

doi:10.11751/ISSN.1002-1280.2021.11.12

芽孢杆菌特性及其在畜牧生态养殖中 应用研究进展

曹树威¹, 余昌花¹, 罗鲜青¹, 魏莎², 蒋世强², 邓祝新², 王英群²,
黄丽霞¹, 唐承明¹, 李美珍², 李芳芳², 王国利^{2*}

(1. 广西壮族自治区畜牧研究所, 南宁 530001; 2. 广西壮族自治区畜禽品种改良站 南宁 530001)

[收稿日期] 2021-07-07 [文献标识码] A [文章编号] 1002-1280 (2021) 11-0077-09 [中图分类号] S852.61

[摘要] 近年来微生物在畜禽、水产等生态养殖领域的研究和应用被日益重视, 芽孢杆菌因益生特性显著、抗逆性极强等特点, 在生态畜牧业的发展中表现出巨大潜力。从常用芽孢杆菌的分类, 益生机理、应用现状、效果等方面进行综述, 分析芽孢杆菌制剂作为新兴畜牧业兽药制剂的开发前景, 对现代畜牧业的可持续、健康发展提供建议。

[关键词] 芽孢杆菌; 益生机理; 应用现状; 生态养殖

Research Progress on Characteristics of *Bacillus* and Its Application in Animal Ecological Breeding

CAO Shu-wei¹, YU Chang-hua¹, LUO Xian-qing¹, WEI Sha², JIANG Shi-qiang²,
DENG Zhu-xin², WANG Ying-qun², HUANG Li-xia¹, TANG Cheng-ming¹,
LI Mei-zhen², LI Fang-fang², WANG Guo-li^{2*}

(1. The Animal Husbandry Research Institute of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning 530001, China;

2. Livestock and Poultry Variety Improvement Station of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning 530001, China)

Corresponding author: WANG Guo-li, E-mail: gxyzyyc@163.com

Abstract: In recent years, more and more attention is being paid to the research and application of microorganisms in such fields as ecological breeding of livestock, poultry and aquaculture; *Bacillus*, as a microorganism with remarkable probiotic characteristics and strong stress tolerance, shows great potential in the development of ecological animal husbandry. In this paper, the classification, probiotic mechanism, present application and effect of commonly-used *Bacillus* were reviewed and then the development prospect of *Bacillus* Preparation, as a new veterinary drug for animal husbandry, was analyzed, providing suggestions for the

基金项目: 防城港市重点研发计划(防科 AB20014040)

作者简介: 曹树威, 硕士, 从事畜牧微生物资源开发利用。

通讯作者: 王国利, E-mail: gxyzyyc@163.com

sustainable and healthy development of modern animal husbandry.

Key words: *Bacillus*; probiotic; mechanism; present application; ecological breeding

“绿色环保”是当代畜牧业的发展趋势,化学药品滥用、养殖粪污影响人畜健康的传统畜牧业必将被无毒、无抗、无污的现代有机畜牧业逐渐取代。芽孢杆菌作为一类生物多样性广,功能全面,抗逆性强,安全无公害的微生物群体,目前芽孢杆菌制剂已在养殖替抗、益生因子饲料发酵、养殖环境污染治理和畜禽疫病防控等领域表现出较大的应用潜力。本文结合芽孢杆菌的研究进展,阐述芽孢杆菌制剂作为未来生态畜牧养殖和新型多功能兽药开发的潜力。

1 畜牧生产常用芽孢杆菌的分类

目前,常用于畜禽、水产养殖领域的芽孢杆菌

主要分为 5 大类(表 1),这些菌都归于芽孢杆菌属,但属于不同的种,且都能够在细胞中间位置或顶端产生抗逆性极强的芽孢;5 类菌对氧气不敏感,暂无研究报道严格厌氧的芽孢杆菌,对营养条件亦无特殊要求,易培养,繁殖速度快,能够在极短时间内形成优势菌群,且多具备生物夺氧机制,与其它菌的竞争优势显著,其自身能够合成不同类型的生物活性物质,可抑制病原菌的生长;5 类菌因不同的产酶特点及其他代谢特征,各具自身特有的优势,被广泛应用于畜牧和水产生态养殖各领域,推动现代畜牧业和水产业朝着绿色环保的方向发展。

表 1 生产常用芽孢杆菌的分类

Tab 1 Classification of *Bacillus* which are commonly used in production

名称	归属	分类	需氧类型	主要产酶类型	功能
枯草芽孢杆菌	芽孢杆菌属	革兰氏阳性	需氧	淀粉酶、蛋白酶、核苷酸酶、脂肪酶、纤维素酶	产生短杆菌肽、多粘菌素、枯草菌素、制霉菌素、等抑制病原菌生长的物质,用作替抗;合成维生素 B1、B2、B6、烟酸等多种 B 族维生素;刺激免疫器官发育,增强机体细胞免疫和体液免疫功能;发酵饲料;降解粪污,减少环境中臭源
解淀粉芽孢杆菌	芽孢杆菌属	革兰氏阳性	兼性厌氧菌	淀粉酶、蛋白酶、纤维素酶	产生多肽类、脂肽类及抑菌蛋白类物质,抑制病原菌生长,广泛用作植物病害防治;提高机体免疫性能及肠黏膜抗氧化功能;净化水体;发酵饲料
凝结芽孢杆菌	芽孢杆菌属	革兰氏阳性	兼性厌氧菌	淀粉酶、蛋白酶、过氧化氢酶	产生凝固素、乳酸等抑制肠道病原菌的物质,防治胃肠道炎症,广泛用于畜、禽、水产养殖中动物疾病的防治;产生 B 族维生素、氨基酸、短链脂肪酸及多类消化酶,提高肠道消化性能
地衣芽孢杆菌	芽孢杆菌属	革兰氏阳性	兼性厌氧菌	淀粉酶、蛋白酶、脂肪酶	产生抗菌活性物质,具备生物夺氧机制,抑制病原菌生长;畜、禽、水产养殖中,防治肠道炎症、痢疾,改善肠道菌群环境;刺激免疫器官发育,提高机体免疫力;发酵饲料
巨大芽孢杆菌	芽孢杆菌属	革兰氏阳性	需氧	淀粉酶、蛋白酶、解磷酶	具备解磷及固氮功能,用作微生物肥料;富集重金属;可降解有机磷农药和黄曲霉毒素;降解粪污,减少环境中臭源,净化水体

