

氯化盐处理对绿豆芽菜植酸降解的影响

闫晓坤, 靳晓琳, 杨润强, 顾振新*

(南京农业大学食品科技学院, 江苏 南京 210095)

摘要: 为降低绿豆芽菜中抗营养物质植酸含量, 探究氯化盐对绿豆芽菜植酸降解的影响, 研究了KCl、NaCl和CaCl₂处理下绿豆芽菜的长势、植酸酶活性及植酸含量的变化, 筛选了具有降植酸效果的氯化盐并优化了浓度组合。结果发现, NaCl和CaCl₂能够促进植酸降解同时促进绿豆芽菜生长; 单因素试验结果表明, 1.6 mmol/L NaCl和6 mmol/L CaCl₂降植酸效果最佳, 且NaCl和CaCl₂促进植酸降解作用有叠加效应。响应面法优化得到NaCl、CaCl₂浓度分别为1.68 mmol/L和6.40 mmol/L时, 植酸含量降低至8.04 μg/株, 为对照的10.84%。

关键词: 绿豆芽菜; 氯化盐; 植酸酶; 植酸降解

Effects of Chlorate Treatments on Phytic Acid Degradation in Germinated Mung Beans

YAN Xiaokun, JIN Xiaolin, YANG Runqiang, GU Zhenxin*

(College of Food Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: The objective of this study was to reduce the phytic acid content in germinated mung bean (*Vigna radiata* (Linn.) Wilczek). The effects of three chlorized salts on phytic acid degradation were investigated. The growth performance, phytase activity and phytic acid content were studied in germinated mung bean sprouts treated with KCl, NaCl and CaCl₂ (2 mmol/L), respectively. The phytase activity and phytic acid content were used to screen the optimal concentrations of chlorized salts, which have function in reducing phytic acid content. The results showed that all three chlorized salts could promote the growth of germinated mung bean and both NaCl and CaCl₂ reduced phytic acid content. NaCl at 1.6 mmol/L and CaCl₂ at 6 mmol/L had the best effects on phytic acid degradation. Furthermore, a synergistic effect was found between NaCl and CaCl₂, the optimal combination determined by response surface analysis were 1.68 mmol/L NaCl and 6.40 mmol/L CaCl₂. Under this condition, the phytic acid content was reduced to 8.04 μg/plant, which was 10.84% of the control.

Key words: germinated mung bean; chlorized salt; phytase; phytic acid degradation

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201622002

中图分类号: TS255.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2016) 22-0007-06

引文格式:

闫晓坤, 靳晓琳, 杨润强, 等. 氯化盐处理对绿豆芽菜植酸降解的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(22): 7-12. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201622002. <http://www.spkx.net.cn>

YAN Xiaokun, JIN Xiaolin, YANG Runqiang, et al. Effects of chlorate treatments on phytic acid degradation in germinated mung beans[J]. Food Science, 2016, 37(22): 7-12. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-201622002. <http://www.spkx.net.cn>

绿豆 (*Vigna radiata* (Linn.) Wilczek), 为豆科植物, 别名青小豆、植豆等, 种子和茎被广泛食用, 有清热解暑功效^[1], 在中国已有2 000多年的栽培史。绿豆营养丰富, 富含蛋白质及碳水化合物、同时富含钙、磷、铁等多种矿物质及维生素^[2], 并富含植酸。植酸主要以钙镁盐形式存在于植物籽粒的糊粉层、胚芽和子叶中^[3]。虽然植酸具有抗氧化、抗癌等生理功能^[4], 但同时又是一种

抗营养因子, 妨碍蛋白质和矿质元素的吸收^[5]。豆类籽粒中植酸含量普遍高于谷类, 可达0.2%~2.9%^[6]。因此, 以豆类为主食时, 易导致人体矿质元素缺乏。但豆类籽粒萌发后, 其内源植酸酶被激活^[7], 部分植酸被水解成低级肌醇磷酸, 低级肌醇磷酸既具有植酸原有的抗氧化与防癌等生理功能, 同时又降低了植酸原有的抗营养作用^[8]。提高植酸酶活性, 则可增加植酸的降解量。有研究

收稿日期: 2016-01-13

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (31471596)

