

李盛, 沈丹, 张杰, 等. 微生物制剂在畜禽舍有害气体减排中的应用研究进展 [J]. 畜牧与兽医, 2024, 56 (4): 132-138.

LI S, SHEN D, ZHANG J, et al. Research progress in microbial preparations in harmful gas emission reduction in livestock house [J]. Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2024, 56 (4): 132-138.

微生物制剂在畜禽舍有害气体减排中的应用研究进展

李盛, 沈丹, 张杰, 刘俊泽, 李春梅*

(南京农业大学动物科技学院, 江苏 南京 210095)

摘要: 养殖环境是影响畜禽健康和生长的关键因素。畜禽舍内有害气体来源广、危害大, 是畜牧业发展所面临的重要挑战。最近的研究表明, 微生物制剂在有害气体控制方面具有重要作用, 包括在饲料中添加、喷洒于畜禽舍内或堆积的粪便上, 均能够直接或间接地减少有害气体产生和排放。本文从源头减量、末端减排和堆肥发酵 3 个方面对微生物制剂在有害气体减排中的应用进行综述, 并基于目前的研究基础总结了微生物制剂在畜牧产业应用上面临的挑战和未来发展方向, 旨在为我国畜禽养殖产业转型升级与可持续发展提供理论依据。

关键词: 微生物制剂; 畜禽养殖; 有害气体

中图分类号: S816.7 文献标志码: A 文章编号: 0529-5130(2024)04-0132-07

Research progress in microbial preparations in harmful gas emission reduction in livestock house

LI Sheng, SHEN Dan, ZHANG Jie, LIU Junze, LI Chunmei*

(College of Animal Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Environmental factors play a critical role in the health and growth performance of livestock and poultry. Harmful gases in livestock and poultry houses originate from an array of diverse sources and pose significant risks, presenting a critical challenge to the advancement of animal husbandry. In addressing this issue, microbial preparations have emerged as promising tools for controlling these harmful gases, including adding those preparations to feed, spraying them on livestock houses or using them in piled manure, all of which can directly or indirectly reduce the generation and emission of harmful gases. This article provides a comprehensive review of the application of microbial preparations in reducing harmful gases, focusing on three main aspects: source reduction, terminal emission reduction, and composting fermentation. Moreover, this article systematically summarizes the key challenges and proposes future directions by synthesizing the current research findings pertaining to the application of microbial preparations in the field of animal husbandry. The aim is to establish a theoretical framework that can facilitate the transformation, enhancement, and sustainable development of the livestock and poultry industry in China.

Keywords: microbial preparations; animal husbandry; harmful gas

近年来, 随着畜禽养殖业的快速发展, 集约化、规模化的现代养殖模式对畜禽舍空气质量提出了更高的要求。然而由于集约化养殖模式养殖密度大、笼架空间结构狭窄、空气流动性差以及通风不畅等特点, 容易导致畜禽舍中有害气体聚集。畜禽舍中的有害气体包括 NH_3 、 H_2S 、 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 和粪臭素等, 其中 NH_3 、 CO_2 和 H_2S 是最主要的有害气体。据我国 NY/T 388—1999《畜禽场空气环境质量标准》,

NH_3 、 CO_2 和 H_2S 浓度在成年禽舍不应超过 15、1 500 和 10 mg/m^3 , 猪舍不应超过 25、1 500 和 10 mg/m^3 。在实际生产中, Ni 等^[1]监测了粪坑式(粪便直接落入笼架下方粪坑中并储存长达 1 年或更长时间)和粪带式(粪便收集在每层笼网下方粪带上, 经由粪带输送到粪便干燥隧道中处理) 2 种叠层笼养蛋鸡养殖舍中的有害气体水平, 发现舍内 NH_3 浓度分别达到 21.8~23.2 mg/m^3 和 5.8~5.9 mg/m^3 , CO_2 平均浓度分别达到 1 724~1 772 mg/m^3 和 2 244~2 254 mg/m^3 。沈丹等^[2]对笼养肉鸡舍进行监测发现, NH_3 和 CO_2 的最高浓度分别达到 1.2 mg/m^3 和 3 000 mg/m^3 。Wathes 等^[3]报道了肉鸡舍内 NH_3 的平均浓度在 4.11~4.38 mg/m^3 之间, 而在冬季通风不足的条件下肉鸡舍的 NH_3 浓度能够达到 14~36 mg/m^3 。Guarrasi 等^[4]

收稿日期: 2023-05-16; 修回日期: 2024-01-20

基金项目: 江苏现代农业(肉鸡)产业技术体系环境控制创新团队 [JATS (2023) 437]

