



周冉冉,马司光,张文晶,等.生物炭与生物基质对设施黄瓜连作土壤改良效果研究[J].江西农业大学学报,2021,43(3):537-546.

ZHOU R R,MA S G,ZHANG W J,et al.The effect of biochar and biological substrate on soil amending under protected cucumber continuous cropping[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2021,43(3):537-546.

# 生物炭与生物基质对设施黄瓜 连作土壤改良效果研究

周冉冉<sup>1</sup>,马司光<sup>1</sup>,张文晶<sup>1</sup>,王 晗<sup>1</sup>,鲁 凡<sup>1</sup>,蔡 忠<sup>2</sup>,郭世荣<sup>1\*</sup>

(1.南京农业大学 园艺学院,江苏 南京 210095;2.江苏兴农基质科技有限公司,江苏 镇江 212016)

**摘要:**【目的】设施栽培中常常连年种植,导致连作障碍的发生。连作障碍引起土壤质量下降,生产力降低,作物产量和品质下降,制约了设施蔬菜的发展。同时,我国是食醋和食用菌生产大国,每年产生大量的醋糟、菇渣等有机废弃物。旨在有效利用醋糟、菇渣等有机废弃物,并解决设施蔬菜土壤连作障碍。【方法】设置商品土壤改良剂(C)、单一生物炭(B)、生物基质(VM)和生物炭+生物基质(VMB,1:1)4个处理和对照(CK),进行盆栽试验。研究生物炭和醋糟、菇渣生物基质对设施栽培黄瓜连作土壤理化性质、土壤酶活性、产量及品质的影响,并评价改良剂对土壤持续改良的效果。【结果】连种两茬后,不同处理均可提高土壤pH,缓解了土壤酸化;同时,基质改良剂增加了土壤养分含量,显著提高土壤速效养分,速效氮含量分别比CK增加46.97%,18.18%,21.21%和71.21%,速效磷含量分别比CK增加70.26%,36.30%,35.16%和38.10%,速效钾含量分别比CK增加76.80%,3.08%,84.31%和82.13%;生物炭+生物基质处理还显著增加土壤蔗糖酶、脲酶、磷酸酶、过氧化氢酶、蛋白酶和多酚氧化酶活性,分别较CK增加81.06%,133.33%,27.73%,42.11%,12.5%和58.92%;与对照相比,生物炭+生物基质处理黄瓜植株总干质量增加41.38%、根系活力增加170.90%、果实产量增加28.56%。而且,主成分分析表明土壤养分和土壤酶活均正向影响产量。【结论】将生物发酵腐熟的醋糟和菇渣按3:1体积比进行混合形成生物基质,生物基质与水稻秸秆生物炭按1:1体积比进行混合形成土壤改良剂,按障碍土壤与土壤改良剂10:1的体积比施入土壤改良效果较好,且具有持续改良效果。

**关键词:**土壤改良剂;连作障碍;黄瓜;土壤酶活;持续改良

中图分类号:S156.99;S626.9 文献标志码:A 文章编号:1000-2286(2021)03-0537-10

## The Effect of Biochar and Biological Substrate on Soil Amending under Protected Cucumber Continuous Cropping

ZHOU Ranran<sup>1</sup>,MA Siguang<sup>1</sup>,ZHANG Wenjing<sup>1</sup>,WANG Han<sup>1</sup>,  
LU Fan<sup>1</sup>,CAI Zhong<sup>2</sup>,GUO Shirong<sup>1\*</sup>

(1.College of Horticulture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2.Jiangsu Xingnong Substrate Technology Co.,Ltd., Zhenjiang, Jiangsu 212016, China)

收稿日期:2020-10-31 修回日期:2021-01-20

基金项目:国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-23-B12)和江苏省科技支撑计划项目(BE2017701)

Project supported by the National Modern Agricultural Industrial Technology System Construction Special Project (CARS-23-B12)and Jiangsu Province Science and Technology Support Program Project(BE2017701)

作者简介:周冉冉,orcid.org/0000-0003-2114-8373,1605787985@qq.com;\*通信作者:郭世荣,教授,博士生导师,主要从事设施园艺与蔬菜生理研究,orcid.org/0000-0003-4308-2256,srguo@njau.edu.cn。

**Abstract:** [Objective] Continuous cropping frequently occurs in the protected cultivation system, which results in continuous cropping obstacle phenomenon. Continuous cropping obstacles will cause decline of soil quality, productivity, crop yield and quality, which restricts the development of facility vegetables. At the same time, China is a big producer of vinegar and edible fungi. And a large amount of vinegar, mushroom residues and other organic wastes are produced every year. This study aims at using organic wastes effectively, such as vinegar and mushroom residues and solving the continuous soil cropping obstacles of greenhouse vegetables. [Method] the study set up controls (CK) and four treatments of commercial soil amendment (C), single biochar (B), biological substrate (VM), and biochar + biological substrate (VMB, 1:1). Pot test was carried out to study the effects of biochar, vinegar residue and mushroom residue on soil physico-chemical properties, soil enzyme activity, yield and quality of continuous cropping cucumber under protected cultivation. And sustainable effects of the amendments on the continuous cropping soil under cultivated cucumber were evaluated. [Result] The results showed that after two consecutive crops, different treatments could increase soil pH, and alleviate soil acidification. Meanwhile, substrate amendment increased the soil nutrient content and significantly increased soil available nutrients. Available nitrogen content increased by 46.97%, 18.18%, 21.21%, 71.21% compared to CK. Available phosphorus content increased by 70.26%, 36.30%, 35.16%, 38.10% compared to CK. Available potassium content increased by 76.80%, 3.08%, 84.31%, 82.13%, respectively. Biochar + biological substrate treatment also significantly increased the activities of soil invertase, urease, phosphatase, catalase, proteinase, and polyphenol oxidase, which increased by 81.06%, 133.33%, 27.73%, 42.11%, 12.5%, 58.92%, respectively, compared with CK. Compared with the control, the total dry weight, root activity and fruit yield of cucumber plants treated with biochar + biological substrate increased by 41.38%, 170.90% and 28.56%, respectively. Furthermore, the principal component analysis showed that both soil nutrients and soil enzyme activity had positive effects on yield. [Conclusion] Therefore, the soil amendments of biological substrate of fermented vinegar residue and mushroom residue mixed at a volume ratio of 3:1, and biological substrate and rice straw biochar mixed at a volume ratio of 1:1 had better soil improvement effect when used at a volume ratio of 10:1 of obstacle soil and soil amendments, and the improvement effect was sustainable.

