



刘赛格, 李宁, 何俊鑫, 胡晓烜, 周治宇, 周振明, 孟庆翔, 吴浩. 沸石在安格斯公牛上的耐受性评价[J]. 中国农业大学学报, 2026, 31(01): 115-126.

LIU Saige, LI Ning, HE Junxin, HU Xiaoxuan, ZHOU Zhiyu, ZHOU Zhenming, MENG Qingxiang, WU Hao. Evaluation of the tolerability of zeolite on angus bulls[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2026, 31(01): 115-126.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2026.01.10

沸石在安格斯公牛上的耐受性评价

刘赛格 李 宁 何俊鑫 胡晓烜 周治宇 周振明 孟庆翔 吴浩*

(中国农业大学 动物科学技术学院, 北京 100193)

摘 要 本研究旨在通过饲粮添加不同水平沸石对安格斯公牛生长性能、养分表观消化率、血液生理生化指标的影响, 评价肉牛对沸石的耐受性。选取18头体重为(730.40±11.19) kg的安格斯公牛, 随机分为3组, 每组6头牛, 对照组(CON组)饲喂基础饲粮, 有效组(E组)在基础饲粮的基础上添加0.4%沸石, 耐受组(10E组)添加4%沸石。试验期49 d, 其中预饲期7 d, 正式期42 d。结果表明: 1) 饲粮中添加有效剂量即0.4%的沸石可以显著提高肉牛的生长性能($P<0.05$), 添加耐受剂量即4.0%的沸石对肉牛生长性能无显著影响($P>0.05$)。2) 饲粮中添加有效剂量即0.4%的沸石可以显著提高粗蛋白的表观消化率($P<0.05$), 具有提高中性洗涤纤维表观消化率的趋势($P=0.089$), 添加耐受剂量即4.0%的沸石对各养分表观消化率无显著影响($P>0.05$)。3) 饲粮中添加有效剂量即0.4%的沸石对血常规、血清生化、血清免疫指标无显著影响($P>0.05$), 可以显著提高机体的抗氧化及抗炎能力($P<0.05$), 添加耐受剂量即4.0%的沸石对血液生化指标无显著影响($P>0.05$), 但会显著降低机体的抗氧化及抗炎能力($P<0.05$)。综上, 饲粮中添加4.0%的沸石对育肥肉牛生长性能、养分表观消化率、血清生化指标无负面影响, 但对血清抗氧化、血清炎症因子指标产生负面影响, 表明在肉牛育肥饲粮中添加沸石的耐受剂量低于4.0%。因此, 在实际生产中推荐使用0.4%的沸石添加水平, 可在保障动物健康的前提下有效提高肉牛生产效益。

关键词 沸石; 耐受性评价; 生长性能; 养分表观消化率; 血液生理生化指标

中图分类号 S823.9+2

文章编号 1007-4333(2026)01-0115-12

文献标志码 A

Evaluation of the tolerability of zeolite on angus bulls

LIU Saige, LI Ning, HE Junxin, HU Xiaoxuan, ZHOU Zhiyu, ZHOU Zhenming,
MENG Qingxiang, WU Hao*

(College of Animal Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract This research aimed to evaluate the tolerance of beef cattle to zeolite by examining the effects of adding different levels of zeolite in the diet on the growth performance, apparent nutrient digestibility, and blood physiological and biochemical indices of Angus bulls. Eighteen Angus bulls with a body weight of (730.40±11.19) kg were selected and randomly divided into 3 groups, with 6 bulls in each group. The control group (CON group) was fed a basal diet, the effective group (E group) was fed the basal diet supplemented with 0.4% zeolite, and the tolerance group (10E group) was fed the basal diet supplemented with 4.0% zeolite. The experimental period was 49 days, including a 7 day pre-feeding period and a 42 day formal period. The results showed that: 1) Adding an effective dose of 0.4% zeolite in the diet can significantly improve the growth performance of beef cattle ($P<0.05$), while adding a tolerance dose of 4.0% zeolite had no significant effect on the growth performance of beef cattle ($P>0.05$). 2) Adding an effective dose of 0.4% zeolite in the diet can

收稿日期: 2025-06-16; 接受日期: 2025-08-25

基金项目: “生态农业科技创新与发展基金(肉牛)”项目(1041-2424003)

第一作者: 刘赛格(ORCID: 0009-0004-8464-9591), 硕士研究生, E-mail: S20233040819@cau.edu.cn

通讯作者: 吴浩(ORCID: 0000-0003-1320-4603), 副教授, 主要从事动物营养与饲料科学方向的研究, E-mail: wu2213@cau.edu.cn

significantly increase the apparent digestibility of crude protein ($P<0.05$), and there was a tendency to increase the apparent digestibility of neutral detergent fiber ($P=0.089$), and adding a tolerance dose of 4.0% zeolite had no significant effect on the apparent digestibility of various nutrients ($P>0.05$). 3) Adding an effective dose of 0.4% zeolite in the diet had no significant effect on blood routine, serum biochemistry, and serum immune indices ($P>0.05$), but can significantly improve the antioxidant and anti-inflammatory capacities of the body ($P<0.05$). Adding a tolerance dose of 4.0% zeolite had no significant effect on blood biochemical indices ($P>0.05$), but significantly reduce the antioxidant and anti-inflammatory capacities of the body ($P<0.05$). In conclusion, adding 4.0% zeolite in the diet of fattening beef cattle had no negative effects on the growth performance, apparent nutrient digestibility, and serum biochemical indices of fattening beef cattle, but had negative effects on serum antioxidant and serum inflammatory factor indices, indicating that the tolerance dose of zeolite added in the fattening diet of beef cattle was less than 4.0%. Therefore, in practical production, a supplementation level of 0.4% zeolite is recommended, which can effectively enhance beef cattle production performance while ensuring animal health.

Keywords zeolite; tolerance evaluation; growth performance; apparent nutrient digestibility; blood physiological and biochemical indices

天然矿物质作为抗结块剂、霉菌毒素粘合剂^[1]以及矿物质和有机质成分^[2]的来源之一,对提高动物的生产性能具有积极意义,被广泛应用于饲料添加剂中。天然沸石(Zeolite)是火山熔岩形成的一种格架状结构的多孔性含碱金属和碱土金属以及结晶水的铝硅酸盐矿物^[3-4],是使用最广泛的天然矿物质饲料之一。沸石特殊的结构使其具有选择吸附、离子交换、催化和再生等性能^[3]。目前关于沸石应用于畜禽的研究主要集中于奶牛、山羊和家禽,有关肉牛的报道较少^[5-6]。Frizzarini等^[7]研究发现,通过产前补充沸石,可以改善奶牛钙代谢,缓解低钙血症(Hypocalcemia),并且能够增加初乳中IgG的浓度。Sallam等^[8]研究发现,与对照组相比,在尿素替代蛋白饲料中添加沸石,极显著提高了羔羊的终末体重、日增重、干物质采食量并极显著降低了饲料转化率。Kaya等^[9]研究发现,与传统垫料相比,饲养在富含沸石的垫料上的肉鸡,其饲料转化率显著降低,且鸡胸产肉量、大腿产肉量和鸡翅产肉量均显著升高。由此可见,沸石具有的特殊性能对于提高饲料的品质和营养价值,增强机体的免疫功能,改善动物体消化道内环境和畜舍生长环境,促进机体对营养物质的吸收以及提高动物的生产性能具有重要意义。

