

DOI: 10.12101/j.issn.1004-390X(n).202105002

地衣芽孢杆菌对热应激公兔肾上腺结构及 血浆皮质醇含量的影响*

韩 昱¹, 张立永^{2**}, 张富梅²

(1. 河北北方学院 实验动物中心, 河北 张家口 075000; 2. 河北北方学院 动物科技学院, 河北 张家口 075000)

摘要:【目的】研究地衣芽孢杆菌(*Bacillus licheniformis*)缓解种公兔热应激的相关机制。【方法】选用年龄相近、体况良好的种公兔 90 只, 随机均分为常温对照组(N)、热应激组(H)和热应激+地衣芽孢杆菌组(H+B)。N 组和 H 组饲喂基础饲料, H+B 组饲喂基础饲料+地衣芽孢杆菌 1 000 mg/kg, H 组和 H+B 组均模拟炎热夏季温度进行热应激刺激, 试验 30 d 后测定公兔肾上腺指数和血浆皮质醇(CORT)含量, 试验结束后制作肾上腺组织切片, 用光镜和电镜观察肾上腺结构变化。【结果】H 组和 H+B 组的肾上腺质量和肾上腺指数极显著高于 N 组($P<0.01$), H+B 组也极显著低于 H 组($P<0.01$)。肾上腺结构观察显示: H 组肾上腺被膜厚度减小, 细胞团直径减小, 超微结构显示肾上腺皮质和髓质结构严重受损, 而 H+B 组肾上腺结构得到明显改善。血浆 CORT 含量显示: 试验初期(12 h 和 3 d), H 组的 CORT 水平极显著升高($P<0.01$), 但 10 d 后开始下降; H+B 组的 CORT 水平虽在初期也表现升高, 但升高缓慢, 至中后期即趋于正常水平, 试验 30 d 时与 N 组无显著差异($P>0.05$)。【结论】饲料中添加地衣芽孢杆菌可以缓解热应激刺激对种公兔肾上腺造成的损伤, 有利于维持其正常生殖功能。

关键词: 地衣芽孢杆菌; 热应激; 公兔; 肾上腺; 血浆皮质醇

中图分类号: S 816.73 文献标志码: A 文章编号: 1004-390X (2021) 06-0962-07

Effect of *Bacillus licheniformis* on the Heat Stress to Adrenal Gland Structure and Plasma CORT Content in Male Rabbits

HAN Yu¹, ZHANG Liyong², ZHANG Fumei²

(1. Laboratory Animal Center, Hebei North University, Zhangjiakou 075000, China;

2. College of Animal Science and Technology, Hebei North University, Zhangjiakou 075000, China)

Abstract: [Purpose] To study the mechanism of *Bacillus licheniformis* for alleviating heat stress in male rabbits. [Method] Ninety male rabbits of similar age and good body condition were selected and randomly divided into normal temperature control group (N), heat stress group (H) and heat stress+B. *licheniformis* group (H+B). Group N and group H were fed with basic diets. Group H+B was fed with a basic diet+B. *licheniformis* 1 000 mg/kg. Group H and group H+B were given heat stress stimulation to simulate hot summer temperature. The test period was 30 days. The adrenal index and content of CORT in the plasma of each group were measured. After the test, sections were

收稿日期: 2021-05-06

修回日期: 2021-08-11

网络首发时间: 2021-11-22 09:33:19

*基金项目: 河北省科技计划项目(12226613, 15226604D)。

作者简介: 韩昱(1989—), 男, 河北张家口人, 硕士, 助理研究员, 主要从事动物养殖与疾病防治研究。

E-mail: hanyufo@163.com

**通信作者 Corresponding author: 张立永(1968—), 男, 河北张家口人, 硕士, 研究员, 主要从事动物养殖研究。E-mail: slsyszly@126.com

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1044.S.20211119.1514.012.html>



made and the changes in adrenal gland structure were observed by light and electron microscopes.

[**Results**] Adrenal weight and adrenal index in group H and group H+B were extremely significantly higher than those in group N ($P<0.01$). Group H+B was extremely significantly lower than the group H ($P<0.01$). Observation of adrenal gland structure showed that in group H, the thickness of the adrenal capsule was reduced, the diameter of the cell mass was reduced, and the structure of the adrenal cortex and medulla was severely damaged. Adrenal gland structure in group H+B was obviously improved. The plasma CORT content showed that at the beginning of the experiment (12 hours and 3 days), the CORT level in group H increased significantly ($P<0.01$), but began to decrease after 10 days. Although the CORT level of group H+B also increased at the beginning, it increased slowly and reached the normal level in the middle and late stages, and there was no significant difference from group N at the 30th day of the test ($P>0.05$). [**Conclusion**] The addition of *B. licheniformis* to the diet can alleviate the damage caused by heat stress stimuli to male rabbits and help maintain their normal reproductive function.

