

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20170720002

夏耀耀, 黎俊, 冯泽猛, 等. 稻米来源镉对生长期猪的生长特性及不同脏器组织镉蓄积的影响[J]. 生态毒理学报, 2018, 13(3): 201-208

Xia Y Y, Li J, Feng Z M, et al. Effects of cadmium supplied via cadmium contaminated rice on the growth performance and the tissues accumulation of cadmium in growing-finishing pigs [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2018, 13(3): 201-208 (in Chinese)

稻米来源镉对生长期猪的生长特性及不同脏器组织镉蓄积的影响

夏耀耀^{1,2}, 黎俊^{1,3}, 冯泽猛^{1,5,*}, 龙次民¹, 曾昭英⁴, 黄瑞林¹, 印遇龙^{1,3}

1. 动物营养生理与代谢过程湖南省重点实验室,中国科学院亚热带农业生态研究所畜禽健康养殖研究中心,中国科学院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,农业部中南动物营养与饲料科学观测实验站,长沙 410125

2. 中国科学院大学,北京 100049

3. 湖南师范大学生命学院动物营养与人体健康实验室,长沙 410081

4. 湖南宝东农牧发展有限公司,邵阳 422002

5. 湖南畜禽安全生产协同创新中心,长沙 410128

收稿日期: 2017-07-20 录用日期: 2017-11-08

摘要:环境中的镉污染对动植物及人类都带来了极大的危害。目前,多数镉毒理研究关注其无机状态,而来源于稻米的有机态镉的毒害作用报道较少。为评估稻米来源镉对生长期猪的毒性作用,选用初始体重为30 kg左右的健康生长猪28头,随机分为体重无明显差异的2组,即对照组与稻米来源镉组(试验组),研究稻米来源镉对生长期猪(生长及育肥全阶段)的生长特性及不同脏器组织镉蓄积的影响。结果表明,在生长及育肥阶段,试验组与对照组相比:1)生长特性无显著差异($P>0.05$);2)育肥期组织游离氨基酸含量,除肌肉中的赖氨酸显著降低外($P<0.05$),血浆、肝脏、肾脏及肌肉中其他游离氨基酸水平均无显著差异($P>0.05$);3)心脏、肝脏、脾脏、肾脏、肺、胃、小肠、大肠、骨骼中镉蓄积量显著增高($P<0.05$),而肌肉、血液中无显著差异($P>0.05$),脂肪、皮中未检出镉。日粮使用大比例镉超标稻米后镉在各脏器和组织中的蓄积规律为肾脏>肝脏>小肠>脾>肺>大肠>胃>血液>骨头>心>腿肌>背肌>脂肪、皮。由此可见,镉超标稻米对生长期猪的生长特性未产生显著的影响,稻米来源镉主要蓄积于肝脏和肾脏,而主流食用组织肌肉和血液中镉的蓄积量较少。

关键词:稻米来源镉;生长期猪;生长特性;蓄积规律

文章编号: 1673-5897(2018)3-201-08 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

Effects of Cadmium Supplied via Cadmium Contaminated Rice on the Growth Performance and the Tissues Accumulation of Cadmium in Growing-finishing Pigs

Xia Yaoyao^{1,2}, Li Jun^{1,3}, Feng Zemeng^{1,5,*}, Long Cimin¹, Zeng Zhaoying⁴, Huang Ruilin¹, Yin Yulong^{1,3}

1. Hunan Provincial Key Laboratory of Animal Nutritional Physiology and Metabolic Process, 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, Scientific Observing and Ex-

基金项目:国家十三五重点研发计划(2016YFD0700200);湖南农财专项(2015-38);中国科学院STS项目(KFJ-SW-STS-173);中国科学院战略生物资源服务网络计划植物种质资源创新项目(ZSJC-011)

作者简介:夏耀耀(1994-),硕士研究生,研究方向为单胃动物营养, E-mail: 1016812759@qq.com

* 通讯作者(Corresponding author), E-mail: zemengfeng2006@163.com

perimental Station of Animal Nutrition and Feed Science in South-Central, Ministry of Agriculture, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. Laboratory of Animal Nutrition and Human Health, School of Life Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410081, China

