

# 婴幼儿米粉复合酶解技术研究

陆东和<sup>1,2</sup>, 陈慎<sup>1,2</sup>, 黄颖颖<sup>1,2</sup>, 杨成龙<sup>1,2\*</sup>

(1. 福建省农业科学院农业工程技术研究所, 福建福州 350003; 2. 福建省农产品(食品)加工重点实验室, 福建福州 350003)

**摘要** [目的] 研究生物酶解法在婴幼儿米粉加工过程中的应用, 以提高直链淀粉含量而抑制淀粉回生。[方法] 选取适宜的复合酶对米粉进行酶解, 通过酶种类的筛选、复合酶配比优化, 酶解 pH、酶作用温度、酶添加量及酶作用时间等条件单因素分析及 Box-Behnken 试验设计, 优化得到了复合酶解技术延缓米粉回生过程的工艺条件。[结果] 考虑实际操作, 得到最优酶解条件如下: 酶解 pH 5.9, 酶解温度 56 °C, 复合酶总添加量 0.70 μg/g, 酶解时间 120 min。该条件下得到实际的直链淀粉含量可达 26.28%。经方差及回归方程分析得到各个条件及它们之间的交互作用对于米粉直链淀粉含量影响显著。[结论] 通过该试验分析法优化得到的复合酶解技术可显著抑制淀粉回生, 所得到的工艺条件可用于指导工业生产。

**关键词** 婴幼儿米粉; 直链淀粉; 酶解; 最佳条件

中图分类号 TS216 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2016)29-0066-05

## Compound Enzyme Selection and Enzymolysis Conditions Optimization for Infant Rice Paste

LU Dong-he<sup>1,2</sup>, CHEN Shen<sup>1,2</sup>, HUANG Ying-ying<sup>1,2</sup>, YANG Cheng-long<sup>1,2\*</sup> (1. Institute of Agricultural Engineering Technology, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou, Fujian 350003; 2. Fujian Key Laboratory of Agricultural Product (Food) Processing, Fuzhou, Fujian 350003)

**Abstract** [Objective] The application of enzyme hydrolysis method in production process of infant rice paste was studied, in order to improve the content of amylopectin and restrain starch retrogradation. [Method] Through enzyme selection, compound enzyme ratio optimization, single factor analysis such as pH, temperature, enzyme dosage, time, and Box-Behnken experimental design, conditions for delay retrogradation process by complex enzymatic hydrolysis technology were optimized. [Result] Considering the actual conditions, the optimal conditions were as follows: pH 5.9, enzymolysis temperature 56 °C, addition amount of compound enzymes 0.70 μg/g, enzymolysis time 120 min. Under this condition the content of amylose could reach to 26.28%. Through variance and regression equation analysis, each condition and their interactions had significant effects on amylose content. [Conclusion] The optimized technique can significantly restrain starch retrogradation, the obtained conditions can be used to guide the industrial production.

**Key words** Infant rice paste; Amylose; Enzyme hydrolysis; Optimal condition

婴幼儿营养米粉是根据婴儿生长发育所需要的营养而研制, 在母乳或婴儿配方食品不能满足婴幼儿营养需要时, 作为补充婴幼儿营养的辅助食品。它是大米为主要原料, 以糖、肉类、蛋类、蔬菜、水果、大豆、小米等为选择性配料, 并加入钙、铁等矿物质及维生素等加工制成<sup>[1]</sup>。欧美国家的婴幼儿辅食发展较快, 大都具有明确的针对性, 营养标签详尽, 膳食调配指导完善<sup>[2]</sup>。国内当前婴幼儿食品传统加工工艺存在冲调时用水量大, 不易搅拌均匀, 存在团块及入口后黏度大等缺点。因此, 提升国内市场婴幼儿食品整体品质具有重要意义。

大米不容易引起过敏且易于消化吸收, 因此由大米加工成的米粉是婴儿辅食的首选<sup>[3]</sup>。淀粉的水解度与回生程度对米粉产品的品质具有显著影响, 因此婴幼儿米粉的品质及口感与淀粉的性质有重要关系。淀粉通过蒸煮、焙烤等加热过程而被糊化, 在储存过程中, 糊化的淀粉发生老化(亦称回生), 从而使食品的质构与消化性劣化。因此, 抑制回生是改善米粉口感及延长货架期的重要手段。淀粉的回生包括直链分子螺旋结构的形成及其堆积、支链淀粉外支链间双螺旋结构的形成与双螺旋之间的有序堆积<sup>[4]</sup>。研究表明, 直链淀粉分子长短及直、支链的比例与回生速率呈高度相关, 抑制

