

微量元素與早期營養

---綜述螯合微量元素對早期動物生長性能的影響

諾偉司國際有限公司 王琪 博士

近年來，由於畜禽產品向高產型、瘦肉型方向發展，使得其對某些營養元素的需要量增加；農業生產中掠奪式經營使飼料中元素含量下降，動物為獲得最佳的免疫力、抗病力和抗緊迫能力，對微量元素也有較高水準的需求。因此，在飼料中添加微量元素十分必要。但是由於無機微量元素的吸收利用率低，再加上人們為獲得更高的生產性能而盲目添加，使得飼料中微量元素含量遠遠高於動物本身的需求量，極易造成動物微量元素中毒，同時大量沒有吸收利用的微量元素排出體外對環境造成了巨大威脅。

無機微量元素的吸收利用率低是因為帶正電荷的金屬離子不易通過富含陰離子的腸壁黏膜細胞，離子必須先和消化道中的配體形成絡合物去極化，才能穿過黏膜細胞被吸收。但因消化道中存在植酸、磷酸、草酸等配體，可以和離子形成不溶性的絡合物而降低微量元素的吸收；或存在金屬離子與其它礦物離子競爭配體，從而導致無機微量元素的利用率低。而有機微量元素分子內電荷趨於中性，在消化道 pH 環境下溶解性好，性質穩定，不易與其它微量元素、微生物、藥物等交互，易被吸收；又因穩定常數中等，吸收後易於釋放金屬離子，供機體利用。本文試圖探討螯合微量元素(銅、鋅)對早期動物生長性能的影響。

成年動物體內的含銅量為 0.00015%~0.00025%，新生動物體內銅的含量與其母體內的含銅量密切相關，除羔羊外新生動物因其肝銅較高而含銅較高，新生犢牛機體含銅較其它任何動物都高，平均約含 13~14 mg，新生仔豬含銅 3.5~4 mg，剛出殼的小雞僅含 60~80 ug 銅，銅從離乳後開始下降。動物體內的銅絕

大部分存在於肌肉和骨骼中，肌肉組織中約占總量的一半，體組織銅主要分佈在肝臟。銅進入肝細胞後，即被轉運到溶酶體、線粒體、微粒體和胞核中儲存起來。因此，肝銅濃度可以作為動物對銅的吸收能力以及供給狀況是否合適的指示器。銅的吸收部位在動物的胃和小腸，特別是十二指腸，經血液運送到肝臟及全身，動物體內銅主要經膽汁排入腸腔隨糞排出體外。銅是骨細胞、膠原和彈性蛋白形成不可缺少的元素。幼齡生長動物或胎兒缺銅可表現出成骨細胞形減慢或停止。

飼糧中添加高銅可以提高離乳仔豬的 ADG，ADFI 和改善 F/G，在許多試驗中得到證實。在離乳仔豬日糧中添加 250 mg/kg 的硫酸銅顯著提高了 ADG 和 F/G。採食量是仔豬生長的限制因素，採食量的增加是改善日增重的主要原因，採食量的增加使得用於維持代謝部分的營養需要相對減少，因此是改善飼料轉化效率的重要因素。高銅在促進生長的同時往往伴隨著採食量的提高，總結 22 個有關離乳仔豬的試驗，結果顯示仔豬料中添加 250 mg/kg 銅(CuSO₄)使採食量提高 8%。銅促進生長的機理包括很多方面，最早的研究認為銅的抑菌效應是這一作用的主要方面，飼糧中添加高銅能發揮到抗生素樣的促生長效應。通過靜脈注射銅，同樣能提高仔豬的生產性能，腸道的抗生素樣作用以外的作用途徑。因為通過靜脈注射的銅的劑量較小，和日糧中添加高銅相比較，通過膽汁排泄途徑進入腸道銅不足以對腸道中的銅的濃度產生影響，所以排除了銅在腸道中可能發揮的抗生素樣效應，提示銅具有全身性的作用，途徑研究發現銅是許多重要的代謝關鍵酶的輔助因數，如細胞色素 C 氧化酶和超氧化物歧化酶、酪氨酸酶、賴氨酸氧化酶等。銅的這一全身性的廣泛作用途徑可能包括對細胞呼吸作用、心血管功能以及中樞神經系統的影響，在眾多作用的途徑中高銅對採食量的提高是改善生產性能的重要基礎。下丘腦作為攝食調控中樞，能對營養的內分泌和神經等多種信號進

行整合並作出反應，形成能量利用。機體進食和代謝之間的負反饋，從而調節機體的能量代謝和攝食以維持其內環境穩定和下丘腦的多種神經肽，某些受體如 OrexinRZ、MC4R 和 LRb 是中樞能量平衡回饋通路的關鍵調節位點。此外 AMPK 作為機體的燃料開關，同樣在中樞水準調節著機體的能量平衡，下丘腦 AMPK 的活性對採食量的調控以及和下丘腦攝食相關神經肽的關係已在近來的研究中被揭示。

