

祝倩, 查伟, 姬玉娇, 等. 母猪饲料添加脯氨酸对哺乳环江香猪血浆生化参数和氨基酸含量的影响[J]. 华南农业大学学报, 2018, 39(1): 7-11.

# 母猪饲料添加脯氨酸对哺乳环江香猪血浆生化参数和氨基酸含量的影响

祝倩<sup>1,2</sup>, 查伟<sup>1</sup>, 姬玉娇<sup>1</sup>, 李华伟<sup>1</sup>, 耿梅梅<sup>1</sup>, 孔祥峰<sup>1,3</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/湖南省畜禽健康养殖工程技术研究中心, 湖南长沙 410125; 2 中国科学院大学, 北京 100049; 3 中国科学院环江喀斯特农业生态试验站 香猪研究中心, 广西环江 547100)

**摘要:**【目的】旨在研究母猪饲料添加脯氨酸对哺乳环江香猪血浆生化参数和氨基酸含量的影响。【方法】选取 15 头配种后第 16 天的环江香猪, 随机分成 3 组, 每组 5 个重复(栏), 每个重复 1 头猪。分别饲喂添加  $w$  为 0.77%  $L$ -丙氨酸(等氮对照组)、 $w$  为 1.00%  $L$ -脯氨酸(脯氨酸组)、 $w$  为 0.77%  $L$ -丙氨酸+ $w$  为 0.0167% 二氟甲基鸟氨酸(DFMO 组)的试验饲料。于产后第 7 和第 14 天, 每窝称体质量后随机选取 1 头哺乳仔猪, 测定血浆生化参数和游离氨基酸含量。【结果】7 日龄时, 脯氨酸组和 DFMO 组血氨浓度显著低于等氮对照组 ( $P<0.05$ )。14 日龄时, 脯氨酸组仔猪体质量显著高于等氮对照组和 DFMO 组 ( $P<0.05$ ), 血氨浓度和胆碱酯酶活性显著高于 DFMO 组 ( $P<0.05$ ), 而肌酸激酶活性显著低于 DFMO 组 ( $P<0.05$ ), 血浆葡萄糖和脯氨酸浓度显著高于等氮对照组 ( $P<0.05$ ); 脯氨酸组和 DFMO 组血浆精氨酸浓度显著高于等氮对照组 ( $P<0.05$ ); 等氮对照组和脯氨酸组血浆天冬酰胺浓度显著低于 DFMO 组 ( $P<0.05$ ); DFMO 组血浆鸟氨酸浓度显著高于等氮对照组 ( $P<0.05$ )。【结论】母猪饲料添加脯氨酸可通过影响哺乳仔猪葡萄糖和氨基酸代谢而促进其生长发育。

**关键词:** 哺乳环江香猪; 脯氨酸; 氨基酸; 血浆生化参数

中图分类号: S828

文献标识码: A

文章编号: 1001-411X(2018)01-0007-05

## Effects of dietary proline supplementation on plasma biochemical parameters and amino acid contents in suckling Huanjiang mini-pigs

ZHU Qian<sup>1,2</sup>, ZHA Wei<sup>1</sup>, JI Yujiao<sup>1</sup>, LI Huawei<sup>1</sup>, GENG Meimei<sup>1</sup>, KONG Xiangfeng<sup>1,3</sup>

(1 Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences/Key Laboratory of Agro-Ecological Processes in Subtropical Region/Hunan Provincial Engineering Research Center of Healthy Livestock, Changsha 410125, China;

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; 3 Research Center of Mini-Pig,

Huanjiang Observation and Research Station for Karst Ecosystems, Chinese

Academy of Sciences, Huanjiang 547100)

**Abstract:** 【Objective】 To investigate the effects of dietary proline supplementation on plasma biochemical parameters and amino acid in suckling Huanjiang mini-pigs. 【Method】 Fifteen female Huanjiang mini-pigs after 15 days of service were randomly divided into three groups, and reared in five pens (replicates) with one pig per pen. The pigs were fed with experimental diet supplementing 0.77%  $L$ -alanine (isonitrogenous control group), 1.00%  $L$ -proline (proline group), or 0.77%  $L$ -alanine+0.0167% 2-difluoromethylornithine (DFMO group). One piglet per litter was randomly selected on the 7th and 14th days respectively after weighing. The

