

胶冻样芽孢杆菌与生物质炭复配及对番茄产量和品质的影响^①

王潇敏, 李恋卿*, 潘根兴, 张旭辉, 郑金伟, 郑聚峰,
刘晓雨, 程 琨, 王家芳, 俞欣妍

(南京农业大学农业资源与生态环境研究所, 南京 210095)

摘 要: 以提高胶冻样芽孢杆菌在土壤中的存活率、减缓其衰亡速率, 延长存活时间, 提高其对土壤难溶性钾的解钾效率为目的, 利用不同种类的秸秆生物质炭与胶冻样芽孢杆菌进行复配筛选。通过室内培养试验发现, 中性小麦秸秆炭可作为胶冻样芽孢杆菌较理想的载体。当土壤培养 35 天后, 土壤速效钾含量在施用炭基解钾菌肥条件下较空白提高了 28.53%, 较小麦秸秆炭和纯菌液处理分别提高了 20.75%、13.41%。纯菌液处理土壤中胶冻样芽孢杆菌的菌落数从 1.1×10^9 个/g 土降为 9.0×10^5 个/g 土, 而炭基解钾菌肥处理则为 1.4×10^7 个/g 土。田间施用炭基解钾菌肥能够提高番茄植株和果实中的全钾含量; 提高番茄产量和品质, 显著提高番茄 Vc 含量, 降低硝酸盐含量。因此, 中性小麦秸秆炭与胶冻样芽孢杆菌的复配能够提高菌剂的存活率, 有效促进土壤中矿物态钾的释放。

关键词: 生物质炭; 胶冻样芽孢杆菌; 解钾; 土壤; 番茄

中图分类号: S144.1

据资料显示, 中国的钾肥生产量只占世界的 0.34%, 而消耗量却到 14.7%, 每年虽然进口 200 多万 t 钾肥, 仍然不能满足农业生产对钾肥的需要^[1]。利用化学钾肥补钾是我国农业中普遍使用并且见效较快的土壤速效钾补充方法, 但是, 大量使用化学钾肥也造成了土壤结构破坏、土壤污染、有机质含量降低^[2]等问题。我国土壤耕层含钾量平均为 25 500 kg/hm²^[3], 但其中 95% 的钾为矿物态钾, 主要存在于钾长石和云母中, 可供作物直接吸收利用的速效性钾不超过全钾量的 2%^[4-5]。因此, 研究如何将土壤中的矿物态钾释放出来, 转化为速效性钾, 对农业生产具有重要的理论和实践意义。

胶冻样芽孢杆菌(*Bacillus mucilaginosus*)对土壤中云母和长石等含钾的硅酸盐矿石具有较强的分解能力^[6], 应用于农业生产不仅可以起到解钾溶磷的作用, 还易形成根系优势种^[7-8], 常被用作果蔬和农作物种植的微生物菌肥^[3]。而作为微生物肥料, 其菌剂在根际土壤的定殖以及在作物生长期保持较高的成活率, 是影响人工接种菌剂能否有效提高作物产量和提升作物品质的重要因素。为了提高微生物在土壤中的存活率, 通常采用泥炭^[9]、蛭石^[10]、菌

糠^[11]、草炭^[10,12]以及草炭与褐煤的混合物^[13]等来作为接种载体。

近几年来, 生物质炭已成为农林、环境和能源等研究领域关注的焦点^[14-16]。生物质炭是农作物秸秆等生物质在限氧条件下经低温(300 ~ 550℃)热解炭化产生的一类高度芳香化难熔性固态物^[17]。其高度芳香化结构具有较好的生物化学及热稳定性, 能够在土壤中长期存在而不易被矿化^[18]。Hale 等人^[19]的研究表明, 与传统的如泥炭和蛭石等接种载体相比, 生物质炭具有疏松多孔的结构和巨大的表面积^[20], 可以作为土壤微生物的栖息地, 同时, 生物质炭具有较强的保蓄养分和水分的能力^[21-22], 可为微生物生长提供可利用的养料。然而, 不同原料制备的生物质炭特性存在差异^[23], 而且生物质炭本身较高的 pH 可能对微生物的存活产生不利的影响。因此, 本研究通过调节生物质炭特性, 筛选适宜的生物质炭载体与胶冻样芽孢杆菌进行复配, 以进一步提高胶冻样芽孢杆菌在土壤中的解钾效率。