2 芽孢杆菌主要益生机理

2.1 竞争占位优势显著 芽孢杆菌的竞争占位优势,主要体现在营养竞争和空间位点竞争。芽孢杆菌对环境温度、湿度、氧气、酸碱度无严格要求,大大拓宽了其可生存环境的范围,且能和其他微生物在定殖部位争夺利用氨基酸、糖类、无机盐、维生素、微量元素等菌体生长所必需的营养物质,因此营养竞争优势显著;另外,芽孢杆菌可以分泌嗜铁素,产生铁螯合物及铁载体,整合、汲取环境里的

Fe³⁺,从而达到和其他微生物竞争环境中铁元素的目的^[1]。

芽孢杆菌空间竞争优势表现在其同病原菌竞争植物根部或肠道内黏附位点,抑制致病菌结合上皮细胞,形成占位优势,保护宿主细胞。Bacon 等研究发现,玉米内生芽孢杆菌因可以和玉米病原菌(串珠镰孢菌)竞争玉米相同的生态位点,大大降低了病原菌的致病性^[2]。芽孢杆菌具有抗胃酸和消化酶的能力,可以顺利进入肠道定植,形成优势菌

群。置换肠道致病菌的研究证明芽孢杆菌对肠道上皮的黏附力强,可以和病原菌竞争肠道上皮的附着位点^[3]。

2.2 生物夺氧,形成益生肠道环境 芽孢杆菌进入肠道定植后,可快速生长繁殖,消耗肠道内游离氧,降低氧化还原电位,使肠道内形成厌氧环境;同时,枯草芽孢杆菌、凝结芽孢杆菌等芽孢杆菌还能够产生有机酸,降低肠道内的 pH 值,形成酸性环境。厌氧、酸性肠道环境为双歧杆菌等益生乳酸菌的快速繁殖创造有利条件,促进益生乳酸菌形成优势菌,抑制沙门氏菌、大肠杆菌等病原菌。好氧芽孢杆菌与厌氧乳酸菌协同作用,形成肠道内益生微生态环境^[4]。

2.3 合成抑菌物质 芽孢杆菌可以合成肽类、聚酮类、蛋白类生物活性物质,抑制细菌、真菌和病毒生长。肽类物质主要分为脂肽类和多肽类物质,脂肽类物质包括表面活性素、伊枯草菌素、泛革素等具有稳定理化性质的物质;多肽类物质是一类线状、环状或分枝状的抗真菌类物质。脂肽类的主要作用机理是破坏细菌或真菌的细胞膜,使膜内物质释放,细胞裂解,达到抑菌的目的,其相对常规抗生素无特定作用靶点,不易因病原菌的变异产生耐药性。解淀粉芽孢杆菌 R3 分泌的 surfactin 类抗菌脂肽通过改变细胞膜通透性破坏细胞膜,裂解细胞,抑制产生多重耐药性的大肠杆菌^[5]。伊枯草菌素、泛革素等都对丝状真菌表现出强烈的抑制作用,聚酮类物质则对细菌表现出强烈的抗性。蛋白类生物活性物质主要包括细菌素及降解菌类细胞壁的酶类物质,其通过降解细胞壁,达到裂解细胞的目的。几丁质酶是其中一种常见的可以降解丝状真菌细胞壁的酶类。TasA (Transition - phase spore - associated antibacterial protein) 是另一类对革兰氏阳性细菌和阴性细菌均有抑制作用的酶类^[6]。

2.4 生物大分子降解酶类及益生因子丰富 芽孢杆菌常见的消化酶类包括淀粉酶、蛋白酶、纤维素酶、脂肪酶、半纤维素酶、木质素过氧化物酶、锰过氧化物酶、果胶酶、植酸酶、木聚糖酶、 β -葡聚糖酶、 β -甘露聚糖酶、壳聚糖酶、碱性磷酸酯酶、单宁

酶;富含纤维素、木质素,营养价值低的农副产品转化成高营养饲料的难题是如何将纤维素、木质素等大分子糖类物质,在低能耗、无污染的前提下高效转化为可直接利用的糖类物质,芽孢杆菌产生的纤维素酶、半纤维素酶、木质素过氧化物酶、锰过氧化物酶等酶类,具备联合降解纤维素、木质素的功能,有望成为攻克此瓶颈问题的一个方向。另外,利用芽孢杆菌作为饲料添加剂,不仅可以补充畜禽机体的外源消化酶类,而且可以刺激机体内源消化酶的分泌,提高肠道消化酶活性^[7];单宁是存在植物中常见的一类抗营养因子,芽孢杆菌产生单宁酶,降解单宁^[8]。芽孢杆菌不仅酶系发达,还能够合成必需氨基酸、维生素、类胡萝卜素及多种类型的生长因子。