反刍动物集约化生产系统以高精料饲料为基础,并使用尿素替代饲料蛋白质,虽然短期可以提高动物产品的产量并降低饲养成本,但会造成瘤胃缓冲能力失调,可能导致动物氨中毒^[8,10]。一方面,沸石具有良好的阳离子吸附性能和交换性能,可以

可逆地结合 NH_4^+ 并将其缓慢的释放^[11];另一方面,沸石含有的矿物质元素以及吸附的阳离子和生物活性物质为瘤胃微生物提供了丰富的底物^[7-8]。White等^[12]研究发现,天然沸石可以结合绵羊瘤胃中高达15%的 NH_4^+ ,减少了氮在血液中的损失,限制了其以尿素的形式排泄至体外。由此可见,沸石可以调控瘤胃内环境,并且提高动物对氮的利用率,对于反刍动物集约化生产具有重要意义。

靶动物耐受性评价通过临床观察、血液学检测及受试物的作用特点和用途增加的特异性观测指标和敏感性功能指标等,对靶动物的短期毒性提供有限评价,当受试物使用剂量超出推荐用量时,也可用来确立受试物的安全范围^[13]。目前关于沸石应用于肉牛的安全问题以及耐受剂量的研究鲜有报道。因此本研究按照《饲料原料和饲料添加剂畜禽靶动物耐受性评价试验指南(试行)》,对沸石在肉牛中的应用开展耐受性评价试验,探究高剂量沸石(4.0% DM)对安格斯公牛的生长性能、养分表观消化率、血液生理生化指标的影响,为沸石在肉牛上的安全应用提供一定的基础数据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本研究所用的沸石呈白色粉末状,系畜禽类及水产类动物饲料添加剂,由北京攀宝生物科技集团有限公司提供,具体成分及含量如表1所示(仅列出主要成分),检测方法为电感耦合等离子体原子发射光谱法(Inductively coupled plasma atomic

emission spectrometry, ICP), 由北京清析技术研究院进行测试。

1.2 饲养试验设计

本研究在北京窦店恒升牧业科技有限公司进

表 1 沸石具体成分及含量

Table 1 The specific composition and content of zeolite mg/kg			
项目 Item	含量 Content	项目 Item	含量 Content
铝 Al	83 570	钠 Na	14 767
钙 Ca	19 580	硅 Si	37 519
铁 Fe	9 396	钛 Ti	1 674
钾 K	54 255	锆 Zr	182
镁 Mg	2 177	硼 B	136
锰 Mn	729		

行,所有动物试验均获得中国农业大学试验动物福利与动物试验伦理审查委员会批准(批准号:Aw82405202-1-01),试验程序严格按照中国农业大学动物研究指导原则执行。本团队前期研究发现,沸石饲喂安格斯肉牛的最高推荐剂量为 0.438%(干物质基础)^[14],考虑到实际试验的可操作性,本研究将 0.4% 作为有效剂量,4.0% 作为耐受剂量。选取 18 头健康且体况良好、体重相近((730.40±11.19) kg)的安格斯公牛,随机分为 3 组,每组 6 头牛。基础饲粮参照 NASEM(2016)^[15]标准配制,各饲粮组成及营养水平见表 2。对照组(CON 组)饲喂基础饲粮,有效组在基础饲粮的基础上添加 0.4%(干物质基础)沸石,耐受组添加 4.0%(干物质基础)沸石。试验期为 49 d,其中预饲期 7 d,正试期 42 d,每天饲喂 2 次(08:00 和 16:00),保证牛只自

表 2 各组饲粮组成及营养水平(干物质基础)

Table 2 Composition and nutritional levels of diets in each group(DM Basis)

项目 Item	沸石添加水平 Zeolite supplementation		
	0	0.4%	4.0%
饲粮原料组成/% Ingredient			
全株玉米青贮 Whole corn silage	43.20	43.03	41.47
玉米秸秆 Corn stalk	14.80	14.74	14.21
玉米 Corn	26.02	25.92	24.98
豆粕 Soybean meal	3.15	3.14	3.02
棉粕 Cottonseed meal	6.74	6.71	6.47
磷酸氢钙 Dicalcium phosphate	0.90	0.90	0.86
小苏打 Sodium bicarbonate	0.50	0.50	0.48
食盐 Salt	0.90	0.90	0.86
预混料 Premix	3.79	3.77	3.64
沸石 Zeolite	—	0.40	4.00
饲粮养分组成 Chemical composition			
干物质/% DM	51.37	51.46	52.36
增重净能/(MJ/kg) NE	1.04	1.03	0.99
粗蛋白质/% CP	11.52	11.48	11.06
粗脂肪/% EE	2.83	2.82	2.72
中性洗涤纤维/% NDF	34.03	33.90	32.67
酸性洗涤纤维/% ADF	20.48	20.40	19.66
钙/% Ca	0.50	0.49	0.47
磷/% P	0.49	0.49	0.47

注:每 kg 预混料含有:15 mg Cu,65 mg Zn,28 mg Mn,0.7 mg I,0.2 mg Co,0.3 mg Se,6000 IU 维生素 A,600 IU 维生素 D 和 47 IU 维生素 E。
Note: Each kilogram of the premix contains 15 mg of copper (Cu), 65 mg of zinc (Zn), 28 mg of manganese (Mn), 0.7 mg of iodine (I), 0.2 mg of cobalt (Co), 0.3 mg of selenium (Se), 6 000 international units (IU) of vitamin A, 600 IU of vitamin D and 47 IU of vitamin E.

由采食和饮水。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 饲粮养分含量 饲粮中粗蛋白(CP)含量的测定参照 GB/T 24318-2009^[16]的方法,粗脂肪(EE)含量的测定参照 AOAC^[17]的方法,中性洗涤纤维(NDF)和酸性洗涤纤维(ADF)含量的测定参照 Van Soest 等^[18]的方法,钙(Ca)含量的测定参照 GB/T 13885-2017^[19]的方法,磷(P)含量的测定参照 GB/T 6437-2018^[20]的方法。

1.3.2 肉牛生长性能 分别于正式试验第1天和第42天晨饲前对试验牛进行称重并记录体重。正式试验期间,每天晨饲前记录各组牛剩料。每天08:00和16:00投料前,用四分法采集各组试验牛新鲜全混合饲粮(TMR),混合均匀后于65℃烘箱中烘干48 h,测定干物质含量,用于计算各组试验牛每天的干物质采食量DMI。部分生长性能指标计算公式如下:

平均日增重(ADG)=(终期体重-初始体重)/试验天数;

饲料转化率(FCR)=干物质采食量/平均日增重。

1.3.3 养分表观消化率 正式试验第40~42天,每天08:00和16:00投料前,用四分法采集各组试验牛新鲜全混合饲粮(TMR),混合均匀后于65℃烘箱中烘干,粉碎后过筛,测定养分含量,用于计算养分表观消化率。正式试验第42天晨饲前,直肠采集新鲜无污染的粪便,加入酒石酸固定氮,于65℃烘箱中烘干48 h,粉碎后过筛,用于计算养分表观消化

