

# 生物有机肥在土壤改良和重金属污染修复中的研究进展\*

鲁洪娟<sup>1,2</sup> 周德林<sup>2</sup> 叶文玲<sup>1,2</sup> 樊霆<sup>1,2</sup> 马友华<sup>1,2#</sup>

(1.安徽农业大学资源与环境学院,安徽 合肥 230036;

2.农田生态保育与污染防治安徽省重点实验室,安徽 合肥 230036)

**摘要** 生物有机肥兼具有机肥料和微生物肥料的性质,可以培肥土壤、调控土壤微生态平衡、改善农产品品质、控制土壤中重金属的有效性,也是农业废弃物资源化利用的重要手段。综述了生物有机肥的主要特征、生物有机肥在土壤重金属污染中的修复作用,重点介绍了生物有机肥在改良土壤性质和修复重金属方面的优越性能,指出生物有机肥领域当前存在的问题,并提出未来在肥源监管、标准修订和品种研发等方面进行改进,为保障农产品的质量、有机肥料资源化利用提供参考。

**关键词** 生物有机肥 土壤改良 重金属 修复

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2019.11.022

**Advances in application of bio-organic fertilizer in soil improvement and remediation of heavy metals pollution** LU Hongjuan<sup>1,2</sup>, ZHOU Delin<sup>2</sup>, YE Wenling<sup>1,2</sup>, FAN Ting<sup>1,2</sup>, MA Youhua<sup>1,2</sup>. (1. School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei Anhui 230036; 2. Anhui Province Key Lab of Farmland Ecological Conservation and Pollution Prevention, Hefei Anhui 230036)

**Abstract:** The bio-organic fertilizer has the advantages of both organic manure and biological fertilizer. It can fertilize the soil, promote soil micro-ecological balance, improve the quality of agricultural products, control the availability of heavy metals, and it is also an important way of comprehensive utilization of agricultural wastes. This article briefly reviews the characteristics of bio-organic fertilizer and its role in reducing heavy metal pollution. It focuses on the advantages of bio-organic fertilizer in improving soil properties and also on remediation of heavy metal contaminated soils. Additionally, it points out the existing problems of bio-organic fertilizers application and the areas that need to be improved and strengthened in fertilizer source supervision, standard revision and variety research and development. This review is conducive to ensuring the quality of agricultural products. It also provides a reference for the resource utilization of many organic fertilizers.

**Keywords:** bio-organic fertilizer; soil improvement; heavy metals; remediation

化肥使用量的增加带动了粮食产量的跨越式增长,与此同时也导致土壤酸化板结、有机质减少、次生盐渍化、作物品质下降等诸多问题,与农业可持续发展策略相悖,因此化肥减量成为农业绿色发展的必然要求。原农业部于2015年制定了《到2020年化肥使用量零增长行动方案》,提出到2020年力争实现农作物化肥、农药使用量零增长,明确“有机肥部分替代化肥”的技术路径。生物有机肥是有机类肥料中的高端产品,集成了化肥、有机肥及微生物肥的优势于一体,是一种新型、高效、安全的微生物-有机复合肥料,已广泛应用于我国农业生产<sup>[1]</sup>。

农田土壤重金属污染问题日趋严重,污染程度和污染面积逐年递增。我国受重金属污染的耕地有

1 000万hm<sup>2</sup>,占耕地总面积的8%以上,导致每年粮食作物减产在1 000万t以上<sup>[2]</sup>。为此,降低土壤重金属活性、修复重金属污染土壤成为保证农产品安全的重要环节。生物有机肥兼具微生物肥料和有机肥料优点,其含有的微生物对重金属具有很强的亲和性,可与重金属形成不溶性金属-有机复合物,增加土壤的阳离子交换量,降低土壤中水溶性重金属和可交换态重金属的含量,从而降低其生物有效性,在提高农田生产力和修复重金属方面表现出非常优越的性质<sup>[3-5]</sup>。为此,本研究针对生物有机肥的主要特征、生物有机肥在土壤重金属污染中的修复作用等问题进行综述,同时指出生物有机肥领域当前存在的问题及未来改进方向,旨在为保障农产

第一作者:鲁洪娟,女,1981年生,博士,讲师,主要从事施肥与农产品安全方面的研究。\*通讯作者。

\*安徽省自然科学基金资助项目(No.1608085QD86);农田生态保育与污染防治安徽省重点实验室开放基金资助项目(No. FECPP201905);农业部农业生态环境保护重大专项(农科教发[2012]3号)。

