

## 畜禽钙磷和微量元素营养研究进展

吴信<sup>1,2</sup>, 万丹<sup>1</sup>, 印遇龙<sup>1,2\*</sup>

- 1.中国科学院亚热带农业生态研究所, 亚热带农业生态过程重点实验室; 畜禽养殖污染控制与资源化技术国家工程实验室; 湖南省畜禽健康养殖工程技术研究中心, 长沙 410125;
- 2.中国科学院天津工业生物技术研究所, 天津 300308

**摘要:** 矿物元素在畜禽生长发育、新陈代谢、神经活动、免疫功能、内分泌等几乎所有的生命活动过程中都发挥着重要的生理作用,分为钙、磷、钠、镁等常量元素和铁、锰、钴、铜等微量元素。某种矿物元素摄入不足或在体内过量蓄积、矿物元素间比例失调,都将引起严重后果。随着畜禽养殖业的集约化规模化发展,饲用矿物元素用量迅速增加,但存在不合理使用的情况,造成了资源浪费和环境污染。因此,在满足畜禽营养需要量的前提下,合理地使用矿物元素剂型及剂量,实现降低矿物元素经畜禽粪污向环境中的排放量,不仅利于集约化畜禽养殖业的发展,同时也能有效降低畜禽粪污中的重金属含量,为种植业提供优良的有机肥来源,维护生态系统的平衡,促进种植业和养殖业的可持续健康发展。基于此,以畜禽体内含量最高的常量元素钙磷和微量元素为切入点,介绍了饲用矿物元素的应用现状、畜禽矿物元素基础需要量及合适的添加范围,着重综述了新型饲用微量元素的开发与应用进展,并探讨了矿物元素动态饲喂模式的可行性及有效性,以期合理利用矿物元素资源及进一步解决全球生态农业研究的畜禽矿物元素导致的环境污染提供参考。

**关键词:** 微量元素; 营养需要量; 微量元素络合物; 生态系统平衡; 环境污染

DOI: 10.19586/j.2095-2341.2021.0124

中图分类号: S815 文献标识码: A

## Research Progress on Calcium, Phosphorus and Trace Elements Nutrition in Livestock and Poultry

WU Xin<sup>1,2</sup>, WAN Dan<sup>1</sup>, YIN Yulong<sup>1,2\*</sup>

1. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region; National Engineering Laboratory for Pollution Control and Waste Utilization in Livestock and Poultry Production; Hunan Provincial Engineering Research Center for Healthy Livestock and Poultry Production; Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China;
2. Tianjin Institute of Industrial Biotechnology, Chinese Academy of Sciences, Tianjin 300308, China

**Abstract:** Mineral elements play an important physiological role in almost all life activities of livestock and poultry, such as growth and development, metabolism, nerve activity, immune function, endocrine, etc. They are divided into major elements such as calcium, phosphorus, sodium and magnesium, and trace elements such as iron, manganese, cobalt and copper. Inadequate intake or excessive accumulation of certain mineral elements in the body and imbalance between mineral elements will cause serious consequences. With the intensive and large-scale development of livestock and poultry breeding industry, the consumption of mineral elements for feeding has increased rapidly, but there are some unreasonable uses, resulting in waste of resources and environmental pollution. Therefore, on the premise of meeting the nutritional requirements of livestock and poultry, rational use of mineral element dosage forms and dosage to reduce the emission of mineral elements into the environment through livestock and poultry manure is not only beneficial to the development of intensive livestock and poultry breeding, but also can effectively reduce the heavy metal content in livestock and poultry manure, provide excellent organic fertilizer sources for planting industry, maintain the balance of ecosystem and promote the sustainable and healthy development of planting and

收稿日期: 2021-06-28; 接受日期: 2021-07-14

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200900); 国家现代农业产业技术体系资助(CARS-35); 湖南农业科技创新基金项目(2019TD01)。

联系方式: 吴信 E-mail: wuxin@isa.ac.cn; \* 通信作者 印遇龙 E-mail: yinyulong@isa.ac.cn

breeding industry. Based on this, taking calcium and phosphorus, which are major elements with the highest content in livestock and poultry, and trace elements as the breakthrough point, the application status of feeding mineral elements, basic requirements and appropriate adding range of mineral elements of livestock and poultry were introduced, the development and application progress of new feeding trace elements was emphatically summarized, and the feasibility and effectiveness of dynamic feeding mode of mineral elements was discussed, in order to provide reference for rational utilization of mineral elements resources and further solving environmental pollution caused by livestock and poultry mineral elements in global ecological agriculture research.

