

陈 练,刘 强,张文明,等.添加植酸酶对米糠消化酶水解产物化学组成及理化性质的影响[J].江苏农业科学,2015,43(5):198-201.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2015.05.066

添加植酸酶对米糠消化酶水解产物 化学组成及理化性质的影响

陈 练,刘 强,张文明,安亚南,周定勇,汪 勇,庄 苏

(南京农业大学动物科技学院,江苏南京 210095)

摘要:研究了植酸酶对米糠消化酶水解产物化学组成及理化性质的影响,并探究养分之间的相互作用。结果表明:植酸酶处理显著增加了米糠液相提取物(SE)的粗蛋白质(CP)和总非淀粉多糖(TNSP)含量($P < 0.05$),显著降低了SE的粗灰分(Ash)含量和不可溶剩余物(ISR)的CP、Ash含量($P < 0.05$)。植酸酶处理显著提高了SE的Ca、Mn、Zn、Cu含量和ISR的Zn含量($P < 0.05$),显著降低了SE的P、植酸磷含量和ISR的P含量($P < 0.05$)。添加植酸酶显著增加了SE各单糖含量、单糖总量和ISR的葡萄糖含量($P < 0.05$)。结果提示,植酸酶处理可提高米糠SE的溶解度、蛋白质含量和非淀粉多糖含量,降低其Ash和植酸含量;米糠中植酸和非淀粉多糖对矿物元素都具有较强的结合能力,它们之间的相互作用可能是导致米糠养分消化利用率较低的重要原因。

关键词:米糠;非淀粉多糖;植酸;蛋白质;矿物元素

中图分类号: S816.44 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2015)05-0198-03

米糠是稻谷主要的加工副产物,富含蛋白质、米糠油和维生素等营养物质。我国米糠年产量超过1 200万t,多用于畜禽饲料^[1];但米糠中的非淀粉多糖(non-starch polysaccharides, NSP)含量较高(20%~25%),NSP会阻碍消化酶与细胞内可消化养分的接触,降低养分的消化利用率^[2]。NSP酶可降解细胞壁结构,消除其对养分的包被作用,提高养分的消化利用率和动物的生产性能。目前,以葡聚糖酶和木聚糖酶为主的NSP酶在麦类日粮中已得到广泛应用并取得了良好的效果,但这类酶制剂在米糠日粮中的效果却不太理想。鉴于米糠中的植酸和矿物元素含量显著高于其他谷物加工副产物,而植酸和NSP均能与矿物元素形成复合物,因此推测米糠中多糖、植酸、矿物元素及其形成的复合物是导致米糠消化利用率较低的主要原因。本试验旨在研究植酸酶处理对米糠消化酶水解产物中不可溶剩余物(insoluble residue, ISR)和液相提取物(supernatant extract, SE)化学组成和理化性质的影响,探究养分之间的相互作用,为进一步研究米糠细胞壁组成及酶制剂对米糠NSP的降解作用提供试验材料和依据。

1 材料与方法

1.1 材料与主要试剂

新鲜米糠(江苏禾嘉牧业集团提供),用饲料粉碎机粉碎过40目筛,75℃烘箱中烘干8h,索氏浸提脱脂,保存备用。

主要试剂:耐高温 α -淀粉酶(Novo Nodisk, Termamyl

120L)、淀粉葡萄糖苷酶(Novo Nodisk, AMG300L)、胃蛋白酶(Sigma, 77151)、植酸酶(Sigma, P9792)、乙醚(AR)、乙酸(AR)、无水乙醇(AR)、乙酸乙酯(AR)、1-甲基咪唑(Sigma, 336092)、单糖标准品(Supelco, 47267);主要仪器:鼓风干燥箱、分析天平、SHZ-88台式水浴恒温振荡器、pHS-2型酸度计、WH-4漩涡混合仪、日立Z-8000原子吸收光谱仪、岛津GC-14B气相色谱仪等。

