

白芸豆 α -淀粉酶抑制剂在加工和消化过程中的活性变化研究

让一峰¹, 赵伟^{2,*}, 杨瑞金², 吴梨¹, 孟丹阳¹

(1. 食品科学与技术国家重点实验室, 江苏无锡 214122;

2. 江南大学食品学院, 江苏无锡 214122)

摘要: 本文研究了白芸豆 α -淀粉酶抑制剂 (α -AI) 在加工和消化过程中的活性变化。通过探究 α -AI 浓度、热、酸、碱以及模拟胃肠道环境对 α -AI 活性的影响来反映 α -AI 在加工和消化过程中的活性变化。 α -AI 对 α -淀粉酶的抑制作用在较低蛋白浓度 (< 6.00 mg/mL) 下呈剂量依赖关系, 在较高蛋白浓度 (> 6.00 mg/mL) 下随蛋白浓度的增大而略有增强。低于 60 $^{\circ}\text{C}$ 的热处理, α -AI 活性无显著变化 ($p > 0.05$), 高于 80 $^{\circ}\text{C}$ 时 α -AI 活性严重损失甚至丧失, 70 $^{\circ}\text{C}$ 时 α -AI 活性有所损失, 随着时间的延长活性损失增大; 酸碱处理 ($\text{pH} 3.0 \sim 10.0$) 会显著影响 α -AI 活性 ($p < 0.05$), 但其对 α -AI 活性造成的损失会随着时间的延长而减小。 α -AI 活性在消化过程中显著降低 ($p < 0.05$), 其活性损失主要在胃内; 低蛋白浓度 (< 8.00 mg/mL) 的 α -AI 在体内几乎失活, 高蛋白浓度 (> 10.00 mg/mL) 的 α -AI 可以较好地发挥生理作用。

关键词: α -淀粉酶抑制剂, 食品加工, 活性变化

Study on activity changes of α -amylase inhibitor from white kidney beans during processing and digestion

RANG Yi-feng¹, ZHAO Wei^{2,*}, YANG Rui-jin², WU Li¹, MENG Dan-yang¹

(1. State Key Laboratory of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

2. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Activity changes of α -amylase inhibitor (α -AI) from white kidney beans during processing and digestion were investigated, which were determined after α -AI of different concentrations were treated by heat, acid, alkali and simulating gastrointestinal environment. When α -AI was at lower concentrations (< 6.00 mg/mL), a dose-dependent relationship between the concentration and the activity of α -AI was observed, while α -AI activity increased slightly with the concentration when α -AI was at higher concentrations (> 6.00 mg/mL). Heat treatment under 60 $^{\circ}\text{C}$ had no significant influence on α -AI activity ($p > 0.05$). Heat treatment over 80 $^{\circ}\text{C}$ greatly damaged or even destroyed α -AI. Heat treatment at 70 $^{\circ}\text{C}$ caused an activity loss which increased with the extension of time. Acid and alkali treatment ($\text{pH} 3.0 \sim 10.0$) significantly affected the activity of α -AI ($p < 0.05$), the loss of the activity was decreased with the extension of time. During digestion, α -AI activity suffered from an enormous loss and stomach accounted for the majority of the loss. Low concentration (< 8.00 mg/mL) of α -AI was nearly inactivated. Nonetheless, high concentration (> 10.00 mg/mL) of α -AI could better perform its physiological functions.

Key words: α -amylase inhibitor; food processing; activity change

中图分类号: TS214.9

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2015)17-0053-05

doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2015.17.002

白芸豆 (white kidney beans) 是一种在世界范围内广泛种植的豆类作物, 其营养丰富, 是淀粉和蛋白质的良好来源, 同时也含有较多的膳食纤维、矿物质元素、维生素和多种不饱和脂肪酸^[1]。因此一直以来对

白芸豆的加工利用都有着较多的研究^[2-3]。自从 1945 年 Bowman^[4] 在白芸豆中发现了 α -淀粉酶抑制剂 (α -amylase inhibitor, α -AI) 以来, 科学工作者们又对其 α -AI 进行了大量的研究^[5]。如今, 白芸豆中

