

色氨酸对断奶仔猪氨基酸转运载体的影响

江敏^{1,2}, 阮征^{1,2}, 米书梅^{1,2}, 李小兰^{1,2}, 熊霞³, 李铁军³, 周艳^{1,2}, 印遇龙^{1,2,3}

(1. 南昌大学食品学院, 江西南昌 330031) (2. 南昌大学食品科学与技术国家重点实验室, 江西南昌 330047)

(3. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 湖南长沙 410125)

摘要: 色氨酸 (tryptophan, Trp) 是一种特殊的氨基酸, 它参与调节蛋白质的合成, 同时在调节食欲与维持等方面都有很重要的作用。本文通过测定断奶仔猪的生长性能、血清中生化指标和游离氨基酸含量、肝脏色氨酸 2,3-加双氧酶 (tryptophan 2,3-dioxygenase, TDO) 和肠道吲哚胺 2,3-加双氧酶 (indoleamine 2,3-dioxygenase, IDO) 含量及 Trp 相关氨基酸转运载体基因表达, 来探讨 Trp 对断奶仔猪氨基酸转运载体的影响。结果发现, 添加 0.2% Trp 可显著增加日增重与日采食量, 显著增加血液中色氨酸与亮氨酸的含量, 显著降低缬氨酸与异亮氨酸的含量。0.1% Trp 可显著增强肝脏 TDO 含量, 0.2% Trp 显著增加空肠 IDO 含量。添加 0.2% Trp 显著增加空肠基因 ATB⁰⁺、4F2hc、B⁰AT1 和 ASCT2 表达 ($P < 0.05$)。综上, Trp 能够促进相关氨基酸转运载体的表达, 最终促进氨基酸的转运吸收。说明 Trp 可以通过上调氨基酸转运载体表达来调控机体健康。

关键词: 色氨酸; 氨基酸; 断奶仔猪; 转运载体

文章编号: 1673-9078(2016)2-40-45

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2016.2.007

Influence of Tryptophan on Amino Acid Transporter in Weaned Piglet

JIANG Min^{1,2}, RUAN Zheng^{1,2}, MI Shu-mei^{1,2}, LI Xiao-lan^{1,2}, XIONG Xia³, LI Tie-jun³, ZHOU Yan^{1,2},
YIN Yu-long^{1,2,3}

(1. School of Food Science and Technology, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

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

(3. Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China)

Abstract: Tryptophan (Trp) participates in the regulation of protein synthesis and plays very important roles in regulating appetite and maintaining health. The effect of Trp on amino acid transporters in weaned piglets was explored by determining growth performance, serum biochemical parameters, free amino acid content in the serum, tryptophan 2,3-dioxygenase (TDO) content in the liver, indoleamine 2,3-dioxygenase (IDO) content in the jejunum, and gene expression of amino acid transporters in weaned piglets. The results showed that addition of 0.2% Trp significantly increased the daily gain and daily feed intake, markedly elevated the levels of serum Trp and leucine, and dramatically decreased the levels of valine and isoleucine. The addition of 0.1% Trp and 0.2% Trp significantly increased TDO content in the liver and IDO content in the jejunum, respectively. The addition of 0.2% Trp markedly enhanced the gene expression of ATB⁰⁺, 4F2hc, B⁰AT1, and ASCT2 in the jejunum ($P < 0.05$). In conclusion, Trp can promote the expression of amino acid transporter-related genes and ultimately promote the transport and uptake of amino acids, indicating that Trp can regulate and control the health of the body by upregulating the expression of amino acid transporters.