**Key words:** trace elements; nutrition requirements; microelement chelate; ecosystem balance; environmental pollution

作为不可再生资源,矿物元素在工业、农业、国防等领域均有广泛应用,其更是人类和动物机体所必需的营养素,分为常量元素和微量元素两类。人和动物体内含量大于0.01%的称为常量元素,包括钙、磷、钠、氯、钾、镁、硫等;人和动物体内含量在0.01%以下的称为微量元素,目前已发现机体必需的或可能必需的微量元素有16种,即铁、锰、钴、铜、锌、硒、钼、碘、氟、钒、镍、砷、铬、锂、硅、锡<sup>[1]</sup>。矿物元素在畜禽生长发育、新陈代谢、神经活动、免疫功能及内分泌等几乎所有的生命活动过程中都发挥着重要的生理作用。如果机体某种矿物元素摄入不足或在体内过量蓄积、矿物元素间比例失调,都将引发疾病甚至死亡等严重问题。世界饲料工业起源于20世纪40年代,随着世界经济和人口的快速发展以及人均生活水平的提高,饲料工业也得到了长足的发展,2016年全球饲料产量首次超过10亿t<sup>[2]</sup>。随着饲料工业和养殖业的集约化规模化发展,畜禽矿物元素用量迅速增加,导致矿物元素资源紧缺,同时,目前矿物元素在剂型与剂量的使用上存在较大问题,造成生态环境污染<sup>[1]</sup>。因此,亟需从源头控制矿物元素在养殖业中的应用,以满足畜禽的营养需要为出发点,形成既减少向环境中的排放,又能为种植业提供良好的有机肥料的可持续种养模式。

钙磷作为畜禽体内含量最高的矿物元素,在消化、吸收、代谢、利用、排泄五大营养过程中均存在复杂的交互关系<sup>[3]</sup>。微量元素虽在畜禽体内含量较少,但具有极其重要的生理功能,有助于维持畜禽机体健康、提高机体抗氧化和抗应激能力、提高畜禽肉品质等<sup>[4]</sup>。基于此,以钙磷和微量元素为切入点,介绍了饲用矿物元素的应用现状、畜禽矿物元素基础需要量及合适的添加范围,着重综述了新型饲用微量元素的开发与应用进展,并探讨了矿物元素动态饲喂模式的可行性及有效性,

以期合理利用矿物元素资源及进一步解决全球生态农业研究的畜禽矿物元素导致的环境污染提供参考。

## 1 我国饲料中钙磷和微量元素应用现状

饲料行业是现代畜牧业和水产养殖业发展的物质基础,同时连接着种植业,是农业产业链中的重要环节。近年来,国内饲料产量快速增长,从2012年的2.17亿t增长至2017年的2.85亿t<sup>[5]</sup>。饲料工业发展至今,面临着质量安全要求更严、资源环境约束更紧张的双重挑战。然而,由于饲料中矿物元素的不合理使用,致使钙、磷、铜、锌、镁、铁、锰等每年的环境排放量超过1 000万t<sup>[6]</sup>,已对土壤、水体等生态环境构成威胁,而伴随矿物元素存在于饲料中的有毒重金属镉、铅等更是一大安全隐患。对部分城市集约化养殖场的畜禽粪便取样调查的结果表明,部分区域的猪粪中铜、锌的超标率分别达59.84%和95.08%<sup>[7]</sup>。因此,在满足畜禽养殖营养需要量的情况下,科学合理的使用饲料中的矿物元素,实现降低养殖业中矿物元素的排放,是当前亟待解决的问题。

## 2 饲用钙磷和微量元素概况

饲用矿物元素主要有钙、磷、铜、锌、铁、锰、硒等。以猪为例,猪对钙的需要量在所有矿物元素中最高,一旦日粮供给不足或钙磷比例不当会直接影响猪的正常生长发育和生产水平<sup>[8]</sup>。因此,在配制猪日粮时,对于矿物元素,首先需要准确供给的就是钙,同时应添加相应比例的磷。微量元素对于畜禽的生长发育同样具有重要意义。在饲料中添加较高剂量的铜可以改善生猪和家禽对饲料中营养物质的消化吸收、促进生长激素的分

