

鸡粪配施尿素对扁豆根际微环境 特征及产量、品质的影响

王明友¹, 张红¹, 张桂祥²

(1. 德州学院 生态与园林建筑学院, 山东 德州 253023; 2. 德州市农业科学研究院, 山东 德州 253015)

摘要: [目的] 探讨鸡粪配施尿素对扁豆根际微环境特征及产量、品质的作用效果, 为提高农田土壤质量管理以及扁豆种植的优化施肥提供理论依据。[方法] 通过连续 4 a 的大田试验, 研究了 CK(对照, 不施肥)、CF(纯施尿素)、CM(纯施鸡粪)和 CM+CF(鸡粪和尿素各提供 50%的氮)处理对扁豆根际中根系分泌物含量、微生物数量、微生物多样性及产量、品质的影响。[结果] 同纯施尿素处理相比, 鸡粪和尿素各半处理根系分泌物中氨基酸总量、有机酸总量和总糖含量分别提高 61.91%, 43.03%和 31.18%; 细菌数、放线菌数和微生物量碳、氮含量明显增加。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 处理扁豆产量分别较 CK, CF 和 CM 处理提高 65.20%, 28.15%和 8.24%, 并使扁豆荚果的 V_c 、可溶性糖和游离氨基酸含量分别较 CF 处理提高 45.55%, 36.35%和 43.23%。与 CM+CF 处理相比, 纯施鸡粪处理对根际和扁豆产量、品质的影响效果较小。[结论] 鸡粪与尿素配施措施能促使扁豆根系分泌物的增多以及根际微生物数量和微生物多样性指数的提高, 有助于增强土壤的供肥性能, 并促进扁豆生长的高产优质。

关键词: 扁豆; 鸡粪; 根系分泌物; 微生物多样性; 品质

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)06-0101-05

中图分类号: S143.6

文献参数: 王明友, 张红, 张桂祥. 鸡粪配施尿素对扁豆根际微环境特征及产量、品质的影响[J]. 水土保持通报, 2017, 37(6): 101-105. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.06.016; Wang Mingyou, Zhang Hong, Zhang Guixiang. Effects of chicken manure co-applied with urea on rhizospheric characteristics and yield, quality of *Lablab purpureus*[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(6): 101-105. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.06.016

Effects of Chicken Manure Co-applied with Urea on Rhizospheric Characteristics and Yield, Quality of *Lablab Purpureus*

WANG Mingyou¹, ZHANG Hong¹, ZHANG Guixiang²

(1. College of Ecology and Garden Architecture, Dezhou University, Dezhou, Shandong 253023, China;

2. Dezhou Academy of College of Agricultural Science, Dezhou, Shandong 253015, China)

Abstract: [Objective] Exploring the effect of chicken manure co-applied with urea on rhizospheric characteristics and yield, quality of *Lablab purpureus*, in order to provide theoretical basis for the improvement of quality management in farmland soil and for fertilization optimization of *Lablab purpureus* plantation. [Methods] A field experiment including four treatments, i. e., CK (neither urea nor chicken manure was applied), CF (100% of nitrogen was provided by urea), CM (100% of nitrogen was provided by chicken manure), and CM + CF (50% and 50% of nitrogen was provided by chicken manure and urea, respectively) was performed. The present study was conducted to determine the effects of different treatments on root exudates contents, microbial population, microbial diversity index in rhizosphere and the yield, quality of *Lablab purpureus*. [Results] In comparison to CF treatment, CM + CF treatment significantly increased the

收稿日期: 2017-08-01

修回日期: 2017-08-13

资助项目: 山东省农业良种工程项目“德州特色豆类蔬菜品种资源的整理筛选与创新利用”(〔2013〕207号)

第一作者: 王明友(1964—), 男(汉族), 山东省安丘市人, 学士, 教授, 主要从事蔬菜高产生理生态方面的教学与研究工作。E-mail: nwmy_sd-dz@163.com。

