

徐 晗,鄢紫薇,覃卫林,等. 生物质炭调控辣椒连作障碍研究进展[J]. 江苏农业科学,2023,51(6):23-31.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.06.004

生物质炭调控辣椒连作障碍研究进展

徐 晗¹,鄢紫薇¹,覃卫林²,邢 丹³,王 玺¹,郑志杰¹,林 杉¹

(1. 华中农业大学资源与环境学院/农业农村部长江中下游耕地保育重点实验室,湖北武汉 430070;
2. 湖北省长阳土家族自治县农业农村局,湖北宜昌 443500; 3. 贵州省农业科学院辣椒研究所,贵州贵阳 550006)

摘要:随着我国农业的发展,由于长期连作引起的生长不良、产量下降且品质变差等连作障碍问题日益影响了我国农产品的经济效益,并造成食品安全风险。我国是辣椒种植大国,由于不合理的栽培和管理措施,辣椒连作障碍已经成为种植区的共性问题。辣椒连作障碍表现为土壤严重酸化、土壤养分失衡并且辣椒出现严重病虫害,因此对辣椒连作土壤进行修复是解决辣椒连作障碍的关键。近年来,生物质炭因其具有独特的结构以及吸附性、碱性等性质,在农业生产中作为一种重要的土壤改良剂得到广泛的关注与应用,故利用生物质炭作为调理剂来缓解辣椒连作障碍具有一定的潜力。本文总结了辣椒连作障碍的危害以及在不同方面的产生原因,总结了为缓解辣椒连作障碍所提出的农艺措施和物理化学调控方法以及这些方法的局限性,综述了生物质炭在改良连作酸化土壤、调控失衡土壤养分、改善土壤微生物群落结构、抑制辣椒疫病和抑制连作辣椒的自毒作用 5 个方面的研究进展,分析了利用生物质炭缓解辣椒连作障碍的应用潜力,并对未来生物质炭应用于连作土壤改良的研究作出展望。

关键词:生物质炭;辣椒连作障碍;酸性土壤改良;土壤养分;化感作用

中图分类号:S641.306 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)06-0023-09

辣椒 (*Capsicum annuum* L.) 因其果实营养丰

富、味道鲜美而在世界各地广泛栽培,在我国种植面积达 210 万 hm^2 以上,其中在河南、贵州、云南和江苏 4 省种植面积均超过 13 万 hm^2 ^[1]。近年来,由于连作障碍造成的产量下降且品质变差等问题已经严重影响到我国农作物的经济收益。在我国辣椒主产区发生的生长不良、产量下降、病害频发等辣椒连作障碍问题日益严重^[2],有研究指出辣椒连作后产量和品质都会出现一定程度的下降^[3],辣椒

收稿日期:2022-05-09

基金项目:国家重点研发计划(编号:2021YFD1901202);湖北省重点研发计划(编号:2021BCA156);武汉市科技计划(编号:2020020601012284)。

作者简介:徐 晗(1998—),男,吉林松原人,硕士研究生,主要从事土壤生态研究。E-mail:1778967364@qq.com。

通信作者:林 杉,博士,副教授,主要从事土壤改良与温室气体减排研究。E-mail:linshan@mail.hzau.edu.cn。

[43] See B D, Hashim S J, Shafri H, et al. A new rapid, low-cost and GPS-centric unmanned aerial vehicle incorporating in-situ multispectral oil palm trees health detection [J]. Journal of Agricultural Science and Botany, 2018, 2(4): 12-16.

[44] 秦 丰, 刘东霞, 孙炳达, 等. 基于图像处理技术的四种苜蓿叶部病害的识别[J]. 中国农业大学学报, 2016, 21(10): 65-75.

[45] 李亚文, 张 军, 陈月星. 基于 K-means 和特征提取的植物叶部病害检测与实现[J]. 陕西农业科学, 2021, 67(6): 33-37, 41.

[46] 陈 荣, 李 旺, 周文玉. 基于灰度共生矩阵和支持向量机的茶叶病害诊断研究[J]. 贵州科学, 2021, 39(4): 80-84.

[47] Wu C, Wang X. Preliminary research on the identification system for anthracnose and powdery mildew of sandalwood leaf based on image processing[J]. PLoS One, 2017, 12(7): e0181537.

[48] 郑建华, 朱立学, 朱 蓉. 基于多特征融合与支持向量机的葡萄病害识别[J]. 现代农业装备, 2018(6): 54-60.

[49] Agarwal M, Gupta S, Biswas K K. A new Conv2D model with modified ReLU activation function for identification of disease type and severity in cucumber plant [J]. Sustainable Computing: Informatics and Systems, 2021, 30: 100473.

[50] 孙 俊, 朱伟栋, 罗元秋, 等. 基于改进 MobileNet-V2 的田间农作物叶片病害识别[J]. 农业工程学报, 2021, 37(22): 161-169.

[51] Upadhyay S K, Kumar A. A novel approach for rice plant diseases classification with deep convolutional neural network [J]. International Journal of Information Technology, 2022, 14(1): 185-199.

[52] 卜翔宇. 基于叶片图像的农作物病害识别方法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.

[53] Adedola A, Owolawi P A, Mapayi T. Deep learning based on nasnet for plant disease recognition using leave images [C]//2019 International Conference on Advances in Big Data, Computing and Data Communication Systems (icABCD). IEEE, 2019: 1-5.

