

马 丽,齐红志,闫 明,等. 生物炭对连作障碍条件下土壤微生物和草莓生长的影响[J]. 江苏农业科学,2019,47(17):142-146.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.17.034

# 生物炭对连作障碍条件下土壤微生物和草莓生长的影响

马 丽<sup>1</sup>, 齐红志<sup>2</sup>, 闫 明<sup>3</sup>, 郭学良<sup>1</sup>, 张宗英<sup>1</sup>, 张 莉<sup>4</sup>

(1. 商丘师范学院生物与食品学院/植物与微生物互作重点实验室,河南商丘 476000; 2. 河南省农业科学院农业经济与信息研究所,河南郑州 450002; 3. 河南农业大学林学院,河南郑州 450002; 4. 河南工业大学生物工程学院,河南郑州 450001)

**摘要:**为合理利用农业废弃物和防治草莓连作障碍,以草莓连作 8 年的土壤为研究对象,设定 5 个生物炭水平,分别添加质量分数为 0%、0.15%、0.30%、0.45%、0.60% 的小麦秸秆生物炭,研究生物炭处理对连作障碍条件下草莓生长和土壤微生物特征的影响。结果表明,施用生物炭能够增加草莓根际土壤微生物含量,随着生物炭的增加,微生物总量先升高然后降低,根长和叶面积变化也表现出相似的趋势。当生物炭添加量为 0.30% 时,草莓根际土壤微生物最丰富,微生物总量达  $6.15 \times 10^7$  CFU/g,比不添加生物炭提高了 49.03%,有效地改善了土壤环境,进而有利于草莓的生长,草莓根系生长量提高,有利于营养吸收和物质转化,单株叶面积比不添加生物炭的处理显著增大,进而更有利于干物质积累和产量的形成。土壤细菌和真菌数量与根系某些指标为显著或极显著正相关,与叶面积表现出极显著正相关关系,而放线菌与根系生长和叶面积相关性不大。总之,施用生物炭能有效提高连作障碍条件下草莓根际土壤微生物数量,促进草莓根系和叶面积的生长,且添加量为 0.30% 时,对连作土壤改良效果最好。

**关键词:**草莓;生物炭;土壤微生物;根系;叶面积

**中图分类号:** S668.404;S156 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)17-0142-05

草莓 (*Fragaria × ananassa* Duch.) 属于蔷薇科草莓属多年生草本植物,果实营养丰富,种植经济效益高,近年来我国草莓产业发展迅速,成为当前种植较为广泛的水果之一,且普遍采用设施栽培,然而设施栽培长期连作容易导致土壤肥力

下降、营养失衡、土壤微生物群落发生变化等问题<sup>[1-2]</sup>,导致草莓的生长发育不良,产量及品质受到严重影响<sup>[3-4]</sup>,连作障碍发生严重,制约了草莓产业的可持续发展。因此,在设施栽培条件下,改善土壤生态,提高连作草莓产量和品质至关重要。轮作是克服连作障碍的有效措施,但由于设施内耕地数量的限制和农民耕作习惯的影响,在保护性耕作条件下很难实施轮作倒茬。

生物炭是一种由农林废弃生物质在完全或部分缺氧条件下,经热裂解形成的抗分解能力极强的富碳物质<sup>[5]</sup>。生物炭的多孔性使其具有极强的吸附能力,并且生物炭含有丰富的矿物质营养。研究指出,添加生物炭能有效提高土壤有机质,增

收稿日期:2018-04-24

基金项目:河南省科技攻关项目(编号:162102110092);商丘师范学院校级青年骨干教师资助项目(编号:2016GGJS10);国家自然科学基金(编号:31401918)。

作者简介:马 丽(1982—),女,河南许昌人,博士,副教授,主要从事植物与微生物互作研究。Tel:(0370)3157770;E-mail:ndmali@163.com。

[10]周 卫,李书田,林 葆,等. 喷钙对苹果果实生理特性的影响[J]. 土壤肥料,2000(6):25-28.

[11]Dogan M,Arslan O,Dogan S. Substrate specificity,heat inactivation and inhibition of polyphenol oxidase from different aubergine cultivars[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2002,37(4):415-423.

[12]Xue Z P,Feng W H,Cao J K,et al. Antioxidant activity and total phenolic contents in peel and pulp of Chinese jujube (*Ziziphus jujuba* Mill) fruits[J]. Journal of Food Biochemistry,2009,33(5):613-629.

