文章编号:1000-7601(2023)03-0166-13 **doi**:10.7606/j.issn.1000-7601.2023.03.22

温室番茄有机组合肥筛选及其肥效、土壤环境和果实品质效应

潘艳花[1],朱惠霞[2],朱建强[3],秦嘉海[4]

(1.甘肃省农业科学院林果花卉研究所,甘肃 兰州 730000;2.甘肃省农业科学院蔬菜研究所,甘肃 兰州 730000;
3.酒泉市农业技术推广服务中心,甘肃 酒泉,735000;4.河西学院农业与生态工程学院,甘肃 张掖 734000)

摘　要:为解决长期施用传统化肥温室土壤环境质量和番茄品质下降以及有机物料对乡村生态环境污染的问题,以玉米秸秆、牛粪、食用菌渣、番茄专用肥和生物菌肥为原料,采用正交试验方法筛选配方,在室内合成有机物料组合肥,开展了有机物料组合肥对温室番茄土壤环境效应和番茄品质影响的田间试验。结果表明:有机物料组合肥配方组合比例为秸秆粪便菌渣肥∶番茄专用肥∶生物菌肥=0.9709∶0.0243∶0.0048,最大利润施肥量为 60 t·hm^{-2}。有机物料组合肥施用量与温室番茄种植田总孔隙度、>0.25 mm 水稳性团聚体、饱和持水量、阳离子交换量、可溶性盐、有机质、有机碳、有机碳密度、碱解氮、速效磷、速效钾、番茄株高、茎粗、单果重、单株果重和产量呈正相关关系,与容重和 pH 值呈负相关关系。连续 3 a 施用有机物料组合肥与传统化肥相比,温室番茄种植田容重、可溶性盐、pH 值、真菌分别降低 7.91%、12.34%、9.22%、10.26%,Hg、Cd、Cr、Pb 分别降低 16.28%、27.12%、16.60%、20.05%,番茄硝酸盐、可滴定酸、施肥成本分别降低 6.64%、19.57%、11.02%,总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、水稳性团聚体、阳离子交换量分别增加 8.73%、8.96%、8.45%、16.87%、17.89%,田间持水量、自然含水量、饱和持水量、毛管持水量、非毛管持水量、贮水量分别增加 12.57%、10.51%、8.73%、8.96%、8.45%、5.30%,有机质、有机碳和有机碳密度分别增加 17.28%、17.27%、8.25%,碱解氮、速效磷、速效钾、Mn、Zn、Mo 分别增加 1.74%、1.31%、0.95%、1.82%、1.96%、9.09%,细菌、放线菌数量、脲酶、磷酸酶、蔗糖酶、多酚氧化酶活性分别增加 14.35%、6.80%、7.56%、5.71%、11.73%、10.43%,番茄可溶性糖、可溶性蛋白质、Vc、可溶性固形物分别增加 6.68%、8.96%、10.76%、17.29%,单果重、单株果重、产量、增产值、施肥利润、肥料投资效率分别增加 6.67%、5.26%、5.43%、27.80%、38.30%、55.14%。施用有机物料组合肥改善了温室番茄种植田质量和番茄品质,提高了土壤有机质、酶活性和经济效益。

关键词:番茄;有机物料;土壤环境质量 ;传统化肥

中图分类号:S641.2　　**文献标志码**:A

Organic compound fertilizer for greenhouse tomato and its response to fertilizer, soil environmental efficiency and tomato's quality

PAN Yanhua[1], ZHU Huixia[2], ZHU Jianqiang[3], QIN Jiahai[4]

(1.*Forest Fruit Flower Research Institute*, *Gansu Academy of Agricultural Sciences*, *Lanzhou*, *Gansu* 730000, *China*;
2.*Vegetable Farming Institute of Gansu Academy of Agricultural Sciences*, *Lanzhou*, *Gansu* 730000, *China*;
3.*Agricultural Technology Extension Center of Jiuquan*, *Jiuquan*, *Gansu* 735000, *China*;
4.*College of Agriculture and Ecological Engineering*, *Hexi University*, *Zhangye*, *Gansu* 734000, *China*)

Abstract: To solve the problems of degradation of soil environmental quality and greenhouse tomato quality due to long-term application of traditional chemical fertilizer and the pollution of organic materials to the rural ecological environment in the study area, the orthogonal test method was used, and corn straw, cow manure, edible fungus residue, tomato special fertilizer and biological fertilizer were taken as raw materials, and the organic materi-

收稿日期:2022-03-05　　**修回日期**:2022-09-11

基金项目:酒泉市科技支撑计划项目(2021JQKJZCJH);甘肃省科技厅技术创新引导计划(22CX2NA002)

作者简介:潘艳花(1985-),女,甘肃金昌人,正高级农艺师,主要从事土壤改良、培肥与新品种选育研究。E-mail:panyh2006@163.com

通信作者:朱惠霞(1979-),女,甘肃民勤人,副研究员,主要从事蔬菜育种及推广研究。E-mail:zhuhx2022@sina.com

als was synthesized indoors. Field experiments were conducted to investigate the effects of organic compound fertilizer efficiency, soil environmental effect and tomato quality of greenhouse tomatoes. The results showed that the ratio of organic compound fertilizer formula combination was as follows: straw manure fungus residue fertilizer 0.9709: tomato fertilizer 0.0243: biological fungus fertilizer 0.0048, and the maximum profit fertilizer amount was 60 t · hm^{-2}. Different doses of organic material compound greenhouse tomato fields total porosity, > 0.25 mm aggregate water stability, saturated water capacity, CEC, soluble salts and organic matter, organic carbon, organic carbon density, alkali solution nitrogen, available phosphorus and available potassium, tomato plant height, stem diameter, weight, weight per plant and yield were positively correlated relationship, and negatively correlated with bulk density and pH value. Compared with conventional chemical fertilizer, the bulk density, soluble salt, pH and fungi of greenhouse tomato planting 3 years in a row decreased by 7.91%, 12.34%, 9.22% and 10.26%, Hg, Cd, Cr and Pb decreased by 16.28%, 27.12%, 16.60% and 20.05%. Nitrate, titratable acid and fertilization cost decreased by 6.64%, 19.57% and 11.02%. Total porosity, capillary porosity, non-capillary porosity, water-stable aggregates and CEC increased by 8.73%, 8.96%, 8.45%, 16.87% and 17.89%. Field water capacity, natural water content, saturated water capacity, capillary water capacity, non-capillary water capacity and water storage increased by 12.57%, 10.51%, 8.73%, 8.96%, 8.45% and 5.30%, and organic matter, organic carbon and organic carbon density increased by 17.28%, 17.27% and 8.25%. Alkali-hydrolyzed nitrogen, available phosphorus, available potassium, Mn, Zn and Mo increased by 1.74%, 1.31%, 0.95%, 1.82%, 1.96% and 9.09%. The number of bacteria, actinomycetes, urease, phosphatase, sucrase and polyphenol oxidase activities increased by 14.35%, 6.80%, 7.56%, 5.71%, 11.73% and 10.43%, and soluble sugar, soluble protein, Vc and soluble solids increased by 6.68%, 8.96%, 10.76% and 17.29%. Fruit weight per plant, fruit weight per plant, yield, increase value, fertilizer profit and fertilizer investment efficiency increased by 6.67%, 5.26%, 5.43%, 27.80%, 38.30% and 55.14%. Application of organic material compound improved the quality of greenhouse tomato planting field and tomato quality, and increased soil organic matter, enzyme activities and economic benefits.

Keywords: tomato; organic materials; soil environmental quality; traditional chemical fertilizers

甘肃省酒泉市蔬菜产业已发展成为农民增收的支柱产业之一,截至 2021 年全市日光温室蔬菜种植面积 1 273.33 hm^2[1]。经调查,菜户温室种植的番茄平均产量为 110 t · hm^{-2},尿素、磷酸二铵、硫酸钾化肥投入量分别为 1.35、0.90、0.68 t · hm^{-2},折合纯 N、P_2O_5、K_2O 分别为 0.78、0.42、0.34 t · hm^{-2},按照生产 100 t 番茄吸收 N、P_2O_5、K_2O 分别为 0.45、0.50、0.50 t 计算[2],生产 110 t · hm^{-2} 番茄需要纯 N、P_2O_5、K_2O 分别为 0.50、0.55、0.55 t · hm^{-2},不施肥番茄产量为 77 t · hm^{-2},土壤提供的 N、P_2O_5、K_2O 分别为 0.35、0.39、0.39 t · hm^{-2},应补充纯 N、P_2O_5、K_2O 分别为 0.15、0.16、0.16 t · hm^{-2},超量施用纯 N、P_2O_5、K_2O 分别为0.63、0.26、0.18 t · hm^{-2}。长期超量施用氮、磷、钾化肥而未施用微量元素易导致番茄种植田大量元素和微量元素比例失衡,缺素的生理性病害经常发生,有机质含量低,板结,通透性能差,可溶性盐富集,有益微生物数量和酶活性降低,生产的番茄可溶性糖、Vc 和可溶性蛋白质含量低,硝酸盐和可滴定酸含量高,产量低且不稳定[3-4],影响了温室蔬菜产业的可持续发展。因此研究有机物料组合肥替代传统化肥是目前研究的热点问题和本文的关键所在。

