



棉杆生物炭对棉花根系特性及生理代谢的影响

唐光木^{1,2}, 侯艳艳³, 潘金龙³, 张云舒¹, 马海刚¹, 徐万里¹

(1. 新疆农业科学院 土壤肥料与农业节水研究所, 乌鲁木齐 830091; 2. 中国农业大学 土地科学与技术学院, 北京 100193; 3. 新疆农业大学 草业与环境科学学院, 乌鲁木齐 830052)

摘要 探讨棉花根系不同根径形态特性及生理代谢对棉杆生物炭施用的响应,为棉花高产高效生产提供理论支撑。为此,以棉花为研究对象,棉杆生物炭为试验材料,在灰漠土和风沙土两种质地土壤上,选择常规施肥、常规施肥+ $22.5 \times 10^3 \text{ kg/hm}^2$ 棉杆生物炭和常规施肥+ $45.0 \times 10^3 \text{ kg/hm}^2$ 棉杆生物炭 3 个处理,探讨棉杆生物炭对棉花根形态特征以及根系叫喙乙酸、丙二醛(MDA)和过氧化氢酶活性等生理指标的影响。结果表明:添加棉杆生物炭促进棉花生长和产量的增加,棉花株高较常规施肥处理显著提高 9.02%~14.02%,棉花产量提高 5.70%~7.71%,但差异不显著;添加过量的棉杆生物炭($45.0 \times 10^3 \text{ kg/hm}^2$)则抑制风沙土中棉花地下部生物量和产量的提升;棉杆生物炭添加提高灰漠土中棉花细根根长、根表面积和根体积,其较常规施肥处理分别提高 7.80%~32.60%、100.00%~111.11%和 83.87%~129.03%,降低了风沙土中棉花中根、粗根的根长和根表面积;棉杆生物炭添加显著提高了棉花根系中过氧化氢酶活性,与常规施肥处理相比,灰漠土中根系过氧化氢酶活性提高 194%~423%,风沙土中提高 155%($22.5 \times 10^3 \text{ kg/hm}^2$)。棉杆生物炭添加促进了棉花株高和细根的生长,有利于棉花根系形态构建,棉杆生物炭添加提高棉花根系过氧化氢酶活性,使棉花根系细胞免于过氧化氢的毒害,从而促进根系对水肥的吸收利用和棉花产量的提高,同时棉杆生物炭添加对灰漠土的影响作用大于风沙土。

关键词 生物炭;棉花;根系;生长素;生理特性

中图分类号 S145.4;S563

文献标志码 A

文章编号 1004-1389(2022)03-0370-09

生物炭是农林废弃物无氧或缺氧低温热裂解形成的,具有多孔、比表面积巨大和化学稳定性的富碳固态物质^[1]。生物炭作为一种土壤改良剂,在改善土壤物理性质^[2]、提升养分水分资源利用效率^[3]、促进作物生长和功能发挥^[4]、提高作物产量^[5]方面发挥重要的作用。由于生物炭原料来源、炭化工艺流程、施用方式方法以及供试土壤类型、作物和种植管理模式等差异,对作物生产力的影响具有很大的不确定性^[5-6]。但生物炭对作物生长和产量的影响,很大程度上取决于作物根系的形态及生理生化特性,开展作物根系及其形态和生理生化特性研究,有助于揭示生物炭对作物生长和产量形成的作用机理。

根系是植物固定、养分吸收和运移的重要器官^[7],是植物激素、有机酸和氨基酸合成的重要场

所^[8],根系表型及生理生化特征影响植物地上部生长发育、产量和品质形成^[9],并通过改变根系构型和生理活性特性适应生境的变化。已有研究表明土壤质地类型^[10]、耕作^[11]以及施肥^[12]、灌溉^[13]等农田管理措施诱导植物根系形态指标改变。根系可根据直径大小可分为细根(0~0.4 mm)、中根(0.4~1.2 mm)和粗根(>1.2 mm)^[14]。粗根能更好地固结土壤^[15],中根和细根是根系系统最活跃的组成部分,很大程度上决定整个根系系统的形态构建和生理生化指标的改变^[16]。研究表明,玉米初生根系和直径小于 2 mm 的细根吸收水分和养分能力远远大于较老和较粗的根系^[17],直径小于 2 mm 的根系根长与青椒产量关系密切^[18],并且农田管理措施主要诱导细根的发生^[19],因此,细根对环境变化的响应最

收稿日期:2021-01-11 修回日期:2021-06-15

基金项目:国家自然科学基金(31660073);国家重点研发计划(2017YFD0200803-04)。

第一作者:唐光木,男,硕士,副研究员,从事土壤生态与安全研究。E-mail: tangjunhui5120@126.com

通信作者:徐万里,男,博士,研究员,主要从事土壤改良与利用研究。E-mail: wlxu2005@163.com

为敏感,细根的周转速率、根系活力以及相关的生理指标可以准确反应根系适应状况。

棉花是直根系作物,根系生长分布受遗传因子^[20]、管理措施^[21]、环境条件^[22]等影响,棉花根系在不同生境土壤中的表型特征及其生理活性指标表现各异。生物炭作为土壤改良剂,对小麦^[23]、水稻^[24]、玉米^[25]、烟草^[26]等作物根系形态特性的影响开展了大量研究;将棉秸秆炭化还田,有利于降低棉秸秆粉碎直接还田影响播种、出苗和土传病害的发生,前期的研究表明,棉秸秆生物炭(以下简称:棉杆生物炭)施入灰漠土能够降低土壤体积质量,增加土壤孔隙度,影响棉花根系的生长,但棉杆生物炭对棉花根系构型及生理生化指标影响作用如何?目前还鲜见报道。为此,本研究以棉花盛花期根系为研究对象,开展棉杆生物炭对棉花根系构型及生理代谢指标的影响研