连作障碍已成为种植区的共性问题。

由于意识到连作障碍在设施蔬菜生产上的危害性,不少种植大户通过改变耕作方式等农艺措施来破除连作障碍,例如运用轮作、间作等耕作方式^[4-5],施用有机肥、进行土壤强还原灭菌等措施^[6-7]。这些方法都具有一定的局限性,难以大面积推广,蔬菜连作障碍的问题依然严峻。因此,明确蔬菜连作障碍的产生机理,探究减缓连作障碍的有效技术措施,具有一定理论研究意义和实践应用价值。

生物质炭是由生物质在无氧或缺氧状态下通过热裂解过程得到的一种富碳物质,近年来在农业上应用广泛。大量研究指出,施用生物质炭可以增强土壤肥力并改善植物根部环境,进而抑制植物土传病害的发生^[8]。鉴于现阶段辣椒连作障碍防治技术见效慢、周期长等问题,本文在分析辣椒连作障碍产生原因的基础上探讨了现有连作障碍防控技术的不足,同时对生物质炭缓解辣椒连作障碍的机理及应用前景进行了阐述,以期对辣椒连作障碍防治技术的改进提供理论依据。

1 辣椒连作障碍的成因

连作障碍是指同一作物在连续种植多年后,即使保持正常的栽培与管理措施,也会出现产量降低、品质下降、生育状况变差、病害严重的现象^[9]。目前认为导致连作障碍的原因主要是 3 个方面:(1)土壤理化性质改变;(2)植物通过各种途径分泌自毒物质而产生自毒作用;(3)土壤微生物群落结构改变,病原微生物增加,病虫害频发。

1.1 土壤理化性质改变

1.1.1 土壤酸化 在农业生产中,过量施用铵态氮肥等酸性肥料会加剧土壤酸化^[10]。辣椒连作常常伴随着氮肥的过量施用,土壤中多余的确态氮与钙、镁等阳离子结合,使氢离子过剩从而导致土壤酸化,长期连作还会导致土壤电导率升高,进一步加剧辣椒连作障碍^[11]。有研究对连作辣椒土壤的酸化趋势进行分析,结果表明土壤 pH 值与土壤养分变化呈负相关关系,即辣椒种植过程中施用酸性肥料是导致其连作障碍的重要原因,其中 NO_3^- 离子的富集占主导过程^[12]。当土壤严重酸化时,辣椒根系的生理机能会被严重破坏,土壤中 P、Ca、Mg 养分的有效性降低,辣椒作物会出现缺素症和早衰,甚至导致植株死亡^[13]。

1.1.2 土壤养分失衡 长期种植同种或同科蔬菜,对于土壤中某种营养元素的特异性吸收过多,并且缺乏配套的施肥管理措施,导致某些元素的超量或缺失,引起连作障碍^[14]。在同一块地长期连作辣椒,会造成辣椒必需元素的缺失和有害物质的积累,严重影响下茬辣椒的生长。有研究指出,连作辣椒土壤中 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 等离子含量和大量元素均高度富集,辣椒所需的营养元素出现失衡,出现了严重的连作障碍^[15]。刘来等的研究指出,化肥和复合肥的大量投入会导致辣椒连作土壤中 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 含量随着年限增加而升高,并且土壤有效磷和速效钾含量也显著升高^[12]。周倩的研究指出,连作辣椒土壤中 K、Mg 等元素含量高于正茬土壤,但 Mn、Cu、Mo 等微量元素的含量减少,且连作辣椒植株中各元素含量均低于正茬辣椒,说明连作土壤中富集的养分并未被辣椒植株吸收^[16]。综上可知,由于不合理的施肥管理措施,种植过程中土壤肥力降低和微量元素减少是导致辣椒连作障碍的原因之一。

1.2 化感自毒作用

自毒作用是辣椒连作障碍形成的重要原因^[17]。江山等研究指出,辣椒根系分泌物中有 6 种化感物质对线辣椒种子萌发有抑制作用^[18]。王广印等研究表明,辣椒的叶、根、茎和全株水浸液均有自毒作用^[19]。辣椒化感物质的来源包括淋溶、残茬分解和根系分泌等,其中辣椒的最主要化感物质为邻苯二甲酸二丁酯(DBP)和邻苯二甲酸叔二丁酯(DIBP)^[20],这 2 种物质对辣椒的产量和品质有一定的负面影响,并且受到 DBP 污染的辣椒根茎和果实等部位会富集化感物质^[21]。另有研究表明,当土壤中 DBP 或 DIBP 的浓度达到 20 mg/kg 时,辣椒的生长受到显著抑制,且果实品质降低^[22]。

1.3 土壤微生物区系变化

土壤微生物对维持土壤生态系统健康起着重要的作用^[23]。蔬菜连作会形成特殊的土壤环境,降低土壤微生物的数量和多样性,从而提高土传病害的发病率^[24]。Wu 等的研究表明,长期连作土壤中微生物总量、细菌和放线菌等有益微生物的数量显著降低^[25];刘来等研究指出,辣椒土壤中真菌数量随着连作年限升高而升高,且土壤严重酸化、土壤酶活性显著降低^[26];辣椒连作会引起土壤细菌和古菌的占比持续下降,土壤微生物结构被破坏^[27]。土壤连续种植同种作物后根系分泌物种类单一,根系

活动对微生物的激活作用也相对较小^[28],导致植物给微生物提供的营养也相对单一,从而导致了连作障碍。

目前,通常所说的连作障碍不仅是指连续种植同种作物本身引起的连作障碍,还包含施肥不合理而导致的土壤质量下降所引起的作物障碍,即使更换耕作模式,随着种植年限的延长,也可能引发作物生育障碍^[29]。需要了解作物连作障碍与施肥不良障碍的联系,针对不同作物和不同土壤的不同连作障碍的主导因素,对连作障碍形成机理开展进一步研究。

2 辣椒连作障碍防控技术

蔬菜连作障碍的产生有多种原因,针对于不同原因导致的连作障碍,研究人员提出了农艺调控技术、物理化学调控技术和生物调控技术等防控方法。

2.1 农艺调控技术

2.1.1 改变种植模式 改变种植模式是缓解连作障碍的常见方法,即选择适宜的作物采取轮作或间作,从而改善土壤微生态环境并控制连作障碍的发生^[30]。有研究指出,采用玉米-辣椒间作和辣椒-草带间作 2 种模式均可以显著改善连作辣椒土壤微生物结构特征^[31],使土壤肥力提高。吴宏亮等研究表明,西瓜和辣椒轮作模式下,辣椒连作土壤中真菌数量显著降低^[32]。江冰冰等将韭菜和辣椒进行间作后发现,韭菜茎叶挥发物和浸提液对辣椒疫霉菌有抑制作用,可以显著减轻辣椒疫病^[33]。虽然间作、轮作等种植模式有助于作物减轻连作障碍,但随着种植年限的延长又会引发作物生育障碍,即采用改变种植模式调控连作障碍的优势维持时间较短,一般只能维持 1~2 年^[34]。

