

邓俊劲, 张艳彬, 张健玲, 刘书欣, 俞婷, 牛志凯, 王志林, 陈庄. 功能微生物在生态健康养殖中的应用研究进展 [J]. 广东农业科学, 2022, 49 (11) : 21-31.

功能微生物在生态健康养殖中的应用研究进展

邓俊劲¹, 张艳彬¹, 张健玲², 刘书欣¹, 俞 婷¹, 牛志凯¹, 王志林¹, 陈 庄¹

(1. 广东省农业科学院农业生物基因研究中心 / 广东省农作物种质资源保存与利用重点实验室,
广东 广州 510640; 2. 江门海关技术中心, 广东 江门 529085)

摘要: 养殖业中抗生素滥用和环境污染问题已引起国家和行业的广泛关注。功能微生物可以有效替代养殖用化学物质, 取代激素和抗生素, 提高动物综合生长性能, 在生态健康养殖中发挥关键作用。为实现我国养殖业的可持续发展, 在动物养殖中应用功能微生物实现生态健康养殖已成为一条重要发展路径。功能微生物的作用贯穿整个养殖前端、过程和末端: 利用功能微生物处理饲料原料, 可以有效去除抗营养因子, 提高饲料转化利用率和营养价值; 以养殖功能微生物饲喂动物, 可以调节肠道微生物群平衡, 维持肠道稳态, 调节机体免疫; 应用于养殖环境中, 可以控制臭气排放和环境病原, 在养殖废弃物的无害化处理和资源化利用方面也发挥重要作用。结合有关养殖功能微生物的研究成果, 对功能微生物在动物养殖中的应用研究进展进行综述, 包括它们在生物饲料加工、动物肠道健康、养殖环境控制和废弃物处理中的应用及相关作用机制, 以期为功能微生物在动物养殖中的进一步应用与推广提供参考。

关键词: 禁抗; 功能微生物; 动物健康; 生物饲料加工; 废弃物处理

中图分类号: S8-1

文献标识码: A

文章编号: 1004-874X (2022) 11-0021-11

Progress in Application of Functional Microorganisms in Ecological and Healthy Breeding

DENG Junjin¹, ZHANG Yanbin¹, ZHANG Jianling², LIU Shuxin¹, YU Ting¹,
NIU Zhikai¹, WANG Zhilin¹, CHEN Zhuang¹

(1. Agro-biological Gene Research Center, Guangdong Academy of Agricultural Sciences /
Guangdong Key Laboratory for Crop Germplasm Resources Preservation and Utilization, Guangzhou 510640, China;
2. Jiangmen Customs Technical Center, Jiangmen 529085, China)

Abstract: Antibiotic abuse and environmental pollution caused by animal husbandry has aroused extensive concern from the government and the industry. As a kind of efficient alternative to agricultural chemicals like hormones and antibiotics, functional microorganisms can enhance the comprehensive growth performance of animals and thus play a crucial role in ecological and healthy breeding. The use of functional microorganisms in animal breeding for eco-agriculture has been a key development pathway for achieving the objective of sustainable development. Functional microorganisms are used at the beginning, middle, and end of the entire breeding process. Functional microorganisms can effectively eliminate anti-nutritional factors from feed sources, increasing their utilization rate and nutritional value. Animals fed with functional microorganisms not only have balanced gut microbiota and intestinal homeostasis, but their immune system is

收稿日期: 2022-09-08

基金项目: 广东省科技专项资金(“大专项+任务清单”)项目(江科〔2020〕182号, 江科〔2021〕183号);
肇庆市科技计划项目(2021N003)

作者简介: 邓俊劲(1992—), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向为功能微生物, E-mail: 489697222@qq.com

通信作者: 陈庄(1963—), 男, 博士, 研究员, 研究方向为微生物资源, E-mail: chenzh1963@vip.sina.com

also well regulated. Functional microorganisms can also control odor emissions and pathogens in the environment. Finally, functional microorganisms also play an important role in the bio-safety treatment and circular utilization of breeding wastes. This study provides references for the continued application and promotion of functional microorganisms in animal breeding by summarizing the progress of their application and related mechanisms in such areas as feed processing, intestinal health, breeding environmental control and waste treatment.

Key words: antibiotic-free; functional microorganism; animal health; biological feed processing; waste treatment

功能微生物是指具有特定功能和生物活性的微生物，其独特、多样而灵活的作用方式是微生物在长期与外界环境和其他生物之间的相互作用中不断进化而形成的，在生态系统中发挥不可替代的作用。近年来随着分子生物学、组学和微量分析技术的快速发展，越来越多的新型微生物及其新颖的代谢方式不断被发现和阐明，各种具有独特功能的微生物也被不断挖掘和应用。随着最近关于对动物体内最庞大、最复杂的微生态系统——肠道微生物组认识的加深，功能微生物在动物养殖中的应用研究也进入了新的快速发展阶段。多种功能微生物如芽孢杆菌、乳酸菌和双歧杆菌等已被广泛开发研制成动物养殖用微生态制剂，用于促进动物生长、提高饲料利用率和动物疫病防治等。

自 20 世纪 40 年代以来，抗生素作为促生长剂被广泛应用于动物养殖中。随着畜牧养殖业的规模化集约化发展，饲用抗生素的使用量也越来越大。饲用抗生素滥用导致细菌耐药性增强和药物残留，相关食品安全问题已经引起人们的重视。自 2006 年起，欧盟、美国和中国相继出台相关政策禁止在动物养殖中使用抗生素作为促生长剂。在禁抗限抗的背景下，探求新型替抗产品成为行业研究的热点，其中，功能微生物及其引领的生态健康养殖以绿色、安全、环保等优势，已成为现今养殖业的主流发展方向。在畜牧养殖前端，功能微生物可以发酵饲料原料，将大分子物质分解为小分子物质，并消除抗营养因子，提高饲料转化率。在养殖过程中，以功能微生物如益生菌等饲喂动物，可以有效调控动物肠道菌群，促进有益菌定植，并调节动物免疫，促进动物健康生长，提高综合生产性能。在养殖环境中，功能微生物也可有效抑制环境中的病原菌生长和养殖臭气产生。在养殖末端，功能微生物可以实现粪污、尸体的无害化处理，促进动物产品加工废弃物的资源化利用。

虽然目前功能微生物在动物养殖中的应用研究很多，但仍缺乏系统性的归纳和分析。本文就功能微生物资源在饲料加工、动物肠道健康、养殖环境控制到养殖废弃物处理的整个养殖过程等相关方面的应用及潜在机制进行综述（图 1），并分析其存在问题和不足，以期为功能微生物在动物生态健康养殖中的进一步深入应用和相关机制的挖掘提供参考。

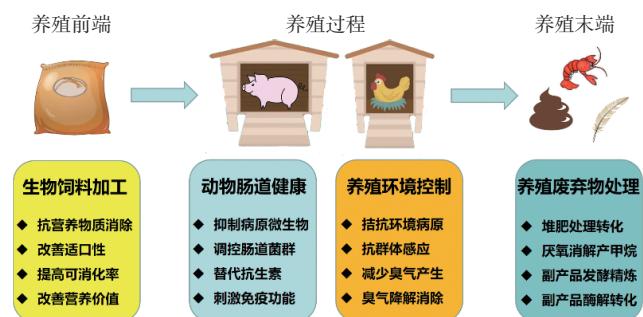


图 1 功能微生物在生态健康养殖中的应用

Fig. 1 Application of functional microorganisms in ecological and healthy breeding