4. Hunan Baodong Agriculture and Animal Husbandry Development Co., Ltd., Shaoyang 422002, China

5. Hunan Animal and Poultry Safety Production Collaborative Innovation Center, Changsha 410128, China

Received 20 July 2017 **accepted** 8 November 2017

Abstract: Cadmium pollution in the ecological environment raises great harm to plants, animals, and humans. Toxicological studies on cadmium mainly focus on its inorganic state, while toxic effects of cadmium from the organic state of rice are obscure. In order to evaluate the effects of dietary cadmium excessive rice on the growth performance and accumulated pattern in tissues of growing pigs, twenty-eight healthy growing pigs with similar body weight (30 kg) were housed individually and randomly assigned to two groups (14 pigs per group). The results showed that: 1) There were no significant differences on growth performance in cadmium excessive rice diet provided group ($P > 0.05$); 2) The concentration of lysine in muscle reduced significantly in test fattening-pig group ($P < 0.05$), and no differences were found on the free amino acids in plasma, liver, kidneys, and muscle ($P > 0.05$); 3) Significant differences were noticed in most tissues (heart, liver, spleen, kidney, lung, stomach, small intestine, large intestine and bone) ($P < 0.05$) apart from the blood and muscle for the accumulated cadmium ($P > 0.05$). No cadmium was detected in fat and skin in both groups. The order of the tissues accumulation was that kidney > liver > small intestine > spleen > lung > large intestine > stomach > blood > bone > heart > leg muscle > dorsi muscle > fat/skin. In conclusion, the use of cadmium excessive rice in growing and fattening pig diets has little effect on the growth performance. The cadmium accumulation in liver and kidney were significantly increased but no difference was found in edible meat and blood tissues.

Keywords: cadmium excessive rice; growing-finishing pig; performance; heavy metal accumulation

随着我国工业化进程的不断加快,重金属对农业生产用地环境的威胁也日益严重^[1-3]。据统计,全球镉年排放量约 1.0×10^6 t,并将继续增长。镉污染对人类健康和生态环境都有极大的危害。环境中镉污染会降低植物产量,严重时会导致植物死亡^[4-7]。对于动物和人类来说,镉暴露可以抑制血管内皮细胞的趋化和管状结构的形成,引发动脉粥样硬化、高血压、心肌病及血管内皮细胞损伤等多种心血管疾病^[8];长期低剂量镉接触可对机体血液红细胞、白细胞产生毒性,造成血淋巴细胞的DNA损伤,损害机体的免疫功能^[9]。镉进入机体后,主要蓄积于肝、肾等器官中,可致大鼠机体肝过氧化氢酶和超氧化物歧化酶活力降低,肝脏还原型谷胱甘肽的含量减少,影响肝功能,产生氧化应激^[10];镉在体内蓄积还对哺乳动物的生殖系统具有毒性作用^[11-12]。镉米作为人类食品存在安全隐患,农业工作者从栽培管理、品种选择、镉钝化剂的使用等多种综合措施入手,或多或少解决了部分镉米问题,但镉污染区的农业生产仍然需要改善。目前有关镉的毒理研究多关注于其无

机态^[13-16],镉米中的镉以蛋白结合态形式存在,其毒性可能有异于无机状态,其对动物的生长代谢是否产生明显的负面影响以及蛋白结合态镉在生物体内如何迁移、分配鲜有研究。因此,本研究探究稻米来源镉在猪体内的蓄积与分配规律,并确定其对生长期猪生长代谢的影响,评估稻米来源镉对生长期猪的毒害程度具有重要现实意义。

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 试验材料

液相质谱联用仪(5500 Q TRAP LC-MS/MS,美国,AB公司)和电感耦合等离子体质谱仪(ICP-OES720,日本,Agilent公司)。

1.2 试验设计与饲粮

试验组镉超标稻米购自镉污染区农户,镉含量(0.75 ± 0.06) mg·kg⁻¹(n=6);对照组同品种稻米从非污染区农户购得,镉含量(0.19 ± 0.01) mg·kg⁻¹(n=6)。采用单因子试验设计,选择同批次二元杂(长白×大白)生长猪28头(体重约30 kg),随机分为体重没有

明显差异的对照组和试验组。试验在湖南新五丰股份有限公司永安分公司猪场同个猪舍进行(分生长和育肥2个阶段)。参考NRC(2012)配制生长期猪基础饲粮,组成及营养水平见表1。配合饲料镉含量对照组(0.15 ± 0.01) mg·kg⁻¹(n=6);试验组(0.55 ± 0.04) mg·kg⁻¹(n=6)。单栏饲养,自由采食、饮水,生长阶段饲喂至均重达60 kg,生长育肥全阶段饲喂至均重达90 kg。

1.3 样品采集

生长阶段试验猪空腹均重达约60 kg时,每组选6头进行心脏放血屠宰;生长育肥阶段试验猪空腹均重达约90 kg时,在每组余下8头于屠宰场晕后再进行心脏放血屠宰,分别采集样品。用肝素管收集血液,4℃静置2 h后,3 500 r·min⁻¹离心10 min,取上清得血浆,-20℃保存。分别取肝、肾脏和背最长肌各50 g于-20℃保存,待测游离氨基酸含量。取心、肝、脾、肺、肾、胃、小肠、大肠、背肌、腿肌、皮、脂肪、骨头各200 g于-20℃保存,待测镉的含量。

1.4 指标检测与测定方法

1.4.1 生长特性

根据试验猪初始体重/(IW%)、末重/(FW%)、每天记录耗料量及试验天数计算平均日增重/g(ADG/g),平均日采食量/g(ADFI/g),料肉比(F/G)。

1.4.2 游离氨基酸

各组织中游离氨基酸的检测利用LC-MS/MS,参照文献方法进行^[17]。

1.4.3 镉含量检测

样品中镉含量的检测严格按照国标法食品中金属元素检测标准(镉 GB 5009.15—2014);利用720系列ICP-OES进行。

1.5 数据处理与分析

试验数据经EXCEL 2010初步整理后,采用SPSS 19.0软件进行t检验统计分析,以P<0.05作为数据结果差异是否显著的判断标准,结果用平均值±标准误(̄x±SEM)表示。