contents of total amino acid, total organic acid and total sugar in root exudates, showing 61.91%, 43.03% and 31.18% increases, respectively. The populations of bacteria and actinomycetes and contents of microbial biomass carbon and microbial biomass nitrogen were obviously increased by the use of CM+CF treatment. In the meantime, the microbial diversity index was the highest in CM+CF treatment, which had the same variation tendency as total microbial population. However, the microbial diversity indices and microbial population had different variation tendency between CF and CK treatments. Additionally, the CM+CF treatment could significantly increase the yield and improve the quality of *Lablab purpureus*, indicative of 65.20%, 28.15% and 8.24% increases in yield as compared with the treatments of CK, CF and CM+CF, respectively. Furthermore, the contents of V_c , soluble sugar and free amino acid in legume increased by 45.55%, 36.35% and 43.23% by the use of CM+CF treatment as compared to CF treatment, respectively. However, less effect on rhizosphere and yield, quality of *Lablab purpureus* in CM treatment was observed in comparison with CM+CF treatment. [Conclusion] As a result, chicken manure co-applied with urea was beneficial on the increases of root exudates, microbial populations and microbial diversity index in rhizosphere and the enhancement of soil nutrient-supply capacity as well as the growth of high-yield and quality *Lablab purpureus*.

Keywords: *Lablab purpureus*; chicken manure; root exudates; microbial diversity; quality

扁豆(*Lablab purpureus*),也叫龙爪豆、鹊豆、眉豆,是十分重要的豆科作物之一,栽培历史悠久,古代就传入了中国。扁豆营养很丰富,味道鲜美,鲜荚中富含维生素、植物蛋白与矿物质,且有一定的药用功效^[1]。在亚洲东南部与南部以及非洲区域,扁豆不仅可当作粮食还能作为蔬菜来食用^[2]。在中国,扁豆以收获嫩荚为主并作为一种蔬菜,经济价值高,并有十分广泛的种植,从华北到华南、自西北到东北均有大面积栽培^[3]。据统计,目前全国约有 4 000 hm² 扁豆种植地,年产量在 1.5×10^5 t 到 2.0×10^5 t 之间。诸多学者关于扁豆进行了大量的探索研究工作,但主要集中于栽培密度^[4]、栽培模式^[1,5]、耐盐性^[6]等方面,并且常见的施肥方式仍以化肥为主,而关于有机肥与尿素搭配施用的研究报道则较少。许多研究表明,有机肥配施尿素对土壤理化性状具有明显的改善效应^[7],并能提升冬小麦^[8]、玉米^[9]、水稻^[10]等农作物的产量与品质。目前,部分地区扁豆生产的突出问题表现在品质低、产量小。分析认为,这与扁豆实际栽培中盲目地大量施用化肥有密切关联。因此,探讨扁豆的合理优化施肥措施是当前亟待解决的重要课题。

有机肥可以优化土壤微生物群落,改善土壤农化性状,提升土壤肥力,并对土壤养分具有缓释效果^[8]。所以,在化肥中搭配有机肥是多年来农业研究者关注的焦点。大量研究认为^[2,7-10],有机肥配施化肥能增加土壤微生物功能多样性,且能增强作物对氮素的吸收与利用能力,有利于土壤肥力的提高与农业的可持续发展。鸡粪是植物生产中优质的天然有机肥,与其他家禽和家畜粪便相比养分含量居于首位^[11]。利用鸡粪生产研制的有机肥或有机—无机复合肥对农作

物有明显的增产效果。据统计^[12],在大白菜或西瓜等作物上施用鸡粪有机肥,增产幅度在 15%~25% 之间。有研究^[11]表明,鸡粪与化肥的适宜搭配比例可显著提高芸豆产量,改善荚果品质,并能提升土壤质量,增强土壤供肥性。也有研究^[13]发现,鸡粪配施化肥对杨树苗根际区域生态环境具有显著的改善效应。可见,许多学者针对鸡粪有机肥开展了大量的研究工作,但应用于扁豆的研究鲜有报道,尤其是关于扁豆根际微环境特征的研究还未见报道。鉴于此,本研究拟选用北京永丰泰生物科技有限公司生产的鸡粪有机肥为供试原料,通过 4 a 的大田试验,开展了鸡粪与尿素配施对扁豆根际中根系分泌物、微生物数量、微生物多样性及产量、品质的研究,旨在评价不同施肥措施对扁豆根际微环境特征的改善效应,并探讨配施措施对扁豆产量、品质的影响效果,为提高农田土壤质量管理与增强农业固碳减排潜力提供理论依据,也为扁豆种植的优化施肥提供技术参考。

