

◆ 专论:熏蒸剂(特约稿)◆

土壤活化技术的研究进展与展望

陈光明,张敏,史朝艾,曹坳程,王秋霞,颜冬冬,方文生,李园*

(中国农业科学院植物保护研究所,北京 100193)

摘要:在农业集约化种植中,土壤质量问题制约农业生产发展的重要因素,长期连作会导致土壤质量下降,具体表现为土壤物理、化学和生物学性质的变化及微生物群落失衡等。为了解决这一问题,介绍了生物肥料、腐殖质、硅肥、生物炭等常用的土壤改良剂,综述其改善土壤理化性质、抑制土传病害、提高作物产量与品质、调节土壤微生物群落平衡的作用机理及研究进展。

关键词:土壤改良剂;微生物;化学熏蒸剂;生物肥料

中图分类号:S 153 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1671-5284.2024.01.005

Research progress and prospects of soil activation technology

CHEN Guangming, ZHANG Min, SHI Chaoai, CAO Aocheng, WANG Qiuxia, YAN Dongdong, FANG Wengsheng, LI Yuan*
(Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

Abstract: In intensive agricultural cultivation, the problem of soil quality is an important factor restricting the development of agricultural production. Long-term continuous cropping will lead to the decline of soil quality, which is manifested in the changes of soil physical, chemical and biological properties, as well as the imbalance of microbial communities. In order to solve this problem, soil conditioners, such as biofertilizers, humus, silica fertilizers, biochar and other substances were applied, which could directly improve the soil physicochemical properties, inhibit soil-borne diseases, improve crop yield and quality, and regulate the balance of soil microbial communities. In this paper, the mechanism of action, the progress of application of several commonly used soil amendments to activate the soil were introduced in detail.

Key words: soil amendment; microorganism; chemical fumigation; biological fertilizer

农业集约化种植是近年来农业生产方式的一个重要发展方向。在农业集约化种植过程中,长期连作种植制度可以带来丰厚的回报,但会引发一系列的土壤健康问题。土壤熏蒸消毒是解决该问题的有效方法之一,即在种植作物前,向土壤中注入挥发性化合物,以控制土传病原真菌、线虫和杂草的蔓延^[1-2]。常用的熏蒸剂包括棉隆(dazomet, DZ)、1,3-二氯丙烯(1,3-dichloropropene, 1,3-D)、氯化苦(chloropicrin, CP)、威百亩(metam-sodium, MS)、二甲基二硫(dimethyl disulfide, DMDS)、异硫氰酸甲酯(methyl isothiocyanate, MITC)等^[3]。熏蒸剂在中国的登记情况如表1所示。

表1 熏蒸剂登记情况

熏蒸剂种类	防治对象	登记数量/个
氯化苦	枯萎病菌、根结线虫、疫霉菌、青枯病菌、黄萎病菌	1
威百亩	根结线虫、一年生杂草、猝倒病	8
棉隆	根结线虫、根腐病	11
乙蒜素	褐斑病、纹枯病、枯萎病、稻瘟病、叶斑病、恶苗病、烂秧病、立枯病	37
异硫氰酸烯丙酯	根结线虫、根腐病	4

氯化苦熏蒸性能显著,在土壤中降解迅速,对非靶标生物无明显毒理效应。目前,氯化苦在中国使用受限^[4],在荷兰、美国等国家处于再评审阶段^[4-5]。

收稿日期:2024-02-02

作者简介:陈光明(2000—),男,河南平顶山人,硕士研究生,主要从事土传病害土壤消毒防治技术研究。E-mail:15224824837@163.com
通信作者:李园(1980—),女,河北保定人,博士,副研究员,主要从事土传病害土壤消毒防治技术研究。E-mail:liyuancaas@126.com

二甲基二硫末在中国登记,但是采用滴灌联用、注射联用等技术与棉隆、威百亩以及1,3-二氯丙烯复配,田间防治根结线虫效果显著^[6]。目前,该熏蒸剂正在争取登记^[7]。威百亩除草性能优异,可与其他熏蒸剂复配。但总体而言,我国化学熏蒸剂的总登记量较少,制约了未来土壤消毒工作的发展。

熏蒸剂的使用存在利弊。熏蒸剂具有广谱性,不仅可以杀死土传病原真菌,还会杀死土壤中的有益昆虫和微生物,导致群落结构的失衡^[8]。研究表明,熏蒸处理会降低土壤微生物的代谢活性、真菌的生物量和多样性。虽然细菌群落在短时间内能从熏蒸抑制中恢复,但真菌被抑制的持续时间较长,不利于土壤根际复杂群落的重建^[9]。健康的土壤环境需要依靠微生物物种间复杂的等级性和传递性维持群落的动态平衡^[10]。

熏蒸后的土壤微生物环境近似为真空状态,随时可能因为外来病原菌的侵入造成病害再次传播^[11]。为了缓解熏蒸剂对环境的负面效应,一方面,应开发使用新型环境友好型熏蒸剂,如乙蒜素(ethylcin)、异硫氰酸烯丙酯(allyl isothiocyanate, AITC)等^[12];另一方面,在熏蒸后种植作物时,将有益微生物制剂、腐殖质、硅肥和生物炭等物质添入土壤中,以促进土壤微生物群落快速恢复,直接或间接地促进对土传病原菌的抑制作用^[13-14]。

1 生物肥料

1.1 概述

生物肥料是富含有益微生物,用于抑制植物病原体、促进植物生长的产品^[15]。有益微生物包括细菌、真菌或藻类来源的活有机体。微生物通过生化过程辅助植物吸收营养,分泌抗生素,与植物病原体竞争营养及诱导植物系统抗性(ISR)^[16-17]。具备促进植物生长潜力的细菌和真菌被称为根际促生细菌(plant growth promoting rhizobacteria, PGPR)和根际促生真菌(plant growth promoting rhizofungi, PGPF)^[18]。图1所示的根际促生细菌、植物和土传病原菌的关系说明了根际微生物发挥功能的直接作用与间接作用^[19]。