1 材料与方法

供试菌种: 胶冻样芽孢杆菌(*Bacillus mucilaginosus*),

^①基金项目: 科技部农业科技成果转化资金项目(2013GB23600666)资助。

* 通讯作者(lqli@njau.edu.cn)

作者简介: 王潇敏(1989—), 女, 山东威海人, 硕士研究生, 主要从事土壤肥力与保育方面的研究。E-mail: xiaomin829@126.com

来自南京师范大学杨后银老师实验室筛选保存,由杨后银老师馈赠。其基本特性为:菌体为粗长杆状,有厚荚膜,芽孢为粗大椭圆形,复红着色深^[24],在无氮培养基上菌落呈无色透明圆形隆起状,表面光滑,边缘整齐,湿润有光泽,胶质黏稠有弹性。

发酵培养基(g/L):蔗糖 10.0, K₂HPO₄ 0.2, CaSO₄·2H₂O 0.1, MgSO₄·7H₂O 0.2, NaCl 0.2, CaCO₃ 5.0, 酵母膏 0.5, pH 6.7~7.2。

1.1 炭基解钾菌肥的筛选及其土壤解钾效果

1.1.1 试验材料 供试的稻壳炭(RB)、花生壳炭(PB)、玉米秸秆炭(CB)和小麦秸秆炭(WB)均购自河南商丘三利新能源有限公司,基本理化性质见表 1;72 h 培养后的胶冻样芽孢杆菌(*Bacillus mucilaginosus*)菌液。供试土壤为水稻土,有机质 10.62 g/kg,全氮 1.86 g/kg,速效磷 15.85 mg/kg,速效钾 180.5 mg/kg, pH 7.56。

表 1 生物质炭基本性质
Table 1 Basic properties of biochars

生物质炭	pH (H ₂ O)	有机碳 (g/kg)	全氮 (g/kg)	速效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)
RB	9.79	332.45	8.90	109.68	1350
PB	9.86	340.98	10.35	222.63	667
CB	10.31	402.36	9.61	139.93	1940
WB	9.64	392.45	10.76	162.26	2065

1.1.2 试验设计 1)接种载体的筛选:将 4 种生物质炭用 0.1 mol/L 的 HCl 浸泡过夜,再用去离子水反复冲洗至中性,抽滤,烘干,分别制成中性的稻壳炭(NRB)、花生壳炭(NPB)、玉米秸秆炭(NCB)和小麦秸秆炭(NWB)。将制备好的生物质炭用去离子水湿润,搅拌,使含水量达到“手握成团,触之即散”的程度;称取 10 g 生物质炭装入 250 ml 三角瓶,121℃ 高温高压湿热灭菌 30 min,冷却后接入 1 ml 菌液,含菌量约为 2.1×10¹⁰ 个/ml,每个处理 3 次重复;30℃ 恒温恒湿培养,每 7 天采一次样,记录菌落数。

2)炭基解钾菌肥的土壤解钾效果:将菌液按 1 ml:10 g 的液料比接入高压湿热灭菌的中性小麦秸秆炭中,设置 4 个处理,分别为:M,100 g 土壤接入胶冻样芽孢杆菌菌液 0.1 ml,含菌量约为 1.1×10¹² 个/ml;BC+M,100 g 土壤中加入中性小麦秸秆炭 1.0 g(含胶冻样芽孢杆菌菌液 0.1 ml,含菌量约为 1.0×10¹² 个/ml);BC,100 g 土壤中加入中性小麦秸秆炭 1.0 g;CK,以原土壤作对照。每个处理 3 次重复;30℃ 恒温恒湿培养,每 7 天采一次样,记录菌落数。

1.1.3 测定项目 土壤速效钾测定采用乙酸铵提取-火焰光度计法^[25];土壤中胶冻样芽孢杆菌数量测定采用梯度稀释、平板涂布法^[26]。

1.2 炭基解钾菌肥在番茄大田试验中的应用

1.2.1 试验设计 田间试验于 2014 年 4 月—8 月在江苏省南京市江宁区上坊镇高桥村进行。试验共设 5 个处理,分别为:BC+M,炭基解钾菌肥(解钾菌发酵培养 72 h 后(6.6×10¹¹ 个/ml)按 1 ml:10 g 接入已 121℃ 高压湿热灭菌的中性小麦秸秆炭,30℃ 培养 7 天,小区含菌量约 3.96×10¹³ 个/6m²) 1 t/hm²,磷酸二