**Keywords:** soil amendment; continuous cropping obstacle; cucumber; soil enzyme activity; sustainable amending

【研究意义】近年来我国设施产业不断发展,设施栽培面积迅速增加。但由于集约化种植,复种指数较高,连作障碍成为制约设施蔬菜发展的主要瓶颈<sup>[1]</sup>。连作障碍引起了作物生长状况变差,作物产量降低,同时还导致设施土壤酸化、次生盐渍化、土壤养分缺失,土壤酶活性紊乱、自毒物质积累,微生物群落失衡等现象<sup>[2]</sup>。【前人研究进展】有研究表明作物连作后土壤容重增大,保肥能力下降,且土壤酸化盐渍化加重<sup>[3]</sup>。目前,黄瓜作为设施蔬菜主要作物普遍栽培,连年栽培已经引起了黄瓜设施土壤酸化,产量和品质下降等问题。有机材料具有丰富的营养且能够改善土壤环境,为有益微生物提供了有利的生长环境,并增加了一些土壤酶的活性。土壤酶作为一类活性物质可以促进土壤有效养分的增加,并且可以表征土壤质量<sup>[4]</sup>。因此,施用有机材料提高土壤保肥能力,增加土壤酶活性,提高土壤可持续生产力是解决连作障碍的有效方式。我国是食醋和食用菌生产大国,每年醋糟、菇渣废弃物排出约200万吨<sup>[5]</sup>,有效利用醋糟、菇渣等有机废弃物意义重大。大量研究发现,有机固体废弃物(如园林废弃物、醋糟、生物炭、木薯渣、动物粪便等)经过生物发酵充分腐熟后形成的生物基质具有较好的理化性质,含有丰富的营养物质,含有促进植物生长、抑制病原菌繁殖的促生菌,可以用来改良土壤的理化性质,提高土壤肥力,促进作物的生长等<sup>[6-9]</sup>。生物炭源自部分烧焦有机物富含碳的残渣材料,作为土壤改良剂已被广泛研究。它具有较大的比表面积和丰富的孔隙结构,且表面富含较多的活性氧基团,已有研究表明生物炭具有提高土壤肥力、固碳减排、缓解连作障碍的作用<sup>[10-11]</sup>。【本研究切入点】然而,目前大量研究仅探讨单一改良剂对土

壤性状及作物产量的影响<sup>[12-13]</sup>,或者研究连作条件下土壤性状的变化<sup>[14-15]</sup>,一次性施入单一或混配改良剂对连作土壤的持续效应研究却鲜有报道。【拟解决的关键问题】为提高有机废弃物和生物炭的资源利用率,本试验将单一生物炭、生物基质及混配改良剂一次性施入连作土壤,连续种植两茬后测定土壤理化性状、土壤酶活及黄瓜生长指标,探索改良剂对土壤养分的保持和连作障碍的缓解作用,为促进农业可持续发展提供思路。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 试验材料

供试黄瓜(*Cucumis sativus* L.)品种为‘津春4号’,由天津科润农业科技股份有限公司黄瓜研究所提供;供试连作土壤为南京林业大学现代农业生态园连栋塑料大棚内连续种植9年黄瓜等瓜类蔬菜的土壤,供试土壤的理化性状:酸碱度(pH)5.97、电导率(EC)1.49 mS/cm、全氮1.38 g/kg、全磷1.02 g/kg、全钾10.91 g/kg和有机质12.15 g/kg;供试生物炭为水稻秸秆炭,由镇江泽地农业生物科技有限公司提供;供试醋糟和菇渣生物基质由江苏兴农基质科技有限公司提供;供试商品土壤改良剂为连作障碍微生物修复基质,由江平生物基质技术股份有限公司提供。各供试材料的理化性状如表1所示。

表1 土壤改良剂材料的理化性状

Tab.1 Physico-chemical properties of soil amending materials

材料 Material	酸碱度 pH	电导率/ (mS·cm <sup>-1</sup> ) EC	容重/ (g·cm <sup>-3</sup> ) Bulk density	总孔隙/% Total porosity	有机碳/ (g·kg <sup>-1</sup> ) Organic carbon	总氮/ (g·kg <sup>-1</sup> ) Total N	总磷/ (g·kg <sup>-1</sup> ) Total P	总钾/ (g·kg <sup>-1</sup> ) Total K
商品土壤改良剂 Commercial soil amendments	7.75	3.75	0.72	45.37	69.53	7.52	1.90	3.57
生物炭 Bio-charcoal	10.39	2.41	0.31	69.57	563.36	0.73	1.00	5.09
醋糟基质 Vinegar substrate	6.78	5.18	0.11	89.64	422.18	38.07	1.48	2.38
菇渣基质 Mushroom substrate	7.48	3.30	0.30	48.06	287.03	23.18	7.16	4.64

### 1.2 试验方法

于2019年2—6月在南京农业大学牌楼教学基地温室内进行土壤改良第一茬试验。醋糟基质、菇渣基质以3:1体积比进行混合用作生物基质(VM)改良剂。试验设连作土壤对照(CK)、商品土壤改良剂(C)和单一生物炭(B)、生物基质(VM)、生物炭+生物基质(VMB,1:1)5个实验处理,将单一改良剂或混配改良剂一次性与连作土壤以1:10(V:V)混合,即土壤改良剂施用量约每667 m<sup>2</sup>施用13.35 m<sup>3</sup>。采用盆栽试验,每个处理均种植30盆,随机排列。第一茬改良过程中不添加任何无机肥料;第一茬结束收集改良土壤,于2019年8—12月在南京农业大学白马基地继续盆栽种植,不再添加改良剂,进行第二茬种植。试验中所有处理每隔3 d均浇灌1次1/2浓度的Hoagland营养液以供黄瓜生长,其他时间视情况补浇清水,同时按照常规温室栽培措施管理。收获后,每个处理随机采集土壤样品,并将其混合成3个生物学重复用于指标测定。土壤分为两部分,分别用于土壤理化性状与土壤酶活的测定。