表1 试验饲粮组成及营养水平(干物质基础)

Table 1 Ingredient and nutrient levels of basal diet (dry mass basis)

| 项目 Item | 生长期 Growth period | 育肥期 Fattening period |
|--|----------------------|-------------------------|
| 成分/% Ingredients/% | | |
| 糙米 Brown rice | 76.00 | 82.00 |
| 大豆粕 Soybean | 20.00 | 14.00 |
| 预混料 ^a Premix ^a | 4.00 | 4.00 |
| 营养水平 Nutrient levels ^b | | |
| 代谢能/(Mcal·kg ⁻¹) ME/(Mcal·kg ⁻¹) | 3.23 | 3.29 |
| 粗蛋白/% CP/% | 15.29 | 13.24 |
| 赖氨酸/% Lys/% | 0.91 | 0.79 |
| 蛋氨酸+胱氨酸/% Met+ Cys/% | 0.52 | 0.45 |
| 苏氨酸/% Thr/% | 0.55 | 0.48 |
| 色氨酸/% Try/% | 0.16 | 0.14 |
| 有效磷/% AP/% | 0.24 | 0.22 |

注:^a预混料为每千克饲粮提供。生长期:维生素A,1 300 IU;维生素D3,150 IU;维生素E,11 IU;维生素B1,1.0 mg;维生素B6,1.0 mg;叶酸,0.3 mg;生物素,0.05 mg;尼克酸,30 mg;泛酸,7.0 mg;氯化胆碱,0.3 mg;NaCl,1.0 g;铜,4.5 mg;铁,100 mg;锌,80 mg;锰,3.0 mg;碘,0.14 mg。育肥期:维生素A,1 300 IU;维生素D3,150 IU;维生素E,11 IU;维生素B1,1.0 mg;维生素B6,1.0 mg;叶酸,0.3 mg;生物素,0.05 mg;尼克酸,30 mg;泛酸,7.0 mg;氯化胆碱,0.3 mg;NaCl,1.0 g;铜,4.0 mg;铁,60 mg;锌,50 mg;锰,2.0 mg;碘,0.13 mg。^b计算值。

Note: ^a Premix provided the following per kilogram of the diet. Growth period: Vitamin A, 1 300 IU; Vitamin D3, 150 IU; Vitamin E, 11 IU; Vitamin B1, 1.0 mg; Vitamin B6, 1.0 mg; Folic acid, 0.3 mg; Biotin, 0.05 mg; Nicotinic acid, 30 mg; Pantothenic acid, 7.0 mg; Choline chloride, 0.3 mg; NaCl, 1.0 g; Cu, 4.5 mg; Fe, 100 mg; Zn, 80 mg; Mn, 3.0 mg; I, 0.14 mg. Fattening period: Vitamin A, 1 300 IU; Vitamin D3, 150 IU; Vitamin E, 11 IU; Vitamin B1, 1.0 mg; Vitamin B6, 1.0 mg; Folic acid, 0.3 mg; Biotin, 0.05 mg; Nicotinic acid, 30 mg; Pantothenic acid, 7.0 mg; Choline chloride, 0.3 mg; NaCl, 1.0 g; Cu, 4.0 mg; Fe, 60 mg; Zn, 50 mg; Mn, 2.0 mg; I, 0.13 mg. ^b Calculated values.

2 结果(Results)

2.1 稻米来源镉对生长期猪生长特性的影响

与对照组相比,生长期猪饲粮中添加稻米来源镉后,ADFI、ADG 及 F/G 均不存在显著差异($P>0.05$)(表 2)。

2.2 稻米来源镉对生长期猪组织中游离氨基酸含量的影响

生长期猪饲喂含有稻米来源镉饲粮后,与对照组相比,除肌肉中赖氨酸含量显著降低外($P<0.05$),血浆、肝脏、肾脏中各游离氨基酸含量均无显著差异

($P>0.05$) (表 3 和 4)。

2.3 稻米来源镉在生长期猪体内的蓄积规律

与对照组相比,无论生长阶段,还是生长育肥全阶段,饲粮中添加稻米来源镉后,除肌肉、血浆中镉蓄积量无显著差异外($P>0.05$),其他各内脏器官中镉蓄积量均显著增高($P<0.05$),皮和脂肪中均未检出镉;各组织中镉蓄积量由多到少依次为:肾脏>肝脏>小肠>脾>肺>大肠>胃>血液>骨头>心>腿肌>背肌>脂肪、皮;且肾脏、肝脏和脾脏中镉的蓄积量随着饲喂时间的延长而增加(表 5)。

