

张俊, 张三杉, 叶丹, 等. 发芽对高粱氨基酸及抗营养因子含量的影响 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(1): 87-92. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021030365

ZHANG Jun, ZHANG Sanshan, YE Dan, et al. Effects of Germination on the Content of Amino Acids and Anti-nutritional Factors of Sorghum Grain[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(1): 87-92. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021030365

发芽对高粱氨基酸及抗营养因子含量的影响

张俊¹, 张三杉¹, 叶丹², 余梦玲¹, 雷激^{1,*}

(1. 西华大学食品与生物工程学院, 四川成都 610039;

2. 四川天味食品集团股份有限公司, 四川成都 610200)

摘要:为改善高粱营养品质, 拓宽其在食品工业中的应用, 本实验以白高粱为原料进行发芽, 探讨高粱发芽过程中氨基酸组成、 γ -氨基丁酸 (γ -aminobutyric acid, GABA) 含量、谷氨酸脱羧酶 (glutamic acid decarboxylase, GAD) 活性、植酸酶活性、植酸及单宁含量的变化规律。结果表明: 随着发芽时间延长, 高粱氨基酸总量显著增加, 60 h 达到最大值为 5.694 g/100 g, 相较未发芽高粱增加了 28.50%; 赖氨酸含量在发芽 72 h 达到最大值为 0.157 g/100 g, 增加了 21.71%; GAD 活性增强, GABA 含量增加, 60 h 达到最大值为 19.026 mg/100 g, 增加到 5 倍; 植酸酶活性同样随着发芽时间的延长不断增强, 促使植酸发生降解, 植酸含量从 94.85 mg/100 g 下降到 52.44 mg/100 g, 降低了 44.71%; 单宁含量从 1.07% 降到 0.14%, 下降了 86.92%。综上所述, 发芽可显著提高高粱营养成分, 降低抗营养因子含量, 提升了高粱的营养价值。

关键词:高粱, 发芽, 氨基酸, γ -氨基丁酸, 植酸, 单宁

中图分类号: TS210.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)01-0087-06

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021030365

本文网刊:



Effects of Germination on the Content of Amino Acids and Anti-nutritional Factors of Sorghum Grain

ZHANG Jun¹, ZHANG Sanshan¹, YE Dan², YU Mengling¹, LEI Ji^{1,*}

(1. School of Food and Bioengineering, Xihua University, Chengdu 610039, China;

2. Sichuan Teway Food Group Co., Ltd., Chengdu 610200, China)

Abstract: To improve the nutritional quality of sorghum and broaden its application in food industry, white sorghum grain was used as raw material for germination, and the changes of amino acid composition, γ -aminobutyric acid (GABA) content, glutamic acid decarboxylase (GAD) activity, phytase activity, phytic acid and tannin content during sorghum germination were explored. The results showed that with the prolonging of germination time, the total amount of amino acids of sorghum increased significantly, reaching the maximum value of 5.694 g/100 g at 60 h, which increased 28.50%; the content of lysine reached the maximum value of 0.157 g/100 g at 72 h after germination, increased by 21.71%; GAD activity was enhanced, and GABA content was increased, reaching the maximum value of 19.026 mg/100 g at 60 h, which increased nearly 5 times; The phytase activity also increased with the prolonging of germination time, which promoted the degradation of phytic acid, and the phytic acid content decreased from 94.85 mg/100 g to 52.44 mg/100 g, decreased by 44.71%; the tannin content decrease from 1.07% to 0.14%, decreased by 86.92%. In summary, germination can significantly increase the nutritional composition of sorghum and reduce the content of anti-nutritional factors to enhance the nutritional value of sorghum.

Key words: sorghum; germination; amino acid; γ -aminobutyric acid; phytic acid; tannin

高粱, 又称蜀黍, 属高粱科, 一年生草本植物, 自古以来就有“五谷之精”、“百谷之长”的盛誉, 是世界

上产量仅次于稻米、小麦、玉米及大麦的第五大粮食作物^[1], 在非洲、亚洲等国家和地区, 除用作酿造原料

收稿日期: 2021-03-30

基金项目: 四川省科技厅国际合作项目 (2020YFH0157); 四川省科技厅重点研发项目 (2019YFN0050)。

作者简介: 张俊 (1995-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品营养与安全, E-mail: 2514396067@qq.com。

* 通信作者: 雷激 (1966-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 食品营养学, E-mail: 121175698@qq.com。

