

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 410128)

摘要: 选取杜×长×大三元杂交断奶仔猪(21日龄)144头,分为4个处理组(每组6个重复,每个重复6头猪)。对照组(CTL)与脂多糖组(LPS)采食基础饲料,低剂量迷迭香水提物组(RE200)与高剂量迷迭香水提物组(RE400)在饲料中额外补充200、400 mg/kg 迷迭香水提物(RE),试验期28天。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 BW),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)含量显著降低($P<0.05$),谷草转氨酶(AST)和白介素6(IL-6)含量显著升高($P<0.05$)。与LPS组相比,RE200组的丙二醛(MDA)、AST含量显著降低($P<0.05$),总抗氧化能力(T-AOC)指标显著升高($P<0.05$);RE400组的AST、IL-6含量显著降低($P<0.05$)。3)与对照组相比,LPS组回肠绒毛高度和绒毛隐比均极显著降低($P<0.01$),隐窝深度极显著升高($P<0.01$),二胺氧化酶(DAO)含量显著升高($P<0.05$)。与LPS组相比,RE200、RE400组均极显著提高绒毛高度和绒毛隐比($P<0.01$),极显著降低隐窝深度($P<0.01$);RE200组的DAO含量显著降低($P<0.05$)。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*)相对丰度显著上升($P<0.05$)。与LPS组相比,RE200组*Romboutsia*相对丰度显著降低($P<0.05$),毛螺菌科 UCG-004 (*Lachnospiraceae* UCG-004)的相对丰度显著升高($P<0.05$)。综上所述,饲料中添加RE显著提高断奶仔猪抗氧化能力,降低了肠道通透性,减少了肠道损伤,改善了肠道菌群结构。在本试验条件下,断奶仔猪饲料中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

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

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(U22A20515), 湖南省科技人才托举工程项目

作者简介: 向鸿坤(2000—), 男, 湖南麻阳人, 硕士研究生, 从事单胃动物营养研究, E-mail:1473184127@qq.com

*通讯作者: 袁旭鹏, 畜牧师, 硕士生导师, E-mail: yuanxupeng01@163.com

Animal Science and Technology, Hunan Biological Electromechanical Vocational Technical College, Changsha, Hunan 410128, China)

Abstract: A total of 144 Duroc × Landrace × Yorkshire crossbred weaned piglets at the age of 21 days were assigned to 4 groups with 6 replicates per group and 6 pigs per replicate randomly. Piglets in the control(CTL) 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 and 400 mg/kg rosemary extract(RE), respectively, for 28 days. 100 µg/kg BW 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 showed 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) content was markedly reduced ($P<0.05$), the aspartate aminotransferase(AST) and interleukin-6(IL-6) content were markedly elevated($P<0.05$) compared to CTL group. In RE200 group, the malondialdehyde(MDA) and AST content was markedly reduced($P<0.05$), and the index of total antioxidant capacity(T-AOC) was markedly elevated($P<0.05$) compared to LPS group. In RE400 group, the AST and IL-6 contents were markedly reduced ($P<0.05$) compared to LPS group. 3) In LPS group, the villus height and pillow-crypt ratio of ileum were markedly reduced($P<0.01$), while the crypt depth was markedly elevated($P<0.01$) and diamine oxidase(DAO) content was markedly elevated($P<0.05$) compared to CTL group. In RE200 and RE400 group, the villus height and pillow-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 content 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 abundances of Romboutsia was markedly elevated($P<0.05$) compared to CTL group. In RE200 group, the relative abundances of Romboutsia was markedly reduced($P<0.05$), the relative abundance of Lachnospiraceae UCG-004 was markedly elevated($P<0.05$) compared to LPS group. In conclusion, dietary adding RE can significantly improve antioxidant capacity, reduce gut permeability, alleviate gut damage, 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，从而使其受到肠道炎症和腹泻的影响。这种影响可能导致生长性能下降甚至死亡，对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]。面对这一健康问题，开发优质、安全、高效的替代抗生素的添加剂对养猪业至关重要。

