

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^{*}

王光飞^{1, 2} 马艳^{1, 2†} 郭德杰^{1, 2} 曹云^{1, 2} 罗德旭³ 赵建锋³ 孙玉东³

(1 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 南京 210014)

(2 农业部江苏耕地保育科学观测实验站, 南京 210014)

(3 江苏徐淮地区淮阴农业科学研究所, 江苏淮安 223001)

摘 要 采用盆栽试验研究了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, 并解析生物炭用量、土壤性状与防控效果之间的关系。结果表明, 随着生物炭用量的增加, 土壤pH和有机质含量逐步上升, 电导率、有效磷和速效钾含量迅速上升, 而铵态氮和硝态氮含量变化较小。细菌、真菌及四种功能菌数量随着用量的增加而逐步增加, 但辣椒疫霉数量呈现先上升后下降的趋势。土壤酶活性方面, 脲酶和 β -葡萄糖苷酶逐步降低, FDA酶和蔗糖酶则先上升后下降。微生物代谢能力、微生物多样性及微生物均匀度均与用量呈倒U型曲线关系, 在1.33%用量下获得最高值。DGGE图谱显示, 低用量生物炭对微生物区系影响较小, 而1.33%和2%用量则能显著改变微生物群落结构。0.33%、0.66%、1.33%和2%用量的防效分别为-9.8%、8.6%、56.7%和35.1%, 与用量也呈倒U型曲线关系, 1.33%生物炭用量对辣椒疫病的防效最好。一定范围内防效随生物炭用量的增加而增加, 这可能是因为生物炭对土壤性状的改善作用, 而随后防效下降, 则与高用量生物炭对土壤性状产生的负面影响有关。

关键词 秸秆生物炭; 辣椒疫病; 土壤性状

中图分类号 S157; S154.3 **文献标识码** A

生物质在无氧或缺氧条件下高温裂解产生的固体产物即为生物炭。生物炭具有比表面积大、孔隙度好、吸附能力强的特点, 并且富含有机碳、矿质养分等, 是一种集肥料、吸附剂和改良剂于一体的新型材料^[1-2]。已有很多报道表明, 添加生物炭能改善土壤酸碱度、温室气体排放、物理结构、养分状况和微生物多样性及群落结构等等, 并且对植株生长有促进作用^[3-5]。

辣椒疫病是由辣椒疫霉菌 (*Phytophthora capsici* L.) 引起的一种世界性土传病害, 蔓延迅速, 致病性强, 常在短期内爆发, 造成辣椒生产的

毁灭性破坏。辣椒疫病等土传病害病情程度不仅与病原菌数量相关, 而且与土壤理化和生物学性状息息相关。近年有不少关于生物炭防控番茄青枯病、芦笋根腐病和黄瓜猝倒病等土传病害的报道^[4, 6], 初步显示出生物炭在土传病害防控方面的潜力和前景。但鲜有文献将生物炭防控土传病害与其对土壤性状的影响进行联系和剖析。

生物炭用量是影响生物炭防效的重要因素, Jaiswal等^[7]和Elmer与Pignatello^[8]分别在研究生物炭防控立枯丝核菌 (*Rhizoctonia solani*) 和芦笋枯萎菌 (*Fusarium oxysporum* f. sp. *asparagi*) 引

^{*} 国家自然科学基金项目 (31471949)、农业部公益性行业专项 (201303023) 和江苏省科技支撑计划项目 (BE2014343) 共同资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 31471949), the Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest (No. 201303023), and the Key Technology R&D Program of Jiangsu Province (No. BE2014343)

[†] 通讯作者Corresponding author, E-mail: myjaas@sina.com

作者简介: 王光飞 (1988—), 男, 江西婺源人, 硕士, 助理研究员, 主要从事土壤微生物研究。E-mail: wy_wgf@163.com

收稿日期: 2016-04-14; 收到修改稿日期: 2016-07-26; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2016-10-20

起的土传病害中,均发现一定范围内生物炭防控病害的效果随生物炭用量的增加而增加,但随后防效逐渐下降。本实验室前期研究显示,土壤添加1%的秸秆生物炭对辣椒疫病具有良好的防控效果^[9],但不同生物炭用量下对病害的防控效果如何?防控效果受土壤中哪些性状影响?是否可以通过优化生物炭用量、调控土壤性状进而提高防控效果?等问题值得深入探究。鉴于此,本文研究了不同用量下生物炭对辣椒疫病的防控效果以及对土壤主要理化和微生物性状的影响,并解析生物炭用量、防控效果和土壤性状的关联性,不仅为利用生物炭防控辣椒疫病等土传病害提供参考用量,而且为评价生物炭施用对土壤性状的影响提供理论依据,具有重要的生产实践指导作用和理论价值。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤采自江苏淮安市黄码乡辣椒大棚耕层土,质地为砂土。生物炭由中国科学院南京土壤所谢祖彬研究员提供,由玉米秸秆经马弗炉500℃厌氧裂解1 h所得,粉碎过40目筛后备用。土壤和生物炭基本理化性状见表1。供试病原菌为辣椒疫霉菌,由本实验室分离所得。供试辣椒品种为苏椒5号。

1.2 试验设计

试验在江苏省农业科学院农业资源与环境研究所大棚内利用盆钵栽培的方式进行,自然光照,温度25~35℃。将制备好的辣椒疫霉游动孢子液

表1 供试土壤和生物炭基本性质

Table 1 Basic properties of the soil and biochar in the experiment

材料 Material	全氮 Total N (g kg ⁻¹)	全磷 Total P (g kg ⁻¹)	全钾 Total K (g kg ⁻¹)	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N (g kg ⁻¹)	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N (g kg ⁻¹)	有机质 OM (g kg ⁻¹)	灰分 Ash (g kg ⁻¹)	EC (μS cm ⁻¹)	pH
土壤Soil	3.21	1.19	18.2	16.2	75.3	30.1	—	706	7.20
生物炭 Biochar	6.28	1.25	38.7	7.1	12.8	365.5	324.2	5 715	9.73

喷洒加入土壤中,并拌匀,使得每g干土辣椒疫霉数量为100个游动孢子。再将试验土壤设以下5个处理:(1)T0,空白对照,生物炭施用量为0%;(2)T1,生物炭施用量为0.33%;(3)T2,生物炭施用量为0.66%;(4)T3,生物炭施用量为1.33%;(5)T4,生物炭施用量为2%。生物炭按质量比加入土壤并拌匀。各处理土壤分装到圆口盆钵中,每盆550 g鲜土。每个处理45盆,每15盆为1个重复。土壤处理当天,每盆种植一颗六叶期辣椒苗。土壤处理时和栽植期间均未施肥。栽植前采集土壤样品进行理化指标分析,栽植后32 d采集各处理植株根际土样,进行理化、酶学和微生物学指标分析,栽植后45 d内定期统计发病率。

