

植物籽粒中植酸及其降解方法与产物研究进展

王新坤, 仲磊, 杨润强, 靳晓琳, 顾振新*

(南京农业大学食品科技学院, 江苏 南京 210095)

摘要: 植酸广泛存在于植物籽粒中, 是磷元素和矿质元素的贮藏库。本文介绍了植物籽粒中植酸的存在形式、抗营养作用(抑制矿质元素吸收、蛋白质降解、淀粉和脂肪降解), 有益作用(抗氧化作用、抗癌作用、预防心脏病和糖尿病); 总结了不同类型(物理和生物)的植酸降解方法; 综述了植酸几种主要不完全降解产物的研究进展。为推动我国植酸功能成分的综合开发提供理论依据。

关键词: 植物籽粒; 植酸; 降解方法; 降解产物

Research Progress in Phytic Acid, Degradation Methods and Products in Plant Seeds

WANG Xin-kun, ZHONG Lei, YANG Run-qiang, JIN Xiao-lin, GU Zhen-xin*

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

Abstract: Phytic acid, also known as hexakisphosphoric acid, exists mainly in plant seeds where it serves as the main storage form of phosphorous and minerals. In this review, the distribution, the negative anti-nutritional aspects (e.g. inhibitions of nutritional element absorption, protein degradation, and starch and lipid degradation), and therapeutic effects including anti-oxidant, anti-cancer, and prevention of cardiovascular diseases and diabetes of phytic acid are introduced, and its degradation methods including several physical and biological methods are summarized. In the end, the recent progress in research on several major incomplete degradation products is reviewed. This review is expected to provide a theoretical basis for promoting future comprehensive development and utilization of phytic acid-containing plant resources in China.

Key words: plant seeds; phytic acid; degradation methods; degradation products

中图分类号: TS210.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2014)03-0301-06

doi:10.7506/spkx1002-6630-201403059

植酸, 即肌醇六磷酸(hexakisphosphoric acid, IP_6), 是一种包含6个磷酸基团的环状化合物, 于19世纪中期首次被发现。植酸存在于植物的籽粒、块根和块茎中。植酸盐或植酸是植物中磷酸盐的主要存在形式, 广泛存在于植物界, 谷物和豆类中含量居多。植酸盐对人和动物营养的主要影响在于会和蛋白质和包括必需矿物质元素(锌、铁和钙)在内的某些矿质元素(钙、锌、镁、铜、锰、钴、铁)形成难以降解的复合体, 使蛋白质和矿质元素的生物利用率降低。谷物和豆类种子中含有大量的植酸, 长期以全谷物食品和豆类食品为主食容易导致矿质元素缺乏, 影响机体正常代谢。鉴于植酸盐的抗营养作用, 目前已经做了很多尝试来降低其含量。在农业生产中, 通过遗传改良可以得到低植酸含量的新品种。在食品加工中, 可以通过高温、微波、膜过滤等物理方法, 以及添加微生物植酸酶的生物方法来降解植酸。植酸与矿质元素的分子比用于评估植物中矿质元素的生物利用率, 有利于铁、锌和钙元素吸收的参考值分

别为: 植酸:铁<10、植酸:锌<15、植酸:钙<0.24。当食品中植酸与3种金属元素的分子比低于参考值时, 一般认为植酸的含量不影响其吸收。植酸降解生成 IP_5 、 IP_4 、 IP_3 、 IP_2 和 IP_1 等一系列低级磷酸肌醇, 最终降解为肌醇和磷酸。大多降解产物都在细胞信号转导过程中发挥作用, 有些还有抗癌和降血压等活性。

1 植酸

1.1 存在形式

植酸在植物籽粒内通常与钾、钙、镁等金属离子形成植酸盐, 再与蛋白质形成具有单层膜的泡状小球, 然后进一步聚集为球状体。此外, 植酸还可以通过氢键与淀粉和脂肪作用, 生成相应的复合体, 但这一部分植酸在总植酸中所占比例尚未见报道。植酸主要存在于植物籽粒中, 常存在于某些特定部位, 例如糊粉层、胚芽或子叶中。通常谷类中植酸含量为0.06%~2.20%(约占其