[13]Cocucci M,Mignani Z M. A possible relationship between bitter pit and membrane transport in apples[J]. Acta Horticulture, 1983, 138:43-50.

[14]李 佳,石琰璟. 苹果多酚的研究现状[J]. 落叶果树,2014,46(6):18-20.

[15]Won L K,Jun K Y,Dae - Ok K,et al. Major phenolics in apple and

their contribution to the total antioxidant capacity[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry,2003,51(22):6516-6520.

[16]Osada K,Takashi S,Kawakami Y,et al. Dose dependent hypocholesterolemic actions of dietary apple polyphenol in rats fed cholesterol[J]. Lipids,2006,41(2):133-139.

[17]鞠志国,原永兵,刘成连,等. 苹果果皮中酚类物质合成规律的研究[J]. 阳农学院学报,1992,9(3):222-225.

[18]鄯光发,刘俊华,董晓颖,等. 红富士苹果果实着色与抗氧化酶活性的关系[J]. 园艺学报,2004,31(3):347-349.

[19]厉恩茂,史大川,徐月华,等. 套袋苹果不同类型果袋内温、湿度变化特征及其对果实外观品质的影响[J]. 应用生态学报,2008,19(1):208-212.

[20]李慧峰,吕德国,刘国成,等. 套袋对苹果果皮特征的影响[J]. 果树学报,2006,23(3):326-329.

[21]鞠志国. 苹果果实中酚类物质与虎皮病的关系[J]. 果树科学,1990,7(4):207-210.

加土壤速效氮磷钾的含量,最终提高作物产量<sup>[6-8]</sup>。顾美英等对棉田施用生物炭的研究发现,生物炭提高土壤纤维素分解菌和自生固氮菌的数量,保护了土壤有益微生物,提高了棉花根际土壤养分和微生物多样性<sup>[9]</sup>;吴维等研究指出,生物炭能够增加土壤田间持水量,有利于植物生长和土壤养分的保持<sup>[10]</sup>。因此,生物炭在改良土壤理化性状、改善土壤微环境、提高土地生产性能和作物生产能力等方面具有一定的作用<sup>[11]</sup>,有利于促进可持续发展。然而,生物炭的应用也有相反的报道,Dempster 等发现使用较高量生物炭,土壤微生物数量有所下降<sup>[12]</sup>,张晗芝等研究显示生物炭对玉米苗期生长有显著的抑制作用<sup>[13]</sup>,而邓万刚等指出施用低量生物炭对热带牧草的生长无正面影响<sup>[14]</sup>。但总体来说,生物炭的正向效应较为普遍。生物炭对作物的影响主要是通过改变土壤环境来实现的,而微生物是土壤生物中的重要组成部分,微生物的分布对土壤营养元素循环、土壤肥力的形成与发展、植物的生长以及病虫害防治等方面都起着重要的作用<sup>[15]</sup>。前人研究指出,生物炭通过其吸附作用,能够激活抗氧化酶活性,减少脂质过氧化,显著降低了连作土壤中酚酸的含量,进而缓解了苹果的连作障碍<sup>[16]</sup>。目前,生物炭在调控棉花<sup>[9,17]</sup>、番茄<sup>[18]</sup>、黄瓜<sup>[19]</sup>、苹果<sup>[20]</sup>等连作障碍方面的研究已有报道,但在草莓上的应用仍不多见,且生物炭添加量在草莓连作障碍方面的应用研究也鲜见报道。针对草莓连作障碍的防治仍以化学措施为主,而化学药剂虽然具有一定的防治效果,但其毒性残留为草莓的食用安全性带来了隐患。本研究以草莓连作 8 年的土壤为对象,以佐贺清香草莓品种为材料,研究不同生物炭用量对连作条件下草莓生长和土壤微生物生态特性的影响,以期为防控草莓连作障碍、实现草莓产业可持续发展及农业废弃物的合理利用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验在商丘师范学院温室大棚内进行,采用连作 8 年草莓的土壤,土壤取自商丘市双八草莓基地。土壤基本理化性质为 pH 值 8.12,有机质含量 23.6 g/kg,碱解氮含量 152.2 mg/kg,速效磷含量 118.4 mg/kg,速效钾含量 138.15 mg/kg。供试草莓苗由河南斯托博瑞农业科技有限公司提供,品种为佐贺清香。试验所用生物炭为小麦秸秆炭,该生物炭速效磷含量 82.2 mg/kg、速效钾含量 1 590 mg/kg、有机碳含量 670 g/kg,pH 值为 9.9,裂解时间为 4~8 h、热解温度 350~550 ℃,由河南三利新能源有限公司提供。

