

# 微量元素氨基酸螯合物的生物学效价研究进展

虞俊翔, 孙南耀, 王光然, 胡晓波, 谢明勇\*

(南昌大学 食品科学与技术国家重点实验室, 江西 南昌 330047)

**摘要:** 微量元素氨基酸螯合物作为第3代微量元素补充剂, 具有生物学效价高、生化稳定性强、抗病能力强、环境污染小及易于吸收等优点, 发展前景广阔。本文就微量元素氨基酸螯合物的营养生理功能、生物学效价的评定方法与影响因素及其在养殖业中的应用进行了综述。

**关键词:** 螯合物; 微量元素; 生物学效价

## Advances in Bioavailability of Amino Acid-Microelement Chelates

YU Junxiang, SUN Nanyao, WANG Guangran, HU Xiaobo, XIE Mingyong\*

(State Key Laboratory of Food Science and Technology, Nanchang University, Nanchang 330047, China)

**Abstract:** Amino acid-microelement chelates, the third generation of trace element supplement, with multiple biological functions such as high bioavailability, good biochemical stability, strong disease resistance, less environmental pollution and fast absorption, have broad prospects. This paper reviews the nutritional and physiological functions and application in animal breeding of amino acid-microelement chelates, methods for evaluating their bioavailability and its influencing factors.

**Key words:** chelate; trace element; bioavailability

中图分类号: TS201.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2015) 23-0367-05

doi:10.7506/spkx1002-6630-201523065

微量元素的生物学利用率一般与其存在形式密切相关, 自然界中微量元素以无机和有机2种形态存在。微量元素补充剂有第1代无机盐类、第2代有机酸盐类和第3代微量元素氨基酸螯合物 (amino acids microelements chelate, Aa-M) 产品, Aa-M作为新一代理想的有机微量元素添加剂, 其多种生物学功能及其高生物学效价已受到广泛重视, 近年来在国内外发展较快, 成为微量元素营养研究领域的热点之一<sup>[1-2]</sup>。

Aa-M是由微量元素金属离子与氨基酸经过络合反应生成的具有环状结构的配位络合物或螯合物。金属元素的配位数差异使得所形成的螯合物中金属离子与氨基酸螯合剂的物质的量比一般为1:1~1:3<sup>[3]</sup>。金属阳离子与氨基酸中的氨基和羧基分别形成配位键和离子键, 构成五元或六元螯环 ( $\alpha$ -氨基酸螯合物为五元环,  $\beta$ -氨基酸螯合物为六元环), 其结构如图1和图2所示。由于多数Aa-M具有接近于动物体内天然形态的元素补充剂的特征: 化学稳定性强、易于消化吸收、无刺激性、无毒害、质量增加明显, 被认为具有较高的生物学效价<sup>[4-6]</sup>。目前, Aa-M的研究与应用范围已达到一个新的层次。

收稿日期: 2015-06-30

基金项目: 江西省科技支撑计划项目 (20151BBF60040); 江西省自然科学基金项目 (20132BAB204002);

江西省重大科技创新研究项目 (20124ACF00400); 江西省教育厅2011年度产学研合作项目 (GJJ11002)

作者简介: 虞俊翔 (1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为功能食品与保健。E-mail: jxyu1210@163.com

