

酵母硒在畜禽生产中的应用研究进展

谭龙娟^{1,2}, 叶金玲³, 艾建安^{1,2*}

(1. 广东省农业科学院农业经济与农村发展研究所, 广东广州 510640; 2. 农业农村部华南都市农业重点实验室, 广东广州 510640; 3. 广东省农业科学院动物科学研究所, 畜禽育种国家重点实验室, 农业农村部华南动物营养与饲料重点实验室, 广东省动物育种与营养公共实验室, 广东省畜禽育种与营养研究重点实验室, 广东广州 510640)

摘要 酵母硒是一种优质的有机硒源, 与无机硒相比具有生物利用率高、安全、低毒等特点, 可以提高畜禽的生长性能和繁殖性能, 加强免疫力及改善肉质等。综述了酵母硒的主要作用及其在畜禽生产实践中的应用现状, 以为为畜禽生产提供一定的参考。

关键词 酵母硒; 畜禽生产; 应用

中图分类号 S816 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2020)21-0013-03

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2020.21.004



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Research Progress on Application of Yeast Selenium in Livestock and Poultry Production

TAN Long-juan^{1,2}, YE Jin-ling³, AI Jian-an^{1,2} (1. Institute of Agricultural Economy and Rural Development, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou, Guangdong 510640; 2. Key Laboratory of Urban Agriculture of South China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangzhou, Guangdong 510640; 3. Guangdong Key Laboratory of Animal Breeding and Nutrition, Guangdong Public Laboratory of Animal Breeding and Nutrition, Key Laboratory of Animal Nutrition and Feed Science in South China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, State Key Laboratory of Livestock and Poultry Breeding, Institute of Animal Science, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou, Guangdong 510640)

Abstract Yeast selenium is a high-quality organic selenium source. It has characteristics of higher bioavailability, safety and low toxicity compared with inorganic selenium. Yeast selenium can improve the growth performance, reproduction performance, immunity, and meat quality of livestock and poultry. This paper summarized the main functions of yeast selenium and the current status of application in livestock and poultry production, so as to provide some references for livestock and poultry production.

Key words Yeast selenium; Livestock and poultry production; Application

硒是动物生长发育所必需的微量元素之一, 对动物机体有抗氧化、增强免疫力、提高肉质等重要作用。饲用硒源制剂有无机硒(如亚硒酸钠等)和有机硒(如酵母硒和硒代蛋氨酸等)2种形式, 目前在国内外畜禽生产中亚硒酸钠作为无机硒的主要代表因其价格低廉应用最为广泛。但是, 由于无机硒生物利用率较低且容易污染环境, 而有机硒在生物学效价和安全方面较大的改善, 因此用有机硒源替代无机硒源成为动物营养学研究热点之一。近年来, 国内外学者做了大量研究, 进一步加深了对有机硒的认识^[1]。酵母硒作为一种优质的有机硒源, 因养殖效果好、生物利用率高、安全, 必将有着广阔的应用前景。笔者综述了酵母硒在畜禽生产中的应用, 以为广大养殖生产者在畜禽生产过程中合理使用酵母硒提供指导。

1 酵母硒的主要作用

1.1 抗氧化作用 硒主要的生理功能是参与硒蛋白质等的合成。其中, 谷胱甘肽过氧化物酶(glutathione peroxidase, GSH-Px)作为一种重要的硒蛋白质, 能有效清除动物机体内的过氧化氢或脂质过氧化物, 从而保护机体免受过氧化作用引起的损伤, 发挥抗氧化功能, 有利于动物繁殖性能与后代生长性能。在妊娠后期和哺乳期补充酵母培养物和酵母硒产品, 不仅可以提高营养受限母猪的抗氧化能力和乳汁含