或饲料外,也作为主食。但高粱蛋白质品质较差,缺乏赖氨酸;抗营养因子单宁和植酸含量较高,植酸可与钙、锌、铁、镁等矿物质结合,形成肌醇六磷酸,导致矿物质无法吸收^[2];单宁与体内消化酶结合,影响蛋白、淀粉的消化吸收^[3-4],不仅降低了高粱的营养价值,也降低了高粱的适口性,使得高粱在食品方面的加工应用受到限制。因此,需要采取适当方法改善其品质。国内外许多研究^[5-7]表明,籽粒发芽可以降低谷物中抗营养物质含量,提高谷物中某些氨基酸、 γ -氨基丁酸(γ -aminobutyric acid, GABA)和维生素等营养物质的含量,促进人体对蛋白质和淀粉的消化吸收,从而提高其营养价值。

GABA 是一种非蛋白质氨基酸,广泛分布于各种谷物和豆类中。它可以通过调节中枢神经系统,起到降低血压、舒缓血管的作用,同时具有镇静神经、调节心情、改善睡眠的作用^[8-9];在医学上,GABA 还能用于治疗癫痫^[10]、保护肝脏^[11]等。目前,以富含 GABA 的发芽糙米、大豆和蚕豆等为原料开发的产品已经面市,而国内关于发芽高粱中 GABA 以及抗营养因子含量变化的研究相对较少。因此,本实验主要研究高粱发芽期间营养成分与抗营养因子含量的变化规律,为改善高粱营养价值以及促进高粱在食品工业方面的发展提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

白高粱种子 产自江苏省沭阳县新河镇,市售;盐酸(浓度 $\geq 36\%$)、柠檬酸钠 优级纯,购于成都科隆化学品有限公司;氢氧化钠、三氯化铁、磺基水杨酸、二甲基甲酰胺、谷氨酸(glutamic acid, GA) 分析纯,购于成都科隆化学品有限公司;GABA 标准品、氨基酸混合溶液标准品、植酸钠标准品、单宁酸标准品 购于北京世纪奥科生物技术有限公司。

UV-2600 型紫外分光光度计 上海谱元仪器有限公司;L-8900 型全自动氨基酸分析仪 日本日立公司;TG-5M 型台式离心机 四川蜀科仪器有限公司;TB-214 电子天平 北京赛多利斯仪器系统有限公司;BZF 型真空干燥箱 上海博迅实业有限公司;MD200-2 型氮吹仪 成都世纪方舟科技有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 发芽高粱的制备 参考易翠平等^[12]的高粱发芽实验:挑选高粱籽粒,确保没有破损颗粒和其它杂质。将浸泡 20 h 后的高粱用 7.0% 的 H_2O_2 溶液消毒 15 min,再用去离子水反复冲洗。然后将高粱籽粒平铺于双层纱布之间,于 30 °C 条件下避光发芽 0、12、24、36、48、60、72 h,每隔 12 h 洒水一次,并清洗纱布和高粱籽粒防止发霉。将不同发芽阶段的高粱籽粒取出后于 40 °C 干燥至水分含量约为 13%,粉碎过 120 目筛,放入 4 °C 冰箱冷藏保存、备用。

1.2.2 淀粉含量的测定 按照国标 GB 5009.9-2016

《食品中淀粉的测定》进行测定。

1.2.3 氨基酸和 γ -氨基丁酸(GABA)含量的测定 按照国标 GB 5009.124-2016《食品中氨基酸的测定》进行测定。

1.2.4 谷氨酸脱羧酶(GAD)活性的测定 在 Maha^[13]和曹晶晶等^[14]的方法基础上作适当调整,取 1 g 发芽高粱与 5 mL 磷酸钾缓冲液(0.05 mol/L, pH7.2)混合,10000 r/min 离心 20 min,上清液为粗酶提取液。取 0.5 mL 粗酶液,加入 200 μ L 底物溶液(50 mmol/L GA)和 1.8 mL 磷酸钾缓冲液(0.05 mol/L, pH5.8),于 37 °C 反应 1 h 后,90 °C 水浴 10 min 反应灭酶,离心,取 1 mL 反应液氮吹干燥。加入 5 mL 0.02 mol/L 盐酸溶液溶解干燥物,按照 1.2.3 方法测定 GABA 含量。GAD 活性定义:在 37 °C 下,1 g 高粱每分钟释放 1 μ mol GABA 作为一个酶活力单位,即 GAD 活力为 1 U。

