苏元镇,郭丽虹,吴茵,等.不同高温闷棚对设施辣椒及其连作土壤的影响[J].江西农业大学学报,2025,47(3):606-617.
SU Y Z,Guo L H,WU Y,et al.Effects of different high-temperature soil solarization treatments on greenhouse peppers and their continuous cropping soil[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2025,47(3):606-617.

不同高温闷棚对设施辣椒及其连作土壤的影响

苏元镇[1],郭丽虹[2*],吴　茵[2],赖家豪[1],罗　倩[1],马承和[2],
葛洪滨[3],高旭春[3],杨有新[1],刘　冰[1*]

(1.江西农业大学 农学院,江西 南昌 330045;2.江西省农业技术推广中心,江西 南昌 330046;3.江西省南昌市农业科学院,江西 南昌 330038)

摘要:【目的】辣椒是江西省的重要蔬菜,随着设施产业的快速发展,其连作障碍问题日益突出。研究不同高温闷棚对设施辣椒及其连作土壤的影响,为充分利用高温闷棚技术消减江西省设施辣椒连作障碍提供参考和依据。【方法】以永丰县设施辣椒为对象,研究灌水高温闷棚(YFM.1)及处理时(后)添加噁霉灵(YFM.2)、生物炭(YFM.3)和微生物菌剂(YFM.4)对其连作土壤酶活、理化性质、微生物菌群以及病害发生和辣椒产量的影响。【结果】4种闷棚处理均可显著提高连作辣椒土壤的脲酶活性,但仅YFM.4能显著提高过氧化氢酶和碱性磷酸酶活性;各处理不能改变连作辣椒土壤的pH但可明显降低其电导率;YFM.4的土壤碱解氮和有机质含量以及YFM.1的土壤速效钾含量低于对照,其他处理的土壤养分含量比对照高;除YFM.4外,其他处理均提高了土壤微生物多样性,且4种闷棚处理都增加了土壤中有益菌群的数量,减缓了连作土壤从细菌型向真菌型转换的进程;各闷棚处理均能提高辣椒产量,减少病害发生,其中YFM.4的辣椒产量最高、品质最好且未发生土传病害。【结论】灌水高温闷棚可在一定程度上缓解设施辣椒连作引起的土壤盐渍化、有害生物积累以及土壤养分失衡等问题,在闷棚后施用生物菌剂的效果最好。

关键词:连作障碍;闷棚;土壤酶活;土壤理化性质;微生物菌群;辣椒病害
中图分类号:S614.3;S154　　**文献标志码:**A　　**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**
文章编号:1000-2286(2025)03-0606-12
CSTR:32399.14.aauj.2025052

Effects of different high-temperature soil solarization treatments on greenhouse peppers and their continuous cropping soil

SU Yuanzhen[1],GUO Lihong[2*],WU Yin[2],LAI Jiahao[1],LUO Qian[1],MA Chenghe[2],
GE Hongbin[3],GAO Xuchun[3],YANG Youxin[1],LIU Bing[1*]

收稿日期:2024-12-20　　**修回日期:**2025-01-24
基金项目:江西省重点研发计划"揭榜挂帅"项目(20223BBF61017)和江西省蔬菜产业技术体系(JXARS-06)
Project supported by Jiangxi Province Key R&D Program "Unveiling the List and Leading the Way" Project (20223BBF61017) and the Earmarked Fund for Jiangxi Agriculture Research System (JXARS-06)

作者简介:苏元镇,硕士生,orcid.org/0009-0000-3002-7835,1425842488@qq.com;*共同第一作者;*通信作者:刘冰,副教授,博士,主要从事植物病理及植物病害防治研究,orcid.org/0000-0002-0620-1642,lbzjm0418@126.com。

©《江西农业大学学报》编辑部,开放获取CC BY-NC-ND协议

(1.College of Agronomy, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 2.Jiangxi Agricultural Technology Promotion Center, Nanchang 330046, China; 3. Nanchang Academy of Agricultural Sciences, Nanchang 330038, China)

Abstract: [**Objective**] Pepper is an important vegetable in Jiangxi Province. With the rapid development of the facility industry, the problem of continuous cropping obstacles in peppers has become increasingly prominent. This study aims to make the best use of the water flooding and high-temperature soil solarization treatments to reduce the continuous cropping obstacles of protected-cultivation peppers in Jiangxi Province. [**Method**] Taking the greenhouse peppers in Yongfeng County as the research object, this study investigated the effects of water flooding and high-temperature sealing (YFM.1), as well as the addition of hymexazol (YFM.2), biochar (YFM.3), and microbial inoculants (YFM.4) during (or after) the treatment, on the enzyme activities, physical and chemical properties, microbial flora of pepper continuous cropping soil, disease occurrence, and the yield of peppers. [**Result**] The four treatments could significantly increase the urease activity of continuous cropping pepper soil, but only YFM.4 could significantly increase the activities of catalase and alkaline phosphatase. Each treatment could not change the pH of continuous cropping pepper soil but could significantly reduce its electrical conductivity. The contents of soil available nitrogen and organic matter in YFM.4 and the content of soil available potassium in YFM.1 were lower than those of the control, while the soil nutrient contents of other treatments were higher than those of the control. Except for YFM. 4, the other treatments increased the soil microbial diversity, and all four treatments increased the number of beneficial flora in the soil and slowed down the conversion process of continuous cropping soil from a bacterial type to a fungal type. Each treatment could increase the pepper yield and reduce the occurrence of diseases. Among them, YFM. 4 exhibited the highest pepper yield, optimal quality, and no incidence of soil-borne diseases. [**Conclusion**] Irrigation and high-temperature sealing can alleviate, to a certain extent, problems such as soil salinization, accumulation of harmful organisms, and soil nutrient imbalance caused by continuous cropping of protected-cultivation peppers. The effect is the best when applying biological agents after soil sealing treatment.

Keywords: continuous cropping obstacles; sealing treatment; soil enzyme activity; physical and chemical properties; microflora; peppers diseases

【研究意义】辣椒(*Capsicum annuum* L.)是一种重要的蔬菜作物,深受消费者喜爱。据农业部大宗蔬菜体系统计,近年来我国辣椒年播种面积居蔬菜首位[1]。辣椒也是江西省主要农作物之一,常年种植面积约7万 hm^2,产量约130万 t,产值13亿元左右,是我国辣椒6个种植大省之一[2]。然而,随着江西蔬菜产业的高速发展,生产规模化水平日益提高,蔬菜复种指数高,品种相对单一[3],从而使得设施蔬菜连作障碍问题愈来愈严重。因此,探索克服连作障碍的方法已成为江西省蔬菜产业发展的迫切要求。【前人研究进展】连作障碍是指在同一田块连续种植同一种或同一科农作物,导致作物生育状况变差、发育不良、病害加剧、品质降低、减产甚至绝收等现象[4]。作物连作会造成土壤酸化、次生盐渍化、养分失衡、土传病害加重、土壤菌群结构变化等一系列问题,从而导致作物生长的环境恶化、作物品质和产量下降[5-6]。高温闷棚技术是利用物理和化学双重作用,在夏季7—8月棚室土地闲暇期,用塑料薄膜同时密封大棚和土壤表面,在强光照射下,提高棚温和地温,使大棚内迅速升温到60~70 ℃,利用高温对大棚进行消毒,从而达到杀灭病菌、害虫和杂草的目的。该技术的运用,能有效地改善土壤理化性状,提高肥力水平,杀灭和减少病虫草害尤其是土传病害对蔬菜生产的危害[7]。

