

不同施肥措施对德州市农田土壤生物学性状的影响

付修勇, 井大炜, 段晓尘, 刘芬

(德州学院 资源环境与规划学院, 山东 德州 253023)

摘要: [目的] 探讨不同施肥措施对山东省德州市农田土壤生物学性状的作用效果, 为农田土壤的培肥与农作物的合理种植提供理论依据。[方法] 通过连续 3 a 的大田试验, 研究 CK(对照, 不施肥)、CF(尿素提供 100% 的氮)、CM(牛粪提供 100% 的氮)和 CM+CF(牛粪和尿素各提供 50% 的氮)等处理对德州市农田土壤养分、微生物数量、微生物多样性、活性有机碳及碳库管理指数的影响。[结果] 与 CF 处理相比, CM+CF 处理显著提高了农田土壤碱解氮、速效磷、速效钾含量和部分微量元素的有效性, 降低了 pH 值; 明显增加了土壤微生物数量与微生物量碳、氮含量, 其中细菌数分别较 CK, CF 和 CM 处理显著增加 91.22%, 65.47% 和 17.11%; 同时, CM+CF 处理的微生物多样性指数最高, 并与微生物总量的变化趋势一致, 而 CF 与 CK 处理的微生物多样性指数与微生物总量的变化趋势不一致。此外, CM+CF 处理的低活性有机碳含量和碳库管理指数亦显著高于其他处理, 其中碳库管理指数比 CK, CF 和 CM 处理高出 69.52, 67.84, 38.61。与 CM+CF 处理相比, CM 处理对农田土壤的影响效果较小。[结论] 牛粪与化肥配施能显著改善德州市农田土壤的生物学性状, 有利于提升土壤肥力和增强供肥性。

关键词: 农田土壤; 牛粪; 微生物多样性; 活性有机碳; 碳库管理指数

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)05-0076-05

中图分类号: S157.3

文献参数: 付修勇, 井大炜, 段晓尘, 等. 不同施肥措施对德州市农田土壤生物学性状的影响[J]. 水土保持通报, 2017, 37(5): 76-80. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.05.013; Fu Xiuyong, Jin Dawei, Duan Xiaochen, et al. Effects of different fertilization measures on soil biological characteristics in farmland of Dezhou City[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(5): 76-80. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.05.013

Effects of Different Fertilization Measures on Soil Biological Characteristics in Farmland of Dezhou City

FU Xiuyong, JING Dawei, DUAN Xiaochen, LIU Fen

(College of Resources, Environment and Planning, Dezhou University, Dezhou, Shandong 253023, China)

Abstract: [Objective] Exploring the effect of different fertilization measures on soil biological characteristics in the farmland of Dezhou City, Shandong Province, in order to provide theoretical basis for the fertilization of farmland and reasonable plantation of crops. [Methods] A field experiment including four treatments, i. e. CK (neither urea nor cattle manure was applied), CF (100% of nitrogen was provided by urea), CM (100% of nitrogen was provided by cattle manure), and CM+CF (50% and 50% of nitrogen was provided by cattle manure and urea, respectively) was performed. The study was conducted to determine the effects of different treatments on soil nutrients, microbial population, microbial diversity index, active organic carbon and carbon pool management index in the farmland of Dezhou City. [Results] CM+CF treatment significantly increased available nitrogen, available phosphorus, available potassium and trace element contents, but decreased the pH value in the farmland soil. The microorganism population and contents of microbial biomass carbon and microbial biomass nitrogen were obviously increased by the use of CM+CF treatment. For bacteria quantity, it increased by 91.22%, 65.47% and 17.11%, respectively, as compared with the treatments of CK, CF and CM. Meanwhile, the microbial diversity index was also found having the highest value in the CM+CF treatment, it had the same variation tendency as total microbial population had. However, the microbial diversity indices and microbial population had different variation tendency between CF and CK treatments. Additionally, the inertly organic carbon content and carbon pool management index in CM+CF