究,对实现棉花高产高效和制定科学合理的水肥管理措施具有重要的意义。

1 材料与方法

1.1 试验材料

田间试验位于国家灰漠土土壤肥力与肥料效益监测基地(N43°95'26",E87°46'45")和新疆生产建设兵团第八师炮台土壤改良试验站(N44°47'36",E85°33'07")。试验地土壤类型为灰漠土和风沙土,土壤质地类型为粉砂质壤土(粘粒 7%,粉砂 46%,砂粒 47%)和砂质壤土(粘粒 2%,粉砂 38%,砂粒 59%),试验地土壤基本性质见表 1。

将收获的棉杆风干粉碎成 8~10 cm 的短枝条,利用自制的炭化炉 450 ℃厌氧条件下炭化 1 h 制备棉杆生物炭。制备的棉杆生物炭自然风干,粉碎过 0.25 mm 筛,充分混合均匀,备用。

表 1 供试土壤基本性质
Table 1 Basic properties of tested soil

土壤类型 Soil type	pH	有机碳/ (g/kg) Organic carbon	全氮/ (g/kg) Total N	全磷/ (g/kg) Total P	全钾/ (g/kg) Total K	碱解氮/ (mg/kg) Available N	速效磷/ (mg/kg) Available P	速效钾/ (mg/kg) Available K
灰漠土 Gray desert soil	8.85	6.91	0.47	0.59	16.35	48.84	27.01	107.72
风沙土 Aeolian sandy soil	8.51	12.41	1.10	0.66	18.30	58.70	1.80	126.30

1.2 试验设计

2019 年 4 月 23 日在国家灰漠土土壤肥力与肥料效益监测基地和新疆生产建设兵团第八师炮台土壤改良试验站进行播种,供试棉花品种为‘新陆早 54 号’。采用膜下滴灌机采棉栽培模式,膜宽 2.05 m,一膜 3 管 6 行,行距配置(10+66+10)cm,株距 9.5 cm(图 1)。试验设常规施肥处理(NPK)、常规施肥+22.5×10³ kg/hm² 棉杆生物炭(NPK1.5BC)和常规施肥+45.0×10³

kg/hm² 棉杆生物炭(NPK3.0BC)共 3 个处理,重复 3 次,18 个小区。采用随机区组排列,小区面积 32 m²。常规施肥处理为纯 N 300 kg/hm², P₂O₅ 138 kg/hm², K₂O 75 kg/hm²。棉杆生物炭和磷钾肥作为基肥一次性施入,氮肥 40%基施,60%追施(6 月 3 日第二水 2%、6 月 16 日第三水 5%、6 月 28 日第四水 12%、7 月 9 日第五水 12%、7 月 19 日第六水 12%、7 月 28 日第七水 12%、8 月 5 日第八水 5%)。田间其他管理方式一致。

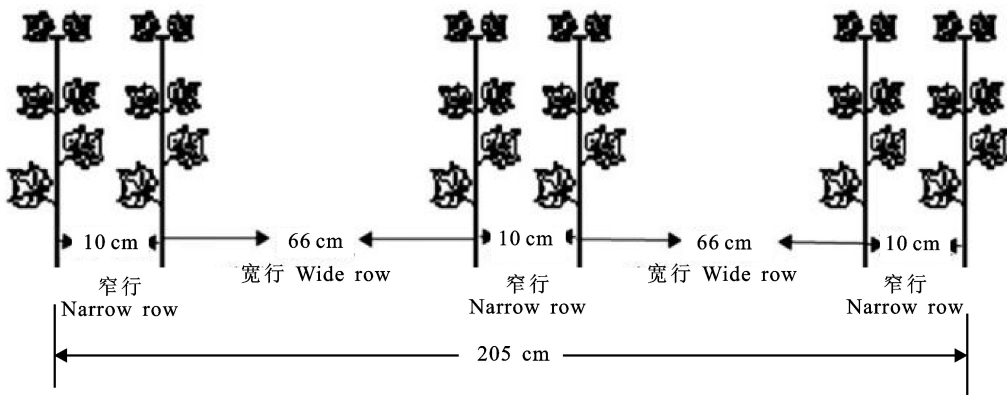


图 1 典型的一膜六行模式^[27]
Fig. 1 Typical six line mode unber one film^[27]

1.3 测定指标与方法

棉花生长盛花期,每个小区随机选择 20~30 株棉花测定株高和茎粗,采集 5~10 株棉花测定地上和地下部生物量。同时,每个小区选取 1 m×1 m 的区域,采集棉花根系样品,将土壤中的所有根系挑选出,并立即放入有冰袋的保温箱中,带回试验室,于 4 ℃ 冰箱内保存。

棉花吐絮期,每个小区选择 9.6 m² 计算棉花每 667 m² 株数、单株铃数,同时随机采集 25 个棉桃,风干后测定单铃质量,计算单位面积棉花籽棉产量。

根据 Sullivan 等^[14]和王庆惠等^[16]提供方法,将棉花根系根据根径大小分为细根(0~0.4 mm)、中根(0.4~1.2 mm)和粗根(>1.2 mm),并进行根系参数的统计计算。

根系吡啶乙酸含量采用参考何钟佩^[28]的方法测定,丙二醛(Malondialdehyde,MDA)含量测定参考 Cui 等^[29]的硫代巴比妥酸法测定,过氧化氢酶(Catalase,CAT)活性测定参考 Liu 等^[30]的方法测定。

