

胡哲伟,金 淑,应蓉蓉,等. 蚓粪和益生菌配施对土壤微生物生物量及酶活性的影响[J]. 江苏农业科学,2021,49(11):201-207.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2021.11.035

蚓粪和益生菌配施对土壤微生物生物量及酶活性的影响

胡哲伟,金 淑,应蓉蓉,刘国强

(生态环境部南京环境科学研究所,江苏南京 210042)

摘要:为探究蚓粪和益生菌配施对土壤改良和微生物生长的影响,在野外试验大棚内设置 6 个不同施肥处理(单施化肥、单施蚓粪、化肥+巨大芽孢杆菌、蚓粪+巨大芽孢杆菌、化肥+解淀粉芽孢杆菌和蚓粪+解淀粉芽孢杆菌),分析不同处理下土壤微生物生物量和酶活性的变化规律。试验结果表明,与单施化肥相比,单施蚓粪可显著提高微生物生物量氮(MBN)、碳(MBC)、磷(MBP),吡啶乙酸(IAA),土壤呼吸,以及蔗糖酶(INV)、脲酶(UE)、磷酸酶(PHOS)、蛋白酶(PRO)、过氧化氢酶(CAT)活性($P < 0.05$)。与单施蚓粪相比,蚓粪与益生菌配施能有效提高土壤 MBN、MBC、MBP、IAA、土壤呼吸和土壤酶活性(INV、UE、PRO、CAT),而磷酸酶活性以配施蚓粪+解淀粉芽孢杆菌处理有效提升,配施处理含量反而减少。相关性分析表明,土壤微生物生物量与土壤酶活性均呈显著正相关($P < 0.05$)。因此,推荐使用蚓粪配施益生菌来提高土壤微生物生物量及土壤酶活性,以改善土壤微生态环境,提高作物产量及品质,促进农业的可持续发展。

关键词:蚓粪;益生菌;土壤;微生物生物量;酶活性

中图分类号:S154.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2021)11-0201-07

化学肥料的长期施用导致了土壤微生物量的减少及酶活性的降低,显著降低土壤质量,从而影响农作物产量和品质^[1-3]。用以蚓粪为代表的有机肥替代化肥,可提高土壤养分的有效性,刺激土壤微生物生物量增加,维持土壤健康^[4-7]。研究表明,蚓粪通过改善土壤质量和酶活性来改善作物生长

的土壤环境,从而提升作物的产量和品质^[8-12]。益生菌不仅可促进作物吸收矿质营养元素,将土壤中难以被作物吸收利用的养分转化为易吸收利用的成分,还能提高微生物活性,改善土壤生态环境^[13]。土壤微生物生物量是土壤养分循环和转化的重要动力和主要参与者,是土壤微生态系统中最活跃的部分^[14-17]。土壤酶活性是植物根系及微生物分泌的具有高度催化作用的蛋白质,对土壤养分、有机质、容重等土壤环境因子的变化极为敏感,土壤环境因子的微小变化就会引起土壤酶活性的改变,如何提升土壤微生物生物量和酶活性已成为改善农

收稿日期:2021-03-19

基金项目:国家自然科学基金(编号:42007182)

作者简介:胡哲伟(1989—),男,江苏南京人,硕士,助理研究员,主要从事土壤环境安全评价研究。E-mail:hzw@nies.org。

通信作者:金 淑,硕士,助理研究员,主要从事农业面源污染控制等研究工作。E-mail:jinsu@nies.org。

复合肥中的钾在早期较普通 NPK 复混肥的释放率低。康帝有机肥和腐殖酸复合肥在后期钾的释放速率高于普通 NPK 复混肥中钾的释放速率,并且可能有活化土壤中难利用钾的作用。

参考文献:

- [1]赵国林,阎 晗,刘志伟,等. 腐殖酸类复混肥料的应用前景[J]. 现代化农业,2000(9):13-15
- [2]牛新湘,马兴旺. 农田土壤养分淋溶的研究进展[J]. 中国农学通报,2011,27(3):451-456.
- [3]沈筱染,李绍才,孙海龙. 氮磷钾在两种基质中的淋溶研究[J].

北方园艺,2016(17):179-183.

- [4]张一扬,方丽婷,帅京彤,等. 腐殖酸原料对植烟土壤钾素淋溶的影响[J]. 腐植酸,2019(3):25-33.
- [5]周杰文,李海平,肖志新,等. 木本泥炭基腐殖酸钾与矿物钾肥配施对酸化植烟土壤养分与烟叶品质的影响[J]. 江苏农业科学,2019,47(8):112-116.
- [6]董艳红,王火焰,周健民,等. 不同土壤钾素淋溶特性的初步研究[J]. 土壤,2014,46(2):225-231.
- [7]金继运. 土壤钾素研究进展[J]. 土壤学报,1993,30(2):95-100.
- [8]Tan K H. The release of silicon, aluminum and potassium during decomposition of soil mineral by humic acid [J]. Soil Science, 1980,129(1):5-11.