1.3 测定项目与方法

土壤常规理化指标分析:土壤pH采用土水比=1:10浸提,用pH计测定;电导率采用土水比=1:10浸提,用电导仪测定;有机质含量采用重铬酸钾氧化法测定;铵态氮含量采用氯化钾浸提—靛酚蓝比色法测定;速效钾含量采用乙酸铵浸提—火

焰光度法测定;有效磷含量采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法测定;硝态氮含量采用紫外分光光度法测定^[10]。

土壤微生物数量:以新鲜土样为测定对象,采用试管梯度稀释涂平板法测定土壤芽孢杆菌、假单胞菌、链霉菌和木霉菌,采用的培养基分别是牛肉膏蛋白胨培养基、King's B培养基、STR培养基和马丁氏培养基^[11-12];以风干土样为测定对象,采用实时荧光定量PCR技术测定土壤细菌、真菌及辣椒疫霉数量^[13]。

土壤酶活性:以新鲜土样为测定对象,FDA酶采用荧光素显色法测定,以1 g土壤1 h后催化底物产生的荧光素的微克数表示^[14];脲酶采用苯酚—次氯酸钠比色法测定,以1 g土壤24 h后催化底物产生的NH₃-N的毫克数表示^[15];蔗糖酶采用3,5-二硝基水杨酸比色法,以1 g土壤24 h后产生葡萄糖的毫克数表示^[15];β-葡萄糖苷酶采用PNPG比色法,以1 g土壤1 h后催化底物产生的对硝基酚的微克数表示^[15]。

土壤微生物群落结构和碳源利用状况: 采用PCR-DGGE技术分析土壤微生物群落结构, PCR-DGGE参照Wang等^[16]的研究, 将主条带进行割胶回收并克隆测序^[16]; 土壤微生物碳源利用测定应用Biolog-Eco生态测试板测定^[17]。

1.4 数据处理

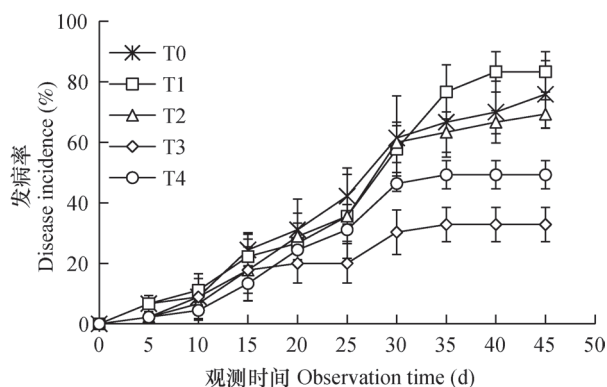
采用孔平均颜色变化率法测定微生物利用单一碳源的能力。 C_i 为各反应孔在590 nm的光密度值; R 为ECO板对照孔A1的光密度值; C_i-R 小于零的孔计算中记为零; $P_i = (C_i - R) / \sum (C_i - R)$, 表示有碳源的孔与对照孔A1的光密度值之差与整板总差的比值; S 为颜色发生变化的孔数(AWCD > 0.2代表该孔碳源被利用)。孔平均颜色变化率(Average well color development, AWCD) = $\sum (C_i - R) / 31$; Shannon物种多样性指数(H) = $-\sum P_i \times \ln P_i$; Shannon群落均匀度指数(E) = $H / \ln S$ ^[17]; Simpson优势度指数(D) = $1 - \sum P_i^2$ 。

测定数据经Microsoft Excel 2010软件整理后, 用SPSS17.0软件进行统计分析。文中病情指数、土壤理化指标和土壤生物学指标均为3次重复平均值。

2 结 果

2.1 不同用量生物炭对辣椒疫病的防控效果

由图1可看出, 栽植后各处理发病率呈现不同的上升趋势。栽植0~15 d各处理发病率逐步上



注: T0、T1、T2、T3和T4分别代表土壤施用0%、0.33%、0.66%、1.33%和2%的秸秆生物炭, 下同 Note: T0、T1、T2、T3 and T4 stands for Treatment 0、1、2、3 and 4 (0%、0.33%、0.66%、1.33%、and 2% w/w in biochar application rate). The same below

图1 不同处理发病率动态

Fig. 1 Dynamics of disease incidence relative to treatment

升, T0发病率最高, 但与其余处理差异不显著。栽植15~25 d各处理发病率差异逐步增大, T1、T2和T4发病率上升幅度略低于T0, T3上升幅度最小。栽植30 d以后, T1发病率上升较快, 甚至较高于T0, 而T3和T4发病率不再上升。栽植45 d时, T3与T4以及T4与T0、T1和T2之间发病率存在显著差异, 其中T3发病率最低, T4次之, 但显著低于T0、T1和T2。T1、T2、T3和T4的防效分别为-9.8%、8.6%、56.7%和35.1%。可见, 施用1.33%的生物炭对辣椒疫病防控效果最好。

2.2 不同用量生物炭对土壤化学性状的影响

表2展示了辣椒栽植前和栽植32 d后不同生物炭施用量对土壤化学性状的影响。栽植前土壤pH、EC、有机质、有效磷和速效钾含量与生物炭用量呈明显的正相关关系。随着生物炭用量的增加, 土壤pH、EC、有机质、有效磷和速效钾含量逐渐上升, 速效钾和有效磷上升趋势最为显著, 其次是EC, 最后是有机质和pH。栽植32 d后, 土壤EC、有机质、有效磷和速效钾含量仍与用量保持明显的正相关性, 但与栽植前相比, 处理间差值有所下降。且pH没有与用量表现出正相关性。因此, 生物炭对土壤部分化学指标的增值效应随时间而减弱, 这与Quilliam等^[18]的研究结果一致。此外, 在整个试验期间, 不同用量生物炭处理对铵态氮和硝态氮含量没有显著影响, 这与刘园等^[19]的报道相符。综上, 添加生物炭能高效提高土壤速效钾和有效磷, 有效提高EC、有机质和pH。

2.3 不同用量生物炭对土壤酶活性的影响

FDA酶和蔗糖酶是表征土壤微生物活性的两种重要水解酶^[15, 20]。脲酶和 β -葡萄糖苷酶分别是表征土壤氮素和碳素循环速度的重要指标之一^[15]。测定添加生物炭对四种酶活性的影响, 结果表明前两种酶随着生物炭用量增加的变化趋势明显不同于后两种酶。随着生物炭用量的增加, FDA酶活性和蔗糖酶活性显示出先升高再下降的趋势。T2和T3中, FDA酶活性和蔗糖酶活性均最高, 且与其余处理有显著差异。而用量最高的T4处理酶活性与T0和T1处理差异较小。所有生物炭处理均显著降低脲酶和 β -葡萄糖苷酶的活性, 随着生物炭用量的增加, 脲酶活性由 $0.487 \text{ mg } 24\text{h}^{-1} \text{ g}^{-1}$ 逐步下降至 $0.442 \text{ mg } 24\text{h}^{-1} \text{ g}^{-1}$, β -葡萄糖苷酶活性由 $44.36 \mu\text{g h}^{-1} \text{ g}^{-1}$ 逐步下降至 $33.94 \mu\text{g h}^{-1} \text{ g}^{-1}$ 。可见, 一定范围用量的生物炭能提高土壤微生物活性, 过高过