品质安全,实现生物有机肥的资源化利用提供了参考。

## 1 生物有机肥概念及技术指标

生物有机肥是以畜禽粪便、作物秸秆等动植物残体为材料,添加促进作物生长、抑制土传病原菌生长的功能性微生物,由特定的生物技术制备而成。生物有机肥中含有大量具有特定功能的活体微生物,富含植物生长所必需的各种营养元素,其中包括大量营养元素(N、P、K)、中量营养元素(Ca、Mg、S)和微量营养元素(Fe、Mn、Cu、Zn等)以及其他对作物生长有益的元素(Si、Co、Se、Na)等,由于其合成过程需要连续数天的腐熟过程,有助于有害菌、害虫在高温下去除,肥料的卫生标准明显高于普通农家肥,肥料中微生物的生命活动及其代谢产物是生物有机肥区别于普通有机肥的关键因素<sup>[6-7]</sup>。

由于生物有机肥的来源较广,生物有机肥中可能含有一定重金属,为此我国发布《生物有机肥》(NY 884—2012),规定了生物有机肥的技术指标及5种重金属的限量要求(见表1),作为产品登记及市场监管的依据,确保生物有机肥的健康发展。

表1 生物有机肥产品技术指标及5种重金属限量要求  
Table 1 Technical indexes and limited contents of heavy metals in bio-organic fertilizers

| 项目                                           | 指标      |
|----------------------------------------------|---------|
| pH                                           | 5.5~8.5 |
| 水分/%                                         | ≤30.0   |
| 有效期/月                                        | ≥6      |
| 蛔虫卵死亡率/%                                     | ≥95     |
| 类大肠菌群数/(个·g <sup>-1</sup> )                  | ≤100    |
| 有机质 <sup>1)</sup> /%                         | ≥40.0   |
| 有效活菌数/(10 <sup>8</sup> cfu·g <sup>-1</sup> ) | ≥0.20   |
| 总砷 <sup>1)</sup> /(mg·kg <sup>-1</sup> )     | ≤15     |
| 总镉 <sup>1)</sup> /(mg·kg <sup>-1</sup> )     | ≤3      |
| 总铅 <sup>1)</sup> /(mg·kg <sup>-1</sup> )     | ≤50     |
| 总铬 <sup>1)</sup> /(mg·kg <sup>-1</sup> )     | ≤150    |
| 总汞 <sup>1)</sup> /(mg·kg <sup>-1</sup> )     | ≤2      |

注:1)以干基中的质量分数或质量浓度计。

## 2 生物有机肥对土壤性质的改良作用

生物有机肥将有机肥、化肥和微生物肥料有机的结合在一起,发挥其综合优势,通过增加土壤的有机质含量和改善土壤中微生物的生命活动,改善土壤生态条件,增加作物抗性,提高农产品品质。

### 2.1 改变土壤物理性质

生物有机肥本身携带丰富有机质,施入土壤后还可通过微生物分解土壤中的有机质形成腐殖质,

并与土壤中的黏土及钙离子结合形成有机-无机复合体,从而促进土壤水稳性团聚体结构的形成<sup>[8]</sup>。生物有机肥中的有益菌起到疏松土壤的作用,可以降低土壤容重,增加土壤孔隙度,提高土壤的田间持水量,调节土壤的供水供肥和保水保肥能力以及土壤透气性能<sup>[9]</sup>,有益菌的存在在一定程度上促进了有机质对土壤性质的改良。另外,生物有机肥颗粒多,比表面积大,微生物及类激素含量多,也会导致土壤结构变好,孔隙度增大。沈德龙等<sup>[10]</sup>研究表明,施用生物有机肥后,土壤有机质质量分数增加75.8%,容重降低12.50%,毛管孔隙度增加9.8%。随着生物有机肥施用量的增加,土壤腐殖质含量显著增加,固碳能力明显增强,水、肥、气、热的矛盾得到更好地协调<sup>[11]</sup>。生物有机肥营养全面,能更好的满足农作物对各种营养元素的需求,使植物根系发育良好,根系分泌物增多,同时通过对土壤物理结构的改善使得土壤总体耕性变好,从而更有利于改善土壤的物理性质。

### 2.2 影响土壤化学性质

大量研究表明,生物有机肥可以活化土壤养分、增加植物对养分的吸收,促进作物的营养生长和生殖生长<sup>[12]</sup>。生物有机肥的生产首先需要发酵有机物,此过程中会产生生长素、赤霉素、氨基酸、核酸以及多种维生素等,故生物有机肥富含多种生理活性物质,可以刺激作物的生长发育<sup>[13]</sup>。生物有机肥含有发酵菌和功能菌,其营养功能强,根际促生效果好,肥效也较高,可以增加豆科作物的固氮作用,增加土壤的氮素营养,同时分解土壤残留的化合态磷、钾元素,增加土壤的磷、钾素营养<sup>[14]</sup>。且生物有机肥依靠微生物的生命活动,可以促进土壤有机质的矿化,使有机养分更为快速地转化为植物可以直接吸收利用的营养元素<sup>[15-16]</sup>。赵佳等<sup>[17]</sup>发现,黄瓜连作情况下,土壤pH及有效磷、速效钾含量在施用生物有机肥后显著提高,增幅分别为6%~11%、24%~125%、15%~29%。生物有机肥通过本身有机质和微生物的综合作用解磷解钾,促进土壤必需营养元素有效性的发挥,增加土壤的大量营养元素,改善土壤的化学性质,协调土壤养分和作物营养代谢之间的关系,最终促进作物生长、改善产品品质。