收稿日期: 2014-12-15

作者简介: 让一峰 (1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与配料, E-mail: 2652398018@qq.com。

* 通讯作者: 赵伟 (1982-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品加工, E-mail: zhaow@jiangnan.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31271977)。

的 α -AI因其生物安全性较高,生理活性较强,能通过特异性抑制人体肠道内的 α -淀粉酶来降低糖尿病人的餐后血糖高峰,故已将其作为保健食品进行了广泛应用^[6]。

随着社会经济的高速发展,我国糖尿病患者的人数也在逐年增多^[7],因而白芸豆中 α -AI在控制糖尿病方面的作用有着重大现实意义^[8]。然而,在白芸豆的加工利用中, α -AI一般会经历不同程度的热处理、酸碱处理等,这样无疑会影响到 α -AI的活性。因此,在白芸豆的加工利用中,尽可能的减少对 α -AI的破坏,不仅能够提高产品的附加值,而且有助于实现白芸豆资源的综合利用。

本文研究了白芸豆 α -AI在加工和消化过程中的活性变化,通过探究 α -AI浓度、热处理、酸碱处理和处理时间等因素对 α -AI活性的影响来反映 α -AI在加工过程中的活性变化,并通过模拟胃肠道处理的方法,对白芸豆中 α -AI在消化中的活性变化进行了研究,旨在为更好地实现白芸豆资源的综合利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

云南丽江白芸豆 市售。颗粒大小均一,干燥饱满,无病虫害和机械损伤。

猪胰 α -淀粉酶(PPA):标示酶活 30 units/mg;牛白蛋白;可溶性淀粉;3,5-二硝基水杨酸(DNS);Folin-酚试剂。所用试剂均为分析纯或化学纯。

UV-1100型紫外可见分光光度计 上海美谱达仪器有限公司;PK-820电热恒温水浴锅 上海精宏实验设备有限公司;MP-501A超级恒温循环槽 上海一恒科学仪器有限公司;DS-1高速组织捣碎机 上海标本模型厂;冷冻离心机 美国Beckman公司;精密pH计 METTLER TOLEDO。

1.2 实验方法

1.2.1 α -AI水提物的制备 取白芸豆100 g,用蒸馏水浸泡8 h后手工去皮,用高速组织捣碎机加水磨浆,过140目尼龙筛以除去粗纤维,将筛下物静置1 h使淀粉充分沉降^[9],所得上层清液于4℃,5000 r/min下离心20 min,过滤上清液,调节滤液pH至6.9后即得 α -AI水提物(蛋白浓度为48~53 mg/mL)。

1.2.2 α -AI浓度对 α -AI活性的影响 将蛋白浓度为50.00 mg/mL的 α -AI水提物用0.2 mol/L PBS(pH6.9)分别稀释至24.00、16.00、12.00、8.00、6.00、4.00、2.00、1.00、0.50、0.25 mg/mL后测定 α -AI水提物对 α -淀粉酶的抑制率。

1.2.3 热处理温度对 α -AI活性的影响 取蛋白浓

度为12.00 mg/mL的 α -AI水提物100 mL,分别在40、50、60、70、80、90、100℃的恒温水浴锅中搅拌处理20 min后,迅速流水冷却至室温,于5000 r/min下离心20 min,收集上清液,测定其对 α -淀粉酶的抑制率。

1.2.4 酸碱处理对 α -AI活性的影响 取蛋白浓度为12.00 mg/mL的 α -AI水提物100 mL,用1 mol/L HCl或1 mol/L NaOH将其pH于室温下分别调节至3.0、4.0、5.0、6.0、8.0、9.0、10.0并持续搅拌20 min,然后立即将pH调回至6.9,于5000 r/min下离心20 min,收集上清液,测定其对 α -淀粉酶的抑制率。

1.2.5 处理时间对 α -AI活性的影响 取蛋白浓度为12.00 mg/mL的 α -AI水提物200 mL,分别热处理和酸碱处理60 min,在处理过程中每15 min取样20 mL,迅速流水冷却至室温或调节pH至6.9后,于5000 r/min下离心20 min,收集上清液,测定其对 α -淀粉酶的抑制率。热处理温度采用70℃,酸碱处理的pH采用4.0和10.0。