1 功能微生物在生物饲料加工中的应用

在养殖前端，饲料是基础和关键，其成本占畜禽养殖生产总运营成本的 2/3 以上。因此，提高饲料转化效率对提高畜牧业经济效益至关重要。相对于动物饲料源，植物饲料源因价格低廉和获取难度低而被广泛使用。但对养殖动物而言，植物饲料源的消化压力大、营养价值低，因此需进一步加工处理。通过功能微生物发酵处理饲料原料，可以有效降解原料中的抗营养因子，促进营养物质吸收。同时，也可降低非常规饲料原料中有毒有害物质，提高饲料利用率和营养价值。

1.1 微生物发酵功能性饲料

豆粕、玉米粕和杂粕作为优质植物性蛋白源，来源广泛，营养丰富，是主要的常规饲料原料。但它们含有植酸、胰蛋白酶抑制剂、凝集素和抗原蛋白等多种抗营养因子，影响动物对营养物质

的消化吸收。此外粕中含有大量大分子蛋白、多糖等难以消化的物质，也会对动物的消化系统造成较大压力。通过功能微生物发酵可以有效解决这些问题。研究表明，采用酿酒酵母、植物乳杆菌、干酪乳杆菌、枯草芽孢杆菌和地衣芽孢杆菌5株益生菌对玉米深加工副产物进行固态发酵后，粗蛋白含量可增加14.3%，有机酸含量也显著提高^[1]。以黑曲霉、木霉和酵母固态发酵玉米秸秆饲料后，粗蛋白含量可增长10倍，粗纤维含量从36.2%下降到18.47%^[2]。通过豆豉芽孢杆菌DP-2发酵豆粕，大豆球蛋白和 β -伴大豆球蛋白的降解率分别为96.14%和66.51%，可溶性蛋白含量也提高5.46倍^[3]。

生物发酵饲料在改善动物机体健康和提高动物生长性能方面具有显著效果，其潜在作用机制复杂。首先，饲料中的非淀粉多糖会增加粘度和降低肠内营养消化率。由于缺乏内源水解酶，非淀粉多糖不能被单胃动物消化^[4]。因此发酵过程中可溶性非淀粉多糖的降解改善了营养价值且是提高单胃动物性能的重要因素。实验表明，与未发酵原料相比，在饲料中添加发酵的菜籽粕^[5]，小麦^[6]，糠麸^[7]或大麦^[8]可以提高动物生产性能，其原因可能是由于发酵后原料中可溶性非淀粉多糖减少。其次，发酵饲料具有酸味，可以刺激食欲，提高动物生产性能。以含6%发酵大豆粉（以嗜热链球菌、酿酒酵母和枯草芽孢杆菌发酵）的饲料饲喂断奶仔猪可以提高平均日增重和平均日采食量^[9]。研究表明，发酵饲料可以降低肠杆菌科^[10]和沙门氏菌^[11]在胃肠道不同位置的数量。发酵饲料含有较多乳酸和短链脂肪酸，可以降低肠道pH值从而抑制病原菌生长^[12-13]。此外，酸的产生和pH值的降低也可促进植酸降解，因为谷物或豆类内源植酸酶的最适pH均在4.5~7.5。除内源植物植酸酶外，外源微生物植酸酶在发酵过程中也可有效降解植酸^[14]。常用饲料发酵微生物如乳酸菌、酵母、黑曲霉和曲霉等均可分泌植酸酶、促进植酸降解。除降解抗营养因子外，发酵还可以通过形成与植酸竞争结合矿物质的低分子量有机酸来提高饲料中矿物质的生物利用度。发酵过程中产生的柠檬酸和乳酸有可能抵消植酸盐的抑制作用，从而通过在肠道中与铁和锌形成可溶性配体来增强宿主对它们的吸收^[15]。

1.2 非常规饲料原料发酵

我国饲料原料资源匮乏，豆粕和玉米等主要饲料大部分依赖进口。为减少对进口饲料原料的依赖，需要积极开辟新型非常规饲料资源。但非常规饲料普遍存在适口性差、营养价值较低、营养成分不均衡且含有多种抗营养因子或毒性物质等问题。通过微生物发酵，可以改善非常规饲料的适口性，提高利用率^[16]。近年来，研究者已开发出许多非常规饲料，如泔水^[17]、桑叶^[18]、甜菜渣^[19]、酒糟^[20]和中草药等，以满足养殖市场对多样化终端化产品的需求。将发酵酒糟添加到鸭日粮中，可以提高其最终体重、日均采食量和大腿肌肉产量，且降低料重比^[21]。以发酵罗汉果渣等量替代饲料中的玉米对黄羽肉鸡生长性能、肉质和肠道功能并无不利影响^[22]。非常规饲料除可作为饲料成分的替代成分外，还可以改善动物抗病性。在饲料中添加4.0%和6.0%的发酵桑叶可显著增强金鲳鱼对哈维弧菌的抵抗能力^[23]。也有报道指出，酶和微生物联合发酵非常规饲料的效果要优于单独发酵。以乳酸菌和纤维素酶联合发酵的青贮饲料饲喂牛，胃中pH值和氨氮/总氮显著降低，且干物质、粗蛋白质、中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维的瘤胃降解率显著提高^[24]。但非常规的饲料仍存在营养价值差异大、发酵工艺无统一标准、对复合菌种的用量和配伍不清晰等问题，非常规原料发酵的代谢产物及其作用机制也有待深入研究^[16]。

2 功能微生物在调控动物肠道健康中的应用

在养殖过程中，动物健康是影响其生长性能的关键因素。最近研究发现，胃肠道除了具有营养消化和吸收的生理功能外，也是病原微生物栖息以及动物机体免疫防护的重要器官。其中，肠道微生物组起至关重要的作用，它们之间的相互作用极大影响动物机体健康。通过添加功能性微生物可以改善肠道菌群平衡，从而维护动物机体健康状况。

2.1 功能微生物调控动物肠道菌群

肠道微生物组是一个复杂而动态的微生态系统，易受多种因素影响。在动物幼龄时期，肠道的初始定殖微生物对宿主至关重要，因为此时的肠道微生物菌群是不成熟和不稳定的，宿主容

易受到环境中的条件致病菌影响。针对该情况，饲喂功能益生菌可促进有益细菌生长，能够迅速占据肠道中的微生物生态位，以防止条件致病菌定植而对宿主健康造成威胁。有研究表明，在饲料或饮水中添加微生物添加剂可保护幼猪免受感染，并维持肠道健康^[25]。据报道，复合益生菌具有高效替抗功能，在饮水中添加复合益生菌可显著改善22~56日龄岭南黄羽肉鸡的生长性能，并有效降低死淘率^[26]。以嗜酸乳杆菌NP51饲喂牛能显著降低其粪便中大肠杆菌O157:H7的数量^[27]。给断奶山羊饲喂罗伊氏乳杆菌、营养乳杆菌、粪肠球菌和双歧杆菌等复合菌，可以维持肠道健康并有效减少粪便中沙门氏菌和志贺氏菌等致病菌的数量^[28]。一般来说，功能微生物对肠道菌群的调控功能是通过抑制病原体对肠壁的粘附和竞争对病原体在环境中定居至关重要的营养物（底物）来实现的。

