

中国饲料磷推荐水平及磷酸盐应用现状和优化分析

郭勇庆¹, 屠焰², 张乃锋², 刘国华², 唐德富³, 王宗勇⁴, 钟昊⁴, 李耀基⁴, 马林¹

(¹中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心/河北省节水农业重点实验室/中国科学院农业水资源重点实验室, 石家庄 050021;

²中国农业科学院饲料研究所, 北京 100081; ³甘肃农业大学动物科学技术学院, 兰州 730070; ⁴云南磷化集团有限公司, 昆明 650600)

摘要:【目的】磷是动物必需的矿物质元素之一, 在动物生长、发育和生产中发挥着重要作用。但是, 动物生产中磷利用效率通常较低, 大量未被利用的磷随粪尿排出体外, 使得环境中磷不断富集, 引起水体富营养化等环境污染。饲料磷水平、磷酸盐的添加量与磷利用效率及粪尿磷排放量密切相关。论文旨在研究中国饲料磷水平及磷酸盐应用现状, 为合理利用饲料磷资源和降低粪尿磷的环境影响提供科学依据。【方法】通过分析中国与美国常见畜禽饲养标准, 比较不同饲养标准推荐的总磷和非植酸磷需要量的差异; 通过对饲料企业调研和饲料样品测定, 分析不同饲料中采用的磷酸盐种类、添加量和磷的含量。【结果】与中国饲养标准相比, 美国的猪饲养标准未列出非植酸磷的需要量, 而是以总磷及标准、表观总肠道可消化磷来表示; 美国的蛋鸡、肉仔鸡和肉鸭饲养标准均未列出总磷需要量; 中国的奶牛饲养标准后备期、泌乳期和干奶妊娠期牛的磷需要量分别比美国饲养标准高 31%、74%和 26%; 中国产蛋鸡、肉仔鸡饲养后期和肉鸭的饲养标准中非植酸磷需要量 (分别为 0.32%、0.35%—0.40%、0.35%—0.42%) 均高于美国饲养标准 (分别为 0.25%、0.30%—0.35%、0.30%—0.40%)。中国畜禽饲料中所用的磷酸盐主要为磷酸氢钙, 其次是磷酸一二钙和磷酸二氢钙; 不同企业生产的同种饲料中磷酸盐添加量、总磷含量及非植酸磷含量差异很大; 当前饲料中磷酸钙盐的添加量低于 2006 年的添加量 (分别为 8.8 和 12.0 kg·t⁻¹); 企业标准中饲料总磷需要量与实际测定值、中国饲养标准推荐值及 2006 年调研值基本相同, 但是产蛋鸡、小猪和大猪饲料的企业标准推荐的非植酸磷需要量均高于中国和美国饲养标准推荐值。【结论】中国饲养标准推荐的奶牛、产蛋鸡、肉仔鸡后期和肉鸭的磷需要量高于美国饲养标准, 饲料中磷酸盐的添加量较 10 年前降低了 3.2 kg·t⁻¹, 企业标准的产蛋鸡、小猪和大猪饲料中非植酸磷需要量高于中国和美国饲养标准。建议根据中国畜禽品种和饲料特点, 开展磷需要量相关研究, 修改畜禽磷需要量推荐标准, 同时采用低磷日粮、高利用率磷酸钙盐和添加植酸酶等综合调控措施来提高饲料磷的利用效率, 降低粪尿磷对环境的污染。

关键词: 饲料; 饲养标准; 磷; 磷酸盐; 环境影响

Current Situation and Optimization Strategy of Phosphorus Recommendation Level and Phosphate Application of Feed in China

GUO YongQing¹, TU Yan², ZHANG NaiFeng², LIU GuoHua², TANG DeFu³, WANG ZongYong⁴,
ZHONG Hao⁴, LI YaoJi⁴, MA Lin¹

(¹Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences/Hebei Key Laboratory of Water-Saving Agriculture/Key Laboratory of Agricultural Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050021; ²Feed Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081; ³College of Animal Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070; ⁴Yunnan Phosphate Group Co., LTD, Kunming 650600)

Abstract: 【Objective】Phosphorus (P) is one of the essential mineral elements for animals. It plays an important role in the

收稿日期: 2017-05-31; 接受日期: 2017-08-02

基金项目: 河北省杰出青年科学基金 (D2017503023)、国家自然科学基金面上项目 (31572210)、云天化国际植物营养研究院开放项目 (YTHZWYJY2016004)、中国科学院百人计划项目

联系方式: 郭勇庆, E-mail: adts12345@126.com. 通信作者马林, Tel: 0311-85810877; E-mail: malin1979@sjziam.ac.cn

growth, development and production of livestock. However, the efficiency of P in animal production is very low, a large amount of undigested feed P excreted with manure, and the P enrichment in the environment resulted in serious P pollution, such as eutrophication. Feed P level and phosphate supplementation are closely related to the P use efficiency and manure P excretion. The objective of this study is to determine the status of P level and phosphate application of animal feed in China, and to provide a scientific basis for rational use of feed P resource and reduce the excretion of manure P. 【Method】 The variance of the P requirement recommended by American feeding standard and Chinese feeding standard, the actual P content and phosphate supplementation in the feed were studied in this research by conducting literature analysis, surveys, and experiments. 【Result】 For swine, compared to the Chinese standard, the current American standard recommends the P requirements as total P, standardized total tract digestible (STTD) P, and apparent total tract digestible (ATTD) P, with no recommendation for non-phytate P (NPP). For laying hens, broilers, meat ducks, the American standard lists NPP requirements, but not total P requirement. For dairy cattle, the total P requirement recommended by the Chinese standard is 31%, 74%, and 26% higher than the American standard for heifers, milking cows, and dry cows, respectively. Compared to the American standards, the current Chinese feeding standard is higher in the NPP requirement for laying hens (0.32% vs 0.25%), slaughter chickens (0.35%-0.40% vs 0.30%-0.35%), and meat ducks (0.35%-0.42% vs 0.30%-0.40%). The majority of phosphates used in feed in China is dicalcium phosphate (DCP), then the mono-dicalcium phosphate (MDCP) and monocalcium phosphate (MCP). The contents of phosphate, total P and NPP of same feed produced by different enterprises varied greatly. The use of calcium phosphate in commercial feeds in China was $8.8 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ in 2016 on average, decreasing from $12.0 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ in 2006. Total P requirement of animals and poultry used by the feed industry in 2016 was similar to that used in 2006 based on surveys, consistent with the Chinese standards. However, the NPP requirement used by the feed industry was higher than recommended by both the Chinese standards and the American standards for laying hens, growing pigs, and finished pigs. 【Conclusion】 The P requirements of dairy cows, laying hen, later stage of broiler, and meat duck recommended by Chinese feeding standard were higher than the American standard; the use of calcium phosphate in commodity feeds in China was $3.2 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ in 2016 lower than in 2006 on average; the NPP requirement used by the feed industry was higher than recommended by both the Chinese feeding standards and the American feeding standards for laying hens, growing pigs, and finished pigs. It is suggested that the study of phosphorus requirement should be carried out based on the animal varieties and feed characteristics in China, and to modify the recommended standards for phosphorus requirement of animals. At the same time, we need to adopt the measures of using the low-phosphorus diets, the high utilization rate of calcium phosphate and addition of phytase in feed to improve the efficiency of feed phosphorus utilization, and to reduce the P excreted with manure.

