

罗有文, 吴海涛, 曹 斌, 等. 载锌凹凸棒石黏土对犬肠道菌群和抗氧化能力的影响[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(6): 1488-1492.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2021.06.017

载锌凹凸棒石黏土对犬肠道菌群和抗氧化能力的影响

罗有文, 吴海涛, 曹 斌, 卓国荣, 吴 锦

(江苏农牧科技职业学院, 江苏 泰州 225300)

摘要: 本试验旨在研究 Zn-Pal 对犬肠道菌群和血清免疫、抗氧化能力的影响。将 20 只 9 月龄比格犬随机分成 4 组, 每组 5 只, 分别饲喂基础日粮+ZnSO₄ (锌添加水平为 80 mg/kg, 对照组)、基础日粮+2.55 g/kg Zn-Pal (锌添加水平为 60 mg/kg, Zn-Pal-60)、基础日粮+3.42 g/kg Zn-Pal (锌添加水平为 80 mg/kg, Zn-Pal-80)、基础日粮+4.30 g/kg Zn-Pal (锌添加水平为 100 mg/kg, Zn-Pal-100)。30 d 后对各组犬只肠道主要菌群和血清免疫、抗氧化指标进行测定。结果显示, Zn-Pal-80 组和 Zn-Pal-100 组大肠杆菌数量显著低于对照组 ($P<0.05$), 血清 IL-6 含量显著高于对照组 ($P<0.05$); Zn-Pal-100 组血清 IgG 含量显著高于对照组 ($P<0.05$); Zn-Pal-80 组血清 SOD 活性显著高于对照组 ($P<0.05$), Zn-Pal-100 组血清 MDA 含量显著低于对照组 ($P<0.05$)。由此可见, Zn-Pal 可以降低比格犬大肠杆菌数量, 改善肠道微生态环境, 提高比格犬血清免疫和抗氧化能力。

关键词: 锌; 凹凸棒石黏土; 比格犬; 肠道菌群; 血清免疫; 抗氧化

中图分类号: S829.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2021)06-1488-05

Effects of zinc-bearing palygorskite on intestinal microflora and antioxidant capability in dogs

LUO You-wen, WU Hai-tao, CAO Bin, ZHUO Guo-rong, WU Jin

(Jiangsu Agri-animal Husbandry Vocational College, Taizhou 225300, China)

Abstract: The study was conducted to explore the effects of Zn-Pal on intestinal microflora and serum immunity, antioxidant capability in dogs. Twenty nine-month-old beagle dogs were randomly divided into four groups with five dogs in each group. They were fed with the basal diet +ZnSO₄ (zinc supplemental level was 80 mg/kg, control group), basal diet + 2.55 g/kg Zn-Pal (zinc supplemental level was 60 mg/kg, Zn-Pal-60), basal diet + 3.42 g/kg Zn-Pal (zinc supplemental level was 80 mg/kg, Zn-Pal-80), and basal diet + 4.30 g/kg Zn-Pal (zinc supplemental level was 100 mg/kg, Zn-Pal-100), respectively. After 30 days, the main serum immunity, antioxidant indices and intestinal microflora of beagle dogs in each group were determined. The results showed that the number of *Escherichia coli* in groups Zn-Pal-80 and Zn-Pal-100 was significantly lower than that in control group ($P<0.05$), the serum IL-6 content in groups Zn-Pal-80 and Zn-Pal-100 was significantly higher than that in control group ($P<0.05$), and the serum IgG content in group Zn-Pal-100 was significantly higher than that in control group ($P<0.05$). The serum SOD activity of group Zn-Pal-80 was significantly higher than that in control group ($P<0.05$). The serum MDA content of group Zn-Pal-100 was significantly lower than that in control group ($P<0.05$). In conclusion, Zn-Pal can improve the intestinal environment, reduce the number of *E.coli* and improve the serum immunity and antioxidant capacity of beagle dogs.

