

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2023.04.006

王研, 罗彤, 闵涛, 等. 不同液体有机肥对新疆棉花生长及土壤养分的影响. 土壤, 2023, 55(4): 739–748.

不同液体有机肥对新疆棉花生长及土壤养分的影响^①

王研, 罗彤, 闵涛, 程李洋, 李俊华*

(石河子大学农学院农业资源与环境系, 新疆生产建设兵团绿洲生态农业重点实验室, 新疆石河子 832003)

摘要: 为研究不同液体有机肥对新疆棉花生长及土壤养分的影响, 进而确定滴灌棉田最适宜的液体有机肥类型, 为优化新疆滴灌棉花施肥技术提供理论依据, 采用盆栽试验, 设置 5 个处理包括不施肥(CK)、常规施肥(化肥, CF)、含氨基酸液体有机肥(AF)、含腐殖酸液体有机肥(HF)、酸性有机肥浸提液(BF), 考察了不同施肥处理对棉花生长、叶片光合能力、产量构成、土壤养分以及养分利用率的影响。结果表明: 与 CF 处理相比, 不同液体有机肥均能促进棉花生长, 提高土壤有效养分含量。其中, AF 处理较 CF 处理显著提高了棉花叶片气孔导度(G_s), 增加 7.18%; 与 CF 处理相比, HF 处理对棉花株高、茎粗、叶片蒸腾速率(T_r)、总根表面积的促进作用最显著, 分别增加了 6.38%、3.92%、11.01% 和 14.52%~11.84%, 棉花茎和地下部干物质质量最高; BF 处理棉花总根长显著提高 41.21%~49.48%, 同时叶片净光合速率(P_n)最强, 棉花单株成铃数、衣分最高, 棉花蕾铃、籽棉和整株干物质质量显著提高了 27.91%、11.83% 和 9.76%。对于土壤理化性质, AF、HF 和 BF 处理较 CF 处理均显著提高了土壤有效磷含量; BF 处理显著降低了土壤 pH, 且土壤有机质、碱解氮和速效钾含量均高于其他处理。BF 处理棉花肥料偏生产力、肥料农学效率和肥料贡献率较 CF 处理提高了 5.83%~19.33%, 显著高于其他处理。总之, 3 种液体有机肥均能促进棉花生长, 增加棉花干物质积累, 提高土壤有效养分含量以及肥料利用率, 其中以酸性有机肥浸提液效果最佳。因此, 在滴灌棉田应用酸性有机肥浸提液可以获得更高的棉花产量及肥料利用率, 有利于新疆滴灌棉田可持续发展。

关键词: 棉花; 液体肥料; 滴灌; 土壤养分

中图分类号: S145.2 **文献标志码:** A

Effects of Different Liquid Organic Fertilizers on Cotton Growth and Soil Nutrients

WANG Yan, LUO Tong, MIN Tao, CHENG Liyang, LI Junhua*

(Department of Resources and Environmental Sciences, College of Agronomy, Shihezi University; Key Laboratory of Oasis Eco-agriculture, Xinjiang Production and Construction Corps, Shihezi, Xinjiang 832003, China)

Abstract: A pot experiment was conducted to study the effects of different liquid organic fertilizers on cotton growth and soil nutrients in order to determine the most suitable type of liquid organic fertilizer for drip irrigated cotton fields in Xinjiang. Five treatments were setup: no fertilizer (CK), conventional fertilizer (CF), liquid organic fertilizer containing amino acids (AF), liquid organic fertilizer containing humic acid (HF) and acidic organic fertilizer extract (BF). Soil nutrients, the growth, leaf photosynthetic, yield and nutrient utilization of cotton were analyzed. The results showed that compared with CF, different liquid organic fertilizers could promote cotton growth and increase soil available nutrient contents. Among them, AF significantly increased stomatal conductance (G_s) of leaves by 7.18%, HF significantly increased plant height, stem thickness, leaf transpiration rate (T_r) and total root surface area by 6.38%, 3.92%, 11.01% and 14.52%–11.84%, respectively, and highest in stem and root biomass. BF significantly increased the total root length by 41.2% to 49.48%, and strongest in the net photosynthetic rate (P_n) of leaves, highest in the number of bolls per plant and fiber yield, and significantly increased the boll, seed and whole plant biomass by 27.91%, 11.83% and 9.76%. AF, HF and BF significantly increased the content of soil available phosphorus, BF significantly reduced soil pH, and highest in the contents of soil organic matter, available N and K. BF significantly increased fertilizer partial factor productivity, agronomic efficiency and fertilizer contribution rate by 5.83%–19.33% compared to the CF treatment, and also significantly higher than other treatments. All three organic liquids could promote dry matter accumulation,

①基金项目: 国家自然科学基金项目(31660598)和国家重点研发计划项目(2021YFD1900802)资助。

* 通讯作者(ljh630703@163.com)

作者简介: 王研(1997—), 女, 安徽颍上人, 硕士研究生, 主要从事新型肥料与现代施肥技术方面研究。E-mail: 1172507332@qq.com

increase cotton yield, improve soil nutrients and fertilizer use efficiency, among which acidic organic fertilizer extract had the best results. Therefore, the application of acidic organic fertilizer extract in drip irrigated cotton fields can achieve higher cotton yield and fertilizer use efficiency, thus is conducive to the sustainable development of drip irrigated cotton fields in Xinjiang.

Key words: Cotton; Liquid fertilizers; Drip irrigation; Soil nutrients

新疆棉花在我国占有重要战略地位。据国家统计局数据显示,截至 2020 年底,新疆棉花播种面积达全国棉花播种面积的 78.9%,总产量已达全国棉花总产量的 87.3%。由于降水量少,新疆棉田主要采用膜下滴灌(在灌溉水中加入肥料,对水、肥进行同步控制)的方式进行灌溉^[1]。适合滴灌使用的肥料主要包括高溶解度的固体肥料和液体肥料。在农业发达国家如美国、英国、德国等,液体肥料很早就得到了广泛使用,以美国为例,液体肥料占其肥料总用量的 35% 左右^[2]。我国液体肥料应用起步较晚,加之滴灌设备的不完善,农业上普遍使用的滴灌肥料仍是溶解度较好的固体肥料,液体肥料应用较少。相比固体肥料,液体肥料更适合灌溉系统应用,且生产费用低,在运输、施肥过程中没有粉尘、烟雾等污染物质;同时,液体肥料颗粒微小,易被作物根系吸收,配方简便灵活,可以根据实际需要各种养料成分在液体中充分混合^[3]。