1 材料与方 法

1.1 试验地点与供试材料

试验地点设置在德州市九龙湾低碳生态农业循环经济产业园。供试土壤为轻壤土,土壤碱解氮、速效磷与速效钾的含量分别为 98.02, 41.29 与 102 mg/kg, pH 值 7.16, 有机碳含量为 14.86 g/kg。供试鸡粪为北京永丰泰生物科技有限公司生产, N, P₂O₅ 和 K₂O 含量分别为 1.28%, 1.31% 和 2.47%, 有机碳含量为 215.69 g/kg; 所用化肥为尿素、过磷酸钙和硫酸钾。

1.2 试验设计

试验于 2013—2016 年连续进行了 4 a, 为避免扁

豆连作,分别选择土壤基础肥力相近的 4 个地块,每年种植在不同地块上,且每个地块的面积、试验处理均相同。统一采用田间小区试验,随机区组设计,共设 4 个处理:① CK,不施肥。② CF,单施化肥。③ CM,鸡粪。④ CM+CF,鸡粪提供 50%的氮,尿素提供 50%的氮。每个处理 3 次重复,每个小区面积为 $8.5\text{ m} \times 12.2\text{ m} = 103.7\text{ m}^2$,共计 12 个小区。除 CK 外,各处理均为等养分量,N,P 和 K 含量相当于 $298.50, 232.50, 175.50\text{ kg/hm}^2$,各处理磷、钾不足部分分别用过磷酸钙、硫酸钾补足。

扁豆采用 12 cm 高 M 垄栽培,栽培行宽 50 cm,株距 40 cm,操作行距 90 cm。按试验设计撒施定量有机肥和化肥,深翻搅拌均匀后整地起垄,覆盖地膜。分别在 2013 年 4 月 26 日、2014 年 4 月 20 日、2015 年 4 月 25 日和 2016 年 4 月 23 日使用点播器点播扁豆。生长期每 15 d 进行 1 次中耕除草,生长后期及时摘除基部黄叶。扁豆生长期为 160 d 左右,并于 7 月中旬进入收获期。整个生长期,根据具体情况喷施药剂防治病虫害。在 2013,2014,2015,2016 年的扁豆种植试验时期内,按照当地采摘习惯每年分别进行采收测产,并随机选取扁豆样品测定荚果品质,重复 5 次。扁豆的产量和品质指标含量均为这 4 a 所测数据的平均值。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 根际土采集与测定 分别于每年的开花结荚期(2013 年 8 月 29 日、2014 年 8 月 26 日、2015 年 8 月 28 日和 2016 年 8 月 23 日)在每个小区选择有代表性的 10 棵植株,参照 Wang 等^[14]的方法采集根际土,并将所取根际土样混匀后分成 3 份:一份新鲜样品用于微生物数量和微生物量碳、氮的测定,一份样品风干后过 1 mm 筛后用于根系分泌物的分析,另一份放于 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冰箱中保存用于细菌多样性指数的分析。

根系分泌物中氨基酸总量的测定采用甲醛滴定法,有机酸总量的测定采用液相色谱仪法,总糖的测定采用蒽酮比色法^[15];土壤微生物数量采用稀释平板计数法,细菌、放线菌与真菌的测定分别采用牛肉蛋白胨琼脂培养基、改良高氏 1 号培养基与马丁—孟加拉红培养基。土壤微生物量碳、氮的测定采用氯仿熏蒸 K_2SO_4 浸提法^[15]。土壤微生物群落功能多样性采用 Biolog GN 平板分析法测定^[16]。

1.3.2 扁豆品质 荚果的 V_c 含量采用 2,6-二氯酚靛酚滴定法测定,可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定,可溶性蛋白采用考马斯亮蓝法测定,游离氨基酸含量采用水合茚三酮法测定,硝酸盐含量采用紫外分

光光度法测定^[17]。

1.4 统计方法

采用 Excel 2013 处理数据,采用 SAS 软件进行方差分析和多重比较(LSD 法, $p < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 根系分泌物

从表 1 可以看出,施用鸡粪的 2 个处理的氨基酸总量、有机酸总量与总糖含量显著高于 CK 与 CF 处理。其中 CM+CF 处理的氨基酸总量、有机酸总量明显高于其他处理,而总糖含量与 CM 处理差异未达显著水平,分别比 CK 提高 74.85%,69.46%和 34.62%,分别比 CF 处理提高 61.91%,43.03%和 31.18%。同 CK 相比,CF 处理显著提高了有机酸总量,而对氨基酸总量与总糖含量的影响作用较小。以上分析可见,不同施肥措施对扁豆根系分泌物含量的影响存在显著差异,鸡粪的加入相比单施化肥可明显促进扁豆分泌较多的根系分泌物,其中鸡粪与尿素配施的作用效果最为显著。