收稿日期: 2017-06-03 优先出版时间: 2017-12-29

优先出版网址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20171229.1142.030.html>

作者简介: 祝倩 (1992—), 女, 硕士研究生, E-mail: [walanzhuqian@163.com](mailto:walanzhuqian@163.com); 通信作者: 孔祥峰 (1974—), 男, 研究员, 博士, E-mail: [nkxf@isa.ac.cn](mailto:nkxf@isa.ac.cn)

基金项目: 国家自然科学基金 (31572421, 31270044); 中科院“西部之光”人才培养计划重点项目 (2013)

plasma biochemical parameters and free amino acid contents were analyzed. 【Result】 The concentrations of plasma ammonia in proline and DFMO groups at the age of 7 days were significantly lower than that in the isonitrogenous control group ( $P<0.05$ ). At the age of 14 days, the proline group had significantly higher piglet body weight compared with the isonitrogenous control and DFMO groups ( $P<0.05$ ), significantly higher plasma ammonia concentration and choline esterase (CHE) activity compared with the DFMO group ( $P<0.05$ ), significantly lower creatine kinase (CK) activity compared with the DFMO group ( $P<0.05$ ), and significantly higher concentrations of glucose and proline compared with the isonitrogenous control group ( $P<0.05$ ). Arginine concentrations in proline and DFMO groups were significantly higher than that in the isonitrogenous control group ( $P<0.05$ ). Asparagine concentrations in isonitrogenous control and proline groups were significantly lower than that in the DFMO group ( $P<0.05$ ). Ornithine concentration in DFMO group was significantly higher than that in the isonitrogenous control group ( $P<0.05$ ). 【Conclusion】 Dietary proline supplementation could improve the growth and development of suckling piglets by affecting the metabolism profiles glucose and amino acids.

**Key words:** suckling Huanjiang mini-pig; proline; amino acid; plasma biochemical parameter

母猪是影响猪场经济效益的重要因素之一,且其繁殖性能受多种因素的制约<sup>[1]</sup>。增加母猪产仔量、减少仔猪死亡率可有效提高母猪的繁殖性能。通过调整饲料结构或在饲料中添加功能性物质改善母猪营养状况和健康水平,进而改善仔猪肠道发育和提高断奶体质量,是降低断奶仔猪死亡率的关键<sup>[2]</sup>。精氨酸、脯氨酸和谷氨酰胺同属于精氨酸家族氨基酸,在动物机体内可相互转化,上述氨基酸及其代谢产物在机体内可发挥多种生理功能<sup>[3]</sup>。最近多项研究表明,母猪饲料添加 *L*-精氨酸可促进妊娠早期胎儿的生长发育<sup>[4]</sup>,提高母猪的繁殖性能<sup>[5]</sup>;泌乳期饲料中添加精氨酸,可通过增加母猪血浆和乳中的营养成分而提高仔猪体增质量<sup>[6]</sup>;饲料添加 *w* 为 0.7% 的精氨酸和 1.0% 的谷氨酰胺可促进断奶仔猪的生长<sup>[7]</sup>。精氨酸在泌乳母猪乳腺组织中代谢主要生成脯氨酸,因此脯氨酸是母猪初乳和常乳中较为丰富的氨基酸之一,也是初生哺乳仔猪的必需氨基酸。而初生仔猪小肠由精氨酸、谷氨酰胺和谷氨酸合成脯氨酸的能力有限,因此母乳中的脯氨酸对仔猪生长和肠道发育尤为重要<sup>[3,8]</sup>。脯氨酸在机体内可通过脯氨酸氧化酶 (Proline oxidase, POX)、鸟氨酸转氨酶 (Ornithine aminotransferase, OAT) 和鸟氨酸脱羧酶 (Ornithine decarboxylase, ODC) 转变为多胺,而母乳和初生仔猪肠道上皮细胞中上述酶的活性较高,因此脯氨酸代谢产生的多胺对促进初生仔猪的肠道发育和成熟至关重要<sup>[9]</sup>。笔者前期研究发现,母猪饲料添加脯氨酸可促进妊娠环江香猪胎儿的生长发育<sup>[10]</sup>,但脯氨酸调控哺乳仔猪生长发育方面的研究并不多见。因此,本试验通过在母猪饲料中添加 *w* 为 1% 的 *L*-脯氨酸促进机体多胺的生