2.1.2 嫁接技术 嫁接是克服连作障碍并实现抗病增产的有效途径之一,其主要原理是通过抗病砧木的嫁接提高植株抗病性和抗逆性,从而克服连作障碍。刘业霞等研究指出,嫁接辣椒的根系活力更强,对青枯病病菌有更强的抵抗力^[35]。杨茹薇等的研究表明,嫁接处理可以提高 3 个品种辣椒的抗病能力^[36]。嫁接不仅能提高辣椒的抗病性,还可调节辣椒根际土壤环境。于迪的研究表明,嫁接辣椒根际微生物总数及酶活性均显著提高^[11]。目前,应用嫁接技术缓解辣椒连作障碍需要筛选优良抗病砧木,对砧木的品质要求严格,故在农业实践生产过程中大范围的应用难以实现。

2.1.3 科学施肥 改变施肥方式并进行科学施肥是预防辣椒连作障碍的一项重要调控技术。研究指出,缓解连作障碍的关键环节是高效利用氮肥^[37]。在农业生产过程中,农户往往大量施用氮磷钾肥,其他微量元素和有机物质被忽视,从而导致重茬种植的辣椒品质差、产量低。辣椒科学施肥主要是指运用有机肥替代化肥和微量元素对营养物质进行补充。赵尊练等研究表明,在连作辣椒土壤中施用有机肥并补充钾肥显著提高了辣椒产量和单株果数,明显缓解了连作障碍^[38]。施用有机肥不仅提高作物产量与品质,还有利于改善土壤微生态结构并提高土壤微生物多样性及酶活性^[39]。除有机肥外,有研究指出,钙镁磷肥等微量元素肥料的施用可以改善连作土壤微生态环境,并有助于调控土壤养分平衡^[40]。综上所述,对连作辣椒进行科学施肥处理,可以改善辣椒品质、提高产量,是克服辣椒连作障碍的一项重要措施。

2.2 物理化学调控技术

2.2.1 土壤强还原 对土壤进行强还原处理是防控土传病害的一项重要措施^[41],其机理是通过灌溉、淹水、覆膜等手段创造出缺氧强还原环境来消灭好氧病原菌。防控辣椒土传病害常用的强还原措施包括土壤灭菌、高温闷棚、土壤淹水等。侯永侠等研究指出,土壤灭菌措施可以显著提高辣椒鲜质量,并降低了有害微生物数量,减轻了连作障碍,但土壤灭菌不能消除由化感物质引起的自毒作用^[42]。王光飞等将连作辣椒土壤进行淹水处理后,土壤中辣椒疫霉的数量显著减少,但淹水处理防控辣椒疫病的效果随辣椒疫霉数量的增加而减弱^[43]。在实际生产中,土壤灭菌、淹水处理等强还原措施均有一定的局限性,并且不能完全消除连作障碍的影响。

2.2.2 添加改良剂 近年来随着肥料行业的发展,众多土壤改良剂应用于农业生产中,如硝化抑制剂、保水剂、脲酶抑制剂等,土壤改良剂的施用可以改善土壤理化性质,增强保水保肥能力,从而进一步增加土壤养分并促进微生物生长,缓解辣椒连作障碍。张福建等在连作辣椒土壤中施入生石灰可显著抑制土壤酸化,降低辣椒发病率^[44]。针对由化感物质引起的连作障碍,研究人员提出用凹土等黏土矿物进行改良,有研究发现,在土壤中施用 20~40 g/kg 的凹土改良剂可以显著降低化感物质对作物的毒害作用^[45]。土壤改良剂的混合配施在现阶段

段得到广泛关注,任旭琴等改良了辣椒自毒作用修复剂的配方,指出凹土、蜂窝煤渣和腐植酸的混合剂对辣椒连作障碍的改善效果更加显著^[22]。

2.3 生物调控技术

辣椒在连作过程中,往往伴随着土壤养分失衡和微生物区系劣变等问题的发生,向土壤中引入有益微生物可以使其拮抗有害病原菌或在根际形成生物屏障,从而减轻土传病害^[46]。高晶霞等在拱棚连作辣椒土壤中施用荧光假单胞杆菌、巨大芽孢杆菌、枯草芽孢杆菌等微生物菌剂,结果表明微生物菌剂均可提高连作辣椒产量和品质^[47]。除单独施用微生物菌剂外,生物强化还原措施(BRSD)可以在一定程度上对连作土壤进行改良,即在添加生物质材料后创造强还原环境,从而达到杀灭土壤病原微生物的目的。郭树根等在连作6年的辣椒土壤上进行BRSD改良措施,结果表明处理后的辣椒产量提高47.5%,并且尖孢镰刀菌数量显著减少^[48]。顾志光等在土壤淹水处理的基础上加入0.25%的小麦秸秆的生物强还原处理可显著降低辣椒疫霉数量^[49]。针对辣椒连作过程中出现的养分有效性降低等问题,杨冬艳等研究表明,在连作辣椒土壤中施用溶磷菌和解钾菌能显著提高土壤养分含量,并提高辣椒产量^[50]。王岩等研究指出,施用丛枝菌根真菌(AM真菌)促进了连作辣椒生长,有利于克服连作障碍^[51]。利用生物调控技术防控辣椒连作障碍二次污染较小,但实施成本相对较高,需要与其他防控技术相结合应用达到最佳效果。

3 生物质炭的性质与特征

生物质炭是在完全或部分缺氧条件下,动植物生物质(秸秆、畜禽粪便等)经热裂解炭化产生的高含碳量固态物质^[52]。生物质炭现阶段应用较广泛,有研究表明,生物质炭可以改良土壤理化性质,如提高土壤持水量^[53]、增加养分含量^[54]、改良土壤质地^[55]等,生物质炭具有吸附性、碱性等性质,使其可应用于障碍土壤改良。

3.1 生物质炭的吸附性

生物质炭具有多级孔隙结构,并且在极大的比表面积上存在多种官能团,所以具有极强的吸附能力^[56],生物质炭施入土壤后,其芳香结构的边缘会氧化为—COOH,进一步增加了对阳离子的吸附能力^[57]。生物质炭的强吸附性可以提高土壤保水性和养分固定能力^[58],从而减少养分流失和干燥环境