在新疆,棉花种植农户的化肥过量施用率占到实际施用量的 59.6%,过量单施化肥将导致土壤肥效降低、质量恶化等问题发生^[4]。而在液体肥的基础上添加有机质制成的液体有机肥,不仅能满足植物生长所需的养分,还可以改善土壤的物理和化学性质,提高土壤连续生产能力,并且对环境的负面影响较小^[5]。

目前,液体有机肥料主要以腐殖酸、氨基酸为原料研制,以有机肥浸提液为基础研制的酸性液体有机肥研究较少^[6]。氨基酸有机肥通常以植物性、动物性原料进行制备,其不仅能够为植物提供氮素和小分子有机碳源,还能直接参与光合作用,提高光合效率,且对土壤微生物具有刺激作用,能缓解土壤的连作障碍^[7-9]。腐殖酸有机肥通常以泥炭、褐煤等为原料,通过与各类营养物质进行组合制备而成。前人研究表明,腐殖酸作为腐殖质的重要组成部分,不仅能够改善土壤理化性状,其所含的羧基、羟基、酚羟基等官能团在促进作物生长、增强作物抗逆性等方面也具有重要作用^[10-12]。而有机肥浸提液是一种由有机、无机物及微生物组成的混合物,其最大化地提取了堆肥中的微生物群落、功能性物质和养分^[13],不仅在提高作物叶绿素含量、增强光合作用、促进作物生长方面

有积极作用^[14-16],而且还能够与土壤中致病微生物产生竞争作用,有效预防土传病害^[17-18]。此外,液体有机肥便于与新疆滴灌技术相结合,方便施用,具有广阔的应用前景。而新疆有机肥资源丰富^[19],制备液体有机肥还能在减少环境污染的同时使农业废弃物资源化利用。

由于不同类型的液体有机肥具有不同的养分含量和理化特性,对作物生长发育的影响也不尽相同,同时不同作物对液体有机肥的响应也必然存在差异。目前关于不同液体有机肥在棉花上的应用与研究较少,利用液体有机肥提供棉花全生育期生长所需养分,从而取代种肥、基肥的做法也较少见。本研究通过研制不同液体有机肥,探究其对棉花生长发育及生理特性的影响,筛选最适宜提高棉花产量的液体有机肥类型,旨在为新疆滴灌棉田应用液体有机肥,促进农业可持续发展,提高作物产量提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

试验于 2020 年 4—10 月在新疆石河子市石河子大学农学院试验站(44°23'N, 85°41'E)进行。试验所取土壤为 0~20 cm 耕层土壤,经风干,过 5 mm 筛混匀备用。供试土壤为灰漠土,土壤基础理化性质为: pH 8.09,有机质 18.64 g/kg,碱解氮 52.97 mg/kg,有效磷 17.32 mg/kg,速效钾 173.93 mg/kg。供试化肥中氮肥、磷肥、钾肥分别为尿素(含 N 460 g/kg),磷酸一铵(含 N 120 g/kg、P₂O₅ 610 g/kg),硫酸钾(含 K₂O 520 g/kg)。供试液体有机肥 3 种:含氨基酸液体有机肥(AF)、含腐殖酸液体有机肥(HF)、酸性有机肥浸提液(BF),根据液体肥中的氮、磷、钾含量,补加尿素(含 N 460 g/kg,小颗粒)、磷酸一铵(含 N 120 g/kg、P₂O₅ 610 g/kg,料浆法)、硫酸钾(含 K₂O 520 g/kg,罗布泊),保持各液体肥氮、磷、钾总养分含量一致,均为 N 70 g/L、P₂O₅ 70 g/L、K₂O 70 g/L。液体有机肥养分含量及性质如表 1。

1.2 试验设计

试验为盆栽试验,共设置 5 个处理(表 2),每个处理重复 4 次,棉花全生育期取样 2 次,共计

表1 液体有机肥肥料性质及养分含量
Table 1 Liquid organic fertilizer properties and nutrient contents

处理	液体有机肥养分含量及性质					无机肥料用量		
	pH	有机质(g/L)	N (g/L)	P ₂ O ₅ (g/L)	K ₂ O(g/L)	N (g/L)	P ₂ O ₅ (g/L)	K ₂ O (g/L)
AF	4.37	6.68	15.73	0.55	2.42	54.27	69.45	67.58
HF	6.64	6.28	2.25	3.00	7.50	67.75	67.00	62.50
BF	4.06	6.20	0.6	36.89	2.17	69.40	33.11	67.83

40盆。试验过程中,取干净塑料盆(直径21 cm,高28 cm)装入供试风干土10 kg。供试棉花品种为新陆早42号,于4月28日播种,每盆经定苗后保留3株长势一致的棉花幼苗。棉花各生育期施肥随水滴灌,使用医用点滴袋模拟滴灌施肥,每次水肥总量均为600 mL/pot。根据棉花的需肥规律,采取少量多次的原则,出苗水带肥(播种)2%、苗期(出苗后27 d)3%、蕾期(出苗后47 d)10%、盛蕾期(出苗后57 d)20%、初花期(出苗后67 d)20%、盛花期(出苗后76 d)25%、花铃期(出苗后85 d)10%、盛铃期(出苗后98 d)10%,共计施肥8次,试验各处理肥料施用量如表2所示。

表2 试验各处理肥料施用量
Table 2 Fertilizer application amount of each treatment

处理	化肥用量(g/盆)			液体有机肥用量 (mL/盆)
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
不施肥(CK)	0	0	0	-
常规施肥(CF)	2	2	2	-
含氨基酸液体有机肥(AF)	-	-	-	28.57
含腐殖酸液体有机肥(HF)	-	-	-	28.57
酸性有机肥浸提液(BF)	-	-	-	28.57

1.3 样品采集

在棉花花铃期(出苗后75 d)和吐絮期(出苗后126 d),各处理采集4盆,并将植株分为不同器官(根、茎、叶、蕾铃、籽棉)后待测。植物样品收获后,将盆栽土混匀,采集约500 g土壤样品用于测定土壤养分指标。

1.4 测定项目及方法

土壤样品的测定:将采集的土壤样品风干过1 mm和0.15 mm筛,备用。土壤有机质测定采用重铬酸钾容量法;全氮测定采用凯氏定氮法;碱解氮测定采用碱解扩散法;有效磷测定采用碳酸氢钠提取钼蓝比色法;速效钾测定采用乙酸铵浸提火焰光度计法^[20]。

