

高华, 涂昊泽, 赵钰媛, 等. 生物质炭调控药用植物连作障碍的研究进展 [J]. 福建农业学报, 2024, 39 (1): 105-114.

GAO H, TU H Z, ZHAO Y Y, et al. Research Progress on Biochar Application for Continuous Cropping of TCM Plants [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2024, 39 (1): 105-114.

## 生物质炭调控药用植物连作障碍的研究进展

高华<sup>1</sup>, 涂昊泽<sup>1</sup>, 赵钰媛<sup>2</sup>, 孔雯<sup>2</sup>, 夏文建<sup>3</sup>, 王飞儿<sup>1</sup>,

Muhammad Shaaban<sup>4</sup>, 林杉<sup>1\*</sup>

(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. 中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司, 云南 昆明 650051; 3. 江西省农业科学院土壤肥料与资源环境研究所, 江西 南昌 330200; 4. 河南科技大学农学院, 河南 洛阳 471000)

**摘要:**我国是中药材种植大国, 但不合理的栽培方式和管理措施导致中药材连作障碍在种植区普遍存在, 造成药材减产变质、道地产区转移、资源保护与利用不协调等, 严重影响药用植物生长发育。因此对中药材连作土壤进行修复是解决中药材连作障碍的一个关键措施。生物质炭一般呈碱性, 是一种良好的土壤改良剂, 能够增加土壤养分、改良酸化土壤、提升植物品质, 近年来得到广泛关注与应用, 因此利用生物质炭作为调理剂来缓解中药材连作障碍具有一定潜力。本文针对我国中药材连作障碍的可能成因及潜在危害, 分析生物质炭在解决药用植物连作造成的土壤理化性质改变、土壤微生物区系改变、化感自毒危害等问题上的作用, 并对生物质炭在药用植物生产上的应用潜力进行展望。

**关键词:** 连作障碍; 药用植物; 生物质炭; 土壤理化性质; 化感自毒作用

中图分类号: R28

文献标志码: A

文章编号: 1008-0384 (2024) 01-0105-10

### Research Progress on Biochar Application for Continuous Cropping of TCM Plants

GAO Hua<sup>1</sup>, TU Haoze<sup>1</sup>, ZHAO Yuyuan<sup>2</sup>, KONG Wen<sup>2</sup>, XIA Wenjian<sup>3</sup>, WANG Feier<sup>1</sup>,

Muhammad Shaaban<sup>4</sup>, LIN Shan<sup>1\*</sup>

(1. Key Laboratory of Arable Land Conservation in Middle and Lower Reaches of Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan, Hubei 430070, China;

2. Kunming Engineering Corp., Ltd., China Power Group, Kunming, Yunnan 650051, China; 3. Soil Fertilizer and Resource Environment Institute, Jiangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanchang, Jiangxi 330200, China;

4. College of Agriculture, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471000, China)

**Abstract:** As a major country in the world engaging in large-scale cultivation of traditional Chinese medicine (TCM) plants, China is facing a serious challenge in growth of the industry. Due to malpractices and poor management, undesirable consequences such as productivity decline and quality deterioration, relocation of authentic origins, insufficient resource protection, and uncoordinated material utilization have surfaced. The causes of the ill-effects may not be all clearly identified, nonetheless, rampant continuous cropping is deemed as one of the most urgent targets for correction. A generally alkali material, biochar is commonly applied to amend the soil in question to improve fertility, reduce acidification, and promote growth of the plants cultivated on it. It has been used by farmers in recent years, and the measure could be implemented to mitigate the damaging effects induced by the TCM continuous cropping as well. This article reviewed the benefits of biochar application on soil, such as adjusting the physicochemical properties, microbial community, and allelopathic environment. Some practical treatments for improvements are presented.

收稿日期: 2023-06-15 修回日期: 2023-11-12

作者简介: 高华 (2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事酸性土壤改良研究, E-mail: gaohua@webmail.hzau.edu.cn

\* 通信作者: 林杉 (1981—), 男, 博士, 副教授, 主要从事酸性土壤改良研究, E-mail: linsan@mail.hzau.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFD1901202); 云南省科技人才与平台计划 (202205AF150004); 湖北省重点研发计划项目 (2021BCA156); 湖北省烟草公司科技项目 (027Y2022-022)

**Key words:** Ill-effects of continuous cropping; traditional Chinese medicine plants; biochar; soil physiochemical properties; allelopathic autotoxicity

我国是中药材生产大国,自 21 世纪以来,随着中药材需求量的增加,中药材的集约化、规模化栽培越来越多,导致连作障碍也越来越严重。统计表明,我国约 70% 以块根入药的药用植物在种植过程中面临严重的连作障碍,其中包括地黄 (*Rehmannia glutinosa*)、三七 (*Panax notoginseng*)、人参 (*Panax ginseng*)、太子参 (*Pseudostellaria heterophylla*)、西洋参 (*Panaxquiquefolium*)、当归 (*Angelicasinensis*) 等<sup>[1]</sup>,导致土壤养分失衡、土壤酸化、重金属残留超标,产量不理想。与此同时,人们对药材品质的要求不断提高,在这种形式下如何有效调控药用植物连作障碍成为中药资源可持续发展的关键。众多国内外研究者认为导致药用植物连作障碍的原因主要有土壤理化性质恶化、土壤微生物区系改变、化感自毒作用<sup>[2]</sup>。由于具有独特的结构和碱性、吸附性等特性,近年来生物质炭在农业生产中得到广泛的关注与应用。故利用生物质炭作为一种重要的土壤改良剂来缓解药用植物连作障碍具有一定潜力。鉴于此,本文对药用植物连作障碍成因及生物质炭的特性进行了综述,并阐述了生物质炭在改善土壤酸化、吸附土壤中重金属元素、调控根际微生物活动、促进作物生长发育方面的作用,旨在为生物质炭调控药用植物连作障碍、促进我国农业可持续发展方面提供理论依据。

## 1 药用植物连作障碍研究动态

近年来,我国中药材市场需求持续增加,集约化种植面积快速扩张。受药用植物土地资源的限制,使药用植物在种植过程中产生的连作障碍越来越严重,导致药用植物产量降低、品质差、病虫害发生加剧等问题,药用植物的连作障碍问题严重制约了该产业的可持续健康发展<sup>[3-4]</sup>。除此之外,连作障碍还导致道地产区转移甚至缩小、中药材价格连年飙升等药用植物一系列其他问题。同时,大部分农户在不清楚连作机理和成因的情况下,盲目施用化肥和农药,导致中药材农药残留超标,污染环境,形成一种恶性循环。地黄一经种植,需经 8~10 年才能在同一地块被再次种植<sup>[5]</sup>;三七连作两年后种子的发芽率和发芽指数大大降低<sup>[6]</sup>;人参忌连作年限长达 10~30 年,是我国根类药材中最具代表性的忌连作植物<sup>[7]</sup>。太子参连作导致叶面积减少,产量显著下降<sup>[8]</sup>。连作障碍又称土壤疾病,常伴随着土壤酸化、

养分失衡、微生物区系变化、化感自毒物质积累、植物生理活动受抑制等<sup>[1,9]</sup>。因此,本文分别从土壤理化性质改变、土壤微生物结构改变、化感自毒作用、作物生理抗性下降等 4 个方面对连作障碍形成的影响进行概述。