Key words: tryptophan; amino acid; weaned piglet; transporter

动物的生长过程即为蛋白质在体内的沉积过程, 因此蛋白质对于动物生长有重要作用。而氨基酸是构成蛋白质的基本单位, 所以蛋白质营养也可认为是氨基酸营养。Trp 是动物生长的必需氨基酸, 具有调节基因表达、缓解应激、提高动物食欲和生产性能等多种作用^[1]。Trp 在动物体内不能合成, 而植物性饲料中

的 Trp 通常又不能满足猪的营养生理需要。近年来, 随着合成赖氨酸和蛋氨酸在配合饲料中的大量使用, 使得 Trp 成为动物饲料中主要的限制性氨基酸^[2]。张隽予等研究表明在猪体内所有氨基酸中 Trp 含量是最低的^[3], 因此通过日粮补充 Trp 对动物的生长发育具有非常重要的意义。

氨基酸的吸收是一个有一系列载体参与的主动运输过程。氨基酸转运载体既是氨基酸作为营养素从机体胞外进入胞内的通道, 也是氨基酸进出胞内完成神经细胞兴奋、抑制等重要细胞功能的通道。氨基酸

收稿日期: 2015-04-30

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31360552)

作者简介: 江敏 (1989-), 女, 硕士研究生, 研究方向为营养与食品卫生学

通讯作者: 阮征 (1978-), 男, 博士, 教授, 研究方向为食品营养

的转运异常会导致氨基酸吸收和代谢障碍性疾病^[4]。因此开展氨基酸转运载体及功能等方面的研究具有重要的意义。一些研究表明,膳食补充赖氨酸、精氨酸和谷氨酸能调节断奶猪肠道氨基酸转运蛋白的表达^[5-6]。然而,Trp对空肠氨基酸转运载体的调节作用仍然未知。此外,有研究表明母乳中含量丰富的 α -乳清蛋白含有Trp,它可以调节婴儿食欲和睡眠^[7-8],目前Trp对婴儿及断奶动物肠道氨基酸吸收转运的影响还未见相关报道。

本文通过测定断奶仔猪血清游离氨基酸、肝脏TDO、空肠IDO以及空肠中与Trp相关氨基酸转运载体,探讨了Trp对断奶生长期氨基酸转运载体的影响。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

氨基酸标品、TDO和IDO试剂盒 上海西唐生物科技有限公司;氯仿、异丙醇、乙醇、DEPC 上海国药集团化学试剂有限公司;Trizol Reagent Kit 美国Invitrogen公司;反转录试剂盒 北京全式金生物技术有限公司;实时PCR扩增试剂盒(SYBR Green detection kit) 美国Thermo公司。

1.2 仪器与设备

SC-3614 低速离心机 科大创新股份有限公司中佳分公司;AL104 分析天平 梅特勒-托利多仪器有限公司;5418R 型冷冻离心机 德国艾本德公司;7900 HT 荧光定量PCR仪 美国ABI公司;全波长多功能酶标仪 北京九宇金泰公司;UPLC-MSMS 美国Waters公司。

1.3 方法

1.3.1 试验动物与管理

选用体重相近的 6.88 ± 0.205 kg的三元杂交(杜洛克 \times 大白 \times 大约克)断奶仔猪21头,随机分成3组,单栏饲养。按NRC(1998)营养需要量并结合中国地方猪营养需要量配制本试验的基础日粮(含0.1% Trp)。对照组饲喂基础日粮(表1),试验组在基础日粮基础上分别为添加0.1%和0.2% Trp,自由采食和饮水,每天记录采食量和体重,试验周期7 d。宰杀前禁食12个小时,期间每日观察猪群的健康情况。

1.3.2 血清生化指标的测定

将收集的血液进行离心得血清。取血清400 μ L用全自动生化分析仪测定血清白蛋白(albumin, ALB)、尿素氮(urea nitrogen, Urea N)含量和碱性磷