中国登记的生物肥料类型繁多:①依据微生物浓度,可分为微生物菌剂和微生物浓缩剂;②依据与其他肥料的复配方式,可分为生物有机肥和复合生物肥;③依据微生物的功能,可分为有机物料腐熟剂、土壤修复菌剂和生物修复菌剂。在全球生物肥料市场中,固氮生物肥占80%,主要包括固氮菌属

(*Azotobacter*)、根瘤菌属(*Rhizobium*)、固氮螺菌属(*Azospirillum*)等;磷酸溶解肥占14%^[20]。

本文以生物肥料中有益微生物为例,探讨生物肥料市场上典型微生物种类在土壤活化方面的应用。

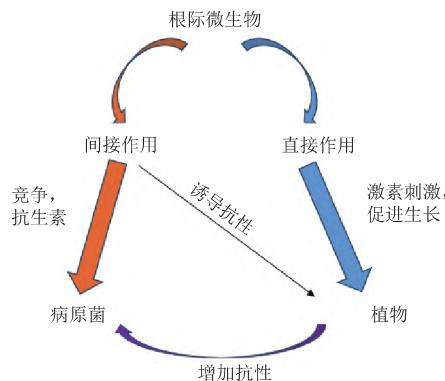


图1 根际促生细菌(PGPR)、植物与病原菌的关系

1.2 根际细菌类

固氮菌属(*Azotobacter* spp.)通过释放吲哚乙酸等植物激素及挥发性烟酸、泛酸和生物素等生物物质促进根系健康生长^[21]。除了固氮作用外,固氮菌属还具有根际细菌群落构建,缓解作物生长逆境胁迫,减少化学氮肥施用等功能^[22-23]。

以假单胞菌属(*Pseudomonas* spp.)中的荧光假单胞菌(*Pseudomonas fluorescens*)分泌的次级代谢物作为信号因子,促进巴西固氮螺杆菌(*Azospirillum brasiliense*)上调*nirK*和*nifX-nifB*基因,最终导致固氮作用硝基含量的增加。另一方面,假单胞菌属可以上调*amtB1*和*amtB2*基因的表达,并调节内部氨库铵盐的释放^[24]。假单胞菌属促进植物生长的作用机制还涉及溶解磷酸盐、分泌生长素和挥发性有机物丙酮等。

芽孢杆菌(*Bacillus* spp.)分泌磷酸酶和有机酸,可以溶解土壤中的磷酸盐,提高磷肥利用率。如枯草芽孢杆菌(*B. subtilis*)、解淀粉芽孢杆菌亚种植物芽孢杆菌(*B. amyloliquefaciens* subsp. *plantarum*)、地衣芽孢杆菌(*B. licheniformis*)和短小芽孢杆菌(*B. pumilus*),在促进植物生长和抑制病原菌方面效果显著^[25-26]。增施芽孢杆菌磷肥,可以提高土壤微生物群落的遗传多样性和功能多样性,增强土壤代谢酶活性,减少化学磷肥的使用量^[27]。Hui等^[28]在土壤样品中接种氨化解淀粉芽孢杆菌,发现其促进了土壤氮的矿化。

生物肥料的连续施用,是维持生物肥料肥效的手段之一,同时有利于鉴定出土壤中长期定殖的有

益微生物,作为待开发菌株备选。研究表明,连续3年施用含解淀粉芽孢杆菌与堆肥混合物的生物有机肥,可在土壤中分离到可培养细菌,如厚壁菌门(*Firmicutes*)、 γ -变形菌门(*Gammaproteobacteria*)和放线菌门(*Actinobacteria*)等^[29]。连续9年施用生物有机肥,核桃田土壤中有益微生物芽孢杆菌、环境修复菌(*Solicoccozyma* spp.)增加显著^[30]。

1.3 根际真菌类

真菌类生物肥料研究的重点主要包括木霉菌根际真菌和曲霉等。木霉(*Trichoderma*)具有抗真菌特性,可以促进植物生长并诱导其对病原微生物产生耐药性^[31-33]。如木霉通过刺激植株分泌次生代谢和防御酶来增强番茄对根结线虫的抗性,有效控制镰刀菌属(*Fusarium* spp.)和疫霉菌属(*Phytophthora* spp.)等土传病原菌^[34-35]。在理化性质方面,在秸秆好氧发酵过程中,添加木霉可提高土壤有机碳含量和团聚体的稳定性^[36];添加绿色木霉(*Trichoderma viridis*)可促进秸秆纤维素降解,缩短堆肥周期^[37]。在木霉的促进机制方面,向有机堆肥中添加贵州木霉(*Trichoderma guizhouense*)制备生物有机肥。利用灭菌与非灭菌的盆栽试验,证明非灭菌土壤的生物因素驱动了植株鲜重增加;通过泥浆试验,发现真菌对增产发挥了重要的作用,并从土壤真菌中鉴定出关键真菌曲霉*A. tamarii*和*A. niger*^[38]。另一方面,土壤中原生生物对木霉具有协同作用。从施用木霉的土壤中分离的原生动物群落中鉴定出微食性草履虫原生生物。原生生物与木霉相结合,促进了作物产量的提高^[39]。

菌根是植物根与土壤真菌的共生组合,主要包括外生菌根、内生菌根、内外生菌根、丛枝菌根等^[18]。研究表明,西洋参连作,导致土壤环境变差,根腐病指数和土壤硝酸盐含量增加。在接种丛枝菌根(*Arbuscular mycorrhiza*)真菌后,缓解了上述负面效应^[40]。作物间作,接种丛枝菌根真菌,可改善作物品质,提高中药材中有效成分产量^[41]。

