

中药渣有机肥耦合高效水溶肥改良 不同肥力设施番茄土壤效果

王光飞¹, 廖开志², 马 艳^{1*}, 郭德杰¹, 徐传银², 梁永红³, 颜士敏³

(1. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 江苏 南京 210014; 2. 东海县农业技术推广中心, 江苏 连云港 222300; 3. 江苏省耕地质量与农业环境保护站, 江苏 南京 210036)

摘 要: 采用常规施肥 (CK)、中药渣有机肥 (OF) 和中药渣有机肥耦合高效水溶肥减肥 30% (HOF) 3 种处理在 2 种肥力日光温室进行田间试验, 以探讨中药渣有机肥耦合高效水溶肥对设施番茄土壤性状和产量的影响。结果表明, 与 CK 处理相比, HOF 处理可提升 pH 0.13 ~ 0.15, 并显著降低电导率 328.5 ~ 371.3 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、硝态氮 60.7 ~ 305.0 mg/kg、有效磷 42.6 ~ 57.1 mg/kg 和速效钾 179.4 ~ 274.1 mg/kg。OF 处理也可显著改善土壤化学性状, 但效果明显弱于 HOF。土壤生物学方面, HOF 处理较 CK 显著增加了土壤细菌数量、微生物活性和多样性, 并显著削减 28.5% ~ 36.0% 的真菌数量。OF 处理改善效果弱于 HOF 处理, 且对土壤脲酶、蔗糖酶和磷酸酶活性有抑制作用。另外, HOF 处理改善高肥力土壤化学和生物性状的作用强于中肥力土壤的改善作用。与 CK 处理相比, HOF 处理在中肥力和高肥力日光温室的增产率分别为 9.0% 和 13.1%, 而 OF 处理分别为 4.6% 和 5.9%。相关性和主成分分析显示, HOF 处理通过降低土壤盐分与养分, 改善土壤生物学性状进而达到增产, 而 HOF 处理平衡性减施速效养分投入极利于改善土壤性状, 且在高肥力土壤中尤为明显。因此, 中药渣有机肥耦合高效水溶肥, 可在减施 30% 化肥养分条件下有效改善富营养设施的土壤综合质量。

关键词: 中药渣有机肥; 高效水溶肥; 土壤肥力; 土壤性状; 产量

受高收益和市场驱动, 设施蔬菜面积逐年增加, 设施蔬菜产量已占蔬菜总产量的 30.5%。但为片面追求产量, 多省份设施蔬菜主产区肥料施用量^[1-4]。设施栽培处于半封闭或封闭状态, 长期大肥大水使得土壤富营养化和次生盐渍化严重, 进而引起土壤酸化和生物性状恶化, 最终导致蔬菜产量和品质降低^[5-6]。

苏北设施蔬菜面积占江苏 65% 以上, 且以产值高的茄果类蔬菜为主。王秋君等^[2]和 Min 等^[7]调研发现, 苏北设施茄果类蔬菜采收期长、产量大, 主要通过盲目、过量施用畜禽类农家肥和化肥以获得高产。种植年限越长的土壤养分过剩现象越严重, 造成土壤性状恶化和质量下降^[4]。研究也表明有机肥和化肥的过量施用也造成肥料利用率低、经

济效应下降, 破坏农田生态环境^[8-10]。

合理施肥以平衡土壤养分是解决设施土壤质量下降的重要途径^[11]。王丽英等^[11]和刘聪等^[12]研究显示对于富营养设施土壤, 结合土壤养分状况平衡施入氮磷钾养分可明显提高养分利用率和蔬菜产量。茄果类蔬菜产量需求追肥量大, 所以选取符合作物养分需求规律的高效水溶肥极为重要。苏北中医药企业多, 中药渣产量大, 将其资源化利用生产出的中药渣有机肥具有有机质高、重金属含量低且不含病原菌的优点^[13-14]。另外, 中药渣有机肥养分具有缓效性和长效性^[14], 适用于养分充足的设施土壤。中药渣有机肥结合高效水溶肥平衡施入养分可在满足作物养分需求的基础上改善土壤性状, 并使作物实现稳产或增产。

本研究在苏北日光温室番茄主产区以农户常规施肥为对照, 研究中药渣有机肥耦合高效水溶肥在减施化肥养分下对中肥力和高肥力土壤性状养分、盐分和生物学性状的影响, 并与养分投入和产量建立联系, 以期设施茄果类蔬菜减肥增效提供技术指导, 为设施土壤合理施肥提供科学依据。

收稿日期: 2020-05-29; 录用日期: 2020-07-07

基金项目: 江苏省农业自主创新资金 [CX(17)2025]; 江苏省重点研发计划 (BE2019394)。

作者简介: 王光飞 (1988-), 男, 江西婺源人, 助理研究员, 博士, 研究方向为土壤微生物。E-mail: wy_wgf@163.com。

通讯作者: 马艳, E-mail: myjaas@sina.com。

1 材料与方法

1.1 试验地点

本试验在江苏省连云港市东海县桃林镇设施蔬菜基地 (34° 32' N, 118° 29' E) 开展。该区域为暖温带湿润季风气候, 年平均气温 14.3℃, 年均降水量 913 mm, 土壤为砂姜黑土。选取中等肥力日光温室 (一号棚) 和高等肥力日光温室 (二号棚), 土壤性状见表 1。

表 1 供试日光温室土壤基本性质

棚	种植年限	pH	电导率 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	有机质 (g/kg)	铵态氮 (mg/kg)	硝态氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)
一号棚	4	8.30	595.5	24.9	11.6	86.3	148.8	524.2
二号棚	10	7.47	867.6	38.4	54.5	310.3	543.9	1545.7