对土壤微生物的不利影响。Steiner等的研究指出,微生物的呼吸作用和微生物数量均随木炭施入量的提高呈线性增加^[59]。

3.2 生物质炭的碱性

作物在生长过程中会吸收大量 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 等阳离子,植物会积累有机阴离子作为碱基来中和阳离子,在热解过程中这些碱基被浓缩保留从而使生物质炭呈碱性^[60]。热解温度和生物质种类的不同会影响生物质炭的碱性,Yuan等在300、500、700℃下制备了不同作物秸秆的生物质炭,发现生物质炭的碱基含量和pH值均随制备温度的升高而增加^[61]。生物质炭中含有氧化物和碳酸盐等成分,施入土壤中可以增加交换性盐基离子含量^[62],从而缓解土壤酸化。

3.3 生物质炭的养分组成

有机物料自身含有一些养分,在制备生物质炭的过程中这些营养元素经过热解后在生物质炭中富集,因此将生物质炭施入土壤中可以显著提高土壤肥力^[63]。不同热解温度会影响生物质炭的养分含量,其中C和N的含量随温度的升高而降低,而K、Ca、Mg和P等元素的含量随温度的升高而增加^[64]。同时生物质炭具有极高的化学稳定性,一定条件下可以在土壤中长时间稳定存在而不被微生物分解^[65]。综上所述,由于生物质炭中含有大量碳、氮和微量元素等养分并且十分稳定,故可以作为土壤有机碳源和养分来源长期存在。

4 生物质炭对辣椒连作障碍的调控作用

4.1 生物质炭改善土壤理化性质

4.1.1 生物质炭改良酸化土壤 辣椒连作过程中酸化现象十分严重,其中肥料的过度施用是主要原因之一^[66]。张福建等对江西省设施辣椒的调查中指出,连作辣椒土壤pH值与连作年限呈负相关,并且土壤电导率与连作年限呈正相关^[67],说明辣椒连作土壤在酸化的同时富集了大量离子。国内外诸多研究指出,生物质炭可显著提高酸性土壤的pH值^[68]。生物质炭改良酸性土壤的主要机制是生物质炭的盐基离子与交换性 H^+ 、交换性 Al^{3+} 进行阳离子交换反应,并将活跃的酸性离子转化为稳定的化合物^[69]。李秋霞等在江西红壤上进行的连续3年的试验表明,生物质炭的连续施用提高了土壤pH值和阳离子交换量,并且施用量越高改良效果越好^[70]。有研究指出,制备生物质炭的热解温度越

高,生物质炭含有的盐基离子越多,施用后土壤 pH 值提高越显著^[71]。不同种类、不同热解温度以及不同用量的生物质炭对酸性土壤的改良效果有所差异(表 1)^[70-73]。

表 1 不同生物质炭的改良效果差异

来源文献	种类	热解温度 (℃)	pH 值	施用量	土壤 pH 值提升幅度 (%)	土壤 CEC 值提升幅度 (%)
[70]	水稻秸秆	550	10.52	22.5 t/hm ²	12.34	15.31
	玉米秸秆	550	10.65	22.5 t/hm ²	—	12.88
	小麦秸秆	550	10.54	22.5 t/hm ²	—	13.39
	稻壳	550	7.75	22.5 t/hm ²	16.53	21.90
	竹子	550	9.48	22.5 t/hm ²	—	8.24
[71]	小麦秸秆	350	10.35	10 t/hm ²	8.88	32.90
	小麦秸秆	350	10.35	20 t/hm ²	9.51	45.82
	小麦秸秆	350	10.35	30 t/hm ²	12.68	44.61
[72]	木薯秸秆	500	10.24	20 g/kg	30.54	—
	桉树枝	500	9.56	20 g/kg	20.00	—
	猪粪	500	10.35	20 g/kg	41.54	—
[72]	椰糠	300	9.12	20 g/kg	10.99	—
	椰糠	400	9.38	20 g/kg	17.58	—
	椰糠	500	9.47	20 g/kg	24.62	—
	椰糠	600	9.72	20 g/kg	27.69	—
[73]	玉米秸秆	300	—	1.65%	8.38	—
	玉米秸秆	500	—	1.65%	18.93	—
	玉米秸秆	700	—	1.65%	34.34	—

注:表中“—”表示文献中无相应数据。

4.1.2 生物质炭调控土壤养分 连作土壤养分并非随着栽培时间延长而线性增长,尽管肥料施用量增加,但土壤养分会呈抛物线式下降^[74]。在养分失衡的土壤中施入生物质炭不仅可以增加土壤碳储量,还可通过调节土壤 pH 值提高磷、钾、镁、钙等元素的生物有效性^[75]。生物质炭由于其吸附性良好可在土壤中形成较大的团聚体,从而提高土壤对养分的固持作用^[55];另一方面,生物炭自身也能够吸持养分并固定在土壤中,达到缓释效果^[76]。国内外许多研究指出,生物质炭可以改良养分失衡的土壤并提高养分利用率,Zhao 等的研究指出,在连作土壤中施用生物质炭会显著提高土壤 pH 值和养分利用率^[77]。Li 等的研究指出,在酸化紫色土中施用生物质炭可以促进土壤碳氮循环与作物生长^[78]。Khadem 等研究指出,生物质炭影响土壤有机质分解和养分循环相关酶的活性,有助于维持土壤养分平衡^[79]。张福建等研究指出,在连作辣椒土壤中施加谷壳生物质炭后,土壤中的有效养分含量显著升高,并且单株辣椒产量提高^[44]。说明生物质炭不仅可以改变土壤理化性质,增加土壤养分含量,还可

以提高作物养分利用率从而增加产量。

4.2 生物质炭对土壤微生物的影响

4.2.1 生物质炭改善土壤微生物群落结构 导致连作障碍发生的原因有多种,最根本的原因是土壤微生物丰度和多样性降低,病原微生物富集而引起各种土传病害^[80]。有报道指出,作物连作后土壤环境恶化会导致土壤微生物群落结构改变,有益微生物丰度和多样性降低,酸性细菌增加等问题^[81-84]。生物质炭本身含有大量矿质养分^[60],同时其固定的养分会在土壤中缓慢释放,为微生物生长提供必要条件^[59]。Ameur 等研究指出,随着生物质炭施用量升高,土壤微生物生物量、多样性指数和功能微生物数量均呈线性增加^[85],使得土壤系统结构更复杂、更稳定。一方面,生物质炭作为土壤改良剂,可以改善土壤理化性状从而改善根系微生物群落,达到抑制土传病害的效果^[86]。Wang 等研究表明,施用生物质炭显著提高了连作土壤中细菌的丰富度^[87];Zhao 等研究指出,生物质炭可以改善连作土壤根际微生物群落结构^[77],使微生物群落更稳定。另一方面,生物质炭由于其自身孔隙度大、吸附性