\*通信作者: 谢明勇 (1957—), 男, 教授, 博士, 研究方向为食品营养学、食品安全、功能保健食品。E-mail: myxie@ncu.edu.cn

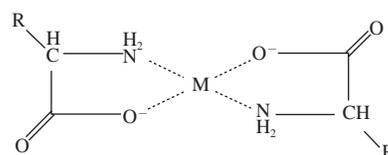


图1  $\alpha$ -氨基酸微量元素螯合物结构图

Fig.1 Structure of  $\alpha$ -amino acid-microelement chelate

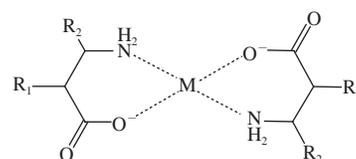


图2  $\beta$ -氨基酸微量元素螯合物结构图

Fig.2 Structure of  $\beta$ -amino acid-microelement chelate

## 1 Aa-M的生物学优越性

Aa-M生物学优越性在理化性质稳定、吸收代谢机制良好、生理功能多样等方面得到了广泛体现。

### 1.1 理化性质稳定

微量元素与氨基酸形成螯合物后,分子内电荷趋于中性,使其在动物体内受pH值的影响较小,在胃的酸性环境内能保持较好的稳定性。游离形态的微量元素在进入动物机体消化道时,与氨基酸类物质常形成不稳定的物质的量比为1:1的化合物,一旦受到强配位体影响后,金属离子将与其他配合物(如磷酸、植酸、草酸、多酚类物质、抗坏血酸等)形成无效螯合物<sup>[7]</sup>。而氨基酸微量元素螯合物稳定常数适中,具有抗酸能力,能克服强配位体的不利影响,避免对维生素的氧化分解作用<sup>[8]</sup>。

另外,在反刍动物体内,氨基酸螯合物由于其稳定的特性而不会受到瘤胃微生物的影响,且不会形成任何难溶物质<sup>[9]</sup>。例如,在反刍动物日粮中添加的CuSO<sub>4</sub>经瘤胃微生物作用后易形成亚硫酸盐和硫化物,它们与饲料中其他成分作用后在小肠易形成极难溶的复合物沉淀,导致铜的利用率极大降低,而氨基酸螯合铜则可直接通过瘤胃而不会受瘤胃微生物的影响<sup>[10]</sup>。

### 1.2 吸收代谢机制良好

微量元素被利用的过程通常依次为:口服、溶解、吸收、代谢、沉积。Aa-M的吸收率比无机微量元素高30%左右<sup>[11]</sup>,原因在于二者的吸收转运方式不同。研究表明,一般的游离金属元素需要在相关辅酶的运输下,与氨基酸等物质结合后才被机体吸收(例如,锌必须和胰腺分泌的小分子质量蛋白配体形成络合物才能被吸收,而不能以离子的形式转运);而Aa-M是利用配位体(氨基酸或肽)的转运系统吸收,而不是游离金属元素的转运系统,故不必先同其他物质结合<sup>[12-13]</sup>。金属微量元素离子能以配位键或离子键与氨基酸配位体键合,使自身被保护在络合物的中心,通过配位体的转运系统,以络合物形式穿过黏膜细胞膜、黏膜细胞和基底细胞膜进入血液,从而减弱金属微量元素间的拮抗作用,大大提高金属微量元素的利用率。另外,微量元素被动物机体吸收的效率还受诸多因素影响,如:溶解度、离子形态、浓度以及饲料中其他成分的作用<sup>[14]</sup>。Aa-M在机体环境条件下溶解性较好,同时,相对分子质量小于800的螯合物均能通过肠道黏膜。

### 1.3 营养功能多样

Aa-M既是机体快速吸收微量元素的重要形式,又是体内合成蛋白质环节的中间物质,因此,其具有多种优越的营养特性与功效(表1)。

表1 Aa-M的营养生理功能

Table 1 Nutritional and physiological functions of amino acid-microelement chelates