第一作者: 李盛, 男, 博士研究生

* 通信作者: 李春梅, 教授, 博士生导师, 主要从事畜禽养殖环境控制与智慧生产研究, E-mail: chunmeili@njau.edu.cn。

总结了其他研究的相关报道,指出禽舍内 H_2S 浓度范围为 $0\sim 9.16\text{ ppm}$ ($0\sim 13.89\text{ mg/m}^3$), 加权平均值为 0.33 ppm (约 0.5 mg/m^3), 猪舍中 H_2S 浓度范围为 $0\sim 97\text{ ppm}$ ($0\sim 147.15\text{ mg/m}^3$), 加权平均值为 0.01 ppm (约 0.015 mg/m^3)。Ni 等^[5]报道了猪舍中 H_2S 的平均浓度为 $30.54\times 10^{-3}\sim 430.71\times 10^{-3}\text{ mg/m}^3$ 。由此可见,在集约化、规模化的现代养殖模式下,舍内有害气体水平往往接近或超过限值。因此,了解有害气体的来源及危害,并且探寻高效改善畜禽舍的空气质量的方法是当前健康养殖发展亟待解决的问题。

1 畜禽舍有害气体的来源和危害

1.1 NH_3

NH_3 是一种具有刺激性味道的无色气体,也是养殖生产中最常见的有害气体之一。畜禽舍中 NH_3 排放主要来自于含氮有机物的分解和发酵,例如畜禽胃肠道中摄入的饲料蛋白经由消化道蛋白酶和微生物酶分解成氨基酸和多肽,而没有被吸收利用的蛋白质和氨基酸会经脱氨基作用分解产生 NH_3 , 但因为肉鸡的消化道比较短,食物在消化道内停留的时间并不长,所以在肉鸡消化道中产生的 NH_3 量较少。另一方面,畜禽舍中饲料残渣、垫料以及粪尿堆积在微生物的作用下将其中的含氮有机物降解产生大量 NH_3 。据报道,畜牧生产中 NH_3 的排放占据总排放量的 75%, 畜禽舍中 NH_3 的大量积聚降低了空气质量并严重威胁了动物及工作人员的健康。有研究表明,连续 30 d 的 NH_3 暴露 [(89.8 ± 0.6) mg/m^3 , 8 h/d] 会破坏猪呼吸道的黏膜屏障,诱发氧化应激和炎症反应,从而破坏气管组织功能^[6]。低水平的 NH_3 (约 5.32 mg/m^3) 暴露 14 d 足以引起肉鸡生长性能下降^[7]。当舍内 NH_3 浓度高于 11.38 mg/m^3 时,肉鸡眼部受到刺激,挠头行为增加^[8]。 NH_3 浓度达到 18.97 mg/m^3 以上时,家禽的肺组织形态严重损伤,炎症浸润水平增加^[9]。Miles 等^[10]的研究同样证实鸡舍内 NH_3 浓度超过 11.16 mg/m^3 时能够导致鸡生产性能下降,死亡率升高。此外, NH_3 能够入侵动物和人的免疫系统,引发免疫细胞凋亡,进而降低机体的抗病能力^[11]。

1.2 CO_2

CO_2 是一种无色无味的温室气体,密度比空气大,因此容易沉积在畜禽舍下方。畜禽舍中 CO_2 排放主要来源于动物自身的呼吸作用以及粪便、饲料中有机物的分解。在肉鸡养殖过程中, CO_2 排放量随着日龄的增加直线上升^[12]。猪舍中的 CO_2 排放量主要受外界环境、猪的数量和种类、猪舍体积以及粪便存储时间等因素影响^[13]。 CO_2 本身没有明显毒性,并且正

常浓度范围内的 CO_2 对畜禽生长没有不利影响,但是当 CO_2 浓度过高时会导致舍内氧气含量降低。畜禽长期处于缺氧环境中容易导致精神不振,食欲下降,生产性能降低以及免疫功能障碍等症状。陈春林等^[14]的研究指出,当鸡舍 CO_2 浓度达到 8 000、12 000、15 000 mg/m^3 时,死亡率分别升高 50%、150.32% 和 100.32%。戴荣国等^[15]的研究同样表明,舍内 CO_2 浓度超过约 12 000 mg/m^3 时,肉鸡的日增重和饲料转化率即受到一定的抑制作用,鸡出现明显的呼吸性酸中毒表现,并且伴随有呼吸系统和循环系统损伤。另一项试验中评估了肉鸡在育雏期接收渐进浓度梯度 (约 5 490.82、10 981.64 和 16 472.46 mg/m^3) 的 CO_2 暴露后的肉鸡生长性能和生理变量,发现随着 CO_2 浓度增加肉鸡的死亡率逐渐提升^[16]。此外,高浓度的 CO_2 将导致致死后的猪出现瘀斑,肌肉 pH 值、乳酸含量以及滴水损失发生明显变化,极大影响猪肉的品质^[17]。

1.3 H_2S

H_2S 易溶于水和乙醇,是一种无色易燃、具有臭鸡蛋气味的有害气体。畜禽舍内 H_2S 主要由粪便、饲料和垫料中的含硫有机物在厌氧微生物的作用下分解产生。其次,当畜禽无法充分消化饲料中的蛋白质,其消化道中可排出大量的 H_2S 。对于家禽而言,禽舍中破损的鸡蛋也是 H_2S 产生的来源之一。 H_2S 的毒性较强,对黏膜具有刺激和腐蚀作用。低浓度的 H_2S 即可引起肉鸡角膜炎、结膜炎、呼吸道黏膜损伤、气管炎等相关疾病。高浓度的 H_2S 可诱发神经系统功能紊乱、呼吸中枢神经麻痹并进一步导致窒息。据报道,暴露于 8~12 ppm ($12\sim 18\text{ mg/m}^3$) H_2S 条件下的肉鸡表现出更低的生长性能和受损的体液免疫功能和细胞免疫功能^[18]。在其他研究中,15 mg/m^3 H_2S 短时间内即能够引起断奶仔猪肝功能和心功能损伤,长时间暴露还会导致肺部炎症性损伤,死亡率升高^[19]。