淀粉类食品的回生可由消除或抑制支链淀粉分子结晶的形成来达到<sup>[5]</sup>。目前, 抑制淀粉回生的主要方法有基因修饰、酶法修饰、化学修饰、物理修饰<sup>[6]</sup>。

淀粉的生物酶解法能通过改变链长, 增强分子链排列的无序性而达到明显的延缓回生、抗老化和改善稳定性的效果。如通过在馒头、面包和米粉等的制作过程中添加淀粉酶, 可有效延长面制品的保鲜时间, 是一种具有广阔前景的方法<sup>[7]</sup>。笔者针对米粉传统生产工艺的缺陷, 选取 α-淀粉酶、β-淀粉酶及环糊精葡聚糖转移酶(CGTase)进行复配, 采用酶解技术解决米粉冲调性的缺陷, 延缓米粉中淀粉的回生过程, 重点解决婴幼儿米粉加工成品口感较差的问题。

## 1 材料与方法

**1.1 材料** 原料与主要试剂: 大米(市售), α-淀粉酶(分析纯), β-淀粉酶(分析纯), 环糊精葡聚糖转移酶(CGTase)(分析纯)。

主要仪器设备: 双螺杆膨化机, 低速台式离心机, 植物粉碎机, 数显恒温水浴锅, 电热恒温鼓风干燥箱。

## 1.2 方法

**1.2.1 工艺流程。** 大米→粉碎→调水分→酶解→钝化→挤压膨化→烘干→粉碎→筛分→辅料调配→混匀→包装。

**1.2.2 酶的筛选。** 选用 α-淀粉酶、β-淀粉酶、环糊精葡聚糖转移酶 3 种酶在其各自最优条件下对米粉进行水解, 通过测定直链淀粉含量, 分析淀粉的水解程度, 筛选出直链淀粉含量比较理想的 2 种酶进行后续复配试验。

进行复配试验时, 选取 3 种酶进行复合酶筛选试验, 固

**基金项目** 福建省科技厅公益类项目(2014R1015-2); 福建省区域重大项目(2015N31010018)。

**作者简介** 陆东和(1975-), 男, 福建福州人, 副研究员, 博士, 从事食品与发酵工程研究。\* 通讯作者, 教授级高级工程师, 从事食品与发酵研究。

**收稿日期** 2016-08-18

定酶添加总量为 0.50  $\mu\text{g}/\text{g}$ ,在各酶水解最适条件下,酶解 2 h。

**1.2.3 复合酶比例的确定。**经过前期预试验确定,在固定酶总添加量 0.60  $\mu\text{g}/\text{g}$ 、pH 8.0、酶解温度 50  $^{\circ}\text{C}$ 、酶解时间 120 min 条件下,设定 9 个不同水平的复配比例,研究效果较好的 2 种酶制剂之间量的不同配比对米粉酶解效果的影响。

**1.2.4 复合酶组合水解条件筛选。**在确定复合酶水解粗略的水解条件之后,改变酶添加量、酶解时间、酶解 pH、温度中的 1 个参数,分别测定其直链淀粉含量,确定复合酶的较佳单因素条件。

**1.2.5 响应面分析试验。**在单因素试验的基础上,选取 pH、温度、酶添加总量、酶解时间作为响应因素,以直链淀粉含量作为响应面值,通过 Design Expert 8.0.1 软件,根据 Box-Behnken 试验设计原理,设计 4 因素 3 水平共 29 组试验对预处理工艺进行响应面分析,得到优化后的最佳加工参数,因素水平编码见表 1。

表 1 试验因素水平编码

Table 1 Coding of factors and levels

水平 Levels	因素 Factors			
	pH ( $X_1$ )	温度( $X_2$ ) Temperature $^{\circ}\text{C}$	酶添加量( $X_3$ ) Enzyme dosage// $\mu\text{g}/\text{g}$	时间( $X_4$ ) Time//min
1	5.0	65	0.70	120
0	5.5	60	0.60	150
-1	6.0	55	0.50	180

