

引用格式:

向鸿坤, 宫嘉泰, 汪龙, 胡睿智, 贺建华, 伍树松, 袁旭鹏. 迷迭香水提物对断奶仔猪血清生化指标、肠道形态和菌群的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2025, 51(6): 109–117.

XIANG H K, GONG J T, WANG L, HU R Z, HE J H, WU S S, YUAN X P. Effects of rosemary extract on serum biochemical indices, gut morphology and microbiota of weaned piglets[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2025, 51(6): 109–117.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



迷迭香水提物对断奶仔猪血清生化指标、 肠道形态和菌群的影响

向鸿坤¹, 宫嘉泰¹, 汪龙¹, 胡睿智¹, 贺建华¹, 伍树松¹, 袁旭鹏^{2*}

(1. 湖南农业大学动物科学技术学院, 湖南 长沙 410128; 2. 湖南生物机电职业技术学院动物科技学院, 湖南 长沙 410127)

摘要: 选取144头杜×长×大三元杂交断奶仔猪(21日龄), 将其分为4个处理组(每组6个重复, 每个重复6头猪)。对照(CTL)组与脂多糖(LPS)组采食基础饲粮, 低剂量迷迭香水提物(RE200)组与高剂量迷迭香水提物(RE400)组分别在饲粮中额外补充200 mg/kg和400 mg/kg迷迭香水提物(RE), 试验期为28 d。LPS组、RE200组和RE400组仔猪分别于第21天和第28天腹腔注射LPS(100 µg/kg), CTL组注射等体积生理盐水。结果表明: 1) 各组间生长性能指标无显著差异($P>0.05$)。2) 与对照组相比, LPS组的超氧化物歧化酶(SOD)活性显著降低($P<0.05$), 谷草转氨酶(ALT)活性和白介素-6(IL-6)质量浓度显著升高($P<0.05$); 与LPS组相比, RE200组的丙二醛(MDA)浓度和ALT活性均显著降低($P<0.05$), 总抗氧化能力(T-AOC)浓度显著升高($P<0.05$); RE400组的ALT活性和IL-6质量浓度均显著降低($P<0.05$)。3) 与对照组相比, LPS组回肠绒毛高度和绒隐比均极显著降低($P<0.01$), 隐窝深度极显著升高($P<0.01$), 二胺氧化酶(DAO)活性显著升高($P<0.05$)。与LPS组相比, RE200组、RE400组绒毛高度和绒隐比均极显著提高($P<0.01$), 隐窝深度极显著降低($P<0.01$); RE200组的DAO活性显著降低($P<0.05$)。4) α 多样性分析结果显示, 各组间均无显著差异($P>0.05$); β 多样性分析结果显示, 各组间菌群的结构基本相似; 与对照组相比, LPS组罗姆布茨菌属(*Romboutsia*)的相对丰度显著上升($P<0.05$); 与LPS组相比, RE200组*Romboutsia*的相对丰度极显著降低($P<0.01$), 毛螺菌科UCG-004属(*Lachnospiraceae* UCG-004)的相对丰度极显著升高($P<0.01$)。综上所述, 饲粮中添加RE能够显著提升断奶仔猪抗氧化能力, 降低肠道通透性, 减少肠道损伤, 改善肠道菌群结构。在本试验条件下, 断奶仔猪饲粮中RE的适宜添加水平为200 mg/kg。

关键词: 迷迭香水提物; 断奶仔猪; 血清生化指标; 肠道形态; 肠道微生物

中图分类号: S816.7

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2025)06-0109-09

Effects of rosemary extract on serum biochemical indices, gut morphology and microbiota of weaned piglets

XIANG Hongkun¹, GONG Jiatai¹, WANG Long¹, HU Ruizhi¹, HE Jianhua¹, WU Shusong¹, YUAN Xupeng^{2*}

(1. College of Animal Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 2. College of Animal Science and Technology, Hunan Biological and Electromechanical Polytechnic, Changsha, Hunan 410127, China)

Abstract: A total of 144 Duroc × Landrace × Yorkshire crossbred weaned piglets at the age of 21 days were selected and randomly divided into 4 treatment groups, with 6 replicates per group and 6 piglets per replicate. Piglets in the control(CTL)

收稿日期: 2024-12-09

修回日期: 2025-01-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(U22A20515), 湖南省科技人才托举工程项目(2023TJ-N07)

作者简介: 向鸿坤(2000—), 男, 湖南麻阳人, 博士研究生, 主要从事单胃动物营养研究, 1473184127@qq.com; *通信作者, 袁旭鹏, 博士, 畜牧师, 主要从事猪营养研究, yuanxupeng01@163.com

group and lipopolysaccharide(LPS) group were fed a basal diet, the low-dose rosemary extract group(RE200) and the high-dose rosemary extract group(RE400) were fed a basal diet supplemented with 200 mg/kg and 400 mg/kg rosemary extract(RE), respectively, for 28 days. 100 μg/kg LPS was intraperitoneally injected to piglets in the LPS, RE200, and RE400 groups on day 21 and day 28, respectively, and those in CTL group were injected with the same dose of normal saline. The results were shown as follows. 1) There were no significant differences in growth performance indexes among all groups($P>0.05$). 2) In LPS group, the superoxide dismutase(SOD) activity was markedly reduced ($P<0.05$), the aspartate aminotransferase(AST) activity and interleukin-6(IL-6) mass concentration were markedly elevated($P<0.05$) compared to CTL group. In RE200 group, the malondialdehyde(MDA) concentration and AST activity were markedly reduced($P<0.05$), and the index of total antioxidant capacity(T-AOC) concentration was markedly elevated($P<0.05$) compared to LPS group. In RE400 group, the AST activity and IL-6 mass concentration were markedly reduced($P<0.05$) compared to LPS group. 3) In LPS group, both the villus height and villus-crypt ratio of ileum were markedly reduced($P<0.01$), while the crypt depth was markedly elevated($P<0.01$) and diamine oxidase(DAO) activity was markedly elevated($P<0.05$) compared to CTL group. In RE200 and RE400 groups, both the villus height and villus-crypt ratio of ileum were markedly elevated ($P<0.01$), while the crypt depth was markedly reduced($P<0.01$) compared to LPS group, and DAO activity in RE200 group was markedly reduced($P<0.05$) compared to LPS group. 4) The α -diversity analysis indicated no significant variations across all groups($P>0.05$), and the results of β diversity analysis showed that the bacterial community structure was basically similar across all groups. In LPS group, the relative abundance of *Romboutsia* was markedly elevated($P<0.05$) compared to CTL group. In RE200 group, the relative abundance of *Romboutsia* was markedly reduced($P<0.01$), and the relative abundance of *Lachnospiraceae* UCG-004 was markedly elevated($P<0.01$) compared to LPS group. In conclusion, the addition of RE to the diet can significantly improve antioxidant capacity, reduce gut permeability, alleviate gut damage, and improve gut flora composition of weaned piglets. Under the condition of this experiment, the suitable addition level of RE in the diet of weaned piglets is 200 mg/kg.