铵 210 kg/hm²,尿素 68 kg/hm²;BC,中性小麦秸秆炭 1 t/hm²,磷酸二铵 210 kg/hm²,尿素 68 kg/hm²;M,将发酵培养 72 h 的胶冻样芽孢杆菌菌液(5.9×10¹¹ 个/ml)稀释 100 倍,移苗时蘸根与灌根共 10 ml(小区含菌量约 2.36×10¹³ 个/6m²),磷酸二铵 210 kg/hm²,尿素 68 kg/hm²;CF,常规施肥,复合肥(15-15-15) 750 kg/hm²;CK,空白对照,番茄全生育期不施任何肥料。试验采用完全随机区组设计,每个处理设 3 次重复,共 15 个小区,小区面积 6 m² (3 m×2 m),每小区定植番茄 20 株。复合肥为安徽拜尔福生物科技有限公司生产的 BB 肥,总养分为 45%,N:P₂O₅:K₂O=15:15:15。供试番茄品种为沪合作 903F1,番茄于 2014 年 4 月 20 日移栽定植,8 月 6 日收获,测定番茄产量,采集各处理的土壤和植物样品,进行室内分析。供试土壤质地为黏质壤土,pH 6.78,有机质 15.66 g/kg,全氮 1.36 g/kg,速效磷 99.83 mg/kg,速效钾 41.35 mg/kg,全钾 18.27 g/kg。

生物质炭于移栽前穴施,其他肥料均在定植 15 天后一次性穴施,整个试验期内都不再进行追肥。各小区防病治虫除草浇灌等田间管理措施均一致,按照当地农民番茄栽培习惯进行。

1.2.2 测定方法 土壤全氮采用德国 Elementor vireo max CNS analyzer 仪测定^[25];pH 采用电位法测定,水:土=2.5:1^[25];有机碳含量采用重铬酸钾容量法-外加热法测定^[25];速效磷采用盐酸-氟化铵法测定^[25];速效钾采用乙酸铵提取-火焰光度计法测定^[25]。

Vc 采用 2,6-二氯酚靛酚滴定法测定^[27];可溶性糖采用蒽酮比色法测定^[27];可溶性蛋白质采用考马斯亮蓝 G-250 染色法测定^[27];有机酸采用水浴提取-

碱液滴定法测定^[27]，硝酸盐采用水杨酸硝化比色法测定^[27]。

1.3 数据处理

采用 Excel 2007 软件对试验数据进行统计处理，采用 SPSS 18.0 软件进行单因素方差分析和多重比较(LSD 检验)，处理之间的显著性分析均为 $P<0.05$ 水平。

2 结果与分析

2.1 不同生物质炭载体的接种效果

表 2 显示了胶冻样芽孢杆菌在不同生物质炭载

体中的存活数量。从表 2 中可以看出，在培养的前 21 天内，所有处理的胶冻样芽孢杆菌存活数量都出现了数量级减小的现象；未经中性处理的生物质炭中胶冻样芽孢杆菌数量比中性生物质炭的菌落数量降低得更快。未经中性处理的生物质炭的菌落数在第 21 天基本达到稳定，数量平均维持在 $(3.0 \sim 5.6) \times 10^2$ 个/g 炭的水平；中性生物质炭的菌落数则是在第 28 天基本达到稳定，数量约维持在 $(6.9 \sim 79) \times 10^5$ 个/g 炭的水平。在 35 天的培养周期中，中性小麦秸秆炭中的胶冻样芽孢杆菌数量级下降最缓慢，存活数量显著高于其他 3 种中性生物质炭。

表 2 不同来源的生物质炭中胶冻样芽孢杆菌的存活数量(个/g 炭)
Table 2 Survival quantities of *Bacillus mucilaginosus* in different sources of biochars

处理	pH (H ₂ O)	培养时间(d)					
		0	7	14	21	28	35
NRB	7.06	2.1×10^{10}	5.6×10^8	1.2×10^5	3.1×10^6	2.7×10^6	1.2×10^5
NPB	7.04	2.1×10^{10}	1.7×10^8	8.9×10^6	3.3×10^6	6.9×10^5	7.1×10^5
NCB	7.08	2.1×10^{10}	4.3×10^7	4.2×10^6	2.3×10^6	8.2×10^5	5.5×10^5
NWB	7.03	2.1×10^{10}	5.2×10^8	8.8×10^6	1.0×10^7	7.9×10^6	6.4×10^6
RB	9.79	2.1×10^{10}	8.3×10^4	1.0×10^3	4.1×10^2	3.5×10^2	1.7×10^2
PB	9.86	2.1×10^{10}	4.0×10^5	2.8×10^3	5.6×10^2	6.0×10^2	3.5×10^2
CB	10.31	2.1×10^{10}	3.9×10^4	6.7×10^2	3.9×10^2	2.6×10^2	1.5×10^2
WB	9.65	2.1×10^{10}	7.1×10^5	5.0×10^3	3.0×10^2	1.9×10^2	2.0×10^2