## 2 结果与分析

### 2.1 复合酶种类与配比选择

**2.1.1 复合酶种类选择。**选取  $\alpha$ -淀粉酶、 $\beta$ -淀粉酶、环糊精葡聚糖转移酶 3 种酶,在其各自最优条件下对米粉进行水解,之后进行两两组合试验,并与单酶试验进行对比。由图 1 可知, $\alpha$ -淀粉酶和  $\beta$ -淀粉酶组合效果最好,因此选取该组合作为后续试验的复合酶。

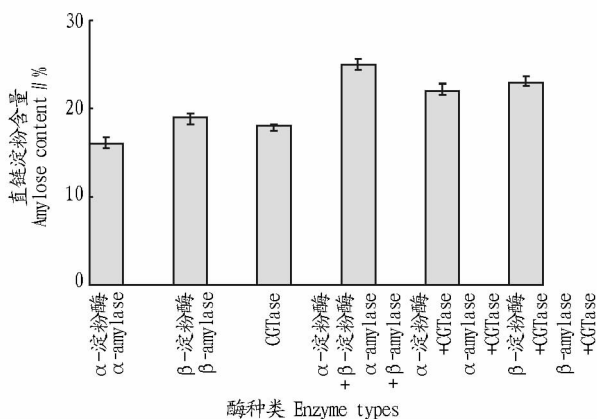


图 1 酶种类与直链淀粉含量的关系

Fig. 1 The relationship between enzyme type and amylose content

**2.1.2 复合酶比例组合筛选结果。**选取  $\alpha$ -淀粉酶和  $\beta$ -

淀粉酶作为该试验的复合酶,配制不同比例的复合酶,以直链淀粉含量为指标,从而得出最佳的复合比例。由表 2 可知,2 号处理组的直链淀粉含量最高,为 25.33%。与单一酶解效果比较,复合酶中所有处理组合的直链淀粉含量均高于单一酶处理组,因此该试验采用的复合酶配比为第 2 处理组,即  $\alpha$ -淀粉酶: $\beta$ -淀粉酶为 4:6。

表 2 不同复合比例组合对米粉的酶解效果

Table 2 Enzymatic results of rice flour with combined enzymes at different ratios

编号 No.	复合酶比例 Ratio of compound enzymes ( $\alpha$ -淀粉酶 + $\beta$ -淀粉酶) $\alpha$ -amylase + $\beta$ -amylase)	直链淀粉含量 Amylose content %
1	1:1	22.68
2	4:6	25.33
3	3:7	24.78
4	2:8	22.97
5	1:9	22.56
6	6:4	23.78
7	7:3	21.01
8	8:2	20.49
9	9:1	18.75
10	10:0	18.58
11	0:10	22.57

### 2.2 复合酶酶解条件单因素试验

**2.2.1 复合酶水解 pH 的选择。**在酶添加量 0.60  $\mu\text{g}/\text{g}$ 、酶解时间 120 min、酶解温度 50  $^{\circ}\text{C}$  条件下,研究不同酶解 pH 对酶解效果的影响,试验结果如图 2 所示。

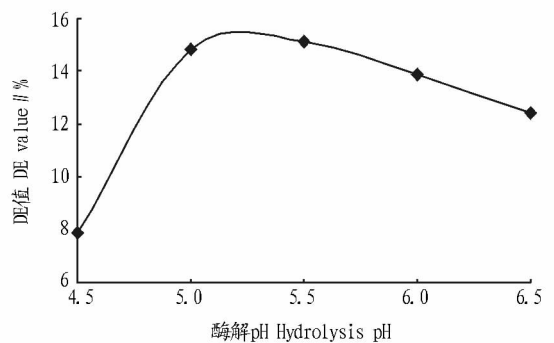


图 2 不同 pH 对直链淀粉含量的影响

Fig. 2 Effect of different pH on amylose content

pH 可影响酶分子活性中心上必需基团的解离程度,影响催化基团中质子供体或质子受体所需的离子化状态,以及底物与酶的解离程度,从而对酶与底物的结合过程造成影响<sup>[8]</sup>。由图 2 可以看出,随 pH 的升高,酶解液的直链淀粉含量呈先升高后降低的趋势,在 pH 5.5 左右时,米粉的酶解效果最好,可知此时复合酶与米粉中淀粉结合最好,pH 低于或超过了这个较适范围,酶的活性中心构象就会发生改变,甚至整个酶分子结构发生了改变<sup>[9]</sup>,造成酶解效果的变化。因此,复合酶的最佳酶解 pH 为 5.5。