2.5 适合遗传改造,可构建新型兽药菌株 芽孢杆菌具有完善的表达系统和分泌系统,已被用作外源蛋白表达的理想宿主,用以构建可表达、分泌多种酶类的基因工程菌。

Pspac 和 Pxyl 启动子系统是芽孢杆菌常用的表达系统,可利用整合载体、噬菌体载体及可独立复制的质粒载体等 3 种载体作为表达载体。整合载体可嵌至芽孢基因组上,随菌体染色体复制而复制,稳定性好,但不足的是拷贝数低,不利于目标产物的大量表达;质粒载体可独立复制,质粒越小拷贝数越高,质粒越稳定,产物表达量越多,且芽孢杆菌可以接受来自多种微生物源的质粒,包括已发现的金黄色葡萄球菌的 pUB110、pC194、pE194 质粒,干燥棒状杆菌的 pTZ12 质粒,乳酸菌的 pWV01、pSH71 质粒及杆菌的 pAT1060、pLS11、pBAA1、pIs11、pBC16 质粒^[9]。芽孢杆菌具有 200 个潜在的可引导胞外蛋白分泌的信号肽序列及 Sec 途径、Tat 途径、ABC、Com 途径等至少 4 个蛋白质分泌途径^[10]。

3 芽孢杆菌制剂应用现状

3.1 畜牧生态养殖无抗应用

3.1.1 提高养殖对象健康 Galagarza 等利用枯草芽孢杆菌饲喂罗非鱼,提高了罗非鱼体内促炎症因子的水平,增加免疫力^[11]。王建超等用枯草芽孢杆菌和地衣芽孢杆菌混合饲喂鲤鱼,显著提高了鲤

鱼的特异性和非特异性免疫性能^[12]。吴梦郡等研究发现,凝结芽孢杆菌可以促进猪仔肠道生理结构的发育,增加空肠绒毛高度,改善肠道吸收功能^[13]。郭森等联合使用抗菌肽和地衣芽孢杆菌饲喂肉鸡,显著提高了肉鸡的免疫器官指数,增强机体的免疫性能^[14]。余魁等用凝结芽孢杆菌添加断奶仔猪日粮,显著提高了仔猪抗氧化能力,促进仔猪肠黏膜的生长发育($P < 0.05$)^[15]。养殖实践表明,饲喂动物添加芽孢杆菌可以促进机体免疫器官、肠道发育,提高机体的免疫力及抗氧化性能,改善机体的健康状况,可作为益生因子添加日粮,促进养殖业健康、绿色发展。

3.1.2 防治畜禽、水产病害 张锦华等研究发现纳豆芽孢杆菌能显著抑制肠道致病菌,包括大肠杆菌、葡萄球菌和沙门氏菌^[16]。钟青萍等研究结果表明,纳豆芽孢杆菌抗菌方式为杀菌,而不是抑菌,且其产生的抗菌活性物质在菌体生长稳定期达到最高值^[17]。朱沛霖等用枯草芽孢杆菌饲喂感染肠炎沙门氏菌的雪山草鸡,极显著减少了鸡肝脏、肾脏、盲肠黏膜等的沙门氏菌量,显著提高鸡对沙门氏菌的抵抗力^[18]。褚文超等在鸡日粮中添加地衣芽孢杆菌治疗鸡腹泻,降低了肠道中的动胶杆菌数量,同时提高了益生的群拟杆菌的数量,使鸡的肠道恢复至正常的微生物群落结构^[19]。李海花等用枯草芽孢杆菌饲喂大肠杆菌感染的仔猪,发现枯草芽孢杆菌降低了 TLR2、TLR4 表达量,减轻了机体的炎症反应^[20]。李宁等研究发现饲喂地衣芽孢杆菌的猪无一出现咳喘病症,且腹泻率降低了 62.18%^[21]。郝向举等利用剂量为 1.4×10^8 CFU/g 的地衣芽孢杆菌 ESB3 饲喂中华绒螯蟹,使中华绒螯蟹的增重率提高 42.83%,同时,溶菌酶活性、血清酚氧化酶活性、超氧化物歧化酶活性分别提高 48.03%、32.73%、9.04%,对嗜水气单胞菌的抗性提高 87.5%^[22]。李靖等用枯草芽孢杆菌添加牛日粮,抑制胃液里弯曲菌属、葡萄球菌属等有害微生物的生长,提高了牛的免疫能力^[23]。芽孢杆菌作为微生态替抗剂,已被广泛用于畜禽、水产养殖领域,添加畜禽饲料饲喂后,抑制或杀灭机体内病原

菌,减轻炎症,预防或治疗畜禽疾病,逐渐取代抗生素或其它化学药品在养殖业中的使用,解决畜产品中抗生素或药品残留问题,降低抗生素滥用对环境造成的影响。

3.1.3 提高畜禽生产性能和产品的品质 郭瑞萍等将枯草芽孢杆菌添加至肉鸡饲料,极显著提高了肉鸡日增重、屠宰率、免疫器官指数、胸腿肉的单不饱和脂肪酸量($P < 0.01$)^[24]。霍永久等用芽孢杆菌 BM1259 制剂喂猪后,猪的日采食量相比对照提高 3.67%,日增重提高 2.42%^[25]。Cheng 等研究发现,用含地衣芽孢杆菌和枯草芽孢杆菌的复合菌剂添加日粮喂猪,猪的烹煮损失率及臀肌丙二醛(MDA)量均显著降低,提高了猪肉的品质($P < 0.05$)^[26]。芽孢杆菌对畜禽生产性能及品质的提高,归功于其酶系发达的优点;其分泌的丰富酶类,补充机体的外源消化酶,刺激机体产生更多内源消化酶,促进机体对营养物质的充分利用,提高机体的生产性能。