Key words: zinc; palygorskite; beagle dog; intestinal microflora; serum immunity; antioxidant

收稿日期: 2021-04-12

基金项目: 江苏省高校自然科学研究面上项目 (20KJD230002)

作者简介: 罗有文 (1981-), 男, 福建上杭人, 硕士, 讲师, 主要从事宠物营养研究。 (E-mail) ywdongke@sina.com

锌是犬的 6 种必需微量矿物元素之一, 对犬的正常生理代谢起着重要的作用^[1]。在动物体内锌有许多功能, 它是 200 多种含锌酶的辅助因子和催

化剂,并参与细胞分裂、有机物代谢等,也是各种蛋白质的主要成分(生长转录因子、受体、细胞因子、酶),是它们发挥生物活性所必需的物质^[1-3]。锌也是宠物生长、抗氧化系统和正常免疫功能所必需的物质^[4],此外,研究结果表明,锌离子还具有一定的抗菌作用^[5-6]。锌在宠物饲料中来源各异,不同形式的锌添加到日粮中均能改善动物肠道菌群^[4,7-8]。抗生素在饲料中的普遍应用极大地推动了畜牧业的发展,但其带来的负面影响(抗生素残留、免疫抑制、细菌耐药性等)也逐渐显露出来。自2020年7月中国发布“无抗计划”后,寻找和研发抗生素的替代品成为近年研究热点,具有抗菌作用的无机抗菌剂是最具有应用和研究前景的一个领域。

非金属矿由于特殊的显微结构而具有较大的比表面积,表现出较强的吸附性和离子交换性,常被用作缓释剂的载体^[9-10]。凹凸棒石黏土是一种结构中富含可交换离子的非金属黏土矿^[11-12],用离子交换法制得的载锌凹凸棒石黏土(Zn-Pal),是动物日粮锌的来源之一。目前,宠物日粮中常以无机锌的形式添加以满足需要,但由于日粮中锌的添加量高使得粪便中锌排泄量偏高从而导致环境问题^[12-13]。研究者发现,Zn-Pal不仅可以作为锌的来源,而且可对病原菌表现出持久的抗菌性,并在相关领域受到了广泛的关注^[9,14]。Yang等^[15]报道,载锌凹凸棒石黏土添加到鸡日粮中可以提高肉品质量和肌肉中锌的沉积量,并能增强肝脏抗氧化能力。研究结果表明,载锌凹凸棒石黏土是肉鸡良好的锌来源^[9],日粮中添加锌改进的黏土,可以提高肉鸡生产性能,抑制病原菌的生长,提高肠道抗氧化能力和免疫功能^[8,16]。迄今为止,国内外鲜有关于Zn-Pal调控犬肠道菌群、免疫和抗氧化能力的报道。因此,本研究旨在探讨Zn-Pal对比格犬肠道菌群、血清免疫和抗氧化指标的影响,为Zn-Pal在犬日粮中的应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验所用凹凸棒石黏土由江苏神力特生物科技股份有限公司提供。Zn-Pal参照颜瑞^[17]、Zhang等^[18]的方法进行制备,凹凸棒石黏土所负载的锌量为23.57 mg/g。

1.2 试验设计

选取9月龄健康比格犬(Beagle)20只,公母各10只,随机分成4组。对照组:基础日粮+ZnSO₄(锌添加水平为80 mg/kg);Zn-Pal-60组:基础日粮+2.55 g/kg Zn-Pal(锌添加水平为60 mg/kg);Zn-Pal-80组:基础日粮+3.42 g/kg Zn-Pal(锌添加水平为80 mg/kg);Zn-Pal-100组:基础日粮+4.30 g/kg Zn-Pal(锌添加水平为100 mg/kg)。日粮参照2008年美国饲料管理委员会(AAFCO)制订的犬营养标准进行配制,饲养期为预试期7 d+正试期30 d。日粮组成及营养指标见表1。

表1 日粮组成及营养水平

Table 1 Basic diet composition and nutrition level

日粮成分		营养水平	
成分	组成(%)	成分	组成(%)
鲜鸡肉	29.0	粗蛋白	25.5
鸡肉粉	15.0	粗脂肪	11.0
燕麦	13.5	粗灰分	6.83
糙米	14.2	钙	1.25
鸡骨架	13.0	磷	1.10
动物脂肪	9.3	赖氨酸	1.20
鱼粉	4.7	蛋氨酸+胱氨酸	0.63
食盐	0.2		
磷酸氢钙	0.1		
预混料	1.0		

1 kg犬预混料含维生素A 15 000 IU,维生素D₃ 500 IU,维生素E 60 IU,维生素B₁ 2.20 mg,维生素B₂ 5.50 mg,吡哆醇 1.50 mg,叶酸 0.22 mg,氯化胆碱 1 000.00 mg,铁 80.00 mg,铜 12.00 mg,锰 7.00 mg,碘 1.10 mg,硒 0.35 mg。

1.3 饲养管理

所有供试比格犬单笼饲养于试验房,试验笼清洗干净并消毒。预饲期7 d,根据试验犬在5 min内的自由采食量确定每次供给量。每日上午8时和下午16时给料饲喂,自由饮水。