### 1.1 土壤理化性质改变

#### 1.1.1 土壤养分失衡

由于药用植物连作时对土壤中养分进行特异性吸收,导致土壤中植物所需的养分储量越来越少,不被植物吸收的养分越来越多,破坏土壤养分平衡<sup>[9]</sup>。当药用植物所需的某些元素在土壤中得不到及时补充,就会出现“木桶效应”;影响药用植物生长,造成药用植物产量和品质下降。如三七连作易导致土壤表层全 N、全 P、Ca、S 等元素含量下降,有效 K、Fe、B 等元素含量上升,养分比例失调,不利于三七生长<sup>[5]</sup>。何银生<sup>[10]</sup>研究结果显示,川党参 (*Codonopsis tangshen* Oliv.) 连作后土壤有机质、碱解氮、速效磷和速效钾含量明显降低,土壤酸化程度加剧。以上均表明药用植物连作障碍的发生可能与土壤养分失衡有关。

#### 1.1.2 土壤酸化

在药材生产过程中,氮肥的过度使用加速了土壤酸化进程<sup>[11]</sup>。长期单一种植某种药用植物时,根系分泌物大量累积,影响土壤微生物活动,导致微生物区系失衡,同时土壤阳离子交换量 (CEC) 降低,破坏土壤酸碱平衡,加重土壤酸化现象<sup>[12]</sup>。人参连作后土壤容重增大,孔隙结构遭到破坏,土壤酸化加重<sup>[13]</sup>。连作的太子参根际土壤较正茬太子参根际土壤 pH 下降 0.4 个单位<sup>[1]</sup>。

### 1.2 根际土壤微生物区系变化

土壤微生物区系变化直接影响土壤的健康状况,进而影响作物健康生长<sup>[9]</sup>。微生物的种类、数量与连作障碍有很大关系,长期连作破坏根际微生物生态平衡,导致土壤微生物群落结构及功能发生变化,引发各种土传病害<sup>[14]</sup>。长期单一种植某一类作物时,根系分泌物单一,微生物所能获得的养分单一,根系活动对微生物的激活作用相对较小,激活的微生物种类单一,降低微生物丰富度和多样性<sup>[15]</sup>。此外,连作种植模式下作物生长期的病原微生物的生长和繁殖速率远高于传统种植模式,病原微生物数量短时间内即可达到作物致病临界水平<sup>[16]</sup>。Rousk 等<sup>[17]</sup>研究表明,真菌适宜在较低的 pH 环境中

生长, 细菌则偏爱较高的 pH 环境。连作导致的酸化问题使真菌多样性升高, 降低细菌多样性, 真菌/细菌增大, 加重土传病害<sup>[18]</sup>。

镰刀菌属 (*Fusarium*)、立枯丝核菌 (*Rhizoctonia solani*)、腐霉菌 (*Pythium*) 是大宗道地药材的主要病害菌, 在连作土壤中大量增殖, 严重影响三七、地黄、人参、太子参、半夏 [*Pinellia ternata* (Thunb.) Breit.] 等生长<sup>[1]</sup>。Wu 等<sup>[19-20]</sup> 研究表明, 地黄连作后土传病原镰刀菌属和丝核菌属 (*Rhizoctonia*) 的数量均随连作年限的增加而升高, 有益假单胞菌属 (*Pseudomonas*) 和芽孢杆菌属 (*Bacillus*) 的数量随之下降。Wu 等<sup>[21-22]</sup> 研究发现太子参连作年限越长, 致病真菌数量越多, 而有益青霉菌属 (*Penicillium*)、链霉菌目 (*Streptomyces*) 和伯克氏菌目 (*Burkholderiales*) 等则呈现逐渐下降的趋势。Wu 等<sup>[23]</sup> 深入研究发现, 地黄连作时的 10 种酚酸类化合物中, 香草酸和阿魏酸对尖孢镰刀菌的生长刺激作用最大, 且对有益假单胞菌生长的抑制作用最大, 说明根分泌物中的某些化感物质对根际微生物具有选择性作用。

### 1.3 化感自毒作用

1984 年, Rice 重新定义化感作用为一种植物或微生物向外界释放化学物质, 从而对周围的植物或微生物产生直接或间接作用, 包括促进或危害作用的现象<sup>[24]</sup>。当作物分泌的化感物质危害自身或同科的作物时即为自毒作用<sup>[25]</sup>。吴林坤等<sup>[26]</sup> 发现忌连作作物的连作障碍现象与化感物质有密切关系。国内外学者普遍认为, 化感自毒物质释放到土壤后经过微生物的处理、分解、转化等, 会引起根际土壤理化性质、根际土壤微生物区系的改变, 进而对药用植物的生长发育产生影响<sup>[27]</sup>。药用植物化感物质多数指酚酸类、有机酸、萜类、生物碱类、黄酮类等次生代谢产物<sup>[28-30]</sup>。半夏产生的有机酸类、生物碱类等化感自毒物质对半夏幼苗生长具有明显的抑制作用<sup>[31]</sup>。自毒物质的作用具有低促高抑的特点<sup>[32]</sup>。如兰州百合 (*Lilium davidii* var. *unicolor* Salisb) 连作土壤水提液在低浓度下能促进兰州百合幼苗生长, 而在高浓度时表现为抑制作用<sup>[33]</sup>。原增艳<sup>[34]</sup> 试验证明地黄连作障碍主要是地黄连作后的根系分泌物或者残茬引起。张秋菊等<sup>[35]</sup> 研究发现, 人参皂苷可损伤西洋参幼苗细胞膜, 引起细胞代谢紊乱, 影响西洋参的生长。焦晓林等<sup>[36]</sup> 研究证明 *p*-香豆酸溶液对西洋参苗期的生长及光合作用有明显的抑制作用。

### 1.4 作物生理抗性下降

当活性氧增多, 会使细胞内不饱和脂肪酸受到

氧化作用而生成有害物质, 破坏细胞结构, 影响细胞功能<sup>[37-38]</sup>。过氧化物酶 (POD)、过氧化氢酶 (CAT) 和超氧化物歧化酶 (SOD) 是植物抗氧化系统中的主要保护酶类, 是活性氧清除系统的主要成分<sup>[39]</sup>。连作时, POD、CAT、SOD 共同发挥作用, 清除植物体内过多的活性氧和过氧化氢, 维持氧动态平衡, 增强作物抗逆性<sup>[40]</sup>。张重义等<sup>[41]</sup> 在对地黄的研究中发现, 连作引起植株细胞膜质过氧化作用, 损伤膜的正常结构和功能, 降低光合能力, 进而阻碍地黄正常生长发育, 表现出明显的障碍效应。广藜香根际土壤浸出液可以提高植物叶片中的丙二醛含量, 增强 SOD 和 POD 活性, 这说明其可能通过提高抗氧化酶活性来降低活性氧增多对植物的伤害<sup>[42]</sup>。

## 2 生物质炭的性质与影响因素

生物质炭是指有机质在低氧或无氧条件下, 经高温热解或不完全燃烧产生的一类性质稳定、含碳量高的固态物质<sup>[43]</sup>。生物质炭一般呈碱性<sup>[44]</sup>, 其表面有大量含氧官能团, 具有养分含量丰富、吸附性强等特点<sup>[45-47]</sup>, 可以改善土壤理化性质<sup>[48]</sup>, 提升土壤肥力<sup>[49]</sup>, 提高作物产量<sup>[50]</sup>、影响全球碳循环, 在农业研究领域广泛使用。