近年来，植物提取物已被广泛研究作为潜在饲

料添加剂^[5-6]。迷迭香 (*Rosmarinus officinalis* L.) 是一种原产于欧洲、北非及地中海地区的唇形科鼠尾草属植物, 广泛应用于食品保健和医药制品等领域^[7-8]。该植物含有抗炎和抗氧化等多种生物学活性, 这些生物活性主要归功于其挥发性成分和多种活性物质。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^[9-10]。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, 随后进行二次纯化得到的活性成分^[11-12]。尽管 RE 具有这些潜在的应用价值, 但其作为饲料添加剂在断奶仔猪上的作用和效果尚未得到充分的研究。因此, 本研究通过在断奶仔猪饲料中添加不同梯度的 RE, 旨在探究其对仔猪生长性能、血清生化及肠道功能的影响, 为其在仔猪生产中的合理利用提供理论依据及参考。

1 材料与方法

1.1 试验设计

选取 144 头杜×长×大三元杂交断奶仔猪, 按遗传、体重基础相近的原则随机分为 4 个处理: CTL 组 (对照组, 饲喂基础饲料)、LPS 组 (模型组, 饲喂基础饲料+注射 100 μg/kg LPS)、RE200 (饲喂基础饲料+200 mg/kg RE +注射 100 μg/kg LPS)、RE400 (饲喂基础饲料+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 天, 试验期间自由采食和饮水。LPS 的使用剂量 (100 μg/kg BW) 参照 Leng 等^[13]研究, RE 的添加剂量 (200、400 mg/kg) 参照 Zhang 等^[14]研究, 由湖南某公司提供。LPS 在试验第 21 天和第 28 天注射, 每个重复注射一头仔猪, 第 28 天注射完 4 小时后准时采样。参照 NRC (2012) 的仔猪营养需要配制基础饲料, 饲料组成及营养水平见表 1。

表 1 基础饲料组成及营养水平

Table 1 Composition and nutrient levels of the basal diet

项目 Items	含量 Content/%
原料 Ingredients	
玉米 Corn	38.00
膨化玉米 Extruded corn	18.50
豆粕 (46% 粗蛋白) Soybean meal	13.00
膨化豆粕 Extruded soybean meal	10.00
鱼粉 Fish meal	5.00
乳清粉 Dried whey	12.00
大豆油 Soybean oil	0.72
磷酸氢钙 CaHPO ₄	0.78
石粉 Limestone	1.00
氯化钠 NaCl	0.30
L-赖氨酸盐酸盐 (纯度 98%) L-Lys•HCl	0.32
DL-蛋氨酸 DL-Met	0.16
L-苏氨酸 L-Thr	0.11
L-色氨酸 L-Trp	0.01

表 1 (续)

项目 Items	含量 Content/%
预混料 Premix ¹	0.03
合计 Total	100.00
营养水平 Nutrient levels ²	
表观消化能 ADE/ (MJ/kg)	14.48
粗蛋白质 CP	19.62
钙 Ca	0.93
总磷 TP	0.66
可消化磷 DP	0.42
赖氨酸 Lys	1.39
蛋氨酸 Met	0.49
苏氨酸 Thr	0.87
色氨酸 Trp	0.22

1) 预混料为每千克饲料提供: 氯化胆碱 500 mg, V-A 10 500 IU, V-D₃ 3 300 IU, V-E 22.5 IU, V-K₃ 3 mg, V-B₁ 3 mg, V-B₂ 7.5 mg, V-B₆ 4.5 mg, V-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 mg, Se 60 mg。

2) 营养水平为计算值。

1.2 样品采集

采样前, 注射 LPS 的仔猪每头采集 2 份血样 (共 20 mL), 置于无抗凝剂的真空采血管内, 参考 Yang 等^[15]方法制备血清。对仔猪采取安乐死后, 在屠宰场对 24 头猪进行内脏切除, 采集每头猪的肝脏和肠道。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 测序分析肠道微生物结构。所有样品存放于 -80 °C 超低温冰箱待测。

1.3 指标测定

1.3.1 生长性能

试验开始和结束时分别称重, 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重 (ADG)、平均日采食量 (ADFI) 和料重比。

