

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

井大炜 王明友 张 红 李士平

(德州学院生态与园林建筑学院, 德州 253023)

摘要: 通过大田试验,研究了不施肥(CK)、单施化肥(CF)、施蚯蚓粪(VC)及蚯蚓粪和尿素各提供50%的氮(VC+CF)等处理对土壤物理性质、豇豆根系活力、形态特征及根际中根系分泌物含量与腐殖质组成的影响。结果表明:VC和VC+CF处理较CF处理能显著降低土壤容重,并明显提高土壤总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度。各施肥处理对豇豆在幼苗期的根系特征和根际土壤腐殖质组成的影响不明显;而在伸蔓期和开花结荚期,与CF处理相比,VC+CF处理显著提高了豇豆的根系活力,并明显增加了豇豆的总根长、比根长、根表面积、根体积与根尖数,而根系直径却显著降低,其中开花结荚期的根表面积分别比CK、CF和VC处理增加144.88%、80.73%和36.82%;同时,VC+CF处理也提高了豇豆根际土壤中根系分泌物和胡敏酸含量,并提升胡敏酸与富里酸比值,其中开花结荚期的胡敏酸含量分别较CK、CF和VC处理高出45.19%、37.06%和7.69%。此外,VC+CF处理可明显提高豇豆产量,显著改善豇豆品质,且作用效果显著优于其他处理。随着豇豆生育期的推进,蚯蚓粪配施尿素的影响作用逐渐增大。综上,蚯蚓粪与尿素配施有利于改善豇豆的根系特性和根际土壤腐殖质组成,增强土壤的供肥性能,有助于促进豇豆生长并提高产量和品质。

关键词: 豇豆; 蚯蚓粪; 根系形态特征; 根系分泌物; 腐殖质组成

中图分类号: S153.6+22; S143.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)01-0212-08

Effects of Vermicompost Co-applied with Urea on Root Characteristics and Humus in Rhizosphere Soil of Cowpea

JING Dawei WANG Mingyou ZHANG Hong LI Shiping

(College of Ecology and Garden Architecture, Dezhou University, Dezhou 253023, China)

Abstract: A field experiment was conducted to explore the effect of vermicompost on the root absorption characteristics and humus composition of cowpea rhizosphere soil. The effects of different treatments, i. e., CK (neither urea nor vermicompost was applied), CF (100% of nitrogen was provided by urea), VC (100% of nitrogen was provided by vermicompost), and VC + CF (vermicompost and urea each provided 50% of nitrogen) on soil physical property, root activity, root morphological characteristics and root exudates, as well as humus composition in the rhizosphere soil of cowpea were studied. The results indicated that in comparison with CF treatment, the VC and VC + CF treatments evidently decreased soil bulk density, and significantly increased soil total porosity, capillary porosity and non-capillary porosity. Different fertilization treatments had no significant effect on root characteristics and humus composition in the rhizosphere soil at the seedling stage of cowpea. While at the stretch tendril period and flowering and pods formation stage, VC + CF treatment significantly increased root activity and obviously increased the total root length, specific root length, root surface area, root volume and root tip number, while the root average diameter was apparently decreased compared with CF treatment. The root surface area in the VC + CF treatment was increased by 144.88%, 80.73% and 36.82% at the flowering and pods formation stage compared with the treatments of CK, CF and VC, respectively. Meanwhile, VC + CF treatment also significantly increased the contents of root exudates and humic acid, and increased the ratio of humic acid to fulvic acid, showing 45.19%, 37.06% and 7.69% increases in humic acid content over the treatments of CK, CF and VC at the flowering and pods formation stage, respectively.

收稿日期: 2016-09-01 修回日期: 2016-10-21

基金项目: 山东省农业良种工程项目(鲁科字(2013)207号)

作者简介: 井大炜(1982—),男,讲师,博士,主要从事植物营养机理研究,E-mail: jingdawei009@163.com

通信作者: 王明友(1964—),男,教授,主要从事蔬菜高产生理生态研究,E-mail: nwmy_sddz@163.com

Additionally, the VC + CF treatment could significantly increase yield and improve quality of cowpea, which had statistically significant differences with other treatments. Along with the extension of cowpea growth period, the impact of vermicompost co-applied with urea on root growth and soil physic-chemical properties of cowpea presented a gradually increasing trend. As a result, the application of vermicompost co-applied with urea was beneficial to root absorption characteristics and humus composition in the rhizosphere soil and soil nutrient-supply capacity improvement as well as growth with high-yield and high-quality of cowpea.

Key words: cowpea; vermicompost; root morphological characteristics; root exudates; humus composition

引言

豇豆(*Vigna unguiculata* L.)属豆科植物,籽粒营养丰富,蛋白质质量分数高达 16.0% ~ 30.8%^[1];并含有多种氨基酸,能弥补禾谷类粮食的不足,同时,豇豆还具有较强的耐瘠薄能力及抗旱性,且生育期短、适应性广,是我国重要的豆类蔬菜作物^[2]。关于豇豆的施肥研究一直是广大学者关注的焦点。有机肥料是传统农业中的重要肥源,在现代农业生产中被越来越多的人所采用^[3-4]。但随着众多畜禽场的规模化兴建、运作,畜禽粪便也渐渐成为大量种植农场的有机肥源,而这些畜禽场所产生的有机肥与传统有机肥相比,却发生了质的变化^[5]。有研究表明^[5],在年出栏 1 万头的猪场,粪便中排出的砷元素量折合 As₂O₃ 为 230 kg/a 左右。由此可见,有机肥的施用方式不容忽视,同时有机肥种类的选择也尤为重要。