营养特性	功能效果	文献
促吸收能力	Aa-M的稳定常数介于4~15之间,降低了pH值、纤维、脂类和胃酸等因素在消化过程中对金属离子的影响,利于机体对金属离子的充分转运和利用。另外,初生动物能在其特殊生理时期,转以胞饮方式来吸收大分子质量的螯合物	[10-11]
缓冲能力	氨基酸配体和金属离子在介质中的络合反应使微量元素的质量浓度处于缓冲环境中,以减轻饲料中微量元素对维生素的氧化分解作用。例如,氨基酸螯合锌与无机锌相比,可提高20%的VA留存率、提高45%的VC留存率	[15-16]
抗病、杀菌能力	Aa-M与动物体内生物酶的形态在结构上有类似之处,利于提高动物机体的免疫应答水平,增强机体抗病能力。实验表明,粮饲中添加氨基酸锌比添加氧化锌对牛瘟疹病毒-1的抗体滴度高30%,蛋氨酸锌组的牛在感染传染性鼻气管炎病毒后的恢复速度明显快于无机锌组;另外,氨基酸螯合锌对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌和枯草芽孢杆菌具有一定的抑菌活性	[17-20]
抗应激能力	Aa-M具有缓解动物应激的作用,在接种、去势、疾病、变更日粮和严酷气候时,饲喂Aa-M有良好作用。蛋鸡在补充蛋氨酸锌后,对高温应激和低钙日粮有良好的适应性	[21-22]
抗氧化能力	Aa-M能有效减少动物体内自由基的形成,提升机体抗氧化能力,防止脂质过氧化。补充氨基酸螯合铁可不同程度提高断奶仔猪血清中琥珀酸脱氢酶、黄嘌呤氧化酶、氧化氢酶和碱性磷酸酶的活力	[23-24]
促催化能力	Aa-M具有的拟酶结构或参与酶的组成使其能发挥酶的作用。氨基酸螯合铜能促进铜-锌超氧化物歧化酶的催化反应,并且很可能是作为独立单元来增加该酶的催化反应速率;经体外酶学实验发现,在血红素合成酶体系中,甘氨酸螯合铁对于δ-氨基-γ-酮戊酸合成酶有明显的反馈抑制作用,利于血红素的生成	[6-10]
安全性	Aa-M本身作为体内生化反应的中间产物,对机体产生的不良作用少,半数致死率(lethal dose, 50%, LD <sub>50</sub> )高于相应的无机盐类微量元素补充剂(有报道苏氨酸锌的大鼠急性LD <sub>50</sub> 为2 710~3 160 mg/kg,硫酸锌LD <sub>50</sub> 为2 150 mg/kg),与无机盐微量元素补充剂相比安全性更高	[25-26]
适口性	多数Aa-M具有氨基酸特有的鲜香味,具有诱食作用,适口性好	[11]

## 2 Aa-M的生物学效价

生物学效价这一概念本身是抽象的,它可以包括消化率、代谢吸收率、可利用率和有效性等多重含义,因此也称为生物学利用率。生物学利用率可总结为营养素被动物采食,参与机体代谢过程后,在动物体内贮存部分占采食总量的比值<sup>[27]</sup>。Aa-M独特的结构使其相比传统的无机盐类和简单有机盐类微量元素补充剂具有更高的生物学效价。

### 2.1 Aa-M的生物学效价评定方法

Aa-M的生物学效价评定方法一般有参比法、同位素示踪法和平衡实验法。评定指标的选择主要有血液学参数指标、骨骼(胫骨)发育参数指标、生产性能指标和外观指标等。不同的研究方法和评定指标均有各自的优点和缺点,应根据实际情况和实验目的采用不同的手段。通常通过计算营养素的相对生物利用率来评价Aa-M的生物学效价。

$$\text{相对利用率}/\% = \frac{\text{研究物利用量}}{\text{标准物利用量}} \times 100 \quad (1)$$

参比法的应用目前最为多见,它包括斜率比法、标准曲线法、三点法等,是一类用以研究相对生物学利用率的方法。参比法通常需选取一类性态稳定,被广泛认可具有传统添加效益的物质作为标准物,如ZnSO<sub>4</sub>、ZnO、FeSO<sub>4</sub>、CuSO<sub>4</sub>等<sup>[6,28-29]</sup>。由于评定指标与标准物和研究物的添加量均具有线性关系,可通过考察2种物

质的添加效应来比较得到研究物相对于标准物的生物学效价。

同位素示踪法是通过测定标记的微量元素在动物体内组织中的含量来评定营养素的生物学效价，它可以反映螯合物中的微量元素进入体内的分布情况。这种方法可以提高实验测定的准确性，缩短实验周期，理论上最为理想，但由于使用该法的饲料成本和设备需求很高，使得它在有机微量元素和氨基酸微量元素螯合物的生物学利用率测定中的应用并不多见。

平衡实验法也叫表观吸收率评定法，原理和所需实验设备都较简单。该法是在一段时间内，通过测定动物的微量元素采食量和排出量，来得到动物对营养素的吸收利用率。

$$\text{吸收利用率}/\% = \frac{\text{元素摄入量} - \text{元素排出量}}{\text{元素摄入量}} \times 100 \quad (2)$$