曲霉(*Aspergillus*)通过淋水法与堆肥结合后,可以促进石灰质土壤中磷和钾的溶解,减少磷、钾化学肥料的使用量^[42]。曲霉与革兰氏阳性放线菌(*Actinomycetes*)、芽孢杆菌(*Bacillus*)等混合施用后,可以降低土壤中根腐病的发病率,增加细菌的多样性,提高潜在有益细菌类群的相对丰度,降低潜在有害细菌的丰度,从而提高作物的产量和品质^[43]。

1.4 未来发展方向

(1) 多菌种联合深入研究。由生物肥料的宏观

功能转向微生物间信号交流、表达水平以及代谢机制。Du等^[44]发现链霉菌(*Streptomyces* spp.)和慢生根瘤菌(*Mesorhizobium* spp.)之间代谢物介导的铁竞争和共享形成了邻里防御性互惠现象;此外,代谢组学与质谱联用技术能够鉴定促进植物形态建成的潜在化合物、激素含量以及根际微生物分泌的益生元等^[45]。荧光定量技术可鉴定生长激素类基因等的表达水平。相信未来空间转录组学的发展,将进一步深化微生物表达的空间结构。

(2) 施用方式多样化。种衣剂包衣和液面喷施也可以达到增产效果。将种子在液体生物肥料烟曲链霉菌(*Streptomyces fumanus*)中浸泡,可以刺激种子和幼苗的生长,富集土壤氨化细菌^[46]。从大豆植株中分离慢生根瘤菌(*Bradyrhizbium* spp.),以灭菌泥炭苔藓作为载体,可以提高根瘤数量、干重、结荚数量等^[47]。生物肥料与化学肥料还可以在基肥与叶面追肥阶段轮换使用。

2 化学熏蒸剂与生物肥料联合施用

评价化学熏蒸剂与生物肥料联合施用效果的指标一般包括:土传病原菌数量、土壤理化性质、土壤酶活性以及土壤微生物群落。化学熏蒸剂在一定程度上抑制了部分土壤酶的活性。威百亩熏蒸后,抑制了土壤脲酶、蔗糖酶和过氧化氢酶的活性;石灰氮熏蒸后,抑制了土壤脲酶和碱性磷酸酶的活性;棉隆熏蒸后,抑制了土壤脲酶的活性。随着生物肥的施入,土壤酶活性逐渐恢复和提升^[48]。

Cheng等^[49]围绕化学熏蒸剂1,3-D的土壤活化,开展了室内和室外试验。1,3-D室内熏蒸后,添加枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)和哈茨木霉(*Trichoderma harzianum*),孵育期收集土壤并检测指标。熏蒸后添加生物肥料的土壤pH、电导率、土壤铵态氮、硝态氮、速效钾和土壤有机质均有所提高;土壤中的脲酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性增强;有益细菌放线菌(*Actinobacteria*)、鞘氨醇单胞菌(*Sphingomonas*)、假单胞菌属、芽孢杆菌、溶杆菌属(*Lysobacter*)的相对丰度增加显著。田间试验表明,添加生物肥料可进一步增强1,3-D对镰刀菌属和疫霉菌属的抑制作用。土壤微生物的多样性和鞘氨醇单胞菌、芽孢杆菌、被孢霉属(*Mortierella*)、木霉等有益微生物的相对丰度在土壤生物活化后增加^[50]。1,3-D熏蒸后,连续两季添加哈茨木霉微生物菌剂、有机肥料或两者混合施用,几乎所有处理线虫侵扰均显著减少,三者结合线虫抑制率最佳。该方法在综合防治线虫,减

少化学品投入方面具有一定的意义^[51]。

化学熏蒸剂棉隆熏蒸后添加复合生物肥料,微生物α多样性指数能够恢复到熏蒸前状态^[52]。Li等^[53]研究了棉隆对土壤活化的影响。在作物生长期添加芽孢杆菌生物肥料,可以有效抑制土传病原菌的数量,提高土壤中氨态氮的含量、过氧化氢酶活性,富集有益微生物如绿曲菌门(*Chloroflexi*)芽孢杆菌和马杜拉放线菌(*Actinomadura*)等。同时,草莓产量与有益微生物的丰度正相关。Ge等^[54]在棉隆熏蒸后施用有机肥,熏蒸处理显著降低了微生物网络的复杂性。随着有机肥的添加,网络结构逐渐复杂。Zhang等^[55]在堆肥中添加拮抗细菌解淀粉芽孢杆菌(*Bacillus amyloliquefaciens*)和真菌贵州木霉(*Trichoderma guizhouense*),用于改善棉隆熏蒸后的土壤微生物群落。在作物成熟期,芽孢杆菌富集并占据了微生物的关键网络节点。通过深耕的方式,棉隆熏蒸后施加生物肥料,激活了土壤中过氧化氢酶、脲酶、蔗糖酶和β-D-葡萄糖苷酶的活性,显著提高了土壤中氮、磷、钾水平,从而促进了菊花的生长^[56]。

Pu等^[57]开展了氯化苦土壤活化的研究。氯化苦熏蒸后,种植期施用富含芽孢杆菌和放线菌的生物有机肥和普通有机肥,分别提高了土壤N(9.88%和8.21%)、P(21.39%和11.57%)、K(7.99%和2.75%)质量分数和皂苷质量分数(23.62%和9.12%)。相对于常规有机肥,生物肥料增加了球囊菌门(*Glomeromycota*)、被孢霉门(*Mortierellomycota*)、腐质霉门(*Humicola*)和芽孢杆菌门的相对丰度,降低了子囊菌门(*Ascomycota*)和镰刀菌门的丰度,生物有机肥料的促进效果优于普通有机肥。