蚯蚓粪是通过蚯蚓消化有机废弃物而产生的均匀颗粒,具有良好的团粒结构,疏松适度,通透性好,酸碱度中性,并有保肥、保水性能;同时其有机质含量高,矿质养分丰富,含有多种利于植物生长的腐殖质、酶、植物激素类物质^[6]。我国从 20 世纪 80 年代开始兴起蚯蚓养殖业,北京、天津、云南等地均建有不同规模的养殖场,蚯蚓粪年产量高达几十万吨^[7]。许多学者针对蚯蚓粪开展了大量的研究,但主要集中在黄瓜、草莓等作物上^[8-9],而应用于豇豆的研究报道较少,尤其关于蚯蚓粪对豇豆根系特性与土壤腐殖质的研究更是鲜有报道。根系吸收特性决定了植株获得水分、养分的能力,作物实际种植中采用的许多栽培措施本质上是通过影响根系吸收特性来控制个体与群体的发育,进而达到增产的目的^[10];而腐殖质是土壤有机质的主体部分,既能作为营养元素的“库”,还可影响土壤中的矿物成分等,其组成是评价土壤肥力水平的重要指标^[11]。本文以豇豆为试材,评价施用蚯蚓粪对土壤物理性状、豇豆根系吸收特性与根际土壤中根系分泌物含量及腐殖质组成的作用效果,以期为蚯蚓粪推广应用提供理论支

撑,也可为豇豆的合理种植提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 试验地点与供试材料

试验地点设在山东省德州市运河经济开发区芦庄村九龙湾生态园,供试土壤为轻壤土,土壤速效氮、磷和钾含量(质量比)分别为 93.85、36.07、106.32 mg/kg,有机质含量为 15.08 g/kg。供试蚯蚓粪为蚯蚓吞食牛粪后的产物,全量氮、磷、钾质量分数分别为 1.68%、1.29% 与 0.95%;氨基酸总质量分数为 5.42%,其所含氨基酸种类在 16 ~ 18 种之间;有机酸总量和总糖含量分别为 41.26 mg/g 与 25.39 mg/g;pH 值 6.9。所用化肥为尿素(含 N 质量分数 46%)、过磷酸钙(含 P₂O₅ 质量分数 12%)和硫酸钾(含 K₂O 质量分数 50%)。豇豆品种为“之豇 28-2”。

1.2 试验设计

试验于 2012—2015 年连续进行 4 a,为避免豇豆连作,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 VC,施蚯蚓粪。④ VC + CF,蚯蚓粪提供 50% 的氮,尿素提供 50% 的氮。每个处理 5 次重复,每个小区面积为 93.6 m² (7.8 m × 12 m),共计 20 个小区。除 CK 外,各处理均为等养分量,氮、磷、钾含量相当于 310.50、238.50、175.50 kg/hm²,各处理磷、钾不足部分分别用过磷酸钙、硫酸钾补足。

豇豆采用 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 2012 年 4 月 26 日、2013 年 4 月 21 日、2014 年 4 月 27 日和 2015 年 4 月 23 日使用点播器点播豇豆,植株抽蔓后支人字架,架高 1.9 m。生长期间每 20 d 进行 1 次中耕除草,生长后期及时摘除基部黄叶。整个生长期,根据具体情况喷施药剂防治病虫害。

1.3 测定项目与方法

分别于豇豆幼苗期(2012 年 5 月 20 日、2013 年 5 月 18 日、2014 年 5 月 16 日和 2015 年 5 月 15 日)、伸蔓期(2012 年 6 月 14 日、2013 年 6 月 12 日、2014 年 6 月 10 日和 2015 年 6 月 9 日)和开花结荚期(2012 年 8 月 29 日、2013 年 8 月 26 日、2014 年 8 月 25 日和 2015 年 8 月 22 日)在每小区选择有代表性的 10 株植株采集根系样品与根际土。将挖出的根系用水冲洗,放在盛有少量水的长方形平盘中,将根系分开,避免根系重叠和堆积,然后采用 WinRHIZ 2003b 根系分析系统对根系进行扫描,分析计算出总根长、比根长、根表面积、根体积、根尖数和平均直径,并用 TTC 比色法测定根系活力。同时参照 WANG 等^[12]的方法采集根际土,并将所取根际土壤样品充分混匀后风干,过 1 mm 筛供根系分泌物含量、腐殖质组成的测定。此外,在每个小区随机选择 10 个点,采用环刀法测定土壤容重,并计算土壤总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度。

根系分泌物中氨基酸总量的测定采用甲醛滴定法;总糖的测定采用蒽酮比色法;有机酸总量的测定采用液相色谱法。腐殖质各组分的测定采用焦磷酸钠-氢氧化钠提取重铬酸钾氧化容量法;首先用重铬酸钾氧化法测定腐殖质全碳,并用氢氧化钠-焦磷酸钠混合液制备待测液,然后用重铬酸钾氧化法分别测定胡敏酸+富里酸的总碳量以及胡敏酸碳量,最后采用差值法即可分组^[13]。

在 2012—2015 年 4 a 的豇豆种植试验时期内,按照当地采摘习惯每年分别进行采收测产,并随机

选取豇豆样品测定荚果品质,重复 5 次。豇豆的产量和品质指标含量均为 4 a 所测数据的平均值。其中荚果维生素 C 含量的测定采用 2,6-二氯酚靛酚滴定法,硝酸盐含量的测定采用紫外分光光度法,可溶性糖含量的测定采用蒽酮比色法,可溶性蛋白含量的测定采用考马斯亮蓝法^[13]。

1.4 统计方法

采用 Excel 2013 进行处理数据并制图,采用 SPSS 17.0 统计软件进行方差分析与多重比较(LSD 法, $P<0.05$)。图、表中数据均为 2012—2015 年 4 a 试验数据的平均值。