【本研究切入点】江西省吉安市永丰县是全国绿色食品(蔬菜)标准化生产基地县、全国首批“无公害蔬菜生产示范基地县”,被农业部命名为“中国辣椒之乡”。然而,近几年来该县辣椒连作障碍问题突出,严重阻碍了当地辣椒产业的发展。【拟解决的关键问题】本试验拟以永丰县的设施辣椒土壤为研究对象,针对目前常见的几种灌水高温闷棚处理,分析处理后土壤的酶活、理化性质和微生物组,调查主要病害发生情况并测定辣椒产量,以期为进一步探索和利用高温闷棚技术消减辣椒连作障碍提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区域位于江西省吉安市永丰县佐盛蔬菜基地(27.28°N,115.37°E),该基地属亚热带季风气候,四季分明,雨量充沛,日照充足,年均气温 18 ℃,年均降雨量 1 627.3 mm,土壤类型为水稻土。试验大棚连续 5 年种植辣椒。本试验辣椒品种为赣椒 19 号。

1.2 试验设计和处理

本试验共设 4 个灌水高温闷棚处理:YFM.1:仅闷棚;YFM.2:闷棚时施用噁霉灵(2.5~3.5 mL/m^3,30%水剂,潍坊华诺生物科技有限公司);YFM.3:闷棚时施用生物炭(1 500 kg/hm^2,平顶山绿之原活性炭有限公司);YFM.4:闷棚后施用微生物菌剂(3 000 g/hm^2,根腐重茬净,潍坊市百鸿农业科技有限公司)。对照(CK)未进行任何处理。

闷棚在夏季 7—8 月气温最高时进行。旧棚膜修补或更换新棚膜后全密闭,土壤深翻并整平,灌水至地表见明水,覆膜,累计高温(气温 35 ℃以上)处理至少 15 d。整个种植过程中,各处理施用的基肥、追肥以及其他耕作措施均一致。有机肥为腐熟鸡粪,其含纯氮、磷(P_2O_5)、钾(K_2O)约为 1.63%、1.54%、0.85%。闷棚之后通风 7 d 左右施有机肥 1 000 kg,结果期追施高钾肥,每 667 m^2 追加高钾肥 20 kg。

1.3 样品的采集

在辣椒定植后,按照 5 点取样法采集辣椒根际 0 ~ 20 cm 的土壤,采用抖土法[8]除去土壤中的小石块、垃圾等杂质和与根系结合较松的土壤,保留与根系黏附较近的土壤作为样品。每个样品取 3 个重复,用四分法将土样分为 2 份。一份装于无菌密封袋并放置于冰盒中,带回实验室放于-80℃保存,用于微生物组的测定;另一份带回实验室自然风干后用于酶活和理化性质的测定。

1.4 土壤酶活测定

脲酶采用脲酶试剂盒测定,以 24 h 后 1 g 土样中产生铵态氮的微克数表示;过氧化氢酶采用过氧化氢酶试剂盒测定,以 24 h 后 1 g 土样催化过氧化氢降解的微摩尔数表示;碱性磷酸酶采用碱性磷酸酶试剂盒测定,以 24 h 后 1 g 土样释放酚的微摩尔数表示;蔗糖酶采用蔗糖酶试剂盒测定,以 24 h 后 1 g 土样中产生还原糖的毫克数表示。

1.5 土壤理化性状测定[9]

pH 采用电位法测定;电导率采用浸提法测定;碱解氮采用碱解扩散法测定;有效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定;速效钾采用火焰光度法测定;有机质采用外加热重铬酸钾容量法测定。

1.6 土壤微生物组测定

将 1.3 采集到的土壤样品送到北京诺禾致源科技股份有限公司,利用 Lllumina NovaSeq 平台进行 16S rDNA 和 18S rDNA 扩增子的高通量测序,数据处理后进行物种注释和丰度、多样性以及功能分析,从而明确不同样品中的细菌和真菌菌群情况。

1.7 辣椒病害与产量调查

从闷棚处理到辣椒采收期间,观察和调查不同处理辣椒的生育动态、果实品质。辣椒开始采收后,每周采收 1 次,记录并计算不同处理辣椒的产量。辣椒采收后期,系统调查并记录植株发病情况,病株率计算公式如下。

$$病株率=(发病株数/调查总植株)\times 100\% \quad (1)$$

1.8 数据分析

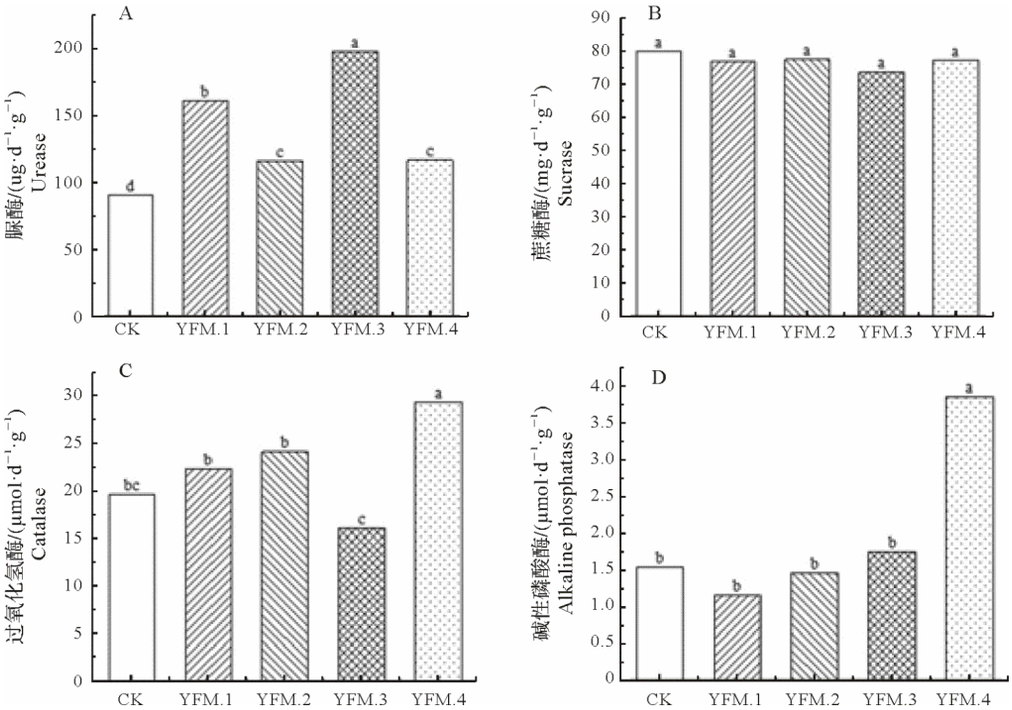
采用 Excel 和 SPSS 26 统计分析软件对试验数据进行处理和分析,绘图采用 Origin 2018。

2 结果与分析

2.1 不同闷棚处理对土壤酶活的影响

不同闷棚处理对设施辣椒土壤酶活性的影响如图 1 所示。4 种闷棚处理的土壤蔗糖酶酶活与对照相比并无显著差异性;不同闷棚处理的土壤脲酶活性均高于对照且与对照差异显著,其中 YFM.3 的酶活性最高,达到 196.84 μg/(d·g);4 种闷棚处理中,除 YFM.3 外,其他 3 种闷棚处理的过氧化氢酶酶活都高

于对照,其中 YFM.4 的酶活显著高于对照,达到了 29.30 μmol/(d·g)。碱性磷酸酶方面,仅有 YFM.4 的活性显著高于对照,达到3.87 μmol/(d·g),其他3种处理与对照无明显差异。



A~D依次为脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶和碱性磷酸酶。CK:未闷棚处理;YFM.1:高温水淹闷棚;YFM.2:高温水淹闷棚时施用噁霉灵;YFM.3:高温水淹闷棚时施用生物炭;YFM.4:高温水淹闷棚后施用微生物菌剂。不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

A–D are urease, sucrase, catalase, and alkaline phosphatase, respectively. CK: Untreated soil; YFM.1: water flooding and high-temperature sealing soil; YFM.2: Apply oxytetracycline when the soil was treated by water flooding and high-temperature sealing; YFM.3: Apply biochar when the soil was treated by water flooding and high-temperature sealing; YFM.4: Apply microbial agents were treated after water flooding and high-temperature sealing. The different lowercase letters in the figure indicate significant differences (P<0.05).