成、添加 ODC 的特异性不可逆抑制剂二氟甲基鸟氨酸 (Difluoromethylornithine, DFMO) 抑制机体多胺的生成,研究其对不同日龄哺乳环江香猪血浆生化参数和氨基酸含量的影响,旨在为研发母子一体化营养调控方案提供参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验动物与饲养管理

试验选取首次配种并确认受孕的健康环江香猪 15 头,配种前 15 d 饲喂基础饲料。于配种后第 16 天称取空腹体质量,根据体质量随机分成 3 组:等氮对照组的饲料添加 *w* 为 0.77% 的 *L*-丙氨酸,脯氨酸组的饲料添加 *w* 为 1.00% 的 *L*-脯氨酸,DFMO 组的饲料添加 *w* 为 0.77% 的 *L*-丙氨酸+*w* 为 0.016 7% 的 DFMO,每组 5 个重复(栏),每个重复 1 头猪。饲喂至产后第 14 天,*L*-脯氨酸添加量依据 Wu 等<sup>[11]</sup>的报道确定,DFMO 的添加量由前期在孕鼠上进行的预试验所得的最适添加剂量换算所得。每天饲喂 2 次,饲喂量约为体质量的 3%,自由饮水。参照 NRC(1998) 饲养标准<sup>[12]</sup>,并结合环江香猪养殖企业的饲料配方制定本试验基础饲料配方(表 1)。试验饲料中添加的 *L*-脯氨酸和 *L*-丙氨酸 ( $w \geq 99.8\%$ ) 均购自日本协和公司,DFMO ( $w \geq 99.8\%$ ) 购自武汉大华伟业化工有限公司。

### 1.2 血浆样品采集

待母猪自由分娩后 2 h 内称取仔猪质量,并记录仔猪头数。哺乳期间不给仔猪补充教槽料。分别于产后第 7 和第 14 天,称取空腹体质量后每窝随机选取 1 头仔猪,前腔静脉采血,肝素抗凝,3 000 r·min<sup>-1</sup>

表 1 基础饲料组成及营养水平 (风干基础)<sup>1)</sup>  
Tab. 1 Composition and nutrient levels of basal diet (air-dry basis)

w/%

饲料的原料组成				饲料的营养成分					
玉米	豆粕	米糠	预混料 <sup>2)</sup>	粗蛋白质	钙	总磷	赖氨酸	精氨酸	脯氨酸
54.0	12.0	30.0	4.0	12.04	0.78	0.62	0.53	0.65	0.67

1) 饲料总能量为 16.02 MJ·kg<sup>-1</sup>, 营养成分均为实测值; 2) 预混料为每千克饲料提供: 维生素 A 301 000 IU, 维生素 D 52 800 IU, 维生素 E 742 IU, 维生素 K<sub>3</sub> 71 mg, 维生素 B<sub>1</sub> 30 mg, 维生素 B<sub>2</sub> 177 mg, 维生素 B<sub>6</sub> 32 mg, 维生素 B<sub>12</sub> 0.8 mg, 烟酸 1 073 mg, 泛酸 540 mg, 叶酸 22 mg, 生物素 3.0 mg, 胆碱 8.0 g, Fe 2.0 g, Cu 1.0 g, Zn 3.5 g, Mn 1.3 g, I 14 mg, Co 35 mg, Se 8.3 mg, Ca 200 mg, P 20 mg

离心 10 min 分离血浆, -20 °C 保存。

### 1.3 血浆生化参数和游离氨基酸的测定

样品于 4 °C 解冻, 用 CX<sub>4</sub> 型全自动生化分析仪 (Beckman 公司) 测定血浆中胆碱酯酶 (Choline esterase, CHE) 和肌酸激酶 (Creatine kinase, CK) 的活性以及总蛋白、白蛋白、血氨、尿素氮和葡萄糖的含量。酶活力单位 (U) 为在 1 min 内能转化 1 μmol 底物的酶量。所用生化试剂盒均购自北京利德曼公司。用 L-8800 型全自动氨基酸分析仪 (日立公司) 测定血浆中游离氨基酸的含量。

### 1.4 数据处理

采用 SPSS19.0 软件对不同处理组的数据进行单因素方差分析, 用 Duncan's 法进行多重比较, 数据结果以平均值±标准误表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同日龄哺乳环江香猪生长性能的变化