株高、茎粗测定:株高和茎粗分别采用直尺和游标卡尺测量。从棉花蕾期开始(出苗后55 d)每隔7 d测定1次株高、茎粗,至棉花吐絮期(出苗后111 d)。

SPAD值及光合参数测定:棉花功能叶SPAD值使用SPAD-502叶绿素仪测定,从棉花蕾期开始(出苗后56 d)每隔7 d测定1次,至棉花盛铃期(出苗后98 d)。选择棉花盛铃期晴天上午11:00—12:00,使用便携式光合作用系统测定仪LI-6400(LI-COR Lincoln, USA)测定棉花功能叶光合参数:净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间CO₂浓度(C_i)、蒸腾速率(T_r)。测定时光源为LED光源,光强为1500 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,温度控制在25℃左右,相对湿度控制在70%左右,安装CO₂钢瓶,人工设置CO₂浓度为400 $\mu\text{mol}/\text{mol}$,流速为500 $\mu\text{mol}/\text{s}$ 。

根系形态测定:使用Epson Perfection 4870 Photo扫描,Win RHIZO分析根系参数。

产量构成及干物质量测定:植物各器官样品,经105℃杀青40 min,在75~80℃烘干至恒重,用天平称量各部位干重。

1.5 数据分析

养分利用率计算公式:

肥料农学效率(AE, kg/kg)=(施肥处理的产量 - 对照产量)/施肥量;

肥料偏生产力(PFP, kg/kg)=施肥处理的产量/施肥量;

肥料贡献率(%)=(施肥处理产量 - 对照产量)/施肥处理产量×100%。

数据统计和绘图采用Excel 2010和R studio 4.0.5;采用SPSS 21.0进行方差分析和LSD法显著性检验($P<0.05$)。文中数据均为平均值±标准差($n=4$)。

2 结果与分析

2.1 不同处理对棉花株高、茎粗的影响

如图1所示,棉花株高和茎粗的动态变化规律基本一致。与CK处理相比,施肥处理均促进了棉花株高和茎粗的增加。在施肥处理中,不同类型液体有机肥对棉花株高和茎粗的促进作用均比CF处理高,说明使用液体有机肥更有利于促进棉花的生长发育,其中HF处理的棉花株高和茎粗值最高。

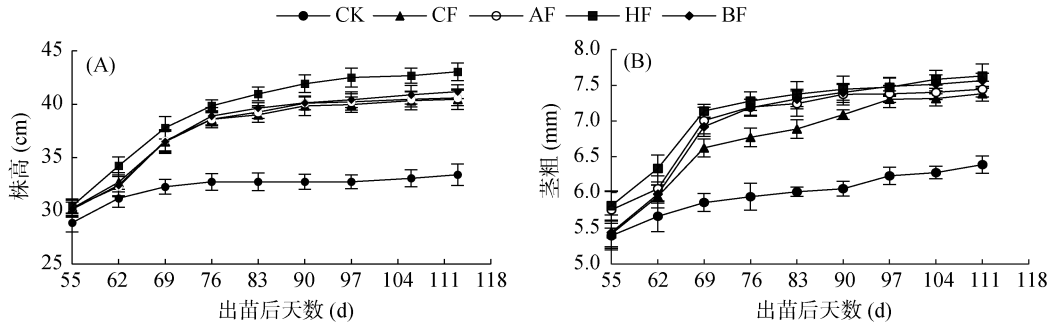


图 1 不同施肥处理下棉花株高、茎粗动态变化

Fig. 1 Dynamic changes of cotton plant heights and stem diameters under different fertilization treatments

2.2 不同处理对棉花叶片 SPAD 值及光合参数的影响

棉花叶片 SPAD 值在一定程度上能够反映叶片叶绿素含量,叶片叶绿素含量的高低及变化又能在一定程度上反映叶片衰老、受害的情况。如图 2 所示,各处理棉花叶片 SPAD 值总体呈现先上升后下降的趋势。与 CK 处理相比,各施肥处理均提高了棉花叶片 SPAD 值。其中,CK 处理叶片 SPAD 值在出苗后 63 d 达到最大,施肥处理中 CF、AF、HF 处理叶片 SPAD 值均在出苗后 77 d 达到最大,BF 处理叶片 SPAD 值在出苗后 84 d 达到最大。说明施肥均能提高叶片叶绿素含量,延缓叶片衰老。

如图 3 对棉花盛铃期各处理的 P_n (图 3A)、 T_r

(图 3B)和 G_s (图 3C)的分析可知,相比 CK 处理,施肥处理均显著提高了棉花叶片 P_n 、 T_r 和 G_s 。对于 P_n ,AF、HF、BF 处理相比 CF 处理分别提高了 9.08%、8.76% 和 9.47%,差异显著;BF 处理叶片 P_n 最高,

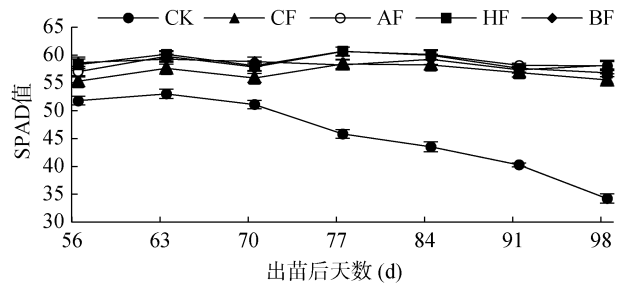
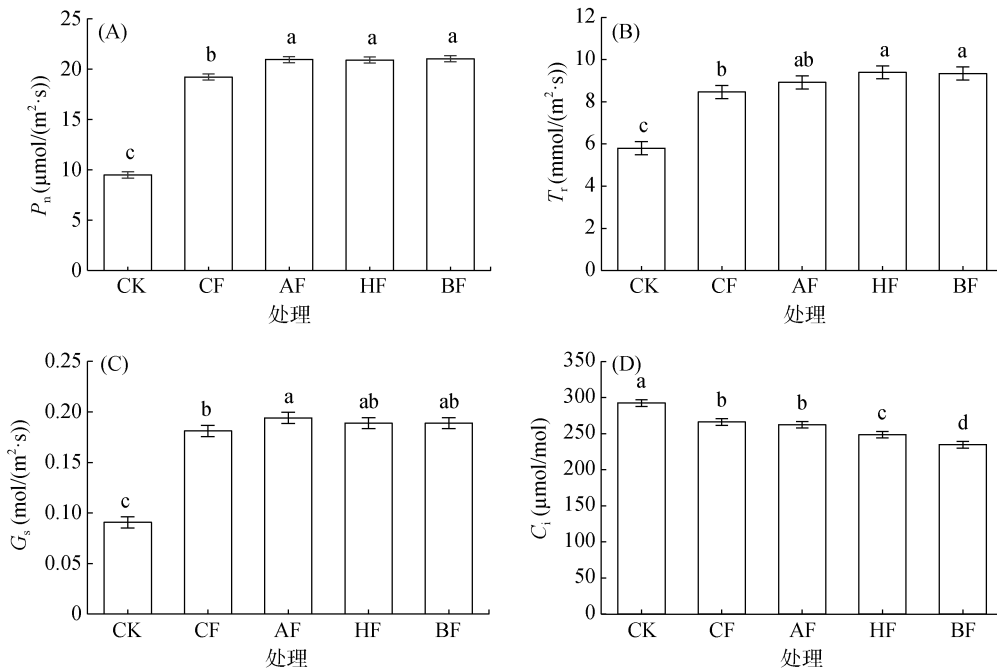