田土壤生态系统的主要任务。

目前,关于蚓粪或益生菌在提高土壤肥力,增加作物产量品质方面已有大量的报道^[18-22],但对于蚓粪配施益生菌以及两者间的交互作用对土壤微生物量及酶活性的研究还有待进一步探讨。因此,本研究选用了巨大芽孢杆菌和解淀粉芽孢杆菌与蚓粪配施,并以化肥作为对照,研究不同配施处理对土壤微生物量及酶活性的影响,以期探明蚓粪与益生菌配施及其交互作用对土壤微生态环境的影响,为蚓粪和益生菌在土壤改良和农业生产使用上提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

本研究在江苏省南京市江宁区横溪镇国家环境保护农药环境评价与污染控制重点实验室野外试验基地的温室大棚开展,供试土壤和蚯蚓粪理化性质见表 1,供试蚯蚓为赤子爱胜蚓 (*Eisenia*

foetida),供试番茄品种为“金小灵”。试验用菌为解淀粉芽孢杆菌 (*Bacillus amyloliquefaciens*, BA) 和专用巨大芽孢杆菌 (*Bacillus megaterium*, BM)。

1.2 试验设计

试验共设计 6 个处理(表 2),24 个试验小区(6 个处理 × 4 个重复),随机区组排列,小区面积为 4 m² (2 m × 2 m)。根据前期研究结果,选定 10 t/hm² 蚓粪施用量(干基质量),分 2 次(间隔 2 d)撒施于试验小区中。供试化肥为尿素、磷酸二氢铵和氯化钾,其施用量根据蚓粪中含有的 N、P、K 及施用量按比例计算,其中纯氮、五氧化二磷、氧化钾的施用量分别为 100、265、223 kg/hm²。接种的菌液来源于酵罐发酵,其活菌成分含量为 1.5 × 10⁸ CFU/mL,接种量为 1 L/m²,未添加菌液处理加入普通细菌培养基:酵母粉 4.0 g,蛋白胨 8.0 g,NaCl 8.0 g,蒸馏水 0.8 L,培养稀释 100 倍后均匀洒入各处理小区,并随肥料一起充分混匀。试验期间各处理田间管理措施一致。

表 1 土壤和蚓粪基本性质

材料	有机质含量 (g/kg)	全氮含量 (g/kg)	全磷含量 (g/kg)	全钾含量 (g/kg)	碱解氮含量 (mg/kg)	速效磷含量 (mg/kg)	速效钾含量 (mg/kg)	pH 值	含水量 (%)
黄棕壤	14.3	0.92	0.62	20.4	34.2	40.6	120	5.38	21.3
蚯蚓粪	568.0	9.68	11.40	18.6	624.0	5 689.0	2001	8.12	70.8

表 2 试验小区处理设置

处理简称	处理设置
CF	单施化肥
CF + BM	化肥 + 巨大芽孢杆菌
CF + BA	化肥 + 解淀粉芽孢杆菌
VC	单施蚓粪
VC + BM	蚓粪 + 巨大芽孢杆菌
VC + BA	蚓粪 + 解淀粉芽孢杆菌

1.3 试验方法

2020 年 6 月 4 日移栽 28 棵幼苗于每个小区中,苗间距为 30 cm × 50 cm,共 28 株,采取滴灌的方式进行,确保土壤湿润,防止积水。于番茄盛花期(7 月 15 日)和收获期(9 月 18 日)分别采集 0 ~ 20 cm 深度的土壤样品,并于结果期每隔 6 d 采摘成熟果实并称质量计产,采摘第 4 穗果时取相同成熟度果实测定其品质指标。

1.4 测试方法

土壤微生物生物量碳(MBC)、氮(MBN)和磷(MBP)采用氯仿熏蒸-浸提法测定。土壤基础呼

吸测定采用 NaOH 吸收法^[8],测定标准条件下微生物碳源矿化过程中 CO₂ 的产生量。土壤过氧化氢酶(CAT)采用 KMnO₄ 滴定法测定,脲酶(UE)采用苯酚钠比色法测定,磷酸酶(PHOS)采用磷酸苯二钠比色法测定,蔗糖酶活性(INV)采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定,蛋白酶活性(PRO)采用茆三酮比色法^[9]测定。