有关有机物料对土壤环境质量及作物品质和产量的影响前人做了大量的研究工作,主要包括两个方面:其一,有机物料对土壤环境质量的影响:羊粪提高了土壤有机质含量[5],改善了土壤物理性质,降低了容重,增大了总孔隙[6],有机物料提高了土壤中>0.25 mm 水稳性团聚体的数量[7-8]。有机物料和羊类有机肥降低了土壤酸碱度、电导率和碱化度,改善了缓冲性能[9-10]。鸡粪和有机物料提高了土壤氮、磷、钾和锌的含量[11-12]。生物菌肥和有机生态肥提高了土壤微生物的数量[13-14]。麦秸和蚯蚓粪便提高了土壤酶活性[15-16]。鸡粪降低了重金属离子的生物有效性,对土壤中 Pb、Cd 具有较强的钝化作用,减少了重金属的累积,降低了玉米对 Cd 的吸收[17-18];猪粪提高了土壤中 Cd、Hg 和 Zn 的含量[19];有机物料降低了水稻根系对土壤 Cd 的吸收富集[20];牛粪与秸秆配合施用,降低了玉米籽粒中 Cd 含量[21]。其二,有机物料对作物品质和产量的影响:羊粪提高了火龙果总糖、Vc 含量[22];秸秆

改善了番茄品质并提高了产量[23];农业废弃物提高了番茄 Vc 和可溶性糖含量[24];有机物料提高了黄瓜果实 Vc 含量[25];有机物料显著提高了作物产量[26];有机肥料替代化肥、沼液与化肥配施能提高番茄产量和改善果实品质[27-28]。

综上所述,前人对有机物料的研究主要集中在羊粪、有机物料、鸡粪、生物菌肥、有机生态肥、麦秸、蚯蚓粪便、猪粪、牛粪、作物秸秆和沼液对土壤环境质量及作物品质和产量影响方面,而采用玉米秸秆、牛粪、食用菌渣、番茄专用肥和生物菌肥合成的有机物料组合肥对温室土壤环境质量及番茄品质和效益影响的研究鲜有报道。经调查,甘肃省酒泉市有机物料年资源量有 2.93×10^6 t,堆放在居民点周围污染了乡村环境。经室内分析,这些有机物料有机质、N、P_2O_5、K_2O 含量分别为 25.41%~42.27%、0.21%~1.03%、0.17%~0.81%、0.13%~0.63%。为解决研究区长期施用传统化肥温室土壤环境质量和番茄品质下降以及有机物料对乡村生态环境污染的问题,本文依据番茄需肥规律和研究区域土壤供肥水平,以研究区资源丰富的制种玉米秸秆、牛粪、食用菌渣、番茄专用肥和生物菌肥为原料,采用正交试验方法筛选配方,在室内合成有机物料组合肥,并进行田间验证试验,旨在为提高有机物料资源利用率、减少化肥施用量、改善土壤环境质量和番茄品质提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 试验地概况 试验在甘肃省酒泉市肃州区银达镇银达村温室内进行(100°15′68″E,39°05′90″N),海拔 1 485 m,年降水量 86 mm,年蒸发量 1 950 mm,年均气温 7.50℃,日照时数 3 053 h,无霜期 150 d。温室长度、脊高、跨度分别为 90、4、8 m,墙体底宽和上口宽分别为 1.8 m 和 1.4 m,土壤类型是灌淤旱作人为土,0~20 cm 土层有机质、碱解氮、速效磷、速效钾含量分别为 17 340、61.13、8.94、134.36 mg·kg^{-1},Hg、Cd、Cr、Pb、Mn、Zn、Mo 分别为 0.35、0.42、23.14、7.05、6.23、0.48、0.10 mg·kg^{-1},阳离子交换量(CEC)、可溶性盐和 pH 值分别为 20.92 cmol·kg^{-1}、1.95 g·kg^{-1}和 8.26,前茬作物是黄瓜。

1.1.2 试验材料 自制番茄专用肥按 $CO(NH_2)_2$:$(NH_4)_2HPO_4$:K_2SO_4:$ZnSO_4\cdot7H_2O$:$MnSO_4\cdot3H_2O$:$(NH_4)_2MoO_4$风干重量比为 0.3687:0.2995:0.2765:0.0276:0.0184:0.0093 混合;自制秸秆粪便菌渣肥按玉米秸秆:牛粪:食用菌渣(风干重量比)为 0.4167:0.3333:0.2500 混合;自制有机物料组合肥按秸秆粪便菌渣肥:番茄专用肥:生物菌肥(风干重量比)为 0.9709:0.0243:0.0048 混合。番茄品种为‘中杂 102’,试验材料有效成分见表 1。

表 1 参试材料有效成分

Table 1 Active ingredient of the tested material

材料种类 Type of material	有机质 Organic matter/%	有机碳 Organic carbon/%	C/N	N/%	P_2O_5/%	K_2O/%	Zn/%	Mn/%	Mo/%	有效活菌数 Effective viable count /(10^8个·g^{-1})	粒径 Particle size/mm
$CO(NH_2)_2$	0	0	0	46.00	0	0	0	0	0	0	2~3
$(NH_4)_2HPO_4$	0	0	0	18.00	46.00	0	0	0	0	0	3~4
K_2SO_4	0	0	0	0	0	50.00	0	0	0	0	1~2
$ZnSO_4\cdot7H_2O$	0	0	0	0	0	0	23.00	0	0	0	1~2
$MnSO_4\cdot3H_2O$	0	0	0	0	0	0	0	26.00	0	0	1~2
$(NH_4)_2MoO_4$	0	0	0	0	0	0	0	0	54.30	0	1~2
玉米秸秆 Corn straw	87.10	50.52	53/1	0.95	0.15	1.18	0	0	0	0	1~10
牛粪 Cow dung	24.31	14.10	40/1	0.35	0.15	0.31	0	0	0	0	1~10
食用菌渣 Edible fungi residue	56.43	32.73	27/1	1.22	0.73	1.46	0	0	0	0	1~10
生物菌肥 Bio-bacterial manure	12.23	7.09	14/1	0.51	0.32	0.36	0	0	0	2.50	1~2
番茄专用肥 Tomato fertilizer	0	0	0	22.35	13.78	13.83	0.64	0.48	0.50	0	1~5
秸秆粪便菌渣肥 Straw manure fungus residue fertilizer	37.13	21.54	27/1	0.81	0.29	1.07	0	0	0	0.32	1~10
有机物料组合肥 Combined organic fertilizer	36.01	20.89	15/1	1.35	0.61	1.37	0.02	0.01	0.01	0.01	1~10

1.2　试验方法

1.2.1　秸秆粪便菌渣肥无害化处理方法　于 2016 年 4 月 1 日将风干的玉米秸秆、牛粪、食用菌渣分别粉碎过 10 mm 筛,加入尿素(尿素加入量($kg \cdot t^{-1}$) = 玉米秸秆、牛粪、食用菌渣 C/N÷25÷0.46)把碳氮比调整为 25∶1,喷自来水调节水分含量达到 60%~65%,在温室内(室温 25~30℃)堆成梯形,覆盖塑料薄膜并开直径 2~3 cm 小洞若干,食用菌渣、牛粪和玉米秸秆分别发酵 90、120、180 d,堆内温度降到室温发酵结束,放置在阴凉干燥处自然风干(含水量小于 5%)得到发酵有机物料备用(表 2)。

表 2　有机物料发酵参数

Table 2　Fermentation parameters of organic materials

种类 Species	尿素加入量 Urea addition /($kg \cdot t^{-1}$)	搅拌间隔时间 Stirring interval time/d	搅拌次数/次 Stirring number	发酵天数 Fermentation days/d
玉米秸秆 Corn straw	4.61	60	3	180
牛粪 Cow manure	3.48	40	3	120
食用菌渣 Edible fungus residue	2.35	30	3	90

1.2.2　试验处理　试验①:有机物料组合肥配方筛选。2017 年 5 月 22 日选择秸秆粪便菌渣肥、番茄专用肥和生物菌肥 3 种肥料,各设置 3 个梯度施用量,按正交表 $L_9(3^4)$ 配制 9 种有机物料组合肥(表 3)。

试验②:有机物种组合肥施用量对番茄种植田环境质量和番茄效益影响的研究。2018 年 5 月 20 日,按照试验①筛选的配方(秸秆粪便菌渣肥∶番茄专用肥∶生物菌肥(风干重量比)为 0.9709∶0.0243∶0.0048)在室内合成有机物料组合肥,施肥量梯度设置为 0(对照)、20、40、60、80、100 $t \cdot hm^{-2}$ 共 6 个处理,各处理重复 3 次,随机区组排列。

试验③:有机物料组合肥与传统化肥比较对温室番茄种植田环境质量及番茄品质和效益影响的研究。2019—2021 年每年 5 月 20 日,在 N、P_2O_5、K_2O、Zn、Mn 和 Mo 纯养分投入量相等的条件下(N 0.81 $t \cdot hm^{-2}$+$P_2O_5$0.37 $t \cdot hm^{-2}$+K_2O 0.82 $t \cdot hm^{-2}$+Zn 0.01%+Mn 0.01%+Mo 0.01%),设置 3 个处理,处理 1 为对照(不施肥);处理 2 为传统化肥($CO(NH_2)_2$1.46 $t \cdot hm^{-2}$+$(NH_4)_2HPO_4$ 0.80 $t \cdot hm^{-2}$+$K_2SO_4$1.64 $t \cdot hm^{-2}$)+$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.04 $t \cdot hm^{-2}$+$MnSO_4 \cdot 3H_2O$ 0.04 $t \cdot hm^{-2}$+$(NH_4)_2MoO_4$0.02 $t \cdot hm^{-2}$;处理 3 为有机物料组合肥(施肥量 60.00 $t \cdot hm^{-2}$)。各处理重复 3 次,随机区组排列。