作者简介: 闫晓坤 (1991—), 女, 硕士研究生, 研究方向为农产品贮藏加工。E-mail: 2014108023@njau.edu.cn

*通信作者: 顾振新 (1956—), 男, 教授, 博士, 研究方向为农产品加工及贮藏。E-mail: guzhenxin@njau.edu.cn

表明,盐胁迫能诱导小麦苗中植酸酶基因表达上调^[9],NaCl胁迫下大麦苗中植酸酶活性增加^[10];Ca²⁺可激活 β -螺旋植酸酶^[11],尤其在逆境胁迫下,细胞内Ca²⁺浓度升高,激活一系列应激反应,使得烟草中相关植酸酶基因表达上调^[12],推测外源添加Ca²⁺可能会提高植酸酶活性。因此,在绿豆发芽期间用一定浓度无机盐进行喷淋,可能会提高植酸酶活性,进而降低绿豆芽菜中植酸含量。目前,我国关于绿豆芽菜生长期间植酸含量变化的研究报道较少,无机盐对绿豆芽菜中植酸降解的影响研究鲜见报道。

本研究以绿豆为试材,在其发芽过程中喷淋KCl、NaCl和CaCl₂,探讨3种氯化盐对绿豆芽菜中植酸降解的影响,旨在为低植酸绿豆芽菜生产提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

绿豆种子:苏绿一号,预实验测得种子中植酸含量约为742.94 μg /粒。由常州五星禾绿蔬菜有限公司提供,于-20 $^{\circ}\text{C}$ 贮存备用。

Dowex 1 \times 8 100-200离子交换树脂 阿法埃莎(天津)化学有限公司;2-(*N*-吗啉)乙磺酸-水合物(2-(*N*-morpholino)ethanesulfonic acid, MES)、乙二胺四乙酸二钠((ethylenedinitrilo) tetraacetic acid disodium salt, EDTA-2Na)、钼酸铵、丙酮、磺基水杨酸、硫酸、盐酸、硫酸钠、三氯化铁、氯化钙、氯化钠、氯化钾 医药集团(上海)化学试剂公司。

1.2 仪器与设备

PGX-150智能培养箱 宁波海曙塞福实验仪器厂;BX-802豆芽机 永康市贝欣五金电器厂;818型pH计美国Orion公司;Multiskan FC型酶标仪 上海赛默飞世尔仪器有限公司;UV-2802型紫外-可见分光光度计上海安亭科学仪器厂。

1.3 方法

1.3.1 种子发芽

称取40 g籽粒饱满的绿豆,用体积分数1.5%的次氯酸钠浸泡15 min后,于蒸馏水中漂洗至pH值中性,然后在30 $^{\circ}\text{C}$ 浸泡4 h,置于发芽机中30 $^{\circ}\text{C}$ 黑暗培养4 d。期间,每2 h喷淋一次氯化盐溶液,每次2 min。以蒸馏水喷淋为对照组。

1.3.2 芽长、株质量测定

随机选取30株绿豆芽苗菜,分别用直尺和分析天平测定其芽长和株质量。

1.3.3 植酸酶活性测定

参照李娜等^[13]的方法,稍作修改,取绿豆芽苗2~3株(约0.5 g),用5 mL MES-EDTA(pH 5.5)缓冲液冰浴研磨成浆状,于4 $^{\circ}\text{C}$ 、10 000 r/min离心15 min得上清液,即为植酸酶提取液。取200 μL 粗酶液与等体积底物(4 mmol/L植酸钠)混匀,在55 $^{\circ}\text{C}$ 条件下反应15 min

后立即加入800 μL 丙酮-钼酸铵溶液终止显色,于405 nm波长处测定其OD值。每个处理重复3次。以无机磷含量为标准,制作标准曲线并计算无机磷的增加量,以每分钟产生1 μmol 无机磷定义为1个酶活力单位U,植酸酶活力表示为U/株。

1.3.4 植酸含量测定

植酸含量测定参照GB/T 170496—1998《食品中植酸的测定》,结果以 μg /株表示。

1.3.5 响应面试验设计

在单因素试验的基础上,根据Box-Behnken设计原理,以发芽第4天植酸含量为响应值,自变量为NaCl浓度(A)、CaCl₂浓度(B)。因子编码及自变量水平见表1,每次试验设3个平行样,取平均值,利用Design-Exper 8.0软件进行试验设计与结果分析。