强,可以成为土壤中有益微生物的载体^[88]。Gu 等研究指出,生物质炭的施入增加了土壤中有益微生物的数量并促进了抗生素的分泌,还进一步减少了土壤中的病原菌数量^[89]。生物质炭不仅单独施用可以改良连作土壤,并且可以与有益微生物菌剂配施,增强其改良作用^[90]。王岩等研究指出,连作辣椒土壤养分含量、酶活性随生物质炭添加而升高,并且以生物质炭与 AM 真菌配施处理效果最佳^[51]。

4.2.2 生物质炭抑制辣椒疫病 辣椒连作引起的代表性土传病害是由辣椒疫霉菌 (*Phytophthora capsici* L.) 引起的辣椒疫病,辣椒疫病的严重程度不仅与病原菌数量相关,还与土壤理化和生物学性状息息相关。张福建等研究指出,单施生物质炭或与生石灰配施均能降低连作辣椒疫病发病率,并提高果实产量^[44]。有研究指出,生物质炭可增加辣椒土壤有益微生物数量,有效降低了土壤中病原菌数量和土传病害发生率^[91]。王光飞等研究指出,生物质炭的添加并未减少辣椒连作土壤中疫霉菌的数量^[92],但辣椒疫病发生率降低,说明生物质炭克服辣椒疫病的机理并非只有减少病原菌数量,在后续研究中表明,木霉菌、曲霉菌、芽孢杆菌、假单胞菌、链霉菌等 9 种菌株可以与生物质炭协同抑制辣椒疫霉^[93],这说明生物质炭抑制辣椒疫病的原理之一是其较大的孔隙度和较强的吸附能力促使其成为了有益微生物的载体,进一步减少了辣椒疫霉菌的数量,从而克服辣椒连作障碍。

4.3 生物质炭对自毒作用的抑制作用

作物会向土壤环境中释放自毒物质,化感物质会促进病原菌增殖从而导致连作障碍^[94]。有研究指出,辣椒根系分泌物对辣椒种子萌发有较强的自毒作用,且浓度越高抑制作用越强^[24]。生物质炭由于具有强吸附性,可以吸附和固定 DBP 等化感物质并降低其生物有效性,从而显著降低植物各器官对化感物质的富集^[95]。许多报道指出,生物质炭可以通过改良化感作用从而抑制连作障碍,Elmer 等研究发现,在连作土壤中施加生物质炭可有效改善连作过程中化感作用产生的负面影响^[96]。Wang 等研究表明,生物炭通过吸附作用能有效降低连作土壤中酚酸浓度,激活抗氧化酶活性^[97],从而有效抑制连作障碍。Rogovska 等研究指出,生物质炭处理可减轻玉米植株水浸液对种子胚根生长的抑制作用^[98]。添加生物质炭可缓解辣椒叶中浸提液对辣椒幼芽的化感作用,并且可以抑制疫霉菌的增

殖^[99],说明生物质炭可以吸附辣椒叶浸提液中的化感物质从而缓解了对自身的自毒作用。综上所述,生物质炭对于辣椒化感作用的抑制有良好的应用潜力。

5 总结与展望

辣椒种植过程中的连作障碍会引起植株养分利用率降低、疫病严重以及果实中硝酸盐含量过高等问题。根据生物质炭具有吸附性、碱性以及富含养分等特点,有助于改良土壤酸化、促进有益微生物富集、提供缓释养分和改善化感作用,故生物质炭在改良辣椒连作障碍方面具有理想的应用潜力。

生物质炭在农业领域有较多的研究,但目前有关生物质炭调控辣椒连作障碍的研究较少。因此,今后需加强以下 4 个方面的研究:(1)明确不同生物质炭的改良效果。不同生物质炭(种类不同、热解温度不同)对不同连作年限辣椒土壤的调控效果存在差异,未来应加强研究不同生物质炭对辣椒连作土壤的调控效果,明确不同来源生物质炭的适用范围,从而优化农业生产,提升辣椒产量和品质。(2)探究生物质炭调控化感作用的内在机制。生物质炭可以抑制化感作用,缓解连作障碍,但对于生物质炭对连作辣椒植株及化感物质的内在作用机制尚未阐明,需加强对生物质炭与化感效应的内在机理研究。(3)加强对生物质炭的长期监测。由于目前的研究基本集中于生物质炭的短期效应,缺乏长期研究,且施于土壤中的生物质炭存在老化现象,今后需要加强生物质炭施用后的长期监测研究。(4)完善生物质炭调控不同类型连作土壤效果的评价体系。目前有关生物质炭对土壤改良效应的评价体系尚未形成,需要合理的评价指标来明确不同生物质炭对土壤的改良效果,针对不同种类的土壤和生物质炭确立适宜当地情况的评价指标,使得评价结论更合理。

参考文献:

- [1] 邹学校,马艳青,戴雄泽,等. 辣椒在中国的传播与产业发展[J]. 园艺学报,2020,47(9):1715-1726.
- [2] Mazzola M, Manici L M. Apple replant disease: role of microbial ecology in cause and control[J]. Annual Review of Phytopathology, 2012,50:45-65.
- [3] 高晶霞,谢 华. 不同连作年限下辣椒的光合特性与果实品质[J]. 北方园艺,2021(19):48-53.
- [4] Tian Y Q, Zhang X Y, Liu J, et al. Microbial properties of rhizosphere