1.2.6 胃肠道环境的模拟 取一定量的 α -AI水提物于37℃的酶反应器中并予以适当搅拌,待 α -AI水提物的温度升至37℃时,用1 mol/L HCl或1 mol/L NaOH将其调至pH2.0来模拟胃环境,调至pH8.2来模拟肠道环境^[10]。 α -AI水提物经模拟胃肠道环境处理一定时间后迅速流水冷却至室温,调节pH至6.9后,于5000 r/min下离心20 min,收集上清液,测定其对 α -淀粉酶的抑制率。

1.2.7 模拟胃肠道处理对不同蛋白浓度 α -AI活性的影响 将蛋白浓度为50.00 mg/mL的 α -AI水提物用0.2 mol/L PBS(pH6.9)分别稀释至20.00、16.00、12.00、10.00、8.00 mg/mL,经模拟胃肠道处理20 min后迅速流水冷却至室温,调节pH至6.9,于5000 r/min下离心20 min,收集上清液,测定其对 α -淀粉酶的抑制率。

1.2.8 蛋白浓度的测定 采用Lowry法^[11],以牛白蛋白为标准蛋白。

1.2.9 α -AI水提物对 α -淀粉酶抑制率的测定 参照Yang等的方法^[12]。将0.25 mL α -淀粉酶液(4 units/mL)和0.25 mL α -AI水提物加入到0.5 mL 0.2 mol/L PBS(pH6.9)中,于37℃水浴10 min后,加入1%可溶性淀粉溶液0.5 mL,精确反应5 min后加入1 mL DNS试剂,沸水浴10 min后迅速冷却,适当稀释后,在540 nm波长下测定吸光值。对照管中不加 α -淀粉酶液(以同体积PBS补足),其他与抑制剂管相同,其反应体系如表1所示。

α -AI水提物对 α -淀粉酶的抑制率可按式(1)

表1 α -淀粉酶抑制率测定体系

Table 1 Determination system for inhibition rate on α -amylase

项目	酶液(mL)	α -AI水提物(mL)	PBS(mL)	淀粉溶液(mL)	DNS(mL)
空白管	0.25	-	0.5	0.5	1
空白对照管	-	-	0.5	0.5	1
抑制管	0.25	0.25	0.5	0.5	1
背景对照管	-	0.25	0.5	0.5	1

计算:

$$\text{抑制率}(\%) = \left(1 - \frac{A_3 - A_4}{A_1 - A_2}\right) \times 100 \quad \text{式(1)}$$

式中 A_1 、 A_2 、 A_3 和 A_4 分别为 540 nm 下空白管、空白对照管、抑制管和背景对照管的吸光值。

1.2.10 数据处理方法 数据处理采用 SPSS17.0 软件进行 ANOVA 单因素方差分析及 Duncan's 多重检验 ($p < 0.05$)。

2 结果与讨论

2.1 α -AI 在加工过程中的活性变化

2.1.1 蛋白浓度对 α -AI 活性的影响 图 1 所示是不同蛋白浓度的 α -AI 水提取物对 α -淀粉酶的抑制曲线。当蛋白浓度在 0.25~6.00 mg/mL 时, α -AI 对 α -淀粉酶的抑制呈剂量依赖关系; 当蛋白浓度大于 6.00 mg/mL 时, 抑制率的增大趋势变得平缓。这与王斯慧等关于苦荞黄酮对 α -淀粉酶抑制活性的研究结果相一致^[13]。由于蛋白浓度为 12.00 mg/mL 的 α -AI 水提取物具有较高的抑制率且处于抑制率增长较为平缓的蛋白浓度区间, 故后续实验中 α -AI 水提取物的蛋白浓度选择 12.00 mg/mL。尽管本实验中所采用的 α -AI 水提取物不是 α -AI 纯品, 但由于其他物质的存在不会影响 α -AI 对 α -淀粉酶抑制率的测定^[14], 因此采用将 α -AI 水提取物从高蛋白浓度稀释到低蛋白浓度的方法, 可以很好地得到不同浓度的 α -AI, 进而探究出 α -AI 浓度对其抑制活性的影响。