### 1.2 试验方法

试验于 2016 年进行,设 5 个处理,即生物炭添加量 0% 为空白对照(CK),其他处理添加生物炭的量分别为 0.15%、0.30%、0.45%、0.60%,记作 T1、T2、T3、T4,生物炭按质量比均匀拌入土壤中,各处理均加入质量比为 0.35% 的干鸡粪和 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 含量均为 15% 的复合肥 0.03%,采用盆栽试验,栽植盆为外口直径 25 cm、内口直径 21.5 cm、底部直径 13.0 cm、高度 16.5 cm 的塑料花盆,装土的高度为浇第 1 遍水后距离盆口上沿 2 cm 处,每盆栽种 1 株草莓,每个处理 30 盆,分 3 个重复,每个重复 10 盆。于 2016 年 5 月 12 日,选择 2 叶 1 心营养钵苗进行移栽。2016 年 10 月 10 日,采集各处

理的根际土壤,置于保鲜袋中,放入 4 ℃ 冰箱中备用。

### 1.3 测定项目及方法

1.3.1 土壤微生物数量的测定 试验采用平板涂抹法,分别测定微生物中细菌、放线菌、真菌的数量,细菌以牛肉膏蛋白胨培养基培养,放线菌以改良高氏一号培养基培养,真菌以马丁氏培养基培养,接种后放在培养箱中培养,细菌在 37 ℃ 下培养 2 d,放线菌和真菌在 28 ℃ 培养,其中真菌培养 3~5 d,放线菌培养 5~7 d,计数培养皿中形成的菌落数量,同时测定土壤含水量,计算干土中微生物的数量,菌数(CFU/g)=(菌落平均数×稀释倍数)/干土质量<sup>[21]</sup>。

1.3.2 根系分析及叶面积测定 采集根际土样的同时,每个重复选取具有代表性的 3 株草莓,通过挖掘法挖出完整的草莓根系,将草莓植株从根部剪掉,用清水将根部清洗干净。利用 WinRHIZO 根系分析系统测定总根长、平均直径、表面积、侧面积以及根尖计数。同时,用叶面积测定仪测定整株草莓叶片叶面积。

### 1.4 数据处理

数据采用 Excel 2003 进行作图,采用 SPSS 16.0 对数据进行统计分析,用邓肯新复极差法进行单因素方差分析和 Pearson 相关性分析,相关性的显著性检验采用双尾 *t* 检验。