1.4 指标测定

1.4.1 肠道菌群的测定 于正试期30 d使用无菌便盒收集新鲜粪便约2~3 g,无菌称取粪样0.2 g于灭菌离心管中,用无菌生理盐水以10倍比例按梯度稀释至1×10⁴、1×10⁵、1×10⁶倍,分别取100 μl稀释液接种于平板培养皿中,进行微生物培养。大肠杆菌在MAC培养基上37℃培养24 h,乳酸杆菌和双歧杆菌分别在MRS和YPY培养基上37℃培养48 h,培养结束后计数,结果用每1 g粪便样品中细菌数量的对

数表示。

1.4.2 血清免疫指标的测定 于正试期 30 d 对供试犬只前肢静脉留置针采血,采集血液约 8 ml 于离心管中,而后 4 500 r/min 离心 10 min,用微量移液器转移分离得到的血清并放置于-20 ℃冰箱待测。血清 IgG、白介素-1 (IL-1)、白介素-2 (IL-2)、白介素-6 (IL-6) 和肿瘤坏死因子- α (TNF- α) 采用酶联免疫法试剂盒进行测定。

1.4.3 血清抗氧化指标的测定 于正试期 30 d 对供试犬只前肢静脉留置针采血,采集血液约 8 ml 于离心管中,而后 4 500 r/min 离心 10 min,用微量移液器转移分离得到的血清并放置于-20 ℃冰箱待测。血清中总抗氧化力 (T-AOC)、超氧化物歧化酶 (SOD) 活性、谷胱甘肽过氧化物酶 (GSH-Px) 活性和丙二醛 (MDA) 含量按试剂盒说明书进行测定。

1.5 数据统计与分析

试验数据录入 Microsoft Excel 后采用 SPSS19.0 统计软件对样本均数进行 *t* 检验,结果以平均值 \pm 标准差表示。

2 结果与分析

2.1 Zn-Pal 对犬肠道菌群的影响

表 2 显示 Zn-Pal-80 组和 Zn-Pal-100 组比格犬肠道大肠杆菌数量显著低于对照组 ($P<0.05$),各组比格犬肠道乳酸杆菌和双歧杆菌数量无显著差异

($P>0.05$)。

表 2 Zn-Pal 对犬肠道菌群的影响

Table 2 Effects of Zn-Pal on intestinal microflora of dogs

项目	对照	Zn-Pal-60	Zn-Pal-80	Zn-Pal-100
大肠杆菌	7.79 \pm 0.42a	8.03 \pm 0.59a	6.12 \pm 0.56b	5.89 \pm 0.50b
乳酸杆菌	9.04 \pm 0.52a	8.54 \pm 0.43a	7.99 \pm 0.50a	9.13 \pm 0.46a
双歧杆菌	7.64 \pm 0.36a	7.03 \pm 0.44a	8.30 \pm 0.59a	7.92 \pm 0.54a

对照组:基础日粮+ZnSO₄(锌添加水平为 80 mg/kg);Zn-Pal-60 组:基础日粮+2.55 g/kg Zn-Pal(锌添加水平为 60 mg/kg);Zn-Pal-80 组:基础日粮+3.42 g/kg Zn-Pal(锌添加水平为 80 mg/kg);Zn-Pal-100 组:基础日粮+4.30 g/kg Zn-Pal(锌添加水平为 100 mg/kg)。同一行数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

2.2 Zn-Pal 对犬血清免疫相关指标的影响

表 3 显示 Zn-Pal-80 组和 Zn-Pal-100 组比格犬血清 IL-6 含量显著高于对照组 ($P<0.05$),Zn-Pal-100 组比格犬血清 IgG 含量显著高于对照组 ($P<0.05$);各组比格犬血清 IL-1 含量无显著差异 ($P>0.05$),各组比格犬血清 IL-2、TNF- α 含量无显著差异 ($P>0.05$)。

2.3 Zn-Pal 对犬血清抗氧化指标的影响

表 4 显示 Zn-Pal-80 组比格犬血清 SOD 活性显著高于对照组 ($P<0.05$),Zn-Pal-100 组比格犬血清 SOD 活性比对照组高 12.73% ($P>0.05$)。Zn-Pal-100 组 MDA 含量显著低于对照组 ($P<0.05$),Zn-Pal-80 组与对照组差异不显著 ($P>0.05$)。比格犬血清 T-AOC 和 GSH-Px 活性各组间无显著差异 ($P>0.05$)。