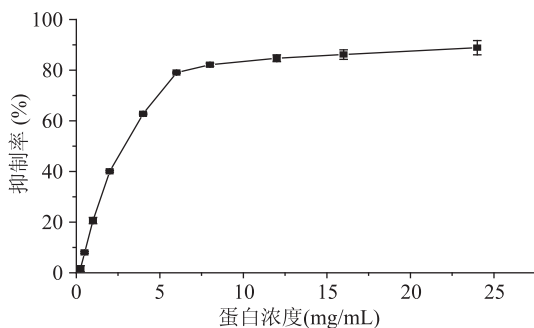


图1 蛋白浓度对 α -AI 活性的影响

Fig.1 Effect of protein concentration on α -AI activity

2.1.2 热处理温度对 α -AI 活性的影响 图 2 所示是经不同温度热处理 20 min 后的 α -AI 水提取物对 α -淀粉酶的抑制曲线。未经热处理的 α -AI 水提取物对 α -淀粉酶的抑制率为 81.15%。随着热处理温度的升高, α -AI 的抑制活性降低。当热处理温度低于 60 $^{\circ}\text{C}$ 时, α -AI 的活性变化不显著 ($p > 0.05$); 70 $^{\circ}\text{C}$ 热处理后, 抑制率为 73.61%, 抑制活性损失 9.29%, 活性变化显著 ($p < 0.05$); 当热处理温度高于 70 $^{\circ}\text{C}$ 时, 抑制活性迅速下降; 80 $^{\circ}\text{C}$ 热处理后, 抑制率为 26.36%, 抑制活性损失 67.52%; 热处理温度高于 90 $^{\circ}\text{C}$ 时, α -AI 完全失活。 α -AI 在较低温度下稳定而在较高温度下失活的特点, 也许与其蛋白质的本质有关^[5]。

2.1.3 酸碱处理对 α -AI 活性的影响 图 3 所示是经不同 pH 的酸碱处理 20 min 后的 α -AI 水提取物对 α -淀粉酶的抑制曲线。未经酸碱处理 (pH6.9) 的 α -AI 水提取物具有最高的抑制活性, 抑制率为

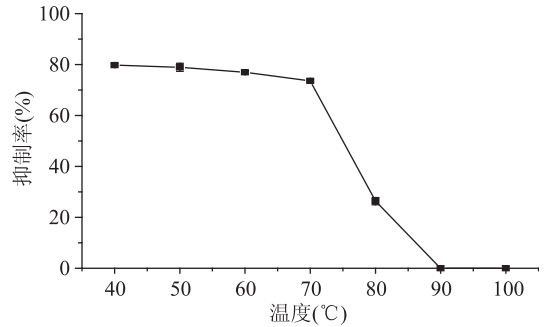


图2 热处理温度对 α -AI 活性的影响

Fig.2 Effect of temperature on α -AI activity

86.13%。在酸处理中, 随着 pH 的减小, 抑制活性迅速下降后趋于稳定, pH3.0 时, 抑制率为 53.89%, 抑制活性损失 37.43%。在碱处理中, 随着 pH 的增大, 抑制活性迅速下降。pH8.0 时, 抑制率为 62.05%, 抑制活性损失 28.03%。随着 pH 的继续增大, 抑制活性无显著变化 ($p > 0.05$)。由此可见, 酸碱处理对 α -AI 的活性有着显著影响。这与杨明琰等^[15]所得结论有所差异, 可能是因为在酸碱处理中采用了缓冲液并处理了较长时间 (4h)。本文采用 1 mol/L HCl 或 1 mol/L NaOH 进行酸碱处理, 与实际加工过程更为接近, 处理相对短的时间则更能准确的反映酸碱处理对 α -AI 的影响。由此可见, 在白芸豆的加工中, 采用 HCl 或 NaOH 调节 pH 时, α -AI 的活性有着严重损失。