量, 增强其繁殖性能, 而且提高了仔猪的生长性能^[2]。大量研究表明, 与无机硒相比, 酵母硒的抗氧化作用更加明显。陈国顺等^[3]研究了不同来源、同一水平硒对肉鸡抗氧化性能的影响, 发现处理 21 d 时, 添加 0.30 mg/kg 酵母硒组肉鸡血清中 GSH-Px 活性显著高于亚硒酸钠组, 与亚硒酸钠组相比 42 日龄时酵母硒组的血清总超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)活性和抑制羟自由基能力明显升高, 且丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量显著降低, 表明酵母硒对肉鸡抗氧化性能的提高要优于亚硒酸钠。郭元晟等^[4]研究表明, 与对照组(0.30 mg/kg 亚硒酸钠)相比, 不同水平(0.30、0.60、0.90 mg/kg)酵母硒均能不同程度提高肉羊血清 GSH-Px、SOD 的活性, 降低 MDA 的含量, 表明日粮中添加酵母硒增强蒙古羊抗氧化性能, 以添加量 0.60、0.90 mg/kg 2 组效果最为明显, 且 2 组间无明显差异。林长光等^[5]研究发现与日粮添加亚硒酸钠相比, 酵母硒对断奶仔猪总抗氧化能力(total antioxidant capacity, T-AOC)有更好的提高作用, 且以 0.50 mg/kg 酵母硒效果最优。

1.2 加强免疫力 酵母硒能有效加强动物机体的免疫力(包括细胞免疫和体液免疫), 达到减少疾病的侵袭。仔猪缺乏硒会导致免疫抑制, 影响淋巴细胞的增殖及免疫球蛋白(IgA、IgG、IgM)水平和抗体效价, 使机体受感染风险上升^[6]。郭元晟等^[4]研究了酵母硒对蒙古羊免疫能力的影响, 结果表明与日粮中添加 0.30 mg/kg 亚硒酸钠相比, 添加不同水平(0.30、0.60、0.90 mg/kg)酵母硒在 60 d 时均能不同程度提高血清中 IgG、IgM 和 IgA 的含量, 且以添加量 0.60 mg/kg 效果最佳。邢焕等^[7]探究了葡萄糖氧化酶和酵母硒混合添加

基金项目 广东省农业科技创新及推广项目(2018LM1091); 广州市科技计划项目(201906030002)。

作者简介 谭龙娟(1990—), 女, 江苏徐州人, 研究实习员, 硕士, 从事畜牧业生产与农业规划研究。* 通信作者, 副研究员, 硕士, 从事农业产业发展研究。

收稿日期 2020-06-18

剂对肉鸡免疫指标的影响,结果发现,与对照组相比,21日龄时试验组中肉鸡法氏囊指数明显升高,42日龄时试验组显著提高肉鸡胸腺指数,法氏囊指数和脾脏指数也有一定提高。在妊娠期和哺乳期向母羊提供酵母硒也是将硒传递给新生幼畜的一种有效途径,有助于增强新生幼畜免疫力^[8]。

1.3 促进生长,改善肉质 酵母硒可以促进动物的生长,更好地改善肉色和系水力。肉品质受品种、营养等多种因素的共同影响,营养调控是改善肉品质的重要手段。王前光等^[9]发现与0.30 mg/kg亚硒酸钠组相比,同一水平酵母硒组豪猪的平均日增重(average daily gain, ADG)显著升高,肝脏和肌肉中的硒含量极显著增加。李晓丽等^[10]研究表明日粮添加0.30~0.40 mg/kg酵母硒能显著提高海兰褐壳蛋鸡产蛋率和平均蛋质量,并降低料蛋比和破蛋率,添加酵母硒组均可以显著改善蛋白质高度、蛋壳强度、哈氏单位及蛋黄颜色,以日粮中添加0.30 mg/kg酵母硒效果最优。葡萄糖氧化酶能将葡萄糖转化为葡萄糖酸,同时产生过氧化氢,能够降低动物肠道pH,有利于提高生长性能等,与酵母硒联用有很好的饲养效果。孙春阳等^[11]研究表明在不同日龄阶段(1~21、22~42、1~42日龄),葡萄糖氧化酶与酵母硒组肉鸡ADG、平均日采食量(average daily feed intake, ADFI)均显著升高,且料重比显著降低;21、42日龄时,试验组肉鸡胸肌肉色 a 值显著高于对照组,肉色 b 值显著低于对照组,说明饲喂含酵母硒的复合添加剂日粮可以提高肉仔鸡的生长性能,并能改善肉品质。