该方法虽然是测定表观吸收率的经典方法，但由于在实验过程中动物的微量元素摄入量和排泄量很小，导致所测数据易受到误差干扰，用它来表示螯合物的生物学利用率存在较大的片面性。然而该方法在实施过程中动物始终处于自然状态，所得数据较贴近动物日常水平，可作为其他研究方法的参考基准<sup>[27]</sup>。

## 2.2 不同Aa-M生物学效价的比较

微量元素参与了酶的合成、机体骨骼发育，以及维持组织与免疫系统的完整性，虽然需求量小，却发挥了重要的生理功能<sup>[30]</sup>。Aa-M作为添加剂可以满足动物对各种微量元素的生理需要，同时产生对人畜健康和生态环境的双重益处。Aa-M目前主要有3种分类方法：1) 按照微量元素的种类可以分为氨基酸铁、氨基酸锌、氨基酸铜、氨基酸锰等螯合物，均能作为相应微量元素的补充剂；2) 按照氨基酸的种类可以分为蛋氨酸、赖氨酸、甘氨酸、苏氨酸等系列微量元素螯合物，其稳定性与氨基酸配体的配位能力成正比，与配体的体积成反比，配体的体积越大，螯合时的空间位阻越大；3) 按照氨基酸的特异性可以分为单一氨基酸螯合物与复合氨基酸螯合物如二肽铜、多肽锌等。单一氨基酸螯合物产品结构确定，性质较稳定，但生产成本高；复合氨基酸螯合物生产成本低，一般由蛋白质水解得到，组成不固定，易吸潮结块，易被氧化，稳定性差<sup>[31]</sup>。当前用于饲料添加剂生产的氨基酸螯合物主要有蛋氨酸的铁、铜、锰、锌、钴螯合物，赖氨酸的锌、铜螯合物，甘氨酸铁螯合物，苏氨酸锌螯合物等产品。针对特定动物、特定日粮、特定环境及特定阶段来选用相应Aa-M的研究取得了明显的效果，如氨基酸锌能提高生长育肥猪日体质量增加量、改善胴体品质<sup>[15,32]</sup>、促进水产动物的生产、提高水产动物的免疫力、存活率和饲料转化率<sup>[33-34]</sup>、还可避免反刍动物瘤胃中微生物的降解作用，具有一定的过瘤胃功能，改善其胴体品质<sup>[35]</sup>。氨基酸铁能调控动物体内激素代谢，

增强抗病力，提高仔猪成活率和窝产仔数<sup>[36-37]</sup>；氨基酸铜、锌可增强肉鸡的生长性能、免疫性能，改善鸡肉品质<sup>[38-39]</sup>，也可以提高蛋鸡的蛋孵化率和健雏率<sup>[40]</sup>。