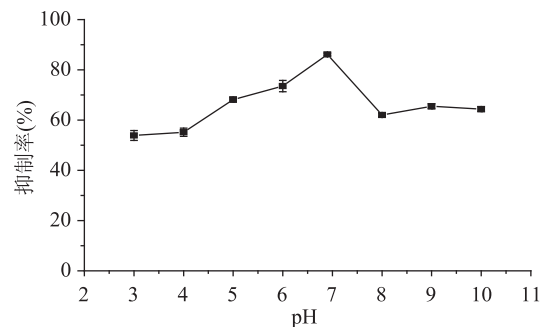


图3 酸碱处理对 α -AI 活性的影响

Fig.3 Effect of acid and alkali treatment

on α -AI activity

2.1.4 处理时间对 α -AI 活性的影响 图 4 所示是 70 $^{\circ}\text{C}$ 热处理和酸碱处理 (pH4.0, pH10.0) α -AI 水提取物 60 min 的过程中抑制活性随时间的变化曲线。经 70 $^{\circ}\text{C}$ 热处理和酸碱处理后 α -AI 的抑制活性均有所下降。在热处理初期 α -AI 的抑制活性迅速下降, 15 min 时 α -AI 的抑制率为 76.34%, 抑制活性损失 10.84%; 在 15~30 min 内抑制活性无显著变化 ($p > 0.05$)。在 30 min 后, α -AI 的抑制活性逐渐降低, 到 60 min 时, 70 $^{\circ}\text{C}$ 热处理组抑制率为 72.44%, 抑制活性损失 15.39%。在酸处理初期 α -AI 的抑制活性迅速降低, 在 15 min 时, α -AI 的抑制率为 64.61%, 抑制活性损失 26.47%; 随着时间的延长, 抑制活性显著回升 ($p < 0.05$), 在 30 min 时, α -AI 的抑制率为 76.82%, 抑制活性损失 12.58%; 30 min 后抑制活性缓慢升高, 到 60 min 时 α -AI 的抑制率为 80.99%, 抑

制活性损失为 7.83%。在碱处理初期 α -AI 的抑制活性变化与酸处理相比较为平缓,在 15 min 时, α -AI 的抑制率为 73.38%,抑制活性损失 15.64%;随着时间的延长,抑制活性缓慢回升,到 60 min 时, α -AI 的抑制率为 80.00%,抑制活性损失 8.02%。由此可见, α -AI 具有较好的热稳定性和 pH 稳定性,这与杨明琰等^[15]所得结论一致。结合图 3 和图 4 可知,随着时间的延长,热处理对 α -AI 活性造成的损失会不断增大,而酸碱处理对 α -AI 活性造成的损失会减小,这可能与 α -AI 在不同处理过程中的构象变化有关。因此在白芸豆的加工中,用 HCl 或 NaOH 调节 pH 后,维持适当的时间,有助于 α -AI 活性的恢复,当然这种做法也会不可避免地延长生产周期。