1.4 促繁殖作用 母猪日粮中补充酵母硒能提高其繁殖性能,此外能向新生仔猪组织中转移更多的硒。母猪乳汁中硒含量的提高,可使哺乳仔猪获得更多有机硒,促进仔猪生长,提高其免疫力,减少疾病的发生,因此提高母乳中硒的存留量具有重要作用^[12]。王宇萍等^[13]研究表明,与0.30 mg/kg亚硒酸钠组相比,0.20 mg/kg酵母硒组有改善藏母猪繁殖性能的作用,平均断奶窝重、断奶个体重和母猪泌乳力均极显著增加。此外,酵母硒组能显著提高初乳、常乳以及藏仔猪肾脏、肝脏和肌肉等组织中硒含量。

2 酵母硒在畜禽生产上的应用

2.1 酵母硒在养猪生产上的应用 罗霄等^[14]研究发现不同水平的酵母硒(0.15、0.30、0.60 mg/kg)均能显著增加仔猪的ADG,饲料利用率比对照组都有所提高,而且不同剂量酵母硒组仔猪腹泻率低、健康状况良好。酵母硒各组仔猪血清中IgG、IgA、IgM、 C_3 、 C_4 含量均显著高于对照组。试验28d后,不同添加量酵母硒组均极显著提高了GPX-Px、T-AOC活性和SOD含量,且酵母硒各组极显著降低了MDA含量,其中以0.30 mg/kg添加量效果最佳。张洁等^[15]研究表明,与对照组和0.10 mg/kg酵母硒组相比,0.30和0.50 mg/kg酵母硒组断奶仔猪的末重、ADG、平均日采食量、料重比和腹泻率均显著改善,0.30、0.50 mg/kg酵母硒组各项指标差异不显著,综合成本等因素,以0.30 mg/kg酵母硒组添加效果最理想。蔡世林等^[16]研究表明,断奶仔猪日粮中添加0.30~0.60 mg/kg酵母硒显著降低了料重比,同时提高了血清抗氧

化能力和养分表观消化率。酵母硒较无机硒还能抑制仔猪消化道内大肠杆菌数量,减少腹泻的发生^[17]。以上研究结果表明,在断奶仔猪日粮中添加酵母硒可以显著改善仔猪的免疫水平,提高抗病能力,减少发生腹泻的风险。同时,酵母硒的添加还有改善仔猪生长性能的效果。

在生长期肥猪日粮中应用酵母硒,能提高其抗氧化能力,改善猪肉肉色,延长货架期,还能提高组织中的硒存留量。日粮中适量补充酵母硒可以改善育肥猪的抗氧化能力和肉质,但不影响育肥猪的生长性能^[18]。罗文有等^[19]研究表明,与对照组相比,不同添加量酵母硒(0.10、0.30、0.50 mg/kg)明显提高了生长育肥猪肌肉的保水作用,滴水损失分别降低了7.55%、9.43%和6.92%,以0.30 mg/kg效果最佳且能显著改善肉色;不同水平的酵母硒能极显著提高GSH-Px活性,显著提高T-AOC、T-SOD和CAT活性,0.30 mg/kg酵母硒能显著降低MDA含量。权群学等^[20]研究表明,饲喂含硒饲料后育肥猪血液及猪毛中硒含量均明显上升,0.25 mg/kg酵母硒组硒含量显著高于同水平无机硒。赵世锋^[21]发现日粮中添加0.30 mg/kg酵母硒对屠宰前生猪的代谢效果比亚硒酸钠要好。日粮中添加0.50 mg/kg酵母硒能增加烟台黑猪肌肉中亚油酸、油酸含量,提高肌肉中硒的沉积等^[22],这与Mateo等^[23]研究结果相似。

日粮添加硒有提高母猪生产性能的作用,并起到预防仔猪缺硒的效果。林金玉等^[24]研究表明,与0.50 mg/kg亚硒酸钠组相比,0.50 mg/kg酵母硒组母猪的生产性能有所提高,母猪的后代初生窝重、断奶体重、断奶窝重、窝增重、平均日增重均显著升高;酵母硒组中母猪和哺乳仔猪血清中IgG、IgA含量比亚硒酸钠组显著升高。Fortier等^[25]研究发现,与0.30 mg/kg亚硒酸钠组相比,同一水平酵母硒组初产母猪血液中硒含量显著升高,GSH-Px活性也显著增加,且酵母硒组胚胎硒含量和胚胎的长度、重量、蛋白质含量均高于亚硒酸钠组。