泌<sup>[9]</sup>,从而使其采食量增加等。饲料中铜含量过少,可能引起贫血、生长发育停滞;但向饲料中添加过量的铜,不仅提高生产成本,还会引起生猪的蓄积性铜中毒、导致其他二价金属元素吸收代谢异常,同时影响食品安全、造成生态环境污染<sup>[10]</sup>。所以,合理的铜添加在畜禽饲养过程中十分重要。饲料中硒缺乏会导致机体抗氧化功能异常,但饲料中硒过量也会对动物机体造成不良影响,甚至毒害作用<sup>[11]</sup>。向家禽日粮中添加外源锌(如ZnSO<sub>4</sub>)以满足日常营养需要,然而,因ZnSO<sub>4</sub>的利用效率低,只有6%的锌被留于体内,而94%的锌被排出体外,并在土壤中累积,对生态环境造成了严重的负担<sup>[12]</sup>。因此,探索畜禽矿物元素需要量和合适的添加范围,改进现有剂型的利用效率,对养殖业矿物元素源头控制至关重要。

### 3 畜禽钙磷和微量元素的需要量研究进展

#### 3.1 畜禽钙磷和微量元素基础需要量

体重、生长阶段是影响矿物元素基础需要量的重要因素。其次,蛋禽的产蛋量以及妊娠母猪的配种体重、胎次、产仔数等也是影响种畜禽矿物元素基础需要量的影响因素。参考猪营养需要(NRC,2012)<sup>[13]</sup>和家禽营养需要(NRC,1994)<sup>[14]</sup>,随着体重的增加,生长猪对矿物元素的基础需要量见表1,不同阶段家禽对矿物元素的基础需要量见表2。目前,除妊娠母猪和哺乳母猪的钙磷基础需要量考虑到母猪的初配体重、胎次、产仔数等因素外,母猪的微量元素基础需要量、种禽的钙磷基础需要量均未细化(表2、3)。因此,如何选择

合适的剂型与剂量的矿物元素,避免母猪和蛋禽的微量元素负平衡,确保繁殖潜能的最大化是当今动物营养研究的关注点之一。

#### 3.2 畜禽钙磷和微量元素的合适添加范围

根据我国畜禽养殖业的生产实际和环保因素,我国农业农村部2625号公告分别推荐和限制了畜禽中各种矿物元素的添加量(表4)。当前,饲料企业基本参考限量标准的上限进行饲料配方设计和产品开发。然而,该公告除了针对铜、锌有较严格的最高限量,对铁和锰的限量均较高,对钙磷暂无最高限量要求。其中,我国仔猪阶段铜的限量(125 mg·kg<sup>-1</sup>)仍高于欧盟的限量(25 mg·kg<sup>-1</sup>)。因此,需要对畜禽的矿物元素的合适添加量进行系统的研究,制订适合我国的合适添加范围。

#### 3.3 新型饲用微量元素开发与应用进展

饲用微量元素不仅与骨骼发育等畜禽生长发育密切相关,还可通过与机体内的蛋白质和其他物质相结合形成酶、激素、维生素等生物大分子,在机体内特别是繁殖阶段和快速生长及应激期间对内分泌、免疫等生命活动发挥重要的生理调控功能。目前,饲料中添加的微量元素主要是无机盐的形式,虽然价格便宜,但是稳定性差,易受饲料中其他成分的影响,且存在吸收利用率低等问题。而通过改变微量元素的结构,可以增加其吸收利用率,减少饲料中的添加量以及向环境的排放量,从而达到降低饲用矿物元素给生态环境等造成严重污染的目的。因此,亟需开发新型饲用微量元素。

锌具有改善肠道健康、增强机体抗应激能力的生理功能。研究表明,氧化锌能显著降低断奶仔猪腹泻率,但大量氧化锌没有被吸收而是直接

表1 生长猪日粮钙、磷和微量元素需要量(自由采食,90%干物质)<sup>[13]</sup>

Table 1 Dietary requirements of calcium, phosphorus and trace elements of growing pigs (free feeding, 90% dry matter)<sup>[13]</sup>