1.2.5 单宁含量的测定 按照 GB/T15686-2008《高粱:单宁含量的测定》进行测定。

1.2.6 植酸含量及植酸酶活性的测定 植酸含量按照 GB5009.153-2016《食品中植酸的测定》进行测定;植酸酶活性按照 GB/T 18634-2009《饲用植酸酶活性的测定-分光光度法》进行测定。

1.3 统计分析

每个处理组进行 3 次重复,所有实验数据用 Excel 2010 分析处理,利用 Origin 8.5 作图,通过 SPSS 19.0 进行显著性检验($P < 0.05$),结果以均值 $\pm$ 标准差表示。

2 结果与分析

2.1 高粱发芽过程中淀粉含量的变化

如图 1 所示,与未发芽高粱相比,浸泡处理(0 h)对淀粉含量无显著影响($P > 0.05$)。随着发芽时间的延长,高粱淀粉含量显著下降($P < 0.05$)。发芽 72 h 后,从 72.74% 下降到 54.44%,这与 Li 等^[15]的研究结果相似。这是因为随着发芽时间的延长,高粱中淀粉酶活性增加,这些酶的作用使淀粉降解成还原糖,以满足种子萌发和生长的物质和能量的需要^[16]。

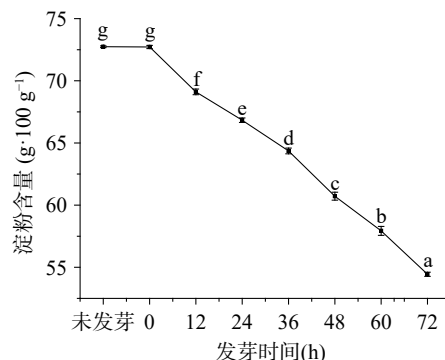


图1 高粱发芽过程中淀粉含量的变化
Fig.1 Changes in starch content of sorghum during germination

注:发芽 0 h 是经过浸泡处理而未发芽的高粱;不同字母表示同一曲线数值之间差异显著($P < 0.05$);图 2~图 4 同。

2.2 高粱发芽过程中氨基酸含量的变化

由表 1 可知, 不同发芽时间处理后高粱的氨基酸含量发生了很大的变化。与未发芽高粱相比, 发芽处理后氨基酸总量显著($P<0.05$)增加, 在发芽 60 h 达到最大值为 5.694 g/100 g, 比未发芽上升 28.50%, 各种氨基酸含量也都有不同程度的增加, 这与易翠平等^[12]的研究结果相似。必需氨基酸的类型和数量可以评估食物蛋白的营养价值, 随着发芽时间的延长, 必需氨基酸总量显著($P<0.05$)增加, 在发芽 60 h 达到最大值为 2.056 g/100 g, 比未发芽上升 28.42%; 每一种必需氨基酸含量增长情况有所不同, 在发芽 48 h, 苯丙氨酸、蛋氨酸、苏氨酸、异亮氨酸含量达到最大值, 与未发芽相比分别增加了 32.84%、65.12%、33.33%、29.19%; 亮氨酸和缬氨酸分别在发芽 60、72 h 达到最大值, 与未发芽相比分别增加了 40.42%、26.00%; 第一限制氨基酸赖氨酸含量也在发芽 72 h 达到最大值, 由未发芽的 0.129 g/100 g 增加到 0.157 g/100 g, 增加了 21.71%; 而必需氨基酸在氨基酸总量中所占比重在 48 h 最大, 占比 37.24%。另外, 谷氨酸是合成 GABA 的底物, 对 GABA 含量有重要影响, 随着发芽时间的延长, 谷氨酸含量显著增加, 在发芽 60 h 达到最大值 1.423 g/100 g, 增加了 37.62%, 之后有所下降, 发芽至 72 h 含量降至 1.311 g/100 g, 这可能是限制 GABA 合成的因素之一^[17]。其下降原因可能是发芽后期高粱呼吸强度增大, 干物质消耗量加剧, 各种氨基酸消耗量增加^[14], 这也是后期氨基酸总量下降

