

不同配方生物炭改良盐渍土对小白菜和 棉花生长及光合作用的影响

李思平¹, 曾路生¹, 李旭霖¹, 柳新伟¹, 宋祥云¹, 王英平², 崔德杰¹

(1. 青岛农业大学资源与环境学院, 山东 青岛 266109; 2. 山东黄岛出入境检验检疫局, 山东 青岛 266555)

摘要: 针对盐渍土壤理化性质差、肥料利用率低和作物长势弱的问题, 利用不同配方生物炭进行土壤改良。采用盆栽试验的方法, 以小白菜和棉花为研究对象, 设置 5 个不同的处理: 不施肥(对照 CK0)、常规施肥(CK)、常规施肥+生物炭(C1)、常规施肥+生物炭+硝化抑制剂(C2)和常规施肥+生物炭+硫酸钙(C3), 研究不同配方的生物炭处理对小白菜和棉花生长及光合作用的影响。结果表明, 与常规施肥比较, C3 处理效果更明显。小白菜的株高和株重分别增加 32.7% 和 112.0%, 叶绿素含量与净光合速率分别提高 45.5% 与 32.9%; 胞间 CO₂ 浓度和蒸腾速率分别下降 15.0% 和 59.2%。光谱分析表明, C3 处理反射率更高, 叶片组织更完好。与 CK 比较, 生物炭处理同样促进棉花生长, 显著提高叶绿素含量, 降低叶片中丙二醛含量和过氧化氢酶活性, 增强抗逆性, 减少棉花损伤。同时, 降低了棉花叶片中胞间 CO₂ 浓度, 提高水分利用率。土壤分析表明, 生物炭配施改良剂能显著改善土壤理化性质, 与常规施肥相比, C2 处理的土壤有机质、速效磷和碱解氮含量分别提高 57.3%、22.9% 和 40.8%, 而对土壤速效钾和 pH 影响较小, C3 处理对土壤电导率有较大提高。因此, 实践中在改良盐渍土壤时, 需注意改良剂的合理施用, 防止土壤盐分的进一步积累。

关键词: 生物炭; 盐渍土壤; 小白菜; 棉花生理指标; 叶绿素; 光合参数

中图分类号: S156.4; S634.3; S562 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2019)02-0363-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.02.055

Amelioration of Saline Soil with Different Biochar Fertilization Formulas and Its Effects on Growth and Photosynthesis of *Brassica Chinensis* and Cotton

LI Siping¹, ZENG Lusheng¹, LI Xulin¹, LIU Xinwei¹, SONG Xiangyun¹, WANG Yingping², CUI Dejie¹

(1. College of Resources and Environment, Qingdao Agricultural University, Qingdao, Shandong 266109;

2. Shandong Huangdao Entry Exit Inspection and Quarantine Bureau, Qingdao, Shandong 266555)

Abstract: Aiming at the poor physicochemical properties, the low fertilizer use efficiency and the weak crop growth in saline soils, a saline soil was ameliorated with different biochar fertilizers in this study. *Brassica chinensis* and cotton were used as research materials in this pot experiment. Five different treatments were conducted, i. e., non-fertilized control group (CK0), conventional fertilization (CK), conventional fertilization + biochar (C1), conventional fertilization + biochar + nitrification inhibitor (C2), conventional fertilization + biochar + Calcium sulphate (C3). The growth and photosynthesis of *Brassica chinensis* and cotton were measured. The results showed that C3 treatment was more effective in crop growth than that of CK. The plant height and weight of *Brassica chinensis* were increased by 32.7% and 112.0%, respectively, and the chlorophyll content and net photosynthetic rate were increased by 45.5% and 32.9%, respectively. The intercellular CO₂ concentration and transpiration rate were decreased by 15.0% and 59.2%, respectively. Spectral analysis indicated that the C3 treatment had higher reflectance and better leaf tissue. The experimental results also indicated that, compared to CK, biochar treatments promoted cotton growth, expressed as increase in chlorophyll content significantly, decreasing malon dialdehyde content and catalase activity in leaves, leading to the enhanced stress resistance and the reduced plant damage. At the same time, the intercellular CO₂ concentration in cotton leaves was reduced, and the water use efficiency was improved. Soil analysis suggested that the application of biochar significantly improved the physical and chemical properties of soil. Compared with CK,

收稿日期: 2018-10-06

资助项目: 山东省重点研发计划项目(2016CYJS05A01, 2017CXGC0303); 山东省现代农业产业体系棉花岗位创新团队项目(SDAIT-03-06)