1.2.3　种植方法　小区面积 27 m^2(长×宽=7.5 m×3.6 m),小区四周筑埂。番茄定植前在栽培行内挖长、宽、深分别为 7.50、0.60、0.20 m 土槽,按试验设计将肥料撒入土槽内起垄,垄高、垄宽和垄距分别为 35、60、60 cm,垄起好后在垄上铺上滴灌带和地膜,选择苗龄 60 d 的番茄苗定植,深度和株距分别为 10 cm 和 30 cm,每垄 2 行,每小区 3 垄。各小区为 1 个支管单元,在支管单元入口安装闸阀、压力表和水表,在栽培垄上安装滴灌带,滴头间距 30 cm,在番茄定植后、开花期、第 1 果穗、第 2 果穗、第 3 果穗膨大期和收获前各滴灌 1 次,每个小区每次灌水量为 5.40 m^3。

1.2.4　样品采集方法　番茄收获时,每个小区选择 3 垄,每垄采集 5 株,共采集 15 株测定单果重、单株果重、可溶性糖、Vc、可溶性蛋白质、硝酸盐和可滴定酸。每个试验小区单独采收,将小区产量换算成公顷产量进行统计分析。2018 年 9 月 26 日试验②和 2021 年 9 月 28 日试验③的番茄采收后,分别在试验小区内按对角线布置 5 个采样点,采集 0~20 cm 耕作层土样 5 kg,采用四分法留土样 3 份,质量分别为 2、2、1 kg,新鲜土样收入 4℃ 避光保存,2 kg 土样分别测定微生物数量和酶活性,1 kg 土样风干过 1 mm 筛供室内分析(土壤容重和团聚体用环刀采原状土,不进行风干)。

1.2.5　测定指标与方法　采用环刀法、计算法和干筛法测定土壤容重、总孔隙度和>0.25 mm 水稳性团聚体;采用酸度计法(水土比 5∶1)、乙酸铵—氯化铵法、电导法和重铬酸钾氧化-外加热法测定 pH 值、CEC、可溶性盐、有机质和有机碳;采用烘干法和威尔科可斯法测定自然含水量和田间持水量;采用扩散法、碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法和中性醋酸铵溶液浸提—火焰光度计法测定碱解氮、速效磷和速效钾;饱和持水量($t \cdot hm^{-2}$)= 面积(m^2)×总孔隙度(%)×土层深度(m);毛管持水量($t \cdot hm^{-2}$)= 面积(m^2)×毛管孔隙度(%)×土层深度(m);非毛管持水量($t \cdot hm^{-2}$)= 面积(m^2)×非毛管孔隙度(%)×土层深度(m);贮水量($m^3 \cdot hm^{-2}$)= 土壤容重($g \cdot cm^{-3}$)×自然含水量(%)×土层深度(m)×面积(m^2);有机碳密度($kg \cdot m^{-2}$)= 土壤有机碳含量($g \cdot kg^{-1}$)×土壤容重($g \cdot cm^{-3}$)×采样深度(cm)×0.01;采用稀释平板法、3,5-二硝基水杨酸比色法、靛酚比色法、磷酸苯二钠比色法和碘量滴定法测定土壤微生物、蔗糖酶、脲酶、磷酸酶、多酚氧化酶;采用水杨酸硝化法、2,6-二氯靛酚滴定法、蒽酮-硫酸法、考马斯亮蓝 C-250 染色法、碱滴定法和 PR-32α 型折射计测定番茄硝酸盐、Vc、可溶性糖、可溶性蛋白、可滴定酸、可溶性固形物;采用石墨炉原子吸收

分光光度法和原子荧光光谱法测定 Cd 和 Hg 全量;采用火焰原子吸收分光光度法测定 Pb 和 Cr 全量;采用原子吸收分光光度法测定有效 Mn、Zn 和 Mo。

1.3 数据分析

采用 SPSS 19.0 软件进行数据统计分析,采用 Duncan 新复极差法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 有机物料组合肥配方筛选

2017 年 9 月 30 日番茄收获后测定数据显示,3 种肥料对番茄经济性状和产量的主次效应(R)为:番茄专用肥>秸秆粪便菌渣肥>生物菌肥。各水平平均单果重、单株果重和产量分别表现为 $K_{A1}>K_{A3}>K_{A2}$、$K_{B3}>K_{B2}>K_{B1}$ 和 $K_{C3}>K_{C1}>K_{C2}$(表 3),说明有机物料组合肥最优组合比例为 A_1 秸秆粪便菌渣肥 60.0 t·hm^{-2}:B_3 番茄专用肥 1.5 t·hm^{-2}:C_3 生物菌肥 0.3 t·hm^{-2},将 60.0、1.5、0.3 t·hm^{-2} 分别除以 61.80 t·hm^{-2},得到有机物料组合肥配方组合比例为秸秆粪便菌渣肥∶番茄专用肥∶生物菌肥为 0.9709∶0.0243∶0.0048。室内测定含有机质、有机碳、N、P_2O_5、K_2O、Zn、Mn、Mo 含量分别为 36.01%、20.89%、1.35%、0.61%、1.37%、0.02%、0.01%、0.01%,有效活菌数≥0.01×10^8 个·g^{-1},粒径 1~20 mm。

2.2 有机物料组合肥施用量对温室番茄种植田环境质量和番茄效益的影响

2.2.1 土壤理化性质 由 2018 年 9 月 26 日番茄采收后测定结果数据可知(表 4,见 172 页),有机物料组合肥施用量与温室番茄种植田总孔隙度、>0.25 mm 水稳性团聚体、饱和持水量、CEC 和可溶性盐含量呈正相关关系,相关系数(r)分别为 0.9907、0.9909、0.9906、0.9918 和 0.9912,与容重和 pH 值呈负相关关系,相关系数(r)分别为 −0.9955 和 −0.9916。随着有机物料组合肥施肥量梯度的增加,总孔隙度、>0.25 mm 水稳性团聚体、饱和持水量、CEC 和可溶性盐含量增加,容重和 pH 值降低。处理 6 与处理 5 相比,总孔隙度、>0.25 mm 水稳性团聚体、饱和持水量和可溶性盐含量变化差异不显著($P>0.05$),CEC 含量变化差异显著($P<0.05$);处理 6 与处理 4 相比,>0.25 mm 水稳性团聚体($P<0.05$)和 CEC($P<0.01$)含量变化差异显著,总孔隙度、饱和持水量和可溶性盐、容重和 pH 值含量变化差异不显著($P>0.05$);处理 6 与处理 3 相比,>0.25 mm 水稳性团聚体和 CEC 含量变化差异极显著($P<0.01$),总孔隙度、饱和持水量、容重和 pH 值含量变化差异显著($P<0.05$),可溶性盐含量含量变化差异不显著($P>0.05$);处理 6 与处理 2 相比,总孔隙度、>0.25 mm 水稳性团聚体、饱和持水量、CEC、容重和 pH 值含量变化差异极显著($P<0.01$),可溶性盐含量变化差异不显著($P>0.05$);处理 6 与处理 1 相比,总孔隙度、>0.25 mm 水稳性团聚体、饱和持水量、CEC、容重和 pH 值含量变化差异极显著($P<0.01$),可溶性盐含量变化差异显著($P<0.05$)。

2.2.2 有机质及有机碳和速效氮磷钾含量 由表 5(见 172 页)可知,有机物料组合肥施用量与温室番茄种植田有机质、有机碳、有机碳密度、碱解氮、速效磷和速效钾含量呈正相关关系,相关系数(r)分别为 0.9997、0.9998、0.9941、0.9915、0.9911、和 0.9952。随着有机物料组合肥施肥量梯度的增加,有机质、有机碳、有机碳密度和速效氮磷钾含量递增。处理 6 与处理 5 相比,有机质、有机碳和速效磷含量变化差异显著($P<0.05$),有机碳密度、碱解氮和速效钾含量变化差异不显著($P>0.05$);处理 6 与处理 4 相比,有机质、有机碳、碱解氮和速效磷含量变化差异极显著($P<0.01$),有机碳密度和速效钾含量变化差异显著($P<0.05$);处理 6 与处理 3 相比,有机质、有机碳、有机碳密度、碱解氮和速效磷含量($P<0.01$),速效钾含量变化差异显著($P<0.05$);处理 6 与处理 2、处理 1 相比,有机质、有机碳、有机碳密度、碱解氮、速效磷和速效钾含量变化均表现出差异极显著($P<0.01$)。

2.2.3 番茄性状和效益 由表 6(见 172 页)可知,有机物料组合肥施用量与番茄株高、茎粗、单果重、单株果重和产量呈正相关关系,相关系数(r)分别为 0.9875、0.9416、0.9052、0.9461 和 0.9144。随着有机物料组合肥施肥量梯度的增加,株高、茎粗、单果重、单株果重、产量、增产值和施肥成本递增,千克肥料增产量和肥料投资效率递减。处理 6 与处理 5 相比,株高、茎粗、单果重、单株果重和产量变化差异不显著($P>0.05$);处理 6 与处理 4 相比,株高变化差异显著($P<0.05$),茎粗、单果重、单株果重和产量变化差异不显著($P>0.05$);处理 6 与处理 3 相比,株高变化差异极显著($P<0.01$),茎粗、单果重、单株果重和产量变化差异显著($P<0.05$);处理 6 与处理 2、处理 1 相比,株高、茎粗、单果重、单株果重和产量变化均表现出差异极显著($P<0.01$)。有机物料组合肥施肥量由 20 t·hm^{-2} 递增到 60 t·hm^{-2},施肥利润随着施肥量增加而递增,当超过 60 t·hm^{-2} 时施肥利润开始下降。由此可见,有机物料组合肥最大利润施肥量为 60 t·hm^{-2}。