的原因。综上所述, 发芽处理对改善高粱营养价值以及在食品中的应用具有积极的意义。

2.3 高粱发芽过程中 GABA 含量和 GAD 活性的变化

GABA 是一种非蛋白氨基酸, 具有许多生理功效, 主要是由谷氨酸脱羧反应形成的^[5]。由图 2 可知, 随着发芽时间的延长, 高粱中 GABA 含量呈先升高后降低的趋势, 60 h 时 GABA 含量最高, 从未发芽的 4.005 mg/100 g 增加到 19.026 mg/100 g, 增加到近 5 倍, 与 Yang 等^[18]的研究结果基本一致。高等植物 GABA 的合成主要由 GAD 和 GABA 转氨酶 (GABA transaminase, GABA-T) 调控^[19]。GAD 是 GABA 合成的限速酶, 对 GABA 的含量有直接影响。在发芽开始时, 稻谷体内的 GAD 被激活, 随着时间的延长, GAD 活性开始增强, 发芽至 60 h 时 GAD 活性最高, 为 8.139 U/100 g, 在这个过程中 GABA 开始大量生成、积累; GABA 增加的另一个原因可能是发芽过程中由于高粱籽粒中的营养素溶于水后通过生化反应发生降解, 导致可溶性含氮化合物 (如 GABA) 的积累^[20]。发芽 60 h 后, GAD 活性和 GABA 含量都有所下降, 这是因为 GAD 活性受谷氨酸的调节。GAD 定位于细胞质中, 其活性受细胞环境中 Ca^{2+} 调节^[21], 而谷氨酸可以通过改变细胞质中 Ca^{2+} 浓度来影响 GAD 活性^[22], 因此谷氨酸含量的变化会对 GAD 活性产生一定影响。结合表 1 可知, 随着发芽时间延长, 谷氨酸含量不断增加, GAD 活性增加; 60 h 后谷氨酸含量有所下降, GAD 活性