畜禽舍内有害气体来源广、易蓄积、危害大,舍内有害气体的减排防控对于养殖业绿色安全可持续发展至关重要。为此,养殖生产过程中需要提高饲养管理水平,加强舍内通风,及时清除粪便以及霉变饲料、垫料。除此之外,根据有害气体的来源和聚集特点,采用有害气体吸附剂、微生物制剂等方法降低舍内有害气体浓度逐渐成为畜禽舍环境改良的重要手段。

2 微生物制剂种类

微生物制剂又被称益生菌、益生菌和活菌制剂

等。根据不同菌株的功能和生理特性,微生物制剂具有促进畜禽生长、防治胃肠道疾病、增强机体免疫能力和减少有害气体排放等多种作用。按照微生物的种类可分为单一微生物制剂(如芽胞杆菌、乳酸杆菌、酵母菌等)以及复合微生物制剂。

2.1 单一微生物制剂

芽胞杆菌在自然界以及动物胃肠道中均有广泛分布,具有耐高温、耐酸、抗逆性强等特点,在有氧和无氧条件下都能够存活。此外,研究表明芽胞杆菌对人畜均无明显毒性作用^[20],对环境也没有污染,这些特点使其能够作为良好的微生物制剂^[21]。据报道,芽胞杆菌能够产生多种抗生素和酶,不仅能够提高生产性能^[22],还能够调节畜禽肠道中含硫有机物的分解,从而降低有害气体的排放^[23]。

乳酸杆菌是一种革兰阳性菌,能够在厌氧条件下将碳水化合物代谢为乳酸。乳酸杆菌在自然界、动物口腔和胃肠道中大量存在,对人无害,也是生产中应用最早的微生物制剂之一,在食品生产、青贮饲料、畜牧养殖等过程广泛使用。饲用乳酸杆菌可以改善畜禽机体代谢,提高动物的免疫能力,维护肠道的菌群平衡^[24]。除此之外,乳酸杆菌具有抑制氨合成的能力,能够有效降低猪舍 NH_3 的含量^[25]。

酵母菌是单细胞真菌,属于兼性厌氧微生物,在有氧和无氧条件下都能够存活。酵母菌由于其自身有益特性并且培养、制备方便快捷,被广泛用于食品加工过程。研究表明,酵母菌能够分泌多种类型的消化酶类,能够协同分解肠道的营养物质,促进机体消化吸收,提高畜禽生产性能^[26]。

2.2 复合微生物制剂

复合微生物制剂由两种或以上的益生菌复合加工而成。相比于单一菌种,复合微生物制剂能够融合多种益生菌的特点,对环境具有更强的适应性,并且能够通过优势菌群、生物拮抗等作用改善肠道微生物环境,增强免疫能力,促进营养物质的消化吸收,起到促生长和防病的作用。Kalavathy 等^[27]通过将 12 种乳酸杆菌复合添加到肉鸡饲料中,发现这种微生物制剂能够明显提高肉鸡的生产性能。高新磊等^[28]将乳酸杆菌与枯草芽胞杆菌加工成为复合微生物制剂并在舍内进行喷洒,结果指出复合微生物制剂能够提高肉鸡生长性能,增强免疫力,并有效改善舍内的空气质量水平。与单一微生物制剂相比,复合微生物制剂中各种益生菌之间存在的互作效应能够增强整体效果,因此不同搭配的微生物组合往往能够发挥不同的作用。蒙琦等^[29]比较了不同配比的复合微生物制剂的有害气体减排功效,发现各组合微生物制剂均能够有效降低粪便中 NH_3 和 H_2S 水平,尤其以酵母菌+枯草芽胞

杆菌+乳酸片球菌+双歧杆菌(2:2:2:1)配比组合效果最为显著。在实际生产中,根据畜禽种类、年龄、环境等因素进行复合微生物制剂的动态配比对于实现其最大功效具有重要意义。

3 微生物制剂在有害气体减排中的作用

目前,针对于畜禽舍有害气体的减排防控主要从源头减量、末端减排和堆肥发酵 3 个方面进行控制。微生物制剂依赖微生物本身对于含氮、含硫有机物的降解以及微生物之间共生、竞争和拮抗关系,具有抑制腐败菌生长、减少有害气体释放的作用,因此在有害气体减排的 3 种途径中均发挥重要作用。