### 2.3 改善土壤生物学性质

微生物是土壤中最具生命活性的部分,在物质和能量传递、养分循环利用以及土壤自我修复过程中起着非常重要的作用。生物有机肥富含有益微生物菌群,能显著改变土壤中细菌、真菌、放线菌、木霉

菌的数量,在植物根系周围形成优势微生物种群,起到抑制根际病原菌繁殖的作用;同时还可以促进蛋白质、核酸和叶绿素的合成,增强作物的抗逆性,减少病虫害发生<sup>[18-20]</sup>。张连忠等<sup>[21]</sup>和柳玲玲等<sup>[22]</sup>研究表明,施用生物有机肥后,土壤细菌、放线菌的数量分别增加 106%、102%,土壤中真菌数量明显减少,土壤向高肥力“细菌型”转变。巩子毓等<sup>[23]</sup>还发现,连续施用生物有机肥明显降低了土壤根际病原菌的数量。土壤微生物群落的变化最终影响作物产量,与单纯施用化肥相比,减量化肥配施生物有机肥处理的土壤细菌和放线菌数分别提高了 111.26%~210.76%、12.49%~34.09%,真菌数显著降低了 20.37%~39.68%,最终油菜产量提高了 4.60%~24.55%<sup>[24]</sup>,也即配施生物有机肥可以改善土壤微生物区系、改变微生物群落结构,使土壤微环境向着更健康的方向转变。

生物有机肥还可以显著提高土壤酶的活性。施用生物有机肥后,黄瓜连作土壤超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)活性分别增加 18%~42%和 47%~113%,蓝莓根区磷酸酶(ACP)、蔗糖酶、脲酶和过氧化氢酶(CAT)活性也显著升高,土壤酶的活性和土壤中一系列的生理生化反应息息相关,以上酶的活性或和土壤中养分的转化过程有关,或和植物对逆境的适应能力相联系,均最终影响到作物最终的生长发育<sup>[25-26]</sup>。另外,生物有机肥通过其携带的微生物诱导植物相关酶参与植物防御反应,有利于减少植物病虫害,改善农产品品质<sup>[27-28]</sup>。

总之,生物有机肥的有机质能有效调节土壤的物理结构、改善土壤的化学性质,增强土壤的供肥、保肥能力和缓冲性能;其丰富的微生物能加速有机质分解,促进生物有机肥中有机质作用的发挥,产生生理活性物质,提高作物的产量和品质<sup>[29]</sup>。孔涛等<sup>[30]</sup>通过实验证明,生物有机肥可显著提高小白菜的产量,小白菜产量随生物有机肥施肥量的增加而增加。JAKIENE 等<sup>[31]</sup>也发现,生物有机肥能使粮食作物增产 10%左右,果菜类增产 15%左右,以上实例均有力证明了生物有机肥在作物增产方面的重要作用。

### 3 生物有机肥在土壤重金属修复方面的作用

生物有机肥中含有的有机质和有益微生物对重金属离子均有很强的吸附作用和螯合作用,可以部分降低土壤中重金属的有效性,减少作物对重金属的吸收,因此,施用生物有机肥是重金属污染土壤钝

化修复的有效措施之一<sup>[32]</sup>。郑少玲等<sup>[33]</sup>发现,施用生物有机肥对广东菜园土上芥蓝的 Cr、Cd、Pb、Ni、Zn、Cu 含量均有明显的降低作用,证明了生物有机肥在降低土壤重金属对作物的危害方面具有一定功效。