由表 2 可知, 脯氨酸组仔猪初生体质量和 7 日

龄体质量均高于等氮对照组, 但差异不显著 (P>0.05), 14 日龄体质量显著高于等氮对照组和 DFMO 组 (P<0.05)。

### 2.2 不同日龄哺乳环江香猪血浆生化参数的变化

由表 3 可知, 7 日龄时, 脯氨酸组和 DFMO 组血氨浓度显著低于等氮对照组; 14 日龄时, 脯氨酸组血氨浓度和 CHE 活性显著高于 DFMO 组, CK 活性显著低于 DFMO 组, 葡萄糖浓度显著高于等氮对照组, 其他血浆酶活性和代谢物浓度各处理组间均无显著差异。

### 2.3 不同日龄哺乳环江香猪血浆精氨酸家族氨基酸浓度的变化

由表 4 可知, 14 日龄时, 脯氨酸组血浆脯氨酸浓度显著高于等氮对照组; DFMO 组血浆鸟氨酸浓度显著高于等氮对照组; 脯氨酸组和 DFMO 组血浆精氨酸浓度显著高于等氮对照组; 等氮对照组和脯氨酸组血浆天冬酰胺浓度显著低于 DFMO 组。其他指标各处理组间差异均不显著。

表 2 不同日龄哺乳环江香猪的生长性能<sup>1)</sup>

Tab. 2 The growth performance of suckling Huanjiang mini-pig at different day-age

处理	产仔数	初生体质量/g	7 日龄体质量/g	14 日龄体质量/g
等氮对照组	7.0±0.7	458.8±19.1	1 044.0±97.7	1 613.8±185.3b
脯氨酸组	6.4±0.7	514.6±51.0	1 169.3±139.0	2 357.4±86.4a
DFMO 组	8.2±0.3	410.6±24.5	1 180.0±87.1	1 500.2±64.1b

1) 同列数据后凡是有一个相同小写字母或未标记字母者, 表示差异不显著 (n=5, P>0.05, Duncan's 法)

表 3 不同日龄哺乳环江香猪的血浆生化参数<sup>1)</sup>

Tab. 3 Plasma biochemical parameters of suckling Huanjiang mini-pig at different day-age

日龄	处理	胆碱酯酶/ (U·dL <sup>-1</sup> )	肌酸激酶/ (U·dL <sup>-1</sup> )	总蛋白/ (g·L <sup>-1</sup> )	白蛋白/ (g·L <sup>-1</sup> )	血氨/ (μmol·L <sup>-1</sup> )	尿素氮/ (mmol·L <sup>-1</sup> )	葡萄糖/ (mmol·L <sup>-1</sup> )
7	等氮对照组	6.11±0.53	19.51±5.49	60.90±1.75	27.40±0.91	118.05±20.05a	7.02±1.33	8.24±1.18
	脯氨酸组	5.78±0.65	21.06±2.75	64.45±4.58	30.00±1.68	67.85±5.55b	8.02±1.40	6.40±0.65
	DFMO 组	5.61±0.48	15.08±2.03	54.83±5.13	28.90±1.78	75.45±8.90b	9.75±1.26	9.35±1.52
14	等氮对照组	5.71±0.32ab	17.19±3.53ab	63.63±3.01	32.40±1.05	85.70±21.18a	7.94±2.07	7.18±0.23b
	脯氨酸组	6.29±0.36a	11.29±1.79b	59.36±1.71	32.64±0.57	117.00±16.74a	6.79±0.57	9.02±0.58a
	DFMO 组	5.25±0.25b	22.41±4.07a	60.00±2.21	32.75±1.04	52.88±14.29b	7.08±1.47	8.21±0.15ab

1) 同列数据后凡是有一个相同小写字母或未标记字母者, 表示差异不显著 (n=5, P>0.05, Duncan's 法)



表 4 不同日龄哺乳环江香猪血浆精氨酸家族氨基酸的浓度<sup>1)</sup>

Tab. 4 The concentrations of arginine-family amino acids in plasma of suckling Huanjiang mini-pig at different day-age