图 1　不同闷棚处理对设施辣椒连作土壤酶活的影响

Fig.1　Effects of different sealing treatments on the enzyme activity of capsicum continuous cropping soil in facility

2.2　不同闷棚处理对土壤理化性质的影响

不同闷棚处理对设施辣椒连作土壤理化性质的影响见表2。由表可知,YFM.3 的土壤 pH 值显著低于对照,而其他3种闷棚处理的土壤 pH 值均与对照无显著差异,说明这4种闷棚方式对土壤酸化没有明显作用;闷棚后的土壤电导率均显著低于对照,说明4种闷棚方式对土壤盐渍化有较好的缓解作用;4种

表 1　不同闷棚处理对设施辣椒连作土壤理化性质的影响

Tab.1　Effects of different sealing treatments on the physical and chemical properties of capsicum continuous cropping soil in facility

样品名称 Sample name	pH	电导率/(μS·cm⁻¹) Electrical conductivity	碱解氮/(mg·kg⁻¹) Alkali hydrolyzed nitrogen	有效磷/(mg·kg⁻¹) Available phosphorus	有机质/(g·kg⁻¹) Organic matter	速效钾/(mg·kg⁻¹) Available potassium
CK	6.02^{a}	694.00^{a}	242.08^{b}	89.21^{b}	39.85^{ab}	478.00^{d}
YFM.1	6.06^{a}	326.33^{c}	253.75^{b}	108.32^{a}	42.29^{ab}	414.33^{e}
YFM.2	6.04^{a}	539.00^{c}	254.92^{b}	90.63^{b}	42.65^{ab}	567.67^{b}
YFM.3	5.94^{b}	597.00^{b}	285.25^{a}	98.93^{ab}	44.08^{a}	532.00^{c}
YFM.4	6.03^{a}	625.33^{b}	233.92^{b}	105.42^{a}	39.06^{b}	601.33^{a}

不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

Different lowercase letters in the table indicate significant differences (P<0.05).

处理中仅有 YFM.3 的土壤碱解氮值显著高于对照，其他 3 种处理均与对照无明显差异；4 种闷棚处理使土壤的有效磷含量均有所增加，其中 YFM.1 和 YFM.4 的有效磷含量均显著高于对照；各闷棚处理的土壤有机质含量与对照比较差异不显著，可能与大棚统一添加的有机肥有关；4 种闷棚处理的土壤速效钾与对照均存在显著性差异，只是 YFM.1 的速效钾含量低于对照，而 YFM.4 处理增幅最大（25.80%）。

2.3 不同闷棚处理对土壤微生物组的影响

2.3.1 不同闷棚处理对土壤细菌门和属水平群落结构变化的影响

由图 2A 可知，土壤样品在细菌门水平上的优势菌群分别为：Proteobacteria（变形菌门）、Gemmatimonadota（芽单胞菌门）、Chloroflexi（绿弯菌门）、Actinobacteriota（放线菌门）、Acidobacteriota（酸杆菌门）、Crenarchaeota（泉古菌门）、Bacteroidota（拟杆菌门）、Patescibacteria（髌骨菌门）、Firmicutes（厚壁菌门）和 Myxococcota（粘球菌门）。对照土壤中变形菌门的相对丰度高于闷棚处理，而芽单胞菌门和泉古菌门的相对丰度低于闷棚处理，说明在门水平上不同闷棚处理会降低土壤中变形菌门的相对丰度（YFM.1、YFM.2、YFM.3、YFM.4 分别降低了 9.08%、8.08%、6.53%、6.86%），增加芽单胞菌门和泉古菌门的相对丰度，其中 YFM.3 的芽单胞菌门丰度最高，较对照增加了 8.53%，YFM.2 的泉古菌门丰度最高，较对照增加了 2.93%。

由图 2B 可知，土壤样品在属水平上的优势细菌菌群分别为：*Gemmatimonas*（芽单胞菌属）、*Mizugakiibacter*（水恒杆菌属）、*unidentified Gemmatimonadaceae*（未鉴定芽单胞菌科）、*Sphingomonas*（鞘氨醇单胞菌属）、*Chujaibacter*（褚氏杆菌属）、*Candidatus Nitrososphaera*（暂定的氨氧化菌属）、*Candidatus Nitrosotalea*（暂定的亚硝化单胞菌属）、*MND1*、*Dokdonella*（独岛杆菌属）和 *Bryobacter*（黄杆菌属）。闷棚处理土壤的水恒杆菌属和褚氏杆菌属的相对丰度低于对照土壤，闷棚处理土壤的芽单胞菌属、未鉴定芽单胞菌科和鞘氨醇单胞菌属的相对丰度高于对照土壤。其中 YFM.2 的芽单胞菌属的相对丰度最高，较对照增加了 6.28%。YFM.3 的鞘氨醇单胞菌属的相对丰度最高，较对照增加了 2.27%。

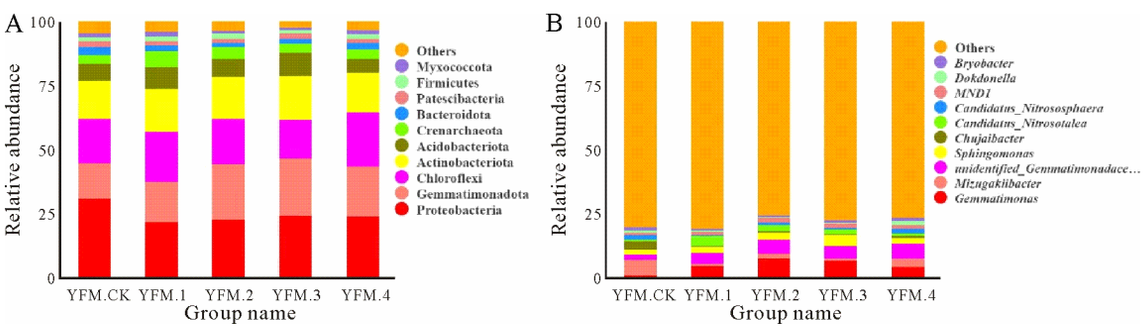


图 2 不同闷棚处理土壤在门（A）和属（B）水平的细菌丰度

Fig.2 Bacterial abundance at the phylum（A）and genus（B）levels in soils of different sealing treatments