2 结果与分析

2.1 土壤物理性质

土壤容重和孔隙度是衡量土壤供肥、保肥能力及土壤紧实状况的重要指标^[14]。由于豇豆在幼苗期、伸蔓期和开花结荚期土壤物理性状变化规律基本一致,因此只给出开花结荚期的试验数据(表 1)。可以看出,VC 和 VC + CF 处理相比 CK、CF 处理能显著降低土壤容重,并明显提高总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度,而 VC 与 VC + CF 处理间差异均未达显著水平。CF 处理的土壤容重显著低于 CK,而总孔隙度和毛管孔隙度显著高于 CK。从表 1 还可知,各处理之间的非毛管孔隙度与毛管孔隙度比值无显著性差异。由此可见,施用蚯蚓粪能显著降低土壤容重,并明显提高土壤总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度,这有利于改善土壤结构,为豇豆的根系生长发育创造有利环境。

表 1 不同处理对豇豆土壤物理性质的影响

Tab.1 Effect of different treatments on soil physical properties of cowpea field					
处理	土壤容重/(g·cm ⁻³)	总孔隙度/%	毛管孔隙度/%	非毛管孔隙度/%	非毛管孔隙度与毛管孔隙度比
CK	1.38±0.02 ^a	47.92±0.43 ^c	31.23±0.68 ^c	16.70±0.26 ^b	0.53±0.03 ^a
CF	1.32±0.02 ^b	50.19±0.85 ^b	33.12±0.71 ^b	17.07±0.32 ^b	0.52±0.06 ^a
VC	1.19±0.03 ^c	55.09±0.62 ^a	35.91±0.33 ^a	19.18±0.49 ^a	0.53±0.06 ^a
VC+CF	1.21±0.03 ^c	54.34±0.46 ^a	36.01±0.25 ^a	18.33±0.52 ^a	0.51±0.05 ^a

注:数据为平均值±标准差,同列数值后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$),下同。

2.2 根系活力

根系活力指根系新陈代谢的活动能力,是反映根系吸收功能的一项重要指标,根系特性与发育状况直接关系到豇豆对土壤养分和水分的吸收^[15]。因此,根系活力的高低也影响着豇豆植株的生长情况。由图 1 可以看出,在幼苗期,各处理的根系活力并未表现出明显的差异;而进入伸蔓期,CF、VC 和 VC + CF 处理的根系活力较 CK 均显著升高,分别高出 29.73%、36.14% 和 38.81%,但 3 个施肥处理之间差异不显著。随着生育期的延长,当进入开花结

荚期时,不同施肥处理对豇豆根系活力的影响呈现出明显的差异。VC + CF 处理的根系活力达到 156.31 μg/(g·h),分别较 CK、CF 和 VC 处理显著高出 64.05%、34.65% 和 12.84%;其次为 VC 处理,也显著高于 CK 和 CF 处理。数据分析表明,随着生育期的推进,施肥措施对豇豆根系活力的作用效果越来越明显。在开花结荚期,施用蚯蚓粪较单施化肥能显著提高豇豆的根系活力,其中蚯蚓粪与尿素配施的提高幅度更大,这有利于增强豇豆的根系活力。

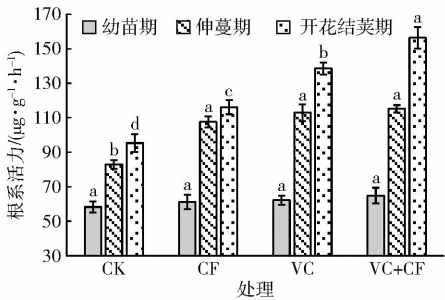


图 1 不同处理对豇豆根系活力的影响

Fig.1 Effect of different treatments on root activity of cowpea

2.3 根系形态特征

根系长度能反映根系和土壤的接触面积并体现根系在土壤中的伸展空间^[16],比根长、根系表面积和根系体积也可以反映根系的发育状况。从表 2 可以看出,豇豆幼苗期的根系形态特征在不同处理之间未表现出显著的差异。在伸蔓期,施用蚯蚓粪处理的总根长、比根长、根表面积和根体积均显著高于对照和单施化肥处理,但 VC + CF 与 VC 处理之间差异不显著。当进入开花结荚期时,不同施肥处理均能明显增加豇豆根系的总根长、比根长、表面积和体积,而 VC + CF 处理的增幅最大,且总根长、根表面积和根体积均显著高于其他处理,其中根表面积分别较 CK、CF 与 VC 处理明显提高 144.88%、80.73% 和 36.82%;其次为 VC 处理,其根体积与

CF 处理无显著性差异,而总根长、比根长与根表面积均明显高于 CF 处理。

根尖除了包括须根根尖外,还包括根毛根尖;须根数、根毛数越多,根系和土壤接触的面积越大,同时根系的有效吸收面积也越多^[16]。VC + CF 处理在伸蔓期的根尖数与 VC 处理差异不显著,但显著高于 CK 和 CF 处理;而在开花结荚期,VC + CF 处理的根尖数最多,分别较 CK、CF 与 VC 处理明显高出 40.37%、35.40% 和 19.22%;其次是 VC 处理,也显著高于 CK 和 CF 处理,而 CK 与 CF 处理间差异未达显著水平。

根系的强弱不仅与根长、根表面积、根系体积有关,同时也与根系平均直径有关。从表 2 可知,施蚯蚓粪处理在伸蔓期的根系平均直径明显低于对照和单施化肥处理,且 VC + CF 与 VC 处理间无显著性差异。随着生育期的推进,当进入开花结荚期时,CF 处理提高了豇豆根系的平均直径,但与 CK 处理无显著性差异,而 VC、VC + CF 处理均显著低于 CK 处理,特别是 VC + CF 处理。这说明蚯蚓粪的施用可以促进豇豆根系变细,有助于增加根系表面积,扩大根系对养分、水分的吸收空间。综合分析可知,蚯蚓粪配施尿素对豇豆在开花结荚期根系形态特征的作用效果最显著。

表 2 不同处理对豇豆根系形态特征的影响

Tab.2 Effect of different treatments on root morphological characteristics of cowpea