2.2 酵母硒在反刍动物生产上的应用 山羊日粮中添加0.60 mg/kg酵母硒能改善其生长性能,提高屠宰率和肉品质^[26]。日粮中添加0.20 mg/kg酵母硒可以显著提高杜寒杂交羊的平均日增重,且料重比显著降低,尿素氮含量也明显降低;当酵母硒添加量增至0.80 mg/kg时,会降低杜寒杂交羊的生长性能,甚至导致其中毒^[27]。日粮中添加0.20、0.30 mg/kg酵母硒均能有效改善母羊的繁殖性能,可为严重缺硒地区繁殖母羊补充硒源提供有效方案^[28]。陈晓梅等^[29]在奶牛日粮中添加0.1%酵母硒,结果发现日均产奶量、乳脂率、乳蛋白质率、乳糖率、乳干物质率分别提高了13.01%、7.80%、9.60%、2.69%和9.13%,料奶比降低了5.21%,表明酵母硒能提高奶牛的产奶性能以及乳品质。与亚硒酸钠相比,日粮中添加0.30 mg/kg酵母硒能够提高奶牛全血和奶中硒含量,还有增强其抗氧化能力,改善免疫功能^[30]。

2.3 酵母硒在家禽生产上的应用 与无机硒相比,日粮中添加0.20 mg/kg酵母硒可以明显增加肉鸡的体重,说明酵母硒能被快速生长的肉鸡充分利用^[31]。日粮中添加

0.45 mg/kg 酵母硒能提高母鸡的产蛋量、蛋重和孵化率,增加小鸡的存活率,表明酵母硒对母鸡生产性能和繁殖性能有明显的促进作用^[32]。齐香萍等^[33]研究发现,与亚硒酸钠(0.40、0.80 mg/kg)相比,蛋鸡日粮中添加同等硒水平的酵母硒能显著提高鸡蛋硒含量,且日粮添加酵母硒 0.80 mg/kg 仍对蛋鸡生产性能无不良影响。贺森等^[34]研究表明,0.30 mg/kg 酵母硒较同一硒水平的亚硒酸钠能显著增加鸡蛋硒沉积,还能减少粪硒的排泄量,增强蛋鸡对硒的利用,而对 19~22 周龄蛋鸡的生产性能无显著影响。王娜^[35]研究表明,日粮添加 0.30 mg/kg 酵母硒对 817 肉鸡免疫器官指数有明显增加作用,对生产性能有一定的促进作用,但差异不显著。蛋鸡日粮中添加 0.1%~0.3% 的酵母硒能提高热应激下蛋鸡鸡蛋品质,以 0.2% 为最佳添加量^[36]。在亚麻籽日粮中添加 0.60 mg/kg 酵母硒可以增强蛋鸡肝脏的抗氧化能力,增加鸡蛋硒含量^[37]。齐志国等^[38]研究发现,相比于亚硒酸钠,日粮中添加 0.20 mg/kg 酵母硒在提高鸡蛋硒沉积和延长鸡蛋货架期方面效果更好。周建军等^[39]研究结果类似,酵母硒较无机硒更能增加鸡蛋的硒沉积量。此外,研究发现日粮中添加 0.40、0.80 mg/kg 酵母硒对临武鸭的产蛋性能无负面影响,而且均可以提高其抗氧化能力,增加蛋硒和血清硒的含量,还能延长蛋硒存留时间,最适添加量为 0.40 mg/kg^[40]。

3 结语

在畜禽生产实践中,与无机硒相比,日粮中添加酵母硒能起到增强畜禽的抗氧化能力,提高机体免疫和抗应激水平以及促进繁殖性能及后代生长性能等作用,且能改善肉品质,增加肌肉等组织中硒存留量,不失为解决缺硒地区民众健康的一条有效途径,还能在一定程度上预防幼小畜禽缺硒,有效降低畜禽腹泄率,提高其存活率。因此,加大酵母硒的研究力度与开发应用具有重要的现实意义。