表 3 Zn-Pal 对犬血清免疫相关指标的影响

Table 3 Effects of Zn-Pal on immune index in the serum of dogs

项目	对照	Zn-Pal-60	Zn-Pal-80	Zn-Pal-100
IL-1 (ng/L)	504.46 \pm 29.03a	493.46 \pm 21.47a	528.02 \pm 18.25a	519.45 \pm 32.85a
IL-2 (ng/L)	352.49 \pm 17.56a	331.00 \pm 25.03a	349.67 \pm 30.11a	362.54 \pm 24.38a
IL-6 (ng/L)	234.97 \pm 8.92a	227.61 \pm 13.66a	270.09 \pm 18.90b	259.52 \pm 15.69b
IgG (mg/L)	69.25 \pm 7.13a	65.40 \pm 4.67a	72.76 \pm 4.32ab	78.52 \pm 5.03b
TNF- α (ng/L)	101.21 \pm 14.02a	112.20 \pm 27.15a	97.56 \pm 16.79a	109.32 \pm 18.22a

对照、Zn-Pal-60、Zn-Pal-80、Zn-Pal-100 见表 2 注。同一行数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

表 4 Zn-Pal 对犬血清抗氧化指标的影响

Table 4 Effects of Zn-Pal on antioxidant index in the serum of dogs

指标	对照	Zn-Pal-60	Zn-Pal-80	Zn-Pal-100
T-AOC (U/ml)	4.42 \pm 0.21a	4.53 \pm 0.38a	4.69 \pm 0.29a	4.07 \pm 0.43a
SOD (U/ml)	14.30 \pm 0.93a	12.24 \pm 1.27a	18.06 \pm 2.09b	16.12 \pm 1.84ab
GSH-Px (U/ml)	950.11 \pm 30.11a	942.83 \pm 21.59a	979.21 \pm 32.12a	966.25 \pm 24.59a
MDA (nmol/ml)	7.16 \pm 0.52a	7.51 \pm 0.69a	6.94 \pm 0.64ab	5.67 \pm 0.54b

对照、Zn-Pal-60、Zn-Pal-80、Zn-Pal-100 见表 2 注。T-AOC:总抗氧化力;SOD:超氧化物歧化酶;GSH-Px:谷胱甘肽过氧化物酶;MDA:丙二醛。同一行数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 Zn-Pal 对犬肠道菌群的影响

动物肠道中栖息着 100 多种菌群,这些微生物构成了肠道的正常微生态菌群。大肠杆菌是肠道菌群中的常见成员,但大肠杆菌过多会引起菌群失调,破坏肠道微生态平衡,并可能导致动物产生疾病^[19]。双歧杆菌和乳酸杆菌能调节动物肠道微生态平衡,增强肠道对有害菌的抵抗力。近年来,金属离子银、锌、铜等交换黏土矿物作为无机抗菌材料在畜牧业中得到了广泛的应用^[20-21]。研究发现,在动物饲料中添加含锌黏土矿物作为抗生素替代品,具有明显的抗菌效果^[8]。本试验发现,日粮添加锌水平为 80 mg/kg、100 mg/kg 的 Zn-Pal 时,犬肠道大肠杆菌数量显著下降。Zn-Pal 通过其吸附性和锌离子的释放而表现出抗菌能力^[21],蛋白质在代谢过程中产生的氨或肠道毒素被 Pal 吸附,改善了肠道微生态环境,大肠杆菌的增殖受到抑制,使得 Zn-Pal 对微生物区系产生影响^[22],从而减少肠道食糜中有害细菌的数量^[23]。此外,Zn-Pal 试验组大肠杆菌数量下降,也可能与锌离子的抑菌性和凹凸棒石黏土的缓释性有关,Zn-Pal 中的锌离子进入动物肠道后开始解吸,解吸后的锌离子可以停留在 Pal 表面,也可以游离在肠道内,与常规锌源相比具有更好的抗菌效果。