生育期	处理	总根长/cm	比根长/(cm·g ⁻¹)	根表面积/cm ²	根体积/cm ³	根尖数	平均直径/cm
幼苗期	CK	236.76 ± 52.63 ^a	173.85 ± 4.92 ^a	327.89 ± 75.82 ^a	6.53 ± 0.80 ^a	109 ± 18 ^a	0.72 ± 0.03 ^a
	CF	251.59 ± 38.76 ^a	179.67 ± 5.09 ^a	358.95 ± 106.55 ^a	6.49 ± 0.67 ^a	116 ± 29 ^a	0.75 ± 0.03 ^a
	VC	279.32 ± 29.68 ^a	175.06 ± 2.56 ^a	383.26 ± 96.17 ^a	6.61 ± 0.39 ^a	112 ± 31 ^a	0.69 ± 0.04 ^a
	VC + CF	263.08 ± 32.15 ^a	173.49 ± 4.27 ^a	396.17 ± 126.98 ^a	6.47 ± 0.32 ^a	107 ± 22 ^a	0.71 ± 0.02 ^a
伸蔓期	CK	352.26 ± 65.09 ^c	179.65 ± 2.18 ^b	525.02 ± 37.14 ^c	10.16 ± 0.89 ^c	228 ± 20 ^b	0.76 ± 0.01 ^a
	CF	489.55 ± 32.57 ^b	185.27 ± 5.22 ^b	618.73 ± 29.05 ^b	14.53 ± 1.36 ^b	241 ± 15 ^b	0.75 ± 0.01 ^a
	VC	676.93 ± 102.35 ^a	214.92 ± 2.81 ^a	936.58 ± 69.51 ^a	18.29 ± 0.93 ^a	297 ± 23 ^a	0.68 ± 0.03 ^b
	VC + CF	691.67 ± 89.81 ^a	217.59 ± 3.96 ^a	978.09 ± 76.33 ^a	19.05 ± 1.02 ^a	316 ± 19 ^a	0.66 ± 0.03 ^b
开花结荚期	CK	597.58 ± 39.79 ^d	183.31 ± 3.95 ^b	708.23 ± 128.65 ^d	16.55 ± 1.43 ^c	327 ± 26 ^c	0.79 ± 0.02 ^a
	CF	722.39 ± 85.50 ^c	187.63 ± 1.82 ^b	959.62 ± 102.96 ^c	22.76 ± 1.08 ^b	339 ± 15 ^c	0.81 ± 0.03 ^a
	VC	936.06 ± 41.64 ^b	218.71 ± 3.16 ^a	1267.58 ± 116.37 ^b	23.93 ± 1.22 ^b	385 ± 23 ^b	0.72 ± 0.02 ^b
	VC + CF	1 069.52 ± 63.21 ^a	223.28 ± 2.07 ^a	1734.29 ± 156.05 ^a	28.05 ± 0.87 ^a	459 ± 18 ^a	0.63 ± 0.03 ^c

2.4 根系分泌物

在植物生长过程中,根系在从土壤中吸收水分、养分的同时,也会向生长介质中分泌质子、释放无机离子以及溢泌或分泌大量有机物^[4],即根系分泌物。从表 3 可以看出,豇豆在幼苗期、伸蔓期和开花结荚期的根系分泌物含量呈现出明显的差异。不同处理之间的氨基酸总量、有机酸总量和总糖含量在幼苗期均无显著性差异;在伸蔓期,VC + CF 处理的氨基酸总量和有机酸总量与 VC 处理差异不显著,

但明显高于 CK 和 CF 处理,而总糖含量在 4 个处理间的差异均未达显著水平。随着生育期进入开花结荚期时,VC + CF 处理的氨基酸总量、有机酸总量与总糖含量均达最高值,且显著高于其他处理,分别较 CF 处理显著提高 38.14%、52.91% 和 39.99%。VC 处理的氨基酸总量、总糖含量与 CF 处理差异未达显著水平,但有机酸总量显著高于 CF 处理。与 CK 相比,CF 处理能明显提高总糖含量,而对氨基酸总量、有机酸总量的影响较小。由以上分析可知,随着

表 3 不同处理对豇豆根系分泌物的影响

Tab.3 Effect of different treatments on root exudates of cowpea

生育期	处理	氨基酸总量/ (mg·kg ⁻¹)	有机酸总量/ (μg·kg ⁻¹)	总糖含量/ (mg·kg ⁻¹)
幼苗期	CK	0.27 ± 0.05 ^a	5.39 ± 0.98 ^a	6.22 ± 1.18 ^a
	CF	0.25 ± 0.06 ^a	5.46 ± 1.05 ^a	5.85 ± 1.36 ^a
	VC	0.36 ± 0.10 ^a	5.61 ± 1.22 ^a	6.69 ± 0.85 ^a
	VC + CF	0.31 ± 0.08 ^a	5.72 ± 0.76 ^a	6.38 ± 1.03 ^a
伸蔓期	CK	0.63 ± 0.12 ^c	12.62 ± 0.86 ^b	14.92 ± 0.69 ^a
	CF	0.87 ± 0.05 ^b	13.15 ± 1.28 ^b	15.17 ± 0.82 ^a
	VC	1.02 ± 0.05 ^a	18.29 ± 0.90 ^a	15.79 ± 0.95 ^a
	VC + CF	1.13 ± 0.07 ^a	19.86 ± 1.16 ^a	16.08 ± 0.63 ^a
开花结荚期	CK	1.12 ± 0.08 ^b	18.07 ± 1.32 ^c	12.56 ± 0.72 ^c
	CF	1.18 ± 0.05 ^b	19.79 ± 2.10 ^c	17.98 ± 1.06 ^b
	VC	1.25 ± 0.14 ^b	25.83 ± 0.95 ^b	19.30 ± 1.27 ^b
	VC + CF	1.63 ± 0.08 ^a	30.26 ± 1.09 ^a	25.17 ± 0.95 ^a