酸酶(alkaline phosphatase, ALP)活性,测定方法按照北京利德曼公司试剂盒说明书进行。

1.3.3 血清游离氨基酸的测定

样品处理:取100 μ L血清加入900 μ L(乙腈:水=9:1)溶液,震荡混匀。然后12000 r/min离心5 min,取上清液。

表1 日粮组成与营养成分表

Table 1 Composition and nutrition facts of experimental diets

日粮成分	对照组	0.1%Trp 色氨酸组	0.2%Trp 色氨酸组
玉米	62.72	60.77	60.97
玉米蛋白粉	14.74	10.00	10.00
豆粕	3.73	10.49	10.23
乳清粉	10.00	10.00	10.00
豆油	0.15	0.25	0.18
葡萄糖	3.00	3.00	3.00
石粉	1.55	1.52	1.52
磷酸二氢钙	0.85	0.79	0.80
食盐	0.33	0.33	0.33
赖氨酸(98%)	1.39	1.21	1.22
DL-蛋氨酸	0.21	0.23	0.24
L-苏氨酸	0.37	0.35	0.35
L-色氨酸	0.00	0.10	0.20
氯化胆碱(50%)	0.1	0.1	0.1
抗氧化剂	0.05	0.05	0.05
多维	0.04	0.04	0.04
有机多矿	0.15	0.15	0.15
硫酸粘菌素(10%)	0.02	0.02	0.02
酸化剂	0.6	0.6	0.6
Total	100	100	100
营养水平			
粗蛋白/%	18	18	18
消化能(Kcal/kg)	3350	3350	3350
钙/%	0.8	0.8	0.8
总磷/%	0.52	0.52	0.52
赖氨酸/%	1.53	1.53	1.53
蛋氨酸/%	0.56	0.56	0.56
蛋氨酸+胱氨酸/%	0.87	0.87	0.87
苏氨酸/%	0.95	0.95	0.95
色氨酸/%	0.1	0.2	0.3

注:每kg提供:Fe 90.00 mg; Zn 100.00 mg; Cu 6.00 mg; Mn 3.15 mg; Se 0.30 mg; I 0.15 mg; 维生素B₁ 2.00 mg; 维生素B₂ 5.00 mg; 维生素B₆ 1.50 mg; 维生素B₁₂ 0.03 mg; 维生素A 5400.00 IU; 维生素D₃ 110.00 IU; 维生素E 18.00 IU; 维

生素 K 5.00 mg; 烟酸 25.00 mg; 泛酸 18.00 mg; 叶酸 0.40 mg; 生物素 0.05 mg; 氯化胆碱 80.0 mg; 抗氧化剂 20.0 mg; 杀菌剂 100.0 mg.

液质条件: 柱温: 45 °C, 进氧量 1 μL; 流动相: A: 水+0.01% TFA, B: 甲醇+0.01% TFA; 毛细管电压: 3000 V (正); 锥孔电压: 20 V; 萃取电压: 3 V; 碰撞电压: 15 V; 脱溶剂温度: 500 °C; 脱溶剂气速: 800 L/h; 锥孔气速: 20 L/h.

1.3.4 肝脏色氨酸 2,3-加双氧酶和空肠吲哚胺 2,3-加双氧酶含量的测定

TDO 和 IDO 含量采用上海西唐生物科技有限公司试剂盒说明书上的操作步骤和计算方法进行检测和计算。

1.3.5 肠道氨基酸转运载体基因表达的测定

表 2 PCR 基因引物

Table 2 PCR primers for genes

Gene	Primers
β-Actin	Forward primer 5'-CTGCGGCATCCACGAAACT-3'
	Reverse primer 5'-AGGGCCGTGATCTCCTTCTG-3'
ASCT2	Forward primer 5'-TGCGAGTGAAGAGGAAGTAGATGA-3'
	Reverse primer 5'-GATTGTGGAGATGGAGGATGTGG-3'
B ⁰ AT1	Forward primer 5'-CGTGTCTTCATGGTGGGT-3'
	Reverse primer 5'-CGTCTGGTTGGCATGAGC-3'
4F2hc	Forward primer 5'-AGCTTCAGCGAGGATAGGC-3'
	Reverse primer 5'-GAGGTGAGACGGCACAGAG-3'
TAT1	Forward primer 5'-CCCTCATTGCTGTCTGTC-3'
	Reverse primer 5'-GGGCACCAACTAACTCG-3'
ATB ⁰⁺	Forward primer 5'-CCGTGGTAACTGGTCCAAAAA-3'
	Reverse primer 5'-CCAATCCCCTGCATATCCAA-3'
LAT1	Forward primer 5'-CTCGGGCATCTTCGTCT-3'
	Reverse primer 5'-CCCAGTTCGCGATAACA-3'