#### 3.1 有机质对重金属的结合作用

有机质对外源重金属的结合能力与有机质含量具有良好的相关性<sup>[34]</sup>,而生物有机肥有机质含量非常丰富,最高可达 50%(质量分数),其在重金属修复上发挥重要作用。有机质的官能团,如羧基、醇羟基、烯醇羟基以及不同类型的羰基结构等,都可以通过吸附、螯合、络合等多种作用方式影响到重金属在土壤中的迁移转化<sup>[35-36]</sup>。黄擎等<sup>[37]</sup>研究发现,配施有机肥可使土壤交换态 Cd 降低 28.84%~36.33%,残渣态 Cd 降低 6.39%~19.29%,碳酸盐结合态 Cd 增加 10.95%~75.27%,有机结合态 Cd 增加 44.91%~68.31%,证明了有机质可以通过改变土壤中 Cd 的赋存形态,降低 Cd 的生物有效性,从而抑制植物对 Cd 的吸收。实验结果显示,在低、中、高剂量生物有机肥处理下,苹果根系 Cd 含量比不施生物有机肥处理分别降低了 12%、15%、24%<sup>[38]</sup>,且生物有机肥对 Cd 的降低作用随土壤 Cd 浓度的增加而越来越显著<sup>[39]</sup>,表明重金属浓度越高,生物有机肥的修复效果越明显。TIAN 等<sup>[40]</sup>研究也表明,生物有机肥可以减少植物根系对重金属的吸收,且土壤重金属含量越高,生物有机肥减少根系吸收重金属的效果越明显。

生物有机肥富含芳香结构,在腐熟化程度较高的生物有机肥中质量分数可高达 3%,芳香结构上存在大量的含氧基团和氨基,为重金属的螯合、络合提供丰富的配位基,含氧基团对重金属的静电吸附作用也降低了重金属的迁移能力<sup>[41]</sup>,即使在 pH 非常低的土壤环境中,生物有机肥的添加依旧可以降低土壤中 Cu 和 Pb 的迁移能力,有效性可达到 74.5%、61.0%<sup>[42]</sup>。有机质与重金属的作用因土壤中重金属浓度不同而不同,在重金属离子浓度较低时有机质与重金属间的作用以螯合作用为主<sup>[43]</sup>,腐殖质对重金属离子迁移能力的影响作用取决于所形成的螯合物的溶解性,由于腐殖质中的胡敏酸与重金属离子形成的螯合物一般是难溶的,因此可以降低重金属的活性<sup>[44]</sup>。如施用生物有机肥后,有机质分解产生的腐殖酸可与土壤中的  $\text{Cd}^{2+}$  形成螯合物沉淀,降低 Cd 的生物有效性,使得黑麦草中的 Cd 降低 42.71%<sup>[45]</sup>。当重金属离子浓度较高时,有机

质与重金属间的作用以交换吸附作用为主。生物有机肥中的有机质对重金属离子的吸附率很大程度上取决于 pH, 当 pH 从 6 增加到 9 时,  $\text{Cd}^{2+}$  的吸附率从 10% 快速升高到 99%, pH 为 9 时吸附率达到最大值。有机质对  $\text{Cu}^{2+}$  的吸附率在 pH 为 4~7 时急剧上升, pH 为 8~10 时吸附率达到 98% 且比较稳定, 可见降低 pH 增加了重金属的有效性, 同时降低了有机质和重金属发生吸附作用的吸附率, 这也是进行重金属修复研究时首先使用钝化剂来提高土壤 pH 的主要原因。

除了通过有机质与重金属离子发生吸附、螯合等作用外, 生物有机肥还可以通过增加土壤的阳离子交换量减少土壤中重金属的水溶态及可交换态组分的比例, 从而降低其生物有效性。另外, 土壤中有有机质具有一定的还原能力, 促进土壤溶液中 Cd、Hg 形成硫化物沉淀, 降低其毒性。

### 3.2 微生物对重金属的转化作用

生物有机肥含有大量的有益微生物, 可以提高土壤的微生物数量, 增强微生物活性, 在重金属修复方面表现出更显著的效果。

一方面, 生物有机肥施入土壤后有机质和重金属可以发生吸附作用, 有益微生物也可通过生物积累、吸附等作用降低土壤中重金属的有效性<sup>[16]</sup>。生物有机肥中的有益菌通过摄取营养元素主动吸收重金属, 或者通过带电荷的细胞表面吸附重金属, 将重金属离子富集在细胞表面或内部。生物有机肥中的有益菌可以吸附土壤中的 Pb、As, 抑制黄瓜对 Pb、As 的吸收<sup>[47]</sup>。这些有益菌还可以通过自身分泌有机酸络合并溶解重金属, 使有毒有害的金属元素转化为无毒或低毒金属沉淀物。如芽孢杆菌可以产生多糖和糖蛋白, 与 Cd、Pb 形成络合物, 产生沉淀, 降低其活性。与禽畜粪便等一些普通有机肥相比, 增加活性微生物后的生物有机肥可吸附更多的土壤重金属, 促进根域土壤对重金属的钝化, 数据显示, 生物有机肥对 Pb、Cd、Cr、As 的吸附率比普通鸡粪高 4.00%~22.94%。