生育期的推进,豇豆的根系分泌物含量呈递增的变化趋势,不同施肥措施对豇豆根系分泌物含量能起到至关重要的作用,蚯蚓粪配施尿素促进了豇豆在开花结荚期根系分泌物含量的明显增加。

2.5 根际土壤腐殖质组成

土壤中的腐殖质由胡敏酸、富里酸和残留在土壤中的胡敏素组成。各施肥处理能不同程度地改变豇豆根际土壤胡敏素碳、腐殖酸碳,而其含量与组成变化能影响土壤团聚体构成与保肥供肥性能

(表 4)。可以看出,在幼苗期,各处理之间的土壤腐殖质组成未见明显变化;在伸蔓期,与对照相比,施肥处理显著提高了腐殖酸碳、胡敏酸碳(HA)和富里酸碳(FA);而在 3 个施肥处理中,VC + CF 处理的腐殖酸碳、胡敏酸碳、富里酸碳与 VC 处理差异不显著,但显著高于 CF 处理。同时可见,3 个施肥处理较对照明显提高了 HA/FA 值,但 CF、VC 和 VC + CF 处理间无显著性差异。随着生育期的延长,进入开花结荚期时,VC 处理的胡敏素碳明显高于其他处理,而腐殖酸碳与 VC + CF 处理差异不显著,但显著高于 CK 和 CF 处理。从表 4 还可知,与 CK 相比,VC + CF 和 VC 处理显著降低了胡敏素碳与腐殖酸碳的比值,其中 VC + CF 处理达最低值,并明显低于 VC 处理;同时,VC + CF 和 VC 处理明显提高了胡敏酸碳、富里酸碳,其中 VC + CF 处理的胡敏酸碳显著高于其他处理,分别比 CK、CF 与 VC 处理提高 45.19%、37.06% 和 7.69%。此外,VC + CF 处理的 HA/FA 值最大,分别比 CK、CF 和 VC 处理显著高出 24.13%、21.99% 和 15.77%,而其他处理间均差异不显著。由此可见,蚯蚓粪与尿素配施相比单施化肥可以降低豇豆在伸蔓期和开花结荚期的胡敏素碳与腐殖酸碳比值,并提高腐殖酸碳和胡敏酸碳,同时还能提高 HA/FA 值,这可能与豇豆的生长周期有关,也可能与施肥措施有一定的关联。

表 4 不同处理对豇豆根际土壤腐殖质组分的影响

Tab.4 Effect of different treatments on humus composition in rhizosphere soil of cowpea

生育期	处理	胡敏素碳含量/ (g·kg ⁻¹)	腐殖酸碳含量/ (g·kg ⁻¹)	胡敏素碳与 腐殖酸碳含量比	胡敏酸碳含量/ (g·kg ⁻¹)	富里酸碳含量/ (g·kg ⁻¹)	胡敏酸碳与 富里酸碳含量比
幼苗期	CK	2.95 ± 0.08 ^a	1.65 ± 0.06 ^a	1.79 ± 0.06 ^a	0.69 ± 0.08 ^a	0.96 ± 0.10 ^a	0.72 ± 0.07 ^a
	CF	2.87 ± 0.26 ^a	1.63 ± 0.09 ^a	1.76 ± 0.10 ^a	0.70 ± 0.03 ^a	0.93 ± 0.02 ^a	0.75 ± 0.05 ^a
	VC	3.02 ± 0.15 ^a	1.71 ± 0.12 ^a	1.77 ± 0.09 ^a	0.75 ± 0.03 ^a	0.96 ± 0.09 ^a	0.78 ± 0.05 ^a
	VC + CF	2.93 ± 0.20 ^a	1.76 ± 0.05 ^a	1.66 ± 0.05 ^a	0.77 ± 0.06 ^a	0.99 ± 0.05 ^a	0.78 ± 0.04 ^a
伸蔓期	CK	5.08 ± 0.39 ^b	2.12 ± 0.08 ^c	2.40 ± 0.07 ^a	0.93 ± 0.05 ^c	1.19 ± 0.03 ^c	0.78 ± 0.02 ^b
	CF	5.42 ± 0.31 ^b	2.40 ± 0.13 ^b	2.26 ± 0.04 ^b	1.09 ± 0.06 ^b	1.31 ± 0.03 ^b	0.83 ± 0.02 ^a
	VC	6.85 ± 0.17 ^a	2.69 ± 0.05 ^a	2.55 ± 0.11 ^a	1.24 ± 0.03 ^a	1.45 ± 0.04 ^a	0.86 ± 0.04 ^a
	VC + CF	5.29 ± 0.52 ^b	2.62 ± 0.07 ^a	2.02 ± 0.05 ^c	1.22 ± 0.07 ^a	1.40 ± 0.05 ^a	0.87 ± 0.03 ^a
开花结荚期	CK	9.16 ± 0.09 ^b	3.06 ± 0.05 ^b	2.99 ± 0.08 ^a	1.35 ± 0.11 ^c	1.71 ± 0.06 ^b	0.79 ± 0.02 ^b
	CF	9.27 ± 0.35 ^b	3.21 ± 0.18 ^b	2.89 ± 0.07 ^a	1.43 ± 0.07 ^c	1.78 ± 0.05 ^b	0.80 ± 0.03 ^b
	VC	10.39 ± 0.28 ^a	3.97 ± 0.06 ^a	2.62 ± 0.12 ^b	1.82 ± 0.03 ^b	2.15 ± 0.12 ^a	0.85 ± 0.05 ^b
	VC + CF	9.23 ± 0.20 ^b	3.95 ± 0.10 ^a	2.34 ± 0.08 ^c	1.96 ± 0.05 ^a	1.99 ± 0.08 ^a	0.98 ± 0.03 ^a