收稿日期: 2013-08-17

作者简介: 王新坤(1985—), 男, 博士研究生, 研究方向为生物技术与食品新资源利用。E-mail: wangxinkun2007@163.com

*通信作者: 顾振新(1956—), 男, 教授, 博士, 研究方向为活性物质富集机理与技术。E-mail: guzhenxin@njau.edu.cn

干质量的1%)；豆类中植酸含量为0.2%~2.9%，高于谷类。此外，品种、成熟阶段和栽培条件的差异也会导致籽粒植酸含量的不同。

1.2 抗营养作用

植酸是植物籽粒中对人体营养和健康影响程度最大的一种抗营养因子^[2]。目前中国农村和城市居民的植酸日摄入量分别为1 342 mg和781 mg，属于高水平(>1 000 mg)和较高水平(500~800 mg)^[3]。由于人体内缺乏植酸酶，植酸的大量摄入既降低了食物中矿质元素的生物利用率，又抑制了蛋白质、脂肪和淀粉的消化。

1.2.1 抑制矿质元素吸收

植酸分子结构中的6个磷酸基团具有极强的螯合能力，与二价或三价金属离子结合形成难溶的植酸盐后，在人体消化系统中难以被降解和吸收，从而导致磷和金属元素生物利用率降低。植酸主要抑制人体对铁、锌、钙和镁元素的吸收^[4]，长期以禾谷类食品作为主食会造成铁、锌等元素摄入不足，这已成为发展中国家未成年人罹患铁、锌元素缺乏症的主要原因^[5-6]。必需矿质元素的缺乏导致人体代谢紊乱，引发贫血症、侏儒症、生殖与发育障碍。食物中的其他成分也会影响植酸对矿质离子的螯合作用。例如：高浓度的钙可与植酸锌作用，生成植酸-钙-锌复合体，加剧植酸对锌的螯合作用；可发酵性糖类、有机酸和蛋白质在某种程度上能抵消植酸对锌元素的螯合作用；蛋白质、多肽、 β -胡萝卜素、有机酸和VC可减轻植酸对铁元素吸收的抑制作用^[1]。

1.2.2 抑制蛋白质降解

植酸与蛋白质结合形成植酸-蛋白质复合体，使蛋白质结构改变而产生凝聚沉淀作用，导致其溶解度和蛋白酶水解程度降低。另外，植酸可螯合蛋白酶活性中心的金属离子，抑制胃蛋白酶、胰蛋白酶、胰凝乳蛋白酶活性，使其降解蛋白质的效率降低^[7]。植酸与蛋白形成复合体时受pH值、蛋白质种类、蛋白质溶解度、钙离子浓度的影响，这些因素决定了植酸对籽粒中蛋白质降解的抑制程度^[2]。

1.2.3 抑制淀粉和脂肪降解

植酸可通过氢键直接与淀粉链结合，也可通过蛋白质间接地与淀粉作用形成植酸-蛋白-淀粉复合体。植酸-淀粉复合体不能被淀粉酶充分水解。同时，植酸可螯合淀粉酶活性中心的钙离子，使淀粉酶失活，影响淀粉的降解，导致人体血糖指数下降。此外，植酸盐与脂类及其衍生物结合形成菲汀^[8]，其中植酸钙与脂的作用在内脏中形成金属小泡，使脂肪不能被脂肪酶水解，降低了脂类的生物利用率。

1.3 有益作用

流行病学证实，以肉类、低植酸含量的精制谷物和豆类制品为主要食物来源的居民，其癌症、糖尿病、肾

结石和冠心病的发病率高；在植酸摄入量较高的发展中国家则发病率较低^[2]。摄入适量的植酸有利于某些疾病的防治。

1.3.1 抗氧化作用

抗氧化是植酸最显著的特征。 Fe^{3+} 可以诱导羟自由基($\cdot\text{OH}$)的产生。植酸肌醇环各位上的磷酸基团具有弹性，可以将 Fe^{3+} 的6个配位键完全占据形成植酸- Fe^{3+} 螯合物，稳定性很高，其他亲和性较低的配基不能与其中的 Fe^{3+} 反应，从而抑制产生 $\cdot\text{OH}$ 。此外植酸与 Fe^{3+} 的分子比($\text{InsP}_6/\text{Fe}^{3+}$)还需要满足一定的条件才能抑制 $\cdot\text{OH}$ 的产生^[1]。Graf等^[9]认为 $\text{InsP}_6/\text{Fe}^{3+}$ 位于4和20之间时才能起到抗氧化作用；而Rimbach等^[10]指出， $\text{InsP}_6/\text{Fe}^{3+}$ 只有大于5:1时才能抑制 $\cdot\text{OH}$ 的产生。植酸的抗氧化能力在体内外研究中差异较大：植酸在体外表现出高的抗氧化活性，但对生物体内抗氧化能力没有提升作用。小鼠体内大量的植酸会降低铁的生物利用率，而且无助于机体抗氧化能力的提升^[10]。Engelman等^[11]以摄入不同量植酸的绝经后妇女为研究对象，结果表明饮食中高含量的植酸对提高人体抗氧化能力无显著作用。体内外的差异说明植酸参与体内外抗氧化的模式可能不一致，而且动物组织的结构成分复杂，很难对其抗氧化能力进行准确衡量。