### 1.3 测定方法

1.3.1 土壤理化性质测定 第二茬黄瓜拉秧后,一部分土壤风干、过筛(0.25 mm)保存于4℃测定理化性状。土壤pH和EC分别采用Spectrum's pH400 Meter和Direct Soil EC Meter测定;土壤含水率采用风干土壤烘干至恒重的失水率测定;土壤有机碳采用重铬酸钾外加热法测定;土壤全氮含量采用凯氏定氮法测定;土壤速效氮含量采用碱解扩散滴定法测定;土壤速效磷含量采用碳酸氢钠比色法测定;土壤速效钾含量采用乙酸铵浸提-原子分光光度计测定;土壤采用H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>消煮,消煮液采用等离子体发射仪(ICP)测定土壤全磷、全钾、钙镁元素含量<sup>[18]</sup>。

1.3.2 土壤酶活测定 另一部分新鲜土壤样品测定根际土壤蔗糖酶、脲酶、磷酸酶、过氧化氢酶、蛋白酶、多酚氧化酶活性<sup>[19]</sup>。土壤蔗糖酶活性采用3,5-二硝基水杨酸比色法测定;土壤脲酶活性采用苯酚钠-次氯酸钠比色法测定。土壤磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定;土壤过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法测定;土壤蛋白酶采用茚三酮比色法测定;土壤多酚氧化酶采用邻苯三酚比色法测定。

1.3.3 植株生长、根系活力及叶绿素含量测定 第二茬黄瓜定植20 d后(初花期)测定株高、茎粗并对植株拍照,分析各处理间植株表型差异。然后将幼苗放入烘箱105℃杀青20 min,再置于75℃烘干至恒质量,测定总干质量。不同处理另取3株长势一致幼苗清洗根系,擦干,取0.5 g根尖样品,采用氯化三苯基四氮唑(TTC)比色法测定根系活力<sup>[16]</sup>。同时剪取同一叶位叶片0.2 g,采用乙醇、丙酮混合浸泡比色法测定叶绿素含量<sup>[17]</sup>。

1.3.4 果实品质及产量测定 在第二茬黄瓜结果期各处理选取同一节位的果实测定可溶性糖、Vc、可溶性蛋白的含量。可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定;Vc含量采用2,6-二氯酚靛酚滴定法测定;可溶性蛋白质含量采用考马斯亮蓝法测定<sup>[14]</sup>。第二茬生长过程中每个处理选取长势一致的5株黄瓜进行标记,结果期记录每次采收的单株结果数及单果质量,最终统计单株总质量及总产量。

## 1.4 数据分析

采用Excel 2013和SPSS 22.0软件对数据进行统计分析,使用单因素方差分析不同改良剂对连作土壤理化性状、土壤酶活性及黄瓜生长的影响。采用Duncan法进行多重比较,以最小显著差数法(LSD)分析差异显著性( $P < 0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤改良剂对连作土壤理化性质的影响

由表2可知,不同处理均可缓解土壤酸化,提高连作土壤营养元素含量,增加土壤含水量,提升土壤质量。4个处理均显著提高土壤pH,C处理pH提高到7.25。同时,C处理提升土壤有机碳含量、总氮含量、总磷含量最为显著,分别较CK增加32.85%、31.45%和15.79%,其次为VMB处理较为显著,分别较CK增加23.85%、26.42%和6.77%。各处理间总钾含量并无显著差异。C、B、VM和VMB处理均显著提高土壤速效养分,速效氮含量分别比CK增加46.97%、18.18%、21.21%和71.21%,速效磷含量分别比CK增加70.26%、36.30%、35.16%和38.10%,速效钾含量分别比CK增加76.80%、3.08%、84.31%和82.13%。同时C处理显著增加钙元素含量,其他处理与CK相比钙镁元素含量并无显著差异。

### 2.2 土壤改良剂对连作土壤酶活性的影响

由表3可知,不同处理均可增加连作黄瓜根际土壤酶活性,其中VMB处理最为显著。VMB处理提高土壤蔗糖酶、磷酸酶、多酚氧化酶活性最高,分别比CK增加81.06%、27.73%和58.92%。VMB处理与CK相比,脲酶、过氧化氢酶、蛋白酶也有显著差异,分别增加133.33%、42.11%和12.5%。

### 2.3 土壤改良剂对连作黄瓜生长的影响

由图1可知,不同处理均提高黄瓜株高、茎粗和总干质量,促进黄瓜生长。其中VMB处理效果最为显著,其株高、茎粗和总干质量分别比CK增加39.46%、30.99%和41.38%。C、B和VM处理总干质量分别增加13.00%、16.45%和38.22%。从表4可以看出,VM和VMB处理显著增加叶绿素a含量,分别比CK提高54.80%和40.67%。C和VMB处理显著增加叶绿素b含量,分别比CK增加18.18%和22.38%。但不同处理与CK相比,叶绿素a/b并没有显著差异。此外,不同处理也显著提高了黄瓜根系活力,C、B、VM和VMB处理根系活力分别比CK增加102.37%、197.35%、132.80%和170.90%(表4)。

### 2.4 土壤改良剂对连作黄瓜果实品质及产量的影响

由表5可知,不同处理均提高黄瓜果实可溶性糖和可溶性蛋白含量。VM和VMB处理显著提高可溶性糖含量,分别较CK增加92.89%、93.87%。B、VM和VMB处理显著提高可溶性蛋白含量,分别较CK增加76.28%、37.64%和32.37%。各处理间Vc含量没有显著差异,只有VM和VMB处理略有提高。不同处理均提高连作黄瓜产量,而VMB处理效果最佳,较CK增加28.56%。

表 2 土壤改良剂对土壤理化性质的影响  
Tab.2 Effects of soil amendments on physico-chemical properties of soil