2.6 豇豆产量与品质

由表 5 可见,与对照 CK 相比,各施肥处理均明显提高了豇豆产量,其中 VC + CF 处理的产量最高,并显著高于其他处理,分别比 CK、CF 和 VC 处理显著提高 36.14%、23.71% 和 9.46%;其次为 VC 处理,也显著高于 CF 处理。CF 处理相比 CK 使荚果

的维生素 C、可溶性糖和可溶性蛋白含量呈下降趋势,其中维生素 C、可溶性糖含量达差异显著水平;而施用蚯蚓粪的 2 个处理均明显提高了荚果的上述指标含量,其中 VC + CF 处理的维生素 C、可溶性糖与可溶性蛋白含量均显著高于其他处理,分别比 CF 处理高出 43.03%、42.10% 和 21.93%。此外,各处

表 5 不同处理对豇豆产量与品质的影响

Tab.5 Effect of different treatments on yield and quality of cowpea

处理	产量/(kg·hm ⁻²)	维生素 C 含量/ (mg·kg ⁻¹)	硝酸盐含量/ (mg·kg ⁻¹)	可溶性糖含量/ (mg·g ⁻¹)	可溶性蛋白含量/ (mg·g ⁻¹)
CK	16 950.57 ± 286.39 ^d	179.28 ± 9.05 ^c	352.71 ± 18.09 ^b	12.95 ± 0.48 ^c	5.89 ± 0.29 ^c
CF	18 653.26 ± 190.25 ^c	158.93 ± 6.90 ^d	416.08 ± 12.63 ^a	11.45 ± 0.30 ^d	5.79 ± 0.21 ^c
VC	21 081.95 ± 239.51 ^b	201.65 ± 6.32 ^b	302.85 ± 9.76 ^c	15.02 ± 0.61 ^b	6.54 ± 0.09 ^b
VC + CF	23 276.18 ± 168.27 ^a	227.32 ± 8.18 ^a	269.43 ± 10.28 ^d	16.27 ± 0.35 ^a	7.06 ± 0.13 ^a

理荚果的硝酸盐含量由大到小排序为:CF、CK、VC 和 VC + CF,且处理间差异均达显著水平,其中 VC + CF 处理分别比 CK、CF 和 VC 处理降低 23.61%、35.25% 和 11.04%。由以上分析可知,蚯蚓粪配施尿素可明显提高豇豆产量,并显著改善荚果品质。

3 讨论

作物处于一定生境下,与养分吸收有关的形态学性状从作用于个体水平到作用于细胞水平及个体结构功能均会发生适应性改变,比如形态可塑性、作物根系形态特征(总根长、根表面积、根体积)与植物的养分、水分利用效率存在显著或极显著的相关性^[16-18]。许多学者关于春玉米^[19]、蔬菜^[20]、广藿香^[21]的研究表明,施用有机肥可以促进根系的生长,并能显著提高作物的根系总干质量。本试验得出,在开花结荚期,蚯蚓粪配施尿素较单施化肥能明显提高豇豆的根系活力,且显著改善了豇豆的根系形态特征,总根长、比根长、根表面积和根体积均明显升高,这说明蚯蚓粪与尿素配施刺激了豇豆根系的生长。究其原因在于:①蚯蚓粪的施用显著降低了土壤容重,并能明显提高土壤的总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度,增强了通气透水性,使土壤结构得到改善,从而为豇豆根系的生长创造了优越的土壤生境。②可能是由于蚯蚓粪提供了丰富的有机碳,可调节土壤的 C/N 比,进而对土壤腐殖质结合形态与有机-无机复合状况有较好的影响效果^[22]。同时,本研究还得出,配施蚯蚓粪能明显降低豇豆根系的平均直径,可能与蚯蚓粪能诱导土壤中毛细根生长的效应有关,这对于增强豇豆对养分、水分的吸收利用具有积极意义。

相关研究认为^[23],植物根系具有较强的合成功能,可以合成氨基酸、植物碱与维生素等,能在植物整个生长期间进行很活跃的代谢作用,并不断向根外分泌无机、有机物质,即根系分泌物。本研究表明,在豇豆进入开花结荚期时,配施蚯蚓粪较单施化肥可显著提高豇豆根系分泌物中氨基酸总量、有机酸总量与总糖含量,这与王明友等^[16]对西瓜的研究结论相似。主要是由于施用蚯蚓粪能明显提高豇豆

的根系活力,并能显著改善根系的形态特征,从而显著增强了豇豆根系的活力和代谢作用。根系分泌物中有机酸总量的升高能降低根际土壤 pH 值,这有利于增强磷、钾和部分盐类离子的溶解性,进而可提高根际土壤中养分离子的有效性^[24-25],促进豇豆对磷、钾的吸收,对于豇豆品质的提高具有重要意义。这样便形成了“根系活力提高与根系形态特征的改善—根系分泌物增多—根际土壤中养分离子有效性提高—根系的吸收能力增强,促进根系生长”的良性循环。

腐殖质是评价土壤肥力水平的关键指标之一,而腐殖酸、HA/FA 值是其核心部分^[11]。有研究得出^[16],有机-无机配施可以增加胡敏酸、富里酸含量,且能引起 HA/FA 值的升高。本研究认为,配施蚯蚓粪较单施化肥明显提高了豇豆在开花结荚期根际土壤中腐殖酸、胡敏酸含量和 HA/FA 值。这与刘方春等^[4]对冬枣的研究结论基本一致。分析认为,这主要与蚯蚓粪的施用显著改善了土壤物理性状和豇豆根系的形态特征,增强了根系活力,进而促使根系分泌物增多紧密相关;而关于豇豆根系形态特征、根系分泌物含量以及腐殖质组成之间的关联分析有待进一步探讨。同时,相关研究发现^[22],微生物自身活动的加剧可引起细胞死亡并使残体的分解加速,也或许是导致胡敏酸增加的原因之一。本研究还得出,蚯蚓粪配施尿素能使豇豆的产量、品质明显优于其他处理。这表明根系特征和根际土壤腐殖质组成的改善,能增强豇豆的根系活性,并提升根际土壤的供肥性能,有助于促进豇豆的高产优质生长。可以推测,豇豆根系特性与根际土壤腐殖质组成的改善是其达到高产优质生长的内在因素。此外,不同施肥措施对豇豆在不同生育期根系特征和土壤理化性状的影响存在一定差异,且随着生育期的延长,施用蚯蚓粪的作用效果越来越明显。这一方面与豇豆的生长特性、需肥规律密切相关;另一方面可能是由于蚯蚓粪中养分以有机形态为主,具有一定的缓释特征^[26-27],进而在豇豆生长中后期有持续的营养供给。这也验证了蚯蚓粪与尿素配施既能满足豇豆在幼苗期和伸蔓期对养分的需求,并且进