表 3　$L_9(3^4)$ 正交试验设计与分析

Table 3　$L_9(3^4)$ Orthogonal experimental design and analysis

试验处理 Treatment	A (秸秆粪便菌渣肥 Straw fecal fungus residue fertilizer)		B (番茄专用肥 Tomato fertilizer)		C (生物菌肥 Biological bacterial fertilizer)		单果重 Weight of single fruit/g	单株果重 Fruit yield of a branch /(kg·株$^{-1}$)	产量 Yield /(t·hm^{-2})
	施用量 Application amount rote /(t·hm^{-2})	编码值 Code value	施用量 Application amount rote /(t·hm^{-2})	编码值 Code value	施用量 Application amount rote /(t·hm^{-2})	编码值 Code value			
1	60.00	1	0.50	1	0.10	1	120.01±1.60bB	1.42±0.04bB	81.09±1.16bB
2	60.00	1	1.00	2	0.20	2	111.69±1.48cB	1.34±0.02cB	76.47±1.08cB
3	60.00	1	1.50	3	0.30	3	165.24±2.20aA	1.95±0.05aA	111.65±1.22aA
4	120.00	2	0.50	1	0.20	2	39.72±0.50gE	0.47±0.01gE	26.87±0.35gE
5	120.00	2	1.00	2	0.30	3	94.57±1.22dC	1.12±0.03dC	63.90±0.80dC
6	120.00	2	1.50	3	0.10	1	120.72±1.40bB	1.43±0.05bB	81.57±1.12bB
7	180.00	3	0.50	1	0.30	3	89.01±1.16eC	1.05±0.02eC	60.14±0.84eC
8	180.00	3	1.00	2	0.10	1	83.68±1.11fD	0.99±0.01fD	56.54±0.66fD
9	180.00	3	1.50	3	0.20	2	121.76±1.61bB	1.44±0.06bB	82.27±0.13bB
1 水平平均单果重(K_1) 1 horizontal average fruit weight (K_1)	132.31		82.91		108.14				
2 水平平均单果重(K_2) 2 horizontal average fruit weight (K_2)	85.00		96.65		91.06				
3 水平平均单果重(K_3) 3 horizontal average fruit weight (K_3)	98.15		135.91		116.27				
肥料主次效应(R) Primary and secondary effects of fertilizers	47.31		53.00		25.21				
1 水平平均单株果重(K_1) 1 average fruit weight per plant at level (K_1)	1.57		0.98		1.28				
2 水平平均单株果重(K_2) 2 average fruit weight per plant at level (K_2)	1.01		1.15		1.08				
3 水平平均单株果重(K_3) 3 average fruit weight per plant at level (K_3)	1.16		1.61		1.37				
肥料主次效应(R) Primary and secondary effects of fertilizers	0.56		0.63		0.29				
1 水平平均产量(K_1) 1 average horizontal output (K_1)	89.73		56.03		73.07				
2 水平平均产量(K_2) 2 average horizontal output (K_2)	57.45		65.61		61.87				
3 水平平均产量(K_3) 3 average horizontal output (K_3)	66.32		91.83		78.56				
肥料主次效应(R) Primary and secondary effects of fertilizers	32.28		35.80		16.69				

注:同列数据不同大写字母和小写字母分别表示达到 $LSR_{0.01}$ 和 $LSR_{0.05}$ 差异显著水平。下同。

Note: Different capital letters and small letters in the same column mean significant difference in $LSR_{0.01}$ and $LSR_{0.05}$, respectively. The same as below.

表 4 有机物料组合肥施用量对温室番茄种植田理化性质的影响

Table 4 Effects of application rate of combined organic material on physicochemical properties of tomato planting field in greenhouse

试验处理 Treatment	施肥量 Fertilizer amount /(t·hm^{-2})	容重 Bulk density /(g·cm^{-3})	总孔隙度 Total porosity /%	>0.25 mm 水稳性团聚体 > 0.25 mm water stable aggregate/%	饱和持水量 Saturated water capacity /(t·hm^{-2})	pH	阳离子交换量 CEC/(cmol·kg^{-1})	可溶性盐 Soluble salt /(g·kg^{-1})
1	0	1.42±0.06aA	46.42±0.57cB	21.04±0.64bB	928.40±1.85cB	8.28±0.16aA	20.71±0.04eD	1.92±0.03bA
2	20	1.39±0.03aA	47.55±0.46cB	22.41±0.44bB	951.00±1.43cB	8.16±0.12aA	22.83±0.06dC	1.94±0.01aA
3	40	1.34±0.05bB	49.43±0.32bA	23.51±0.32bB	988.60±0.88bA	7.84±0.06bB	24.55±0.10cB	1.96±0.02aA
4	60	1.29±0.04cB	51.32±0.66aA	24.21±1.02bA	1026.40±0.62aA	7.62±0.14cB	25.57±0.30cB	1.97±0.04aA
5	80	1.26±0.01cB	52.45±0.55aA	26.52±0.08aA	1049.00±1.22aA	7.46±0.08cB	26.72±0.08bA	1.99±0.06aA
6	100	1.24±0.02cB	53.21±0.24aA	27.63±1.10aA	1064.20±0.97aA	7.31±0.10cB	28.18±0.02aA	2.02±0.08aA

表 5 有机物料组合肥施用量对温室番茄种植田有机质及有机碳和氮磷钾含量的影响

Table 5 Effects of application rate of combined organic material on organic matter, organic carbon and N、P、K contents in tomato planting field in greenhouse

试验处理 Treatment	施肥量 Fertilizer amount /(t·hm^{-2})	有机质 Organic matter /(g·kg^{-1})	有机碳 Organic carbon /(g·kg^{-1})	有机碳密度 Organic carbon density /(kg·hm^{-2})	碱解氮 Alkali N /(mg·kg^{-1})	速效磷 Available P /(mg·kg^{-1})	速效钾 Available K /(mg·kg^{-1})
1	0	16.99±0.34dC	9.85±0.13dB	2.80±0.01cB	69.90±0.76eE	9.76±0.11fC	131.67±1.67eD
2	20	18.29±0.44cB	10.61±0.10cB	2.95±0.06cB	77.34±0.63dD	10.27±0.08eC	134.45±1.82dC
3	40	19.60±0.28cB	11.37±0.08cB	3.05±0.09bB	92.83±0.54cC	11.04±0.32dC	137.19±1.93cB
4	60	20.76±0.24cB	12.04±0.15cB	3.11±0.02bA	107.71±0.31bB	12.61±0.12cB	140.62±1.88bA
5	80	22.16±0.20bA	12.85±0.1b1A	3.24±0.04aA	116.71±0.86aA	14.10±0.22bA	143.10±2.01aA
6	100	23.44±0.18aA	13.60±0.24aA	3.37±0.08aA	121.06±0.94aA	15.32±0.14aA	148.01±1.71aA

表 6 有机物料组合肥施用量对番茄性状和效益的影响

Table 6 Effects of application rate of combined organic material on tomato characters and efficiency

试验处理 Treatment	施肥量 Fertilizer rate /(t·hm^{-2})	株高 Plant height /m	茎粗 Stem diameter /cm	单果重 Fruit weight /g	单株果重 Fruit weight per plant /(kg·plant^{-1})	产量 Yield /(t·hm^{-2})	千克肥料增产量 Yield increase per kilogram of fertilizer /(kg·kg^{-1})	增产值 Unit yield inceement /(10^4 Yuan·hm^{-2})	施肥成本 Fertilization costs /(10^4 Yuan·hm^{-2})	施肥利润 Fertilization profits /(10^4 Yuan·hm^{-2})	肥料投资效率 Efficiency of fertilizer investment /(Yuan·Yuan^{-1})
1	0	1.47±0.03eD	1.67±0.02dC	116.91±2.14dC	1.42±0.04dC	77.62±1.27dC					
2	20	1.52±0.01dC	1.78±0.03cB	133.46±3.04cB	1.59±0.03cB	88.12±0.89cB	0.53	3.15	0.35	2.80	8.00
3	40	1.63±0.02cB	1.95±0.06bA	138.21±2.56bA	1.70±0.06bA	96.23±4.36bA	0.47	5.58	0.70	4.88	6.97
4	60	1.72±0.03bA	2.01±0.04aA	141.52±2.04aA	1.77±0.01aA	100.98±2.17aA	0.39	7.01	1.05	5.96	5.68
5	80	1.760.04aA	2.03±0.08aA	143.67±3.12aA	1.79±0.04aA	101.30±6.43aA	0.30	7.10	1.40	5.70	4.07
6	100	1.81±0.06aA	2.06±0.10aA	146.13±4.86aA	1.82±0.08aA	102.09±2.25aA	0.25	7.34	1.75	5.59	3.19