日糧中添加銅改變了下丘腦攝食相關神經肽和調節因數的表達模式，其中 NPY 的 mRNA 豐度增加而 POMC 和 LRb 的 mRNA 豐度降低，提示高銅的添加使下丘腦的能量調節平衡促進能量攝入增加的方向移動。NPY 是目前已知具有最強刺激動物攝食活性的神經肽之一，動物中樞注射 NPY 可提高採食量。在雞、羊、豬中得到證實，同樣給兔靜脈注射銅，刺激了下丘腦神經肽 Y 的分泌；給仔豬注射銅，同樣可以促進其神經肽 Y 的分泌，因此高銅通過刺激豬下丘腦神經肽 Y 的分泌，進而引起豬採食量增加是可能的。

鋅分佈在動物機體內的所有組織中，其中以肌肉、肝臟、毛皮等器官組織中的含量高，但同一器官組織中的含鋅量因家畜種類、年齡等的不同而有差異，血液中 75 % 鋅存在於紅細胞中，血漿中約 22 %，白細胞中僅 3 %，新生幼畜紅細胞中的鋅含量僅為成年家畜的 1/4。鋅還存在於家畜(禽)的眼組織中，尤其是眼脈絡膜中含鋅量豐富。鋅的吸收機理現在仍然不清楚，目前仍沿用提出的小腸鋅吸收的假說：(1)胰腺分泌一種鋅結合體進入腸腔；(2)在腸腔中鋅與該配體相結合；(3)與配體結合後的通過腸道微絨毛轉運進上皮細胞；(4)在上皮細胞中，鋅被轉運到位於基膜上的結合位點上；(5)動脈血中的無礦物白蛋白與基膜相互作用，將鋅結合點上移走，進入血液迴圈，在基膜上可獲得的無礦物白蛋白數量決

定了腸上皮細胞內移走鋅的數量，這樣可調節進入機體內鋅的數量。

肉雞日糧中添加不同來源和劑量的鋅對種雞的產蛋率、平均蛋重和破蛋率都有顯著影響。之前的很多研究也有類似的結果，缺鋅會顯著降低雞胚的孵化率並提高雞胚的死亡率。玉米-豆粕日糧仍需添加少量的鋅以維持正常的孵化率。鋅能顯著提高種蛋的受精率，隨著鋅添加劑量的增加，種蛋中蛋黃和蛋白中的鋅含量也會顯著提高。在種雞日糧中短期(4 w)或長期(40 w)添加高劑量鋅顯著提高雞蛋中的鋅沉積。種雞向種蛋中沉積微量元素主要通過兩個途徑：一是通過卵巢將微量元素沉積在蛋黃中；二是通過輸卵管將微量元素沉積在蛋白、蛋殼和蛋殼膜中。與無機鋅相比，日糧中添加有機鋅明顯提高種蛋蛋黃和蛋中的鋅含量。胚胎在孵化過程中的營養物質都來自種蛋中儲存的營養物質。研究發現，蛋黃中的鋅在胚胎孵化到 17 胚齡時幾乎被消耗，隨後的孵化過程中可利用的鋅較少。種蛋中鋅沉積的增加，會給雞胚發育提供更多可利的鋅，所以結果提示種蛋中鋅含量的增加可能會對後續的胚胎發育以及肉仔雞的生長的影響。骨骼肌無疑是動物體內最重要的組織，與大腦、心肝、腸道等器官的發育相比，骨骼肌在胚胎的發育過程中處於營養分配的次要地位，骨骼肌的發育容易受到母體營養過剩或不足的危害。因此，母體營養對胎兒骨骼肌的發育和子代的生產性能有著程式化的影響。家禽骨骼肌的生長發育包括兩個過程：肌纖維數目的增加(Hyperplasia)和肌纖維直徑的增加(Hypertrophy)。在雞胚孵化過程中，肌肉的發育特徵是肌纖維數目的增加，而且肌纖維的數目在仔雞出殼時確定。肉仔雞骨骼肌的發育特徵主要是肌纖維直徑的增加，這個過程要求體內的蛋白質合成代謝要大於蛋白質的分解代謝，mTOR 信號通路和泛素-蛋白酶體信號通路是體內調控蛋白質合成和分解的主要信號通路。研究發現，鋅能維持胰島素和胰島素受體的結構和穩定性，有類似胰

島素的作用，可以提高 PI3K/AKT 的磷酸化。體內試驗和體外試驗都發現，鋅能提高 mTOR 信號通路的活性，影響蛋白質的表達。給小鼠喂含鋅(300 mg/kg)日糧會顯著提高骨骼肌中 AKT (Ser 473)的磷酸化，鋅(200 nmol/L)還能顯著增加脂肪細胞中 AKT (Ser 473)的磷酸化。鋅還可以通過啟動 AKT，進而影響 FOXO 家族的活性來影響蛋白質的分解代謝。肉種雞日糧中添加 300 mg/kg 有機鋅，能顯著提高 14 日齡肉仔雞的胸肌率。種雞日糧中添加鋅顯著提高 14 和 35 日齡肉仔雞的肌纖維數目，並且顯著降低單位面積內的肌纖維目。由於肌纖維的數目在雛雞出殼時已經確定，子代骨骼的發育主要是肌纖維直徑的增加，肉種雞日糧中添加鋅通過增加子代骨骼肌的肌纖維數目而促進骨骼肌的生長發育，且這種影響一直持續存在。這也說明母體營養對子代的生長發育，尤其是骨骼肌的生長發育有著程式化的影響。