1.5 统计分析

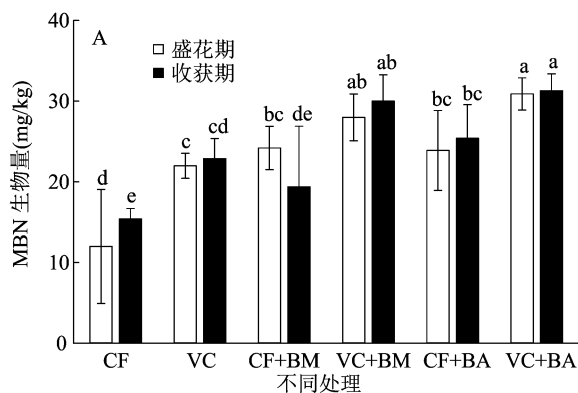
采用 SPSS 22.0 软件进行数据分析,差异显著性检验采用 LSD 法(*P* < 0.05)。采用 Excel 作图、制表。

2 结果与分析

2.1 蚓粪和益生菌配施对土壤微生物生物量的影响

不同施肥处理均不同程度地改善土壤微生物生物量、生长素以及土壤呼吸。在盛花期和收获期,与单施化肥处理 CF 相比,单施蚓粪处理 VC 可显著提高土壤微生物生物量氮,分别提高了 83.33% 和 48.70%。

由图 1 可见,化肥配施益生菌处理较 CF 处理显著增加盛花期和收获期土壤微生物生物量氮,增幅分别为 101.67% 和 25.79% (CF + BM),99.17% 和 64.94% (CF + BA),这表明化肥配施益生菌后能显著提高盛花期和收获期土壤微生物生物量氮。与 VC 处理相比,蚓粪配施益生菌 (VC + BM 和 VC + BA) 显著增加土壤微生物生物量氮,增幅为 27.27% ~ 40.45%。此外,蚓粪配施益生菌处理 (VC + BM、VC + BA) 微生物生物量氮显著高于化肥配施益生菌处理 (VC + BM、VC + BA)。这也进一步



说明施用蚓粪对改良土壤微生物生物量氮具有较好的效果。蚓粪和益生菌配施对土壤微生物生物量碳、磷的影响与微生物生物量氮相似,与 CF 处理相比,VC 处理可显著提高土壤微生物生物量碳、磷,提高了 13.99% ~ 42.69%。CF + BM、CF + BA 处理较 CF 处理显著增加盛花期和收获期土壤微生物生物量碳、磷,增幅分别为 1.40% ~ 58.15%、18.18% ~ 72.41%。随着蚓粪与益生菌的配施 (VC + BM 和 VC + BA),土壤微生物生物量碳、磷含量明显增加,增幅分别为 1.84% ~ 23.31%、25.83% ~ 36.67%。

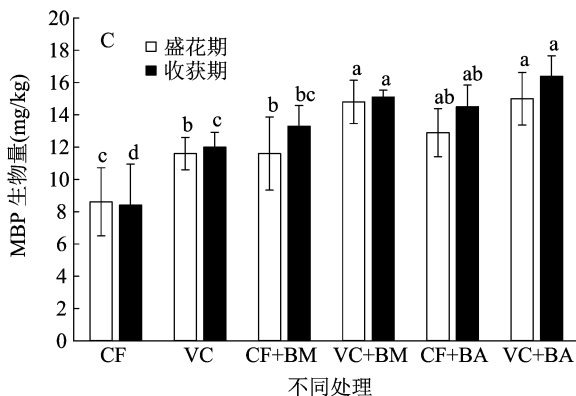
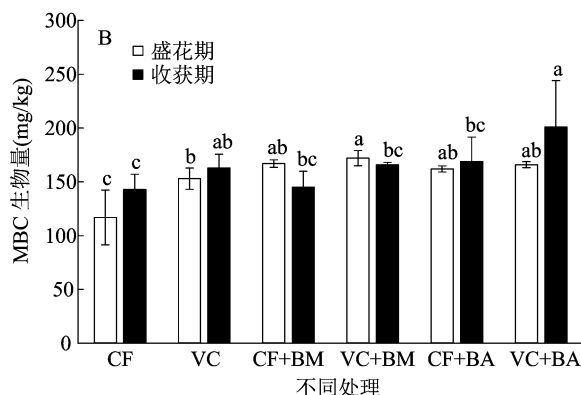


图1 不同施肥处理对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响

由图 2 可见,与对照 CF 相比,盛花期和收获期的 CF + BM 和 CF + BA 处理 IAA 分别提高 14.26% 和 15.62% 及 37.52% 和 7.81%。对于土壤 IAA, VC + BM 处理较 VC 分别提高了 13.51% 和 2.46%, VC + BA 处理较 VC 分别提高了 9.46% 和 12.32%。同时,蚓粪较化肥处理分别提高了 11.07% 和 5.73%。土壤呼吸方面,施用蚓粪处理 (VC、VC + BM、VC + BA) 显著高于化肥处理 (CF、CF + BM、CF + BA),增幅为 23.89% ~ 202.86% (图 3)。