图 2 不同施肥处理下棉花叶片 SPAD 值动态变化

Fig. 2 Dynamic changes of SPAD values of cotton leaves under different fertilization treatments



(柱图上方不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$);下同)

图 3 不同施肥处理对棉花光合参数的影响

Fig. 3 Cotton photosynthetic parameters under different fertilization treatments

达 $21.03 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。对于 T_r , HF、BF 处理相比 CF 处理分别提高了 11.01% 和 10.36%, 差异显著; 其中, HF 处理 T_r 最高, 达 $9.40 \text{ mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。对于 G_s , AF 处理 G_s 最高, 相比 CF 处理提高了 11.01%, 达 $9.40 \text{ mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。 C_i (图 3D)的变化规律与 P_n 、 T_r 和 G_s 相反, 相比 CK 处理, 施肥处理均显著降低了棉花叶片 C_i , 其中 HF 和 BF 处理相比 CF 和 AF 处理显著降低, BF 处理棉花叶片 C_i 最低。说明施用液体肥有利于增大棉花叶片的气孔开度, 提高蒸腾速率, 从而提高 CO_2 转化率。

2.3 不同处理对棉花根系形态的影响

如表 3 所示, 在花铃期, 各施肥处理棉花总根长、总根表面积、总根体积和根尖数均高于 CK 处理(根尖数除外), 同时在吐絮期这种差异更加显著。在各施肥处理中, AF、HF 和 BF 处理总根长和总根表面积均显著高于 CF 处理, 其中 BF 处理总根长在花铃期和吐絮期分别显著提高了 49.48% 和 41.21%, HF

处理总根表面积在花铃期和吐絮期分别显著提高了 14.52% 和 11.84%; 在花铃期, AF、HF 和 BF 处理总根体积显著高于 CF 处理, 同时 AF、HF 和 BF 处理间无显著差异, 但在吐絮期, 总根体积表现出在 HF 处理最高, 根尖数呈现相似趋势。

2.4 不同处理对棉花干物质累积及产量形成的影响

如表 4 所示, 与 CK 处理相比, 各施肥处理均能显著提高棉花花铃期和吐絮期各器官的干物质质量。其中, 在花铃期与 CF 处理相比, AF、HF 和 BF 处理显著提高了棉花蕾铃和地下部的干物质质量; HF 和 BF 处理显著提高了棉花整株干物质质量; BF 处理显著提高了棉花茎干物质质量; 此外, BF 处理棉花叶、茎、地下部及整株干物质质量均显著高于 AF 和 HF 处理。在吐絮期, HF 处理棉花茎和地下部干物质质量最高, 较 CF 处理显著提高了 2.68% 和 7.99%; BF 处理棉花蕾铃、籽棉和整株干物质质量最高, 较 CF 处理显著提高了 27.91%、11.83% 和 9.76%。

表 3 不同处理对不同时期棉花根系形态参数的影响

Table 3 Morphological parameters of cotton roots at different growth stages under different treatments

时期	处理	总根长(mm)	总根表面积(cm^2)	总根体积(cm^3)	根尖数
花铃期	CK	3 100.13 ± 153.46 d	511.84 ± 8.14 d	6.54 ± 0.02 c	15 161.00 ± 155.82 d
	CF	3 133.72 ± 176.24 d	607.25 ± 2.26 c	7.17 ± 0.44 b	15 078.67 ± 116.74 d
	AF	3 668.90 ± 170.47 c	675.30 ± 9.30 ab	7.80 ± 0.09 a	15 766.33 ± 363.87 c
	HF	4 096.27 ± 73.11 b	695.43 ± 19.66 a	7.62 ± 0.05 a	16 652.00 ± 237.51 b
	BF	4 684.41 ± 114.68 a	652.09 ± 11.37 b	7.78 ± 0.04 a	17 807.33 ± 104.69 a
吐絮期	CK	3 594.68 ± 71.59 d	480.34 ± 6.77 c	6.95 ± 0.27 d	17 055.30 ± 190.56 c
	CF	4 065.10 ± 196.23 c	652.58 ± 26.67 b	8.01 ± 0.05 c	19 907.75 ± 489.03 b
	AF	5 468.88 ± 59.20 b	706.89 ± 13.64 a	8.15 ± 0.04 bc	20 076.22 ± 82.28 b
	HF	5 578.49 ± 19.46 b	729.82 ± 10.88 a	8.46 ± 0.12 a	20 759.63 ± 444.66 a
	BF	5 740.27 ± 91.98 a	726.35 ± 16.20 a	8.32 ± 0.11 ab	20 340.75 ± 389.33 ab

注: 表中数据为 4 个重复的平均值 ± 标准差, 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$); 下同。

表 4 不同施肥处理对不同生育时期棉花干物质累积的影响(g/pot)

Table 4 Cotton dry matter mass at different growth stages under different fertilization treatments