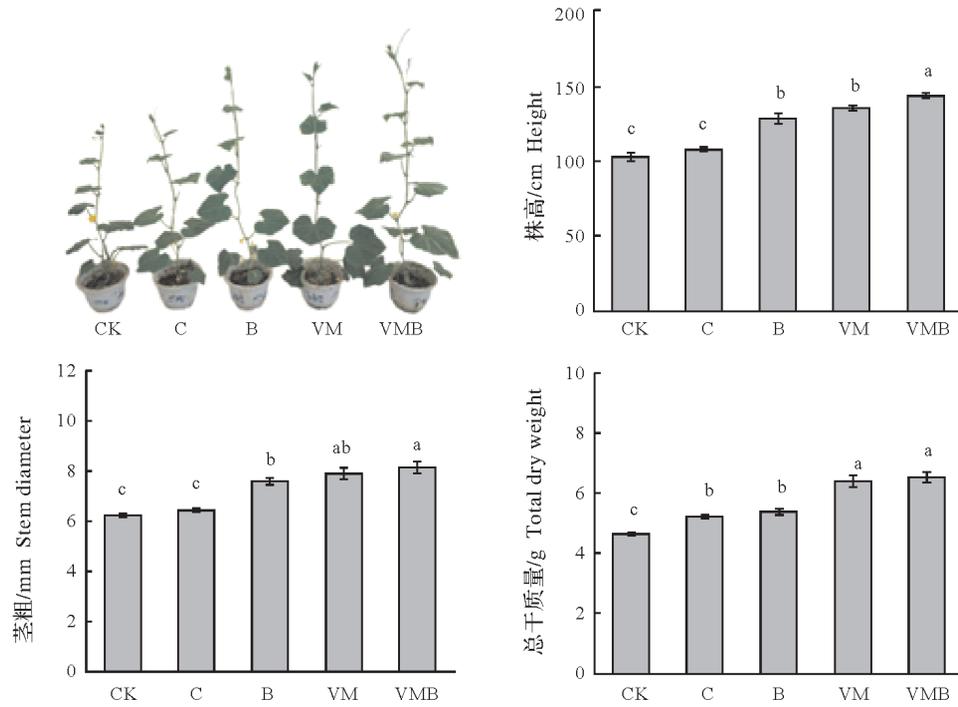
材料性状 The material properties	对照 CK	商品土壤改良剂处理 Treatment with commercial conditioner	生物炭处理 Treatment with biochar	生物基质处理 Treatment with biological substrate	生物炭+生物基质处理 Treatment with biochar+biological substrate
pH	5.82±0.02 <sup>c</sup>	7.25±0.03 <sup>a</sup>	6.15±0.03 <sup>d</sup>	6.41±0.01 <sup>c</sup>	6.85±0.02 <sup>b</sup>
EC/(mS·cm <sup>-1</sup> )	1.48±0.06 <sup>c</sup>	1.69±0.03 <sup>a</sup>	1.56±0.02 <sup>b</sup>	1.57±0.05 <sup>b</sup>	1.62±0.04 <sup>ab</sup>
含水量/% Soil water content	2.54±0.06 <sup>c</sup>	3.28±0.33 <sup>bc</sup>	3.31±0.27 <sup>abc</sup>	3.80±0.52 <sup>ab</sup>	4.33±0.08 <sup>a</sup>
有机碳/(g·kg <sup>-1</sup> ) Organic carbon	8.89±0.28 <sup>b</sup>	11.81±0.17 <sup>a</sup>	9.77±0.34 <sup>b</sup>	9.35±0.11 <sup>b</sup>	11.01±0.44 <sup>b</sup>
总氮含量/(g·kg <sup>-1</sup> ) Total N content	1.59±0.01 <sup>d</sup>	2.09±0 <sup>a</sup>	1.63±0.01 <sup>d</sup>	1.84±0.01 <sup>c</sup>	2.01±0.02 <sup>b</sup>
总磷含量/(g·kg <sup>-1</sup> ) Total P content	1.33±0.02 <sup>c</sup>	1.54±0.01 <sup>a</sup>	1.41±0.01 <sup>b</sup>	1.41±0.03 <sup>b</sup>	1.42±0.02 <sup>b</sup>
总钾含量/(g·kg <sup>-1</sup> ) Total K content	13.24±0.15 <sup>a</sup>	13.88±0.41 <sup>a</sup>	13.30±0.20 <sup>a</sup>	14.48±0.71 <sup>a</sup>	14.14±0.20 <sup>a</sup>
速效氮含量/(mg·kg <sup>-1</sup> ) Available N content	7.70±0.20 <sup>d</sup>	11.32±0.12 <sup>b</sup>	9.10±0 <sup>c</sup>	9.33±0.12 <sup>c</sup>	13.18±0.31 <sup>a</sup>
速效磷含量/(mg·kg <sup>-1</sup> ) Available N content	83.20±0.83 <sup>c</sup>	141.65±1.78 <sup>a</sup>	113.40±6.91 <sup>b</sup>	112.45±4.35 <sup>b</sup>	114.90±4.34 <sup>b</sup>
速效钾含量/(mg·kg <sup>-1</sup> ) Available K content	822.20±18.65 <sup>b</sup>	1 453.67±22.23 <sup>a</sup>	847.50±27.60 <sup>b</sup>	1 515.40±21.36 <sup>a</sup>	1 497.43±39.85 <sup>a</sup>
钙含量/(g·kg <sup>-1</sup> ) Ca content	5.15±0.21 <sup>b</sup>	11.21±1.08 <sup>a</sup>	4.86±0.20 <sup>b</sup>	5.11±0.36 <sup>b</sup>	4.69±0.10 <sup>b</sup>
镁含量/(g·kg <sup>-1</sup> ) Mg content	0.88±0.16 <sup>a</sup>	0.92±0.14 <sup>a</sup>	0.86±0.14 <sup>a</sup>	0.84±0.12 <sup>a</sup>	0.90±0.09 <sup>a</sup>

不同的小写字母表示在  $P<0.05$  水平下处理之间的显著差异,下表同。

The different lowercase letters in a column indicate significant differences among treatments at  $P<0.05$  levels, the same below.