表 2 供试有机肥基本性质

有机肥	pH	含水率 (%)	电导率 (mS/cm)	有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	全磷 (g/kg)	全钾 (g/kg)	碱解氮 (g/kg)	有效磷 (g/kg)	速效钾 (g/kg)
鸡粪稻壳	7.55	28.6	6.71	664.5	23.47	9.19	20.35	3.15	1.23	17.42
中药渣有机肥	7.21	30.9	4.75	461.7	24.32	8.99	18.94	1.32	0.99	12.32

黄博系列水溶肥为中国农业科学院农业资源与农业区划研究所研制的设施果菜专用水溶肥。

1.3 试验设计

两个日光温室内均设置 3 个处理: 1) 常规对照 (CK), 基肥施用鸡粪稻壳, 基肥化肥与水溶肥同农户常规; 2) 中药渣有机肥 (OF), 基肥施用中药渣有机肥, 基肥化肥与水溶肥同农户常规; 3) 中药渣有机肥耦合高效水溶肥 (HOF), 基肥施用中药渣有机肥, 基肥化肥减用 30%, 水溶肥改用黄博系列肥料且养分减用 30%。各处理具体肥料投入见表 3, 各处理速效养分投入见表 4。每个处理 3 个重复小区, 小区面积为 100 m^2 , 随机排列。2018 年 8 月 26 日肥料撒施后翻地, 9 月 5 日移栽番茄苗, 12 月至下年 2 月为番茄采收期。11 月为追肥第 1 阶段, 追肥 2 次; 12 月为追肥第 2 阶段, 追肥 3 次; 下年 1 月为追肥第 3 阶段, 追肥 3 次。收获结束后各小区按照 S 型多点法采集 0 ~ 20 cm 耕层土样。

1.4 测定项目与方法

土壤常规化学指标分析: 土壤 pH 采用土水比 1:5 浸提, 用 pH 计测定; 电导率采用土水比 1:5

1.2 供试材料

鸡粪稻壳购于当地养鸡场, 为鲜鸡粪与稻壳混合晾干后产物。中药渣有机肥购于江苏省好徕斯肥业有限公司, 主要堆肥原料为金银花、青蒿、元胡、平贝、茯苓、桂枝等。有机肥化学性状见表 2。供试番茄品种为凯胜, 供试基肥化肥为 15-15-15 复合肥、硫酸钾、磷酸二铵。供试水溶肥为史丹利 20-20-20、顺欣 15-15-30、施可丰 15-7-38、黄博 1 号 22-12-16、黄博 2 号 19-6-25 及黄博 3 号 16-6-28。

浸提, 用电导仪测定; 有机质含量采用重铬酸钾氧化法测定; 硝态氮含量采用紫外分光光度法测定; 有效磷含量采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定; 速效钾含量采用乙酸铵浸提-火焰光度法测定^[15]。

表 3 各处理肥料投入 (kg/hm^2)

施肥时期	肥料种类	CK	OF	HOF
基肥化肥	金正大 15-15-15	675	675	472.5
	硫酸钾	225	225	157.5
	磷酸二铵	300	300	210
基肥有机肥	鸡粪稻壳	45000	0	0
	中药渣有机肥	0	45000	45000
追肥阶段 1	史丹利 20-20-20	300	300	0
	黄博 22-12-16	0	0	252
追肥阶段 2	顺欣 15-15-30	540	540	0
	黄博 19-6-25	0	0	453.6
追肥阶段 3	施可丰 15-7-38	540	540	0
	黄博 16-6-28	0	0	453.6

表4 各处理速效养分投入 (kg/hm²)

处理	BOFA-NPK	BCFA-NPK	BA-NPK	TA-NPK	A-NPK
CK	700.6	612.8	1313.3	828.0	2141.3
OF	470.2	612.8	1083.0	828.0	1911.0
HOF	470.2	428.9	899.1	579.6	1478.7

注: BOFA-NPK: 有机肥速效养分; BCFA-NPK: 基肥化肥速效养分; BA-NPK: 基肥速效养分; TA-NPK: 追肥速效养分; A-NPK: 总速效养分。下同。

土壤酶活测定: 脲酶采用苯酚-次氯酸钠比色法测定, 以 1 g 土样酶促反应 24 h 后催化尿素生成的 NH₃-N 的毫克数表示; 蔗糖酶采用 3, 5-二硝基水杨酸比色法, 以 1 g 土样酶促反应 24 h 后催化蔗糖生成的葡萄糖的毫克数表示; 碱性磷酸酶采用磷酸苯二钠比色法, 以 1 g 土样酶促反应 24 h 后催化磷酸苯二钠生成的酚的毫克数表示^[16]。

土壤细菌和真菌丰度测定: 采用 MP 试剂盒提取土壤 DNA 后, 在 ABI 7500 仪器上采用 TaKaRa 生产的 SYBR Premix Ex Taq 试剂盒进行实时荧光定量 PCR, 真菌定量所用引物为 NS1 (5'-GTAGTCATATGCTTGCTC') 和 Fung (5'-ATTCCCCGTTACCCGTTG'), 细菌定量所用引物为 338f (5'-ACTCTACGGGAGGCAGCAG-3') 和 534r (5'-ATTACCGCGGCTGCTGG-3')^[17]。

土壤微生物碳源利用测定: 用 0.85% NaCl 无菌溶液浸提土壤并稀释获得微生物悬浮液后, 接种于 ECO 板中, 每孔 150 μL, 每样 1 板, 每板 3 次重复。置于 25℃ 下培养, 每隔 24 h 在 Biolog 仪器 590 nm 波长下读数^[18]。