1.2 米糠消化酶水解产物SE和ISR的制备

参考刘强提取NSP的方法^[3]并作调整,具体如下:称取100g脱脂米糠放入烧瓶,加500mL沸水和0.5mL耐高温 α -淀粉酶,旋转蒸发仪水浴中水解2h(95℃, 40r/min)。冷却至55℃,加入0.5mL淀粉葡萄糖苷酶,55℃水浴继续水解8h。冷却至37℃,将pH值调节为2.0,加入0.5g胃蛋白酶,37℃水浴水解4h。然后4 000r/min离心10min,分别收集上清液和沉淀。在上清液中加入4倍体积的无水乙醇,使体系中乙醇体积分数为80%。室温静置8h,弃去上清液,收集沉淀并用体积分数85%乙醇溶液洗涤2次,每次静置20min,弃去上清液,过滤后将沉淀冷冻干燥即为SE₁。将离心后的沉淀用去离子水洗涤3次,75℃烘干8h即为ISR₁。

1.3 米糠消化酶-植酸酶水解产物SE和ISR的制备

该提取方法与消化酶水解法基本相同,仅在淀粉葡萄糖苷酶水解完成并冷却至37℃后增加如下步骤:调节pH值至4.5并加入0.2g植酸酶,37℃水浴水解4h(40r/min),其余步骤均同上,由此方法制备SE₂和ISR₂。

1.4 指标测定

参照文献[4]测定米糠、SE和ISR的水分、粗蛋白质、粗脂肪、粗灰分含量,淀粉含量测定采用酶水解-DNS法,矿物元素含量测定参照GB/T 13885—2003《动物饲料中钙、铜、铁、镁、钾、钠和锌含量的测定 原子吸收光谱法》,植酸磷(phytate phosphorus, PP)含量测定采用三氯化铁沉淀法,黏度

收稿日期:2015-01-19

基金项目:国家自然科学基金(编号:31172237)。

作者简介:陈 练(1989—),男,四川宜宾人,硕士研究生,主要从事饲料资源开发与利用研究。E-mail:2012105049@njau.edu.cn。

通信作者:刘 强,博士,副教授,主要从事饲料资源开发与利用研究。E-mail:Liuayang@njau.edu.cn。

测定参照《中华人民共和国药典》所述平氏毛细管黏度计法, NSP 测定参考 Theander 等的乙酰醛醇衍生法(Uppsala 法)^[5]。

1.5 数据统计分析

数据以“平均值±标准差($\bar{x} \pm s$)”表示,采用 SPSS 18.0 统计软件进行 ANOVA 单因素方差分析(one-way ANOVA, LSD), $P < 0.05$ 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 米糠 SE 和 ISR 的理化性质

SE₁ 为乳白色粉末,质地坚硬;SE₂ 为浅黄色粉末,质地疏松。二者均有一定的黏性和吸湿性。室温下 SE₁ 和 SE₂ 在水

中的溶解度分别为 4.19% 和 8.60%,SE₁ 溶液呈淡黄色,SE₂ 溶液呈土灰色。SE₁ 和 SE₂ 溶液(浓度为 1%)在 40 ℃ 水浴中的相对黏度分别为 1.15 和 1.35。

2.2 米糠及其 SE 和 ISR 的常规成分

由表 1 可知,SE 中粗灰分相对含量明显高于米糠,其中 SE₁ 中的灰分含量显著高于 SE₂ ($P < 0.05$),而 SE₂ 中的粗蛋白(CP)和总非淀粉多糖(TNSP)含量显著高于 SE₁ ($P < 0.05$)。ISR 中 CP 和 TNSP 相对含量明显高于米糠,与 ISR₁ 相比,植酸酶处理显著降低了 ISR₂ 的 CP 和灰分含量($P < 0.05$),但对 TNSP 含量影响不显著。经 2 种酶水解后,所得 SE 和 ISR 中均未检测出脂肪和淀粉。