3.1.4 构建绿色养殖环境 粪臭素、氨气、硫化氢、甲酚、吡啶类物质、挥发性脂肪酸等物质是养殖环境中的臭源物质,不仅直接影响畜禽健康,而且对周围环境造成污染。丁文骏等利用巨大芽孢杆菌 BM1259 饲喂肉鸡,极显著降低了蛋鸡排泄物的氨态氮、尿酸、尿素氮含量和脲酶活性($P < 0.01$)^[27]。沈琦等从猪粪中筛选到的嗜热解淀粉芽孢杆菌对猪粪 NH_3 、 H_2S 的降解率分别达到 50.31%、31.09%,且能够抑制大肠杆菌和金黄色葡萄球菌^[28]。王思佳等利用具有高蛋白酶、脂肪酶活性的枯草芽孢杆菌、短小芽孢杆菌和贝莱斯芽孢杆菌作复合菌剂,发酵鸡、牛屠宰废弃物,分解有机碳及臭源物质,降低氮损失及堆肥里的水分,获得高品质有机肥^[29]。曹煜成等研究地衣芽孢杆菌对凡纳滨对虾的粪便降解效果,发现 COD 和 $\text{NO}_3 - \text{N}$ 的降解率分别达到 60% 和 50%^[30]。芽孢杆菌具备产生氨基转移酶、氨基氧化酶、分解硫化物酶等复合酶的能力,在肠道内分解、氧化臭源物质,同时,抑制腐败菌滋生。在实际使用过程中,可将芽孢杆菌作为益生因子饲喂动物,芽孢杆菌定植

肠道后可从源头分解臭源;同时,可将芽孢杆菌液体制剂喷洒至养殖环境,分解臭源,形成养殖环境的益生屏障,解决养殖栏舍空气污染的问题。

3.1.5 促进集约环保新型无抗水产养殖业发展 可控环保型鱼类养殖箱是一类集约型的生态循环养鱼系统,集成了工厂、生态双重模式,可通过调节供氧、水体循环及生物净化、粪便沉淀分离等综合措施达到集约、生态养鱼的目的,常常用以经济价值高、对养殖环境要求苛刻鱼类的高密度养殖。可控环保型鱼类养殖箱占用空间远小于传统的水产养殖,且可控性强,最大的优势是利用微生物高效降解养殖水体中可溶的、不能被过滤掉的有机排泄物、氨态氮,彻底净化养殖水体,实现养殖用水的循环利用。微生物降解是此循环系统的核心环节,目前常用于水体净化微生物包括光合细菌、乳酸菌、芽孢杆菌、硝化细菌。光合细菌、乳酸菌适宜在厌氧静态环境中使用,与本系统水的流动循环及供氧系统相悖,不适合本系统使用;硝化细菌净化水体效果虽好,但对附着介质要求严格,且稳定性较差,菌种制作技术要求高,成本相对高;芽孢杆菌是兼性厌氧菌,分泌的胞外功能酶类型多,对氧要求不严格,具备强的水体有机物净化能力,是集约型养殖的理想菌。目前,芽孢杆菌在水产养殖领域已被广泛用做水质净化及水产动物的疾病防治。

3.2 益生因子饲料加工领域 利用芽孢杆菌发酵饲料提高营养,去除抗营养因子、毒素是目前饲料加工领域的绿色、环保的方法。Dai 等利用枯草芽孢杆菌发酵豆粕后,显著提高了豆粕中粗蛋白、可溶性蛋白、黄酮、总酚的含量($P < 0.05$)^[31]。闫亚婷等用枯草芽孢杆菌发酵玉米饲料,玉米的淀粉分解率提高,使可溶性糖含量提高 1.72 倍^[32]。孙焕林等研究枯草芽孢对棉籽粕的发酵效果,发现发酵后棉籽粕的棉酚含量降低了 88.84%,蛋白含量提高 14.37%,蛋白小肽类物质由 4.00% 提高至 12.40%,必需氨基酸的含量均提高,其中缬氨酸、亮氨酸、赖氨酸、苏氨酸、异亮氨酸、苯丙氨酸各提高 6.25%、3.52%、9.52%、8.45%、24.13%、9.52%^[33]。张洪燕等用地衣芽孢杆菌发酵饲料

桑,极显著提高了饲料中粗蛋白含量,同时极显著降低了粗纤维含量($P < 0.01$)^[34]。魏立民等利用复合酪酸芽孢杆菌发酵木薯渣,显著提高粗蛋白、粗脂肪、乳酸等物质的含量,显著降低干物质、中酸性洗涤纤维($P < 0.05$)^[35]。李红亚等用解淀粉芽孢杆菌复合菌剂发酵玉米秸秆,24 d 后木质素、纤维素、半纤维素分别降解了 48.4%、30.5% 和 41.4%^[36]。Supriyati 等用解淀粉芽孢杆菌发酵米糠,3 d 后粗纤维由 10.62% 将至 7.79%,发酵的米糠添加肉鸡日粮后,提高了肉鸡的饲料利用率^[37]。管维等利用含纳豆杆菌、侧胞杆菌、凝结芽孢杆菌、枯草杆菌等的复合菌剂发酵菜籽饼 5 d 后,纤维素、植酸、单宁等抗营养因子的降解率分别为 93.74%、36.59% 和 14.75%^[38]。田玉虎等研究枯草芽孢杆菌、地衣芽孢杆菌等对黄曲霉毒素 AFB1、玉米赤霉烯酮 ZEN 等霉菌毒素的降解效果,发现枯草芽孢杆菌、地衣芽孢杆菌对 AFB1 和 ZEN 的降解作用强,且枯草芽孢杆菌的降解效果优于地衣芽孢杆菌^[39]。在畜不与人争粮的前提下,农副产品等非粮生物质能源的开发是解决未来畜禽养殖饲料源问题的关键;生产实践表明,芽孢杆菌具备将营养缺乏、不宜直接作为饲料的生物质能源转化成营养型饲料的潜质。非粮生物质能源作为饲料开发不仅能够拓宽饲料源,而且能够解决传统的秸秆焚烧或弃置的问题,间接改善环境。