第一作者: 李思平(1996—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事农业资源与环境研究。E-mail: lisiping911@163.com

通信作者: 曾路生(1966—), 男, 副教授, 博士, 主要从事土壤与肥料教学与研究。E-mail: zenglush@163.com

the organic matter content, available phosphorus content and alkali nitrogen content in C2 treated soil were increased by 57.3%, 22.9% and 40.8%, respectively. However, the influence on soil available potassium content and pH value was not obviously, and C3 treatment had an obvious increase in soil electrical conductivity. Therefore, when ameliorating the saline soil, it is necessary to pay attention to the reasonable application amount of the modifiers to prevent further accumulation of soil salinity.

Keywords: biochar; saline soil; *Brassica chinensis*; cotton physiological index; chlorophyll; photosynthetic parameters

土壤盐渍化不利于作物生长,严重影响作物的养分吸收,导致生长衰退,甚至脱水枯死^[1]。盐渍化致使大量低产田出现,使土壤资源难以高效利用,农业综合生产力下降,严重影响当地农业生产和农民的生活水平^[2-3]。当前,我国的盐碱土地面积已达到 9 913 万 hm^2 ,盐渍化仍是限制我国农林业发展的主要障碍之一。因此,对盐碱地的改良与修复具有重要现实意义。通过对盐渍土壤的改良,改善土壤生态环境,可以扩大耕地面积,促进当地经济发展,提高人民的生活水平^[4]。

改良盐渍土壤的常规方法有大水洗盐、节水灌溉、增施有机肥、降低地下水位等,有学者^[5-6]发现,种植盐地碱蓬等盐生植物也能降低滨海盐渍土的含盐度。近年来,国内外利用生物炭改良盐渍土壤取得了一些成效。孙军娜等^[7]通过研究糠醛渣及其生物炭对盐渍土壤理化性质的影响,表明生物炭能有效提高土壤总有机碳含量,降低土壤碱化程度;杨放等^[8]研究发现,用生物炭改良盐碱土能明显减少氮素淋失,增强土壤的持续供氮能力;Lin 等^[9]研究表明,生物炭可以提高盐渍土壤的生产力和碳固存,使生长在滨海盐渍土的小麦单株籽粒质量增加了 27.7%;Usman 等^[10]研究表明,生物炭可以使盐水灌溉系统中的番茄总产量比对照组增加 14.0%~43.3%,并认为生物炭可以有效地用作土壤改良剂,提高干旱条件下受盐分胁迫的砂质土壤生产力;Drake 等^[11]研究发现,在高盐碱土中施用生物炭能提高苗木高度,降低根系、地上部和土壤中锰、氮、硫的含量,在低盐碱土中施用生物炭提高了叶片中磷、钾、硫的含量,证实生物炭有助于盐碱地的再造林。

生物炭与其他改良剂组合用于盐渍土的改良效果需进一步探索。硝化抑制剂作为一种肥料增效剂,可抑制土壤中氮的亚硝化及硝化过程,延缓铵态氮向硝态氮的转化,从而减少土壤中硝态氮的积累与损失,提高土壤中氮素利用效率^[12]。硫酸钙作为一种土壤改良剂,钙离子可把土壤胶体表面吸附的代换性钠离子置换下来,随水淋洗掉,促进土壤团聚体的形成,改善盐渍土壤的通气透水性。硫酸根离子可平衡盐渍土壤中的碳酸根和重碳酸根离子,降低土壤 pH,改善土壤理化性质。同时,硫酸钙补充了土壤中钙素和硫素营养,促进作物生长^[13]。本试验利用生

物炭与硝化抑制剂、硫酸钙组合,探究不同配方生物炭处理改良盐渍土对小白菜和棉花生长及光合作用的影响,旨在寻找生物炭与其他改良剂的优化组合,为生物炭的农业应用与盐渍土壤的高效改良提供科学的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试作物为棉花“鲁棉 11 号”(山东省棉花研究中心育成)和小白菜(青岛市蔬菜林公司)。

供试土壤采自山东省东营市利津县北宋镇碾李村(37°23'N, 118°10'E)的盐渍土壤,选择有代表性的地块,走“S”形路线,多点采取 0—20 cm 土壤,样品充分混匀,自然风干后过 2 mm 筛备用。