Keywords: *Bacillus licheniformis*; heat stress; male rabbits; adrenal gland; plasma CORT

热应激是影响畜禽生产性能的重要因素^[1-3],可导致种畜禽繁殖性能下降^[4-6]。研究发现:热应激可显著降低山羊干物质采食量,影响其生产性能和乳品质,使其瘤胃黏膜绒毛大面积萎缩、脱落和坏死,增加瘤胃黏膜屏障的通透性^[7];还会使睾丸细胞线粒体形态学发生改变,诱发细胞氧化损伤,进而可能影响生殖功能^[8]。探索抗热应激措施,并研究其作用机制至关重要。畜禽发生热应激时,肾上腺发挥着核心作用,其分泌的皮质醇(cortisol, CORT)是热应激不可或缺的激素^[9]。因此,观测肾上腺结构及其分泌激素水平变化,有助于研究缓解种公兔热应激反应的机制,为指导炎热环境下种公兔饲养提供科学依据。

地衣芽孢杆菌(*Bacillus licheniformis*)是一种益生菌,可促进动物消化道有益菌生长,抑制有害菌增殖,调节微生态平衡,增强消化功能,促进生长^[10-14];还可刺激动物免疫器官生长,激活淋巴细胞,提高机体免疫力^[15-17]。邓文等^[18]研究发现:地衣芽孢杆菌可改善热应激下鸡蛋品质和提高产蛋率;宦海琳等^[19]发现:仔猪受到脂多糖(lipopolysaccharide, LPS)应激后,利用地衣芽孢杆菌可提高其免疫力,增强肠黏膜抗氧化能力,减缓肠道损伤并修复肠道形态。课题组前期研究发现:种公兔饲料中添加适量地衣芽孢杆菌可降低由热应激引起的精子畸形率,提高精子密度和精子活力^[20]。到目前为止,未见有关地衣芽孢杆菌对种公兔热应激下肾上腺结构及其分泌皮质醇

影响的报道。本研究通过在热应激种公兔饲料中添加地衣芽孢杆菌,观察其对热应激种公兔肾上腺结构的影响,测定血浆中CORT的变化,探究地衣芽孢杆菌缓解种公兔热应激机制,为炎热季节种公兔的合理饲养提供科学依据,也为后续开发抗热应激营养素提供进一步的技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

地衣芽孢杆菌活菌制剂购于北京挑战生物技术有限公司,其活菌含量 2×10^{10} CFU/g;塞北兔种公兔来自河北北方学院实验动物中心。

1.2 试验动物分组与饲养

1.2.1 种公兔选择与分组

选取年龄相近、体况良好的塞北兔种公兔90只,随机等分为3组,每组设置3个重复,每个重复10只。设常温对照组(N组)、热应激组(H组)和热应激+地衣芽孢杆菌组(H+B组)。N组和H组饲喂基础饲料, H+B组饲料为基础饲料+地衣芽孢杆菌1 000 mg/kg(前期研究确定的最佳添加剂量^[7])。

1.2.2 饲养管理

公兔自由采食和饮水,采用全自动智能控温电加热暖风机控温。设置温度N组为20~25℃;H组和H+B组模拟夏季温度变化规律:12:00—16:00温度控制在32~35℃,10:00—12:00和16:00—22:00温度控制在28~30℃,22:00—

10:00 温度控制在 25~27 ℃。各组其他饲养环境相同,湿度均为 50%~55%。预饲期 7 d 后转为正式期饲喂 30 d。

1.3 测定指标

1.3.1 血浆 CORT 含量

在试验开始 0 h、12 h、3 d、10 d、20 d 和 30 d, 各组兔分别耳静脉采血, 制备血浆, 采用放射免疫分析法测定血浆 CORT 含量, 即利用全自动化学发光免疫分析仪 (MAGLUMI X8) 和皮质醇检测试剂盒 (化学发光法) 进行测定。

1.3.2 肾上腺指数

试验结束后, 各组兔空腹 12 h, 测定体质量; 麻醉固定, 腹部解剖, 无菌摘取肾上腺, 称量, 计算肾上腺指数。肾上腺指数=肾上腺质量(g)/体质量(kg)。

1.3.3 肾上腺组织光镜样品制备及观察

取部分肾上腺组织块立即固定于 4% 甲醛磷酸缓冲液中 (pH=7.2~7.4); 充分固定后, 按常规方法脱水、透明、石蜡包埋, 制作石蜡切片, HE 染色后, 用显微镜观察, 并采用 YD300 型数字摄像机及图像处理系统分析肾上腺组织结构的变化。

1.3.4 肾上腺组织透射电镜标本制备及观察

另取肾上腺组织块, 用 2.5% 戊二醛固定 24 h 以上, 用磷酸缓冲液漂洗, 再用 1% 锇酸固定, 用不同体积分数的乙醇脱水, 然后包埋、固化, 制成超薄切片; 用 3% 醋酸铀—枸橼酸铅双染色, 采用 JEMCX II 型透射式电子显微镜观察其超微结构。