2.2 蚓粪和益生菌配施对土壤酶活性的影响

不同施肥处理对各土壤酶活性存在显著影响 (图 4、图 5)。蔗糖酶、脲酶和磷酸酶不同处理整体表现为收获期小于盛花期,表明在作物收获期土壤

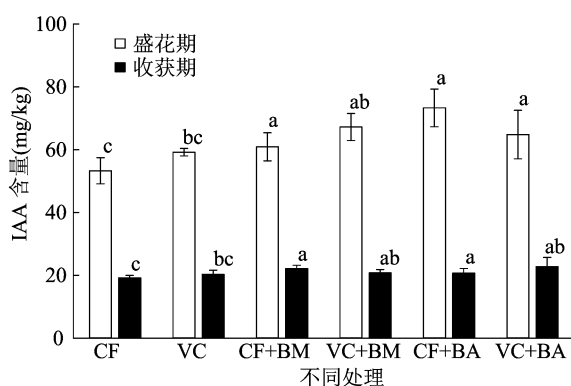


图2 不同处理对土壤吲哚乙酸(IAA)的影响

营养物质、有机磷及有机氮的转化能力小于盛花期。施用蚓粪无论是在盛花期还是收获期均明显大于施用化肥处理,分别使蔗糖酶提高了 44.05%

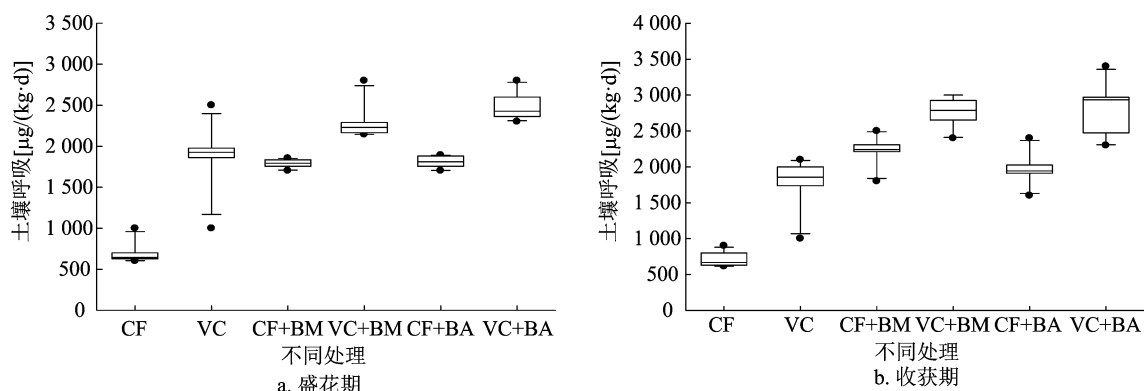


图3 不同施肥处理对不同时期土壤呼吸的影响

和 35.03%，脲酶提高了 27.97% 和 26.19%，磷酸酶提高了 44.05% 和 35.03%。主要原因可能是施用蚓粪能有效增加土壤中易溶性营养物质，将有机磷转化成可供植物吸收的无机磷，增强土壤有效态氮的转化能力和无机氮的供应能力。与化肥配施益生菌相比，蚓粪配施益生菌能明显增加土壤蔗糖酶、脲酶和磷酸酶活性，增幅分别为 12.93% ~ 17.67%、0.8% ~ 21.18% 和 4.48% ~ 32.10%。蚓粪配施益生菌较单施蚓粪能提高土壤蔗糖酶和脲酶 ($P > 0.05$)，虽没有达到显著水平，但能有效提升土壤酶活性，且以 VC + BA 效果较好。而 VC + BM 处理较 VC + BA 能有效提升磷酸酶活性，这表明在土壤无

机磷转化方面以 VC + BM 效果较好。

不同处理的土壤蛋白酶和过氧化氢酶活性均为收获期大于盛花期，表明在作物收获期土壤中氮素营养的转化状况和土壤微生物新陈代谢能力大于盛花期。与施用化肥处理相比，施用蚓粪显著增加土壤蛋白酶活性和过氧化氢酶活性，增幅分别 4.18% ~ 9.3%、22.9% ~ 33.33%。为蚓粪配施益生菌较单施蚓粪均能有效提升土壤蛋白酶和过氧化氢酶，其中，蛋白酶分别提高了 9.22% 和 11.42% (VC + BM) 及 12.41% 和 11.73% (VC + BA) ($P < 0.05$)；过氧化氢酶分别提高了 7.86% 和 7.45% (VC + BM) 及 5% 和 5.59% (VC + BA) ($P > 0.05$)。