表 3 土壤改良剂对土壤酶活性的影响  
Tab.3 Effects of soil amendments on soil enzyme activity

处理 Treatments	蔗糖酶/ (mg glucose·g <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> ) Invertase	脲酶/ (mg NH <sub>3</sub> -N·g <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> ) Urease	磷酸酶/ (mg phenol·g <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> ) Phosphatase	过氧化氢酶/ (mg H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ·g <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> ) Catalase	蛋白酶/ (mg NH <sub>2</sub> -N·g <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> ) Proteinase	多酚氧化酶/ (mg purple gallin·(100g) <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> ) Polyphenol oxidase
对照 CK	47.46±5.20 <sup>b</sup>	0.12±0.02 <sup>b</sup>	1.19±0.02 <sup>b</sup>	0.38±0.01 <sup>d</sup>	0.24±0.006 <sup>d</sup>	4.43±0.31 <sup>b</sup>
商品土壤改良剂处理 Treatment with commercial conditioner	53.85±2.81 <sup>b</sup>	0.26±0.03 <sup>a</sup>	1.31±0.05 <sup>ab</sup>	0.65±0.01 <sup>a</sup>	0.28±0.003 <sup>a</sup>	7.04±0.51 <sup>a</sup>
生物炭处理 Treatment with biochar	77.97±1.06 <sup>a</sup>	0.24±0.03 <sup>a</sup>	1.38±0.12 <sup>ab</sup>	0.48±0.01 <sup>c</sup>	0.26±0.003 <sup>bc</sup>	6.70±0.24 <sup>a</sup>
生物基质处理 Treatment with biological substrate	82.92±2.60 <sup>a</sup>	0.30±0.01 <sup>a</sup>	1.47±0.11 <sup>a</sup>	0.40±0.02 <sup>d</sup>	0.24±0.007 <sup>cd</sup>	6.84±0.23 <sup>a</sup>
生物炭+生物基质处 Treatment with biochar+biological substrate	85.93±2.03 <sup>a</sup>	0.28±0.01 <sup>a</sup>	1.52±0.05 <sup>a</sup>	0.54±0.01 <sup>b</sup>	0.27±0.003 <sup>ab</sup>	7.04±0.23 <sup>a</sup>



CK: 未添加改良剂(对照); C: 商品土壤改良剂处理; B: 生物炭处理; VM: 生物基质处理; VMB: 生物炭+生物基质处理; 不同的小写字母表示在  $P < 0.05$  水平下处理之间的显著差异。

CK: without amendments (control); C: treatment with commercial conditioner; B: treatment with biochar; VM: treatment with biological matrices; VMB: treatment with biochar+biological matrices. The different lowercase letters indicate significant differences among treatments at  $P < 0.05$  levels.

图1 土壤改良剂对黄瓜植株生长的影响

Fig.1 Effects of soil amendments on plant growth of cucumber

表4 土壤改良剂对黄瓜叶绿素含量和根系活力的影响

Tab.4 Effects of soil amendments on chlorophyll content and root activity of cucumber

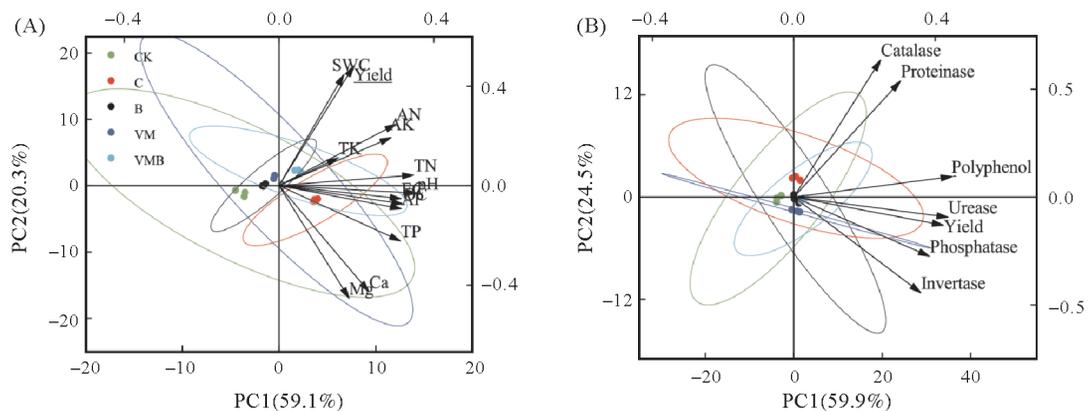
处理 Treatments	叶绿素 a 含量/ ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$ ) Chl a content	叶绿素 b 含量/ ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$ ) Chl b content	叶绿素 a/b Chl a/b	根系活力/ ( $\text{TTF} \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \text{h}^{-1}$ ) Root activity
对照 CK	$0.76 \pm 0.10^c$	$0.44 \pm 0.04^{ab}$	$1.71 \pm 0.33^a$	$26.64 \pm 4.06^d$
商品土壤改良剂处理 Treatment with commercial conditioner	$0.78 \pm 0.09^c$	$0.52 \pm 0.07^a$	$1.48 \pm 0.38^a$	$53.91 \pm 4.81^c$
生物炭处理 Treatment with biochar	$0.87 \pm 0.02^{bc}$	$0.39 \pm 0.02^b$	$2.21 \pm 0.08^a$	$79.21 \pm 1.26^a$
生物基质处理 Treatment with biological substrate	$1.18 \pm 0.12^a$	$0.54 \pm 0.01^a$	$2.18 \pm 0.19^a$	$62.02 \pm 1.18^{bc}$
生物炭+生物基质处理 Treatment with biochar+biological substrate	$1.07 \pm 0.02^{ab}$	$0.46 \pm 0^{ab}$	$2.34 \pm 0.04^a$	$72.17 \pm 5.16^{ab}$