体重范围/kg	5~7	7~11	11~25	25~50	50~75	75~100	100~135
总钙/%	0.85	0.80	0.70	0.66	0.59	0.52	0.46
磷标准全肠道消化率/%	0.45	0.40	0.33	0.31	0.27	0.24	0.21
磷表观全肠道消化率/%	0.41	0.36	0.29	0.26	0.23	0.21	0.18
总磷/%	0.70	0.65	0.60	0.56	0.52	0.47	0.43
铜/(mg·kg <sup>-1</sup> )	6	6	5	4	3.5	3	3
铁/(mg·kg <sup>-1</sup> )	100	100	100	60	50	40	40
锰/(mg·kg <sup>-1</sup> )	4	4	3	2	2	2	2
锌/(mg·kg <sup>-1</sup> )	100	100	80	60	50	50	50

表2 家禽日粮钙、磷、微量元素需要量(自由采食,90%干物质)<sup>[14]</sup>

Table 2 Dietary requirements of calcium, phosphorus and trace elements of poultry (free feeding, 90% dry matter)<sup>[14]</sup>

	雏鸡	肉小鸡	肉中鸡	青年鸡	产蛋鸡
总钙/%	0.90	1.00	0.90	0.80	3.00
非植酸磷/%	0.40	0.45	0.35	0.35	0.32
铜/(mg·kg <sup>-1</sup> )	5	8	8	4	4
铁/(mg·kg <sup>-1</sup> )	80	80	80	60	60
锰/(mg·kg <sup>-1</sup> )	60	60	60	30	30
锌/(mg·kg <sup>-1</sup> )	40	40	40	35	35

表3 妊娠和泌乳母猪日粮微量元素需要量(自由采食,90%干物质)<sup>[13]</sup>

Table 3 Dietary requirements of trace element of pregnant and lactating sows (free feeding, 90% dry matter)<sup>[13]</sup>

	妊娠母猪	泌乳母猪
铁/(mg·kg <sup>-1</sup> )	80	80
锰/(mg·kg <sup>-1</sup> )	25	25
铜/(mg·kg <sup>-1</sup> )	10	20
锌/(mg·kg <sup>-1</sup> )	100	100

排出体外,并蓄积在土壤中,对环境造成重要的影响。通过在断奶仔猪日粮中添加高锌(3 000、2 000、1 000 mg·kg<sup>-1</sup>),42日龄后,测定粪便中锌的含量,高锌组中锌的含量分别是对照组(100 mg·kg<sup>-1</sup>)的13.6、9.9和4.6倍<sup>[15]</sup>。农业农村部2625号公告对氧化锌的添加量减少了用量,现代养殖生产中,为了更好地利用锌对机体的积极作用及减少对环境的危害,可考虑碱式氯化锌替代氧化锌。农业农村部饲料工业中心的研究结果表明,碱式氯化锌在抗腹泻和促生长方面具有比氧化锌更高的效率<sup>[15]</sup>,1 250 mg·kg<sup>-1</sup>碱式氯化锌能达到2 250 mg·kg<sup>-1</sup>氧化锌的效果,农业农村部已将碱式氯化锌作为抗腹泻锌源纳入2625号公告,为行业替代氧化锌提供了新的方案。其他形式的氧化锌替代方案,如改性氧化锌、纳米氧化锌等方案在控制仔猪腹泻应用上也具有一定的作用。

近年来,采用氨基酸微量元素替代无机微量元素也是“减量增效”策略之一。研究表明,日粮中高水平的添加量会增加粪便中的排出量,而添加有机形式的微量元素,可减少它们经粪便的排出量<sup>[16]</sup>,日粮中用较少的有机形式的锌代替无机锌既满足了肉鸡和蛋的营养需求,又将矿物元素

对环境的影响降到最低<sup>[17]</sup>。本实验室研究发现,使用氨基酸金属螯合物能显著提高畜禽对微量元素的消化吸收率<sup>[18]</sup>。低剂量的有机铜替代无机铜,提高了铜的生物利用率,降低了粪便中铜的含量<sup>[19]</sup>,有机铜也可改善生长后期畜禽肉品质。在肉鸡日粮中添加有机铜——赖氨酸铜(250 mg·kg<sup>-1</sup>)显著降低在十二指肠和空肠内容物的锌的溶解度<sup>[20]</sup>;肉鸡日粮中50~75 mg·kg<sup>-1</sup>羟基蛋氨酸螯合锰可有效替代100 mg·kg<sup>-1</sup>硫酸锰<sup>[21]</sup>。使用有机铁饲喂哺乳仔猪,与无机铁相比,仔猪体重、日增重以及血红蛋白和血液红细胞数含量等指标均显著增加,有机铁促进了铁的吸收与利用,降低排粪量和粪中排铁量<sup>[22]</sup>。研究发现,妊娠后期母仔日粮中采用有机铁Fe-CGly替代FeSO<sub>4</sub>,能显著改善妊娠后期母猪的胎盘铁沉积和铁代谢,改善母猪的繁殖性能,特别是仔猪的出生窝重<sup>[23]</sup>;螯合铁还可增强幼龄期免疫力以及减少肠道刺激<sup>[24-25]</sup>。