率。饲粮及粪便中DM、CP、EE、NDF、ADF含量的测定同1.3.1,饲粮及粪便中酸不溶灰分(AIA)含量的测定参照 GB/T 23742—2009^[21]的方法。计算公式如下:

$$G(\%)=100-100\times(E/F)\times(A/B)$$
 (1)

式中:G为某养分表观消化率,%;E和F为饲粮和粪便中AIA含量,%;A和B为粪便和饲粮中该养分含量,%。

1.3.4 血液生理生化指标 正式试验第42天晨饲前,对试验牛进行尾根静脉采血。每头试验牛用EDTA真空抗凝管采集5 mL血液,缓慢颠倒摇匀后于4℃静置保存,用于血常规指标的测定;用普通真空采血管采集10 mL血液,3 000 r/min(4℃)离心后取上清至1.5 mL冻存管于-80℃保存,用于血生化、免疫、抗氧化及炎症因子指标的测定。血液生理生化指标的测定由北京康佳宏原生物科技有限公司完成。

1.4 数据统计分析

所有试验数据采用 Excel 2019 进行整理, SAS 9.4 进行单因子方差分析(One-way ANOVA)。数据以平均值±均值标准误(SEM)表示, $P<0.05$ 为差异显著, $P<0.01$ 为差异极显著。

2 结果与分析

2.1 沸石对肉牛生长性能的影响

饲粮中添加沸石对肉牛生长性能的影响如表3所示,试验第0天各组肉牛体重($P=0.895$)和

表3 沸石对肉牛生长性能的影响
Table 3 Effects of zeolite on the growth performance of beef cattle

项目 Item	沸石添加水平 Zeolite supplementation			均值标准误 SEM	P值 P value
	0	0.4%	4.0%		
初始体重/kg IBW	730.40	723.60	738.67	11.195	0.895
终末体重/kg FBW	776.00	778.00	787.33	7.324	0.839
平均日增重/(kg/d) ADG	1.09	1.30	1.15	0.102	0.389
干物质采食量/(kg/d) DMI					
0~21 d	16.70	17.04	17.13	0.209	0.696
21~42 d	15.41b	16.81a	17.08a	0.201	0.001
0~42 d	16.06b	16.93a	17.11a	0.148	0.010
饲料转化率FCR	14.73a	13.02b	14.8a	0.153	<0.000 1

注:同行标注字母不同表示差异显著($P<0.05$)。下同。
Note: Different letters in the same row indicate significant differences ($P<0.05$). The same below.

第 42 天各组肉牛体重均无显著差异($P=0.839$), 试验全期 3 个处理组日增重无显著差异($P=0.389$), 0~21 d 各组干物质采食量无显著差异($P=0.696$), 21~42 d 有效组和耐受组干物质采食量极显著高于对照组($P=0.001$), 0~42 d 有效组和耐受组干物质采食量显著高于对照组($P=0.01$), 0~42 d 有效组饲料转化效率极显著高于对照组和耐受组($P<0.0001$), 耐受组与对照组饲料转化效率差异不显著($P>0.05$)。说明饲粮中添加有效剂量即 0.4% 的沸石可以显著提高肉牛的生长性能。与对照组相比, 饲粮中添加耐受剂量即 4.0% 的沸石对肉牛生长性能无显著影响。

2.2 沸石对养分表观消化率的影响

饲粮中添加沸石对养分表观消化率的影响如表 4 所示, 各组间干物质表观消化率(DMD)($P=0.561$)、有机物表观消化率(OMD)($P=0.493$)、酸性洗涤纤维表观消化率(ADFD)($P=0.568$)、粗脂肪表观消化率(EED)($P=0.775$)均无显著差异。与对照组和耐受组相比, 有效组粗蛋白表观消化率(CPD)显

著高于对照组和耐受组($P=0.043$), 同时具有提高中性洗涤纤维表观消化率(NDFD)的趋势($P=0.089$)。耐受组和有效组之间各养分表观消化率均无显著差异($P>0.05$)。说明饲粮中添加有效剂量即 0.4% 的沸石可以显著提高粗蛋白的表观消化率, 且具有提高中性洗涤纤维表观消化率的趋势。与对照组相比, 饲粮中添加耐受剂量即 4.0% 的沸石对各养分表观消化率无显著影响。

2.3 沸石对血液生理生化指标的影响

饲粮中添加沸石对血常规指标的影响如表 5 所示, 试验第 42 天时, 与对照组和有效组相比, 耐受组中间细胞绝对值显著降低($P=0.048$)。各组间其他指标均无显著差异($P>0.05$)。饲粮中添加沸石对血清生化指标的影响如表 6 所示, 试验第 42 天时, 各组间各血清生化指标均无显著差异($P>0.05$)。说明饲粮中添加有效剂量即 0.4% 沸石对肉牛的血常规指标无显著影响, 添加耐受剂量即 4.0% 的沸石显著降低了肉牛的中间细胞绝对值。饲粮中添加沸石对各血清生化指标均无显著影响。

表 4 沸石对养分表观消化率的影响

Table 4 Effects of zeolite on the apparent digestibility of nutrients

项目 Item	沸石添加水平 Zeolite supplementation			均值标准误 SEM	P 值 P value
	0	0.4%	4.0%		
干物质消化率/% DMD	53.81	59.66	58.10	2.087	0.561
有机物消化率/% OMD	55.52	60.61	61.79	2.099	0.493
中性洗涤纤维消化率/% NDFD	53.27	64.23	53.94	2.382	0.089
酸性洗涤纤维消化率/% ADFD	58.30	56.45	53.90	1.583	0.568
粗脂肪消化率/% EED	74.08	78.80	77.94	2.678	0.775
粗蛋白消化率/% CPD	56.73b	66.47a	53.98b	2.018	0.043

饲粮中添加沸石对血清免疫指标的影响如表 7 所示, 试验第 42 天时, 各组间血清免疫指标均无显著差异($P>0.05$), 与对照组相比, 耐受组具有降低 IgA 水平的趋势($P=0.063$)。

饲粮中添加沸石对血清抗氧化指标的影响如表 7 所示, 试验第 42 天时, 耐受组总抗氧化能力(T-AOC)($P=0.0012$)、过氧化氢酶(CAT)水平($P=0.0012$)、总超氧化物歧化酶(T-SOD)水平($P<0.0001$)极显著低于对照组和有效组, 丙二醛(MDA)水平极显著高于对照组和有效组

($P=0.0034$)。与对照组相比, 有效组和耐受组谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)水平无显著差异($P>0.05$), 有效组和耐受组之间相比, 有效组 GSH-Px 浓度显著高于耐受组($P=0.0192$)与对照组相比, 有效组 T-SOD 水平极显著高于对照组($P<0.0001$)。说明饲粮中添加有效剂量即 0.4% 的沸石显著提高了机体的抗氧化能力, 耐受剂量即 4.0% 的沸石显著降低了机体的抗氧化能力。