3.1 微生物制剂在源头减量中的作用

微生物制剂的有害气体源头减量作用是在畜禽饲料中添加微生物制剂,通过降低脲酶、尿素氮、尿酸等有害气体前体物质含量,减少有害气体的排放。微生物制剂的饲喂还可以增加畜禽胃肠道内有益菌的丰度,提高畜禽对摄入养分的消化吸收能力,从而减少排泄物中有机物含量,发挥有害气体减排的作用。此外,部分微生物还具有代谢有害气体的作用,利用胃肠道中代谢产生的 NH_3 、 H_2S 和 CH_4 等合成菌体蛋白作为畜禽养分,不仅增加了饲料利用率,还能够减少废气排放。在目前无抗养殖的大背景下,饲用微生物制剂在源头减排中的作用和优势愈发突显。诸多研究表明,饲料中添加枯草芽胞杆菌对改善畜禽舍空气质量,减少有害气体排放具有重要作用。枯草芽胞杆菌能够促进肠道内有益菌增殖,提高 NH_3 的有效利用率,从而减少舍内 NH_3 的排放^[30]。王建斌等^[31]研究发现,添加枯草芽胞杆菌能够显著降低排泄物中总氮和尿素氮含量,从而抑制含氮有机物分解产生 NH_3 的过程。另据研究报道,在肉鸡日粮中分别补充添加粪肠球菌^[32]、枯草芽胞杆菌不同菌株^[33]或者淀粉样芽胞杆菌^[34]对粪便中 NH_3 和 H_2S 合成和排放具有明显抑制作用,并且这种抑制作用呈剂量依赖性增加。相比之下,复合微生物制剂由于各种微生物之间具有优势互补、协同促进的作用,往往比单一微生物的使用效果更佳^[35]。据报道,饲料中添加由乳酸菌、酵母菌和芽胞杆菌组成的复合微生物制剂能够提高断奶仔猪的消化率,降低腹泻率和粪便中有害气体 H_2S 的排放^[36]。Liu 等^[37]在断奶仔猪饲料中添加包含枯草芽胞杆菌和粪肠球菌的复合微生物制剂,发现微生物制剂增加了营养物质的表观消化率,并且显著降低了粪便中 NH_3 的浓度。Lan 等^[38]的研究结果同样指出,饲料补充双歧杆菌、地衣芽胞杆菌、枯草芽胞杆菌和丁酸梭菌混合物对断奶仔猪生长性能和营养消化率均有积极作用,并且混合微生物制剂改变了粪便中乳酸

菌和大肠杆菌的比例,进而降低粪便中 NH_3 、 H_2S 和总硫醇排放量。刘辉等^[39]在鸡的基础日粮中添加由芽胞杆菌、酵母菌和曲霉菌等益生菌组成的复合菌,舍内空气质量得到明显的改善,其中 NH_3 减少了73.5%。Zhang等^[40]报道了嗜酸乳杆菌、枯草芽胞杆菌和酪酸梭菌的复合制剂改善了肉鸡的生产性能和氨基酸消化率,降低了其排泄物中 NH_3 水平。在饮水中添加以乳酸菌和芽胞杆菌为主的复合微生物制剂能够将鸭舍内 NH_3 浓度下调50%左右, CO_2 浓度也有一定程度的降低^[41]。

3.2 微生物制剂在末端减排中的作用

有害气体的末端减排主要通过通过对饲养过程中所产生的排泄物、废水和腐败饲料等发酵处理,达到将氨、硫化物等恶臭气体吸收利用或控制减排的效果,从而改善空气环境质量。粪便和污水中有害菌的繁殖是畜禽舍内有害气体的主要原因之一,将微生物制剂喷洒至畜禽舍内,利用微生物制剂中的有益菌群和有害菌群进行竞争,抑制畜禽舍内有害菌的生长、增殖,从而减少有害气体的排放。而面对畜禽舍内复杂的环境,复合微生物制剂适应性强的特点使其能够更好地发挥作用。已有研究指出,喷洒含有枯草芽胞杆菌、乳酸杆菌、乳球菌等制成的复合微生物制剂喷雾,短时间内显著降低了粪便中 NH_3 和 CO_2 浓度,而长时间的喷洒处理进一步降低了粪便 H_2S 、甲基硫醇浓度^[42]。规模化肉鸡舍内每日喷洒 $10\text{ mL}/\text{m}^2$ 以枯草芽胞杆菌和植物乳杆菌为主要成分的复合微生物能够显著降低舍内空气中大肠杆菌的比例,减少 NH_3 和 H_2S 的浓度,并且研究指出在喷洒后5 h舍内有害气体浓度最低^[28]。本实验室前期研究评估了肉鸡舍内 NH_3 的排放规律,并以此为基础探究了喷洒微生物制剂对冬季肉鸡舍内 NH_3 浓度的影响,发现微生物制剂的喷洒即时地降低了舍内的 NH_3 浓度,并且在1 d时间内形成先降低后升高的循环变化规律^[43]。张刚等^[44]通过舍内雾化设备喷洒由乳酸菌、芽胞杆菌、酶制剂、酵母菌制成的复合微生物产品,评估了微生物制剂对猪舍空气质量参数的影响,发现随着微生物制剂使用时间的增加,舍内 NH_3 和 H_2S 浓度逐渐降低。席磊等^[45]比较了由枯草芽胞杆菌、乳酸杆菌和酵母菌组成的复合微生物制剂与传统的苯扎溴铵消毒剂的功效,结果表明,喷洒复合微生物制剂较苯扎溴铵能更有效地降低鸭舍中 NH_3 浓度与活菌数。与上述报道相似,陈静等^[46]研究表明由放线菌、乳酸菌和芽胞杆菌为主要成分的微生物制剂较化学消毒剂聚维酮碘能显著降低鸡舍内 H_2S 水平,但是对舍内 CO_2 含量没有明显的影响。崔艳等^[47]在蛋鸡饲料中添