另一方面, 施用生物有机肥后, 土壤发生重金属的微生物转化。大量研究表明, 微生物对重金属的抗性在很多情况下是由细胞中染色体的遗传物质——质粒或转座子抗性基因决定的, 由抗性基因编码的金属解毒酶催化高毒性金属转化成为低毒状态<sup>[48]</sup>。微生物通过氧化还原作用可以使某些重金属元素的价态发生转变, 从而使其活性和毒性降低, 或者通过根系分泌氧将根周围的重金属离子氧化而

降低其生物有效性。例如, 生物有机肥中的微生物可以将毒性较高的  $\text{Mn}^{2+}$  氧化为毒性较小的  $\text{Mn}^{4+}$ , 将高毒性的  $\text{Cr}^{6+}$  还原为低毒性的  $\text{Cr}^{3+}$ , 或使有机汞和无机汞的化合物还原为元素汞, 以此来降低其生物毒性<sup>[49]</sup>。

生物有机肥对土壤多种重金属污染均有一定程度的修复作用, 但对不同种类重金属的修复方式和修复能力不同。生物有机肥对 Cu 的降低作用高于对 Cd 的作用, 原因是 Cu 在很广的 pH 范围内均能形成非常稳定的化合物, 所以 Cu 形成金属络合物的机会更多, 生物有机肥对 Cu 的吸附作用更强, 减少根系吸收 Cu 的效果也比 Cd 更明显<sup>[50]</sup>。

## 4 生物有机肥应用存在的问题

### 4.1 肥源复杂, 需加强监控和管理

统计结果表明, 截至 2017 年 8 月, 我国生物有机肥生产企业数量约 960 家, 获得国家有关部门批准登记的产品达 1 207 个, 生产企业及产品应用遍及全国, 产业规模不断壮大。但由于生物有机肥以草炭、腐殖酸、饼粕、生活垃圾等生活、生产废弃物等为主要原材料, 成分复杂, 可能存在重金属超标和抗生素残留风险, 特别是鸡粪和猪粪等动物源为主要原料的生物有机肥抗生素含量更高, 腐熟过程不充分的产品中含有致病微生物, 会给土壤带来潜在的风险<sup>[51]</sup>。另外, 生物有机肥产品杂菌污染亦不容忽视, 近年来很多研究发现芽孢杆菌和类芽孢杆菌的部分菌株是烈性致病菌和条件致病菌, 并产生多种毒素, 存在着一定的潜在危害。

### 4.2 生物有机肥产品质控标准存在不足

NY 884—2012 对于生物有机肥产品的重金属限量提出要求, 但是对抗生素残留量并未提出限量要求, 而目前的生物有机肥产品普遍存在抗生素残留问题, 迫切需要通过相关数据资料明确其风险程度, 设定抗生素限量值, 尤其是大环内酯类和磺胺类等检查出率较高的抗生素类。

### 4.3 缺乏专用产品的研发

当前学者已发现多种功能型微生物, 如根际功能菌 SQR9 对农作物的促生效果<sup>[52]</sup>、淀粉芽孢杆菌 J-25 克服连作障碍和减轻草莓枯萎病<sup>[53]</sup>、含解淀粉芽孢杆菌 QL-18 调控番茄<sup>[54]</sup>和辣椒<sup>[55]</sup>根际微生物的区系组成等作用, 但市场上缺乏真正意义上的专用生物有机肥的研制和开发。另外, 部分生物有机肥还加入无机养分, 如何减少无机养分对功能菌的影响也是生产环节中必须考虑的一个重要问题<sup>[56]</sup>。

## 5 结论与展望

生物有机肥既具有化学肥料的速效性、有机肥料的长效性、微生物肥料的稳效性,又具有微量元素的增效性、调节剂的促效性、缓释土壤养分的潜效性等作用,使各种效应有机地融为一体,同时利用有机质和功能微生物对土壤中重金属的结合作用和转化作用降低重金属的有效性,在土壤重金属的修复方面发挥重要作用,是实现2020年化肥零增长、促进化肥减量增效的切实可行措施,也是缓解农业面源污染、支撑农业可持续发展的重要途径。

面对生物有机肥来源复杂、微生物种类众多以及生产和施肥过程中还存在着种种问题,需要进一步改进和提升。针对肥源问题带来的安全隐患问题,可通过对生物有机肥样品重金属和抗生素残留进行监控,修订NY 884—2012,同时应当确定相关抗生素检测技术方法标准,为质量控制和风险监管提供依据。因此,健全生产菌种安全风险评价体系,加强风险管理,通过相关研究对潜在风险因子进行识别和监控,是生物有机肥质量安全的首要保障。