饲粮中添加沸石对血清炎症因子指标的影响如表 7 所示, 试验第 42 天时, 耐受组 IFN- γ ($P=$

表5 沸石对血常规指标的影响
Table 5 Effects of zeolite on blood routine indices

项目 Item	沸石添加水平 Zeolite supplementation			均值标准误 SEM	P值 P value
	0	0.4%	4.0%		
白细胞数/(10 ⁹ /L) WBC	129.87	125.95	116.43	5.058	0.554
淋巴细胞绝对值/(10 ⁹ /L) LYM	63.55	65.13	67.01	2.161	0.826
中间细胞绝对值/(10 ⁹ /L) MID	22.10a	21.30a	16.71b	1.079	0.048
粒细胞绝对值/(10 ⁹ /L) GRA	19.03	13.37	16.46	2.248	0.653
淋巴细胞百分比/% LYM	57.00	64.05	64.50	3.096	0.569
中间细胞百分比/% MID	13.18	11.97	12.48	1.004	0.896
粒细胞百分比/% GRA	29.82	23.98	23.02	2.340	0.465
红细胞数/(10 ¹² /L) RBC	6.41	5.66	5.93	0.167	0.178
血红蛋白/(g/L) HGB	108.50	99.33	97.83	2.606	0.201
平均红细胞体积/fL MCV	40.02	39.43	38.07	0.603	0.424
平均血红蛋白含量/pg MCH	16.82	17.67	16.52	0.355	0.415
红细胞宽度标准/fL RDW-SD	13.67	14.42	12.17	0.509	0.190
红细胞宽度变异系数/% RDW-CV	23.43	23.12	20.20	0.731	0.137
血小板数/(10 ⁹ /L) PLT	1 071.2	1 022.8	1 612.4	143.300	0.204
血小板压积/(L/L) PCT	0.729	0.651	0.838	0.082	0.670
平均血小板体积/fL MPV	6.850	6.633	6.383	0.138	0.407
血小板分布宽度/% PDW	6.617	8.400	7.100	1.395	0.878

表6 沸石对血清生化指标的影响
Table 6 Effects of zeolite on serum biochemical indices

项目 Item	沸石添加水平 Zeolite supplementation			均值标准误 SEM	P值 P value
	0	0.4%	4.0%		
丙氨酸氨基转移酶/(U/L) ALT	48.20	42.74	38.98	2.435	0.316
天门冬氨酸氨基转移酶/(U/L) AST	114.94	113.01	109.28	5.088	0.910
总蛋白 TP/(g/L)	73.31	74.68	74.32	0.910	0.835
白蛋白/(g/L) ALB	32.45	33.77	32.00	0.437	0.239
球蛋白/(g/L) GLB	40.86	40.91	42.32	0.838	0.748
肌酐/(μmol/L) CREA	112.76	110.33	105.15	3.127	0.626
尿素氮/(mmol/L) BUN	4.16	4.85	3.92	0.217	0.199
总胆固醇/(mmol/L) TC	3.55	3.68	3.25	0.134	0.426
甘油三酯/(mmol/L) TG	0.206	0.174	0.192	0.008	0.261
空腹血糖/(mmol/L) GLU	4.915	4.692	5.002	0.068	0.157
乳酸脱氢酶/(U/L) LDH	1 315.5	1 323.7	1 356.78	28.630	0.841
糖化血清蛋白/(mmol/L) FMN	3.057	3.071	3.123	0.036	0.757
碱性磷酸酶/(U/L) ALP	97.64	98.01	118.29	5.611	0.239
总胆红素/(nmol/L) TBIL	4 013.7	3 448.4	3 405.1	199.579	0.405
直接胆红素/(nmol/L) DBIL	763.72	769.89	716.03	50.219	0.910
间接胆红素/(nmol/L) IBIL	3 250.0	2 678.5	2 800.6	208.107	0.526
钙/(μmol/L) Ca	2 351.7	2 364.7	2 344.5	25.781	0.955
磷/(mmol/L) P	2.235	2.191	2.095	0.049	0.525
铁/(nmol/L) Fe	25 170.0	29 611.0	29 703.0	1 159.3	0.195
铜/(μmol/L) Cu	21.85	22.39	26.38	3.560	0.631
锌/(μmol/L) Zn	14.26	14.71	15.87	0.518	0.451

0.025)、IL-6 ($P=0.018$)、高敏 C 反应蛋白 ($P=0.019$) 浓度显著高于对照组和有效组, TNF- α ($P=0.001\ 2$)、降钙素原 ($P=0.007$)、C 反应蛋白 ($P<0.000\ 1$) 浓度极显著高于对照组和有效组。与对照组相比, 有效组和耐受组 IL-10 浓度差异不显著, 有效组和耐受组之间相比, 有效组 IL-10 浓度显著高于耐受组 ($P=0.025$)。各组 IL-2 无显著差异 ($P>0.05$)。说明饲料中添加有效剂量即 0.4% 的沸石显著提高了机体的抗炎能力, 耐受剂量即 4.0% 的沸石显著增加了机体的炎症反应。

表 7 沸石对血清免疫、抗氧化、炎症因子指标的影响
Table 7 Effect of zeolite on serum immune, antioxidant and inflammatory factor indexes

项目 Item	沸石添加水平 Zeolite supplementation			均值 标准误 SEM	P 值 P value
	0	0.4%	4.0%		
抗氧化指标 Antioxidant index					
总抗氧化能力/(mmol/L) T-AOC	0.744a	0.714a	0.645b	0.013	0.001 2
总超氧化物歧化酶/(U/mL) T-SOD	164.02b	179.19a	153.08c	2.896	<0.000 1
谷胱甘肽过氧化物酶/(U/mL) GSH-Px	212.22ab	233.06a	174.97b	9.104	0.019 2
过氧化氢酶/(U/mL) CAT	6.862a	7.157a	4.155b	0.402	0.000 3
丙二醛/(nmol/L) MDA	3.516b	3.604b	4.153a	0.094	0.003 4
炎症因子指标 Inflammatory factor index					
干扰素 γ /(pg/mL) IFN- γ	49.94b	47.38b	62.40a	2.554	0.025
肿瘤坏死因子 α /(pg/mL) TNF- α	60.75b	55.09b	69.00a	1.804	0.001 2
白细胞介素 2/(pg/mL) IL-2	33.09	32.13	39.59	1.575	0.104
白细胞介素 6/(pg/mL) IL-6	76.10b	76.15b	93.66a	3.115	0.018
白细胞介素 10/(pg/mL) IL-10	26.77ab	28.83a	21.39b	1.324	0.049
降钙素原/(pg/mL) PCT	18.41b	18.76b	22.70a	0.678	0.007
C 反应蛋白/(pg/mL) CRP	92.99b	78.40c	143.78a	7.151	<0.000 1
高敏 C 反应蛋白/(pg/mL) hCRP	31.23b	28.00b	40.43a	1.989	0.019
免疫指标 Immune index					
免疫球蛋白 A/(mg/dL) IgA	3.515	3.331	3.281	0.422	0.063
免疫球蛋白 M/(mg/dL) IgM	6.882	6.822	6.844	0.163	0.990
免疫球蛋白 G/(mg/dL) IgG	187.23	179.83	198.54	10.099	0.771
补体 C3/(mg/dL)	0.641	0.662	0.483	0.047	0.210
补体 C4/(mg/dL)	0.092	0.109	0.058	0.010	0.124