碳酸氢铵和石灰作为新型熏蒸剂在抑制病害方面效果显著^[58]。碳酸氢铵能够使发病率从96%降至40%。添加石灰,病害抑制率可提高12%。另外,添加生物有机肥料能够将对病害的防治效果从7%提高到12%^[59]。室内盆栽试验结果表明,石灰和碳酸氢铵混合熏蒸后施用富含解淀粉芽孢杆菌的生物肥料,可使发病率降低80%^[60]。这种熏蒸策略对病害的抑制可能归因于土壤性质的改变以及土壤微生物区系的恢复。进一步研究抑制香蕉枯萎病的土壤微生物群响应机制,细菌群落首先对熏蒸做出反应,真菌群落率先对施肥做出反应^[61]。熏蒸后施用生物肥料,土壤中富集到双生单胞菌(*Gemmimonas*)、鞘氨醇单胞菌(*Sphingomonas*)、假单胞菌属、溶杆菌(*Lysobacter*)和芽孢杆菌等与病原菌如镰刀菌

丰度呈现负相关的根际有益细菌^[62]。

二甲基二硫和氯化苦联合熏蒸后喷施木霉,能够显著提高黄瓜产量(35.6%)和对土传病原菌、根结线虫的相对防效,增加了索氏真菌(*Sodiomyces*)和根霉属(*Rhizophlyctis*)等有益微生物的相对丰度^[63]。

化学熏蒸降低了根际微生物的多样性,平衡了微生物群落组成的偏差,同时土壤理化性质也发生了显著变化,降低了病害侵染率,促进了植物生长。与熏蒸处理相比,生物肥料对土壤和作物的影响中等,更多用于提前预防。相关分析表明,生物制剂主要是直接作用,而熏蒸对缓解作物连作障碍有间接作用,即重建土壤微生物群落,然后改变土壤性质和植株表现,从而有效地缓解连作障碍^[64]。将两者结合使用,可以弥补化学熏蒸剂持效期短、田间管理不当导致后期病原菌数量易增加等问题。

3 腐殖质活化技术

腐殖质(humus, HS)是由动植物残体经物理、化学、微生物等分解和转化而形成的黑棕色高分子有机物,主要包括腐植酸(humic acid, HA)、黄腐酸(fulvic acid, FA)和胡敏素(humin, HM)^[65]。腐植酸以芳香环为核心,环上氢被醌基、酚基、羧基等官能团取代,酚基赋予腐植酸亲水性,脂肪族链和芳香环赋予腐植酸亲油性。大多数腐植酸可溶于碱性介质,部分溶于水,不溶于酸性介质^[66]。天然腐植酸主要从风化煤、褐煤、草炭中提取^[67]。人工腐植酸主要利用工、农业废弃物通过发酵法与化学法制备^[68]。腐植酸肥料以腐植酸为原料,通过氨化、络合、复分解等一系列反应而制得。其对土壤结构的改良功能包括:提高土壤有机碳含量,释放营养元素,提高肥料利用率,改善土壤孔隙结构,以及增强土壤通气和保水能力。对作物的改善功能包括:刺激根系生长,增加侧根数量,提高根系与土壤接触面积和养分吸收能力,调节植物代谢,增强植株的抗逆性,提高作物产量,并改善作物品质^[69]。对土壤重金属的吸附功能包括:螯合土壤金属离子形成络合物,使微量元素向植株转运,钝化吸附土壤中的重金属,减少土壤和水中残留。对土壤酶和微生物的影响包括:降低土壤脲酶,减少氨的损失,提高土壤碱性磷酸酶和过氧化氢酶的活性,增强磷的有效性,增加根际土壤参与养分转化微生物的数量。腐植酸具有用量少、成本低、吸收快等特点。

黄腐酸中氧含量较多而碳含量较少,较腐植酸

具有更强的阳离子交换能力、螯合力以及吸附能力^[70]。黄腐酸能够改善土壤物理性质,提高叶绿素含量,增强光合作用,提高作物抗病抗旱能力。

胡敏素的聚合程度最高,不溶于酸碱性溶液,主要用于土壤重金属污染修复^[71]。

4 硅肥活化技术

硅是土壤中第二大元素,仅次于氧。也是继N、P、K之后的第四大植物营养元素^[72],但土壤中的结晶态和不定型态硅无法被植物直接吸收。据报道,我国50%耕地缺硅,土壤中缺硅会干扰植株形态建成,造成作物减产^[73]。硅肥主要包括熔渣硅肥、水溶性硅肥、硅复混肥、有机硅水溶缓释肥等^[74]。

硅肥对农作物的影响包括:提高根系活力,增加叶片厚度和叶绿素含量,促进光合作用;协调干物质转运,积累营养物质,提高作物的产量和品质;吸收硅形成硅化细胞,增强抗倒伏能力;提高超氧化物歧化酶、多酚氧化酶和谷胱甘肽还原酶活性,增强植株的抗病性^[75];提高氧化还原酶、细胞大分子等代谢相关基因的表达,增强作物的抗旱性^[76]。

硅肥对土壤重金属的影响包括:钝化土壤重金属,促使重金属由可交换态向更稳定的形态转化^[77];诱导作物合成抗氧化相关物质并提高相关酶的活性,抑制作物对重金属的吸收转运,降低籽粒中重金属的含量^[78]。对土壤的改良功能包括:提高土壤有效硅含量,调节土壤酸碱度,提高土壤通透性,促进养分循环,减少甲烷排放,增加腐生真菌数量,促进有机质的矿化。

5 生物炭活化技术

生物炭(biochar)是生物残体在缺氧条件下经高温热解形成的一类富碳、难溶、高度芳香化的固体颗粒材料^[79]。由于热解过程未破坏孔隙结构,使生物炭保留了较大的比表面积,施用到土壤后能够减小土壤的容重,增加其透气性及持水和蓄肥能力,提高肥料的利用率。活性炭表面羧基等含氧官能团释放盐基离子,可提高土壤阳离子的交换量,同时官能团与土壤中重金属离子发生络合反应,减少了土壤中重金属的迁移^[80]。生物炭富含碳(70%以上),全碳组分受生物质原料的来源、种类、粒径,热解过程的温度、压力、升温速度和停留时间等因素的影响^[81]。生物炭施用后增大了土壤碳氮比,增加了碳库储备,提高了土壤有机质的含量。