		<i>c</i> /( $\mu\text{mol}\cdot\text{mL}^{-1}$ )							
日龄	处理	天冬氨酸	天冬酰胺	谷氨酸	谷氨酰胺	精氨酸	脯氨酸	鸟氨酸	瓜氨酸
7	等氮对照组	0.027±0.004	0.096±0.028	0.214±0.101	0.887±0.431	0.099±0.032	0.737±0.262	0.083±0.035	0.064±0.024
	脯氨酸组	0.028±0.005	0.060±0.018	0.219±0.041	0.607±0.386	0.101±0.011	0.718±0.167	0.080±0.012	0.076±0.021
	DFMO组	0.020±0.002	0.095±0.017	0.215±0.019	0.626±0.384	0.091±0.026	0.845±0.313	0.084±0.016	0.132±0.030
14	等氮对照组	0.022±0.009	0.037±0.001b	0.196±0.086	0.450±0.217	0.060±0.015b	0.896±0.136b	0.047±0.013b	0.051±0.015
	脯氨酸组	0.021±0.003	0.042±0.006b	0.215±0.028	0.309±0.027	0.110±0.021a	1.285±0.142a	0.083±0.013ab	0.098±0.032
	DFMO组	0.022±0.007	0.062±0.014a	0.254±0.072	0.407±0.077	0.110±0.012a	1.074±0.198ab	0.106±0.024a	0.102±0.027

1)同列数据后凡是有有一个相同小写字母或未标记字母者,表示差异不显著( $n=5, P>0.05$ , Duncan's 法)

### 3 讨论与结论

随着胎猪的生长发育,有限的子宫空间进一步压缩,胎儿在相对紧凑的空间和营养不足的环境中竞争空间和养分,必然会影其生长发育<sup>[13]</sup>。本试验中,脯氨酸组仔猪初生体质量比等氮对照组升高 12.16%,但产仔数降低 8.57%;DFMO 组哺乳仔猪初生体质量比等氮对照组和脯氨酸组分别降低 10.48% 和 20.32%,但产仔数分别提高 18.57% 和 29.68%;脯氨酸组 14 日龄哺乳仔猪体质量显著高于等氮对照组和 DFMO 组。这可能是因为脯氨酸的代谢产物多胺促进了胎儿和仔猪的肠道发育<sup>[14]</sup>,从而提高了肠道对营养物质的消化吸收,促进了胎儿的生长发育<sup>[15]</sup>。有研究表明,脯氨酸可提高母猪繁殖性能、促进胎儿的代谢及生长发育<sup>[9-10]</sup>。例如,在妊娠 11~30 d 添加脯氨酸可增加 1~2 胎次母猪的繁殖性能;给哺乳仔猪口服脯氨酸可提高其生长性能、促进小肠粘膜发育<sup>[16]</sup>。上述结果说明,妊娠期和哺乳期补充脯氨酸均能促进胎儿和/或仔猪的生长发育<sup>[17]</sup>。DFMO 组胎猪在营养相对不足条件下,胎儿的生长发育相对缓慢,对子宫空间的竞争也相对缓和。也就是说产仔数增加会造成宫内拥挤,从而降低仔猪出生质量<sup>[18]</sup>。而较低的初生体质量可能会影响其出生后的生长发育,增加其死亡率和发病率,从而降低其断奶后的存活率<sup>[19]</sup>。

CHE 是一类糖蛋白酶,可催化酰基胆碱的水解。体质量增加可引起血清 CHE 水平的增加<sup>[20]</sup>。本试验中,脯氨酸组 14 日龄仔猪血浆 CHE 活性和体质量均显著高于 DFMO 组,提示母猪饲料添加脯氨酸可调节哺乳仔猪的脂代谢从而促进其生长发育。CK 主要存在于心肌和骨骼肌中,其主要的生物学功能是可逆地催化肌酸和 ATP 之间的转磷酸基反应,为肌肉收缩以及转运系统提供能量<sup>[21]</sup>。血浆 CK 活性的升高一般提示存在肌肉损伤或应激反