2.2 炭基解钾菌肥的土壤解钾作用

表 3 表示不同处理土壤中胶冻样芽孢杆菌数量的变化。从表 3 中可以看出，M 和 BC+M 处理土壤后，随着培养时间的延长，菌落数量急剧下降，M 处理在培养的前 7 天，菌落数从 1.1×10^9 个/g 土降为

8.3×10^6 个/g 土，在培养 35 天后降为 9.0×10^5 个/g 土；而 BC+M 处理在培养的前 7 天，菌落数从 1.0×10^9 个/g 土降为 1.6×10^8 个/g 土的水平，当培养到 35 天时，菌落数仍保持在 1.4×10^7 个/g 土；而 CK 和 BC 处理的土壤中菌落数在整个培养期间无显著变化。

表 3 不同处理土壤中胶冻样芽孢杆菌的存活数量(个/g 土)
Table 3 Quantities of *Bacillus mucilaginosus* in soils under different treatments

处理	培养时间(d)					
	0	7	14	21	28	35
CK	1.4×10^2	2.1×10^2	1.0×10^2	2.4×10^2	1.9×10^2	2.0×10^2
M	1.1×10^9	8.3×10^6	2.4×10^7	5.9×10^6	4.3×10^6	9.0×10^5
BC	1.6×10^2	1.0×10^2	1.5×10^2	3.1×10^2	1.1×10^2	2.5×10^2
BC+M	1.0×10^9	1.6×10^8	6.7×10^7	7.3×10^6	6.9×10^6	1.4×10^7

表 4 为不同处理土壤速效钾含量的变化。由表 4 可知，随着培养时间的延长，M 和 BC+M 处理土壤速效钾的含量逐渐提高，并在培养的第 21 和 28 天达到最大，分别为 207.89 mg/kg 和 280.64 mg/kg，虽然生物质炭本身含有一定量的速效钾，但与各自培养的初始值相比，BC+M 处理的速效钾含量提高 23.08%，而 M 处理仅提高 13.52%，除去生物质炭本身所含的速效钾，BC+M 处理的土壤速效钾含量比 M 处理提

高 13.41%。从时间变化来看，土壤速效钾含量的增幅在 7 ~ 14 天时达到最大，M 和 BC+M 处理土壤速效钾含量增幅分别为 5.65% 和 12.32%。在整个培养期内，CK 和 BC 处理的土壤速效钾含量随培养时间的增长无显著变化。

2.3 炭基解钾菌肥对番茄钾素吸收的影响

从表 5 可知，除 CF 处理外，其他各处理在番茄收获后土壤速效钾含量无显著差异，CF 处理的土壤

表 4 不同处理土壤速效钾的含量变化(mg/kg)
Table 4 Contents of soil available K under different treatments

处理	培养时间(d)					
	0	7	14	21	28	35
CK	180.58 ± 2.15 a	181.32 ± 5.36 b	180.84 ± 8.02 c	178.08 ± 3.29 d	176.43 ± 4.21 d	179.57 ± 4.62 d
M	183.13 ± 4.76 a	190.01 ± 9.37a	200.74 ± 7.95 c	207.89 ± 6.35 bc	206.12 ± 3.78 c	207.31 ± 7.12 c
BC	229.32 ± 5.20 a	228.84 ± 8.54b	231.87 ± 5.18 b	229.07 ± 2.71 b	230.80 ± 9.31 b	232.42 ± 4.89 b
BC+M	228.01 ± 4.32 a	240.38 ± 2.02a	269.90 ± 8.56 a	278.13 ± 4.70 a	280.64 ± 5.52 a	279.10 ± 3.73 a

注：表中为平均值±标准差，同列不同小写字母表示处理间差异显著(P>0.05)；下同。

表 5 不同处理的土壤速效钾、番茄植株和果实全钾含量的差异
Table 5 Differences in soil available K after harvest and in contents of total K in plants and fruits under different treatments