试验中所需生物炭由木材为原材料烧制而成,硝化抑制剂由中科院沈阳应用生态所研发提供,硫酸钙为试剂公司购买。

1.2 试验设计

盆栽试验于 2017 年 4—9 月在青岛农业大学资源与环境学院实验场进行。风干过筛的土样充分混合后,分别称取 6.0 kg,置于口径 30 cm、底径 20 cm、高 20 cm 的塑料盆中,调节土壤的含水量为田间持水量的 65%。

设置 5 个不同处理:不施肥(对照 CK0)、常规施肥(CK)、常规施肥+生物炭(C1)、常规施肥+生物炭+硝化抑制剂(C2)、常规施肥+生物炭+硫酸钙(C3)。常规施肥按照基肥为 N:P₂O₅:K₂O 为 15:15:15 的复合肥 750 kg/hm²,追肥尿素为 225 kg/hm²。硝化抑制剂按 N 总量的 7‰加入,生物炭处理为 4 500 kg/hm²,硫酸钙为 7 500 kg/hm²。添加剂与土壤充分混匀,施入基肥。

种子采用直播,小白菜每盆 15 粒,棉花每盆 4 粒,常规管理。作物生长旺盛期时,分析测定植株的生长指标和生化指标。小白菜与棉花分别于 6 月 15 日和 9 月 28 日进行收获,收获后用土壤刀采集盆栽土样,用以分析土壤有机质、碱解氮、速效钾、速效磷和 pH 等指标的变化。

1.3 项目测定

(1)植物 SPAD 值采用日产 SPAD-520 型叶绿素仪进行测定;MDA 含量采用 TBA 法测定;CAT

活性采用滴定法测定。

(2)作物光合作用参数,选择晴天、少云的天气,利用美国汉莎公司生产的 CIRAD-3 仪器测定。叶绿素荧光参数,采用美国汉莎公司生产的 M-PEA 仪器测定;冠层光谱:采用北京爱万提斯生产的 Auaspel-ULS2048 光纤光谱仪,在作物旺盛期,采集不同处理的作物冠层光谱。测量时,选择晴朗、无风、少云天气,测量时间为 11:00—14:00,每次测量时采用白板进行校正。

(3)土壤理化性质采用常规分析方法。土壤有机质含量采用重铬酸钾容量法—外加加热法测定;碱解氮含量采用碱解扩散法测定;速效磷含量采用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提—钼锑抗比色法测定;速效钾含量采用醋酸铵浸提—火焰光度计法测定;土壤 pH

采用电位测定法;电导率采用电导仪法测定。

1.4 数据处理

试验数据应用 Excel 2003、DPS 软件进行分析和统计,用 LSD 法进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 生物炭改良盐渍土对小白菜生长指标的影响

由表 1 可知,与常规施肥的 CK 比较,不施肥处理的小白菜株高、株重、根长、根体积、叶宽等指标都要更小,说明肥料是作物生长的营养条件,合理施肥可促进作物增产。在常规施肥基础上,添加生物炭的 3 个处理均促进了小白菜生长指标的增加。其中,生物炭与硫酸钙组合的 C3 处理效果更好,小白菜的株高和株重分布增加 32.7%和 112.0%,根体积和叶宽分布增加 50.0%和 20.3%。

表 1 不同生物炭处理对小白菜生长指标的影响

处理	株高/ cm	比 CK/ %	株重/ g	比 CK/ %	根长/ cm	比 CK/ %	根体积/ cm ³	比 CK/ %	叶宽/ cm	比 CK/ %
CK0	7.0c	-32.7	1.1c	-56.1	6.6a	-2.9	0.07c	-41.7	2.51b	-36.5
CK	10.4b	—	2.5b	—	6.8a	—	0.12b	—	3.95a	—
C1	13.0ab	25.1	4.9a	96.0	8.2a	20.9	0.17a	41.7	4.49a	13.7
C2	12.7ab	22.1	4.6a	84.0	7.1a	4.4	0.15ab	25.0	4.60a	16.6
C3	13.8a	32.7	5.3a	112.0	7.3a	7.4	0.18a	50.0	4.75a	20.3

注:表中同列数据后的不同字母表示各处理差异显著(α=0.05)。下同。

2.2 生物炭改良盐渍土对小白菜叶绿素含量的影响

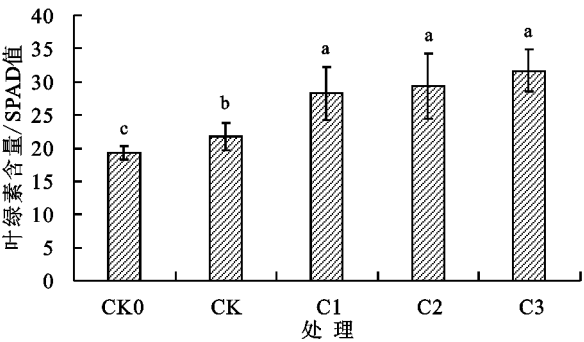
从图 1 可以看出,与常规施肥比较,不施肥处理的叶绿素含量更低,而添加生物炭的处理均具有较高的叶绿素含量,C1、C2 和 C3 处理分别比常规施肥分别增加 29.9%,35.2%和 45.5%,且与常规施肥处理具有显著差异。