4 芽孢杆菌制剂促进现代畜牧业可持续发展的模型分析

现代畜牧业必将朝着生态、立体、循环、可持续发展的方向发展,如图 1 所示,饲料种植业、饲料加工业、养殖业和疫病防控构成一个可持续的循环体系,而芽孢杆菌益生功能显著,对于这个循环的可持续发展起到了极其关键的作用。

生态畜牧业中,种植饲料土壤肥力的提高依靠芽孢杆菌微生物肥料,替代化肥使用,避免化肥滥用造成的环境失衡;针对土壤中有有机污染及重金属污染的问题,利用芽孢杆菌进行生物降解、吸附。种植所得饲料植物,经芽孢杆菌发酵提高营养,去除抗营养因子及毒素,分泌微生物益生因子,为畜

禽、水产无抗生态养殖提供益生菌饲料；同时，利用芽孢杆菌直接添加饲喂，替代抗生素防治疾病，全面提高动物的免疫能力及生产性能。木质化程度过高的农作物秸秆、糠类副产物，可作为动物的垫料床，变废为宝。垫料的铺设延长了养殖栏舍清粪周期，减少了人力成本，垫料床混合动物粪便，经芽孢杆菌发酵，分解有机大分子及粪便的臭源物质，消除栏舍臭味，改善栏舍养殖环境，间接提高动物

健康度。垫料床经发酵后，直接用作有机肥还田或者投放鱼塘，塘泥是一类肥力深厚的物质，可用做土壤状况的改良。至此，形成了“饲料生态种植→生态养殖→秸秆和粪污还田”的良性循环，无污染排放，无农药、抗生素残留，摆脱对化肥的依赖，实现农业绿色发展。因此，芽孢杆菌是助推现代畜牧业可持续发展的关键因素，必将在我国乡村振兴战略中发挥重要作用。

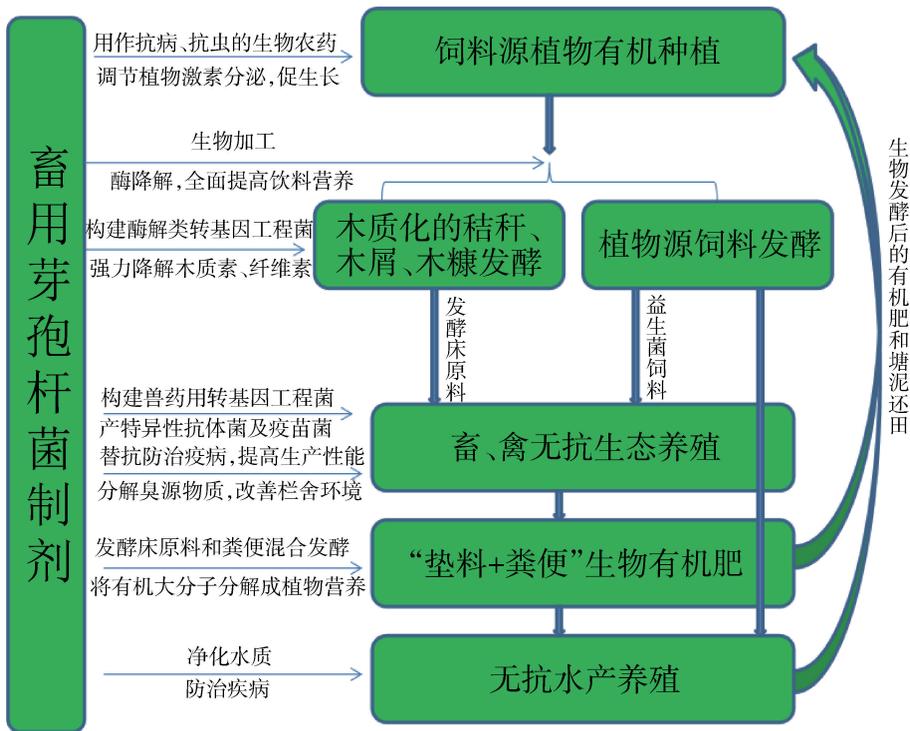


图 1 芽孢杆菌促进的生态畜牧业循环发展模型

Fig. 1 Development model of ecological animal husbandry cycle promoted by *Bacillus*

5 展 望

猪瘟、禽流感及其它多类畜禽病多由病毒的感染导致，芽孢杆菌虽可产生抑菌物质，抑制多种病原菌，提高动物抵抗力，但尚不能对病毒起到直接、高效的杀灭作用，根本原因是菌体不能直接合成靶向性强的抗病毒物质。当前，已报道的芽孢杆菌基因工程菌表达的外源基因多为乙醇脱氢酶、纤维素酶、半纤维素酶、碱性蛋白酶、淀粉酶等酶的合成基因及氨基酸、有机酸醇、维生素等物质合成途径相关的调控基因，尚缺乏利用芽孢杆菌构建用作兽药