收稿日期: 2017-06-01

修回日期: 2017-07-06

资助项目: 山东省软科学研究计划“自然资源胁迫下的山东省节约型社会发展模式研究”(2009RKB578)

第一作者: 付修勇(1964—), 男(汉族), 山东省禹城市人, 本科, 教授, 主要从事自然资源与环境研究。E-mail: fuxy640724@163.com。

treatment were also significantly higher than those of other treatments, indicating carbon pool management index increases by 69.52, 67.84 and 38.61, respectively, as compared with the treatments of CK, CF and CM. However, less effect on farmland soil in CM treatment was observed in comparison with the one in CM + CF treatment. [Conclusion] Cattle manure co-applied with inorganic fertilizer could significantly improve soil biological characteristics in the farmland of Dezhou City, which was beneficial to increase soil fertility and enhance nutrient supplying capability.

Keywords: farmland soil; cattle manure; microbial diversity; active organic carbon; carbon pool management index

华北平原以小麦—玉米一年两熟种植为主体种植制度,是中国的粮食主产区^[1]。但由于化肥氮的当季利用率仅有30%左右,所以长期的单施化肥措施,不仅造成了直接的经济损失,且部分地区因施肥不当已引起环境污染^[2],出现地表水富营养化、地下水硝态氮含量超标等问题^[3],同时还导致农作物品质的下降。因此,探寻一种合理的施肥措施,对于培肥农田土壤和改善农业生态环境显得尤为重要。

有机肥能优化土壤微生物群落,改善土壤农化性状,提升土壤肥力,并且对养分具有缓释效果^[4],所以,在化肥中配施有机肥是多年来农业生产中的研究热点。许多研究发现^[5-7],有机肥与化肥配施可增加土壤微生物多样性,且能促进作物对氮素的吸收与利用,有助于土壤肥力的提高与农业的可持续发展。牛粪是一种丰富的有机肥资源,仅次于猪粪资源,占畜禽粪便的1/3^[8]。近年来,诸多学者利用牛粪在油菜^[8]、西瓜^[9]、水稻^[10]等作物上开展了深入的研究,并获得良好的增产效应,但关于牛粪在冬小麦—夏玉米上的应用,尤其针对农田土壤生物学性状进行连续多年的研究报道则较少。土壤微生物是土壤有机质、土壤养分转化与循环的内在动力^[7],且土壤微生物及其参与下的物质转化是农业生态系统持续发展的基础。同时,维持土壤微生物多样性对于提高农业生产力与增强农田土壤缓冲能力具有重要意义^[11]。此外,土壤活性有机碳与土壤速效养分、土壤物理性状等紧密相关,已成为评价土壤质量的重要指标之一^[12-13]。可见,掌握这些土壤生物学特征指标的变化规律对于了解施肥的作用机理并评价施肥效果具有重要的理论指导意义。为此,本研究拟针对山东省德州市农田土壤,以腐熟好的牛粪为供试原料,通过连续3a的大田试验开展牛粪与化肥配施对农田土壤养分、微生物数量、微生物多样性及活性有机碳的研究,评价不同施肥措施对农田土壤生态环境的改善效应,进而为农田土壤的培肥与农作物的合理种植提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地选择在山东省德州市德城区二屯镇李庄

村(东经116°42',北纬36°59'),海拔高度为22.7 m。气候属暖温带半湿润季风气候,多年年均气温和平均降水量分别为13.1℃和583 mm,其中降雨量主要集中在7—9月。地貌特征为冲积平原,土壤类型为潮土。2014—2016年连续开展了3a试验,其中2014年试验开始时0—20 cm土壤基本理化性状为:有机质13.68 g/kg,全氮0.92 g/kg,全磷1.85 g/kg,全钾57.00 g/kg,pH值8.39。种植制度为冬小麦—夏玉米一年两熟种植。