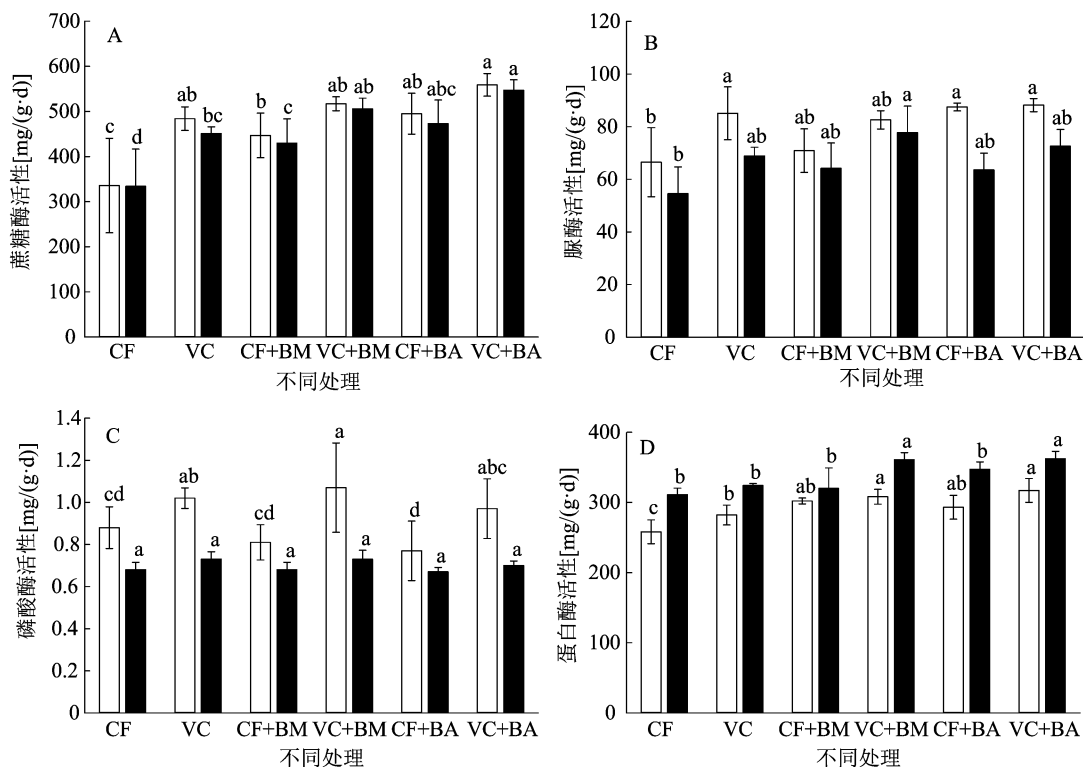


图4 不同处理对土壤酶活性的影响

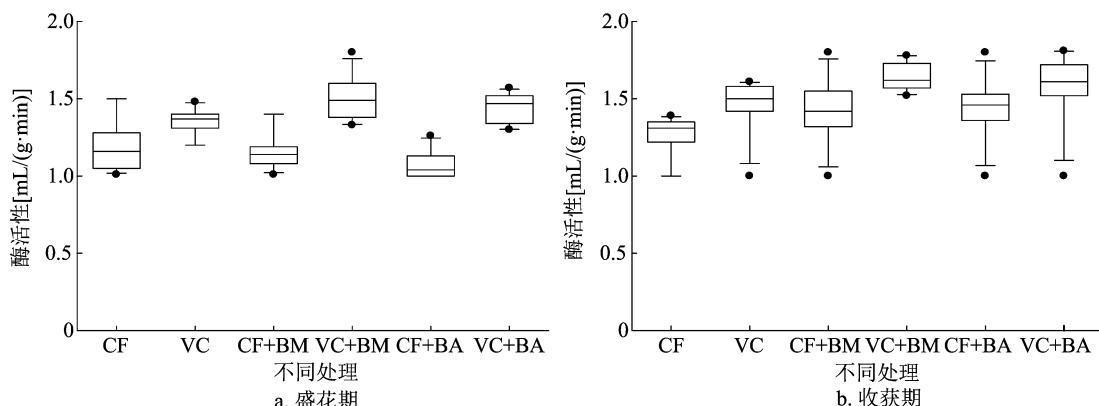


图5 不同处理对土壤过氧化氢酶活性的影响

综上,施用蚓粪比化肥更能提高土壤酶活性,而蚓粪配施益生菌也能明显提升土壤酶活性,且巨大芽孢杆菌(BM)与解淀粉芽孢杆菌(BA)对配施效果的影响不大。

2.3 相关性分析

相关性分析(表3)表明,土壤微生物碳、氮、磷均与土壤酶活性呈显著正相关。其中,MBN、MBC、MBP和基础呼吸与蔗糖酶达到了显著水平($P < 0.01$);脲酶与MBN(0.657**)、MBC(0.429*)显著。蛋白酶与MBN(0.688**)、MBP(0.687**)和基础呼吸(0.631**)达到显著水平。此外,土壤过氧化氢酶与MBN(0.747**)、MBC(0.634**)和MBP(0.578**)均达到显著水平。