1.3.2 抗癌作用

植酸具有广谱的抗癌作用^[12]，可有效防治结肠癌和白血病，抑制乳腺癌、宫颈癌、前列腺癌和肝癌细胞的扩散。目前，植酸的具体抗癌机制还未明确。植酸可能是通过提高细胞的自身抗癌能力，改变癌细胞的信号转导，上调抗癌因子和抗氧化酶基因的表达等途径来达到抗癌目的。相关研究表明，植酸还可诱导癌细胞的分化和成熟，使其转化为正常细胞^[2]。目前缺乏植酸应用于人体治疗的临床数据，且已有报道中植酸的浓度和纯度均不明确，无法确定病灶中植酸含量与癌细胞数量的对应关系。因此有必要对植酸的药理学和药代动力学等进行深入研究。

1.3.3 预防心脏病

植酸可能通过络合铁离子以减少铁诱导的低密度脂蛋白胆固醇的氧化，从而降低血浆中胆固醇含量，使人体罹患冠心病的几率降低^[13]。

1.3.4 防治糖尿病

体外研究表明，高植酸含量的食品会使血糖浓度降低，消费谷物和豆类食品有助于糖尿病人控制血糖指数^[14]。植酸专一性地抑制丝氨酸磷酸化酶的活性，可能是通过调节钙离子通道的活性来调控胰岛素的分泌，从而实现了对糖尿病的治疗。

1.3.5 其他作用

植酸可通过干扰草酸钙和磷酸钙晶体的形成来防止人体产生肾结石^[15]。此外，植酸可降低牙齿珐琅质中

钙、氟化物和磷酸盐的溶解度,具有预防蛀牙的功能;且植酸对羟基磷灰石具有很高的吸附能力,可保护牙齿免于矿质元素的流失,从而起到保护牙齿的作用^[16]。

2 植酸的降解方法

饮食中植酸的大量存在影响人体的营养平衡甚至健康,去磷酸化是提高植物籽粒营养价值的先决条件。植酸的降解方法按原理的不同主要分为物理方法和生物方法。

2.1 物理方法

2.1.1 机械处理

植酸一般存在于籽粒的特定部位,存在于谷类糊粉层和胚芽中的植酸可通过脱壳和碾皮处理,将其含量降低90%;但与此同时,麸糠和胚芽中的矿质元素、维生素和膳食纤维也会被一同除去,导致谷类食物的综合营养品质降低^[1]。豆类中植酸主要存在于子叶和胚乳的蛋白体中,脱壳和碾皮处理不但不能降低植酸含量,反而会使植酸的相对浓度增加。

2.1.2 热处理

热处理简单易行,成本低,无残留,主要分为两类:烘炒、焙炒、爆裂、微波辐射、红外辐射等干热法;蒸煮、膨化等湿热法。植酸具有较高的热稳定性,常规家庭烹饪处理温度较低,时间较短,只能将约1/4的植酸降解为IP₅-IP₃的混合物^[1]。在100℃条件下将大豆蒸煮1h仅能引起9%的植酸降解;将浸泡12h的绿豆再进行常压蒸煮、高压蒸煮和微波加热处理均未引起植酸含量的显著降低^[17]。而在食品工业中,140℃高温处理即可将豆类中IP₆和IP₅总量降低近60%^[1];但过度加热会破坏籽粒中的氨基酸和维生素,降低营养价值。

2.1.3 膜处理

大豆浓缩蛋白采用传统工艺生产时,所需的洗脱液体积较大,且终产品中含有大量的矿质离子和植酸。将蛋白提取液先经两性电极膜电解,调节pH值至6,再经透析膜过滤,可显著降低浓缩蛋白中植酸含量,终产品中蛋白质的溶解度也大为提高^[18]。