Key words: feed; feeding standard; phosphorus; phosphate; environmental impacts

0 引言

【研究意义】当前, 农业面源污染已成为影响农村生态环境的重要污染源, 是中国现代农业快速发展的瓶颈。其中, 畜禽粪尿磷排放造成的环境污染逐渐成为世界各国共同关心的问题^[1], 主要是由于富含磷的畜禽粪尿在农田中的过量施用, 使得磷在土壤中累积饱和或过剩, 通过径流、淋洗和渗漏等途径进入水体; 此外, 畜禽粪尿管理不当也可导致磷直接排放到河流、湖泊中, 造成水体磷污染^[2]。水体磷污染引起的富营养化会劣化水质, 造成水体恶臭、透明度和溶解氧降低, 并最终导致鱼类及其他水生生物的死亡等系列生态环境问题^[3]。畜禽粪尿中的磷主要来源于未被消化利用的植酸磷和无机磷酸盐磷^[4]。植物饲料中的磷主要以植酸磷的形式存在, 由于单胃动物胃肠道缺乏降解植酸的酶, 其磷的利用率较低, 因此生产中通常需要添加磷酸盐来补充饲料磷的不足, 磷酸盐磷

通常占饲料总磷的 1/3。科学评价中国畜禽饲养标准推荐的磷需要量、磷酸盐添加量和饲料总磷含量等影响饲料磷利用效率的关键因素, 对于合理配制日粮, 准确、充分地满足畜禽磷营养需要和减少粪尿磷排泄具有重要意义。【前人研究进展】近年来, 对于畜禽粪尿磷减排的研究多集中在饲料中添加植酸酶或低磷日粮上, 研究表明在肉鸡^[5]、肉鸭^[6]、蛋鸡^[7]、猪^[8]日粮中添加植酸酶或采用低磷日粮^[9-10]均能提高饲料磷的利用效率, 降低粪尿磷排放; 但是, 对于中国畜禽饲养标准推荐的磷需要量、磷酸盐添加量及饲料总磷含量现状等相关研究相对缺乏, 磷源的利用也较粗放。刘振^[11]通过对中国华东地区 4 个规模牛场进行调研, 得出奶牛饲料总磷含量为 0.44%—0.56%, 均高于美国饲养标准推荐值; 霍启光^[12]通过对中国部分饲料企业进行调研, 得出小猪、中猪、大猪和产蛋鸡饲料中非植酸磷含量均高于美国和中国饲养标准, 配合饲料中磷酸盐平均添加量为 $12.0 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 。李国华^[13]比较了集约

化和散养两种养殖模式下奶牛、猪和鸡饲料中的磷含量，结果显示集约化养殖猪饲料中磷含量最高且变异大，散养奶牛饲料磷含量最低，饲料中的总磷含量是影响畜禽粪尿中磷含量的重要因素之一。【本研究切入点】日粮磷酸盐添加量和有效磷含量同时影响着畜禽的健康、生产水平、经济效益和环境污染，但由于磷在日粮养分中所占比例相对较小，长期以来对中国饲养标准推荐的畜禽磷需要量、磷酸盐添加量和饲料实际磷含量等方面缺乏科学的认识和准确评价。【拟解决的关键问题】通过文献数据挖掘、调研和试验测定等方法，比较中国与美国饲养标准推荐的不同畜禽磷需要量的差异、不同种类饲料的磷酸盐添加量和总磷含量，阐明中国饲料中磷及磷酸盐的应用现状，为畜禽饲料磷推荐水平和磷减排解决方案的制定提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 文献数据挖掘

通过归纳中国和美国的猪、奶牛、蛋鸡、肉仔鸡、肉鸭的饲养标准，总结和比较不同饲养标准推荐的饲料磷的需要量。其中中国畜禽饲养标准主要为农业行业标准（NY/T），美国畜禽饲养标准主要为 NRC（National Research Council）制定的饲养标准。此外，由于动物的钙和磷代谢密切相关，且影响磷的利用效率，因此本研究同时比较了饲养标准推荐的不同畜禽饲料的钙需要量和钙磷比。

1.2 调研研究

通过访谈调查和问卷调查两种调研方式，于 2016 年 9 月份对华北地区部分饲料企业（共 21 家）进行调

研，主要包括常见畜禽饲料中磷酸盐的添加种类、添加量及总磷和非植酸磷的含量等参数，共收集到有效调研问卷 14 份。同时采集饲料样品 64 份，其中全价配合料样品 50 份、浓缩料样品 7 份，预混合饲料样品 7 份。

1.3 试验测定

将调研采集的 64 份饲料样品采用钼锑抗比色法测定总磷含量^[14]。其测定原理与过程为：饲料样品经湿法（硫酸+过氧化氢）380℃消煮后，使各种形态的磷转变成正磷酸盐，正磷酸盐与钼锑抗显色剂反应，生成磷钼蓝，蓝色溶液的吸光度与含磷量呈正比例关系，然后用分光光度计（880 nm 波长）比色来测定饲料中的总磷含量。

2 结果

2.1 中国和美国饲养标准推荐的磷需要量比较

2.1.1 猪钙磷需要量 中国饲养标准^[15]和美国饲养标准^[16]生长育肥猪的磷需要量均是以体重来推荐需要量；美国饲养标准划分猪的种类和阶段更为详细，尤其是妊娠母猪和哺乳母猪标准规定了妊娠体重、胎次和产仔数等参数，更利于精细化饲养时的饲料配制。此外，美国饲养标准推荐的磷需要量未列出非植酸磷的需要量，而是以总磷以及表观（ATTD）和标准总肠道可消化（STTD）磷来表示，其中 ATTD 值小于 STTD 值（表 1、表 2）。

2.1.2 奶牛磷需要量 中国饲养标准^[17]和美国饲养标准^[18]推荐的磷需要量计算参数不一致，中国饲养标准根据奶牛的体重、日增重、产奶量和妊娠天数计算，而美国饲养标准则根据干物质采食量、可利用磷需要、日粮总磷吸收率来计算（表 3）。按照中国饲养标准

表 1 生长育肥猪钙磷需要量

Table 1 Dietary calcium and phosphorous requirements of grower-finisher pigs^[15-16]