### 2.1 生物质炭的理化性质

生物质炭富含碳素, 其碳含量通常超过总含量的 60%<sup>[51]</sup>, 可增加土壤有机质含量, 是土壤稳定的有机碳源<sup>[52]</sup>。生物质炭含有 K、Na、Ca、Mg 等植物生长过程中必需的矿质元素, 以碳酸盐或氧化物的形式储存在灰分中<sup>[53]</sup>, 溶于水后呈碱性。因此生物质炭投入土壤中起到平衡土壤养分、调节土壤 pH、促进植物生长的作用<sup>[54]</sup>。生物质炭的 C 含量、灰分含量随着热解温度的上升而增加, 产量降低<sup>[55]</sup>。生物质炭的疏松多孔结构和巨大的比表面积能够增加土壤持水能力和透气性, 降低土壤容重<sup>[56-58]</sup>, 增加对养分的吸附和固持<sup>[59-60]</sup>, 促进作物根系茁壮生长<sup>[61]</sup>; 促进土壤团聚体形成, 保持良好的土体结构; 为微生物提供适宜的生存场所, 提高微生物丰度和活性<sup>[62]</sup>, 调节土壤健康。生物质炭一般呈碱性, 其 pH 值多在 8.2~13.0<sup>[63]</sup>, 随热解温度的升高而增加<sup>[64-65]</sup>, 是一种常用的酸性土壤改良材料。存在于生物质炭表面的丰富的羧基和羟基等含氧官能团具有亲水性<sup>[65]</sup>, 官能团数量与生物质炭自身阳离子交换量呈正相关关系, 能够提高土壤含水量和 CEC, 提高土壤酸碱缓冲能力<sup>[49]</sup>。此外, 生物质炭大量的含氧官能团既能够增强土壤对养分的吸附,



又能吸附土壤中重金属等污染物，显著降低土壤中有效态重金属含量，抑制重金属进入植物体，达到促进植物生长和降低污染物对土壤环境危害的双重效果<sup>[66]</sup>。芳香族基团赋予生物质炭较大的稳定性，使其在土壤中固定碳元素的同时保持长时间存在而不被降解，从而增强土壤碳汇<sup>[50]</sup>。

## 2.2 生物质炭性质的影响因素

不同生物质炭原料和工艺条件下，制备的生物质炭性能差别很大，且具有一定的变化规律<sup>[67]</sup>。影响生物质炭性能的因素主要有：（1）生产原料；（2）热解条件，包括热解温度、热解停留时间。

### 2.2.1 生产原料

相同的热解条件下，生物质炭性质因不同的生产原料而异。制备原料的多样性导致生物质炭各组分含量的差异<sup>[68]</sup>，因而对土壤的改良效果也不同。生产生物质炭的原料包括但不限于猪粪、秸秆等农业废弃物，工业有机废弃物，城市污泥<sup>[55]</sup>，生物质炭也因此划分为粪污炭、秸秆炭、木炭、竹炭、污泥炭等<sup>[69]</sup>。相同热解条件下不同生产原料所制备生物质炭的性质有所差异（表 1）。

表 1 相同热解条件下不同生产原料所制备生物质炭的性质  
Table 1 Properties of biochar made from different raw materials by same pyrolysis process

原料 Raw material	热解温度 Pyrolysis temperature/°C	热解停留时间 Pyrolysis time/h	pH	阳离子交换量 Cation exchange capacity/ (cmol·kg <sup>-1</sup> )	灰分 Ash/%	文献来源 Literature		
小麦秸秆 Wheat straw	350		10.05	35.11	17.00	[70]		
水稻秸秆 Rice straw			9.33	32.80	26.00			
玉米秸秆 Corn straw			9.41	58.17	20.00			
稻壳粉 Rice husk flour	450	1	9.07	73.17	26.26	[71]		
花生壳 Peanut shell			8.72	91.94	29.98			
牛粪 Cow dung			10.81	75.55	70.46			
椰渣 Coconut residue			9.86	76.69	15.86			
小麦秸秆 Wheat straw			10.08	33.60	28.00			
水稻秸秆 Rice straw			10.13	27.10	29.00			
玉米秸秆 Corn straw	550		9.92	43.33	23.00	[70]		
小麦秸秆 Wheat straw			10.24	27.16	18.00			
水稻秸秆 Rice straw			10.20	21.60	34.00			
玉米秸秆 Corn straw			10.04	32.13	24.00			
稻壳 Rice husk			0.5	8.1	—		51.2	[72]
玉米秸秆 Corn straw				10.13	—		—	[73]
水稻秸秆 Rice straw	500	3	10.30	—	28.46	[74]		
油菜秸秆 Rapeseed straw			8.14	—	—			
玉米秸秆 Corn straw	600	1	10.30	128.25	36.27	[75]		
紫茎泽兰 Eupatorium adenophorum			9.82	96.22	43.54			

### 2.2.2 热解条件

热解条件包括热解温度和热解停留时间<sup>[76]</sup>，通常热解温度对生物质炭性质的影响更为显著。生物质炭的比表面积、孔隙度、碳含量、灰分含量以及 pH 值均随热解温度的上升而增加，产量随热解温度的升高而降低<sup>[55]</sup>。生物质炭的孔隙结构决定比表面积，与热解停留时间相比，热解温度对孔隙大小有显著影响<sup>[74]</sup>。随热解温度的升高，生物质炭孔隙度

增大，比表面积亦是，同时持水性增加<sup>[77]</sup>。当温度超过一定限度时孔隙结构遭到破坏，比表面积和孔隙度降低<sup>[78]</sup>。400~500 °C 可能是生物质炭热解反应的临界温度，具体范围随生产原料不同而变化<sup>[67]</sup>。不同原料产生的生物质炭酸性基团、碱性基团、总基团含量差别很小，受热解温度影响较大，碱性基团含量随热解温度升高逐渐增加，总基团含量减少，pH 值升高<sup>[65]</sup>，同时，生物质炭表面极性官能团

数量减少，导致持水性降低。

陈斐杰等<sup>[67]</sup>发现，热解停留时间对生物质炭官能团的影响大于热解温度和生产原料。生物质炭的灰分含量和平均孔径随着热解停留时间的延长而增加，产量随着热解停留时间的延长而降低<sup>[79]</sup>。Tan 等<sup>[79]</sup>发现，随热解停留时间的延长，产生的生物质炭含有更多的灰分，当热解停留时间从 20 min 增长至 60 min 时，生物质炭的灰分含量从 7.0% 增加至 15.7%。程国淡等<sup>[80]</sup>利用马弗炉 500 °C 制备污泥生物质炭的研究发现，当热解停留时间从 2 h 增加到 4 h，产量降低 5.68%。