此外，一些功能微生物可以产生直接抑制病原微生物的物质，从而减少动物体内病原微生物数量而发挥益生功能。功能微生物产生的抑菌物质主要有两种，一种是肠道中碳水化合物和蛋白质发酵产生的代谢物，如挥发性脂肪酸(VFAs)，另一种是针对细胞膜完整性并阻碍质子动力功能的细菌素或抗菌肽等。如罗伊氏乳杆菌产生的罗伊氏菌素具有广谱抗菌性，已被报道可以有效抑制家禽病原空场弯曲杆菌和大肠弯曲杆菌的生长^[29]。Shi等^[30]发现罗伊氏乳杆菌S5可以有效抑制沙门氏菌ATCC13076的生长，经过其无细胞上清液处理后，沙门氏菌活力、运动和粘附相关基因的表达显著降低，运动能力和生物膜形成显著减弱，膜结构和细胞内结构也受到破坏。许晓燕等^[31]研究发现，乳酸乳球菌乳亚种NCU036018可以产生细菌素并有效抑制金黄色葡萄球菌等病原菌。还有研究发现干酪乳杆菌会刺激肠道分泌抗菌肽、清除肠道病原体、保护机体肠道屏障^[32]。体外表达重组的抗菌肽也表现出对肠道致病菌的良好抑制作用。

2.2 功能微生物增强动物免疫

功能微生物还可刺激机体免疫^[33~34]，改善动物防御和健康状况。在对早期断奶仔猪生长性能和肠道发育的研究中，日粮中同时添加活酵母和超细酵母粉可提高饲料转化率、促进肠道发育和增强机体免疫力^[35]。Chauvelras-Durand等^[25]

研究发现，以布拉迪酵母菌或乳杆菌饲喂小猪可促进肠道IgA分泌，抑制产肠毒素大肠杆菌增殖，从而保持小猪健康。Bai等^[36]研究发现，在饲料中添加0.1%或0.2%的益生菌产品可增强1~21日龄肉鸡的肠道T细胞免疫，且对肉鸡生长性能无不良影响。Lee等^[37]研究发现，肉鸡饲喂 5×10^6 CFU芽孢杆菌可降低巨型艾美耳球虫感染率，胃肠道病变明显减少。此外，益生菌也可增强动物接种疫苗的免疫效果。通过饮水添加益生菌，可增强肉鸡接种新城疫疫苗产生的体液免疫反应^[38]。功能微生物增强动物免疫是通过调节炎症因子和抗体产生、增强自然杀伤细胞和巨噬细胞活性、调节树突状细胞功能和表型、调控AP-1和NF-κB通路、调节细胞凋亡和一氧化氮释放来实现的^[39]。如罗伊氏乳杆菌可以激活巨噬细胞并增强其吞噬和杀死细胞内鼠伤寒沙门菌的能力从而减轻鼠伤寒沙门菌引起的炎症反应，其内在机制可能是一氧化氮产生的调节^[40]。大部分功能微生物免疫调节特性的介质是免疫细胞尤其是辅助T细胞，且一般具有菌株特异性^[41]。

3 功能微生物在改善养殖环境中的应用

随着规模化和集约化畜牧场的发展，养殖场环境对动物养殖的影响越来越大。养殖动物与其生活环境之间不仅存在物质和能量的交换，也存在微生物的交换。动物自身携带的微生物能够影响环境，环境中存在的微生物也不断影响动物。而在养殖场中，粪便、尿液、饮水和呼吸是动物与环境交流的主要方式和载体。目前养殖场环境控制中的两个重要问题是有害微生物和臭味，功能微生物也受到广泛关注和应用。

3.1 功能微生物抑制环境病原

在环境病原控制方面，陆生动物的养殖环境较易使用化学试剂和药品等处理，因此功能微生物的应用较少。在水产养殖中，高密度养殖伴随的药物滥用和药物残留导致严重的环境污染和食品安全问题。水产养殖因其水体环境特性而难以使用畜禽养殖的方式处理，采用生态健康养殖模式是确保水产养殖业绿色可持续发展的重要途径，因此功能微生物在水产养殖环境控制中发挥着重要作用。益生菌已被证明能拮抗多种水产动物病原体，是遏制水产养殖疾病问题的一个很好的解决方案。孙博超等^[42]在水体中使用组合益

生菌能够有效抑制弧菌在水体和虾体内的增殖，提高虾成活率。陈锦豪等^[43]也报道了通过向鱼虾混养池塘中添加益生菌和复合营养剂可显著降低养殖水体中有害弧菌的浓度，使其远低于致病浓度而保证养殖动物安全。Santos 等^[44]从欧洲海鲈、金头海鲈和白海鲈中分离出多株功能微生物菌，均具有抗菌、抑制生物膜形成和抗群体感应活性，可有效抑制常见水产病原菌如嗜水气单胞菌和沙门氏菌等的生长与侵染。一些功能微生物还会分泌一些抑菌活性物质，可被应用于养殖水体病原控制。石广举等^[45]在饲料中添加纳豆菌抗菌脂肽可以有效降低水体和虾体中副溶血弧菌和溶藻弧菌的数量。在水产养殖中虽然不断有不同功能微生物用于拮抗各种病原微生物，但相关作用机制仍不清楚，需要进一步深入研究。

3.2 功能微生物控制养殖臭气

除了抑制环境病原微生物外，臭气治理也是功能微生物用于养殖环境控制的重要方向。养殖臭气分子主要来源于动物体内未被利用的蛋白质、多糖等成分的发酵分解，目前一般认为氨和硫化氢是养殖臭气的主要组成。功能微生物用于氨和硫化氢的降解研究已有深入研究，其应用方式主要有减少臭气分子产生和降解臭气分子两种，可通过在饲料中添加生物除臭菌剂和对粪污喷洒生物除臭菌剂实现。饲料生物除臭添加菌剂一般在饲料或饮水中添加，提高动物对饲料的消化吸收率，间接减少臭气排放。张志峰等^[46]报道指出，通过在家禽日粮中添加枯草芽孢杆菌可提高消化酶活性和氮利用率，从而减少氨排放。除了直接使用益生菌饲料添加剂外，采用原位喷洒功能微生物也是畜禽粪污臭气治理另一重要途径。功能微生物对于臭气分子的降解研究已有较长时间，大部分均集中于对于氨和硫化氢的降解。邵栓等^[47]使用具有除臭功能的贝莱斯芽孢杆菌、枯草芽孢杆菌、产朊假丝酵母和干酪乳杆菌对猪粪处理，在最优条件下猪粪中氨和硫化氢去除率可达 63.60% 和 70.29%。李玥等^[48]从鸡粪中分离得到 5 株具有除臭功能的菌株，包括芽孢杆菌属 MS03、贝莱斯芽孢杆菌 MS07、耐寒短杆菌 MS11、木糖葡萄球菌 MS42 和变异棒杆菌 MS82，应用复合菌系 MS03+MS07 和 MS03+MS82 处理鸡粪，氨和硫化氢去除率均可超过 60%。吲哚类分子因其嗅阈值低，即使相对浓度较低，但其臭气

贡献率很高，且降解难度大、极性高、挥发性强，已成为目前养殖臭气治理的难点。目前已有多株吲哚降解菌的相关报道，但降解效率不够高，且大部分只适用于工业废水废气处理，难以在养殖业中应用^[49]。最近本课题组^[50]从猪粪中筛选鉴定出高效吲哚无氧降解菌 GDIAS-5，非常适合于养殖环境中粪污堆积的缺氧场景，并首次发现了负责吲哚无氧氧化的单加氧酶 ycnE，促进了对吲哚降解机制的理解。

4 功能微生物在养殖废弃物资源化利用中的应用

功能微生物在粪便、动物尸体和加工副产品等畜禽养殖末端废弃物的处理上也被广泛应用和研究。随着我国养殖规模的不断扩大，相关废弃物的产生量也越来越大，对环境造成严重影响^[51]。但实际上，很多废弃物如羽毛、虾蟹壳等仍具有较高的可利用空间，只是处理难度较大，成本较高，其中含有的潜在病原菌也需要进行处理，而使用功能微生物则可以有效解决这些问题，促进养殖废弃物的资源化利用。