生物炭能够提高土壤养分供给。在固氮作用和

硝化作用中,通过提高土壤固氮微生物、硝化微生物和反硝化微生物的群落结构及活性,增加土壤无机氮含量,减少N₂O排放^[82]。生物炭可通过炭化过程释放磷酸盐,促进磷酸根溶解;提高土壤pH,抑制可溶性磷与金属离子的络合;为解磷微生物提供碳源等多种途径增加土壤中有效磷含量^[83]。生物炭直接供给钾,或改善土壤温度、水分、减少淋溶等间接因素,提高土壤中速效钾含量。

生物炭可以促进有益微生物的生长,增加微生物的丰度,改善土壤微生物的结构,提高土壤酶的活力^[84]。生物炭一方面分解营养物质,为微生物提供碳源;另一方面,通过改善土壤理化性质,为微生物定殖创造空间。连续多年施用生物炭提高了与C-N-P-S循环相关的土壤微生物功能类群的丰度及农业生态系统的多功能性^[85]。生物炭对土壤表面的改良减少了熏蒸剂的排放,提高了土壤微生物的恢复速度^[86]。生物炭用于土壤改良与调节微生物群落结构,具有广阔的应用前景。

6 结语

生物肥料在减少化肥使用量、提高作物产量、改善产品质量方面,具有广阔的应用空间,但是目前生物肥料的发展仍面临一些挑战,如选定合理待开发菌株的生物制约、保质期的技术限制、产品注册的严格监管约束等^[87]。同时,生物肥料的田间效果受植物品种、生长发育阶段、微生物群落、土壤类型、组成以及土壤管理措施等生物因素和非生物因素的制约。

一方面,腐植酸提取工艺的不统一,造成各种腐植酸肥料的原料质量不同,需要借助先进的检测技术对腐植酸的基本结构进行鉴定,建立统一的评价体系。另一方面,人们对腐植酸促进植物生长机理的认识不够系统和深入,需要重点研究植物、土壤性状和微生物等影响因子对腐植酸功能的介导作用^[88]。

高昂的生产成本造成我国目前仅登记58件含硅水溶肥,未来需要开发生产成本低廉的硅肥生产工艺^[89]。目前对硅肥作用机理的研究大多还停留在物理屏障和生化生理方面。未来应重点对硅肥增效的分子机制进行研究。同位素标记法研究硅与其他营养元素的互作和在植株体内的循环转化;转录组学和代谢组学探究植株和土壤微生物对硅肥施用后基因表达情况及代谢化合物通路的鉴定。

目前,生物炭的推广因其性质和特征缺乏系统

研究且田间研究周期较短而受到限制。生物炭对土壤改良效果显著,但改良效果受土壤类型,生物炭种类、添加量、与其他改良剂的混合比例等多种因素的影响^[9]。未来,应深入研究生物炭的负面影响,如微生物分解生物炭过程中潜在的二氧化碳排放问题;生物炭灰分造成的土壤碱性对土壤有益微生物生长的干扰;自身吸附的重金属对环境的负面影响等,为生物炭的合理使用提供指导。

综上所述,土壤活化技术应根据实际土壤类型进行定量与定性使用。如化学熏蒸剂与微生物菌剂联合使用,可以提高土壤微生物的活性;化学熏蒸剂与生物有机肥联合使用,可以提高土壤有机质含量;化学熏蒸剂与生物炭联合使用,可以改良南方酸性黏结土壤;化学熏蒸剂熏蒸后,应在作物生长期液面喷施腐植酸和硅肥;微生物菌剂与腐植酸、硅肥以及生物炭等混合,可以减少化学熏蒸剂的使用。以上措施均能够有效抑制土传病害,改善土壤结构,促进土壤微生物的多样性,在一定程度上活化土壤,缓解连作障碍。