Keywords: rosemary extract; weaned piglets; serum biochemical indices; gut morphology; gut microbiota

肠道是消化吸收的主要场所，也是抵御食源性病原体的第一道免疫屏障，对维持正常的免疫防御功能起着不可或缺的作用。然而，由于肠道屏障和免疫功能发育不成熟，幼龄动物易受到肠道损伤的影响，增加感染肠道疾病的风险^[1]。在断奶期间，仔猪面临各种生理和环境应激，这些应激促使免疫系统过度分泌白细胞介素-6(IL-6)等炎性细胞因子，进而引发肠道炎症和腹泻，导致断奶仔猪生长性能下降甚至死亡，给养殖业造成重大经济损失^[2-3]。虽然使用抗生素可以显著降低仔猪的发病率和死亡率，但也会出现耐药性和药物残留等一系列副作用^[4]。因此，开发优质、安全、高效且可替代抗生素的添加剂对养猪业至关重要。

迷迭香(*Rosmarinus officinalis* L.)是唇形科鼠尾草属植物，被广泛应用于食品保健和医药制品等领域^[5-6]。该植物含有多种挥发性成分和活性物质，具有抗炎和抗氧化作用。挥发性成分主要包括蒎烯等萜类化合物和桉叶油醇等醇类化合物；活性物质则包括迷迭香酸、鼠尾草酸、熊果酸等^[7-8]。迷迭香水提物(RE)是通过水蒸气蒸馏法从迷迭香中萃取出单萜烯及其衍生物，随后对其进行二次纯化后得到的活性成分^[9-10]。尽管RE具备抗炎、抗氧化这些潜

在的应用价值，但其作为饲料添加剂，对断奶仔猪的作用与效果尚未得到充分研究。因此，本研究在断奶仔猪饲粮中添加不同浓度的RE，旨在探究其对仔猪生长性能、血清生化指标及肠道功能的影响，以期为其在仔猪生产中的合理利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验设计

分别参照文献[11-12]中LPS的使用剂量(100 μg/kg)和RE的添加剂量(200、400 mg/kg)，选取144头杜×长×大三元杂交断奶仔猪，按照遗传基础、体质量相近的原则，将其随机分为4个处理：对照组(CTL组，饲喂基础饲粮)、脂多糖组(LPS组，饲喂基础饲粮+注射100 μg/kg LPS)、低剂量迷迭香水提物组(RE200组，饲喂基础饲粮+200 mg/kg RE+注射100 μg/kg LPS)、高剂量迷迭香水提物组(RE400组，饲喂基础饲粮+400 mg/kg RE +注射100 μg/kg LPS)，每个处理6个重复，每个重复6头猪，试验期为28 d，试验期间自由采食和饮水。LPS分别在试验第21天和第28天注射，每个重复注射1头仔猪，第28天注射完4 h后采样。参照《猪营养需要》(NRC, 2012)配制基础饲粮，饲粮组成及营养水平见表1。

表1 基础饲粮组成及营养水平

原料	质量分数/%
玉米	38.00
膨化玉米	18.50
豆粕(46%粗蛋白)	13.00
膨化豆粕	10.00
鱼粉	5.00
乳清粉	12.00
大豆油	0.79
磷酸氢钙	0.78
石粉	1.00
氯化钠	0.30
L-赖氨酸盐酸盐(纯度为98%)	0.32
DL-蛋氨酸	0.16
L-苏氨酸	0.11
L-色氨酸	0.01
预混料 ¹⁾	0.03
合计	100.00
营养水平 ²⁾	
表观消化能 ³⁾	14.48
粗蛋白质	19.62
钙	0.93
总磷	0.66
可消化磷	0.42
赖氨酸	1.39
蛋氨酸	0.49
苏氨酸	0.87
色氨酸	0.22

注：1) 预混料为每kg饲粮提供氯化胆碱500 mg, 维生素A 10 500 IU, 维生素D₃ 3 300 IU, 维生素E 22.5 IU, 维生素K₃ 3 mg, 维生素B₁ 3 mg, 维生素B₂ 7.5 mg, 维生素B₆ 4.5 mg, 维生素B₁₂ 0.03 mg, 烟酸 30 mg, 泛酸盐 15 mg, 叶酸 1.5 mg, 生物素 0.12 mg, Cu 10 mg, Fe 333 mg, Zn 400 mg, Mn 12.9 mg, I 19 μg, Se 60 μg。

2) 营养水平为计算值。

3) 表观消化能单位为MJ/kg。

1.2 样品采集

每头注射LPS的仔猪采集2份血样(共20 mL), 置于无抗凝剂的真空采血管内, 之后参考YANG

表2 饲粮添加迷迭香水提物对断奶仔猪生长性能的影响

Table 2 Effect of adding rosemary extract to diet on growth performance of weaned piglets

