson T, Andersson M, Wehtje E, et al. Influence of water

(下转第 74 页)

### 3 结论

在相同超高压处理条件下,对酪蛋白进行模拟成人、婴儿胃肠消化环境,在单因素基础上应用正交设计对超高压处理酪蛋白条件进行优化。单因素结果显示:超高压结合成人、婴儿胃肠消化后都可以消减酪蛋白过敏反应。高压结合模拟成人胃肠消化的最佳条件组合是:350 MPa、温度 30 ℃、保压时间 15 min、高压 3 次,此时的抑制率为 22.67%;高压结合模拟婴儿胃肠消化的最佳条件组合是:350 MPa、温度 30 ℃、保压时间 20 min、高压 1 次,此时的抑制率为 39.95%。因此可以看出:结合成人胃肠消化比结合婴儿胃肠消化对过敏原的消减效果更好。期望通过本研究,可以进一步对牛奶中酪蛋白过敏原进行消减,研发出更利于婴儿饮用的液态奶以及其低过敏性酪蛋白相关产品。

#### 参考文献

- [1] 卢姗姗,张少辉,付丽娜,等.牛乳酪蛋白源生物活性肽研究进展[J].食品研究与开发,2011,(11):176-179.
- [2] Altmann K,Wutkowski A,Klempt M,et al.Generation and identification of anti-inflammatory peptides from bovine beta-casein using enzyme preparations from cod and hog[J].Journal of the Science of Food and Agriculture,2016,96(3):868-877.
- [3] Espeche Turbay M B,De Moreno De Leblanc A,Perdigon G,et al.beta-Casein hydrolysate generated by the cell envelope-associated proteinase of *Lactobacillus delbrueckii* ssp.lactis CRL 581 protects against trinitrobenzene sulfonic acid-induced colitis in mice[J].Journal of Dairy Science,2012,95(3):1108-1118.
- [4] Tsaouri S,Douros K,Priftis K N.Cow's milk allergenicity[J].Endocrine Metabolic & Immune Disorders Drug Targets,2014,14(1):16-26.
- [5] 岳喜庆,吴超,郭晨.牛乳中主要蛋白过敏原研究现状[J].食品研究与开发,2008,29(10):147-150.
- [6] Schrander J J P, Van Den Bogart J P H, Forget P P, et al. Cow's milk protein intolerance in infants under 1 year of age: A prospective epidemiological study [J]. European Journal of Pediatrics, 1993, 152(8): 640-644.
- [7] 赵泓.杭州市区 0~3 岁儿童食物过敏现状调查[D].杭州:浙江大学,2012.
- [8] 汝成业.酶法降低牛乳  $\alpha$ s1-酪蛋白致敏性[D].无锡:江南大学,2015.
- [9] 张微,张索坤,王希彪.蛋白酶水解降低牛乳酪蛋白抗原性的研究[J].黑龙江畜牧兽医,2014,(15):112-115.
- [10] 林单,林峰,陆路,等.水解牛乳酪蛋白的抗原性研究[J].食品工业科技,2012,(5):119-122.
- [11] Bae H O, Kang K, Lee J, et al. Regularity for Ostwald-de Waele type shear thickening fluids [J]. Nonlinear Differential Equations & Applications Nodea, 2015, 22(1): 1-19.
- [12] Vajravelu K, Prasad K V, Datti P S, et al. Convective flow, heat and mass transfer of Ostwald-de Waele fluid over a vertical stretching sheet [J]. Journal of King Saud University, 2017, 29(1): 57-67.
- [13] Huang H-W, Hsu C-P, Yang B B, et al. Potential utility of high-pressure Processing to Address the Risk of Food Allergen Concerns [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2014, 13(1): 78-90.
- [14] 龙芳羽,史雪萍,王蓉蓉,等.超高压技术降低食品过敏原的研究进展[J].高压物理学报,2013,27(04):604-608.
- [15] Long F, Yang X, Wang R, et al. Effects of combined high pressure and thermal treatments on the allergenic potential of shrimp (*Litopenaeus vannamei*) tropomyosin in a mouse model of allergy [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2015, 29(119-124).
- [16] 谢丹丹,胡志和,薛璐,等.超高压结合酶法消减南美白对虾蛋白过敏原研究[J].食品科学,2012,23(08):109-114.
- [17] Li H, Zhu K, Zhou H, et al. Effects of high hydrostatic pressure treatment on allergenicity and structural properties of soybean protein isolate for infant formula [J]. Food Chemistry, 2012, 132(2): 808-814.
- [18] Zhang Y, Dai B, Deng Y, et al. AFM and NMR imaging of squid tropomyosin  $\alpha$ Tod p1 subjected to high hydrostatic pressure: evidence for relationships among topography, characteristic domain and allergenicity [J]. RSC Adv, 2015, 5(89): 73207-73216.
- [19] 刘曼丽.模拟胃肠消化制备蚕蛹蛋白活性多肽及其生物活性研究[D].济南:山东师范大学,2015.
- [20] Dupont D, Mandalari G, Molle D, et al. Comparative resistance of food proteins to adult and infant *in vitro* digestion models [J]. Molecular Nutrition & Food Research, 2010, 54(6): 767-780.
- [21] 孙晨,刘丽波,李春,等.母乳和婴儿配方奶粉中唾液酸体外模拟消化研究[J].食品工业科技,2014,(05):334-337.
- [22] Rahaman T, Vasiljevic T, Ramchandran L. Effect of processing on conformational changes of food proteins related to allergenicity [J]. Trends in Food Science & Technology, 2016, 49(24-34).
- [23] Hu G, Zheng Y, Liu Z, et al. Structure and IgE-binding properties of alpha-casein treated by high hydrostatic pressure, UV-C, and far-IR radiations [J]. Food Chemistry, 2016, 204(46-55).
- [24] Shriver S K, Yang W W. Thermal and Nonthermal Methods for Food Allergen Control [J]. Food Engineering Reviews, 2011, 3(1): 26-43.
- [25] Sathe S K, Teuber S S, Roux K H. Effects of food processing on the stability of food allergens [J]. Biotechnology Advances, 2005, 23(6): 423-429.

(上接第 69 页)

activity on the competition between  $\beta$ -glycosidase-catalysed transglycosylation and hydrolysis in aqueous hexanol [J]. Enzyme & Microbial Technology, 2001, 29(9): 527-534.

[10] 王章存,陆杰,李乐静,等.谷朊粉的有限酶解对其分散性及胶黏性的影响[J].食品工业科技,2012,(5):119-122.

[11] Bae H O, Kang K, Lee J, et al. Regularity for Ostwald-de