	中国饲养标准（88% DM） ¹⁾ Chinese feeding standard					美国饲养标准（90% DM） ²⁾ American feeding standard						
体重 Weight (kg)	3-8	8-20	20-35	35-60	60-90	5-7	7-11	11-25	25-50	50-75	75-100	100-135
钙 Ca (%)	0.88	0.74	0.62	0.55	0.49	0.85	0.80	0.70	0.66	0.59	0.52	0.46
总磷 TP (%)	0.74	0.58	0.53	0.48	0.43	0.70	0.65	0.60	0.56	0.52	0.47	0.43
非植酸磷 NPP (%)	0.54	0.36	0.25	0.20	0.17	—	—	—	—	—	—	—
STTD P ³⁾ (%)	—	—	—	—	—	0.45	0.40	0.33	0.31	0.27	0.24	0.21
ATTD P ⁴⁾ (%)	—	—	—	—	—	0.41	0.36	0.29	0.26	0.23	0.21	0.18
钙/总磷 Ca/TP	1.19	1.28	1.17	1.15	1.14	1.21	1.23	1.17	1.18	1.13	1.11	1.07
钙/非植酸磷 Ca/NPP	1.63	2.06	2.48	2.75	2.88	—	—	—	—	—	—	—

¹⁾ 瘦肉型生长育肥猪日粮钙磷需要量 Dietary calcium and phosphorus requirements of lean growing-finishing pig; ²⁾ 生长猪自由采食情况下日粮中钙磷的需要量 Dietary calcium and phosphorus requirements of growing pig when allowed feed ad libitum; ³⁾ 标准总肠道可消化磷 Standardized total tract digestibility (STTD) of P; ⁴⁾ 表观总肠道可消化磷 Apparent total tract digestibility (ATTD) of P

表 2 妊娠母猪和泌乳母猪钙磷需要量

Table 2 Dietary calcium and phosphorous requirements of gestating sows and lactating sows^[15-16]

	中国饲养标准 (88% DM) ¹⁾										美国饲养标准 (90% DM) ²⁾																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
	Chinese feeding standard					American feeding standard																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
	妊娠母猪 Gestating sow		泌乳母猪 Lactating sow				妊娠母猪 Gestating sow		泌乳母猪 Lactating sow				妊娠母猪 Gestating sow		泌乳母猪 Lactating sow				妊娠母猪 Gestating sow		泌乳母猪 Lactating sow																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
体重 Weight (kg)						140	165	185	205	175	175	175	210	210	210																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									

¹⁾ 瘦肉型妊娠和泌乳母猪日粮钙磷需要量 Dietary calcium and phosphorus requirements of lean gestating and lactating sows; ²⁾ 妊娠和泌乳母猪日粮中钙磷的需要量 Dietary calcium and phosphorus requirements of gestating and lactating sows; ³⁾ 标准总肠道可消化磷 Standardized total tract digestibility (STTD) of P; ⁴⁾ 表观总肠道可消化磷 Apparent total tract digestibility (ATTD) of P

表 3 奶牛磷需要量

Table 3 Dietary phosphorous requirement of dairy cows^[17-19]

牛只类别 Cow type	中国饲养标准 Chinese feeding standard					美国饲养标准 American feeding standard				中国饲养标准比美国饲养标准高的百分比 Percentage of Chinese feeding standard higher than American feeding standard (%)	
	奶牛质量 Weight (kg)	日增重 ADG (kg·d ⁻¹); 产奶量 Milk yield (kg·d ⁻¹); 妊娠天数 Gestation days (d)	日粮磷需要量 Dietary P requirement (g·d ⁻¹)		干物质采食量 DMI (kg·d ⁻¹)	可利用磷需要量 Available P requirement (g·d ⁻¹)	日粮总磷吸收率 Absorption rate of dietary TP (%)	日粮磷需要量 Dietary P requirement (g·d ⁻¹)		日粮磷需要量 Dietary P requirement (g·d ⁻¹)	Percentage of Chinese feeding standard higher than American feeding standard (%)
后备母牛 Heifer	维持 Maintain	300	0.8	13.5	7.1	6.28	0.65	9.66		39.75	
	增重 BWG	300	0.8	10.4	7.1	5.60	0.65	8.61		20.79	
	合计 Total	—	—	23.9	—	11.88	—	18.27		30.82	
泌乳牛 Lactation cow	维持 Maintain	680	25	30.6	21.0	22.36	0.68	32.88		-6.93	
	泌乳 Milking	680	25	75.0	21.0	18.90	0.68	27.79		169.88	
	合计 Total	—	—	105.6	—	41.26	—	60.68		74.03	
干奶牛 Dry cow	维持 Maintain	680	270	30.6	13.7	15.06	0.66	22.82		34.09	
	妊娠 Gestation	680	270	9.0	13.7	5.63	0.66	8.53		5.51	
	合计 Total	—	—	39.6	—	20.69	—	31.35		26.32	

计算的后备牛、泌乳牛和干奶牛推荐的磷需要量均高于美国饲养标准，分别高 31%、74%和 26%^[19]。

2.1.3 蛋鸡钙磷需要量 由表 4 可知，中国蛋鸡饲养标准^[20]没有划分具体品种，是以中型体重蛋鸡需要量来推荐磷的需要量；而美国饲养标准^[21]则以蛋鸡的主要品种（轻型来航蛋鸡）来推荐需要量，并以采食量来确定日粮中钙磷浓度。中国饲养标准开产前蛋鸡的钙和非植酸磷需要量与美国饲养标准相同，但是产蛋鸡非植酸磷需要量（0.32%）高于美国饲养标准（0.21%—0.31%），钙磷比（10.94：1）低于美国饲养标准（12.90：1—13.10：1）。美国饲养标准中未

列出总磷需要量。

2.1.4 肉仔鸡钙磷需要量 中国饲养标准^[20]肉仔鸡后期非植酸磷（0.35%—0.40%）推荐的需要量高于美国饲养标准^[21]（0.30%—0.35%），钙的推荐需要量相同；此外，美国饲养标准未列出总磷的需要量（表 5）。

2.1.5 肉鸭钙磷需要量 由表 6 可知，中国饲养标准^[22]推荐的非植酸磷（0.35%—0.42%）和钙（0.80%—0.90%）需要量均高于美国饲养标准^[21]推荐的非植酸磷（0.30%—0.40%）和钙（0.60%—0.65%）的需要量；美国饲养标准没有列出总磷的需要量。

表 4 蛋鸡钙磷需要量
Table 4 Dietary calcium and phosphorous requirements of layer^[20-21]

	中国饲养标准 Chinese feeding standard				美国饲养标准 American feeding standard						
	中型体重蛋鸡 ¹⁾ Medium weight layer				白壳/褐壳蛋鸡 ²⁾ White shell/brown shell layer				白壳蛋鸡 ²⁾ White shell layer		
周龄 Weeks	0-8	9-18	19-开始产蛋 Start laying eggs	产蛋鸡 Layer	0-6	6-12	12-18	18-开始产蛋 Start laying eggs			
采食量 Feed intake (g·d ⁻¹)									80	100	120
钙 Ca (%)	0.90	0.80	2.00	3.50	0.90	0.80	0.80	2.00	4.06	3.25	2.71
总磷 TP (%)	0.70	0.60	0.55	0.60	—	—	—	—	—	—	—
非植酸磷 NPP (%)	0.40	0.35	0.32	0.32	0.40	0.35	0.30	0.32	0.31	0.25	0.21
钙/总磷 Ca/TP	1.29	1.33	3.64	5.83	—	—	—	—	—	—	—
钙/非植酸磷 Ca/NPP	2.25	2.29	6.25	10.94	2.25	2.29	2.67	6.25	13.10	13.00	12.90