1.3.2 血清生化

血清中丙二醛 (MDA)、超氧化物歧化酶 (SOD)、总抗氧化能力 (T-AOC)、谷草转氨酶

(AST)、谷丙转氨酶 (ALT)、IL-6、二胺氧化酶 (DAO) 和 D-乳酸的检测参照课题组前期研究进行^[16]。

1.3.3 肠道 HE 染色分析及菌群分析

回肠组织切片、HE 染色^[16], 以及肠道菌群分析^[17]分别参照课题组前期研究进行。

1.4 数据分析

结果用平均值±标准差表示。采用 SPSS 19.0 统计程序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 软件作图。P<0.05 时视为差异显著。

2 结果与分析

2.1 饲料添加迷迭香水提物对断奶仔猪生长性能的影响

饲料添加 RE 对断奶仔猪生长性能的影响如表 2 所示。RE200 组仔猪末重、平均日增重高于 LPS 组, 而料重比低于 LPS 组, 但无统计学显著差异

($P>0.05$)。此外, 各组间平均日采食量无显著差异 ($P>0.05$)。

表 2 饲料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 Items	CTL	LPS	RE200	RE400	P 值 P-value
初重 Initial weight/Kg	5.71±0.51	5.71±0.51	5.79±0.64	6.03±0.78	$P>0.05$
末重 Final weight/Kg	11.97±0.94	11.47±0.94	12.73±2.40	12.12±2.61	$P>0.05$
平均日增重 ADG/Kg	0.24±0.03	0.22±0.03	0.25±0.06	0.23±0.07	$P>0.05$
平均日采食量 ADFI/Kg	0.45±0.05	0.41±0.05	0.44±0.09	0.43±0.08	$P>0.05$
料重比 F/G	1.87±0.06	1.87±0.14	1.76±0.12	1.93±0.20	$P>0.05$

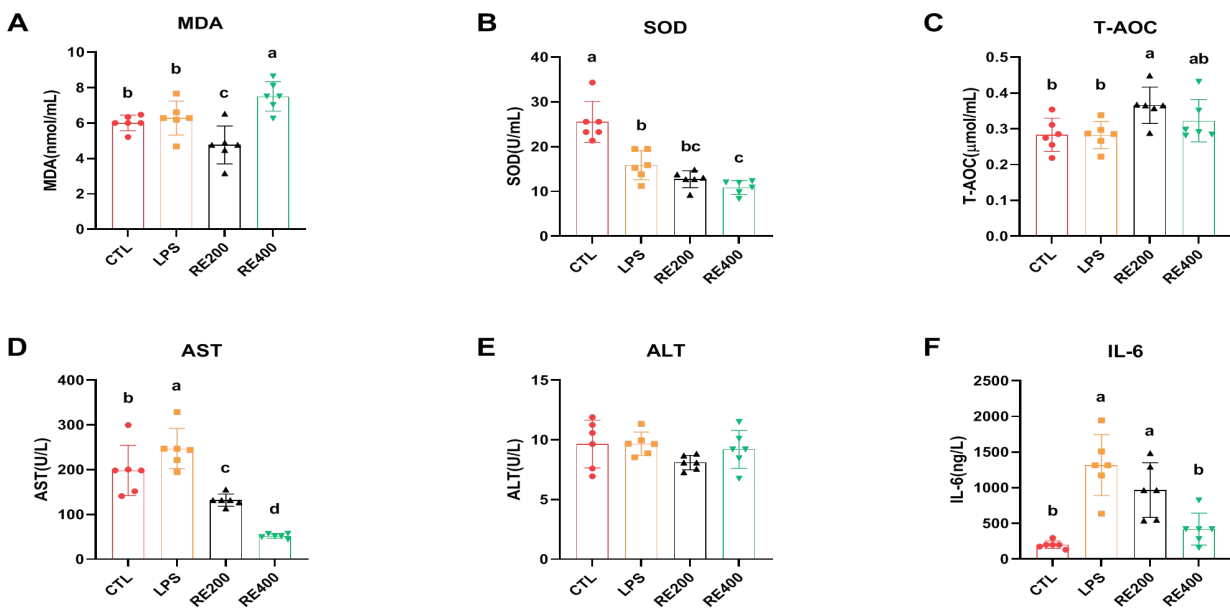
同列不同字母表示组间的差异有统计学意义($P<0.05$)。下表同。

2.2 饲料添加迷迭香水提物对断奶仔猪血清生化指标的影响

如图 1 所示, 在抗氧化相关指标中, 与对照组相比, LPS 组的 SOD 含量显著降低 (图 1B, $P<0.05$)。当在饲料中添加 200 mg/kg 的 RE 后, 与 LPS 组相比, 仔猪体内的 MDA 含量显著降低 (图 1A, $P<0.05$), T-AOC 显著提升 (图 1C, $P<0.05$)。

