

## 生物炭和黄腐酸对滨海滩涂盐碱地土壤性质的提升

孙运朋<sup>1,2</sup>, 杨劲松<sup>1\*</sup>, 姚荣江<sup>1</sup>, 陈小兵<sup>3</sup>

(1.中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008;  
2.中国科学院大学, 北京 100049; 3.中国科学院烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264003)

**摘要:**为探讨生物炭和黄腐酸对滨海滩涂围垦盐碱地的改良作用, 采用田间玉米种植试验法, 设置生物炭使用量 7.5 t/hm<sup>2</sup> (BC1)、30 t/hm<sup>2</sup> (BC2) 和黄腐酸用量 1.5 t/hm<sup>2</sup> (FA) 及其组合, 共 6 种处理: CK、BC1、BC2、FA、BC1+FA、BC2+FA, 研究材料施加对土壤重要盐碱状况表征指标的影响。结果表明, BC2 处理降低土壤容重, 但低用量 BC1 处理下土壤容重没有降低, 研究区土壤呈逐渐自然板结退化状态; 随着生物炭施用量的增加, 土壤持水能力呈减小的趋势。生物炭和黄腐酸施用明显提高土壤有机质含量, BC2+FA 最高, 达到 6.31 g/kg; 各处理中, 周期性脱盐和返盐现象在各处理间的土壤表层呈现一致规律, 但 BC1+FA 和 BC2+FA 处理的盐分累积明显低于其他处理。结果表明适量生物炭和黄腐酸施用可提高土壤肥力, 改善土壤结构, 抑制盐分累积, 有利于滩涂围垦土地的快速耕地化利用。生物炭使用量为 30 t/hm<sup>2</sup> 并黄腐酸用量 1.5 t/hm<sup>2</sup> 处理效果最好。

**关键词:** 生物炭; 黄腐酸; 水稳性团聚体; 滩涂围垦

doi: 10.13304/j.nykjdb.2018.0357

中图分类号: S156.4 文献标识码: A 文章编号: 1008-0864(2019)08-0115-07

## Effects of Biochar and Fulvic Acid Application on Soil Properties in Tidal Flat Reclamation Region

SUN Yunpeng<sup>1,2</sup>, YANG Jinsong<sup>1\*</sup>, YAO Rongjiang<sup>1</sup>, CHEN Xiaobing<sup>3</sup>

(1.State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; 3.Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Shandong Yantai 264003, China)

**Abstract:** In order to investigate the function of biochar and fulvic acid on improving coastal salty-alkalinity land, this paper adopted field corn planting experimental method in June 2015; and set up 6 treatments: CK, BC1, BC2, FA, BC1+FA, BC2+FA, applying biochar 7.5 t/hm<sup>2</sup> (BC1), 30 t/hm<sup>2</sup> (BC2), fulvic acid 1.5 t/hm<sup>2</sup> (FA) and their combinations; and studied the effects of additional materials on characteristic indexes of important soil salinity-alkalinity situation. The results indicated that BC2 treatment could reduce soil bulk density, but soil bulk density was not reduced under treatment of low biochar application quantity (BC1), and soil in research area showed a gradual degradation state of natural hardening. With the increase of biochar applying quantity, soil water holding capacity showed a degeneration tendency. Application of biochar and fulvic acid significantly improved the organic matter contents in soil, which was the highest level under BC2+FA condition, reaching 6.31 g/kg. Among all treatment, the phenomenon of periodic desalting and accumulation of salt in the surface soil showed an identical rule, but the salt accumulation under BC1+FA and BC2+FA treatments was obviously lower than that of the other treatments. The results indicated that application of biochar and fulvic acid could increase soil fertility, improve soil structure, restrain salt accumulation and was in favour of remoulding coastal beach saline-alkali land for rapid arable land utilization. The treatment of 30 t/hm<sup>2</sup> biochar combined with 1.5 t/hm<sup>2</sup> fulvic acid had the best result.

收稿日期: 2018-06-13; 接受日期: 2019-01-24

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200303, 2016YFC0501309, 2016YFC0501201); 中国科学院重点部署项目(KFZD-SW-112-03-02); 国家自然科学基金委员会-山东联合基金重点支持项目(U1806215); 江苏省重点研发计划(现代农业)重点项目(BE2015337, BE2017337); 中国科学院南京土壤研究所“一三五”计划和领域前沿项目(ISSASIP1633)资助。

作者简介: 孙运朋, 博士研究生, 主要从事盐渍土土壤改良修复研究。E-mail: ypsun@issas.ac.cn。\* 通信作者: 杨劲松, 研究员, 博士生导师, 主要从事盐碱地资源可持续利用研究。E-mail: jsyang@issas.ac.cn

**Key words:** biochar; fulvic acid; water stable aggregate; tideland reclamation

生物炭(biochar, BC)是有机物质在缺氧或无氧条件下高温热解(<700℃)形成的一种富炭、多孔的多环芳烃物质。与木炭不同,生物炭最早用来描述一种由高粱秆制备的、用于吸附有害气体的活性炭,后 Johannes 等<sup>[1]</sup>在其著作中将生物炭特指为主要在土壤中使用,用来提高土壤作物产量、增加碳储量、改善土壤透水性等的一种炭化有机物。