根据总 RNA 提取试剂盒 (Trizol) 及其反转录试剂盒进行 RNA 的提取及反转录。所选 PCR 引物用 Primer 5.0 软件设计, 如表 2。以 β-Actin 基因作为内参, 在 ABI 7900 HT PCR 仪上进行 PCR 反应, 扩增反应体系如表 3 所示。反应采用三步法, 其条件为: 50 °C UDG 预处理 2 min; 95 °C 预变性 10 min; 95 °C 变性 15 s, 60 °C 退火 30 s, 72 °C 延伸 30 s, 共 40 个循环; 每个反应体系设置 2 个重复, 每次循环的最后一步收集 SYBR Green 荧光信号, 循环结束时从 60 °C 升温至 95 °C 进行溶解曲线分析。先用 ABI 7900 配套软件 SDS 2.3 对样品中目的基因和 β-actin 的 CT 值进行初步整理, 然后采用 2^{-(ΔΔCt)}法计算 mRNA 的相对

定量, 其中:

$$\Delta \Delta Ct = (Ct_{Target} - Ct_{\beta-actin})_{treatment} - (Ct_{Target} - Ct_{\beta-actin})_{control}$$

再将相对表达规范化, 对照组目标基因的相对表达是 1.0。相对基因表达表示与对照组相比后折算的值。

1.4 数据处理与分析

试验数据先用 EXCEL2003 初步处理后, 再用 SPSS 17.0 统计软件进行单因素方差分析和 TUKEY 方法多重比较, 结果以平均值 ± 标准误 ($\bar{x} \pm SE$) 表示, $p < 0.05$ 表示有显著性差异。所有图表均由 GraphPad Prism 6 软件制作。

2 结果与讨论

2.1 色氨酸对断奶仔猪生长性能的影响

表 3 Trp 对断奶仔猪生长性能的影响

Table 3 Effect of Trp on the growth performance in weaned piglets

指标	对照组	0.1%Trp 组	0.2%Trp 组
日增重(g/d)	29.167±9.08 ^a	106.25±16.54 ^b	129.17±24.03 ^b
日采食量(g/d)	162.75±1.42 ^a	204.08±25.04 ^a	298.04±27.90 ^b
日增重:日采食量	3.57±1.01	2.33±0.64	2.03±0.41

注: 同行上标的不同字母 (如 a, b, c) 表示有显著性差异 ($p < 0.05$)。

与对照组相比, 0.1% Trp 组和 0.2% Trp 组断奶仔猪的平均日增重显著性增加 ($p < 0.05$); 同时 0.2% Trp 组的平均日采食量也显著性降低 ($p < 0.05$), 而 0.1% Trp 组与对照组之间没有显著性差异 (表 3)。因此, Trp 的膳食添加改善了断奶仔猪的生长性能。很多研究表明, 膳食补充 Trp 可以提高动物的生长性能、缓解压力^[9], 这与我们的结果相一致。

2.2 色氨酸对断奶仔猪血清生化指标的影响

表 4 Trp 对断奶仔猪血清生化指标的影响

Table 4 Effect of Trp on the serum biochemical parameters of weaned piglets

指标	对照组	0.1%Trp 组	0.2%Trp 组
碱性磷酸酶(U/L)	162.80±19.98	185.20±20.83	194.00±20.54
白蛋白(g/L)	33.99±0.32 ^a	34.70±0.89 ^{ab}	36.86±0.94 ^b
尿素氮(mmol/L)	5.64±0.22 ^a	4.34±0.37 ^b	3.01±0.21 ^c