($P<0.05$)。

在炎症相关指标中, 与对照组相比, LPS 组的 AST 含量 (图 1D)、IL-6 含量 (图 1F) 都显著升高 ($P<0.05$), 说明仔猪出现了炎症。与 LPS 组相比, 在饲料中添加 200 mg/kg 和 400 mg/kg 的 RE 后, 仔猪体内 AST 含量显著降低 (图 1D, $P<0.05$)。饲料中添加 400 mg/kg 的 RE 显著降低了仔猪体内 IL-6 的含量 (图 1F, $P<0.05$)。



数据柱形标注不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)。下图同。

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 饲料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

饲料添加 RE 对断奶仔猪回肠形态的影响见图 2 和表 3。切片染色结果表明,与对照组相比, LPS 组回肠形态受损,绒毛隐比极显著降低 ($P<0.01$);

与 LPS 组相比,饲料添加不同剂量的 RE 均改善了回肠损伤,绒毛隐比极显著升高 ($P<0.01$)。

在肠道通透性指标中,由图 2C 可知,与对照组相比, LPS 组血液中 DAO 的含量显著提升 ($P<0.05$),而仔猪在采食添加 200 mg/kg RE 的饲料后,DAO 的水平显著降低 ($P<0.05$)。

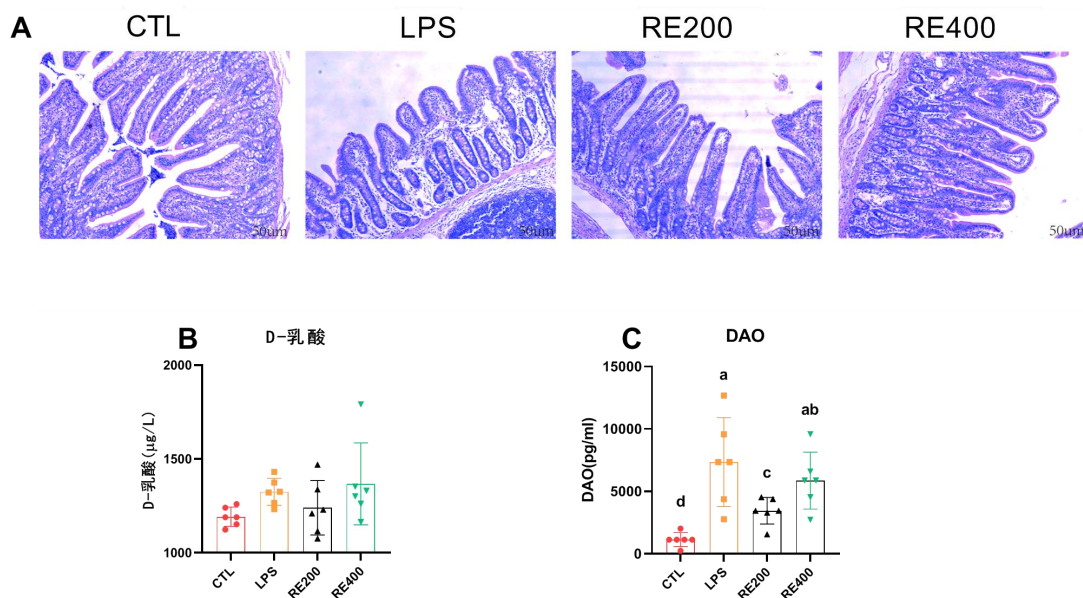


图 2 迷迭香水提物对断奶仔猪回肠形态及血清中 D-乳酸和 DAO 的影响

Fig.2 Effect of rosemary extract on ileum morphology and serum D-lactic acid and DAO 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