3 讨 论

3.1 沸石对生长性能和表观消化率的影响

沸石具有的格架状多孔结构以及特殊的选择吸附和离子交换性能,使其可以吸附带正电荷的离子,如 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} ,维持瘤胃的渗透压稳定和 pH 值稳定,提高养分在胃肠道中的通过率和消化率,促进纤维降解菌,如瘤胃球菌属的活性;另外,

沸石缓慢释放其中含有的瘤胃微生物所需的氮、营养物质和矿物质,为微生物的生长提供了底物,可以增加微生物蛋白质的产生;此外,沸石中含有的微量元素,如 Mg、Zn,作为多种消化酶的活性因子,可以间接激活消化酶系统,促进养分的消化和吸收^[11, 22-25]。这也是本研究中,与对照组相比,有效组干物质和有机物的表观消化率虽未出现显著差异,但在数值上增加了 4~6 个百分点,并具有提高中性

洗涤纤维表观消化率趋势这一结果的原因。Masoumi等^[5]和Dschaak等^[26]研究发现,产后奶牛补充适宜剂量的沸石,将显著增加DMI,并显著提高干物质、有机物、粗蛋白、中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维的表观消化率,这与本研究的结果基本一致,但本研究中添加适宜剂量沸石后,干物质、有机物和酸性洗涤纤维的表观消化率没有显著变化,这可能与试验所用沸石的纯度、粒径大小和消化道内环境的pH值不同有关,关于影响沸石阳离子交换性质的因素及其作用效果的研究,体外培养试验中的报道较多,针对其体内饲养试验的报道较少^[27-28],本研究虽未围绕沸石不同纯度和粒径在体内饲养试验中的应用效果展开研究,但为揭示沸石与肉牛干物质采食量及养分表观消化率之间相互关系的研究提供了基础数据。

饲料中的氮只有10%~40%被捕获并转化为牛肉或牛奶^[27],使反刍动物氮利用率较低的主要原因之一是饲料蛋白质在瘤胃中的降解^[29-30]。微生物发酵过程中未经及时捕获的氨气,经瘤胃上皮吸收运输至肝门系统中,形成尿素氮(Blood urea nitrogen, BUN),释放入血液中,最终以尿素的形式排出体外,并被快速水解产生氨气^[31]。65%的氮以氨气的形式流失到大气中,不仅造成氮的浪费,其二级产物如 NH_4^+ 和 NO_3^- 还会污染空气和水质,危害动物生活环境甚至使动物氨中毒,对动物健康和生产性能造成影响^[27, 32]。沸石的离子交换性能和选择吸附性能,使其具备可逆地结合 H^+ 和 NH_4^+ 并将它们缓慢释放^[11]的能力,减少了氮在血液中的损失,并且提高了动物对氮的利用率。Sallam等^[8]研究发现,饲喂含有沸石与尿素的高浓缩物饲料的羔羊,其瘤胃 NH_3 浓度降低,机体对氮的利用率提高。本研究结果表明,饲喂有效剂量的沸石,将显著提高粗蛋白的表观消化率,侧面反映了饲料中添加沸石能够提高动物对氮的利用率。另外, Sigurdarson等^[28]和 Amanzougarene等^[11]研究表明,饲喂高精料饲料时,瘤胃pH值下降, NH_3 向 NH_4^+ 的方向转化,高浓度的 NH_4^+ 提高了沸石的阳离子交换容量, NH_4^+ 将更高效地被沸石吸附而不是以 NH_3 的形式被释放出来,减少氮的浪费。因此,反刍动物现代集约化养殖系统的高精料饲料中辅以适宜剂量的沸石,对于改善反刍动物瘤胃的氮代谢,促进反刍动物的集约化生产具有重要意义。

目前仍未见关于沸石在肉牛生产上的耐受性评价方面的报道。本研究发现,添加耐受剂量即4%的沸石,显著降低了粗蛋白的表观消化率,这可能是由于耐受剂量的沸石过度吸附了氨基酸、矿物质等养分,导致微生物可利用的底物减少,并且增加了食糜黏度或者缩短了食糜在消化道内的停留时间,沸石的这种剂量效应抑制了其因选择吸附和离子交换性能对蛋白质消化率的提高作用^[33-34],因此与对照组相比,有效剂量的沸石显著提高了粗蛋白消化率9.74个百分点,而耐受剂量的沸石反而在数值上使粗蛋白消化率降低了2.75个百分点,所以耐受组DMI虽然相较于对照组显著提高,但其FCR与对照组相比却无显著差异。然而,与对照组相比,耐受组干物质和有机物消化率却在数值上增加了4~7个百分点。这可能是由于沸石的选择吸附和离子交换性能改善了瘤胃环境,提高了淀粉分解菌的丰度,从而提高了非结构性碳水化合物的消化率^[35],肉牛日粮中非结构性碳水化合物的占比达35%,对干物质和有机物消化率的影响较大^[36]。此外,沸石可能吸附胆汁酸促进了脂肪的乳化作用^[37],这也与本研究,与对照组相比,耐受组在数值上使粗脂肪消化率提高了3.86个百分点的结果相一致。因此,非结构性碳水化合物和粗脂肪消化率的提高抵消了蛋白质消化率的下降作用,所以耐受组干物质和有机物消化率在数值上有所上升但不显著。这也表明高剂量沸石对饲料不同营养物质组分存在选择性作用机制,在抑制粗蛋白消化过程的同时,可以通过改善瘤胃环境促进对非结构性碳水化合物的消化。

3.2 沸石对血液生理生化指标的影响

血液作为运输营养物质和代谢废物的载体,同时承担着机体体液调节的功能,动物的血液生理生化指标是与机体健康状况和代谢状态紧密相关的重要指标,是用于评估机体局部和整体生理代谢和组织功能的标志物^[38-41]。肉牛饲养过程中许多因素都可能导致自由基(Reactive oxygen species, ROS)在体内积累,造成氧化系统和抗氧化系统不平衡,最终使肉牛产生氧化应激(Oxidative stress, OS)^[42]。总抗氧化能力(T-AOC)是评估机体抗氧化能力的重要指标;超氧化物歧化酶(SOD)是一种重要的抗氧化酶,是反映机体抗氧化水平的重要标志物;过氧化氢酶(CAT)可以保护机体免受ROS