1.4 数据分析

采用 WPS 2016 和 SAS 8.0 统计分析软件进行试验数据分析和绘图,多重比较采用 LSD 法,数据均以“平均值±标准差”表示。

2 结果与分析

2.1 添加棉秆生物炭对棉花生长及产量的影响

添加棉秆生物炭对不同土壤类型棉花生长及产量的影响不同(表 2、图 2)。灰漠土中,相比 NPK 处理,NPK1.5BC 处理棉花株高提高 14.02%,NPK3.0BC 处理显著提高 18.33%;棉秆生物炭处理间,NPK3.0BC 处理相比 NPK1.5BC 处理提高了棉花株高,但差异不显著;相比 NPK 处理,添加棉秆生物炭提高了棉花茎粗、地上部生物量和地下部生物量,不同处理间差异不显著;NPK3.0BC 处理相比 NPK1.5BC 处理降低了棉花茎粗、地上部生物量和地下部生物量,但差异不显著。风沙土中,相比 NPK 处理,NPK1.5BC 处理显著提高了棉花地上部生物量 12.16%,NPK3.0BC 处理显著提高了棉花茎

表 2 添加棉秆生物炭棉花生长性状的变化

Table 2 Changes of cotton growth with addition of cotton stalk char

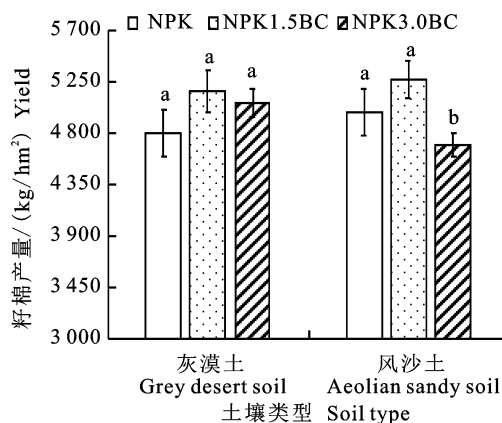
处理 Treatment	株高/cm Plant height		茎粗/mm Stem diameter		地上部生物量/(g/株) Aboveground biomass		地下部生物量/(g/株) Underground biomass	
	灰漠土 Grey desert soil	风沙土 Aeolian sandy soil	灰漠土 Grey desert soil	风沙土 Aeolian sandy soil	灰漠土 Grey desert soil	风沙土 Aeolian sandy soil	灰漠土 Grey desert soil	风沙土 Aeolian sandy soil
NPK	71.83±3.00 b	57.33±4.93 a	20.35±0.59 a	8.64±1.06 b	32.50±13.13 a	42.94±5.29 a	5.34±1.91 a	9.97±3.76 a
NPK1.5BC	81.91±5.25 ab	62.50±5.50 a	21.20±0.52 a	8.88±0.29 ab	34.94±6.76 a	45.49±0.94 b	5.72±1.23 a	10.01±3.35 a
NPK3.0BC	85.00±5.00 a	59.87±2.00 a	20.42±0.26 a	10.41±0.26 a	33.20±10.91 a	48.16±5.26 a	5.59±1.26 a	9.38±1.51 a

注:同列不同小写字母表示 5% 水平差异显著。

Note: Values followed by different letters indicate significant difference at 5% level.

粗 20.49%,株高、茎粗、地上部生物量和地下部生物量其他各处理间差异不显著;棉秆生物炭处理间,相比 NPK1.5BC 处理,NPK3.0BC 处理显著提高了地上部生物量 5.87%。可见,灰漠土和风沙土中添加棉秆生物炭均促进棉花的生长。

添加棉秆生物炭提高灰漠土中棉花籽棉产量,相比 NPK 处理,NPK1.5BC 和 NPK3.0BC 处理籽棉产量提高 7.71%和 5.53%,但过量的棉秆生物炭添加降低籽棉产量,相比 NPK1.5BC 处理,NPK3.0BC 处理籽棉产量降低 2.03%,不同处理间差异不显著。风沙土中,相比 NPK 处理,NPK1.5BC 处理籽棉产量提高 5.70%,NPK 3.0BC 处理则降低 5.85%,不同处理间差异不显著;棉秆生物炭处理间,与 NPK1.5BC 处理相比,NPK3.0BC 处理籽棉产量则显著降低 10.93%。



不同字母表示各处理间差异显著($P<0.05$),下同

Different letters indicate significant difference ($P<0.05$), the same below

图 2 添加棉秆生物炭棉花籽棉产量

Fig. 2 Seedcotton yield under addition of cotton stalk char

两种土壤类型间都表现为相比 NPK 处理,NPK1.5BC 处理提高籽棉产量,NPK3.0BC 处理降低籽棉产量。

2.2 添加棉杆生物炭对棉花根系形态的影响

添加棉杆生物炭影响灰漠土中棉花根系形态(表 3),棉花根长表现为细根>中根>粗根,相比 NPK 处理,NPK1.5BC 处理细根根长显著增加 32.60%,NPK3.0BC 处理增加了细根根长但差异不显著;相比 NPK 处理,棉杆生物炭添加处理降低了中根和粗根根长,不同处理间差异不显著。棉花根表面积表现为中根>粗根>细根,与 NPK 处理相比,NPK1.5BC 处理细根和中根表面积提