项目	CTL组	LPS组	RE200组	RE400组	P
初质量/kg	5.71±0.51	5.71±0.51	5.79±0.64	6.03±0.78	>0.05
末质量/kg	11.97±0.94	11.47±0.94	12.73±2.40	12.12±2.61	>0.05
平均日增质量/kg	0.24±0.03	0.22±0.03	0.25±0.06	0.23±0.07	>0.05
平均日采食量/kg	0.45±0.05	0.41±0.05	0.44±0.09	0.43±0.08	>0.05
料重比	1.87±0.06	1.87±0.14	1.76±0.12	1.93±0.20	>0.05

2.2 饲粮添加迷迭香水提物对断奶仔猪血清生化指标的影响

由图1可见, 与对照(CTL)组相比, LPS组的SOD活性显著降低(图1(b), P<0.05)。当在饲粮中添加200 mg/kg的RE后, 与LPS组相比, 仔猪体内的MDA浓度显著降低(图1(a), P<0.05), T-AOC浓度

等^[13]的方法制备血清。对24头仔猪采取安乐死后, 在屠宰场切除仔猪内脏, 采集每头猪的肝脏和肠道, 然后取回肠部分肠段固定样进行形态学检测; 采集盲肠内容物样本, 用于16S rRNA测序分析。

1.3 指标测定

1.3.1 生长性能指标

试验开始和结束时分别称质量, 对各猪栏的饲料消耗进行测定。基于测定数据计算平均日增质量(ADG)、平均日采食量(ADFI)和料重比。

1.3.2 血清生化指标

参照文献[14], 检测血清中丙二醛(MDA)浓度、超氧化物歧化酶(SOD)活性、总抗氧化能力(T-AOC)浓度、谷草转氨酶(AST)活性、谷丙转氨酶(ALT)活性、IL-6质量浓度、二胺氧化酶(DAO)活性和D-乳酸质量浓度。

1.3.3 肠道HE染色分析及菌群分析

参照文献[14–15]进行回肠组织切片、HE染色, 以及肠道菌群分析。

1.4 数据分析

数据结果以平均值±标准差的形式表示。采用SPSS 19.0分别对数据进行单因素方差分析和邓肯多重范围检验。采用PRISM 8.0软件绘图。

2 结果与分析

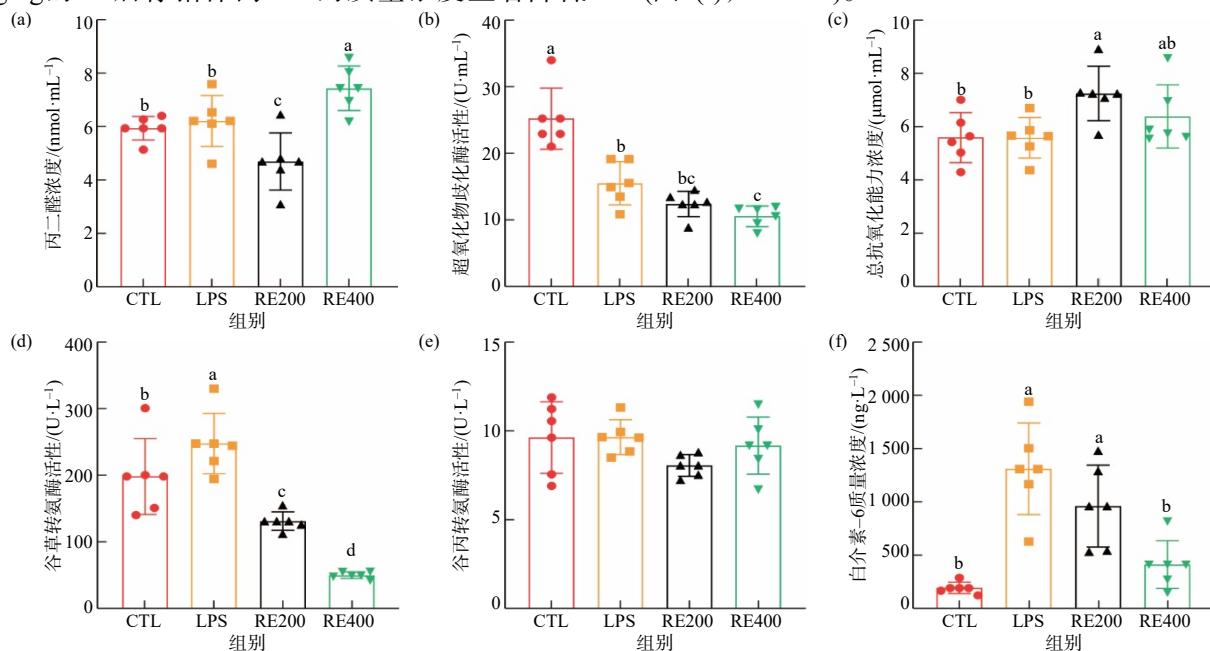
2.1 饲粮添加迷迭香水提物对断奶仔猪生长性能的影响

由表2可见: RE200组仔猪末质量、平均日增质量均高于LPS组的, 而料重比低于LPS组的, 但差异均不显著(P>0.05)。此外, 各组间平均日采食量无显著差异(P>0.05)。

显著提升(图1(c), P<0.05)。

与CTL组相比, LPS组的AST活性(图1(d))、IL-6质量浓度(图1(f))均显著升高(P<0.05), 说明仔猪出现了炎症。与LPS组相比, 在饲粮中添加200 mg/kg和400 mg/kg的RE后, 仔猪体内AST活性显著降低(图1(d), P<0.05)。相较于LPS组, 饲粮中添加400

mg/kg的RE后仔猪体内IL-6的质量浓度显著降低(图1(f), $P<0.05$)。



各分图中不同小写字母表示组间差异显著($P<0.05$)。

(a) RE对断奶仔猪血清MDA浓度的影响; (b) RE对断奶仔猪血清SOD活性的影响; (c) RE对断奶仔猪血清T-AOC浓度的影响; (d) RE对断奶仔猪血清AST活性的影响; (e) RE对断奶仔猪血清ALT活性的影响; (f) RE对断奶仔猪血清IL-6质量浓度的影响