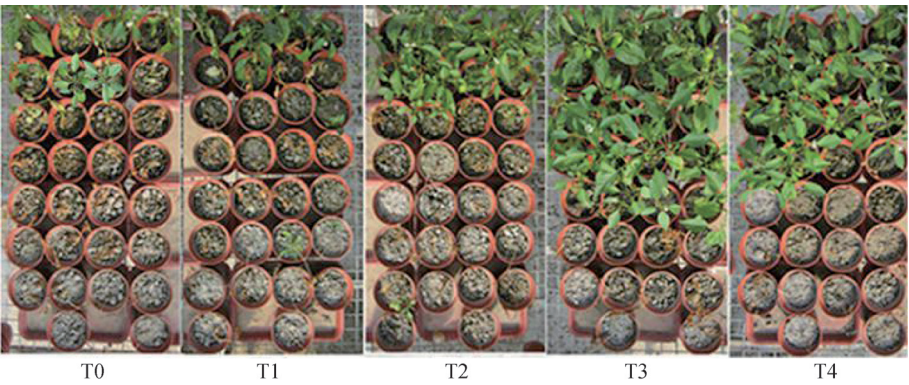


图2 栽植45 d后盆栽效果

Fig. 2 45 days after the peppers were transplanted into the pots

表2 不同处理土壤化学性状

Table 2 Soil chemical properties relative to treatment								
处理 Treatment		pH	EC ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	有机质OM (g kg^{-1})	铵态氮 Ammonium N (mg kg^{-1})	硝态氮 Nitrate N (mg kg^{-1})	有效磷 Available P (mg kg^{-1})	速效钾 Readilyavailable K (mg kg^{-1})
栽植前 Before transplantation	T0	$7.20 \pm 0.08\text{c}$	$706.5 \pm 12.7\text{c}$	$30.1 \pm 2.5\text{b}$	$16.2 \pm 3.5\text{a}$	$75.3 \pm 5.5\text{a}$	$165.3 \pm 3.4\text{d}$	$179.1 \pm 7.8\text{e}$
	T1	$7.30 \pm 0.07\text{bc}$	$746.3 \pm 16.9\text{b}$	$31.4 \pm 1.4\text{b}$	$15.4 \pm 2.0\text{a}$	$75.1 \pm 2.8\text{a}$	$170.9 \pm 10.3\text{d}$	$259.7 \pm 8.5\text{d}$
	T2	$7.32 \pm 0.06\text{bc}$	$762.7 \pm 24.2\text{b}$	$36.7 \pm 1.6\text{a}$	$17.2 \pm 3.6\text{a}$	$80.1 \pm 2.7\text{a}$	$209.9 \pm 9.7\text{c}$	$345.2 \pm 31.1\text{c}$
	T3	$7.37 \pm 0.06\text{ab}$	$822.5 \pm 15.7\text{a}$	$36.5 \pm 1.9\text{a}$	$16.9 \pm 3.7\text{a}$	$81.3 \pm 2.9\text{a}$	$229.1 \pm 15.3\text{b}$	$551.8 \pm 29.7\text{b}$
	T4	$7.44 \pm 0.05\text{a}$	$861.0 \pm 32.1\text{a}$	$38.9 \pm 1.9\text{a}$	$17.1 \pm 2.7\text{a}$	$78.5 \pm 3.6\text{a}$	$261.8 \pm 9.3\text{a}$	$778.6 \pm 35.7\text{a}$
栽植后32 d 32 days after transplantation	T0	$7.47 \pm 0.05\text{a}$	$431.3 \pm 21.2\text{c}$	$30.3 \pm 2.7\text{b}$	$18.6 \pm 3.2\text{a}$	$43.2 \pm 2.5\text{a}$	$156.3 \pm 5.3\text{c}$	$148.7 \pm 11.3\text{e}$
	T1	$7.49 \pm 0.05\text{a}$	$442.5 \pm 4.2\text{c}$	$31.6 \pm 0.3\text{b}$	$18.5 \pm 1.4\text{a}$	$43.6 \pm 1.3\text{a}$	$161.9 \pm 12.5\text{c}$	$199.2 \pm 14.1\text{d}$
	T2	$7.51 \pm 0.05\text{a}$	$486.0 \pm 16.9\text{b}$	$35.3 \pm 2.2\text{ab}$	$17.7 \pm 2.2\text{a}$	$41.8 \pm 1.3\text{a}$	$177.4 \pm 13.1\text{c}$	$238.5 \pm 5.7\text{c}$
	T3	$7.48 \pm 0.04\text{a}$	$534.7 \pm 18.2\text{a}$	$39.9 \pm 2.0\text{a}$	$19.4 \pm 2.2\text{a}$	$41.6 \pm 2.7\text{a}$	$204.5 \pm 15.8\text{b}$	$387.1 \pm 12.7\text{b}$
	T4	$7.53 \pm 0.05\text{a}$	$541.3 \pm 12.7\text{a}$	$40.6 \pm 1.9\text{a}$	$18.5 \pm 0.5\text{a}$	$44.4 \pm 2.2\text{a}$	$230.7 \pm 11.4\text{a}$	$593.3 \pm 31.1\text{a}$

注：同一列数字后字母不同表示有显著差异 ($p < 0.05$)，下同 Note: Different letters following the values within the same column mean significant difference ($p < 0.05$). The same below

表3 不同处理根际土壤酶活性

Table 3 Enzyme activities in rhizosphere soil relative to treatment				
处理 Treatment	FDA酶FDA Hydrolase ($\mu\text{g h}^{-1} \text{g}^{-1}$)	脲酶Urease ($\text{mg 24h}^{-1} \text{g}^{-1}$)	蔗糖酶Sucrase ($\text{mg 24h}^{-1} \text{g}^{-1}$)	β -葡萄糖苷酶 β -glucosidase ($\mu\text{g h}^{-1} \text{g}^{-1}$)
T0	$45.63 \pm 1.31\text{b}$	$0.487 \pm 0.009\text{a}$	$44.70 \pm 1.46\text{ab}$	$44.36 \pm 3.98\text{a}$
T1	$45.73 \pm 1.54\text{b}$	$0.459 \pm 0.014\text{b}$	$42.79 \pm 2.62\text{b}$	$38.54 \pm 1.06\text{b}$
T2	$47.60 \pm 4.34\text{ab}$	$0.456 \pm 0.015\text{b}$	$51.04 \pm 5.28\text{a}$	$38.01 \pm 2.12\text{b}$
T3	$53.23 \pm 2.61\text{a}$	$0.446 \pm 0.014\text{b}$	$50.54 \pm 2.66\text{a}$	$37.61 \pm 2.10\text{b}$
T4	$41.49 \pm 4.82\text{b}$	$0.442 \pm 0.011\text{b}$	$47.64 \pm 3.48\text{ab}$	$33.94 \pm 1.57\text{b}$