表1 Box-Behnken试验水平与因素
Table 1 The coded levels and corresponding actual levels of the independent variables used in the Box-Behnken design

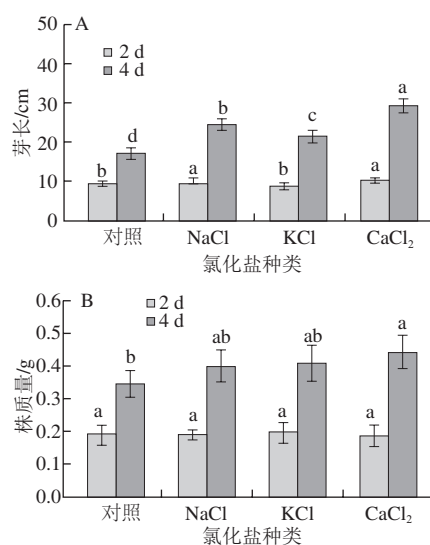
因素	水平		
	-1	0	1
A NaCl浓度	1.2	1.6	2.0
B CaCl ₂ 浓度	4	6	8

1.4 数据分析

采用统计分析软件SPSS 18.0进行统计分析,均值间比较采用Duncan's多重比较,在0.05水平上进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 氯化盐处理对绿豆芽菜生长的影响



氯化盐浓度均为2 mmol/L。不同小写字母代表不同处理间的显著性差异($P < 0.05$)。下同。

图1 不同氯化盐处理绿豆芽菜的芽长(A)和株质量(B)变化
Fig. 1 Changes in sprout length (A) and sprout weight (B) with different chlorate treatments

由图1可以看出,绿豆芽菜的芽长和株质量随发芽时间的延长而增加,NaCl和CaCl₂处理显著增加了绿豆芽长($P<0.05$),而在发芽第4天时,CaCl₂处理下的芽长最大,其次是NaCl,而KCl处理仅在第4天表现出促进作用,与对照相比,第4天时CaCl₂、KCl和NaCl处理下芽长分别增加了42.80%、23.44%和70.90%(图1A)。由图1B可以看出,在3种盐处理下,生长2 d的绿豆芽苗株质量与对照无显著差异,而发芽4 d的绿豆芽苗仅有CaCl₂处理表现出促进作用,这可能是由于发芽第4天Ca²⁺提高了芽苗的含水量^[14]。

2.2 不同无机盐处理绿豆芽菜中植酸酶活性及植酸含量变化

表2 不同氯化盐处理植酸酶活性

Table 2 Changes in phytase activity under different chlorate treatments

处理	植酸酶活性/(U/株)	
	2 d	4 d
对照	35.71±1.84 ^a	27.75±2.06 ^b
2 mmol/L NaCl	35.51±2.78 ^{ab}	36.51±3.44 ^a
2 mmol/L KCl	22.07±1.84 ^c	20.45±1.38 ^c
2 mmol/L CaCl ₂	30.19±2.30 ^{ab}	37.50±3.44 ^a

注:同列肩标不同字母代表显著性差异($P<0.05$)。下同。

由表2可看出,对照和KCl处理绿豆芽菜的植酸酶活性随发芽时间的延长而降低,而NaCl和CaCl₂处理下的酶活随时间的延长而增加,其中KCl处理的植酸酶活性最低。在发芽第2天,NaCl和CaCl₂处理的酶活性与对照相比无显著差异($P<0.05$);在发芽第4天,NaCl和CaCl₂处理的酶活性分别高于对照31.57%和35.11%($P<0.05$)。这表明KCl可抑制植酸酶活性,而NaCl和CaCl₂处理能提高植酸酶活性。

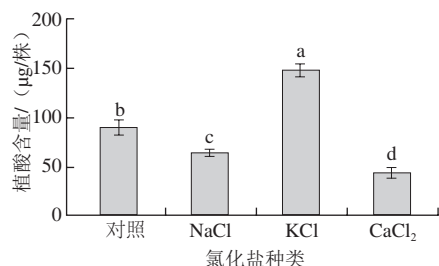


图2 氯化盐处理绿豆芽菜第4天植酸含量变化

Fig. 2 Changes in phytic acid content on the 4th day with different chlorate treatments