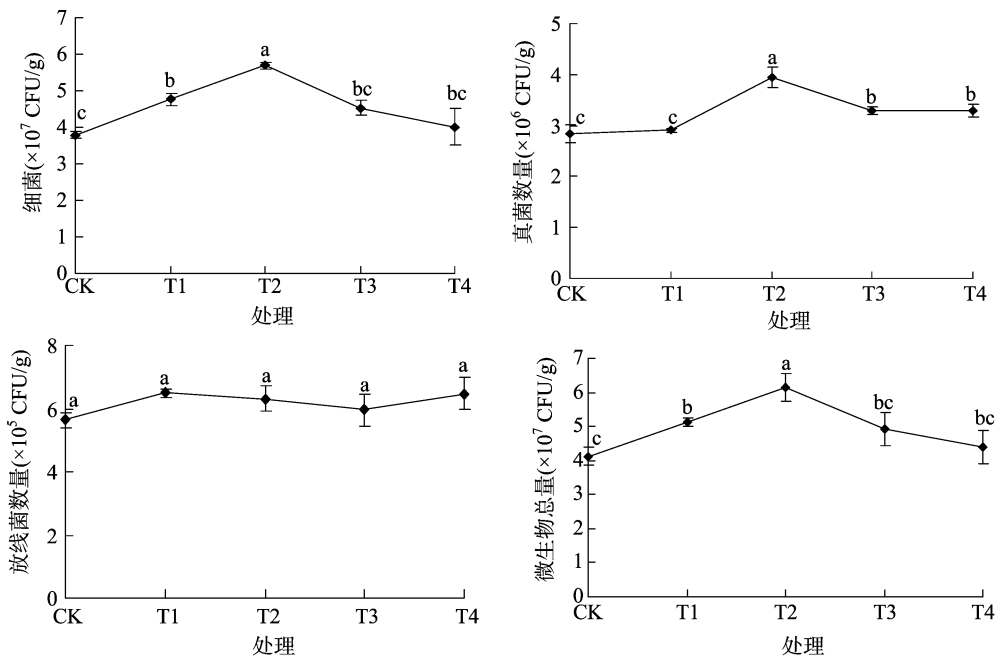
## 2 结果与分析

### 2.1 生物炭对连作障碍条件下草莓根际土壤微生物数量的影响

由图 1 可以看出,添加不同量的生物炭,草莓连作土壤根际微生物含量存在明显差异。细菌数量随着生物炭添加量的增加表现出先升高后降低的趋势,且各处理细菌数量均高于对照,当生物炭添加量为 0.30% (处理 T2) 时,草莓根际土壤细菌数量最多,达  $5.69 \times 10^7$  CFU/g,是对照的 1.50 倍,其次是生物炭添加量为 0.15% (处理 T1) 时,土壤细菌数量比对照提高 25.81%,且差异达到显著水平,而 T3 处理和 T4 处理与对照差异不显著。真菌在草莓根际土壤微生物中的含量仅次于细菌,除处理 T1 外,其他各处理真菌含量均显著高于对照,当生物炭添加量为 0.30% 时根际土壤真菌含量最高,为  $3.94 \times 10^6$  CFU/g,比对照高 38.91%。随着生物炭添加量的增加,真菌在微生物总量中的比例表现出先降低然后升高的趋势,当生物炭添加量为 0.15% (T1 处理) 时,真菌所占比例最低,为 5.67%,其次为 T2 处理,占比为 6.40%。添加生物炭对草莓根际土壤放线菌含量的影响不明显,各处理间差异均未达到显著水平。本研究结果显示,添加生物炭后各处理根际土壤微生物总量均升高,由于细菌是土壤微生物中占比最大的一类微生物,土壤微生物总量的变化与细菌保持一致,细菌占微生物总量的 91.05%~93.06%,其次为真菌,占总量的 5.67%~7.48%。随着生物炭添加量的增加,土壤微生物总量增加,当生物炭添加量为 0.30% 时,土壤微生物含量最高,是对照的 1.49 倍,继续增加生物炭的量,则土壤微生物总量降低,各处理根际土壤微生物总量均高于对照,T1 处理和 T2 处理与对照差异显著,分别比对照高 24.06% 和 49.03%。

### 2.2 生物炭对连作障碍条件下草莓根系生长特性的影响

由表 1 可以看出,连作障碍条件下加入生物炭,草莓总根长、根表面积、根体积和根尖计数均有所增加,随着生物炭添



不同小写字母表示处理之间差异显著( $P<0.05$ )。下图同  
图1 不同生物炭用量草莓根际土壤微生物的数量

加量的增加,草莓总根长、根表面积和根体积均表现出先升高然后降低的趋势,当在连作土壤中加入 0.30% 的生物炭(T2 处理)时,除根直径外,根系其他各指标均显著高于对照,其总根长为对照的 1.89 倍,根表面积、根体积和根尖计数分别是对照的 2.32、2.87 和 1.54 倍,而根直径与对照差异不显著。处理 T1 与对照相比,其总根长显著增加,增幅为 61.58%,但根系其他指标均未达到显著水平。总根长、根表

面积、根体积和根尖计数等指标的增加,提高了根系与外界物质接触的概率,有利于根系对土壤中养分和水分的吸收以及一些生命物质的合成,进而有利于草莓植株的生长。在草莓连作土壤中加入生物炭,有利于根系的生长,但生物炭添加量应适宜,加入过少和过多均达不到改良土壤和促进植株生长的目的。本研究中,在连作 8 年的土壤中加入 0.30% 的生物炭时,草莓根系生长较好。