4.1 粪便和动物尸体堆肥处理

粪便和动物尸体堆肥处理需要微生物在高温条件下对有机废物进行生物分解和转化，以产生稳定的、无病原体且可有利于土地增肥的最终产物^[52]。影响堆肥的主要因素是碳氮比、颗粒大小、水分含量、pH 值、氧气利用率、堆肥技术以及微生物活力。尽管原料中也存在一些微生物可以降解堆肥材料，但它们较少的数量和较差的降解能力导致堆肥效率降低和堆肥质量不理想^[53]。为加快堆肥进程，堆肥过程中通常添加使用一些有机肥发酵剂，可见，使用专门的功能微生物是促进堆肥成熟和提高最终堆肥质量的有力手段。接种耐热放线菌，包括链霉菌 H1、分枝杆菌 G1、小单孢菌 G7 和糖单孢菌 T9，已经被报道可以增强粪便中木质纤维素的降解并提高堆肥的效果和质量^[54]。堆肥过程中的纤维素酶、木聚糖酶、锰过氧化物酶、木质素过氧化物酶和漆酶的活性也都增加。最近，也有发现在堆肥原料中补充耐热氨氧化细菌可以改善堆肥牛粪的腐殖化过程，并显著提高产品的腐殖化因子和芽孢杆菌科丰度^[55]。Wan 等^[56]将筛选得到的 25 种不同纤维素降解菌与 7 种商业菌株结合接种堆肥，可以提

高堆肥温度，促进嗜热阶段发展，使堆肥产品的发芽指数从 62% 提高到 96%。然而，目前对生物强化在堆肥过程中作用和机制的了解仍然缺乏，需要进一步深入研究^[57]。

4.2 粪便、废水和动物尸体厌氧消解

厌氧消解是一种被广泛应用的处理养殖有机废弃物的多功能技术，是一个由不同种类细菌和产甲烷古菌进行的连续发酵过程，也被称为厌氧消化产甲烷。在动物养殖废弃物处理中，厌氧消解应用的功能微生物可用于原料预处理以及生物强化消解。预处理主要是针对原料中纤维素和木质纤维素等难降解组分，利用高效分解纤维素的白腐真菌对在牛粪和谷类作物厌氧消解之前的原料进行预处理可使甲烷产量提高 10%~18%，纤维素降解率提高 80%^[58]。使用烟曲霉 SK1 或木霉预处理牛粪，木质素去除率达 60% 和 43%，还原糖含量提升到 4.91、9.59 μmol，沼气产量显著提高^[59]。生物强化则是在厌氧消解过程中添加不同的功能微生物，以增强系统对底物的消解能力。以 15% 的接种量添加厌氧瘤胃真菌可以有效增强牛粪中木质纤维素的水解，甲烷产量提高 60%^[60]。在猪粪中接种 RY3、SH4、G1、G2 和 G3 产甲烷菌株明显促进产甲烷过程的启动和缩短消解时间，沼气总产量提高 2.7 倍^[61]。

4.3 羽毛深加工资源化利用

羽毛是家禽养殖业的主要副产品，主要由角蛋白组成。一方面，家禽业产生的大量未经处理的羽毛会因其难以降解而造成环境污染。另一方面，羽毛富含蛋白，是肥料和动物饲料的潜在来源。通过功能微生物处理，可以有效破坏角蛋白结构，使其转化为可被消化吸收的小分子。目前已从各种环境中分离出许多羽毛降解菌，其中地衣芽孢杆菌和链霉菌被认为是细菌中最有效的角蛋白降解菌^[62]。最近文献报道了一株能固态发酵高效降解羽毛的链霉菌 *Streptomyces* sp. SCUT-3，可以在 6 d 内将羽毛中超过 90% 的角蛋白转化为可溶的氨基酸及多肽^[63]。该团队进一步揭示了半胱氨酸双加氧酶 CDO1 产生亚硫酸盐还原羽毛中二硫键的机制，还通过合成生物学改造了其增强羽毛降解的能力，使发酵时间缩短至 3 d，发酵产品中直接可溶氨基酸超过 30%，可溶多肽超过 20%^[64]。而虽然在应用功能微生物产角蛋白酶有较多报道，但直接以酶处理完整的羽毛并

不成功，可能是由于受到角蛋白分子间众多二硫键的阻碍。

4.4 虾蟹壳生物转化

随着水产养殖和加工业的迅速发展，大量甲壳废弃物被产生。由于缺乏有效的几丁质酶，这些废弃物很难被人类降解利用。传统物理及化学处理法能耗高、污染大。甲壳通过功能微生物直接发酵或酶处理可以有效提高其营养价值，使其能被动物吸收利用。利用枯草芽孢杆菌发酵虾壳，通过产酸去除 72% 的矿物质、产蛋白酶去除 84% 的蛋白质，可以从虾壳制备得到几丁质和壳聚糖^[65]。利用产蛋白酶的深层微小杆菌和产乳酸的嗜酸乳杆菌连续两步发酵虾壳提取几丁质，86% 的蛋白质和 95% 的矿物质均被去除^[66]。此外，以经过植物乳杆菌 LV33204、嗜麦芽寡养单胞菌 LV2122 和气单胞菌 LV1111 发酵的虾壳饲喂小鼠表现出降血糖和降血脂的效果^[67]。在利用功能微生物产酶处理虾壳方面，近期罗晓春教授课题组取得系列进展：通过重组毕赤酵母发酵获得一株现有报道酶活产量最高的重组几丁质酶 rChit46^[68]；结合 rChit46 与重组酸性蛋白酶，首次实现虾壳蛋白质、几丁质、虾青素和矿物质的零浪费回收^[69]；进一步以融合多糖结合域改造 rChit46，通过重组毕赤酵母发酵产酶，首次实现几丁质酶一步法降解未经任何前处理的虾壳^[70]；获得的几丁寡糖具有免疫调节作用，可增强小鼠巨噬细胞的吞噬活性和抑制脂多糖介导的炎症应答^[71]。

5 存在问题

我国大力推行生态健康养殖，微生物在养殖领域的应用也越来越广泛，但目前仍然存在以下问题，需要在未来进行更深层次研究。首先，用于养殖业的微生物菌株准入门槛低，许多微生物菌种来源不明，作用机制不清晰，且高性能、高耐受性、高稳定性和高适应性的优良菌株资源仍然匮乏。针对这一问题，应加大力度筛选更加优良的菌株，以扩大菌种库和基因库。还应根据研究目的，不断驯化、诱变和改造现有菌株，探索更高通量的方法选育优良菌株。其次，目前许多养殖用微生物缺乏具体的功效和安全性评价，部分存在安全隐患的微生物仍被用于养殖业且缺少评价体系，如许多含有毒力因子的粪肠球菌和屎

肠球菌等。当前应尽快建立完善的养殖微生物功能和安全评价体系，设立综合评价指标和方法。第三，养殖功能微生物菌剂加工工艺相对落后，许多功能优良的乳杆菌、双歧杆菌等由于难以耐受饲料加工的高温条件而难以实际应用。要解决这个问题，需要大力开发微胶囊包被、后喷涂和膜过滤等可保持微生物活性的新型饲料加工技术。第四，产品设计落后，功效突出的个性化产品少。市面上通用全能型产品居多，许多产品菌株组合没有科学依据，针对性强和效果突出的个性化产品少。加强认识养殖动物微生态平衡的重要性，以及正常微生物群的普遍性和必要性，针对不同部位、时期以构建合理的微生态菌群与结构为设计目的产品是一个有效的解决方法。

