

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

宋以玲^{1,2}, 于建^{1,2}, 陈士更^{1,2}, 肖承泽^{1,2}, 李玉环³, 苏秀荣⁴, 丁方军^{1,2,3}

(1. 山东农大肥业科技有限公司, 山东 泰安 271000; 2. 山东省腐植酸高效利用工程技术研究中心, 山东 泰安 271000;
3. 山东农业大学资源与环境学院, 山东 泰安 271018; 4. 山东农业大学化学学院, 山东 泰安 271018)

摘要: 通过盆栽试验, 研究化肥减量 10%~30% 条件下, 配施与所减化肥相同用量的 2 种生物有机肥对油菜生理代谢、产量、土壤生物学特性和养分含量的影响, 系统的阐述了生物有机肥应用于蔬菜生产的优势所在。结果表明: 减量化肥配施生物有机肥可促进油菜生长, 提高油菜叶片内叶绿素含量和根系活力, 同时增强了油菜叶片和根系内抗氧化酶(SOD、POD、CAT)活性, 降低了过氧化物含量(MDA、O₂⁻), 进而提高了油菜的光合性能和抗氧化能力, 与常规施肥(100%化肥)相比, 产量提高了 4.60%~24.55%, 根际土壤细菌和放线菌数分别显著提高了 111.26%~210.76% 和 12.49%~34.09%, 而真菌数显著降低了 20.37%~39.68%, 同时提高了根际土壤中中性磷酸酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性, 而降低了土壤脲酶和脱氢酶活性, 最终提高了根际土壤中有效养分和有机质含量。以上结果表明, 减量化肥配施生物有机肥可通过改善根际土壤微生物群落的数量和结构来改变土壤酶活性和有效养分含量, 优化根际环境的同时提高根系活力, 增强植物抗逆性和光合能力, 最终实现养地增产的效果。

关键词: 生物有机肥; 油菜; 抗氧化系统; 土壤微生物; 土壤酶

中图分类号: S144.1; S565.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2018)01-0352-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.01.055

Effects of Reduced Chemical Fertilizer with Application of Bio-organic Fertilizer on Rape Growth, Microorganism and Enzymes Activities in Soil

SONG Yiling^{1,2}, YU Jian^{1,2}, CHEN Shigeng^{1,2}, XIAO Chengze^{1,2},

LI Yuhuan³, SU Xiurong⁴, DING Fangjun^{1,2,3}

(1. Shandong Agricultural University Fertilizer Science & Technology Co. Ltd., Tai'an, Shandong 271000;

2. Engineering & Technology Research Center of High Efficient Utilization of Humic Acid of Shandong Province, Tai'an, Shandong 271000; 3. College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018; 4. College of Chemistry, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018)

Abstract: In order to elucidate the advantage of bio-organic fertilizer to vegetable production, a pot experiment was carried out. The effects of two kinds bio-organic fertilizers on rape physiological metabolism, yield, and soil biological characteristics and nutrient content were studied through replacement of 10% to 30% chemical fertilizer with the same amount of the bio-organic fertilizers. Results showed that the bio-organic fertilizer, which was equivalent with the reduced chemical fertilizer, could promote rape growth, chlorophyll content and root activity. Meanwhile, the enhanced activities of antioxidant enzymes (SOD, POD, CAT) and reduced content of reactive oxygen species (MDA, O₂⁻) indicated the increased photosynthetic performance and oxidation resistance. Compared with the conventional fertilization (100% chemical fertilizer), the rape yield increased by 4.60% to 24.55% in bio-organic fertilization. The population of soil bacteria and actinomycetes was significantly increased by 111.26% to 210.76% and 12.49% to 34.09%, respectively, but the number of fungi was decreased by 20.37% to 39.68%. With the partial absence of chemical fertilizer, the soil phosphatase, invertase and catalase activities were increased, but soil urease and dehydrogenase activities were decreased, resulting in the increased soil available nutrient and organic matter. The above results suggest that, application of bio-organic fertilizer with the partial absence chemical fertilizer can change soil enzyme activities and available nutrients by improving the number and structure of soil microbial community, and consequently, optimize the rhizosphere environment and increase the root activity and plant stress

收稿日期: 2017-08-01

资助项目: 泰山产业领军人才工程(LJNY201612); 山东省重点研发计划项目(2015GNC110025)

第一作者: 宋以玲(1989-), 女, 硕士研究生, 主要从事新型肥料的研发与应用研究。E-mail: songyiling0915@163.com

通信作者: 丁方军(1964-), 男, 学士, 副教授, 主要从事土壤肥科学、新型肥料研发及生产技术研究。E-mail: sdnfdyjs@163.com

resistance and photosynthetic ability, finally, enrich soil and increase crop production.

Keywords: bio-organic fertilizer; rape; antioxidant system; soil microorganism; soil enzyme

土壤和肥料是保障粮食产量和安全的基础,是人类赖以生存的保障,关系到农业和社会的可持续发展,然而伴随工业化的急速发展,化肥和农药用量迅猛增长,导致土壤营养结构遭到破坏、环境质量持续下降,对农业生产和人类健康造成了巨大威胁,不容忽视^[1]。随着化肥、农药双减政策的提出,有关新型肥料替代化肥的研究飞速发展^[2-4],前人研究^[5-6]表明,50%的有机肥替代无机肥可有效提高小麦、玉米轮作条件下磷素利用率,降低磷素的流失,在提高作物体内磷素含量的同时提高了小麦和玉米产量。在冬小麦与夏季稻轮作种植模式下无机肥减量 30%~50%时配施不同比例的有机肥可提高作物产量,土壤脲酶、过氧化氢酶和磷酸酶活性以及土壤微生物总量,且减量为 30%的条件下效果较优。生物有机肥是一类可依靠微生物的生命活动及其代谢产物为作物提供营养物质和其他生理活性物质的微生物活体制品,已有研究^[7-9]表明,生物有机肥不但可以提供植物生长所必需的营养物质,还具有改善土壤团粒结构、调节根际微生物区系组成、增强植物抗逆性、提高作物对养分的吸收能力及肥料利用率,实现产、质双增的效果。魏晓兰等^[10]研究发现,施用等量生物有机肥条件下,化肥减量在 25%范围内对土壤供肥能力及小白菜生物量不产生明显的影响,还一定程度的提高了肥料利用率;张焕菊等^[11]研究表明,减量化肥在 30%范围内,施入等重量生物有机肥,不仅不会阻碍烤烟生长,还能一定程度上改善烤烟经济性状,提高烟叶的感官评吸质量;陶磊等^[12]同样发现,在化肥减量 20%~40%情况下,配施生物有机肥不仅不会