¹⁾ 根据中型体重蛋鸡制定 According to the medium weight laying hens; ²⁾ 根据来航型蛋鸡制定 According to the Airborne laying hens

表 5 肉仔鸡钙磷需要量
Table 5 Dietary calcium and phosphorous requirements of broiler^[20-21]

	中国饲养标准 Chinese feeding standard			美国饲养标准 American feeding standard		
	0-3	4-6	7	0-3	3-6	6-8
周龄 Weeks						
钙 Ca (%)	1.0	0.9	0.8	1.0	0.9	0.8
总磷 TP (%)	0.68	0.65	0.60	—	—	—
非植酸磷 NPP (%)	0.45	0.40	0.35	0.45	0.35	0.30
钙/总磷 Ca/TP	1.47	1.38	1.33	—	—	—
钙/非植酸磷 Ca/NPP	2.22	2.25	2.29	2.22	2.57	2.67

2.2 中国饲料磷含量和磷酸盐应用现状

2.2.1 全价配合饲料磷含量和磷酸盐应用 猪配合饲料的磷含量和磷酸盐使用调查结果见表 7。由表可知，10—30 kg 猪配合饲料所用的磷酸盐以水溶性高的磷酸一二钙（MDCP）和磷酸二氢钙（MCP）较多，而其他两个阶段均是以磷酸氢钙（DCP）为主。不同

企业的相同饲料中磷酸盐添加量差异较大，尤其是 DCP；总磷含量变异不大，但是仔猪饲料中钙含量、以 DCP 为磷源时的中猪和大猪饲料中非植酸磷含量变异较大。以 MDCP 或 MCP 为磷源时，仔猪和中猪饲料中磷酸盐添加量及非植酸磷含量低于以 DCP 为磷源时。饲料总磷测定值低于或略高于企业设定

表 6 肉鸭钙磷需要量
Table 6 Dietary calcium and phosphorous requirements of meat duck^[21-22]

	中国商品鸭饲养标准			中国种鸭饲养标准			美国肉鸭饲养标准	
	Chinese commercial ducks feeding standard			Chinese breed ducks feeding standard			American meat duck feeding standard	
周龄 Weeks	1-2	3-5	6-7	8-22	23-26	27-70	0-2	2-7
钙 Ca (%)	0.90	0.85	0.80	0.80	2.00	3.10	0.65	0.60
总磷 TP (%)	0.65	0.60	0.55	0.55	0.60	0.60	—	—
非植酸磷 NPP (%)	0.42	0.40	0.35	0.35	0.38	0.38	0.40	0.30
钙/总磷 Ca/TP	1.38	1.42	1.45	1.45	3.33	5.17	—	—
钙/非植酸磷 Ca/NPP	2.14	2.13	2.29	2.29	5.26	8.16	1.63	2.00

表 7 猪配合饲料磷含量和磷酸盐使用调查
Table 7 The survey of P content and phosphate use in compound feed for pig

	仔猪 Piglet		中猪 Shoat		大猪 Pig
	10-30 kg		30-60 kg		>60 kg
饲料数量 Feed number	4	2	2	5	4
磷酸盐种类 Phosphate species	MCP/MDCP	DCP	MDCP	DCP	DCP
磷酸盐用量 Phosphate dosage (kg·t ⁻¹)	7.45±1.12	9.50±6.36	6.15±1.91	7.38±4.58	4.55±1.83
钙 Ca (%)	0.87±0.25	0.85	0.65±0.07	0.81±0.18	0.65±0.09
总磷 TP (%)	0.56±0.03	0.70	0.57±0.03	0.55±0.06	0.60±0.02
非植酸磷 NPP (%)	0.34±0.05	0.40	0.29±0.02	0.34±0.12	0.33±0.12
植酸酶效价 Titer of phytase (kFTU/kg)	10.00±0.00	5.00	10.00±0.00	8.00±2.74	7.50±2.89
植酸酶添加量 Addition amount of phytase (g·t ⁻¹)	137.50±47.87	175.00±35.36	100.00±0.00	135.0±48.73	131.25±55.43
总磷测定值 Measured value of TP (%)	0.50±0.06	0.58	0.59±0.20	0.51±0.04	0.59

超过两个数据时，用平均数±标准差表示。下同 More than two data shown as mean±SD. The same as below

的饲料总磷含量。饲料中所用的植酸酶效价为 5 000—10 000 FTU/kg，不同企业相同饲料的植酸酶添加量差异较大。

由表 8 可知，肉仔鸡饲料中所用磷酸盐以 DCP 为主，其次为 MDCP；肉鸭饲料中除使用 DCP 外，还使用骨制 DCP。肉仔鸡和肉鸭饲料以 DCP 为磷源时，不同企业的相同饲料中磷酸盐添加量差异较大，饲料中钙、总磷、非植酸磷含量及植酸酶的添加量差异也很大。肉仔鸡饲料中以 MDCP 为磷源时，磷酸盐的添加量和非植酸磷含量均低于以 DCP 为磷源时。肉仔鸡和肉鸭饲养后期饲料中磷酸盐的添加量、总磷含量和非植酸磷含量均低于饲养前期。除肉鸭饲养后期饲料中总磷测定值高于企业设定值（分别为 0.66 和 0.59）外，其他阶段肉仔鸡和肉鸭饲料的总磷测定值均低于或略高于企业设定值。

由表 9 可知，蛋鸡配合饲料中所用的磷酸盐以 DCP 为主，其次为 MDCP。以 DCP 为磷源时，不

同企业的相同饲料中磷酸盐添加量变异大，前期的添加量高于中后期；饲料中钙、总磷和非植酸磷含量在一定范围内波动。饲料中以 MDCP 为磷源时，磷酸盐的添加量、总磷和非植酸磷含量均低于以 DCP 为磷源时的数值。饲料中磷酸盐的添加量、总磷含量和非植酸磷含量均以蛋小鸡最高，产蛋鸡最低。除蛋中鸡饲料总磷测定值高于企业设定值（分别为 1.15 和 0.66）外，蛋小鸡和产蛋鸡饲料的总磷测定值均低于企业设定值。

由表 10 可知，反刍动物精料补充料中添加的磷酸盐以 DCP 为主，添加量低于单胃动物，为 3—5 kg·t⁻¹ 精料补充料。肉牛和肉羊的精料补充料中总磷含量（分别为 0.75%和 0.80%）高于泌乳奶牛（0.60%），钙含量低于泌乳奶牛（1.0%和 1.2%）。

2.2.2 浓缩饲料磷含量和磷酸盐应用 浓缩料是由蛋白原料和添加剂预混而成，饲喂时需补加能量料成为全价料，以猪浓缩料最为常见。由表 11 可知，猪浓

表 8 肉仔鸡和肉鸭配合饲料磷含量和磷酸盐使用调查

Table 8 The survey of P content and phosphate use in compound feed for broilers and meat duck