**2.2.2 复合酶水解温度的选择。**在 pH 8.0、酶添加量 0.60  $\mu\text{g/g}$ 、酶解时间 120 min 条件下,研究不同酶水解温度对酶解效果的影响,试验结果如图 3 所示。

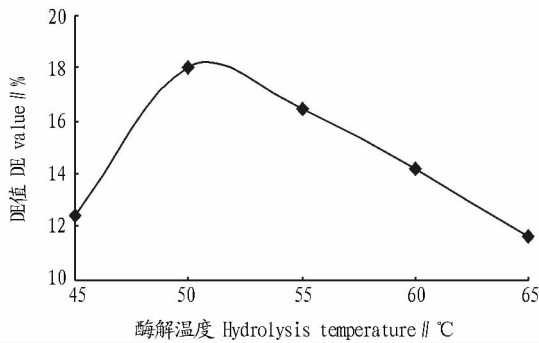


图3 不同酶解温度对直链淀粉含量的影响

Fig. 3 Effect of different hydrolysis temperature on amylose content

温度对酶的活性至关重要,其对酶促反应速率的影响主要表现在 2 个方面:一方面当温度在一定范围内升高时,反应物能量增加,单位时间内有效碰撞次数增加,反应速率加快;另一方面由于酶的本质是蛋白质,随着温度的升高,在超过一定范围之后,酶蛋白会因逐渐变性而失活,从而导致酶促反应速度下降。由图 3 可知,当温度较低时,淀粉酶的活性受到限制,酶解反应效率较低,直链淀粉含量偏低,当温度逐渐升高,淀粉酶的活性不断提高,带动酶解反应速率增加。当温度为 60  $^{\circ}\text{C}$  时,直链淀粉含量最高,此后随着酶解温度的升高酶活性受到抑制,直链淀粉含量降低。研究表明, $\alpha$ -淀粉酶的适宜温度在 60  $^{\circ}\text{C}$  左右<sup>[10]</sup>,而  $\beta$ -淀粉酶的适宜温度在 40 ~ 60  $^{\circ}\text{C}$ <sup>[11]</sup>,故选择复合酶适宜的酶解温度为 60  $^{\circ}\text{C}$  左右。

**2.2.3 复合酶总添加量的选择。**在 pH 8.0、酶解温度 50  $^{\circ}\text{C}$ 、酶解时间 120 min 条件下,研究不同酶总添加量对酶解效果的影响,试验结果如图 4 所示。

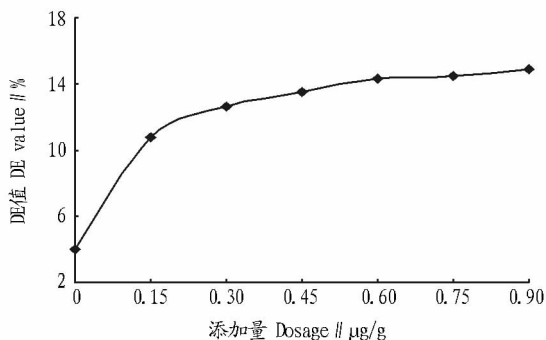


图4 不同酶总添加量对直链淀粉含量的影响

Fig. 4 Effect of different addition amount of total enzymes on amylose content

在底物充足而酶用量处在较低水平时,随着酶用量增大,反应速率也随之增大;当底物不充足时增大酶用量,反应速率的增大会变得缓慢,甚至出现下降的趋势<sup>[12]</sup>。由图 4 可知,当复合酶总添加量为 0 ~ 0.60  $\mu\text{g/g}$  时,酶解液直链淀粉含量随复合酶添加量的增加而不断升高,当添加量超过 0.60

$\mu\text{g/g}$  后,酶解液的直链淀粉含量增加不再明显,说明酶已经被底物饱和,再增加酶的用量对酶解效果作用不大。有研究发现,一定浓度的  $\beta$ -淀粉酶能保持直链淀粉的分支结构,但缩短了直链淀粉的外链长度,从而抑制淀粉的回生<sup>[13]</sup>。因此,复合酶的最适添加量确定为 0.60  $\mu\text{g/g}$ 。