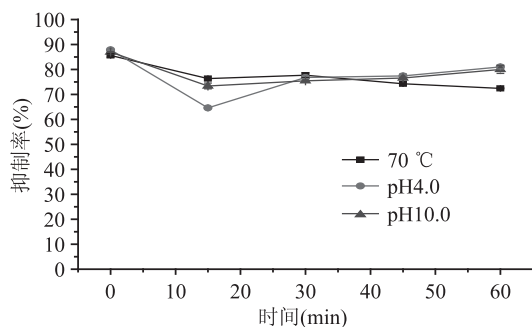


图4 处理时间对 α -AI 活性的影响

Fig.4 Effect of treatment time on α -AI activity

2.2 α -AI 在消化过程的活性变化

2.2.1 模拟胃肠道处理对不同蛋白浓度 α -AI 活性的影响 图 5 所示是蛋白浓度分别为 8.00、10.00、12.00、16.00、20.00 mg/mL 的 α -AI 水提物经模拟胃肠道处理 20 min 后对 α -淀粉酶的抑制活性损失曲线。未经模拟胃肠道处理时,其对 α -淀粉酶的抑制率分别为 82.15%、82.68%、84.72%、86.16%、87.49%。经模拟胃肠道处理后 α -AI 的抑制活性均有损失,而且变化规律一致。当蛋白浓度高于 10.00 mg/mL 时,抑制活性的损失随蛋白浓度的增加而缓慢减少,蛋白浓度为 10.00 mg/mL 时,在胃肠道中抑制活性损失率分别为 34.89% 和 44.42%;当蛋白浓度低于 10.00 mg/mL 时,抑制活性的损失随蛋白浓度的增加而迅速减少,蛋白浓度为 8.00 mg/mL 时,在胃肠道中抑制活性损失率分别为 88.94% 和 83.21%。由此可见, α -AI 的摄入量显著影响着 α -AI 在体内活性的变化,适当的 α -AI 摄入量是商业 α -AI 在人体内发挥降血糖作用的前提之一^[6]。

2.2.2 不同时间的模拟胃肠道处理对 α -AI 活性的影响 图 6 所示是模拟胃肠道处理 α -AI 水提物 120 min 的过程中 α -AI 抑制活性随时间的变化曲线。 α -AI 水提物的蛋白浓度为 12.00 mg/mL。经过胃肠道处理 120 min 后, α -AI 的抑制活性均显著降低 ($p < 0.05$)。在模拟胃处理初期,抑制活性迅速下降,在 15 min 时, α -AI 的抑制率为 64.83%,抑制活性损失 24.83%;在 15~60 min 内抑制活性无显著变化 ($p > 0.05$);在 60 min 后抑制活性再次迅速下降,至 120 min 时 α -AI 的抑制率为 52.55%,抑制活性损失 39.07%。在模拟肠道处理初期,抑制活性的变化

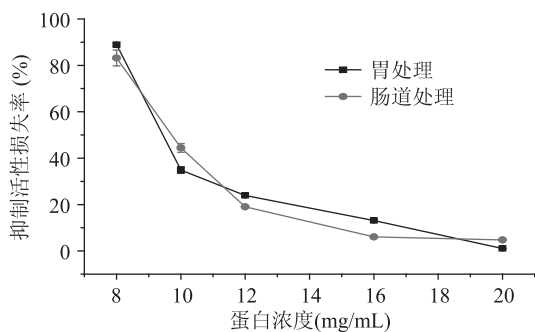


图5 模拟胃肠道处理对不同蛋白浓度 α -AI 活性的影响

Fig.5 Effect of simulating gastrointestinal treatment on α -AI activity of different protein concentrations

情况与模拟胃处理基本一致,但在 30 min 时抑制活性有所回升,并一直保持稳定,至 120 min 时 α -AI 的抑制率为 72.26%,抑制活性损失 16.50%。由于模拟胃处理的条件属于极端 pH,因而对 α -AI 造成的破坏难以恢复,这与图 4 所得结论并不矛盾。尽管胃肠道内存在着蛋白酶,但白芸豆中 α -AI 不受人体胃蛋白酶和胰蛋白酶的影响^[16],对生理量的胰凝乳蛋白酶的酶解也具有抗性^[17]。由此可见, α -AI 的活性在胃内有较大损失,如果能够开发出微胶囊化的 α -AI 产品,其生理效果可能会更为可靠^[18-19]。