参考文献

- [1] SURAI P F, FISININ V I. Selenium in pig nutrition and reproduction: Boars and semen quality-A review[J]. *Asian-Australasian journal of animal sciences*, 2015, 28(5): 730-746.
- [2] ZHANG S H, WU Z H, HENG J H, et al. Combined yeast culture and organic selenium supplementation during late gestation and lactation improve preweaning piglet performance by enhancing the antioxidant capacity and milk content in nutrient-restricted sows[J]. *Animal nutrition*, 2020, 6(2): 160-167.
- [3] 陈国顺, 吴劲峰, 李冲. 不同来源硒对肉鸡生产性能、免疫功能和抗氧化性能的影响[J]. *中国家禽*, 2014, 36(11): 22-25.
- [4] 郭元晟, 张敏. 有机硒对蒙古羊生长性能、抗氧化性能及免疫机能的影响[J]. *饲料工业*, 2015, 36(13): 41-45.
- [5] 林长光, 林金玉, 刘东霞, 等. 不同硒源对断奶仔猪生长性能、血清抗氧化能力和血浆硒含量的影响[J]. *畜牧兽医学报*, 2013, 44(11): 1790-1796.
- [6] 鲁志勇, 聂昌林, 姜建阳, 等. 酵母硒在猪生产中的应用研究进展[J]. *中国饲料*, 2013(6): 29-31.
- [7] 邢焱, 孙春阳, 栾素军, 等. 葡萄糖氧化酶和酵母硒混合添加剂对肉鸡生产性能和免疫指标的影响[J]. *动物营养学报*, 2015, 27(4): 1236-1242.
- [8] STEWART W C, BOBE G, VORACHEK W R, et al. Organic and inorganic selenium; IV. Passive transfer of immunoglobulin from ewe to lamb[J]. *Journal of animal science*, 2013, 91(4): 1791-1800.
- [9] 王前光, 刘秋, 张保平, 等. 不同硒源及硒水平对 10~11 月龄豪猪生长性能及组织硒含量的影响[J]. *中国畜牧兽医*, 2014, 41(7): 118-121.
- [10] 李晓丽, 何万领, 位治国, 等. 酵母硒对蛋鸡生产性能、血清生化指标及常规蛋品质的影响[J]. *中国兽医学报*, 2015, 35(11): 1835-1839.
- [11] 孙春阳, 邢焱, 栾素军, 等. 葡萄糖氧化酶和酵母硒复合添加剂对肉鸡生长性能、抗氧化性能及肉品质的影响[J]. *动物营养学报*, 2014, 26(9): 2789-2796.
- [12] CLOSE W H. Organic selenium may improve sow, piglet performance[J]. *Feedstuffs*, 2003, 75(8): 12.
- [13] 王宇萍, 杨鹏标. 酵母硒、无机硒对不同品种母猪繁殖性能、仔猪组织中硒沉积影响的研究[J]. *中国畜牧兽医*, 2013, 40(12): 161-164.
- [14] 罗霄, 方俊, 刘刚, 等. 日粮中添加酵母硒对断奶仔猪生长性能及抗氧化性能的影响[J]. *饲料工业*, 2015, 36(6): 6-10.
- [15] 张洁, 梁兴龙, 杨晋青, 等. 有机酵母硒对断奶仔猪生产性能的影响[J]. *山西农业科学*, 2015, 43(7): 885-887.
- [16] 蔡世林, 李元凤, 周婷, 等. 酵母硒对断奶仔猪生长性能和养分消化率的影响[J]. *养猪*, 2020(1): 11-13.
- [17] 吕良康, 熊奕, 张慧, 等. 酵母硒对感染沙门氏杆菌仔猪生长性能及粪便中大肠杆菌数量的影响[J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2020(4): 44-47.
- [18] CHEN J, TIAN M, GUAN W T, et al. Increasing selenium supplementation to a moderately-reduced energy and protein diet improves antioxidant status and meat quality without affecting growth performance in finishing pigs[J]. *Journal of trace elements in medicine and biology*, 2019, 56: 38-45.
- [19] 罗文有, 边连全, 刘显军, 等. 酵母硒对保育猪肉品质及抗氧化能力的影响[J]. *饲料研究*, 2013(3): 1-3.