表 1 米糠及米糠 SE 和 ISR 的常规成分含量(风干基础)

物质	含量(%)					
	水分	粗蛋白	灰分	粗脂肪	淀粉	总非淀粉多糖
米糠	7.08 ± 0.01	14.69 ± 0.36	8.71 ± 0.05	19.45 ± 0.35	36.80 ± 0.90	18.76 ± 0.06
液相提取物 SE ₁	13.52 ± 0.30a	4.83 ± 0.28b	65.95 ± 0.04a	—	—	3.13 ± 0.01b
液相提取物 SE ₂	10.75 ± 0.0b	14.63 ± 0.40a	35.48 ± 0.14b	—	—	9.72 ± 0.39a
不可溶剩余物 ISR ₁	4.65 ± 0.13b	21.75 ± 0.48a	2.14 ± 0.01a	—	—	51.81 ± 0.52
不可溶剩余物 ISR ₂	5.67 ± 0.24a	15.20 ± 0.55b	1.85 ± 0.01b	—	—	50.52 ± 0.22

注:“—”表示未检出;同一指标、同列数据后不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

2.3 米糠及其 SE、ISR 的矿物元素含量

由表 2 可知,米糠中 P、Mg、Mn 含量较高,其中磷主要以植酸磷的形式存在(占总磷的 67.97%),而 Ca、Zn、Cu 含量较低。SE 中矿物元素相对含量均明显高于米糠,其中 Ca、Mn、Zn、Cu 含量均高于米糠含量的 10 倍以上。与 SE₁ 相比,植酸酶处理显著提高了 SE₂ 中 Ca、Mn、Zn、Cu 的含量($P < 0.05$),

降低了总磷和 PP 的含量($P < 0.05$),SE₂ 中未检出 PP。除 Cu 外,ISR 中的矿物元素相对含量均明显低于米糠,其中 ISR₁ 和 ISR₂ 中均未检出 Mn,ISR₂ 中未检出 PP。植酸酶处理使 ISR₂ 中总磷含量显著低于 ISR₁ ($P < 0.05$),但 Zn 含量显著升高($P < 0.05$),其余矿物元素含量未见显著影响。整体而言,ISR 中的矿物元素相对含量均低于 SE。

表 2 米糠及米糠 SE、ISR 的矿物元素含量(干物质基础)

物质	钙 (%)	磷 (%)	镁 (%)	锰 (mg/kg)	锌 (mg/kg)	铜 (mg/kg)	植酸磷 (%)
米糠	0.07 ± 0.01	1.53 ± 0.11	0.87 ± 0.02	216.33 ± 6.42	34.88 ± 3.30	17.48 ± 1.60	1.04 ± 0.04
液相提取物 SE ₁	0.75 ± 0.01b	18.84 ± 0.17a	5.03 ± 0.12	2 430.36 ± 25.77b	406.81 ± 27.60b	104.65 ± 0.95b	8.33 ± 0.06a
液相提取物 SE ₂	1.22 ± 0.05a	7.34 ± 0.10b	4.41 ± 0.08	4 652.26 ± 55.38a	1 013.89 ± 27.66a	138.89 ± 0.64a	—
不可溶剩余物 ISR ₁	0.01 ± 0.00	0.27 ± 0.01a	0.01 ± 0.00	—	3.66 ± 0.33b	33.47 ± 1.29	0.08 ± 0.01
不可溶剩余物 ISR ₂	0.01 ± 0.00	0.06 ± 0.00b	0.01 ± 0.00	—	24.31 ± 1.80a	34.94 ± 0.10	—