2.3.2 不同闷棚处理对土壤细菌群落的 α 多样性指数的影响

Coverage 指数越高说明土壤样本序列被测出的概率越高。由表 2 可知，各处理土壤样本 Coverage 指数都在 0.9 以上，代表可以反映样本中微生物群落的真实情况。除 YFM.4 的 chao1 指数、shannon 指数和 observedfeatures 都小于对照，其他 3 种闷棚处理的指数都高于对照，说明 YFM.1、YFM.2、YFM.3 的土壤细菌微生物群落较对照相比包含的低丰度物种多，群落多样性高，物种数目多，而 YFM.4 处理与之相反。4 种闷棚处理的土壤 Simpson 指数均比对照高，说明闷棚处理的物种均匀度要高于对照。

表 2 不同闷棚处理对土壤细菌群落 α 多样性指数的影响

Tab.2 Bacterial community alpha diversity index in soils of different sealing treatments

处理 Treatment	Chao1	Coverage	Observed features	Shannon	Simpson
YFM.CK	3 755.746	0.996	3 474.000	9.293	0.994
YFM.1	5 051.423	0.994	4 584.000	9.903	0.997
YFM.2	4 845.162	0.994	4 323.000	9.695	0.996
YFM.3	4 026.173	0.995	3 717.000	9.594	0.996
YFM.4	3 482.068	0.996	3 208.000	9.232	0.995

2.3.3　不同闷棚处理后土壤细菌群落的功能预测

基于16S rRNA标记基因,通过与KEGG数据库进行比对,预测土壤细菌群落的代谢功能。由图3可知,对照及闷棚处理的土壤群落优势功能有所差异,其中对照组菌群的优势功能为Transfer_RNA_biogenesis、Purine_metabolism;YFM.1的菌群优势功能为Exosome、Carbon_fixation_pathways_in_prokaryotes、Butanoate_metabolism、Messenger_RNA_Biogenesis;YFM.2菌群的优势功能为Cysteine_and_methionine_metabolism、Peptidases;YFM.3菌群的优势功能为RNA_degradation;YFM.4菌群的优势功能为Transporters、ABC_transporters、Two-component_system、Bacterial_motility_proteins。与对照组相比,除YFM.1外,其他闷棚处理的菌群优势功能种类减少且相对丰度降低,说明闷棚处理时(后)施用噁霉灵、生物炭和微生物菌剂能使土壤细菌菌群功能趋于均一化,其中生物炭的作用最明显。

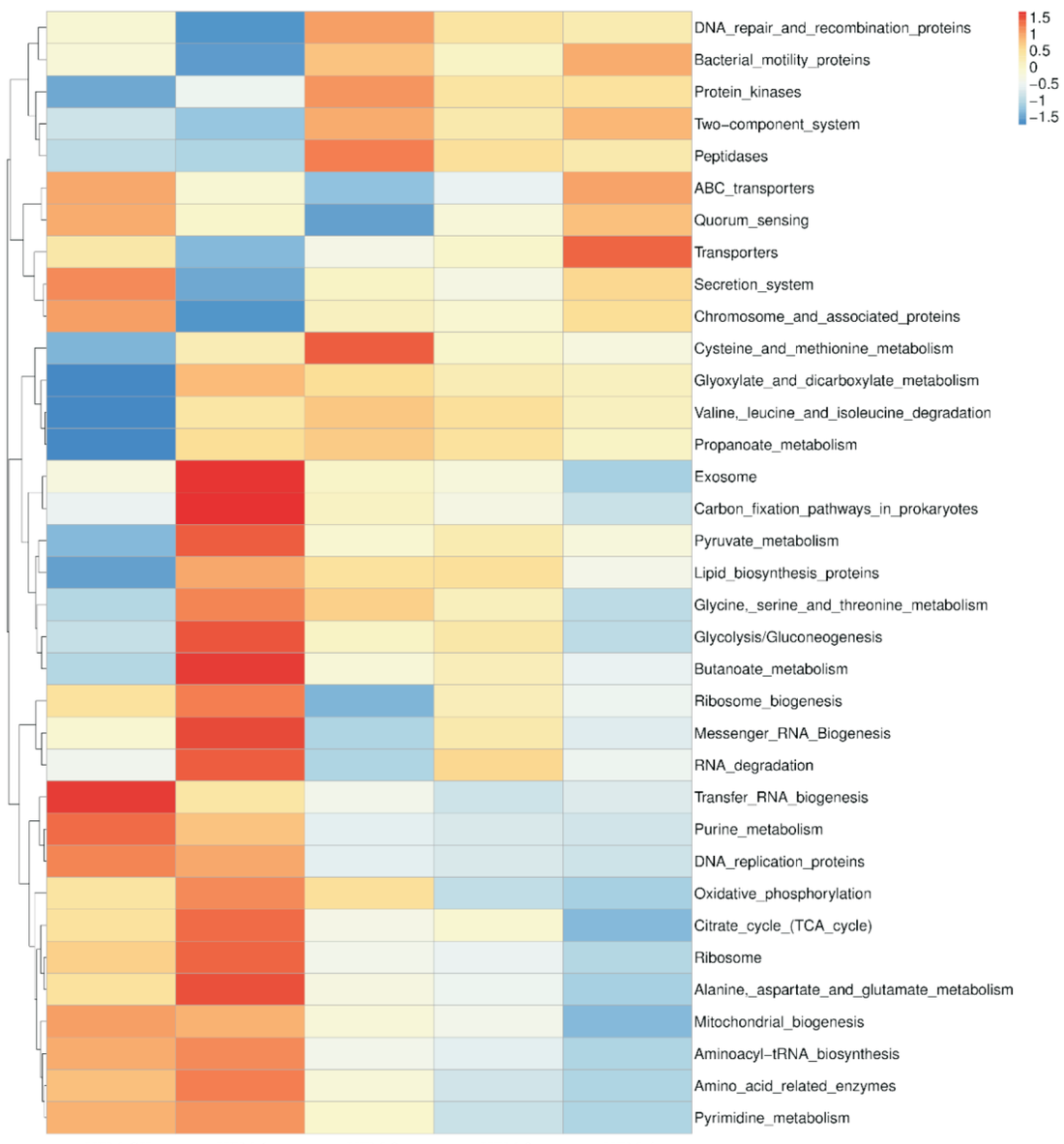


图3　不同闷棚处理后土壤细菌群落功能注释聚类热分析

Fig.3　Functionally annotated clustered heat map of soil bacterial communities in soils of different sealing treatments

2.3.4　不同闷棚处理对土壤真菌门和属水平群落结构变化的影响

由图4可知,土壤样品在真菌门水平上的优势菌群依次为:Ascomycota(子囊菌门)、Fungi_phy_Incertae_sedis、Basidiomycota(担子菌门)、Mortierellomycota(被孢霉门)、Rozellomycota(罗兹菌门)、Mucoromycota(毛霉门)、Chytridiomycota(壶菌门)、Aphelidiomycota、Calcarisporiellomycota和Olpidiomycota。经过不

同闷棚处理，土壤中的Fungi_phy_Incertae_sedis和担子菌门的相对丰度相较对照均明显减少。除YFM.1外，其他3种处理的子囊菌门真菌相对丰度均有所提高，其中YFM.4相对丰度最高占比为88.98%。此外，YFM.1、YFM.2和YFM.3 3种处理中的被孢霉门相对丰度均高于对照，分别增加了3.42%、1.12%、0.22%。土壤样品在属水平分类上的优势菌属依次为：*Mycothermus*（嗜热链球菌属）、*Corynascus*（棒囊壳属）、*Chaetomium*（毛壳菌属）、*Cephaliophora*（头梗霉属）、*Pseudothielavia*、*Fungi gen Incertae sedis*、*Allocanariomyces*、*Aspergillus*（曲霉属）、*Ascobolus*（粪盘菌属）和*Humicola*（腐质霉属）。4种不同闷棚处理的*Fungi pen Incertae sedis*和*Allocanariomyces*相对丰度较对照降低，而头梗霉属相对丰度提高，其中YFM.2的头梗霉属相对丰度最高，较对照增加了29.76%。闷棚处理中，除YFM.3外，其他3个处理组的毛壳菌属相对丰度较对照降低，而YFM.3的相对丰度增加了18.16%。经过闷棚处理后，除YFM.4外其他3种处理的嗜热链球菌属和棒囊壳菌属的相对丰度较对照均降低。