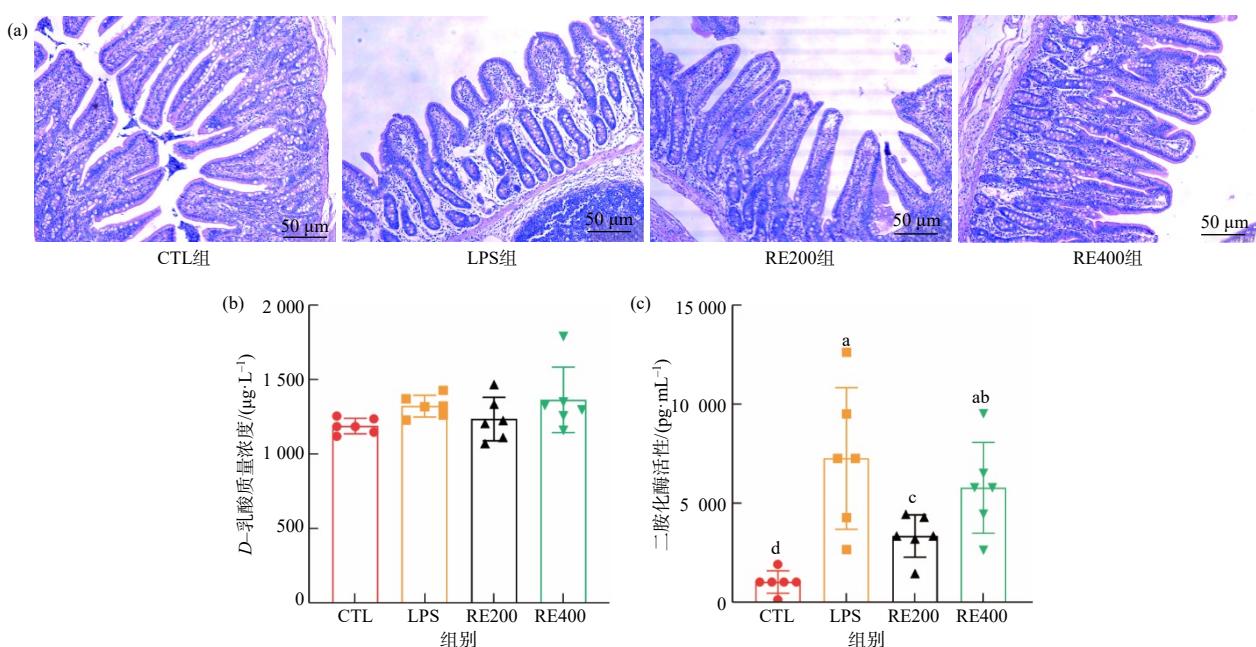
图1 迷迭香水提物对断奶仔猪血清生化指标的影响

Fig. 1 Effect of rosemary extract on serum biochemical indices of weaned piglets

2.3 饲粮添加迷迭香水提物对断奶仔猪肠道形态及肠道通透性的影响

饲粮添加RE对断奶仔猪回肠形态的影响分别见图2和表3。由图2和表3可见:与CTL组相比, LPS

组回肠形态受损, 绒隐比极显著降低($P<0.01$);与LPS组相比, RE200组和RE400组绒隐比均极显著升高($P<0.01$), 说明饲粮中添加不同剂量的RE可有效修复回肠损伤。



不同小写字母表示组间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

(a) RE对断奶仔猪回肠形态的影响; (b) RE对断奶仔猪血清D-乳酸质量浓度的影响; (c) RE对断奶仔猪血清DAO活性的影响

图2 迷迭香水提物对断奶仔猪回肠形态及血清中D-乳酸质量浓度和DAO活性的影响

Fig. 2 Effect of rosemary extract on ileum morphology, mass concentration of serum D-lactic acid and DAO activity of weaned piglets

表3 迷迭香水提物对断奶仔猪绒毛高度和隐窝深度的影响

Table 3 Effects of rosemary extract on villus height and crypt depth of weaned piglets

参数	CTL组	LPS组	RE200组	RE400组	P
绒毛高度/ μm	169.03 \pm 7.20 ^a	115.76 \pm 19.72 ^b	166.69 \pm 18.89 ^a	155.56 \pm 21.40 ^a	<0.01
隐窝深度/ μm	117.30 \pm 20.76 ^b	159.50 \pm 26.36 ^a	112.93 \pm 22.20 ^b	115.44 \pm 34.02 ^b	<0.01
绒隐比	1.48 \pm 0.24 ^a	0.74 \pm 0.13 ^b	1.54 \pm 0.28 ^a	1.42 \pm 0.37 ^a	<0.01

注：同行不同小写字母表示组间的差异有统计学意义($P<0.01$)。

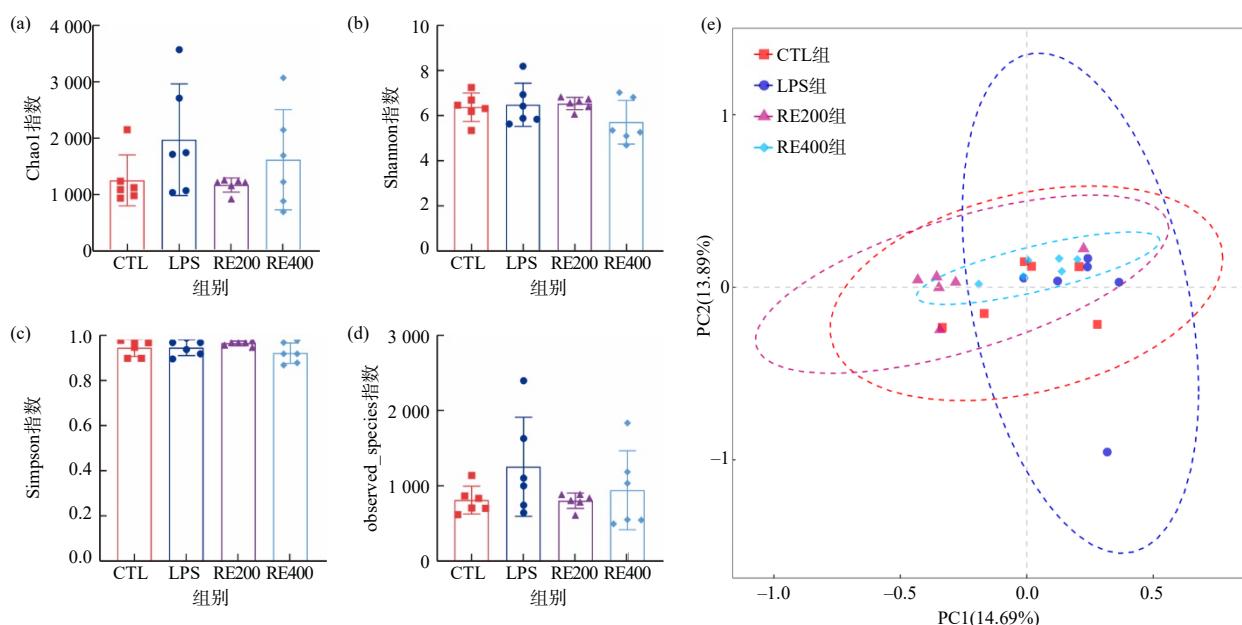
在肠道通透性方面，由图2(c)可知，与对照组相比，LPS组血清DAO活性显著升高($P<0.05$)，而在饲粮中添加200 mg/kg的RE后，断奶仔猪DAO活性相较于LPS组显著降低($P<0.05$)。