高 111.10%和 17.49%,NPK3.0BC 处理细根表面积显著增加 100.00%;NPK1.5BC 和 NPK3.0BC 处理降低了粗根表面积,但差异不显著。根体积表现为细根>中根>粗根,不同处理间对中根和粗根根体积无显著影响,相比 NPK 处理,NPK1.5BC 和 NPK3.0BC 处理细根根体积显著提高 129.03%和 83.87%。不同棉杆生物炭处理间表现为过量的棉杆生物炭抑制了棉花根系的生长,相比 NPK1.5BC 处理,NPK3.0BC 处理则降低棉花根长、根表面积和根体积,但差异不显著(细根根长除外)。

表 3 添加棉杆生物炭灰漠土棉花根系参数

Table 3 Cotton root parameters of grey desert soil under addition of cotton stalk char

处理 Treatment	根长/cm Root length			根表面积/cm ² Root surface			根体积/cm ³ Root volume		
	细根 Fine root	中根 Medium root	粗根 Coarse root	细根 Fine root	中根 Medium root	粗根 Coarse root	细根 Fine root	中根 Medium root	粗根 Coarse root
NPK	26.53±5.08 b	6.63±1.14 a	2.09±0.22 a	0.09±0.01 b	1.83±0.20 a	0.40±0.19 a	0.31±0.02 bc	0.02±0.00 a	0.01±0.01 a
NPK1.5BC	35.18±3.01 a	6.50±2.29 a	1.96±0.42 a	0.19±0.11 a	2.15±0.31 a	0.37±0.12 a	0.71±0.16 a	0.02±0.00 a	0.01±0.00 a
NPK3.0BC	28.60±3.98 b	6.60±3.64 a	1.68±0.50 ab	0.18±0.02 a	1.78±0.36 a	0.30±0.09 a	0.57±0.05 ab	0.02±0.00 a	0.01±0.00 a

注:同列不同小写字母表示 5%水平差异显著。细根直径:0~0.4 mm,中根直径:0.4~1.2 mm,粗根直径:>1.2 mm。下同。

Note: Values followed by different letters in same column indicate significantly different at 5% level. The diameter of fine root,medium root and coarse root are 0~0.4 mm,0.4~1.2 mm and over 1.2 mm,respectively. The same below.

风沙土中,根长和根表面积表现为细根>中根>粗根,不同根径大小之间根体积变化不明显(表 4)。不同处理棉杆生物炭添加降低了中根和粗根的根长和根表面积,高量的棉杆生物炭则增加了细根的根长和根表面积,与 NPK 处理相比,NPK1.5BC 处理降低细根根长和根表面积,NPK3.0BC 处理增加了细根根长和根表面积,但差异不显著;棉杆生物炭处理间,与 NPK1.5BC 处理相比,NPK3.0BC 处理细根根长和根表面分别显著增加 43.21%和 27.61%;中根和粗根根长和根表面积则随棉杆生物炭添加量的增加而降

低,与 NPK 处理相比,NPK3.0BC 处理中根根长和根表面积分别显著降低 50.57%和 53.19%,粗根根长和根表面积则显著降低 65.38%、67.92%;不同处理对棉花根系不同根径的根体积影响不大。两种土壤类型中,棉杆生物炭添加都降低了中根和粗根根长、根表面积(灰漠土 NPK1.5BC 除外),对其根体积影响不显著;对细根根长和根表面积影响存在不同,不同处理中,灰漠土中 NPK1.5BC 处理细根根长最长、体积最大,风沙土中 NPK3.0BC 处理细根根长最长、体积最大。

表 4 添加棉杆生物炭风沙土棉花根系参数

Table 4 Cotton root parameters of aeolian sandy soil under addition of cotton stalk char

处理 Treatment	根长/cm Root length			根表面积/cm ² Root surface			根体积/cm ³ Root volume		
	细根 Fine root	中根 Medium root	粗根 Coarse root	细根 Fine root	中根 Medium root	粗根 Coarse root	细根 Fine root	中根 Medium root	粗根 Coarse root
NPK	49.45±12.02 ab	7.85±3.16 a	1.82±0.86 a	2.05±0.34 ab	0.94±0.49 a	0.53±0.4 a	0.01±0.00 a	0.02±0.00 a	0.02±0.00 a
NPK1.5BC	37.63±1.72 bc	4.86±0.90 ab	1.74±0.60 a	1.63±0.23 a	0.70±0.31 a	0.66±0.07 a	0.01±0.00 a	0.01±0.00 a	0.03±0.00 a
NPK3.0BC	53.89±8.79 a	3.88±2.02 b	0.63±0.46 b	2.08±0.07 b	0.44±0.28 b	0.17±0.10 b	0.01±0.00 a	0.01±0.00 a	0.01±0.00 a

2.3 添加棉杆生物炭棉花根系生理活性变化

吲哚乙酸(IAA)是植物内源激素中最重要的一种。棉杆生物炭添加对灰漠土和风沙土根系 IAA 的影响不同(图 3)。灰漠土中,不同处理间

棉花根系中 IAA 含量表现为 NPK1.5BC>NPK>NPK3.0BC,相比 NPK 处理,NPK1.5BC 处理棉花根系 IAA 显著提高 49.57%,NPK3.0BC 则显著降低 39.32%;不同棉杆生物炭处理间,相比

NPK1.5BC 处理,NPK3.0BC 处理根系 IAA 显著降低 59.43%。风沙土中,不同处理间根系 IAA 则表现为 NPK3.0BC>NPK>NPK1.5BC,相比 NPK 处理,NPK1.5BC 处理根系 IAA 降低 27.12%,NPK3.0BC 则显著提高 137.33%;不同棉杆生物炭处理间,相比 NPK1.5BC 处理,