应。本试验中,脯氨酸组仔猪血浆 CK 活性显著低于 DFMO 组,说明母猪饲料添加脯氨酸可减少哺乳仔猪的应激反应,这有利于仔猪的生长发育。

血浆代谢物来源于机体消化吸收的营养物质和组织器官的代谢产物,可用来反映机体的新陈代谢和内脏器官的健康状况。血氨主要是由体内氨基酸的脱氨基作用产生,或消化道细菌代谢产生,对动物机体有一定的毒性。正常情况下,肝脏能将氨转化为尿素,再由肾脏排出体外<sup>[22]</sup>。本试验中,7 日龄时脯氨酸组和 DFMO 组仔猪血氨浓度比等氮对照组分别显著降低 42.52% 和 36.09%,14 日龄时脯氨酸组比 DFMO 组显著升高了 121.26%,提示饲料添加脯氨酸可能影响了氨基酸的脱氨基作用或尿素合成作用,但具体机制还不清楚。葡萄糖是机体新陈代谢不可缺少的重要能量来源。乳糖在仔猪消化道内被水解为葡萄糖,而肠道吸收是血液中葡萄糖的主要来源。精氨酸可通过其代谢产物 NO 调控葡萄糖代谢<sup>[23]</sup>。多胺可影响机体的氨基酸和葡萄糖代谢<sup>[24]</sup>。本试验中,脯氨酸组 14 日龄仔猪血浆葡萄糖浓度分别比等氮对照组和 DFMO 组显著升高 25.62% 和 9.86%,可能是由于精氨酸和脯氨酸的代谢引起的,这可减少机体内蛋白质的分解,有助于提高机体的免疫力和抗逆能力,促进仔猪的生长发育<sup>[2]</sup>。

由于母猪乳腺细胞中富含精氨酸酶,乳腺中的精氨酸被大量分解代谢<sup>[25]</sup>。内源合成是支持机体和肠道生长发育所需精氨酸的重要途径<sup>[26]</sup>。因此,精氨酸缺乏是影响仔猪生长发育的主要因素之一。本试验中,脯氨酸组 14 日龄哺乳仔猪血浆精氨酸和脯氨酸浓度分别比等氮对照组显著升高 83.33% 和 43.42%,主要是由于饲料添加的脯氨酸可在初生仔猪小肠内转化为精氨酸,这对改善仔猪的肠道发育和促进生长具有重要作用<sup>[6]</sup>。天冬酰胺在机体内可通过一系列脱氨基和转氨基途径生成精氨酸<sup>[27]</sup>。本试验发现,DFMO 组 14 日龄哺乳仔猪血浆精氨酸、

鸟氨酸和天冬酰胺浓度比等氮对照组分别显著升高 83.33%、125.53% 和 67.57%，天冬酰胺浓度比脯氨酸组显著升高 13.51%，这可能是由于 DFMO 抑制了脯氨酸的多胺合成途径，而增强了脯氨酸转化为精氨酸家族其他氨基酸的途径。哺乳仔猪血浆生化参数和氨基酸浓度发生不同程度的变化，可能是由于母猪饲料添加脯氨酸或 DFMO 后影响了母乳成分，进而改变了仔猪的机体代谢<sup>[6]</sup>，其具体原因尚需进一步研究。