积累的有害影响;丙二醛(MDA)是脂质过氧化的产物,与组织细胞中脂质的过氧化程度有关,其水平升高将造成组织细胞氧化损伤^[42-46]。ROS的产生将催化超氧阴离子自由基歧化产生氧气和过氧化氢,其水平一旦超过机体抗氧化防御系统的能力,将造成SOD、CAT水平以及T-AOC下降,MDA水平升高^[47]。氧化应激往往与机体炎症反应具有协同作用,氧化应激水平增加将会加剧促炎细胞因子如白细胞介素-6(IL-6)、干扰素- γ (TNF- γ)和肿瘤坏死因子- α (TNF- α)水平的增加^[48-49]。IL-6是具有代表性的促炎性细胞因子;IL-10是具有代表性抗炎型细胞因子,对细胞介导的免疫反应至关重要,可以刺激B细胞的增殖和分化,增强体液免疫;降钙素原(PCT)是机体在炎症反应刺激下分泌的一种蛋白质前体物质,是诊断细菌感染的重要标志物;C反应蛋白(CRP)是由肝脏合成的急性期反应蛋白,其水平可在炎症反应刺激下迅速升高^[48,50]。

沸石中含有的微量元素,如Zn、Cu和Fe,是保护细胞免受活性氧和自由基损伤的抗氧化酶的基本辅助因子,可以提高机体的抗氧化能力,使机体免受氧化应激损伤^[48]。Kamr等^[48]研究表明,Zn浓度与受牛块状皮肤病影响的机体抗氧化能力呈正相关,Cu浓度则与促氧化能力呈负相关,Cu和Zn的水平与机体抗炎细胞因子水平成正比关系。这与本研究中添加适宜剂量沸石显著提高了T-SOD水平并显著降低了CRP水平的结果相一致。然而,添加耐受剂量的沸石显著降低了血清的抗氧化能力并显著增加了血清的炎症因子水平,这样的结果并非与前述的微量元素的浓度与机体抗氧化水平和抗炎水平呈正相关的观点相悖。这可能是由于高浓度微量元素产生的剂量效应,耐受剂量沸石中含有的过量的Fe和Cu引发了芬顿反应,产生了更多的ROS,且高浓度的Fe和Cu干扰了抗氧化酶活性位点的正常功能,扰乱了机体的氧化平衡系统,过度激活了免疫系统,导致促炎因子释放增加^[51],此外,高浓度微量元素可能造成肝脏和肾脏的代谢负担^[52],最终加剧了机体氧化应激和炎症反应。另外,考虑到沸石具有的吸附性能,耐受剂量的沸石可能过度吸附机体中的抗氧化分子,如维生素C、维生素E或抗炎介质,如谷胱甘肽,造成机体抗氧化能力的下降^[53]。耐受组血清抗氧化和炎

症因子指标的结果也与耐受剂量的沸石降低IgA水平的结果相一致。

4 结 论

饲料中添加0.4%的沸石可以显著提高育肥肉牛的生长性能及粗蛋白质表观消化率,并显著改善其健康状况。饲料中添加4.0%的沸石对育肥肉牛生长性能、养分表观消化率、血清生化指标无显著影响,但对肉牛的血清抗氧化及炎症因子指标产生负面影响,表明在肉牛育肥饲料中添加沸石的耐受剂量小于4.0%。

参考文献 References

- [1] Angulo E, Brufau J, Esteve-Garcia E. Effect of a sepiolite product on pellet durability in pig diets differing in particle size and in broiler starter and finisher diets[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 1996, 63(1/4):25-34
- [2] Wilson I. Applied Clay Mineralogy. Occurrences, processing, and application of kaolins, bentonite, palygorskite-sepiolite, and common clays[J]. *Clays and Clay Minerals*, 2007, 55(6):644-645
- [3] 张伟. 沸石在畜牧养殖及饲料工业中的应用研究进展[J]. *饲料工业*, 2003, 24(3):23-27
Zhang W. Research progress on the application of zeolite in animal husbandry and feed industry[J]. *Feed Industry*, 2003, 24(3):23-27 (in Chinese)
- [4] 董淑慧, 周凌云, 孙鹏, 张养东. 沸石在反刍动物生产上的应用研究进展[J]. *华北农学报*, 2011, 26(S2):243-247
Dong S H, Zhou L Y, Sun P, Zhang Y D. Research progress on application of zeolite in ruminant production[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2011, 26(S2):243-247 (in Chinese)
- [5] Masoumi Pour M M, Foroudi F, Karimi N, Abedini M R, Karimi K. Effect of anionic and zeolite supplements and oral calcium bolus in prepartum diets on feed intake, milk yield and milk compositions, plasma Ca concentration, blood metabolites and the prevalence of some reproductive disorders in fresh dairy cows[J]. *Animals*, 2022, 12(21):3059
- [6] Aladdin Helmy S, Mahrous Ebeid H, Ahmed Hanafy M, Mohamed Mahmoud A E, Roshdy Ali El-Tanany R. Rumen parameters, nutrients digestibility and milk production of lactating Boer goats fed diets containing clay minerals[J]. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 2022, 25(8):755-764
- [7] Frizzarini W S, Campolina J P, Vang A L, Lewandowski L R, Teixeira N N, Connelly M K, Monteiro P L J, Hernandez L L. Mechanisms by which feeding synthetic zeolite A and dietary cation-anion difference diets affect feed intake, energy metabolism, and milk performance: Part II[J]. *Journal of Dairy Science*, 2024, 107(7):5222-5234
- [8] Sallam S M A, Abo-Zeid H M, Abaza M A, El-Zaiat H M. Nutrient intake, digestibility, growth performance, and carcass of sheep fed urea-based diet supplemented with natural clinoptilolite[J]. *Nihon Chikusan Gakkaiho*, 2022,