1.2 试验设计

采用田间小区试验,随机区组设计,设4个处理:处理1不施肥(CK);处理2单施化肥(CF);处理3牛粪(CM);处理4牛粪提供50%的氮,化肥提供50%的氮(CM+CF)。每个处理重复3次,每小区面积为12×9=108 m²,共计12个小区。小区与小区之间用宽12 cm,深60 cm的水泥隔板分隔,并设置1.0 m×1.0 m的保护行。冬小麦于每年10月中旬播种,次年6月上旬收获,播种时采用人工开沟撒种,行距20 cm;夏玉米于6月中旬人工点播(6.7万株/hm²),10月上旬收获,其中有机肥与化肥作为基肥一次性施入,采用撒施的方式。除CK外,各处理均为等养分量,N,P₂O₅,K₂O施加量分别相当于280.50,206.50,175.00 kg/hm²,各处理P与K不足部分分别用过磷酸钙、硫酸钾补足。冬小麦、夏玉米生育期内其他的农作管理措施与当地大田常规方法一致。

1.3 测定项目与方法

分别在2014,2015和2016年度3个玉米收获季进行采样分析,在每个小区按“S”型选取7点,用土钻法取0—20 cm土层土样,混合均匀后分为2份:一份新鲜土样于4℃冰箱避光保存,尽快测定微生物数量和微生物量碳、氮及微生物多样性指数;另一份样品风干,过0.25 mm筛后测定土壤养分与活性有机碳等指标。

土壤碱解氮、速效磷、速效钾、pH值和微量元素的测定均采用常规方法^[14];土壤微生物数量采用稀释平板计数法^[15];土壤微生物量碳、氮的测定采用氯仿熏蒸K₂SO₄浸提法;土壤微生物群落功能多样性采用Biolog GN平板分析法测定^[16]。

土壤总有机碳的测定采用重铬酸钾氧化外加热法;土壤活性有机碳测定与碳库管理指数计算:采用 33,167,333 mmol/L KMnO_4 氧化法分别测定土壤样品中高活性、中活性和低活性有机碳含量。以对照处理土壤为参照。碳库指数与碳库管理指数等相关指标参照王改玲等^[12]的方法计算。

1.4 统计方法

采用 Excel 2013 处理数据并制图,采用 SPSS 19.0 统计软件进行方差分析和多重比较(LSD法, $p < 0.05$)。数据取 2014—2016 年 3 a 试验数据的平均值。

2 结果与分析

2.1 土壤养分

从表 1 可见,不同施肥处理对农田土壤的 pH 值产生了显著影响,CM+CF 处理的 pH 值最低,分别

较 CK,CF 和 CM 处理显著下降 0.31,0.23,0.14。各处理的碱解氮、速效磷和速效钾含量表现出基本一致的变化规律,其大小次序分别为:CM+CF>CM>CF>CK,且各处理间的差异均达显著水平,CM+CF 处理的碱解氮、速效磷和速效钾分别较 CK 显著提高 89.58%,68.82%和 49.43%,分别较 CF 处理显著提高 44.83%,36.26%和 27.19%。说明牛粪配施化肥处理较单施化肥处理可以显著增加土壤中速效养分含量。同时,不同施肥措施对土壤中微量元素的有效性也产生一定影响。同 CF 处理相比,CM+CF 和 CM 处理不同程度地提高了有效 Fe,Mn 含量,而对有效 Cu,Zn 含量的影响较小。其中 CM+CF 处理的有效 Fe,Mn 含量均为最高,并显著高于其他处理。以上分析认为,各施肥措施均对农田土壤养分含量产生了显著影响,其中牛粪与化肥配施的作用效果最显著。