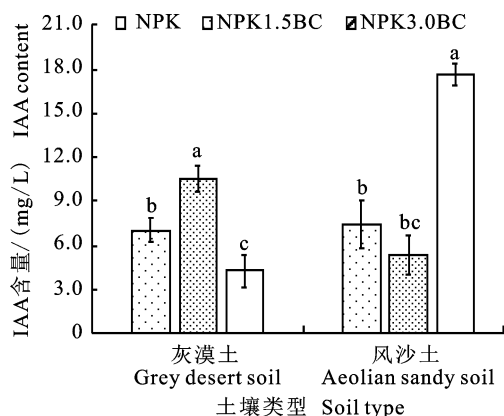


图3 添加棉杆生物炭棉花根系 IAA 含量的变化

Fig.3 Cotton root system of IAA content under addition of cotton stalk char

表5 添加棉杆生物炭棉花根系 MDA 含量和 CAT 活性的变化

Table 5 Root's MDA content and CAT activity under addition of cotton stalk char

处理 Treatment	MDA 含量/(mol/g) Content of MDA		CAT 活性/[mg/(g·min)] Activity of CAT	
	灰漠土 Grey desert soil	风沙土 Aeolian sandy soil	灰漠土 Grey desert soil	风沙土 Aeolian sandy soil
NPK	0.04±0.01 b	0.02±0.01 b	0.86±0.33 c	1.39±0.07 c
NPK1.5BC	0.03±0.01 b	0.10±0.02 a	4.50±1.07 a	3.54±0.12 b
NPK3.0BC	0.07±0.02 a	0.04±0.01 b	2.53±0.53 b	1.44±0.30 c

3 结论与讨论

生物炭施用影响作物生长和产量形成,但生物炭原料来源、炭化工艺流程、施用量和方式方法以及区域环境特点、土壤条件、田间管理措施等影响生物炭对作物生长和产量形成的作用效果^[5-6],并存在诸多的不确定性。本研究中,灰漠土和风沙土中添加棉杆生物炭促进棉花生长和产量的提高,但棉杆生物炭添加量达到 $45.0 \times 10^3 \text{ kg/hm}^2$ 时一定程度上抑制棉花生长和产量提高,这与魏永霞等^[31]、刘慧敏等^[32]研究结果相一致,究其原因可能是因为生物炭施用降低土壤体积质量,增加土壤孔隙度和比表面积,提高土壤保水保肥性能^[2],促进作物生长和产量的提高;但过量生物炭施入改变土壤酸碱度,并与作物产生养分、水分竞争作用,抑制作物根系生长和养分水分吸收利用,同时

NPK3.0BC 处理根系 IAA 显著提高 225.65%。

MDA 是细胞质膜氧化的最终产物,反映细胞质膜过氧化程度和对逆境的反应程度,不同处理对棉花根系 MDA 含量影响不同(表 5)。灰漠土中,NPK1.5BC 处理根系 MDA 含量低于 NPK 处理,但差异不显著,NPK3.0BC 处理相比 NPK 处理根系 MDA 含量则显著提高 75.00%。风沙土中,棉杆生物炭添加提高了根系 MDA 含量,相比 NPK 处理,NPK1.5BC 和 NPK3.0BC 处理则分别增加了 5 倍和 2 倍。

过氧化氢酶(CAT)是植物体内重要的抗氧化酶,催化细胞内过氧化氢的分解,使细胞免于过氧化氢的毒害。灰漠土和风沙土中,棉杆生物炭添加增加了根系 CAT 活性,表现为 NPK1.5BC>NPK3.0BC>NPK 处理;相比 NPK 处理,NPK1.5BC 处理灰漠土和风沙土棉花根系 CAT 活性分别显著提高 423.26%和 154.68%;相比 NPK 处理,NPK3.0BC 处理灰漠土中棉花根系 CAT 活性显著提高 194.19%,风沙土中提高 3.60%,但差异不显著。

提高土壤碳氮比值,影响土壤微生物群落结构和功能^[33];同时,生物炭含有的易挥发性成分,可能对作物产生一定的毒害作用^[34],从而抑制作物生长和产量提高。

根系是土壤最直接的“接触者”,生物炭通过改善土壤物理、化学和微生物特性,从而影响作物根系的生长发育和形态特征。张伟明等^[24]研究表明生物炭施用增加水稻生育前期主根长、根体积,进而提高根系总吸收面积;蒋健等^[25]对玉米的研究中指出生物炭增加玉米根系总根长、根体积,进而增加玉米根系活跃吸收面积。本研究中,两种土壤类型中添加棉杆生物炭对棉花细根的影响比较明显,对中根、粗根的影响相对较小,这与陈伟等^[35]的研究结果相一致,说明生物炭对根系形态特性的影响主要集中在细根,添加生物炭细根根系辐射面积和土壤的接触面积更大,更加有

利于养分、水分的吸收利用,从而有利于作物生长和产量的提高。

根系生理活性指标是根系吸收、合成、氧化和还原能力的综合体现^[36],反映根系生长状况和受伤害程度。赵宏伟等^[37]研究表明冷水灌溉显著提高根系 CAT 活性和 MDA 含量,降低内源激素 IAA 含量,Liu 等^[38]认为施氮可增强干旱处理棉花根系 CAT 活性,降低复水后 MDA 活性,罗宏海等^[39]指出水氮双重亏缺加剧棉花根系 MDA 含量的大幅上升和 CAT 活性的下降。本研究表明,生物炭添加影响棉花根系内源激素 IAA、MDA 含量和 CAT 活性,生物炭对灰漠土和风沙土中棉花根系 IAA 影响不同,这可能与试验地土壤质地和棉花生长季气温有关。生物炭添加增加根系 MDA 含量和 CAT 活性,这是因为生物炭施用导致棉花根系膜脂过氧化伤害加强,根系为了减轻活性氧对根系细胞膜脂的伤害从而激发根系 CAT 活性,清除自由基,起到保护根系的作用;添加棉杆生物炭对灰漠土和风沙土中根系 IAA 含量、MDA 含量和 CAT 活性影响不同,究其原因在于两种土壤的质地、养分及其微环境存在不同,根系 IAA 含量、MDA 含量和 CAT 活性作出的相应响应的结果^[40]。