菌株的研究报道。未来，随着动物血清里特异性抗体提纯、鉴定技术的进一步发展，可开发能够直接用作杀灭病毒的菌株。构建能表达特异性抗体的芽孢杆菌功能菌，利用芽孢杆菌体耐受性强、对氧要求不严格的优势，既能在动物体内发挥常规的益生作用，又能产生特异性抗体，直接杀灭病毒，补充病弱动物体的免疫缺陷。另外，构建能表达病原物质的芽孢杆菌型疫苗，利用芽孢杆菌繁殖速度快，适应性强的优点，有望与酵母类工程疫苗、腺病毒类疫苗及灭活疫苗等互补，共同促进畜牧产业的健

康发展。

微生物对畜牧生态养殖的发展至关重要。芽孢杆菌是一类群体庞大的益生微生物,第 9 版《伯杰氏细菌系统学手册:原核生物分类纲要》共记述了 35 个属及近源属的 409 种芽孢杆菌。当下及未来的任务是进一步挖掘新的芽孢杆菌资源,在世界范围内筛选自然环境中芽孢杆菌,建立地方特色芽孢杆菌资源库,利用地方特色菌服务当地畜牧业的发展。随着航天事业的发展,我国自主研发的空间站在未来将逐渐投入科研应用。利用太空各类辐射的复杂条件,在太空开展新功能或更强功能芽孢杆菌诱变、筛选研究,将会为芽孢杆菌的育种开辟新的途径,进一步增强可用芽孢杆菌兽药资源的多样性,对畜牧业发展的前景不可估量。从目前的应用现状可知,芽孢杆菌里的绝大多数菌是生物安全级别微生物,但长期的应用必会导致菌株的变异。负向变异菌株可能存在功能退化、具备致病性等缺点,这就要求我们在应用芽孢杆菌的同时,做好安全性监测,提前制定好应对负向变异菌株的措施,及时消除安全隐患,加强可持续利用的研究。

参考文献:

- [1] Shoda M. Bacterial control of plant diseases[J]. J Biosci Bioeng, 2000, 89: 515 - 521.
- [2] Bacon C W, Yates I E, Hinton D M, et al. Biological control of *Fusarium moniliforme* in maize [J]. Environ Health Perspect, 2001, 109(Suppl 2): 325 - 332.
- [3] Gu S B, Zhao L N, Wu Y, et al. Potential probiotic attributes of a new strain of *Bacillus coagu - ans* CGMCC 9951 isolated from healthy piglet feces [J]. World Journal of Microbiology & Biotech - nology, 2015, 31: 851 - 863.
- [4] 杨继业, 郭晓军, 郭威, 等. 产有机酸芽孢杆菌的筛选, 鉴定及产芽孢条件优化[J]. 饲料工业, 2015, 36(4): 44 - 51. Yang J Y, Guo X J, Guo W, et al. Screening and identification of organic acid producing *Bacillus* and optimization of spore producing conditions [J]. Feed industry, 2015, 36 (4): 44 - 51.
- [5] 荣艳君. 解淀粉芽孢杆菌 R3 菌株抗菌脂肽及其作用于病原大肠杆菌的研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014. Rong Y J. Study on antibacterial lipopeptide of *Bacillus amyloliquifaciens* R3 strain and its effect on pathogenic *Escherichia coli* [D]. Qingdao: China Ocean University, 2014.
- [6] Stover A G, Driks A. Regulation of synthesis of the *Bacillus subtilis* transition - phase, spore - associated antibacterial protein TasA[J]. J Bacteriol, 1999, 181: 5476 - 5481.
- [7] Gao Z, Wu H, Shi L, et al. Study of *Bacillus subtilis* on growth performance, nutrition metabolism and intestinal microora of 1 to 42 d broiler chickens [J]. Animal Nutrition, 2017, 3 (2): 109 - 113.
- [8] Pell A N, Woolston T K, Nelson K E, et al. Tannins: Biological activity and bacterial tolerance. In: Brooker, J. D. (Ed.), Tannins in livestock and human nutrition proceedings of an international workshop [J]. Australian Centre for International Agricultural Research, Adelaide, Australia, 2000, (4): 111 - 117.
- [9] 杨明明, 陈玉林. 饲用枯草芽孢杆菌表达系统研究进展[J]. 家畜生态学报, 2013, 34(12): 1 - 7. Yang M M, Chen Y L. Research progress on expression system of feed *Bacillus subtilis* [J]. Journal of livestock ecology, 2013, 34 (12): 1 - 7.
- [10] 武彩霞, 王静, 刘开扬. 枯草芽孢杆菌转基因研究进展[J]. 河北北方学院学报(自然科学版), 2015, 31(5): 105 - 111. Wu C X, Wang J, Liu K Y. Research progress of *Bacillus subtilis* transgene [J]. Journal of Hebei North University (Natural Science Eeition), 2015, 31 (5): 105 - 111.
- [11] Galagarza O A, Smith S A, Drahos D J, et al. Modulation of innate immunity in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) by dietary supplementation of *Bacillus subtilis* endospores [J]. Fish & Shellfish Immunology, 2018, 83: 171 - 179.
- [12] 王建超, 张培军, 张东鸣, 等. 不同组合芽孢杆菌对鲤鱼免疫功能的影响[J]. 中国兽医杂志, 2016, 52(2): 110 - 113. Wang J C, Zhang P J, Zhang D M, et al. Effects of different combinations of *Bacillus* on immune function of carp [J]. Chinese Journal of veterinary medicine, 2016, 52 (2): 110 - 113.
- [13] 吴梦郡, 侯永清, 纪昌正, 等. 日粮中添加凝结芽孢杆菌对断奶仔猪小肠功能的影响 [J]. 中国畜牧兽医, 2019, 46 (3): 669 - 676. Wu M J, Hou Y Q, Ji C Z, et al. Effects of *Bacillus coagulans* on intestinal function of weaned piglets [J]. Chinese animal husbandry and veterinary, 2019, 46 (3): 669 - 676.
- [14] 郭森, 孙全友, 魏凤仙, 等. 抗菌肽和地衣芽孢杆菌对肉仔鸡肠道微生物及免疫器官指数的影响[J]. 中国家禽, 2016, 38(18): 26 - 31. Guo S, Sun Q Y, Wei F X, et al. Effects of antimicrobial peptides and *Bacillus licheniformis* on intestinal microflora and immune organ index of broilers [J]. Chinese poultry, 2016, 38