入开花结荚期时也能确保有充足的养分供应。

4 结 论

- (1)施用蚯蚓粪较单施化肥能显著降低土壤容重,并明显提高土壤总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度。
- (2)在幼苗期,不同施肥措施对豇豆根系特征和根际土壤腐殖质组成的影响不明显;而在伸蔓期和开花结荚期,蚯蚓粪与尿素配施相比单施化肥可显著提高豇豆的根系活力,并明显增加豇豆的总根长、比根长、根表面积、根体积和根尖数,而根系直径

- 却显著降低。
- (3)蚯蚓粪配施尿素明显提高了豇豆根际土壤中根系分泌物和胡敏酸含量,并提升 HA/FA 值,其中胡敏酸含量分别较对照、单施化肥和施蚯蚓粪处理明显高出 45.19%、37.06% 和 7.69%;同时,该处理可明显提高豇豆产量,显著改善品质,且作用效果显著优于其他处理。
- (4)随着豇豆生育期的推进,蚯蚓粪配施尿素的影响作用逐渐增大。该措施有利于改善豇豆的根系特性和根际土壤腐殖质组成,增强土壤的供肥性能,有助于促进豇豆生长并提高产量和品质。

参 考 文 献

1 张炳火,李汉全,罗娟艳,等.放线菌 JXJ-0136 对白菜和豇豆生长的影响及其解磷作用[J].中国农业科学,2016,49(16):3152-3161.
ZHANG Binghuo, LI Hanquan, LUO Juanyan, et al. Influences of actinomycete strain JXJ-0136 on the growth of *Brassica chinensis* and *Vigna unguiculata* and its phosphate solubilization [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(16):3152-3161. (in Chinese)

2 韩彦龙,晋凡生,郑普山,等.红芸豆养分限制因子及养分吸收、积累和分配特征研究[J].中国生态农业学报,2016,24(7):902-909.
HAN Yanlong, JIN Fansheng, ZHENG Pushan, et al. Nutrient restrictive factors, nutrient absorption and accumulation of red kidney bean [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(7):902-909. (in Chinese)

3 井大炜,邢尚军,刘方春,等.配施味精废浆促进杨树生长提高土壤活性有机碳及碳库管理指数[J].农业工程学报,2016,32(增刊1):124-131.
JING Dawei, XING Shangjun, LIU Fangchun, et al. Applied monosodium glutamate wastewater promoting poplar growth, improving soil active organic carbon and carbon pool management index [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(Sup. 1):124-131. (in Chinese)

4 刘方春,邢尚军,马海林,等.生物肥对冬枣根际土壤微环境特征影响[J].北京林业大学学报,2012,34(5):100-104.
LIU Fangchun, XING Shangjun, MA Hailin, et al. Effects of bio-fertilizer on micro-environment characteristics in winter jujube rhizosphere soil [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2012, 34(5):100-104. (in Chinese)

5 彭智平,黄继川,于俊红,等.叶面喷施味精废液对白菜产量和品质的影响[J].广东农业科学,2011(6):64-65.
PENG Zhiping, HUANG Jichuan, YU Junhong, et al. Effects of foliar application of monosodium glutamate wastewater on yield and quality of Chinese cabbage [J]. Guangdong Agricultural Science, 2011(6):64-65. (in Chinese)

6 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.
WANG Mingyou, JING Dawei, ZHANG Hong, et al. Effects of vermicompost on active organic carbon and microbial activity in cowpea soil [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2016, 30(7):1404-1410. (in Chinese)

7 王福友,王冲,刘全清,等.腐植酸、蚯蚓粪及蚯蚓蛋白肥料对滨海盐碱土壤的改良效应[J].中国农业大学学报,2015,20(5):89-94.
WANG Fuyou, WANG Chong, LIU Quanqing, et al. Improved effect of humic acid, earthworm protein fertilizer and vermicompost on coastal saline soils [J]. Journal of China Agricultural University, 2015, 20(5):89-94. (in Chinese)

8 胡艳霞,孙振韵,孙永明,等.蚯蚓粪对黄瓜炭疽病的系统诱导抗性作用[J].应用生态学报,2004,15(8):1358-1362.
HU Yanxia, SUN Zhenjun, SUN Yongming, et al. Earthworm feces-induced systemic resistance of cucumber against anthracnose [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(8):1358-1362. (in Chinese)

9 田给林,张潞生.蚯蚓粪缓解草莓连作土壤障碍的作用[J].植物营养与肥料学报,2016,22(3):759-767.
TIAN Geilin, ZHANG Lusheng. Alleviation of vermicompost to obstacle in sterilized continuous cropping soil in strawberry production [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22(3):759-767. (in Chinese)

10 COSTA C, DWYER L M, HAMILTON R I, et al. A sampling method for measurement of large root systems with scanner-based image analysis [J]. Agronomy Journal, 2000, 92(4):621-627.