生物炭与硫酸钙共同处理的 C3 更明显。与常规施肥比较,C3 处理的净光合速率上升 32.9%,胞间 CO₂ 浓度、气孔导度和蒸腾速率分别下降 15.0%,68.4%和 59.2%。

植物的胞间 CO₂ 利用率随着净光合速率的增长而提高,致使其浓度也相应降低;植物蒸腾系数与植物水分利用率呈反比关系,植物蒸腾系数越低,植物水分利用率就越高。通常情况下,气孔导度指数随着净光合速率的增长而降低,但在测光合作用速率时如果受到环境和温度的影响,或是由于作物的蒸腾作用过强,为使作物自身不受到伤害,保卫细胞可使气孔导度减小,以降低蒸腾作用。

2.4 生物炭改良盐渍土对小白菜光谱特征的影响

从图 3 可以看出,在不同处理下小白菜叶片光谱的反射率也存在着差异性。试验中小白菜叶片的光谱反射率的变化趋向相同,均在波长 480 nm 的蓝光处和 670 nm 的红光处,因为叶绿素的强吸收出现 2 个反射谷的现象。而在波长 560 nm 左右由于叶绿素的强反射产生形成 1 个反射峰。在可见光波段(350~750 nm)的反射率大小为:C3>C2>CK>CK0>C1,各处理差异较小。一般情况,反射率大小与叶绿素含量密切相关,反射率在 750 nm 左右达到最大。由于叶片内部的组织结构多次的反射和散射



注:图中不同字母表示处理间差异显著(α=0.05)。下同。

图 1 不同生物炭处理对小白菜叶绿素的影响

2.3 生物炭改良盐渍土对小白菜光合作用的影响

从图 2 可以看出,与常规施肥比较,没有施肥的 CK0 胞间 CO₂ 浓度(C_i)更高,说明光合作用强度更弱,而生物炭各个处理胞间 CO₂ 浓度整体更低,说明光合作用强度更强。经生物炭 3 个处理净光合速率(P_n)比常规施肥更高,而气孔导度(G_s)和蒸腾速率(T_r)均比常规施肥低。特别是在常规施肥基础上,