由图2可知,发芽至第4天,KCl处理绿豆芽菜中植酸含量显著高于对照,而NaCl、CaCl₂处理绿豆芽菜中植酸含量显著低于对照($P<0.05$),分别为对照的70.77%和49.22%。由此可见,这3种氯化盐对植酸降解作用不同,KCl可抑制植酸降解,NaCl和CaCl₂处理能显著促进植酸降解。

2.3 不同浓度CaCl₂处理绿豆芽菜中植酸酶活性和植酸含量变化

表3 不同浓度CaCl₂处理绿豆芽菜中植酸酶活性

Table 3 Changes in phytase activity with CaCl₂ treatment at different concentrations

CaCl ₂ 浓度/(mmol/L)	植酸酶活性/(U/株)	
	2 d	4 d
0	35.71±1.84 ^b	27.75±2.06 ^c
2	30.19±2.30 ^{bc}	37.50±3.44 ^b
4	30.51±1.84 ^{bc}	37.99±2.75 ^b
6	46.09±2.75 ^a	46.74±1.38 ^a
8	34.68±1.30 ^b	36.52±0.69 ^b
10	28.24±1.38 ^c	35.54±2.07 ^b

由表3可知,随着CaCl₂浓度的增加,植酸酶活性先增加再减小。6 mmol/L CaCl₂处理植酸酶活性最高,第4天时比对照高68.43%($P<0.05$)。

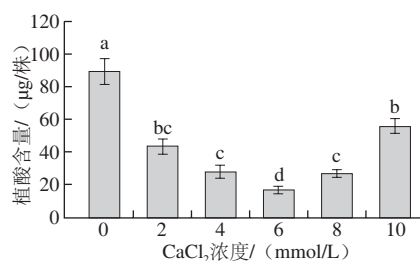


图3 不同浓度CaCl₂处理绿豆芽菜第4天植酸含量变化

Fig. 3 Changes in phytic acid content on the 4th day with CaCl₂ treatment at different concentrations

如图3所示,不同浓度CaCl₂处理下植酸含量均显著低于对照,但随着CaCl₂喷淋浓度的增加,绿豆芽菜中植酸含量呈先降低后升高的趋势。CaCl₂浓度为6 mmol/L时,植酸含量最低,仅为对照的19.21%($P<0.05$)。

2.4 不同浓度NaCl处理绿豆芽菜中植酸酶活性及植酸含量变化

表4 不同浓度NaCl处理绿豆芽菜中植酸酶活性

Table 4 Changes in phytase activity with NaCl treatment at different concentrations

NaCl浓度/(mmol/L)	植酸酶活性/(U/株)	
	2 d	4 d
0.0	25.81±0.69 ^d	23.70±1.38 ^b
0.2	26.94±1.38 ^{cd}	24.33±0.030 ^b
0.4	23.68±1.38 ^d	20.94±0.69 ^c
0.8	25.32±1.84 ^d	20.45±0.10 ^c
1.6	43.17±0.46 ^a	27.75±2.07 ^a
3.2	32.14±0.46 ^b	26.78±0.69 ^{ab}

由表4可知,不同浓度NaCl处理对植酸酶活性的影响相似,即随着NaCl浓度的升高,植酸酶活性先增大后减小。其中,1.6 mmol/L NaCl处理下植酸酶活性最高($P<0.05$),而其他浓度NaCl处理下植酸酶活性时与对照无显著性差异,甚至低于对照。

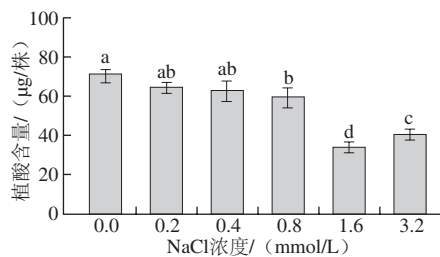


图4 不同浓度NaCl处理绿豆芽菜第4天植酸含量变化

Fig. 4 Changes in phytic acid content on the 4th day with NaCl treatment at different concentrations