## 参考文献:

- [1] 李新华,巩前文.从“增量增产”到“减量增效”:农户施肥调控政策演变及走向[J].农业现代化研究,2016,37(5):877-884.
- [2] 骆永明,滕应.我国土壤污染退化状况及防治对策[J].土壤,2006,38(5):505-508.
- [3] ANSARI R A, MAHMOOD I M. Optimization of organic and bio-organic fertilizers on soil properties and growth of pigeon pea[J]. Scientia Horticulturae, 2017, 226: 1-9.
- [4] 白国新,刘珊珊,郑宇,等.病死动物源氨基酸研制的生物有机肥促生效果研究[J].土壤,2018,50(2):270-276.
- [5] LI X G, WANG X X, DAI C C, et al. Effects of intercropping with *Atractylodes lancea* and application of bio-organic fertilizer on soil invertebrates, disease control and peanut productivity in continuous peanut cropping field in subtropical China[J]. Agroforestry Systems, 2014, 88(1): 41-52.
- [6] ZHAO S, LIU D Y, LIN G N, et al. Bio-organic fertilizer application significantly reduces the *Fusarium oxysporum* population and alters the composition of fungi communities of watermelon *Fusarium* wilt rhizosphere soil[J]. Biology & Fertility of Soils, 2014, 50(5): 765-774.
- [7] JUN Z, TIAN N, JING L, et al. Effects of organic-inorganic compound fertilizer with reduced chemical fertilizer application on crop yields, soil biological activity and bacterial community structure in a rice-wheat cropping system[J]. Applied Soil Ecology, 2016, 99: 1-12.
- [8] 顾欣,孙权,王锐,等.菌肥与有机肥配施对拱棚西瓜土壤的改良效果[J].干旱地区农业研究,2017,35(3):219-225.
- [9] 郭婷,张迪,游晓伟,等.石灰配施生物有机肥对连作大蒜品质及产量的影响[J].北方园艺,2018(6):42-46.
- [10] 沈德龙,曹凤明,李力.我国生物有机肥的发展现状及展望[J].中国土壤与肥料,2007(6):1-5.
- [11] 哈雪姣,左继民,司长城,等.施用生物有机肥及生物菌剂对西瓜产量、品质及土壤养分含量的影响[J].中国瓜菜,2018,31(10):45-48.
- [12] 施河丽,孙立广,谭军,等.生物有机肥对烟草青枯病的防效及对土壤细菌群落的影响[J].中国烟草科学,2018,39(2):54-62.
- [13] 刘艳,李波,雋英华,等.生物有机肥对盐碱地玉米渗透调节物质及土壤微生物的影响[J].西南农业学报,2018,31(5):1013-1018.
- [14] 张瑞福,颜春荣,张楠,等.微生物肥料研究及其在耕地质量提升中的应用前景[J].中国农业科技导报,2013,15(5):8-16.
- [15] SOH K L, STEPHEN J, MUZZAMIL N, et al. Enhancement of palm oil refinery waste - spent bleaching earth (SBE) into bio organic fertilizer and their effects on crop biomass growth[J]. Industrial Crops and Products, 2013, 49: 775-781.
- [16] 刘秀春,高艳敏,范业宏,等.生物有机肥对重金属的吸附解吸作用的影响[J].土壤通报,2008,39(4):942-945.
- [17] 赵佳,杜宾,聂园军,等.施用生物有机肥对连作黄瓜生长及根际微环境的影响[J].中国瓜菜,2017,30(1):31-34.
- [18] WU Y, ZHAO C Y, FARMER J, et al. Effects of bio-organic fertilizer on pepper growth and *Fusarium* wilt biocontrol[J]. Scientia Horticulturae, 2015, 193: 114-120.
- [19] WANG L F, LU X P, YUAN H Y, et al. Application of bio-organic fertilizer to control tomato fusarium wilting by manipulating soil microbial communities and development[J]. Communications in Soil Science & Plant Analysis, 2015, 46(18): 2311-2322.
- [20] 赵力光,唐兴莹,汤利,等.化肥减量配施生物有机肥对植烟土壤微生物区系的影响及其与烤烟青枯病的关系[J].云南农业大学学报(自然科学版),2018,33(4):744-750.
- [21] 张连忠,路克国,王宏伟,等.重金属和生物有机肥对苹果根区土壤微生物的影响[J].水土保持学报,2005,19(2):92-95.
- [22] 柳玲玲,王文华,杨再刚,等.不同生物有机肥对钩藤产量、品质及土壤生物性状的影响[J].中国土壤与肥料,2018(3):116-121.
- [23] 巩子毓,高旭,黄炎,等.连续施用生物有机肥提高设施黄瓜产量和品质的研究[J].南京农业大学学报,2016,39(5):777-783.
- [24] 宋以玲,于建,陈士更,等.化肥减量配施生物有机肥对油菜生长及土壤微生物和酶活性影响[J].水土保持学报,2018,32(1):352-360.
- [25] 李志友.生物有机肥对蓝莓根区土壤养分及微生物学特性的影响[J].水土保持研究,2017,24(2):36-42.
- [26] ZHANG N, PAN R, SHEN Y F, et al. Development of a novel bio-organic fertilizer for plant growth promotion and suppression of rhizome rot in ginger[J]. Biological Control, 2017, 114: 97-105.
- [27] 陈永波,黄光昱,马作江,等.生物有机肥和复合微生物菌剂对黄瓜产量和品质的影响[J].氨基酸和生物资源,2012,34(3):32-36.
- [28] ZEINAB A S, FAROUK K E B, ALAA A G, et al. Antioxidant activities of phenolics, flavonoids and vitamin C in two cultivars of fennel (*Foeniculum vulgare* Mill.) in responses to organic and bio-organic fertilizers[J]. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 2015, 14(1): 91-99.
- [29] RADY M M, MOUNZER O H, ALARCÓN J J, et al. Growth, heavy metal status and yield of salt-stressed wheat (*Triticum aestivum* L.) plants as affected by the integrated application of bio-organic and inorganic nitrogen fertilizers[J]. Journal of Applied Botany and Food, 2016, 89: 21-28.
- [30] 孔涛,马瑜,刘民,等.生物有机肥对土壤养分和土壤微生物的影响[J].干旱区研究,2016,33(4):884-891.
- [31] JAKIENE E, SPRUOGIS V, ROMANECKAS K, et al. The