表 1 发芽高粱氨基酸含量变化
Table 1 Changes in amino acid content of germinated sorghum

氨基酸含量(g/100 g)	发芽时间(h)							
	未发芽	0	12	24	36	48	60	72
天门冬氨酸Asp	0.408±0.009 ^c	0.361±0.011 ^a	0.403±0.005 ^c	0.377±0.002 ^b	0.445±0.002 ^c	0.439±0.004 ^c	0.422±0.003 ^d	0.550±0.003 ^f
苏氨酸Thr	0.051±0.003 ^c	0.045±0.004 ^b	0.038±0.001 ^a	0.051±0.001 ^c	0.049±0.004 ^c	0.068±0.004 ^c	0.056±0.002 ^d	0.046±0.005 ^b
丝氨酸Ser	0.015±0.001 ^{ef}	0.010±0.001 ^c	0.007±0.000 ^a	0.014±0.001 ^c	0.011±0.002 ^d	0.016±0.002 ^f	0.015±0.001 ^{ef}	0.009±0.001 ^b
谷氨酸Glu	1.034±0.002 ^a	1.135±0.007 ^b	1.141±0.003 ^b	1.169±0.004 ^c	1.211±0.002 ^d	1.238±0.008 ^e	1.423±0.006 ^g	1.311±0.007 ^f
脯氨酸Pro	0.396±0.003 ^b	0.370±0.004 ^a	0.418±0.004 ^c	0.415±0.004 ^c	0.416±0.002 ^c	0.474±0.003 ^e	0.507±0.002 ^f	0.458±0.007 ^d
甘氨酸Gly	0.173±0.004 ^a	0.185±0.005 ^b	0.190±0.002 ^c	0.181±0.001 ^b	0.190±0.005 ^c	0.199±0.004 ^d	0.190±0.002 ^c	0.210±0.001 ^e
丙氨酸Ala	0.444±0.002 ^a	0.485±0.005 ^b	0.493±0.002 ^c	0.503±0.001 ^d	0.517±0.001 ^e	0.568±0.003 ^f	0.602±0.001 ^g	0.569±0.003 ^f
半胱氨酸Cys	0.004±0.000 ^a	0.005±0.000 ^b	0.007±0.000 ^d	0.006±0.000 ^c	0.006±0.000 ^c	0.008±0.000 ^e	0.007±0.000 ^d	0.008±0.000 ^e
缬氨酸Val	0.300±0.001 ^a	0.311±0.001 ^b	0.325±0.003 ^d	0.320±0.004 ^c	0.338±0.002 ^c	0.360±0.003 ^f	0.366±0.001 ^g	0.378±0.003 ^h
蛋氨酸Met	0.043±0.001 ^a	0.054±0.005 ^c	0.052±0.001 ^b	0.052±0.001 ^b	0.069±0.002 ^c	0.071±0.000 ^f	0.059±0.001 ^d	0.057±0.001 ^c
异亮氨酸Ile	0.184±0.001 ^a	0.184±0.005 ^a	0.187±0.002 ^b	0.195±0.002 ^c	0.204±0.001 ^d	0.238±0.002 ^g	0.226±0.005 ^f	0.222±0.001 ^e
亮氨酸Leu	0.626±0.004 ^a	0.688±0.003 ^b	0.695±0.004 ^c	0.715±0.005 ^d	0.743±0.002 ^e	0.820±0.002 ^g	0.879±0.001 ^h	0.808±0.003 ^f
酪氨酸Tyr	0.087±0.003 ^a	0.160±0.001 ^d	0.147±0.002 ^c	0.133±0.001 ^b	0.177±0.001 ^f	0.166±0.003 ^e	0.134±0.001 ^b	0.176±0.001 ^f
苯丙氨酸Phe	0.268±0.003 ^a	0.277±0.002 ^b	0.288±0.003 ^c	0.287±0.001 ^c	0.303±0.003 ^d	0.356±0.002 ^g	0.342±0.002 ^f	0.332±0.003 ^e
赖氨酸Lys	0.129±0.002 ^a	0.135±0.002 ^c	0.143±0.001 ^e	0.132±0.001 ^b	0.136±0.000 ^c	0.138±0.001 ^d	0.132±0.001 ^b	0.157±0.001 ^f
组氨酸His	0.117±0.001 ^a	0.121±0.003 ^b	0.125±0.001 ^c	0.122±0.000 ^b	0.128±0.002 ^d	0.146±0.001 ^g	0.136±0.002 ^e	0.142±0.003 ^f
精氨酸Arg	0.151±0.002 ^a	0.207±0.001 ^h	0.181±0.001 ^c	0.177±0.001 ^b	0.185±0.002 ^d	0.202±0.001 ^g	0.198±0.003 ^f	0.192±0.003 ^e
必需氨基酸总量	1.601±0.007 ^a	1.696±0.003 ^b	1.728±0.006 ^c	1.752±0.008 ^d	1.843±0.004 ^e	2.052±0.003 ^g	2.056±0.002 ^g	2.000±0.008 ^f
氨基酸总量	4.431±0.036 ^a	4.734±0.011 ^b	4.840±0.023 ^c	4.848±0.026 ^d	5.128±0.015 ^e	5.507±0.008 ^f	5.694±0.010 ^h	5.624±0.031 ^g

必需氨基酸/总氨基酸 0.3613±0.0002^c 0.3582±0.0004^e 0.3571±0.0002^b 0.3614±0.0005^c 0.3593±0.0001^d 0.3724±0.0004^f 0.3612±0.0001^e 0.3555±0.0003^a
注: 不同字母表示同行数值之间差异显著($P<0.05$)。

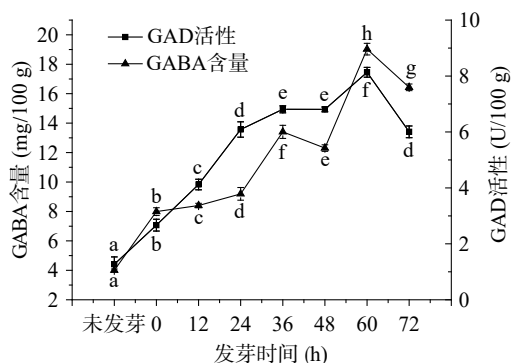


图2 高粱发芽过程中 GABA 含量和 GAD 活性的变化

Fig.2 Changes in GABA content and GAD activity of sorghum during germination

降低。谷氨酸含量的下降使得以其为底物形成的 GABA 含量也有所下降。另外, 60 h 后 GABA 含量下降也可能是因为 GABA 被 GABA-T 催化转换为琥珀酸半醛进入三羧酸循环^[23]。