6 结论

基于功能微生物的微生态制剂具有资源节约、环境友好的特征，是解决我国面临的资源短缺与环境污染等问题的重要途径。功能微生物制剂可以逐渐替代养殖用化学物质，取代激素和抗生素，提高动物综合生产性能，生产出健康食品，恢复环境和宿主的生态和微生态平衡。随着我国在畜牧业禁抗无抗水平的提高，以及对饲料安全和卫生的愈加重视，功能微生物制剂必将在养殖业中受到重点关注和大力推广，其在动物饲料、废弃物处理和环境控制方面也将会得到进一步开发和利用，促进养殖业生态健康可持续发展。

参考文献 (References) :

- [1] 郭如意. 综合利用玉米深加工副产物固态发酵饲料的研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- GUO R Y. Study on comprehensive utilization of by-products of corn deep processing solid-state fermentation feed [D]. Dalian:Dalian University of Technology, 2021.
- [2] 廖雪义, 代青, 余海忠. 多菌种混合发酵秸秆生产蛋白质饲料的研究 [J]. 中国饲料, 2009(16):8–10, 14. DOI:10.3969/j.issn.1004-3314.2009.16.005.
- LIAO X Y, DAI Q, YU H Z. Study on the production of protein feed from multi-strain mixed fermentation straw [J]. China Feed, 2009(16):8–10, 14. DOI:10.3969/j.issn.1004-3314.2009.16.005.
- [3] LIU Z, GUAN X, ZHONG X, ZHOU X, YANG F. *Bacillus velezensis* DP-2 isolated from Douchi and its application in soybean meal fermentation [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2021, 101(5):1861–1868. DOI:10.1002/jsfa.10801.
- [4] JAKOBSEN G V, JENSEN B B, KNUDSEN K E B, CANIBE N. Impact of fermentation and addition of non-starch polysaccharide-degrading enzymes on microbial population and on digestibility of dried distillers grains with solubles in pigs [J]. Livestock Science, 2015, 178:216–227. DOI:10.1016/j.livsci.2015.05.028.
- [5] CHIANG G, LU W Q, PIAO X S, HU J K, GONG L MTHACKER P A. Effects of feeding solid-state fermented rapeseed meal on performance, nutrient digestibility, intestinal ecology and intestinal morphology of broiler chickens [J]. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences, 2010, 23(2):263–271.
- [6] 韦良开, 郑斌, 王海辉, 郭棚, 赵彤, 陈兴发. 液体发酵饲料在猪业养殖中的应用研究 [J]. 饲料研究, 2019, 42(5):122–125. DOI:10.13557/j.cnki.issn1002-2813.2019.05.033.
- WEI L K, ZHENG B, WANG H H, GUO P, ZHAO T, CHEN X F. Study on the application of liquid fermented feed in pig culture [J]. Journal of Feed Research, 2019, 42(5):122–125. DOI: 10.13557/j.cnki.issn1002-2813.2019.05.033.
- [7] 崔艺燕, 田志梅, 鲁慧杰, 邓盾, 马现永, 陈卫东. 糜麸营养价值及其发酵饲料在动物生产中的应用 [J]. 中国畜牧兽医, 2019, 46(10):2902–2915. DOI: 10.16431/j.cnki.1671-7236.2019.10.011.
- CUI Y Y, TIAN Z M, LU H J, DENG D, MA X Y, CHEN W D. Nutritional value of bran and its application in animal production [J]. China Animal Science and Veterinary Medicine, 2019, 46(10):2902–2915. DOI:10.16431/j.cnki.1671-7236.2019.10.011.
- [8] 黄健, 刘艳玲, 陈杰, 王胜, 臧仕波. 一种环保减排型猪用生物发酵饲料, CN110050895A [P]. 2019-07-26.
- HUANG J, LIU Y L, CHEN J, WANG S, ZANG S B. An environmental protection and emission reduction type biological fermented feed for pigs: CN110050895A [P]. 2019-07-26.
- [9] WANG Y, LU W Q, LI D F, LIU X T, WANG H L, NIU S, PIAO X S. Energy and ileal digestible amino acid concentrations for growing pigs and performance of weanling pigs fed fermented or conventional soybean meal [J]. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences, 2014, 27(5): 706–716. DOI: 10.5713/ajas.2013.13612.
- [10] 梁睿, 李振, 徐刚, 杨玉. 发酵饲料对蛋雏鸡生长性能和生理指标的影响 [J]. 饲料博览, 2012(4):5–8. DOI:10.3969/j.issn.1001-0084.2012.04.003.
- LIANG R, LI Z, XU G, YANG Y. Effects of fermentation feed on layer chicks growth performance and physiological indexes [J]. Feed Review, 2012(4):5–8. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0084.2012.04.003.
- [11] HERES L, ENGEL B, VAN KNAPEN F, DE JONG M C, WAGENAAR J A, URLINGS H A. Fermented liquid feed reduces susceptibility of broilers for *Salmonella enteritidis* [J]. Poultry Science, 2003, 82(4):603–611. DOI:10.1093/ps/82.4.603.
- [12] SCHOLTEN R H, RIJNEN M M, SCHRAMA J W, BOER H, VESSEUR P C, DEN HARTOG L A, VAN DER PEET-SCHWERING C M, VERSTEGEN M W. Fermentation of liquid coproducts and liquid compound diets: Part 1. Effects on chemical composition during a 6-day storage period [J]. Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition, 2001, 85(5–6): 111–123. DOI: 10.1046/j.1439-