备注:价格(元·吨$^{-1}$):$CO(NH_2)_2$ 1800;$(NH_4)_2HPO_4$ 3600;K_2SO_4 3200;$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 4000;$MnSO_4 \cdot 3H_2O$ 4500;$(NH_4)_2MoO_4$ 35000;玉米秸秆 105;牛粪 45;食用菌渣 110;生物菌肥 4500;自制番茄专用肥 2852.14($CO(NH_2)_2$、$(NH_4)_2HPO_4$、K_2SO_4、$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$、$MnSO_4 \cdot 3H_2O$、$(NH_4)_2MoO_4$风干重量比按 0.3687∶0.2995∶0.2765∶0.0276∶0.0184∶0.0093 混合);自制秸秆粪便菌渣肥 86.24(玉米秸秆、牛粪、食用菌渣风干重量比按 0.4167∶0.3333∶0.2500 混合);自制有机物料组合肥 174.64(秸秆粪便菌渣肥、番茄专用肥、生物菌肥风干重量比按 0.9709∶0.0243∶0.0048 混合);2018 年番茄市场平均售价 3000。

Note: Price (Yuan·t^{-1}): $CO(NH_2)_2$ 1800; $(NH_4)_2HPO4$ 3600; K_2SO_4 3200; $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 4000; $MnSO_4 \cdot 3H_2O$ 4500; $(NH_4)_2MoO_4$ 35000; Corn straw 105; Cow dung 45; Edible fungus residue 110; Biological bacterial fertilizer 4500; The air-drying mass ratio of homemade tomato fertilizer 2852.14 ($CO(NH_2)_2$, $(NH_4)_2HPO_4$, K_2SO_4, $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$, $MnSO_4 \cdot 3H_2O$ and $(NH_4)_2MoO_4$ was 0.3687∶0.2995∶0.2765∶0.0276∶0.0184∶0.0093 mixed); The self-made straw fecal fungus residue fertilizer was 86.24 (the air-drying mass ratio of corn straw, cow dung and edible fungus residue was 0.4167∶0.33333∶0.2500); Self-made combined organic material 174.64 (straw manure fungus residue fertilizer, tomato special fertilizer, biological fungus fertilizer drying weight 0.9709∶0.0243∶0.0048); The average market price of tomato in 2018 is 3000.

2.3　有机物料组合肥与传统化肥比较对温室番茄种植田环境质量及番茄品质和效益的影响

2.3.1　土壤理化性质　连续定点试验 3 a 后,由番茄收获后测定数据可知(表 7),不同处理温室番茄种植田容重和 pH 值均表现为有机物料组合肥<传统化肥<对照;孔隙度、水稳性团聚体和 CEC 均表现为有机物料组合肥>传统化肥>对照;可溶性盐含量表现为传统化肥>有机物料组合肥>对照。有机物料组合肥与传统化肥相比,容重、总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度变化差异显著($P<0.05$),水稳性团聚体、CEC、可溶性盐和 pH 值变化差异极显著($P<0.01$);有机物料组合肥与对照相比,容重、pH 值、总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、水稳性团聚体和 CEC 变化差异极显著($P<0.01$),可溶性盐含量变化差异不显著($P>0.05$)。传统化肥与对照相比,容重和 pH 值变化差异不显著($P>0.05$),而总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度和 CEC,可溶性盐含量变化差异极显著($P<0.01$),>0.25 mm 水稳性团聚体变化差异显著($P<0.05$)。

2.3.2　持水量、有机质和有机碳含量　由表 8(见 175 页)可知,不同处理温室番茄种植田田间持水量、饱和持水量、毛管持水量、非毛管持水量、自然含水量、贮水量、有机质、有机碳和有机碳密度均表现为有机物料组合肥>传统化肥>对照。有机物料组合肥与传统化肥相比,田间持水量、自然含水量、有机质和有机碳含量变化差异极显著($P<0.01$),饱和持水量、贮水量、毛管持水量、非毛管持水量和有机碳密度变化差异显著($P<0.05$);与对照相比,田间持水量、自然含水量、饱和持水量、毛管持水量、非毛管持水量、有机质、有机碳和有机碳密度变化差异极显著($P<0.01$),贮水量变化差异显著($P<0.05$)。传统化肥与对照相比,田间持水量、自然含水量、饱和持水量、贮水量、毛管持水量、非毛管持水量、有机质、有机碳含量和有机碳密度变化差异不显著($P>0.05$)。

2.3.3　氮磷钾、微量元素和重金属含量　由表 9(见 175 页)可知,不同处理温室番茄种植田碱解氮、速效磷、速效钾、Mn、Zn 和 Mo 含量均表现为有机物料组合肥>传统化肥>对照;Hg、Cd、Cr 和 Pb 含量均表现为传统化肥>有机物料组合肥>对照。有机物料组合肥与传统化肥相比,碱解氮、速效磷、速效钾、Mn 和 Zn 含量变化差异不显著($P>0.05$),Mo、Hg、Cd、Cr 和 Pb 含量变化差异极显著($P<0.01$);与对照相比,碱解氮、速效磷、速效钾和 Mo 含量变化差异极显著($P<0.01$),Mn 和 Zn 含量变化差异显著($P<0.05$),Hg、Cd、Cr 和 Pb 含量变化差异不显著($P>0.05$)。传统化肥与对照相比,碱解氮、速效磷、速效钾、Mo、Hg、Cd、Cr 和 Pb 含量变化差异极显著($P<0.01$),Mn 和 Zn 含量变化差异显著($P<0.05$)。施用有机物料组合肥处理 Hg、Cd、Cr 和 Pb 含量虽然大于对照,但仍小于土壤污染临界值,不会对作物造成风险。

2.3.4　微生物数量和酶活性　由表 10 可知,不同处理温室番茄种植田真菌数量表现为有机物料组合肥<传统化肥<对照;细菌、放线菌数量和酶活性表现为有机物料组合肥>传统化肥>对照。有机物料组合肥与传统化肥相比,真菌、细菌数量、蔗糖酶和多酚氧化酶活性变化差异极显著($P<0.01$),放线菌数量、脲酶和磷酸酶活性变化差异显著($P<0.05$);与对照相比,真菌数量、细菌、放线菌数量、脲酶、磷酸酶、蔗糖酶和多酚氧化酶活性变化差异极显著($P<0.01$)。传统化肥与对照相比,真菌、细菌、放线菌数量、蔗糖酶和多酚氧化酶活性变化差异显著($P>0.05$),脲酶活性变化差异显著($P<0.05$),磷酸酶活性变化差异极显著($P<0.01$)。

表 7　有机物料组合肥与传统化肥比较对温室番茄种植田理化性质的影响

Table 7　Effects of combined organic material and traditional fertilizer on physicochemical properties of tomato planting field in greenhouse

试验处理 Treatment	肥料种类 Fertilizer	容重 Bulk density /(g·cm^{-3})	总孔隙度 Total porosity/%	毛管孔隙度 Capillary porosity/%	非毛管孔隙度 Non-capillary porosity/%	>0.25 mm 水稳性团聚体 > 0.25 mm water stable aggregate/%	pH	阳离子交换量 CEC /(cmol·kg^{-1})	可溶性盐 Soluble salt /(g·kg^{-1})
1	不施肥(对照) No fertilization (CK)	1.41±0.05aA	46.79±0.57cB	25.62±0.25cB	21.17±0.20cB	22.42±0.64cB	8.26±1.47aA	20.92±0.61cB	1.95±2.14bB
2	传统化肥 Traditional chemical fertilizers	1.39±0.04aA	47.55±0.58bA	26.01±0.28bA	21.54±0.22bA	22.65±0.81bB	8.24±0.96aA	21.91±1.24bB	2.27±3.16aA
3	有机物料组合肥 Combined organic materials	1.28±0.01bB	51.70±0.66aA	28.34±0.32aA	23.36±0.28aA	26.47±1.02aA	7.48±0.42bB	25.83±0.98aA	1.99±0.82bB

2.3.5 番茄品质 由表 11 可知,不同处理番茄可溶性糖、Vc、可溶性蛋白质和可溶性固形物均表现为有机物料组合肥>传统化肥>对照;硝酸盐表现为对照<有机物料组合肥<传统化肥;可滴定酸表现为有机物料组合肥<传统化肥<对照。有机物料组合肥与传统化肥相比,可溶性糖和可溶性蛋白质、硝酸盐含量变化差异显著($P<0.05$),Vc、可溶性固形物和可滴定酸含量变化差异极显著($P<0.01$);有机物料组合肥与对照相比,可溶性糖、Vc、可溶性蛋白质、可溶性固形物和可滴定酸含量变化差异极显著($P<0.01$),硝酸盐含量变化差异不显著($P>0.05$)。传统化肥与对照相比,可溶性糖、Vc、可溶性蛋白质和硝酸盐含量变化差异极显著($P<0.01$),可溶性固形物含量变化差异显著($P<0.05$),可滴定酸含量变化差异不显著($P>0.05$)。

2.3.6 番茄性状和效益 由表 12 可知,施用有机物料组合肥显著改善了番茄经济性状,提高了其经济效益。有机物料组合肥较传统化肥显著地提高了株高、茎粗、单果重、单株果重和产量。不同处理经济性状和产量均表现为有机物料组合肥>传统化肥>对照。有机物料组合肥与传统化肥相比,株高、茎粗、单果重、单株果重和产量变化差异显著($P<0.05$);与对照相比,株高、茎粗、单果重、单株果重和产量变化差异极显著($P<0.01$)。传统化肥与对照相比,株高、茎粗、单果重、单株果重和产量变化差异极显著($P<0.01$)。不同处理经济效益表现为有机物料组合肥>传统化肥。有机物料组合肥与传统化肥相比,肥料成本降低11.02%,增产值、施肥利润和肥料投资效率分别增加 27.80%、38.30% 和 55.14%。