加微生物制剂(包括枯草芽胞杆菌、纳豆芽胞菌、乳酸菌和酵母菌),并结合环境喷雾处理(主要成分为光合细菌、酵母菌、乳酸菌和丝状真菌),结果指出在整个试验期内舍内 NH_3 和 CO_2 浓度分别降低了90%和50%,而微生物制剂对舍内 CO_2 排放的差异影响可能与微生物制剂使用方式、复合微生物制剂的组成、气体测定时间和方法存在关联性。由此可见,选择适宜的菌株以及将源头减量和末端减排相结合似乎能够更有成效地发挥微生物制剂的有害气体减排作用。

3.3 微生物制剂在堆肥发酵中的作用

堆肥发酵处理是利用畜禽粪便中自然存在的细菌、真菌和放线菌等微生物,有控制地促进固体废弃物中可生物降解的有机物向稳定的类腐殖质转化的微生物学过程。然而,在自然堆肥过程中有害菌的滋生和繁殖会延长堆体腐熟时间并产生大量有害气体,如 NH_3 、 SO_2 、 H_2S 和有机胺化合物。在堆肥发酵中添加微生物制剂不仅能够将部分气体吸收作为营养物质分解,加速堆体腐熟,还能够通过微生物之间的共生、繁殖及协同作用抑制腐败微生物及病原菌的繁殖,并将粪便中的有机物分解为乳酸、乙酸等小分子酸性物质,从而实现有害气体减排的目的。与畜禽生产过程中利用的菌株不同,堆肥过程产生高温、强酸环境并不利于所有菌生长,因此筛选可用于堆肥发酵的高效菌株是减少有害气体排放的重要手段。Ma等^[48]从猪粪中筛选出与有害气体产生相关的菌株反硝化副球菌、地衣芽胞杆菌和酿酒酵母,其组合成的复合微生物制剂具有高效的发酵减排效率,其中 NH_3 和 H_2S 气体去除率最高可达58.99%和74.85%。Kuroda等^[49]通过分析粪便堆肥中的微生物组成,筛选并分离出嗜热芽胞杆菌TAT105,具有极高的氨氮耐受性并且可以将堆肥中 NH_3 的排放量降低20%以上。Park等^[50]从猪粪浆样品中筛选分离出植物乳杆菌菌株,孵育5 h后 NH_3 的去除效率最高达到50.19%。陈书安等^[51]从菜园、果园、山坡土壤、河底湖底污泥和堆肥中分别分离得到的中温细菌、放线菌、酵母菌和耐高温细菌,可以减少鸡粪 NH_3 释放量64%以上和 H_2S 释放量50%以上。有研究指出,在堆肥中添加微生物制剂能够加速堆体升温,延长堆体在高温阶段的持续时间,充分杀灭堆体中有害微生物和芽胞,从而减少有害气体的释放^[52]。张智等^[53]在鸡粪好氧堆肥中加入不同微生物制剂,发现不仅提高了堆肥温度,加速了堆体的腐熟,而且不同的微生物制剂均显著降低了堆体中 NH_3 、 SO_2 和脂肪胺类气体的排放。卢彬等^[54]对比了正常稻壳牛粪堆肥和添加复合微生物制剂的牛粪堆肥中各物理、化学指标有害气体

的排放量,结果表明,接种复合微生物制剂能够加速堆体升温,减少 CH_4 和 N_2O 气体含量。

整体来看,微生物制剂主要是通过调节畜禽体内以及粪便排泄物中微生物的组成从而发挥其功能作用,而复合微生物制剂由于其优异的促生长作用和有害气体减排能力,具有广阔的应用前景。究其原因,一方面复合微生物制剂的源头添加能够更加有效改变畜禽消化道微生物的定植和组成,通过调整有益菌的比例以及代谢物和后生元的水平,改善畜禽的肠道健康,并增加养分的消化、吸收^[55]。消化道微生物对于机体摄入养分的二次利用减少了含硫、含氮等成分的流失,减少了粪便排泄物中有机成分的含量,从而降低有害气体的产生^[38]。另一方面,复合微生物制剂对于环境具有更强的适应性,使其无论在畜禽舍内或高温发酵堆体中都能够有效发挥作用,通过微生物制剂中的有益菌群和有害菌群进行竞争,抑制产生有害气体的细菌生长、增殖,从而实现有害气体减排的目的^[49]。