表 2 稻米来源镉对生长期猪生长特性的影响

Table 2 Effects of cadmium supplied via cadmium contaminated rice on the growth performance of growing-finishing pigs

| 项目 Item | 生长阶段(n=6) | | 育肥阶段(n=8) | |
|----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | 对照组 Control | 试验组 Test | 对照组 Control | 试验组 Test |
| 初重/kg IW/kg | 30.89 ± 3.27 | 30.85 ± 2.98 | 32.06 ± 2.66 | 32.11 ± 2.45 |
| 末重/kg FW/kg | 63.61 ± 4.32 | 64.02 ± 7.46 | 92.40 ± 7.49 | 91.31 ± 4.00 |
| 日均采食量/g ADFI/g | 2 007.61 ± 64.01 | 2 004.71 ± 88.21 | 2 229.50 ± 75.12 | 2 294.82 ± 28.47 |
| 日增重/g ADG/g | 711.41 ± 25.23 | 721.01 ± 43.44 | 735.67 ± 24.04 | 758.54 ± 16.49 |
| 料肉比 F/G | 2.84 ± 0.12 | 2.83 ± 0.22 | 3.03 ± 0.04 | 3.04 ± 0.08 |

表 3 稻米来源镉对生长期猪(30~90 kg, n=8)血浆、肌肉中游离氨基酸含量的影响

Table 3 Effects of cadmium supplied via cadmium contaminated rice on free amino acids for the plasma and muscle of growing-finishing pigs (30~90 kg, n=8)

| 项目 Item | 血浆/(μmol·L ⁻¹) Plasma/(μmol·L ⁻¹) | | 肌肉/(μmol·L ⁻¹) Muscle/(μmol·L ⁻¹) | |
|------------|---|----------------|---|--------------------------|
| | 对照组 Control | 试验组 Test | 对照组 Control | 试验组 Test |
| 丙氨酸 Ala | 147.97 ± 6.22 | 156.59 ± 7.63 | 47.88 ± 3.17 | 47.82 ± 1.77 |
| 精氨酸 Arg | 17.46 ± 1.51 | 19.44 ± 0.93 | 1.18 ± 0.07 | 1.07 ± 0.04 |
| 天门冬酰胺 Asn | 1.66 ± 0.07 | 1.66 ± 0.06 | 0.83 ± 0.05 | 0.76 ± 0.04 |
| 天门冬氨酸 Asp | 9.88 ± 0.04 | 9.87 ± 0.05 | 7.18 ± 0.38 | 6.50 ± 0.21 |
| 谷氨酰胺 Gln | 120.72 ± 7.65 | 116.86 ± 4.20 | 49.99 ± 6.20 | 48.19 ± 3.35 |
| 甘氨酸 Gly | 133.92 ± 8.58 | 134.14 ± 8.54 | 21.52 ± 1.94 | 19.40 ± 2.22 |
| 组氨酸 His | 23.81 ± 2.04 | 23.21 ± 0.93 | 1.55 ± 0.35 | 1.45 ± 0.23 |
| 异亮氨酸 Ile | 98.77 ± 5.64 | 85.48 ± 4.86 | 26.23 ± 1.41 | 26.63 ± 1.09 |
| 亮氨酸 Leu | 166.20 ± 10.57 | 148.47 ± 6.72 | 46.63 ± 2.48 | 47.56 ± 2.69 |
| 赖氨酸 Lys | 26.15 ± 1.77 | 25.75 ± 1.47 | 1.36 ± 0.10 ^b | 1.10 ± 0.04 ^a |
| 甲硫氨酸 Met | 28.07 ± 1.92 | 29.24 ± 1.22 | 24.59 ± 1.08 | 25.58 ± 1.67 |
| 苯丙氨酸 Phe | 74.74 ± 3.50 | 82.76 ± 2.88 | 35.89 ± 1.51 | 36.93 ± 1.98 |
| 脯氨酸 Pro | 77.61 ± 3.61 | 80.90 ± 5.91 | 22.82 ± 1.17 | 24.41 ± 0.58 |
| 丝氨酸 Ser | 30.49 ± 2.15 | 29.34 ± 1.86 | 12.31 ± 1.40 | 10.23 ± 0.72 |
| 苏氨酸 Thr | 46.60 ± 3.02 | 47.12 ± 2.31 | 12.86 ± 1.14 | 12.42 ± 1.09 |
| 色氨酸 Trp | 43.09 ± 2.82 | 49.86 ± 2.22 | 9.60 ± 0.55 | 10.50 ± 0.55 |
| 酪氨酸 Tyr | 66.76 ± 2.66 | 73.65 ± 3.34 | 26.18 ± 1.71 | 26.55 ± 1.60 |
| 正缬氨酸 Val | 189.16 ± 8.83 | 166.82 ± 10.32 | 40.93 ± 2.60 | 39.74 ± 2.00 |

注:与对照组相比,不同字母表示差异显著($P<0.05$),下同。

Note: Compared with control, different letters indicate significant differences ($P<0.05$). The same below.