导致棉花减产,还能改善土壤微生物区系结构和土壤酶活性。因此,依靠生物有机肥替代化肥的方式来减少化肥施入量是实现化肥零增长的快速有效途径。

蔬菜是人们日常生活中所必需的副食品,我国是世界上最大的蔬菜生产国和销售国,然而随着农药和化肥的大量施用及设施大棚内蔬菜的长期重茬种植,导致蔬菜抗病性减弱、土传病害爆发,蔬菜中农药残留、重金属和硝酸盐含量严重超标等诸多危害^[13]。因此寻找新的施肥管理模式,实现蔬菜无公害绿色生产是推动我国农业发展的有效途径。随着双减政策的提出和生物有机肥的快速发展,有关生物有机肥应用于蔬菜生产的研究相继展开^[10,14-15]。然而目前针对产量和品质的研究居多,而有关生物有机肥如何改善植物生理代谢及土壤理化和生物学性状的研究较少,因此本文以油菜为载体,通过生物有机肥与化肥的不同减增配比来研究生物有机肥对油菜生理代谢、产量和土壤各项理化及生物学特性的影响,系统的阐述生物有机肥应用于蔬菜生产的优势所在,同时寻找适宜的减增配比,为实现 2020 年化肥零增长政策提供有效的科学依据。

1 材料与amp;方法

1.1 供试材料

供试油菜品种:华绿 1 号;供试土壤的基本理化性状:碱解氮 58.38 mg/kg,有机质 16.76 g/kg,全氮 0.91 g/kg,有效磷 13.15 mg/kg,速效钾 89.16 mg/kg;供试肥料:农大肥业科技有限公司微生物肥料车间提供的生物有机肥和复合肥车间提供的复合肥,各肥料特性详见表 1。

表 1 肥料基本特性

供试肥料	菌数	N-P ₂ O ₅ -K ₂ O	腐植酸(HA)	中微量元素	有机质	底料
农大复合肥		25-10-10				
生物有机肥 I	6 亿/g	总量≥5%	有	≥5%	≥60%	稻壳鸡粪+种鸡粪
生物有机肥 II	6 亿/g	总量≥10%		≥5%	≥60%	稻壳鸡粪+种鸡粪

1.2 试验方法

本试验于 2016 年 8 月 20 日至 2016 年 10 月 2 日在山东省泰安市肥城市农大肥业科技有限公司蔬菜大棚内进行,试验共设 8 个处理,不施肥和仅施农大复合肥处理为空白和对照,其余 6 个处理分别为化肥减量

10%,20%,30%并配施与所减化肥相同用量的生物有机肥,详见表 2,肥料均做基肥施入,每个处理 3 次重复,采用随机分布试验,把长有 4 片真叶的油菜幼苗移栽到长,宽,高分别为 60,40,30 cm 的泡沫种植箱内,每箱种植 8 棵,共 24 箱,移苗后统一管理,直至收获。

表 2 不同处理施肥量

单位:kg/667 m²

供试肥料	CK1	CK2	T1	T2	T3	T4	T5	T6
农大复合肥	0	50	45	40	35	45	40	35
生物有机肥 I	0	0	5	10	15	0	0	0
生物有机肥 II	0	0	0	0	0	5	10	15

1.3 测定项目与方法

1.3.1 植株各项指标测定 油菜植株生长指标、根

系活力及产量的测定:收获植株并将地上部和地下部分开,根系先用 5 mmol/L CaCl₂ 冲洗,再用蒸馏水冲

洗干净,称鲜重;然后在 110 ℃ 下杀青,80 ℃ 烘干至恒重,测干重。根系活力采用 TTC 法测定^[16];光合色素含量用 95% 的乙醇研磨,25 mL 定容后,分别在 665,649,470 nm 下测定吸光值的方法测定^[17];超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑(NBT)法测定^[18];过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法测定;过氧化氢酶(CAT)活性采用紫外吸收法测定;丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸法测定^[19];超氧阴离子(O₂⁻)产生速率采用羟氨氧化法测定^[20]。

1.3.2 根际土壤各项指标测定 微生物数量(根际土壤细菌数、真菌数和放线菌数)采用平板菌落计数法测定^[21];土壤有机质采用重铬酸钾容量法测定;全氮采用凯氏定氮法测定;碱解氮采用碱解扩散法测定;速效磷采用碳酸氢钠溶解钼锑抗比色法测定;有效钾采用乙酸铵溶解火焰光度计法测定^[22];脲酶采用苯酚一次氯酸钠比色法测定,以 24 h 后 1 g 土壤中 NH₃-N 的质量(mg)表示;过氧化氢酶采用滴定法测定,其活性用 20 min 后 1 g 土壤消耗 0.02 mol/L KMnO₄ 的体积(mL)表示;蔗糖酶采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定,以 24 h 后 1 g 土壤中所含葡萄糖的质量(mg)表示;土壤磷酸酶采用磷酸苯二钠比色法测定,结果以 24 h 后 1 g 土壤中释放出的酚

的质量(mg)表示;土壤脱氢酶采用氯化三苯基四氮唑(TTC)法测定,结果以 24 h 后 1 g 土壤中生成的三苯基甲腈(TPF)的质量(μg)表示^[23]。

1.3.3 数据处理及分析方法 采用 Excel 2003 软件处理数据和绘表,采用 DPS 7.05 软件进行统计分析,采用最小显著极差法(LSD)进行差异显著性检验($p < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 减量化肥配施生物有机肥对油菜生长和产量的影响

由表 3 可知,减量化肥配施生物有机肥提高了油菜叶面积、根长、根体积、干鲜重及亩产量,且 T1, T2, T5 和 T6 处理的各项指标与 CK2 相比,均存在显著性差异,其亩产分别显著提高了 13.28%, 22.00%, 14.61%, 24.55%。此外,各生长指标均随生物有机肥 II 用量的增多而提高,而生物有机肥 I 的最佳减增配比为 20%。以上结果表明,不同减增配比对油菜生长有明显影响,在化肥减量 30% 范围内配施相应用量的生物有机肥不但不会对油菜生长造成不良影响,还显著提高了油菜的产量,且生物有机肥 II 的增产效果优于生物有机肥 I。