1.4 数据统计及分析

测定数据采用 SPSS 19.0 生物统计软件进行分析, 结果以“平均值±标准差”表示。

2 结果与分析

2.1 地衣芽孢杆菌对热应激种公兔肾上腺指数的影响

由表 1 可知: 热应激组 (H) 肾上腺质量和肾上腺指数极显著高于常温组 (N) ($P<0.01$); 而热应激+地衣芽孢杆菌组 (H+B) 极显著低于 H 组 ($P<0.01$), 但仍高于 N 组。

2.2 地衣芽孢杆菌对热应激种公兔肾上腺组织结构的影响

2.2.1 种公兔肾上腺组织结构的变化

由图 1 可知: 光镜下观察, 热应激组 (H) 种公兔肾上腺被膜厚度减小, 为 $(50.70\pm2.98)\mu\text{m}$, 热应

表 1 地衣芽孢杆菌对热应激种公兔肾上腺指数的影响

Tab. 1 The effect of *Bacillus licheniformis* on the adrenal index of heat-stressed male rabbits

组别 group	体质量/kg weight	肾上腺质量/g adrenal weight	肾上腺指数 adrenal index
N	4.41±0.04 Aa	0.55±0.02 Cc	0.13±0.01 Cc
H	4.00±0.10 Bb	0.85±0.02 Aa	0.21±0.01 Aa
H+B	4.06±0.12 Bb	0.64±0.02 Bb	0.16±0.01 Bb

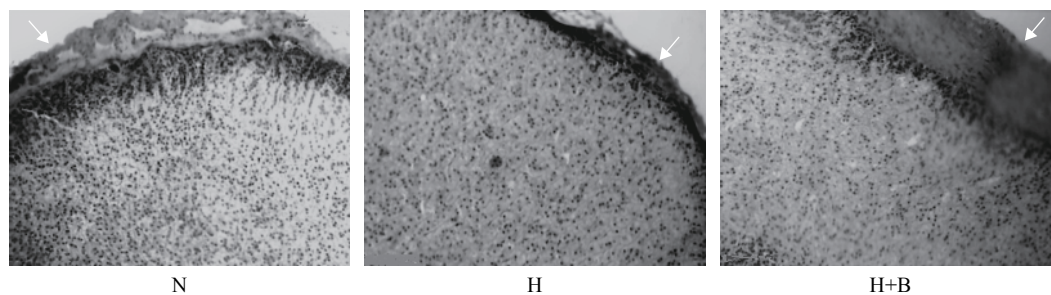
注: N. 常温对照组, H. 热应激组, H+B. 热应激+地衣芽孢杆菌组; 同列不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$), 不同大写字母表示差异极显著 ($P<0.01$); 下同。

Note: N. normal temperature control group, H. heat stress group, H+B. heat stress+B. *licheniformis* group; the data with different lowercase letters in same column show significant differences ($P<0.05$), the data with different capital letters in same column show extremely significant differences ($P<0.01$); the same as below.

激+地衣芽孢杆菌组 (H+B) 为 $(104.30\pm12.30)\mu\text{m}$, 常温对照组 (N) 为 $(146.90\pm15.81)\mu\text{m}$ 。由图 2 可知: N 组、H+B 组和 H 组的皮质细胞团直径分别为 (20.70 ± 2.91) 、 (16.30 ± 2.58) 和 $(13.30\pm1.34)\mu\text{m}$; N 组细胞团由 3~9 个低柱状细胞和细胞索组成, 基膜清晰完整, 核仁明显, 染色较深, 细胞团相挨紧凑, 胞质中略见嗜酸性脂滴; H+B 组与 H 组相比, 细胞团基膜边缘较为完整, 但略次于 N 组; H 组中每个细胞中胞质较多, 胞膜轮廓不清, 胞质出现空泡化; 细胞核 H+B 组较 H 组清晰, 染色也略深; N 组中肾上腺皮质层束状带与球状带分界清晰, 较球状带厚, 成索状排列, 细胞索之间可见较窄的窦状血管; H+B 和 H 组细胞索分界不清晰, H 组窦状血管较 H+B 组增宽。

2.2.2 肾上腺皮质和髓质超微结构的变化

由图 3 可知: 常温对照组 (N) 公兔肾上腺皮质束状带细胞, 胞核圆, 染色质较少, 核膜完整, 核染色质分布均匀, 核仁清晰, 线粒体呈圆形管状结构, 不肿胀, 嵴清楚, 胞浆内脂滴清晰, 且丰富均匀; 胞浆中含有大量的滑面内质网, 高尔基体较为发达, 有少量溶酶体。热应激时 (H 组) 肾上腺皮质束状带细胞胞膜不清, 核异染色质较多, 且向核膜边聚集, 线粒体较少松散、嵴断裂不清晰, 出现明显肿胀, 空化明显, 脂质颗粒减少或无, 有的细胞脂滴呈空泡状; 滑面内质网肿胀模糊不清, 有脂褐素和髓样结构出现。热应激+地衣芽孢杆菌组 (H+B) 与 H 组相比, 线粒体结构较为完整, 有轻微肿胀, 脂滴相对较多, 脂滴空泡状相对较少, 无出现脂褐素溶酶体, 滑面内质网模糊不清, 异染色质向核膜靠拢。