微量元素络合物配体的选择对其功能性也具有重要的影响。本实验室研究发现,不同来源的硒对蛋鸡产蛋性能影响区别较大<sup>[26]</sup>;锌和铁等与多糖等植物天然产物络合后具有多种兼具天然产物和微量元素的功能性生理作用<sup>[27]</sup>。总之,与传统无机微量元素相比,饲料中选用新型微量元素更加高效安全,可一定程度上降低微量元素的排放。

#### 4 钙磷和微量元素机体内动态规律与精准化饲喂

机体对矿物元素等营养物质的消化、吸收和利用存在明显的空间分布差异,矿物元素之间存在协同与拮抗作用,基于此规律提出了动态营养及其饲喂模式<sup>[28]</sup>。本实验室研究表明,机体铁稳态受生物钟调控,一天中,仔猪09:00肝脏铁储存浓度最高,15:00血清铁浓度最高,且与铁吸收、代谢密切相关的基因DMT1、DCYTB、TfR和HAMP均呈现动态节律变化<sup>[29]</sup>;相应地节律性补铁影响猪的铁吸收和沉积<sup>[30]</sup>;妊娠后期动态添加钙显著缩短了母猪的产程,有效提高了母猪的繁殖性能<sup>[31]</sup>。在家禽中的研究表明,蛋鸡钙和锌动态饲喂影响了钙、锌和磷3种元素在蛋鸡体内不同器官和组织间的调运节律,以及蛋鸡体内钙与

表 4 我国畜禽钙、磷和微量元素推荐添加量和最高限量

Table 4 Recommended addition and maximum limit of calcium, phosphorus and trace elements of livestock and poultry in China

元素	化合物名称	在配合饲料或全混合日粮中推荐添加量 (以元素计,mg·kg <sup>-1</sup> )	在配合饲料或全混合日粮中的最 高限量(以元素计,mg·kg <sup>-1</sup> )
钙/%	碳酸钙	猪:0.4~1.1;牛:0.2~0.8;羊:0.2~0.7; 肉禽:0.6~1.0;蛋禽:0.8~4.0	暂无
	氯化钙	同上	
	乳酸钙	同上	
磷/%	磷酸氢钙	猪:0~0.55;牛:0~0.38;羊:0~0.3; 肉禽:0~0.45;蛋禽:0~0.4	暂无
	磷酸二氢钙	同上	
	磷酸三钙	同上	
铜/(mg·kg <sup>-1</sup> )	硫酸铜	猪:3~6;牛:10;羊:7~10; 家禽:0.4~1.0	仔猪(≤25 kg):125 开始反刍之前的犊牛:15 其他牛:30 绵羊:15 山羊:35 甲壳类动物:50 其他动物:25 (单独或同时使用)
	碱式氯化铜	猪:2.6~5;鸡:0.3~0.8	
铁/(mg·kg <sup>-1</sup> )	硫酸亚铁	猪:40~100;牛:10~50;羊:30~50;鸡:35~120	仔猪(断奶前):250 mg·头 <sup>-1</sup> ·日 <sup>-1</sup> 家禽:750 牛:750 羊:500 宠物:1 250 其他动物:750(单独或同时使用)
	富马酸亚铁	同上	
	柠檬酸亚铁	同上	
	乳酸亚铁	同上	
锰/(mg·kg <sup>-1</sup> )	硫酸锰	猪:2~20;肉牛:20~40;奶牛:12; 肉鸡:72~110;蛋鸡:40~80	畜禽:150 (单独或同时使用)
	氧化锰	猪:2~20;肉鸡:86~132	
	氯化锰	猪:2~20;肉鸡:74~113	
锌/(mg·kg <sup>-1</sup> )	硫酸锌	猪:40~80;肉牛:30;奶牛:40; 肉鸡:120;蛋鸡:40~80	仔猪(≤25 kg):110 母猪:100 其他猪:80 犊牛代乳料:180 水产动物:150 宠物:200 其他动物:120 (单独或同时使用)
	氧化锌	猪:80;肉牛:30;奶牛:40;肉鸡:80~120	
	蛋氨酸锌络合物	猪:42~80;肉鸡:54~120	