生育时期	处理	叶	茎	蕾铃	籽棉	地上部	地下部	整株
花铃期	CK	8.44 ± 0.17 c	7.48 ± 0.21 b	6.30 ± 0.05 c	—	22.22 ± 0.20 c	5.27 ± 0.04 c	27.49 ± 0.22 d
	CF	11.88 ± 0.20 b	7.74 ± 0.09 b	7.12 ± 0.43 b	—	26.74 ± 0.47 b	5.28 ± 0.01 c	32.01 ± 0.46 c
	AF	11.76 ± 0.15 b	7.76 ± 0.11 b	7.52 ± 0.12 a	—	27.04 ± 0.15 b	5.38 ± 0.03 b	32.42 ± 0.14 bc
	HF	11.81 ± 0.66 b	7.95 ± 0.49 b	7.77 ± 0.09 a	—	27.53 ± 0.89 b	5.38 ± 0.02 b	32.90 ± 0.88 b
	BF	12.47 ± 0.02 a	8.46 ± 0.32 a	7.63 ± 0.10 a	—	28.56 ± 0.30 a	5.83 ± 0.01 a	34.39 ± 0.29 a
吐絮期	CK	7.97 ± 0.40 c	8.77 ± 0.43 c	7.48 ± 0.24 e	17.39 ± 0.28 e	41.62 ± 1.26 d	5.79 ± 0.04 d	47.41 ± 1.22 d
	CF	22.33 ± 0.24 a	16.76 ± 0.24 b	18.81 ± 0.47 d	51.24 ± 0.26 d	109.13 ± 0.58 c	10.51 ± 0.30 c	119.63 ± 0.84 c
	AF	19.38 ± 0.50 b	16.51 ± 0.09 b	20.07 ± 0.36 c	56.78 ± 0.16 b	112.73 ± 0.79 b	10.63 ± 0.13 bc	123.35 ± 0.76 b
	HF	19.49 ± 0.25 b	17.24 ± 0.28 a	20.77 ± 0.37 b	53.59 ± 0.29 c	111.10 ± 0.99 b	11.35 ± 0.27 a	122.45 ± 1.09 b
	BF	22.53 ± 0.32 a	16.56 ± 0.12 b	24.06 ± 0.29 a	57.30 ± 0.24 a	120.44 ± 0.45 a	10.86 ± 0.04 b	131.30 ± 0.44 a

如表 5 所示, 施肥处理与 CK 处理相比均显著提高了棉花单株有效铃数、株高、茎粗和衣分含量。其中, BF 处理的单株成铃数最高, 显著高于其他处理。HF 处理株高最高, 显著高于其他处理。AF、HF 和

BF 处理茎粗显著高于 CF 处理, 其中 HF 处理茎粗最大, 较 CF 处理提高了 3.92%。AF、HF、BF 处理棉花衣分较 CF 处理分别提高了 1.74%、1.12% 和 3.09%, 其中 BF 处理棉花衣分最高, 显著高于 CF 处理。

表 5 不同施肥处理对棉花产量构成因素的影响
Table 5 Cotton yield components under different fertilization treatments

处理	单株成铃数(个)	株高(cm)	茎粗(mm)	衣分(%)
CK	2.00 ± 0.41 c	33.38 ± 1.63 c	6.48 ± 0.13 d	39.76 ± 0.01 c
CF	4.75 ± 0.60 b	40.46 ± 0.75 b	7.40 ± 0.11 c	43.02 ± 0.00 b
AF	5.08 ± 0.76 ab	40.58 ± 1.02 b	7.51 ± 0.11 b	43.77 ± 0.00 ab
HF	4.83 ± 0.37 ab	43.04 ± 1.23 a	7.69 ± 0.04 a	43.50 ± 0.01 ab
BF	5.25 ± 0.43 a	41.17 ± 1.23 b	7.60 ± 0.05 ab	44.35 ± 0.00 a

2.5 不同处理对土壤养分的影响

如表 6 所示, 花铃期和吐絮期施肥处理土壤 pH 显著低于 CK 处理。其中, 花铃期不同施肥处理之间土壤 pH 变化没有显著差异, 而在吐絮期 BF 处理 pH 显著低于 CF 处理, 下降了 1.28%。

花铃期, HF 和 BF 处理土壤有机质含量较 CK 处理分别提高了 3.31% 和 6.89%, 差异显著; 其中, BF 处理土壤有机质含量最高, 显著高于其他处理。吐絮期, AF、HF 和 BF 处理土壤有机质含量较 CK 处理分别提高了 3.48%、4.33% 和 7.06%, 差异显著; 其中, BF 处理土壤有机质含量显著高于其他处理。

不同施肥处理均提高了棉花两个时期的土壤全氮含量, 均呈现 HF 和 BF 处理土壤全氮含量显著高于 CF 处理, 且 BF 处理土壤全氮含量最高。

不同时期, 施肥处理与 CK 处理相比均显著提高了土壤碱解氮含量。花铃期, BF 处理土壤碱解氮含量最高, 与 CF 处理相比提高了 4.18%, 差异显著; 吐絮期, 土壤碱解氮含量规律与花铃期规律一致,

BF 处理土壤碱解氮含量也最高。

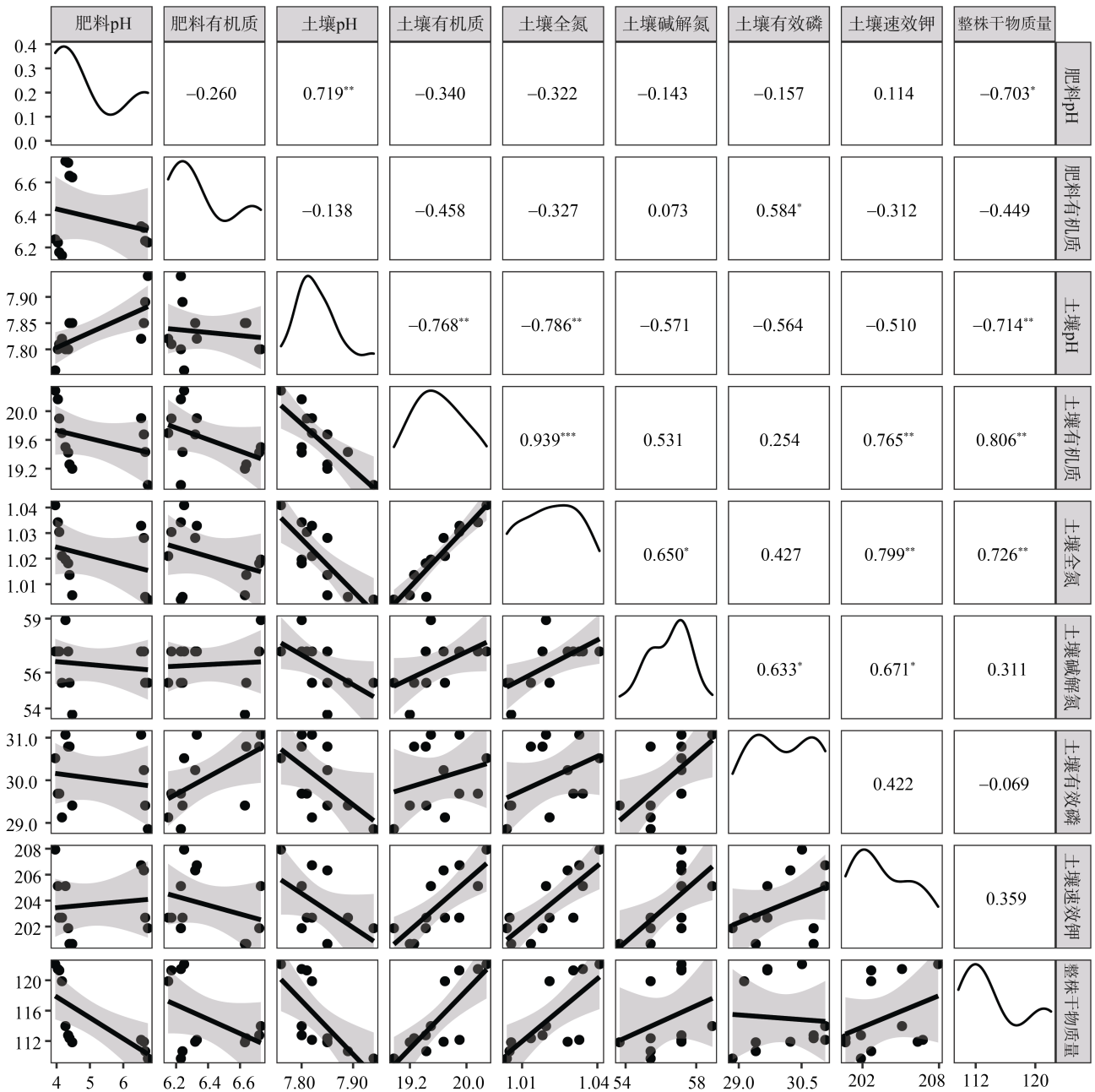
不同时期, 施肥处理与 CK 处理相比均显著提高了土壤有效磷含量。花铃期, CF、AF、HF 和 BF 处理与 CK 处理相比土壤有效磷含量分别提高了 31.86%、43.13%、44.46% 和 44.46%; 吐絮期分别提高了 79.51%、93.39%、93.84% 和 93.84%。不同时期, AF、HF 和 BF 处理土壤有效磷含量均显著高于 CF 处理。