### 3 生物质炭对药用植物连作障碍的调控作用

#### 3.1 生物质炭改良酸化土壤

中药材连作过程中土壤酸化现象较严重，伴随着土壤养分流失，毒性铝活性增加，土壤保肥能力下降，同时滋养病原菌，促使药用植物减产变质<sup>[81]</sup>。目前已有大量研究证实，生物质炭能够明显改善土壤酸化<sup>[82]</sup>。首先，碱性生物质炭施入土壤可提高土壤 pH，促进喜碱植物生长；其次，生物质炭的灰分一方面可以中和土壤中  $H^+$ ，另一方面释放  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $K^+$  等碱性金属阳离子与  $H^+$ 、 $Al^{3+}$  发生交换，生成  $Al(OH)_3$  沉淀，降低毒性铝活性，并诱导土壤碱化，提高土壤 pH<sup>[44-83]</sup>。研究发现随热解温度升高，制备出的生物质炭含有更高 pH<sup>[84]</sup>。当生物质炭与酸化土壤的酸碱性相差越大时，随着生物质炭向酸化土壤中投入量越多，改良效果越明显<sup>[85]</sup>。唐汉萌<sup>[86]</sup>研究发现，600 °C 下制备的谷壳生物质炭以 6% 添加量对连作半夏酸化土壤改良效果最明显，较不添加生物质炭土壤 pH 提高 0.54 个单位。杨莉等<sup>[87]</sup>将稻壳炭、椰子壳炭、玉米秸秆炭施入老参地土壤，显著提高土壤 pH，且随着添加量的增加提高效果越明显。王昆艳等<sup>[88]</sup>研究发现，施用稻壳炭显著提高三七连作土壤 pH。

#### 3.2 生物质炭调控土壤微生物群落

土壤微生物群落结构对土壤养分循环以及能量输送具有重要意义<sup>[52]</sup>。生物质炭通过自身的多孔结构和营养元素，以及影响土壤 pH 来影响土壤微生物群落结构，主要体现在微生物的丰度与多样性上。首先，不同微生物群体对 pH 的响应不尽相同，当土壤 pH 提高时，细菌的数量会随之增加，真菌数量降低甚至不发生改变<sup>[89]</sup>。其次，生物质炭的多孔结构改善土壤微生物组成，为有益真菌提供良好的栖息环境<sup>[90]</sup>。最后，生物质炭富含碳素，为微生物提供

额外碳源及微生物需要的 Na、Ga、Mg 等元素，促进功能性有益微生物的繁殖<sup>[91-92]</sup>。杨莉等<sup>[93]</sup>研究发现，向连作参地投入碱性玉米秸秆炭、稻壳炭、椰子壳炭提高土壤 pH 值，可以增加芽单胞菌门 (*Gemmatimonadetes*) 数量，提高连作人参的出苗率。周丽靖等<sup>[72]</sup>研究发现，兰州百合土壤中加入稻壳炭和竹炭能够明显改善土壤微生物群落结构，其中有益细菌鞘氨醇单胞菌属 (*Sphingomonas*) 数量增加，而其主要致病真菌镰刀菌属的数量降低，减少枯萎病的发生。生物质炭对土壤中相关微生物作用关系到土壤磷循环<sup>[67]</sup>。Anderson 等<sup>[94]</sup>研究表明，生物质炭能够有效提高土壤中溶磷细菌的活性，从而提高土壤中的可溶性磷含量。由此可知，生物质炭调控土壤微生物群落，对遭受连作障碍的药用植物生长有一定的促进作用。

#### 3.3 生物质炭缓解自毒作用

目前，生物质炭缓解自毒作用的机制有两种较为被学者认可：一是生物质炭利用其较强的吸附能力和离子交换能力降低化感物质酚酸浓度、农药残留以及重金属对作物的危害<sup>[95-98]</sup>；二是生物质炭可以利用植物体内的赤霉素、生长素，激活超氧化物歧化酶的活性，抑制细胞内的超氧基和羟基自由基的生成，降低膜脂过氧化作用，减轻化感物质的损害<sup>[99-100]</sup>。Elmer 等<sup>[101]</sup>研究发现，将生物质炭施入土壤能解决化感物质降低丛枝菌根真菌在根部定殖的问题。Wang 等<sup>[102]</sup>试验表明生物质炭利用自身吸附作用，有效减少连作土壤中的酚酸浓度，激活抗氧化酶活性，从而有效抑制连作障碍。杨莉等<sup>[93]</sup>将稻壳炭和玉米秸秆炭施入连作参地土壤，提高了以酚酸物质为底物的功能性微生物群落数量。综上所述，生物质炭对于药用植物化感自毒作用的抑制有良好的应用潜力。

## 4 结论与展望

目前针对药用植物连作障碍的初步认识是由植物—微生物—土壤三者共同作用引起的。药用植物连作过程中出现土壤养分失衡、微生物区系紊乱、土传病害严重等问题，制约下茬作物生长。生物质炭以其碱性、吸附性和养分组成极大改善土壤酸化，丰富土壤养分含量，调节土壤养分组成，缓解化感自毒作用。故生物质炭对于改良药用植物连作障碍具有理想的应用潜力。

采用单一措施来克服或减轻连作障碍，其效果往往不显著。在今后的治理过程中应有机协调多种调控相结合，最大限度地利用自然调控因素，考虑

经济、社会和生态效益,做到综合治理。总体上,生物质炭可以应用于多个农业领域,但是目前在药用植物领域的研究较少,未来应加强以下几个方面研究:

(1) 研究不同种类的生物质炭对酸性土壤的修复作用,筛选出具有明显增效作用的生物质炭类型。

(2) 加强研究不同类型生物质炭对不同药用植物产量和品质的调控效果。不同生物质炭对不同的药用植物产量和品质的影响存在差异,因此,需要明确不同药用植物产区最适合的生物质炭种类,以达到最大限度地发挥药用植物对土壤营养元素的高效利用,进而达到增产增效的目的。

(3) 明确生物质炭改善土壤酶活性的内在机制。土壤酶活性代表土壤肥力水平,与药用植物生长息息相关。由连作障碍导致土壤酶活力下降,降低中药材抗逆性,因此应深入研究生物质炭改善土壤酶活性的作用机制。

(4) 加强生物质炭在药用植物土壤的长期监测工作。生物质炭在热解矿化中可能会产生少量的有毒有害物质,自身的理化性质也会随着时间的推移发生改变,影响生物质炭的改良效果。为此,有必要加强施用生物质炭对药用植物土壤的改良效果长期监测和环境风险评估。