如图4所示,随着NaCl浓度的增加,绿豆芽菜中植酸含量呈先降低再升高的趋势,0.8、1.6、3.2 mmol/L NaCl处理下中植酸含量与对照相比均有显著降低,分别为对照的83.41%、47.86%、63.13%;其中1.6 mmol/L NaCl处理绿豆芽菜植酸含量最低($P<0.05$)。结合植酸酶活性测定结果,1.6 mmol/L的NaCl有效促进植酸降解。

2.5 NaCl联合CaCl₂处理绿豆芽菜中植酸酶活性及植酸含量变化

表5 NaCl联合CaCl₂处理绿豆芽菜中植酸酶活性
Table 5 Changes in phytase activity with combined treatment of NaCl and CaCl₂

处理	植酸酶活性/ (U/株)	
	2 d	4 d
对照	31.39±2.07 ^c	26.74±2.75 ^c
NaCl (1.6 mmol/L)	43.33±0.67 ^b	27.75±2.07 ^c
CaCl ₂ (6 mmol/L)	47.71±2.75 ^a	40.90±1.37 ^b
NaCl (1.6 mmol/L) + CaCl ₂ (6 mmol/L)	48.47±2.07 ^a	45.69±2.75 ^a

由表5可知,NaCl联合CaCl₂处理下植酸酶的活性最高,发芽2、4 d相对于对照分别提高了54.41%和70.87%。CaCl₂喷淋下植酸酶活性高于NaCl处理,去离子水喷淋酶活性最低。

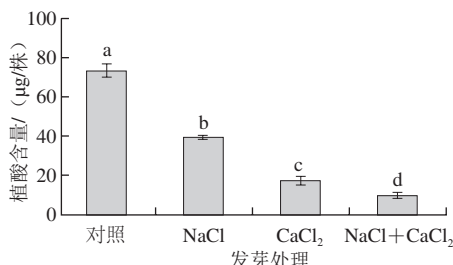
图5 NaCl联合CaCl₂处理绿豆芽菜第4天植酸含量变化Fig. 5 Changes in phytic acid content on the 4th day with combined treatment of NaCl and CaCl₂

图5显示,NaCl联合CaCl₂处理下绿豆中芽菜植酸含量显著低于NaCl、CaCl₂单独处理和对照($P<0.05$),分别为NaCl、CaCl₂和对照处理下的25.01%、54.87%和13.25%。CaCl₂喷淋促进植酸降解的效果要优于NaCl喷淋,但植酸含量均显著低于对照($P<0.05$)。因而推测

NaCl和CaCl₂具有协同作用以增强绿豆芽菜中植酸酶活性并降低植酸含量。

2.6 NaCl联合CaCl₂处理试验结果

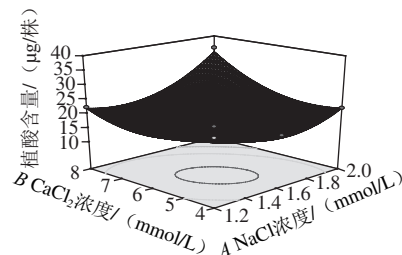
表6 NaCl联合CaCl₂处理Box-Behnken试验设计及结果
Table 6 Box-Behnken design with experimental data for combined treatment of NaCl and CaCl₂

试验号	A NaCl浓度/ (mmol/L)	B CaCl ₂ 浓度/ (mmol/L)	植酸含量/ (μg/株)
1	1.60	4.00	17.05
2	2.00	8.00	35.64
3	1.60	6.00	10.54
4	1.20	8.00	22.39
5	2.00	6.00	21.61
6	1.20	4.00	22.89
7	1.60	8.00	20.39
8	2.00	4.00	22.16
9	1.20	6.00	14.62

表7 回归模型方差分析
Table 7 Analysis of variance of the regression model

方差来源	平方和	自由度	均方和	F值	P值
回归模型	247.43	5	49.49	13.45	0.028 8
A NaCl浓度	40.09	1	40.09	10.90	0.045 7
B CaCl ₂ 浓度	39.12	1	39.12	10.63	0.047 1
AB	48.86	1	48.86	13.28	0.035 6
A ²	69.42	1	69.42	18.87	0.022 5
B ²	49.93	1	49.93	13.57	0.034 7
残差	11.04	3	3.68		
总误差	258.47	8			

注:调整系数 $R^2=0.957 3$ 。

图6 NaCl与CaCl₂的交互作用对植酸含量影响的响应面图Fig. 6 Interaction effect of NaCl and CaCl₂ on phytic acid content