### 2.5 土壤性状与产量主成分分析

采用PCA分析,构建土壤理化性质、土壤酶活与产量间的二维排序图(图2)。从土壤理化性质与产量的PCA分析可以看出,产量显著受土壤含水量、有效氮、有效钾和总钾含量正向影响,而与钙镁元素含量无显著影响。从土壤酶活与产量的PCA分析可以看出,各种酶活均正向影响产量。综合2个PCA分析可知,土壤养分和土壤酶活均正向影响产量。由此可推,不同改良剂的施用可通过提升土壤酶活性,加强土壤养分的分解与释放,进而促进产量的提升。

表5 土壤改良剂对黄瓜果实品质及产量的影响  
Tab.5 Effects of soil amendments on quality and yield of cucumber

处理 Treatments	可溶性糖/% Soluble sugar	可溶性蛋白/(mg·g <sup>-1</sup> ) Soluble protein	维生素C/(mg·g <sup>-1</sup> ) Vitamin C	产量/(g·plant <sup>-1</sup> ) Yield
对照 CK	2.50±0.31 <sup>b</sup>	7.97±0.85 <sup>d</sup>	8.16±0.30 <sup>a</sup>	402.26±19.78 <sup>b</sup>
商品土壤改良剂处理 Treatment with commercial conditioner	2.67±0.28 <sup>b</sup>	8.47±0.98 <sup>cd</sup>	7.47±0.43 <sup>a</sup>	417.78±30.60 <sup>ab</sup>
生物炭处理 Treatment with biochar	2.69±0.08 <sup>b</sup>	14.05±0.63 <sup>a</sup>	7.99±0.88 <sup>a</sup>	463.42±37.40 <sup>b</sup>
生物基质处理 Treatment with biological substrate	3.74±0.03 <sup>a</sup>	10.97±0.08 <sup>b</sup>	8.50±0.24 <sup>a</sup>	457.89±18.56 <sup>ab</sup>
生物炭+生物基质处理 Treatment with biochar+biological substrate	3.72±0.04 <sup>a</sup>	10.55±0.52 <sup>bc</sup>	8.71±0.36 <sup>a</sup>	517.16±30.40 <sup>a</sup>



AN:速效氮;AP:速效磷;AK:速效钾;TN:总氮;TP:总磷;TK:总钾;SWC:土壤含水量;Ca:钙;Mg:镁。

AN: available nitrogen; AP: available phosphorus; AK: available potassium; TN: total nitrogen; TP: total phosphorus; TK: total potassium; SWC: soil water content; Ca: calcium; Mg: magnesium.

图2 土壤理化性质与产量间的主成分分析(A)和土壤酶活与产量间的主成分分析(B)

Fig.2 The principal component analysis between soil physico-chemical properties and yield (A) and the principal component analysis between soil enzyme activity and yield (B)

### 3 结论与讨论

长期同类作物连作会使土壤质量下降,生产力降低,设施栽培中由于连年的集约化种植也会导致土壤障碍严重、作物产量连年下降。王彩云等<sup>[20]</sup>使用5%的生物炭添加到连作6年和10年的设施土壤中,减缓了连作对黄瓜的生育障碍,发现生物炭促进了黄瓜植株生长,完善了叶片结构,增加了果实产量。与王彩云等研究结果基本一致,第二茬种植后单一生物炭改良处理促进设施连作黄瓜生长,提升产量,表明生物炭对土壤有持续的改良效应。其中生物炭+生物基质改良处理效果最为显著,植株生长和果实品质均显著高于对照,表明生物炭与生物基质共同修复连作土壤、持续促进黄瓜生长,提高果实营养品质更为有效。虽然商品土壤改良剂处理增加土壤营养元素含量最为显著,生物炭+生物基质改良处理次之,但生物炭和生物基质的结合提供的土壤环境更适合植株对养分的吸收。同时,生物炭+生物基质改良处理有较高的土壤酶活性和根系活力,因此,混配改良处理能够更好的缓解连作障碍,持续改良障碍土壤,促进植株生长。

设施土壤由于长期缺乏雨水淋洗,高温蒸发且大量施用化肥,破坏了土壤的缓冲能力,导致土壤pH值逐渐下降,EC值逐渐升高,酸化盐渍化逐渐严重<sup>[21]</sup>。连续种植两茬后,不同改良处理土壤pH均显著高于对照,其中商品土壤改良剂提升土壤pH最为显著。商品土壤改良剂为海蛎壳粉等碱性基质组成,其

含有较高的 Ca、Mg 等盐基离子可能以碳酸盐和氧化物形式在土壤中存在,溶于水后呈碱性从而中和土壤活性酸和潜性酸,同时使土壤中钙镁元素含量升高。生物基质具有较低的容重和较大的孔隙度,拥有良好的理化性质且含有丰富的外源微生物,其可以增强土壤的缓冲能力提高土壤 pH,提升土壤质量。王笃超等<sup>[22]</sup>研究表明不同有机物料可以提高大豆土壤养分含量,改善土壤养分性状。Zhao 等<sup>[23]</sup>在长期施肥的土壤中添加秸秆发现,经过秸秆分解后土壤有效养分提升,与对照相比养分含量明显增加。本论文与其研究基本相似,不同的改良处理均增加了土壤营养元素含量,混配改良比单一施用具有良好的持续改良效果。可能是生物炭、醋糟、菇渣的添加额外补充了营养元素含量,也可能影响了土壤微生物区系,加强了土壤有效养分释放。