**2.2.4 复合酶解时间的选择。**在 pH 8.0、酶添加量 0.60  $\mu\text{g/g}$ 、酶解温度 50  $^{\circ}\text{C}$  条件下,研究不同酶解时间对酶解效果的影响,试验结果如图 5 所示。

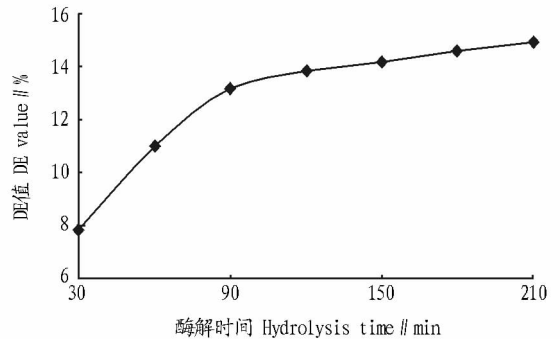


图5 不同酶解时间对直链淀粉含量的影响

Fig. 5 Effect of enzymolysis time on amylose content

由图 5 可知,伴随着酶解反应时间的延长,酶解效果逐渐达到最佳点,酶解液直链淀粉含量逐渐上升。在 30 ~ 120 min 内,淀粉得到了快速的酶解,120 min 后溶液的直链淀粉含量增加变得缓慢。可能的原因是酶解程度达到完全之后底物被完全酶解,酶解效率开始下降,酶解效果趋于平缓。因此,以 120 min 为较合适的复合酶酶解时间。

**2.3 最佳酶解条件优化** 由单因素试验可知,复合酶处理下,直链淀粉含量增加,而直链淀粉是直接影响米粉制作的最主要因素,因此在单因素试验基础上,以直链淀粉含量为指标,选取复合酶总添加量、温度、pH 和时间进行响应面分析,采用 Box-Behnken 试验设计原理,对 4 个因素进行优化设计,结果如表 3。

利用 Design Expert 8.0 分析软件对表 3 的试验结果进行分析,以 pH( $X_1$ )、酶解温度( $X_2$ )、复合酶添加总量( $X_3$ )和酶解时间( $X_4$ )为自变量,直链淀粉含量( $Y$ )为因变量,建立酶解工艺参数回归模型,回归方程如下: $Y = -419.14 + 42.45X_1 + 6.02X_2 + 357.65X_3 + 0.47X_4 + 0.038X_1X_2 - 30.25X_1X_3 - 0.089X_1X_4 - 2.86X_2X_3 + 0.0008X_2X_4 - 0.12X_3X_4 - 0.99X_1^2 - 0.04X_2^2 + 4.54X_3^3 + 0.000132X_4^4$ 。

对回归模型进行方差分析,结果得出, $F_{\text{模型}} = 84.71$ , $P_{\text{模型}} < 0.0001^{***}$ ;  $F_{X_1} = 277.29$ , $P_{X_1} < 0.0001^{***}$ ;  $F_{X_2} = 160.03$ , $P_{X_2} < 0.0001^{***}$ ;  $F_{X_3} = 129.29$ , $P_{X_3} < 0.0001^{***}$ ;  $F_{X_4} = 14.74$ , $P_{X_4} = 0.0018^{**}$ ;  $F_{X_1X_2} = 0.67$ , $P_{X_1X_2} = 0.4271$ ;  $F_{X_1X_3} = 169.57$ , $P_{X_1X_3} < 0.0001^{***}$ ;  $F_{X_1X_4} = 133.59$ , $P_{X_1X_4} < 0.0001^{***}$ ;  $F_{X_2X_3} = 151.58$ , $P_{X_2X_3} < 0.0001^{***}$ ;  $F_{X_2X_4} = 1.07$ , $P_{X_2X_4} = 0.3191$ ;  $F_{X_3X_4} = 9.08$ , $P_{X_3X_4} = 0.0093^{**}$ ;  $F_{X_1^2} = 7.41$ , $P_{X_1^2} = 0.0165^*$ ;  $F_{X_2^2} = 120.40$ , $P_{X_2^2} < 0.0001^{***}$ ;  $F_{X_3^2} = 0.25$ , $P_{X_3^2} = 0.6263$ ;  $F_{X_4^2} = 1.74$ , $P_{X_4^2} = 0.2079$ ;  $F_{\text{失拟}} = 3.06$ , $P_{\text{失拟}} = 0.1464$ 。