表 1 不同处理对农田土壤养分含量的影响

处理	碱解氮/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效磷/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效钾/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	pH 值	Fe/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Mn/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Cu/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Zn/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
CK	37.25±1.80 ^d	29.54±0.95 ^d	322.63±10.90 ^d	8.41±0.03 ^a	16.86±0.19 ^d	4.58±0.29 ^d	31.76±3.05 ^a	5.46±0.22 ^a
CF	48.76±3.29 ^c	36.60±2.18 ^c	379.05±21.27 ^c	8.33±0.02 ^b	19.03±0.60 ^c	5.41±0.16 ^c	31.64±2.92 ^a	5.39±0.15 ^a
CM	58.91±1.52 ^b	43.05±2.02 ^b	436.57±15.29 ^b	8.24±0.03 ^c	23.61±0.45 ^b	6.10±0.33 ^b	32.95±2.18 ^a	5.41±0.08 ^a
CM+CF	70.62±3.06 ^a	49.87±1.12 ^a	482.12±13.96 ^a	8.10±0.05 ^d	28.32±0.26 ^a	6.96±0.10 ^a	36.21±3.57 ^a	5.62±0.19 ^a

注:CK 为不施肥;CF 为单施化肥;CM 为牛粪;CM+CF 为牛粪提供 50%的氮,化肥提供 50%的氮。数据为平均值±标准误,同列不同小写字母表示处理间差异显著($p < 0.05$)。下同。

2.2 微生物数量与微生物量碳、氮

由表 2 可见,农田土壤中细菌、放线菌与真菌所占微生物总量的比例分别为 63.66%~75.41%,23.87%~35.64%和 0.70%~0.79%,说明细菌占绝对优势,放线菌次之,真菌最少。与对照相比,各处理均明显增加了土壤的细菌数和真菌数,而对放线菌数的影响较小。在施肥处理中,CM 与 CM+CF 处理的细菌数与真菌数显著高于 CF 处理;而 CM+CF 处理的细菌数达最高值,并显著高于其他处理,分别比 CK,CF 与 CM 处理显著高出 91.22%,65.47%与 17.11%。同时,CK,CF,CM 和 CM+CF 处理使农

田微生物总量分别达到 752.99,841.47,1 067.71,1 215.43(10^4 CFU/g),且各个处理之间均达差异显著水平。从表 2 还可知,各处理的微生物量碳、氮含量呈现出基本一致的变化规律,其大小次序为:CM+CF>CM>CF>CK,且处理间差异均达显著水平,其中 CM+CF 处理的微生物量碳含量分别较 CK,CF 与 CM 处理提高 64.96%,35.97%与 16.03%,微生物量氮含量分别提高 83.02%,36.01%与 10.75%。由此可知,不同施肥措施对德州市农田土壤微生物数量和微生物量碳、氮含量的影响存在显著差异,其中牛粪与化肥配施处理的增幅最大。

表 2 不同处理对农田土壤微生物数量与微生物量碳、氮含量的影响

处理	细菌/ (10^4 CFU · g^{-1})	放线菌/ (10^4 CFU · g^{-1})	真菌/ (10^4 CFU · g^{-1})	微生物量碳/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	微生物量氮/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
CK	479.33±20.27 ^d	268.39±15.17 ^a	5.27±0.10 ^c	409.32±22.52 ^d	39.81±0.95 ^d
CF	553.92±13.51 ^c	281.20±7.96 ^a	6.35±0.29 ^b	496.58±19.28 ^c	53.57±2.12 ^c
CM	782.69±25.80 ^b	276.54±9.80 ^a	8.48±0.31 ^a	581.93±26.07 ^b	65.79±1.86 ^b
CM+CF	916.58±19.22 ^a	290.16±12.25 ^a	8.69±0.15 ^a	675.21±16.35 ^a	72.86±1.63 ^a

2.3 微生物多样性

本研究通过 Shannon 指数公式计算了农田土壤微生物多样性指数(图 1)。由图 1 可知,不同施肥处理使德州市农田土壤的微生物多样性指数变化各异,这说明各个处理的土壤微生物群落的丰富度存在差异。CM+CF 处理的微生物多样性指数达最高值,并显著高于其他处理,这与微生物总量的变化规律基本一致;而 CF 处理的微生物多样性指数相比对照明显降低,这与微生物总量的变化规律不一致,可能是由于单施化肥处理使农田土壤环境适宜于某一类或几类微生物的生长,而对其他类群微生物的生存不一定产生影响,即对不同类微生物的作用效果有差异,导致土壤中微生物总数可能较高,但其对应的微生物多样性指数则不一定高。由此可见,除了分析土壤微生物总量外,很有必要对土壤微生物多样性指数进行研究。