4 微生物制剂面临的挑战和发展方向

近年来,随着畜禽养殖业的发展以及无抗养殖理念的推广,微生物制剂逐渐进入大众视野,针对微生物制剂的开发与应用也日益增加。微生物制剂在畜牧产业中的优点和效用已经被广泛报道,除了提高生产性能^[56],增强免疫能力^[57],对畜禽舍中有害气体的减排也具有一定的积极作用^[35]。然而,不可否认的是微生物制剂的应用效果存在一定的不稳定性 and 可变性。不同环境条件、饲养管理方式以及动物种类等因素会对微生物制剂的作用产生影响,因此需要进一步研究和优化微生物制剂的配方和应用方式,以提高其稳定性和适应性。其次,微生物制剂的应用成本较高。生产、存储和应用微生物制剂需要一定的技术和设备支持,增加了养殖成本。因此,需要开展经济性评估和成本效益分析,探索降低微生物制剂应用成本的途径,以促进其在畜禽舍有害气体减排中的广泛应用。此外,到目前为止,国内可用于畜禽舍有害气体控制减排的微生物制剂种类较少,菌株品种单一,并且微生物制剂的制作和加工工艺手段落后,尚需进一步优化从开发到应用的全套产业体系。

微生物制剂在有害气体减控方面的未来发展方向应注重多学科交叉,以畜牧产业需求为基础,运用现代分子生物学和生化技术开发高效、稳定的微生物制剂。针对不同的有害气体,可以选择具有特定功能的菌株进行筛选和优化,以开发精准、高效的微生物制剂。同时,优化微生物制剂的配方和培养条件,提高其存活率和适应性,以应对复杂的养殖环境。探索微

生物制剂与其他减排技术的联合应用,将微生物制剂与其他减排技术(如通风设备、废气处理系统等)相结合,形成协同效应,进一步提高有害气体减排效果。此外,还可以与饲料添加剂、饲养管理措施等相结合,综合实施多种减排措施,实现更好的环境保护和生产效益。

5 结论

综上所述,在畜禽养殖业高标准、大规模发展的同时,对舍内空气环境质量的要求逐渐增加,畜禽养殖过程中舍内有害气体来源广、危害大,而微生物制剂能够通过源头减量、末端减排和堆肥发酵3种方式在畜禽舍有害气体减排中发挥重要作用,为畜牧业安全、健康、绿色可持续发展提供有力保障。

参考文献:

- [1] NI J Q, CHAI L, CHEN L, et al. Characteristics of ammonia, hydrogen sulfide, carbon dioxide, and particulate matter concentrations in high-rise and manure-belt layer hen houses [J]. *Atmos Environ*, 2012, 57: 165-174.
- [2] 沈丹, 戴鹏远, 吴胜, 等. 冬季封闭式肉种鸡舍空气颗粒物、氨气和二氧化碳分布特点及 $\text{PM}_{2.5}$ 理化特性分析 [J]. *畜牧兽医学报*, 2018, 49 (6): 1178-1193.
- [3] WATHES C M, HOLDEN M R, SNEATH R W, et al. Concentrations and emission rates of aerial ammonia, nitrous oxide, methane, carbon dioxide, dust and endotoxin in UK broiler and layer houses [J]. *Br Poult Sci*, 1997, 38 (1): 14-28.
- [4] GUARRASI J, TRASK C, KIRYCHUK S. A systematic review of occupational exposure to hydrogen sulfide in livestock operations [J]. *J Agromedicine*, 2015, 20 (2): 225-236.
- [5] NI J Q, HEBER A J, DIEHL C A, et al. Summertime concentrations and emissions of hydrogen sulfide at a mechanically ventilated swine finishing building [J]. *Transactions of the ASAE*, 2002, 45 (1): 193.
- [6] WANG H, ZENG X, ZHANG X, et al. Ammonia exposure induces oxidative stress and inflammation by destroying the microtubule structures and the balance of solute carriers in the trachea of pigs [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2021, 212: 111974.
- [7] HAN H, ZHOU Y, LIU Q, et al. Effects of ammonia on gut microbiota and growth performance of broiler chickens [J]. *Animals (Basel)*, 2021, 11 (6): 1716.
- [8] LIU Q X, ZHANG M H, ZHOU Y, et al. Broilers' head behavior as an early warning index of production and lung health under ammonia exposure [J]. *Poult Sci*, 2021, 100 (3): 100814.
- [9] WANG G, LIU Q, ZHOU Y, et al. Effects of different ammonia concentrations on pulmonary microbial flora, lung tissue mucosal morphology, inflammatory cytokines, and neurotransmitters of broilers [J]. *Animals (Basel)*, 2022, 12 (3): 261.
- [10] MILES D M, MILLER W W, BRANTONS S L, et al. Ocular responses to ammonia in broiler chickens [J]. *Avian Diseases*,