表4 稻米来源镉对生长期猪(30~90 kg, n=8)肝脏、肾脏中游离氨基酸含量的影响
Table 4 Effects of cadmium supplied via cadmium contaminated rice on free amino acids for the liver and kidney of growing-finishing pigs (30-90 kg, n=8)

| 项目 Item | 肝脏/(μmol·L⁻¹) Liver/(μmol·L⁻¹) | | 肾脏/(μmol·L⁻¹) Kidney/(μmol·L⁻¹) | |
|------------|-----------------------------------|----------------|------------------------------------|----------------|
| | 对照组 Control | 试验组 Test | 对照组 Control | 试验组 Test |
| 丙氨酸 Ala | 154.85 ± 14.33 | 147.80 ± 16.83 | 167.57 ± 7.37 | 157.13 ± 5.43 |
| 精氨酸 Arg | 1.46 ± 0.19 | 1.56 ± 0.33 | 2.24 ± 0.29 | 2.00 ± 0.17 |
| 天门冬酰胺 Asn | 3.04 ± 0.27 | 2.85 ± 0.24 | 3.81 ± 0.28 | 3.27 ± 0.23 |
| 天门冬氨酸 Asp | 5.96 ± 0.34 | 5.48 ± 0.19 | 6.12 ± 0.36 | 7.11 ± 0.47 |
| 胱氨酸 Cys | 15.60 ± 2.50 | 19.31 ± 2.28 | 11.70 ± 1.32 | 9.37 ± 2.19 |
| 谷氨酰胺 Gln | 66.04 ± 8.09 | 56.15 ± 4.96 | 73.67 ± 5.57 | 68.76 ± 4.28 |
| 谷氨酸 Glu | 33.93 ± 3.40 | 32.07 ± 3.60 | 36.39 ± 3.22 | 29.70 ± 4.27 |
| 甘氨酸 Gly | 110.55 ± 9.59 | 102.59 ± 7.61 | 107.65 ± 6.41 | 101.62 ± 6.69 |
| 组氨酸 His | 27.36 ± 1.84 | 25.55 ± 2.56 | 29.88 ± 2.80 | 25.81 ± 1.37 |
| 异亮氨酸 Ile | 106.49 ± 6.48 | 101.81 ± 8.66 | 137.93 ± 12.47 | 128.38 ± 9.42 |
| 亮氨酸 Leu | 257.93 ± 18.00 | 243.43 ± 18.78 | 322.56 ± 27.16 | 303.42 ± 21.63 |
| 赖氨酸 Lys | 2.47 ± 0.21 | 3.11 ± 0.37 | 2.68 ± 0.44 | 2.02 ± 0.21 |
| 甲硫氨酸 Met | 98.66 ± 5.81 | 94.08 ± 7.58 | 131.52 ± 11.53 | 123.12 ± 8.83 |
| 苯丙氨酸 Phe | 89.73 ± 9.09 | 91.80 ± 9.45 | 193.55 ± 16.89 | 179.63 ± 13.37 |
| 脯氨酸 Pro | 208.76 ± 12.58 | 207.77 ± 19.21 | 247.98 ± 18.10 | 240.32 ± 14.16 |
| 丝氨酸 Ser | 31.40 ± 3.38 | 28.27 ± 3.13 | 38.70 ± 4.01 | 38.71 ± 3.73 |
| 苏氨酸 Thr | 67.29 ± 5.22 | 61.12 ± 5.30 | 91.52 ± 5.68 | 83.32 ± 4.42 |
| 色氨酸 Trp | 27.57 ± 1.52 | 28.46 ± 3.14 | 52.50 ± 4.25 | 49.96 ± 3.43 |
| 酪氨酸 Tyr | 197.12 ± 11.95 | 180.58 ± 13.93 | 183.24 ± 11.59 | 174.18 ± 8.65 |
| 正缬氨酸 Val | 218.38 ± 15.85 | 204.04 ± 14.93 | 271.55 ± 22.73 | 255.35 ± 19.22 |

表5 稻米来源镉在生长期猪体内的沉积规律
Table 5 The accumulation of cadmium supplied via cadmium contaminated rice in growing-finishing pigs