1.5 数据处理

采用孔平均颜色变化率法测定微生物利用单一碳源的能力。 C_i 为各反应孔在 590 nm 的光密度值; R 为 ECO 板对照孔 A1 的光密度值; C_i-R 小于零的孔计算中记为零; $P_i = (C_i - R) / \sum (C_i - R)$, 表示有碳源的孔与对照孔 A1 的光密度值之差与整板总差的比值; S 为颜色发生变化的孔数 ($AWCD > 0.2$ 代表该孔碳源被利用)。孔平均颜色变化率 ($AWCD$) = $\sum (C_i - R) / 31$; Shannon 物种多样性指数 (H) = $-\sum P_i \times \ln P_i$; Simpson 优势度指数 (D) = $1 / \sum P_i^2$; Shannon 群落均匀度指数 (E) = $H / \ln S$ ^[18]。

测定数据经 Excel 2016 整理后, 用 SPSS 19.0 进行统计分析。文中产量、土壤理化指标和土壤

生物学指标均为 3 次重复的平均值。应用 Canoco 4.5 进行主成分分析 (PCA), 其结果用排序图表示。

2 结果与分析

2.1 不同处理对番茄产量的影响

在不同土壤肥力下, OF 和 HOF 处理分别较 CK 增产 4.6% ~ 5.9% 和 9.0% ~ 13.1%, 但各处理间产量均未达显著差异水平 (图 1)。可见, 中药渣有机肥替代鸡粪稻壳有助于提高番茄产量, 而中药渣有机肥耦合高效水溶肥在减施 30% 化肥养分的条件下增产效果更佳。

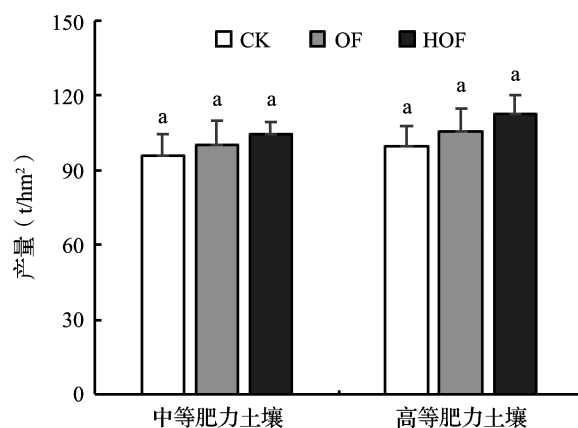


图1 不同肥力土壤下各处理产量

注: 柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

2.2 不同处理对土壤化学性状的影响

2.2.1 对土壤化学性状的影响

与种植前一致, 种植后高肥力土壤总体表现为 pH 显著低于中肥力土壤, 而电导率、有机质、硝态氮、有效磷和速效钾含量显著高于中肥力土壤 (表 5)。两种肥力土壤的 OF 和 HOF 处理均较 CK 处理增加土壤 pH, 而 HOF 效果强于 OF, 且在高肥力土壤中 pH 提升更显著。OF 和 HOF 处理在中肥力土壤中电导率较 CK 分别降低了 189.0 和 328.5 μS/cm, 高肥力土壤中分别降低了 268.7 和 371.3 μS/cm。不同处理对土壤有机质含量没有显著影响。中肥力土壤的 OF 和 HOF 处理较 CK 分别减少 52.0 和 60.7 mg/kg 硝态氮、20.9 和 42.6 mg/kg 有效磷及 112.6 和 179.4 mg/kg 速效钾。高肥力土壤的 OF 和 HOF 处理较 CK 分别减少 244.3 和 305.0 mg/kg 硝态氮、18.2 和 57.1 mg/kg 有效磷及 128.2 和 274.1 mg/kg 速效钾。可见, 中药渣有机肥和中

药渣有机肥耦合高效水溶肥可缓解土壤酸化、降低土壤盐分并削减速效养分,且后者更为显著。另

外,两者对高肥力土壤的改善作用均大于中肥力土壤。

表 5 不同处理土壤化学性状

土壤肥力水平	处理	pH	电导率 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	有机质 (g/kg)	硝态氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)
中等肥力土壤	CK	$8.10 \pm 0.05\text{a}$	$875.5 \pm 46.0\text{a}$	$25.7 \pm 0.2\text{a}$	$107.2 \pm 13.5\text{a}$	$232.5 \pm 10.0\text{a}$	$846.7 \pm 35.9\text{a}$
	OF	$8.21 \pm 0.08\text{a}$	$686.5 \pm 33.4\text{b}$	$25.8 \pm 1.6\text{a}$	$55.2 \pm 9.4\text{b}$	$211.6 \pm 25.1\text{ab}$	$734.1 \pm 21.8\text{b}$
	HOF	$8.23 \pm 0.06\text{a}$	$547.0 \pm 28.5\text{c}$	$26.9 \pm 1.7\text{a}$	$46.5 \pm 8.2\text{b}$	$189.9 \pm 19.6\text{b}$	$667.3 \pm 25.9\text{c}$
高等肥力土壤	CK	$7.14 \pm 0.11\text{a}$	$1134.8 \pm 41.4\text{a}$	$35.1 \pm 4.1\text{a}$	$616.7 \pm 52.7\text{a}$	$316.0 \pm 23.5\text{a}$	$1228.4 \pm 75.9\text{a}$
	OF	$7.18 \pm 0.12\text{ab}$	$866.1 \pm 116.2\text{b}$	$34.0 \pm 2.5\text{a}$	$472.4 \pm 86.5\text{b}$	$297.8 \pm 28.5\text{ab}$	$1100.2 \pm 26.6\text{b}$
	HOF	$7.29 \pm 0.02\text{b}$	$763.5 \pm 94.3\text{b}$	$33.2 \pm 4.7\text{a}$	$311.7 \pm 73.7\text{c}$	$258.9 \pm 27.0\text{b}$	$954.3 \pm 39.5\text{c}$