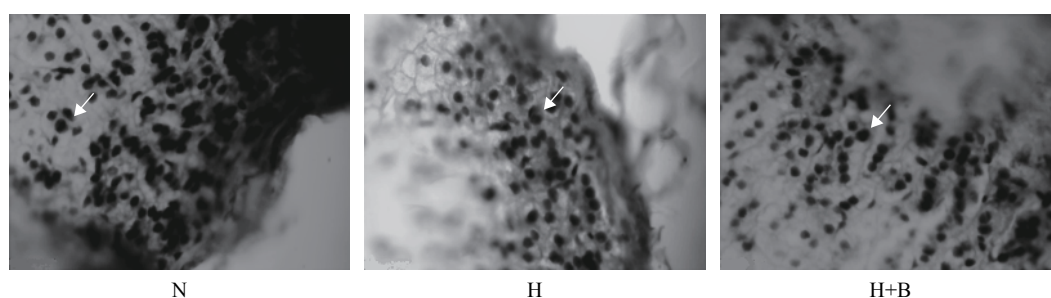


注: N. 常温对照组, H. 热应激组, H+B. 热应激+地衣芽孢杆菌组; 下同。

Note: N. normal temperature control group, H. heat stress group, H+B. heat stress+*Bacillus licheniformis* group; the same as below.

图1 光镜下观察种公兔肾上腺被膜厚度的变化 (HE, 400×)

Fig. 1 Observation of changes in adrenal gland thickness of male rabbits under light microscope



注: 箭头所指为肾上腺组织内细胞团。

Note: The arrow points to the cell mass in the adrenal gland tissue.

图2 光镜下观察种公兔肾上腺组织内细胞团直径变化 (HE, 400×)

Fig. 2 Observation of changes in cell cluster diameter in adrenal gland tissue of male rabbits under light microscope

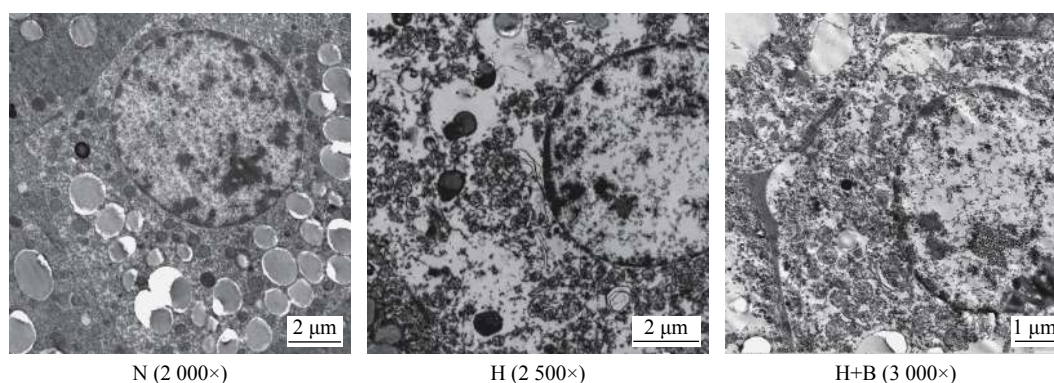


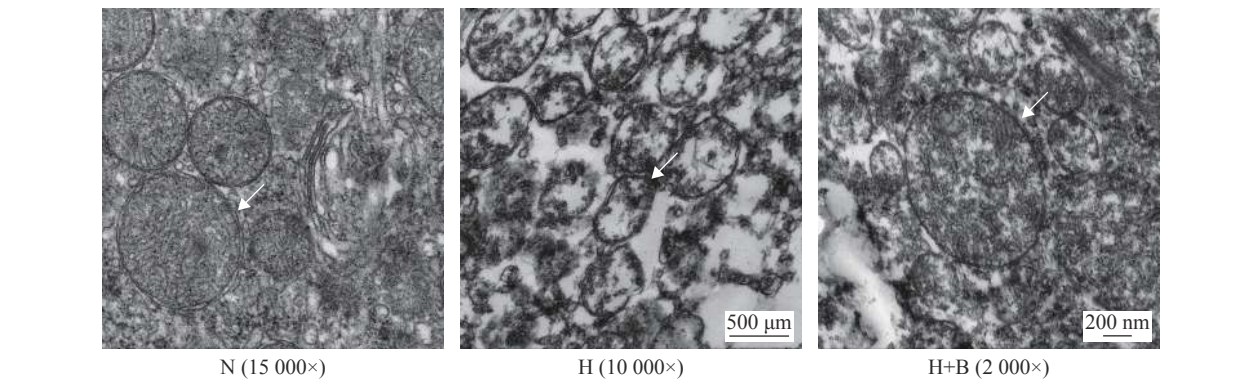
图3 电镜下种公兔肾上腺皮质束状带细胞变化

Fig. 3 Changes of fascicular zone cells in the adrenal cortex of male rabbits under electron microscope