| 项目 Item | 生长阶段(n=6)/(μg·kg⁻¹) | | 育肥阶段(n=8)/(μg·kg⁻¹) | |
|--------------------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| | 对照组 Control | 试验组 Test | 对照组 Control | 试验组 Test |
| 心脏 Heart | 2.73 ± 0.43 ^a | 5.67 ± 0.51 ^b | 2.86 ± 0.24 ^a | 5.2 ± 0.32 ^b |
| 肝脏 Liver | 94.60 ± 9.10 ^a | 390.50 ± 17.57 ^b | 120.37 ± 9.07 ^a | 400.26 ± 17.67 ^b |
| 脾脏 Spleen | 18.67 ± 0.44 ^a | 49.28 ± 3.70 ^b | 23.44 ± 1.62 ^a | 66.71 ± 2.38 ^b |
| 肺 Lung | 6.46 ± 0.64 ^a | 22.59 ± 2.64 ^b | 12.97 ± 0.89 ^a | 34.03 ± 3.88 ^b |
| 肾 Kidney | 680.62 ± 66.20 ^a | 1 922.58 ± 248.28 ^b | 936.36 ± 74.97 ^a | 2 662.43 ± 169.43 ^b |
| 胃 Stomach | 6.26 ± 1.00 ^a | 18.56 ± 1.56 ^b | 8.57 ± 0.41 ^a | 22.27 ± 1.23 ^b |
| 小肠 Small intestine | 15.17 ± 2.63 ^a | 168.49 ± 15.36 ^b | 31.88 ± 7.60 ^a | 172.20 ± 15.95 ^b |
| 大肠 Large intestine | 11.56 ± 1.14 ^a | 25.31 ± 1.94 ^b | 8.60 ± 0.51 ^a | 24.31 ± 1.97 ^b |
| 背肌 Dorsi muscle | — | — | 1.40 ± 0.32 | 1.59 ± 0.48 |
| 腿肌 Leg muscle | 3.64 ± 0.61 | 3.52 ± 0.61 | 3.46 ± 0.28 | 3.94 ± 0.48 |
| 骨头 Bone | 4.98 ± 0.58 ^a | 7.64 ± 0.55 ^b | 4.24 ± 0.31 ^a | 8.78 ± 0.53 ^b |
| 血液 Blood | 19.85 ± 1.30 | 19.60 ± 0.92 | 19.07 ± 0.98 | 19.27 ± 0.87 |
| 脂肪 Fat | ND | ND | ND | ND |
| 皮 Skin | ND | ND | ND | ND |

注:“ND”表示未检出;“—”表示未检测。

Note: “ND” means no results detected; “-” means no detection.

3 讨论(Discussion)

戴清文等^[18]的研究表明,在动物饲粮中添加无机镉,会降低动物的生长特性,但是对于引起动物生长特性下降的确切饲粮镉含量,观点不一。断奶仔猪饲粮中添加 $3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 镉对其生长发育和料重比无明显影响,而添加 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 镉则导致猪生长缓慢。生长育肥猪饲粮中随着镉含量的增多,采食量和日增重相应降低^[19]。Combs 等^[20]报道,在山羊饲粮中分别添加 10.4、18.0 和 $28.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的镉,饲喂 125 d,期间生长特性并未下降。Bundscherer 等^[21]的研究表明,肉鸡饲粮中添加 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 镉,对肉仔鸡身体状况和生长速度亦无显著影响。饲粮中添加 50 、 $300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的镉对北京鸭体重未产生显著影响^[22]。Lisk 等^[23]指出,生长育肥阶段(17.6~90 kg)饲喂镉含量为 $0.24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的玉米来源镉饲粮后试验猪的 ADG、F/G 和 ADFI 均无明显变化。我国饲料卫生标准规定全价配合饲料中镉含量不得超过 $0.50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。本试验中,试验组镉含量约 $0.55 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,全部来源于超标稻米,生长特性试验结果表明,试验猪的生长特性及采食量并没有得到明显的抑制,这与 Lisk 等^[23]的研究结果一致。可见,稻米来源镉对猪生长健康状况的影响与无机镉效果类似,即随剂量而异,高剂量时降低猪的生长速度,而低剂量时不产生显著的抑制作用。

有研究表明,镉胁迫导致家蝇 3 日龄幼虫血淋巴中游离氨基酸组成发生变化(如丙氨酸降低、赖氨酸升高)^[24]。大鼠镉中毒时,血浆中丝氨酸和异亮氨酸含量显著降低^[25]。本试验中,肌肉、肝脏、肾脏及血液中游离氨基酸含量,与对照组相比,除肌肉中赖氨酸显著降低外($P < 0.05$),其余氨基酸都没有明显变化($P > 0.05$),推测低剂量镉对氨基酸代谢影响不大,但导致肌肉赖氨酸下降的具体原因有待进一步研究。

动物机体为了维持正常的生命活动,必须从饲粮中吸收一些微量元素,如铜、铁、锰、锌等。它们直接参与机体组成以及影响酶的活性,与许多疾病的发生、发展以及动物生长发育过程都有着非常重要的关系。这些金属元素在机体内的吸收、蓄积及排出过程也具有一定的互作关系,镉作为机体非必需元素,可以借助这些必需元素的吸收、转运通道进入机体^[26-27]。