表 1 不同处理对扁豆根系分泌物含量的影响

处理	氨基酸/ ($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有机酸/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	总糖/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
CK	327.12 ± 13.55^c	22.95 ± 0.80^d	13.72 ± 0.65^b
CF	353.25 ± 19.03^c	27.19 ± 1.81^c	14.08 ± 0.57^b
CM	484.79 ± 10.27^b	33.52 ± 1.32^b	18.10 ± 0.26^a
CM+CF	571.96 ± 12.63^a	38.89 ± 0.76^a	18.47 ± 0.33^a

注:数据为平均值±标准误,同一列中不同小写字母表示处理间差异显著($p < 0.05$)。下同。

2.2 根际微生物数量与微生物量碳、氮

从表 2 可以看出,扁豆根际中细菌、放线菌所占微生物总量的比例分别为 78.49%~81.14%,17.75%~19.68%,而真菌所占比例甚少。表明细菌占居绝对优势,放线菌次之,而真菌最少。各施肥处理较 CK 均显著增加了根际的细菌数、放线菌数和微生物总量,而对真菌数的影响较小。在施肥处理中,CM 和 CM+CF 处理的细菌数、放线菌数和微生物总量显著高于 CF 处理;而 CM+CF 处理的细菌数、放线菌数与微生物总量均达最高值,并与 CK,CF,CM 处理差异达显著水平,其中细菌数分别较 CK,CF 和 CM 处理显著增加 85.22%,57.20%和 32.31%。此外,各处理微生物量碳、氮含量的变化规律一致:CM+CF > CM > CF > CK,且各处理之间差异均达到显著水平,这说明施用鸡粪处理的微生物量碳、氮含量均显著高于单施化肥,其中 CM+CF 处理的微

生物量碳、氮含量分别比 CF 处理增加 40.05% 和 54.47%。数据分析表明,鸡粪与尿素配施对扁豆根

际微生物数量和微生物量碳、氮含量的增加幅度最大。

表 2 不同处理对扁豆根际微生物数量及微生物量碳、氮含量的影响

处理	细菌/ (10^5 CFU · g ⁻¹)	放线菌/ (10^5 CFU · g ⁻¹)	真菌/ (10^5 CFU · g ⁻¹)	微生物总/ (10^5 CFU · g ⁻¹)	微生物量碳/ (mg · kg ⁻¹)	微生物量氮/ (mg · kg ⁻¹)
CK	20.98 ± 1.26 ^d	5.26 ± 0.15 ^d	0.49 ± 0.06 ^a	26.73 ± 0.50 ^d	459.28 ± 8.16 ^d	22.96 ± 0.96 ^d
CF	24.72 ± 0.83 ^c	6.15 ± 0.27 ^c	0.48 ± 0.13 ^a	31.35 ± 0.63 ^c	487.63 ± 7.71 ^c	30.57 ± 1.06 ^c
CM	29.37 ± 1.12 ^b	7.29 ± 0.30 ^b	0.53 ± 0.16 ^a	37.19 ± 1.01 ^b	603.85 ± 9.65 ^b	36.39 ± 0.89 ^b
CM+CF	38.86 ± 1.09 ^a	8.61 ± 0.39 ^a	0.42 ± 0.25 ^a	47.89 ± 0.53 ^a	682.91 ± 8.51 ^a	47.22 ± 1.18 ^a

2.3 微生物多样性指数

本试验通过 Shannon 指数公式分别计算了扁豆根际微生物多样性指数(图 1)。结果显示,不同处理使扁豆根际的微生物多样性指数存在一定差异,且各处理之间差异均达显著水平,表明不同处理的扁豆根际微生物群落的丰富度不同。CM+CF 处理的微生物多样性指数最高,分别较 CK,CF 和 CM 处理显著高出 32.93%,53.58% 和 11.25%,这与微生物总量的变化趋势一致;而 CF 处理的微生物多样性指数显著低于 CK,这与微生物总量的变化规律不完全一致,说明土壤中微生物总数可能较高,但其微生物多样性指数则不一定高。因此,除了分析土壤微生物数量外,很有必要对土壤微生物多样性指数进行评价。