注同表 1。

2.4 米糠及米糠 SE 和 ISR 的单糖含量

由表 3 可知,米糠中可溶性非淀粉多糖(SNSP)含量较低,仅占米糠 TNSP 的 4.13%,主要由半乳糖和葡萄糖组成;米糠不可溶性非淀粉多糖(INSP)主要由阿拉伯糖和木糖组成,分别占 INSP 总量的 32.99% 和 45.19%。2 种酶水解获得的 SE 中单糖组成变化不大,均以阿拉伯糖和半乳糖为主。经植酸酶处理后,SE₂ 中的单糖总糖相对含量显著高于 SE₁ ($P < 0.05$)。与米糠相同,2 种 ISR 也都以阿拉伯糖和木糖为主,但均未检出甘露糖。ISR₁ 和 ISR₂ 中除甘露糖以外的各单糖含量及单糖总量均显著高于米糠($P < 0.05$)。除葡萄糖外,植酸酶处理前后 ISR 的单糖相对含量变化不大($P > 0.05$),但 ISR₂ 中的葡萄糖含量显著低于 ISR₁ ($P < 0.05$)。组成 SE 和 ISR 的单糖物质的量的比与米糠相比无明显变化。

3 小结与讨论

本试验获得的 2 种米糠液相提取物 SE₁ 和 SE₂ 的黏度较

低,可能与其中结合了较多的矿物元素有关。多糖等大分子聚合物中羟基、羧基和氨基等官能团在水溶液中形成氢键或通过范德华力等分子间相互作用是形成黏度的主要原因,矿物离子与上述官能团往往通过配位键和离子键结合,消除或遮蔽有机大分子组分在溶液中的极性,从而降低其黏滞性^[6]。

谷物中的植酸主要分布在胚和糊粉层,其形成跟蛋白质、多糖等物质的沉积有关^[7-8]。研究显示,稻谷的糠麸层含有大量的植酸和蛋白质^[9],而植酸可与蛋白质形成多元复合物,pH 值是影响其复合物形成的主要因素。在酸性条件下(pH 值小于蛋白质的等电点),蛋白质末端的 α-氨基和蛋白质侧链的一些基团容易带正电荷,可与带负电荷的植酸结合形成二元复合物^[10]。而处于中性或碱性条件时(pH 值大于蛋白质的等电点),带负电荷的植酸可通过 Ca²⁺、Mg²⁺、Zn²⁺ 等二价阳离子的桥键作用与带负电荷的蛋白质结合形成植酸-矿物元素-蛋白质三元复合物^[11]。植酸-蛋白质多元复合物的形成,使得蛋白质溶解度降低,进而影响其消化利用

表 3 米糠及米糠 SE、ISR 的单糖含量(干物质基础)

分组	液相提取物单糖含量(mg/kg)					
	阿拉伯糖	木糖	甘露糖	半乳糖	葡萄糖	单糖总量
米糠	1.26 ± 0.17c	0.51 ± 0.11c	1.18 ± 0.12b	2.27 ± 0.08c	2.52 ± 0.38b	7.74 ± 0.15c
SE ₁	7.92 ± 0.60b	3.63 ± 0.13b	2.42 ± 0.41b	14.10 ± 0.40b	3.24 ± 0.63b	31.31 ± 0.10b
SE ₂	25.05 ± 1.62a	10.27 ± 0.25a	7.28 ± 0.40a	42.97 ± 2.66a	11.65 ± 0.27a	97.22 ± 3.86a

分组	不可溶剩余物单糖含量(mg/kg)					
	阿拉伯糖	木糖	甘露糖	半乳糖	葡萄糖	单糖总量
米糠	59.33 ± 2.85b	81.26 ± 3.04b	6.19 ± 0.17	16.88 ± 0.99b	16.16 ± 1.78c	179.81 ± 0.77b
ISE ₁	159.73 ± 4.54a	210.78 ± 1.86a	ND	50.77 ± 0.76a	96.79 ± 2.01a	518.07 ± 5.16a
ISE ₂	160.31 ± 4.05a	228.21 ± 6.38a	ND	55.35 ± 2.80a	61.32 ± 2.64b	505.19 ± 2.18a