表 3 不同施肥处理对油菜生长指标和产量的影响

处理	叶面积/cm ²	根长/cm	根体积/cm ³	单株鲜重/g	单株干重/g	亩产/kg
CK1	172.23±10.87c	9.57±0.12e	2.20±0.10e	113.24±1.79d	24.66±1.12e	2517.70±39.82d
CK2	195.66±5.10b	11.00±0.50d	2.37±0.12de	123.16±1.04c	26.14±0.15d	2664.07±107.72c
T1	232.54±0.83a	13.01±0.46b	3.20±0.17c	135.74±4.82b	31.14±1.04bc	3017.95±107.20b
T2	241.52±6.12a	14.07±0.51a	3.41±0.17c	146.19±3.69a	32.06±0.55ab	3250.22±82.11a
T3	198.05±3.84b	12.03±0.31c	3.13±0.15c	138.27±1.96b	31.28±0.19bc	3014.20±43.58b
T4	203.09±14.95b	10.27±0.47de	2.67±0.38d	127.29±0.44c	27.25±0.38d	2786.54±68.19c
T5	227.91±9.51a	12.07±0.51c	4.01±0.10b	137.34±1.15b	30.17±0.57c	3053.45±25.64b
T6	240.83±5.42a	13.13±0.60b	4.60±0.44a	149.24±3.01a	32.81±0.49a	3318.03±66.93a

注:表中数据为平均值±标准误差;同列不同小写字母表示处理间差异显著($p < 0.05$)。下同。

2.2 减量化肥配施生物有机肥对油菜光合色素的影响

由表 4 可知,减量化肥配施生物有机肥提高了油菜叶片内叶绿素 a 和叶绿素 b 含量,而叶绿素 a/b 却有所降低,对类胡萝卜素含量的影响不大,叶绿素 a+b 含量随生物有机肥 I 用量的增加而降低,在生物有机肥 II 中出现了相反的结果。生物有机肥 I 和生物有机肥 II 的最佳处理分别为 T1 和 T6,与 CK2 相比,叶绿素 a, 叶绿素 b, 类胡萝卜素和叶绿素 a+b 的含量分别提高了 8.20% 和 13.11%、44.00% 和 52.00%、12.12% 和 9.09%、8.39% 和 13.55%,且 T6 与 CK2 间存在显著性差异,这表明化肥减量相等条件下,不同类型生物有机肥对不同色素的影响不同,但均提高了光合色素总量,促进了油菜的光合能力,最终实现增产提质的效果。

2.3 减量化肥配施生物有机肥对油菜根系活力的影响

根系活力是反映植物根系吸收和代谢能力强弱

的指标,较高的根系活力有利于营养物质的吸收和植物的新陈代谢。由图 1 可知,减量化肥配施生物有机肥提高了油菜的根系活力,与 CK2 相比 T2, T3, T4, 和 T5 的根系活力分别显著提高了 16.53%, 15.13%, 25.67%, 25.51%, 而 T1 和 T6 的效果不显著,因此生物有机肥 I 的最佳减增配比为 20%, 而生物有机肥 II 的最佳减增配比为 10%。

2.4 减量化肥配施生物有机肥对油菜体内抗氧化酶活性的影响

由图 2A 可知,仅施化肥提高了油菜叶片内 SOD 活性却降低了其根系内的活性,减量化肥配施生物有机肥进一步提高了油菜叶片和根系内 SOD 活性,且两种生物有机肥的变化趋势相同,叶片内的最佳减增配比为 20%, 即与 CK2 相比, T2 和 T5 处理分别显著提高了 30.79% 和 19.72%, 而根系内的最佳减增配比为 30%, 与 CK2 相比, T3 和 T6 处理分别显著

提高了 53.89% 和 107.37%，因此生物有机肥对根系内 SOD 活性的影响较叶片明显。

表 4 不同施肥处理对油菜叶片内光合色素含量的影响

处理	叶绿素 a/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	叶绿素 b/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	类胡萝卜素/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	叶绿素 a+b/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	叶绿素 a/b
CK1	1.15±0.09c	0.25±0.03b	0.32±0.07a	1.41±0.10c	4.74±0.59a
CK2	1.22±0.07bc	0.25±0.05b	0.33±0.04a	1.55±0.16bc	4.45±0.54ab
T1	1.32±0.12ab	0.36±0.02a	0.37±0.05a	1.68±0.13ab	3.14±0.76bc
T2	1.31±0.02ab	0.35±0.08a	0.35±0.01a	1.66±0.06ab	3.10±1.11c
T3	1.30±0.12ab	0.33±0.07ab	0.33±0.01a	1.63±0.14b	3.64±0.47abc
T4	1.34±0.02ab	0.33±0.05ab	0.35±0.03a	1.67±0.06ab	3.51±0.89abc
T5	1.36±0.08ab	0.37±0.07a	0.38±0.07a	1.70±0.14ab	3.77±0.98abc
T6	1.38±0.07a	0.38±0.04a	0.36±0.06a	1.76±0.10a	3.34±0.63bc