项目 Items	CTL	LPS	RE200	RE400	P 值 P-value
绒毛高度 Villus height /um	169.03±7.20 ^a	115.76±19.72 ^b	166.69±18.89 ^a	155.56±21.40 ^a	0.000
隐窝深度 Crypt depth/um	117.30±20.76 ^b	159.50±26.36 ^a	112.93±22.20 ^b	115.44±34.02 ^b	0.007
绒毛隐比 V/C	1.48±0.24 ^a	0.74±0.13 ^b	1.54±0.28 ^a	1.42±0.37 ^a	0.000

2.4 饲料添加迷迭香水提物对断奶仔猪肠道菌群的影响

2.4.1 α、β多样性分析

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,因此采用 16S rRNA 基因扩增子测序分析盲肠菌群组成,

反映肠道微生物定植情况。α多样性分析结果显示, chao1、shannon、simpson 和 observed_species 指数无显著差异 ($P>0.05$) (图 3B-E),表明菌群多样性与丰富度未发生明显改变。主成分分析结果如图 3A 所示,4 个处理 24 个样品部分重叠未明显分开,说明各处理中菌群的结构基本相似。

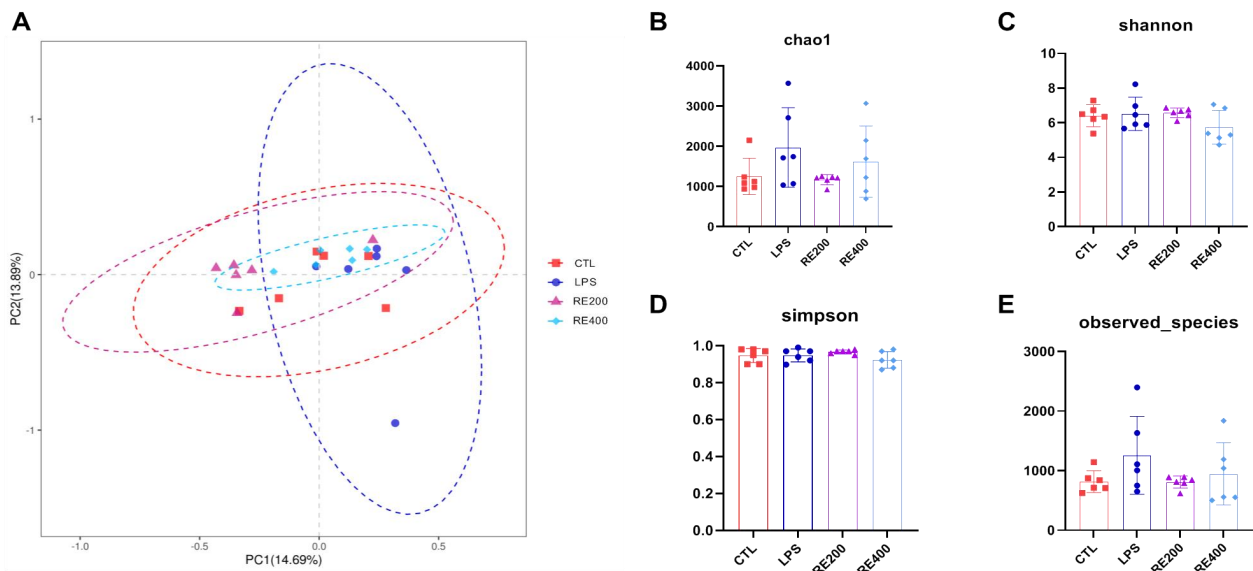


图 3 迷迭香水提取物对断奶仔猪盲肠食糜中微生物 α 和 β 多样性的影响

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

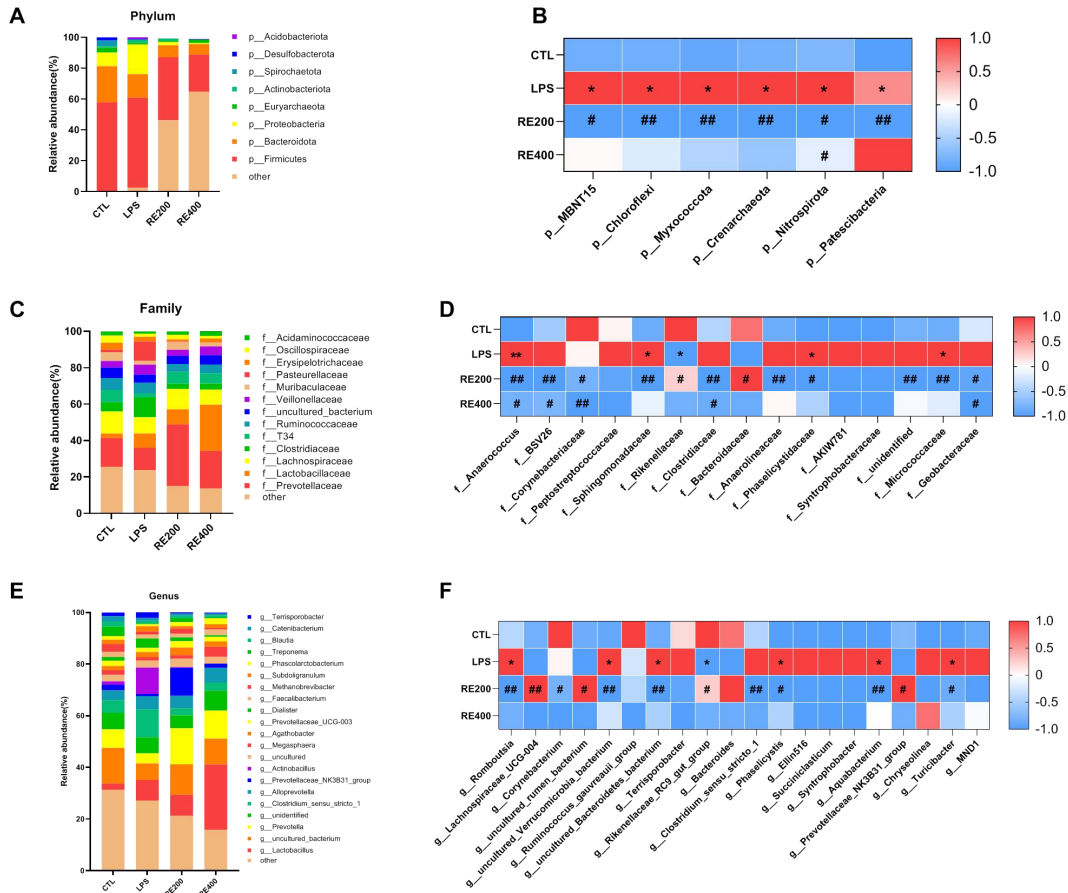
2.4.2 门、科、属水平菌群分析