- bio-organic nano fertilizer improves sugar beet photosynthesis process and productivity[J]. *Zemdirbyste*, 2015, 102(2): 141-146.
- [32] 马铁铮, 马友华, 付欢欢, 等. 生物有机肥和生物炭对 Cd 和 Pb 污染稻田土壤修复的研究[J]. *农业资源与环境学报*, 2015, 32(1): 14-19.
- [33] 郑少玲, 陈琼贤, 马磊, 等. 施用生物有机肥对芥蓝及土壤重金属含量影响的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24(增刊 1): 62-66.
- [34] VRINCEANU N O, MOTELICA D M, CALCIU I, et al. Influence of bentonite, dolomite, natural zeolite and manure on heavy metal immobilization in a contaminated soil[J]. *Agrolife Scientific Journal*, 2017, 6(2): 227-234.
- [35] ZHAO Y C, YAN Z B, QIN J H, et al. Effects of long-term cattle manure application on soil properties and soil heavy metals in corn seed production in Northwest China[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2014, 21(12): 7586-7595.
- [36] LESZCZYŃSKA D, KWIATKOWSKA MALINA J. Evaluation of mitigation of the effects of heavy metal contamination of soil by adding organic matter[J]. *Przemysł Chemiczny*, 2015, 94(5): 756-759.
- [37] 黄攀, 刘博睿, 蔡华杰, 等. 冻融循环及有机肥配施对黑土中镉形态的影响[J]. *环境污染与防治*, 2014, 36(12): 38-42.
- [38] 张连忠, 路克国, 王宏伟, 等. 重金属镉、铜在苹果幼树体内的分布特性及生物有机肥对减少重金属效应的研究[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(3): 123-125.
- [39] 路克国. 生物有机肥的土壤学效应及其对红富士苹果根系吸收镉、铜的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2003.
- [40] TIAN W, ZHANG Z H, HU X F, et al. Short-term changes in total heavy metal concentration and bacterial community composition after replicated and heavy application of pig manure-based compost in an organic vegetable production system[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2015, 51(5): 593-603.
- [41] UYGUNER DEMIREL C S, BEKBOLET M. Significance of analytical parameters for the understanding of natural organic matter in relation to photocatalytic oxidation[J]. *Chemosphere*, 2011, 84(8): 1009-1031.
- [42] SMITHA G R, BASAKA B B, THONDAIMAN V, et al. Nutrient management through organics, bio-fertilizers and crop residues improves growth, yield and quality of sacred basil (*Ocimum sanctum* Linn)[J]. *Industrial Crops and Products*, 2019, 128: 599-606.
- [43] MOORE T R, DE SOUZA W, KOPRIVNIAK J K. Controls on the sorption of dissolved organic carbon by soils[J]. *Soil Science*, 1992, 154(2): 120-129.
- [44] 罗巧玉, 王晓娟, 林双双, 等. AM 真菌对重金属污染土壤生物修复的应用与机理[J]. *生态学报*, 2013, 33(13): 3898-3906.
- [45] LIN Q, XU X, BAO Q B, et al. Influence of water-dispersible colloids from organic manure on the mechanism of metal-transport in historically contaminated soils: coupling colloid fractionation with high-energy synchrotron analysis[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16(2): 349-359.
- [46] 孙家骏, 付青霞, 谷洁, 等. 生物有机肥对猕猴桃土壤酶活性和微生物群落的影响[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(3): 829-837.
- [47] OSYCZKA P, ROLA K, JANKOWSKA K. Vertical concentration gradients of heavy metals in *Cladonia* lichens across different parts of thalli[J]. *Ecological Indicators*, 2016, 61: 766-776.
- [48] SARGIN I, ARSLAN G, KAYAM M. Microfungal spores (*Ustilago maydis* and *U. digitariae*) immobilised chitosan microcapsules for heavy metal removal[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2016, 138: 201-209.
- [49] 刘瑞伟, 皇传华, 王磊. EM 发酵有机肥对油菜生物性状及重金属含量的影响[J]. *北方园艺*, 2010(17): 36-38.
- [50] 马国辉, 何定国, 何定荣, 等. 生物菌肥不同用量对稻米重金属污染的阻控效果研究[J]. *作物研究*, 2014, 28(8): 919-921.
- [51] 余佩瑶, 刘寒冰, 邓艳玲, 等. 畜禽粪便中抗生素污染特征及堆肥化去除研究进展[J]. *环境化学*, 2019, 38(2): 1-10.
- [52] KUMAR K, SINGH G K, DASTIDAR M G, et al. Role of iron-oxidizing microorganism in bioleaching of heavy metals from sewage sludge contaminated with textile dyes[J]. *Geomicrobiology Journal*, 2016, 33(1): 63-71.
- [53] 姜莉莉, 王开运, 武玉国, 等. 含高效固氮解淀粉芽孢杆菌生物有机肥在草莓上的应用效果[J]. *北方园艺*, 2018(20): 7-12.
- [54] 张鹏, 王小慧, 李蕊, 等. 生物有机肥对田间蔬菜根际土壤中病原菌和功能菌组成的影响[J]. *土壤学报*, 2013, 50(2): 381-387.
- [55] MA J, ZHANG H Y, ZHOU X K, et al. Biological control tobacco bacterial wilt and black shank and root colonization by bio-organic fertilizer containing bacterium *Pseudomonas aeruginosa* NXHG29[J]. *Applied Soil Ecology*, 2018, 129: 136-144.
- [56] GUO S, XIONG W, XU H, et al. Continuous application of different fertilizers induces distinct bulk and rhizosphere soil prokaryotic communities[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2018, 88: 8-14.