- soils as affected by rotation, grafting, and soil sterilization in intensive vegetable production systems [J]. *Scientia Horticulturae*, 2009, 123 (2): 139 – 147.
- [5] Min J, Lu K P, Sun H J, et al. Global warming potential in an intensive vegetable cropping system as affected by crop rotation and nitrogen rate [J]. *Clean – Soil, Air, Water*, 2016, 44 (7): 766 – 774.
- [6] Luan H A, Gao W, Huang S W, et al. Partial substitution of chemical fertilizer with organic amendments affects soil organic carbon composition and stability in a greenhouse vegetable production system [J]. *Soil & Tillage Research*, 2019, 191: 185 – 196.
- [7] Guo H C, Zhao X, Rosskopf E N, et al. Impacts of anaerobic soil disinfestation and chemical fumigation on soil microbial communities in field tomato production system [J]. *Applied Soil Ecology*, 2018, 126: 165 – 173.
- [8] Myers M R, King G M. Isolation and characterization of *Acidobacterium ailaui* sp. nov., a novel member of Acidobacteria subdivision 1, from a geothermally heated Hawaiian microbial mat [J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2016, 66 (12): 5328 – 5335.
- [9] Fehrmann W. Replant disease and its importance for fruit production [J]. *Acta Horticulturae*, 1988, 233 (2): 17 – 20.
- [10] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands [J]. *Science*, 2010, 327 (5968): 1008 – 1010.
- [11] 于迪. 嫁接克服设施辣椒连作障碍效果研究初探 [D]. 郑州: 河南农业大学, 2015: 30 – 31.
- [12] 刘来, 孙锦, 郭世荣, 等. 大棚辣椒连作土壤养分和离子变化与酸化的关系 [J]. *中国农学通报*, 2013, 29 (16): 100 – 105.
- [13] 郭红伟. 连作对土壤性状和辣椒生育、生理代谢的影响 [D]. 南京: 南京农业大学, 2011: 20 – 23.
- [14] Cesarano G, Zotti M, Antignani V, et al. Soil sickness and negative plant – soil feedback: a reappraisal of hypotheses [J]. *Journal of Plant Pathology*, 2017, 99 (3): 545 – 570.
- [15] 郭红伟, 郭世荣, 刘来, 等. 辣椒连作对土壤理化性状、植株生理抗性 & 离子吸收的影响 [J]. *土壤*, 2012, 44 (6): 1041 – 1047.
- [16] 周倩. 连作对线辣椒矿质元素吸收的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011: 30 – 32.
- [17] Tsuchiya K, Lee J W, Hoshina T. Allelopathic potential of red pepper (*Capsicum annuum* L.) [J]. *Japan Agricultural Research Quarterly*, 1994, 28 (1): 1 – 11.
- [18] 江山, 赵尊练, 臧纱纱, 等. 线辣椒根系分泌物中几种化感物质对其种子萌发和幼苗生长的影响 [J]. *西北农业学报*, 2013, 22 (12): 137 – 143.
- [19] 王广印, 周秀梅, 谢玉会, 等. 辣椒植株水浸液对辣椒种子萌发的自毒作用 [J]. *上海交通大学学报 (农业科学版)*, 2008, 26 (5): 407 – 410.
- [20] 耿广东, 张素勤, 程智慧. 辣椒根系分泌物的化感作用及其化感物质分析 [J]. *园艺学报*, 2009, 36 (6): 873 – 878.
- [21] 周震峰, 王建超, 饶潇潇. 三种设施蔬菜对邻苯二甲酸酯的吸收累积特征 [J]. *农业现代化研究*, 2015, 36 (6): 1086 – 1090.
- [22] 任旭琴, 高军, 陈伯清, 等. 辣椒 DBP/DIBP 胁迫及其修复剂优化和机理研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34 (6): 1121 – 1126.
- [23] van Bruggen A H C, Goss E M, Havelaar A, et al. One Health – Cycling of diverse microbial communities as a connecting force for soil, plant, animal, human and ecosystem health [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 664: 927 – 937.
- [24] van Bruggen A H C, Finckh M R. Plant diseases and management approaches in organic farming systems [J]. *Annual Review of Phytopathology*, 2016, 54: 25 – 54.
- [25] Wu Z J, Xie Z, Yang L, et al. Identification of autotoxins from root exudates of Lanzhou lily (*Lilium davidii* var. *unicolor*) [J]. *Allelopathy Journal*, 2015, 35 (1): 35 – 48.
- [26] 刘来, 黄保健, 孙锦, 等. 大棚辣椒连作土壤微生物数量、酶活性与土壤肥力的关系 [J]. *中国土壤与肥料*, 2013 (2): 5 – 10.
- [27] 何志刚, 王秀娟, 董环, 等. 日光温室辣椒连作不同年限土壤微生物种群变化及酶活性研究 [J]. *中国土壤与肥料*, 2013 (1): 38 – 42.
- [28] Brennan E B, Acosta – Martinez V. Cover cropping frequency is the main driver of soil microbial changes during six years of organic vegetable production [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 109: 188 – 204.
- [29] 李天来, 杨丽娟. 作物连作障碍的克服——难解的问题 [J]. *中国农业科学*, 2016, 49 (5): 916 – 918.
- [30] Fan P S, Chen G, Xu D L, et al. Study on obstacles to continuous cropping of vegetables and soil remediation technology [J]. *Asian Agricultural Research*, 2016, 8 (2): 64 – 65, 72.
- [31] 安瞳昕, 湛方栋, 李旺, 等. 旱坡地间作群体对作物根际微生物数量的影响 [J]. *干旱地区农业研究*, 2017, 35 (5): 102 – 106, 150.
- [32] 吴宏亮, 康建宏, 陈阜, 等. 不同轮作模式对砂田土壤微生物区系及理化性状的影响 [J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21 (6): 674 – 680.
- [33] 江冰冰, 张彧, 郭存武, 等. 韭菜和辣椒间作对辣椒疫病的防治效果及其化感机理 [J]. *植物保护学报*, 2017, 44 (1): 145 – 151.
- [34] Sumner D R, Minton N A, Brenneman T B, et al. Root diseases and nematodes in bahiagrass – vegetable rotations [J]. *Plant Disease*, 1999, 83 (1): 55 – 59.
- [35] 刘业霞, 姜飞, 张宁, 等. 嫁接辣椒对青枯病的抗性及其与渗透调节物质的关系 [J]. *园艺学报*, 2011, 38 (5): 903 – 910.
- [36] 杨茹薇, 秦勇, 吴慧, 等. 辣椒嫁接抗病效果研究 [J]. *新疆农业大学学报*, 2010, 33 (1): 27 – 30.
- [37] Aminifard M H, Bayat H. Influence of different rates of nitrogen fertilizer on growth, yield and fruit quality of sweet pepper (*Capsicum annuum* L. var. *California Wander*) [J]. *Journal of Horticulture and Postharvest Research*, 2018, 1 (2): 105 – 114.
- [38] 赵尊练, 史联联, 阎玉让, 等. 克服线辣椒连作障碍的施肥方案研究 [J]. *干旱地区农业研究*, 2006, 24 (5): 77 – 80, 114.
- [39] 曹云, 常志州, 马艳, 等. 沼液施用对辣椒疫病的防治效果