2.1.4 其他处理方法

瞬间可控压力降是植物籽粒加工处理新技术。该方法可以快速降解植酸,但不同作物籽粒中植酸降解程度差异较大。60 MPa压力下处理3 min后,羽扇豆、大豆、兵豆、鹰嘴豆和花生中植酸盐含量分别降低90%、16%、47%、35%和10%^[19]。此外,超高压处理在降解植酸的同时,不会对总蛋白和总脂肪含量以及相关活性成分产生影响。30 kGy以上的电子束辐照高粱籽粒可以引起90%的植酸降解,但有关电子束辐照下植酸的降解模式目前还未见报道^[20]。

2.2 生物方法

植酸在植酸酶的作用下,其分子中的磷酸依次从肌醇环上水解下来,直至完全降解。酶促降解是目前降低谷物籽粒中植酸含量的最有效方法,采用孵育、发芽、发酵等方法时,可激活植物籽粒或微生物中的植酸酶,从而降解植酸。

2.2.1 孵育法

将植物籽粒在内源酶适宜的条件下进行一定时间的孵育(即培养)。在孵育过程中,植物籽粒中一部分水溶性植酸盐,如植酸钾、植酸钠会释放到水中,弃去培养液可将这部分植酸盐除去;同时,植物籽粒孵育时,内源植酸酶活性增强。植酸降解效率主要受孵育温度、pH值和时间的影响。植物籽粒在内源植酸酶最适条件下孵育可大幅度提高植酸的降解率。植物植酸酶的最适温度范围为45~65℃,最适pH值范围为5.0~6.0,而且孵育时间越长,植酸的降解率越高。此外,不同种类的植物孵育时植酸降解率存在差异,例如豌豆和扁豆经内源植酸酶孵育处理1h后,植酸降解率分别为85%和78%^[21]。

2.2.2 发芽法

植物籽粒在发芽过程中,激活的内源植酸酶可有效降解植酸,为幼苗的新陈代谢提供矿质元素和无机磷元素。与此同时,蛋白质、淀粉和脂类等的相关酶作用下降解,生成多肽、低聚糖和不饱和脂肪酸、维生素、 γ -氨基丁酸等对人体有益的活性物质;胰蛋白酶抑制剂等抗营养因子也会被降解,使籽粒营养价值和风味大幅提高。除了小麦、黑麦和大麦等麦类作物的籽粒外,未经发芽处理的籽粒中几乎检测不到植酸酶活性。随着发芽时间的延长,植酸酶活性会逐渐升高,并达到最大值,之后缓慢降低。伴随植酸酶活性的增加,籽粒中植酸含量大幅度降低,无机磷在总磷中占比增加^[22],矿质元素含量随发芽时间的延长而增加^[23]。可见,籽粒发芽过程中,内源植酸酶活性的提高可显著降低植酸含量。

2.2.3 发酵法

发酵可改善食品风味,提高食品营养品质和延长货架期。植物籽粒含丰富的蛋白质和淀粉等营养成分,可作为发酵食品的原料。在发酵过程中,微生物释放到体外的植酸酶可用于降解植酸。其中,乳酸发酵是谷物和豆类发酵的首选方法,因为乳酸发酵会产生乳酸和乙酸,使发酵液pH值下降,而酸性pH值有利于提高植酸酶活性。此外,据Fujita等^[24]报道,根霉和曲霉产生的植酸酶可降解大豆植酸。Liang^[25]、Luo^[26]等的研究证实,自然发酵也可使糙米和蚕豆中植酸含量大幅度降低,显著提高铁、锌元素的生物利用率。

此外,将孵育、发芽和发酵3种方法有机结合并应用于谷物籽粒,可显著提高植酸降解效率。Sharma等^[27]将浸泡和发芽处理后的珍珠粟再经过发酵,植酸含量由

800 mg/100 g降至0 mg/100 g。另据报道,麦类(除燕麦外)经催芽处理并研磨后,再在植酸酶最适条件下孵育,可将植酸完全降解^[28]。可见,将植物籽粒先经发芽处理,再经过发酵或孵育处理是去除植酸行之有效的途径。