表 1 不同生物炭用量对草莓根系生长特性的影响

处理	总根长 (cm)	表面积 (cm <sup>2</sup> )	直径 (mm)	根体积 (cm <sup>3</sup> )	根尖计数
CK	309.64 ± 14.96c	51.65 ± 2.35b	0.53 ± 0.01ab	0.69 ± 0.04b	526 ± 56b
T1	500.33 ± 49.84ab	85.46 ± 18.76ab	0.53 ± 0.06ab	1.20 ± 0.41ab	665 ± 47ab
T2	585.40 ± 45.77a	119.85 ± 16.76a	0.64 ± 0.05a	1.98 ± 0.42a	811 ± 43a
T3	426.83 ± 50.58bc	87.94 ± 14.54ab	0.65 ± 0.04ab	1.45 ± 0.30ab	579 ± 37b
T4	415.89 ± 10.66bc	65.08 ± 3.12b	0.50 ± 0.01b	0.81 ± 0.06b	649 ± 49b

注:同列数据后不同小写字母表示不同处理之间差异达 0.05 显著水平。

2.3 生物炭对连作障碍条件下草莓叶面积的影响

叶片是草莓植株从外界获取营养和进行光合作用的载体,叶面积的大小直接影响了植株的光照面积,决定了光能利用率的高低。从图 2 可以看出,在发生连作障碍的土壤中加入生物炭,单株叶面积均有所增加,随着生物炭添加量的升高,叶面积变化趋势与微生物总量和总根长量变化一致,均为先升高然后降低,在添加 0.30% 的生物炭时,草莓单株叶面积最大,与其他处理均差异显著,是对照的 2.15 倍;添加 0.15% 和 0.45% 的生物炭时,单株叶面积也显著高于对照,分别比对照增加 48.91% 和 53.28%;但当添加量增加至 0.60% 时,单株叶面积与对照差异不显著。

2.4 土壤微生物与草莓植物生长之间的关系

相关分析结果(表 2)表明,土壤细菌、真菌数量和微生物总量与根系各指标及叶面积均呈正相关关系。其中,细菌数

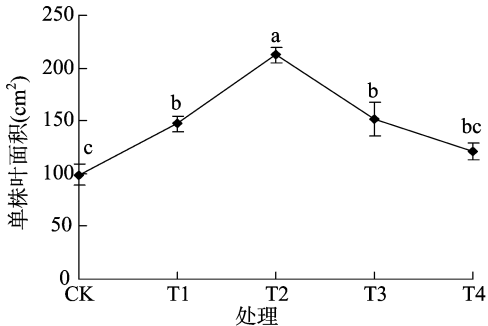


图2 不同生物炭用量对草莓单株叶面积的影响

量与根长和根表面积呈显著正相关,与根尖计数和叶面积呈极显著正相关;真菌数量与根表面积和根体积呈显著正相关,与叶面积呈极显著正相关;土壤放线菌数量与根系各指标和

表 2 土壤微生物数量与草莓植株根系和叶面积的相关关系 ( $n=15$ )

指标	相关系数					
	根长	根表面积	根直径	根体积	根尖计数	叶面积
细菌数量	0.628 *	0.560 *	0.334	0.500	0.706 **	0.835 **
真菌数量	0.496	0.526 *	0.413	0.515 *	0.499	0.691 **
放线菌数量	-0.126	0.077	0.441	0.158	-0.287	0.052
微生物总量	0.377	0.474	0.565 *	0.488	0.318	0.658 **