土壤酶是一类具有催化能力的生物活性物质,由微生物、动植物活体分泌及动植物残体分解释放于土壤中,其活性的高低可以表征土壤养分的循环状况和土壤质量<sup>[4]</sup>。同时土壤酶活性提供了有关土壤进行生物地球化学反应能力的信息,所以它们常常被用作检测人为管理或污染对土壤的影响指标<sup>[24]</sup>。土壤蔗糖酶与土壤肥力成正相关,可以影响土壤有机质、氮、磷含量;土壤脲酶以尿素为底物可以表征土壤氮元素状况;土壤磷酸酶可以提高植物对磷元素的吸收;土壤蛋白酶与土壤全氮、铵态氮、硝态氮含量正相关;土壤过氧化氢酶可以分解由呼吸或其他生物氧化过程产生的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>,同时土壤过氧化氢酶和土壤多酚氧化酶可以驱动土壤中芳香族化合物的分解与转化,从而消除土壤中过氧化物和芳香族化合物对植株的毒害作用,缓解自毒物质对植株的连作影响<sup>[25-27]</sup>。生物炭+生物基质持续改良后土壤蔗糖酶、磷酸酶、多酚氧化酶活性与对照相比增加最为显著,其他酶活也具有显著差异,这与舒秀丽等<sup>[28]</sup>和李小炜等<sup>[29]</sup>研究改良剂对土壤酶活影响结果基本一致。同时,生物炭+生物基质改良处理提高土壤酶活性的同时土壤有效养分含量也显著增加。土壤酶活与土壤中营养元素含量正相关,表明改良剂可以通过增加土壤酶活性增加土壤氮、磷、钾含量,从而减缓因连作造成的土壤生物学性质变差。PCA 分析也表明土壤有效养分、土壤酶活性与黄瓜产量正相关,因此,改良处理能够通过提升土壤酶活性,提高土壤有效养分含量,促进植株对养分的吸收,增加黄瓜产量。生物炭+生物基质改良与单一施入生物炭改良和生物基质改良相比也具有较高的土壤酶活及理化性质,表明混配改良连作土壤具有良好的持续效应,增强了土壤生态系统的稳定性。醋糟基质、菇渣基质改良连作土壤取得了双赢效果,有利于农业的可持续发展。

因此,生物炭和生物基质混合形成的土壤改良剂对设施黄瓜连作障碍土壤改良效果较好,且具有持续改良的效果。经过充分生物发酵腐熟的醋糟和菇渣按 3:1 体积比进行混合形成生物基质,生物基质与水稻秸秆生物炭按 1:1 体积比进行混合形成土壤改良剂,按障碍土壤与土壤改良剂 10:1 的体积比施入土壤,每 667 m<sup>2</sup> 土壤改良剂施用量约 13.35 m<sup>3</sup>。

## 参考文献 References:

- [1] 孙锦,高洪波,田婧,等.我国设施园艺发展现状与趋势[J].南京农业大学学报,2019,42(4):594-604.  
SUN J,GAO H B,TIAN J,et al.Development status and trends of protected horticulture in China[J].Journal of Nanjing agricultural university,2019,42(4):594-604.
- [2] 曲成闯,陈效民,张志龙,等.生物有机肥提高设施土壤生产力减缓黄瓜连作障碍的机制[J].植物营养与肥料学报,2019,25(5):814-823.  
QU C C,CHEN X M,ZHANG Z L,et al.Mechanism of bio-organic fertilizer on improving soil productivity for continuous cucumber in greenhouse.[J].Journal of plant nutrition and fertilizers,2019,25(5):814-823.
- [3] LITHOURGIDIS A S,DAMALAS C A,GAGIANAS A A.Long-term yield patterns for continuous winter wheat cropping in northern Greece[J].European journal of agronomy,2006,25(3):208-214.
- [4] 许云翔,何莉莉,刘玉学,等.施用生物炭 6 年后对稻田土壤酶活性及肥力的影响[J].应用生态学报,2019,30(4):1110-1118.  
XU Y X,HE L L,LIU Y X,et al.Effects of biochar addition on enzyme activity and fertility in paddy soil after six years[J].Chinese journal of applied ecology,2019,30(4):1110-1118.

- [5] 吴清,朱咏莉,李萍萍.醋糟和锯末基质对温室黄瓜生长的影响[J].北方园艺,2015(24):28-31.  
WU Q,ZHU Y L,LI P P.Effect of vinegar residue and sawdust culture substrates on cucumber growth in greenhouse[J].Northern horticulture,2015(24):28-31.
- [6] 陈浩天,张地方,张宝莉,等.园林废弃物不同处理方式的环境影响及其产物还田效应[J].农业工程学报,2018,34(21):239-244.  
CHEN H T,ZAHNG D F,ZHANG B L,et al.Environmental impacts and returning effects of garden wastes under different disposal methods[J].Transactions of the chinese society of agricultural engineering,2018,34(21):239-244.
- [7] 范娜,白文斌,王海燕,等.醋糟、粉煤灰对盐渍地高粱生长及土壤性状影响的研究[J].农业资源与环境学报,2017,34(6):531-535.  
FAN N,BAI W B,WANG H Y,et al.Effects of vinegar bad and flyash on the growth of sorghum and the improvement of saline soils[J].Journal of agricultural resources and environment,2017,34(6):531-535.
- [8] 吴愉萍,王明湖,席杰君,等.不同农业废弃物生物炭及施用量对土壤pH值和保水保氮能力的影响[J].中国土壤与肥料,2019(1):87-92.  
WU Y P,WANG M H,XI J J,et al.The effects of different agricultural waste biochars and application rates on soil pH,water holding capacity and N adsorption[J].Soil and fertilizer sciences in China,2019(1):87-92.
- [9] 冯丹,邢巧,葛成军,等.木薯渣基炭制备及对热带砖红壤的改良效果[J].江苏农业科学,2017,45(1):234-239.  
FENG D,XIN Q,GE C J,et al.Preparation of cassava residue-based carbon and its improvement effect on tropical brick red soil[J].Jiangsu agricultural sciences,2017,45(1):234-239.
- [10] 张相锋,杨晓斌,焦子伟.生物炭在连作障碍治理中的应用综述[J].现代园艺,2018(10):82-85.  
ZHANG X F,YANG X R,JIAO Z W.Summary of the application of biochar in the treatment of continuous cropping obstacles[J].Xiandai horticulture,2018(10):82-85.
- [11] WANG Y F,PAN F B,WANG G S,et al.Effects of biochar on photosynthesis and antioxidative system of *Malus hupehensis* Rehd. seedlings under replant conditions[J].Scientia horticulturae,2014,175:9-15.
- [12] 胡云,严海欧,赵淑文,等.高粱绿肥对设施黄瓜根际土壤理化性质及真菌群落的影响[J].北方园艺,2020(3):93-101.  
HU Y,YAN H O,ZHAO S W,et al.Effect of sorghum green manure on the physicochemical properties and fungi community of facilities cucumber rhizosphere soil[J].Northern horticulture,2020(3):93-101.
- [13] WANG Y F,MA Z T,WANG X W,et al.Effects of biochar on the growth of apple seedlings,soil enzyme activities and fungal communities in replant disease soil[J].Scientia horticulturae,2019,256:108641.
- [14] 赵帆,赵密珍,王钰,等.不同连作年限草莓根际细菌和真菌多样性变化[J].微生物学通报,2017,44(6):1377-1386.  
ZHAO F,ZHAO M Z,WANG Y,et al.Biodiversity of bacteria and fungi in rhizosphere of strawberry with different continuous cropping years[J].Microbiology China,2017,44(6):1377-1386.
- [15] 王喜枝,姚丽娟,王艳丽,等.不同连作年限对大蒜根际土壤养分含量、微生物数量及酶活性的影响[J].河南农业科学,2016,45(9):58-63.  
WANG X Z,YAO L J,WANG Y L,et al.Effects of continuous cropping for different years on garlic rhizosphere soil nutrients contents,microorganisms number and enzyme activities[J].Journal of Henan agricultural sciences,2016,45(9):58-63.
- [16] 李合生.植物生理生化实验原理和技术[M].北京:高等教育出版社,2001:119-120.  
LI H S.Experimental principles and techniques of plant physiology and biochemistry[M].Beijing:Higher Education Press,2001:119-120.
- [17] 胡秉芬,黄华梨,季元祖,等.分光光度法测定叶绿素含量的提取液的适宜浓度[J].草业科学,2018,35(8):1965-1974.  
HU B F,HUANG H L,JI Y Z,et al.Evaluation of the optimum concentration of chlorophyll extract for determination of chlorophyll content by spectrophotometry[J].Pratacultural science,2018,35(8):1965-1974.
- [18] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.  
BAO S D.Soil agrochemical analysis[M].3rd ed.Beijing:China Agriculture Press,2000.
- [19] 孙正国.连作西瓜的根际土壤酶活性和微生物多样性[J].水土保持研究,2015,22(5):46-51.  
SUN Z G.Soil enzyme activity and microbial diversity in rhizosphere of continuous watermelon cropping[J].Research of soil