11 张敬敏,刘春生,叶桂梅,等.腐殖酸与无机肥配施对 I-107 欧美杨养分和土壤肥力的影响[J].林业科学,2011,47(9):158-161.
ZHANG Jingmin, LIU Chunsheng, YE Guimei, et al. *Populus × euramericara* cv. ‘74/76’ nutrient content and soil fertility affected by application of humic acid with inorganic fertilizers [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011, 47(9):158-161. (in Chinese)

12 WANG Xiaoping, ZABOWSKI D. Nutrient composition of Douglas-fir rhizosphere and bulk soil solutions [J]. Plant Soil, 1998, 200(1):13-20.

13 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,1999:24-214.

14 井大炜,邢尚军,刘方春,等.畦灌配施保水剂改善杨树林下土壤物理性状提高微生物活性[J].农业工程学报,2015,31(14):116-122.
JING Dawei, XING Shangjun, LIU Fangchun, et al. Border irrigation co-applied with super absorbent polymers improving soil

- physical characteristics and increasing microbial activity in poplar forest [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(14): 116 – 122. (in Chinese)
- 15 宋海星, 王学立. 玉米根系活力及吸收面积的空间分布变化[J]. 西北农业学报, 2005, 14(1): 137 – 141. SONG Haixing, WANG Xueli. The space distribution of the maize root activity and its absorbing area [J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2005, 14(1): 137 – 141. (in Chinese)
- 16 王明友, 张红, 李士平. 味精废浆有机肥对西瓜根系特性与根际土壤腐殖质组成的影响[J]. 水土保持通报, 2015, 35(5): 205 – 210. WANG Mingyou, ZHANG Hong, LI Shiping. Effects of monosodium glutamate wastewater manure on root characteristics and humus composition in the rhizosphere soil of watermelon (*Citrullus lanatus*) [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(5): 205 – 210. (in Chinese)
- 17 银敏华, 李援农, 李昊, 等. 氮肥运筹对夏玉米根系生长与氮素利用的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(6): 129 – 138. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160617&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.017. YIN Minhua, LI Yuannong, LI Hao, et al. Effects of nitrogen application rates on root growth and nitrogen use of summer maize [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(6): 129 – 138. (in Chinese)
- 18 汪可欣, 付强, 张中昊, 等. 秸秆覆盖与表土耕作对东北黑土根区土壤环境的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 131 – 137. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160319&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.019. WANG Kexin, FU Qiang, ZHANG Zhonghao, et al. Effects of straw mulching mode and tillage methods on soil environment of root zone in northeast black soil [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 131 – 137. (in Chinese)
- 19 肖小平, 唐海明, 汤文光, 等. 不同施肥模式对南方红壤旱地春玉米生物学特性的影响[J]. 中国农业大学学报, 2016, 21(8): 19 – 26. XIAO Xiaoping, TANG Haiming, TANG Wenguang, et al. Effects of different fertilization modes on biological characteristics of spring maize in red soil upland in southern China [J]. Journal of China Agricultural University, 2016, 21(8): 19 – 26. (in Chinese)
- 20 焦玉洁, 桑宇杰, 杨磊, 等. 新鲜和腐熟紫茎泽兰对三种茄科蔬菜生理和辣椒产量品质的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(5): 874 – 884. JIAO Yujie, SANG Yujie, YANG Lei, et al. Effects of fresh and composted *Ageratina adenophora* on physiology of three solanaceae vegetables and yield and quality of pepper [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(5): 874 – 884. (in Chinese)
- 21 卢丽兰, 杨新全, 赵世翔, 等. 有机肥与化肥配施对广藿香生长、品质及土壤养分的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(10): 184 – 191. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20151024&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.024. LU Lilan, YANG Xinquan, ZHAO Shixiang, et al. Effects of compound application of organic and chemical fertilizers on growth, quality of *Pogostemon cablin* and soil nutrient [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10): 184 – 191. (in Chinese)
- 22 井大炜, 邢尚军. 鸡粪与化肥不同配比对杨树苗根际土壤酶和微生物量碳、氮变化的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 455 – 461. JING Dawei, XING Shangjun. Effects of chicken manure mixed with inorganic fertilizer on soil enzyme activities, microbial biomass C and N at rhizosphere of poplar seedlings [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19(2): 455 – 461. (in Chinese)
- 23 BERTIN C, YANG Xiaohan, WESTON L A. The role of root exudates and allelochemicals in the rhizosphere [J]. Plant and Soil, 2003, 256(1): 67 – 83.
- 24 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/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(8): 192 – 200. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160824&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.08.024. JING Dawei, WANG Mingyou, ZHANG Hong, et al. Effects of chicken manure co-applied with nitrogen fertilizer on soil organic carbon oxidation stability and carbon pool management index in kidney bean/maize rotation soil [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(8): 192 – 200. (in Chinese)
- 25 李萍萍, 林永锋, 胡永光. 有机肥与化肥配施对茶叶生长和土壤养分的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 64 – 69. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150211&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.02.011. LI Pingping, LIN Yongfeng, HU Yongguang. Effects of compound application of organic and chemical fertilizers on growth, quality of tea plants and soil nutrient [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2): 64 – 69. (in Chinese)
- 26 李晓娜, 陈富彩, 郑璞帆, 等. 施用蚯蚓粪对陕南烤烟土壤和烟叶钾营养、农艺与经济性状的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2016(3): 105 – 109. LI Xiaona, CHEN Fucui, ZHENG Pufan, et al. Effects of vermicompost on potassium nutrition and agronomic traits and economic traits of flue-cured tobacco in southern Shaanxi Province [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2016(3): 105 – 109. (in Chinese)
- 27 李欢, 向丹, 李晓林, 等. 蚯蚓粪和生物有机肥对土壤养分及夏玉米产量的调控作用[J]. 土壤通报, 2011, 42(5): 1179 – 1183. LI Huan, XIANG Dan, LI Xiaolin, et al. The regulation of vermicompost and microbial organic fertilizer on soil nutrients and summer maize yield [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(5): 1179 – 1183. (in Chinese)