- 93(1):e13689
- [9] Kaya M, Karaarslan S, Oral Toplu H D, Dereli Fidan E, Türkylmaz M K, Nazlıgül A. Growth performance, carcass, and meat quality traits in broiler chickens reared on plastic-grid flooring, wood shavings, and zeolite-supplemented wood shavings[J]. *Tropical Animal Health and Production*, 2024, 56(2):66
- [10] 何姗姗, 吴力健, 裴世腾, 吕良康, 熊凤良, 张帆, 王炜康, 陈合伟, 杨红建. 反刍动物乳酸利用菌的代谢、分解模式及其在瘤胃酸中毒中的应用[J]. 中国畜牧杂志, 2025, 61(2):20-25
- He S S, Wu L J, Pei S T, Lyu L K, Xiong F L, Zhang F, Wang W K, Chen H W, Yang H J. The metabolism and degradation patterns of lactate-utilizing bacteria in ruminants and their application in rumen acidosis[J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2025, 61(2):20-25 (in Chinese)
- [11] Amanzougarene Z, Fondevila M. Rumen fermentation of feed mixtures supplemented with clay minerals in a semicontinuous *in vitro* system[J]. *Animals*, 2022, 12(3):345
- [12] White J L, Ohlrogge A J. Ion exchange materials to increase consumption of nonprotein nitrogen in ruminants. United states, 4393082[P]. 1983-01-12
- [13] 文开梅. 甜叶菊提取物对蛋鸡有效性和耐受性评价研究[D]. 雅安:四川农业大学, 2024
- Wen K M. Evaluation of the efficacy and safety of Stevia extract in laying hens [D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2024 (in Chinese)
- [14] 李宁. 斜发沸石对肉牛生长性能、血清指标及瘤胃微生物区系的影响[D]. 北京:中国农业大学, 2025
- Li N. Effects of clinoptilolite zeolite on growth performance, serum indexes and rumen microflora of beef cattle [D]. Beijing: China Agricultural University, 2025 (in Chinese)
- [15] National academies of sciences, engineering, and medicine. Nutrient requirements of beef cattle[S]. Washington: The National Academies Press, 2016
- [16] GB/T 24318—2009. 杜马斯燃烧法测定饲料原料中总氮含量及粗蛋白质的计算[S]. 北京:中国标准出版社, 2009
- GB/T 24318—2009. Determination of total nitrogen content in animal feeding stuffs by combustion according to the Dumas principle and calculation of the crude protein content[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009 (in Chinese)
- [17] Horwitz W, Latimer G W. *Official Methods of Analysis of AOAC International* [M]. Maryland: AOAC Publications, 2023:38-46
- [18] Van Soest P J, Robertson J B, Lewis B A. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition [J]. *Journal of Dairy Science*, 1991, 74(10):3583-3597
- [19] GB/T 13885—2017. 饲料中钙、铜、铁、镁、锰、钾、钠和锌含量的测定原子吸收光谱法[S]. 北京:中国标准出版社, 2017
- GB/T 13885—2017. Determination of the contents of calcium, copper, iron, magnesium, manganese, potassium, sodium, and zinc contents in feeds—Method using atomic absorption spectrometry[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017 (in Chinese)
- [20] GB/T 6437—2018. 饲料中总磷的测定分光光度法[S]. 北京:中国标准出版社, 2018
- GB/T 6437—2018. Determination of phosphorus in feeds-spectrophotometry [S]. Beijing: Standards Press of China, 2018 (in Chinese)
- [21] GB/T 23742—2009. 饲料中盐酸不溶灰分的测定[S]. 北京:中国标准出版社, 2009
- GB/T 23742—2009. Determination of ash insoluble in hydrochloric acid[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009
- [22] Kerwin A L, Ryan C M, Leno B M, Jakobsen M, Theilgaard P, Barbano D M, Overton T R. Effects of feeding synthetic zeolite A during the prepartum period on serum mineral concentration, oxidant status, and performance of multiparous Holstein cows [J]. *Journal of Dairy Science*, 2019, 102(6):5191-5207
- [23] Khachlouf K, Hamed H, Gdoura R, Gargouri A. Effects of dietary Zeolite supplementation on milk yield and composition and blood minerals status in lactating dairy cows[J]. *Journal of Applied Animal Research*, 2019, 47(1):54-62
- [24] Mahdavi-rad N, Chaji M, Bojarpour M, Dehghanbanadaky M. Comparison of the effect of sodium bicarbonate, sodium sesquicarbonate, and zeolite as rumen buffers on apparent digestibility, growth performance, and rumen fermentation parameters of Arabi lambs[J]. *Tropical Animal Health and Production*, 2021, 53(5):465
- [25] Banaszak M, Biesek J, Adamski M. Aluminosilicates at different levels in rye litter and feed affect the growth and meat quality of broiler chickens [J]. *Veterinary Research Communications*, 2022, 46(1):37-47
- [26] Dschaak C M, Eun J S, Young A J, Stott R D, Peterson S. Effects of supplementation of natural zeolite on intake, digestion, ruminal fermentation, and lactational performance of dairy cows [J]. *The professional Animal Scientist*, 2010, 26(6):647-654
- [27] Myers C A, de Haro Marti M E, Chahine M, Chibisa G E. Feeding or pen surface application of clinoptilolite with different particle sizes: Impact on nitrogen utilization and manure ammonia emissions in feedlot cattle [J]. *Journal of Animal Science*, 2024, 102:skae230
- [28] Sigurdarson J J, Svane S, Karring H. The molecular processes of urea hydrolysis in relation to ammonia emissions from agriculture[J]. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2018, 17(2):241-258
- [29] 刘洋, 张振斌, 臧俞, 张军, 王梦芝. 反刍动物瘤胃可溶碳和可溶氮降解平衡研究进展[J]. 饲料工业, 2024, 45(18):25-33
- Liu Y, Zhang Z B, Zang Y, Zhang J, Wang M Z. Research progress on the degradation balance of soluble carbon and soluble nitrogen in the rumen of ruminants [J]. *Feed Industry*, 2024, 45(18):25-33 (in Chinese)
- [30] Inácio A G, Ítavo, Camila Celeste Brandão Ferreira, Dias A M, dos Santos Difante G, de Queiroz J F, de Oliveira L C S, dos Santos G T, Ítavo L C V. A new feed additive composed of urea and soluble carbohydrate coated with wax for controlled release in ruminal fluid[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1):4487
- [31] 牛晓麟, 张千. 反刍动物蛋白质代谢及氨基酸营养调控机制[J]. 饲料工业, 2023, 44(19):67-72
- Niu X L, Zhang Q. Study on protein metabolism and amino acid nutritional