表2 部分Aa-M的生物学利用率研究  
Table 2 Bioavailability of amino acid-microelement chelates

实验动物	饲料添加剂	相对利用率/%	研究方法	文献
大鼠	赖氨酸锌	165	采用斜率法，以硫酸锌为参比标准物，以敏感组织器官（肝脏、胎骨）锌浓度和血清锌浓度、血清碱性磷酸酶活性为判定指标，测定锌源的相对生物学效价	[27]
	蛋氨酸锌	165		
大鼠	甘氨酸铁	118.5	采用斜率法，以硫酸亚铁为参比标准物，通过检测血红蛋白、血清铁、血清铁蛋白和血清总铁结合力共4种铁营养敏感指标，测定氨基酸螯合铁的相对生物学效价	[6]
	赖氨酸铁	124.3		
大鼠	甘氨酸锌	124	采用同位素示踪法，以硫酸锌为对照，检测血浆中、大腿骨、全身的锌含量及血浆碱性磷酸酶的活性，评价其生物学利用率	[41]
哺乳仔猪	蛋氨酸铁	142.61	采用平衡实验法和斜率法，以硫酸亚铁为标准物，测定各阶段（每周）生长性能，并采血测定血红蛋白浓度、血细胞压积、免疫蛋白等参数，比较补铁剂对哺乳仔猪生长性能和血液生化指标的影响，左列数据以7 d所测血红蛋白浓度指标为例	[42]
	富马酸亚铁	141.27		
断奶仔猪	甘氨酸铁	160.3	采用剂量反应法，在基础日粮中分别添加甘氨酸铁与硫酸亚铁，以铁元素的消化率为参照，进行甘氨酸铁、硫酸亚铁的表现消化率和血液学参数的测定	[43]
	硫酸亚铁	143.7		
妊娠母猪	甘氨酸铁	142.15	采用线性回归分析法，以硫酸亚铁为参比物，以血红蛋白含量、血清铁含量等理化指标参数为指标，评价不同铁源对妊娠母猪的铁营养生物学效价，左列数据以母猪胎盘含铁量为例	[44]
肉鸡	蛋氨酸锌	229.1	采用线性回归分析法，以硫酸锌为对照，饲喂含蛋氨酸螯合物的日粮，取动物胎骨测灰分，以原子吸收光谱法测定胎骨中锌的总量。根据粗灰分质量、锌含量和日体质量增加量3项指标评价其生物学效价	[28]
		146.9		
		179		
肉鸡	羟基蛋氨酸锰	129.09	采用斜率法，以硫酸锰为对照，以胸腺指数、脾脏指数、法氏囊指数等免疫器官指数为指标，评价不同锰源对肉仔鸡免疫性能的影响	[45]
水貂	蛋氨酸铜	131.06	采用斜率法，以硫酸铜为参比标准物，以血清铜蓝蛋白活性和血清铜、锌超氧化物歧化酶活性为指标，测定蛋氨酸铜对于育成期水貂的生物学效价	[29]
		118.10		
银狐	甘氨酸铜	128.06	采用斜率法，以硫酸铜为对照，以育成期雌性银狐的生长性能、营养物质消化率及血液学参数为指标，评价不同铜源对其生物学效价方面的影响。左列数据以所报道超氧化物歧化酶含量为例	[46]
	蛋氨酸铜	107.21		
	柠檬酸铜	115.77		

对于氨基酸种类不同的同种微量元素Aa-M，经比较发现其均对该微量元素的功能作用起到了促进效果，相对利用率均在一个相近区间浮动。表2列出了部分Aa-M的相对利用率及其研究方法。多数研究表明，氨基酸种类不同的Aa-M其生物学效价及发挥的功能作用无明显差异，原因在于其统一的结构优势使其能更好地被动物体肠道吸收。对于微量元素种类不同的同种氨基酸配体的Aa-M，如羟基蛋氨酸铜、锌、铁、锰，研究发现，该配体相同的4种不同Aa-M的生物学利用率分别高于对应标准物，变化的显著程度为Aa-Zn≈Aa-Cu>Aa-Mn≈Aa-Fe<sup>[47]</sup>。总之，不同Aa-M对动物的作用效果差异不显著，使用低剂量的不同Aa-M来替代传统的高剂量无机盐制剂，有利于环境保护，也具有更高的生物学效益<sup>[48-50]</sup>。

## 2.3 影响Aa-M生物学效价的因素

Aa-M的生物学效价易被以下因素影响：产品质量、添加水平、日粮组成、动物种类、效价评定指标及标准参照物的选择等。例如，不同实验所使用的Aa-M产品质量以及所设定的微量元素添加水平均有不同，易造成实

验结果差异; 饲料中某些抑制剂或促进剂会造成不同元素之间的拮抗或互补影响, 也导致实验数据不能真实反映动物机体对其利用程度; 此外, 不同的动物、同种动物不同品种、同品种不同生理条件和生长阶段的动物都会对产品的吸收利用情况产生影响; 另外, 微量元素经体内代谢后作用于机体不同组织产生的特异性敏感指标不同, 采用不同研究方法和评定指标, 所得的结果可能也有略微差异甚至产生矛盾<sup>[51]</sup>; 实验持续的时间长短不一也会影响生物利用率的最终表达情况。