#### 参考文献:

- [1] 吴红淼,林文雄.药用植物连作障碍研究评述和发展透视[J].中国生态农业学报(中英文),2020,28(6):775-793.  
WU H M, LIN W X. A commentary and development perspective on the consecutive monoculture problems of medicinal plants [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(6): 775-793. (in Chinese)
- [2] ALEMÁN F. Common bean response to tillage intensity and weed control strategies [J]. *Agronomy Journal*, 2001, 93(3): 556-563.
- [3] 郭兰萍,黄璐琦,蒋有绪,等.药用植物栽培种植中的土壤环境恶化及防治策略[J].中国中药杂志,2006,31(9):714-717.  
GUO L P, HUANG L Q, JIANG Y X, et al. Soil deterioration during cultivation of medicinal plants and ways to prevent it [J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2006, 31(9): 714-717. (in Chinese)
- [4] 孙跃春,林淑芳,黄璐琦,等.药用植物自毒作用及调控措施[J].中国中药杂志,2011,36(4):387-390.  
SUN Y C, LIN S F, HUANG L Q, et al. Review: Autotoxicity in medicinal plants and means to overcome [J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2011, 36(4): 387-390. (in Chinese)
- [5] 孙雪婷,龙光强,张广辉,等.基于三七连作障碍的土壤理化性状及酶活性研究[J].生态环境学报,2015,24(3):409-417.  
SUN X T, LONG G Q, ZHANG G H, et al. Properties of soil physical-chemistry and activities of soil enzymes in context of continuous cropping obstacles for *Panax notoginseng* [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(3): 409-417. (in Chinese)
- [6] 张子龙,王文全,杨建忠,等.三七连作土壤对其种子萌发及幼苗生长的影响[J].土壤,2010,42(6):1009-1014.  
ZHANG Z L, WANG W Q, YANG J Z, et al. Effects of continuous *Panax notoginseng* cropping soil on *P. notoginseng* seed germination and seedling growth [J]. *Soils*, 2010, 42(6): 1009-1014. (in Chinese)
- [7] 杨莉,刘宇航,郝佳,等.生物质炭对人参连作土壤微生物组成及功能的影响[J].华南农业大学学报,2022,43(1):28-36.  
YANG L, LIU Y H, HAO J, et al. Effect of biochar on microbial composition and function in continuous cropping ginseng soil [J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2022, 43(1): 28-36. (in Chinese)
- [8] 焦艳阳,林煜,蔡昭莹,等.不同技术迭代对太子参连作障碍的消减效果及作用机制[J].应用生态学报,2021,32(7):2485-2495.  
JIAO Y, LIN Y, CAI Z Y, et al. Effects of different technical substitutions on reducing replant disease of *Radix pseudostellariae* and the underlying mechanism [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(7): 2485-2495. (in Chinese)
- [9] 侯慧,董坤,杨智仙,等.连作障碍发生机理研究进展[J].土壤,2016,48(6):1068-1076.  
HOU H, DONG K, YANG Z X, et al. Advance in mechanism of continuous cropping obstacle [J]. *Soils*, 2016, 48(6): 1068-1076. (in Chinese)
- [10] 何银生.川党参连作障碍机制及修复研究[D].武汉:华中农业大学,2019:36-37.  
HE Y S. Studies on the mechanism of continuous cropping obstacle of *Condonopsis tangshanensis* Oliv. and its remediation [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019: 36-37. (in Chinese)
- [11] GUO J H, LIU X J, ZHANG Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands [J]. *Science*, 2010, 327(5968): 1008-1010.
- [12] 石雷磊.白术连作障碍发生原因分析及调控方法研究[D].杭州:浙江中医药大学,2018:43-46.  
SHI L L. Study on the causes and control methods of continuous cropping barrier in *Atractylodes macrocephala* [D]. Hangzhou: Zhejiang Chinese Medical University, 2018: 43-46. (in Chinese)
- [13] 沈彦龙,程立业,孟祥茹,等.人参连作土壤对不同生育期人参生长发育及抗氧化系统的影响[J].应用化学,2023,40(1):109-115.  
SHEN Y L, CHENG L Y, MENG X R, et al. Effects of ginseng continuous soil crop on growth development and antioxidant system of ginseng at different fertility stages [J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2023, 40(1): 109-115.
- [14] LI X G, DING C F, ZHANG T L, et al. Fungal pathogen accumulation at the expense of plant-beneficial fungi as a consequence of consecutive peanut monoculturing [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 72: 11-18.
- [15] 吴凤芝,王学征.设施黄瓜连作和轮作中土壤微生物群落多样性的变化及其与产量品质的关系[J].中国农业科学,2007,40(10):2274-2280.  
WU F Z, WANG X Z. Effect of monocropping and rotation on soil microbial community diversity and cucumber yield, quality under protected cultivation [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(10): 2274-2280. (in Chinese)

- [16] 蔡祖聪, 黄新琦. 土壤学不应忽视对作物土传病原微生物的研究 [J]. 土壤学报, 2016, 53 (2): 305–310.  
CAI Z C, HUANG X Q. Soil-borne pathogens should not be ignored by soil science [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(2): 305–310. (in Chinese)
- [17] ROUSK J, BROOKES P C, BÅÅTH E. Contrasting soil pH effects on fungal and bacterial growth suggest functional redundancy in carbon mineralization [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2009, 75(6): 1589–1596.
- [18] KURTZWEIL N, GRAU C, MACGUIDWIN A, et al. Soil pH in relation to brown stem rot and soybean cyst nematode [J]. *Madison: University of Wisconsin Press*, 2002: 177–185.
- [19] WU L K, CHEN J, KHAN M U, et al. Rhizosphere fungal community dynamics associated with *Rehmannia glutinosa* replant disease in a consecutive monoculture regime [J]. *Phytopathology*, 2018, 108(12): 1493–1500.
- [20] WU L K, CHEN J, XIAO Z G, et al. Barcoded pyrosequencing reveals a shift in the bacterial community in the rhizosphere and rhizoplane of *Rehmannia glutinosa* under consecutive monoculture [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2018, 19(3): 850.
- [21] WU H M, WU L K, WANG J Y, et al. Mixed phenolic acids mediated proliferation of pathogens *Talaromyces helicus* and *Kosakonia sacchari* in continuously monocultured *Radix pseudostellariae* rhizosphere soil [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2016, 7: 335.
- [22] WU H M, QIN X J, WANG J Y, et al. Rhizosphere responses to environmental conditions in *Radix pseudostellariae* under continuous monoculture regimes [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2019, 270/271: 19–31.
- [23] WU H M, WU H M, QIN X J, et al. Replanting disease alters the faunal community composition and diversity in the rhizosphere soil of *Radix pseudostellariae* [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 310: 107304.
- [24] 田瑶. 无花果提取物对几种药用植物种子萌发和幼苗生长的影响 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2021.  
TIAN Y. Effects of figs extract on seed germination and seedling growth of several medicinal plants [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2021. (in Chinese)
- [25] 陆茜, 张金池, 孟苗婧. 长期连栽杨树林根际土壤自毒作用的生物测定 [J]. 生态学报, 2017, 37 (12): 4053–4060.  
LU Q, ZHANG J C, MENG M J. Bioassay for inhibitory autotoxicity of rhizosphere soil under long-term successive monoculture poplar plantations [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(12): 4053–4060. (in Chinese)
- [26] 吴林坤, 林向民, 林文雄. 根系分泌物介导下植物-土壤-微生物互作关系研究进展与展望 [J]. *植物生态学报*, 2014, 38 (3): 298–310.  
WU L K, LIN X M, LIN W X. Advances and perspective in research on plant-soil-microbe interactions mediated by root exudates [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2014, 38(3): 298–310. (in Chinese)
- [27] LI X G, DING C F, HUA K, et al. Soil sickness of peanuts is attributable to modifications in soil microbes induced by peanut root exudates rather than to direct allelopathy [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 78: 149–159.
- [28] LIU J K, YAN Z Q, LI X Z, et al. Characterization of allelochemicals from the rhizosphere soil of *Pinellia ternate* (Thunb.) and their inhibition activity on protective enzymes [J]. *Applied Soil Ecology*, 2018, 125: 301–306.
- [29] ZHENG F, CHEN L, GAO J M, et al. Identification of autotoxic compounds from *Atractylodes macrocephala* Koidz and preliminary investigations of their influences on immune system [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2018, 230: 33–39.
- [30] ZHANG B, WESTON P A, GU L, et al. Identification of phytotoxic metabolites released from *Rehmannia glutinosa* suggest their importance in the formation of its replant problem [J]. *Plant and Soil*, 2019, 441(1): 439–454.
- [31] 唐成林, 罗夫来, 赵致, 等. 半夏植株腐解液对 8 种作物的化感作用及化感物质成分分析 [J]. *核农学报*, 2018, 32 (8): 1639–1648.  
TANG C L, LUO F L, ZHAO Z, et al. The allelopathy of *Pinellia ternata* decomposed liquid on 8 crops and composition of allelochemicals [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2018, 32(8): 1639–1648. (in Chinese)
- [32] 陈福慧, 申乃坤, 姜明国, 等. 作物重茬连作障碍中自毒物质的研究进展 [J]. *中国农业科技导报*, 2022, 24 (10): 125–132.  
CHEN F H, SHEN N K, JIANG M G, et al. Research progress of autotoxic secretions in crops replant successive cropping obstacles [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2022, 24(10): 125–132. (in Chinese)
- [33] 黄钰芳, 张恩和, 张新慧, 等. 兰州百合连作土壤水浸液自毒作用研究 [J]. *西北农林科技大学学报 (自然科学版)*, 2020, 48 (7): 84–93.  
HUANG Y F, ZHANG E H, ZHANG X H, et al. Autotoxicity of water extracts from continuous cropping soil of *Lilium davidii* var. *unicolor* salisb [J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2020, 48(7): 84–93. (in Chinese)
- [34] 原增艳. 地黄自毒物质的分离与鉴定 [D]. 郑州: 河南农业大学, 2010.  
YUAN Z Y. Isolation and identification of autotoxicity substances from *Rehmannia glutinosa* libosch [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2010. (in Chinese)
- [35] 张秋菊, 张爱华, 雷锋杰, 等. 人参皂苷粗提液对西洋参早期生长的化感效应 [J]. *西北植物学报*, 2011, 31 (3): 576–582.  
ZHANG Q J, ZHANG A H, LEI F J, et al. Allelopathic effect of crude ginsenoside extracts on early growth of *Panax quinquefolium* L [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2011, 31(3): 576–582. (in Chinese)
- [36] 焦晓林, 毕晓宝, 高微微. p-香豆酸对西洋参的化感作用及生理机制 [J]. *生态学报*, 2015, 35 (9): 3006–3013.  
JIAO X L, BI X B, GAO W W. Allelopathic effect of p-coumaric acid on American ginseng and its physiological mechanism [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(9): 3006–3013. (in Chinese)
- [37] GILL S S, TUTEJA N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2010, 48(12): 909–930.
- [38] MITTLER R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance [J]. *Trends in Plant Science*, 2002, 7(9): 405–410.