2.2.4 外源植酸酶法

植物籽粒中内源植酸酶活性一般较低,植酸降解所需时间长,在生产中有时需要添加外源植酸酶。目前,外源植酸酶主要以微生物植酸酶为主,其热稳定性好,pH值适用范围广。例如,在面包制作过程中添加真菌产植酸酶,一方面可将植酸在胃内完全降解,提高人体对铁元素的吸收^[29];另一方面可以激活 α -淀粉酶,改善面包品质^[30]。在糙米粉中添加微生物植酸酶进行孵育培养可最大程度地降解植酸,同时使干物质和矿质元素的损失降到最低^[31]。除微生物植酸酶外,麦类籽粒中植酸酶活性一般较高^[32],可将其作为酶源降解豆类中植酸。Luo等^[33]用小麦植酸酶处理过的蚕豆粉饲喂小鼠,可显著提高小鼠对铁的吸收率。豆浆中植酸含量为0.56%,添加外源小麦植酸酶后可将其完全去除^[34]。目前,商品植酸酶已作为添加剂应用到猪、家禽和鱼等动物饲料中。尽管商品植酸酶在食品加工和制造中有巨大的应用潜力,但目前未见适用于人类的植酸酶产品面市。

2.2.5 其他方法

近些年来,微生物中不断有新的植酸酶被分离和鉴定出来,而且对应的植酸酶基因也已被克隆。通过对基因进行遗传改造,可以使微生物所产植酸酶具备耐受高温、耐极端pH值,以及耐蛋白酶消化和较低的最适温度等新特性,从而提高植酸的降解效率。此外,编码微生物植酸酶的基因可被克隆至植物内,育成具有高植酸酶活性的新品种,使植物籽粒中植酸含量降低。目前,水稻、小麦和大豆等作物都进行了转植酸酶基因的研究,外源基因主要来自曲霉属真菌、枯草杆菌、大肠杆菌和酵母菌等。

3 植酸的降解产物

植酸降解产生的第一类中间产物是IP₅,并很快被植酸酶和磷酸酶降解为IP₄,由IP₄到IP₃的过程非常缓慢,IP₃会被继续水解为IP₂和IP₁,直至完全生成肌醇和磷酸。IP₅、IP₄和IP₃在细胞信号转导和机体代谢调节中起着非常重要的作用,且具有抗癌、降血压等功效。

3.1 IP₅类

IP₅具有和IP₆相近的螯合能力,一般被视为抗营养因子。磷酸肌醇3-激酶(PI3-K)与许多生物和病原生理反应有关,其中包括肿瘤发生和感染等。Ins(1,3,4,5,6)P₅可特异性地抑制PI3-K/Akt激酶信号传输通路,使得体外培养的癌细胞对普通抗癌药物的作用更加敏感,引起癌细胞的凋亡^[35]。Tania等^[36]进行的小鼠的体内试验,进一步验证了Ins(1,3,4,5,6)P₅是通过阻断Akt激酶的磷酸

化从而起到抑癌效果。另外,细胞内相对稳定的InsP₆和Ins(1,3,4,5,6)P₅含量对于调控细胞增殖至关重要。Elaine等^[37]研究发现,Ins(1,3,4,5,6)P₅含量的降低可抑制体外培养的动物细胞的增殖速率,Ins(1,3,4,5,6)P₅含量的降低可能阻断了染色质构型的改变,从而不利于染色体的复制。此外,Ins(1,3,4,5,6)P₅还以信号转导因子介导细胞外因子和 β 连环蛋白间的信号传递^[38]。

3.2 IP₄类

IP₄对矿质离子的螯合能力大为降低,且对蛋白水解酶类的抑制作用相对较弱。目前已报道的IP₄包括:Ins(1,3,4,5)P₄和Ins(3,4,5,6)P₄。Ins(1,3,4,5)P₄可由Ins(1,4,5)P₃在Ins(1,4,5)P₃-3激酶的作用下生成。Valerie等^[39]通过抑制小鼠体内Ins(1,4,5)P₃-3激酶基因的表达,可使其T淋巴细胞严重受损,这表明Ins(1,3,4,5)P₄对T淋巴细胞的正常分化具有重要作用。此外,在中性粒细胞中,Ins(1,3,4,5)P₄通过与Ins(1,4,5)P₃竞争结合目的蛋白,可以实现对Ins(1,4,5)P₃信号传导途径的反向调控^[40]。Ins(3,4,5,6)P₄是IP₄中另一个重要的同分异构体,Erik等^[41]报道称其可通过抑制胰岛素酸化小泡的形成,减少小鼠体内胰岛素的分泌。另外,Mark等^[42]研究认为Ins(3,4,5,6)P₄在调控人体细胞氯离子分泌过程中起了非常重要的作用。