吴景初等^[28]研究发现,镉在染毒大鼠体内的分布为:肾>肝>胰>心>肺>毛,血液及骨中含量均较低。凡强胜^[19]的研究报道,生长期猪饲粮中添加一

定剂量的无机镉,其在体内的蓄积分配规律为:肾脏>肝脏>肌肉,三者含量之间存在显著正相关关系。镉在动物体内的累积随饲喂时间增长而增加,肝脏和肾脏中镉浓度随着饲粮中镉含量的增加而增加^[29]。机体在镉暴露下可迅速生成金属硫蛋白(MT),饲粮中的镉可与体内 MT 形成 Cd-MT 复合物,而该复合物能大量转运至肝肾^[30-31]。本试验中对照组和试验组相比,各脏器和组织中镉的蓄积量除脂肪、皮、肌肉和血液中无显著差异外($P > 0.05$),其他组织均存在明显差异($P < 0.05$),尤其以肾脏和肝脏中蓄积最多,可能原因是肝肾可以快速大量合成 MT 使镉得以大量蓄积,所以肾脏和肝脏成为镉蓄积的重要靶器官,这与前面所述试验的研究结果基本一致。总的来说,在生长期猪饲粮中添加稻米来源镉($0.55 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)后,镉在肾脏($2.66 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)中沉积量最多,超过国家食品标准($1.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),肝脏($0.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)次之,略低于国家食品标准($0.50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$);肌肉($0.003 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、脂肪(未检出)沉积量很少,远低于国家食品标准($0.10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

因此,生长期猪饲粮中添加稻米来源镉($0.55 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)后,不影响主流食用组织的食用安全性,其毒害作用主要体现在肝脏和肾脏,故需对肝肾做无害化处理。

致谢:感谢包显颖、陈頔等在本试验进行过程中给予的热情帮助。

通讯作者简介:冯泽猛(1985-),男,博士,助理研究员,主要研究方向为动物营养与养殖环境控制。

参考文献(References):

- [1] 杨辰. 我国农田土壤重金属污染修复及安全利用综述 [J]. 现代农业科技, 2017(3): 164-167
Yang C. Review on remediation and safety utilization of heavy metal pollution of farmland soil in China [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2017(3): 164-167 (in Chinese)
- [2] 王哲玮, 王秋红, 于丽华. 土壤重金属污染及对生物体影响的研究进展[J]. 中国农学通报, 2017, 33(19): 1-6
Wang X W, Wang Q H, Yu L H. Heavy metal contamination and its effect on organism in soil: A review [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017, 33(19): 1-6 (in Chinese)
- [3] 甘伟威, 赵国欢. 农田土壤重金属污染情况监测分析及防治策略[J]. 资源节约与环保, 2017(2): 64-65

- Gan W W, Zhao G H. Monitoring, analysis and control strategy of heavy metal pollution in farmland soil [J]. Resource Conservation and Environmental Protection, 2017(2): 64-65 (in Chinese)
- [4] 苗亚琼, 林清. 广西土壤重金属镉污染及对人体健康的危害[J]. 环境与可持续发展, 2016(5): 171-173
- Miao Y Q, Lin Q. Pollution caused by heavy metal cadmium to the soil in Guangxi and its harm to human health [J]. Environment and Sustainable Development, 2016(5): 171-173 (in Chinese)
- [5] 李婧, 周艳文, 陈森, 等. 我国土壤镉污染现状、危害及其治理方法综述[J]. 安徽农学通报, 2015, 21(24): 104-107
- Li J, Zhou Y W, Chen S, et al. Actualities, damage and management of soil cadmium pollution in China [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2015, 21(24): 104-107 (in Chinese)
- [6] Johannes G, Franziska S, Christian G S, et al. The toxicity of cadmium and resulting hazards for human health [J]. Journal of Occupational Medicine and Toxicology, 2006, 1(1): 22
- [7] Alexander P D, Alloway B J, Dourado A M. Genotypic variations in the accumulation of Cd, Cu, Pb and Zn exhibited by six commonly grown vegetables [J]. Environmental Pollution, 2006, 144: 736-745
- [8] Prozialeck W C, Edwards J R, Nebert D W, et al. The vascular system as a target of metal toxicity [J]. Toxicological Sciences, 2008, 102(2): 207-218
- [9] Lu J, Jin T, Nordberg G, et al. Metallothionein gene expression in peripheral lymphocytes from cadmium-exposed workers [J]. Cell Stress Chaperones, 2001, 6(2): 97-104
- [10] Nemmiche S, Chabane-Sari D, Guiraud P. Role of alpha-tocopherol in cadmium-induced oxidative stress in Wistar rat's blood, liver and brain [J]. Chemico-biological Interactions, 2007, 170(3): 221-230
- [11] Kusakabe T, Nakajima K, Nakazato K, et al. Changes of heavy metal, metallothionein and heat shock proteins in Sertoli cells induced by cadmium exposure [J]. Toxicology in Vitro, 2008, 22(6): 1469-1475
- [12] Thompson J, Bannigan J. Cadmium: Toxic effects on the reproductive system and the embryo [J]. Reproductive Toxicology, 2008, 25(3): 304-315
- [13] 刘天红, 孙福新, 王颖, 等. 无机镉对栉孔扇贝(*Chlamys farreri*)急性毒性研究及其安全评价[J]. 食品研究与开发, 2010, 31(4): 161-165
- Liu T H, Sun F X, Wang Y, et al. The study on acute toxicity test on inorganic-cadmium to *Chlamys farreri* and its safety estimation [J]. Food Research and Development, 2010, 31(4): 161-165 (in Chinese)
- [14] 龚频, 白晓换, 陈福欣, 等. 镉的肝脏毒性研究进展[J]. 工业卫生与职业病, 2016, 42(4): 318-320
- Gong P, Bai X H, Chen F X, et al. Advances in liver toxicity of cadmium [J]. Industrial Health and Occupational Diseases, 2016, 42(4): 318-320 (in Chinese)
- [15] Ujah G A, Nna V U, Agah M I, et al. Effect of quercetin on cadmium chloride-induced impairments in sexual behaviour and steroidogenesis in male wistar rats [J]. Andrologia, 2018, 50(2): e12866
- [16] Hajrezaie M, Paydar M, Looi C Y, et al. Corrigendum: Apoptotic effect of novel schiff based CdCl₂ (C₁₄H₂₁N₃O₂) complex is mediated via activation of the mitochondrial pathway in colon cancer cells [J]. Scientific Reports, 2017, 7: 46793
- [17] Feng Z M, Zhou X L, Wu F, et al. Both dietary supplementation with monosodium L-glutamate and fat modify circulating and tissue amino acid pools in growing pigs, but with little interactive effect[J]. PLoS One, 2014, 9(1): e84533
- [18] 戴清文, 樊璞, 杨允正, 等. 猪实验性镉中毒[J]. 中国兽医杂志, 1991, 17(4): 7-9
- Dai Q W, Fan P, Yang Y Z, et al. Experimental cadmium poisoning in pigs [J]. Chinese Journal of Veterinary Medicine, 1991, 17(4): 7-9 (in Chinese)
- [19] 凡强胜. 生长育肥猪日粮镉水平和组织镉残留动态关系研究[D]. 重庆: 西南大学, 2007: 21-38
- Fan Q S. The dynamic relationship of cadmium residues in the body tissues with the content of cadmium in the dietary of the growing-finishing pig [D]. Chongqing: Southwest University, 2007: 21-38 (in Chinese)
- [20] Combs D K, Goodrich R D, Meiske J C. Influence of dietary zinc or cadmium on hair and tissue mineral concentrations in rats and goats [J]. Journal of Animal Science, 1983, 56(1): 184-193
- [21] Bundscherer B, Rambeck W A, Kollmer W E, et al. Effect of zinc content in the fodder on cadmium retention in the liver and kidneys in chickens[J]. Zeitschrift Fur Ernahrungswissenschaft, 1985, 24(2): 73-78
- [22] Bennett D C, Hughes M R, Elliott J E, et al. Effect of cadmium on Pekin duck total body water, water flux, renal filtration, and salt gland function[J]. Journal of Toxicology and Environmental Health Part A, 2000, 59(1): 43-56
- [23] Lisk D J, Boyd R D, Telford J N, et al. Toxicologic studies with swine fed corn grown on municipal sewage sludge-amended soil [J]. Journal of Animal Science, 1982,