注:数据来源:农业农村部2625号公告。

锌元素之间的昼夜变化,调节钙、锌和磷元素在蛋鸡体内的稳态,影响了钙、锌和磷在产蛋鸡血清和胫骨昼夜变化及蛋黄中的沉积规律和沉积水平<sup>[32]</sup>。这提示动态饲喂模式可一定程度上避免矿物元素间的拮抗作用,进而提高利用率。

## 5 展望

随着畜牧业不断进步和发展,饲料中钙磷和微量元素需要量更趋于精准化。建立适合我国国

情的畜禽矿物元素添加量推荐标准,开发高效的矿物元素产品,有效地降低畜禽饲料中的矿物元素含量,降低或者平衡粪污中的矿物元素排放量,构建养殖矿物元素安全与高效利用的理论、方法和技术体系,减少畜禽养殖排泄物对环境的污染是关乎我国畜禽养殖业的可持续发展、农业生态环境的维护的重要举措<sup>[33-34]</sup>。因此,需要进一步完善矿物元素有效性评估模型,精确评价动物不同阶段矿物元素的有效需要量,修订饲料中矿物元素添加标准;同时,在研究功能性氨基酸和矿物元素吸收与分布规律基础上,进一步研发并筛选出高效安全的矿物元素添加剂产品,降低畜禽排泄物中的重金属元素的含量。