表 3 Box-Benhnken 试验设计与结果  
Table 3 Design and results of Box-Benhnken experiment

试验号 Test No.	因素 Factors				直链淀粉含量(Y) Amylose content//%
	pH( $X_1$ )	温度( $X_2$ ) Temperature// $^{\circ}\text{C}$	酶添加量( $X_3$ ) Enzyme dosage// $\mu\text{g/g}$	时间( $X_4$ ) Time//min	
1	5.0	55	0.6	150	21.88
2	6.0	55	0.6	150	24.12
3	5.0	65	0.6	150	19.52
4	6.0	65	0.6	150	22.24
5	5.5	60	0.5	120	22.44
6	5.5	60	0.7	120	24.71
7	5.5	60	0.5	180	22.65
8	5.5	60	0.7	180	23.52
9	5.0	60	0.6	120	21.05
10	6.0	60	0.6	120	25.79
11	5.0	60	0.6	180	23.01
12	6.0	60	0.6	180	22.38
13	5.5	55	0.5	150	20.76
14	5.5	65	0.5	150	22.32
15	5.5	55	0.7	150	24.93
16	5.5	65	0.7	150	20.84
17	5.0	60	0.5	150	19.51
18	6.0	60	0.5	150	24.65
19	5.0	60	0.7	150	24.23
20	6.0	60	0.7	150	23.32
21	5.5	55	0.6	120	23.43
22	5.5	65	0.6	120	21.30
23	5.5	55	0.6	180	22.86
24	5.5	65	0.6	180	21.31
25	5.5	60	0.6	150	23.27
26	5.5	60	0.6	150	23.08
27	5.5	60	0.6	150	22.96
28	5.5	60	0.6	150	23.33
29	5.5	60	0.6	150	23.16

模型的  $F$  值为 84.71,  $P$  值小于 0.000 1, 说明该数学模型显著。而失拟项  $P = 0.146 4 > 0.05$ , 说明失拟项不显著, 相关系数 ( $R^2 = 0.988 3$ ) 较高, 表明有 98.83% 的数据可以用此方程解释。因此, 该方程拟合较好, 可以用此模型来预测米粉酶解工艺。由  $F$  值可以看出, 显著影响酶解的因素由大到小依次为 pH、酶解温度、复合酶添加总量和酶解时间。

**2.4 验证试验** 利用 Design Expert 8.0.6 软件对拟合后的回归方程进行求解, 得出最优酶解条件为: pH 为 5.93, 酶解温度为 55.87  $^{\circ}\text{C}$ , 酶总添加量为 0.69  $\mu\text{g/g}$ , 酶解时间 120.76 min, 直链淀粉含量可达到 26.36%。考虑实际操作, 将优化参数修正为: pH 为 5.9, 酶解温度为 56  $^{\circ}\text{C}$ , 酶总添加量为 0.70  $\mu\text{g/g}$ , 酶解时间 120 min。采用优化后的参数条件进行试验, 得到实际的直链淀粉含量为 26.28%, 与预测值基本相符, 而且得到的结果比任何一次单因素试验都好, 说明模型的适用性高, 以及利用响应面分析确定 2 种淀粉酶最佳复配条件具有可行性。

### 3 结论与讨论

该研究通过单因素试验和 Box-Benhnken 试验设计, 优化得到了复合酶解技术延缓米粉回生过程的工艺条件, 选取

$\alpha$ -淀粉酶和  $\beta$ -淀粉酶进行复配, 通过酶解 pH、酶作用温度、酶添加量及酶作用时间等条件进行分析, 结果表明, 在 pH 为 5.9, 酶解温度为 56  $^{\circ}\text{C}$ , 酶总添加量为 0.70  $\mu\text{g/g}$ , 酶解时间 120 min 的条件下, 直链淀粉含量提高至 26.28%, 经方差及回归方程分析得到各个条件及它们之间的交互作用对于米粉支链淀粉含量影响显著。因此, 通过响应面分析法优化的复合酶解技术抑制淀粉回生工艺条件可用于指导工业生产。