综合可知,添加棉杆生物炭 22.5×10^3 kg/hm² 时,能够有效促进棉花生长、产量形成、根系形态构建和生理活性指标提高,过量棉杆生物炭施用(45.0×10^3 kg/hm²)抑制棉花生长、产量形成和根系形态构建,同时,由于生物炭施用对作物根系构型及其生理指标的研究还处于起步阶段,应加强生物炭影响作物根系构型和生理指标的深入研究,为生物炭的应用提供更加有力的数据支撑和理论依据。

参考文献 Reference:

- [1] 张海晶,王少杰,田春杰,等.玉米秸秆及其生物炭对东北黑土溶解有机质特性的影响[J].水土保持学报,2021,35(2):243-250.
- [2] ZHANG H J, WANG SH J, TIAN CH J, et al. Effects of maize straw and its biochar on the dissolved organic matter characteristics of black soil in northeastern China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(2): 243-250.
- [3] LIANG J P, LI Y, SI B C, et al. Optimizing biochar application to improve soil physical and hydraulic properties in saline-alkali soils[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 771: 144802.
- [4] ABIVEN S, HUND A, MARTINSEN V, et al. Biochar

- amendment increases maize root surface areas and branching: a shovelomics study in Zambia[J]. *Plant and Soil*, 2015, 395: 45-55.
- [5] HU Y J, SUN B H, WU S F, et al. After-effects of straw and straw-derived biochar application on crop growth, yield, and soil properties in wheat (*Triticum aestivum* L.)-maize (*Zea mays* L.) rotations: a four-year field experiment[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 780: 146560.
- [6] LIU X, ZHANG A, JI C, et al. Biochar's effect on crop productivity and the dependence on experimental conditions—meta-analysis of literature data[J]. *Plant and Soil*, 2013, 373: 583-594.
- [7] MUKHERJEE A, LAL R. The biochar dilemma[J]. *Soil Research*, 2014, 52: 217-230.
- [8] 刘梅, 吴广俊, 路笃旭, 等. 不同年代玉米品种氮素利用效率与其根系特征的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(1): 71-82.
- [9] LIU M, WU G J, LU D X, et al. Improvement of nitrogen use efficiency and the relationship with root system characters of maize cultivars in different years[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilize*, 2017, 23(1): 71-82.
- [10] 李焱焱, 刘海荷, 陈金湘, 等. 棉花根系研究进展[J]. 作物研究, 2008, 22(5): 449-452.
- [11] LI Y Y, LIU H H, CHEN J X, et al. Research progress of cotton root system[J]. *Crop Research*, 2008, 22(5): 449-452.
- [12] 国秀丽, 白灯莎, 买买提艾力, 张少民, 等. 丛枝菌根真菌对苗期棉花根系形态特征的影响[J]. 棉花学报, 2017, 29(5): 476-486.
- [13] GUO X L, MAIMATIALIB, ZHANG SH M, et al. Effect of indigenous arbuscular mycorrhizae fungi on the root morphological characteristics of cotton at the seedling stage[J]. *Cotton Science*, 2017, 29(5): 476-486.
- [14] 张泽, 马革新, 海兴岩, 等. 氮肥和土壤质地对滴灌棉花根系分布及产量的影响[J]. 土壤, 2018, 50(3): 622-627.
- [15] ZHANG Z, MA G X, HAI X Y, et al. Effect of nitrogen fertilization and soil texture on cotton root traits and yields under conventional drip irrigation[J]. *Soils*, 2018, 50(3): 622-627.
- [16] 杨华, 李彤, 王威雁, 等. 保护性耕作对西北旱区丛枝菌根真菌及土壤理化性质的影响[J]. 西北农业学报, 2020, 29(10): 1528-1536.
- [17] YANG H, LI T, WANG W Y, et al. Responses of arbuscular mycorrhizal fungi and soil physical and chemical properties under different tillage practices in arid area of northwest China[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2020, 29(10): 1528-1536.
- [18] 任江静, 吕新, 祁力敏, 等. 不同滴灌水肥配施模式对土壤硝态氮与棉花根系形态的影响[J]. 西北农业学报, 2019, 28(11): 1812-1820.
- [19] REN J J, LÜ X, QI L M, et al. Effects of different drip fertigation modes on soil nitrate nitrogen and cotton root