门水平的优势菌群如图 4A 所示，厚壁菌门（Firmicutes）占比最高，其次是拟杆菌门（Bacteroidota）。如图 4B 所示注射了 LPS 后，绿弯菌门（Chloroflexi）、黏球菌门（Myxococcota）、泉古菌门（Crenarchaeota）、硝化螺旋菌门（Nitrospirota）、骸骨菌门（Patescibacteria）及候选门 MBNT15（Candidate phylum MBNT15）相对丰度显著上升（ $P < 0.05$ ）。仔猪在采食添加了 200 mg/kg RE 的饲料后，以上几种菌门的相对丰度显著下降（ $P < 0.05$ ）。

在科水平上，前 15 的优势菌群如图 4C 所示，乳杆菌科（Lactobacillaceae）、普雷沃氏菌科（Prevotellaceae）和毛螺菌科（Lachnospiraceae）的占比较高。如图 4D 所示注射了 LPS 后，厌氧球菌科（Anaerococcus）、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（ $P < 0.05$ ）。在饲喂了 RE 后，多种菌的相对丰度发生了改变，Rikenellaceae 和拟杆菌科（Bacteroidaceae）的丰

度在注射 LPS 后降低，采食了 RE 后升高。棒状杆菌科（Corynebacteriaceae）、Sphingomonadaceae、梭菌科（Clostridiaceae）、厌氧绳菌科（Anaerolineaceae）、豆形囊菌科（Phaselicystidaceae）、地杆菌科细菌（Geobacteraceae）、Micrococcaceae、Anaerococcus 及 BSV26 在注射了 LPS 后相对丰度升高，而采食了 RE 后降低。