3 讨论与结论

施用有机物料组合肥提高了温室番茄种植田有机质及有机碳和有机碳密度,本研究结果与前人一致[29]。究其原因认为有机物料组合肥丰富的有机质和有机碳带入土壤,因而提高了有机质和有机碳含量。施用有机物料组合肥温室番茄种植田容重降低,孔隙度、水稳性团聚体、田间持水量、饱和持水量、毛管持水量、非毛管持水量、自然含水量和贮水量得以提高,前人也得出了相同的结论[30]。究其原因认为,一是有机物料组合肥中的有机质使土壤松软、疏松,因此增大了孔隙度,降低了容重;二是有机物料组合肥中的有机质在土壤中进行腐殖质过程,合成的高分子有机化合物(腐殖质)促进了水

表 10 有机物料组合肥与传统化肥比较对温室番茄种植田微生物数量和酶活性的影响

Table 10 Effects of combined organic material and traditional fertilizer on microbial quantity and enzyme activities of tomato planting field in greenhouse

试验处理 Treatment	肥料种类 Fertilizer	真菌 Fungus /($10^7 \cdot g^{-1}$)	细菌 Bacteria /($10^7 \cdot g^{-1}$)	放线菌 Actinomycetes /($10^7 \cdot g^{-1}$)	蔗糖酶 Sucrase /($mg \cdot g^{-1} \cdot d^{-1}$)	脲酶 Urease /($mg \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$)	磷酸酶 Phosphatase /($g \cdot kg^{-1} \cdot d^{-1}$)	多酚氧化酶 Polyphenol oxidase /($ml \cdot g^{-1}$)
1	不施肥(对照) No fertilization (CK)	0.41±0.03aA	2.34±0.05bB	2.01±0.28 bB	155±0.31bB	1.62±0.31cB	0.31±0.01cB	1.60±0.41bB
2	传统化肥 Traditional chemical fertilizers	0.39±0.44bA	2.37±0.12bB	2.06 ±0.26bA	1.62±1.01bB	1.72±0.22bA	0.35±0.12dA	1.63±0.66bB
3	有机物料组合肥 Combined organic materials	0.35±0.01cB	2.71±0.04aA	2.20±1.01aA	1.81±0.42aA	1.85±0.40aA	0.37±0.22aA	1.80±0.02aA

表 11 有机物料组合肥与传统化肥比较对番茄品质的影响

Table 11 Effects of combined and tradional fertilizer organic material on tomato quality

试验处理 Treatment	肥料种类 Fertilizer	可溶性糖 Soluble sugar /%	Vc /($mg \cdot 100g^{-1}$)	可溶性蛋白质 Soluble protein /($mg \cdot 100g^{-1}$)	硝酸盐 Nitrate /($mg \cdot 100g^{-1}$)	可滴定酸 Titratable acid /($g \cdot kg^{-1}$)	可溶性固形物 Soluble solids /%
1	不施肥(对照) No fertilization (CK)	3.37±0.06cB	11.81±0.23cC	8.57±0.17cB	103.28±1.71c B	0.47±0.01aA	6.99±0.13cB
2	传统化肥 Traditional chemical fertilizers	4.19±0.04bA	13.57±0.16bB	9.49±0.21bA	113.11±1.18aA	0.46±0.04aA	7.52±0.16bB
3	有机物料组合肥 Combined organic materials	4.470.02aA	15.031±0.41aA	10.34±0.33aA	105.60±1.21bA	0.37±0.02bB	8.82±0.12aA

表 8　有机物料组合肥与传统化肥对温室番茄种植田持水量和有机质的影响

Table 8　Effects of combined organic material and traditional fertilizer on water capacity and organic matter of tomato planting field in greenhouse

试验处理 Treatment	肥料种类 Fertilizer	田间持水量 Field capacity /%	饱和持水量 Saturated water capacity /(t·hm^{-2})	毛管持水量 Capillary capacity /(t·hm^{-2})	非毛管持水量 Non-capillary water capacity /(t·hm^{-2})	自然含水量 Natural water content /(g·kg^{-1})	贮水量 Pondage /(m^3·hm^{-2})	有机质 Organic matter /(g·kg^{-1})	有机碳 Organic carbon /(g·kg^{-1})	有机碳密度 Organic carbon density /(kg·hm^{-2})
1	不施肥(对照) No fertilization (CK)	21.98±0.26bB	935.80±10.60bB	512.406.40bB	423.40±5.18bB	152.62±1.90bB	400.44±5.07bA	17.34±0.21bB	10.05±0.13bB	2.83±0.01bB
2	传统化肥 Traditional chemical fertilizers	22.59±0.22bB	951.00±11.88bA	520.20±5.12bA	430.80±3.228bA	156.78±1.52bB	408.05±4.33bA	18.06±0.18bB	10.48±0.11bB	2.91±0.04bA
3	有机物料组合肥 Combined organic materials	25.43±0.30aA	1034.00±12.41aA	566.80±4.38aA	467.20±4.41aA	173.25±1.43aA	429.66±2.12aA	21.18±0.24aA	12.29±0.15aA	3.15±0.02aA

表 9　有机物料组合肥与传统化肥对温室番茄种植田氮磷钾及微量元素和重金属含量的影响

Table 9　Effects of combined organic material and traditional fertilizer on contents of N, P, K, trace elements and heavy metals in greenhouse tomato planting field

试验处理 Treatment	肥料种类 Fertilizer	碱解氮 Alkali N /(mg·kg^{-1})	速效磷 Available P /(mg·kg^{-1})	速效钾 Available K /(mg·kg^{-1})	Mn /(mg·kg^{-1})	Zn /(mg·kg^{-1})	Mo /(mg·kg^{-1})	Hg /(mg·kg^{-1})	Cd /(mg·kg^{-1})	Cr /(mg·kg^{-1})	Pb /(mg·kg^{-1})
1	不施肥(对照) No fertilization (CK)	61.13±0.76bB	8.94±0.11bB	134.36±1.67bB	6.23±0.07bA	0.48±0.01bA	0.10±0.03cC	0.35±0.02dB	0.42±0.02bB	23.14±0.30bB	7.05±0.11bB
2	传统化肥 Traditional chemical fertilizers	111.04±1.38aA	13.71.±0.14aA	150.23±1.76aA	6.58±0.04aA	0.51±0.04aA	0.11±0.01bB	0.43±0.22aA	0.59±0.04aA	27.830.44aA	8.88±0.14aA
3	有机物料组合肥 Combined organic materials	112.97±aA	13.89±0.12aA	151.65±1.88aA	6.70±0.10aA	0.52±0.02aA	0.12±0.04aA	0.36±0.11bB	0.43±0.21bB	23.21±0.51bB	7.10±0.12bB

表 12　有机物料组合肥与传统化肥对番茄性状和效益的影响

Table 12　Effects of combined organic material and traditional fertilizer on tomato characters and efficiency

试验处理 Treatment	肥料种类 Fertilizer	株高 Plant height /m	茎粗 Thick stems /cm	单果重 Weight of /g	单株果重 Plant /(kg·株$^{-1}$)	产量 Yield /(t·hm^{-2})	增产值 Unit yield inceement /(万元·hm^{-2})	施肥成本 Fertilization costs /(万元·hm^{-2})	施肥利润 Fertilization profits /万元·hm^{-2})	肥料投资效率 Efficiency of fertilizer investment /(元·元$^{-1}$)
1	不施肥(对照) No fertilization (CK)	1.50±0.02cB	1.70±0.04cB	129.50±2.21cB	1.56±0.65cB	76.59±0.95cB	/	/	/	/
2	传统化肥 Traditional chemical fertilizers	1.65±0.04bA	1.92±0.06bA	152.43±1.41bA	1.71±0.44bA	95.04±1.18bA	5.54	1.18	4.36	3.70
3	有机物料组合肥 Combined organic materials	1.75±0.03aA	2.05±0.101aA	162.60±1.98aA	1.80±0.88aA	100.20±1.17aA	7.08	1.05	6.03	5.74

注:1.价格(元·吨$^{-1}$):$CO(NH_2)_2$ 1800;$(NH_4)_2HPO_4$ 3600;K_2SO_4 3200;$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 4000;$MnSO_4 \cdot 3H_2O$ 4500;$(NH_4)_2MoO_4$ 35000;有机物料组合肥 174.64。2.传统化肥施肥成本 1.18 万元($CO(NH_2)_2$ 1.46 t·hm^{-2}+$(NH_4)_2HPO_4$ 0.80 t·hm^{-2}+K_2SO_4 1.64 t·hm^{-2})+$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.04 t·hm^{-2}+$MnSO_4 \cdot 3H_2O$ 0.04 t·hm^{-2}+$(NH_4)_2MoO_4$ 0.02 t·hm^{-2}。3.有机物料组合肥 1.05 万元(施肥量 60.00 t·hm^{-2})。4.2021 年番茄市场平均售价 3000 元·t^{-1}。

Note:1. Price (YUAN·t^{-1}): $CO(NH_2)_2$ 1800; $(NH_4)_2HPO_4$ 3600; K_2SO_4 3200; $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 4000; $MnSO_4 \cdot 3H_2O$ 4500; $(NH_4)_2MoO_4$ 35000; Combined organic materials 174.64. 2. The fertilization cost of traditional fertilizer is 11,800 Yuan ($CO(NH_2)_2$ 1.46 t·hm^{-2}+$(NH_4)_2HPO_4$ 0.80 t·hm^{-2}+K_2SO_4 1.64 t·hm^{-2}) +$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.04 t·hm^{-2}+$MnSO_4 \cdot 3H_2O$ 0.04 t·hm^{-2}+$(NH_4)_2MoO_4$ 0.02 t·hm^{-2}. 3. Combined organic material 10 500 Yuan (fertilizer amount 60.00 t·hm^{-2}). 4. The average market price of tomato in 2021 is 3 000 Yuan·t^{-1}.