注: 同行上标的不同字母 (如 a, b, c) 表示有显著性差异 ($p < 0.05$)。

Trp 对断奶仔猪血清生化指的影响如表 4 所示。与对照组相比, 0.2% Trp 组 ALB 和 Urea N 含量都显

著性增加 ($P<0.05$)。

血清 ALP 是衡量动物是否缺磷的指标之一,相关研究表明,血清 ALP 活性能反应动物生长性能,并且与猪平均日增重成正相关^[10]。本实验中,随着 Trp 水平的增加,血清 ALP 活性成上升趋势,这与 2.1 中平均日增重增加的结果相对应。

血清 ALB 和 Urea N 浓度与猪蛋白营养密切相关,仔猪血清 ALB 可以参与与氨基酸代谢,这样机体就能有效利用体内蛋白从而增加蛋白沉积。血清 Urea N 是蛋白质和氨基酸代谢终产物,它可以反映机体内氨基酸之间的平衡,当这种平衡被打破时,血清中 Urea N 的浓度会升高。Eggum 等研究表明血清 Urea N 与膳食蛋白质质量成负相关^[11]。Chen 等研究表明当降低血清 Urea N 的浓度时,氨基酸平衡较好^[12]。本实验结果显示:随着膳食 Trp 含量增加,断奶仔猪血清 ALB 浓度增加,血清 Urea N 降低,说明 Trp 有利于氨基酸平衡。

2.3 色氨酸对血清中氨基酸含量的影响

表 5 Trp 对血清中氨基酸含量的影响

Table 5 Effect of Trp on the concentrations of serum free amino acids of weaned piglets

氨基酸	对照组	0.1% Trp 组	0.2% Trp 组
色氨酸($\mu\text{mol/L}$)	19.93 \pm 0.90 ^a	20.53 \pm 1.93 ^a	28.40 \pm 1.61 ^b
缬氨酸($\mu\text{mol/L}$)	145.48 \pm 3.24 ^a	135.28 \pm 8.77 ^a	97.76 \pm 7.51 ^b
异亮氨酸($\mu\text{mol/L}$)	67.16 \pm 1.98 ^a	59.87 \pm 5.86 ^a	41.84 \pm 4.29 ^b
亮氨酸($\mu\text{mol/L}$)	145.88 \pm 9.46 ^a	152.87 \pm 10.06 ^{ab}	184.64 \pm 10.35 ^b
赖氨酸($\mu\text{mol/L}$)	159.73 \pm 10.28	155.47 \pm 12.45	173.68 \pm 18.05
苯丙氨酸($\mu\text{mol/L}$)	67.04 \pm 3.17	67.17 \pm 3.76	67.13 \pm 2.88
酪氨酸($\mu\text{mol/L}$)	102.00 \pm 10.03	89.94 \pm 6.95	94.03 \pm 10.41
ΣLNAA ($\mu\text{mol/L}$)	534.96 \pm 18.59 ^a	551.15 \pm 12.27 ^a	447.04 \pm 15.78 ^b
Trp/LNAA	0.044 \pm 0.004 ^{ab}	0.037 \pm 0.002 ^a	0.054 \pm 0.005 ^b

注: LNAA=Large neutral amino acid; ΣLNAA =(亮氨酸、异亮氨酸、苯丙氨酸、缬氨酸、酪氨酸); 同行上标的不同字母(如 a, b, c)表示有显著性差异 ($p<0.05$)。

Trp 对断奶仔猪血清游离必需氨基酸含量的影响如表 5 所示。与对照组相比,0.2% Trp 组异亮氨酸、缬氨酸和 LNAA 浓度显著性降低 ($p<0.05$),亮氨酸、Trp 浓度和 Trp/LNAA 显著性增加 ($p<0.05$)。0.1% Trp 组与其有相同趋势,但是无显著性变化。

血清游离氨基酸直接参与机体氨基酸的代谢及蛋白质沉积,其水平反映着动物的营养状况^[13]。当日粮氨基酸不能满足动物需要时,血清游离氨基酸含量偏低,就无法合成充分的蛋白质供给身体各组织使用。Yin 等发现血清游离氨基酸浓度增加可以促进蛋白质