导致在 760~950 nm 波段内形成近红外反射平台,在此波段内反射率越高,表明叶片内部的组织结构越完好。在近红外波段(760~1 050 nm)内的平均反射

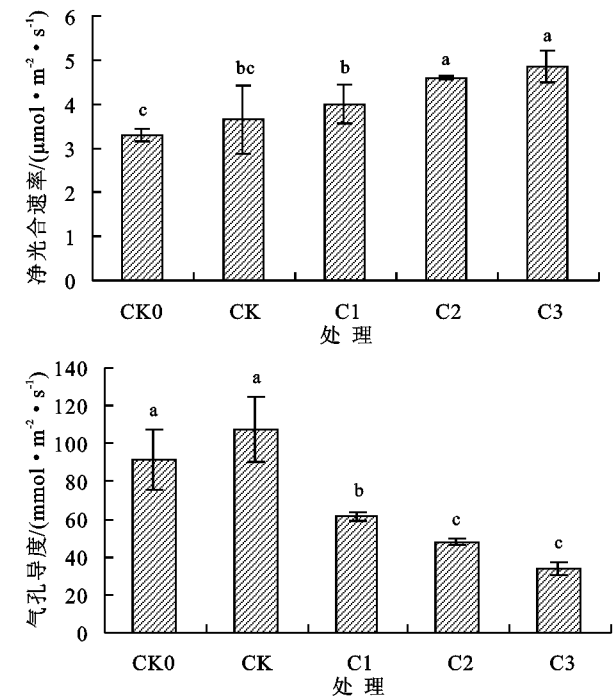


图 2 不同生物炭处理对小白菜光合参数的影响

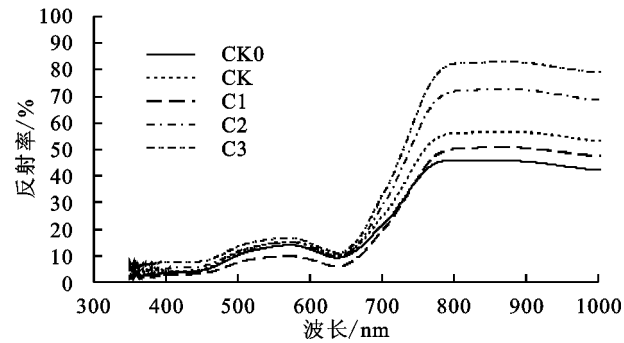


图 3 不同生物炭处理对小白菜光谱特征的影响

2.5 生物炭改良盐渍土对棉花生长指标的影响

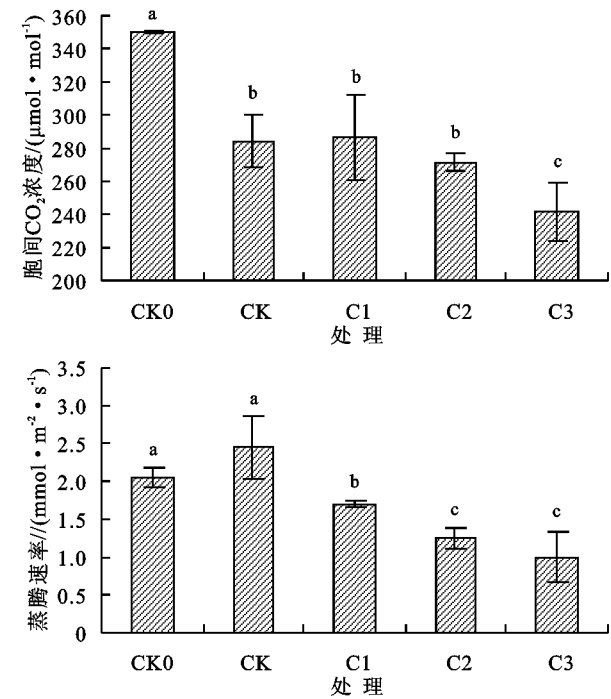
从表 2 可以看出,与小白菜试验相似,不同配方的生物炭处理对棉花的株高、株重、根长和叶面积均有一

表 2 不同生物炭处理对棉花生长指标的影响								
处理	株高/ cm	比 CK/ %	株重/ g	比 CK/ %	根长/ cm	比 CK/ %	叶面积/ cm ²	比 CK/ %
CK0	21.6b	-38.9	4.9b	-31.9	7.4b	-14.9	81.0b	-22.9
CK	35.4a	—	7.2b	—	8.7ab	—	105.0ab	—
C1	37.0a	4.5	9.8ab	36.1	11.2ab	28.7	119.7ab	14.0
C2	39.4a	11.3	9.6ab	33.3	11.0ab	26.4	153.7ab	46.4
C3	41.5a	17.2	11.1a	54.2	12.4a	42.5	169.4a	61.3

2.7 生物炭对棉花光合作用的影响

由表 3 可知,与常规施肥的 CK 相比,添加生物炭的 C1、C2 和 C3 处理棉花叶片中细胞间隙 CO_2 浓度分别降低 6.1%、26.4%和 18.4%,净光合速率分别提高 5.8%、15.4%和 9.6%,而水分利用率分别提高 20.0%、40.0%、33.3%。在试验中,C2 与 C3 处

率大小为: $\text{C3} > \text{C2} > \text{CK} > \text{C1} > \text{CK0}$,且差异明显,特别是 C3 处理反射率最高,并向近红外波段偏移,叶片组织更完好。



定促进作用。其中,生物炭与硫酸钙共同组合的 C3 处理具有较好的改良效果,棉花的株高、株重、根长和叶面积分别增加了 17.2%、54.2%、42.5%和 61.3%。其次,生物炭与硝化抑制剂组合的 C2 处理,也表现较好。

2.6 生物炭对棉花叶绿素、丙二醛和过氧化氢酶活性的影响

由图 4 可知,与常规施肥相比,不同配方的生物炭处理显著地增加了棉花叶绿素的含量。其中,C1、C2 和 C3 处理分别增加 19.1%、11.5%和 15.1%。降低了棉花叶片中丙二醛含量和过氧化氢酶的活性,其中,C3 处理效果更好,丙二醛含量和过氧化氢酶的活性分别降低 74.2%和 49.1%。