参考文献

- [1] COOPER J, DOBSON H. The benefits of pesticides to mankind and the environment[J]. Crop Protection, 2007, 26(9): 1337-1348.
- [2] 曹坳程,张文吉,刘建华.溴甲烷土壤消毒替代技术研究进展[J].植物保护,2007,33(1): 15-20.
- [3] HUANG B, WANG Q, GUO M X, et al. The synergistic advantage of combining chloropicrin or dazomet with fosthiazate nematicide to control root-knot nematode in cucumber production[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2019, 18(9): 2093-2106.
- [4] 李晓云.5年内我国将禁用全部高毒农药[J].农业知识,2018(5): 14.
- [5] 曹坳程,方文生,王秋霞,等.氯化苦的生态毒理效应[J].世界农药,2020,42(10): 32-35.
- [6] 毛连纲.新型熏蒸剂的毒力评价及应用技术研究[D].北京:中国农业科学院,2015.
- [7] 陈翠翠,梁艳辉,祝杰.土壤熏蒸剂专利技术分析[J].现代农药,2022,21(4): 26-30.
- [8] DOMÍNGUEZ-MENDOZA C A, BELLO-LÓPEZ J M, NAVARRO-NOYA Y E, et al. Bacterial community structure in fumigated soil [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2014, 73: 122-129.
- [9] LI R, SHEN Z Z, SUN L, et al. Novel soil fumigation method for suppressing cucumber *Fusarium* wilt disease associated with soil microflora alterations[J]. Applied Soil Ecology, 2016, 101: 28-36.
- [10] CHANG C Y, BAJIC D, VILA J C, et al. Emergent coexistence in multispecies microbial communities[J]. Science, 2023, 381: 343-348.
- [11] THALAVAIASUNDARAM S, AJWA H, STEVENS M C. Dose-response of pests to ethanedinitrile dose-response of weed seeds, soil borne pathogens, and plant-parasitic nematodes to ethanedinitrile[J]. Australasian Plant Pathology, 2023, 52(2): 133-143.
- [12] 曹坳程,张大琪,方文生,等.土传病害防治技术进展及面临的挑战[J].植物保护,2023,49(5): 260-269.
- [13] 李想,刘艳霞,陆宁,等.综合生物防控烟草青枯病及其对土壤微生物群落结构的影响[J].土壤学报,2017,54(1): 216-226.
- [14] DENG X H, ZHANG N, SHEN Z Z, et al. Soil microbiome manipulation triggers direct and possible indirect suppression against *Ralstonia solanacearum* and *Fusarium oxysporum* [J]. npj Biofilms and Microbiomes, 2021, 7(1): 33.
- [15] MCICK M, GRYTA A, FRC M. Biofertilizers in agriculture: an overview on concepts, strategies and effects on soil microorganisms [J]. Advances in Agronomy, 2020, 162: 31-87.
- [16] DINESHKUMAR R, KUMARAVEL R, GOPALSAMY J, et al. Microalgae as bio-fertilizers for rice growth and seed yield productivity[J]. Waste and Biomass Valorization, 2018, 9(5): 793-800.
- [17] GOPALAKRISHNAN S, ARUMUGAM S, VIJAYABHARATHI R, et al. Plant growth promoting rhizobia: challenges and opportunities[J]. 3 Biotech, 2014, 5: 355-377.
- [18] KAUSHIK B D, KUMAR D, SHAMIM M. Biofertilizers and biopesticides in sustainable agriculture[M]. Singapore: Springer, 2019: 377-398.
- [19] SOUMARE A, DIEDHIOU A G, THUITA M, et al. Plants exploiting biological nitrogen fixation: a route towards a sustainable agriculture[J]. Plants, 2020, 8(9): 1-22.
- [20] BASU A, PRASAD P, DAS S N, et al. Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) as green bioinoculants: recent developments, constraints, and prospects[J]. Sustainability, 2021, 13(3): 1-20.
- [21] KADER M A, MIAN M H, HOQUE M S. Effects of azotobacter inoculant on the yield and nitrogen uptake by wheat[J]. Journal of Biological Sciences, 2002, 2(4): 259-261.
- [22] IMADE E B O O. Biotechnological utilization: the role of *Zea mays* rhizospheric bacteria in ecosystem sustainability[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2021, 105(11): 4487-4500.
- [23] RAZMJOOEI Z, ETEMADI M, ESHGHII S, et al. Potential role of foliar application of azotobacter on growth, nutritional value and quality of lettuce under different nitrogen levels[J]. Plants (Basel), 2022, 11(3): 406.
- [24] SANOW S, KUANG W, SCHAAF G, et al. Molecular mechanisms of pseudomonas-assisted plant nitrogen uptake: opportunities for modern agriculture[J]. Molecular Plant-Microbe Interactions, 2023, 36(9): 536-548.
- [25] BEN ABDALLAH D, FRIKHA-GARGOURI O, TOUNSI S. Rhizospheric competence, plant growth promotion and biocontrol efficacy of *Bacillus amyloliquefaciens* subsp. *plantarum* strain 32a [J]. Biological Control, 2018, 124: 61-67.
- [26] MURAS A, ROMERO M, MAYER C, et al. Biotechnological applications of *Bacillus licheniformis*[J]. Crit Rev Biotechnol, 2021, 41(4): 609-627.
- [27] MCICK M, GRYTA A, SAS-PASZT L, et al. The status of soil microbiome as affected by the application of phosphorus biofertilizer: fertilizer enriched with beneficial bacterial strains[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2020, 21(21): 8003.