沉积从而提高断奶仔猪生长性能^[14]。长链中性氨基酸(亮氨酸、异亮氨酸、缬氨酸)和 Trp 因共用同一个转运系统而竞争性通过血脑屏障。因此,Trp 含量的升高可能会导致血清长链中性氨基酸含量的降低。这与我们的实验结果相一致。综上,Trp 的添加使血清总氨基酸含量增加,从而为仔猪阶段的蛋白质沉积、机体的快速生长发育提供了必需的物质来源,同时 Trp 添加也使得长链中性氨基酸含量的降低。

2.4 色氨酸对断奶仔猪肝脏色氨酸 2,3-加双氧酶和空肠吲哚胺 2,3-加双氧酶含量的影响

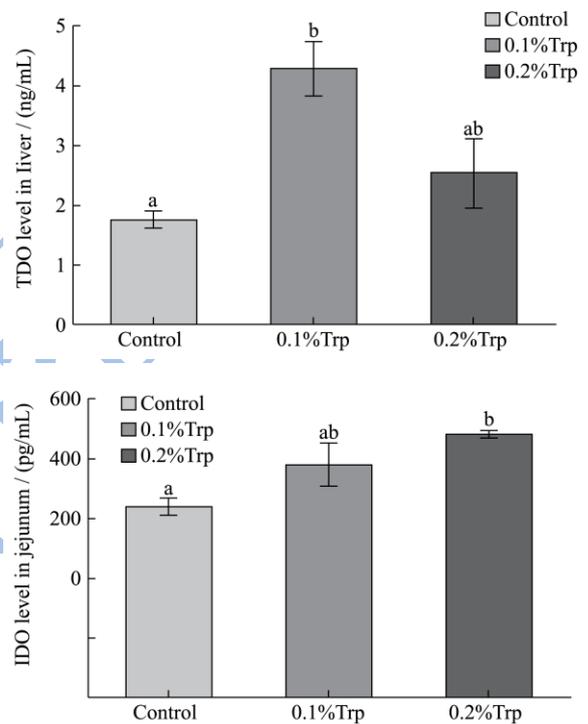


图 1 Trp 对断奶仔猪肝脏 TDO 和空肠 IDO 含量的影响

Fig.1 Effect of Trp on concentrations of TDO in the liver and IDO in the jejunum of weaned piglets

注: a: 肝脏 TDO 含量的变化; b: 肠道 IDO 含量的变化; 同行上标的不同字母(如 a, b, c)表示有显著性差异 ($p<0.05$)。

与对照组相比,0.1%Trp 组肝脏 TDO 含量与 0.2% Trp 组空肠 IDO 浓度均显著性增加 ($p<0.05$) (图 1)。实验中 Trp 添加后,与对照组相比 0.1% Trp 组肝脏 TDO 含量最高,而肠道 IDO 含量是添加 0.2% Trp 组最高,这可能是由于组织分布的不同而导致了其活性的差异。试验结果表明添加 Trp 后 TDO 和 IDO 活性增强。

动物摄入体内的 Trp 主要经犬尿氨酸途径代谢,中间产物为犬尿氨酸,TDO 和 IDO 是其限速酶。TDO 和 IDO 能以超氧阴离子为其辅助因子催化从 Trp 到犬

尿酸的氧化反应^[15], 同时两者对氧自由基的清除不需要将其转化为过氧化氢, 而且对氧自由基的清除效率甚至高于 SOD^[16]。根据实验结果可以得出, TDO 和 IDO 含量的增加加速了 Trp 的分解代谢, 且增强了断奶仔猪的抗氧化性能。

2.5 色氨酸对断奶仔猪肠道氨基酸转运载体的影响

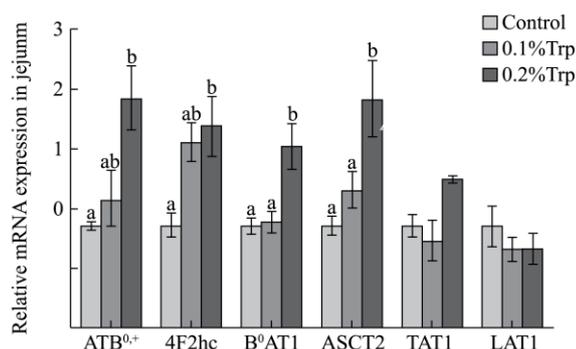


图 2 Trp 对断奶仔猪空肠氨基酸转运载体的影响

Fig.2 Effect of Trp on the relative gene expression of amino acid transporters in the jejunum of weaned piglets