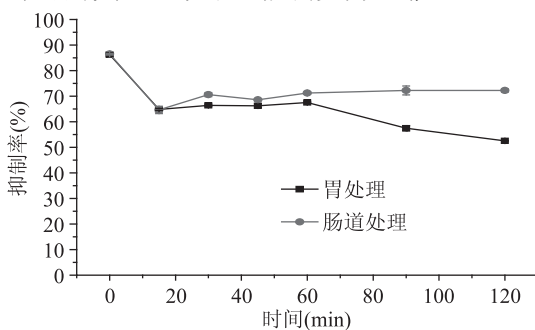


图6 不同时间的模拟胃肠道处理对 α -AI 活性的影响

Fig.6 Effect of simulating gastrointestinal treatment time on α -AI activity

2.2.3 经模拟胃处理后的 α -AI 在模拟肠道中的活性变化 图 7 所示是经模拟胃处理 2 h 后的 α -AI 水提物再经模拟肠道处理 120 min 的过程中 α -AI 抑制活性随时间的变化曲线。 α -AI 水提物的蛋白浓度为 12.00 mg/mL。经模拟肠道处理 120 min 后, α -AI 的抑制活性有所上升。在模拟肠道处理初期, α -AI 的抑制活性显著上升 ($p < 0.05$),在 30 min 时 α -AI 的抑制活性为 60.00%,抑制活性提高 10.68%,并一直保持稳定。由此可见,经胃处理后进入肠道的 α -AI,其活性可以很好地保持甚至略有增强。因此直接食用较高剂量的 α -AI 可以达到预期的生理效果,这与 M.A.Tormo 等的研究结论相一致^[20]。

3 结论

在白芸豆的加工利用中,经常会涉及到热、酸、碱等处理,同时也会考虑到原料用量、操作时间等有关生产成本的问题,这些都会影响到白芸豆中 α -AI 的活性,因此掌握白芸豆中 α -AI 在这些过程中的变化情况,可以更好地指导白芸豆的实际生产和应用。

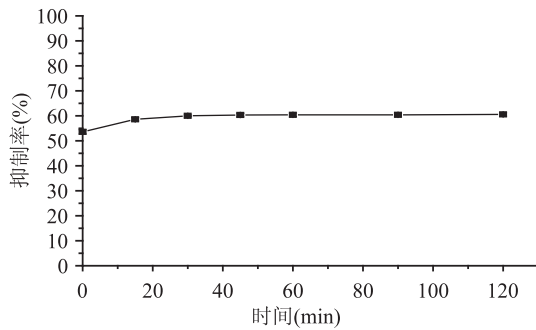


图7 经模拟胃处理后的 α -AI在模拟肠道中的活性变化

Fig.7 Activity changes of α -AI pretreated by simulating gastric in simulating intestine

本文通过研究 α -AI水提物经热处理、酸碱处理以及模拟胃肠道处理后的活性变化来反映白芸豆中 α -AI在加工和消化过程中的活性变化。 α -AI对 α -淀粉酶的抑制作用在较低的蛋白浓度(<6.00 mg/mL)下呈剂量依赖关系。高于 80 °C的热处理会使 α -AI活性严重损失甚至丧失, 70 °C时 α -AI活性有所损失,随着时间的延长活性损失增大。短时间(<30 min)的酸碱处理(pH3.0~10.0)会显著影响 α -AI的活性($p < 0.05$)。在消化过程中, α -AI的活性会显著降低($p < 0.05$),其活性损失主要在胃内,低蛋白浓度(<8.00 mg/mL)的 α -AI在体内几乎失活。高蛋白浓度(>10.00 mg/mL)的 α -AI可以较好地发挥生理作用。低于 60 °C的热处理不会显著影响 α -AI的活性($p > 0.05$)。较长时间(>30 min)的酸碱处理(pH3.0~10.0)对 α -AI活性的影响较小。因此,本文的研究可以很好地为白芸豆的加工利用提供借鉴,有利于白芸豆资源的综合利用。

参考文献

[1] Du S K, Jiang H X, Ai Y F, et al. Physicochemical properties and digestibility of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) starches [J]. Carbohydrate Polymers, 2014, 108: 200-205.
 [2] 杜双奎, 王华, 聂丽洁. 芸豆淀粉理化特性研究[J]. 中国粮油学报, 2012, 27(8): 31-35.
 [3] David B A, Teresita S E, Jorge R R, et al. Enzymatic hydrolysis of hard-to-cook bean (*Phaseolus vulgaris* L.) protein concentrates and its effects on biological and functional properties [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2014, 49: 2-8.
 [4] Bowman D E. Amylase inhibitor of navy beans [J]. Science, 1945, 102(2649): 358-359.
 [5] Obiro W C, Zhang T, Jiang B. The nutraceutical role of the *Phaseolus vulgaris* α -amylase inhibitor [J]. British Journal of Nutrition, 2008, 100: 1-12.
 [6] Lajolo F M, Genovese M I. Nutritional Significance of Lectins

and Enzyme Inhibitors from Legumes [J]. Journal of Agriculture and Food Chemistry, 2002, 50: 6592-6598.