表3 土壤微生物生物量与土壤酶活性的相关性分析

指标	相关系数				
	蔗糖酶	脲酶	磷酸酶	蛋白酶	过氧化氢酶
MBN	0.694**	0.657**	0.091	0.688**	0.747**
MBC	0.657**	0.429*	0.173	0.477*	0.634**
MBP	0.656**	0.366	0.084	0.687**	0.578**
IAA	0.513*	0.118	0.153	0.275	0.330
基础呼吸	0.662**	0.368	0.146	0.631**	0.513*

注:*表示在0.05水平上相关性显著;**表示在0.01水平上相关性显著。

由此可以看出,土壤酶活性随土壤微生物量的增加而显著增强,且蔗糖酶受土壤微生物量影响最为显著,磷酸酶受土壤微生物量影响不大,这可能是由于作物在生长过程中对不同酶的需求不同导致的。从相关性的角度可以看出,土壤微生物指标MBN、MBC、MBP和基础呼吸能更好地解释土壤酶活性的变化(由于其相关性都很高且达到显著差异),但是土壤IAA含量与酶活性并不存在一定的相关性。其中MBN和MBC对除磷酸酶以外的土

壤酶活性(蔗糖酶、脲酶、蛋白酶、过氧化氢酶)解释度最好,其次为MBP和土壤呼吸。

3 讨论

3.1 土壤微生物生物量对蚓粪和益生菌配施的响应

土壤微生物生物量不仅是土壤营养物质及有机质迁移转化的驱动力,同时可改善土壤理化性质,调节土壤养分循环与平衡,并维持土壤生态平衡^[24]。本研究表明,与单施化肥相比,施用蚓粪对土壤微生物生物量碳、氮、磷均具有明显的促进作用。与单施蚓粪或化肥配施益生菌相比,蚓粪配施益生菌能显著提高土壤MBN和MBP($P < 0.05$),明显提高土壤MBC、IAA和土壤呼吸($P < 0.05$)。这与张志林等的研究结果^[2]相一致,配施蚯蚓粪较单施化肥能明显提升桑树土壤微生物生物量碳,增加根际土壤微生物数量。贾德新等研究也表明,增施蚯蚓粪不仅能提高土壤养分的有效性,还能显著增强土壤微生物活性,改善豇豆根际土壤的微生态环境^[24]。此外,张池等研究表明,添施蚓粪能明显增加土壤溶解性碳、碱解氮、速效磷以及土壤微生物生物量碳氮的含量^[10]。王明友等通过试验表明,化肥配施蚯蚓粪较单施蚓粪相比,能明显提高豇豆土壤中活性有机碳含量,增强土壤微生物活性。值得一提的是,研究还表明单施蚓粪与化肥配施蚓粪相比,对豇豆土壤养分的影响较小^[25]。本研究虽未将蚓粪与化肥配施作为对照试验,但研究结果表明单施蚓粪与化肥配施益生菌对土壤微生物生物量的影响差异不显著。此外,本研究表明蚓粪配施益生菌比化肥配施益生菌有明显的促进作用,这与申飞等的研究结果^[9]一致,益生菌配施蚓粪对菠菜产量增加和品质改善效果明显优于益生菌配施化肥。

同时,本研究表明蚓粪配施巨大芽孢杆菌与蚓粪配施解淀粉芽孢杆菌对土壤微生物生物量的影响有一定的差异,整体上均有明显的效果但差异不大。这与申飞等的研究结果^[23]不一致,申飞等的研究结果表明综合比较 2 种益生菌和蚓粪配施效果,以蚓粪配施解淀粉芽孢杆菌对改良土壤性状改善、提高蔬菜产量品质方面效果较好。这可能是因为其种植的是菠菜,而菠菜对养分及土壤有机质的吸收与番茄不完全相同,且本研究针对的是土壤微生物生物量,申飞等的研究针对的是菠菜产量、品质及土壤养分和 pH 值。

3.2 土壤酶活性对蚓粪和益生菌配施的响应

土壤酶参与土壤中许多重要的生物化学过程,常被用作评价土壤质量和生态系统功能的重要指标。例如,脲酶与土壤中微生物和有机质含量一般呈正相关关系,对提高土壤氮肥利用率和土壤氮素代谢具有重要的意义;蔗糖酶活性常与土壤有机质、微生物数量和土壤基础呼吸有显著相关关系;蛋白酶在含氮有机化合物转化中(如氨基酸、蛋白质等)起着至关重要的作用;过氧化氢酶一般能反映土壤腐殖化的程度和有机质的积累;磷酸酶与土壤中有机磷的代谢与转化有着密切的作用,在很大程度上反映了磷肥的吸收与利用^[26]。本研究表明,与单施化肥相比,施用蚓粪能显著提高蔗糖酶和过氧化氢酶活性($P < 0.05$),同时提高脲酶、磷酸酶和蛋白酶活性($P > 0.05$)。这与徐洪岩等的研究结果^[26]一致,研究表明施用蚯蚓粪显著增加 3 个不同深度土壤磷酸酶、蛋白酶、蔗糖酶和纤维素酶活性。李少杰等的研究也表明,与对照(CK)相比,配施蚯蚓粪处理土壤有机质含量增加 21.93% ~ 31.38%,且能显著提高土壤蔗糖酶、磷酸酶、蛋白酶和过氧化氢酶活性^[27]。张池等的研究表明,添施蚓粪能显著增加土壤过氧化氢酶、转化酶、脲酶、酸性磷酸酶和碱性磷酸酶活性($P < 0.05$)^[28]。