### 3 结 语

Aa-M是微量元素添加剂新一代产品, 其功能作用与积极意义毋庸置疑, 但目前仍存在一些问题, 限制了Aa-M的推广与发展。大量资料证明, 相比无机盐和有机酸盐类, 氨基酸螯合物的生物学效价更高且能有效促进动物生长。但也有研究表明, 赖氨酸锌、蛋氨酸锌与硫酸锌对断奶仔猪和羔羊具有相同的生物学效价<sup>[52-53]</sup>, 甚至还有学者以血红蛋白为评价指标来研究蛋氨酸铁的相对生物学效价时发现其仅为硫酸亚铁的68%<sup>[54]</sup>。可见Aa-M的相对生物学效价评定工作还有待科学全面的评价, 评定Aa-M的生物学效价不能仅以某一种微量元素的利用率来表达, 而应当是涵盖饲料产品的动物消化率、代谢利用率、体内组织留存率以及多种对象动物的健康状况和生产性能在内的一个综合指标, 需要一套完整的评定体系。如何使Aa-M生物学效价的研究结果更客观准确, 操作方式更简单, 成本消耗更低廉是今后需解决的问题。此外, 应继续深入研究Aa-M在机体内的作用机制, 揭示可能使其在动物体内获得高吸收利用的影响因素, 从理论上探明影响Aa-M生物学效价的原因。另外, Aa-M在饲料中的有效添加量、最佳添加比例也有待进一步研究。