用Design-Expert软件设计两因素三水平试验,根据设计进行试验,并得到相应结果如表6所示。对Box-Behnken试验设计进行方差分析见表7,利用Design-Expert 8.0对数据进行多元二次回归拟合得到植酸含量Y对编码自变量NaCl浓度(A)、CaCl₂浓度(B)的二次多项回归方程为:

$$Y=170.066 1-166.750 0A-0.703 3B+4.368 75AB+47.239 58A^2+0.315 83B^2$$

由表7回归模型方差分析可以看出 $F_M=13.45$, $P<0.028 8$,模型显著。A、B、AB、A²、B²项 $P<0.05$,影响显著。Design-Expert 8.0软件中Box-Behnken法计算回归模型的调整确定系数 R^2_{Adj} 为0.886 1,即该模型能解释

88.61%响应值的变化,说明该模型拟合程度良好,试验误差较小,以此模型优化NaCl联合CaCl₂处理促进植酸降解是可行的。

表7列出了2种影响因素在Box-Behnken试验设计下影响植酸含量的回归方程系数及显著性检验。结果表明NaCl浓度和CaCl₂浓度的一次项及其二次项都对植酸含量有显著性影响($P<0.05$)。同时NaCl浓度和CaCl₂浓度的交互作用影响显著($P<0.05$)。

由图6可知,当CaCl₂浓度一定时,NaCl浓度在1.2~2.0 mmol/L范围内增大时,曲线较陡,植酸含量在1.6 mmol/L左右达到最小值后就开始上升;当NaCl浓度一定时,CaCl₂浓度在4~8 mmol/L范围内增大时,曲线变化较陡,在6 mmol/L附近时,植酸含量达到最小值,达到极值后开始缓慢上升。响应曲面坡度反映响应值对因素变化的敏感性,等高线的形状可反映出交互作用的强弱^[15]。从图6可以看出,NaCl浓度和CaCl₂浓度之间交互作用影响显著。

对模型方程进行典型性分析,结果表明,模型具有稳定点,稳定点为其最小值。模型给出的最优组合为NaCl浓度1.68 mmol/L, CaCl₂浓度6.40 mmol/L,再此条件下预测植酸最低含量为8.47 μg/株。为了证明模型预测的准确性,在给出最优条件下进行了3次平行的重复性实验,植酸含量均值为8.04 μg/株。这说明模型方程可信度较高,实验值与预测值基本相符,能够很好地预测实验结果。

3 讨论

绿豆籽粒发芽初始阶段,吸水膨胀,进入萌芽状态;分解蛋白质、脂肪等有机物为其萌芽生长提供充足能量,同时也会分解植酸为以获得充足的磷元素,表现为芽长和株质量迅速上升^[16]。本研究发现外源盐处理会影响绿豆芽菜的生长,在2 mmol/L浓度下,KCl、NaCl和CaCl₂ 3种氯化盐处理均促进了绿豆芽菜的生长,其中以CaCl₂的促进效果最为显著,NaCl次之,这与梁帅克等^[17]对苜蓿幼苗的研究一致。

绿豆籽粒萌发后,内源植酸酶被激活,植酸在其内源植酸酶的催化下降解为低级肌醇磷酸^[18]。植酸酶作为一种活性蛋白,会被不同种类的无机盐激活或抑制^[19],从而影响植酸降解。本研究中,在2 mmol/L浓度下,KCl显著抑制了植酸酶的活性,导致芽苗中植酸含量高于对照。有研究报道,NaCl胁迫可导致大麦苗植酸酶活性提高^[10],也可使小麦苗植酸酶基因^[7]和大豆紫色酸性磷酸酶基因PAP基因^[20]上调,从而提高植酸降解量。本研究中NaCl可显著提高绿豆芽菜中植酸酶活性,促进植酸降解,与上述研究结果一致。Ca²⁺是多种酶的激活剂,