理均表现出较好的效果。

2.8 生物炭对植棉土壤理化性质的影响

由于棉花生长时间较长,试验处理对土壤理化性质影响更明显。由表 4 可知,与常规施肥的 CK 相比,添加生物炭的各个处理对土壤理化性质的变化产生了一定的影响。其中,对土壤有机质的增加幅度更明

显,C1、C2 和 C3 处理分别增加 55.5%、57.3%和53.6%。其次,较显著的增加了土壤速效磷和碱解氮含量,对土壤速效钾和土壤 pH 影响不明显,C3 处理对土壤电导率有较明显的增加,比 CK 提高 39.7%。

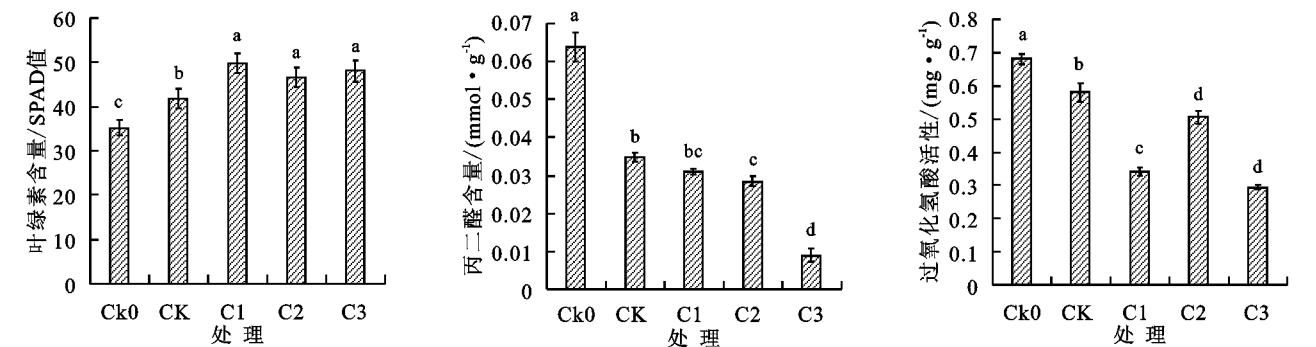


图 4 不同生物炭处理对棉花叶绿素、丙二醛和过氧化氢酶活性的影响

表 3 不同生物炭处理对棉花光合参数的影响

处理	胞间 CO ₂ 浓度 C _i / (μmol·mol ⁻¹)	比 CK/ %	气孔导度 G _s / (mmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	比 CK/ %	净光合速率 P _n / (μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	比 CK/ %	蒸腾速率 T _r / (mmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	比 CK/ %	水分利用率 W _u / (g·kg ⁻¹)	比 CK/ %
CK0	212.0a	2.7	102.5a	50.7	4.9a	-13.5	9.1a	42.2	0.70a	-6.7
CK	206.5 a	—	68.0b	—	5.2a	—	6.4bc	—	0.75a	—
C1	194.0 a	-6.1	63.5b	-6.6	5.5a	5.8	5.9c	-7.8	0.90a	20.0
C2	152.0 a	-26.4	42.0c	-38.2	6.0a	15.4	4.1d	-36.0	1.05a	40.0
C3	168.5 a	-18.4	66.0b	-11.8	5.7a	9.6	5.6b	-12.5	1.00a	33.3

表 4 不同生物炭处理对植棉土壤理化性质的影响

处理	有机质/ (g·kg ⁻¹)	比 CK/ %	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	比 CK/ %	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)	比 CK/ %	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)	比 CK/ %	pH	比 CK/ %	电导率/ (μS·cm ⁻¹)	比 CK/ %
CK0	9.8b	-10.9	37.3b	-10.1	13.5b	-26.6	72.6b	-3.5	7.83a	-0.51	192.7b	-24.7
CK	11.0b	—	41.5b	—	18.4b	—	75.2ab	—	7.87a	—	255.9ab	—
C1	17.1ab	55.5	52.5a	26.5	28.3a	53.8	75.8ab	0.8	7.91a	0.51	307.5ab	20.2
C2	17.3a	57.3	51.0ab	22.9	25.9a	40.8	76.1ab	1.2	7.80a	-0.88	295.5ab	15.5
C3	16.9ab	53.6	56.5a	36.1	28.7a	56.0	80.4a	6.9	7.95a	1.01	357.5a	39.7