- regulation mechanism in ruminants [J]. *Feed Industry*, 2023, 44(19): 67-72 (in Chinese)
- [32] 刘玉, 郑爱华, 林萌萌, 麻小凤. 过瘤胃氨基酸在反刍动物中的应用进展[J]. 饲料研究, 2024, 47(12): 158-162
- Liu Y, Zheng A H, Lin M M, Ma X F. Progress in the application of rumen amino acids in ruminants [J]. *Feed Research*, 2024, 47(12): 158-162 (in Chinese)
- [33] 李瑞银, 张增贤, 张秀江, 沈宜钊, 李妍, 张喆萍, 曹红蕊, 李秋凤, 曹玉凤, 李建国. 霉菌毒素吸附剂对西门塔尔育肥牛生长性能、养分表观消化率、血清抗氧化和免疫指标的影响[J]. 动物营养学报, 2021, 33(7): 3914-3924
- Li R Y, Zhang Z X, Zhang X J, Shen Y Z, Li Y, Zhang Z P, Cao H R, Li Q F, Cao Y F, Li J G. Effects of mycotoxin adsorbent on growth performance, nutrient apparent digestibilities, serum antioxidant and immune indices of Simmental fattening cattle [J]. *Journal of Animal Nutrition*, 2021, 33(7): 3914-3924 (in Chinese)
- [34] 田亚原, 付叶, 安佳秀, 赵颖, 吴文旋, 杨艺. 不同吸附剂对玉米赤霉烯酮的吸附效果及其对肉羊健康的影响[EB/OL]. [2025-04-28]. <https://doi.org/10.19556/j.0258-7033.20241202-01>
- Tian Y Y, Fu Y, An J X, Zhao Y, Wu W X, Yang Y. Adsorption effect of different adsorbents on zearalenone and its effect on the health of meat sheep [EB/OL]. [2025-04-28]. <https://doi.org/10.19556/j.0258-7033.20241202-01> (in Chinese)
- [35] 邓波, 杨淑晶, 王淑萍, 房健, 杨连玉. 沸石粉对肉鸡日粮能量和蛋白质利用的影响[J]. 吉林农业大学学报. 2003, 25(4): 442-444, 450
- Deng B, Yang S J, Wang S P, Fang J, Yang L Y. Effect of zeolite supplementation on dietary energy and protein utilization by broilers [J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2003, 25(4): 442-444, 450 (in Chinese)
- [36] Naderi N, Ghorbani G R, Erfani H, Ferraretto L F. Feeding byproduct-based concentrates instead of human-edible feed ingredients increases net food production and improves performance of high-producing Holstein cows [J]. *Animals*, 2022, 12(21): 2977
- [37] 陈健. 天然沸石在肉鸭饲料中的应用效果研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2011
- Chen J. Study on the application effect of natural zeolite in meat duck feed [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011 (in Chinese)
- [38] Choi H, Chen Y, Longo F, Kim S W. Comparative effects of benzoic acid and sodium benzoate in diets for nursery pigs on growth performance and acidification of digesta and urine [J]. *Journal of Animal Science*, 2023, 101: skad116
- [39] 崔林雨, 李雄雄, 齐帅, 沙玉柱, 王正文, 赵生国, 焦婷. 日粮中添加甜菊糖苷对湖羊生长性能、屠宰性能及肉品质的影响[EB/OL]. [2025-04-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1069.S.20250303.1554.002.html>
- Cui L Y, Li X X, Qi S, Sha Y Z, Wang Z W, Zhao S G, Jiao T. Effect of steviol glycosides added to diet on growth performance, slaughter performance and meat quality of Hu sheep [EB/OL]. [2025-04-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1069.S.20250303.1554.002.html> (in Chinese)
- [40] 王梁, 刘禹辰, 杨卫芳, 赵秀蓉, 关紫, 郭兴, 姜润深, 宁中华, 郭江鹏, 吴迪梅, 曲鲁江. 常规饲喂和填饲对北京鸭屠宰性能、血液生理生化指标和养分利用率的影响[J]. 中国畜牧杂志, 2025, 61(2): 331-334, 338
- Wang L, Liu Y C, Yang W F, Zhao X R, Guan Z, Guo X, Jiang R S, Ning Z H, Guo J P, Wu D M, Qu L J. Effects of conventional feeding and feeding on slaughter performance, blood physiological and biochemical indexes and nutrient utilization rate of Beijing ducks [J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2025, 61(2): 331-334, 338 (in Chinese)
- [41] Wang S Y, Li Q, Peng J H, Niu H X. Effects of long-term cold stress on growth performance, behavior, physiological parameters, and energy metabolism in growing beef cattle [J]. *Animals*, 2023, 13(10): 1619
- [42] Sun L L, Gao S T, Wang K, Xu J C, Sanz-Fernandez M V, Baumgard L H, Bu D P. Effects of source on bioavailability of selenium, antioxidant status, and performance in lactating dairy cows during oxidative stress-inducing conditions [J]. *Journal of Dairy Science*, 2019, 102(1): 311-319
- [43] Colakoglu H E, Yazlik M O, Kaya U, Colakoglu E C, Kurt S, Oz B, Bayramoglu R, Vural M R, Kuplulu S. MDA and GSH-px activity in transition dairy cows under seasonal variations and their relationship with reproductive performance [J]. *Journal of Veterinary Research*, 2017, 61(4): 497-502
- [44] Gong J, Xiao M. Selenium and antioxidant status in dairy cows at different stages of lactation [J]. *Biological Trace Element Research*, 2016, 171(1): 89-93
- [45] Gong J, Ni L L, Wang D F, Shi B L, Yan S M. Effect of dietary organic selenium on milk selenium concentration and antioxidant and immune status in midlactation dairy cows [J]. *Livestock Science*, 2014, 170: 84-90
- [46] Pal G, Behl T, Rohil V, Khandelwal M, Gupta G, Jena J. Evaluation of oxidative stress and its modulation by L-Arginine and L-Ascorbic acid in repetitive restraint stress model in Wistar rats [J]. *Obesity Medicine*, 2020, 17: 100172
- [47] Ma F T, Shan Q, Jin Y H, Gao D, Li H Y, Chang M N, Sun P. Effect of *Lonicera japonica* extract on lactation performance, antioxidant status, and endocrine and immune function in heat-stressed mid-lactation dairy cows [J]. *Journal of Dairy Science*, 2020, 103(11): 10074-10082
- [48] Kamr A, Hassan H, Toribio R, Anis A, Nayel M, Arbag A. Oxidative stress, biochemical, and histopathological changes associated with acute lumpy skin disease in cattle [J]. *Veterinary World*, 2022, 15(8): 1916-1923
- [49] Phyn C V C, Stelwagen K, Davis S R, McMahon C D, Dobson J M, Singh K. Tight junction protein abundance and apoptosis during involution of rat mammary glands [J]. *Journal of Cellular Physiology*, 2017, 232(8): 2075-2082
- [50] Ul-Rahman A, Shahid M F, Iqbal M Z, Ali Channa A, Rasheed M, Adnan M, Mahmood R, Ishaq H M, Ali Khera H, Hussain K U R, Raza M A. Evaluation of haematological, serum biochemical and oxidative stress parameters in cattle naturally infected with lumpy skin disease virus [J]. *Tropical Animal Health and Production*, 2023, 55(3): 184
- [51] 陈紫婷, 陈梦婷, 孙智达. 芬顿反应诱导的肉类蛋白质氧化及干预研究进展[J]. 肉类研究, 2023, 37(5): 72-80
- Chen Z T, Chen M T, Sun Z D. Research progress on Fenton reaction-induced meat protein oxidation and its inhibitor [J]. *Meat Research*, 2023, 37(5): 72-80 (in Chinese)
- [52] 郭彬. 规模化牛养殖过程中重金属的分布特征及物质流分析[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2024

Guo B. Distribution characteristics of heavy metals and material flow analysis during large-scale cattle farming [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2024 (in Chinese)

X J. The adaptability of Hy-Line Brown laying hens to low-phosphorus diets supplemented with phytase[J]. *Poultry Science*, 2020, 99(7):3525-3531

责任编辑:秦梅

[53] Ren Z Z, Sun W Q, Cheng X, Liu Y L, Han D, Yan J K, Pan C, Duan Y L, Yang



第一作者简介:刘赛格,中国农业大学动物营养与饲料科学系在读硕士研究生。曾获中国农业大学硕士二等奖学金,在《动物营养学报》以第一作者发文1篇。



通讯作者简介:吴浩,中国农业大学动物科技学院动物营养与饲料科学系副教授,中国农业大学肉牛研究中心副主任,硕士生导师。长期致力于反刍动物营养与粗饲料加工方向的研究。主持农业农村部畜牧兽医局、农业农村部国际合作司项目3项,参与国家自然科学基金、科技部重点研发计划、农业农村部科教司项目3项。主译《肉牛营养需要(第八次修订版)》,起草《肉用母牛体况评分技术规范》国家标准,参编《全株玉米青贮实用技术问答》等著作。参与云南省镇康县和贵州省沿河县科技帮扶脱贫攻坚、河南固始农业科技服务等社会服务工作。曾获2021年度中国农业大学“优秀教育工作者”、中国农业大学第十二届青年教师教学基本功比赛三等奖、全国农林高校“牛精英挑战赛”特等奖指导教师、2020年度动物科技学院“优秀共产党员”等荣誉称号。