编辑: 丁 怀 (收稿日期: 2019-01-04)

(上接第 1377 页)

- [35] 钟山, 王里奥, 刘元元, 等. 垃圾焚烧飞灰处理高浓度含磷废水的动力学[J]. *土木建筑与环境工程*, 2009, 31(5): 117-121.
- [36] 贾艳萍, 姜修平, 姜成, 等. 改性粉煤灰的制备及其在含磷废水处理中的应用进展[J]. *硅酸盐通报*, 2015, 34(7): 1921-1925.
- [37] SHIM Y S, KIM Y K, KONG S H, et al. The adsorption characteristics of heavy metals by various particle sizes of MSWI bottom ash[J]. *Waste Management*, 2003, 23(9): 851-857.
- [38] 宋立杰, 赵由才, 朱南文. 城市垃圾焚烧炉渣处理含磷废水的实验研究[J]. *有色冶金设计与研究*, 2009, 30(6): 75-79.
- [39] 徐小惠, 苗宇, 张雅心, 等. 改性碳纤维的制备及对含磷废水处理效果研究[J]. *硅酸盐通报*, 2016, 35(4): 1270-1276.
- [40] 石中亮, 宋永强, 郭星, 等. 磁性多孔 Fe(OH)<sub>3</sub> 微球制备及其在含磷废水处理中的应用[J]. *过程工程学报*, 2011, 11(4): 684-688.
- [41] 戴凌云. 磁混凝技术在高含磷污水处理中的应用[J]. *磷肥与复肥*, 2017, 32(10): 47-49.
- [42] AL YAQOUT A F. Assessment and analysis of industrial liquid waste and sludge disposal at unlined landfill sites in arid climate[J]. *Waste Management*, 2003, 23(9): 817-824.
- [43] DOYLE J D, OLDRING K, CHURCHLEY J, et al. Chemical control of struvite precipitation[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2003, 129(5): 419-426.
- [44] LU B, XU J, ZHANG M, et al. Phosphorus removal and recovery from wastewater by highly efficient struvite crystallization in an improved fluidized bed reactor[J]. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2017, 34(11): 2879-2885.
- [45] 吴翠荣. 煤气化废水深度处理技术研究[J]. *工业水处理*, 2012, 32(5): 73-75.
- [46] 钟山, 张漓杉, 龙腾发. 一种能有效去除废水中磷和硫的滤料模块: 201310402110.6[P]. 2013-12-18.

编辑: 陈锡超 (收稿日期: 2019-05-20)