低的用量对微生物活性影响不显著；在本实验中，添加生物炭抑制土壤氮素和碳素转化相关的酶活性，且抑制作用随着生物炭用量的增加而增加。与之相似，Paz-Ferreiro等^[21]的研究表明高用量生物炭能显著降低土壤微生物活性、净氮矿化速率和β-葡萄糖苷酶活性等。

2.4 不同用量生物炭对土壤微生物数量的影响

图3A为栽植32 d不同处理根际细菌和真菌总数。随着生物炭用量的增加，细菌总数呈逐步上升趋势，T2和T3细菌总数高于T0和T1，而T4显著高于T0和T1。T2、T3和T4细菌总数分别为T0的1.72倍、2.45倍和2.93倍。真菌总数呈先下降后上升趋势。T1和T2与T0差异不显著，但T3和T4与T0相

比，显著地增加了根际真菌总数，分别为T0的2.49倍和3.09倍。据此，在本试验用量范围内，细菌和真菌总数与生物炭用量呈一定的正相关性。

图3B则显示辣椒疫霉数量随生物炭用量增加表现为先升高后下降的趋势，T1、T2、T3和T4辣椒疫霉数量分别为T0的0.98倍、1.70倍、2.33倍和0.69倍。在生物炭用量0~1.33%范围内，生物炭促进了辣椒疫霉数量的增加。与之相似，Gravel^[22]和Guijarro^[23]等研究结果表明施用生物炭虽能增加土壤中腐霉菌和立枯丝核菌两种病原真菌的数量，但有防控效果或未加重病害。但本试验也显示出在高用量下生物炭对辣椒疫霉数量可产生一定的削弱作用。

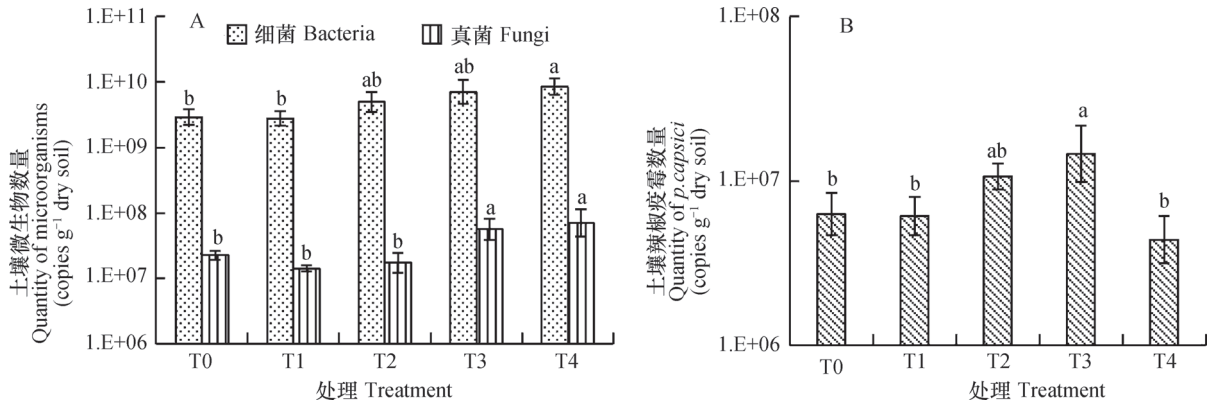


图3 不同处理根际土壤细菌、真菌 (A) 及辣椒疫霉 (B) 的数量

Fig. 3 Populations of bacteria, fungi (A) and *P. capsici* (B) in rhizosphere soil relative to treatment

芽孢杆菌、假单胞菌、链霉菌和木霉菌是已知的抗病性功能微生物^[11]。表5展示了不同用量生物炭处理下四种功能微生物数量的差异。随着生物炭用量的增加，四种功能微生物数量基本呈上升趋势，假单胞菌和链霉菌分别由 1.96×10^6 CFU g⁻¹和 7.40×10^5 CFU g⁻¹上升至 2.75×10^6 CFU g⁻¹和 9.28×10^5 CFU g⁻¹，但不同处理间均未达到显著差

异。芽孢杆菌由 5.25×10^6 CFU g⁻¹上升至 5.77×10^6 CFU g⁻¹，T4与其余处理达到显著差异。木霉菌由 3.00×10^2 CFU g⁻¹上升至 8.00×10^2 CFU g⁻¹，T2和T4与T0和T1达到显著差异。因此，生物炭能在一定程度上增加抗病性功能微生物的数量，且随着用量的增加，而逐步明显。这与前人^[8, 11, 26]的研究结果一致。

表4 不同处理根际功能菌数量

Table 4 Populations of functional microbial groups in rhizosphere soil relative to treatment

处理 Treatment	芽孢杆菌 <i>Bacillus</i> (10 ⁶ CFU g ⁻¹)	假单胞菌 <i>Pseudomonas</i> (10 ⁶ CFU g ⁻¹)	链霉菌 <i>Streptomyces</i> (10 ⁵ CFU g ⁻¹)	木霉菌 <i>Trichoderma</i> (10 ² CFU g ⁻¹)
T0	5.25 ± 0.21b	1.96 ± 0.56a	7.40 ± 1.34a	3.00 ± 0.97b
T1	5.31 ± 0.24b	2.03 ± 0.50a	7.88 ± 1.72a	3.67 ± 1.25b
T2	5.26 ± 0.13b	1.75 ± 0.56a	7.92 ± 1.63a	6.83 ± 1.87a
T3	5.40 ± 0.09b	2.78 ± 0.49a	8.31 ± 1.23a	5.50 ± 0.57ab
T4	5.77 ± 0.27a	2.75 ± 0.67a	9.28 ± 2.21a	8.00 ± 1.73a

2.5 不同用量生物炭对细菌和真菌群落结构的影响

细菌 DGGE 图谱及测序结果显示 (图 4 和表 4), 所有处理除条带 B12 外, 所有条带均为共有性条带, 包含以下 5 个类群: 变形菌门 (Proteobacteria)、厚壁菌门 (Firmicutes)、放线菌门 (Actinobacteria)、绿弯菌门 (Chloroflexi) 和拟杆菌门 (Bacteroidetes), 条带亮度显示细菌数量以变形菌门、厚壁菌门和放线菌门居多, 但 blast 结果显示细菌种类以变形菌门居多。T0、T1 和 T2 细菌群落较为一致, 但 T3 和 T4 细菌群落与 T0、T1 和 T2 有一定的差异性。T3 和 T4 处理假单胞菌 (*Pseudomonas*) 条带亮度显著加深, 代表了假单胞菌数量的显著上升, 假单胞菌是一种公认的抗病微生物。T4 处理有特异条带鞘氨醇单胞菌 (*Sphingomonas*), 且颜色较深, 鞘氨醇单胞菌能高效降解生物炭的重要成分芳香化合物, 且有文献报道过其促生效果^[25]。此外, T4 处理显著减少了黄杆菌 (*Flavobacterium*) 数量, 而黄杆菌可产生抑制病原菌物质^[26]。可见, 生物炭的添加