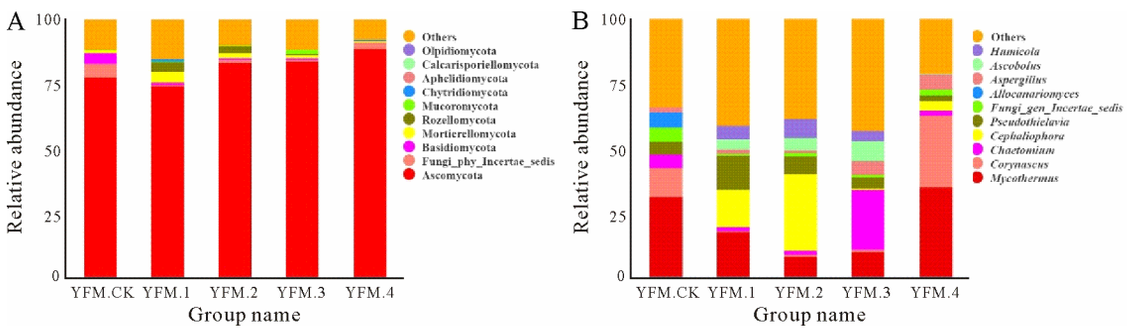


图4 不同闷棚处理土壤在门（A）和属（B）水平上的真菌丰度

Fig.4 Fungal abundance at phylum (A) and genus (B) levels in soils of different sealing treatments

2.3.5 不同闷棚处理对土壤真菌群落的α多样性指数的影响

Coverage指数越高说明土壤样本序列被测出的概率越高。由表3可知，在试验中各土壤样本Coverage指数都为1，代表可以反映样本中微生物群落的真实情况。除了YFM.4的Chao1指数、Shannon指数、和Observed Features均小于对照，其他3种闷棚处理的均高于对照，说明YFM.1、YFM.2、YFM.3的土壤真菌的微生物群落较对照相比包含的低丰度物种多，群落多样性高，物种数目多，而YFM.4相反。YFM.2和YFM.4的土壤Simpson指数比对照低，说明其物种均匀度要低于对照，前者可能是噁霉灵杀死了土壤中的部分真菌，而后者施用的微生物菌剂影响了土壤真菌菌群的均匀度。

表3 不同闷棚处理对土壤真菌群落α多样性指数的影响

Tab.3 Alpha diversity index of soil fungal communities in soils of different sealing treatments

处理 Treatment	Chao1	Coverage	Observedf eatures	Shannon	Simpson
YFM.CK	845.13	1	836	5.088	0.916
YFM.1	1 156.649	1	1 148	5.612	0.932
YFM.2	1 203.000	1	1 185	5.235	0.896
YFM.3	974.019	1	961	5.532	0.925
YFM.4	761.109	1	751	4.126	0.829

2.3.6 不同闷棚处理对土壤真菌群落的功能预测

FunGuild基于ITS的扩增子分析，可以获得环境中存在的真菌物种分类及其丰度信息。由图5可知，对照组和处理组的菌群优势功能差异明显，其中对照组的菌群主要功能为Pathotroph-Saprotroph（病理-腐生营养型）、Pathotroph-Symbiotroph（病理-共生营养型）、Saprotroph-Pathotroph-Symbiotroph（腐生-病理-共生营养型）、Pathotroph-Saprotroph-Symbiotroph（病理-腐生-共生营养型）；YFM.1的优势功能菌群为Symbiotroph（共生营养型）、Pathotroph（病理营养型）、Unassigned；YFM.2的菌群优势功能为Pathogen-Saprotroph-Symbiotroph（病原-腐生-共生营养型）、Saprotroph-Symbiotroph（腐生-共生营养型）、Saprotroph（腐生营养型）；YFM.3的菌群优势功能为Saprotroph（腐生营养型）、Pathotroph（病理营养型）；

YFM.4的菌群优势功能为Saprotroph(腐生营养型)且丰度低。可见,相对于对照组而言,闷棚处理组的菌群优势功能类型减少,特别是与病原相关的明显减少,腐生营养型的相对丰度增加,说明了闷棚处理对土壤中的病原菌具有较好的杀灭作用。

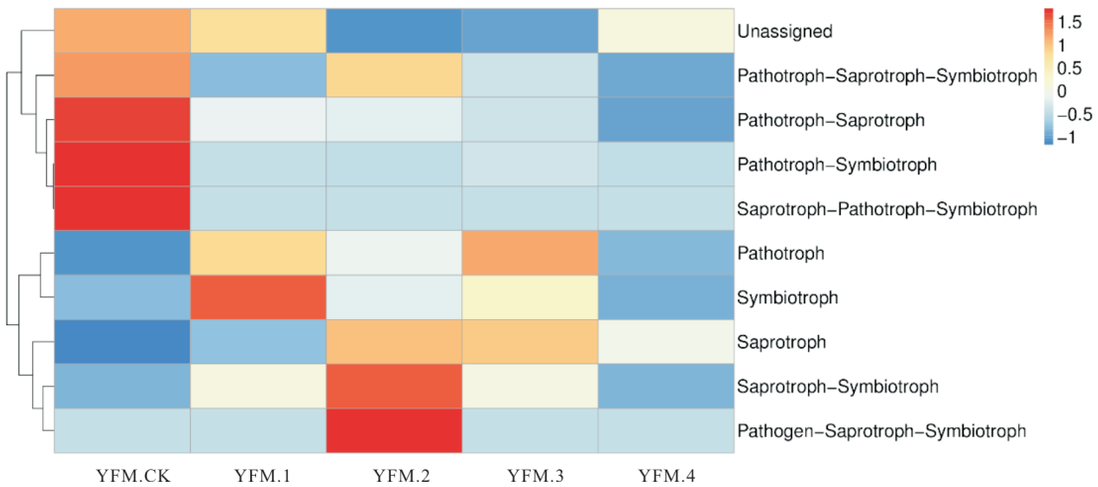


图5　不同闷棚处理后土壤真菌群落功能注释相对丰度柱形分析

Fig.5　Functionally annotated relative abundance histogram of soil fungal communities in soils of different sealing treatments

2.4　不同闷棚处理对辣椒生长的影响

由表4可知,相比对照组,4种不同的闷棚处理均增加了辣椒的产量(YFM.1、YFM.2、YFM.3、YFM.4较对照分别增加了8.20%、18.69%、12.30%、35.57%),且有效减少了病害的发生,说明了高温闷棚可以缓解连作障碍引起的病害加剧、品质降低、减产等问题。其中闷棚后施用微生物菌剂(YFM.4)效果最好,辣椒亩产量可达4 135 kg,且YFM.4处理组的果型品质优、植株病害极少发生。此外,闷棚时施用噁霉灵(YFM.2)也可以显著降低连作辣椒的病株率并提高辣椒产量。