	饲养阶段 Period					
	肉仔鸡 Broiler				肉鸭 Meat duck	
	0-21 d		22-42 d		0-21 d	22-42 d
饲料数量 Feed number	4	1	4	1	2	2
磷酸盐种类 Phosphate species	DCP	MDCP	DCP	MDCP	DCP/骨制 DCP ¹⁾	DCP/骨制 DCP
磷酸盐用量 Phosphate dosage (kg·t ⁻¹)	12.75±1.04	8.50	9.43±0.96	7.00	11.55±0.64	8.80±0.42
钙 Ca (%)	0.97±0.16	0.88	0.87±0.09	0.80	0.85±0.07	0.78±0.04
总磷 TP (%)	0.65±0.06	0.65	0.60±0.07	0.60	0.65±0.06	0.59±0.01
非植酸磷 NPP (%)	0.42±0.07	0.35	0.35±0.06	0.31	0.40±0.10	0.35±0.07
植酸酶效价 Titer of phytase (kFTU/kg)	12.50±5.00	10.00	12.50±5.00	10.00	15.00±7.07	15.00±0.07
植酸酶添加量 Addition amount of phytase (g·t ⁻¹)	155.00±52.60	100.00	130.00±47.61	100.00	100.00±0.00	100.00±0.00
总磷测定值 Measured value of TP (%)	0.62±0.06	0.56	0.60±0.09	0.37	0.65±0.01	0.66±0.13

¹⁾ 骨制磷酸氢钙，骨明胶生产过程中的副产品 Bone dicalcium phosphate, a by-product of in the production of bone gelatin

表 9 蛋鸡配合饲料磷含量和磷酸盐使用调查

Table 9 The survey of P content and phosphate use in compound feed for layer

	蛋小鸡 Chicken		蛋中鸡 Pullet		产蛋鸡 Laying hen	
	3	1	3	1	3	1
饲料数量 Feed number	3	1	3	1	3	1
磷酸盐种类 Phosphate species	DCP	MDCP	DCP	MDCP	DCP	MDCP
磷酸盐用量 Phosphate dosage (kg·t ⁻¹)	11.53±3.23	9.80	9.13±2.58	5.80	9.0±1.73	8.00
钙 Ca (%)	0.96±0.06	0.85	0.93±0.04	0.90	3.65±0.07	3.60
总磷 TP (%)	0.75±0.07	0.59	0.66±0.06	0.64	0.63±0.03	0.62
非植酸磷 NPP (%)	0.48±0.03	0.35	0.39±0.01	0.32	0.36±0.01	0.31
植酸酶效价 Titer of phytase (kFTU/kg)	11.67±7.64	10.00	11.67±7.64	10.00	11.67±7.64	10.00
植酸酶添加量 Addition amount of phytase (g·t ⁻¹)	116.67±28.87	100.00	116.67±28.87	100.00	116.67±28.87	150.00
总磷测定值 Measured value of TP (%)	0.63	—	1.15	—	0.55±0.05	0.59

表 10 反刍动物精料补充料磷酸盐使用调查

Table 10 The survey of phosphate use in concentrate supplement for ruminant

	泌乳奶牛 Lactating cows	肉牛 Beef cattle	肉羊 Sheep
总磷 TP (%)	0.60	0.75	0.80
钙 Ca (%)	1.20	1.00	1.00
磷酸盐种类 Phosphate species	DCP	DCP	DCP
磷酸盐用量 Phosphate dosage (kg·t ⁻¹)	5.00	3.00	3.00

缩料占全价料的比例变异较大（20%—40%），主要使用 DCP 作为无机磷源；折合成全价料后不同企业的相同饲料中磷酸盐添加量相差很大。植酸酶添加量为 200—1 000 g·t⁻¹，差异较大。

2.2.3 预混料磷含量和磷酸盐应用 预混料主要提供矿物质元素、微量元素和维生素，在全价料中的添加比例为 0.5%—10.0%，其中 4%（猪）和 5%（鸡）的预混料中最为常见。鸡和猪鸡预混料中磷酸盐以

DCP 为主，其次是 MDCP。以 DCP 为磷源，折合成全价料后，不同企业相同预混料中磷酸盐添加量差异均较大，蛋小鸡为 260.00 kg·t⁻¹，仔猪为 150.00 kg·t⁻¹。蛋鸡、猪和肉仔鸡预混料中磷酸盐的添加量、总磷含量和非植酸磷含量均是生长前期（蛋小鸡、仔猪、肉仔鸡）高于生长后期（表 12、表 13）。

表 11 猪浓缩饲料磷酸盐使用调查

Table 11 The survey of phosphate use in concentrated feed for pig

	仔猪 Piglet 10-30 kg	中猪 Shoat 30-60 kg	大猪 Pig >60 kg
饲料数量 Feed number	4	4	4
磷酸盐种类 Phosphate species	DCP	DCP	DCP
浓缩料比例 Proportion of feed (%)	30.75±6.50	25.0±4.08	21.25±2.50
磷酸盐用量 Phosphate dosage (kg·t ⁻¹)	31.85±16.27	39.53±11.32	43.23±11.97
植酸酶效价 Titer of phytase (kFTU/kg)	7.50±2.89	8.75±2.50	8.75±2.50
植酸酶添加量 Addition amount of phytase (g·t ⁻¹)	575.00±403.11	575.00±386.22	575.00±386.22
总磷测定值 Measured value of TP (%)	1.06±0.18	1.30±0.10	1.19±0.35
折合全价料中磷酸盐添加量 Equivalent of addition amount of phosphate in compound feed (kg·t ⁻¹)	9.25±3.42	9.75±2.66	9.35±3.47

表 12 蛋鸡预混料磷酸盐使用调查

Table 12 The survey of phosphate use in premix feed for layer

	蛋小鸡 Chicken	青年鸡 Pullet		产蛋鸡 Laying hens	
饲料数量 Feed number	3	1	2	1	2
磷酸盐种类 Phosphate species	DCP	MDCP	DCP	MDCP	DCP
预混料比例 Proportion of feed (%)	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
磷酸盐用量 Phosphate dosage (kg·t ⁻¹)	260.00±72.10	135.00	200.00±84.90	135.00	165.00±49.50
植酸酶效价 Titer of phytase (kFTU/kg)	5.00±0.00	5.00	5.00±0.00	5.00	5.00±0.00
植酸酶添加量 Addition amount of phytase (g·t ⁻¹)	4000.00±0.00	4000.00	4000.00±0.00	4000.00	4000.00±0.00
折合全价料磷酸盐添加量 Equivalent of addition amount of phosphate in compound feed (kg·t ⁻¹)	13.00±3.60	6.75	10.00±4.20	6.75	8.30±2.50