- [20] 权群学, 赵世峰, 魏仁铃, 等. 不同硒源与添加时间对保育猪血硒及猪毛硒含量的影响[J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2015(17): 129-130.
- [21] 赵世峰. 亚硒酸钠与酵母硒在猪营养代谢中的比较研究[J]. *陕西农业科学*, 2017, 63(2): 14-16.
- [22] 唐敏, 宋俊森, 李少宁, 等. 营养水平和酵母硒对烟台黑猪屠宰性能及肉品质的影响[J]. *中国畜牧杂志*, 2018, 54(5): 84-90.
- [23] MATEO R D, SPALLHOLZ J E, ELDER R, et al. Efficacy of dietary selenium sources on growth and carcass characteristics of growing-finishing pigs fed diets containing high endogenous selenium[J]. *Journal of animal science*, 2007, 85(5): 1177-1183.
- [24] 林金玉, 林长光, 詹桂兰, 等. 不同硒源对泌乳期母猪生产性能、甲状腺激素水平和免疫功能的影响[J]. *华南农业大学学报*, 2015, 36(1): 1-8.
- [25] FORTIER M E, AUDET I, GIGUERE A, et al. Effect of dietary organic and inorganic selenium on antioxidant status, embryo development, and reproductive performance in hyperovulatory first-parity gilts[J]. *Journal of animal science*, 2012, 90(1): 231-240.
- [26] AGHWAN Z A, SAZILI A Q, KADHIM K K, et al. Effects of dietary supplementation of selenium and iodine on growth performance, carcass characteristics and histology of thyroid gland in goats[J]. *Animal science journal*, 2016, 87(5): 690-696.
- [27] 张永翠, 程光民, 何孟蓬, 等. 饲料中添加酵母硒对杜寒杂交羊生长性能、氮代谢、屠宰性能及肉品质的影响[J]. *动物营养学报*, 2019, 31(12): 5562-5570.
- [28] 王烁, 郑健, 李洪杰, 等. 辽西地区舍饲肉用母羊体内血液硒水平及补硒效果研究[J]. *现代畜牧兽医*, 2020(3): 30-33.
- [29] 陈晓梅, 徐国庆. 酵母硒对奶牛产奶性能和乳品质的影响[J]. *中国畜牧种业*, 2019, 15(8): 85-86.
- [30] GONG J, NI L L, WANG D F, et al. Effect of dietary organic selenium on milk selenium concentration and antioxidant and immune status in mid-lactation dairy cows[J]. *Livestock science*, 2014, 170: 84-90.
- [31] UPTON J R, EDENS F W, FERKET P R. Selenium yeast effect on broiler performance[J]. *International journal of poultry science*, 2008, 7(8): 798-805.
- [32] EMAMVERDI M, ZARE-SHAHNEH A, ZHANDI M, et al. An improvement in productive and reproductive performance of aged broiler breeder hens by dietary supplementation of organic selenium[J]. *Theriogenology*, 2019, 126: 279-285.
- [33] 齐香萍, 张海斌, 张瑞锋. 不同硒源对蛋鸡生产性能和硒沉积的影响[J]. *中国饲料*, 2019(16): 60-63.
- [34] 贺森, 张新, 廖仙青, 等. 酵母硒对海兰褐商品代蛋鸡产蛋性能、蛋硒沉积和硒利用率的影响[J]. *中国饲料*, 2020(5): 113-117.
- [35] 王娜. 酵母硒对 817 肉鸡生产性能和免疫器官指数影响的研究[J]. *家禽科学*, 2019(10): 19-21.
- [36] 丁金雪, 贺君君, 李静, 等. 酵母硒对热应激海兰褐鸡蛋品质的影响[J]. *安徽科技学院学报*, 2017, 31(5): 15-19.
- [37] 司雪阳, 王浩, 郭晓青, 等. 亚麻籽饲料粮中添加不同水平酵母硒对蛋鸡肝脏抗氧化能力、蛋黄脂肪酸组成和蛋中硒含量的影响[J]. *动物营养学报*, 2020, 32(5): 2138-2147.