表4　永丰县不同闷棚处理对辣椒生长及主要病害发生的影响

Tab.4　Effects of different sealing treatments on the growth of peppers and the occurrence of major diseases in Yongfeng County

田块处理 Field treatment	667 m²产量/kg Yield	品质 Quality	病株率/% Disease rate	
			根腐病 Root rot	病毒病 Virus disease
CK(未做处理) Not processed	3 050.00[a]	植株矮小,果型偏细短,果色偏白,果皮褶皱多,畸形果多。	5.58[a]	50.25[a]
YFM.1(仅水淹) Flooding only	3 300.00[b]	植株矮小,果型偏细短,果色偏白,有畸形果。	2.50[b]	5.45[b]
YFM.2(水淹+噁霉灵) Flooding + Hymexazol	3 620.00[c]	植株正常,果型弯曲多,果色深绿色,果皮光滑,偶有畸形果。	0[c]	5.45[b]
YFM.3(水淹+生物碳) Flooding + Biochar	3 425.00[b]	植株正常,果型粗长,果色深绿色,果皮光滑,畸形果少。	1.67[d]	3.25[c]
YFM.4(水淹后+微生物菌剂) After flooding + Microbials	4 135.00[d]	植株粗壮茂密,果型粗长,果色深绿色,果皮光滑,畸形果少。	0[c]	0[d]

不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

Different lowercase letters indicate significant differences(P<0.05).

3　讨论与结论

脲酶是土壤中主要的水解酶类之一,对尿素在土壤中的水解及作物对尿素氮的利用有重要的影响[10]。土壤蔗糖酶可以反映土壤中的有机碳的转化和呼吸强度,反映了土壤熟化程度和肥力水平[11]。过

氧化氢的积累会对生物和土壤产生毒害作用，而过氧化氢酶能酶促过氧化氢分解为水和氧，解除过氧化氢的毒害作用[12]。土壤磷酸酶是一类催化土壤有机磷化合物矿化的酶，其活性高低直接影响土壤中有机磷的分解转化及其生物有效性[13]。本研究表明，经过不同的闷棚处理后，土壤的蔗糖酶活性与对照的无明显差异；YFM.4的碱性磷酸酶和过氧化氢酶活性显著高于对照，这与常勃[14]和于鑫鑫等[15]的研究结果相符，即微生物菌剂能有效促进土壤中有机磷的分解转换并能缓解土壤中过氧化作用。其中YFM.1和YFM.2的碱性磷酸酶活性低于对照，推测是灌水闷棚降低了其酶活性，这与李佳川等[16]的研究结果一致，其表明经过灌水高温闷棚处理后，由于淋溶作用等使得土壤养分下沉，N、P、K等元素浓度降低，可能是造成酶活性降低的原因之一。而YFM.3的过氧化氢酶活性低于对照，其结果与樊军等[17]的研究结果一致，其表明过氧化氢酶活性与有机C、全N、有效P、C/N均有显著的负相关关系，随土壤有机质积累，有机C和全N的增加，过氧化氢酶活性降低，本试验中YFM.3施加生物炭闷棚，从而增加了土壤的有机质含量，使得YFM.3的过氧化氢酶活性降低；也有研究[18]表明，土壤脲酶活性与土壤有机质含量呈极显著正相关。本试验中YFM.3的脲酶活性显著高于对照，推测也是生物炭发挥了一定作用。

已有研究表明，通过测定土壤电导率可以反映土壤水溶性盐含量的多少[19]，而pH是衡量土壤酸碱强弱的指标[20]。本研究结果发现，4个闷棚处理中，仅有YFM.3的pH值显著低于对照。Chandi等[21]研究表明添加生物炭可以增加土壤的pH值。这与本试验结果不符，推测是生物炭老化导致。丛铭[22]发现生物炭老化后对土壤pH值的提升效果减弱，干湿生物炭会显著降低土壤pH值，特别是在干湿循环的闷棚条件下，会使得生物炭老化[23]，且随着老化作用的发生，生物炭中的芳香族被分解，以C的形式释放到环境中，会与CO_2结合形成碳酸盐[24]，从而降低了土壤的pH值。本试验中所有闷棚处理均能减轻连作土壤的盐渍化和提高土壤中的有效磷含量，其中YFM.1缓解盐渍化效果显著，YFM.1和YFM.4提高有效磷含量效果显著。有研究[25-26]表明，施用生物炭可显著提升土壤有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量。本研究中YFM.3的有机质和碱解氮含量是所有处理组里面最高的，这与前人的研究结果相符。但YFM.4的速效钾含量比YFM.3高，这可能是受到了微生物菌肥的影响。有研究[27]表明在土壤中加入微生物菌肥可以提高设施作物土壤速效养分含量，其中对土壤速效钾含量增加最为明显。YFM.4的碱解氮和有机质含量低于对照，推测是微生物菌剂的施用促进了植株的快速生长，植株吸收土壤中的碱解氮和有机质的含量，从而使得土壤中的含量降低。

土壤微生物群落结构越丰富、物种越均匀及多样性越丰富，植物对抗病原菌的综合能力就越强[28-29]。从α多样性分析可知，与对照相比，YFM.1、YFM.2、YFM.3闷棚处理提高了土壤细菌和真菌的丰富度指数和多样性指数，说明经过这3种闷棚处理后，其作物对抗病原菌的综合能力提高。YFM.4的多样性指数相比对照降低，推测与施用的微生物菌剂有关。施用微生物菌剂是影响土壤微生物多样性最直接的方式，微生物菌剂还可以有效抑制病原菌生长，增加土壤养分含量[30]。从不同闷棚处理对土壤细菌群落的影响分析可知，在门水平上，闷棚使芽单胞菌门和泉古菌门的相对丰度增加。在属水平上，闷棚使芽单胞菌属和鞘氨醇单胞菌属的相对丰度增加，而水恒杆菌属和褚氏杆菌属的相对丰度降低。芽单胞菌属是常见的有益菌，可以维持土壤的健康状况，有利于植物的生长发育[31]；一些鞘氨醇单胞菌具有促进植物生长和提高植物抗逆性的作用，是潜在的农作物生长促进剂[32]；水恒杆菌属通常是发病土壤中的优势菌[33]。但有报道褚氏杆菌属在健康土壤中比发病土壤中丰度大[34]，本试验结果与此相反，因此该属细菌在土壤中的主要功能还有待验证。从土壤真菌群落分析，在门水平上，闷棚使Fungi_phy_Incertae_sedis和担子菌门的相对丰度降低；在属水平，闷棚使头梗霉属相对丰度增加，还增加了YFM.1、YFM.2和YFM.3的嗜热链球菌属和棒囊壳属的相对丰度。有研究表明，头梗霉属具有促进植物生长和抑制植物病原菌的作用[35]，嗜热链球菌属在木质纤维素降解中起着至关重要的作用[36]。从功能预测的结果来看，不同的闷棚处理破坏了细菌和真菌的微生物群落结构，减少了土壤病理营养型的相对丰度，增加了土壤有益菌群的相对丰度，有效缓解了连作中土壤由细菌型向真菌型的转化。

有研究[37]表明，闷棚处理后的连作辣椒产量极显著高于未闷棚的，且可以有效缓解连作障碍。噁霉灵是一种高效低毒环保的广谱性杀菌剂，对多种病原真菌引起的植物病害有较好的防治效果，同时可以促进作物根系生长发育、生根壮苗及提高成活率[38]，微生物菌肥是利用现代生物技术生产的低耗能、无毒、无害、无污染的有机微生物菌剂，可以增加土壤中有益微生物数量，改善土壤结构，提高土壤保水、保