处理	施入的钾 (K, kg/hm ²)	收获后土壤速效钾 (K, mg/kg)	番茄植株全钾 (g/kg)	番茄果实全钾 (g/kg)
CK	0	37.61 ± 6.08 b	51.9 ± 3.4 c	151.4 ± 7.5 c
CF	93.39	71.51 ± 2.52 a	67.7 ± 3.0 a	200.9 ± 5.4 a
M	0	40.26 ± 6.22 b	54.6 ± 3.3 c	161.0 ± 2.9 b
BC	8.78	39.59 ± 5.25 b	60.3 ± 4.3 b	176.7 ± 2.1 b
BC+M	8.78	40.37 ± 7.81 b	65.9 ± 4.6 a	199.5 ± 7.9 a

速效钾含量较 BC+M 处理高出了 31.14%，这是由于 CF 处理有大量外源钾(化肥钾)的缘故，但 BC+M 处理番茄植株全钾和果实全钾含量均与 CF 处理无显著差异。与 BC 处理相比，BC+M 处理的番茄植株和果实全钾量分别显著提高了 9.29% 和 12.90%；在同等加菌量的情况下，BC+M 处理的茄植株和果实的全钾量较 M 处理分别提高 20.70% 和 23.91%。

2.4 炭基解钾菌肥对番茄品质和产量的影响

表 6 显示了不同处理对番茄果实品质指标和产量

的影响。BC+M 与 BC 和 M 处理相比，Vc 含量显著提高了 26.72% 和 23.10%。CF 处理番茄的可溶性蛋白含量显著高于其他处理，BC+M 处理较 M 处理提高了 21.40%，而 BC+M 与 BC 处理间无显著差异。番茄的硝酸盐含量以 BC+M 处理最低，为 72.49 mg/kg，较 CK、CF、M 和 BC 等 4 个处理分别降低了 28.84%、5.48%、25.14% 和 19.63%。各处理间有机酸含量无显著差异。番茄的可溶性糖含量以及产量，均以 CF 和 BC+M 处理最高，M 与 BC 处理间没有显著的差异。

表 6 不同处理对番茄产量和品质的影响
Table 6 Effects of different treatments on qualities and yields of tomatoes

处理	番茄产量 (t/hm ²)	Vc (mg/kg)	可溶性蛋白 (mg/kg)	硝酸盐 (mg/kg)	有机酸 (柠檬酸, g/kg)	可溶性糖 (g/kg)
CK	38.60 ± 4.79 b	73.95 ± 10.78 b	2.45 ± 0.08 c	101.75 ± 9.06 a	5.6 ± 0.5 a	23.8 ± 3.9 c
CF	57.75 ± 5.38 a	123.12 ± 8.64 a	4.11 ± 0.43 a	76.69 ± 4.16 c	6.5 ± 0.5 a	32.6 ± 3.5 a
M	48.06 ± 4.26 ab	87.52 ± 9.36 b	2.57 ± 0.32 c	96.83 ± 7.90 a	5.8 ± 0.7 a	25.4 ± 1.3 bc
BC	49.01 ± 3.50 ab	85.02 ± 6.13 b	2.75 ± 0.04 bc	90.19 ± 9.63 b	6.0 ± 0.3 a	26.9 ± 4.2 abc
BC+M	51.19 ± 3.17 a	107.74 ± 7.09 a	3.12 ± 0.23 b	72.49 ± 8.61 c	6.3 ± 0.6 a	31.0 ± 1.6 ab

3 讨论

本研究结果表明，生物质炭需经中性处理才能有利于胶冻样芽孢杆菌的生长。生物质炭一般具有较高的 pH^[28]，而适宜微生物生存的环境一般为中性或弱碱性，本研究所用的胶冻样芽孢杆菌培养基的 pH 范围为 6.7 ~ 7.2^[29]。因此，对碱性生物质炭进行中性处理后，接种的菌剂能够长时间地存活。在 4 种原料烧制的生物质炭中，以中性小麦秸秆炭为载体的胶冻样芽孢杆菌的存活数量最多，这可能是由于不同原料的