2.4 饲粮添加迷迭香水提物对断奶仔猪肠道菌群的影响

2.4.1 α 和 β 多样性分析结果

由于肠道微生物群落在肠道健康和屏障功能

中发挥着重要作用，因此，本研究采用16S rRNA测序分析盲肠菌群组成，研究肠道微生物定植情况。 α 多样性分析结果显示，各组断奶仔猪肠道微生物群Chao1、Shannon、Simpson和observed_species指数无显著差异($P>0.05$)(图3(a)~图3(d))，表明菌群多样性与丰富度未发生明显改变。主成分分析结果显示(图3(e))，4个处理(24个样品)间部分区域未明显区分开，说明各处理中菌群的结构基本相似。



(a) RE对断奶仔猪肠道微生物群Chao1指数的影响；(b) RE对断奶仔猪肠道微生物群Shannon指数的影响；(c) RE对断奶仔猪肠道微生物群Simpson指数的影响；(d) RE对断奶仔猪肠道微生物群observed_species指数的影响；(e) RE对断奶仔猪肠道微生物群 β 多样性的影响

图3 迷迭香水提物对断奶仔猪盲肠中微生物 α 和 β 多样性的影响

Fig. 3 Effects of rosemary extract on microbial α and β diversity in cecal microbiota of weaned piglets

2.4.2 门、科、属水平菌群分析结果

由图4(a)可见，在门水平上，厚壁菌门(Firmicutes)占比最高，其次是拟杆菌门(Bacteroidota)。由图4(b)可见：相较于对照组，LPS组绿弯菌门(Chloroflexi)、黏球菌门(Myxococcota)、泉古菌门(Crenarchaeota)、硝化螺旋菌门(Nitrospirota)、髌骨细菌门(Patescibacteria)及候选门MBNT15(Candidate phylum MBNT15)的相对丰度显

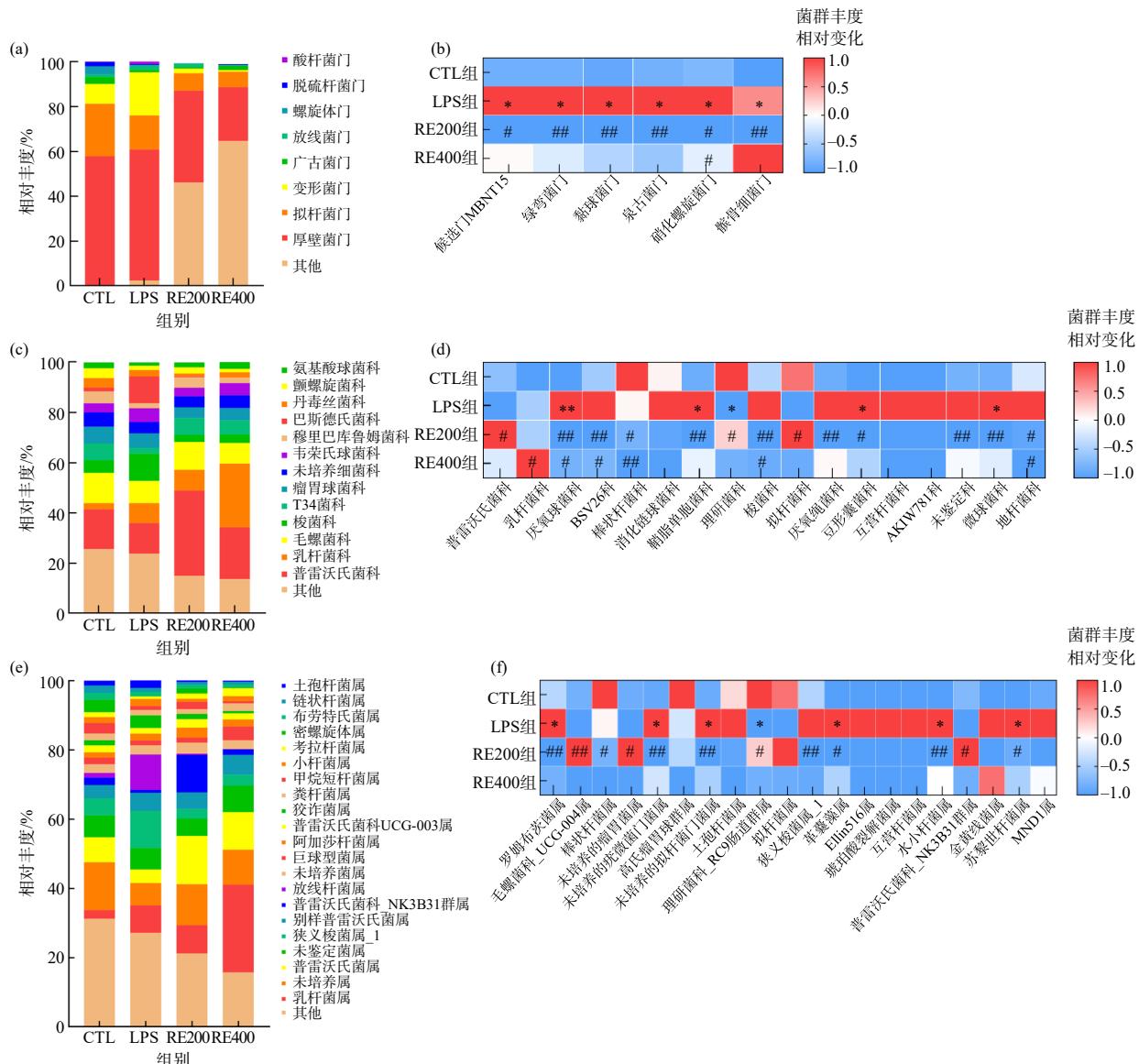
著上升($P<0.05$)；但在RE200组中，以上几种菌门的相对丰度相较于LPS组显著或极显著下降。