3 讨论

生物炭改良盐渍土能促进作物的生长发育。杨艳丽等^[14]研究表明,用 2%生物质炭配合盐酸处理轻度苏打盐渍化土壤,燕麦株高增加 6.3%,干重增加 65.5%;Wang 等^[15]试验发现,不添加生物炭的重度盐碱地小麦种子萌发率为 0,而添加 45%生物炭后,小麦种子萌发率高达 48.9%。本试验中添加生物炭处理与常规施肥相比,小白菜和棉花的株高、株重、根长分别提高 25.1%、96.0%、20.9%和 4.5%、36.1%、28.7%。究其原因:生物炭除为土壤微生物提供碳源外,还含有一定量的 N、P、K 等元素,能作为营养供应源为作物的生长发育过程提供必需的养分^[16];另外,生物炭能促进土壤团粒的形成,吸附土壤中的水和养分,延迟释放,减弱其在土壤中的迁移与转化,促进作物对养分的吸收与利用^[17-19]。

生物炭改良盐渍土壤可提高作物的光合能力。张芙蓉等^[20]研究发现,生物炭处理盐渍土对甜瓜开花期净光合速率和气孔导度分别提高 14.3%和 70.0%;韩光明等^[21]研究表明,施用生物炭提高棉花叶片的净光合速率、气孔导度、光合能力及表观量子效率。本研究发现,在小白菜试验中,添加硫酸钙比单一施用生物

炭的叶绿素含量增加 12.0%。叶绿素含量的升高可以提高作物的光能利用率,从而提高光合速率^[22]。另外,在近红外波段,小白菜在 C3 处理下光谱反射率最高,说明硫酸钙与生物炭配合施用下,作物的内部结构较好。在棉花试验中,添加硝化抑制剂比单一施用生物炭的水分利用率提高 16.6%,胞间 CO₂ 浓度降低 21.6%,说明生物炭与硝化抑制剂组合更有利于提高棉花的光和能力,而与硫酸钙组合更有利于提高小白菜的光和能力。究其原因:生物炭除了能固持土壤养分促进作物发育外,还可以吸附部分酚酸类化感物质,降低其有害浓度,从而提高棉花的光合能力^[23]。

生物炭配合改良剂显著改善盐渍土壤的理化性质。韩剑宏等^[24]利用生物炭和脱硫石膏混合施用改良盐碱土,降低土壤盐碱度,提高土壤养分含量。本试验发现,对于植棉土壤,生物炭可以有效提高土壤有机质、碱解氮和有效磷的含量,尤其是在生物炭与硫酸钙组合下,土壤养分含量显著增加。相关研究^[25]认为,生物炭中的有机大分子和空隙结构,在施入土壤后易产生大的团聚体,增加对土壤养分的吸附和保持,特别是对 NH₄⁺ 有很强的吸附作用。生物炭中碳含量很高且不易降解,这是土壤有机质含量增加的主要原因^[26]。生物炭会吸附土

壤中的磷酸根,减少有效磷的淋溶,促进有机态磷的矿化,因此速效磷的含量显著增加^[27]。

4 结论

(1)生物炭改良盐渍土壤显著增加作物的株高、株重、叶宽、根体积等生长指标。其中,常规施肥与生物炭、硫酸钙组合效果最优。小白菜的株高和株重分别增加 32.7%和 112.0%。生物炭还能有效降低棉花叶片中丙二醛含量和过氧化氢酶活性,提高抗逆性,减少损伤程度,延缓植株衰老。

(2)常规施肥下,生物炭与硫酸钙组合,小白菜和棉花的叶绿素含量分别提高 45.5%和 15.1%,增强对 CO₂ 的吸收能力,降低叶片的气孔导度和蒸腾速率,棉花的水分利用率提高 33.3%,从而提高光能利用率。

(3)生物炭与硫酸钙组合显著增加土壤有机质、碱解氮和速效磷的含量,与常规施肥相比分别提高 53.6%,36.1%和 56.0%,但对速效钾和土壤 pH 影响不明显。同时,土壤电导率增加 39.7%,说明土壤盐分有一定的增加。因此,实践中需注意合理施用改良剂用量,防止土壤盐分的进一步积累。

参考文献:

- [1] Li J G, Pu L J, Han M, et al. Soil salinization research in China: Advances and prospects[J]. Journal of Geographical Sciences, 2014, 24(5): 943-960.
- [2] 周健民. 浅谈我国土壤质量变化与耕地资源可持续利用[J]. 中国科学院院刊, 2015, 30(4): 459-467.
- [3] 马晨, 马履一, 刘太祥, 等. 盐碱地改良利用技术研究进展[J]. 世界林业研究, 2010, 23(2): 28-32.
- [4] 邵华伟, 孙九胜, 胡伟, 等. 新疆盐碱地分布特点和成因及改良利用技术研究进展[J]. 黑龙江农业科学, 2014(11): 160-164.
- [5] 王鹏山, 张金龙, 苏德荣, 等. 不同淋洗方式下滨海沙性盐渍土改良效果[J]. 水土保持学报, 2012, 26(3): 136-140.
- [6] 林学政, 沈继红, 刘克斋, 等. 种植盐碱地修复滨海盐渍土效果的研究[J]. 海洋科学进展, 2005, 23(1): 65-69.
- [7] 孙军娜, 董陆康, 徐刚, 等. 糠醛渣及其生物炭对盐渍土理化性质影响的比较研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(3): 532-538.
- [8] 杨放, 李心清, 荆英, 等. 生物炭对盐碱土氮淋溶的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(5): 972-977.
- [9] Lin X W, Xie Z B, Zheng J Y, et al. Effects of biochar application on greenhouse gas emissions, carbon sequestration and crop growth in coastal saline soil[J]. European Journal of Soil Science, 2015, 66(2): 329-338.
- [10] Usman A R A, Al-Wabel M I, Yong S O, et al. Conocarpus biochar induces changes in soil nutrient availability and tomato growth under saline irrigation[J]. Pedosphere, 2016, 26(1): 27-38.

- [11] Drake J A, Cavagnaro T R, Cunningham S C, et al. Does biochar improve establishment of tree seedlings in saline sodic soils? [J]. Land Degradation and Development, 2016, 27(1): 52-59.
- [12] 皮荷杰, 曾清如, 蒋朝晖, 等. 两种硝化抑制剂对不同土壤中氮素转化的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(1): 68-72.
- [13] 黄明杰, 张杰. 硫酸钙在农业中的应用简述[J]. 南方农业, 2016, 10(7): 58-60.
- [14] 杨艳丽, 李秀军, 陈国双, 等. 生物炭与盐酸配施对苏打盐渍土理化性状的影响研究[J]. 土壤与作物, 2015(3): 113-119.
- [15] 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, 5(11): 116-119.
- [16] 刘阿梅, 向言词, 田代科, 等. 生物炭对植物生长发育及重金属镉污染吸收的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(5): 193-198.
- [17] 黄德荣, 衡德茂, 倪宏章, 等. 施用生物炭对土壤和作物的影响[J]. 安徽农业科学, 2015(2): 130-132.
- [18] Chen Y, Shinogi Y, Taira M, et al. Influence of biochar use on sugarcane growth, soil parameters, and groundwater quality[J]. Australian Journal of Soil Research, 2010, 48(7): 526-530.
- [19] 陈红霞, 杜章留, 郭伟, 等. 施用生物炭对华北平原农田土壤容重、阳离子交换量和颗粒有机质含量的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(11): 2930-2934.
- [20] 张芙蓉, 赵丽娜, 张瑞, 等. 生物炭对盐渍化土壤改良及甜瓜生长的影响[J]. 上海农业学报, 2015(1): 54-58.
- [21] 韩光明, 刘东, 孙世清, 等. 生物炭对不同连作年限棉田棉花光合特性的影响[J]. 湖北农业科学, 2015(24): 6202-6206.
- [22] 张学艳, 曹莹, 孟军, 等. 生物炭对镉胁迫下水稻生长及光合产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2016, 45(5): 97-101.
- [23] Wittenmayer L, Szabó K. The role of root exudates in specific apple (*Malus × domestica* Borkh.) replant disease (SARD) [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2015, 163(4): 399-404.
- [24] 韩剑宏, 李艳伟, 张连科, 等. 生物炭和脱硫石膏对盐碱土壤基本理化性质及玉米生长的影响[J]. 环境工程学报, 2017, 11(9): 5291-5297.
- [25] Dong X, Guan T, Li G, et al. Long-term effects of biochar amount on the content and composition of organic matter in soil aggregates under field conditions[J]. Journal of Soils and Sediments, 2016, 16(5): 1481-1497.
- [26] 张瑞, 杨昊, 张芙蓉, 等. 生物竹炭改良崇明滩涂盐渍化土壤的试验研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(12): 2404-2411.
- [27] Yao Y, Gao B, Zhang M, et al. Effect of biochar amendment on sorption and leaching of nitrate, ammonium, and phosphate in a sandy soil[J]. Chemosphere, 2012, 89(11): 1467-1471.