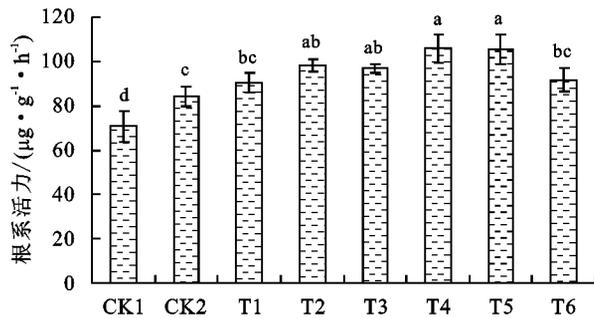


图 1 不同施肥处理对油菜根系活力的影响

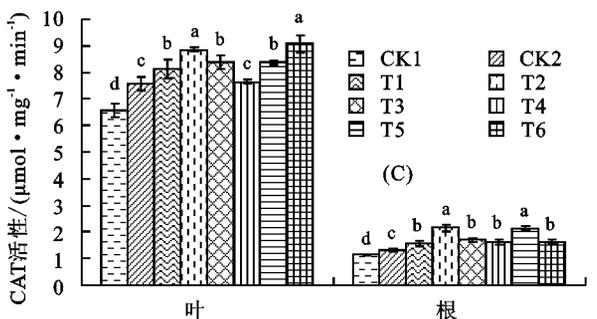
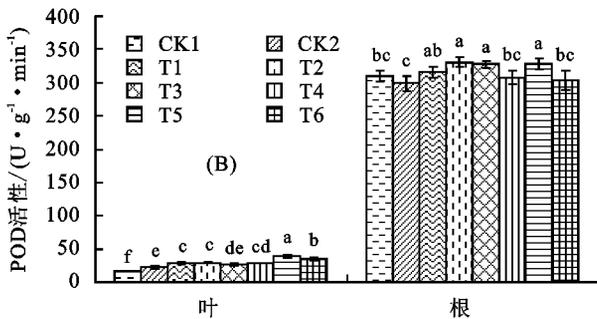
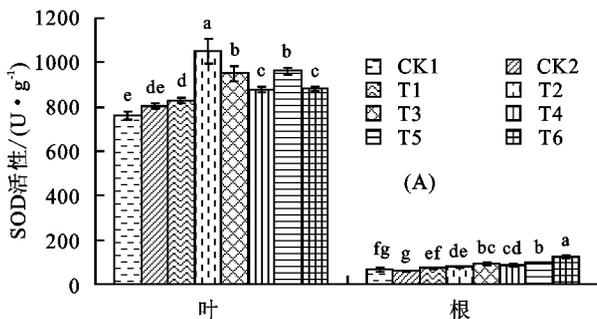


图 2 不同施肥处理对油菜叶片和根系内超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性的影响

由图 2B 可知,不同施肥处理对油菜叶片和根系内 POD 活性影响与 SOD 相似,但存在一定差异,即叶片和根系内的最佳减增配比均为 20%,即 T2 和 T5 与 CK2 相比,叶片内分别显著提高了 24.52% 和 67.15%,根系内分别显著提高了 10.68% 和 9.94%,因此,生物有机肥对叶片内 POD 活性的影响较根系明显。

由图 2C 可知,施肥提高了油菜叶片和根系内 CAT 活性,不同类型生物有机肥在叶片内的最佳减增配比不同,生物有机肥 I 的最佳减增配比为 20%,而生物有机肥 II 的最佳减增配比为 30%,即 T2 和 T6 处理效果最好,分别比 CK2 显著提高了 16.73% 和 19.63%,根系内的最佳减增配比均为 20%,即 T2 和 T5 分别比 CK2 显著提高了 62.88% 和 61.36%,以上结果表明,仅施化肥会减弱植物体内一些抗氧化酶的活性,而减量化肥配施生物有机肥均能提高各酶活性,且各生物有机肥减增配比为 20% 时,效果最佳,因此适当的减增配比可通过提高植物体内抗氧化酶的活性,来提高植物抵抗逆境胁迫的能力。

2.5 减量化肥配施生物有机肥对油菜体内丙二醛和超氧阴离子含量的影响

由图 3 可知,施入化肥后显著降低了油菜叶片内 MDA 含量和 O_2^- 产生速率,根系内出现了相反的结果,由图 3 可知,减量化肥配施生物有机肥进一步降低了油菜叶片和根系内 MDA 含量,且各处理与 CK2 相比,均存在显著性差异,两种类型生物有机肥的最佳减增配比均为 20%,与 CK2 相比,T2 分别降低了 31.74% 和 39.25%,T5 分别降低了 51.50% 和 41.12%;减量化肥配施生物有机肥对叶片和根系内 O_2^- 产生速率的影响不同,与 CK2 相比,根系内均显著降低,而当生物有机肥 II 的减增配比达到 20% 后,其叶片内 O_2^- 产生速率却有所提高,但与 CK2 相比,差异不显著。以上结果表明,减量化肥配施生物有机肥可通过提高植物体内抗氧化酶的活性来降低活性氧含量,减轻氧化损伤,且抗氧化酶活性与活性氧含量间存在较强的相关性,因此适宜的减增对比对充分发挥各肥料优势具有极其重要的意义。

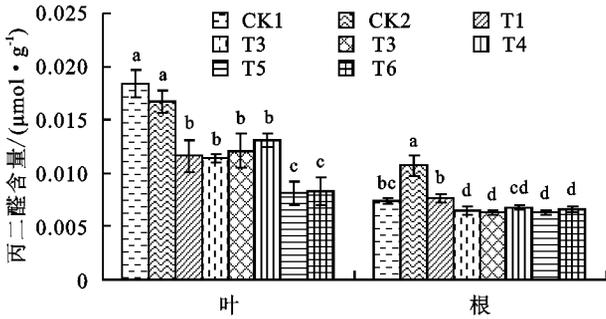
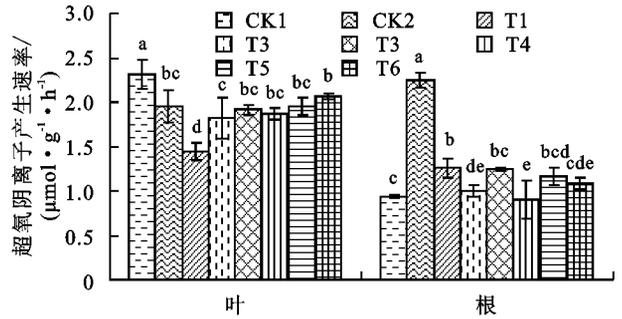


图 3 不同施肥处理对油菜叶片和根系内丙二醛含量(MDA)和超氧阴离子($O_2^{\cdot-}$)产生速率的影响



2.6 减量化肥配施生物有机肥对油菜根际土壤微生物量的影响

由图 4 可知,施用化肥后降低了根际土壤细菌数,却显著提高了根际土壤真菌数和放线菌数,与 CK1 相比,细菌数降低了 32.23%,真菌和放线菌数分别提高 56.83%和 7.82%;减量化肥配施 2 种不同类型的生物有机肥均显著提高了根际土壤细菌数和放线菌数,并随减增配比的升高而升高,因此 T3 和 T6 处理的效果最显著,与 CK1 相比,细菌数提高了 110.29%和 110.62%,放线菌数提高了 40.98%和 44.17%,却显著降低了根际土壤真菌数,且减增配比为 30%时效果最显著,即 T3 和 T6 与 CK2 相比,分别降低了 39.68%和 26.46%,但仍高于 CK1。这表明减量化肥配施生物有机肥有利于提高根际土壤细菌和放线菌数,而对真菌数的影响效果相反,且不同类型的生物有机肥对根际土壤微生物的影响效果相似。