- [28] HUI C, SUN P, GUO X, et al. Shifts in microbial community structure and soil nitrogen mineralization following short-term soil amendment with the ammonifier *Bacillus amyloliquefaciens* DT [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2018, 132: 40-48.
- [29] FU L, RUAN Y, TAO C, et al. Continous application of bioorganic fertilizer induced resilient culturable bacteria community associated with banana *Fusarium* wilt suppression[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 27731.
- [30] DU T Y, HE H Y, ZHANG Q, et al. Positive effects of organic fertilizers and biofertilizers on soil microbial community composition and walnut yield[J]. Applied Soil Ecology, 2022, 175: 104457.
- [31] ZHANG F, ZHU Z, YANG X, et al. *Trichoderma harzianum* T-E5 significantly affects cucumber root exudates and fungal community in the cucumber rhizosphere[J]. Applied Soil Ecology, 2013, 72(5): 41-48.
- [32] FU J, XIAO Y, WANG Y F, et al. *Trichoderma* affects the physiochemical characteristics and bacterial community composition of saline-alkaline maize rhizosphere soils in the cold-region of Heilongjiang Province[J]. Plant and Soil, 2019, 436: 211-227.
- [33] SILVA F D A, VIEIRA V D O, SILVA R C D, et al. Introduction of *Trichoderma* spp. biocontrol strains against *Sclerotinia sclerotiorum* (Lib.) de Bary change soil microbial community composition in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivation [J]. Biological Control, 2021, 163: 104755.
- [34] YAN Y, MAO Q, WANG Y, et al. *Trichoderma harzianum* induces resistance to root-knot nematodes by increasing secondary metabolite synthesis and defense-related enzyme activity in *Solanum lycopersicum* L.[J]. Biological Control, 2021, 158: 104609.
- [35] SRIDHARAN A P, THANGAPPAN S, KARTHIKEYAN G, et al. Metabolites of *Trichoderma longibrachiatum* EF5 inhibits soil borne pathogen, *Macrophomina phaseolina* by triggering amino sugar metabolism[J]. Microbial Pathogenesis, 2021, 150: 104714.
- [36] ZHU L, ZHANG F, LI L, et al. Soil C and aggregate stability were promoted by bio-fertilizer on the North China Plain[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2021, 21(3): 2355-2363.
- [37] WANG S, LONG H, HU X, et al. The co-inoculation of *Trichoderma viridis* and *Bacillus subtilis* improved the aerobic composting efficiency and degradation of lignocellulose [J]. Bioresource Technology, 2024, 394: 130285.
- [38] WU J J, SHI Z A, ZHU J H, et al. Taxonomic response of bacterial and fungal populations to biofertilizers applied to soil or substrate in greenhouse-grown cucumber[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 18522.
- [39] GUO S, XIONG W, HANG X, et al. Protists as main indicators and determinants of plant performance[J]. Microbiome, 2021, 9(64): 1-11.
- [40] LIU N, SHAO C, SUN H, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi biofertilizer improves American ginseng (*Panax quinquefolius* L.) growth under the continuous cropping regime[J]. Geoderma, 2020, 363: 114155.
- [41] CHELAN Z A, AMINI R, DABBAGH M N A. Essential oil yield and compositions of *Dracocephalum moldavica* L. in intercropping with fenugreek, inoculation with mycorrhizal fungi and bacteria[J]. Scientific Reports, 2023, 13(1): 8039.
- [42] YOUSSEF S M, SHAABAN A, ABDELKHALIK A, et al. Compost and phosphorus/potassium-solubilizing fungus effectively boosted quinoa's physio-biochemical traits, nutrient acquisition, soil microbial community, and yield and quality in normal and calcareous soils[J]. Plants (Basel), 2023, 12(17): 3071.
- [43] DONG L, LI Y, XU J, et al. Biofertilizers regulate the soil microbial community and enhance *Panax ginseng* yields[J]. Chinese Medicine, 2019, 14(20): 1-14.
- [44] DU X, LIU N, YAN B, et al. Proximity-based defensive mutualism between *Streptomyces* and *Mesorhizobium* by sharing and sequestering iron[J]. The ISME Journal, 2024, ward041.
- [45] WEN T, XIE P, LIU H, et al. Tapping the rhizosphere metabolites for the prebiotic control of soil-borne bacterial wilt disease [J]. Nature Communications, 2023, 14(1): 4497.
- [46] DOOLOTKELDIEVA T, BOBUSHEVA S, KONURBAEVA M. Effects of streptomyces biofertilizer to soil fertility and rhizosphere's functional biodiversity of agricultural plants[J]. Advances in Microbiology, 2015, 5(7): 555-571.
- [47] ALKURTANY A. The efficiency of prepared biofertilizer from local isolate of *Bradyrhizobium* sp. on growth and yield of mungbean plant[J]. The Iraqi Journal of Agricultural Sciences, 2018, 49(5): 722-730.
- [48] 米国全, 王裔娜, 史艳艳, 等. 土壤熏蒸剂及生物菌肥对日光温室番茄土壤酶活性及产量的影响[J]. 河南农业科学, 2018, 47(7): 100-105.
- [49] CHENG H Y, ZHANG D Q, HUANG B, et al. Organic fertilizer improves soil fertility and restores the bacterial community after 1,3-dichloropropene fumigation[J]. Science of the Total Environment, 2020, 738: 140345.
- [50] CHENG H Y, ZHANG D Q, REN L R, et al. Bio-activation of soil with beneficial microbes after soil fumigation reduces soil-borne pathogens and increases tomato yield[J]. Environmental Pollution, 2021, 283: 117160.
- [51] D'ERRICO G, GRECO N, VINALE F, et al. Synergistic effects of trichoderma harzianum, 1,3-dichloropropene and organic matter in controlling the root-knot nematode meloidogyne incognita on tomato[J]. Plants, 2022, 11(21): 2890.
- [52] 张庆华, 曾祥国, 韩永超, 等. 土壤熏蒸剂棉隆和生物菌肥对草莓连作土壤真菌多样性的影响[J]. 微生物学通报, 2018, 45(5): 1048-1060.
- [53] LI Q J, ZHANG D Q, SONG Z X, et al. Organic fertilizer activates soil beneficial microorganisms to promote strawberry growth and soil health after fumigation [J]. Environmental Pollution, 2022, 295: 118653.
- [54] GE A H, LIANG Z H, XIAO J L, et al. Microbial assembly and association network in watermelon rhizosphere after soil fumigation for *Fusarium* wilt control[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2021, 312: 107336.