有利于形成健康的土壤微生物区系, 但用量过高则产生一定的负影响。聚类分析图显示, T0、T1 和 T2 较为相似, 而 T3 和 T4 与 T0、T1 和 T2 组成的族群差异较大。

真菌条带测序结果显示, 所有处理根际真菌均以子囊菌门 (Ascomycota) 为主。F1–13 为共有条带, 均为子囊菌门真菌。T0 和 T1 真菌 DGGE 图谱较为一致, 但 T2、T3 和 T4 真菌条带有较大的变化。T2 和 T4 处理能显著增加担子菌 (Basidiomycota) *Psilocybe sylvatica* 或 *Cerrena* sp. 的数量。与其余处理相比, T3 具有特异条带 F15–18, 且均为子囊菌门真菌。聚类分析结果表明, T0 和 T1 单独成一个族群, T2 在相似系数为 0.82 处与 T0 和 T1 聚成一族群。T3 和 T4 单独聚成一族群, 相似系数为 0.79。DGGE 图谱、聚类分析和测序结果表明了生物炭用量较低时对根际微生物群落结构影响较小, 但提高生物炭用量能显著改变根际微生物群落结构, 即 T3 和 T4 处理对根际微生物的影响作用最为显著。

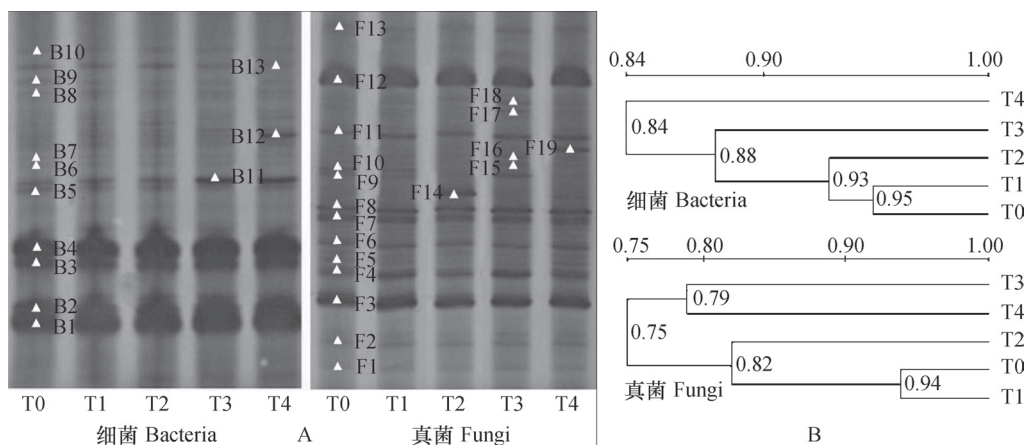


图4 不同处理根际真菌和细菌DGGE图谱 (A) 及聚类树状图 (B)

Fig. 4 DGGE profiles (A) and cluster analysis (B) of the bacterial and fungal communities in rhizosphere soil relative to treatment

2.6 不同用量生物炭对土壤微生物碳源利用能力的影响

平均颜色变化率 (AWCD) 表征微生物群落碳源利用率, 反映了土壤微生物活性和微生物群落生理功能多样性等^[17]。图5中各处理AWCD值整体趋势表现为 T3 > T2 > T0 ≥ T4 > T1。说明用量为 0.66% 和 1.33% 时促进了根际微生物群落对碳源的利用能力, 而用量过高 (2%) 和用量过低 (0.33%) 对根际微生物群落碳源利用能力均无显

著影响。

Shannon 多样性指数反映微生物群落物种的丰富度, Shannon 均匀度指数是微生物群落物种均一性的度量, Simpson 优势度指数反映微生物群落物种集中度。T2 和 T3 的多样性指数明显高于其余处理, 而均匀度指数则表现为 T3 和 T4 显著或较显著高于其余处理。优势度指数表明 T2、T3 和 T4 微生物群落物种集中度小于 T0 和 T1。因此 T3 处理根际功能多样性最高, 其次为 T2 和 T4。

表5 DGGE 图谱条带的序列比对结果

Table 5 Sequence of bands in DGGE profile

条带 Band	序列长 Sequence length (bp)	NCBI 数据库中最相似菌种 (登录号) Strains of bacteria the highest in identity in NCBI (Accession)	同源性 Homology (%)	门 Phylum
B1	184	Uncultured <i>Papillibacter</i> sp. KM108639	99	Firmicutes
B2	199	Uncultured <i>Nitrosomonas</i> sp. DQ857300	99	Proteobacteria
B3	191	Uncultured actinomycete clone JX242820	100	Actinobacteria
B4	199	Uncultured bacterium clone JN048172	98	—
B5	200	Uncultured <i>Tumebacillus</i> sp. HQ018500	99	Firmicutes
B6	195	Uncultured bacterium clone KT835507	99	—
B7	189	Uncultured Alphaproteobacteria clone CU922792	99	Proteobacteria
B8	198	Uncultured actinobacterium sp. JX240800	99	Actinobacteria
B9	174	Uncultured Chloroflexi clone JQ402149	98	Chloroflexi
B10	174	Uncultured <i>Rhizobiales</i> bacterium LN614987	100	Proteobacteria
B11	199	<i>Pseudomonas</i> sp. KR181836	100	Proteobacteria
B12	184	<i>Sphingomonas</i> sp. NR_133861	99	Proteobacteria
B13	194	<i>Flavobacterium</i> sp. LC024957	100	Bacteroidetes
F1	347	Uncultured <i>Lecythophora</i> isolate FJ748585	99	Ascomycota
F2	347	Uncultured soil ascomycete isolate AJ515948	99	Ascomycota
F3	347	Uncultured soil ascomycete isolate DQ837573	99	Ascomycota
F4	349	<i>Ascobolus crenulatus</i> AY544721	99	Ascomycota
F5	351	Uncultured <i>Ascobolus</i> clone KC922272	99	Ascomycota
F6	349	<i>Cladosporium cladosporioides</i> NG_016492	99	Ascomycota
F7	348	<i>Aspergillus oryzae</i> HM536621	99	Ascomycota
F8	347	<i>Aleuria aurantia</i> NG_013139	99	Ascomycota
F9	352	<i>Phaeomyces dubiosus</i> strain KF830077	98	Ascomycota
F10	349	Uncultured Basipetospora clone KC922230	99	Ascomycota
F11	346	Uncultured fungus clone KR906041	99	—
F12	347	Uncultured <i>Chaetothyriales</i> clone JQ071732	99	Ascomycota
F13	349	Uncultured <i>Ascobolus</i> clone KC922272	98	Ascomycota
F14	352	<i>Psilocybe sylvatica</i> DQ851583	99	Basidiomycota
F15	347	Uncultured <i>Chaetothyriales</i> clone JQ071732	99	Ascomycota
F16	351	Uncultured fungus isolate HM004632	99	—
F17	347	Uncultured <i>Pulchromyces</i> clone KC922295	99	Ascomycota
F18	350	Uncultured soil ascomycete isolate AJ515925	99	Ascomycota
F19	352	<i>Cerrena</i> sp. GQ899199	98	Basidiomycota