2.4 高粱发芽过程中单宁含量的变化

单宁, 可与蛋白质作用生成难消化的高分子沉淀物质, 具有较强的苦涩味^[24]; 过量摄入单宁会使消化酶活力降低, 从而影响人体对蛋白质的消化率和生物价^[25]; 同时会影响脂肪酶、胰蛋白酶以及 α -糖化酶等的功能作用^[26]。如图 2 所示, 发芽处理后高粱中单宁含量显著 ($P<0.05$) 下降, 发芽至 72 h, 单宁含量从 1.07% 降到 0.14%, 下降了 86.92%。这与 Claver 等^[27] 的研究结果一致。高粱单宁可溶于水, 浸泡 (0 h) 处理使单宁部分扩散到水中, 含量有所下降; 发芽过程中, 单宁含量继续下降, 这可能与高粱中醇溶蛋白的结构变化有关, 发芽处理后, 醇溶蛋白表面可能已经暴露出新位点, 可促进单宁与醇溶蛋白单体之间的相互作用^[28]; 除此之外, 单宁属于多酚类化合物, 其含量降低可能是发芽过程中多酚氧化酶活性增加所致^[29]。

2.5 高粱发芽过程中植酸含量和植酸酶活性的变化

植酸, 化学名为肌醇六磷酸酯, 是谷类、豆类中磷的主要存在形式, 可与 Zn^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Fe^{2+} 等多种矿物质元素结合形成难溶性的植酸盐络合物, 从而很难被人体吸收^[2]; 还可与蛋白质生成复合物, 影响蛋白质的生理功能, 或与酶结合, 抑制其活性^[30]。因此被看作是一种抗营养因子。由图 3 可知, 浸泡 (发芽 0 h) 处理后, 植酸含量下降幅度较大, 这可能是因为浸泡过程中植酸扩散到浸泡介质中^[29]; 随着发芽时间的延长, 植酸含量持续下降, 从 94.85 mg/100 g 下降到 52.44 mg/100 g, 下降了 44.71%。这是因为当种子吸水开始发芽后, 植酸酶活性被激发, 植酸盐水解并释放出无机磷以供作物生长; 随着发芽时间延长, 植酸酶活性不断增加, 由未发芽的 28.88 U/g 增加到 36.52 U/g, 这与丁俊胃等^[31] 对发芽糙米的研究结果相似。

3 结论

本研究探讨了发芽过程中高粱营养成分以及抗

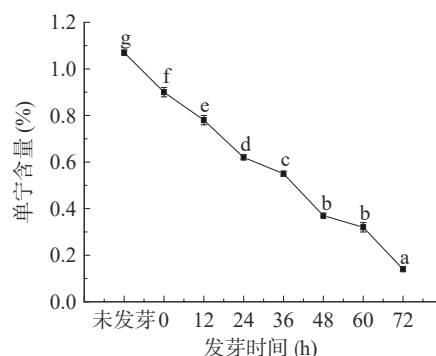


图3 高粱发芽过程中单宁含量的变化

Fig.3 Changes in tannin content of sorghum during germination

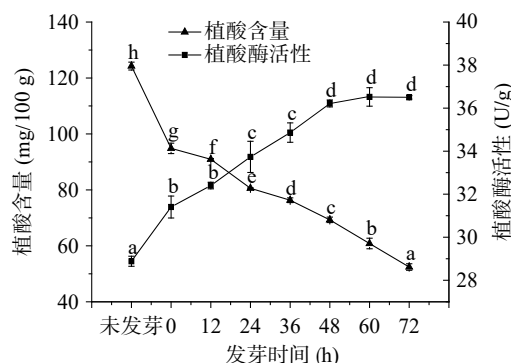


图4 高粱发芽过程中植酸含量和植酸酶活性的变化

Fig.4 Changes of phytic acid content and phytase activity of sorghum during germination

营养因子的变化规律, 结果表明: 随着发芽时间的延长, 氨基酸总量显著增加, 60 h 达到最大值, 各种氨基酸含量均有不同程度的增加 ($P<0.05$), 其中第一限制氨基酸赖氨酸含量增加了 21.71%; GAD 酶活性和 GABA 含量均比未发芽时显著增加 ($P<0.05$), 发芽至 60 h GAD 酶活性最强, GABA 含量最高; 植酸酶活性增强, 单宁和植酸含量在发芽过程中始终呈下降趋势 ($P<0.05$)。综上所述, 发芽在一定程度上能够提高高粱的营养价值, 可为今后高粱在食品中的应用提供参考。

目前我国国家对于发芽高粱的研究并不多见, 且发芽后高粱中 GABA 含量尽管有很大程度的增长, 但总量依然不高。因此, 后续的研究可在发芽基础上进一步探讨其他富集工艺对高粱 GABA 含量的影响, 以进一步提高高粱中 GABA 含量, 为开发富含 GABA 的发芽高粱食品提供理论基础。