注:数字后不同小写字母表示处理间有显著差异($P<0.05$)。下同。

2.2.2 相关性分析

相关性分析显示,速效养分投入均与土壤 pH 呈负相关,其中基肥速效养分与土壤 pH 负相关系数最高(表 6)。基肥速效养分和总速效养分与电导率、硝态氮、有效磷和速效钾呈极显著或显著正相关,且基肥速效养分相关性系数均高于总速效养分。追肥速效养分也与电导率和 3 种土壤速效养分呈正相关或显著正相关,但相关性弱于基肥速效养

分和总速效养分。与中肥力土壤相比,高肥力土壤速效养分投入与土壤速效养分含量相关性更强。对于两种肥力土壤,电导率和土壤速效养分均与产量呈负相关。因此,速效养分投入显著增加土壤速效养分,以基肥速效养分增加作用显著。速效养分投入大引起土壤速效养分含量过高,盐分增加和酸碱度下降,不利于高产。这种效应在高肥力土壤中更为明显。

表 6 产量及养分投入与土壤化学性状相关性分析

土壤肥力水平	投入与输出	pH	EC	有机质	硝态氮	有效磷	速效钾
中等肥力土壤	产量	0.163	-0.593	0.405	-0.367	-0.229	-0.346
	BA-NPK	-0.613*	0.830**	-0.192	0.833**	0.738*	0.922**
	TA-NPK	-0.393	0.674*	-0.259	0.581	0.646*	0.748*
	A-NPK	-0.520	0.779*	-0.242	0.726*	0.709*	0.856**
高等肥力土壤	产量	0.593	-0.841**	-0.139	-0.497	-0.654*	-0.777*
	BA-NPK	-0.508	0.794*	0.230	0.821**	0.738*	0.933**
	TA-NPK	-0.424	0.607	0.194	0.596	0.704*	0.827**
	A-NPK	-0.487	0.719*	0.217	0.728*	0.737*	0.901**

注:*,** 分别表示显著($P<0.05$)和极显著($P<0.01$)相关。下同。

2.3 不同处理对土壤生物学性状的影响

2.3.1 对土壤微生物数量的影响

在中等土壤肥力中,OF 和 HOF 处理对土壤细菌数量没有显著影响,但可在高肥力土壤上增加细菌数量,且 HOF 效果强于 OF(图 2)。高肥力土壤真菌数量总体高于中肥力土壤。与 CK 相比,OF 和 HOF 处理可削减土壤真菌数量,其中 HOF 为显著削减,两处理在中等和高等肥力土壤中较 CK 分别削减了 11.7% 和 28.5%、8.9%

和 36.0%。可见,中药渣有机肥和中药渣有机肥耦合高效水溶肥均可增加土壤细菌数量和降低土壤真菌数量,其中在高肥力土壤中效果更显著。

2.3.2 对土壤酶活性的影响

除 HOF 处理较 CK 可显著降低蔗糖酶活性,OF 和 HOF 处理对中肥力土壤酶活性没有显著影响。对于高肥力土壤,OF 较 CK 降低了脲酶和磷酸酶活性,HOF 与 CK 间 3 种酶活性均没有显著影