注: 同行上标的不同字母(如 a、b、c)表示有显著性差异 ($p < 0.05$)。

由图 2 可以看出, 与对照组相比, 添加 0.2% Trp 组空肠基因 ATB⁰⁺、4F2hc、B⁰AT1 和 ASCT2 表达显著增加 ($P < 0.05$), 而 TAT1 和 LAT1 表达均无显著性差异。

氨基酸的吸收主要取决于他们肠上皮细胞的膜转运蛋白。一般的, 膳食补充高蛋白或高氨基酸含量时, 由于增加了相关氨基酸转运蛋白基因表达丰度从而增加小肠氨基酸转运能力^[17]。Feng 等^[18]研究发现猪肠道不同时期 ATB⁰⁺和 LAT1 mRNA 表达增加可能与日粮中氨基酸含量有关。ATB⁰⁺转运载体可能在氨基酸进出血脑屏障的转运中发挥了重要的生理作用^[19]。Nakamura E 指出 LAT1 不仅对 Trp 有亲和力, 还对亮氨酸、异亮氨酸、缬氨酸、苯丙氨酸、组氨酸和蛋氨酸等氨基酸有较强亲和力^[20]。Kim 等发现 TAT1 可以转运 Trp, 苯丙氨酸, 酪氨酸^[21]。这可能是实验中 TAT1 和 LAT1 表达无显著性差异的原因。添加 Trp 后 ATB⁰⁺、4F2hc、B⁰AT1 和 ASCT2 表达显著增加, 因此说明 Trp 可促进氨基酸的吸收, 提高氨基酸转运载体的表达。

3 结论

膳食补充 Trp 可以增加血清中游离氨基酸的含

量, 提高肝脏 TDO 和空肠 IDO 含量, 增加空肠 ATB⁰⁺、4F2hc、ASCT2 和 B⁰AT1 基因的表达。综上所述, Trp 能够增加断奶仔猪蛋白质沉积, 增加氨基酸转运载体的表达, 为机体的快速生长发育提供必需的物质来源。

参考文献

- [1] Koopmans S J, Guzik A C, Van Der Meulen J, et al. Effects of supplemental-tryptophan on serotonin, cortisol, intestinal integrity, and behavior in weanling piglets [J]. Journal of Animal Science, 2006, 84(4): 963-971
- [2] 夏彦斌. 饲料蛋白质水平和色氨酸添加量对断奶仔猪生长性能及血液生化指标的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2012
- [3] XIA Yan-bin. Effects of different Protein Diets Supplemented with different Tryptophan levels on Performance and serum biochemical assays for Piglets [D]. Yangzhou: Yang Zhou University, 2012
- [4] 张隽予, 傅伟龙. 色氨酸在猪营养中的作用[J]. 饲料博览, 2011, : 8-11
- [5] ZHANG Hui-yu, FU Wei-long. The roles of tryptophan in swine nutrition [J]. Feed Review, 2011, 1: 8-11
- [6] 职爱民. 猪碱性氨基酸转运载体 cDNA 克隆及其 mRNA 表达与调控[D]. 广州: 华南农业大学, 2008
- [7] ZHI Ai-min. Cloning of porcine cationic amino acid transporters cDNA and its mRNA expression and regulation [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2008
- [8] Yin J, Ren W, Duan J, et al. Dietary arginine supplementation enhances intestinal expression of SLC7A7 and SLC7A1 and ameliorates growth depression in mycotoxin-challenged pigs [J]. Amino Acids, 2014, 46(4): 883-892
- [9] Lin M, Zhang B, Yu C, et al. L-Glutamate supplementation improves small intestinal architecture and enhances the expressions of jejunal mucosa amino acid receptors and transporters in weaning piglets [J]. PloS One, 2014, 9(11): e111195
- [10] Fazzolari-Nesci A, Domianello D, Sotera V, et al. Tryptophan fortification of adapted formula increases plasma tryptophan concentrations to levels not different from those found in breast-fed infants [J]. Journal of pediatric gastroenterology and nutrition, 1992, 14(4): 456-459
- [11] 蔡霞, 郑穗平. 谷氨酸棒杆菌产 L-色氨酸重组菌株的构建[J]. 现代食品科技, 2014, 30(4): 165-170
- [12] CAI Xia, ZHENG Sui-ping. Construction of recombinant corynebacterium glutamicum for L-tryptophan production [J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 30(4): 165-170
- [13] Guzik A C, Matthews J O, Kerr B J, et al. Dietary tryptophan