稳性团聚体的形成;三是有机物料组合肥在土壤中合成的腐殖质吸水率比黏土大,因而提高了持水量和贮水量。施用有机物料组合肥温室番茄种植田 CEC 增大,pH 值和可溶性盐降低,此结论与前人研究结果相一致。究其原因认为,一是有机物料组合肥在土壤中合成的腐殖质带负电荷,吸附了土壤中的阳离子,因而提高了阳离子交换量;二是有机物料组合肥在分解过程中产生的有机酸降低了 pH 值;三是有机物料组合肥在土壤中合成的腐殖质是一种含有酚羟基、羧基、甲氧基等多功能团的弱酸,因而降低了 pH 值;四是有机物料组合肥盐基离子含量比化肥低,因而降低了可溶性盐含量。施用有机物料组合肥温室番茄种植田碱解氮、速效磷、速效钾、Mn 和 Zn 含量差异不显著,究其原因是为了使试验具有可比性,在试验设计中有机物料组合肥和传统化肥投入的 N、P_2O_5、K_2O、Zn 和 Mn 纯养分投入量相等。施用有机物料组合肥温室番茄种植田真菌数量降低,细菌和放线菌数量增加,究其原因一是有机物料组合肥施入土壤改变了土壤环境条件,增加了有益微生物的数量,促进了细菌和放线菌的繁殖,抑制了真菌的生长发育;二是有机物料组合肥中的有机质及大量元素和微量元素为微生物生长发育提供了碳源和营养物质,促进了细菌和放线菌的繁殖。有机物料组合肥比传统化肥显著地提高了温室番茄种植田脲酶和磷酸酶活性,极显著地提高了蔗糖酶和多酚氧化酶活性,本结论与前人研究结果相吻合[31],究其原因一是有机物料组合肥含有丰富的有机碳,酶吸附在有机碳上为酶创造了良好的土壤生态环境条件,提高了酶的活性。施用有机物料组合肥温室番茄种植田 Hg、Cd、Cr 和 Pb 含量比对照分别增加 2.86%、2.38%、0.30% 和 0.71%,但含量仍小于土壤污染临界值[32],说明研究区域有机物料组合肥重金属含量较低,不会对作物造成风险,究其原因是有机物料组合肥中的牛粪和食用菌渣把重金属离子带入土壤[33]。而李传哲等[34]研究得出施用不同种类的有机物料可使土壤重金属离子增幅为 0.90%~369.12%,此研究结果与本研究不一致,可能与研究区域有机物料重金属离子含量有关。施用有机物料组合肥番茄农艺性状、经济性状、产量和品质表现为株高、茎粗、单果重、单株果重、产量、可溶性糖、Vc 和可溶性蛋白质含量提高,硝酸盐和可滴定酸含量降低。究其原因是有机物料组合肥含有丰富的有机质及大量元素和微量元素,促进了番茄的生长发育,因而提高了番茄产量,改善了其品质。而李会合等[35]研究发现有机肥处理降低了生菜 Vc 和可溶性糖含量,提高了硝酸盐含量,马国泰等[36]研究认为畜禽粪便肥施用量增加后,辣椒 Vc 含量和硝酸盐含量显著下降,该研究结果与本研究结论不尽相同,有待今后进一步研究。

有机物料组合肥原料间的主次效应表现为番茄专用肥>秸秆粪便菌渣肥>生物菌肥。施用有机物料组合肥与传统化肥相比,温室番茄种植田孔隙度、水稳性团聚体、CEC、持水量、有机质、有机碳、有机碳密度、碱解氮、速效磷、速效钾、Mn、Zn、Mo、细菌、放线菌、酶活性、番茄品质、经济性状和产量变化顺序为有机物料组合肥>传统化肥>对照;Hg、Cd、Cr 和 Pb 含量变化顺序为传统化肥>有机物料组合肥>对照;温室番茄种植田容重、pH 值、真菌数量变化顺序为有机物料组合肥<传统化肥<对照;可溶性盐含量变化顺序为对照<有机物料组合肥<传统化肥。与传统化肥相比,有机物料组合肥显著提高了温室番茄种植田孔隙度、水稳性团聚体、CEC、持水量、有机质、有机碳、有机碳密度、碱解氮、速效磷、速效钾、Mn、Zn、Mo、细菌、放线菌数量、脲酶、磷酸酶、蔗糖酶和多酚氧化酶活性、番茄可溶性糖、可溶性蛋白质、Vc、可溶性固形物、单果重、单株果重、产量、施肥利润和肥料投资效率,降低了温室番茄种植田容重、可溶性盐、pH 值、真菌数量、重金属含量和番茄硝酸盐和可滴定酸。常规化肥则提高了温室番茄种植田重金属、可溶性盐、番茄硝酸盐和可滴定酸含量,对温室番茄种植田有机质、容重、孔隙度和团聚体、微生物数量和酶活性无显著影响。本研究的创新之处在于将秸秆粪便菌渣肥的缓效、番茄专用肥的速效、生物菌肥的增效作用融为一体,源源不断的为番茄生长发育提高营养,解决了长期施用传统化肥土壤有机质含量低、土壤质量下降的问题。施用有机物料组合肥替代传统化肥改善了温室番茄种植田理化性质和番茄品质,提高了温室番茄种植田有机质和番茄经济效益,促进了农业废弃物资源的循环利用,为保障番茄安全生产提供了技术支撑。

参 考 文 献:

[1] 王晓巍, 张玉鑫, 马彦霞, 等. 甘肃省蔬菜产业现状及推进发展对策[J]. 甘肃农业科技, 2017,(7): 67-71.
WANG X W, ZHANG Y X, MA Y X, et al. Current situation and countermeasures of vegetable industry in Gansu Province[J]. Gansu Agricultural Science and Technology, 2017,(7): 67-71.

[2] 侯格平, 甄东升, 孙宁科, 等. 河西走廊蔬菜日光温室土壤次生盐渍化现状及改良对策[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2018, 38(1): 48-54.

HOU G P, ZHEN D S, SUN N K, et al. Study on soil degradation in greenhouse in Hexi corridor area[J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Nature Science Edition), 2018, 38(1): 48-53.

[3] 杨玉珍, 孟超然, 张新疆, 等. 氮、钾肥用量对膜下滴灌加工番茄产量和品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017,(1): 61-67.
YANG Y Z, MENG C R, ZHANG X J, et al. Effect of nitrogen and potassium fertilizer on yield and quality of processing tomato under drip irrigation with plastic film mulching[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2017,(1): 61-67.

[4] 贺志文, 李灵芝, 任瑞娴, 等. 不同钾肥种类及配比对大棚番茄产量及品质的影响[J]. 江西农业学报, 2018, 30(7): 73-76.
HE Z W, LI L Z, REN R X, et al. Effects of different kinds and proportions of potassium fertilizer on yield and quality of tomato in greenhouse[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2018, 30(7): 73-76.

[5] 成钢, 夏莹, 安玉玲, 等. 洞庭湖区羊粪资源化利用现状与技术探讨[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2019,(6): 44-46.
CHENG G, XIA Y, AN Y L, et al. Current situation and technical discussion on the resource utilization of sheep manure in Dongting Lake region [J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2019,(6): 44-46.

[6] 冯焕德, 党志国, 倪斌, 等. 羊粪发酵肥替代化肥对芒果园土壤性状、叶片营养及果实品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019,(6): 190-195.
FENG H D, DANG Z G, NI B, et al. Effects of sheep fermentation fertilizer substituting for different quantities of chemical fertilizer on soil characters, leaf nutrition and fruit quality in mango orchard[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2019,(6): 190-195.

[7] 陈晓东, 吴景贵, 范围, 等. 有机物料对原生盐碱土微团聚体特征及稳定性的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(2): 201-207.
CHEN X D, WU J G, FAN W, et al. Effect of organic materials on the characteristics and stability of micro-aggregates in the native saline-alkalisoil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(2): 201-207.

[8] 王超, 姜坤, 卢瑛, 等. 不同有机物料施用对砖红壤团聚体组成和稳定性的影响[J]. 土壤通报, 2019, 50(6): 1328-1334.
WANG C, JIANG K, LU Y, et al. Effects of different organic material application on aggregate composition and stability of latosol [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, 50(6): 1328-1334.

[9] 郭军玲, 金辉, 郭彩霞, 等. 不同有机物料对苏打盐化土有机碳和活性碳组分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(8): 1290-1299.
GUO J L, JIN H, GUO C X, et al. Effects of organic materials on soil organic carbon and fractions of active carbon in soda saline soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(8): 1290-1299.

[10] 李娟, 韩慧, 常少刚, 等. 羊粪有机肥施用量对沙地甘蓝生长和产量及土壤化学性质的影响[J]. 上海农业学报, 2019, 35(6): 97-101.
LI J, HAN H, CHANG S G, et al. Effects of sheep manure organic fertilizer application rate on growth, yield of *Brassica oleracea* and soil chemical properties in sandy land [J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2019, 35(6): 97-101.