- (18): 26-31.
- [15] 余魁, 张越, 李思源, 等. 日粮中添加凝结芽孢杆菌对仔猪血浆抗氧化指标和肠黏膜生长的影响[J]. 中国畜牧兽医, 2019, 46(5): 1362-1369.
- Yu K, Zhang Y, Li S Y, *et al.* Effects of *Bacillus coagulans* on plasma antioxidant indexes and intestinal mucosal growth of piglets [J]. Chinese animal husbandry and veterinary, 2019, 46(5): 1362-1369.
- [16] 张锦华, 王萍. 纳豆提取物和纳豆菌的体外抑菌作用研究[J]. 江西畜牧兽医杂志, 2006, 6: 38-42.
- Zhang J H, Wang P. *In vitro* antibacterial activity of natto extract and natto fungus [J]. Jiangxi Journal of animal husbandry and veterinary medicine, 2006, 6:38-42.
- [17] 钟青萍, 谢俊杰. 纳豆菌抗菌作用的研究[J]. 食品研究与开发, 2001, 22(6): 20-22.
- Zhong Q P, Xie J J. Study on antibacterial activity of natto [J]. Food research and development, 2001, 22(6): 20-22.
- [18] 朱沛霖, 徐歆, 齐玉凯, 等. 枯草芽孢杆菌 048 对雪山草鸡抗肠炎沙门氏菌感染能力的影响[J]. 动物营养学报, 2017, 29(2): 479-487.
- Zhu P J, Xu X, Qi Y K, *et al.* Effect of *Bacillus subtilis* 048 on anti *Salmonella enteritidis* infection ability of Xueshan grass chicken [J]. Acta Zoologica nutrica Sinica, 2017, 29(2): 479-487.
- [19] 褚文超, 刘勇, 熊金波, 等. 益生菌地衣芽孢杆菌治疗鸡腹泻机理初探[J]. 现代生物医学进展, 2015, 15(28): 5443-5446.
- Chu W C, Liu Y, Xiong J B, *et al.* Mechanism of probiotics *Bacillus licheniformis* in the treatment of chicken diarrhea [J]. Advances in modern biomedicine, 2015, 15(28): 5443-5446.
- [20] 李海花, 张全红, 朱琪, 等. 饲料添加芽孢杆菌对感染大肠杆菌 K88 仔猪脾脏 TLRs 表达的影响[J]. 饲料工业, 2016, 37(18): 9-11.
- Li H H, Zhang Q H, Zhu Q, *et al.* Effect of dietary *Bacillus* on TLRs expression in spleen of piglets infected with *Escherichia coli* K88 [J]. Feed industry, 2016, 37(18): 9-11.
- [21] 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): 52-56.
- Li N, Mu S Q, Yan J, *et al.* Effect of *Bacillus licheniformis* replacing antibiotics on piglet health [J]. Food and feed industry, 2018, (12): 52-56.
- [22] 郝向举, 李义. 芽孢杆菌 ESB3 对中华绒螯蟹生长性能的影响[J]. 粮食与饲料工业, 2011, (8): 53-58.
- Hao X J, Li Y. Effect of *Bacillus* ESB3 on growth performance of *Eriocheir sinensis* [J]. Food and feed industry, 2011, (8): 53-58.
- [23] 李靖. 枯草芽孢杆菌对荷斯坦育成牛生长性能和瘤胃微生物区系的影响[D]. 山东农业大学, 2019.
- Li Jing. Effect of *Bacillus subtilis* on growth performance and rumen microflora of Holstein cattle [D]. Shandong Agricultural University, 2019.
- [24] Cheng Y F, Chen Y P, Du M F, *et al.* Evaluation of dietary symbiotic supplementation on growth performance, muscle antioxidant ability and mineral accumulations, and meat quality in late-finishing pigs[J]. K Un Vet Fakult Derg, 2018, 24(5): 673-679.
- [25] 郭瑞萍, 肖发沂, 都振玉, 等. 枯草芽孢杆菌对肉鸡生产性能、屠宰性能、免疫性能和肌肉风味的影响[J]. 中国饲料, 2019, (17): 79-83.
- Guo R P, Xiao Fa Y, Du Z Y, *et al.* Effects of *Bacillus subtilis* on production performance, slaughter performance, immune performance and muscle flavor of broilers [J]. China feed, 2019, (17): 79-83.
- [26] 霍永久, 张艳云, 施青青, 等. 芽孢杆菌 1259 制剂对生长肥育猪生产性能及猪粪氨气产生量的影响[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(2): 159-161.
- Huo Y J, Zhang Y Y, Shi Q Q, *et al.* Effect of *Bacillus* 1259 preparation on growth performance and ammonia production in pig manure of growing finishing pigs [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2012, 40(2): 159-161.
- [27] 丁文骏, 王强, 戴美梅, 等. 巨大芽孢杆菌 1259 制剂对比丝兰素、枯草芽孢杆菌对产蛋鸡生产性能及排泄物中氨氮含量的影响[J]. 动物营养学报, 2016, 28(5): 1566-1572.
- Ding W J, Wang Q, Dai M M, *et al.* Effects of *Bacillus megaterium* 1259 preparation on production performance and ammonia nitrogen content in feces of laying hens [J]. Acta Zoologica Sinica, 2016, 28(5): 1566-1572.
- [28] 沈琦, 孙宏, 王新, 等. 猪粪中嗜热纤维素降解菌的筛选及其除臭特性研究[J]. 中国畜牧杂志, 2020, 56(10): 162-166.
- Shen Q, Sun H, Wang X, *et al.* Screening of thermophilic cellulose degrading bacteria from pig manure and their deodorization characteristics [J]. Chinese Journal of animal husbandry, 2020, 56(10): 162-166.
- [29] 王思佳. 畜禽屠宰废弃物高效降解菌株分离鉴定及堆肥效果评价[D]. 大连理工大学, 2020.
- Wang S J. Isolation, identification and composting effect evalua-