响。因此, 中药渣有机肥处理对中肥力土壤酶活性影响较小, 而对高肥力土壤影响较大。另外, 中药

渣有机肥处理降低土壤酶活性作用显著, 而中药渣有机肥耦合高效水溶肥作用较弱。

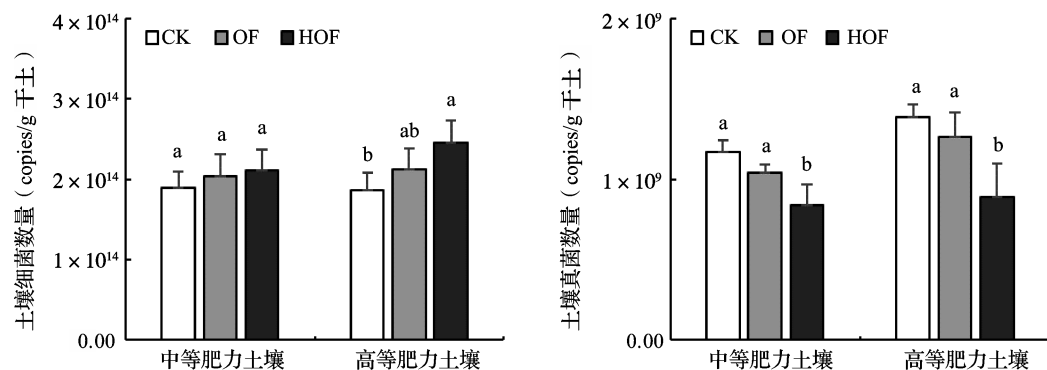


图2 不同处理土壤细菌和真菌数量

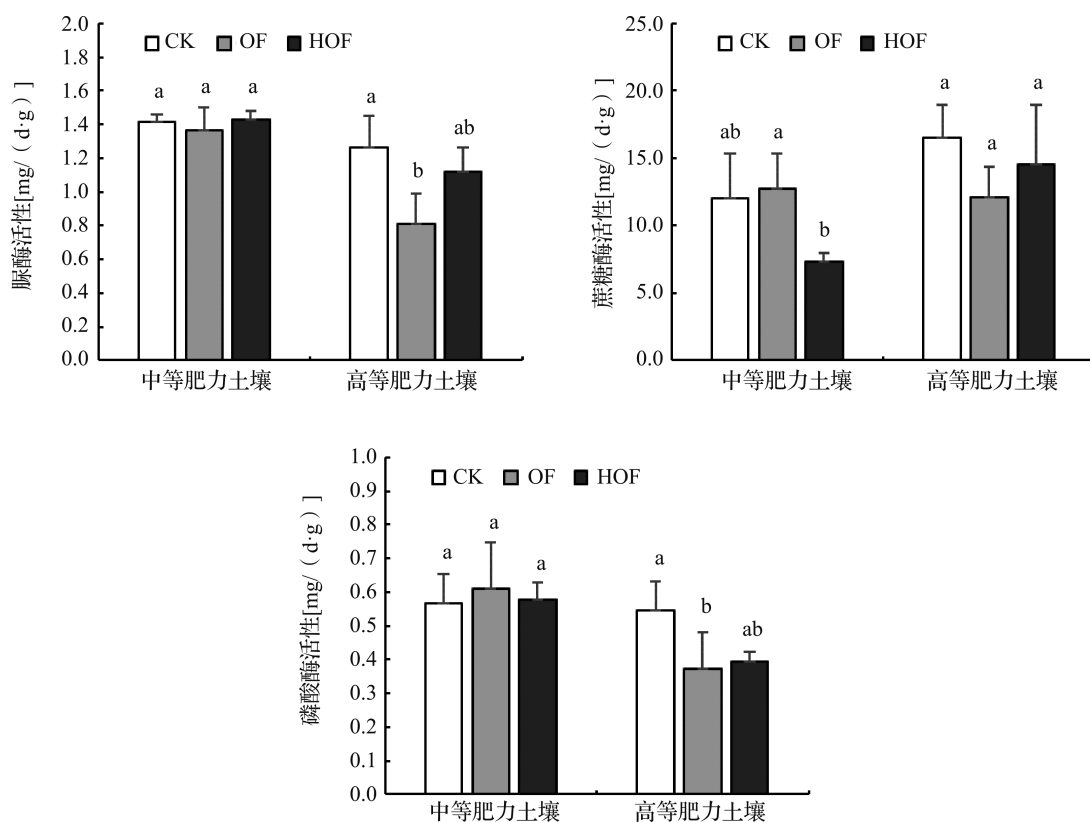


图3 不同处理土壤酶活性

2.3.3 对土壤微生物碳源利用能力及多样性的影响

平均颜色变化率 (AWCD) 表征微生物群落碳源利用率, 反映了土壤微生物活性。在不同肥力土壤中各处理整体趋势表现均为 HOF > OF > CK (图4), 说明了 OF 和 HOF 处理均促进了土壤微生物对碳源的利用能力。在高等肥力土壤中, OF 和 HOF 的 AWCD 值均显著高于 CK, 而在中等肥力土

壤中差异不显著。OF 和 HOF 处理均可较 CK 增加中等和高等肥力土壤微生物多样性指数和高等肥力土壤微生物均匀度, OF 和 BOF 处理对两种肥力土壤微生物优势度指数没有显著影响。因此, 中药渣有机肥和中药渣有机肥耦合高效水溶肥有利于增加土壤微生物活性和多样性及群落均匀性, 且在高等肥力土壤中效果更佳。此外, 中药渣有机肥耦合高效水溶肥改善效果优于中药渣有机肥处理。

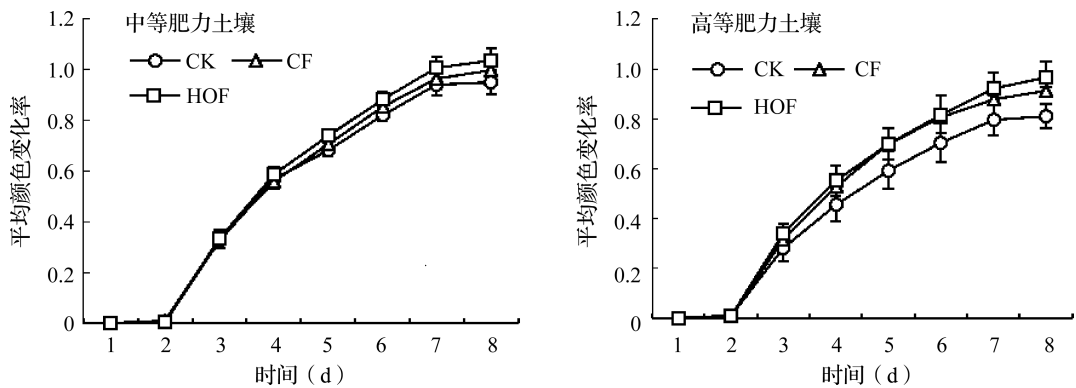


图4 中等和高等肥力土壤下不同处理土壤平均颜色变化率

表7 不同处理土壤微生物功能多样性指数 (96 h)

土壤肥力水平	指数	CK	OF	HOF
中等肥力土壤	H	3.111 ± 0.020b	3.160 ± 0.041ab	3.182 ± 0.013a
	E	0.910 ± 0.019a	0.927 ± 0.007a	0.934 ± 0.014a
	D	0.051 ± 0.001a	0.049 ± 0.003a	0.048 ± 0.002a
高等肥力土壤	H	3.043 ± 0.050b	3.149 ± 0.031ab	3.175 ± 0.079a
	E	0.899 ± 0.009b	0.927 ± 0.005a	0.932 ± 0.015a
	D	0.056 ± 0.006a	0.048 ± 0.003a	0.048 ± 0.004a

注: H: Shannon 物种多样性指数; E: Shannon 群落均匀度指数; D: Simpson 优势度指数。

2.3.4 相关性分析

基肥速效养分、追肥速效养分和总速效养分投入与土壤微生物数量、多样性指数和 AWCD 值密切相关, 速效养分投入与土壤真菌数量呈极显著正相关, 而与土壤细菌数量、多样性指数和 AWCD 值呈负相关。其中, 基肥速效养分与多样性指数和 AWCD 值呈极显著或显著负相关, 总速效养分投入与其呈显著负相关或负相关, 而追肥速效养分与其呈一定负相关。与中肥力土壤相比, 高肥力土壤速效养分投入与细菌数量、多样性指数和 AWCD 值的负相关性更强。可见, 速效养分投入过大不利于土壤细菌数量、真菌数量、微生物多样性和微生物活性增加, 在高等肥力土壤中更为显著。