注: \* 和 \*\* 分别表示相关性在 0.05 和 0.01 水平上显著 (双尾  $t$  测验)。

叶面积无显著相关性;微生物总量则与根直径和叶面积分别达到显著正相关和极显著正相关。

### 3 讨论与结论

目前,国内外许多国家都采用集约化栽种草莓,在同一地块高密度连续栽植,导致有害生物频发,产量和品质下降。草莓连作障碍现象已成为全世界草莓栽培和研究者都广泛关注的热点,是目前亟需解决的一大问题。引起连作障碍的原因主要是土壤微生物群落和作物根系分泌物诸多因素综合作用的结果<sup>[22]</sup>。土壤微生物在土壤有机质分解和养分转化中起着重要的作用,进而影响了土壤的质量和作物的产量及品质<sup>[23]</sup>。连作草莓土壤微生物种群发生变化,根际微生物含量降低,导致了连作病害的发生<sup>[24]</sup>。研究表明,生物炭具有多孔结构,表面含有部分易分解的物质,能够吸附土壤微生物生长有毒的化感物质<sup>[25]</sup>,为土壤微生物提供适宜的生存环境,有益于土壤微生物活动<sup>[26]</sup>,生物炭的添加,主要通过改变土壤理化性质,间接地影响微生物的群落结构<sup>[6]</sup>。本研究中,草莓连作土壤施加适量生物炭,草莓根际土壤细菌和真菌数量均显著高于不施加生物炭的处理,而放线菌的数量变化不明显,植株根系总量增加,单株叶面积变大,有利于干物质的积累,这与前人研究结果<sup>[27]</sup>一致。而生物炭的用量要适当,本研究表明,当生物炭添加量为 0.30% 时,草莓根际微生物最为丰富,根系发达,植株生长健壮,而用量过低或者过量,均达不到较好的土壤改良效果,对连作障碍防治效果不明显。黄超等研究指出,生物炭施用量为较低时,土壤中有机碳、速效磷和速效钾含量升高,有利于黑麦草的生长,在肥力水平较高的土壤中,施用较多生物炭,使土壤微生物下降,抑制了黑麦草的生长<sup>[28]</sup>。王光飞等研究表明,生物炭用量为 1.33% 能显著改变微生物群落结构,对辣椒疫病的防治效果最好,微生物的多样性在一定范围内随着生物炭用量的增加而增加,但继续增加用量反而会降低<sup>[29]</sup>。生物炭添加量较低时,对土壤孔隙度和土壤质地等影响较小,且由于生物炭颗粒微小,能够填充部分土壤孔隙<sup>[30]</sup>,而生物炭自身含有丰富的微孔结构和亲水性,抑制了营养物质和水分向根系的转移<sup>[31]</sup>;随着生物炭用量的增加,生物炭与土壤颗粒能够形成微小团粒,有效抑制了土壤的收缩,形成了良好的孔隙结构及较低的堆积密度,进而降低土壤容重,孔隙度增加,改善了土壤结构<sup>[32]</sup>;生物炭添加过量,则会造成土壤小空隙和大孔隙的增加而减小了有效孔隙量<sup>[33]</sup>,进而水分向植株根系的移动受到影响,影响水分和养分的吸收,且研究表明过量生物炭能够降低土壤酶和微生物的活性<sup>[34]</sup>。

不同类型的生物炭,其用量和效果也有很大的差异,王光飞等指出生物炭用量为 1.33% 效果较好,其生物炭为玉米秸

秆生物炭<sup>[29]</sup>,叶协锋等指出生物炭用量为 600 kg/hm<sup>2</sup> 时对作物的改良效果最好,其生物炭为花生壳热解制成<sup>[35]</sup>,也有研究指出,施用木渣制成的生物炭对作物产生了负面影响<sup>[36]</sup>。而本研究中所用生物炭为小麦秸秆生物炭,生物炭用量为 0.30% 时效果最优。不同类型的生物炭,其灰分含量、pH 值、表面形态和孔隙结构等各不相同,因此具有不同的环境效应,在使用量和作用效果上也各不相同<sup>[37]</sup>。

草莓连作障碍是一种较为复杂的综合性病症。草莓连作后,根际土壤中的各生物因子间、非生物因子间、生物因子与非生物因子间相互作用,影响作物的正常生长,根系生长受到严重影响,草莓植株死亡指数大幅度升高<sup>[38]</sup>。虽然采用化学消毒效果较好,但因对环境有污染,而且影响人类健康,对土壤中的微生物种群乃至土壤中的固氮菌、根瘤菌和有机质分解菌等有益微生物产生不利的影响<sup>[39]</sup>,不利于草莓产业的可持续发展。研究表明,生物炭通过改变土壤容重、孔隙度和养分含量,进而影响了土壤微环境,抑制了土壤中有害物质的滋生,改良了土壤团粒结构,改善了土壤质量,增强了土壤生态系统的稳定性<sup>[40]</sup>,有利于缓解连作障碍。生物炭能够提高土壤有机碳的矿化速率,进而增加土壤可溶性有机碳含量,土壤可利用养分升高,有利于植株的生长<sup>[35]</sup>。连作障碍条件下,生物炭的施用有利于提高植株株高和干物质<sup>[20]</sup>。本研究中,在连作障碍条件下添加生物炭,草莓总根量增加、单株叶面积也明显变大,这与前人研究结果一致。生物炭在连作条件下对植株产生影响,可能是由于本身含有较高的有机物质,且能吸附土壤中部分有害物质,进而降低土壤中有害菌对植株的影响。相关性分析表明,细菌和真菌数量及微生物总量均与叶面积呈极显著正相关关系,与根长、根表面积、根体积及根尖计数等根系指标存在着某些显著或极显著相关性,而放线菌与根系各指标及叶面积无显著相关性。微生物数量的变化会影响植株的根系的生长,进而影响着叶片的生长,特别是微生物中细菌和真菌的数量,在调节根系生长,促进叶片生长方面作用比较明显。