- na[J]. Clean-soil air water, 2017, 45(1): 1-7.
- [46] YANG Z H, WU Z J, LIAO Y P, et al. Combination of microbial oxidation and biogenic schwertmannite immobilization: A potential remediation for highly arsenic-contaminated soil[J]. Chemosphere, 2017, 181: 1-8.
- [47] SANTINI J M, SLY L I, SCHNAGL R D, et al. A new chemolithoautotrophic arsenite-oxidizing bacterium isolated from a gold mine: Phylogenetic, physiological, and preliminary biochemical studies[J]. Appl Environ Microbiol, 2000, 66(1): 92-97.
- [48] SANTINI J M, VANDEN HOVEN R N. Molybdenum-containing arsenite oxidase of the chemolithoautotrophic arsenite oxidizer NT-26[J]. Journal of bacteriology, 2004, 186(6): 1614-1619.
- [49] 周武先, 段媛媛, 游景茂, 等. 砷氧化菌 DWY-1 的分离鉴定及其修复砷污染水稻土的可能机理[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(12): 2746-2754.
- [50] PAUL D, PODDAR S, SAR P. Characterization of arsenite-oxidizing bacteria isolated from arsenic-contaminated groundwater of West Bengal[J]. Journal of environmental science and health: Part A, 2014, 49(13): 1481-1492.
- [51] SONG W F, DENG Q, BIN L Y, et al. Arsenite oxidation characteristics and molecular identification of arsenic-oxidizing bacteria isolated from soil[J]. Applied mechanics & materials, 2012, 188: 313-318.
- [52] BAHAR M M, MEGHARAJ M, NAIDU R. Arsenic bioremediation potential of a new arsenite-oxidizing bacterium *Stenotrophomonas* sp. MM-7 isolated from soil[J]. Biodegradation, 2012, 23(6): 803-812.
- [53] LIU X L, ZHANG Y N, LIU C Y, et al. Characterization of the antimonite- and arsenite-oxidizing bacterium *Bosea* sp. AS-1 and its potential application in arsenic removal[J]. Journal of hazardous materials, 2018, 359(5): 527-534.
- [54] ZHANG J, ZHOU W X, LIU B B, et al. Anaerobic arsenite oxidation by an autotrophic arsenite-oxidizing bacterium from an arsenic-contaminated paddy soil[J]. Environmental science & technology, 2015, 49(10): 5956-5964.
- [55] 杨孝军, 黄怡, 邱宗清, 等. 农田高效砷氧化侧孢短芽孢杆菌的分离、鉴定及其对水稻砷毒害的修复作用[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2014, 43(2): 172-177.
- [56] CORSINI A, COLOMBO M, MUYZER G, et al. Characterization of the arsenite oxidizer *Aliihoeflea* sp. strain 2WW and its potential application in the removal of arsenic from groundwater in combination with *Pf*-ferritin[J]. Antonie van Leeuwenhoek, 2015, 108(3): 673-684.
- [57] GARCIA-DOMINGUEZ E, MUMFORD A, RHINE E D, et al. Novel autotrophic arsenite-oxidizing bacteria isolated from soil and sediments[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2008, 66(2): 401-410.
- [58] OREMLAND R S, HOEFT S E, SANTINI J M, et al. Anaerobic oxidation of arsenite in mono lake water and by a facultative, arsenite-oxidizing chemolithoautotroph, strain MLHE-1[J]. Applied & environmental microbiology, 2002, 68(10): 4795-4802.
- [59] TAPASE S R, KODAM K M. Assessment of arsenic oxidation potential of *Microrhiza indica* S-M11b sp. nov. in heavy metal polluted environment[J]. Chemosphere, 2017, 195: 1-10.
- [60] WANG P P, SUN G X, JIA Y, et al. A review on completing arsenic biogeochemical cycle: Microbial volatilization of arsines in environment[J]. Journal of environmental sciences, 2014, 26(2): 371-381.