表8 产量及养分投入与土壤生物学性状相关性分析

土壤肥力水平	投入与输出	细菌数量	真菌数量	脲酶活性	蔗糖酶活性	磷酸酶活性	多样性指数	AWCD
中等肥力土壤	产量	0.265	-0.639	0.575	-0.577	-0.433	0.418	0.396
	BA-NPK	-0.372	0.884**	-0.129	0.549	-0.046	-0.699*	-0.686*
	TA-NPK	-0.290	0.808**	-0.253	0.651	0.046	-0.508	-0.573
	A-NPK	-0.339	0.865**	-0.193	0.613	-0.002	-0.620	-0.645
高等肥力土壤	产量	0.509	-0.418	-0.083	-0.158	-0.112	0.673*	0.682*
	BA-NPK	-0.726*	0.848**	0.167	0.198	0.559	-0.752*	-0.821**
	TA-NPK	-0.657	0.836**	-0.161	-0.028	0.308	-0.585	-0.659
	A-NPK	-0.704*	0.860**	0.009	0.091	0.448	-0.686*	-0.759*

2.4 土壤主要性状与产量主成分分析

在中肥力土壤中, 番茄产量受细菌数量、多样性指数、AWCD、脲酶活性正向影响, 而受真菌数量、蔗糖酶活性、总速效养分投入、电导率、有效磷、速效钾负向影响 (图 5)。对于高肥力土壤, 番茄产量明显受多样性指数、AWCD、细菌数量、

pH 正向影响, 而明显受电导率、磷酸酶活性、总速效养分投入、有效磷、速效钾、真菌数量负向影响。两种肥力土壤中, 总速效养分投入均对土壤真菌数量、电导率、土壤速效养分产生正向影响, 对细菌数量、多样性指数、AWCD 和 pH 产生负向影响。

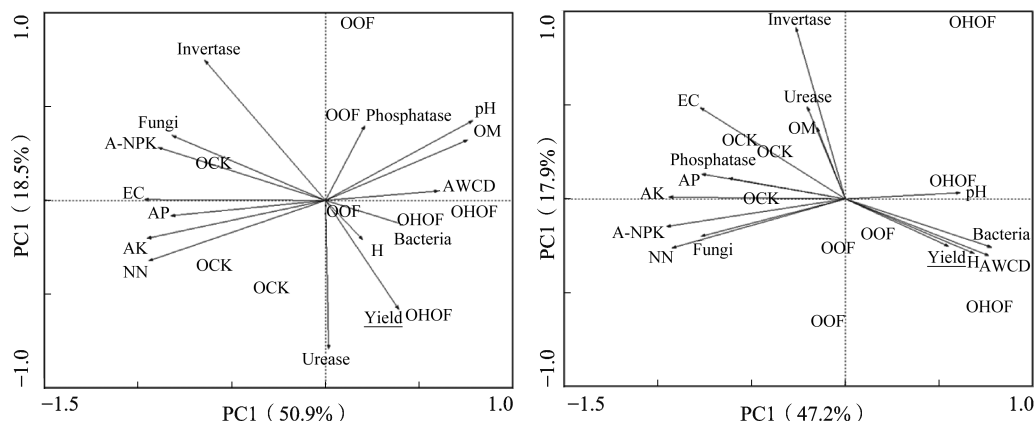


图5 土壤性状与产量 PCA 双序图

注: A-NPK: 总投入速效养分; OM: 有机质; EC: 电导率; NN: 硝态氮; AP: 有效磷; AK: 速效钾; Phosphatase: 磷酸酶活性; Urease: 脲酶活性; Invertase: 蔗糖酶活性; Fungi: 真菌数量; Bacteria: 细菌数量; AWCD: 孔平均颜色变化率; H: Shannon 多样性指数; Yield: 产量。

3 讨论

3.1 改良施肥处理的施用效果

富营养化土壤磷酸根离子、氯离子和硫酸根离子等强酸性离子浓度过高引起土壤 pH 下降^[19-20], 因此两种施肥措施提高土壤 pH 可能利于有效削减磷酸根离子等强酸性离子浓度。王学霞等^[20]的研究显示土壤盐含量过高显著抑制微生物繁衍能力, 导致土壤微生物量和活性下降。改良施肥处理土壤盐分显著下降可能是土壤微生物性状改善的主要原因。在土壤养分含量充足的情况下, 土壤微生物数量和活性更能敏感反映土壤肥力质量^[8, 21-22]。因此, 改良施肥措施改善了土壤生物肥力质量。相关性和主成分分析显示, 速效养分总投入、土壤盐分、养分性状和真菌数量对产量产生负影响, 而细菌数量、微生物活性和多样性对产量产生显著正向影响。因此, 改良施肥措施主要通过改善土壤生物学性状, 降低盐分和速效养分进而增加产量。

鸡粪稻壳与中药渣有机肥总养分一致, 但鸡粪稻壳速效养分含量显著高于中药渣有机肥, 过多施用可引起土壤中速效养分过量^[23-24]。对于养分充足的土壤, 鸡粪作为有机基肥使得土壤起始速效养分更足, 不利于作物缓苗和土壤养分平衡。因此适合以中药渣有机肥作为有机基肥, 在保证土壤有机质平衡的条件下其后续有机矿化养分符合作物需肥滞后性。过量有机物料养分投入不能进一步增产时存在面源污染风险^[25], 因此本试验产区适合应用中药渣有机肥替代鸡粪稻壳。土壤酶是生态系统的重要组成部分^[21-22], 本试验中药渣有机肥可抑制