- effects on plasma and salivary cortisol and meat quality in pigs [J]. *Journal of animal science*, 2006, 84(8): 2251-2259
- [10] Wang M Q, Tao W J, Ye S S, et al. Effects of dietary pharmacological zinc on growth, liver metallothionein, Cu, Zn-SOD concentration and serum parameters in piglets [J]. *Journal of Animal and Veterinary Advances*, 2012, 11(9): 1390-1394
- [11] Eggum B O. Blood urea measurement as a technique for assessing protein quality [J]. *British Journal of Nutrition*, 1970, 24(4): 983-988
- [12] Chen H Y, Miller P S, Lewis A J, et al. Changes in plasma urea concentration can be used to determine protein requirements of two populations of pigs with different protein accretion rates [J]. *Journal of Animal Science*, 1995, 73(9): 2631-2639
- [13] Longenecker J B, H Ause N L. Relationship between plasma amino acids and composition of ingested protein [J]. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 1959, 84:46-59
- [14] Yin F, Zhang Z, Huang J, et al. Digestion rate of dietary starch affects systemic circulation of amino acids in weaned pigs [J]. *British Journal of Nutrition*, 2010, 103(10): 1404-1412
- [15] Ozaki Y, Nichol C A, Duch D S. Utilization of dihydroflavin mononucleotide and superoxide anion for the decyclization of L-tryptophan by murine epididymal indoleamine 2,3-dioxygenase [J]. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 1987, 257(1): 207-216
- [16] Britan A, Maffre V, Tone S, et al. Quantitative and spatial differences in the expression of tryptophan-metabolizing enzymes in mouse epididymis [J]. *Cell and Tissue Research*, 2006, 324(2): 301-310
- [17] Garc ía-Villalobos H, Morales-Trejo A, Araiza-Piña B A, et al. Effects of dietary protein and amino acid levels on the expression of selected cationic amino acid transporters and serum amino acid concentration in growing pigs [J]. *Archives of Animal Nutrition*, 2012, 66(4): 257-270
- [18] Feng D Y, Zhou X Y, Zuo J J, et al. Segmental distribution and expression of two heterodimeric amino acid transporter mRNAs in the intestine of pigs during different ages [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2008, 88(6): 1012-1018
- [19] Czeredys M, Mysiorek C, Kulikova N, et al. A polarized localization of amino acid/carnitine transporter B(0,+)(ATB(0,+)) in the blood-brain barrier [J]. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 2008, 376(2): 267-270
- [20] Nakamura E, Sato M, Yang H, et al. 4F2 (CD98) heavy chain is associated covalently with an amino acid transporter and controls intracellular trafficking and membrane topology of 4F2 heterodimer [J]. *Journal of Biological Chemistry*, 1999, 274(5): 3009-3016
- [21] Kim D K, Kanai Y, Chairoungdua A, et al. Expression cloning of a Na⁺-independent aromatic amino acid transporter with structural similarity to H⁺/monocarboxylate transporters [J]. *Journal of Biological Chemistry*, 2001, 276(20): 17221-17228