$\alpha$ -淀粉酶普遍分布在动物、植物和微生物中, 是一种重要的淀粉水解酶。它以随机作用方式切断淀粉、糖原、寡聚或多聚糖分子内的  $\alpha$ -1,4 葡萄糖苷键, 产生麦芽糖、低聚糖和葡萄糖等<sup>[14]</sup>。 $\alpha$ -淀粉酶来源稳定且价格便宜, 酶解效果佳, 是工业生产中应用广泛的酶制剂之一<sup>[15]</sup>。 $\beta$ -淀粉酶是一种外切型糖化酶, 作用于淀粉时, 能从  $\alpha$ -1,4 糖苷键的非还原性末端顺次切下 1 个麦芽糖单位, 生成麦芽糖及大分子的  $\beta$ -界限糊精<sup>[12]</sup>。从而通过切短支链淀粉外侧支链而抑制其回生, 且随着酶解度的增加回生抑制更加明显。因此  $\beta$ -淀粉酶在制备饴糖、啤酒、饮料等工业生产过程中被大量使用成糖化剂。该研究中所筛选出的 2 种酶均为易得稳定、

成本可控的加工原料,在大规模生产中都可很好地应用,因此,该研究所得到的加工条件具有可行性<sup>[16]</sup>。

当前国内外婴幼儿米粉加工企业,无论是采用辊筒干燥法或挤压膨化法,都存在一定的技术瓶颈,导致产品水溶速度慢、冲调性差,米粉冲调后质量低和口感差等一系列问题<sup>[17]</sup>。该研究运用酶解法在一定程度上改善了婴幼儿米粉产品的品质,但当前婴幼儿米粉仍然存在卫生学指标超标、营养强化剂添加不足、食用方便性和稳定性差等问题。由于米粉作为婴幼儿必要的谷物类辅助食品,具有很大的市场需求和发展前景。因此,研究更符合婴幼儿的生理及饮食特点,配方科学、营养全面、食用方便的新型高端米粉产品具有重要意义。只有对米粉加工过程进行更加详细和全面性的研究才能从根本上解决存在的诸多问题,促进米粉产业的快速发展。

### 参考文献

- [1] TADA Y, NAKASE M, ADACHI T, et al. Reduction of 14 - 16 kDa allergenic proteins in transgenic rice plants by antisense gene[J]. FEBS letters, 1996, 391(3): 341 - 345.
- [2] ERNST J, GROSS S. Types and methods for feeding infants[M]//POLIN R, FOX W. Fetal and neonatal physiology. Elsevier, Philadelphia, PA; 2001: 257 - 276.
- [3] 刘昊,曹燕. 酶在婴儿米粉生产中的应用及研究[J]. 生命科学仪器,

- 2011, 9(6): 38 - 40.
- [4] 孟祥艳. 淀粉老化机理及影响因素的研究[J]. 食品工程, 2007(2): 60 - 63.
- [5] 姚远, 丁霄霖. 米饭回生研究(III) 米饭回生抑制的原理与工艺[J]. 中国粮油学报, 2000, 15(1): 4 - 9.
- [6] 吴跃, 陈正行, 李晓喧. 抑制淀粉回生方法的研究现状和进展[J]. 食品工业科技, 2011(4): 423 - 427.
- [7] 童国林, 张晓丽, 景宣. 淀粉酶酶解处理改善表面施胶性能的研究[J]. 中华纸业, 2007, 28(12): 57 - 59.
- [8] 蔡丽华, 马美湖. 4种常用蛋白酶对牛骨蛋白的酶解动力学研究[J]. 食品科学, 2010, 31(5): 150 - 154.
- [9] 赵燕, 涂勇刚, 郭建军, 等. 玉米淀粉的 $\beta$ -淀粉酶酶解动力学研究[J]. 食品科学, 2009, 30(17): 190 - 194.
- [10] 郑宝东. 食品酶学[M]. 南京: 东南大学出版社, 2006: 88.
- [11] 郭卢云, 张渊. 中温 $\alpha$ -淀粉酶酶学性质的研究[J]. 饲料研究, 2011(5): 9 - 11.
- [12] 张剑, 林庭龙, 秦瑛, 等.  $\beta$ -淀粉酶研究进展[J]. 中国酿造, 2009(4): 5 - 8.
- [13] YAO Y, ZHANG J, DING X. Partial  $\beta$ -amylolysis retards starch retrogradation in rice products[J]. Journal of agricultural & food chemistry, 2003, 51(14): 4066 - 4071.
- [14] 罗志刚, 杨景峰, 罗发兴.  $\alpha$ -淀粉酶的性质及应用[J]. 食品研究与开发, 2007, 28(8): 163 - 167.
- [15] 徐婷, 孙天玮, 周海燕, 等.  $\alpha$ -淀粉酶水解魔芋飞粉最佳条件优化的研究[J]. 现代生物医学进展, 2008, 8(6): 1090 - 1092.
- [16] 靳纪培. 麦芽中 $\beta$ -淀粉酶的提取、纯化及应用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2009.
- [17] 高静丹, 陈洁, 王春, 等. 主干燥温度对米粉品质的影响[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2012, 33(6): 68 - 71.