[11] 刘志平, 武雪萍, 李若楠, 等. 温室滴灌条件下施用鸡粪和磷肥对土壤磷素的影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52(20): 3637-3647.
LIU Z P, WU X P, LI R N, et al. Effect of applying chicken manure and phosphate fertilizer on soil phosphorus under drip irrigation in greenhouse [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52 (20): 3637-3647.

[12] 侯建伟, 邢存芳, 严学佳, 等. 不同物料和时间对沙土全量氮磷钾含量的影响[J]. 南方农业, 2020, 14(14): 128-129, 132.
HOU J W, XING C F, YAN X J, et al. Effects of different materials and time on total nitrogen, phosphorus and potassium content in sandy soil [J]. South China Agriculture, 2020, 14 (14): 128-129, 132.

[13] 邰凤雷, 张全力, 李占行, 等. 防病虫生物菌肥对番茄根结线虫防控试验简报[J]. 基层农业推广, 2020, 8(8): 26-28.
TAI F L, ZHANG Q L, LI Z X, et al. Brief report on the experiment of controlling tomato root knot nematode with biological fertilizer[J]. Primary Agricultural Technology Extension, 2020, 8(8): 26-28.

[14] 毛涛, 王勤礼, 赵蕊, 等. 有机生态肥对日光温室土壤有机质和番茄的影响[J]. 甘肃农业科技, 2020,(9): 13-17.
MAO T, WANG Q L, ZHAO R, et al. Effects of organic ecological fertilizer on soil organic matter and tomato in solar greenhouse[J]. Gansu Agricultural Science and Technology, 2020,(9): 13-17.

[15] 赵海东, 宋江, 向阳, 等. 小麦秸秆基高分子缓释肥在番茄中的应用效果[J]. 湖北农业科学, 2019, 58(9): 52-57.
ZHAO H D, SONG J, XIANG Y, et al. The application effect of wheat straw-based polymer slow release fertilizer in tomato[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2019, 58(9): 52-57.

[16] 刘慧, 史津玮, 张国显, 等. 蚓粪替代化肥对土壤磷素组分和番茄产量的影响[J]. 北方园艺, 2020,(10): 104-110.
LIU H, SHI J W, ZHANG G X, et al. Effects of earthworm manure replacing chemical fertilizer on phosphorus components in facility soil [J]. Northern Horticulture, 2020,(10): 104-110.

[17] 闫翠侠, 贾宏涛, 孙涛, 等. 鸡粪生物炭表征及其对水和土壤镉铅的修复效果[J]. 农业工程学报, 2019, 35(13): 225-233.
YAN C X, JIA H T, SUN T, et al. Characteristics of chicken manure biochars and its effect on Cd and Pb remediation in water and soil [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(13): 225-233.

[18] 悦飞雪, 李继伟, 王艳芳, 等. 施用秸秆生物炭和鸡粪对镉胁迫下玉米生长及镉吸收的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(10): 2118-2126.
YUE F X, LI J W, WANG Y F, et al. Effects of soil amendments with stalk-derived biochar and chicken manure on the growth and Cd uptake of maize under Cd stress[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(10): 2118-2126.

[19] 黄会前, 何腾兵, 李阳, 等. 长期施用猪粪土壤的重金属含量及风险评价[J]. 西南农业学报, 2018, 31(4): 824-829.
HUANG H Q, HE T B, LI Y, et al. Contents of heavy metals and risk assessment in soils with long-term application of swine manure [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2018, 31(4): 824-829.

[20] 宋姿蓉, 俄胜哲, 袁金华, 等. 不同有机物料对灌漠土重金属累积特征及作物效应的影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52(19): 3367-3379.
SONG Z R, E S Z, YUAN J H, et al. Heavy metal accumulation in irrigated desert soils and their crop effect after applying different organic materials [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52 (19): 3367-3379.

[21] 丛源欣, 吴起汉, 陈璐, 等. 牛粪与秸秆配施对玉米体内镉积累

及亚细胞分布的影响[J]. 土壤通报, 2019, 50(3): 725-731.
CONG Y X, WU Q H, CHEN L, et al. Effects of combined application of cow manure and straw on cadmium uptake and subcellular distribution in maize[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, 50(3): 725-731.

[22] 刘红明, 张晓梅, 李进学, 等. 化肥羊粪配施对火龙果果实品质动态及矿质营养元素的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2017, 32(6): 1079-1084.
LIU H M, ZHANG X M, LI J X, et al. Effects of sheep excrement application with chemical fertilizers on dynamic quality and mineral nutrition of pitaya[J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2017, 32(6): 1079-1084.

[23] 王乐, 何平如, 张红玲, 等. 秸秆深埋和覆膜对土壤水盐及番茄产量的影响[J]. 水土保持研究, 2020, 27(3): 372-378.
WANG L, HE P R, ZHANG H L, et al. Effects of straw burying and film mulching on soil water-salt and yield of tomato[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(3): 372-378.

[24] 刘中良, 张艳艳, 谷端银, 等. 农业废弃物还田对番茄品质、产量及土壤氮磷钾的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(7): 639-644.
LIU Z L, ZHANG Y Y, GU D Y, et al. Effects of recycled agricultural wastes on tomato quality, yield and soil NPK nutrient content in protected house[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2018, 36(7): 639-644.

[25] 刘传云, 管西林, 邹春琴, 等. 不同有机物料对设施黄瓜生长及土壤性状的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(2): 360-368.
LIU C Y, GUAN X L, ZOU C Q, et al. Effects of different organic materials on the growth of greenhouse cucumber and soil properties [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(2): 360-368.

[26] 李春喜, 刘晴, 邵云, 等. 有机物料还田和减施氮肥对麦-玉周年农田碳氮水足迹及经济效益的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(4): 527-536.
LI C X, LIU Q, SHAO Y, et al. Effects of organic material returning and nitrogen fertilizer reduction on the economic yields and carbon, nitrogen, and water footprints of wheat-maize annual farmland in China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2020, 37(4): 527-536.

[27] 张怀志, 唐继伟, 袁硕, 等. 化肥减施对日光温室越冬长茬番茄氮肥利用率及去向的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(7): 1295-1302.
ZHANG H Z, TANG J W, YUAN S, et al. Effect of fertilizer reduction on nitrogen utilization efficiency and fate during overwinter long-season tomato production in greenhouse[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(7): 1295-1302.

[28] 任寒硕, AZEEM M, 孙吉翠, 等. 沼液与化肥不同比例配施对番茄产量和品质的影响[J]. 中国瓜菜, 2020, 33(9): 34-38.
REN H S, AZEEM M, SUN J C, et al. Effect of different ratios of biogas slurry and chemical fertilizer on the yield and quality of tomato [J]. China Cucurbits and Vegetables, 2020, 33(9): 34-38.

[29] 王梦雅, 符云鹏, 黄婷婷, 等. 等碳量添加不同有机物料对土壤有机碳组分及土壤呼吸的影响[J]. 中国烟草学报, 2018, 24(2): 65-73.
WANG M Y, FU Y P, HUANG T T, et al. Effects of organic material application on organic carbon in and respiration of soil[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2018, 24(2): 65-73.

[30] 曲成闯, 陈效民, 韩召强, 等. 生物有机肥对潮土物理性状及微生物量碳、氮的影响[J]. 水土保持通报, 2018, 38(5): 70-76.
QU C C, CHEN X M, HAN Z Q, et al. Effects of bioorganic fertilizer application on soil physical properties and microbial biomass carbon and nitrogen in fluvoaquic soil[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(5): 70-76.

[31] 许晓玲, 呼世斌, 刘晋波, 等. 蘑菇渣和畜禽粪便复配蚯蚓堆肥过程中理化指标和酶活性变化研究[J]. 环境工程, 2018, 36(7): 122-127.
XU X L, HU S B, LIU J B, et al. Changes of physicochemical properties and enzyme activities in vermicomposting of animal manure with different proportions of mushroom residues[J]. Environmental Engineering, 2018, 36(7): 122-127.

[32] 彭丽, 孙勃岩, 王权, 等. 陕西杨凌规模化养殖场饲料及粪便中养分和重金属含量分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(5): 123-129, 138.
PENG L, SUN B Y, WANG Q, et al. Contents of nutrients and heavy metals in feeds and manure at intensive livestock farms in Yangling, Shaanxi[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2017, 45(5): 123-129, 138.

[33] 袁凯, 熊苏雅, 梁静, 等. 畜禽粪便中铜和锌污染现状及风险分析[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(8): 1837-1842.
YUAN K, XIONG S Y, LIANG J, et al. Status and risk analysis of copper and zinc pollution in livestock manure[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(8): 1837-1842.

[34] 李传哲, 杨苏, 姚文静, 等. 有机物料输入对土壤及玉米籽粒重金属来源解析及风险评估[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(6): 1230-1239.
LI C Z, YANG S, YAO W J, et al. Source analysis and pollution risk assessment of heavy metals in soil and maize grain through the application of organic materials[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(6): 1230-1239.

[35] 李会合,王正银.不同有机肥料对生菜产量及品质的影响[J]. 河南农业大学学报,2007, 41(1):29-32.
LI H H, WANG Z Y. Effects of manures on yield and quality of romaine lettuce[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2007,41(1):29-32.

[36] 马国泰, 杨继刚, 关天霞, 等. 畜禽粪便来源的有机肥对辣椒品质的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2018,(4): 34-38.
MA G T, YANG J G, GUAN T X, et al. Effect of organic fertilizer derived from livestock manure on the quality of hot pepper[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2018,(4): 34-38.