[7] Chen X P, Yang W Y. Epidemic trend of diabetes in China [J]. Journal of Diabetes Investigation, 2014, 5(5): 478-481.

[8] Carlson G L, Li B U K, Bass P, et al. A bean α -amylase inhibitor formulation (Starch Blocher) is ineffective in man [J]. Science, 1983, 219(4583): 393-395.

[9] Singh N, Kaur M, Sandhu K S, et al. Physicochemical, thermal, morphological and pasting properties of starches from some Indian black gram (*Phaseolus mungo* L.) cultivars [J]. Starch, 2004, 56: 535-544.

[10] 崔玉敏, 张炳然, 袁勤生. SOD在模拟小鼠胃肠道环境中的稳定性研究[J]. 中国生化药物杂志, 1994, 15(2): 82-84.

[11] Lowry O H, Rosebrough N J, Farr A L, et al. Protein measurement with the Folin phenol reagent [J]. The Journal of biological chemistry, 1951, 193: 265-275.

[12] Yang M Y, Zhang X Q, Ma Y, et al. Purification and partial characterization of a glycoprotein α -amylase inhibitor from white kidney bean (*Phaseolus vulgaris* L.) [J]. Journal of Food Biochemistry, 2008, 32: 72-84.

[13] Marshall J J, Lauda C M. Purification and properties of phaseolamin, an inhibitor of α -amylase, from the kidney bean, *Phaseolus vulgaris* [J]. The Journal of Biological Chemistry, 1975, 250: 8030-8037.

[14] 王斯慧, 白银花, 黄琬凌, 等. 苦荞黄酮对 α -淀粉酶的抑制作用研究[J]. 食品工业, 2012(3): 109-111.

[15] 杨明球, 宋纪蓉, 张晓琦, 等. 白豆 α -淀粉酶抑制剂糖蛋白的提纯及性质研究[J]. 西北大学学报, 2007, 37(5): 753-757.

[16] Kotatu M, Yeh H Y, Yoshikawa H, et al. Activity changes in cranberry bean (*Phaseolus vulgaris*) α -amylase inhibitor by chemical modification and enzymatic digestion [J]. J Nutr Sci Vitaminol, 1989, 35: 71-80.

[17] Gibbs B F, Alli I. Characterization of a purified α -amylase inhibitor from white kidney beans (*Phaseolus vulgaris*) [J]. Food Res Int, 1998, 31: 217-225.

[18] Wang H H, Chen C L, Jeng T L, et al. Comparisons of α -amylase inhibitors from seeds of common bean mutants extracted through three phase partitioning [J]. Food Chemistry, 2011, 128: 1066-1071.

[19] Mosca M, Boniglia C, Carratu B, et al. Determination of α -amylase inhibitor activity of phaseolamin from kidney bean (*Phaseolus vulgaris*) in dietary supplements by HPAEC-PAD [J]. Analytica Chimica Acta, 2008, 617: 192-195.

[20] Tormo M A, Gil-Exojo I, Tejada A R, et al. Hypoglycaemic and anorexigenic activities of an α -amylase inhibitor from white kidney beans (*Phaseolus vulgaris*) in Wistar rats [J]. British Journal of Nutrition, 2004, 92: 785-790.

(上接第52页)

[14] Helena C F Carneiro, Renata V Tonon, et al. Encapsulation efficiency and oxidative stability of flaxseed oil microencapsulated by spray drying using different combinations of wall materials [J]. Journal of Food Engineering, 2013, 115(4): 443-451.

[15] 程宇. 马铃薯蛋白水解物在水包油乳状液中的抗氧化作用及机理研究[D]. 无锡: 江南大学, 2010.

[16] 杨晓慧. 喷雾干燥制备非全氢化植物油咖啡伴侣粉末油脂的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2013.