高肥力土壤酶活性, 因此连年施用中药渣有机肥可能对土壤生态有一定的负面作用。

常规水溶肥为片面追求果产量, 钾养分含量过高, 磷含量略高和氮的含量略低。在本试验中, 所选高效水溶肥根据茄果类蔬菜不同需肥阶段研制氮磷钾养分比例, 与常规水溶肥相比适当增加氮的比例, 减少磷钾的比例。中药渣有机肥耦合高效水溶肥减施 30% 化肥养分可在满足作物需肥量的同时极大降低土壤养分和盐分, 且改善土壤生物性状效果和增产作用更佳。因此农户常规养分用量偏高, 需适当减施化肥养分^[5], 可根据作物养分需求规律施用适宜量和比例的高效水溶肥^[11]。多项研究表明, 实行平衡施肥可减少不必要的化肥投入, 极大改善土壤性状并缓解养分流失^[6, 10, 26], 同时提高养分利用率^[25, 27]。本试验中药渣有机肥耦合高效水溶肥可降低并平衡土壤养分, 即显著降低土壤中尤为过足的钾, 其次是氮, 最后是磷。与鸡粪稻壳和中药渣有机肥相比, 中药渣有机肥耦合高效水溶肥减施养分又增产, 极大提高了土壤养分利用率。另外, 耦合高效水溶肥可缓解中药渣有机肥对土壤酶活性的抑制作用, 是适合田间应用的施肥组合措施。

3.2 改良施肥处理在不同肥力土壤下的施用效果差异

与中肥力土壤相比, 高肥力土壤养分过剩、盐渍化和真菌化更为严重。另外, 土壤酸碱度、细菌数量及微生物活性和多样性均低于中肥力土壤。两种改良施肥措施对其土壤化学和生物学性状的改善效果较中肥力土壤显著。主成分分析显示高肥力土

壤性状的改善作用对产量的正向影响更为显著。与此对应,高肥力土壤下改良施肥措施增产效果较中肥力土壤下更为显著。另外,高肥力设施土壤养分过度积累易造成养分淋溶和面源污染^[28-29],通过改良施肥在满足作物需肥情况下减施养分投入可减少养分流失。因此,高肥力土壤应用这两种改良施肥措施不仅有利于增产同时有利于提升土壤质量和保护农业环境。与中肥力土壤相比,高肥力土壤应用改良施肥措施更具有必要性。

3.3 速效养分投入对土壤性状的影响

本试验土壤本底养分含量高,因此速效养分投入可显著加大土壤速效养分含量,并对生物学性状和产量有负作用。基肥速效养分投入量产生的负作用最大,追肥速效养分投入负作用较小。因此,对于速效养分过高的土壤,应改变现有习惯用肥,即降低基肥速效养分输入,或者转移部分基肥速效养分至追肥阶段,这符合作物吸收养分规律,同时有利于提高养分利用率和改善土壤综合性状^[8, 30]。

4 结论

本田间试验条件下,中药渣有机肥耦合高效水溶肥在减施30%化肥养分下可显著减少中高肥力土壤盐分、削减土壤过足养分,增加土壤细菌数量、微生物活性和多样性并抑制土壤真菌化,进而提高了番茄产量。而中药渣有机肥处理改善土壤和增产效果次之。这两种改良施肥措施在高肥力土壤中应用效果更佳。另外,基肥速效养分投入过多易引起土壤养分过度积累和土壤生物性状恶化,应适当减施基肥速效养分。

参考文献:

[1] 张怀志,唐继伟,袁硕,等. 津冀设施蔬菜施肥调查分析[J]. 中国土壤与肥料, 2018 (2): 60-66.

[2] 王秋君,马艳,郭德杰,等. 设施蔬菜土壤养分状况分析及综合评价[J]. 江苏农业学报, 2019 (3): 624-630.

[3] 胡美美,于世欣,付乃鑫,等. 日光温室番茄产量与土壤养分、植株养分的关系[J]. 土壤与作物, 2018 (1): 13-21.

[4] 刘兆辉,江丽华,张文君,等. 山东省设施蔬菜施肥量演变及土壤养分变化规律[J]. 土壤学报, 2008, 45 (2): 296-303.

[5] 宋雅欣,马茂亭,安志装,等. 有机无机肥料配施对大棚辣椒与番茄产量及品质的影响[J]. 华北农学报, 2017 (2): 211-216.

[6] 赵伟,杨圆圆,刘梦龙,等. 减量施肥对越夏番茄产量、品质及土壤养分的影响[J]. 西北农业学报, 2018, 27 (9):

105-112.

[7] Min J, Zhao X, Shi W M. Nitrogen balance and loss in a greenhouse vegetable system in Southeastern China [J]. *Pedosphere*, 2011, 21 (4): 464-472.

[8] 宁川川,王建武,蔡昆争. 有机肥对土壤肥力和土壤环境质量的影响研究进展[J]. 生态环境学报, 2016, 25 (1): 175-181.

[9] 沈灵凤,白玲玉,曾希柏,等. 施肥对设施菜地土壤硝态氮累积及pH的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31 (7): 1350-1356.

[10] 郝小雨,高伟,王玉军,等. 有机无机肥料配合施用对设施番茄产量、品质及土壤硝态氮淋失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31 (3): 538-547.

[11] 王丽英,张彦才,翟彩霞,等. 平衡施肥对连作日光温室黄瓜产量、品质及土壤理化性状的影响[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16 (6): 1375-1383.

[12] 刘聪,韩秉进,吴凤芝,等. 设施富营养化土壤平衡施肥技术研究[J]. 北方园艺, 2016 (19): 184-188.