- [39] 邓苕明,熊格生,袁小玲,等.棉花不同耐高温品系的 SOD、POD、CAT 活性和 MDA 含量差异及其对盛花期高温胁迫的响应[J].棉花学报,2010,22(3):242-247.  
DENG J M, XIONG G S, YUAN X L, et al. Differences in SOD, POD, CAT activities and MDA content and their responses to high temperature stress at peak flowering stage in cotton lines with different tolerance to high temperature [J]. *Cotton Science*, 2010, 22(3): 242-247. (in Chinese)
- [40] 张重义,林文雄.药用植物的化感自毒作用与连作障碍[J].中国生态农业学报,2009,17(1):189-196.  
ZHANG Z Y, LIN W X. Continuous cropping obstacle and allelopathic autotoxicity of medicinal plants [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17(1): 189-196. (in Chinese)
- [41] 张重义,尹文佳,李娟,等.地黄连作的生理生态特性[J].植物生态学报,2010,34(5):547-554.  
ZHANG Z Y, YIN W J, LI J, et al. Physio-ecological properties of continuous cropping *Rehmannia glutinosa* [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(5): 547-554. (in Chinese)
- [42] 唐堃,李明,董闪,等.广藿香根际土壤水浸液对其扦插苗的化感自毒作用[J].中药材,2014,37(6):935-939.  
TANG K, LI M, DONG S, et al. Allelopathy autotoxicity effects of aquatic extracts from rhizospheric soil on rooting and growth of stem cuttings in *Pogostemon cablin* [J]. *Journal of Chinese Medicinal Materials*, 2014, 37(6): 935-939. (in Chinese)
- [43] 孙建财,周丹丹,王薇,等.生物炭改性及其对污染物吸附与降解行为的研究进展[J].环境化学,2021,40(5):1503-1513.  
SUN J C, ZHOU D D, WANG W, et al. Research progress on modification of biochar and its adsorption and degradation behavior [J]. *Environmental Chemistry*, 2021, 40(5): 1503-1513. (in Chinese)
- [44] YUAN J H, XU R K. The amelioration effects of low temperature biochar generated from nine crop residues on an acidic Ultisol [J]. *Soil Use and Management*, 2011, 27(1): 110-115.
- [45] 戴静,刘阳生.生物炭的性质及其在土壤环境中应用的研究进展[J].土壤通报,2013,44(6):1520-1525.  
DAI J, LIU Y S. Review of research on the properties of biochar and its applications in soil [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44(6): 1520-1525. (in Chinese)
- [46] BLANCO-CANQUI H. Biochar and soil physical properties [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2017, 81(4): 687-711.
- [47] SINGH B, SINGH B P, COWIE A L. Characterisation and evaluation of biochars for their application as a soil amendment [J]. *Soil Research*, 2010, 48(7): 516.
- [48] ENNIS C J, EVANS A G, ISLAM M, et al. Biochar: Carbon sequestration, land remediation, and impacts on soil microbiology [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2012, 42(22): 2311-2364.
- [49] 孔丝纺,姚兴成,张江勇,等.生物质炭的特性及其应用的研究进展[J].生态环境学报,2015,24(4):716-723.  
KONG S F, YAO X C, ZHANG J Y, et al. Review of characteristics of biochar and research progress of its applications [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(4): 716-723. (in Chinese)
- [50] 徐敏,伍钧,张小洪,等.生物炭施用的固碳减排潜力及农田效应[J].生态学报,2018,38(2):393-404.  
XU M, WU J, ZHANG X H, et al. Impact of biochar application on carbon sequestration, soil fertility and crop productivity [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(2): 393-404. (in Chinese)
- [51] 周桂玉,窦森,刘世杰.生物质炭结构性性质及其对土壤有效养分和腐殖质组成的影响[J].农业环境科学学报,2011,30(10):2075-2080.  
ZHOU G Y, DOU S, LIU S J. The structural characteristics of biochar and its effects on soil available nutrients and humus composition [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(10): 2075-2080. (in Chinese)
- [52] 江明华,程建中,李心清,等.生物炭对农田土壤 CO<sub>2</sub> 排放的影响研究进展[J].地球与环境,2021,49(6):726-736.  
JIANG M H, CHENG J Z, LI X Q, et al. The effect of biochar on the farmland soil CO<sub>2</sub> emission: A review [J]. *Earth and Environment*, 2021, 49(6): 726-736. (in Chinese)
- [53] 谢祖彬,刘琦,许燕萍,等.生物炭研究进展及其研究方向[J].土壤,2011,43(6):857-861.  
XIE Z B, LIU Q, XU Y P, et al. Advances and perspectives of biochar research [J]. *Soils*, 2011, 43(6): 857-861. (in Chinese)
- [54] 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.
- [55] 袁帅,赵立欣,孟海波,等.生物炭主要类型、理化性质及其研究展望[J].植物营养与肥料学报,2016,22(5):1402-1417.  
YUAN S, ZHAO L X, MENG H B, et al. The main types of biochar and their properties and expectative researches [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(5): 1402-1417. (in Chinese)
- [56] 李文文,李梦蕊,赵广超.磁性竹基炭对 Pb<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup> 与 Cu<sup>2+</sup> 的吸附机理研究[J].环境科学学报,2014,34(4):938-943.  
LI W W, LI M R, ZHAO G C. Adsorption mechanism of Pb<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup> and Cu<sup>2+</sup> onto bamboo-based magnetic carbon [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(4): 938-943. (in Chinese)
- [57] 刘晶晶,杨兴,陆扣萍,等.生物质炭对土壤重金属形态转化及其有效性的影响[J].环境科学学报,2015,35(11):3679-3687.  
LIU J J, YANG X, LU K P, et al. Effect of bamboo and rice straw biochars on the transformation and bioavailability of heavy metals in soil [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(11): 3679-3687. (in Chinese)
- [58] ZHANG X K, WANG H L, HE L Z, et al. Using biochar for remediation of soils contaminated with heavy metals and organic pollutants [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, 20(12): 8472-8483.
- [59] 王瑞峰,赵立欣,沈玉君,等.生物炭制备及其对土壤理化性质影响的研究进展[J].中国农业科技导报,2015,17(2):126-133.  
WANG R F, ZHAO L X, SHEN Y J, et al. Research progress on preparing biochar and its effect on soil physio-chemical properties [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2015, 17(2): 126-133. (in Chinese)
- [60] ESMAEELNEJAD L, SHORAFI M, GORJI M, et al. Impacts of woody biochar particle size on porosity and hydraulic conductivity of biochar-soil mixtures: An incubation study [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2017, 48(14): 1710-1718.
- [61] 戴中民.生物炭对酸化土壤的改良效应与生物化学机理研究[D].杭州:浙江大学,2017:10-76