2.7 减量化肥配施生物有机肥对油菜根际土壤养分含量的影响

由表 5 可知,减量化肥配施不同类型生物有机肥提高了根际土壤碱解氮、速效钾、有效磷和有机质含量,除有效磷外,其余指标均达到显著水平,而全氮含量却有所降低,其中碱解氮、速效钾和有效磷含量均随减增配比的增大呈先升高后降低的趋势,即减增配比为 20%时效果最显著,T2 和 T5 与 CK2 相比,各速效养分含量分别提高了 20.50%和 22.53%、49.04%和 25.47%、36.49%和 59.72%;有机质随减增配比的增大而增大,与 CK2 相比,T3 和 T6 分别显著提高了 13.39%和 21.20%,而全氮含量的变化趋势与之相反,即分别显著降低了 15.20%和 8.80%,以上结果表明,减量化肥配施生物有机肥可显著提高根际土壤速效养分和有机质含量,且减增配比为 20%时,效果最佳,但也一定程度的降低土壤全氮含量。

2.8 减量化肥配施生物有机肥对油菜根际土壤酶活性的影响

由表 6 可知,仅施化肥后提高了根际土壤脲酶、中性磷酸酶和蔗糖酶活性,过氧化氢酶和脱氢酶活性却有所降低;减量化肥配施不同类型生物有机肥降低了根际土壤脲酶和脱氢酶活性,提高了过氧化氢酶、

中性磷酸酶和蔗糖酶活性,与 CK2 相比,过氧化氢酶和蔗糖酶活性达到显著水平,不同减增对比对各酶活性的影响不同,2 种类型生物有机肥减增配比均为 20%时,脲酶活性最低,中性磷酸酶活性最高,因此 T2 和 T5 分别比 CK2 显著降低了 12.28%和 17.93%和提高了 43.24%和 75.52%;过氧化氢酶和脱氢酶活性均随减增配比的增大而降低,与 CK2 相比,T1 和 T4 分别显著提高了 55.47%和 41.02%,而 T3 和 T6 分别显著降低了 35.00%和 30.00%;蔗糖酶活性随生物有机肥 I 施入量的增多而降低,在生物有机肥 II 中出现了相反的结果,即 T1 和 T6 分别比 CK2 显著提高了 43.23%和 50.61%。

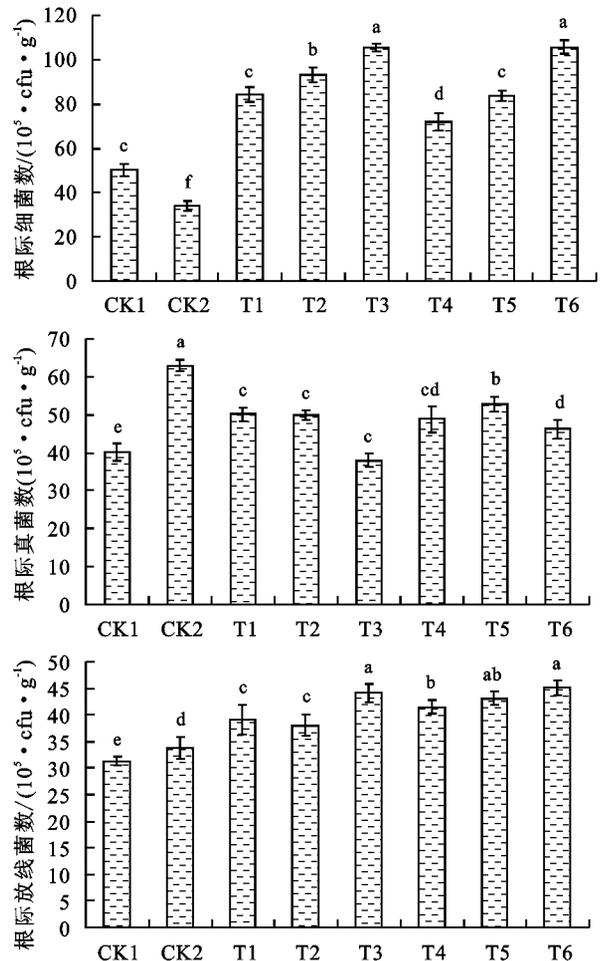


图 4 不同施肥处理对根际土壤细菌数、真菌数和放线菌数的影响

上述结果表明减量化肥配施生物有机肥对根际土壤酶活性的作用效果明显于仅施化肥处理,此外,

根际土壤脱氢酶活性受肥料用量和种类的影响较其他酶小。

表 5 不同施肥处理对根际土壤养分含量的影响

处理	碱解氮/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全氮/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效钾/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有效磷/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有机质/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
CK1	60.72±1.37f	0.98±0.041e	37.33±2.08g	12.13±0.57f	17.14±0.33f
CK2	69.99±0.90e	1.25±0.019a	70.67±0.58f	19.24±1.12d	18.30±0.07e
T1	78.67±1.37bc	1.17±0.036b	96.33±1.53e	19.82±0.64d	19.41±0.50d
T2	84.34±1.19a	1.08±0.031cd	105.33±3.06a	26.26±0.57b	20.29±0.64bc
T3	75.17±0.96d	1.06±0.082de	78.00±1.00e	19.57±0.57d	20.75±0.19b
T4	79.21±1.38b	1.20±0.023ab	83.67±1.15d	27.01±1.68b	19.66±0.23cd
T5	85.76±1.11a	1.18±0.066ab	88.67±2.08c	30.73±1.41a	20.73±0.87b
T6	76.88±1.37cd	1.14±0.014bc	78.67±3.06e	23.91±1.62c	22.18±0.37a

表 6 不同施肥处理对根际土壤酶活性的影响

处理	脲酶	过氧化氢	脱氢酶	中性磷酸酶	蔗糖酶
CK1	2.78±0.07c	8.23±0.27a	0.21±0.008a	1.48±0.14e	11.99±0.40e
CK2	3.42±0.17a	5.12±0.16d	0.20±0.009a	2.22±0.32d	13.95±0.57d
T1	3.19±0.15ab	7.96±0.27a	0.18±0.007b	2.42±0.19d	19.98±0.37b
T2	3.00±0.20bc	7.77±0.42a	0.17±0.004bc	3.18±0.37bc	19.49±0.54b
T3	3.16±0.36ab	6.49±0.32c	0.13±0.011d	2.68±0.49cd	18.21±0.35c
T4	2.91±0.05bc	7.22±0.42b	0.17±0.006b	2.94±0.20bc	19.78±0.19b
T5	2.90±0.02bc	7.21±0.32b	0.16±0.006c	3.89±0.19a	19.92±0.50b
T6	3.03±0.05bc	7.13±0.27b	0.14±0.008d	3.41±0.33ab	21.01±0.53a