Reddy等^[12]研究发现,Ca²⁺可激活β-螺旋植酸酶。还有研究报道,Ca²⁺能够导致拟南芥^[21]、烟草^[22]中植酸酶基因表达上调,从而表现出高的植酸酶活性。此外,植酸降解的另一条途径磷酸肌醇特异性磷脂酶C途径中的关键酶特异性磷脂酰肌醇磷脂酶C也受到钙离子调控^[23]。本研究实验结果表明,CaCl₂显著提高了植酸酶活性,与上述研究结果一致,且促进植酸降解的作用优于NaCl。NaCl和CaCl₂主要在第4天提高了植酸酶活性,而第4天芽苗中植酸含量却显著低于对照,可能因为植酸酶活性反映的是某一时刻植酸酶的降解能力,而植酸降解量是在各个时刻植酸酶的催化下逐步累积的。

NaCl和CaCl₂单因素试验结果表明,不同浓度氯化盐处理对绿豆芽菜植酸降解的影响不同,浓度过低其降植酸效果与对照相比不显著,浓度过高则可能因为对植株造成严重胁迫而影响正常生长和酶活,从而无法促进甚至抑制植酸降解。这可能是由于高浓度NaCl会使植物细胞内渗透压增加,阻碍其正常生长代谢活动^[24]。有研究表明,高浓度的盐会抑制大麦的萌发,使得植酸降解的产物无机磷在大麦中积累,从而抑制植酸酶的活性^[10]。Ca²⁺浓度过高则会导致多余Ca²⁺与植酸形成植酸-Ca或Ca-植酸-蛋白质复合物,竞争酶的活性中心位点而影响植酸酶的活性从而降低植酸酶的作用^[25]。因此NaCl和CaCl₂促进植酸降解的作用随浓度的升高呈先增大再降低的趋势。本研究综合不同浓度NaCl和CaCl₂对植酸酶活性和植酸含量的影响,获得最优浓度为1.6 mmol/L NaCl和6 mmol/L CaCl₂。

NaCl和CaCl₂分别提高了植酸酶的活性,且均有促进植酸降解的作用,推测二者的作用可能存在叠加效应。本研究结果也印证了该推测,并经响应面实验优化出NaCl联合CaCl₂处理最优浓度分别为1.68 mmol/L和6.40 mmol/L,经验证可靠。

4 结论

不同的氯化盐对绿豆芽菜中植酸降解的影响不同,2 mmol/L浓度下,KCl可抑制而NaCl和CaCl₂可促进植酸降解;且CaCl₂降植酸效果显著优于NaCl。

不同浓度的NaCl、CaCl₂对植酸降解的影响不同,NaCl和CaCl₂促进植酸降解的最优浓度分别为1.6 mmol/L和6 mmol/L,且二者对植酸降解的促进作用有叠加效果,经优化后联合处理的浓度分别为1.68 mmol/L和6.40 mmol/L,验证性实验证实该优化浓度可靠。

参考文献:

- [1] 张海均,贾冬英,姚开. 绿豆的营养与保健功能研究进展[J]. 食品与发酵科技, 2012, 38(1): 7-10. DOI:10.3969/j.issn.1674-506X.2012.01-002.