- DAI Z M. The effects of biochar on acid soil improvement and the related biochemical mechanisms[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017: 10-76. (in Chinese)
- [62] ZHU X M, CHEN B L, ZHU L Z, et al. Effects and mechanisms of biochar-microbe interactions in soil improvement and pollution remediation: A review [J]. *Environmental Pollution*, 2017, 227: 98-115.
- [63] 张千丰, 王光华. 生物炭理化性质及对土壤改良效果的研究进展 [J]. *土壤与作物*, 2012, 1 (4): 219-226.
- ZHANG Q F, WANG G H. Research progress of physiochemical properties of biochar and its effects As soil amendments [J]. *Soil and Crop*, 2012, 1(4): 219-226. (in Chinese)
- [64] 李明, 李忠佩, 刘明, 等. 不同秸秆生物炭对红壤性水稻土养分及微生物群落结构的影响 [J]. *中国农业科学*, 2015, 48 (7): 1361-1369.
- LI M, LI Z P, LIU M, et al. Effects of different straw biochar on nutrient and microbial community structure of a red paddy soil [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(7): 1361-1369. (in Chinese)
- [65] 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.
- [66] UCHIMIYA M, WARTELLE L H, KLASSON K T, et al. Influence of pyrolysis temperature on biochar property and function as a heavy metal sorbent in soil [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2011, 59(6): 2501-2510.
- [67] 陈斐杰, 夏会娟, 刘福德, 等. 生物质炭特性及其对土壤性质的影响与作用机制 [J]. *环境工程技术学报*, 2022, 12 (1): 161-172.
- CHEN F J, XIA H J, LIU F D, et al. Characteristics of biochar and its effects and mechanism on soil properties [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022, 12(1): 161-172. (in Chinese)
- [68] SPOKAS K A, CANTRELL K B, NOVAK J M, et al. Biochar: A synthesis of its agronomic impact beyond carbon sequestration [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2012, 41(4): 973-989.
- [69] 刘玉学, 刘微, 吴伟祥, 等. 土壤生物质炭环境行为与环境效应 [J]. *应用生态学报*, 2009, 20 (4): 977-982.
- LIU Y X, LIU W, WU W X, et al. Environmental behavior and effect of biomass-derived black carbon in soil: A review [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(4): 977-982. (in Chinese)
- [70] 何逸婷, Marios Drosos, 孙嘉, 等. 不同原料、热解温度对生物质炭化学性质及结构组成的影响 [J]. *南京农业大学学报*, 2023, 46 (4): 718-726.
- HE Y T, MARIOS D, SUN J, et al. Effects of feedstock and pyrolysis temperature on chemical properties and structural composition of biochar [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2023, 46(4): 718-726. (in Chinese)
- [71] 柯贤林, 恽壮志, 刘铭龙, 等. 不同来源生物质废弃物热解炭化农业应用潜力分析: 生物质炭产率、性质及促生效应 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27 (7): 1113-1128.
- KE X L, YUN Z Z, LIU M L, et al. Potential of pyrolysis for agricultural application of different biowastes: Biochar yield, properties and their crop growth effects [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(7): 1113-1128. (in Chinese)
- [72] 周丽靖, 王亚军, 谢忠奎, 等. 生物炭对兰州百合 (*Lilium davidii* var. *unicolor*) 连作土壤的改良作用 [J]. *中国沙漠*, 2019, 39 (2): 137-142.
- ZHOU L J, WANG Y J, XIE Z K, et al. Improvement Effect of Biochar on the Degraded Soil of Lanzhou Lily Field [J]. *Journal of Desert Research*, 2019, 39(2): 137-142. (in Chinese)
- [73] 郭平, 王观竹, 许梦, 等. 不同热解温度下生物质废弃物制备的生物质炭组成及结构特征 [J]. *吉林大学学报 (理学版)*, 2014, 52 (4): 855-860.
- GUO P, WANG G Z, XU M, et al. Structure and composition characteristics of biochars derived from biomass wastes at different pyrolysis temperatures [J]. *Journal of Jilin University (Science Edition)*, 2014, 52(4): 855-860. (in Chinese)
- [74] 简敏菲, 高凯芳, 余厚平. 不同裂解温度对水稻秸秆制备生物炭及其特性的影响 [J]. *环境科学学报*, 2016, 36 (5): 1757-1765.
- JIAN M F, GAO K F, YU H P. Effects of different pyrolysis temperatures on the preparation and characteristics of bio-char from rice straw [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(5): 1757-1765. (in Chinese)
- [75] 赵海岚, 李冰, 王昌全, 等. 两种生物质炭对酸性紫色土腐殖质组成的影响 [J]. *中国生态农业学报 (中英文)*, 2020, 28 (12): 1949-1957.
- ZHAO H L, LI B, WANG C Q, et al. The effects of biochars on humus composition in acidic purplish soil [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(12): 1949-1957. (in Chinese)
- [76] 张继宁, 周胜, 孙会峰, 等. 生物质炭在我国蔬菜地应用的研究现状与展望 [J]. *农业现代化研究*, 2018, 39 (4): 543-550.
- ZHANG J N, ZHOU S, SUN H F, et al. Research progress and prospects on the biochar's application in Chinese vegetable field [J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2018, 39(4): 543-550. (in Chinese)
- [77] 罗煜, 赵立欣, 孟海波, 等. 不同温度下热裂解芒草生物质炭的理化特征分析 [J]. *农业工程学报*, 2013, 29 (13): 208-217.
- LUO Y, ZHAO L X, MENG H B, et al. Physio-chemical characterization of biochars pyrolyzed from miscanthus under two different temperatures [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(13): 208-217. (in Chinese)
- [78] 梁桓, 索全义, 侯建伟, 等. 不同炭化温度下玉米秸秆和沙蒿生物炭的结构特征及化学特性 [J]. *土壤*, 2015, 47 (5): 886-891.
- LIANG H, SUO Q Y, HOU J W, et al. The structure characteristics and chemical properties of maize straw biochar and *Artemisia ordosica* biochar prepared at different carbonization temperatures [J]. *Soils*, 2015, 47(5): 886-891. (in Chinese)
- [79] TAN Z X, LIN C S K, JI X Y, et al. Returning biochar to fields: A review [J]. *Applied Soil Ecology*, 2017, 116: 1-11.
- [80] 程国淡, 黄青, 张凯松. 热解温度和时间对生物干化污泥生物炭性质的影响 [J]. *环境工程学报*, 2013, 7 (3): 1133-1138.