[13] 杨绪勤,袁博,蒋继宏. 中药渣资源综合再利用研究进展[J]. 江苏师范大学学报(自然科学版), 2015, 33 (3): 40-44.

[14] 毕京芳,黄钧,关梦龙,等. 微生物菌剂发酵中草药渣生产有机肥[J]. 应用与环境生物学报, 2014, 20 (5): 840-845.

[15] 张甘霖,龚子同. 土壤调查实验室分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012.

[16] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.

[17] Wang Q, Ma Y, Wang G, et al. Integration of biofumigation with antagonistic microorganism can control *Phytophthora* blight of pepper plants by regulating soil bacterial community structure [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2014, 61: 58-67.

[18] 张红,吕家珑,曹莹菲,等. 不同植物秸秆腐解特性与土壤微生物功能多样性研究[J]. 土壤学报, 2014, 51 (4): 743-752.

[19] 范庆锋,张玉龙,陈重. 保护地蔬菜栽培对土壤盐分积累及pH值的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23 (1): 103-106.

[20] 王学霞,陈延华,王甲辰,等. 设施菜地种植年限对土壤理化性质和生物学特征的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24 (6): 1619-1629.

[21] 唐玉姝,魏朝富,颜廷梅,等. 土壤质量生物学指标研究进展[J]. 土壤, 2007, 39 (2): 157-163.

[22] Schloter M, Dill O, Munch J C. Indicators for evaluating soil quality [J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2003, 98 (1-3): 255-262.

[23] 宇万太,姜子绍,马强,等. 施用有机肥对土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15 (5): 1057-1064.

[24] 王婷婷,王俊,赵牧秋,等. 有机肥对设施菜地土壤磷素状况的影响[J]. 土壤通报, 2011, 42 (1): 138-141.

- [25] 李吉进, 宋东涛, 聂俊华, 等. 不同有机肥料对番茄生长及品质的影响 [J]. 中国农学通报, 2008, 24 (10): 310-315.
- [26] 何传龙, 马友华, 于红梅, 等. 减量施肥对保护地土壤养分淋失及番茄产量的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2010 (4): 846-851.
- [27] Redding M R, Lewis R, Kearton T, et al. Manure and sorbent fertilisers increase on-going nutrient availability relative to conventional fertilisers [J]. Science of the Total Environment, 2016, 569: 927-936.
- [28] 李书田, 刘荣乐, 陕红. 我国主要畜禽粪便养分含量及变化分析 [J]. 农业环境科学学报, 2009, 28 (1): 179-184.
- [29] 赵亚杰, 赵牧秋, 鲁彩艳, 等. 施肥对设施菜地土壤磷累积及淋失潜能的影响 [J]. 应用生态学报, 2015, 26 (2): 466-472.
- [30] 温延臣, 张曰东, 袁亮, 等. 商品有机肥替代化肥对作物产量和土壤肥力的影响 [J]. 中国农业科学, 2018, 51 (11): 2136-2142.

Improvement effects of coupling of Chinese medicine residue compost and high-efficient water-soluble fertilizer on tomato greenhouse soils with different fertilities

WANG Guang-fei¹, LIAO Kai-zhi², MA Yan^{*}, GUO De-jie¹, XU Chuan-yin², LIANG Yong-hong³, YAN Shi-min³
(1. Institute of Agricultural Sciences and Environments, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing Jiangsu 210014; 2. Donghai Agro-Technology Extension Center, Lianyungang Jiangsu 222300; 3. Jiangsu Province Station of Farmland Quality and Agro-Environmental Protection, Nanjing Jiangsu 210036)

Abstract: A field experiment was carried out in solar greenhouses with 2 kinds of different soil fertilities to study the effects of coupling of Chinese medicine residue compost and high-efficient water-soluble fertilizer on soil properties and tomato yield. Three fertilization treatments were selected: conventional fertilizer (CK), Chinese medicine residue compost, coupling of Chinese medicine residue compost and high-efficient water-soluble fertilizer with chemical fertilizer nutrient reducing by 30% (HOF). The results showed that HOF treatment increased soil pH by 0.13 ~ 0.15 and significantly reduced electrical conductivity by 328.5 ~ 371.3 $\mu\text{S}/\text{cm}$, nitrate nitrogen by 60.7 ~ 305.0 mg/kg, available P by 42.6 ~ 57.1 mg/kg and available K by 179.4 ~ 274.1 mg/kg, compared with CK. OF treatment also significantly improved soil chemical properties, but the improvement effect was weaker than HOF treatment. As for soil biological properties, HOF treatment increased bacterial abundance and microbial activity and diversity and decreased fungal abundance 28.5% ~ 36.0%, with HOF treatment more significant than OF treatment. However, OF treatment had inhibitory effect on soil urease, invertase and phosphatase activities. Furthermore, the improvement effect of HOF treatment on comprehensive soil properties of high fertility soil was stronger than that of moderate fertility soil. HOF treatment increased the tomato yield by 9.0% and 13.1% in moderate and high fertility soils relative to CK, respectively, while OF treatment increased by 4.6% and 5.9%, respectively. Correlation and principal component analysis indicated that HOF treatment could reduce soil salt and nutrient content and improve soil biological properties, thus effectively increasing the yield. In addition, balanced reduction of available nutrient input via HOF treatment was beneficial to improve soil properties. This situation was more obvious in high fertility soil. Therefore, coupling of Chinese medicine residue compost and high-efficient water-soluble fertilizer can effectively improve the soil fertility quality in eutrophic greenhouse under the condition of reducing chemical fertilizer nutrient by 30%.

Key words: Chinese medicine residue compost; high-efficient water-soluble fertilizer; soil fertility; soil properties; yield