### 参 考 文 献

- [1] 舒绪刚, 吴信, 王继华. 饲用矿物元素配合物的研究与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [2] 范春旭. 2017年奥特奇全球饲料调查报告[J]. 中国畜牧业, 2017(6):42-43.
- [3] 杨小军, 颜家坤, 虎千力, 等. 家禽矿物元素营养势调控技术研究进展[J]. 饲料工业, 2020, 41(17):1-8.
- [4] 贾刚, 田刚, 方热军, 等. 单胃动物微量元素营养研究进展[M]. 动物营养学报, 2020, 32(10):4659-4673.
- [5] 中商产业研究院. 中国饲料行业市场规模及发展前景分析: 2020年饲料产量将突破30000万吨[EB/OL]. <https://www.askci.com/news/chanye/20180613/0920101124611.shtml>. (2018-06-13)[2021-07-13].
- [6] 余玥. 生长猪对蛋白原料钙磷标准全肠道消化率的评价及植酸酶的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 博士学位论文, 2017.
- [7] 贾武霞, 文炯, 许望龙, 等. 我国部分城市畜禽粪便中重金属含量及形态分布[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(4): 764-773.
- [8] 宁国, 韩红秀. 猪体对钙的需要和钙缺乏症及防治对策[J]. 国外畜牧学(猪与禽), 2007(3):66-67.
- [9] 刘强. 日粮中不同铜水平对生长肥育猪影响的研究[D]. 江苏扬州: 扬州大学, 硕士学位论文, 2006.
- [10] 谭新. 猪排泄物中氮、磷、铜对周围环境的影响及其营养调控措施[D]. 长沙: 湖南农业大学, 硕士学位论文, 2008.
- [11] 吴信, 孟田田, 万丹, 等. 硒在畜禽养殖中的应用研究进展[J]. 生物技术进展, 2017, 7(5):428-432.
- [12] LI L, LI P, CHEN Y, *et al.* Zinc-bearing zeolite clinoptilolite improves tissue zinc accumulation in laying hens by enhancing zinc transporter gene mRNA abundance[J]. Anim. Sci. J., 2015, 86(8):782-789.
- [13] NRC. Nutrient requirements of swine[M]. Washington DC: National Academy Press, 2012.
- [14] NRC. Nutrient requirements of poultry[M]. Washington DC: National Academy Press, 1994.
- [15] 郭小权, 胡国良, 曹华斌, 等. 高锌日粮对断奶仔猪血清锌和粪便排泄锌含量的影响[J]. 江西农业大学学报, 2009(5): 789-792.
- [16] YENICE E, MIZRAK C, GÜLTEKIN M, *et al.* Effects of organic and inorganic forms of manganese, zinc, copper, and chromium on bioavailability of these minerals and calcium in late-phase laying hens[J]. Biol. Trace Elem. Res., 2015, 167(2):300-307.
- [17] AO T, PIERCE J. The replacement of inorganic mineral salts with mineral proteinates in poultry diets[J]. World Poult. Sci. J., 2013, 69(1): 5-16.
- [18] 李丽立, 张彬, 印遇龙, 等. 氨基酸螯合物在畜禽集约化养殖业中的应用[J]. 中国家禽, 2009, 31(15):32-33.
- [19] 单玉萍, 单安山. 氨基酸铜在猪生产中的研究与应用[J]. 中国畜牧兽医, 2011, 38(4):20-22.
- [20] PANG Y, APPLGATE T J. Effects of dietary copper supplementation and copper source on digesta pH, calcium, zinc, and copper complex size in the gastrointestinal tract of the broiler chicken[J]. Poult. Sci., 2007, 86(3):531-537.
- [21] MENG T T, GAO L M, XIE C Y, *et al.* Manganese methionine hydroxy analog chelated affects growth performance, trace element deposition and expression of related transporters of broilers[J]. Anim. Nutr., 2021, 7(2): 481-487.
- [22] 张彬, 李丽立, 李铁军, 等. 不同铁源对哺乳仔猪生长、代谢和环境的影响[J]. 应用生态学报, 2000, 11(1): 91-94.
- [23] WAN D, ZHANG Y M, WU X, *et al.* Maternal dietary supplementation with ferrous N-carbamylglycinate chelate affects sow reproductive performance and iron status of neonatal piglets[J]. Animal, 2018, 12(7):1372-1379.
- [24] FENG J, MA W Q, XU Z R, *et al.* Effects of iron glycine chelate on growth, haematological and immunological characteristics in weanling pigs[J]. Anim. Feed Sci. Technol., 2007, 134(3-4): 261-272.
- [25] JAROSZ Ł, KWIECIEŃ M, MAREK A, *et al.* Effects of feed supplementation with glycine chelate and iron sulfate on selected parameters of cell-mediated immune response in broiler chickens[J]. Res. Vet. Sci., 2016, 107:68-74.
- [26] MENG T T, LIN X, XIE C Y, *et al.* Nanoselenium and selenium yeast have minimal differences on egg production and Se deposition in laying hens[J]. Biol. Trace Elem. Res., 2021, 199(6):2295-2302.
- [27] XIE C Y, ZHANG Y M, NIU K M, *et al.* Enteromorpha polysaccharide-zinc replacing prophylactic antibiotics contributes to improving gut health of weaned piglets[J/OL]. Anim. Nutr., 2021: 008[2021-07-14]. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2021.01.008>.
- [28] 吴信, 印遇龙. 单胃动物营养学的动态概念及其发展[J]. 农业现代化研究, 2015, 36(3): 321-326.
- [29] ZHOU X, WAN D, ZHANG Y, *et al.* Diurnal variations in polyunsaturated fatty acid contents and expression of genes

- involved in their *de novo* synthesis in pigs[J]. *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, 2017, 483(1):430-434.
- [30] ZHANG Y, WAN D, ZHOU X, *et al.* Diurnal variations in iron concentrations and expression of genes involved in iron absorption and metabolism in pigs[J]. *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, 2017, 490(4):1210-1214.
- [31] DONG Z, LI L, ZHANG Y, *et al.* Effects of circadian iron administration on iron bioavailability and biological rhythm in pigs[J]. *J. Sci. Food Agric.*, 2021, 101(7):2712-2717.
- [32] GAO L, LIN X, XIE C, *et al.* The time of calcium feeding affects the productive performance of sows [J/OL]. *Animals* (Basel), 2019, 9(6):337[2021-07-18]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6617234/>. DOI: 10.3390/ani9060337.
- [33] LIN X, MENG T, YANG T, *et al.* Circadian zinc feeding regime in laying hens related to laying performance, oxidation status, and interaction of zinc and calcium [J]. *Poult. Sci.*, 2020, 99(12):6783-6796.
- [34] LIN X, LIU Y L, XIE C Y, *et al.* Circadian rhythms and dynamic dietary calcium feeding affect laying performance, calcium and phosphorus levels in laying hens [J]. *Biol. Rhythm Res.*, 2018, 49(2): 227-236.