由图4(c)可见，在科水平上，乳杆菌科(Lactobacillaceae)、普雷沃氏菌科(Prevotellaceae)和毛螺菌科(Lachnospiraceae)的占比较高。由图4(d)可见：相较于对照组，LPS组厌氧球菌科(Anaerococcaceae)、鞘脂单胞菌科(Sphingomonadaceae)、豆形囊菌科(Phaselicystidaceae)和微球菌科(Micrococcaceae)的

相对丰度显著升高($P<0.05$)，理研菌科(Rikenellaceae)的相对丰度显著降低($P<0.05$)。与LPS组相比, RE200组地杆菌科、豆形囊菌科及棒状杆菌科(Corynebacteriaceae)的相对丰度显著降低($P<0.05$), 厌氧球菌科、BSV26菌科、鞘脂单胞菌科、梭菌科(Clostridiaceae)、厌氧绳菌科(Anaerolineaceae)、未鉴定菌科(unidentified)、微球菌科的相对丰度极显著降低($P<0.01$), 理研菌科、普雷沃氏菌科和拟杆菌科(Bacteroidaceae)的相对丰度显著升高($P<0.05$); RE400组厌氧球菌科、BSV26菌科、地杆菌科、梭菌科的相对丰度显著降低

($P<0.05$), 棒状杆菌科的相对丰度极显著降低($P<0.01$), 乳杆菌科的相对丰度显著升高($P<0.05$)。

由图4(e)和图4(f)可见, 在属水平上, LPS组的罗姆布茨菌属(Romboutsia)、未培养的疣微菌门菌属(uncultured Verrucomicrobia bacterium)、革囊藻属(Phaselicystis)、未培养的拟杆菌门菌属(uncultured Bacteroidetes bacterium)、水小杆菌属(Aquabacterium)和苏黎世杆菌属(Turicibacter)这6种菌属的相对丰度相较于对照组显著升高($P<0.05$), 但是在饲喂RE后, RE200组这6种菌属的相对丰度显著或极显著降低。



*和**分别表示LPS组与CTL组间的差异有统计学意义($P<0.05$ 、 $P<0.01$); #和##分别表示RE200组或RE400组与LPS组间的差异有统计学意义($P<0.05$ 、 $P<0.01$)。

(a) 在门水平上RE对断奶仔猪肠道菌群组成的影响; (b) 在门水平上RE对断奶仔猪肠道菌群相对丰度的影响; (c) 在科水平上RE对断奶仔猪肠道菌群组成的影响; (d) 在科水平上RE对断奶仔猪肠道菌群相对丰度的影响; (e) 在属水平上RE对断奶仔猪肠道菌群组成的影响; (f) 在属水平上RE对断奶仔猪肠道菌群相对丰度的影响

图4 迷迭香水提物对断奶仔猪盲肠菌群组成和相对丰度的影响

Fig. 4 Effects of rosemary extract on the composition and relative abundance of cecal chyme flora of weaned piglets

3 讨论

在氧化应激和炎症相关的研究中，通常使用过氧化氢、LPS等药物建立模型。其中，LPS能通过识别并结合toll样受体引发炎症反应^[16]。大量试验结果表明，注射LPS会导致仔猪的末质量和日增质量降低^[17-19]。在本研究中，LPS组生长性能指标相较于对照组都有一定程度的降低；在饲粮中添加RE后，仔猪生长性能各项指标均有一定程度的升高，但无显著差异。

仔猪的断奶过程会破坏肠道氧化平衡和抗氧化系统，导致产生更多活性氧，从而引发严重的氧化应激^[20]。本研究结果显示，LPS诱导显著降低了仔猪血清中SOD活性，增加了MDA、IL-6的水平，表明LPS诱导破坏了仔猪体内氧化与抗氧化平衡并引发炎症反应。焦鑫鑫等^[21]研究表明，补充高剂量的鼠尾草酸能显著提高葡聚糖硫酸钠诱导的小鼠结肠SOD活性并显著降低回肠MDA含量。在本研究中，RE的添加逆转了LPS诱导的氧化损伤，添加200 mg/kg的RE显著提高了血清中总抗氧化能力，提示RE可以恢复仔猪体内的氧化平衡，增强仔猪机体的抗氧化能力。

AST和ALT大量存在于肝细胞内。酯化作用会损伤肝细胞生物膜的磷脂双分子层，增强细胞膜的通透性，导致糖蛋白受损和细胞凋亡，最终引起AST和ALT释放进入血液^[22-23]。本研究结果表明，LPS诱导会使仔猪血清中AST活性显著升高，而添加200 mg/kg的RE后这一变化发生逆转，提示RE可能对肝脏具有潜在修复作用。IL-6是由LPS刺激而大量产生的炎症因子，在炎症反应中发挥关键作用^[24]。李润林等^[25]研究表明，迷迭香酸与百里香酚复配能够降低LPS诱导的大鼠空肠黏膜中IL-6的水平。本研究结果显示，添加400 mg/kg的RE可显著降低血清中IL-6的水平，表明RE可能会缓解仔猪机体内炎症的发生。