注:脲酶活性以 24 h 后 1 g 土壤中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的质量(mg)表示;过氧化氢酶活性用 20 min 后 1 g 土壤消耗 0.02 mol/L KMnO_4 的体积(mL)表示;蔗糖酶活性以 24 h 后 1 g 土壤中所含葡萄糖的质量(mg)表示;土壤磷酸酶活性以 24 h 后 1 g 土壤中释放出的酚的质量(mg)表示;土壤脱氢酶活性以 24 h 后 1 g 土壤中生成的三苯基甲腈(TPF)的质量(μg)表示。

3 讨论

3.1 减量化肥配施生物有机肥对油菜生长的影响

本研究结果表明,盆栽条件下化肥减量 30% 范围内配施 2 种商品生物有机肥均能促进油菜生长,提高油菜产量,这归因于生物有机肥含有大量有益菌株,施入土壤后在根系周围定殖,优化根际微域环境^[24],进而提高根系活力;叶绿素含量影响叶片的光合能力,减量化肥配施生物有机肥在提高油菜根系活力的同时其叶片内光合色素总量也随之提高,因而根系吸收的水分和矿物营养可被叶绿素的合成和叶片光合所需^[25],最终提高油菜体内碳水化合物的合成和贮存,此结果与王若男等^[26]研究结果相似;生物有机肥本身含有大量的有机养分,具有肥效释放缓慢持久的特点,因此既不会因前期养分释放迅速而导致大量淋失,也不会因后期脱肥而出现养分供应不足的现象,因此减量化肥配施生物有机肥具有促进植物生长,提高产量的效果。

3.2 减量化肥配施生物有机肥对油菜理化指标的影响

近年来由于化肥、农药的长期大量施用,导致土壤结构破坏、微生物多样性下降、各种连作障碍、土传病害爆发,植物抗逆性显著降低^[27]。生物有机肥含

有大量可在植物根系定殖的有益微生物,与根系形成一种互惠互利的共生关系,优化植物根际环境,在生长繁殖过程中向作物根际土壤分泌各种代谢产物刺激植物生长、减轻土壤中病原菌的侵染,提高植物抗性^[27]。植物体内的抗氧化酶 SOD 能催化 O_2^- 发生歧化作用生成 H_2O_2 , POD 和 CAT 可将 H_2O_2 分解成 H_2O 和 O_2 , 消除植物体内过多的活性氧,因此 SOD、POD 和 CAT 均为植物体内重要的防御保护酶。研究^[28-31]表明,生物有机肥可通过提高植物体内防御酶(SOD、CAT、PPO、PAL、POD)活性来减轻番茄和茄子青枯病的发病率,以及小麦盐害胁迫和黄瓜连作障碍。本研究发现,减量化肥配施不同类型生物有机肥均能提高油菜叶片和根系内 SOD、POD 和 CAT 活性,且减增配比为 20% 的效果最佳,同时对根系内酶活的影响较叶片明显,进而降低了叶片和根系内过氧化物(MDA、 O_2^-)含量,MDA 是植物细胞膜不饱和脂肪酸发生过氧化作用的终产物,其含量高可作为植物细胞膜损伤程度的参数, O_2^- 是植物体内第一个氧自由基,含量过高时会引起自由基链锁反应,最终转化成 H_2O_2 、羟基自由基(OH^-)和单线态氧($^1\text{O}_2$)等自由基,进而导致氧化损伤^[32],前人研究发现生物有机肥能够通过降低盐胁迫下小麦

叶片内 MDA、 O_2^- 含量和相对电导率来提高小麦的抗盐性^[31,33]。因此减量化肥配施生物有机肥可通过提高根系活力、增强光合性能、优化根际微生物结构和根系的分泌物来改善根际微域环境,促进植物生长,进而提高油菜叶片和根系内抗氧化酶活性,降低 MDA 和 O_2^- 的累积量,提高油菜抵抗各种不良环境的能力,最终实现提质增产。

3.3 减量化肥配施生物有机肥对根际土壤微生物的影响

土壤微生物是土壤生态系统的重要组成部分,在有机物质分解转化过程中起主导作用,具有巨大的生物化学活力,在土壤碳、氮、磷等循环过程中有重要的间接性作用^[34],然而随着化肥农药的长期大量使用,使微生物区系由高肥的“细菌型”土壤向底肥的“真菌型”土壤转化,导致土壤肥力下降,病原菌数升高,土传病害加重^[35]。本研究发现,减量化肥配施生物有机肥提高了根际土壤细菌和放线菌数,降低了土壤真菌数,且减增配比越大,效果越显著,此结果与柳影等^[36]、丁文娟等^[37]和张云伟等^[38]研究结果一致。这一方面可能是生物有机肥中含有大量有益微菌群,对土壤土著微生物有一定活化作用,且含有供微生物生长繁殖所需的有机营养物质,因而加速了土壤中有益微生物的生长繁殖;另一方面这些有益微生物群落通过营养竞争、空间占领,产生抗生素、细菌素、胞外溶解酶等抑菌物质,在作物根系周围形成保护屏障,以菌克菌,抑制有害真菌、细菌的定殖,以及植物病原菌的侵染^[39],最终又将“真菌型”土壤转化成“细菌型”土壤。已有研究^[37,40-41]表明,植物土传病害的发病率与土壤真菌数呈显著正相关,而与土壤细菌和放线菌数呈显著负相关,且生物有机肥能很好地提高有益微生物数量,改善土壤微生物群落结构,进而提高植物抗病性。此外,土壤微生物在生长繁殖过程中除了需要充足的营养外,还需要一定的能量供给,即充足的碳源,而生物有机肥中含有大量的有机质,进而补给了部分碳源,维持了微生物生长繁殖所需的能量,最终提高了根际土壤微生物总量。因此减量化肥配施生物有机肥优化了根际微域环境,实现土壤微生物的生态平衡,促进根系生长,提高根系活力,激活油菜的防御系统,提高抗逆性,形成促进植物生长和提高植物抗性,且有利于可持续发展的生态土壤环境。