由图4可知: 常温对照组 (N) 正常细胞胞质内含有大量较为完整的线粒体颗粒, 高尔基复合体不发达, 胞核较大, 染色质分布均匀; 热应激时 (H 组) 髓质细胞核明显皱缩, 染色质凝聚, 线粒体颗粒呈明显排空状态, 且水肿明显; 热应激+地衣芽孢杆菌组 (H+B) 与 H 组相比, 主要是线粒体颗粒相对较多, 颗粒排空相对较少, 线粒体出现较明显肿胀。

2.3 地衣芽孢杆菌对热应激种公兔血浆 CORT 水平的影响

由表2可知: 热应激 12 h 和 3 d 时, 热应激组 (H) 与热应激+地衣芽孢杆菌组 (H+B) 血浆 CORT 含量均极显著高于常温对照组 (N) ($P < 0.01$), 但 H+B 组较 H 组上升缓慢; 10 d 时, H+B 组和 H 组均呈现下降趋势; 至 30 d 时, H+B 组趋向于 N 组 ($P > 0.05$), 而 H 组水平虽仍显著高于 N 组



注：箭头所指为肾上腺髓质细胞线粒体。
Note: The arrow points to the adrenal medulla cell mitochondria.

图 4 电镜下种公兔肾上腺髓质细胞线粒体变化
Fig. 4 Mitochondrial changes of adrenal medullary cells of male rabbits under electron microscope

表 2 地衣芽孢杆菌对热应激种公兔血浆 CORT 水平的影响

Tab. 2 Effect of <i>B. licheniformis</i> on plasma CORT levels in heat stressed male rabbits						nmol/L
分组 group	处理时间 time of treatment					
	0 h	12 h	3 d	10 d	20 d	30 d
N	150.29±29.24 Aa	152.99±28.56 Bb	150.72±28.56 Bb	150.26±29.98 Bc	149.57±27.56 Bb	151.64±27.84 Ab
H	143.42±19.53 Aa	310.44±52.82 Aa	528.92±57.70 Aa	457.16±54.97 Aa	272.63±41.64 Aa	208.35±32.08 Aa
H+B	136.35±27.92 Aa	356.01±110.39 Aa	425.22±106.28 Aa	350.19±57.86 ABb	193.77±23.75 ABb	160.04±12.54 Ab

和 H+B 组 ($P<0.05$), 但较热应激初期明显下降。

3 讨论

3.1 地衣芽孢杆菌对热应激种公兔肾上腺指数及组织结构的影响

肾上腺是动物应激反应的重要器官, 其正常结构是机体应对热应激的保障, 当动物受到应激刺激时, 下丘脑—腺垂体—肾上腺皮质轴 (HPA 轴) 功能活动加强^[9,21]。据研究报道, 热应激可导致肾上腺组织结构发生改变。王珏等^[22]研究发现: 热应激导致蛋鸡分泌皮质激素的肾间组织比例增大, 但随着热应激时间延长, 肾间细胞出现萎缩、破碎和解体等现象; 张乐萃等^[23]也报道了类似结果。本研究呈现与上述结果相一致的现象, 试验 30 d 时, 种公兔肾上腺质量和肾上腺指数均极显著增加。光镜下观察, 热应激组肾上腺被膜厚度降低, 细胞团直径减小; 超微结构显示: 皮质束状带细胞中空化明显, 脂质颗粒减少, 脂滴有时呈空泡状, 线粒体明显肿胀, 滑面内质网肿胀模糊不清。分析其原因, 是长期热应激环境下促肾上腺皮质激素 (adreno-cortico-tropic-hormone, ACTH) 反复刺激肾上腺细胞所致。

ACTH 的作用是促进肾上腺皮质增生, 对维持肾上腺皮质正常结构以及糖皮质激素的合成和分泌具有重要作用^[9]。刘法东等^[24]研究表明: 热应激可以造成大鼠血清 ACTH 水平显著升高, 且发现热暴露组大鼠较室温对照组脑垂体和肾上腺相对质量增加。但有研究发现: HPA 轴对应激的急性反应通常有适应性, 即 HPA 轴上的激素适度分泌将有利于抵抗应激刺激, 但过度或长时间被激活会对机体产生有害影响^[25]。本研究从微观上也证实了持续热应激可对种公兔肾上腺结构造成损伤。