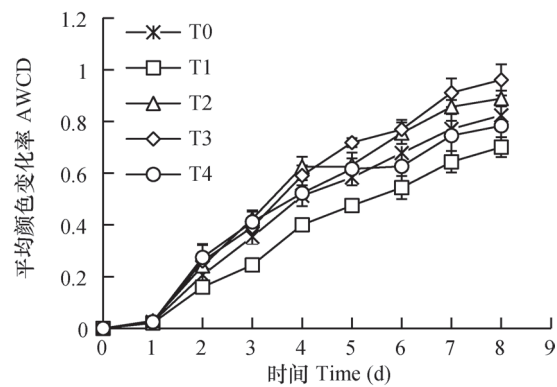


图5 不同处理根际土壤平均颜色变化率

Fig. 5 Temporal variation of average well color development (AWCD) of rhizosphere soil relative to treatment

2.7 生物炭用量、辣椒疫病发生率与土壤主要性状间的相关性

生物炭用量、辣椒疫病发生率和土壤性状三者间关系密切，见表7。土壤化学性状方面，生物炭用量与EC、有机质、有效磷、速效钾含量呈极显著正相关，发病率则与EC、有机质、有效磷、速效钾含量呈极显著负相关。土壤生物学性状方面，生物炭用量与细菌数量、真菌数量、芽孢杆菌数量、木霉数量等呈极显著正相关，与假单胞菌数量和微生物均匀度呈显著正相关。发病率则与真菌数量、假单胞菌数量、微生物均匀度呈极显著负相关，与细菌数量和AWCD值呈显著负相关。此外，

表6 不同处理根际土壤微生物功能多样性指数（96 h）

Table 6 Functional diversity indices of the microbial communities in rhizosphere soil relative to treatment					
指数Index	T0	T1	T2	T3	T4
<i>H</i>	2.953 ± 0.044b	2.945 ± 0.038b	3.053 ± 0.029a	3.072 ± 0.007a	2.946 ± 0.075b
<i>E</i>	0.900 ± 0.013b	0.901 ± 0.008b	0.913 ± 0.002b	0.936 ± 0.009a	0.919 ± 0.014ab
<i>D</i>	0.060 ± 0.004a	0.063 ± 0.002a	0.052 ± 0.001b	0.053 ± 0.002b	0.057 ± 0.006ab

表7 生物炭用量及发病率与土壤性状的相关性

Table 7 Relationships of biochar content and disease incidence with soil properties					
变量因子 Variable factor	生物炭用量 Biochar content	发病率 Disease incidence	变量因子 Variable factor	生物炭用量 Biochar content	发病率 Disease incidence
生物炭用量Biochar content	—	−0.708**	链霉菌 <i>Streptomyces</i>	0.409	−0.274
发病率Disease incidence	−0.758**	—	木霉菌 <i>Trichoderma</i>	0.721**	−0.471
pH	0.558*	−0.227	细菌Bacteria	0.747**	−0.601*
EC	0.921**	−0.802**	真菌Fungi	0.713**	−0.648**
有机质OM	0.961**	−0.851**	辣椒疫霉 <i>P. capsici</i>	0.054	−0.39
有效磷 Available P	0.939**	−0.713**	平均颜色变化率AWCD	0.198	−0.589*
速效钾Readily available K	0.984**	−0.711**	多样性指数 <i>H</i>	0.129	−0.348
芽孢杆菌 <i>Bacillus</i>	0.792**	−0.447	均匀度指数 <i>E</i>	0.633*	−0.792**
假单胞菌 <i>Pseudomonas</i>	0.584*	−0.647**			

注：*，**分别表示显著（ $p < 0.05$ ）和极显著（ $p < 0.01$ ）相关 Note: * and ** stands for significant correlation at the 5% and 1% levels, respectively

生物炭用量(0~2%)和发病率呈极显著负相关。可见,不同用量生物炭处理的发病率与其对土壤性状的影响关系紧密。

3 讨 论

本研究结果展示了生物炭用量与防效并非简单的线性关系,而是倒U型曲线关系,即随着生物炭用量的增加,防效先上升后下降,这与前人^[7-8]的研究结果一致。生物炭通过改善土壤理化和生物学性状进而防控辣椒疫病,因此这种倒U型效应应与不同用量生物炭对土壤性状的影响密切相关。

生物炭富含P、K、Mg、Ca等矿质元素,施入土壤后可明显改善土壤中的养分状况^[27]。与之相符,本试验中随着生物炭用量的增加,土壤有效磷和速效钾含量迅速增加。磷可以促进植株体内糖和蛋白质的正常代谢,刺激植物根系生长,增进根吸收,有效缓解根部病害^[28]。钾可通过参与植株的酚、碳、氮及活性氧代谢调控植株的抗病性能,进而提高植物的抗病能力^[28]。因此,土壤有效磷和速效钾含量的增加可能有利于提高植株抗病性。多项研究报道生物炭能显著提高土壤pH,本研究中土壤pH随用量逐步升高,这可能在一定程度上减缓辣椒疫病的发生。生物炭有机质含量极高,因此随着用量的增加土壤有机质含量呈上升趋势,有机质含量的增加可为微生物和作物生长提供更多的养分和能源^[29],进而促进了土壤抑病性和植株抗病性。

根际微生物碳源代谢能力、FDA酶活性和蔗糖酶活性数据显示,随着生物炭用量的增加,土壤微生物活性呈先上升后下降的趋势,高用量下微生物活性降低可能与生物炭含有的毒性物质密切相关^[7]。微生物活性与土壤抑病性呈正比^[20],因此适当增加用量能提高土壤抑病性,但高用量则会产生负作用。脲酶活性和 β -葡萄糖苷酶活性数据显示,生物炭对土壤碳氮循环具有一定的抑制作用,且随着用量的增加而逐步增大,因此高用量会产生其他的负面效应。这些可能与高用量生物炭防效降低息息相关。