综上所述，母猪饲料添加脯氨酸能通过影响哺乳仔猪葡萄糖和氨基酸代谢而促进其生长发育。

#### 参考文献:

- [1] THANATHIP S, SKORN K. Genetic markers on reproductive traits in pigs[J]. *Thai J Vet Med*, 2011, 41: 73-76.
- [2] 袁雪波, 马黎, 陈克麟, 等. 丙氨酰谷氨酰胺二肽对哺乳仔猪生长性能、小肠形态学和血清生化指标的影响[J]. *动物营养学报*, 2011, 23(1): 94-101.
- [3] WU G, BAZER F W, DAVIS T A, et al. Important roles for the arginine family of amino acids in swine nutrition and production[J]. *Livest Sci*, 2007, 112(1/2): 8-22.
- [4] 刘俊锋, 吴琛, 孔祥峰, 等. 精氨酸对妊娠环江香猪胎儿生长发育的影响[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(5): 1040-1045.
- [5] LIU X D, WU X, YIN Y L, et al. Effects of dietary *L*-arginine or *N*-carbamyglutamate supplementation during late gestation of sows on the miR-15b/16, miR-221/222, VEGFA and eNOS expression in umbilical vein[J]. *Amino Acids*, 2012, 42(6): 2111-2119.
- [6] ZHU C, GUO C Y, GAO K G, et al. Dietary arginine supplementation in multiparous sows during lactation improves the weight gain of suckling piglets[J]. *J Integr Agr*, 2017, 16(3): 648-655.
- [7] SHAN Y, SHAN A, LI J, et al. Dietary supplementation of arginine and glutamine enhances the growth and intestinal mucosa development of weaned piglets[J]. *Livest Sci*, 2012, 150(1/2/3): 369-373.
- [8] KANG P, ZHANG L, HOU Y, et al. Effects of *L*-proline on the growth performance, and blood parameters in weaned lipopolysaccharide (LPS)-challenged pigs[J]. *Asian-Aust J Anim Sci*, 2014, 27(8): 1150-1156.
- [9] WU G, BAZER F W, DATTA S, et al. Proline metabolism in the conceptus: Implications for fetal growth and development[J]. *Amino Acids*, 2008, 35(4): 691-702.
- [10] 查伟, 孔祥峰, 谭敏捷, 等. 饲料添加脯氨酸对妊娠环江香猪繁殖性能和血浆生化参数的影响[J]. *动物营养学报*, 2016, 28(2): 579-584.
- [11] WU G, BAZER F W, BURGHARDT R C, et al. Proline and hydroxyproline metabolism: Implications for animal and human nutrition[J]. *Amino Acids*, 2011, 40(4): 1053-1063.
- [12] NRC. Nutrient requirements of swine[S]. Washington D. C.: National Academic Press, 1998.
- [13] 孔祥峰, 伍国耀, 印遇龙. 猪宫内生长迟缓及其防治研究进展[J]. *畜牧与兽医*, 2009, 41(10): 96-101.
- [14] 王小城, 熊霞, 杨焕胜, 等. 腐胺和脯氨酸对哺乳期仔猪空肠绒毛-隐窝轴上皮细胞的多胺代谢及 Wnt 信号通路的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(8): 1609-1615.
- [15] 谭敏捷, 孔祥峰, 刘庆友, 等. 多胺与哺乳动物的孕体发育[J]. *动物营养学报*, 2015, 27(1): 43-48.
- [16] WANG J, LI G, TAN B, et al. Oral administration of putrescine and proline during the suckling period improves epithelial restitution after early weaning in piglets[J]. *J Anim Sci*, 2015, 93(4): 1679-1688.
- [17] GONZALEZ-ANOVER P, GONZALEZ-BULNES A. Maternal age modulates the effects of early-pregnancy *L*-proline supplementation on the birth-weight of piglets[J]. *Anim Reprod Sci*, 2017, 181: 63-68.
- [18] WANG W, DEGROOTE J, VAN GINNEKEN C, et al. Intrauterine growth restriction in neonatal piglets affects small intestinal mucosal permeability and mRNA expression of redox-sensitive genes[J]. *FASEB J*, 2016, 30(2): 863-873.
- [19] REKIEL A, WIECEK J, BATORSKA M, et al. Effect of sow prolificacy and nutrition on pre and postnatal growth of progeny: A review[J]. *Ann Anim Sci*, 2014, 14(1): 3-15.
- [20] ODA E. Associations between serum cholinesterase and incident hyper-LDL cholesterolemia, hypertriglyceridemia and hypo-HDL cholesterolemia as well as changes in lipid levels in a health screening population[J]. *Atherosclerosis*, 2015, 241(1): 1-5.
- [21] ANDREWS F J, GRIFFITHS R D. Glutamine: Essential for immune nutrition in the critically ill[J]. *Brit J Nutr*, 2002, 87(1): S3-S8.
- [22] 李晓光, 于永光, 王丽艳, 等. 血氨检测在临床肝脏疾病中的应用价值[J]. *国际检验医学杂志*, 2012, 33(11): 1340-1342.
- [23] JOBGEN W S, FRIED S K, FU W J, et al. Regulatory role for the arginine-nitric oxide pathway in metabolism of energy substrates[J]. *J Nutr Biochem*, 2006, 17(9): 571-588.
- [24] 方婷婷, 刘光芒, 贾刚, 等. 多胺对动物肠道稳态的调控作用及可能机制[J]. *动物营养学报*, 2016, 28(11): 3400-3407.
- [25] O'QUINN P R, KNABE D A, WU G. Arginine catabolism in lactating porcine mammary tissue[J]. *J Anim Sci*, 2002, 80(2): 467-474.
- [26] 伍国耀. 小肠氨基酸的代谢: 动物营养的新视角[J]. *饲料工业*, 2011, 32(24): 51-54.
- [27] WU G, BAZER F W, BURGHARDT R C, et al. Impacts of amino acid nutrition on pregnancy outcome in pigs: Mechanisms and implications for swine production[J]. *J Anim Sci*, 2010, 88(Suppl 13): E195-E204.

【责任编辑 庄延】