分组	单糖物质的量的比					
	阿拉伯糖	木糖	甘露糖	半乳糖	葡萄糖	
米糠	0.30	0.41	0.03	0.13	0.13	
SE ₁ + ISR ₁	0.27	0.35	0.01	0.15	0.22	
SE ₂ + ISR ₂	0.28	0.36	0.01	0.2	0.15	

注:米糠组液相提取物、不可溶剩余物分别为米糠中的可溶性非淀粉多糖和不可溶性非淀粉多糖含量;单糖物质的量的比为液相提取物、不可溶剩余物中单糖物质的量的含量之和与各单糖物质的量的含量总和的比值。

率^[12]。此外,植酸还可与蛋白酶、淀粉酶等消化酶结合,降低酶的活性,影响蛋白质等养分的消化。本试验中,植酸酶处理使 SE 中蛋白质含量增加而 ISR 中的蛋白质含量降低,即增加了可溶性蛋白的含量。植酸酶可破坏植酸-蛋白质多元复合物,释放植酸结合的蛋白质,从而促进蛋白质的消化利用。Zi 等研究表明,在豆粕中添加 0.5% 植酸酶使得豆粕蛋白质的水解度由 0.22 mol/kg 增加至 1.26 mol/kg^[13]。Kong 等在肉鸡日粮中添加植酸酶(1 500 U/kg),发现植酸酶对肉鸡的蛋白质效率(8 ~ 15 d)和蛋白质沉积量(15 ~ 22 d)有显著的影响^[14]。此外,Zeng 等的研究也证实,在断奶仔猪低磷日粮中添加植酸酶能显著提高日粮亮氨酸、赖氨酸、苯丙氨酸、丙氨酸和半胱氨酸的表现消化率^[15]。

米糠中富含矿物元素,然而单胃动物对米糠中的矿物元素利用率较低。日粮纤维和植酸是影响米糠中矿物元素消化的主要因素。植酸的磷酸基团带负电荷,在一定条件下能与二价阳离子结合形成结构稳定、难以溶解的植酸盐,降低矿物元素的消化利用率^[16]。植酸酶的作用可破坏植酸-矿物元素复合物,释放出矿物离子,进而提高矿物元素的利用率。Madrid 等研究表明,在生长猪低磷日粮中添加植酸酶能显著增加 Ca、P、Mg、Cu 的消化率,显著增加 P、Mg、Cu 的沉积率^[17]。Bikker 等也研究了添加植酸酶对 Zn 和 Cu 在猪体内消化率的影响,结果表明,植酸酶能显著增加 Zn 的消化率,但对 Cu 的消化率无显著影响^[18]。不同矿物离子与植酸结合的能力不同,一般来说 Zn²⁺ > Cu²⁺ > Ca²⁺,随着二者结合能力的减弱,其形成的植酸盐的稳定性降低,因而植酸酶对 Cu 的作用小于对 Zn 的作用。本试验添加植酸酶使得可溶性 Ca、Mn、Zn、Cu 含量显著升高,与 Madrid 等^[17]、Bikker 等^[18]的结果较一致。然而本试验中 P、Mg 的含量呈现下降趋势却较为反常,这可能跟米糠细胞壁复杂的多糖结构有关。此外,反应体系的 pH 值、矿物元素的种类、植酸与矿物离子的物质的量之比、其他螯合剂的竞争作用都有可能影响植酸与矿物元素的结合导致结果异常。