- 及对土壤生物学特性的影响[J]. 中国农业科学,2013,46(3): 507–516.
- [40] Ding J L, Jiang X, Ma M C, et al. Effect of 35 years inorganic fertilizer and manure amendment on structure of bacterial and archaeal communities in black soil of northeast China[J]. Applied Soil Ecology,2016,105:187–195.
- [41] Meng T Z, Ren G D, Wang G F, et al. Impacts on soil microbial characteristics and their restorability with different soil disinfection approaches in intensively cropped greenhouse soils [J]. Applied Microbiology and Biotechnology,2019,103(15):6369–6383.
- [42] 侯永侠,周宝利,吴晓玲,等. 土壤灭菌对辣椒抗连作障碍效果[J]. 生态学杂志,2006,25(3):340–342.
- [43] 王光飞,马 艳,常志州,等. 淹水改良土壤性状及对辣椒疫病的防效研究[J]. 水土保持学报,2013,27(2):209–214.
- [44] 张福建,陈 昱,杨 磊,等. 施用生物质炭和生石灰对连作辣椒生长的影响[J]. 核农学报,2019,33(6):1240–1247.
- [45] 任旭琴,高 军,陈伯清,等. 凹土对辣椒自毒作用修复的生理生化机制研究[J]. 土壤,2014,46(5):908–912.
- [46] Kloepper J W, Ryu C M, Zhang S A. Induced systemic resistance and promotion of plant growth by *Bacillus* spp. [J]. Phytopathology,2004,94(11):1259–1266.
- [47] 高晶霞,牛勇琴,吴雪梅,等. 微生物菌剂对拱棚连作辣椒生长、产量及品质的影响[J]. 北方园艺,2018(19):59–64.
- [48] 郭树根,沈怡斐,姚燕来,等. 生物强化还原处理防控辣椒连作障碍[J]. 浙江农业科学,2018,59(9):1674–1679.
- [49] 顾志光,马 艳,安 霞,等. 麦秸淹水处理对连作土壤性状和辣椒疫病田间防控效果的影响[J]. 农业环境科学学报,2014,33(9):1762–1769.
- [50] 杨冬艳,高晶霞,桑 婷,等. 溶磷菌和解钾菌对拱棚连作辣椒生长及土壤养分含量的影响[J]. 北方园艺,2019(6):1–6.
- [51] 王 岩,周 鹏,白立伟,等. 生物炭和 AM 真菌配施对连作辣椒生长和土壤养分的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文),2020,28(10):1600–1608.
- [52] Lehmann J. A handful of carbon[J]. Nature,2007,447(7141): 143–144.
- [53] Singh Mavi M, Singh G, Singh B P, et al. Interactive effects of rice – residue biochar and N – fertilizer on soil functions and crop biomass in contrasting soils[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2018,18(1):41–59.
- [54] Meier S, Moore F, González M E, et al. Effects of three biochars on copper immobilization and soil microbial communities in a metal – contaminated soil using a metallophyte and two agricultural plants [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2021, 43 (4): 1441–1456.
- [55] Blanco – Canqui H. Biochar and soil physical properties[J]. Soil Science Society of America Journal,2017,81:687–711.
- [56] Zhang X Y, Gao B, Creamer A E, et al. Adsorption of VOCs onto engineered carbon materials; a review [J]. Journal of Hazardous Materials,2017,338:102–123.
- [57] Glaser B, Lehmann J, Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal; a review[J]. Biology and Fertility of Soils,2002,35(4):219–230.
- [58] Han G M, Chen Q Q, Zhang S X, et al. Biochar effects on bacterial community and metabolic pathways in continuously cotton – cropped soil [J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition,2019,19(2): 249–261.
- [59] Steiner C, Das K C, Garcia M, et al. Charcoal and smoke extract stimulate the soil microbial community in a highly weathered xanthic Ferralsol[J]. Pedobiologia,2008,51(5/6):359–366.
- [60] Dai Z M, Zhang X J, Tang C, et al. Potential role of biochars in decreasing soil acidification—A critical review[J]. Science of the Total Environment,2017,581/582:601–611.
- [61] Yuan J H, Xu R K, Zhang H. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures [J]. Bioresource Technology,2011,102(3):3488–3497.
- [62] Xu X Y, Zhao Y H, Sima J K, et al. Indispensable role of biochar – inherent mineral constituents in its environmental applications: a review[J]. Bioresource Technology,2017,241:887–899.
- [63] Fox A, Gahan J, Ikoyi I, et al. Miscanthus biochar promotes growth of spring barley and shifts bacterial community structures including phosphorus and sulfur mobilizing bacteria[J]. Pedobiologia,2016, 59(4):195–202.
- [64] Cao X D, Harris W. Properties of dairy – manure – derived biochar pertinent to its potential use in remediation [J]. Bioresource Technology,2010,101(14):5222–5228.
- [65] Ding Y, Liu Y G, Liu S B, et al. Biochar to improve soil fertility. A review [J]. Agronomy for Sustainable Development, 2016, 36 (2):36.
- [66] Zhao Y H, Zhang L, Chen Y F, et al. Atmospheric nitrogen deposition to China; a model analysis on nitrogen budget and critical load exceedance [J]. Atmospheric Environment, 2017, 153:32–40.
- [67] 张福建,陈 昱,吴才君,等. 江西省设施辣椒连作障碍现状调查与分析[J]. 北方园艺,2018(17):75–81.
- [68] Teutscherova N, Lojka B, Houška J, et al. Application of holm oak biochar alters dynamics of enzymatic and microbial activity in two contrasting Mediterranean soils [J]. European Journal of Soil Biology,2018,88:15–26.
- [69] Shi R Y, Hong Z N, Li J Y, et al. Mechanisms for increasing the pH buffering capacity of an acidic ultisol by crop residue – derived biochars[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry,2017,65 (37):8111–8119.
- [70] 李秋霞,陈效民,靳泽文,等. 生物质炭对旱地红壤理化性状和作物产量的持续效应[J]. 水土保持学报,2015,29(3):208–213,261.
- [71] 袁金华,徐仁扣,俄胜哲,等. 生物质炭中盐基离子存在形态及其与改良酸性土壤的关系[J]. 土壤,2019,51(1):75–82.
- [72] 赵牧秋,金凡莉,孙照炜,等. 制炭条件对生物炭碱性基团含量及酸性土壤改良效果的影响[J]. 水土保持学报,2014,28(4): 299–303,309.
- [73] 杨彩迪,宗玉统,卢升高. 不同生物炭对酸性农田土壤性质和作物产量的动态影响[J]. 环境科学,2020,41(4):1914–1920.