肥、抗病虫害能力,进而降低连作障碍,促进农作物生长发育,提高农作物产量,改善农产品品质[39]。本研究中,高温闷棚配合施加生物炭、噁霉灵、微生物菌剂均能提高辣椒的品质和产量,减轻连作引起的土传病害。其中微生物菌剂的效果最好,辣椒的亩产量达到了4 135 kg且不发生根腐病。

综上所述,闷棚时添加噁霉灵和生物炭均可显著提高辣椒连作土壤的脲酶活性,但仅有闷棚后施用微生物菌剂能显著提高过氧化氢酶和碱性磷酸酶活性;各处理能普遍显著地提高连作土壤的速效钾含量;闷棚处理对辣椒连作土壤酸化的缓解不明显,但可以有效减轻土壤的盐渍化;4种闷棚处理都增加了土壤中有益菌群的数量,减缓了连作土壤中有害生物的积累。总之,灌水高温闷棚时添加噁霉灵、生物炭和闷棚后施用微生物菌剂可不同程度地缓解设施辣椒连作障碍问题,其中微生物菌剂的效果最好,噁霉灵次之。在消减设施辣椒土壤连作障碍时,可以根据具体的连作问题选择合适的闷棚方法或者将几种方法结合起来,最大限度地解决不同原因造成的连作问题。

致谢:江西省星火计划项目(20161BBF61080)同时对本研究给予了资助,谨致谢意!

参考文献 References:

[1] 王立浩,张正海,曹亚从,等.“十二五”我国辣椒遗传育种研究进展及其展望[J].中国蔬菜,2016(1):1-7.
WANG L H,ZHANG Z H,CAO Y C,et al.Progress and prospects of genetic breeding research on chili in China during the 12th Five Year Plan Period[J].China vegetables,2016(1): 1-7.

[2] 戴雄泽,刘志敏.初论我国辣椒产业的现状及发展趋势[J].辣椒杂志,2005(4):1-6.
DAI X Z,LIU Z M.On current situation and its development trends of the pepper industry in China[J].Journal of China capsicum,2005(4):1-6.

[3] 吴宝荣,阳振芳.江西省蔬菜灰霉病重发生原因与防治技术[J].中国植保导刊,2005(3):11-12.
WU B R,YANG Z F.Causes and control techniques of gray mold disease in vegetables in Jiangxi Province[J].China plant protection,2005(3):11-12.

[4] 泮琇.温州市设施蔬菜土壤连作障碍治理调控技术研究[D].南京:南京农业大学,2009.
PAN X.Countermeasures for soil obstacle of continuous vegetable cropping in plastic green house in Wenzhou[D].Nanjing: Nanjing Agricultural University,2009.

[5] 卢维宏,张乃明,包立,等.我国设施栽培连作障碍特征与成因及防治措施的研究进展[J].土壤,2020,52(4):651-658.
LU W H,ZHANG N M,BAO L,et al.Study advances on characteristics,causes and control measures of continuous cropping obstacles of facility cultivation in China[J].Soils,2020,52(4):651-658.

[6] 苏文桢,涂志伟,张瑜,等.余干辣椒连作对土壤理化性质及微生物多样性的影响[J].江西农业大学学报,2023,45(1):113-124.
SU W Z,TU Z W,ZHANG Y,et al.Effects of continuous cropping of Yugan pepper on soil physicochemical properties and microbial diversity[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2023,45(1):113-124.

[7] 徐光明,项永祥,单东方.设施蔬菜大棚灌水高温闷棚技术[J].现代农业科技,2012(22):195.
XU G M,XIANG Y X,SHAN D F.Irrigation and high-temperature confinement technology for facility vegetable greenhouses [J].Modern agricultural science and technology,2012(22):195.

[8] 申建波,毛达如.植物营养研究方法[M].北京:中国农业大学出版社,2011.
SHEN J B,MAO D R.Research methods of plant nutrition[M].Beijing:China Agricultural University Press,2011.

[9] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000.
LU R K.Methods of soil agrochemical analysis[M].Beijing:China Agricultural Science and Technology Press,2000.

[10] 张雪艳,高丽红,李元,等.栽培模式对黄瓜连作温室土壤酶活性及相关养分的影响[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2007,28(3):113-117.
ZHANG X Y,GAO L H,LI Y,et al.The influence of summer different cultivation patterns to soil enzyme activity and its correlation nutrient[J].Journal of Inner Mongolia agricultural university(natural sciences edition),2007,28(3):113-117.

[11] 马云华,王秀峰,魏珉,等.黄瓜连作土壤酚酸类物质积累对土壤微生物和酶活性的影响[J].应用生态学报,2005,16(11):2149-2153.
MA Y H,WANG X F,WEI M,et al.Accumulation of phenolic acids in continuously cropped cucumber soil and their effects

on soil microbes and enzyme activities[J].Chinese journal of applied ecology,2005,16(11):2149-2153.

[12] 吴凤芝,孟立君,王学征.设施蔬菜轮作和连作土壤酶活性的研究[J].植物营养与肥料学报,2006,12(4):554-558.
WU F Z,MENG L J,WANG X Z.Soil enzyme activities in vegetable rotation and continuous cropping system of under shed protection[J].Journal of plant nutrition and fertilizers,2006,12(4):554-558.

[13] 于群英.土壤磷酸酶活性及其影响因素研究[J].安徽技术师范学院学报,2001,15(4):5-8.
YU Q Y.Study on soil phosphatase activity and their influenced factors[J].Journal of Anhui science and technology university,2001,15(4):5-8.

[14] 常勃.微生物菌剂对矿区复垦土壤生物活性和油菜生长的影响[D].太原:山西大学,2014.
CHANG B.Effects of microbial agent on reclaimed soil biological activity and rape growth[D].Taiyuan:Shanxi University,2014.

[15] 于鑫鑫,王芷,刘莉.土壤调理剂对露天煤矿排土场土壤酶活和微生物多样性的影响[J].工业微生物,2023,53(5):163-171.
YU X X,WANG Z,LIU L.Effects of soil conditioners on soil enzyme activities and microbial diversity in open-pit coal mine dumps[J].Industrial microbiology,2023,53(5):163-171.

[16] 李佳川,杨瑞平,张显.灌水高温闷棚处理对温室连作土壤修复效果的影响[J].北方园艺,2016(15):172-175.
LI J C,YANG R P,ZHANG X.Effect of irrigation and high temperature tightly greenhouse on enzyme activity changes in continuous cropping soil[J].Northern horticulture,2016(15):172-175.

[17] 樊军,郝明德.黄土高原旱地轮作与施肥长期定位试验研究Ⅱ:土壤酶活性与土壤肥力[J].植物营养与肥料学报,2003,9(2):146-150.
FAN J,HAO M D.Study on long-term experiment of crop rotation and fertilization in the loess plateau Ⅱ:Relationship between soil enzyme activities and soil fertility[J].Journal of plant nutrition and fertilizers,2003,9(2):146-150.

[18] 岳宗伟,李嘉骁,孙向阳,等.化肥有机肥配施对土壤性质、樱桃果实品质和产量的影响[J].浙江农业学报,2023,35(9):2192-2201.
YUE Z W,LI J X,SUN X Y,et al.Effects of chemical fertilizer combined with organic fertilizer on soil properties,cherry fruit quality and yield[J].Acta agriculturae Zhejiangensis,2023,35(9):2192-2201.