参考文献

- [1] 姜鹏, 李忍, 戴凌燕, 等. 浸泡和微波处理对三种高粱熟化的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(8): 70-74. [JIANG P, LI R, DAI L Y, et al. Effects of soaking and microwave treatment on maturation of three kinds of sorghum[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(8): 70-74.]
- [2] MORAES R A, OLIVEIRA F D, QUEIROZ V, et al. Domestic processing effects on antioxidant capacity, total phenols and phytate content of sorghum[J]. Current Nutrition & Food Science,

- 2020, 4(16): 501–507.
- [3] HAHN D H, ROONEY L W, EARP C F. Tannins and phenols of sorghum[J]. *Cereal Foods World*, 1984, 29(12): 776–779.
- [4] ABDELHALIM Tilal Sayed, KAMAL Nasrein Mohamed, HASSAN Amro B. Nutritional potential of wild sorghum: Grain quality of Sudanese wild sorghum genotypes (*Sorghum bicolor* L. Moench)[J]. *Food Science & Nutrition*, 2019, 7(4): 1529–1539.
- [5] 吴凤凤. 发芽对糙米主要营养成分、生理功效和加工特性的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2013. [WU F F. The effect of germination on the main nutrients, physiological functions and processing characteristics of brown rice[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2013.]
- [6] 高芬, 王宇婷, 石磊. 荞麦发芽过程中植酸含量变化的研究[J]. *农产品加工*, 2019(13): 59–61, 66. [GAO F, WANG Y T, SHI L. Study on the change of phytic acid content in buckwheat during germination[J]. *Agricultural Products Processing*, 2019(13): 59–61, 66.]
- [7] HUSSAIN S Z, JABEEN R, NASEER B, et al. Effect of soaking and germination conditions on γ -aminobutyric acid and gene expression in germinated brown rice[J]. *Food Biotechnology*, 2020, 34(2): 132–150.
- [8] NISHIMURA M, YOSHIDA S I, HARAMOTO M, et al. Effects of white rice containing enriched gamma-aminobutyric acid on blood pressure[J]. *Journal of Traditional & Complementary Medicine*, 2016, 6(1): 66–71.
- [9] 李科, 俞兰秀, 刘小雨, 等. γ -氨基丁酸改善睡眠作用机制的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(14): 353–358. [LI K, YU L X, LIU X Y, et al. Research progress on the mechanism of γ -aminobutyric acid in improving sleep[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(14): 353–358.]
- [10] 张宿. γ -氨基丁酸的生理作用及应用[J]. *安徽农业科学*, 2019, 47(18): 1–9, 16. [ZHANG S. Physiological function and application of γ -aminobutyric acid[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2019, 47(18): 1–9, 16.]
- [11] YANG H Y, XING R G, LIU S, et al. Rescuing fluoride-induced damages in liver with gamma aminobutyric acid[J]. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 2017, 491(1): 19–24.
- [12] 易翠平, 李艳, 姚辰, 等. 发芽白高粱的工艺优化及主要营养成分分析[J]. *中国粮油学报*, 2015, 30(6): 27–31, 42. [YI C P, LI Y, YAO C, et al. Optimization of germinating white sorghum technology and analysis of main nutrients[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2015, 30(6): 27–31, 42.]
- [13] MOHAMED F M. 发芽高粱及其与小麦混合粉面包的功能特性[D]. 南京: 南京农业大学, 2013. [MOHAMED F M. Functional characteristics of germinated sorghum and its mixed wheat flour bread[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013.]
- [14] 曹晶晶, 顾丰颖, 罗其琪, 等. 发芽糙米 γ -氨基丁酸形成的谷氨酸脱羧酶活性与底物变化的相关性分析[J]. *食品科学*, 2018, 39(16): 47–52. [CAO J J, GU F Y, LUO Q Q, et al. Correlation analysis of glutamate decarboxylase activity formed by germinated brown rice γ -aminobutyric acid and substrate changes[J]. *Food Science*, 2018, 39(16): 47–52.]
- [15] LI C, OH S G, LEE D H, et al. Effect of germination on the structures and physicochemical properties of starches from brown rice, oat, sorghum, and millet[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2017, 105(Pt 1).
- [16] MOHAN B H, MALLESHI N G, KOSEKI T. Physico-chemical characteristics and non-starch polysaccharide contents of Indica and Japonica brown rice and their malts[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2010, 43(5): 784–791.