### 参考文献:

- [1] 刘向伟, 刘祥银, 李华, 等. 饲料中微量元素添加剂的发展历程及应用研究现状[J]. 饲料工业, 2013, 34(19): 28-31.
- [2] 王晓春, 孙学良, 朱永信. 奶牛饲料添加剂种类及其应用[J]. 饲料与添加剂, 2014(1): 56.
- [3] PAUL M. Official publication of the association of american feed control officials incorporated[G]. 1998 Official publication. Chicago: AAFCO Press, 1998: 237-238.
- [4] 胡亮, 张明. 微量元素氨基酸螯合物在动物营养中的应用[J]. 上海畜牧兽医通讯, 2012(3): 61-63.
- [5] 江素梅. 氨基酸螯合物在食品安全及饲料中的应用前景[J]. 饲料研究, 2012(2): 30-32.
- [6] 周桂莲. 氨基酸螯合铁的营养作用机理和相对生物学效价[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2000: 61-70.
- [7] HURRELL R, EGLI I. Iron bioavailability and dietary reference values[J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 2010, 91(5): 1461S-1467S.
- [8] JOHNS P, MCEWEN J, PATEL G, et al. Liquid nutritional products comprising metal amino acid chelates: United States, US20140037798A1[P]. 2012-02-08 [2014-02-06]. <http://www.freepatentonline.com/y2014/0037798.html>.
- [9] SPEARS J W, KEGLEY E B, WARD J D. Bioavailability of organic, inorganic trace minerals explored[J]. Feedstuffs, 1991, 10(3): 200-204.
- [10] 孙海霞, 石宝明. 微量元素-氨基酸螯合物在动物生产中的研究与应用功效[J]. 河北农业大学学报, 2003, 26(增刊1): 173-176.
- [11] 江素梅, 蔡菊. 氨基酸螯合物的营养功能及其在水产养殖上的应用[J]. 饲料研究, 2013(3): 37-39.
- [12] ALLEN L H. Advantages and limitation of iron amino acid chelates as iron fortificants[J]. Nutrition Reviews, 2002, 60(7): 18-21.
- [13] 刘欣, 李奎, 周斌. 铁的生理学特性及吸收机制[J]. 饲料研究, 2011(6): 38-39.
- [14] 黄金昌, 林化成, 袁卫东. 有机微量元素在动物生产的应用与研究[J]. 湖南饲料, 2014(1): 42-45.
- [15] van HEUGTEN E, SPEARS J W, KEGLEY E B, et al. Effects of organic forms of zinc on growth performance, tissue zinc distribution, and immune response of weanling pigs[J]. Journal of Animal Science, 2003, 81(8): 2063-2071.
- [16] 刘兵, 尚沁沁, 熊平文, 等. 蛋氨酸锌的生物学功能及其在家禽生产中的应用[J]. 中国畜牧杂志, 2015, 51(1): 73-76.
- [17] MARCHETTI M, ASHMEAD D, TOSSANI N, et al. Comparison of the rates vitamin degradation when mixed with metal sulphates or metal amino acid chelates[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2000, 13(6): 875-884.
- [18] 李伟, 邓波, 刘婉盈, 等. 氨基酸螯合铁在断奶仔猪中的应用研究进展[J]. 饲料工业, 2012, 33(22): 7-10.
- [19] 龚毅, 胡晓波, 彭丽霞, 等. 锌氨基酸螯合物的抑菌活性研究[J]. 食品科学, 2009, 30(17): 84-87.
- [20] 刘翠艳, 淡秀荣, 左龙. 蛋氨酸锌在反刍动物生产中的应用[J]. 中国牛业科学, 2014, 40(5): 41-43.
- [21] 丁永富. 氨基酸螯合铁预混料在母猪、仔猪生产中的应用[J]. 福建畜牧兽医, 2003, 25(2): 29.
- [22] KIENHOLZ E W, MORENG R E, FLINCHUM J D. Zinc methionine for stressed laying hens[J]. Poultry Science, 1992, 71(5): 829-832.
- [23] 邓志刚, 潘玉春, 张银芝, 等. VE和有机微量元素对猪肉质的影响研究[J]. 饲料广角, 2011(1): 19-23.
- [24] 马文强, 冯杰. 甘氨酸铁对断奶仔猪血清氧化酶活力及生化指标的影响[J]. 饲料工业, 2008, 29(22): 28-30.
- [25] HU Xiaobo, GONG Yi, LI Lei, et al. Safety evaluation of zinc threoninate chelate[J]. International Journal of Toxicology, 2010, 29(4): 372-379.
- [26] 冯建萍, 王光然, 胡晓波, 等. 高剂量苏氨酸锌和硫酸锌对大鼠胚胎-胎仔发育毒性的比较[J]. 食品科学, 2014, 35(17): 241-244. doi: 10.7506/spkx1002-6630-201417046.
- [27] 董晓慧, 韩友文, 周桂莲, 等. 不同锌源生物学效价的研究[J]. 动物营养学报, 2004, 16(3): 21-23.
- [28] 周锦兰, 俞开潮, 吴灵英, 等. 蛋氨酸锌螯合物合成的改进及饲喂肉鸡的生物学效价的对比研究[J]. 粮食与饲料工业, 2002(7): 35-36.
- [29] 吴学壮, 张铁涛, 于淼, 等. 育成期水貂不同铜源相对生物学利用率和血清生化指标的研究[J]. 动物营养学报, 2015, 27(2): 485-494.
- [30] FAVERO A, VIEIRA S L, ANGEL C R, et al. Development of bone in chick embryos from Cobb 500 breeder hens fed diets supplemented with zinc, manganese, and copper from inorganic and amino acid-complexed sources[J]. Poultry Science, 2013, 92(2): 402-411.
- [31] 王丽霞. 氨基酸微量元素螯合物的研究与应用[J]. 氨基酸和生物资源, 2013, 35(1): 46-50.