植酸不但能直接结合谷物中的矿物元素,还可与 NSP 发生交互作用络合形成多糖-植酸-矿物元素多元聚合物,影

响日粮中矿物元素的利用。Pushpanjali 等研究发现,日粮纤维能抑制 Zn、Fe 等矿物元素在体内的吸收和沉积,矿物元素的利用率与日粮中植酸和纤维的含量呈显著负相关^[19]。也有研究表明多糖可以直接与矿物元素结合形成多糖-矿物元素复合物。Wang 等研究表明,纤维素酶可以提高米糠中 Ca 的体外溶解率,推测纤维素可能与 Ca 结合形成难溶的复合物^[20]。张亚伟的研究也证实,日粮中的 Gal 与结合态的 Cu 显著正相关,小肠食糜中的不溶性的 Ara、Xyl 与结合态的 Zn、Mn 显著正相关^[21]。本试验结果显示,经过植酸酶处理的 SE 中各单糖残基和总的多糖含量均显著增加,可能是植酸酶降解了复合物中的植酸,破坏植酸与多糖的相互作用,释放出与植酸结合的多糖。从整体来看,SE 中的矿物元素和植酸磷的含量均明显高于 ISR,表明 SE 与植酸和矿物元素的结合率显著高于 ISR,因此推断米糠中的 SE 和植酸盐可能是影响其矿物元素利用的主要因素。

参考文献:

[1] Abdul-Hamid A, Luan Y S. Functional properties of dietary fibre prepared from defatted rice bran[J]. Food Chemistry, 2000, 68(1): 15-19.

[2] Saunders R. Rice bran: composition and potential food uses[J]. Food Reviews International, 1985, 1(3): 465-495.

[3] 刘 强. 我国麦类饲料中非淀粉多糖抗营养作用机理的研究[D]. 北京:中国农业科学院, 1998: 38-43.

[4] 张丽英. 饲料分析及饲料质量检测技术[M]. 3 版. 北京:中国农业大学出版社, 2007: 48-81.

[5] Theander O, Aman P, Westerlund E, et al. Enzymatic and chemical analysis of dietary fiber[J]. Journal of AOAC International, 1993, 77(3): 703-709.

[6] 艾晓杰, 韩正康. 大麦和米糠中抗营养因子对家禽食糜性状的影响[J]. 饲料工业, 2003, 11: 55-57.

[7] Brinch-Pedersen H, Sørensen L D, Holm P B. Engineering crop plants: getting a handle on phosphate[J]. Trends in Plant Science, 2002, 7(3): 118-125.

[8] O'Dell B L, de Boland A R, Koirtiyohann S R. Distribution of phytate

白云峰,高立鹏,涂远璐,等.精饲料水平对育肥山羊玉米苞叶自由采食量及生产性能的影响[J].江苏农业科学,2015,43(5):201-203.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2015.05.067

精饲料水平对育肥山羊玉米苞叶自由采食量及生产性能的影响

白云峰,高立鹏,涂远璐,严少华,刘健

(江苏省农业科学院六合动物科学基地,江苏南京 210014)

摘要:以玉米苞叶为粗饲料背景,研究不同精饲料饲喂水平下育肥山羊对粗饲料的自由采食量及生产性能的影响。选用品种一致、体质量接近的 120 日龄断奶羔羊,投喂精饲料 100、200、300、400 g/(头·d),分别记为 A、B、C、D 组,各试验组自由采食玉米苞叶。试验结果看出,在以玉米苞叶为粗饲料背景下,C 组精饲料水平,即 300 g/(头·d)对育肥山羊粗饲料自由采食量及其干物质采食量占体质量比显著高于其他处理组($P < 0.05$);在低精料补饲水平下,育肥山羊对粗饲料自由采食量及总干物质采食量最低($P < 0.05$)。研究表明,单纯以玉米苞叶等秸秆类粗饲料育肥山羊对精饲料依赖度高。

关键词:玉米苞叶;精饲料;山羊;采食量;生产性能

中图分类号:S827.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2015)05-0201-03

随着农业生产集约化程度日益提高和草原载畜量的下降,秸秆资源成为农区草食家畜最主要的粗饲料来源。如何

收稿日期:2014-06-23

基金项目:公益性行业(农业)科研专项(编号:201203050-4)。

作者简介:白云峰(1974—),男,黑龙江铁力人,博士,研究员,主要从事家畜营养生态学研究。Tel:(025)84390204;E-mail:Blinkeye@126.com。