- [61] GOSIO B. Action of microphytes on solid compounds of arsenic: A recapitulation[J]. Science, 1892, 19(472): 104-106.
- [62] CHALLENGER F, HIGGINBOTOM C. The production of trimethylarsine by *Penicillium brevicaulis* (*Scopulariopsis brevicaulis*) [J]. Biochemical journal, 1935, 29(7): 1757-1778.
- [63] GUIMARÃES L H S, SEGURA F R, TONANI L, et al. Arsenic volatilization by *Aspergillus* sp. and *Penicillium* sp. isolated from rice rhizosphere as a promising eco-safe tool for arsenic mitigation[J]. Journal of environmental management, 2019, 237: 170-179.
- [64] EDVANTORO B B, NAIDU R, MEGHARAJ M, et al. Microbial formation of volatile arsenic in cattle dip site soils contaminated with arsenic and DDT[J]. Applied soil ecology, 2004, 25(3): 207-217.
- [65] KURAMATA M, SAKAKIBARA F, KATAOKA R, et al. Arsenic biotransformation by *Streptomyces* sp. isolated from rice rhizosphere[J]. Environmental microbiology, 2014, 17(6): 1897-1909.
- [66] SRIVASTAVA P K, VAISH A, DWIVEDI S, et al. Biological removal of arsenic pollution by soil fungi[J]. Science of the total environment, 2011, 409(12): 2430-2442.
- [67] QIN J, ROSEN B P, ZHANG Y, et al. Arsenic detoxification and evolution of trimethylarsine gas by a microbial arsenite S-adenosylmethionine methyltransferase[J]. Proceedings of the national academy of sciences of the United States of America, 2006, 103(7): 2075-2080.
- [68] WANG P P, BAO P, SUN G X. Identification and catalytic residues of the arsenite methyltransferase from a sulfate-reducing bacterium, *Clostridium* sp. BXM[J]. FEMS Microbiology Letters, 2015, 362(1): 1-8.
- [69] HUANG K, CHEN C, SHEN Q R, et al. Genetically engineering *Bacillus subtilis* with a heat-resistant arsenite methyltransferase for bioremediation of arsenic-contaminated organic waste[J]. Applied and environmental microbiology, 2015, 81(19): 6718-6724.
- [70] HUANG K, CHEN C, ZHANG J, et al. Efficient arsenic methylation and volatilization mediated by a novel bacterium from an arsenic-contaminated paddy soil[J]. Environmental science & technology, 2016, 50(12): 6389-6396.
- [71] HUANG H, JIA Y, SUN G X, et al. Arsenic speciation and volatilization from flooded paddy soils amended with different organic matters[J]. Environmental science & technology, 2012, 46(4): 2163-2168.
- [72] QIN J, LEHR C R, YUAN C G, et al. Biotransformation of arsenic by a Yellowstone thermoacidophilic eukaryotic alga[J]. Proceedings of the national academy of sciences of the United States of America, 2009, 106(13): 5213-5217.
- [73] YE J, CHANG Y, YAN Y, et al. Identification and characterization of the arsenite methyltransferase from a protozoan, *Tetrahymena pyriformis* [J]. Aquatic toxicology, 2014, 149: 50-57.
- [74] 吴剑, 杨柳燕, 肖琳, 等. 微生物挥发砷影响因素研究[C]//中国化学会. 第三届全国环境化学学术大会论文集. 北京: 中国化学会, 2005: 11-13.
- [75] TESSEMA D A, WONDIMU T, KOSMUS W. Study of the trend in the release of purgeable arsenic compounds from soil sample[J]. Journal of trace and microprobe techniques, 2001, 19(2): 279-288.

(上接第 15 页)

- [38] 齐志国, 王俊, 王帅, 等. 亚硒酸钠和酵母硒对蛋鸡生产性能、蛋硒含量、蛋品质的影响[J]. 中国畜牧杂志, 2019, 55(7): 117-122.
- [39] 周建军, 胡先勤, 王学东, 等. 几种不同硒源对蛋鸡生产性能、产蛋品质以及蛋硒含量的影响[J]. 饲料工业, 2018, 39(11): 38-43.
- [40] 黄璇, 李闯, 蒋桂韬, 等. 饲料中硒添加水平对产蛋高峰期临武鸭产蛋性能、蛋品质、血清抗氧化指标和蛋硒含量动态变化的影响[J]. 动物营养学报, 2017, 29(12): 4334-4341.