表 13 猪和肉仔鸡预混料磷酸盐使用调查

Table 13 The survey of phosphate use in premix feed for pig and broiler

	仔猪 Piglet 10-30 kg	中猪 Shoat 30-60 kg	大猪 Pig >60 kg	肉仔鸡 Broiler 0-21 d	肉仔鸡 Broiler 22-42 d
饲料数量 Feed number	2	2	2	1	1
磷酸盐种类 Phosphate species	DCP	DCP	DCP	DCP	DCP
预混料比例 Proportion of feed (%)	7.00±4.20	7.00±4.20	7.00±4.20	5.00	4.00
磷酸盐用量 Phosphate dosage (kg·t ⁻¹)	150.00±141.40	117.50±81.30	75.00±56.60	290.00	270.00
植酸酶效价 Titer of phytase (kFTU/kg)	5.00±0.00	5.00±0.00	5.00±0.00	5.00	5.00
植酸酶添加量 Addition amount of phytase (g·t ⁻¹)	950.00±777.80	950.00±777.80	950.00±777.80	400.00	400.00
折合全价料磷酸盐添加量 Equivalent of addition amount of phosphate in compound feed (kg·t ⁻¹)	7.50±3.50	6.50±0.70	4.10±0.80	14.50	10.80

2.2.4 不同饲料磷酸盐用量、磷含量与饲养标准的比较 对中国当前与 2006 年饲料调研^[12]得出的不同饲料中磷酸盐用量、总磷含量、非植酸磷含量等数据的平均值以及实际测定值、饲料企业标准、中国饲养标准、美国饲养标准的推荐值进行了比较。由表 14 可知，中国当前畜禽饲料中磷酸盐的添加量均值低于 2006

年调研值（平均低 3.2 kg·t⁻¹）；产蛋鸡和猪饲料中非植酸磷含量高于 2006 调研值；饲料企业标准的总磷含量与中国饲养标准推荐值、实际测定值和 2006 年调研值差异不大，但产蛋鸡、小猪（10—30 kg）和大猪（> 60 kg）饲料企业标准的非植酸磷含量均高于中国和美国饲养标准推荐值。

表 14 饲料磷酸盐用量、磷含量与饲养标准的比较

Table 14 The comparison of feed phosphate quantities, P content and feeding standard^[13,16-17,21-23]

	猪 Pig			产蛋鸡	肉仔鸡 Broiler		肉鸭 Meat duck		均值
	10-30 kg	35-60 kg	>60 kg	Laying hen	0-21 d	22-42 d	0-21 d	22-42 d	Mean
磷酸盐用量 ¹⁾	9.36	7.03	4.55	8.75	11.90	8.94	11.03	8.80	8.80
Addition amount of phosphate (kg·t ⁻¹)									
总磷含量 ¹⁾ TP (%)	0.59	0.56	0.60	0.63	0.65	0.60	0.64	0.60	0.61
非植酸磷含量 ¹⁾ NPP (%)	0.39	0.32	0.33	0.34	0.45	0.38	0.40	0.35	0.37
2006 年磷酸盐用量 ²⁾	13.00	10.60	9.00	12.70	16.00	10.50	—	—	12.00
Addition amount of phosphate in 2006 (kg·t ⁻¹)									
2006 年总磷含量 ²⁾	0.65	0.56	0.49	0.60	0.68	0.59	—	—	0.60
TP in 2006 (%)									
2006 年非植酸磷含量 ²⁾	0.32	0.30	0.22	0.31	0.47	0.39	—	—	0.34
NPP in 2006 (%)									
总磷测定值 ³⁾	0.54	0.54	0.59	0.56	0.61	0.52	0.63	0.61	0.58
Test value of TP (%)									
国标总磷推荐值 ⁴⁾	0.53	0.48	0.43	0.60	0.68	0.6	0.65	0.6	0.55
TP recommendations in Chinese standard (%)									
国标 NPP 推荐值 ⁴⁾	0.25	0.20	0.17	0.32	0.50	0.35	0.42	0.40	0.30
NPP recommendations in Chinese standard (%)									
美标 NPP 推荐值 ⁴⁾	0.35	0.35	0.30	0.25	0.45	0.30	0.40	0.30	0.33
NPP recommendations in American standard (%)									

1) 调研数据 Survey data; 2) 文献数据 Literature data; 3) 测定数据 Measured data; 4) 饲养标准数据 Feeding standard data

3 讨论

3.1 中国和美国饲养标准推荐的畜禽磷需要量比较

饲养标准是对各种特定动物所需要的各种营养物质给出的定量建议，主要是根据不同畜禽的生理及营养需要特点，合理推荐不同营养物质的最低需要量；因其总结了最新的科学研究和生产实践成果，以可信度高的重复实验资料为基础，经过专家严格审定，并以推荐标准或专题报告形式提交权威部门颁布，具有较高的科学性、先进性以及一定的权威性。但是，饲养标准也随着科学研究和实际生产的发展而变化，应根据具体情况调整其营养需要推荐值并考虑安全

系数^[23]。此外，饲养标准还具有条件性和局限性特点，应根据个体差异、饲料适口性及其物理特性、环境条件等实际生产条件，来调整畜禽饲料的营养水平和饲喂方案，以实现提高动物生产效率、提高饲料资源利用效率、推动动物生产发展和提高科学养殖水平等目标^[24]。

各个国家都有自己的畜禽饲养标准，但由于不同国家之间生产方式、技术水平以及传统习惯的差异，衡量指标尚未统一，现行各国标准中对于相同畜禽的同一营养物质规定的用量不尽相同。本研究得出，中国饲养标准与美国饲养标准推荐的磷需要量和表示方法存在差异，同一阶段中国饲养标准推荐的生长猪钙

和总磷需要量总体上低于美国饲养标准,如中国饲养标准中推荐的 35—60 kg 猪钙和总磷需要量分别为 0.55%和 0.48%,而美国饲养标准中推荐的 25—50 kg 猪钙和总磷需要量分别为 0.66%和 0.56%;美国饲养标准中用 ATTD 和 STTD 磷替代非植酸磷能更精确地满足猪在不同生长性能水平和生理状态时的需求,同时能使磷的排泄量最小化^[25]。中国饲养标准推荐的肉鸡后期、肉鸭和产蛋鸡的非植酸磷需要量均高于美国饲养标准,且美国饲养标准只列出了非植酸磷的需要量,未考虑总磷需要量;对于奶牛,按中国饲养标准计算的后备牛、泌乳牛和干奶妊娠牛磷需要量均高于美国饲养标准。