肠道是动物对营养物质消化吸收的重要场所。绒毛高度与隐窝深度的比值(绒隐比)与肠道的消化与吸收能力呈正相关^[26]。本研究中，LPS组攻毒的仔猪回肠上皮绒隐比极显著低于其他各组的，说明肠道吸收功能受损；饲粮中添加RE后仔猪回肠上皮绒隐比极显著升高，说明RE能减少LPS攻毒引起的仔猪肠道损伤，促进肠道的消化吸收功能。

肠上皮屏障是抵御肠道细菌和抗原渗透的重

要防御机制，其结构的完整性主要由紧密连接维持^[27]。血清中高浓度的D-乳酸和DAO与肠黏膜屏障功能异常密切相关。当肠黏膜屏障受损时，肠黏膜屏障的渗透性增加，D-乳酸和DAO被释放到血液中^[28]。段佳琪^[29]研究发现，补充迷迭香水提物可降低柔嫩艾美耳球虫攻毒后的黄羽肉鸡血清中DAO的活性，说明迷迭香水提物对肠道机械屏障有一定的修复作用。本研究结果表明，饲粮中添加200 mg/kg的RE可逆转LPS诱导的仔猪血清中DAO活性和D-乳酸的水平变化，说明RE在降低肠道通透性及改善肠道屏障完整性方面具有积极作用。

肠道微生物复杂的群落结构与组成在动物肠道营养物质的消化吸收和免疫调节中起着关键作用。WU等^[30]研究表明，植物多酚可通过调节肠道菌群结构影响宿主健康。多样性指数是评估微生物群丰富度、多样性及组成差异的关键指标^[31]。本研究结果显示，各组 α 多样性无显著差异，表明菌群多样性与丰富度未发生明显改变；然而，与LPS组相比，RE200组和RE400组的Chao1指数与observed_species指数呈降低趋势，且二者数值均向对照组水平靠近，这表明添加RE对缓解LPS诱导的断奶仔猪盲肠微生物物种丰富度异常波动具有积极作用。

Lachnospiraceae UCG-004属是一类广泛存在于消化道的有益内源性细菌，可以将消化的多糖发酵裂解成短链脂肪酸，尤其是丁酸^[32]。丁酸被认为是一种促进肠道健康的物质，它能通过促进紧密连接的形成与组装来改善肠道屏障，对维持肠道屏障的完整性具有重要作用^[33]。SUN等^[34]研究表明，由Lachnospiraceae生成的丁酸能促进免疫抑制细胞因子IL-10的合成，并可对抗肠道中的氧化应激，减少肠道炎症反应。在本研究中，补充RE后Lachnospiraceae UCG-004属的相对丰度明显上调，提示RE对于肠道炎症的缓解可能与Lachnospiraceae UCG-004属丰度的变化有关。

此外，本研究中，饲粮添加200 mg/kg的RE后Romboutsia的相对丰度极显著下调。Romboutsia相对丰度的变化可能与因肠组织细胞炎症和肠上皮紧密连接破坏而引发的肠道疾病密切相关^[35]。综上可知，饲粮中添加RE能促进肠道部分有益菌的生长，抑制致病菌的增殖，优化断奶仔猪肠道菌群结构，对肠道炎症反应和肠黏膜损伤具有一定的缓解作用。

4 结论

本试验结果表明,饲粮添加200 mg/kg RE显著提高了断奶仔猪抗氧化能力,降低了*Romboutsia*的相对丰度,提高了Lachnospiraceae UCG-004属的相对丰度,改善了肠道屏障功能。

参考文献:

- [1] KIM J C, HANSEN C F, MULLAN B P, et al. Nutrition and pathology of weaner pigs: nutritional strategies to support barrier function in the gastrointestinal tract[J]. Animal Feed Science and Technology, 2012, 173(1/2): 3–16.
- [2] 刘泽民,何流琴,李铁军,等.氧化应激对断奶仔猪能量代谢和氨基酸表观消化率的影响[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2022,48(2):208–214.
- [3] TANG X P, XIONG K N, FANG R J, et al. Weaning stress and intestinal health of piglets: a review[J]. Frontiers in Immunology, 2022, 13: 1042778.
- [4] DING D, WANG B, ZHANG X A, et al. The spread of antibiotic resistance to humans and potential protection strategies[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2023, 254: 114734.
- [5] LEŠNIK S, FURLAN V, BREN U. Rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.): extraction techniques, analytical methods and health-promoting biological effects[J]. Phytochemistry Reviews, 2021, 20(6): 1273–1328.
- [6] DE OLIVEIRA JR, CAMARGO S E A, DE OLIVEIRA L D. *Rosmarinus officinalis* L.(rosemary) as therapeutic and prophylactic agent[J]. Journal of Biomedical Science, 2019, 26(1): 5.
- [7] KUO C F, SU J D, CHIU C H, et al. Anti-inflammatory effects of supercritical carbon dioxide extract and its isolated carnosic acid from *Rosmarinus officinalis* leaves[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, 59(8): 3674–3685.
- [8] COLICAC, DI RENZO L, AIELLO V, et al. Rosmarinic acid as potential anti-inflammatory agent[J]. Reviews on Recent Clinical Trials, 2018, 13(4): 240–242.
- [9] MEZIANE-ASSAMI D, TOMAO V, RUIZ K, et al. Geographical differentiation of rosemary based on GC/MS and fast HPLC analyses[J]. Food Analytical Methods, 2013, 6(1): 282–288.
- [10] MULINACCI N, INNOCENTI M, BELLUMORI M, et al. Storage method, drying processes and extraction procedures strongly affect the phenolic fraction of rosemary leaves: an HPLC/DAD/MS study[J]. Talanta, 2011, 85(1): 167–176.
- [11] LENG W B, LIU Y L, SHI H F, et al. Aspartate alleviates liver injury and regulates mRNA expressions of TLR4 and NOD signaling-related genes in weaned pigs after lipopolysaccharide challenge[J]. The Journal of Nutritional Biochemistry, 2014, 25(6): 592–599.
- [12] ZHANG L H, GE J W, GAO F, et al. Rosemary extract improves egg quality by altering gut barrier function, intestinal microbiota and oviductal gene expressions in late-phase laying hens[J]. Journal of Animal Science and Biotechnology, 2023, 14(1): 121.
- [13] YANG X Z, HU R Z, YAO L P, et al. The role of uterus mitochondrial function in high-fat diet-related adverse pregnancy outcomes and protection by resveratrol[J]. Food & Function, 2024, 15(9): 4852–4861.
- [14] HU R Z, WU S S, LIB Z, et al. Dietary ferulic acid and vanillic acid on inflammation, gut barrier function and growth performance in lipopolysaccharide-challenged piglets[J]. Animal Nutrition, 2022, 8: 144–152.
- [15] GONG J T, ZHANG Q J, HU R Z, et al. Effects of *Prevotella copri* on insulin, gut microbiota and bile acids[J]. Gut Microbes, 2024, 16(1): 2340487.
- [16] SOLDADO D, BESSAR J B, JERÓNIMO E. Condensed tannins as antioxidants in ruminants: effectiveness and action mechanisms to improve animal antioxidant status and oxidative stability of products[J]. Animals, 2021, 11(11): 3243.
- [17] WEN X B, WAN F, WU Y, et al. Caffeic acid supplementation ameliorates intestinal injury by modulating intestinal microbiota in LPS-challenged piglets[J]. Food & Function, 2023, 14(16): 7705–7717.
- [18] XIONG S J, JIANG J J, WAN F, et al. *Cordyceps militaris* extract and cordycepin alleviate oxidative stress, modulate gut microbiota and ameliorate intestinal damage in LPS-induced piglets[J]. Antioxidants, 2024, 13(4): 441.
- [19] CUI C, WEI Y L, WANG Y B, et al. Dietary supplementation of benzoic acid and essential oils combination enhances intestinal resilience against LPS stimulation in weaned piglets[J]. Journal of Animal Science and Biotechnology, 2024, 15(1): 4.
- [20] CAO S T, WANG C C, WU H, et al. Weaning disrupts intestinal antioxidant status, impairs intestinal barrier and mitochondrial function, and triggers mitophagy in piglets[J]. Journal of Animal Science, 2018, 96(3): 1073–1083.
- [21] 焦鑫鑫,许敏,吴华,等.鼠尾草酸对葡聚糖硫酸钠诱

- 导的小鼠溃疡性结肠炎的改善作用[J]. 现代食品科技, 2024, 40(3): 18–27.
- [22] 熊兆龙. 葡萄籽提取物对氧化应激AA肉鸡的影响及作用机制的研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2021.
- [23] JIA P L, JI S L, ZHANG H, et al. Piceatannol ameliorates hepatic oxidative damage and mitochondrial dysfunction of weaned piglets challenged with diquat[J]. Animals, 2020, 10(7): 1239.
- [24] LAI J L, LIU Y H, PENG Y C, et al. Indirubin treatment of lipopolysaccharide-induced mastitis in a mouse model and activity in mouse mammary epithelial cells[J]. Mediators of Inflammation, 2017, 2017: 3082805.
- [25] 李润林, 赵道远, 李盼盼, 等. 百里香酚与迷迭香酸组合对脂多糖攻毒大鼠生长性能、炎症反应和肠道健康的影响[J]. 动物营养学报, 2022, 34(3): 2009–2022.
- [26] SONG B C, HE J, PAN X, et al. Dietary *Macleaya cordata* extract supplementation improves the growth performance and gut health of broiler chickens with necrotic enteritis[J]. Journal of Animal Science and Biotechnology, 2023, 14(1): 113.
- [27] GANAPATHY A S, SAHA K, WANG A, et al. Alpha-tocopherylquinone differentially modulates claudins to enhance intestinal epithelial tight junction barrier via AhR and Nrf2 pathways[J]. Cell Reports, 2023, 42(7): 112705.
- [28] XU B F, LIANG S N, ZHAO J Y, et al. *Bifidobacterium animalis* subsp. *lactis* XLTG11 improves antibiotic-related diarrhea by alleviating inflammation, enhancing intestinal barrier function and regulating intestinal flora[J]. Food & Function, 2022, 13(11): 6404–6418.
- [29] 段佳琪. 迷迭香水提物对黄羽肉鸡感染柔嫩艾美耳球虫的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2021.
- [30] WU S S, HU R Z, NAKANO H, et al. Modulation of gut microbiota by *Lonicera caerulea* L. berry polyphenols in a mouse model of fatty liver induced by high fat diet[J]. Molecules, 2018, 23(12): 3213.
- [31] 赵文轩, 吴建民, 党苗苗, 等. 橙皮苷与迷迭香酸组合对育肥猪盲肠肠道形态、抗氧化功能、菌群结构及屏障功能的影响[J]. 微生物学报, 2023, 63(11): 4356–4371.
- [32] CHEN R Z, WU P, CAI Z, et al. Puerariae Lobatae Radix with Chuanxiong Rhizoma for treatment of cerebral ischemic stroke by remodeling gut microbiota to regulate the brain-gut barriers[J]. The Journal of Nutritional Biochemistry, 2019, 65: 101–114.
- [33] CAO Y, CHEN J J, XIAO J, et al. Butyrate: a bridge between intestinal flora and rheumatoid arthritis[J]. Frontiers in Immunology, 2024, 15: 1475529.
- [34] SUN M M, WU W, CHEN L, et al. Microbiota-derived short-chain fatty acids promote Th1 cell IL-10 production to maintain intestinal homeostasis[J]. Nature Communications, 2018, 9(1): 3555.
- [35] WANG F H, SUN N, ZENG H Q, et al. Selenium deficiency leads to inflammation, autophagy, endoplasmic reticulum stress, apoptosis and contraction abnormalities via affecting intestinal flora in intestinal smooth muscle of mice[J]. Frontiers in Immunology, 2022, 13: 947655.

责任编辑: 伍锦花

英文编辑: 张承平