2.4 扁豆产量与品质

从表 3 可见,不同施肥措施对扁豆产量与荚果品质产生了显著影响。各施肥处理相对对照均显著提高了扁豆产量;而在施肥处理中,CM+CF 处理的产量显著高于其他处理,分别较 CK,CF 和 CM 处理显著高出 65.20%,28.15% 和 8.24%;其次为 CM 处理,亦明显高于 CF 处理。同 CK 相比,CF 处理使荚果的 V_c、可溶性糖、可溶性蛋白和游离氨基酸含量呈

现下降的趋势,其中 V_c 含量差异达显著水平;而 CM+CF 处理均显著提高了荚果的上述指标含量,其中 V_c、可溶性糖和游离氨基酸含量均达最高值,并与其他处理差异达显著水平,分别较 CF 处理提高 45.55%,36.35% 和 43.23%。从表 3 还可知,各处理的荚果硝酸盐含量大小依次为:CF,CK,CM,CM+CF,其中 CM+CF 处理分别较 CK,CF 和 CM 处理显著降低 24.90%,35.25% 和 22.82%。综合分析可知,鸡粪与尿素配施措施相比单施化肥可以显著提高扁豆产量,并明显改善荚果品质。

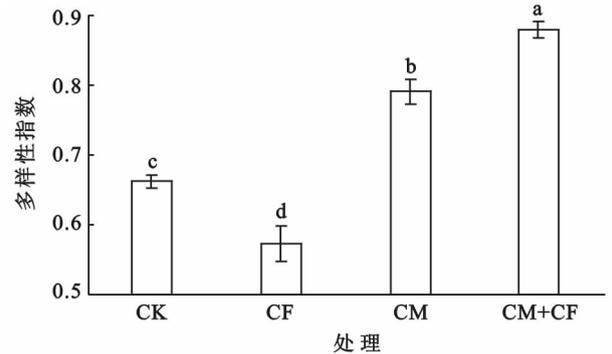


图 1 不同处理对扁豆根际微生物多样性指数的影响

表 3 不同处理对扁豆产量与品质的影响

处理	产量/ (kg · hm ⁻²)	V _c / (10^{-2} mg · g ⁻¹)	可溶性糖/ (mg · g ⁻¹)	可溶性蛋白/ (mg · g ⁻¹)	游离氨基酸/ (mg · kg ⁻¹)	硝酸盐/ (mg · kg ⁻¹)
CK	27 895.35 ± 169.20 ^d	18.33 ± 0.27 ^c	13.92 ± 0.49 ^c	6.11 ± 0.06 ^c	237.16 ± 9.75 ^c	336.81 ± 6.29 ^b
CF	35 960.73 ± 151.16 ^c	17.65 ± 0.31 ^d	13.67 ± 0.23 ^c	6.02 ± 0.08 ^c	226.32 ± 8.82 ^c	390.63 ± 9.36 ^a
CM	42 573.26 ± 132.58 ^b	19.86 ± 0.79 ^b	16.09 ± 0.46 ^b	6.55 ± 0.06 ^b	282.53 ± 8.06 ^b	327.76 ± 8.18 ^b
CM+CF	46 082.52 ± 149.27 ^a	26.68 ± 0.55 ^a	18.98 ± 1.21 ^a	6.97 ± 0.05 ^a	339.68 ± 9.25 ^a	252.95 ± 7.67 ^c

3 讨论

根际是植物—土壤—微生物相互作用的特殊微生态环境,植物根系以多种方式向周围的土壤释放有机物质,并以其自身的活动影响这部分土壤的理化及生物学性状,尤其是影响微生物区系的发育^[18]。本

试验得出,同单施化肥相比,施用鸡粪处理显著提高了扁豆根际中细菌数、放线菌数和微生物总量,这主要是由于施用鸡粪处理使扁豆根系分泌物中氨基酸总量、有机酸总量和总糖含量明显增多,为微生物的生长繁殖提供了营养来源与能量来源。这与徐宪斌等^[19]对玉米根际的研究结果相类似。同时,根系分

泌物中有机酸总量的提高易降低扁豆根际的 pH 值,有助于促进磷、钾与部分盐类离子的溶解^[20],增强扁豆对磷和钾的吸收能力,对于提升扁豆的荚果品质具有重要意义。此外,鸡粪配施尿素处理的微生物量碳、氮含量显著高于其他处理,这主要是由于鸡粪与尿素搭配有助于调节土壤的碳氮比,并能促使扁豆根系分泌物的增多,进而为微生物的快速繁殖创造了优越条件^[13]。而微生物量碳、氮是土壤养分的源与库,对土壤养分转化、循环起着重要作用^[18]。