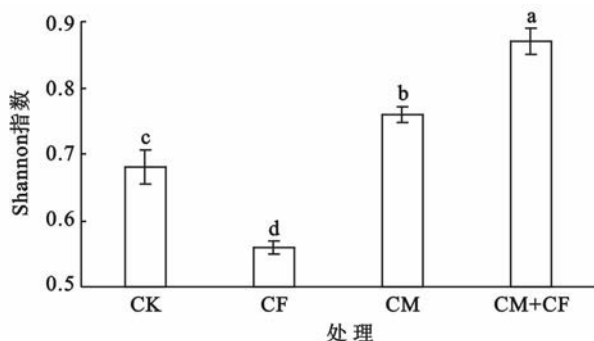


图 1 不同处理对农田土壤微生物多样性指数的影响

表 3 不同处理对农田土壤活性有机碳与碳库管理指数的影响

处理	总有机碳/ ($g \cdot kg^{-1}$)	低活性有机碳/ ($g \cdot kg^{-1}$)	中活性有机碳/ ($g \cdot kg^{-1}$)	高活性有机碳/ ($g \cdot kg^{-1}$)	碳库管理指数
CK	7.42 ± 0.26^c	1.73 ± 0.05^c	0.82 ± 0.02^c	0.40 ± 0.03^b	100.00 ± 0.00^c
CF	7.61 ± 0.23^c	1.78 ± 0.16^c	0.91 ± 0.05^b	0.32 ± 0.01^c	101.68 ± 3.55^c
CM	8.92 ± 0.15^a	2.20 ± 0.07^b	1.04 ± 0.05^a	0.49 ± 0.04^a	130.91 ± 9.67^b
CM+CF	8.46 ± 0.09^b	2.61 ± 0.12^a	1.07 ± 0.03^a	0.51 ± 0.01^a	169.52 ± 6.82^a

3 讨论

施肥对农田土壤理化性状具有明显的作用效果^[17]。本研究表明,通过连续 3 a 的大田试验,不同施肥措施使农田土壤养分发生了显著变化。首先,牛粪与化肥配施处理使土壤 pH 值显著低于其他处理,而土壤 pH 值能直接影响土壤养分的存在状态、转化和有效性,对农作物的生长发育有直接的影响。究其原因可能在于牛粪配施化肥可以明显增强农作物的根系活性,进而能刺激根系产生较多的根系分泌物^[9]。有研究发现^[18],根系分泌物中含有一定量的有机酸。可见,牛粪配施化肥处理可能明显提高了根

2.4 土壤活性有机碳与碳库管理指数

由表 3 可以看出,各个处理土壤总有机碳含量的变化规律为:CM>CM+CF>CF \approx CK,说明施用牛粪处理相比单施化肥可以显著提高农田土壤的总有机碳含量。CM+CF 处理的低活性有机碳含量显著高于其他处理,依次为 CM 处理,也显著高于 CK,CF 处理;同 CF 处理相比,CM+CF,CM 处理的低活性有机碳含量分别高出 46.63%,23.60%,且低活性有机碳占总有机碳的比重分别为 30.85%,24.66%,亦高于 CF 处理(23.39%)。与低活性有机碳相比,中活性、高活性有机碳含量相对较低,其波动范围分别为 0.82~1.07,0.32~0.51 g/kg。CM+CF 和 CM 处理的中活性、高活性有机碳含量较 CF 处理均显著升高。同时可见,CM+CF 处理的中活性、高活性有机碳占总有机碳的比重均为最高,分别达到了 12.65%和 6.03%。从表 3 还可见,CM+CF 处理的碳库管理指数达最高值,并显著高于其他处理,分别比 CK,CF 和 CM 处理明显高出 69.52,67.84,38.61;其次为 CM 处理,也显著高于 CF 处理,而 CF 处理与 CK 无显著性差异。综上,牛粪处理的总有机碳、3 种活性有机碳含量与碳库管理指数相比对照和单施化肥均得到了显著提升,这表明施用牛粪既能提高土壤有机碳数量,还能改善土壤有机碳质量,有利于提高土壤的综合生产力。