生物质炭的理化性质、孔隙结构等方面的差异对微生物存活数量产生影响。刘莹莹^[23]研究表明，生物质炭的比表面积为小麦秸秆炭>花生壳炭>玉米秸秆炭，张伟明^[30]研究证明花生壳炭比表面积>稻秆炭>玉米秸秆炭。此外，养分也是影响微生物繁殖的重要因素。许燕萍等^[31]发现，在 400℃ 制炭温度下，小麦秸秆炭的钙、钠、硫等微量元素含量均高于玉米秸秆炭。本研究所使用的 4 种生物质炭中小麦秸秆炭的有机碳和全氮含量均高于其他 3 种，速效钾含量也相对较高，这可能也是小麦秸秆炭能有效提高胶冻样芽孢

杆菌数量和存活时间的重要因素。

许多研究表明,施用生物质炭可显著提高土壤微生物的数量和活性^[32-34]。O'Neill 等^[35]在对亚马逊富碳土壤的微生物种群研究中发现,施用生物质炭可以显著提高土壤微生物数量和细菌群落结构的多样性,这可能与生物质炭的组成和表面结构特性有关。生物质炭含有一定量易分解的有机物质,可为微生物的生长提供碳源和氮源^[36]。此外,生物质炭具有从纳米到数十微米的丰富的孔隙^[37],这种孔隙结构能够为微生物提供附着位点和较大的生存空间^[38]。同时,生物质炭表面的官能团能够吸附土壤中的养分,而大量的孔隙还可保蓄水分^[39],这为微生物的栖息生活提供了良好的微环境。此外,生物质炭的高芳香烃结构^[40]决定了其较高的化学和生物学稳定性,能够抵抗微生物的分解作用,可在土壤中长时间稳定存在^[41]。本研究表明,以中性生物质炭为载体的胶冻样芽孢杆菌加入土壤,芽孢杆菌在土壤中的存活数量下降缓慢,土壤中速效钾的含量显著提高,显示以中性生物质炭为载体的解钾菌肥的解钾效率较高。

大田试验结果表明,虽然番茄收获后土壤速效钾含量没有显著变化,但与单施菌肥相比,炭基解钾菌肥显著提高了番茄植株和果实的全钾含量,而单施菌肥处理与对照相比,仅仅提高了番茄果实的全钾含量。金会翠等^[42]和吴国喜^[43]研究显示番茄叶片和果实中的钾素随着基质中钾的增加而增加,这进一步显示了炭基解钾菌肥的施用提高了土壤中速效钾的含量,从而提高了番茄植株和果实钾的吸收量。已有的研究表明,钾素能显著地提高果实品质,是公认的“品质元素”^[44]。张炎等^[45]试验结果表明,在一定的范围内,番茄果实中 Vc 含量随施钾量的增加而增加^[43,46],适当增施钾肥能使果实中的硝酸盐含量显著降低^[43,45]。本研究中炭基解钾菌肥处理的番茄产量、Vc 含量和硝酸盐含量均与化肥的相当,且与其他处理差异显著,可能是由于生物质炭提高了胶冻样芽孢杆菌的存活数量,促进了其对土壤矿物的解钾效果。当然,生物质炭本身对蔬菜的品质也具有一定的改善效应^[47-48]。

4 结论

本研究结果表明,中性小麦秸秆炭较稻壳炭、花生壳炭和玉米秸秆炭更有利于胶冻样芽孢杆菌的存活,适合作为接种载体;土壤中加入生物质炭能使胶冻样芽孢杆菌的存活数量得到提高,并且能够持续分解土壤矿物态钾;施用炭基解钾菌肥可显著提高番茄产量和番茄植株与果实全钾含量,明显改善番茄果实品质。