如图 4E 所示，在属水平上，我们对前 20 种优势菌群进行了筛选。如图 4F 所示，在注射了 LPS 后，LPS 组的罗姆布茨菌属（*Romboutsia*）、革囊藻属（*Phaselicystis*）、水小杆菌属（*Aquabacterium*）和苏黎世杆菌属（*Turcibacter*）这 4 种菌属的相对丰度显著升高（ $P < 0.05$ ），但是在饲喂了 RE 后，RE200 组这 4 种菌属的相对丰度显著降低（ $P < 0.05$ ），并有多数菌属的相对丰度发生改变。



*表示 LPS vs CTL, 且 $P < 0.05$, **表示 $P < 0.01$; #表示 RE200/400 vs LPS, 且 $P < 0.05$, ##表示 $P < 0.01$ 。

图 4 迷迭香水提物对断奶仔猪盲肠食糜菌群在门水平 (A,B)、科水平 (C,D) 和属水平 (E,F) 上的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 at phylum level (A,B), family level (C,D) and genus level (E,F) of weaned piglets

3 讨论

3.1 饲料添加迷迭香水提物对断奶仔猪生长性能的影响

在氧化应激和炎症相关的研究中, 通常使用过氧化氢、LPS 等其他药物建立模型, 细菌 LPS 能结合 toll 样受体 (TLR4) 引发炎症反应^[18]。大量试验表明, 注射 LPS 会导致仔猪的末重和日增重降低^[19-21]。在本研究中, LPS 组生长性能各指标相较于对照组都有一定程度的降低, 饲料中添加 RE 对生长性能各项指标有一定程度的升高, 但无显著差异。

3.2 饲料添加迷迭香水提物对断奶仔猪血清生化指标的影响

仔猪的断奶过程会破坏肠道氧化平衡和抗氧化系统, 导致活性氧的产生增加, 从而引发严重的氧化应激^[22]。本研究 LPS 诱导显著降低了仔猪血清

中 SOD 水平, 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^[23]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, 显著提高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。脂化作用损伤肝细胞生物膜的磷脂双分子层, 增强了细胞膜的通透性, 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^[24-25]。本试验发现, LPS 诱导对仔猪血清中 AST 含量显著升高, 而添加 200 mg/kg 的 RE 逆转了这一变化, 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^[26]。李润

林等^[27]研究报道,迷迭香酸与百里香酚复配能够降低 LPS 诱导大鼠空肠黏膜中 IL-6 含量。本研究结果显示,RE 可显著降低血清中 IL-6 的含量,表明 RE 可缓解仔猪机体内炎症发生。

3.3 饲料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

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与肠道的消化与吸收能力呈正相关^[28]。本研究发现,LPS 攻毒的回肠上皮绒毛比显著低于其他各组,说明肠道吸收功能受损;饲料中添加 RE 能显著改善回肠上皮绒毛比,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,其结构的完整性由紧密连接维持^[29]。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^[30]。段佳琪等^[31]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黄羽肉鸡血清 DAO 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。本研究结果显示,饲料中添加 RE 可逆转 LPS 诱导的仔猪血清中 DAO 和 D-乳酸水平,表明 RE 在降低肠道通透性及改善肠道机械屏障完整性方面具有积极作用。

3.4 饲料中添加迷迭香水提物对断奶仔猪盲肠微生物的影响

肠道微生物复杂的群落组成对动物的肠道营养消化吸收和免疫调节中起着关键作用。团队前期研究发现,植物多酚可通过调节肠道菌群结构影响宿主健康^[32]。作为评估微生物群丰富度、多样性及组成差异的关键指标^[33],多样性指数在本研究中显示, α 多样性分析无显著差异,表明菌群多样性与丰富度未发生明显改变,但 RE200 组的 shannon 指数有一定程度的增加,表明添加 RE 对断奶仔猪盲肠微生物物种的丰富度和均匀度的改善具有积极作用。