3.4 减量化肥配施生物有机肥对根际土壤养分和土壤酶活性的影响

目前中国菜园施肥量高,肥料利用率低,养分流失量大,因而减少肥料投入量,提高肥料利用率是目

前土壤肥料工作者义不容辞的责任。通过减量化肥配施生物有机肥来降低养分投入量,提高养分利用率的方式相继推广,前人研究^[42-43]表明,生物有机肥可通过提高功能细菌的活性来加快分解土壤外源有机质而达到释放氮、磷、钾的功效,同时活化土壤中难溶态氮、磷、钾等养分。本研究结果显示,减量化肥配施生物有机肥虽一定程度的降低了根际土壤全氮含量,但显著提高了根际土壤速效养分和有机质含量,且减增配比为 20% 时,效果最佳,与上述研究结果相似。有机质升高的原因,一方面生物有机肥本身含有大量有机碳,另一方面,生物有机肥促进了根际土壤微生物的繁殖生长,其作用于土壤所释放的有机质同样会在土壤中累积,最终提高土壤有机质含量^[44]。土壤酶活性是土壤养分循环和土壤微生物代谢活性的重要指标,受肥料种类、肥料用量、土壤类型、作物种类、管理与耕作方式和土壤水分环境条件等因素影响,大量研究^[24,34]表明,施用生物有机肥能提高土壤酶活性。减量化肥配施不同类型生物有机肥降低了根际土壤脲酶和脱氢酶活性,提高了过氧化氢酶、中性磷酸酶和蔗糖酶活性,但不同减增配比对不同酶活性的影响不同,脲酶活性降低的原因可能是施入的无机肥中含有大量酰胺态氮,因此对土壤脲酶起了很强的激发作用,但脲酶活性过高可能会增加氮素的损失;而生物有机肥可通过调节微生物的分泌代谢,来改变脲酶活性,进而提高氮素利用率,这与孙薇等^[34]所研究的生物有机肥对核桃园土壤酶活性的影响结果相似,但与荆瑞勇等^[45]和田小明等^[46]研究的生物有机肥对小白菜和棉花土壤酶活性的影响结果相反。土壤过氧化氢酶可促进土壤中多种化合物的氧化,防止过氧化物累积而对植物造成危害,与好氧微生物数量和土壤肥力密切相关,表征土壤氧化过程的强度及肥力状况^[47],脱氢酶属于胞内酶,能催化有机物质脱氢,起着氢的中间转化传递作用,同样很好地表征土壤微生物的氧化能力^[48],减量化肥配施生物有机肥提高了植物的抗氧化性,减少了植物体内过氧化物质的形成和释放,降低了土壤内活细胞中过氧化物质的积累,维持了土体相对稳定的氧化还原平衡,因此根际土壤过氧化氢酶活性升高的同时,降低了根际土壤脱氢酶活性,这与丁文娟等^[37]和孔涛等^[42]研究结果相似。土壤蔗糖酶以蔗糖为酶促基质,生物有机肥处理的土壤微生物对糖类利用较多;土壤磷酸酶能加速有机磷脱磷速度,其活性高低直接影响土壤中有机磷的分解、转化及生物有效性;生物有机肥本身含有大量固氮、解磷、解钾等有益微生物和有机碳、有机磷类物

质,因此减量化肥配施生物有机肥显著提高了根际土壤蔗糖酶和中性磷酸酶活性。王兴龙等^[49]研究发现,减氮 20%,配施生物有机肥,可提高玉米生育期土壤微生物量碳和土壤蔗糖酶活性,改善根系生长环境,提高玉米产量;因而减量化肥配施生物有机肥可通过改善土壤酶活性来提高肥料利用率,进而促进作物生长,提高作物产量和品质。

4 结论

(1)减量化肥配施相同用量的 2 种商品生物有机肥均可提高油菜叶片内光合色素含量、叶面积和根系活力,进而提高了油菜的光合性能以及吸收营养物质和水分的能力,促进了碳水化合物的合成和转运,与 CK2 相比,T1,T2,T5 和 T6 处理的亩产分别显著提高了 13.28%,22.00%,14.61%,24.55%,且生物有机肥 I 的最佳减增配比为 20%,而生物有机肥 II 的最佳减增配比为 30%。

(2)SOD、POD 和 CAT 均为植物体内重要的抗氧化酶,减量化肥配施生物有机肥提高了油菜叶片和根系内各酶活性,同时降低了 MDA 和 O_2^- 含量,最终提高了油菜的抗逆性,且 2 种生物有机肥的减增配比为 20%时效果最显著。

(3)减量化肥配施生物有机肥显著提高了根际土壤细菌数和放线菌数,并随减增配比的升高而升高,即减增配比为 30%时效果最显著,与 CK1 相比,根际土壤细菌数提高了 110.29%~110.62%,放线菌数提高了 40.98%~44.17%,而与 CK2 相比,真菌数显著降低了 26.46%~39.68%。

(4)减量化肥配施不同类型生物有机肥降低了根际土壤脲酶和脱氢酶活性,提高了过氧化氢酶、中性磷酸酶和蔗糖酶活性,当 2 种类型生物有机肥减增配比均为 20%时,脲酶活性最低,中性磷酸酶活性最高,而过氧化氢酶和脱氢酶活性均随减增配比的增大而降低,蔗糖酶活性随生物有机肥 I 施入量的增多而降低,在生物有机肥 II 中出现了相反的结果。

(5)综上所述,减量化肥配施生物有机肥能改善根际土壤微生物群落的数量和结构,改变根际土壤酶活性,分解和活化土壤中难溶、不易移动、不能被作物直接吸收利用的营养物质,最终优化根际环境,提高根系活力和植物体内抗氧化酶活性及叶片内光合色素含量,最终实现养地增产的效果,且较优减增配比为 20%~30%,因此减量化肥配施生物有机肥是落实双减政策,实现化肥零增长的切实可行途径。

参考文献:

[1] 尉元明,王静,乔艳君. 化肥、农药和地膜对甘肃省农业

生态环境的影响[J]. 中国沙漠,2005,25(6):165-171.