- CHENG G D, HUANG Q, ZHANG K S. Effect of temperature and duration of pyrolysis on properties of bio-dried sludge biochar [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2013, 7(3): 1133-1138. (in Chinese)
- [81] ROWELL D L, WILD A. Causes of soil acidification: A summary [J]. *Soil Use and Management*, 1985, 1(1): 32-33.
- [82] 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.
- [83] KLOSS S, ZEHETNER F, WIMMER B, et al. Biochar application to temperate soils: Effects on soil fertility and crop growth under greenhouse conditions [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2014, 177(1): 3–15.
- [84] 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.
- YUAN J H, XU R K, E S Z, et al. Forms of base cations in biochars and their roles in acid soil amelioration [J]. *Soils*, 2019, 51(1): 75–82. (in Chinese)
- [85] WANG G J, XU Z W. The effects of biochar on germination and growth of wheat in different saline-alkali soil [J]. *Asian Agricultural Research*, 2013, 05: 116–119.
- [86] 唐汉萌. 微生物菌剂和生物炭对半夏产量、品质及土壤微生态的影响 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2019: 53-61.
- TANG H M. Effects of microbial fertilizer and biochar applications on the yield and quality of *Pinellia ternata* and soil microecology[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019: 53-61. (in Chinese)
- [87] 杨莉, 文子伟, 付婧, 等. 生物质炭对连作参地人参种苗与土壤质量的影响 [J]. *中药材*, 2020, 43 (4): 791–796.
- YANG L, WEN Z W, FU J, et al. Effect of biochar on seedling and soil quality of continuous cropping *Panax ginseng* [J]. *Journal of Central University of Finance & Economics*, 2020, 43(4): 791–796. (in Chinese)
- [88] 王昆艳, 官会林, 赵林艳, 等. 稻壳炭对三七连作土壤理化性质和细菌群落结构的影响 [J]. *西南农业学报*, 2022, 35 (9): 2107–2113.
- WANG K Y, GUAN H L, ZHAO L Y, et al. Effects of rice husk biochar on soil physicochemical properties and bacterial community structure of *Panax notoginseng* under continuous cropping [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2022, 35(9): 2107–2113. (in Chinese)
- [89] ROUSK J, BÅÅTH E, BROOKES P C, et al. Soil bacterial and fungal communities across a pH gradient in an arable soil [J]. *The ISME Journal*, 2010, 4(10): 1340–1351.
- [90] ELAD Y, DAVID D R, HAREL Y M, et al. Induction of systemic resistance in plants by biochar, a soil-applied carbon sequestering agent [J]. *Phytopathology*, 2010, 100(9): 913–921.
- [91] 饶霜, 卢阳, 黄飞, 等. 生物炭对土壤微生物的影响研究进展 [J]. *生态与农村环境学报*, 2016, 32 (1): 53–59.
- RAO S, LU Y, HUANG F, et al. A review of researches on effects of biochars on soil microorganisms [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2016, 32(1): 53–59. (in Chinese)
- [92] 周之栋, 卜晓莉, 吴永波, 等. 生物炭对土壤微生物特性影响的研究进展 [J]. *南京林业大学学报 (自然科学版)*, 2016, 40 (6): 1–8.
- ZHOU Z D, BU X L, WU Y B, et al. Research advances in biochar effects on soil microbial properties [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2016, 40(6): 1–8. (in Chinese)
- [93] 杨莉, 勾颖, 文子伟, 等. 生物质炭对连作参地土壤肥力及微生物特性的影响 [J]. *核农学报*, 2022, 36 (6): 1244–1253.
- YANG L, GOU Y, WEN Z W, et al. Effect of biochar on soil fertility and microbial properties in continuous cropping ginseng field [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2022, 36(6): 1244–1253. (in Chinese)
- [94] ANDERSON C R, CONDRON L M, CLOUGH T J, et al. Biochar induced soil microbial community change: Implications for biogeochemical cycling of carbon, nitrogen and phosphorus [J]. *Pedobiologia*, 2011, 54(5/6): 309–320.
- [95] PEAKE L R, REID B J, TANG X Y. Quantifying the influence of biochar on the physical and hydrological properties of dissimilar soils [J]. *Geoderma*, 2014, 235/236: 182–190.
- [96] BUTNAN S, DEENIK J L, TOOMSAN B, et al. Biochar characteristics and application rates affecting corn growth and properties of soils contrasting in texture and mineralogy [J]. *Geoderma*, 2015, 237/238: 105–116.
- [97] PARANAVITHANA G N, KAWAMOTO K, INOUE Y, et al. Adsorption of Cd<sup>2+</sup> and Pb<sup>2+</sup> onto coconut shell biochar and biochar-mixed soil [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(6): 484.
- [98] 颜钰, 王子莹, 金洁, 等. 不同生物质来源和热解温度条件下制备的生物炭对菲的吸附行为 [J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33 (9): 1810–1816.
- YAN Y, WANG Z Y, JIN J, et al. Phenanthrene adsorption on biochars produced from different biomass materials at two temperatures [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(9): 1810–1816. (in Chinese)
- [99] 刘丽珠, 范如芹, 卢信, 等. 农业废弃物生物质炭在设施栽培中应用的研究进展 [J]. *江苏农业学报*, 2016, 32 (6): 1434–1440.
- LIU L Z, FAN R Q, LU X, et al. Research progress in application of biochar derived from agricultural waste in facility cultivation [J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2016, 32(6): 1434–1440. (in Chinese)
- [100] DE LA ROSA J M, PANEQUE M, HILBER I, et al. Assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in biochar and biochar-amended agricultural soil from Southern Spain [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16(2): 557–565.
- [101] 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.
- [102] 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.

(责任编辑: 于洪杰)