畜禽饲养标准处于不断更新中,如第 1 版家养动物营养需要(nutrient requirements of domestic animals)出版于 1944 年,后来的家禽营养需要分别于 1984 和 1994 年出版;猪营养需要至 2012 年已更新了 11 个版本,各版本间通常相差十几年,年代久远营养需要依据的基础数据和技术体系大多已经过时,最新的营养需要标准通常更先进。中国猪(1987 年和 2004 年出版)、鸡(1986 年和 2004 年出版)、奶牛(1986 年和 2004 年出版)等畜禽饲养标准目前大多只更新了两个版本,更新速度较慢,且制定标准时选用的模型参数与美国饲养标准等国外标准相比存在一定差异。此外,近年来集约化养殖的大幅度增加,畜禽生长速度增加,饲养方式和环境变化造成的应激因素增加;中国畜禽饲料中所用饲料原料与国外及先前的种类也不一样,比如当前中国饲料中所用棉粕、菜籽粕等杂粕较多,磷利用率相对较低。因此,中国仍需根据畜禽品种、生产性能、饲料原料特性和饲养方式等指标变化,根据最新科研成果,参考美国饲养标准等及时更新的营养需要参数,采用科学的评价参数来修订饲养标准^[26],合理制定畜禽营养需要中的总磷或非植酸磷的推荐值。此外,考虑到饲料总磷含量与粪尿磷排放密切相关,中国单胃动物饲养标准建议仍需同时列出总磷和非植酸磷的推荐量。

3.2 中国饲料磷含量与磷酸盐应用现状和优化分析

畜禽饲料中磷酸盐添加量和磷含量与动物生产性能、环境污染和经济效益密切相关,因此受到业界密切关注。当前,为了提高植酸磷的利用效率,降低磷添加成本,大多数饲料企业在饲料中添加植酸酶,使植酸盐中的磷以磷酸根的形式游离出来从而被动物吸收,提高总磷的利用率,并起到减少环境污染的作用^[27],但植酸酶的来源和种类较多,应用效果也有

差异,可以释放植酸磷的比例很难确定。因此,在动物生产中通常添加磷酸盐来补充饲料本底磷的不足或提供安全裕量,以保证饲料中充足的磷含量。本研究发现,中国畜禽饲料中所用的磷酸盐主要为 DCP、MDCP 和 MCP 等,其中以 DCP 应用最为广泛;不同企业的饲料中磷酸盐添加量及总磷和非植酸磷含量相差很大,当前畜禽饲料中磷酸盐的添加量平均比 2006 年的添加量降低了 3.2 kg·t⁻¹,产蛋鸡、小猪和大猪的企业标准中非植酸磷含量均高于中国现行饲养标准和美国饲养标准。通过以上研究可以看出,中国饲料磷酸盐的用量较 10 年前明显降低,其正好与 10 年来中国植酸酶用量持续增长和植酸酶价格持续下降的趋势相吻合,因此可以认为植酸酶的应用的确起到了替代磷酸盐的作用;此外, MDCP 和 MCP 的磷含量和生物学效价较高,替代 DCP 时也能够降低磷酸盐的添加量,因此, MDCP 和 MCP 的逐渐普及也使得饲料中磷酸盐的添加量相应降低。

本研究发现,企业标准中产蛋鸡、小猪和大猪饲料的非植酸磷含量均高于中国和美国饲养标准推荐值,表明企业在技术上的保守性,为了保证饲料足够的磷供给量,所设置的安全裕量过大,造成了饲料磷资源的浪费和潜在的环境风险,可以考虑适当降低非植酸磷的设置水平。DOU 等^[28]调研了美国 612 家奶牛场的饲料中磷含量,结果表明饲料中磷含量变异很大,从 0.36%—0.70%,平均值为 0.44%,比美国饲养推荐值高 34%;刘振^[11]对中国华东地区 4 个规模化牛场进行了调研,得出饲料中磷含量为 0.44%—0.56%,均高于美国饲养推荐值。但是,对于猪、鸡等单胃动物饲料中磷含量及磷酸钙盐添加量的调研研究相对较少。2006 年对中国部分饲料企业的调研结果得出小猪、中猪和大猪饲料中非植酸磷含量分别为 0.32%、0.30%和 0.22%,均高于美国饲养标准和中国饲养标准^[12];产蛋鸡日粮非植酸磷水平接近国标,比美国饲养标准高 24%,表明有降低饲料中非植酸磷供给的潜力。因此,饲料企业在配制饲料时,可结合畜禽种类、饲料原料特点、采食量等信息,在不影响畜禽生产性能的前提下,适当降低饲料产品中磷酸盐的添加量和非植酸磷含量。

4 结论

美国猪饲养标准磷需要量中未列出非植酸磷的需要量,而是以总磷及标准、表观总肠道可消化磷来表示;美国蛋鸡、肉仔鸡和肉鸭饲养标准均未列出总磷

需要量；中国饲养标准推荐的产蛋鸡非植酸磷需要量高于美国饲养标准（分别为 0.32%和 0.25%），肉仔鸡饲养后期的非植酸磷需要量高于美国饲养标准（分别为 0.35%—0.40%和 0.30%—0.35%），肉鸭饲养标准推荐的非植酸磷（0.35%—0.42%）和钙（0.80%—0.90%）需要量高于美国饲养标准（非植酸磷：0.30%—0.40%，钙：0.60%—0.65%）；按照中国饲养标准计算的后备牛、泌乳牛和干奶妊娠牛磷需要量分别比美国饲养标准高 31%、74%和 26%。

中国畜禽饲料中所用的磷酸盐主要为磷酸氢钙、磷酸一二钙和磷酸二氢钙，其中磷酸氢钙应用最为广泛，不同企业饲料中磷酸盐添加量、总磷含量及非植酸磷含量差异很大；当前畜禽饲料中磷酸钙盐添加量（均值为 $8.8 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ ）低于 2006 年的添加量（均值为 $12.0 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ ）；企业标准中设置的饲料总磷需要量与实际测定值、国家标准磷推荐量及 2006 年调研数值基本相同，但是产蛋鸡、小猪和大猪饲料的企业标准中设置的非植酸磷需要量高于中国和美国饲养标准的推荐量。建议根据中国畜禽品种和饲料特点，优化中国畜禽磷需要量推荐标准，同时采用低磷日粮、高利用率磷酸钙盐和添加植酸酶等综合调控措施来提高饲料磷的利用效率，降低粪尿磷对环境的污染。