- [17] 王斌. 稻谷发芽富集 γ -氨基丁酸及大米加工技术研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018. [WANG B. Research on rice germination and enrichment of γ -aminobutyric acid and rice processing technology[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2018.]
- [18] YANG R, WANG P, ELBALOULA M F, et al. Effect of germination on main physiology and biochemistry metabolism of sorghum seeds[J]. *Bioscience Journal*, 2016, 32(2): 378–383.
- [19] 张海龙, 陈迎迎, 杨立新, 等. γ -氨基丁酸对植物生长发育和抗逆性的调节作用[J]. *植物生理学报*, 2020, 56(4): 600–612. [ZHANG H L, CHEN Y Y, YANG L X, et al. Regulatory effects of γ -aminobutyric acid on plant growth and stress resistance[J]. *Acta Plant Physiology*, 2020, 56(4): 600–612.]
- [20] KHWANCHAI P, CHINPRAHAST N, PICHYANGKURA R, et al. Gamma-aminobutyric acid and glutamic acid contents, and the GAD activity in germinated brown rice (*Oryza sativa* L.): Effect of rice cultivars[J]. *Food Science and Biotechnology*, 2014, 23(2): 373–379.
- [21] 李喜明. 黄腐酸与 γ -氨基丁酸联合胁迫促进单针藻 *Monoraphidium* sp. QLY-1 油脂积累相关代谢机制的研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2020. [LI X M. Study on the metabolic mechanism of fulvic acid and γ -aminobutyric acid combined with salt stress to promote lipid accumulation in *Monoraphidium* sp. QLY-1[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2020.]
- [22] DENNISON K L. Glutamate-gated calcium fluxes in arabidopsis[J]. *Plant Physiology*, 2000, 124(4): 1511–1514.
- [23] 王姗姗, 刘小娇, 胡赞, 等. 植物中 γ -氨基丁酸的代谢及富集机制[J]. *安徽农业科学*, 2020, 48(24): 9–12. [WANG S S, LIU X J, HU Y, et al. Metabolism and enrichment mechanism of γ -aminobutyric acid in plants[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2020, 48(24): 9–12.]
- [24] HASSAN S, AHMAD N, AHMAD T, et al. Microwave processing impact on the phytochemicals of sorghum seeds as food ingredient[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2019, 43(5): e13924.
- [25] 耿雪莹, 郭藏, 米生权, 等. 单宁的血糖调节活性功能研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(7): 301–306. [GENG X Y, GUO Z, MI S Q, et al. Research progress on the blood glucose regulating activity of tannins[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(7): 301–306.]
- [26] TEIXEIRA L, PINTO C, KESSLER A, et al. Effect of partial substitution of rice with sorghum and inclusion of hydrolyzable tannins on digestibility and postprandial glycemia in adult dogs[J]. *PLoS One*, 2019, 14(5): e020886.
- [27] CLAVER I P, NICOLE M. The Effect of soaking with

wooden ash and malting upon some nutritional properties of sorghum flour used for impeke, a traditional burundian malt-based sorghum beverage[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2011, 10(11): 1801–1811.

[28] GEORGET D, ELKHALIFA A, PETER S B. Structural changes in kafirin extracted from a white type II tannin sorghum during germination[J]. *Journal of Cereal Science*, 2012, 55(2): 106–111.

[29] SAMAILA J, UGOCHUKWU N T, JOEL N, et al. Influence of fermentation and germination on some bioactive components of selected lesser legumes indigenous to Nigeria[J]. *Journal of Agri-*

culture and Food Research, 2020, 2: 1–10.

[30] EHSAN F, SADAT M R, ALALEH Z, et al. Review of the beneficial and anti-nutritional qualities of phytic acid, and procedures for removing it from food products[J]. *Food Research International*, 2021, 143(1): 110284.

[31] 丁俊胃, 刘贞, 赵思明, 等. 糙米发芽过程中内源酶活力及主要成分的变化[J]. *食品科学*, 2011, 32(11): 29–32. [DING J H, LIU Z, ZHAO S M, et al. Changes in endogenous enzyme activity and main components during the germination of brown rice[J]. *Food Science*, 2011, 32(11): 29–32.]