不同时期, 施肥处理与 CK 处理相比均显著提高了土壤速效钾含量。花铃期, HF 和 BF 处理土壤速效钾含量与 CF 处理相比分别提高了 3.60% 和 3.66%。吐絮期, 土壤速效钾含量变化规律与花铃期一致, BF 处理土壤速效钾含量最高。

由图 4 可知, 液体有机肥的 pH 与土壤 pH 呈显著正相关(0.719**), 与整株干物质量呈显著负相关(-0.703*)。而土壤 pH 与土壤有机质(-0.768**)、全氮含量(-0.786**)呈显著负相关。肥料有机质含量与土壤有效磷含量呈显著正相关(0.584*)。土壤全氮与土

表 6 不同施肥处理对土壤理化性质的影响
Table 6 Soil physiochemical properties under different fertilization treatments

时期	处理	土壤 pH	有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	碱解氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)
花铃期	CK	8.06 ± 0.11 a	18.72 ± 0.22 c	0.98 ± 0.00 c	48.85 ± 1.45 c	16.51 ± 0.32 c	171.29 ± 1.57 c
	CF	7.92 ± 0.04 b	18.84 ± 0.28 bc	1.00 ± 0.01 b	52.35 ± 0.76 b	21.77 ± 0.47 b	190.67 ± 2.22 b
	AF	7.85 ± 0.02 b	19.21 ± 0.12 bc	1.01 ± 0.01 ab	53.67 ± 1.24 ab	23.63 ± 0.32 a	193.40 ± 1.21 ab
	HF	7.88 ± 0.06 b	19.34 ± 0.34 b	1.02 ± 0.01 a	54.28 ± 1.63 ab	23.85 ± 0.76 a	197.54 ± 4.75 a
	BF	7.82 ± 0.11 b	20.01 ± 0.23 a	1.03 ± 0.00 a	54.54 ± 0.88 a	23.85 ± 0.15 a	197.64 ± 1.90 a
吐絮期	CK	8.05 ± 0.07 a	18.69 ± 0.11 c	0.99 ± 0.01 d	46.23 ± 0.76 c	15.42 ± 0.82 c	178.76 ± 3.18 c
	CF	7.90 ± 0.01 b	18.72 ± 0.12 c	1.00 ± 0.00 cd	54.54 ± 0.88 b	27.68 ± 0.63 b	199.55 ± 1.29 b
	AF	7.83 ± 0.02 bc	19.34 ± 0.30 b	1.01 ± 0.01 bc	56.29 ± 1.96 ab	29.82 ± 0.42 a	202.08 ± 1.82 ab
	HF	7.88 ± 0.05 b	19.50 ± 0.47 b	1.02 ± 0.01 ab	56.29 ± 0.88 ab	29.89 ± 0.84 a	204.40 ± 2.14 a
	BF	7.80 ± 0.02 c	20.01 ± 0.21 a	1.03 ± 0.01 a	56.73 ± 0.76 a	29.89 ± 0.36 a	204.60 ± 1.19 a



(*表示在 $P<0.05$ 水平上显著相关, **表示在 $P<0.01$ 水平上显著相关, ***表示在 $P<0.001$ 水平上显著相关)

图 4 液体有机肥性质与土壤养分相关分析

Fig. 4 Correlation analysis between properties of liquid organic fertilizer and soil nutrients

壤有机质含量呈显著正相关(0.939***),与土壤碱解氮含量呈显著正相关(0.650*)。整株干物质量与土壤有机质含量呈显著正相关(0.806**)。

2.6 不同处理对棉花养分吸收利用率的影响

肥料偏生产力是反映当地土壤基础养分水平和化肥施用量综合效应的重要指标。由表 7 可以看出,与 CF 处理相比施肥均显著提高了肥料偏生产力,各处理间差异显著,表现为 BF>AF>HF>CF。与 CF 处理相比,AF、HF、BF 处理肥料偏生产力分别增加了

10.77%、4.57%、12.76%,其中 BF 处理肥料偏生产力最高,显著高于其他处理。

不同施肥处理的肥料农学效率和肥料贡献率与肥料偏生产力变化规律一致,均为 BF>AF>HF>CF,各处理间差异显著。不同类型的液体无机肥中,BF 处理肥料农学效率和肥料贡献率均最高,且显著高于其他处理,与 CF 处理相比分别高出 19.33% 和 5.83%。可见,BF 处理养分利用率最优。

表 7 不同施肥处理养分利用率
Table 7 Nutrient utilization rates under different fertilization treatments

处理	肥料偏生产力 (kg/kg)	肥料农学效率 (kg/kg)	肥料贡献率 (%)
CK	-	-	-
CF	8.54 ± 0.04 d	5.64 ± 0.06 d	66.05 ± 0.17 d
AF	9.46 ± 0.03 b	6.56 ± 0.06 b	69.37 ± 0.09 b
HF	8.93 ± 0.05 c	6.03 ± 0.07 c	67.55 ± 0.18 c
BF	9.63 ± 0.10 a	6.73 ± 0.12 a	69.90 ± 0.31 a