References

- [1] BAI Z H, MA L, OENEMA O, CHEN Q, ZHANG F S. Nitrogen and phosphorus use efficiencies in dairy production in China. *Journal of Environmental Quality*, 2013, 42(4): 990-1001.
- [2] VOLLENWEIDER R A. *Scientific Fundamentals of the Eutrophication of Lakes and Flowing Waters, with Particular Reference to Nitrogen and Phosphorus as Factors in Eutrophication*. Paris, French: Organisation for Economic Co-operation and Development, 1970.
- [3] CONLEY D J, PAERL H W, HOWARTH R W, BOESCH D F, SEITZINGER S P, HAVENS K E, LANCELOT C, LIKENS G E. Ecology. Controlling eutrophication: nitrogen and phosphorus. *Science*, 2009, 323(5917): 1014-1015.
- [4] 曾悦, 洪华生, 曹文志, 陈能汪, 李永玉, 黄云凤. 九龙江流域养猪场氮磷流失特征研究. *农业工程学报*, 2005, 21(2): 116-120.
ZENG Y, HONG H S, CAO W Z, CHEN N W, LI Y Y, HUANG Y F. Characteristics of nitrogen and phosphorus losses from swine production systems in Jiulong River watershed. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(2): 116-120. (in Chinese)
- [5] IBRAHIM S, JACOB J P, BLAIR R. Phytase supplementation to reduce phosphorus excretion of broilers. *Journal of Applied Poultry Research*, 1999, 8(4): 414-425.
- [6] 吕明斌, 孙作为, 燕磊, 吕尊周, 王正国, 冯好民, 唐婷婷. 植酸酶对樱桃谷肉鸭生长性能和氮、磷排泄的影响. *中国家禽*, 2014, 36(1): 30-33.
LÜ M B, SUN Z W, YAN L, LÜ Z Z, WANG Z G, FENG H M, TANG T T. Effects of phytase on growth performance and excretion of nitrogen and phosphorus of cherry valley meat ducks. *China Poultry*, 2014, 36(1): 30-33. (in Chinese)
- [7] LIM H S, NAMKUNG H, PAIK I K. Effects of phytase supplementation on the performance, egg quality, and phosphorous excretion of laying hens fed different levels of dietary calcium and nonphytate phosphorous. *Poultry Science*, 2003, 82(1): 92-99.
- [8] HARPER A F, KORNEGAY E T, SCHELL T C. Phytase supplementation of low-phosphorus growing-finishing pig diets improves performance, phosphorus digestibility, and bone mineralization and reduces phosphorus excretion. *Journal of Animal Science*, 1997, 75(12): 3174-3186.
- [9] WU Z, SATTER L D, BLOHOWIAK A J, STAUFFACHER R H, WILSON J H. Milk production, estimated phosphorus excretion, and bone characteristics of dairy cows fed different amounts of phosphorus for two or three years. *Journal of Dairy Science*, 2001, 84(7): 1738-1748.
- [10] KESHAVERZ K. Effects of continuous feeding of low-phosphorus diets with and without phytase during the growing and laying periods on performance of two strains of Leghorns. *Poultry Science*, 2003, 82(9): 1444-1456.
- [11] 刘振. 日粮磷水平对奶牛生产性能及磷排放的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
LIU Z. Effect of dietary phosphorus amount on milk production and phosphorus excretion of dairy cows in China[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010. (in Chinese)
- [12] 霍启光. 在猪鸡配合饲料中植酸酶部分取代磷酸盐的现状和未来//齐广海. *动物营养与饲料科学进展*. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007: 110-119.
HUO Q G. Partial replacement of phosphate with phytase in diets for pigs and chickens: current status and future prospects//QI G H. *Advances in Animal Nutrition and Feed Science*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2007: 110-119. (in Chinese)
- [13] 李国华. 我国畜禽粪便磷组分与土壤磷养分资源管理策略[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
LI G H. Phosphorus fractions in animal manure and soil phosphorus management in China[D]. Beijing: China Agricultural University,

2015. (in Chinese)
- [14] 张丽英. 饲料分析及饲料质量检测技术. 2 版. 北京: 中国农业大学出版社, 2003.
- ZHANG L Y. *Feed Analysis and Feed Quality Detection Technology*. 2nd ed. Beijing: China Agricultural University Press, 2003. (in Chinese)
- [15] 中华人民共和国农业部. 猪饲养标准: NY/T 65-2004[S]. 北京: 中国农业出版社, 2004.
- Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Feeding standard of swine: NY/T 65-2004[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2004. (in Chinese)
- [16] USA. National Research Council. *Nutrient Requirements of Swine*. 11th ed. Washington D.C.: National Academy Press, 2012.
- [17] 中华人民共和国农业部. 中国奶牛饲养标准: NY/T 34-2004[S]. 北京: 中国农业出版社, 2004.
- Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Feeding standard of dairy cow: NY/T 34-2004[S]. Beijing: China Agricultural Press, 2004. (in Chinese)
- [18] USA. National Research Council. *Nutrient Requirements of Dairy Cattle*. 7th ed. Washington D.C.: National Academy Press, 2001.
- [19] 张晓明. NRC 2001 版《奶牛营养需要》中有关磷需要量内容的解读与思考. 饲料研究, 2006(12): 48-51.
- ZHANG X M. Interpretation and reflection of phosphorus requirement in the book of "Nutrient requirements of dairy cattle" published in 2001. *Feed Research*, 2006(12): 48-51. (in Chinese)
- [20] 中华人民共和国农业部. 鸡饲养标准: NY/T 33-2004[S]. 北京: 中国农业出版社, 2004.
- Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Feeding standard of chicken: NY/T 33-2004[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2004. (in Chinese)
- [21] USA. National Research Council. *Nutrient Requirements of Poultry*. 9th ed. Washington D.C.: National Academy Press, 1994.
- [22] 中华人民共和国农业部. 肉鸭饲养标准: NY/T 2122-2012[S]. 北京: 中国农业出版社, 2012.
- Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Nutrient requirements of meat-type duck: NY/T 2122-2012[S]. Beijing: China Agricultural Press, 2012. (in Chinese)
- [23] 熊本海. 国内外畜禽饲养标准与饲料成分表. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2010.
- XIONG B H. *Domestic and Overseas Animal Feeding Standard and Feed Composition Table*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2010. (in Chinese)
- [24] 王会群, 朱魁元, 张丽, 刘博. 动物饲养标准概述. 饲料博览, 2010(3): 16-18.
- WANG H Q, ZHU K Y, ZHANG L, LIU B. Overview of animal feeding standard. *Feed Review*, 2010(3): 16-18. (in Chinese)
- [25] 纪少丽, 陈琳, TAYLOR-PICKARD J A, CLOSE W H. 美国 NRC 新标准——回顾现代猪种的营养需求. 国外畜牧学(猪与禽), 2014, 34(8): 21-23.
- JI S L, CHEN L, TAYLOR-PICKARD J A, CLOSE W H. The new NRC: reviewing the nutrient needs of modern pigs. *Animal Science Abroad (Pigs and Poultry)*, 2014, 34(8): 21-23. (in Chinese)
- [26] 伍喜林. 初探如何完善中国猪饲养标准: 比较澳大利亚与中国猪饲养标准的启示. 中国饲料, 1993(11): 24-25.
- WU X L. Discussion on how to improve Chinese feeding standard of pig: Comparison of Australian and Chinese pig feeding standards. *China Feed*, 1993(11): 24-25. (in Chinese)
- [27] 史鹏飞, 樊文娜, 高腾云, 汪垠锋, 潘军. 植酸酶在饲料工业中的应用. 饲料研究, 2009(1): 22-25.
- SHI P F, FAN W N, GAO T Y, WANG Y F, PAN J. Application of phytase in feed industry. *Feed Research*, 2009(1): 22-25. (in Chinese)
- [28] DOU Z, FERGUSON J D, FIORINI J, TOTH J D, ALEXANDER S M, CHASE L E, RYAN C M, KNOWLTON K F, KOHN R A, PETERSON A B, SIMS J T, WU Z. Phosphorus feeding levels and critical control points on dairy farms. *Journal of Dairy Science*, 2003, 86(11): 3787-3795.

(责任编辑 岳梅)