生物多样性指数在一定程度上能反映生物群落中物种的丰富程度及其各类型间的分布比例^[16]。通常,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^[21]。因此,除研究土壤微生物数量外,有必要对土壤生物多样性指数进行研究。本试验中,单施化肥处理的微生物多样性指数显著低于对照,这与微生物总量的变化规律不一致。究其原因可能在于不同施肥处理使扁豆根际微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^[16],导致土壤微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,施用鸡粪的 2 个处理的微生物多样性指数显著高于单施化肥处理,这可能是由于虽然单施化肥与鸡粪处理的养分总用量相等,但前者在土壤中释放迅速,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^[18],从而会降低微生物群落的丰富度。表明鸡粪的施用可明显提高扁豆土壤微生物群落的丰富度,进一步印证了施用鸡粪措施在提高扁豆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。本研究还表明,施用鸡粪处理能使扁豆的产量、品质显著优于对照和单施化肥处理。说明施用鸡粪可以改善扁豆根系生长的微生态环境条件,有利于促进扁豆的高产优质生长,这也印证了扁豆根际微域特征的改善可能是扁豆达到高产优质生长的内在因素。

此外,本试验还发现,在鸡粪施用的 2 个处理中,鸡粪与尿素配施处理对扁豆根际微环境特征及产量、品质的作用效果明显优于鸡粪处理,其原因可能是由于鸡粪与尿素配施能更好地调节土壤的 C/N 比,并丰富了土壤中的大量元素与微量元素,从而更利于促进土壤微生物的大量繁殖和微环境的改善^[22];同时,配施鸡粪能够维持较好的土壤性状与可持续利用潜力,有助于土壤有机碳的累积与碳排放的减少。

4 结论

与纯施尿素处理相比,鸡粪与尿素配施处理可显

著提高扁豆根系分泌物中氨基酸总量、有机酸总量和总糖含量,并使细菌数、放线菌数和微生物量碳、氮含量明显增加。同时,鸡粪配施尿素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,而纯施尿素与对照处理的微生物多样性指数和微生物总量的变化趋势不一致。此外,鸡粪配施尿素处理扁豆产量分别较对照、纯施尿素和纯施鸡粪处理提高 65.20%、28.15% 和 8.24%,并使扁豆荚果的 V_c 、可溶性糖和游离氨基酸含量分别较纯施尿素处理显著提高 45.55%、36.35% 和 43.23%。综上,鸡粪与尿素配施措施能促使扁豆根系分泌物的增多以及根际微生物数量和微生物多样性指数的提高,有助于增强土壤的供肥性能,并促进扁豆生长的高产优质。

[参 考 文 献]

- [1] 安欢乐,燕翀,徐娜,等. 3 种镰刀菌对小扁豆生长的影响[J]. 草业科学,2016,33(1):67-74.
- [2] 郇恒福,黄嘉璐,线琳,等. 施用豆科绿肥对酸性土壤有机磷组分的动态影响[J]. 草地学报,2014,22(6):1216-1221.
- [3] 张绪成,王红丽,于显枫,等. 半干旱区全膜覆盖垄沟间作种植马铃薯和豆科作物的水热及产量效应[J]. 中国农业科学,2016,49(3):468-481.
- [4] 王家军,于佰双,张瑞萍,等. 龙引扁豆 1 号与青贮玉米混种技术研究[J]. 黑龙江农业科学,2013(1):19-22.
- [5] 杨封科,高世铭,崔增团,等. 甘肃省黄绵土耕地质量特征及其调控的关键技术[J]. 西北农业学报,2011,20(3):67-74.
- [6] 张凤银,雷刚,胡斌. 壳聚糖对扁豆种子萌发过程中盐胁迫的缓解作用[J]. 江汉大学学报:自然科学版,2016,44(6):485-489.
- [7] 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壤腐殖质的影响[J]. 农业机械学报,2017,48(1):212-219.
- [8] 郑凤霞,董树亭,刘鹏,等. 有机无机肥配施对冬小麦耗水特性和干物质生产的影响[J]. 水土保持学报,2017,31(2):240-247.
- [9] 宋桂云,杨恒山,徐寿军,等. 氮肥运筹对科尔沁地区粮饲兼用玉米金山 10 产量、干物质及氮素积累的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2017,23(2):289-296.
- [10] 刘红江,陈虞雯,孙国峰,等. 有机肥—无机肥不同配施比例对水稻产量和农田养分流失的影响[J]. 生态学杂志,2017,36(2):405-412.
- [11] 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.