赵善廷等^[26]研究发现: 溶酶体、脂滴、内质网和线粒体与类固醇激素的合成紧密相关, 本研究中肾上腺组织结构发生病理变化, 影响了皮质激素的分泌, 这也解释了试验中热应激中后期机体 CORT 呈现下降的原因。这必然会导致种公兔体内物质代谢紊乱, 免疫力降低, 蛋白质分解加强, 激素合成受阻, 生长迟缓, 甚至出现负增长, 这可能是热应激下种公兔生殖机能下降的重要原因^[20]。此外, 本研究还发现: 热应激使种公兔肾上腺髓质细胞核明显皱缩, 肾上腺素颗粒呈明显排空状态, 线粒体肿胀。肾上腺髓质结构变化会影响儿茶酚胺类激素分泌, 加重热应激反

应。而热应激+地衣芽孢杆菌组试验结果显示:可缓解热应激引起肾上腺被膜降低速度,增加皮质细胞核直径,保持细胞团基膜边缘的整齐度和细胞核的完整,降低肾上腺髓质细胞胞质和线粒体空泡化程度。这说明地衣芽孢杆菌可以明显减轻热应激对肾上腺结构的损伤程度,使之趋于正常水平。

目前,益生菌对肾上腺及其他腺体结构和分泌功能的作用机制尚未见报道,有待深入研究。据报道:存在多种因素影响HPA轴的功能,其中肠道微生物群是重要影响因素。肠道微生物群失调可能影响机体代谢功能,进而影响大脑发育,特别是HPA轴的发育^[27]。有研究发现:日粮中添加益生菌可以增加热应激条件下动物盲肠有益菌乳酸杆菌的数量,减少有害菌大肠杆菌的数量^[28],有利于调节肾上腺功能。另外,DENG等^[29]报道:在热应激母鸡饲料中添加地衣芽孢杆菌,能增加肠道上皮淋巴细胞和IgA分泌细胞的数量,提高机体免疫力;彭承英^[30]发现:饲料中添加益生菌可以提高热应激肉鸡天然免疫基因表达,改善其抗氧化能力。由此可见,在热应激条件下,益生菌对提高机体免疫及抗氧化性能也有显著作用,这可能是本试验中地衣芽孢杆菌能改善热应激下肾上腺结构与分泌功能的间接原因。

3.2 地衣芽孢杆菌对热应激种公兔血浆CORT的影响

肾上腺皮质束状带分泌的糖皮质激素是机体应激反应的主要激素^[9],去除肾上腺的动物抗应激能力显著下降,当遭受应激刺激时往往容易引起死亡^[31]。有报道称热应激可导致肾上腺皮质释放CORT增多^[32];邓文等^[18]也报道:蛋鸡热应激6和12 d时,血清CORT水平极显著高于对照组,饲喂地衣芽孢杆菌可显著改善这种现象,使CORT水平与对照组无明显差异。本研究结果总体呈现出与上述报道相一致的规律,即热应激组在试验初期(12 h和3 d)CORT水平表现显著升高,但从10 d后血浆中CORT含量开始下降,直至30 d时虽高于常温组和热应激+地衣芽孢杆菌组,但比热应激初期明显降低。分析原因认为:初期由于热应激造成ACTH分泌增多,引起肾上腺皮质分泌CORT相应增多,这是肾上腺皮质出现代偿性分泌的结果,使机体积极应对热应激;但热应激中后期,肾上腺皮质组织结构遭到破

坏,分泌功能降低,CORT分泌减少,机体抗热应激能力下降,机能表现衰退。课题组前期研究也发现:热应激可导致种公兔精液品质降低,甲状腺及甲状旁腺结构受损,影响其生殖功能^[20,33]。

本研究在种公兔饲料中添加地衣芽孢杆菌后,虽在试验初(0~3 d)CORT水平有升高现象,可能是地衣芽孢杆菌还未很好地发生作用,但中后期(10 d)CORT水平开始下降,至试验20 d后逐渐趋于正常,与常温对照组差异不显著。这从激素水平方面进一步说明地衣芽孢杆菌在缓解种公兔热应激中的作用。结果提示:在种兔养殖实践中,地衣芽孢杆菌应在夏季高温来临前10~20 d即开始添加使用,可达到预期效果。课题组前期试验数据也表明:日粮中添加适量地衣芽孢杆菌可以缓解热应激导致的种公兔生殖机能下降以及甲状腺和甲状旁腺结构损伤^[20,33]。因此,地衣芽孢杆菌的应用对改善炎热夏季种公兔生殖性能、促进养兔业发展起到积极作用。

4 结论

热应激可导致种公兔肾上腺结构损伤,造成CORT水平在初期显著升高,后期明显下降,饲料中添加适量地衣芽孢杆菌可以使这些变化得到显著改善。

[参考文献]