3.3 IP₃类

IP₃不影响人体对营养物质的消化和吸收。Ins(1,4,5)P₃、Ins(1,2,3)P₃和Ins(1,2,6)P₃是目前研究较为深入的3种IP₃同分异构体。Ins(1,4,5)P₃是作为Ca²⁺信号转导途径中的第二信使^[43]。IP₃/Ca²⁺信号转导途径可调控多种细胞代谢过程,例如:植物细胞的受精作用、增殖、新陈代谢等,以及动物细胞的腺体分泌、神经元细胞的信息加工等。除了在细胞信号转导中的作用外,IP₃对心脏的生理和病理功能发挥重要作用,从调控心脏的起搏、收缩到心率失常、心肌肥大和心衰竭均离不开IP₃的作用。通过分离植酸的水解产物,可以得到有降低糖尿病小鼠血压作用的Ins(1,2,3)P₃^[44]和对人肝癌细胞SMMC-7721具有显著的抑制作用的Ins(1,2,6)P₃^[45]。据报道^[21,46],以IP₃为主的植酸水解产物是通过诱导细胞内信号转导来抑制结肠癌细胞HCT116增殖的。

植酸降解过程中产生的一系列低级磷酸肌醇均包含了多种异构体,但由于分离和制备技术的限制,目前只能对上述少数几种含量较高的产物进行了生物活性和功能的研究。有关低级磷酸肌醇的深入研究还有待于分离制备技术的提高。

4 结 语

鉴于植酸对人体营养的双重作用,应针对不同特征的人群来控制植酸的降解程度:由于儿童和女性对矿质

元素需要量大,为减轻植酸对锌、铁等元素的抑制作用,应将植酸有控制地降解;落后地区的居民以植物籽粒为主要食材,应在食品制作过程中充分降解植酸;发达地区居民因营养过剩,罹患癌症、糖尿病、肾结石和冠心病的风险大,可将植酸适度降解或不降解,充分发挥其抗氧化和抗癌等活性。植酸的测定应采用可区分植酸和低级肌醇磷酸的高效液相色谱法和高效离子色谱法等方法。传统的植酸测定方法缺乏区分IP₆及其水解产物的特异性,所测植酸含量为包含降解产物在内的总植酸,高估了样品中的IP₆和IP₅的含量,精确测定IP₆和IP₅的总量能更准确地评估植酸对营养吸收的抑制程度。

参考文献:

- [1] SCHLEMMER U, FROLICH W, PRIETO R, et al. Phytate in foods and significance for humans: food sources, intake, processing, bioavailability, protective role and analysis[J]. Molecule Nutrition Food Research, 2009, 539(2): 330-375.
- [2] 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.
- [3] MA G, LI Y, JIN Y, et al. Phytate intake and molar ratios of phytate to zinc, iron and calcium in the diets of people in China[J]. European Journal of Clinical Nutrition, 2007, 61(3): 368-374.
- [4] DAVIDSSON L, ALMGREN A, JULLERAT M A, et al. Manganese absorption in humans: the effect of phytic acid and ascorbic acid in soy formula[J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 1995, 62(5): 984-987.
- [5] SOP M M K, GOUADO I, MANANGA M J, et al. Trace elements in foods of children from Cameroon: a focus on zinc and phytate content[J]. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 2012, 26(2/3): 201-204.
- [6] HEMALATHA S, PLATEL K, SRINIVASAN K. Zinc and iron contents and their bioaccessibility in cereals and pulses consumed in India[J]. Food Chemistry, 2007, 102(4): 1328-1336.
- [7] YU S, COWIESON A, GILBERT C, et al. Interactions of phytate and myo-inositol phosphate esters (IP₁₋₅) including IP₅ isomers with dietary protein and iron and inhibition of pepsin[J]. Journal of Animal Science, 2012, 90(6): 1824-1832.
- [8] VOHRA A, SATYANARAYANA T. Phytases: microbial sources, production, purification, and potential biotechnological applications[J]. Critical Reviews in Biotechnology, 2003, 23(1): 29-60.
- [9] GRAF E, MAHONEY J R, BRYANT R G, et al. Iron-catalyzed hydroxyl radical formation stringent requirement for free iron coordination site[J]. The Journal of Biological Chemistry, 1984, 259(6): 3620-3624.
- [10] RIMBACH G, PALLAUF J. Phytic acid inhibits free radical formation *in vitro* but does not affect liver oxidant or antioxidant status in growing rats[J]. The Journal of Nutrition, 1998, 128(11): 1950-1955.
- [11] ENGELMAN H M, ALEKEL D L, HANSON L N, et al. Blood lipid and oxidative stress responses to soy protein with isoflavones and phytic acid in postmenopausal women[J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 2005, 81(3): 590-596.
- [12] VUCENIK I, SHAMSUDDIN A M. Cancer inhibition by inositol hexaphosphate (IP₆) and inositol: from laboratory to clinic[J]. The Journal of Nutrition, 2003, 133(11): 3778-3784.
- [13] JARIWALLA R J, SABIN R, LAWSON S, et al. Lowering of serum cholesterol and triglycerides and modulation of divalent cations by dietary phytate[J]. Journal of Applied Nutrition, 1990, 42(1): 18-28.
- [14] THOMPSON L U, BUTTON C L, JENKIS D J A. Phytic acid and calcium affect the *in vitro* rate of navy bean starch digestion and blood glucose response in humans[J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 1987, 46(3): 467-473.
- [15] GRASES F, SIMONET B M, VUCENIK I, et al. Absorption and excretion of orally administered inositol hexaphosphate (IP₆ or phytate) in humans[J]. Bio Factors, 2001, 15(1): 53-61.
- [16] WEAVER C M, HEANEY R P, MARTIN B R, et al. Human calcium absorption from whole-wheat products[J]. The Journal of Nutrition, 1991, 121(11): 1769-1775.
- [17] MUBARAK A E. Nutritional composition and antinutritional factors of mung bean seeds (*Phaseolus aureus*) as affected by some home traditional processes[J]. Food Chemistry, 2005, 89(4): 489-495.
- [18] ALI F, IPPERSIEL D, LAMARCHE F, et al. Characterization of low-phytate soy protein isolates produced by membrane technologies[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2010, 11(1): 162-168.
- [19] PEDROSA M M, CUADRADO C, BURBANO C, et al. Effect of instant controlled pressure drop on the oligosaccharides, inositol phosphates, trypsin inhibitors and lectins contents of different legumes[J]. Food Chemistry, 2012, 131(3): 862-868.
- [20] SHAWRANG P, SADEGHI A A, BEHGAR M, et al. Study of chemical compositions, anti-nutritional contents and digestibility of electron beam irradiated sorghum grains[J]. Food Chemistry, 2011, 125(2): 376-379.
- [21] FRIAS J, DOBLADO R, ANTEZANA J R, et al. Inositol phosphate degradation by the action of phytase enzyme in legume seeds[J]. Food Chemistry, 2003, 81(2): 233-239.
- [22] AFIFY A E M R, EI-BELTAGIAEL H S, EI-SALAM S M A, et al. Bioavailability of iron, zinc, phytate and phytase activity during soaking and germination of white sorghum varieties[J]. PloS One, 2011, 6(10): e25512.
- [23] AL-NUMAIR K S, AHMED S E B, AL-ASSAF A H, et al. Hydrochloric acid extractable minerals and phytate and polyphenols contents of sprouted faba and white bean cultivars[J]. Food Chemistry, 2009, 113(4): 997-1002.
- [24] FUJITA J, SHIGETA S, YAMANE Y I, et al. Production of two types of phytase from *aspergillus oryzae* during industrial koji making[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2003, 95(5): 460-465.
- [25] LIANG J F, HAN B Z, ROBERT NOUT M J, et al. Effects of soaking, germination and fermentation on phytic acid, total and *in vitro* soluble zinc in brown rice[J]. Food Chemistry, 2008, 110(4): 821-828.
- [26] LUO Yuwei, GU Zhenxin, HAN Yongbin, et al. The impact of processing on phytic acid, *in vitro* soluble iron and Phy/Fe molar ratio of faba bean (*Vicia faba* L.)[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2009, 89(5): 861-866.
- [27] SHARMA A, KAPOOR A C. Levels of anti-nutritional factors in pearl millet as affected by processing treatments and various types of fermentation[J]. Plant Foods for Human Nutrition, 1996, 49 (3): 241-252.
- [28] LARSSON M, SANDBERG A S. Phytate reduction in oats during malting[J]. Journal of Food Science, 1992, 57(4): 994-997.
- [29] SANDBERG A S, HULTHEN L. R, TÜRK M. Dietary *Aspergillus niger* phytase increases iron absorption in humans[J]. The Journal of Nutrition, 1996, 126(2): 476-480.
- [30] HAROS M, ROSELL C, BENEDITO C. Fungal phytase as a potential breadmaking additive[J]. European Food Research and Technology, 2001, 213(4/5): 317-322.