参考文献：

- [1] 王改兰,段建南. 土壤矿物钾活化途径[J]. 土壤通报, 2004, 35(6): 802-805
- [2] 马光庭. 生态有机肥与农业可持续发展[J]. 中国生态农业学报, 2004, 12(3): 191-193
- [3] 季鹏章. 生物钾肥及其在农业上的应用[J]. 热带农业科技, 1999, 22(1): 45-46
- [4] 周俊,朱江,储国正,等. 钾资源的地球化学背景及其开发利用[J]. 矿产综合利用, 1999(4): 36-40
- [5] 史静静,刘静洋,韩国民,等. 棉花根际解钾细菌的生理活性和促生效果[J]. 中国土壤与肥料, 2012(4): 87-90
- [6] 占新华,徐阳春,蒋廷惠. 硅酸盐细菌的生物效应和根际效应[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(4): 412-415
- [7] 赵艳,张晓波,郭伟. 不同土壤胶质芽孢杆菌生理生化特征及其解钾活性[J]. 生态环境学报, 2009, 18(6): 2 283-2 286
- [8] Basak B B, Biswas D R. Co-inoculation of potassium solubilizing and nitrogen fixing bacteria on solubilization of waste mica and their effect on growth promotion and nutrient acquisition by a forage crop[J]. Biology Fertility of Soils, 2010, 46(6): 641-648
- [9] 韩华雯. 几种新型植物根际促生菌肥载体筛选及研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2013
- [10] 刘庆莉,王金生,刘丽君,等. 大豆根瘤菌剂载体的选择及最佳施用浓度筛选[J]. 大豆科学, 2014, 33(2): 207-210
- [11] 刘雯雯,姚拓,孙丽娜,等. 菌糠作为微生物肥料载体的研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(2): 787-791
- [12] 隋文志,卢林纲,钟鄂蓉,等. 玉米联合固氮耐铵工程菌 *Enterobacter gergoviae*-7(E7)在不同载体及玉米根际的存活规律[J]. 应用与环境生物学报, 2002, 8(2): 200-203
- [13] 郭春景. 微生物肥料及其微生态效应研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2004
- [14] Lehmann J, Silva J P, Steiner C, et al. Nutrient availability and leaching in an archaeological anthrosol and a ferralsol of central amazonia: Fertilizer and charcoal amendments[J]. Plant and Soil, 2003, 249: 343-357
- [15] Lehmann J, Joseph S. Biochar for environmental management: Science and technology[M]. London, UK: Earthscan, 2009
- [16] Whitman T, Lehmann J. Biochar-one way forward for soil carbon in offset mechanisms in Africa?[J]. Environmental Science & Policy, 2009, 12(7): 1 024-1 027
- [17] Gaunt J L, Lehmann J. Energy balance and emissions associated with biochar sequestration and pyrolysis bioenergy production[J]. Environmental Science & Technology, 2008, 42(11): 4 152-4 158
- [18] 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
- [19] Hale L, Luth M, Crowley D. Biochar characteristics relate to its utility as an alternative soil inoculum carrier to peat and vermiculite[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, 81(2): 228-235