- and water conservation, 2015, 22(5):46-51.
- [20] 王彩云, 武春成, 曹霞, 等. 生物炭对温室连作土壤黄瓜生长、叶片结构及产量的影响[J]. 北方园艺, 2018(19):23-27.  
WANG C Y, WU C C, CAO X, et al. Effects of biochar on growth, leaf structure and yield of cucumber in different continuous cropping years in greenhouse[J]. Northern horticulture, 2018(19):23-27.
- [21] 耿士均, 刘刊, 商海燕, 等. 园艺作物连作障碍的研究进展[J]. 北方园艺, 2012(7):190-195.  
GEN S J, LIU K, SHANG H Y, et al. Research progress of continuous cropping obstacle in horticultural plants[J]. Northern horticulture, 2012(7):190-195.
- [22] 王笃超, 吴景贵, 李建明. 不同有机物料对连作大豆土壤养分含量及生物性状的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(3):258-262.  
WANG D C, WU J G, LI J M. Effects of different organic materials on soil nutrient contents and biological properties of continuous cropping of soybean[J]. Research of soil and water conservation, 2017, 31(3):258-262.
- [23] ZHAO S C, QIU S J, XU X P, et al. Change in straw decomposition rate and soil microbial community composition after straw addition in different long-term fertilization soils[J]. Applied soil ecology, 2019, 138:123-133.
- [24] NANNIPIERI P, TRASAR-CEPEDA C, DICK R P. Soil enzyme activity: a brief history and biochemistry as a basis for appropriate interpretations and meta-analysis[J]. Biology and fertility of soils, 2018, 54(1):11-19.
- [25] 谷洁, 李生秀, 秦清军, 等. 水解类酶活性在农业废弃物静态高温堆腐过程中的变化[J]. 中国农学通报, 2005, 21(5):32-35.  
GU J, LI S X, QIN Q J, et al. Changes of some hydrolase activities during agricultural waste materials composting in high temperature and static state[J]. Chinese agricultural science bulletin, 2005, 21(5):32-35.
- [26] 马志良, 赵文强, 刘美. 高寒灌丛生长季根际和非根际土壤多酚氧化酶和过氧化氢酶活性对增温的响应[J]. 应用生态学报, 2019, 30(11):3681-3688.  
MA Z L, ZHAO W Q, LIU M. Responses of polyphenoloxidase and catalase activities of rhizosphere and bulk soils to warming during the growing season in an alpine scrub ecosystem[J]. Chinese journal of applied ecology, 2019, 30(11):3681-3688.
- [27] 徐欣, 郑利远, 周珂, 等. 长期施肥对不同有机质水平黑土蛋白酶活性及氮素的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019(1):44-48.  
XU X, ZHEN L Y, ZHOU K, et al. Effects of long-term fertilization on protease activity and nitrogen in arable mollisols of different organic matter contents[J]. Soil and fertilizer sciences in China, 2019(1):44-48.
- [28] 舒秀丽, 赵柳, 孙学振, 等. 不同土壤改良剂处理对连作西洋参根际微生物数量、土壤酶活性及产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(6):1289-1294.  
SHU X L, ZHAO L, SUN X Z, et al. Effects of soil amendments on rhizosphere microbial number, soil enzyme activity and yield of continuous cropped American ginseng[J]. Chinese journal of eco-agriculture, 2011, 19(6):1289-1294.
- [29] 李小炜, 白春梅, 田丽, 等. 微生物土壤改良剂对陕北沙区耕地的改良效果研究[J]. 陕西农业科学, 2019, 65(4):18-20.  
LI X W, BAI C M, TIAN L, et al. Effect of microorganism soil conditioners on improvement of arable land in sand area of north shaanxi[J]. Shaanxi journal of agricultural sciences, 2019, 65(4):18-20.