系分泌物中有机酸含量,进而导致土壤 pH 值的下降,这可能是配施牛粪处理降低土壤 pH 值的机理之一^[19]。有文献表明^[20],土壤 pH 值降低可以促进土壤 P,K 与部分盐类离子的溶解,可能是牛粪配施化肥处理具有较高的速效磷、速效钾含量的主要原因之一,这有助于提高土壤中养分分离子的有效性。

诸多学者研究认为^[5,21-22],单施有机肥或有机—无机肥配施可以提高土壤细菌、真菌和微生物总量。这一结论在本试验中也得到了证实:施用牛粪的 2 个处理使农田土壤细菌数、真菌数和微生物总量均明显高于对照、单施化肥处理。这表明牛粪的施入可以促进农田土壤微生物的生长发育,其原因可能在于大部

分微生物在农田土壤中实际上处于低营养状态^[20],当牛粪加入土壤后,可为微生物提供新能源,使其在种群数量上发生明显改变;同时,牛粪本身也带入了大量活的微生物^[9],起到了“接种”作用。本试验还得出,施用牛粪处理对农田土壤的放线菌数影响较小,相比对照、单施化肥处理均无显著性差异,而井大炜等^[17]针对豇豆的研究则认为,蚯蚓粪与化肥配施处理能显著提高土壤放线菌数。这与本研究结果不完全一致,造成这一差异可能与作物种类、肥料特性、试验周期等因素有关。

一个群落中物种类型数越多,各类型间分布比例越均匀,该群落的生物多样性指数就越高^[9]。本研究中,单施化肥处理的生物多样性指数明显低于对照,这与微生物总量的变化规律不一致。分析其原因可能是由于不同施肥处理使农田土壤环境对各类微生物的影响效果存在差异,可能仅适宜某一类或几类微生物的生长,而对其他类微生物则并无作用^[7],导致土壤生物多样性指数与微生物总量的变化趋势不同步。本研究还发现,施用牛粪的 2 个处理的生物多样性指数明显高于单施化肥处理,其原因在于虽然单施化肥与牛粪处理的养分总用量相等,但前者在农田土壤中释放迅速,高浓度的氮、磷与钾可能会抑制固氮菌、磷细菌与钾细菌的生长繁殖^[19-24],从而会降低微生物群落的丰富度。说明牛粪的施用能显著提高农田土壤微生物群落的丰富度,进一步印证了施用牛粪措施在提高农田土壤微生物数量与生物多样性指数方面的作用效果显著优于单施化肥。

研究土壤活性有机碳与碳库管理指数的变化规律,可进一步明确土壤管理与施肥的科学性^[12-13]。本试验中,施用牛粪处理相比对照和单施化肥能显著提高农田土壤中高活性、中活性和低活性有机碳含量与碳库管理指数,这与叶桂梅等^[23]对杨树幼苗的研究结论基本一致。这可能与施加牛粪能显著提高农田土壤微生物数量和微生物多样性有关,有利于进入土壤的根系分泌物与有机残体数量的增加^[19],进而促进活性有机碳的生成,并提高碳库管理指数;也可能与牛粪能为农田土壤直接提供有机碳源,进而增加土壤的有机碳库有一定关联。此外,本试验研究中,在施用牛粪的 2 个处理中,牛粪与化肥配施处理对农田土壤生物学性状的改善效果显著优于牛粪处理,这可能与配施处理有助于协调土壤的 C/N 比,并且化肥又弥补了土壤中消耗的氮^[25],进而更利于改善土壤生态环境有密切关联。