- morphology[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2019, 28(11):1812-1820.
- [13] CHILUNDO M, JOEL A, WESSTROM I, *et al.* Response of maize root growth to irrigation and nitrogen management strategies in semi-arid loamy sandy soil[J]. *Field Crops Research*, 2017, 200:143-162.
- [14] SULLIVAN W M, JIANG Z C, HULL R J. Root morphology and its relationship with nitrate uptake in Kentucky Bluegrass[J]. *Crop Science*, 2000, 40:765-772.
- [15] 严青青, 张巨松, 李星星, 等. 盐碱胁迫对海岛棉种子萌发及幼苗根系生长的影响[J]. 作物学报, 2019, 45(1):100-110.
- YAN Q Q, ZHANG J S, LI X X, *et al.* Effects of salinity stress on seed germination and root growth of seedlings in island cotton[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2019, 45(1):100-110.
- [16] 王庆惠, 韩伟, 侯银莹, 等. 不同耐盐品种棉花根系主要指标对盐分胁迫的响应[J]. 应用生态学报, 2018, 29(3):865-873.
- WANG Q H, HAN W, HOU Y Y, *et al.* Responses of main characters of root system to salt stress among cotton varieties with different salt tolerance[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(3):865-873.
- [17] PIERRET A, MORAN C J, DOUSSAN C. Conventional detection methodology is limiting our ability to understand the roles and functions of fine roots[J]. *New Phytologist*, 2005, 166(3):967-980.
- [18] 孔清华, 李光永, 王永红, 等. 地下滴灌施氮及灌水周期对青椒根系分布及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(增刊 2):38-42.
- KONG Q H, LI G Y, WANG Y H, *et al.* Effects of nitrogen application and irrigation cycle on bell pepper root distribution and yield under subsurface drip irrigation[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(Supp. 2):38-42.
- [19] MAAKIPAA R, KARJALAINEN T, PUSSINEN A, *et al.* Effects of climate change and nitrogen deposition on the carbon sequestration of a forest ecosystem in the boreal zone[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1999, 29(1):1490-1501.
- [20] 白慧东, 罗宏海, 张亚黎, 等. 高产杂交棉标杂 A1 根系生长及空间分布特性[J]. 新疆农业科学, 2008, 45(6):981-985.
- BAI H D, LUO H H, ZHANG Y L, *et al.* Character of root growth and spatial distribution of hybrid cotton biaoza A1[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2008, 45(6):981-985.
- [21] 张立桢, 李亚兵, 王桂平, 等. 留营养枝棉花根系生长发育与分布规律的研究[J]. 棉花学报, 1998, 10(6):322-328.
- ZHANG L ZH, LI Y B, WANG G P, *et al.* The root growth, development and distribution of cotton with vegetative branches[J]. *Acta Gossypii Sinica*, 1998, 10(6):322-328.
- [22] 王进, 张静, 翟小娟, 等. UV-B 辐射增强对棉花根系特征及产量品质的影响[J]. 新疆农业科学, 2009, 46(6):1171-1176.
- WANG J, ZHANG J, ZHAI X J, *et al.* Effect of enhanced UV-B radiation on root and yield of cotton[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2009, 46(6):1171-1176.
- [23] PRENDERGAST-MILLER M T, DUVAL M, SOHI S P. Localisation of nitrate in the rhizosphere of biochar-amended soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43:2243-2246.
- [24] 张伟明, 孟军, 王嘉宇, 等. 生物炭对水稻根系形态与生理特性及产量的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(8):1445-1451.
- ZHANG W M, MENG J, WANG J Y, *et al.* Effect of biochar on root morphological and physiological characteristics and yield in rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(8):1445-1451.
- [25] 蒋健, 王宏伟, 刘国玲, 等. 生物炭对玉米根系特性及产量的影响[J]. 玉米科学, 2015, 23(4):62-66.
- JIANG J, WANG H W, LIU G L, *et al.* Effect of biochar on root characteristics and yield in maize[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2015, 23(4):62-66.
- [26] 王欢欢, 任天宝, 张志浩, 等. 生物质炭对烤烟旺长期根系发育及光合特性的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(2):287-292.
- WANG H H, REN T B, ZHANG ZH H, *et al.* Effects of biochar on root development and leaf photosynthetic characteristics of flue-cured tobacco in the vigorous growing period[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(2):287-292.
- [27] 娄善伟, 董合忠, 田晓莉, 等. 新疆棉花“矮、密、早”栽培历史、现状和展望[J]. 中国农业科学, 2021, 54(4):720-732.
- LOU SH W, DONG H ZH, TIAN X L, *et al.* The “Short, dense and early” cultivation of cotton in Xinjiang: History, current situation and prospect[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(4):720-732.
- [28] 何钟佩. 农作物化学控制实验指导[M]. 北京:北京农业大学出版社, 1993:60-68.
- HE ZH P. Guidance of Crop Chemical Control Experiment[M]. Beijing:China Agricultural University Press, 1993:60-68.
- [29] CUI G B, ZHAO X X, LIU S D, *et al.* Beneficial effects of melatonin in overcoming drought stress in wheat seedlings[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2017, 118:138-149.
- [30] LIU J L, WANG W X, WANG L Y, *et al.* Exogenous melatonin improves seedling health index and drought tolerance in tomato [J]. *Plant Growth Regulation*, 2015, 77(3):317-326.
- [31] 魏永霞, 石国新, 冯超, 等. 黑土区施加生物炭对土壤综合肥力与大豆生长的影响[J]. 农业机械学报, 2020, 51(5):285-295.