申飞等的研究结果表明,蚓粪与益生菌配施不仅显著提高土壤硝态氮含量、蔗糖酶活性,还提高了土壤 EC 值^[23]。本研究结果与之相似,与单施蚓粪或化肥配施益生菌相比,蚓粪和益生菌配施能明显提升土壤酶活性。此外,本研究发现巨大芽孢杆菌(BM)与解淀粉芽孢杆菌(BA)对配施效果的影响不大,这与申飞等的研究结果^[23]相悖,申飞等研究发现蚓粪配施解淀粉芽孢杆菌对土壤酶活性的改善效果最好,这可能是因为作物对土壤养分吸收

利用效率不同引起的土壤微生态环境的变化。对于本研究与前人研究间的差异还有待进一步开展相关试验进行分析。

此外,本研究表明土壤微生物生物量碳、氮、磷均与土壤酶活性均呈显著正相关。这与陈小锦等的研究结果^[29]相一致,陈小锦等研究发现,施用蚯蚓粪可提高多种土壤酶活性,促进土壤微生物繁殖,从而提高红壤肥力及养分有效性,改善红壤生态环境。庞月等研究表明施用化肥对土壤中的蔗糖酶、酸性磷酸酶活性影响表现为下降的趋势,而施用不同比例蚓粪显著提高了土壤中蔗糖酶和酸性磷酸酶的活性,这是因为配施蚓粪能显著增加土壤微生物生物量碳以及微生物生物量氮^[30]。雍海燕等研究也发现,与 CK 相比,施用蚓粪能显著增加土壤磷酸酶和脲酶活性,增幅为 40.74% 和 53.33%,且能提高微生物量氮达 36.84%。其主要原因是施用蚓粪或配施益生菌不仅为土壤增加养分,还能促进土壤微生物繁殖,改善土壤微生物生态环境,从而维持或提高农田土壤肥力和功能潜力^[31]。

4 结论

(1)与单施化肥相比,配施蚓粪显著提高了土壤微生物生物量碳、氮、磷。与单施蚓粪和化肥配施益生菌相比,蚓粪配施益生菌能显著提高土壤微生物生物量碳、氮、磷。

(2)单施蚓粪或蚓粪和益生菌配施均能明显提高土壤酶活性,促进土壤营养物质、有机磷、有机氮的转化及土壤微生物新陈代谢,且蚓粪和益生菌配施比单施蚓粪效果更佳。

(3)土壤微生物生物量碳、氮、磷均与土壤酶活性呈显著正相关,且土壤酶活性是反映土壤微生物生物量的重要指标之一。综上,推荐使用蚓粪配施益生菌来提高土壤微生物生物量及土壤酶活性,以改善土壤微生态环境,提高作物产量及品质,促进农业的可持续发展。

参考文献:

- [1] 韩顺斌,马丽君,华军,等. 蚯蚓粪和化肥配施对日光温室番茄产量和品质的影响[J]. 农业科技与信息,2020,(13):19-21.
- [2] 张志林,秦和生,何梦秀,等. 蚯蚓粪配施化肥对桑树根际土壤生物学特征及桑叶产量和品质的影响[J]. 西南农业学报,2020,33(2):357-362.
- [3] Ding Z, Kheir S, Ali M, et al. A vermicompost and deep tillage system to improve saline-sodic soil quality and wheat productivity