4 结论

牛粪与化肥配施处理能显著提高农田土壤碱解

氮、速效磷、速效钾含量和部分微量元素的有效性,降低了 pH 值;明显增加了土壤微生物数量与微生物量碳、氮含量;同时,牛粪配施化肥处理的微生物多样性指数最高,并与微生物总量的变化趋势一致,而单施化肥与对照处理的微生物多样性指数与微生物总量的变化趋势不一致。此外,牛粪配施化肥处理的低活性有机碳含量和碳库管理指数亦显著高于其他处理。与牛粪配施化肥处理相比,牛粪处理对农田土壤的影响效果较小。牛粪与化肥配施能显著改善德州市农田土壤的生物学性状,有利于提升土壤肥力和增强供肥性。

[参 考 文 献]

- [1] 许艳艳,武兰芳,李彬彬,等.不同耕作措施下土壤 N₂O 排放及其农学效率[J].中国生态农业学报,2015,23(11):1349-1358.
- [2] 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.
- [3] 孟庆峰,张娟,李欣伦,等.长期施用牛粪对松嫩平原盐渍化土壤质量的影响[J].农业工程学报,2017,33(6):84-91.
- [4] 魏猛,张爱君,诸葛玉平,等.长期不同施肥对黄潮土区冬小麦产量及土壤养分的影响[J].植物营养与肥料学报,2017,23(2):304-312.
- [5] 俄胜哲,杨志奇,罗照霞,等.长期施肥对黄土高原区小麦产量及土壤养分的影响[J].麦类作物学报,2016,36(1):104-110.
- [6] 孙雅杰,吴文良,刘原庆,等.有机肥和化肥对盆栽番茄氮素利用以及损失的影响[J].中国农业大学学报,2017,22(4):37-46.
- [7] 罗佳,刘丽珠,王同,等.有机肥与化肥配施对黄瓜产量及土壤微生物多样性的影响[J].生态与农村环境学报,2016,32(5):774-779.
- [8] 付斌,刘宏斌,胡万里,等.施用牛粪对土壤—油菜系统氮素组分的影响[J].土壤通报,2016,47(5):1177-1183.
- [9] 井大炜,张红,王明友.牛粪对西瓜根际土壤微生物多样性及氮素利用率的影响[J].核农学报,2014,28(11):2102-2107.
- [10] 王飞,林诚,李清华,等.长期不同施肥下黄泥田土壤—水稻碳氮磷生态化学计量学特征[J].土壤通报,2017,48(1):169-176.
- [11] 井大炜,邢尚军,刘方春,等.保水剂施用方式对侧柏根际微生态环境的影响[J].农业机械学报,2016,47(5):146-154.
- [12] 王改玲,李立科,郝明德.长期施肥和秸秆覆盖土壤活性有机质及碳库管理指数变化[J].植物营养与肥料学报,2017,23(1):20-26.

(下转第 85 页)