- WEI Y X, SHI G X, FENG CH, *et al.* Effects of applying biochar on sloping farmland in black soil area on soil comprehensive fertility and soybean growth[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(5):285-295.
- [32] 刘慧敏, 张圣也, 郭怀刚, 等. 生物炭对谷子幼苗生长及光合特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(1):86-91.
- LIU H M, ZHANG SH Y, GUO H G, *et al.* Effects of biochar supplement in soil on growth and photosynthetic characteristics of millet seedlings[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2020, 38(1):86-91.
- [33] 周劲松, 闫平, 张伟明, 等. 生物炭对东北冷凉区水稻秧苗根系形态建成与解剖结构的影响[J]. 作物学报, 2017, 43(1):72-81.
- ZHOU J S, YAN P, ZHANG W M, *et al.* Effect of biochar on root morphogenesis and anatomical structure of rice cultivated in cold region of northeast China[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2017, 43(1):72-81.
- [34] GUNDALE, M J, DELUCA T H. Charcoal effects on soil solution chemistry and growth of *Koeleria macrantha* in the ponderosa pine/Douglas-fir ecosystem[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2007, 43:303-311.
- [35] 陈伟, 周波, 束怀瑞. 生物炭和有机肥处理对平邑甜茶根系和土壤微生物群落功能多样性的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(18):3850-3856.
- CHEN W, ZHOU B, SHU H R. Effects of organic fertilizer and biochar on root system and microbial unctonal diversity of *Malus hupehensis* rehder[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(18):3850-3856.
- [36] 张智勇, 董秀秀, 王绍明, 等. 不同连作障碍消减措施对新疆棉花根系形态生理特征的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2019, 25(4):918-925.
- ZHANG ZH Y, DOMG X X, WANG SH M, *et al.* Influence of different control measures on morphological and physiological characteristics of cotton root in Xinjiang[J]. *China Journal of Applied and Environmental Biology*, 2019, 25(4):918-925.
- [37] 赵宏伟, 王喆, 瞿昭璐, 等. 分蘖期冷水胁迫对寒地梗稻根系生理特性及产量的影响[J]. 东北农业大学学报, 2019, 50(12):10-20.
- ZHAO H W, WANG ZH, QU ZH J, *et al.* Effect of cold water stress at tillering stage on physiological characteristics and yield of japonica rice roots in cold region[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2019, 50(12):10-20.
- [38] LIU R X, ZHOU Z G, GUO W Q, *et al.* Effects of N fertilization on root development and activity of water-stressed cotton (*Gossypium hirsutum* L.) plants[J]. *Agricultural Water Management*, 2008, 95(11):1261-1270.
- [39] 罗宏海, 张宏芝, 陶先萍, 等. 膜下滴灌条件下水氮供应对棉花根系及叶片衰老特性的调节[J]. 中国农业科学, 2013, 46(10):2142-2150.
- LUO H H, ZHANG H ZH, TAO X P, *et al.* Effect of irrigation and nitrogen application regimes on senescent characters of roots and leaves in cotton with under-mulch-drip irrigation[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(10):2142-2150.
- [40] 任昊, 程乙, 刘鹏, 等. 不同栽培模式对夏玉米根系性能及产量和氮素利用的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(12):2270-2281.
- REN H, CHENG Y, LIU P, *et al.* Effects of different cultivation patterns on root characteristics, yield formation and nitrogen utilization of summer maize[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(12):2270-2281.

Effect of Cotton Stalk-char on Root Characteristics and Physiological Metabolism in Cotton

TANG Guangmu^{1,2}, HOU Yanyan³, PAN Jinlong³,
ZHANG Yunshu¹, MA Haigang¹ and XU Wanli¹

(1. Institute of Soil and Fertilizer and Agricultural Water-saving, Xinjiang Academy of Agricultural Science, Urumqi 830091, China;

2. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

3. College of Grassland and Environmental Science, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract The effect of cotton stalk-char on the morphological characteristics and physiological metabolism of different diameters root in cotton was studied in this paper, which will provide a theoretical support for high-yield and high-efficiency cotton production. Taking cotton as the research object and cotton stalk-char as experimental material, three treatments, including conventional fertilization, conventional fertilization + 22.5×10^3 kg/hm² of cotton stalk-char, and conventional fertilization + 45.0×10^3 kg/hm² of cotton stalk-char, were setup in this experiment, so as to study the effect of cotton stalk-char on the cotton physiological indexes such as morphological characteristics, indoleacetic acid, malon dialdehyde and catalase activity in cotton roots. The addition of cotton stalk-char promoted the increase of cotton growth and yield. Compared with the conventional fertilization treatment, the plant height of the cotton significantly increased by 9.02%–14.02%, and the cotton yield increased by 5.70%–7.71%, but the difference was not significant; however, underground part and yield were suppressed with excessive addition of cotton stalk-char (45.0×10^3 kg/hm²) in sandy soil. Length, area and volume in fine root of cotton increased by 7.80%–32.60%, 100.00%–111.11% and 83.87%–129.03% respectively in the grey desert soil under the addition of cotton stalk-char compared with the conventional fertilization treatment. The catalase activity increased by 194%–423% in grey desert soil, and by 155% in sandy soil (22.5×10^3 kg/hm²), but addition of cotton stalk-char damaged the medium and coarse root length and surface in sandy soil. The addition of cotton stalk-char increased the height of cotton plant and the growth of cotton fine roots, which was conducive to the formation of cotton root morphology. The addition of cotton stalk-char increased the catalase activity of cotton roots and protected cotton root cells from hydrogen peroxide, so the absorption and utilization of water and fertilizer were promoted by the root system, and the cotton yield was increased. At the same time, the effect of cotton stalk-char addition on gray desert soil was greater than that in windy sand soil.

Key words Biochar; Cotton; Root; Auxin; Physiological characteristics

Received 2021-01-11

Returned 2021-06-15

Foundation item National Natural Science Foundation of China (No. 31660073); National Key Research and Development Plan (No. 2017YFD0200803-04).

First author TANG Guangmu, male, master, associate research fellow. Research area: soil ecology and security. E-mail: tangjunhui5120@126.com

Corresponding author XU Wanli, male, Ph. D, research fellow. Research area: improvement and utilization of soil. E-mail: wlxu2005@163.com

(责任编辑: 潘学燕 Responsible editor: PAN Xueyan)