- [J]. Journal of Environmental Management, 2021, 277: 111–118.
- [4] Yang L, Zhao F, Chang Q, et al. Effects of vermicomposts on tomato yield and quality and soil fertility in greenhouse under different soil water regimes[J]. Agricultural Water Management, 2015, 160: 98–105.
- [5] 刘 慧, 史津玮, 张国显, 等. 蚓粪替代化肥对土壤磷素组分和番茄产量的影响[J]. 北方园艺, 2020(10): 104–110.
- [6] Perrino E V, Ladisa G, Calabrese G. Flora and plant genetic resources of ancient olive groves of Apulia (Southern Italy) [J]. Genetic Resources and Crop Evolution, 2014, 61(1): 23–53.
- [7] Kiran, Seving. Effects of vermicompost on some morphological, physiological and biochemical parameters of lettuce (*Lactuca sativa* var. *crispa*) under drought stress [J]. Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj–Napoca, 2019, 47(2): 352–358.
- [8] 任 涵, 黄宝灵, 康 凯, 等. 生物炭和益生菌对桉树幼苗生物量及其林下土壤微生物活性的影响[J]. 南方农业学报, 2019, 50(8): 1785–1791.
- [9] 刘恩科, 赵秉强, 李秀英, 等. 长期施肥对土壤微生物量及土壤酶活性的影响[J]. 植物生态学报, 2008, 32(1): 176–182.
- [10] 张 池, 陈旭飞, 周 波, 等. 蚓粪施用对土壤微生物特征以及酶活性的影响[J]. 土壤 2014, 46(1): 70–75.
- [11] Demir Z. Effects of Vermicompost on soil physicochemical properties and lettuce (*Lactuca sativa* var. *crispa*) yield in greenhouse under different soil water regimes[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2019(3): 2151–2168.
- [12] 邱 月, 刘 平, 魏忠平, 等. 渤海泥质海岸四种典型防护林对土壤微生物量、酶活性及土壤养分的影响[J]. 土壤通报, 2017, 48(5): 1119–1125.
- [13] Maria G B, Marina J, Zangerle M, et al. Effects of digestate on soil chemical and microbiological properties: A comparative study with compost and vermicompost [J]. Journal of Hazardous Materials, 2015, 302: 267–274.
- [14] Kiran S. Alleviation of adverse effects of salt stress on lettuce (*Lactuca sativa* var. *crispa*) by application of vermicompost [J]. Acta scientiarum Polonorum. Hortorum cultus = Ogrodnictwo, 2019, 18(5): 153–160.
- [15] 秦玮玺, 斯贵才, 雷天柱, 等. 氮肥添加对土壤微生物生物量及酶活性的影响[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(1): 170–175.
- [16] 周 枫, 罗佳琳, 赵亚慧, 等. 翻耕和不同泡田方式对土壤微生物生物量及其酶活性的影响[J]. 土壤通报, 2020, 51(2): 352–357.
- [17] 张志阳. 牦牛粪分解及对土壤理化性质、微生物生物量和酶活性的影响[D]. 兰州大学, 2019.
- [18] 崔 羽, 严思维, 吴建召, 等. 汶川地震受损区恢复初期植物与微生物生物量、土壤酶活性对土壤呼吸的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2019, 25(2): 215–224.
- [19] 王 波, 李 琴, 朱 炜, 等. 毛竹林覆盖经营对土壤养分含量、酶活性及微生物生物量的影响[J]. 林业科学, 2019, 55(1): 110–118.
- [20] 周东兴, 李 磊, 李晶, 等. 玉米/大豆轮作下不同施肥处理对土壤微生物生物量及酶活性的影响[J]. 生态学杂志, 2018, 37(6): 1856–1864.
- [21] Hossain M B, Ryu K S. Effects of organic and inorganic fertilizers on lettuce (*Lactuca sativa* L.) and soil properties [J]. SAARC Journal of Agriculture, 2018, 15(2): 93–102.
- [22] 文 嘉, 曾光明, 安 赫, 等. 改性沸石改良底泥对土壤中微生物生物量碳及酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(2): 302–307.
- [23] 申 飞, 刘满强, 李辉信, 等. 蚓粪和益生菌互作对土壤性状、菠菜产量和品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2016(5): 90–95.
- [24] 贾德新, 李士平, 王风丹, 等. 蚯蚓粪对豇豆根际土壤生物学特征及微生物活性的影响[J]. 浙江农业学报, 2016, 28(318–3232): 318–323.
- [25] 王明友, 井大炜, 张 红, 等. 蚯蚓粪对豇豆土壤活性有机碳及微生物活性的影响[J]. 核农学报, 2016, 30(7): 1404–1410.
- [26] 徐洪岩, 刘 丽, 张明爽. 蚯蚓粪对土壤酶活性的影响[J]. 农业研究与应用, 2020, 33(3): 6–8.
- [27] 李少杰, 王红梅, 曹云娥. 蚯蚓粪对设施甜瓜土壤微生物特性的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(10): 286–290.
- [28] 张 池, 陈旭飞, 周 波, 等. 不同比例蚓粪对旱地土壤微生物学特性以及酶活性的影响[J]. 中国农业大学学报, 2014, 19(1): 118–124.
- [29] 陈小锦, 沈鹏飞, 陈博阳, 等. 不同蚓粪添加量对红壤微生物及酶活性的影响[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(11): 443–445.
- [30] 庞 月, 史雅静, 王玉荣, 等. 追施蚓粪对西瓜产量品质及土壤酶活性的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2018(6): 35–39.
- [31] 雍海燕, 王红梅, 沙 龙. 不同有机物料处理对设施番茄土壤中微生物的影响[J]. 宁夏农林科技, 2018, 59(6): 33–37.