3 讨论

前人研究表明,滴施含氨基酸水溶肥和含腐殖酸液体有机肥均能显著提高作物株高、茎粗^[21-22]。施用堆肥浸提液能显著提高番茄、黄瓜种苗的株高和茎粗,有利于种苗后期地上部的生长发育^[23]。可见,不同类型液体有机肥对作物的生长发育均有显著的促进作用。对于棉花,液体肥能有效改善棉花植株的长势,促进棉花的生长^[24],本研究结果验证了这一结论。本研究中,HF(含腐殖酸液体有机肥)处理对棉花株高和茎粗的促进效果最佳,并且吐絮期总根体积、总根表面积和根尖数均最高,这可能由以下原因所致:①腐殖酸对根系生长具有刺激作用,从而提高根系对养分的吸收能力,最终表现出促进棉花生长。前人研究表明,腐殖酸能促进根系中H⁺-ATP酶相关基因的表达,酸化非原质体,从而使细胞壁松弛,允许细胞伸长^[25-26];②腐殖酸能够刺激与地上部生长和代谢相关的酶类的基因表达,从而引起植株体内养分的吸收和代谢,进而影响地上部生长^[27]。但本研究还发现,在棉花生长后期干物质积累与分配中,HF处理下棉花根系和茎的干物质积累显著高于其他处理,这可能不利于产量的形成。而AF(含氨基酸液体有机肥)处理对棉花株高和茎粗的促进以及棉花根系形态的影响低于HF和BF(酸性有机肥浸提液)处理,其原因可能是:①虽然氨基酸对植物有促进作用,但一定时间内由于根系氨基酸转运蛋白数量有限,导致其对氨基酸的吸收和转运量有限^[28],这可能导致一部分氨基酸有机肥无效化;②氨基酸还可能被土壤微生物直接利用或者降解^[29-30],产生竞争吸收作用,降低其有效性。

叶绿素是植物叶片光合作用能够顺利进行的关键物质,其含量可以反映植物的光合作用能力,并与植物干物质累积有着密切关系^[31]。研究表明,在作物生长发育过程中,适时适量地补给液体有机肥能够提高植株叶片SPAD值,增加叶片T_v、G_s和P_n,从

而促进CO₂同化和根系生长,最终有利于提高作物干物质积累^[32-34],本研究与前人研究结果一致。3种液体有机肥中,BF处理棉花叶片P_n和叶片CO₂的同化能力最强,干物质积累量最高,这可能是由于BF处理能够促进根系微生物生长,促进其分泌促生长物质,增大根系接触面积,促进植物对养分的吸收,进而提高了植物的光合作用,最终有利于干物质积累^[35-37]。

施用液体有机肥能显著提高土壤有机质、碱解氮、有效磷和速效钾的含量^[38]。本研究中,与CF处理相比,施用3种液体有机肥均不同程度地提高土壤有效养分含量,且对土壤碱解氮、速效钾、有效磷的增加差异不大,但BF处理下土壤有机质、碱解氮和速效钾含量最高。这一方面可能是有机肥浸提液中特有的微生物及代谢产物促进了土壤养分释放,从而提高了土壤的养分含量^[39];另一方面可能是BF的施入显著降低了石灰性土壤的pH,从而活化了土壤养分^[40]。此外,AF、HF和BF处理土壤有效磷含量均显著高于CF处理,这可能与有机质输入量有关,而施用有机肥料能显著提高土壤中活性和中等活性有机磷含量,其中活性和中等活性有机磷含量与土壤有效磷含量呈显著正相关^[41]。

液体有机肥能显著提高肥料偏生产力、农学效率和贡献率^[42]。本研究中,施用3种液体有机肥均显著提高了肥料农学效率、偏生产力和贡献率,其中BF处理显著高于AF和HF处理。本阶段试验主要筛选滴灌液体有机肥类型,3种液体有机肥AF、HF和BF成本分别为2.03、2.18和2.06元/升。其中,补充的无机肥料尿素2500元/吨,磷酸一铵6000元/吨,硫酸钾4800元/吨,浸提所用工业磷酸(85%)7900元/吨,氨基酸原粉(植物性、动物性)3500元/吨,矿源腐殖酸5000元/吨,鸡粪有机肥2000元/吨,成本将在后续试验中进行优化。

4 结论

与施用化肥相比,3种液体有机肥(AF、HF和BF)均提高了土壤有效养分含量,促进了棉花根系生长,从而促进了根系对土壤养分的吸收;同时,3种液体有机肥提高了棉花株高、茎粗和叶片光合作用能力,促进了棉花各器官干物质的积累,最终提高了棉花产量和养分利用率。在3种液体有机肥中,BF处理下土壤有机质、碱解氮和速效钾含量最高,棉花叶片P_n、总根长、干物质积累量以及衣分最高,且BF处理显著提高了肥料的偏生产力、农学效率和贡献

率。因此, BF 是 3 种液体有机肥中更加适合滴灌棉田的液体有机肥。

参考文献:

- [1] 马富裕, 周治国, 郑重, 等. 新疆棉花膜下滴灌技术的发展与完善[J]. 干旱地区农业研究, 2004, 22(3): 202–208.
- [2] 李玉顺, 高继光, 刘伟, 等. 浅析液体肥发展现状与存在问题[J]. 氮肥技术, 2016, 37(4): 48–50.
- [3] 黄燕, 汪春, 衣淑娟. 液体肥料的应用现状与发展前景[J]. 农机化研究, 2006(2): 198–200.
- [4] 玛衣拉·吐尔逊, 甫祺娜依·尤力瓦斯, 阿斯亚·托乎提. 农户过量施用化肥行为的影响因素分析——以新疆棉花种植户为例[J]. 棉花学报, 2016, 28(6): 619–627.
- [5] 徐瑞强, 徐海东, 董合林, 等. 液态有机肥与氮肥配施对棉花生理特性及产量的影响[J]. 中国农学通报, 2019, 35(13): 42–47.
- [6] 李思, 弓瑶, 詹保成, 等. 中国有机液肥的应用现状及发展趋势[J]. 中国农学通报, 2021, 37(21): 75–79.
- [7] 田时敏, 袁嘉玮, 王爱玲, 等. 氨基酸肥在果树生产上的应用研究进展[J]. 绿色科技, 2021, 23(21): 92–95, 98.
- [8] 李佳璠, 宋梦圆, 许盟盟, 等. 不同有机肥处理对番茄生长、产量及品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(12): 173–180.
- [9] 胡波. 化肥减量条件下配施生物有机肥及氨基酸水溶肥对甜瓜生长及土壤肥力的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2019.
- [10] 宋海燕, 尹友谊, 宋建中. 不同来源腐殖酸的化学组成与结构研究[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2009, 41(1): 61–66.
- [11] 李朋发, 江春玉, 李忠佩. 不同施肥处理对光合碳在花生-土壤系统中分配的影响[J]. 土壤, 2019, 51(5): 923–928.
- [12] 王宇函, 姜存仓, 吕波, 等. 不同浓度腐殖酸对油菜苗期生长及生理特性的影响[J]. 中国农学通报, 2018, 34(6): 19–24.
- [13] 刘霓红, 熊征, 蒋先平, 等. 国外堆肥茶发展现状及对中国设施农业的启示[J]. 现代农业装备, 2019, 40(3): 9–15.
- [14] Pane C, Palese A M, Spaccini R, et al. Enhancing sustainability of a processing tomato cultivation system by using bioactive compost teas[J]. Scientia Horticulturae, 2016, 202: 117–124.
- [15] Scheuerell S J, Mahaffee W F. Compost tea as a container medium drench for suppressing seedling damping-off caused by *Pythium ultimum*[J]. Phytopathology, 2004, 94(11): 1156–1163.
- [16] 张祥, 骆菲菲, 任兰天, 等. 小麦秸秆堆肥茶灌根对设施蔬菜苗期生长的影响[J]. 安徽农学通报, 2019, 25(9): 92–97.
- [17] 魏岚菁, 李培, 安瑞琼, 等. 堆肥浸提液及其堆肥茶对裸仁美洲南瓜白粉病的防治效果[J]. 中国植保导刊, 2019, 39(7): 50–53.
- [18] 徐大兵. 猪粪—秸秆堆肥提取液促进植物生长和抑制土传病原菌效果及其作用机制[D]. 南京: 南京农业大学, 2011.
- [19] 杜为研, 唐杉, 汪洪. 我国有机肥资源及产业发展现状[J]. 中国土壤与肥料, 2020(3): 210–219.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [21] 韩松竹, 高杰. 氮肥减施与氨基酸液体肥增施对露地膜下滴灌洋葱生长、产量和品质的影响[J]. 新疆农业科学, 2021, 58(5): 838–845.
- [22] 闫嘉欣, 常青, 杨治平, 等. 黄腐酸液体配方肥对大棚黄瓜产量及品质的影响[J]. 中国农学通报, 2019, 35(10): 47–51.
- [23] 李惠, 李建明, 丁明, 等. 堆肥浸提液对番茄、黄瓜种苗生长及养分吸收的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(2): 121–127.
- [24] 徐文修, 马秀珍, 马跃峰, 等. 沼肥对棉花生长发育及产量的影响[J]. 新疆农业科学, 2008, 45(4): 687–690.
- [25] Zandonadi D B, Canellas L P, Façanha A R. Indolacetic and humic acids induce lateral root development through a concerted plasmalemma and tonoplast H⁺ pumps activation[J]. Planta, 2007, 225(6): 1583–1595.
- [26] Vaccaro S, Ertani A, Nebbioso A, et al. Humic substances stimulate maize nitrogen assimilation and amino acid metabolism at physiological and molecular level[J]. Chemical and Biological Technologies in Agriculture, 2015, 2(1): 5.
- [27] Schiavon M, Pizzeghello D, Muscolo A, et al. High molecular size humic substances enhance phenylpropanoid metabolism in maize (*Zea mays* L.)[J]. Journal of Chemical Ecology, 2010, 36(6): 662–669.
- [28] 曹小闯, 吴良欢, 马庆旭, 等. 高等植物对氨基酸态氮的吸收与利用研究进展[J]. 应用生态学报, 2015, 26(3): 919–929.
- [29] Lipson D A, Monson R K. Plant-microbe competition for soil amino acids in the alpine tundra: Effects of freeze-thaw and dry-rewet events[J]. Oecologia, 1998, 113(3): 406–414.
- [30] 陈展宇, 陈天鹏, 李慧杰, 等. 植物吸收运转氨基酸的分子机制进展[J]. 分子植物育种, 2017, 15(12): 5166–5171.
- [31] 王孝娣, 刘凤之, 郑晓翠, 等. 氨基酸液体肥在设施桃上的应用效果[J]. 中国土壤与肥料, 2013(2): 85–88.
- [32] 范蓓蓓, 倪亮, 石伟勇. 浓缩沼液配方肥对小白菜生长及土壤特性的影响[J]. 土壤, 2015, 47(5): 868–873.
- [33] 徐海东, 董合林, 苏丽丽, 等. 液态有机肥对滴灌棉花光合特性及产量形成规律的影响[J]. 中国农学通报, 2017, 33(20): 71–77.
- [34] 罗彤, 李俊华, 华瑞, 等. 不同酸性有机肥浸提液对棉花生长及土壤性质的影响[J]. 新疆农业科学, 2017, 54(10): 1839–1846.
- [35] Luziatelli F, Ficca A G, Colla G, et al. Foliar application of vegetal-derived bioactive compounds stimulates the growth of beneficial bacteria and enhances microbiome biodiversity in lettuce[J]. Frontiers in Plant Science, 2019, 10: 60.
- [36] Samet M, Charfeddine M, Kamoun L, et al. Effect of compost tea containing phosphogypsum on potato plant growth and protection against *Fusarium solani* infection[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(19): 18921–18937.

- [37] Luo T, Min T, Ru S B, et al. Response of cotton root growth and rhizosphere soil bacterial communities to the application of acid compost tea in calcareous soil[J]. *Applied Soil Ecology*, 2022, 177: 104523.
- [38] 贾云, 雍艳霞, 曹云娥. 蚯蚓堆肥和蚯蚓液体肥对设施葡萄生长及土壤特性的影响[J]. *中国南方果树*, 2017, 46(5): 1–8.
- [39] Molineux C J, Gange A C, Newport D J. Using soil microbial inoculations to enhance substrate performance on extensive green roofs[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 580: 846–856.
- [40] 罗彤, 李俊华, 华瑞, 等. 滴施酸性有机肥浸提液对棉田土壤养分活化和利用效率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(5): 1255–1265.
- [41] 张亚丽, 沈其荣, 曹翠玉. 有机肥料对土壤有机磷组分及生物有效性的影响[J]. *南京农业大学学报*, 1998, 21(3): 59–63.
- [42] 姜佰文, 牛煜, 王春宏, 等. 应用液体有机肥减施氮肥对玉米氮素利用效率及产量的影响[J]. *东北农业大学学报*, 2020, 51(12): 24–31, 40.