- [2] 李杰,贾豪语,颜建明,等. 生物肥部分替代化肥对花椰菜产量、品质、光合特性及肥料利用率的影响[J]. 草业学报,2015,24(1):47-55.
- [3] 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.
- [4] 崔仕春,杨秀芬,郑兴耘,等. 生物有机肥控制小麦全蚀病及作用机理初探[J]. 中国生物防治学报,2016,32(1):112-118.
- [5] Xin X L, Qin S W, Zhang J B, et al. Yield, phosphorus use efficiency and balance response to substituting longterm chemical fertilizer use with organic manure in a wheat-maize system [J]. *Field Crops Research*, 2017, 208(7): 27-33.
- [6] Zhao J, Ni T, Li J, 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(5): 1-12.
- [7] 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.
- [8] Xu M G, Li D C, Li J M, et al. Effects of organic manure application with chemical fertilizers on nutrient absorption and yield of rice in Hunan of southern China [J]. *Agricultural Sciences in China*, 2008,7(10): 1245-1252.
- [9] 宋松,孙莉,石俊雄,等. 连续施用生物有机肥对烟草青枯病的防治效果[J]. 土壤,2013,45(3):451-458.
- [10] 魏晓兰,吴彩姣,孙玮,等. 减量施肥条件下生物有机肥对土壤养分供应及小白菜吸收的影响[J]. 水土保持通报,2017,37(1):40-44.
- [11] 张焕菊,陈刚,王树声,等. 应用生物有机肥减少烤烟化肥用量试验研究[J]. 中国烟草科学,2015,36(1):48-53.
- [12] 陶磊,褚贵新,刘涛,等. 有机肥替代部分化肥对长期连作棉田产量、土壤微生物数量及酶活性的影响[J]. 生态学报,2014,34(21):6137-6146.
- [13] 汪志伟,袁森,努热亚·艾合买提,等. 日光温室无公害蔬菜生产问题及对策分析[J]. 中国果菜,2017,37(2):54-56.
- [14] 王宗抗,阚学飞,宋钊,等. 新型生物有机肥对小白菜生长和土壤肥力的影响[J]. 磷肥与复肥,2016,(3):49-52.
- [15] 庞天德,李铭,姚娜,等. 牛粪发酵生物有机肥对 3 种蔬菜生长及品质的影响[J]. 热带农业科学,2016,36(7):9-12.
- [16] 张志良,瞿伟菁. 植物生理学实验指导[M]. 北京:高等教育出版社,2003:39-41.
- [17] Knudson L L, Tibbitts T W, Edwards G E. Measurement of ozone injury by determination of leaf chlorophyll concentration [J]. *Plant Physiology*, 1977, 60

- (4): 606-608.
- [18] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 167-169.
- [19] Heath R L, Packer L. Photoperoxidation in isolated chloroplasts: I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation[J]. Archives Biochemistry and Biophysics, 1968, 125(1): 189-198.
- [20] Shi Q H, Zhu Z J. Effects of exogenous salicylic acid on manganese toxicity, element contents and antioxidative system in cucumber [J]. Environmental and Experimental Botany, 2008, 63(3): 317-326.
- [21] 何绍江, 陈雯莉. 微生物实验[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007: 45-48.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2005: 14-114.
- [23] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 294-297.
- [24] 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.
- [25] Dina Z E L, Albidin A K. Role of nitric oxide on iron homeostasis, chlorophyll biosynthesis and antioxidants system in two wheat cultivars [J]. American Journal of Plant Physiol, 2007, 2(4): 237-250.
- [26] 王若男, 洪坚平. 4 种生物菌肥对盆栽油菜产量品质及土壤养分含量的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2016, 36(11): 774-778, 792.
- [27] 胡可, 李华兴, 卢维盛, 等. 生物有机肥对土壤微生物活性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(2): 303-306.
- [28] 肖相政, 刘可星, 廖宗文. 生物有机肥对番茄青枯病的防效研究及机理初探[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(11): 2368-2373.
- [29] 丁传雨, 乔焕英, 沈其荣, 等. 生物有机肥对茄子青枯病的防治及其机理探讨[J]. 中国农业科学, 2012, 45(2): 239-245.
- [30] 段文琦, 刘海英, 邢晨涛, 等. 生物有机肥对盐胁迫下小麦幼苗活性氧代谢的影响[J]. 湖北农业科学, 2016, 55(9): 2192-2194.
- [31] 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.
- [32] 李国婧. 超氧阴离子的产生及其在植物体内作用的研究[J]. 生物技术世界, 2012, 10(4): 24-25.
- [33] 贾乐, 刘海英, 刘宁, 等. 生物有机肥对盐胁迫下小麦幼苗叶片膜脂过氧化的影响[J]. 湖北农业科学, 2017, 56(11): 2025-2027.
- [34] 孙薇, 钱勋, 付青霞, 等. 生物有机肥对秦巴山区核桃园土壤微生物群落和酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(5): 1224-1233.
- [35] 吴凤芝, 王学征. 设施黄瓜连作和轮作中土壤微生物群落多样性的变化及其与产量品质的关系[J]. 中国农业科学, 2007, 40(10): 2274-2280.
- [36] 柳影, 丁文娟, 曹群, 等. 套种韭菜配施生物有机肥对香蕉枯萎病及土壤微生物的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(2): 303-309.
- [37] 丁文娟, 曹群, 赵兰凤, 等. 生物有机肥施用期对香蕉枯萎病及土壤微生物的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(8): 1575-1582.
- [38] 张云伟, 徐智, 汤利, 等. 生物有机肥对烤烟黑胫病及根际微生物代谢功能多样性的影响[J]. 中国烟草学报, 2014, 20(5): 59-65, 72.
- [39] 王卫霞. 新疆几种典型荒漠植物根际微生物特征及内生固氮菌的分离、促生性能研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2009.
- [40] 李姣, 刘国顺, 高琴, 等. 不同生物有机肥与烟草专用复合肥配施对烤烟根际土壤微生物及土壤酶活性的影响[J]. 河南农业大学学报, 2013, 47(2): 132-137.
- [41] 李艳红, 徐智, 汤利, 等. 化肥减量配施生物有机肥对烤烟青枯病及其病原菌的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学版), 2015, 30(4): 612-617.
- [42] 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, 30(4): 884-891.
- [43] 张峰, 李世强, 乔金玲, 等. 生物菌肥对库尔勒香梨腐烂病的发生及土壤养分的影响[J]. 中国农学通报, 2017, 33(3): 57-60.
- [44] 于秀丽, 赵明家. 增施生物有机肥对盐碱土壤养分的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2013, 35(1): 50-54, 57.
- [45] 荆瑞勇, 王丽艳, 郭永霞. 生物有机肥对盆栽小白菜土壤酶活性和微生物数量的影响[J]. 水土保持研究, 2015, 22(2): 79-83, 89.
- [46] 田小明, 李俊华, 王成, 等. 连续 3 年施用生物有机肥对土壤养分、微生物生物量及酶活性的影响[J]. 土壤, 2014, 46(3): 481-488.
- [47] 杜社妮, 梁银丽, 徐福利, 等. 施肥对日光温室土壤微生物与酶活性变化的影响[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(4): 68-71.
- [48] 尹睿, 张华勇, 黄锦法, 等. 保护地菜田与稻麦轮作田土壤微生物学特征的比较[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(1): 57-62.
- [49] 王兴龙, 朱敏, 杨帆, 等. 配施有机肥减氮对川中丘区土壤微生物量与酶活性的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(3): 271-276.