- [55] ZHANG X, XUE C, FANG D, et al. Manipulating the soil microbiomes during a community recovery process with plant beneficial species for the suppression of *Fusarium* wilt of watermelon[J]. AMB Express, 2021, 11(1).
- [56] CHEN H J, ZHAO S, ZHAO J M, et al. Deep tillage combined with biofertilizer following soil fumigation improved chrysanthemum growth by regulating the soil microbiome[J]. Microbiology Open, 2020, 9(7): e1045.
- [57] PU R, WANG P, GUO L, et al. The remediation effects of microbial organic fertilizer on soil microorganisms after chloropicrin fumigation [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2022, 231: 113188.
- [58] 沈宗专, 孙莉, 王东升, 等. 石灰碳铵熏蒸与施用生物有机肥对连作黄瓜和西瓜枯萎病及生物量的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(10): 3351-3359.
- [59] XUE C, SHEN Z Z, HAO Y W, et al. Fumigation coupled with bio-organic fertilizer for the suppression of watermelon *Fusarium* wilt disease re-shapes the soil microbiome [J]. Applied Soil Ecology, 2019, 140: 49-56.
- [60] SHEN Z Z, XUE C, TAYLOR P W J, et al. Soil pre-fumigation could effectively improve the disease suppressiveness of biofertilizer to banana *Fusarium* wilt disease by reshaping the soil microbiome[J]. Biology & Fertility of Soils, 2018, 54: 793-806.
- [61] SHEN Z Z, XUE C, PENTON C R, et al. Suppression of banana *Panama* disease induced by soil microbiome reconstruction through an integrated agricultural strategy[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2019, 128: 164-174.
- [62] SHEN Z Z, WANG B B, ZHU J X, et al. Lime and ammonium carbonate fumigation coupled with bio-organic fertilizer application steered banana rhizosphere to assemble a unique microbiome against Panama disease[J]. Microbial Biotechnology, 2019, 12(3): 517-527.
- [63] WU J J, ZHU J H, ZHANG D Q, et al. Beneficial effect on the soil microenvironment of *Trichoderma* applied after fumigation for cucumber production[J]. PLoS One, 2022, 17(8): e0266347.
- [64] XIONG J, PENG S G, LIU Y J, et al. Soil properties, rhizosphere bacterial community, and plant performance respond differently to fumigation and bioagent treatment in continuous cropping fields [J]. Frontiers in Microbiology, 2022, 13: 923405.
- [65] PONGE J F. Plant-soil feedbacks mediated by humus forms: a review[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 57: 1048-1060.
- [66] DE MELO B A G, MOTTA F L, SANTANA M H A. Humic acids: structural properties and multiple functionalities for novel technological developments[J]. Materials Science & Engineering: C, 2016, 62: 967-974.
- [67] 文昭普, 郭景丽, 刘锐杰, 等. 腐殖酸类肥料在花卉栽培中的应用浅析[J]. 南方农业, 2021, 15(24): 21-22.
- [68] 于建, 吴钦泉, 洪丕征, 等. 简述生化腐植酸的功能、制备及其肥料应用[J]. 腐植酸, 2016(2): 6-10.
- [69] MRIDHA D, PAUL I, DE A, et al. Rice seed (IR64) priming with potassium humate for improvement of seed germination, seedling growth and antioxidant defense system under arsenic stress [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, 219: 112313.
- [70] 朱宝伟, 杜国丰. 黄腐酸在生产生活中的应用 [J]. 山东化工, 2016, 45(20): 133-134.
- [71] 王平, 门姝慧, 黄占斌. 胡敏素在土壤重金属污染修复中的研究进展[J]. 中国材料进展, 2021, 40(2): 147-151.
- [72] 房纪秀, 李卓航, 侯佳, 等. 硅肥应用研究进展[J]. 新疆农垦科技, 2022, 45(6): 43-46.
- [73] 蔡德龙. 国内外硅肥研究与应用进展[J]. 磷肥与复肥, 2017, 32(1): 37-39.
- [74] 秦微娜, 周智浩. 有机硅水溶缓释肥在玉米上应用效果[J]. 现代化农业, 2022(5): 44-45.
- [75] 刘月, 刘海河, 张彦萍, 等. 外源硅对厚皮甜瓜白粉病抗性的影响[J]. 河北农业大学学报, 2021, 44(6): 51-56.
- [76] 张杰, 尹强, 闫志坚, 等. 硅对干旱胁迫下燕麦根系响应的分子机理[J]. 分子植物育种, 2021, 19(14): 4759-4769.
- [77] 龚正, 黄丽. KH₂PO₄和硅肥对垃圾填埋场紫色土重金属的钝化[J]. 湖南农业科学, 2022(12): 43-49.
- [78] 潘荣庆, 何卿姐, 韦昌江, 等. 不同叶面肥及水稻品种对水稻糙米重金属累积的影响[J]. 福建农业学报, 2022, 37(6): 712-719.
- [79] 袁帅, 赵立欣, 孟海波, 等. 生物炭主要类型、理化性质及其研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(5): 1402-1417.
- [80] 张林, 林庆毅, 张梦阳, 等. 生物炭对不同土壤改良及生态效应影响的研究进展[J]. 中国农学通报, 2019, 35(15): 54-58.
- [81] 李湘萍, 张建光. 生物质热解制备多孔炭材料的研究进展[J]. 石油学报(石油加工), 2020, 36(5): 1101-1110.
- [82] 王翰琨, 吴永波, 刘俊萍, 等. 生物炭对土壤氮循环及其功能微生物的影响研究进展[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(6): 689-701.
- [83] 刘玉学, 唐旭, 杨生茂, 等. 生物炭对土壤磷素转化的影响及其机理研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(6): 1690-1695.
- [84] 刘金灵, 张亚茹, 王宇光, 等. 生物炭对土壤微生物影响的研究进展[J]. 中国农学通报, 2023, 39(26): 60-66.
- [85] HU W, ZHANG Y, RONG X, et al. Biochar and organic fertilizer applications enhance soil functional microbial abundance and agroecosystem multifunctionality[J]. Biochar, 2024, 6(1): 3.
- [86] SHEN G, ASHWORTH D J, GAN J, et al. Biochar amendment to the soil surface reduces fumigant emissions and enhances soil microorganism recovery[J]. Environmental Science & Technology, 2016, 50(3): 1182-1189.
- [87] BHATTACHARJEE R, DEY U. Biofertilizer, a way towards organic agriculture: a review[J]. African Journal of Microbiology Research, 2014, 8(24): 2332-2343.
- [88] 周丽平, 袁亮, 赵秉强, 等. 腐植酸的组成结构及其对作物根系调控的研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(2): 334-343.
- [89] 周峰, 曾智, 刘春成. 正常环境条件下硅肥对作物生长影响研究进展[J]. 江西水利科技, 2023, 49(2): 102-107.
- [90] 王凡, 廖娜, 曹银贵, 等. 基于生物炭施用的土壤改良研究进展[J]. 新疆环境保护, 2020, 42(2): 12-23.

(编辑:胡新宇)