- plant(*Solanum melongena* L.)[J]. Journal of Agricultural Science and Technology B, 2011, 1(7): 1091-1096.
- [11] Taek K O, Yoshiyuki S, Jiro C, et al. Effect of Aqueous Extract of Biochar on Germination and Seedling Growth of Lettuce(*Lactuca sativa* L.)[J]. Journal of the Faculty of Agriculture, Kyushu University, 2012, 57(1):55-60.
- [12] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2002.
- [13] 李仲芳. 植物生理学试验指导[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2010: 66-75.
- [14] 张丽霞, 张国强. 大蒜素含量的测定方法研究[J]. 湖北农业科学, 2009, 48(3): 713-714.
- [15] 陈晓月, 赵承辉. 大蒜素体外抗菌活性研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2008, 39(1): 108-110.
- [16] Angm D, Sensöz S. Effect of pyrolysis temperature on chemical and surface properties of biochar of rapeseed (*Brassica napus* L.)[J]. International Journal of Phytoremediation, 2014, 16(7/8): 684-693.
- [17] 王英惠, 杨旻. 不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳矿化及腐殖质组成的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(8): 1585-1591.
- [18] Zimmerman A R. Abiotic and microbial oxidation of laboratory-produced black carbon(biochar)[J]. Environmental Science & Technology, 2010, 44(4): 1295-1301.
- [19] Whitman T, Enders A, Lehmann J. Pyrogenic carbon additions to soil counteract positive priming of soil carbon mineralization by plants[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 73: 33-41.
- [20] Lou Yingmei, Joseph S, Li Lianqing, et al. Water extract from straw biochar used for plant growth promotion: An initial test[J]. Bioresources, 2015, 11(1): 249-266.
- [21] Fawzy Z F, El-Bassiony A M, Behairy A G, et al. Effect of foliar spraying by some bio and organic compounds on growth, yield and chemical composition of snap bean plants[J]. Journal of Applied Sciences Research, 2010, 6(12): 2269-2274.
- [22] Fimmen R L, Cory R M, Chin Yuping, et al. Probing the oxidation-reduction properties of terrestrially and microbially derived dissolved organic matter [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2007, 71(12): 3003-3015.
- [23] 王越. 硒硫配施对大蒜光合特性、产量及品质的影响[J]. 山东农业科学 2014, 46(5): 66-71.
- [24] 靳志丽, 刘国顺, 聂新柏. 腐殖酸对土壤环境和烤烟矿质吸收影响的研究[J]. 中国烟草科学, 2002(3): 15-18.
- [25] 曾婕, 海梅荣, 王晓会. 木醋液对植烟土壤微生物多样性的影响[J]. 土壤通报, 2015, 46(1): 93-98.

(上接第 80 页)

- [13] 井大炜, 王明友, 张红, 等. 鸡粪对芸豆土壤有机碳氧化稳定性与碳库管理指数的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(8): 192-200.
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [15] 代红翠, 陈源泉, 赵影星, 等. 不同有机物料还田对华北农田土壤固碳的影响及原因分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(S2): 103-110.
- [16] 郭金瑞, 宋振伟, 朱平, 等. 长期不同种植模式对东北黑土微生物群落结构与土壤理化性质的影响[J]. 土壤通报, 2016, 47(2): 353-359.
- [17] 井大炜, 王明友, 张红, 等. 蚯蚓粪配施尿素对豇豆根系特征与根际土腐殖质的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(1): 212-219.
- [18] 罗永清, 赵学勇, 王涛, 等. 植物根系分解及其对生物和非生物因素的响应机理研究进展[J]. 草业学报, 2017, 26(2): 197-207.
- [19] 刘晓. 配施鸡粪对杨树苗根系形态和根际土壤微环境特征的影响[J]. 水土保持通报, 2014, 34(5): 80-84.
- [20] 井大炜, 王明友, 马海林, 等. 畦灌与保水剂配施对杨树根际土壤微环境特征及生长的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(1): 62-70.
- [21] 王传杰, 肖婧, 蔡岸冬, 等. 不同气候与施肥条件下农田土壤微生物生物量特征与容量分析[J]. 中国农业科学, 2017, 50(6): 1067-1075.
- [22] 李猛, 张恩平, 张淑红, 等. 长期不同施肥设施菜地土壤酶活性与微生物碳源利用特征比较[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(1): 44-53.
- [23] 叶桂梅, 井大炜, 邢尚军, 等. 味精废浆与化肥配施对杨树幼苗土壤活性有机碳与微生物活性的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(5): 291-296.
- [24] 井大炜, 邢尚军, 刘方春, 等. 保水剂—尿素凝胶对侧柏裸根苗细根生长和氮素利用率的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(4): 1046-1052.
- [25] 石博文, 赖欣, 李洁, 等. 尿素与有机肥配施对棕红壤氮素转化的影响[J]. 核农学报, 2017, 31(5): 938-945.