- [32] CARLSON M S, BOREN C A, WU C, et al. Evaluation of various inclusion rates of organic zinc either as polysaccharide or proteinate complex on the growth performance, plasma and excretion of nursery pigs[J]. *Journal of Animal Science*, 2004, 82(5): 1359-1366.
- [33] LIN Shimei, LIN Xin, YANG Yang, et al. Comparison of chelated zinc and zinc sulfate as zinc sources for growth and immune response of shrimp (*Litopenaeus vannamei*)[J]. *Aquaculture*, 2013, 406/407: 79-84.
- [34] HERNÁNDEZ A J, SATOH S, KIRON V. Supplementation of citric acid and amino acid chelated trace elements in low-fish meal diet for rainbow trout affect growth and phosphorus utilization[J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2012, 43(5): 688-696.
- [35] SPEARS J W, KEGLEY E B. Effect of zinc source (zinc oxide vs zinc proteinate) and level on performance, carcass characteristics, and immune response of growing and finishing steers[J]. *Journal of Animal Science*, 2002, 80(10): 2747-2752.
- [36] 胡培, 程茂基, 江涛, 等. 甘氨酸铁对断奶仔猪生长性能的影响[J]. *饲料工业*, 2011, 32(13): 29-32.
- [37] COCATO M L, TRINDADE N M A, BERTO D A, et al. Bioavailability of iron in different compounds for piglets weaned at 21 days old[J]. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 2008, 37(12): 2129-2135.
- [38] 王福明. 氨基酸螯合锌对凉山岩鹰鸡生产性能和免疫功能的影响[J]. *饲料工业*, 2012, 33(24): 5-7.
- [39] CHOWDHURY S D, PAIK I K, NAMKUNG H, et al. Responses of broiler chickens to organic copper fed in the form of copper-methionine chelate[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2004, 115(3/4): 281-293.
- [40] 曲湘勇, 唐湘薇, 魏艳红, 等. 不同锌源对绿壳蛋鸡产蛋性能和蛋黄锌含量的影响[J]. *中国饲料*, 2013(2): 32-34.
- [41] SCHLEGEL P, WINDISCH W. Bioavailability of zinc glycinate in comparison with zinc sulphate in the presence of dietary phytate in an animal model with Zn labeled rats[J]. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 2006, 90 (5/6): 216-222.
- [42] 江剑波, 段吉礼, 李华慧. 三种补铁剂对哺乳仔猪生长性能和血液生化指标影响的研究[J]. *国外畜牧学*, 2015, 35(3): 33-36.
- [43] ETTLE T, SCHLEGEL P, ROTH F X. Investigations on iron bioavailability of different sources and supply levels in piglets[J]. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 2008, 92(1): 35-43.
- [44] 董冬华, 张桂国, 杨维仁, 等. 不同铁源及水平对妊娠母猪铁营养状况和抗氧化性能的影响[J]. *动物营养学报*, 2014, 26(5): 1180-1188.
- [45] 于德平. 不同锰源对肉仔鸡生产性能和免疫性能的影响[J]. *辽宁农业职业技术学院学报*, 2013, 15(1): 25-26.
- [46] 钟伟, 刘凤华, 赵靖波, 等. 不同铜源对育成期雌性银狐生长性能、营养物质消化率及血液生化指标的影响[J]. *动物营养学报*, 2013, 25(10): 2489-2496.
- [47] 田科雄, 高凤仙, 贺建华, 等. 有机微量元素的生物学利用率研究[J]. *湖南农业大学学报: 自然科学版*, 2003, 29(2): 147-149.
- [48] COFFEY R D, CROMWELL G L, MONEGUE H J. Efficacy of a copper-lysine complex as a growth promotant for weanling pigs[J]. *Journal of Animal Science*, 1994, 72(11): 2880-2886.
- [49] WARD T L. Zinc-methionine improves growth performance of starter pigs[J]. *Journal of Animal Science*, 1997, 74(Suppl 1): 182.
- [50] 金成龙, 翟振亚, 王丹, 等. 甘氨酸铜替代硫酸铜对断奶仔猪生长性能、血清生化参数和粪铜排放的影响[J]. *广东农业科学*, 2015, 42(1): 100-103.
- [51] 刘英丽. 不同锌源生物利用率的研究[J]. *中国畜牧兽医*, 2005, 32(11): 5-7.
- [52] 韦习会, 夏冬, 李文艺, 等. 不同形态锌对断奶仔猪补锌效果的研究[J]. *养猪*, 1998(4): 6-7.
- [53] CAO J, HENRY P R, GUO R, et al. Chemical characteristic and relative bioavailability of supplemental organic zinc sources for poultry and ruminants[J]. *Journal of Animal Science*, 2000, 78(8): 2040-2052.
- [54] LEWIS A J, MILLER P S. Bioavailability of iron in iron methionine for weanling pigs[J]. *Journal of Animal Science*, 1995, 73(Suppl 1): 172.