- 2006, 50 (1): 45-49.
- [11] SHAH S W A, CHEN D, ZHANG J, et al. The effect of ammonia exposure on energy metabolism and mitochondrial dynamic proteins in chicken thymus: through oxidative stress, apoptosis, and autophagy [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2020, 206: 111413.
- [12] 张晓迪, 朱丽媛, 卢庆萍, 等. 网上平养模式下肉鸡温室气体排放的研究 [J]. *畜牧兽医学报*, 2017, 48 (1): 108-115.
- [13] NI J Q, HEBER A J, LIM T T, et al. Methane and carbon dioxide emission from two pig finishing barns [J]. *J Environ Qual*, 2008, 37 (6): 2001-2011.
- [14] 陈春林, 戴荣国, 周晓容, 等. 鸡舍 CO₂ 浓度对肉鸡血液生化指标的影响 [J]. *家畜生态学报*, 2009, 30 (2): 59-61.
- [15] 戴荣国, 周晓容, 彭祥伟, 等. CO₂ 浓度对肉鸡生产性能、体液免疫及血液指标的影响 [J]. *西南大学学报 (自然科学版)*, 2009, 31 (8): 21-27.
- [16] OLANREWaju H A, DOZIER W A, PURSWELL J L, et al. Growth performance and physiological variables for broiler chickens subjected to short-term elevated carbon dioxide concentrations [J]. *J Poult Sci*, 2008, 7 (8): 738-742.
- [17] LLONCH P, RODRIGUEZ P, GISPert M, et al. Stunning pigs with nitrogen and carbon dioxide mixtures: effects on animal welfare and meat quality [J]. *Animal*, 2012, 6 (4): 668-675.
- [18] 孟庆平. 不同硫化氢浓度对肉仔鸡生长性能、免疫功能和肉质的影响 [D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
- [19] 谢彦娇. 外源硫化氢暴露对断奶仔猪生长健康及其体内代谢的影响 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2021.
- [20] MISHRA S, ARORA N K. Evaluation of rhizospheric *Pseudomonas* and *Bacillus* as biocontrol tool for *Xanthomonas campestris* pv *campestris* [J]. *World J Microbiol Biotechnol*, 2012, 28 (2): 693-702.
- [21] 朱瑾, 朱红军, 曲湘勇. 畜禽臭气危害及枯草芽胞杆菌在畜禽生产中的应用 [J]. *畜牧与兽医*, 2019, 51 (10): 127-130.
- [22] LEE S H, INGALE S L, KIM J S, et al. Effects of dietary supplementation with *Bacillus subtilis* LS 1-2 fermentation biomass on growth performance, nutrient digestibility, cecal microbiota and intestinal morphology of weanling pig [J]. *Anim Feed Sci Tech*, 2014, 188: 102-110.
- [23] LEE J H, LEE J. Indole as an intercellular signal in microbial communities [J]. *Fems Microbiol Rev*, 2010, 34 (4): 426-444.
- [24] 宋盈, 王光强. 乳酸杆菌制剂的作用机理及在动物生产中的应用 [J]. *山东畜牧兽医*, 2012, 33 (12): 20-23.
- [25] 张旋. 益生菌发酵对饲料品质、猪粪菌菌群和猪舍有害气体的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- [26] BILAL R M, HASSAN F U, SAEED M, et al. Role of yeast and yeast-derived products as feed additives in broiler nutrition [J]. *Anim Biotechnol*, 2023, 34 (2): 392-401.
- [27] KALAVATHY R, ABDULLAH N, JALALUDIN S, et al. Effects of *Lactobacillus* cultures on growth performance, abdominal fat deposition, serum lipids and weight of organs of broiler chickens [J]. *Brit Poultry Sci*, 2003, 44 (1): 139-144.
- [28] 高新磊, 王学静, 刘彦慈, 等. 复合益生菌喷雾制剂对肉鸡生产性能、免疫功能、鸡舍空气微生物及有害气体的影响 [J]. *中国家禽*, 2022, 44 (8): 51-56.
- [29] 蒙琦, 刘瑞生, 徐建峰, 等. 复合微生物添加剂对肉鸡圈舍有害气体浓度的影响 [J]. *饲料研究*, 2021, 44 (21): 47-51.
- [30] 张露. 肉鸡饲用微生物除臭剂的研究 [D]. 保定: 河北农业大学, 2015.
- [31] 王建彬, 刘晋娟, 李小红, 等. 枯草杆菌培养物降低养鸡场氨气排放的研究报告 [J]. *当代畜牧*, 2008, 175 (11): 50-52.
- [32] LAN R X, LEE S I, KIM I H. Effects of enterococcus faecium SLB 120 on growth performance, blood parameters, relative organ weight, breast muscle meat quality, excreta microbiota shedding, and noxious gas emission in broilers [J]. *Poult Sci*, 2017, 96 (9): 3246-3253.
- [33] PARK J H, KIM I H. The effects of the supplementation of *Bacillus subtilis* RX7 and B2A strains on the performance, blood profiles, intestinal *Salmonella* concentration, noxious gas emission, organ weight and breast meat quality of broiler challenged with *Salmonella typhimurium* [J]. *J Anim Physiol Anim Nutr (Berl)*, 2015, 99 (2): 326-334.
- [34] AHMED S T, ISLAM M, MUN H S, et al. Effects of bacillus amyloliquefaciens as a probiotic strain on growth performance, cecal microflora, and fecal noxious gas emissions of broiler chickens [J]. *Poult Sci*, 2014, 93 (8): 1963-1971.
- [35] KWOJI I D, AIYEGORO OA, OKPEKU M, et al. Multi-strain probiotics: synergy among isolates enhances biological activities [J]. *Biology (Basel)*, 2021, 10 (4): 322.
- [36] ZHAO P, LI H, LEI Y, et al. Effect of fermented medicinal plants on growth performance, nutrient digestibility, fecal noxious gas emissions, and diarrhea score in weanling pigs [J]. *J Sci Food Agric*, 2016, 96 (4): 1269-1274.
- [37] LIU J B, CAO S C, LIU J, et al. Effect of probiotics and xylo-oligosaccharide supplementation on nutrient digestibility, intestinal health and noxious gas emission in weanling pigs [J]. *Asian Austral J Anim*, 2018, 31 (10): 1660-1669.
- [38] LAN R X, LEE S I, KIM I H. Effects of multistrain probiotics on growth performance, nutrient digestibility, blood profiles, faecal microbial shedding, faecal score and noxious gas emission in weaning pigs [J]. *J Anim Physiol Anim Nutr (Berl)*, 2016, 100 (6): 1130-1138.
- [39] 刘辉, 李祥明, 高迎春, 等. 中药植物和微生态制剂对鸡舍环境优化作用的研究 [J]. *西南农业学报*, 2008, 214 (4): 1156-1159.
- [40] ZHANG Z F, KIM I H. Effects of multistrain probiotics on growth performance, apparent ileal nutrient digestibility, blood characteristics, cecal microbial shedding, and excreta odor contents in broilers [J]. *Poult Sci*, 2014, 93 (2): 364-370.
- [41] 陈登科, 李丽立, 张彬, 等. 不同饲料添加剂对樱桃谷鸭生长性能及鸭舍有害气体含量的影响 [J]. *生态学杂志*, 2009, 28 (8): 1499-1504.
- [42] SURESHKUMAR S, PARK J H, KIM I H. A preliminary evaluation on mixed probiotics as an antimicrobial spraying agent in growing pig barn [J]. *J Anim Sci Technol*, 2022, 64 (6): 1035-1045.
- [43] 张杰, 李明阳, 锁云鹏, 等. 微生物制剂对冬季鸡舍 NH₃ 和 CO₂ 浓度的影响 [J]. *畜牧与兽医*, 2023, 55 (6): 35-40.
- [44] 张刚, 陈晓安, 王刚, 等. 益生菌对改善养猪环境的生产应用试验 [J]. *湖南畜牧兽医*, 2019, 211 (3): 45-47.
- [45] 席磊, 王永芬, 石志芳, 等. 复合益生菌生物消毒剂的制备及其在肉鸭生产中的应用 [J]. *西北农林科技大学学报 (自然科*