3.2 Zn-Pal 对犬血清免疫功能的影响

血清免疫是机体体液免疫的重要组成部分,IgG 是血清和细胞外液中含量最高的免疫球蛋白,是血清免疫的主要指标。研究结果表明,日粮锌源的补充可以提高血清免疫分子含量^[24]。本试验发现日粮锌添加水平为 100 mg/kg 的 Zn-Pal 处理组犬血清 IgG 含量显著高于对照组,表明 Zn-Pal 可作为锌源提高犬血清 IgG 含量。TNF- α 是一种对某些肿瘤细胞具有细胞毒性作用的因子,具有增强机体局部免疫、杀伤肿瘤细胞等作用^[25]。IL-6 在免疫应答中能促进肝细胞产生急性期蛋白,参与炎症反应,提高机体对局部感染的防御能力^[25]。本试验结果显示,日粮添加锌水平为 80 mg/kg、100 mg/kg 的 Zn-Pal 可以显著提高犬血清中 IL-6 含量,表明 Zn-Pal 可以提高犬血清免疫分子含量。Zhang 等^[26]的研究结果也表明 Zn-Pal 可以提高团头鲂血清免疫功能。

3.3 Zn-Pal 对犬抗氧化能力的影响

锌是动物体内许多酶和激素的组成成分和激活剂,在犬的生长、免疫和抗氧化功能中起着重要作用^[4]。一般而言,健康动物机体氧自由基的产生和消除处于动态平衡状态^[27]。动物生长过程中的不良因素如高温、寒冷、运输等可使动物体内产生大量的羟基自由基,破坏动物体内自由基的平衡状态。SOD 是动物酶促抗氧化体系的重要氧化酶,能有效清除自由基,有助于减少和阻止脂质过氧化反应^[28]。在本研究中,日粮添加 80 mg/kg 的 Zn-Pal 处理组血清 SOD 活性显著高于对照组,添加 100 mg/kg 的 Zn-Pal 处理组血清 SOD 活性比对照组高 12.73%。Zhang 等^[26]研究 Zn-Pal 对团头鲂生长、抗氧化能力和抗运输应激的影响时发现,日粮中添加 Zn-Pal 可以提高血清 SOD 和 Cu/Zn-SOD 活性。这可能是因为凹凸棒石黏土的吸附缓释性提高了锌在犬体内的利用率,而锌又跟体内许多酶(包括抗氧化酶)的活性相关,从而提高了机体抗氧化酶清除自由基的能力。本试验还发现,日粮添加锌水平为 80 mg/kg、100 mg/kg 的 Zn-Pal,犬血清 MDA 含量均有不同程度下降。Yang 等^[15]报道,以 Zn-Pal 作为锌源添加到肉鸡日粮中,肉鸡血清中 MDA 含量显著下降,SOD 活性均呈增加趋势,同时肝脏中 SOD 活性也显著增加,与本试验结果类似。由此可知,日粮添加 Zn-Pal 可以提高犬血清抗氧化功能。

日粮添加 Zn-Pal 可以降低犬肠道中大肠杆菌数量,改善肠道微生态平衡,可以提高血清免疫和抗氧化能力。Zn-Pal 可以作为日粮锌源满足犬对锌的需要,但 Zn-Pal 作为锌源的生物学利用率是否高于无机锌还有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] 丁丽敏,夏兆飞. 犬猫营养需要[M]. 2 版. 北京:中国农业大学出版社,2017.
- [2] FUKADA T, YAMASAKI S, NISHIDA K., et al. Zinc homeostasis and signaling in health and diseases[J]. J Biol Inorg Chem, 2011, 16: 1123-1134.
- [3] VALLEE B L, AULD D S. Zinc coordination, function, and structure of zinc enzymes and other proteins[J]. Biochemistry, 1990, 29: 5647-5659.
- [4] 赵治平,黄克和,任志华. 富硒锌益生菌对犬的全血硒锌含量与抗氧化能力和肠道菌群的影响[J]. 营养学报, 2009, 31(2): 159-163.
- [5] SODERBERG T A, SUNZEL B, HOLM S, et al. Antibacterial effect