(下转第 112 页)

- [J]. 自然资源学报, 2001, 16(5): 427-432.
- [21] 曹裕, 居玛汗·卡斯木, 范鹏, 等. 陕西洛川旱塬苹果园地深层土壤水分和养分特征[J]. 应用生态学报, 2013, 24(2): 388-396.
- [22] 阎太白, 王潜德. 洛川塬黄土潜水的补给机制及黄土含水特征[J]. 地质评论, 1983, 29(5): 418-427.
- [23] 程立平, 刘文兆. 黄土塬区土壤水分分布特征及其对不同土地利用方式的响应[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 203-207.
- [24] 王延平, 韩明玉, 张林森, 等. 洛川苹果园土壤水分变化特征[J]. 应用生态学报, 2012, 23(3): 731-738.
- [25] 李志, 刘文兆, 王秋贤. 黄土塬区不同地形部位和土地利用方式对土壤物理性质的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(6): 1303-1308.
- [26] 向伟, 林雪青, 张志强, 等. 黄土塬区土地利用变化对深剖面土壤水分的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(4): 12-17.
- [27] 樊军, 郝明德, 邵明安. 黄土旱塬农业生态系统土壤深层水分消耗与水分生态环境效应[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 61-64.
- [28] 李玉山, 黄土区土壤水分循环特征及其对陆地水分循环的影响[J]. 生态学报, 1983, 3(2): 3-13.
- [29] 孙长忠, 黄宝龙. 黄土高原“林分自创性”有效水分供给体系的研究[J]. 生态学报, 1999, 19(5): 614-621.
- [30] 王石言. 黄土塬区苹果园土壤水文特征及蒸散规律[D]. 陕西 杨凌: 教育部水土保持与生态环境研究中心, 2016.
- [31] Wang Yunqiang, Shao Mingan, Liu Zhipeng, et al. Characteristics of dried soil layers under apple orchards of different ages and their applications in soil water managements on the Loess Plateau of China[J]. Pedosphere, 2015, 25(4): 546-554.
- [32] Zhang Zhiqiang, Evaristo Javime, Li Zhi, et al. Tritium analysis shows apple trees may be transpiring water several decades old[J]. Hydrol Process, 2017, 31(5): 1196-1201.
- [33] 黄明斌, 康绍忠, 李玉山. 黄土高原沟壑区小流域水分环境演变研究[J]. 应用生态学报, 1999, 10(4): 411-414.
- [34] 刘贤赵, 黄明斌. 渭北旱塬苹果园土壤水分环境效应[J]. 果树学报, 2002, 19(2): 75-78.
- [35] 阎太白. 洛川黄土地区区域地下水资源及计算方法探讨[J]. 水文地质工程地质, 1981, 13(5): 43-46.
- [36] 方德彪, 邓振镛, 仇化民, 等. 甘肃东部旱作区土壤水分补给量的研究[J]. 干旱地区农业研究, 1996, 14(3): 5-9.

(上接第 105 页)

- [12] 刘高峰. 有机营养对烤烟生理代谢与品质影响的研究[D]. 福建 福州: 福建农林大学, 2006.
- [13] 井大炜. 不同栽培措施对欧美 I-107 杨的增长效应及作用机理研究[D]. 山东 泰安: 山东农业大学, 2013.
- [14] Wang Xiaoping, Zabowski D. Nutrient composition of Douglas-fir rhizosphere and bulk soil solutions [J]. Plant Soil, 1998, 200(1): 13-20.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [18] 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.
- [19] 徐宪斌. 蚯蚓粪配施化肥对玉米根际土壤生物学特征的影响[J]. 水土保持通报, 2017, 37(1): 78-82.
- [20] 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.
- [21] 李雅, 刘梅, 曾全超, 等. 基于文献计量的土壤有机碳与土壤微生物多样性研究前沿态势分析[J]. 土壤通报, 2017, 48(3): 745-756.
- [22] 程万莉, 刘星, 高怡安, 等. 有机肥替代部分化肥对马铃薯根际土壤微生物群落功能多样性的影响[J]. 土壤通报, 2015, 46(6): 1459-1465.