通信作者:严少华,研究员,研究方向为循环农业。E-mail:shyan@jas.ac.cn。

科学地匹配种植业与养殖业、合理规划日粮中秸秆的适宜比重,是“种、养平衡”的关键依据。在秸秆粗饲料自由采食条件下,日粮中的精饲料水平直接影响动物的总干物质采食量和秸秆自由采食量。研究表明,随着日粮精饲料比例增加,动物瘤胃中丙、乙酸等挥发性脂肪酸(volatile fatty acids, VFA)产量等代谢发生改变。羊日粮有纤维适宜供给量和最低供给量问题,一般认为羊日粮适宜中性洗涤纤维(neutral detergent fiber, NDF)含量为 35%~40%^[1-2]。秸秆等粗饲料采食量的大小及生产性能,是规模养羊生产中如何进行农田科学匹配

and nutritionally important elements among the morphological components of cereal grains [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1972, 20(3): 718-723.

[9] Juliano B O. The rice caryopsis and its composition [M] // Houston D F. Rice Chemistry and Technology. Eagan, MN, USA: American Association of Cereal Chemists, 1972: 16-17.

[10] Arnone A, Perutz M. Structure of inositol hexaphosphate-human deoxyhaemoglobin complex [J]. Nature, 1974, 249: 34-36.

[11] Reddy N, Salunkhe D. Interactions between phytate, protein, and minerals in whey fractions of black gram [J]. Journal of Food Science, 1981, 46(2): 564-567.

[12] Selle P H, Cowieson A J, Cowieson N P, et al. Protein-phytate interactions in pig and poultry nutrition: a reappraisal [J]. Nutrition Research Reviews, 2012, 25(1): 1-17.

[13] Zi P M, Kim I D, Shin D H, et al. Consecutive treatment with phytase and arzyme influence protein hydrolysis of soybean meal [J]. African Journal of Biotechnology, 2013, 10(40): 7868-7873.

[14] Kong C, Adeola O. Protein utilization and amino acid digestibility of canola meal in response to phytase in broiler chickens [J]. Poultry Science, 2011, 90(7): 1508-1515.

[15] Zeng Z, Piao X, Wang D, et al. Effect of microbial phytase on performance, nutrient absorption and excretion in weaned pigs and

apparent ileal nutrient digestibility in growing pigs [J]. Asian-Aust J Anim Sci, 2011, 24(8): 1164-1172.

[16] Haraldsson A K, Rimsten L, Alminger M, et al. Digestion of barley malt porridges in a gastrointestinal model: Iron dialysability, iron uptake by Caco-2 cells and degradation of β -glucan [J]. Journal of Cereal Science, 2005, 42(2): 243-254.

[17] Madrid J, Martínez S, López C, et al. Effect of phytase on nutrient digestibility, mineral utilization and performance in growing pigs [J]. Livestock Science, 2013, 154(1): 144-151.

[18] Bikker P, Jongbloed A, Thissen J. Meta-analysis of effects of microbial phytase on digestibility and bioavailability of copper and zinc in growing pigs [J]. Journal of Animal Science, 2012, 90: 134-136.

[19] Pushpanjali S K. In vitro availability of iron and zinc from some Indian vegetarian diets: correlations with dietary fibre and phytate [J]. Food Chemistry, 1996, 56(2): 111-114.

[20] Wang Y, Cheng Y, Ou K, et al. In vitro solubility of calcium, iron, and zinc in rice bran treated with phytase, cellulase, and protease [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56(24): 11868-11874.

[21] 张亚伟. 四种纤维原料的细胞壁组分在猪消化道各段变化规律及其相关性研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2014: 50-51.