- of zinc oxide in vitro[J]. *Scandinavian Journal of Plastic and Reconstructive Surgery and Hand Surgery*, 1990, 24(3): 193-197.
- [6] YAO J, LIU Y, LING H, et al. The effect of zinc (II) on the growth of E-coli studied by microcalorimetry[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2005, 79(1): 39-43.
- [7] FENG Y, MIN L, ZHANG W, et al. Zinc oxide nanoparticles influence microflora in ileal digesta and correlate well with blood metabolites[J]. *Front Microbiol*, 2017, 8: 992.
- [8] TANG Z G, WEN C, WANG L C, et al. Effects of zinc-bearing clinoptilolite on growth performance, cecal microflora and intestinal mucosal function of broiler chickens[J]. *Anim Feed Sci Technol*, 2014, 189: 98-106.
- [9] YAN R, ZHANG L, YANG X. Bioavailability evaluation of zinc-bearing palygorskite as a zinc source for broiler chickens[J]. *Appl Clay Sci*, 2016, 119: 155-160.
- [10] ZHOU C H, KEELING J. Fundamental and applied research on clay minerals: from climate and environment to nanotechnology[J]. *Appl Clay Sci*, 2013, 74: 3-9.
- [11] GIUSTETTO R, WAHYUDI O. Sorption of red dyes on palygorskite: synthesis and stability of red/purple Mayan nanocomposites[J]. *Microporous Mesoporous Mater*, 2011, 142: 221-235.
- [12] APINES M J, SATOH S, KIRON V, et al. Bioavailability of amino acids chelated and glass embedded zinc to rainbow trout, *oncorhynchus mykiss*, fingerlings[J]. *Aquac Nutr*, 2001, 7: 221-228.
- [13] CARLSON M S, BOREN C A, WU C, et al. Evaluation of various inclusion rates of organic zinc either as polysaccharide or proteinate complex on the growth performance, plasma, and excretion of nursery pigs[J]. *J Anim Sci*, 2004, 82: 1359-1366.
- [14] JIAO L, KE Y, XIAO K, et al. Effects of zinc-exchanged montmorillonite with different zinc loading capacities on growth performance, intestinal microbiota, morphology and permeability in weaned piglets[J]. *Appl Clay Sci*, 2015, 112: 40-43.
- [15] YANG W, CHEN Y, CHENG Y, et al. Effects of zinc bearing palygorskite supplementation on the growth performance, hepatic mineral content, and antioxidant status of broilers at early age[J]. *Asian Australas J Anim Sci*, 2017, 30: 1006-1012.
- [16] HU C, QIAN Z, SONG J, et al. Effects of zinc oxide-montmorillonite hybrid on growth performance, intestinal structure, and function of broiler chicken[J]. *Poult Sci*, 2013, 92: 143-150.
- [17] 颜 瑞. 固相载锌凹凸棒石粘土对肉鸡锌生物利用率及免疫调节机制的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2016.
- [18] ZHANG R, ZHOU Y, JIANG X, et al. Evaluation of zinc-bearing palygorskite effects on growth performance, nutrient retention, meat quality, and zinc accumulation in blunt snout bream *Megalobrama amblycephala*[J]. *Clay Clay Min*, 2018, 66: 274-285.
- [19] 丁维俊, 周邦靖, 翟慕东, 等. 参苓白术散对小鼠脾虚模型肠道菌群的影响[J]. *北京中医药大学学报*, 2006, 29(8): 530-533.
- [20] JIAO L, KE Y, XIAO K, et al. Effects of zinc-exchanged mon-tmorillonite with different zinc loading capacities on growth performance, intestinal microbiota, morphology and permeability in weaned piglets[J]. *Appl Clay Sci*, 2015, 112: 40-43.
- [21] JIAO L, LIN F, CAO S, et al. Preparation, characterization, antimicrobial and cytotoxicity studies of copper/zinc-loaded mon-tmorillonite[J]. *J Anim Sci Biotechnol*, 2017, 8: 27.
- [22] XIA M S, HU C H, XU Y. Adsorption of *Aeromonas hydrophila* by copper-bearing montmorillonite clays[J]. *J Inorg Mater*, 2007, 22: 652-656.
- [23] WANG W, TIAN G, ZONG L, et al. Mesoporous hybrid Zn-silicate derived from red palygorskite clay as a high-efficient adsorbent for anti-biotics[J]. *Microporous Mesoporous Mater*, 2016, 234: 317-325.
- [24] FENG J, MA W Q, NIU H H, et al. Effects of zinc glycine chelate on growth, hematological, and immunological characteristics in broilers[J]. *Biological Trace Element Research*, 2010, 133(2): 203-211.
- [25] 严思益. 免疫学笔记精要[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [26] ZHANG R Q, JIANG Y, LIU W J, et al. Evaluation of zinc-bearing palygorskite effects on the growth, immunity, antioxidant capability, and resistance to transport stress in blunt snout bream[J]. *Aquaculture*, 2021, 532: 963-973.
- [27] HALLIWELL B, WHITEMAN M. Measuring reactive species and oxidative damage in vivo and in cell culture: how should you do it and what do the results mean[J]. *Br J Pharmacol*, 2004, 142: 231-255.
- [28] 谢继青, 李玉华, 杨春梅, 等. 超氧化物歧化酶的药理作用[J]. *中国生化药物杂志*, 2009, 30(1): 72-75.

(责任编辑: 陈海霞)