在连作障碍条件下添加生物炭能够提高草莓根际土壤微生物含量,增加草莓根系生长量,增加单株叶面积。生物炭添加量为 0.30% 时,土壤微生物最为丰富,是不添加生物炭的 1.49 倍,草莓总根长、根表面积、根体积以及叶面积均显著高于不添加生物炭的处理,对草莓连作障碍起到了良好的防控效果。土壤细菌和真菌数量与根系某些指标为显著或极显著正相关,与叶面积呈极显著正相关,而放线菌与根系生长和叶面积相关性不大。

### 参考文献:

[1] 赵 帆,赵密珍,王 钰,等. 草莓不同连作年限土壤养分及微生

- 物区系分析[J]. 江苏农业科学,2017,45(16):110-113.
- [2] Yao H Y, Jiao X D, Wu F Z. Effects of continuous cucumber cropping and alternative rotations under protected cultivation on soil microbial community diversity[J]. Plant and Soil, 2006, 284 (1/2): 195-203.
  - [3] 李贺勤, 张林林, 刘奇志. 修复剂对连作草莓植株生长、土壤酶活性和矿质氮含量的影响[J]. 土壤通报, 2014(3): 643-647.
  - [4] 李星月, 刘奇志, 白春启, 等. 土壤修复技术对连作草莓产量与品质的影响[J]. 西南农业学报, 2017, 30(2): 383-388.
  - [5] Antal M J, Gronli M. The art, science and technology of charcoal production[J]. Industrial and Engineering Chemistry, 2003, 42(8): 1619-1640.
  - [6] 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.
  - [7] 陈心想, 何绪生, 耿增超, 等. 生物炭对不同土壤化学性质、小麦和糜子产量的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(20): 6534-6542.
  - [8] Tammeorg P, Simojoki A, Mäkelä P, et al. Erratum to: biochar application to a fertile sandy clay loam in boreal conditions: effects on soil properties and yield formation of wheat, turnip rape and faba bean[J]. Plant and Soil, 2014, 379(1/2): 389-390.
  - [9] 顾美英, 刘洪亮, 李志强, 等. 新疆连作棉田施用生物炭对土壤养分及微生物群落多样性的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(20): 4128-4136.
  - [10] 吴维, 李心清, 周运超, 等. 玉米秸秆生物炭对贵州黄壤持水能力的影响[J]. 地球与环境, 2017, 45(6): 675-680.
  - [11] Khodadad C M, Zimmerman A R, Green S J, et al. Taxa-specific changes in soil microbial community composition induced by pyrogenic carbon amendments[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2011, 43(2): 385-392.
  - [12] Dempster D N, Gleeson D B, Solaiman Z M, et al. Decreased soil microbial biomass and nitrogen mineralisation with *Eucalyptus* biochar addition to a coarse textured soil[J]. Plant and Soil, 2012, 354(1/2): 311-324.
  - [13] 张晗芝, 黄云, 刘钢, 等. 生物炭对玉米苗期生长、养分吸收及土壤化学性状的影响[J]. 生态环境学报, 2010, 19(11): 2713-2717.
  - [14] 邓万刚, 吴鹏豹, 赵庆辉, 等. 低量生物质炭对 2 种热带牧草产量和品质的影响研究初报[J]. 草地学报, 2010, 18(6): 844-847, 853.
  - [15] 郝玉敏, 戴传超, 戴志东, 等. 拟茎点霉 B3 与有机肥配施对连作草莓生长的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(21): 6695-6704.
  - [16] Wang Y, Pan F, Wang G, et al. Effects of biochar on photosynthesis and antioxidative system of *Malus hupehensis* Rehd. seedlings under replant conditions[J]. Scientia Horticulturae, 2014, 175(1): 9-15.
  - [17] 韩光明, 陈全求, 张淑芳, 等. 生物炭对不同连作年限棉田土壤微生物数量的影响[J]. 棉花科学, 2017, 39(5): 7-12.
  - [18] 李亮亮, 吴正超, 陈彬, 等. 生物炭对化感物质胁迫下番茄幼苗生物量及保护酶活性的影响[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(16): 99-103.