- 学版), 2015, 43 (7): 41-48.
- [46] 陈静, 刘乃芝, 徐辉, 等. 微生物喷雾剂改善笼养蛋鸡舍环境的效果 [J]. 中国饲料, 2014, 511 (11): 19-22.
- [47] 崔艳, 张士海, 巴良兴, 等. 微生物制剂对育成期蛋鸡生长性能及舍内空气质量的影响 [J]. 当代畜禽养殖业, 2021, 464 (5): 12-16.
- [48] MA H, LI F, NIYITANGA E, et al. The odor release regularity of livestock and poultry manure and the screening of deodorizing strains [J]. Microorganisms, 2021, 9 (12): 2488.
- [49] KURODA K, WAKI M, YASUDA T, et al. Utilization of *Bacillus* sp. strain TAT105 as a biological additive to reduce ammonia emissions during composting of swine feces [J]. Biosci Biotechnol Biochem, 2015, 79 (10): 1702-1711.
- [50] PARK K M, KIM J D. Effectiveness of *Lactobacillus plantarum* strain KJ-10311 to remove characteristic malodorous gases in piggery slurry [J]. Asian Austral J Anim, 2006, 19 (1): 144-152.
- [51] 陈书安, 黄为一. 除臭微生物分离及效果测定 [J]. 上海环境科学, 2002, 21 (9): 571-573, 582.
- [52] 李昌宁, 苏明, 姚拓, 等. 微生物菌剂对猪粪堆肥过程中堆肥理化性质和优势细菌群落的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26 (09): 1600-1611.
- [53] 张智, 乔艳, 陈云峰, 等. 不同菌剂对鸡粪堆肥过程中有害气体排放的影响 [J]. 中国农业科技导报, 2021, 23 (12): 145-150.
- [54] 卢彬, 武肖媛. 复合微生物菌剂对高温堆肥进程及有害气体排放的影响 [J]. 过程工程学报, 2018, 18 (增刊1): 122-128.
- [55] LI H Y, ZHOU D D, GAN R Y, et al. Effects and mechanisms of probiotics, prebiotics, synbiotics, and postbiotics on metabolic diseases targeting gut microbiota: a narrative review [J]. Nutrients, 2021, 13 (9): 3211.
- [56] GADDE U, KIM W H, OH S T, et al. Alternatives to antibiotics for maximizing growth performance and feed efficiency in poultry: a review [J]. Anim Health Res Rev, 2017, 18 (1): 26-45.
- [57] KOBER A K M H, RIAZ RAJOKA M S, MEHWISH H M, et al. Immunomodulation potential of probiotics: a novel strategy for improving livestock health, immunity, and productivity [J]. Microorganisms, 2022, 10 (2): 388.