- [31] LIANG J F, HAN B Z, NOUT M J R, et al. Effect of soaking and phytase treatment on phytic acid, calcium, iron and zinc in rice fractions[J]. Food Chemistry, 2009, 115(3): 789-794.
- [32] EGLI I, DAVIDSSON L, JUILLERAT M A, et al. The influence of soaking and germination on the phytase activity and phytic acid content of grains and seeds potentially useful for complementary feeding[J]. Journal of Food Science, 2002, 67(9): 3484-3488.
- [33] LUO Yuwei, XIE Weihua. Effect of phytase treatment on iron bioavailability in faba bean (*Vicia faba* L.) flour[J]. Food Chemistry, 2012, 134 (3): 1251-1255.
- [34] KSKIKGM N. Entrapment of wheat phytase in polyacrylamide gel and its application in soymilk phytate hydrolysis[J]. Biotechnology and Applied Biochemistry, 1994, 19(2): 193-198.
- [35] PICCOLO E, VIGNATI S, MAFFUCCI T, et al. Inositol pentakisphosphate promotes apoptosis through the PI3-K/Akt pathway[J]. Oncogene, 2004, 23(9): 1754-1765.
- [36] MAFFUCCI T, PICCOLO E, CUMASHI A, et al. Inhibition of the phosphatidylinositol 3-kinase/Akt pathway by inositol pentakisphosphate results in antiangiogenic and antitumor effects[J]. Cancer Research, 2005, 65 (18): 8339-8349.
- [37] ORCHISTON E A, BENNETT D, LESLIE N R, et al. PTEN M-CBR3, a versatile and selective regulator of inositol 1,3,4,5,6-pentakisphosphate (Ins(1,3,4,5,6)P₅) evidence for Ins(1,3,4,5,6)P₅ as a proliferative signal[J]. The Journal of Biological Chemistry, 2004, 279(2): 1116-1122.
- [38] GAO Y, WANG H Y. Inositol pentakisphosphate mediates Wnt/beta-catenin signaling[J]. The Journal of Biological Chemistry, 2007, 282(36): 26490-26502.
- [39] POUILLON V, HASCAKOVA B R, PAJAK B, et al. Inositol-1,3,4,5-tetrakisphosphate is essential for T lymphocyte development[J]. Nature Immunology, 2003, 4(11): 1136-1143.
- [40] JIA Y, SUBRAMANIAN K K, ERNEUX C, et al. Inositol-1,3,4,5-tetrakisphosphate negatively regulates phosphatidylinositol- 3,4,5-trisphosphate signaling in neutrophils[J]. Immunity, 2007, 27(3): 453-467.
- [41] RENSTROM E, IVARSSON R, SHEARS S B. Inositol-3, 4, 5, 6-tetrakisphosphate inhibits insulin granule acidification and fusogenic potential[J]. The Journal of Biological Chemistry, 2002, 277(30): 26717-26720.
- [42] CAREW M A, YANG X N, SCHULTZ C, et al. Myo-inositol 3,4,5,6-tetrakisphosphate inhibits an apical calcium-activated chloride conductance in polarized monolayers of a cystic fibrosis cell line[J]. The Journal of Biological Chemistry, 2000, 275(35): 26906-26913.
- [43] BERRIDGE M J. Inositol trisphosphate and calcium signalling mechanisms[J]. Biochimica et Biophysica Acta, 2009, 1793(6): 933-940.
- [44] 江洪, 马续红. 1,2,3-三磷酸肌醇对四氧嘧啶型糖尿病小鼠降血糖作用研究[J]. 中国现代应用药理学杂志, 2009, 26(2): 89-92.
- [45] ZHOU Yamin, WU Moucheng, JIANG Hong. Effects of inositol-1,2,6-triphosphate on human liver cancer SMMC-7721 cells[J]. Medicinal Chemistry Research, 2011, 21(12): 4069-4073.
- [46] ISHIZUKA S, SAITOH K, SUZUKI T, et al. A partially degraded product of phytate suppresses the proliferation of HCT116 colorectal cancer cells[J]. Food Chemistry, 2011, 125(4): 1219-1225.