根际细菌和真菌数量随生物炭用量而逐步增加,这有利于营造健康的微生物区系。四种抑病性

功能微生物数量,尤其是木霉菌和芽孢杆菌,也与生物炭用量呈正相关。由此,随着生物炭用量的增加,部分与抗病性相关的土壤生物学性状逐步改善。在病原菌数量方面,在一定用量范围内生物炭增加了辣椒疫霉数量,说明了生物炭并非通过降低病原菌数量产生防控效果,这与前人报道^[22-23]一致。也有多项研究表明应用有机物防控疫霉属病害时,虽然有防效,但疫霉数量却有所增加,因此病原菌数量并不是决定性因子。生物炭高用量下辣椒疫霉数量降低至低于对照,这可能是高用量下生物炭的毒性物质对病原菌产生较为显著的抑制作用,我们推测这可能是高用量生物炭具有一定防效的主要原因。

不少研究表明生物炭对土壤微生物群落结构也产生了巨大影响^[11, 30]。本研究显示低用量生物炭对土壤微生物区系影响较小,但较高及高用量生物炭能显著改变土壤微生物群落结构和优势微生物种群。微生物多样性分析则显示,微生物多样性和均匀度在一定范围随着用量的增加而增加,但随后反而降低。因此,高用量生物炭虽能显著影响土壤微生物区系,但对微生物多样性等产生了较大的负面效应,适当的用量既能改善土壤微生物区系又能提高微生物多样性,这可能是较高用量具有最佳防效的重要原因。

本研究相关性分析显示辣椒疫病发生率与土壤EC、有机质、有效磷、速效钾含量呈极显著负相关,因此生物炭对土壤化学性状的改善作用与其防控效果密切相关。假单胞菌、细菌、真菌数量、碳源利用能力、微生物均匀度等与发病率呈极显著或显著负相关,因此生物炭引起的土壤生物学性状变化也是其产生防效的重要原因。随着生物炭用量的增加,与发病率呈负相关的化学指标数据逐步增加,但生物学性状指标并非如此,部分性状存在倒U型效应,用量超过一定范围后对土壤生物学性状产生负面影响,即土壤酶活性、微生物活性、微生物多样性和微生物均匀度下降,不利于土壤的抑病性,这可能是用量与防效显示倒U型曲线关系的主要原因。在本试验中1.33%用量时各项土壤生物学指标已达到最佳值或接近最佳值,而2%用量部分生物学性状指标下降,产生负面影响进而减弱了防控效果。

4 结 论

生物炭使用量对防控土传病害有重要影响。一定生物炭用量范围内防效随用量增加而增加, 原因可能在于其对土壤多种化学和生物学性状的改善作用逐渐增大, 这种改善作用产生的防病效果甚至超过了辣椒疫霉菌数量增加对植株发病率的影响。但随后继续增大生物炭用量(2%), 虽然辣椒疫霉菌的数量显著减少, 但对病害的防效反而降低, 这可能与高用量生物炭对土壤碳氮循环、微生物活性和微生物多样性等多种性状产生的负面效应有关。

参 考 文 献

- [1] Joseph S D, Camps-Arbestain M, Lin Y, et al. An investigation into the reactions of biochar in soil. *Australian Journal of Soil Research*, 2010, 48 (7) : 501—515
- [2] Lehmann J, Rillig M C, Thies J, et al. Biochar effects on soil biota-A review. *Soil Biology & Biochemistry*, 2011, 43: 1812—1836
- [3] Lai W Y, Lai C M, Ke G R, et al. The effects of woodchip biochar application on crop yield, carbon sequestration and greenhouse gas emissions from soils planted with rice or leaf beet. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2013, 44 (6) : 1039—1044
- [4] 马艳, 王光飞. 生物炭防控植物土传病害研究进展. *中国土壤与肥料*, 2014 (6) : 14—20
Ma Y, Wang G F. Review of biochar utilization on soil-borne disease control (In Chinese). *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2014 (6) : 14—20
- [5] Gómez J D, Deneff K, Catherine E, et al. Biochar addition rate influences soil microbial abundance and activity in temperate soils. *European Journal of Soil Science*, 2014, 65: 28—39
- [6] Graber E R, Frenkel O, Jaiswal A K, et al. How may biochar influence severity of diseases caused by soilborne pathogens? *Carbon Management*, 2014, 5 (2) : 169—183
- [7] Jaiswal A K, Frenkel O, Elad Y, et al. Non-monotonic influence of biochar dose on bean seedling growth and susceptibility to *Rhizoctonia solani*: The “Shifted Rmax-Effect”. *Plant and Soil*, 2015, 395 (1) : 125—140
- [8] Elmer W H, Pignatello J J. Effect of biochar amendments on mycorrhizal associations and Fusarium crown and root rot of asparagus in replant soils. *Plant Disease*, 2011, 95 (8) : 960—966
- [9] 王光飞, 马艳, 郭德杰. 秸秆生物炭对辣椒疫病的防控效果及机理研究. *土壤*, 2015, 47 (6) : 1107—1114
Wang G F, Ma Y, Guo D J. Effect and mechanism of straw biochar on disease control of *Phytophthora blight* of chilli pepper (In Chinese). *Soils*, 2015, 47 (6) : 1107—1114
- [10] 张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验室分析方法. 北京: 科学出版社, 2012
Zhang G L, Gong Z T. *Soil survey laboratory methods* (In Chinese). Beijing: Science Press, 2012
- [11] Graber E R, Meller Harel Y, Kolton M, et al. Biochar impact on development and productivity of pepper and tomato grown in fertigated soilless media. *Plant and Soil*, 2010, 337: 481—496
- [12] Conn K L, Leci E, Kritzman G, et al. A quantitative method for determining soil populations of *Streptomyces* and differentiating potential potato scab-inducing strains. *Plant Disease*, 1998, 82 (6) : 631—638
- [13] Wang Q J, Ma Y, Wang G F, et al. Integration of biofumigation with antagonistic microorganism can control *Phytophthora blight* of pepper plants by regulating soil bacterial community structure. *European Journal of Soil Biology*, 2014, 61 (5) : 58—67
- [14] 刘海芳, 马军辉, 金辽, 等. 水稻土FDA水解酶活性的测定方法及应用. *土壤学报*, 2009, 46 (2) : 365—367
Liu H F, Ma J H, Jin L, et al. Determination of activity of FDA hydrolysis in paddy soils and its application in Taihu Lake region (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46 (2) : 365—367
- [15] 关松荫. 土壤酶及其研究法. 北京: 农业出版社, 1986
Guan S Y. *Soil enzymes and its research methods* (In Chinese). Beijing: Agriculture Press, 1986
- [16] Wang Q J, Ma Y, Yang H, et al. Effect of biofumigation and chemical fumigation on soil microbial community structure and control of pepper *Phytophthora blight*. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2014, 30: 507—518
- [17] 张红, 吕家珑, 曹莹菲, 等. 不同植物秸秆腐解特性与土壤微生物功能多样性研究. *土壤学报*, 2014, 51 (4) : 743—752
Zhang H, Lü J L, Cao Y F, et al. Decomposition characteristics of different plant straws and soil microbial functional diversity (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (4) : 743—752
- [18] Quilliam R S, Marsden K A, Gertler C, et al. Nutrient