- [1] 张健,张高振,郑会超,等.热应激条件下高能饲料对奶牛生理指标和生产性能的影响[J].动物营养学报,2009,21(1):41. DOI: 10.3969/j.issn.1006-267x.2009.01.008.
- [2] BAHGA C S, KAUR P, HANDA M C. Performance of meat and wool type rabbits as effected by heat stress and microclimatic modification[J]. Indian Journal of Animal Research, 2010, 44(1): 67. DOI: 10.1016/j.domaniend.2009.07.004.
- [3] GUPTA R, KAUR D, CHOPRA S, et al. Performance analysis of the broiler chicks under different cooling devices during hot-dry summer[J]. Indian Journal of Animal Research, 2014, 48(5): 480. DOI: 10.5958/0976-0555.2014.00015.6.
- [4] 姜丽丽,高航,时梦,等.高温环境对母猪繁殖性能的影响规律与作用机制[J].中国畜牧杂志,2018,54(1):4. DOI: 10.19556/j.0258-7033.2018-01-004.
- [5] KORNMATITSUK B, CHANTARAPRATEEP P, KORNMATITSUK S, et al. Different types of postpartum luteal activity affected by the exposure of heat stress and subsequent reproductive performance in Holstein lactating cows[J]. Reproduction in Domestic Animals, 2008, 43