- [2] 纪花, 陈锦屏, 卢大新. 绿豆的营养价值及综合利用[J]. 现代生物医学进展, 2006(10): 143-144. DOI:10.13241/j.cnki.pmb.2006.10.049.
- [3] 李兴林. 种子植酸及其低植酸作物品种选育的研究进展[J]. 种子, 2006, 25(12): 51-53. DOI:10.3969/j.issn.1001-4705.2006.12.015.
- [4] 陈红霞. 植酸的生物学特性与应用[J]. 生物学通报, 2006(2): 14-16. DOI:10.3969/j.issn.0006-3193.2006.02.007.
- [5] KUMAR, V, SINHA A K, MAKAR H P S, et al. Dietary roles of phytate and phytase in human nutrition: a review[J]. Food Chemistry, 2010, 120(4): 945-959. DOI:10.1016/j.foodchem.2009.11.052.
- [6] 王新坤, 仲磊, 杨润强, 等. 植物籽粒中植酸及其降解方法与产物研究进展[J]. 食品科学, 2014, 35(3): 301-306. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201403059.
- [7] 靳晓琳, 王新坤, 杨润强, 等. 高等植物体中植酸合成、代谢及其生理作用[J]. 植物生理学报, 2014, 50(6): 711-716. DOI:10.13592/j.cnki.pbj.2014.0048.
- [8] 江洪. 三磷酸肌醇的制备及其生物活性的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2005.
- [9] GUO C, GUO L, LI X, et al. Transcriptional regulation of the rice phytase gene *OsPHY1* by several phytohormones and osmotic stresses using promoter-GUS analysis[J]. Plant Molecular Biology Reporter, 2013, 31(6): 1461-1473. DOI:10.1007/s11105-013-0615-y.
- [10] 郭建华, 赵长新, 李林勇, 等. 盐胁迫对大麦发芽时植酸酶活性和无机磷代谢的影响[J]. 中国酿造, 2006, 25(4): 14-17. DOI:10.3969/j.issn.0254-5071.2006.04.004.
- [11] BARRIENTOS L, SCOTT J J, MURTHY P P. Specificity of hydrolysis of phytic acid by alkaline phytase from lily pollen[J]. Plant Physiology, 1994, 106(4): 1489-1495. DOI:10.1104/pp.106.4.1489.
- [12] REDDY V S, REDDY A S N. Proteomics of calcium: signaling components in plants[J]. ChemInform, 2004, 35(43): 1745-1776. DOI:10.1002/chin.200443272.
- [13] 刘娜, 李静, 柳鸿敏, 等. 玉米子粒植酸酶活性测定方法研究[J]. 吉林农业大学学报, 2012(1): 71-75. DOI:10.13327/j.jjlau.2012.01.017.
- [14] 胡远富, 王泽奇, 施君信, 等. 氯化钙对大豆生长发育及抗逆性的促进效应研究[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2007(3): 39-42. DOI:10.3969/j.issn.1002-2090.2007.03.010.
- [15] 周彬, 华渤文, 周胜德, 等. 琥珀酸放线杆菌发酵产琥珀酸的优化[J]. 食品与发酵科技, 2012, 48(3): 18-21. DOI:10.3969/j.issn.1674-506X.2012.03-005.
- [16] 张红香. 种子发芽生态研究[D]. 吉林: 东北师范大学, 2008.
- [17] 梁帅克, 樊宏, 张文明, 等. 无机盐溶液引发对紫花苜蓿种子活力及幼苗抗逆性的影响[J]. 草原与草坪, 2010(3): 61-65. DOI:10.13817/j.cnki.cyycp.2010.03.005.
- [18] 赵宁春, 程方民, 张小明, 等. 作物种子中植酸代谢及其相关酶的研究进展[J]. 作物杂志, 2008(5): 10-13. DOI:10.16035/j.issn.1001-7283.2008.05.006.
- [19] 曹志华, 罗静波. 发芽、发酵对小麦植酸酶活性的影响[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2014(23): 42-44. DOI:10.3969/j.issn.1673-1409(s).2014.08.013.
- [20] LI W Y F, SHAO G, LAM H M. Ectopic expression of *GmPAP3* alleviates oxidative damage caused by salinity and osmotic stresses[J]. New Phytologist, 2008, 178(1): 80-91. DOI:10.1111/j.1469-8137.2007.02356.x.
- [21] TRIPATHY M K, TYAGI W, GOSWAMI M, et al. Characterization and functional validation of tobacco PLC delta for abiotic stress tolerance[J]. Plant Molecular Biology Reporter, 2012, 30(2): 488-497. DOI:10.1007/s11105-011-0360-z.
- [22] NOVOTNA, Z, VALENTOVA O, MARTINEC J, et al. Study of phospholipases D and C in maturing and germinating seeds of *Brassica napus*[J]. Biochemical Society Transactions, 2000, 28(6): 817-818. DOI:10.1042/bst0280817.
- [23] HIRAYAMA, T, OHTO C, MIZOGUCHI T, et al. A gene encoding a phosphatidylinositol-specific phospholipase C is induced by dehydration and salt stress in *Arabidopsis thaliana*[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 1995, 92(9): 3903-3907. DOI:10.1073/pnas.92.9.3903.
- [24] 檀龙颜. 油菜(*Brassica napus*)种子萌发响应NaCl胁迫的生理学与蛋白质组学研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014.
- [25] 祁艳霞, 陈玉林. 植酸酶的作用机理及影响植酸酶活性的因素[J]. 饲料博览, 2004(7): 10-12. DOI:10.3969/j.issn.1001-0084.2004.07.004.