- [74] 曾路生, 高岩, 李俊良, 等. 寿光大棚菜地酸化与土壤养分变化关系研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(4): 157–161.
- [75] Oladele S O. Changes in physicochemical properties and quality index of an alfisol after three years of rice husk biochar amendment in rainfed rice – maize cropping sequence[J]. Geoderma, 2019, 353: 359–371.
- [76] Xiao X, Chen B L, Chen Z M, et al. Insight into multiple and multilevel structures of biochars and their potential environmental applications; a critical review[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(9): 5027–5047.
- [77] Zhao L Y, Guan H L, Wang R, et al. Effects of tobacco stem – derived biochar on soil properties and bacterial community structure under continuous cropping of *Bletilla striata* [J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2021, 21(2): 1318–1328.
- [78] Li S P, Li Z L, Feng X, et al. Effects of biochar additions on the soil chemical properties, bacterial community structure and rape growth in an acid purple soil[J]. Plant, Soil and Environment, 2021, 67(3): 121–129.
- [79] Khadem A, Raiesi F. Influence of biochar on potential enzyme activities in two calcareous soils of contrasting texture[J]. Geoderma, 2017, 308: 149–158.
- [80] Yao Z Y, Xing J J, Gu H P, et al. Development of microbial community structure in vegetable – growing soils from open – field to plastic – greenhouse cultivation based on the PLFA analysis[J]. Journal of Soils and Sediments, 2016, 16(8): 2041–2049.
- [81] Zhong W H, Bian B Y, Gao N, et al. Nitrogen fertilization induced changes in ammonia oxidation are attributable mostly to bacteria rather than archaea in greenhouse – based high N input vegetable soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2016, 93: 150–159.
- [82] Zhao Y N, Mao X X, Zhang M S, et al. Response of soil microbial communities to continuously mono – cropped cucumber under greenhouse conditions in a calcareous soil of North China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2020, 20(5): 2446–2459.
- [83] Kalam S, Basu A, Ahmad I, et al. Recent understanding of soil acidobacteria and their ecological significance; a critical review[J]. Frontiers in Microbiology, 2020, 11: 580024.
- [84] 武春成, 周国彦, 曹霞, 等. 连作土壤连续施入生物炭对黄瓜品质及根区微生态的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(9): 143–147.
- [85] Ameer D, Zehetner F, Johnen S, et al. Activated biochar alters activities of carbon and nitrogen acquiring soil enzymes[J]. Pedobiologia, 2018, 69: 1–10.
- [86] 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.
- [87] Wang W P, Wang Z H, Yang K, et al. Biochar application alleviated negative plant – soil feedback by modifying soil microbiome[J]. Frontiers in Microbiology, 2020, 11: 799.
- [88] Egamberdieva D, Hua M, Reckling M, et al. Potential effects of biochar – based microbial inoculants in agriculture[J]. Environmental Sustainability, 2018, 1(1): 19–24.
- [89] Gu Y A, Hou Y G, Huang D P, et al. Application of biochar reduces *Ralstonia solanacearum* infection via effects on pathogen chemotaxis, swarming motility, and root exudate adsorption[J]. Plant and Soil, 2017, 415(1): 269–281.
- [90] Tao S Y, Wu Z S, Wei M M, et al. *Bacillus subtilis* SL – 13 biochar formulation promotes pepper plant growth and soil improvement[J]. Canadian Journal of Microbiology, 2019, 65(5): 333–342.
- [91] Gong H B, Tan Z X, Zhang L M, et al. Preparation of biochar with high absorbability and its nutrient adsorption – desorption behaviour[J]. Science of the Total Environment, 2019, 694: 133728.
- [92] 王光飞, 马艳, 郭德杰, 等. 秸秆生物炭对辣椒疫病的防控效果及机理研究[J]. 土壤, 2015, 47(6): 1107–1114.
- [93] 王光飞, 马艳, 郭德杰, 等. 生物质炭介导生防微生物抑制辣椒疫霉的作用[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(7): 1015–1023.
- [94] Zhang Z Z, Zhang Z D, Han X Y, et al. Specific response mechanism to autotoxicity in melon (*Cucumis melo* L.) root revealed by physiological analyses combined with transcriptome profiling[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, 200: 110779.
- [95] Kearns J P, Shimabuku K K, Mahoney R B, et al. Meeting multiple water quality objectives through treatment using locally generated char: improving organoleptic properties and removing synthetic organic contaminants and disinfection by – products[J]. Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development, 2015, 5(3): 359–372.
- [96] Elmer W H, Pignatello J J. Effect of biochar amendments on mycorrhizal associations and *Fusarium* crown and root rot of *Asparagus* in replant soils[J]. Plant Disease, 2011, 95(8): 960–966.
- [97] 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.
- [98] Rogovska N, Laird D, Cruse R M, et al. Germination tests for assessing biochar quality[J]. Journal of Environmental Quality, 2012, 41(4): 1014–1022.
- [99] 马艳, 王光飞. 生物炭防控植物土传病害研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2014(6): 14–20.