- (5): 515. DOI: [10.1111/j.1439-0531.2007.00945.x](https://doi.org/10.1111/j.1439-0531.2007.00945.x).
- [6] 郭富强, 张燕军, 张美娜, 等. 热应激对公畜繁殖性能影响及缓解措施的研究进展[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2020(3): 39. DOI: [10.13881/j.cnki.hljxmsy.2019.02.0270](https://doi.org/10.13881/j.cnki.hljxmsy.2019.02.0270).
- [7] 马燕芬, 陈琦, 杜瑞平, 等. 热应激对奶山羊瘤胃上皮细胞屏障通透性的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(21): 4478. DOI: [10.3864/j.issn.0578-1752.2013.21.010](https://doi.org/10.3864/j.issn.0578-1752.2013.21.010).
- [8] 张晓峰, 刘迪, 王淼, 等. 热应激对猪睾丸细胞活性氧水平影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(11): 4064. DOI: [10.3864/j.issn.0578-1752.2009.11.038](https://doi.org/10.3864/j.issn.0578-1752.2009.11.038).
- [9] 赵茹茜. 动物生理学[M]. 5版. 北京: 中国农业出版社, 2011.
- [10] 唐娟, 张毅, 李雷雷, 等. 地衣芽孢杆菌应用研究进展[J]. 湖北农业科学, 2008, 47(3): 351. DOI: [10.3969/j.issn.0439-8114.2008.03.037](https://doi.org/10.3969/j.issn.0439-8114.2008.03.037).
- [11] BI R, ARNDT C, SOMMER U. Field evaluation of the effect of a probiotic-containing *Bacillus licheniformis* and *Bacillus subtilis* spores on the health status, performance, and carcass quality of grower and finisher pigs[J]. Transboundary & Emerging Diseases, 2010, 51(6): 306. DOI: [10.1111/j.1439-0442.2004.00637.x](https://doi.org/10.1111/j.1439-0442.2004.00637.x).
- [12] 郭浩, 曹忠辉, 王林庚. 浅谈地衣芽孢杆菌在畜禽上的应用[J]. 江西畜牧兽医杂志, 2019(5): 30. DOI: [10.3969/j.issn.1004-2342.2019.05.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-2342.2019.05.013).
- [13] 王长青, 韩书英. 地衣芽孢杆菌对家禽的作用机制及应用效果[J]. 饲料研究, 2013(11): 19. DOI: [10.13557/j.cnki.issn.1002-2813.2013.11.007](https://doi.org/10.13557/j.cnki.issn.1002-2813.2013.11.007).
- [14] 徐亚飞. 地衣芽孢杆菌在水产养殖中的应用研究进展[J]. 渔业研究, 2018, 40(1): 83. DOI: [10.14012/j.cnki.fjsc.2018.01.011](https://doi.org/10.14012/j.cnki.fjsc.2018.01.011).
- [15] KUMAR N R, RAMAN R P, JADHAO S B. Effect of dietary supplementation of *Bacillus licheniformis* on gut microbiota, growth and immune response in giant freshwater prawn, *Macrobrachium rosenbergii* (de Man, 1879)[J]. Aquaculture International, 2013, 21(2): 387. DOI: [10.1007/s10499-012-9567-8](https://doi.org/10.1007/s10499-012-9567-8).
- [16] 孙小沛, 杨在宾, 李兆勇, 等. 地衣芽孢杆菌与日粮蛋白水平对肉鸡生产性能、肠道环境及免疫器官指数的影响[J]. 饲料工业, 2013, 34(23): 40. DOI: [10.3969/j.issn.1001-991X.2013.23.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-991X.2013.23.011).
- [17] 李宁, 穆淑琴, 闫峻, 等. 地衣芽孢杆菌替代抗生素对仔猪健康的影响[J]. 粮食与饲料工业, 2018(12): 52. DOI: [10.7633/j.issn.1003-6202.2018.12.014](https://doi.org/10.7633/j.issn.1003-6202.2018.12.014).
- [18] 邓文, 董晓芳, 佟建明. 日粮添加地衣芽孢杆菌对热应激蛋鸡产蛋率和血清激素水平的影响[J]. 中国家禽, 2011, 33(13): 23. DOI: [10.16372/j.issn.1004-6364.2011.13.009](https://doi.org/10.16372/j.issn.1004-6364.2011.13.009).
- [19] 宦海琳, 张干, 徐祝华, 等. 地衣芽孢杆菌对脂多糖应激仔猪肠道形态、肠黏膜抗氧化能力和免疫力的影响[J]. 动物营养学报, 2020, 32(2): 586. DOI: [10.3969/j.issn.1006-267x.2020.02.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-267x.2020.02.014).
- [20] 张立永, 张富梅. 地衣芽孢杆菌对热应激公兔精液品质及激素水平的影响[J]. 中国兽医学报, 2017, 37(1): 177. DOI: [10.16303/j.cnki.1005-4545.2017.01.34](https://doi.org/10.16303/j.cnki.1005-4545.2017.01.34).
- [21] TSUDA Y, IWASAWA K, YAMAGUCHI M. Low-protein diet decreased the adrenal function and spontaneous activity of mice during chronic heat stress[J]. Heliyon, 2019, 5(4): e01463. DOI: [10.1016/j.heliyon.2019.e01463](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01463).
- [22] 王珏, 郑艺梅, 李升和, 等. 补铬对热应激蛋鸡肾上腺组织结构的影响[J]. 畜牧与兽医, 2004, 36(2): 14. DOI: [10.3969/j.issn.0529-5130.2004.02.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.0529-5130.2004.02.006).
- [23] 张乐萃, 王述柏, 单虎, 等. 抗应激添加剂对热应激肉鸡甲状腺和肾上腺组织结构的影响[J]. 饲料研究, 1998(5): 3.
- [24] 刘法东, 耿瑶, 陶虹, 等. 急性热应激对大鼠血清ACTH及CORT水平的影响[J]. 宁夏医科大学学报, 2014, 36(10): 1079. DOI: [10.16050/j.cnki.issn1674-6309.2014.10.005](https://doi.org/10.16050/j.cnki.issn1674-6309.2014.10.005).
- [25] MIRANDA V B, HOMBERG J R, HENCKENS M. Modulation of the hypothalamic-pituitary-adrenal axis by early life stress exposure[J]. Frontiers in Cellular Neuroscience, 2017, 11: 87. DOI: [10.3389/fncel.2017.00087](https://doi.org/10.3389/fncel.2017.00087).
- [26] 赵善廷, 王士平, 刘文杰, 等. 小白鼠肾上腺皮质的超微结构观察[J]. 新疆医学院学报, 1991, 14(3): 177.
- [27] DE WEERTH C. Do bacteria shape our development? Crosstalk between intestinal microbiota and HPA axis[J]. Neuroscience & Biobehavioral Reviews, 2017, 83: 458. DOI: [10.1016/j.neubiorev.2017.09.016](https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2017.09.016).
- [28] LANDY N, KAVYANI A. Effects of using a multi-strain probiotic on performance, immune responses and cecal microflora composition in broiler chickens reared under cyclic heat stress condition[J]. Iranian Journal of Applied Animal Science, 2013, 3(4): 703.
- [29] DENG W, DONG X F, TONG J M, et al. The probiotic *Bacillus licheniformis* ameliorates heat stress-induced impairment of egg production, gut morphology, and intestinal mucosal immunity in laying hens[J]. Poultry Science, 2012, 91(3): 575. DOI: [10.3382/ps.2010-01293](https://doi.org/10.3382/ps.2010-01293).
- [30] 彭承英. 益生菌对热应激肉鸡肠道结构和天然免疫相关基因表达的影响[D]. 南昌: 江西农业大学, 2018.
- [31] GETTING M J, SAMBROOK J. Protein folding in the cell[J]. Nature, 1992, 355(6355): 33. DOI: [10.1038/355033a0](https://doi.org/10.1038/355033a0).
- [32] 刘胜军, 卢庆萍, 张宏福, 等. 高温高湿环境对生长猪生长性能、血浆皮质醇浓度和免疫功能的影响[J]. 动物营养学报, 2010, 22(5): 1214. DOI: [10.3969/j.issn.1006-267x.2010.05.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-267x.2010.05.014).
- [33] 韩昱, 张立永, 张富梅, 等. 地衣芽孢杆菌对热应激公兔甲状腺和甲状旁腺组织的影响[J]. 中国兽医学报, 2021, 41(2): 259. DOI: [10.16303/j.cnki.1005-4545.2021.02.10](https://doi.org/10.16303/j.cnki.1005-4545.2021.02.10).

责任编辑: 何馨成