- 0396.2001.00309.x.
- [13] MISSOTTEN J A M, GORIS J, MICHEELS J, VAN COILLIE E, HERMAN L, DE SMET S, DIERICK N A, HEYNDRICKX M. Screening of isolated lactic acid bacteria as potential beneficial strains for fermented liquid pig feed production [J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2009, 150(1-2):122-138. DOI: 10.1016/j.anifeedsci.2008.08.002.
- [14] KOZLOWSKA H, HONKE J, SADOWSKA J, FRIAS J, VIDALVALVERDE C. Natural fermentation of lentils: influence of time, concentration and temperature on the kinetics of hydrolysis of inositol phosphates [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1996, 71(3):367-375.
- [15] SCHLEMMER U, FROLICH W, PRIETO R M, GRASES F. Phytate in foods and significance for humans: food sources, intake, processing, bioavailability, protective role and analysis [J]. *Molecular Nutrition & Food Research*, 2009, 53:330-375. DOI: 10.1002/mnfr.200900099.
- [16] 陈彤, 董玲, 许晴, 熊文钰, 邓秋怡, 张杭超, 区玉兴, 高春起. 微生物发酵非常规饲料原料在畜禽生产中的应用进展 [J]. 饲料工业, 2022, 43(8):18-23. DOI: 10.13302/j.cnki.fi.2022.08.004.
- CHEN T, DONG L, XU Q, XIONG W Y, DENG Q Y, ZHANG H C, QU Y X, GAO C Q. Microbial fermentation of the progress in the application of non-conventional feed raw materials in the livestock and poultry production [J]. *Journal of Feed Industry*, 2022, 43 (8):18-23. DOI:10.13302/j.carol carroll nki fi.2022.08.004.
- [17] 张海波, 李凤翥, 卢莹, 叶明. 混合菌发酵泔水的条件优化与效果研究 [J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2012, 35(9):1284-1288. DOI: 10.3969/j.issn.1003-5060.2012.09.030.
- ZHANG H B, LI F L, LU Y, YE M. Study on the condition optimization and effect of mixed bacteria fermentation of swill [J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science Edition)*, 2012, 35(9):1284-1288. DOI: 10.3969/j.issn.1003-5060.2012.09.030.
- [18] SHARMA S, HANSEN L D, HANSEN J O, MYDLAND L T, HORN S J, OVERLAND M, EIJSINK V G H, VUORISTO K S. Microbial protein produced from brown seaweed and spruce wood as a feed ingredient [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2018, 66(31):8328-8335. DOI:10.1021/acs.jafc.8b01835.
- [19] 敖维平, 程梦, 陈颜旭, 孙继鹏, 张春雷, 赵先乐, 周波. 发酵甜菜渣对断奶仔猪生长性能、血液生化与免疫指标和肠道微生物多样的影响 [J]. 中国畜牧杂志, 2022:1-12. DOI:10.19556/j.0258-7033.20211225-03.
- AO W P, CHENG M, CHEN Y X, SUN J P, ZHANG C L, ZHAO X L, ZHOU B. Effects of fermented beet residue on growth performance, blood biochemical and immune indices and intestinal microbial diversity of weaned piglets [J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2022:1-12. DOI:10.19556/J.0258-7033.20211225-03.
- [20] 沈大春, 卢颖林, 周文灵, 陈迪文, 敖俊华, 王庆, 黄莹, 黄振瑞, 李奇伟, 江永. 糖蜜酒精残液生物发酵效果及水培试验分析 [J]. 甘蔗糖业, 2018(1):12-16. DOI: 10.3969/j.issn.1005-9695.2018.01.003.
- SHEN D C, LU Y L, ZHOU W L, CHEN D W, AO J H, WANG Q, HUANG Y, HUANG Z R, LI Q W, JIANG Y. Analysis of vinasse with biological fermentation and hydroponics experiment [J]. *Sugarcane and Canesugar*, 2018(1):12-16..DOI: 10.3969/j.issn.1005-9695.2018.01.003.
- [21] ZHAI S S, TIAN L, ZHANG X F, WANG H, LI M M, LI X C, LIU J L, YE H, WANG W C, ZHU Y W, YANG L. Effects of sources and levels of liquor distiller's grains with solubles on the growth performance, carcass characteristics, and serum parameters of Cherry Valley ducks [J]. *Poultry Science*, 2020, 99(11):6258-6266. DOI:10.1016/j.psj.2020.07.025.
- [22] DING X M, QI Y Y, ZHANG K Y, TIAN G, BAI S P, WANG J P, PENG H W, LV L, XUAN Y, ZENG Q F. Corn distiller's dried grains with solubles as an alternative ingredient to corn and soybean meal in Pekin duck diets based on its predicted AME and the evaluated standardized ileal digestibility of amino acids [J]. *Poultry Science*, 2022, 101(8):101974. DOI:10.1016/j.psj.2022.101974.
- [23] NING L, LIU S, GAO L, ZHOU W, CHEN X, LI Y, PAN Q. Influence of dietary fermented *Folium mori* on growing performance, lipometabolism and disease resistance of golden pompano *Trachinotus ovatus* [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2022, 128: 398-404. DOI:10.1016/j.fsi.2022.08.010.
- [24] WILKOWSKA A, BERLOWSKA J, NOWAK A, MOTYL I, ANTCAZAK-CHROBOT A, WOJTCZAK M, KUNICKA-STYCZYN SKA A, BINCZARSKI M, DZIUGAN P. Combined yeast cultivation and pectin hydrolysis as an effective method of producing prebiotic animal feed from sugar beet pulp [J]. *Biomolecules*, 2020, 10(5):724. DOI:10.3390/biom10050724.
- [25] CHAUCHEYRAS-DURAND F, DURAND H. Probiotics in animal nutrition and health [J]. *Beneficial Microbes*, 2010, 1(1):3-9. DOI:10.3920/BM2008.1002.
- [26] 刘石, 刘静, 陈庄, 俞婷, 贝锦龙, 王蕾, 李拯民, 王志林. 饮水中添加复合益生菌对岭南黄羽肉鸡生长性能和肠道微生物菌群结构的影响 [J]. 中国畜牧兽医, 2022, 49(1):98-108. DOI:10.16431/j.cnki.1671-7236.2022.01.011.
- LIU S, LIU J, CHEN Z, YU T, BEI J L, WANG L, LI Z M, WANG Z L. Effects of compound probiotics in drinking water on growth performance and intestinal microbiota structure of lingnan yellow-feathered broilers [J]. *Chinese Journal of Animal Science and Veterinary Medicine*, 2022, 49(1):98-108. DOI:10.16431/j.cnki.1671-7236.2022.01.011.
- [27] PETERSON R E, KLOPFENSTEIN T J, ERICKSON G E, FOLMER J, HINKLEY S, MOXLEY R A, SMITH D R. Effect of *Lactobacillus acidophilus* strain NP51 on *Escherichia coli* O157:H7 fecal shedding and finishing performance in beef feedlot cattle [J]. *Journal of Food Protection*, 2007, 70(2): 287-291. DOI: 10.4315/0362-028x-70.2.287.
- [28] APAS A L, DUPRAZ J, ROSS R, GONZALEZ S N, ARENA M E. Probiotic administration effect on fecal mutagenicity and microflora in the goat's gut [J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2010, 110(5): 537-540. DOI:10.1016/j.jbiosc.2010.06.005.
- [29] ASARE P T, ZURFLUH K, GREPPI A, LYNCH D, SCHWAB