- dynamics, microbial growth and weed emergence in biochar amended soil are influenced by time since application and reapplication rate. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2012, 158: 192—199
- [19] 刘园, Khan M J, 靳海洋, 等. 秸秆生物炭对潮土作物产量和土壤性状的影响. *土壤学报*, 2015, 52 (4) : 849—858
- Liu Y, Khan M J, Jin H Y, et al. Effects of successive application of crop-straw biochar on crop yield and soil properties in Cambosols (In Chinese) . *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (4) : 849—858
- [20] Bonanomi G, Antignani V, Capodilupo M, et al. Identifying the characteristics of organic soil amendments that suppress soilborne plant diseases. *Soil Biology & Biochemistry*, 2010, 42: 136—144
- [21] Paz-Ferreiro J, Gascó G, Gutiérrez B, et al. Soil biochemical activities and the geometric mean of enzyme activities after application of sewage sludge and sewage sludge biochar to soil. *Biology and Fertility of Soils*, 2012, 48: 511—517
- [22] Gravel V, Dorais M, M é nard C. Organic potted plants amended with biochar: Its effect on growth and *Pythium* colonization. *Canadian Journal of Plant Science*, 2013, 93: 1217—1227
- [23] Guijarro M B, Mattner S W, Wiechel T J, et al. Suppression of damping-off of radish caused by *Rhizoctonia solani* AG2.1 with soil carbon amendments// Stirling G R. 6th Australasian Soilborne Diseases Symposium. Queensland: Agri-Science Queensland, 2010: 49
- [24] Elad Y, Rav David D, Meller Harel Y, et al. Induction of systemic resistance in plants by biochar, a soil applied carbon sequestering agent. *Phytopathology*, 2010, 100: 913—921
- [25] Hryniewicz K, Baum C, Niedojadło J, et al. Promotion of mycorrhiza formation and growth of willows by the bacterial strain *Sphingomonas* sp. 23L on fly ash. *Biology and Fertility of Soils*, 2009, 45 (4) : 385—394
- [26] Sang M K, Kim K D. The volatile-producing *Flavobacterium johnsoniae* strain GSE09 shows biocontrol activity against *Phytophthora capsici* in pepper. *Journal of Applied Microbiology*, 2012, 113 (2) : 383—398
- [27] Atkinson C J, Fitzgerald J D, Hipps N A. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: A review. *Plant and Soil*, 2010, 337: 1—18
- [28] Dordas C. Role of nutrients in controlling plant diseases in sustainable agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 2008, 28 : 33—46
- [29] 田小明, 李俊华, 危常州, 等. 不同生物有机肥用量对土壤活性有机质和酶活性的影响. *中国土壤与肥料*, 2012 (1) : 26—32
- Tian X M, Li J H, Wei C Z, et al. Effect of different bio-organic fertilizer application rate on soil active organic matter and enzyme activities (In Chinese) . *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2012 (1) : 26—32
- [30] Kolton M, Meller Harel Y, Pasternak Z, et al. Impact of biochar application to soil on the root-associated bacterial community structure of fully developed greenhouse pepper plants. *Applied and Environmental Microbiology*, 2011, 77 (14) : 4924—4930

Application-Rate-Dependent Effects of Straw Biochar on Control of *Phytophthora* Blight of Chilli Pepper and Soil Properties

WANG Guangfei^{1, 2} MA Yan^{1, 2†} GUO Dejie^{1, 2} CAO Yun^{1, 2} LUO Dexu³ ZHAO Jianfeng³ SUN Yudong³

(1 *Institute of Agricultural Resources and Environments, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China*)

(2 *Scientific Observing and Experimental Station of Arable Land Conservation (Jiangsu) , Ministry of Agriculture, Nanjing 210014, China*)

(3 *Huaiyin Institute of Agricultural Science in Xuhuai Area of Jiangsu Province, Huai'an, Jiangsu 223001, China*)

Abstract 【Objective】 Biochar is a carbon-rich product of pyrolysis of biomass and can be used to ameliorate soil and promote crop growth. Recently, studies show that biochar has some good effects on control of soil-borne diseases. Researches in the past already demonstrated that straw biochar could effectively control *Phytophthora* blight of chilli pepper, through improving soil physic-chemical properties and microbiological properties, but little has been reported on how application rate affects the effect of biochar controlling the

disease of *Phytophthora capsici*. 【Method】 In this study, a pot experiment, designed to have 5 treatments concerning application rate, i.e. Treatment 0, 1, 2, 3 and 4 (0%, 0.33%, 0.66%, 1.33% and 2% w/w, respectively), was carried out to investigate effect of straw biochar controlling Phytophthora blight of chilli pepper, relative to application rate of biochar. The soils in the pots were analyzed separately for chemical properties (soil pH, electrical conductivity, organic matter, ammonium N, nitrate N, available P and readily available K) and soil micro-biological properties (soil enzyme activity, microbial population, microbial community structure and soil microbial carbon utilization features). Soil microbial population was determined with the dilution plating method and real time PCR; soil microbial community structure with PCR-DGGE and soil microbial carbon utilization features with the Biolog system. Correlation analysis was done of biochar application rate, soil properties and disease control effect. 【Result】 The disease controlling efficiency in Treatment 1, 2, 3 and 4 was -9.8%, 8.6%, 56.7% and 35.1%, respectively, forming an inverted U-shape curve. So the application rate of 1.33% (Treatment 3) was the optimal for disease control. With increasing biochar application rate, soil pH and organic matter content increased gradually, electrical conductivity, available P content and readily available K content did significantly, but ammonium and nitrate nitrogen contents did only slightly. Urease and β -glucosidase activities gradually decreased, FDA Hydrolase and sucrase activities increased first and then decreased, total bacteria, total fungi and four groups of functional microorganisms gradually increased in population, and *P. capsici* first increased and then decreased in population with increasing application rate of straw biochar. Microbial metabolic ability, microbial diversity and microbial community evenness all displayed an inverted U-shape curve in response to the varying application rate of straw biochar, with peaks appearing all in Treatment 3 (1.33%). DGGE profiles show that biochar at low application rates (0.33% and 0.66%) had little effect on microbial community structure, but when at high application rates (1.33% and 2%) it did significantly alter microbial community structure, significantly increasing the abundance of *Pseudomonas*, *Sphingomonas*, Ascomycota and Basidiomycota. 【Conclusion】 This study demonstrates prominently the importance of application rate of straw biochar in disease control. The control efficiency increases as application rate of straw biochar increases within a certain range, which may be attributed to the function of biochar to improve soil chemical and biological properties. But when the application rate goes beyond the range, straw biochar could weaken in control efficiency, which may be explained by the fact that too much biochar has some negative influences on soil carbon and nitrogen recycling, microbial activity and diversity. In addition, the effect of biochar controlling Phytophthora blight of chilli pepper is not much related to the population of *P. capsici* in the soil.

Key words Straw biochar; Phytophthora blight of chilli pepper; Soil properties

(责任编辑: 卢 萍)