  - [19] 邹春娇, 张勇勇, 张一鸣, 等. 生物炭对设施连作黄瓜根域基质酶活性和微生物的调节[J]. 应用生态学报, 2015, 26(6): 1772-1778.
  - [20] 王艳芳, 相立, 徐少卓, 等. 生物炭与甲壳素配施对连作平邑甜茶幼苗及土壤环境的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(4): 711-719.
  - [21] 林先贵, 王一明. 土壤微生物研究原理与方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010: 30-47.
  - [22] 邹莉, 袁晓颖, 李玲, 等. 连作对大豆根部土壤微生物的影响研究[J]. 微生物学杂志, 2005, 25(2): 27-30.
  - [23] 王光华, 金剑, 徐美娜, 等. 植物、土壤及土壤管理对土壤微生物群落结构的影响[J]. 生态学杂志, 2006, 25(5): 550-556.
  - [24] 甄文超, 代丽, 胡同乐, 等. 连作草莓土壤微生物区系动态的研究[J]. 河北农业大学学报, 2005, 28(3): 70-72, 87.
  - [25] 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.
  - [26] 李力, 刘娅, 陆宇超, 等. 生物炭的环境效应及其应用的研究进展[J]. 环境化学, 2011, 30(8): 1411-1421.
  - [27] De Tender C, Haegeman A, Vandecasteele B, et al. Dynamics in the strawberry rhizosphere microbiome in response to biochar and *Botrytis cinerea* leaf infection[J]. Frontiers in Microbiology, 2016, 7(7): 2062.
  - [28] 黄超, 刘丽君, 章明奎. 生物质炭对红壤性质和黑麦草生长的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2011, 37(4): 439-445.
  - [29] 王光飞, 马艳, 郭德杰, 等. 不同用量秸秆生物炭对辣椒疫病防控效果及土壤性状的影响[J]. 土壤学报, 2017, 54(1): 204-215.
  - [30] 赵迪, 黄爽, 黄介生. 生物炭对粉黏壤土水力参数及胀缩性的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(17): 136-143.
  - [31] 李树霖, 王霞, 王朔, 等. 生物炭施用方式及用量对土壤水分参与蒸发的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(14): 135-144.
  - [32] 文曼, 郑纪勇. 生物炭不同粒径及不同添加量对土壤收缩特征的影响[J]. 水土保持研究, 2012, 19(1): 46-50, 55.
  - [33] 王红兰, 唐翔宇, 张维, 等. 施用生物炭对紫色土坡耕地耕层土壤水力学性质的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(4): 107-112.
  - [34] Oleszczuk P, Josko I, Futa B A, et al. Effect of pesticides on microorganisms, enzymatic activity and plant in biochar-amended soil[J]. Geoderma, 2014, 214(2): 10-18.
  - [35] 叶协锋, 李志鹏, 于晓娜, 等. 生物炭用量对植烟土壤碳库及烤后烟叶质量的影响[J]. 中国烟草学报, 2015, 21(5): 33-41.
  - [36] Asai H, Samson B K, Stephan H M, et al. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos: 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield[J]. Field Crops Research, 2009, 111(1/2): 81-84.
  - [37] 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.
  - [38] Fang X, Phillips D, Li H, et al. Severity of crown and root diseases of strawberry and associated fungaland oomycete pathogens in Western Australia[J]. Australasian Plant Pathology, 2011, 40(2): 109-119.
  - [39] 赵尊练, 杨广君, 巩振辉, 等. 克服蔬菜作物连作障碍问题之研究进展[J]. 中国农学通报, 2007, 23(12): 278-282.
  - [40] Bapat H, Manahan S E, Larsen D W. An activated carbon product prepared from mile (*Sorghum vulgare*) grain for use in hazardous waste gasification by ChemChar cocurrent flow gasification[J]. Chemosphere, 1999, 39(1): 23-32.