- tion of efficient degradation strains of livestock and poultry slaughtering waste [D]. Dalian University of technology, 2020.
- [30] 曹煜成, 李卓佳, 林小涛, 等. 地衣芽孢杆菌 De 株对凡纳滨对虾粪便的降解效果 [J]. 热带海洋学报, 2010, 29(4): 125 - 131.
- Cao Y C, Li Z J, Lin X T, *et al.* Degradation effect of *Bacillus licheniformis* de strain on the feces of *Litopenaeus vannamei* [J]. Acta tropical Oceanographica Sinica, 2010, 29(4): 125 - 131.
- [31] Dai C, Ma H, He R, *et al.* Improvement of nutritional value and bioactivity of soybean meal by solid - state fermentation with *Bacillus subtilis* [J]. LWT - Food Science and Technology, 2017, 86: 1 - 7.
- [32] 闫亚婷, 周安国, 王之盛. 枯草芽孢杆菌固态发酵玉米粉的研究 [J]. 中国粮油学报, 2011, 26(1): 52 - 55.
- Yan Y T, Zhou A G, Wang Z S, *et al.* Solid state fermentation of corn flour by *Bacillus subtilis* [J]. Chinese Journal of cereals and oils, 2011, 26(1): 52 - 55.
- [33] 孙焕林. 枯草芽孢杆菌发酵棉粕对黄羽肉鸡生产性能、免疫性能和肉品质的影响研究 [D]. 石河子大学, 2015.
- Sun H L. Effects of *Bacillus subtilis* fermented cottonseed meal on production performance, immune performance and meat quality of yellow feathered broilers [D]. Shihezi University, 2015.
- [34] 张洪燕, 黄先智, 郑旺, 等. 适合改善桑叶发酵饲料主要营养物质含量的菌剂筛选 [J]. 蚕业科学, 2016, 42(6): 1053 - 1061.
- Zhang H Y, Huang X Z, Zheng W, *et al.* Screening of microbial agents suitable for improving the content of main nutrients in mulberry leaf fermented feed [J]. Sericulture science, 2016, 42(6): 1053 - 1061.
- [35] 魏立民, 刘圀炜, 刘海隆, 等. 复合酪酸芽孢杆菌对木薯渣发酵品质的影响 [J]. 广东饲料, 2016, 25(11): 22 - 24.
- Wei L M, Liu Q W, Liu H L, *et al.* Effect of compound *Bacillus butyricus* on fermentation quality of cassava residue [J]. Guangdong feed, 2016, 25(11): 22 - 24.
- [36] 李红亚, 李文, 李术娜, 等. 解淀粉芽孢杆菌复合菌剂对玉米秸秆的降解作用及表征 [J]. 草业学报, 2017, 26(6): 153 - 167.
- Li H Y, Li W, Li S N, *et al.* Degradation and characterization of corn straw by *Bacillus amyloliquefaciens* composite bacteria [J]. Acta prataculturae Sinica, 2017, 26(6): 153 - 167.
- [37] Supriyati TH, Susanti T, Susana IWR. Nutritional value of Rice Bran fermented by *Bacillus amyloliquefaciens* and humic substances and its utilization as a feeding gradient for broiler chickens [J]. Asia - Australasian Journal of Animal Sciences, 2015, 28(2): 231 - 238.
- [38] 管维, 兰时乐, 詹逸舒, 等. 复合微生物固态发酵菜籽饼粕对抗营养因子去除条件的研究 [J]. 安徽农业科学, 2020, 48(2): 189 - 196.
- Guan W, LAN S L, Zhan Y S, *et al.* Study on the conditions of solid - state fermentation of rapeseed meal with complex microorganisms for removing antinutritional factors [J]. Anhui Agricultural Sciences, 2020, 48(2): 189 - 196.
- [39] 田玉虎, 李凤华. 霉菌毒素降解菌株和吸附剂的体外效果评估和筛选 [J]. 饲料研究, 2020, 43(5): 61 - 64.
- Tian Y H, Li F H. Evaluation and screening of mycotoxin degrading strains and adsorbents *in vitro* [J]. Feed research, 2020, 43(5): 61 - 64.

(编辑:侯向辉)