- C, STEPHAN R, LACROIX C. Reuterin demonstrates potent antimicrobial activity against a broad panel of human and poultry meat *campylobacter* spp. isolates [J]. *Microorganisms*, 2020,8(1): 78. DOI: 10.3390/microorganisms8010078.
- [30] SHI S, QI Z, SHENG, TU J, SHAO Y, QI K. Antagonistic trait of *lactobacillus reuteri* S5 against *Salmonella enteritidis* and assessment of its potential probiotic characteristics [J]. *Microbial Pathogenesis*, 2019,137:103773.DOI:10.1016/j.micpath.2019.103773.
- [31] 许晓燕, 彭珍, 熊世进, 肖沐岩, 黄涛, 熊涛. 乳酸乳球菌乳亚种 NCU036018 细菌素的分离纯化及其抗菌机制 [J]. 食品科学, 2022,43(16):209–216.DOI: 10.7506/spkx1002–6630–20210902–018.
- XU X Y, PENG Z, XIONG S J, XIAO M Y, HUANG T, XIONG T. Isolation and purification of bacteriocin from *Lactococcus lactis* *Lactobacillus* NCU036018 and its antibacterial mechanism [C]. *Food Science*, 2022,43(16):209–216. DOI:10.7506/spkx1002–6630–20210902–018.
- [32] 白永飞. 干酪乳杆菌刺激肠细胞产生抗菌肽的筛选及其对肠上皮细胞增殖作用研究 [D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2021.
- BAI Y F. Screening of antimicrobial peptides produced by *Lactobacillus casei* on intestinal cells and its effect on the proliferation of intestinal epithelial cells [D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2021.
- [33] UYENO Y, SHIGEMORI S, SHIMOSATO T. Effect of probiotics/prebiotics on cattle health and productivity [J]. *Microbes and Environments*, 2015, 30(2): 126–132. DOI: 10.1264/jsme2.ME14176.
- [34] HILL C, GUARNER F, REID G, GIBSON G R, MERENSTEIN D J, POT B, MORELLI L, CANANI R B, FLINT H J, SALMINEN S, CALDER P C, SANDERS M E. Expert consensus document. The International Scientific Association for probiotics and prebiotics consensus statement on the scope and appropriate use of the term probiotic [J]. *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology*, 2014,11(8):506–514.DOI: 10.1038/nrgastro.2014.66.
- [35] JIANG Z, WEI S, WANG Z, ZHU C, HU S, ZHENG C, CHEN Z, HU Y, WANG L, MA X, YANG X. Effects of different forms of yeast *Saccharomyces cerevisiae* on growth performance, intestinal development, and systemic immunity in early-weaned piglets [J]. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 2015,6:47.DOI: 10.1186/s40104–015–0046–8.
- [36] BAI S P, WU A M, DING X M, LEI Y, BAI J, ZHANG K Y, CHIO J S. Effects of probiotic-supplemented diets on growth performance and intestinal immune characteristics of broiler chickens [J]. *Poultry Science*, 2013, 92(3): 663–670. DOI: 10.3382/ps.2012–02813.
- [37] LEE K W, LILLEHOJ H S, JANG S I, LI G, LEE S H, LILLEHOJ E P, SIRAGUSA G R. Effect of *Bacillus*-based direct-fed microbials on *Eimeria maxima* infection in broiler chickens [J]. *Comparative Immunology Microbiology and Infectious Diseases*, 2010, 33(6): e105–110.DOI: 10.1016/j.cimid.2010.06.001.
- [38] RITZI M M, ABDELRAHMAN W, VAN-HEERDEN K, MOHNL M, BARRETT N W, DALLOUL R A. Combination of probiotics and coccidiosis vaccine enhances protection against an eimeria challenge [J]. *Veterinary Research*, 2016,47(1):111.DOI: 10.1186/s13567–016–0397–y.
- [39] TIWARI G, TIWARI R, PANDEY S, PANDEY P. Promising future of probiotics for human health: Current scenario [J]. *Chronicles of Young Scientists*, 2012, 3(1):17–28. DOI:10.4103/2229–5186.94308.
- [40] JIANG P, YANG W, JIN Y, HUANG H, SHI C, JIANG Y, WANG J, KANG Y, WANG C, YANG G. *Lactobacillus reuteri* protects mice against *Salmonella typhimurium* challenge by activating macrophages to produce nitric oxide [J]. *Microbial Pathogenesis*, 2019,137: 103754.DOI:10.1016/j.micpath.2019.103754.
- [41] FONG F L, SHAH N P, KIRJAVAIVEN P, EL–NEZAMI H. Mechanism of action of probiotic bacteria on intestinal and systemic immunities and antigen-presenting cells [J]. *International Reviews of Immunology*, 2016,35(3):179–188.DOI: 10.3109/08830185.2015.1096937.
- [42] 孙博超, 杨运楷, 王海亮, 宋晓玲, 黄健. 零换水条件下益生菌组合在凡纳滨对虾育苗生产中的应用 [J]. 上海海洋大学学报, 2019, 28(1):93–102.
- SUN B C, YANG Y K, WANG H L, SONG X L, HUANG J. Application of probiotic combination in breeding and production of *Litopenaeus vannamei* under zero water exchange condition [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2019,28(1):93–102.
- [43] 陈锦豪, 郑锦滨, 毛勇, 苏永全, 王军. 益生菌和复合营养剂对鱼虾混养池塘水质及细菌群落结构的影响 [J]. 热带生物学期报, 2019,10(1):6–13.DOI: 10.15886/j.cnki.rdsxb.2019.01.002.
- CHEN J H, ZHENG J B, MAO Y, SU Y Q, WANG J. Effects of probiotics and compound nutrients on water quality and community structure of bacteria in fish–shrimp farming pond [J]. *Journal of South China University of Tropical Agriculture*, 2019, 10(1): 6–13. DOI:10.15886/j.cnki.rdsxb.2019.01.002.
- [44] SANTOS R A, OLIVA T A, POUSAO–FERREIRA P, JERUSIK R, SAAVEDRA M J, ENES P, SERRA C R. Isolation and characterization of fish–gut *bacillus* spp. as source of natural antimicrobial compounds to fight aquaculture bacterial diseases [J]. *Marine Biotechnology*, 2021,23(2):276–293.DOI:10.1007/s10126–021–10022–x.
- [45] 石广举, 孙力军, 王雅玲, 刘唤明, 徐德峰, 聂芳红, 刘颖, 叶日英. NT-6 抗菌脂肽对凡纳滨对虾生长性能及养殖源头弧菌数的影响 [J]. 广东农业科学, 2014,41(12):119–122,137. DOI:10.16768/j.issn.1004–874X.2014.12.040.
- SHI G J, SUN L J, WANG Y L, LIU H M, XU D F, NIE F H, LIU Y, YE R Y. Effects of NT-6 antibacterial lipopeptide on growth performance and number of *Vibrio* species in culture source of *Litopenaeus vannamei* [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2014,41(12):119–122,137.DOI:10.16768/j.issn.1004–874X.2014.12.040.
- [46] ZHANG Z F, CHO J H, KIM I H. Effects of *bacillus subtilis* UBT–MO₂ on growth performance, relative immune organ weight, gas concentration in excreta, and intestinal microbial shedding in broiler chickens [J]. *Livestock Science*, 2013, 155(2–3):343–347. DOI:10.1016/j.livsci.2013.05.021.