[19] 谭海燕,周文星,童江云,等.昆明地区耕地土壤电导率和水溶性盐的关系及土壤盐化情况分析[J].云南农业科技,2018(1):4-6.
TAN H Y,ZHOU W X,TONG J Y,et al.Relationship between soil conductivity and water-soluble salts and analysis of soil salinization in arable land in Kunming[J].Yunnan agricultural science and technology,2018(1):4-6.

[20] 毛伟,郁洁,李文西,等.近40年江苏农田土壤pH时空变化特征及驱动因素[J].植物营养与肥料学报,2023,29(2):264-272.
MAO W,YU J,LI W X,et al.Spatial and temporal variation of cropland pH and the driving factors in Jiangsu over the past 40 years[J].Journal of plant nutrition and fertilizer,2023,29(2):264-272.

[21] CHANDI K,UDOMKUN P,BOONUPARA T,et al.Enhancing soil health,microbial count,and hydrophilic methomyl and hydrophobic lambda-cyhalothrin remediation with biochar and nano-biochar[J].Scientific reports,2024,14(1):19551.

[22] 丛铭.生物炭及其老化对小白菜生长和土壤肥力的影响[D].武汉:华中农业大学,2021.
CONG M.Effects of biochar and its aging on growth and soil fertility of *Brassica napus*[D].Wuhan:Huazhong Agricultural University,2021.

[23] 胡昕怡,徐伟健,施珂珂,等.土壤/沉积物中黑碳的老化模拟研究进展[J].环境工程技术学报,2020,10(5):860-870.
HU X Y,XU W J,SHI K K,et al.Research progress of aging simulation of black carbons(BCs) in soils/sediments[J].Journal of environmental engineering technology,2020,10(5):860-870.

[24] HE L,ZHONG H,LIU G,et al.Remediation of heavy metal contaminated soils by biochar:mechanisms,potential risks and applications in China[J].Environmental pollution,2019,252:846-855.

[25] 杨丽,王劲松,董二伟,等.长期施用秸秆生物炭对土壤养分及作物生长的影响[J].干旱地区农业研究,2024,42(2):62-70.
YANG L,WANG J S,DONG E W,et al.Effects of long-term application of straw biochar on soil nutrients and crop growth[J].Agricultural research in the arid areas,2024,42(2):62-70.

[26] 牛政洋,闫伸,郭青青,等.生物炭对两种典型植烟土壤养分、碳库及烤烟产质量的影响[J].土壤通报,2017,48(1):

155-161.
NIU Z Y, YAN S, GUO Q Q, et al.Effects of biochar on yield and quality of flue-cured tobacco and nutrients and carbon pool in two typical soils planted with tobacco[J].Chinese journal of soil science, 2017, 48(1): 155-161.

[27] 马理,刘文菊.不同生育期施用微生物菌剂对设施番茄生产和土壤养分的影响[J].蔬菜,2023(10):35-40.
MA L, LIU W J.Effects of microbial agents applied at different growth stages on tomato production and soil nutrients in facilities[J].Vegetable, 2023(10): 35-40.

[28] INAGAKI F, NUNOURA T, NAKAGAWA S, et al.Biogeographical distribution and diversity of microbes in methane hydrate-bearing deep marine sediments on the Pacific Ocean Margin[J].Proceedings of the national academy of sciences, 2006, 103(8): 2815-2820.

[29] 张志红,彭桂香,李华兴,等.生物肥与甲壳素和恶霉灵配施对香蕉枯萎病的防治效果[J].生态学报,2011,31(4):1149-1156.
ZHANG Z H, PENG G X, LI H X, et al.Effects on controlling banana *Fusarium* wilt by bio-fertilizer, chitosan, hymexazol and their combinations[J].Acta ecologica Sinica, 2011, 31(4): 1149-1156.

[30] 朱菲莹,张屹,肖姬玲,等.生物有机肥对土壤微生物群落结构变化及西瓜枯萎病的调控[J].微生物学报,2019,59(12):2323-2333.
ZHU F Y, ZHANG Y, XIAO J L, et al.Regulation of soil microbial community structures and watermelon *Fusarium* wilt by using bio-organic fertilizer[J].Acta microbiologica Sinica, 2019, 59(12): 2323-2333.

[31] 徐沛国,谢奎忠,胡新元,等.不同连作年限马铃薯根际土壤细菌群落特征研究[J].干旱地区农业研究,2024,42(3):197-205.
XU P G, XIE K Z, HU X Y, et al.Characterization of inter-root soil bacterial communities in potato with different years of continuous cropping[J].Agricultural research in the arid areas, 2024, 42(3): 197-205.

[32] 刘辉,韦璐璐,朱龙发,等.鞘氨醇单胞菌的研究进展[J].微生物学通报,2023,50(6):2738-2752.
LIU H, WEI L L, ZHU L F, et al.Research progress of *Sphingomonas*[J].Microbiology China, 2023, 50(6): 2738-2752.

[33] 张钟月.患溃疡病或正常猕猴桃内生及土壤细菌多样性及群落结构研究[D].成都:四川农业大学,2018.
ZHANG Z Y.Bacterial community and diversity changes associated with natural canker disease in tissues or rhizosphere soils of *Actinidia chinensis*[D].Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2018.

[34] 乔帆,陈汉清,畅文军,等.菜籽饼肥对香蕉枯萎病的防效及其对土壤细菌的影响[J].基因组学与应用生物学,2021,40(4):1702-1710.
QIAO F, CHEN H Q, CHANG W J, et al.Control effect of rapeseed cake fertilizer on banana *Fusarium* wilt and its effect on soil bacteria[J].Genomics and applied biology, 2021, 40(4): 1702-1710.

[35] 田晴,高丹美,李慧,等.小麦根系分泌物对西瓜连作土壤真菌群落结构的影响[J].中国农业科学,2020,53(5):1018-1028.
TIAN Q, GAO D M, LI H, et al.Effects of wheat root exudates on the structure of fungi community in continuous cropping watermelon soil[J].Scientia agricultura Sinica, 2020, 53(5): 1018-1028.

[36] 朱鹏飞.生物炭固体酸耦合微生物加速堆肥过程中碳转化以及重金属钝化的研究[D].南宁:广西大学,2023.
ZHU P F.Study on carbon conversion and heavy metal passivation in composting process accelerated by biochar solid acid coupled microorganisms[D].Nanning: Guangxi University, 2023.

[37] 胡俏强,李英,卢国强,等.高温闷棚技术对设施辣椒连作障碍防治效果的研究[J].辣椒杂志,2015,13(1):23-25.
HU Q Q, LI Y, LU G Q, et al.Effects of high temperature stuffy greenhouse on continuous cropping obstacle control in hot pepper[J].Journal of China capsicum, 2015, 13(1): 23-25.

[38] 邱黛玉,宋世杰.土壤处理对连作党参土壤酶活性及生长的影响[J].时珍国医国药,2024,35(2):441-445.
QIU D Y, SONG S J.The effect of soil treatment on soil enzyme activity and growth of continuous cropping *Codonopsis pilosula*[J].Journal of Li-shizhen traditional Chinese medicine, 2024, 35(2): 441-445.

[39] 吴小丽,马留辉,张慧娜.不同微生物菌肥对甜瓜生长、产量和品质的影响[J].中南农业科技,2024,45(7):1-4.
WU X L, MA L H, ZHANG H N.The effects of different microbial fertilizers on the growth, yield, and quality of sweet melons [J].South-central agricultural science and technology, 2024, 45(7): 1-4.