- [20] Day D, Evans R J, Lee J W, et al. Valuable and stable carbon co-product from fossil fuel exhaust scrubbing[J]. Preprints Papers-American Chemical Society, Division of Fuel Chemistry, 2004, 49(2): 802–804
- [21] Liang B, Lehmann J, Solomon D, et al. Black carbon increases cation exchange capacity in soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2006, 70(5): 1 719–1 730
- [22] Mizuta K, Matsumoto T, Hatate Y, et al. Removal of nitrate-nitrogen from drinking water using bamboo powder charcoal[J]. Bioresource technology, 2004, 95(3): 255–257
- [23] 刘莹莹. 不同原料生物质炭基本性质及其对溶液中 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 吸附特性的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2007
- [24] 陈廷伟. 胶质芽孢杆菌分类名称及特性研究(综述)[J]. 土壤肥料, 2002(4): 5–10
- [25] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000
- [26] 杨文博. 微生物学实验[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004
- [27] 张治安, 陈展宇. 植物生理学实验技术[M]. 长春: 吉林大学出版社, 2008
- [28] 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
- [29] 王雪, 袁晓凡, 赵兵, 等. 胶质芽孢杆菌培养条件及发酵工艺的研究进展[J]. 过程工程学报, 2010, 10(2): 409–416
- [30] 张伟明. 生物炭的理化性质及其在作物生产上的应用[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2012
- [31] 许燕萍, 谢祖彬, 朱建国, 等. 制炭温度对玉米和小麦生物质炭理化性质的影响[J]. 土壤, 2013, 45(1): 73–78
- [32] Wardle D A, Nilsson M C, Zackrisson O. Fire-derived charcoal causes loss of forest humus[J]. Science, 2008, 320(5876): 629
- [33] Liang B, Lehmann J, Sohi S P, et al. Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil[J]. Organic Geochemistry, 2010, 41(2): 206–213
- [34] 匡崇婷, 江春玉, 李忠佩, 等. 添加生物质炭对红壤水稻土有机碳矿化和微生物生物量的影响[J]. 土壤, 2012, 44(4): 570–575
- [35] O'Neill B, Grossman J, Tsai M T, et al. Bacterial community composition in Brazilian anthrosols and adjacent soils characterized using culturing and molecular identification[J]. Microbial Ecology, 2009, 58(1): 23–35
- [36] Gheorghe C, Marculescu C, Badea A, et al. Effect of pyrolysis conditions on biochar production from biomass[C]. Proceedings of the 3rd WSEAS international conference on Renewable Energy Sources. Bucharest, Romania, 2009
- [37] Kolb S E, Fermanich K J, Dornbush M E. Effect of charcoal quantity on microbial biomass and activity in temperate soils[J]. Soil Science Society of American Journal, 2009, 73(4): 1 173–1 181
- [38] 卜晓莉, 薛建辉. 生物炭对土壤生境及植物生长影响的研究进展[J]. 生态环境学报, 2014, 23(3): 535–540
- [39] Kolton M, Harel Y M, Pasternak Z, et al. Impact of biochar application to soil on the root-associated bacterial community structure of fully developed greenhouse pepper plants[J]. Applied and Environment Microbiology, 2011, 77(14): 4 924–4 930
- [40] Knicker H. How does fire affect the nature and stability of soil organic nitrogen and carbon: A review[J]. Biogeochemistry, 2007, 85(1): 91–118
- [41] 袁金华, 徐仁扣. 生物质炭的性质及其对土壤环境功能影响的研究进展[J]. 生态环境学报, 2011, 20(4): 779–785
- [42] 金会翠, 张林森, 李丙智, 等. 增施钾肥对红富士苹果叶片营养及果实品质的影响[J]. 西北农业学报, 2007, 16(3): 100–104
- [43] 吴国喜. 钾肥对大棚番茄品质影响及主要相关机理的研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2007
- [44] 许前欣, 赵振达, 李秀文, 等. 钾肥对蔬菜产量品质效应的影响[J]. 土壤肥料, 1999(2): 23–25
- [45] 张炎, 马海刚, 徐万里, 等. 施钾对加工番茄产量与品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2008(3): 40–42, 51
- [46] 董洁, 邹志荣, 燕飞, 等. 不同施肥水平对大棚番茄产量和品质的影响[J]. 北方园艺, 2009(12): 38–41
- [47] 付嘉英, 乔志刚, 郑金伟, 等. 不同炭基肥料对小白菜硝酸盐含量、产量及品质的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(34): 162–165
- [48] 乔志刚, 付嘉英, 郑金伟, 等. 不同炭基肥对青椒生长、品质和氮素农学利用率的影响[J]. 土壤通报, 2014, 45(1): 174–179

Compound of *Bacillus mucilaginosus* and Biochar and Its Effects on Tomato Yield and Quality

WANG Xiaomin, LI Lianqing^{*}, PAN Genxing, ZHANG Xuhui, ZHENG Jinwei,
ZHENG Jufeng, LIU Xiaoyu, CHENG Kun, WANG Jiafang, YU Xinyan

(Institute of Resources, Ecosystem and Environment for Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Experiments were conducted by compounded various straw biochars and *Bacillus mucilaginosus* in order to select the optimal carrier to improve the survival rate of *Bacillus mucilaginosus*, slow its senescence rate, prolong its survival time in soil, and promote the releasing efficiency of soil insoluble potassium. Incubation experiments showed that neutral wheat straw biochar could be used as the ideal carrier for *Bacillus mucilaginosus*. After 35-d incubation, the content of soil available potassium of biochar-based potassium-releasing fertilizer was 28.53%, 20.75% and 13.41% higher than CK, wheat straw biochar and microbial liquid treatments, respectively. Although the quantities of the *Bacillus mucilaginosus* both in microbial liquid treatment and biochar-based potassium-released fertilizer treatment were significantly decreased, the decreased rate in biochar-based potassium-released fertilizer treatment (1.0×10^9 cfu/g to 1.4×10^7 cfu/g) was lower than microbial liquid treatment (1.1×10^9 cfu/g to 9.0×10^5 cfu/g). Field experiments showed that biochar-based potassium-released fertilizer could significantly increase total potassium contents in tomato plants and fruits, increase the yield and quality of tomato, promote the content of vitamin C, and decrease nitrate content. These results indicate that compound neutral wheat straw biochar and *Bacillus mucilaginosus* can improve the survival rate of inoculant and promote effectively the release of mineral potassium from soil.

Key words: Biochar; *Bacillus mucilaginosus*; Potassium release; Soil; Tomato