(上接第56页)

菜时As含量不能超过50.0  $\mu\text{g/L}$ ,表明水体中As满足要求,部分流域Hg仍超标,故超标水体不能直接浇灌农作物,需经处理后方可使用。

### 3 结论

该研究采用PF6-2非色散原子荧光光度计同时测定地表水水样中Hg和As, A道测定Hg, B道测定As。选择1.0%  $\text{NaBH}_4$ 为还原剂, 5%  $\text{HNO}_3$ 为载液, 99.99% Ar为载气且流量为300 mL/min的测试条件, Hg和As浓度分别为0、0.2、0.4、0.6、0.8和1.0  $\mu\text{g/L}$ 的标准系列溶液经测定, Hg和As标准曲线的相关系数分别为0.999 9和0.999 5, 线性关系较好。检出限试验得到Hg和As检出限分别为0.02和0.01  $\mu\text{g/L}$ , 精密密度为0.59%和2.98%; Hg和As标准溶液的准确度测试以相对误差表征, 分别为0.125%和0.030%, 以相对标准偏差表征, 分别为0.284%和0.151%。10组水样6次测定相对标准偏差,  $RSD_{\text{Hg}} = 1.02\%$ ,  $RSD_{\text{As}} = 1.26\%$ ; Hg除1个水样属劣V类, 其他水样均属于IV类水质标准, As未超标符合I类水质标准; 流域周边通常遍布农田耕地, 参照

《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2005), 该水体部分流域不适用于农田作物灌溉。

### 参考文献

- [1] 王文忠. 紫外可见分光光度法测定水中微量汞[J]. 化工标准·计量·质量, 2002(8): 24 - 25.
- [2] 高峰, 贾永忠, 孙进贤, 等. Ag-DDC光度法测砷的研究[J]. 盐湖研究, 2010, 18(2): 22 - 25.
- [3] 王晓, 关淑霞. 萃取分离-偏振赛曼石墨炉原子吸收光谱法测定水中痕量汞[J]. 仪器仪表与分析监测, 2003(3): 10 - 11.
- [4] 马泓冰, 徐淑坤, 周焕英, 等. 砷和汞的顺序注射-蒸气发生原子吸收光谱测定[J]. 光谱学与光谱分析, 2000, 20(4): 529 - 532.
- [5] 邹勇平, 束琴霞, 周元元, 等. HG-AFS同时测定驱蚊水中的砷和汞[J]. 光谱实验室, 2012, 29(2): 861 - 864.
- [6] 李虹丽, 陈铁文, 张学梅, 等. HG-AFS测定西藏日多温泉水中砷的形态[J]. 化学研究与应用, 2013, 25(4): 584 - 587.
- [7] 戴骐, 林晓娜, 吴艳燕. ICP-AES法测定化妆品中铅、镉、砷、汞、锑、铬、镍、钡、锶等禁限用元素含量[J]. 分析实验室, 2012, 31(6): 54 - 57.
- [8] 陈凤玲, 陈金忠, 振瑞, 等. ICP-AES测定饮用水中5种重金属元素[J]. 光谱实验室, 2010, 27(3): 896 - 899.
- [9] 蒋梦. 液相色谱-原子荧光检测水中汞形态方法研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2011.
- [10] 叶发明, 张祥. 等离子体质谱法与原子荧光光谱法测食品中砷、汞、硒、锑的方法比对[J]. 粮油食品科技, 2016, 24(1): 77 - 80.
- [11] 陈贺, 周慧兰. 液液萃取-HPLC-ICPMS联用技术测定水体中甲基汞[J]. 中国环境监测, 2015, 31(2): 109 - 112.