- 55(3): 613-619
- [24] 谢春, 吴建伟, 刘利亚, 等. 多代镉胁迫对家蝇幼虫血淋巴中镉和游离氨基酸的影响[J]. 环境与健康杂志, 2013, 30(10): 865-868
Xie C, Wu J W, Liu L Y, et al. Effects of multigeneration-al cadmium stress on cadmium and free amino acid in hemolymph of the *Musca domestica* larvae [J]. Journal of Environment and Health, 2013, 30(10): 865-868 (in Chinese)
- [25] 顾君一, 胡迎青, 许志祥, 等. 镉中毒对大鼠血、尿氨基酸及酶水平的影响[J]. 南通医学院学报, 1994, 14(2): 145-147
Gu J Y, Hu Y Q, Xu Z X, et al. Effect of cadmium intoxication in rat on amino acids and enzymes levels in plasma and urine [J]. Journal of Nantong Medical College, 1994, 14(2): 145-147 (in Chinese)
- [26] Himeno S, Yanagiya T, Fujishiro H. The role of zinc transporters in cadmium and manganese transport in mammalian cells [J]. Biochimie, 2009, 91(10): 1218-1222
- [27] Thevenod F. Catch me if you can! Novel aspects of cadmium transport in mammalian cells[J]. Biometals, 2010, 23(5): 857-875
- [28] 吴景初, 周秀达, 黄永源, 等. 大鼠喂镉米后镉在体内的分布[J]. 环境与健康杂志, 1987, 4(6): 25
- [29] Bokori J, Fekete S. Complex study of the physiological role of cadmium. I. Cadmium and its physiological role [J]. Acta Veterinaria Hungarica, 1995, 43(1): 3-43
- [30] Min K S, Kobayashi K, Onosaka S, et al. Tissue distribution of cadmium and nephropathy after administration of cadmium in several chemical forms[J]. Toxicology and Applied Pharmacology, 1986, 86(2): 262-270
- [31] Suwazono Y, Kobayashi E, Okubo Y, et al. Renal effects of cadmium exposure in cadmium nonpolluted areas in Japan [J]. Environmental Research, 2000, 84(1): 44-55 ◆