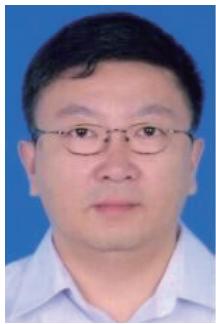
- [47] 邵栓, 党晓伟, 李慧娟, 常娟, 王平, 尹清强, 高天增. 响应面法优化微生物除臭效果的研究 [J]. 中国畜牧兽医, 2020, 47(8):2684–2693. DOI: 10.16431/j.cnki.1671-7236.2020.08.039.
- SHAO S, DANG X W, LI H J, CHANG J, WANG P, YIN Q Q, GAO T Z. Study on optimization of microbial deodorization effect by response surface method [J]. *China Animal Science and Veterinary Medicine*, 2020, 47(8):2684–2693. DOI: 10.16431/j.cnki.1671-7236.2020.08.039.
- [48] 李明, 李成成, 李静, 张潇月, 张紫薇, 黄议漫, 刘浩, 罗鸿, 张小平, 赵珂. 鸡粪除臭菌的分离筛选及除臭效果分析 [J]. 农业环境科学报, 2020, 39(5):1103–1110. DOI: 10.11654/jaes.2019-1354.
- LI Y, LI C C, LI J, ZHANG X Y, ZHANG Z W, HUANG Y M, LIU H, LUO H, ZHANG X P, ZHAO K. Isolation and screening of deodorizing bacteria from chicken manure and analysis of its deodorizing effect [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(5):1103–1110. DOI: 10.11654/jaes.2019-1354.
- [49] MA Q, ZHANG X, QU Y. Biodegradation and biotransformation of indole: advances and perspectives [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2018, 9:2625. DOI: 10.3389/fmich.2018.02625.
- [50] DENG J J, DENG D, WANG Z L, LUO X C, CHEN H P, LIU S Y, MA X Y, LI J Z. Indole metabolism mechanisms in a new, efficient indole-degrading facultative anaerobe isolate *Enterococcus hirae* GDIAS-5 [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 434: 128890. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2022.128890.
- [51] 卢钰升, 顾文杰, 徐培智, 解开治, 石超宏, 杨少海. 有机固体废弃物生物转化技术研究进展 [J]. 广东农业科学, 2020, 47(11):162–170. DOI: 10.16768/j.issn.1004-874X.2020.11.018.
- LU Y S, GU W J, XU P Z, XIE K Z, SHI C H, YANG S H. Research Progress in Bioconversion Technologies for Organic Solid Waste [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2020, 47(11):162–170. DOI: 10.16768/j.issn.1004-874X.2020.11.018.
- [52] 黄金枝, 胡桂萍, 俞燕芳, 杜贤明, 石旭平, 王军文. 微生物在农业废弃物堆肥应用中的研究进展 [J]. 广东农业科学, 2019, 46(1):64–70. DOI: 10.16768/j.issn.1004-874X.2019.01.010.
- HUANG J Z, HU G P, YU Y F, DU X M, SHI X P, WANG J W. Research progress of microbe in agricultural waste composting [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2019, 46(1): 64–70. DOI: 10.16768/j.issn.1004-874X.2019.01.010.
- [53] XU J Q, LU Y Y, SHAN G C, HE X S, HUANG J H, LI Q L. Inoculation with compost-born thermophilic complex microbial consortium induced organic matters degradation while reduced nitrogen loss during co-composting of dairy manure and sugarcane leaves [J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2019, 10(9):2467–2477. DOI: 10.1007/s12649-018-0293-y.
- [54] WEI Y, WU D, WEI D, ZHAO Y, WU J, XIE X, ZHANG R, WEI Z. Improved lignocellulose-degrading performance during straw composting from diverse sources with actinomycetes inoculation by regulating the key enzyme activities [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 271:66–74. DOI: 10.1016/j.biortech.2018.09.081.
- [55] XU Z, LI R, WU S, HE Q, LING Z, LIU T, WANG Q, ZHANG Z, QUAN F. Cattle manure compost humification process by inoculation ammonia-oxidizing bacteria [J]. *Bioresource Technology*, 2022, 344(Pt B):126314. DOI: 10.1016/j.biortech.2021.126314.
- [56] WAN L, WANG X, CONG C, LI J, XU Y, LI X, HOU F, WU Y, WANG L. Effect of inoculating microorganisms in chicken manure composting with maize straw [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 301:122730. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.122730.
- [57] HEIDARZADEH M H, AMANI H, JAVADIAN B. Improving municipal solid waste compost process by cycle time reduction through inoculation of *Aspergillus niger* [J]. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 2019, 17(1):295–303. DOI: 10.1007/s40201-019-00348-z.
- [58] AKYOL C, INCE O, BOZAN M, OZBAYRAM E G, INCE B. Biological pretreatment with *Trametes versicolor* to enhance methane production from lignocellulosic biomass: A metagenomic approach [J]. *Industrial Crops and Products*, 2019, 140: 111659. DOI: 10.1016/j.indcrop.2019.111659.
- [59] ZULKIFLI Z, RASIT N, UMOR N A, ISMAIL S. The effect of *A. Fumigatus* SK1 and *trichoderma* sp. on the biogas production from cow manure [J]. *Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 2018, 14(3):353–359. DOI: 10.11113/mjfas.v14n3.1066.
- [60] YILDLIRIM E, INCE O, AYDIN S, INCE B. Improvement of biogas potential of anaerobic digesters using rumen fungi [J]. *Renewable Energy*, 2017, 109: 346–353. DOI: 10.1016/j.renene.2017.03.021.
- [61] 王渝昆, 袁月祥, 李东, 胡亚东, 黄显波, 文昊深, 刘晓风, 彭绪华, 同志英. 产甲烷复合菌剂的性能评价及中试试验产气效果 [J]. 农业工程学报, 2014, 30(16):247–255. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2014.16.032.
- WANG Y K, YUAN Y X, LI D, HU Y D, HUANG X B, WEN H S, LIU X F, PENG X Y, YAN Z Y. Performance evaluation of methanogenic compound agent and its gas production effect in pilot test [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(16):247–255. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2014.16.032.
- [62] LI Q. Progress in microbial degradation of feather waste [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2019, 10:2717. DOI: 10.3389/fmich.2019.02717.
- [63] LI Z W, LIANG S, KE Y, DENG J J, ZHANG M S, LU D L, LI J Z, LUO X C. The feather degradation mechanisms of a new *Streptomyces* sp. isolate SCUT-3 [J]. *Communications Biology*, 2020, 3(1):191. DOI: 10.1038/s42003-020-0918-0.
- [64] LIANG S, DENG J J, ZHANG M S, LUO Z Y, LU W J, LU D L, MAO H H, LI Z W, LI J Z, LUO X C. Promotion of feather waste recycling by enhancing the reducing power and keratinase activity of *Streptomyces* sp. SCUT-3 [J]. *Green Chemistry*, 2021, 23(14): 5166–5178. DOI: 10.1039/dlge00677k.
- [65] SINI T K, SANTHOSH S, MATHEW P T. Study on the production of chitin and chitosan from shrimp shell by using *Bacillus subtilis* fermentation [J]. *Carbohydrate Research*, 2007, 342(16):2423–2429. DOI: 10.1016/j.carres.2007.06.028.
- [66] XIE J, XIE W, YU J, XIN R, SHI Z, SONG L, YANG X. Extraction

- of chitin from shrimp shell by successive two-step fermentation of *Exiguobacterium profundum* and *Lactobacillus acidophilus* [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2021,12:677126.DOI: 10.3389/fmicb.2021.677126.
- [67] HUANG C H, LIN C H, HUANG H H, TSAI G J. Development of fermented shrimp shell product with hypoglycemic and hypolipidemic effects on diabetic rats [J]. *Metabolites*, 2022,12(8):695.DOI: 10.3390/metabol12080695.
- [68] DENG J J, SHI D, MAO H H, LI Z W, LIANG S, KE Y, LUO X C. Heterologous expression and characterization of an antifungal chitinase (Chit46) from *Trichoderma harzianum* GIM 3.442 and its application in colloidal chitin conversion [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 134:113–121.DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2019.04.177.
- [69] DENG J J, MAO H H, FANG W, LI Z Q, SHI D, LI Z W, ZHOU T, LUO X C. Enzymatic conversion and recovery of protein, chitin, and astaxanthin from shrimp shell waste [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020,271: 122655.DOI:10.1016/j.jclepro.2020.122655.
- [70] DENG J J, ZHANG M S, LI Z W, LU D L, MAO H H, ZHU M J, LI J Z, LUO X C. One-step processing of shrimp shell waste with a chitinase fused to a carbohydrate-binding module [J].*Green Chemistry*, 2020,22(20):6862–6873.DOI:10.1039/d0gc02611e.
- [71] DENG J J, LI Z Q, MO Z Q, XU S, MAO H H, SHI D, LI Z W, DAN X M, LUO X C. Immunomodulatory effects of N-Acetyl chitooligosaccharides on RAW264.7 macrophages [J].*Mar Drugs*, 2020,18(8):421. DOI: 10.3390/md18080421.

(责任编辑 白雪娜)



邓俊劲，博士，助理研究员，研究方向为微生物资源对农业废弃物处理与资源化利用，近期的研究重点是畜禽养殖中的臭味消除。近两年主持国家自然科学基金、中国博士后科学基金和广东省自然科学基金等项目5项。近5年发表SCI论文10篇，其中第一作者8篇，共同第一作者1篇。申请发明专利10项，获授权5项。参与研发的生物质降解技术“超级改造菌降解农业含氮废弃物（羽毛、虾蟹壳、鱼皮）高值化利用”获得2022年度广东省农业微生物领域十大可应用转化重大科技成果奖。



陈庄，研究员，学科带头人，现任广东省农业科技战略专家，国家、广东省和浙江省自然科学基金评审专家。主要从事畜牧胃肠道微生物、畜牧营养调控研究。在农业微生态制剂研究开发和动物基因编辑等方面有深入研究，曾担任畜牧育种国家重点实验室副主任，是业内公认学术造诣高、工作业绩突出的专业技术人员。主持省部级以上科技项目10余项，作为首席科学家主持国家“973”重大项目农业生物技术及农产品加工科学问题，在国内外期刊累计发表论文80余篇，申请发明专利18项。参编广东省第一部动物转基因专著《转基因动物》(1995)。获科技成果转化多项，其中省部级以上成果奖励4项，包括农业部农业科技创新团队奖、广东省农业技术推广二等奖、广东省自然科学三等奖和广东省科技进步三等奖。