Lachnospiraceae UCG-004 是一种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^[34],丁酸被认为是一种促进肠道健康的物质,它可通过促进紧密连接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^[35]。Sun 等^[36]研究表明,由 *Lachnospiraceae* 生成的丁酸能促进效应 T 细胞中免疫抑制细胞因子 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 能极显著上调 *Lachnospiraceae* UCG-004 的相对丰度,提示 RE 缓解肠道炎症可能与 *Lachnospiraceae* UCG-004 丰度的变化有关。

此外,本实验中饲料添加 RE 极显著下调了 *Romboutsia* 相对丰度。*Romboutsia* 相对丰度的变化可能与由肠组织细胞炎症和肠上皮紧密连接破坏引起的肠道疾病密切相关^[37]。综上所述,饲料中添加 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,饲料添加 200 mg/kg RE 显著提高了断奶仔猪抗氧化能力,降低了 *Romboutsia* 相对丰度,提高了 *Lachnospiraceae* UCG-004 相对丰度,改善了肠道屏障功能。

参考文献:

- [1] WEN X,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): 7705-17.
- [2] CAMPBELL J M,CRENSHAW J D,POLO J.The biological stress of early weaned piglets[J].Journal of Animal Science and Biotechnology,2013,4(1):19.
- [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.
- [4] DING D,WANG B,ZHANG X, et al. The spread of antibiotic resistance to humans and potential protection strategies [J]. Ecotoxicology and environmental safety, 2023, 254: 114734.
- [5] 曹满湖,金睿,温建崇,等.桑叶提取物对 AA 肉鸡肉品

- 质的影响及其作用机理[J].湖南农业大学学报(自然科学版), 2023,49(03):344-351.
- [6] 王海波,谷志勇,刘远等.槲皮素对早期断奶广丰山羊羔羊的生长性能和血清生理及免疫抗氧化能力的影响[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2025,51(1):90-97.
- [7] 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) :1273-328.
- [8] DE OLIVEIRA J R,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.
- [9] 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):3674-85.
- [10] COLICA C,DI RENZO L,AIELLO V,et al.Rosmarinic acid as potential anti-inflammatory agent[J].Reviews on Recent Clinical Trials,2018,13(4):240-2.
- [11] 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,2013,6:282-8.
- [12] 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):167-76.
- [13] LENG W,LIU Y,SHI H,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):592-9.
- [14] ZHANG L, GE J, 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.
- [15] YANG X,HU R,YAO L, 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): 4852-61.
- [16] HU R,WU S,LI B, et al. Dietary ferulic acid and vanillic acid on inflammation, gut barrier function and growth performance in lipopolysaccharide-challenged piglets [J]. Animal nutrition (Zhongguo xu mu shou yi xue hui), 2022, 8(1): 144-52.
- [17] GONG J,ZHANG Q,HU R, et al. Effects of *Prevotella copri* on insulin, gut microbiota and bile acids [J]. Gut microbes, 2024, 16(1): 2340487.
- [18] SOLDADO D, BESSA R J, 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: 3243.
- [19] WEN X,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): 7705-17.
- [20] XIONG S,JIANG 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 (Basel, Switzerland), 2024, 13(4).
- [21] CUI C,WEI Y,WANG Y, 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.
- [22] CAO S,WANG 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):1073-83.
- [23] 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(03):18-27.

- [24] 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].西南科技大学,2021.
- [25] JIA P,JI S,ZHANG H,et al.Piceatannol ameliorates hepatic oxidative damage and mitochondrial dysfunction of weaned piglets challenged with diquat[J].Animals,2020,10(7):1239.
- [26] 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.
- [27] 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(03):2009-22.
- [28] SONG B,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..
- [29] 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.
- [30] XU B,LIANG S,ZHAO J, 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): 6404-18.
- [31] 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].湖南农业大学,2021.
- [32] WU S,HU R,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.
- [33] 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.
- [34] CHEN R,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,2019,65:101-14.
- [35] CAO Y,CHEN J,XIAO J, et al. Butyrate: a bridge between intestinal flora and rheumatoid arthritis [J]. Front Immunol, 2024, 15: 1475529.
- [36] SUN 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.
- [37] WANG F,SUN N,ZENG H,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.