我国海岸线绵长,滨海盐碱地宜耕地大都是中低产田,土壤盐渍化问题严重制约着农业高效发展。淡水资源匮乏、地下水矿化度高伴随着土壤结构性差、有效养分低等障碍因素。利用外源物质添加改善土壤结构,以求达到改土增产的目的,被认为是一种有效的改良土壤盐渍化的手段<sup>[2,3]</sup>。生物炭呈碱性,成品中还含有大量的碱性离子<sup>[4]</sup>在酸性土等土壤中应用效果显著<sup>[5-7]</sup>,但在盐碱地改良应用方面富有争议性<sup>[8-10]</sup>。生物炭密度远小于土壤且结构和物质组成稳定,在土壤中可以长期固定存在,能有效降低板结土壤的容重、提高土壤孔隙度,可以将这些特性充分应用于盐渍化土壤治理。生物炭因其制造材料、设备、方法的多元性<sup>[11-13]</sup>,尚缺乏一个广泛认可的组织制定出行业内接受的分类标准。生物炭的碱性特征<sup>[14]</sup>及生产过程中产生的不稳定有害毒物<sup>[15,16]</sup>是制约其在滨海盐碱地应用的主要障碍。单一的管控措施并不能很好的遏制土壤盐碱障碍问题,采取不同物料组合的方式已被证明是一种非常有效的治理方法。黄腐酸(fulvic acid, FA)是腐植酸类分子量较小的高分子有机化合物<sup>[17]</sup>,含有多种活性官能团,具有较强的生物活性,容易被植物吸收,而且呈酸性,是配合生物炭进行盐渍化改良的理想材料。

开发生物炭基肥用于农业生产或土壤改良,已在许多研究中证明其实用价值<sup>[18-20]</sup>。我国每年有大约8亿t作物秸秆,40%用于焚烧<sup>[21]</sup>将这些农业资源进行生物炭质化可以缓解农业生产矛盾,适合在发展中国家推广<sup>[22]</sup>,同时也应留意环境效益与风险评估<sup>[23]</sup>。已有研究表明,生物炭与无机肥料或腐植酸类混合使用,可以达到缓释肥料提高肥效的目的,改善作物生境<sup>[18,24-26]</sup>,但将生物炭与黄腐酸应用于盐碱地治理的研究还有待补充。本研究即使用生物炭和黄腐酸,研究田间试验条件下两种材料施用对土壤性状的影响,为盐碱地治理提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

研究区位于江苏省东台市黄海原种场(32°38'42.01"N, 120°54'8.04"E),东距黄海约2 km,西临东台市弼港镇。试验田由滩涂围垦地改造而成,围垦时间是2005年<sup>[27]</sup>。当地地处北亚热带季风气候区,有明显的海洋性季风气候特征,四季分明,年均温度14.6℃,风速3.3 m/s,相对湿度81%,全年无霜期达213 d。年均降水量1 042 mm,小于年均蒸发量1 417 mm。降雨集中在6~8月,占全年降水量的70%。地下水位低,约1.5 m左右。周期性脱盐与返盐现象明显,淡水来源主要靠雨水。土壤肥力较为贫瘠,盐分空间分布存在变异性,土壤基本特征列于表1。

### 1.2 供试材料

供试生物炭为河南三利新能源有限公司生产的小麦秸秆生物炭,其基本属性特征为:pH 8.1(BC:水=1:5)、电导率125 μS/cm、全氮含量

表1 试验地土壤基本特征

Table 1 Basic soil properties of study locality.

土壤性质 Soil property	电导率 (μS/cm) Electric conductivity (μS/cm)	pH	容重 (g/cm <sup>3</sup> ) Bulk density (g/cm <sup>3</sup> )	砂粒质量 分数 Sand content	粉砂粒质 量分数 Silt content	黏粒质 量分数 Clay content	有机质 含量 Organic matter content	全氮含量 (g/kg) Total nitrogen content (g/kg)	碱解氮含量 (mg/kg) Available phosphorus content (mg/kg)	有效磷含量 (mg/kg) Avaliable phosphorus content (mg/kg)	速效钾含量 (mg/kg) Available potassium content (mg/kg)
平均值 Mean	2150	8.62	1.37	3.48%	75.76%	20.76%	4.66%	0.48	63.00	10.20	112.32

3.29 g/kg、全磷含量 6.3 g/kg、全钾含量 19.2 g/kg、全碳含量 332 g/kg、灰分含量 27.4%; 试验所用黄腐酸是由江西红土地腐植酸有限公司提供的生化黄腐酸, 为 100~200 目棕黄色粉末, 黄腐酸(干基)含量大于 90% pH 6。玉米品种选用玉米苏玉 10 号, 购自东台市弶港镇农资公司。

### 1.3 试验设计

试验于 2015 年 6 月开始, 平整土地后划定试验区。共设 6 个处理, 具体处理如下: 对照(CK): 常规种植, 单施无机肥, 不施生物炭和黄腐酸; 单施生物炭(BC1): 生物炭(7.5 t/hm<sup>2</sup>); 单施生物炭(BC2): 生物炭 30 t/hm<sup>2</sup>; 单施黄腐酸(FA): 黄腐酸 1.5 t/hm<sup>2</sup>; 低量生物炭和黄腐酸(BC1+FA): 生物炭 7.5 t/hm<sup>2</sup> 和黄腐酸 1.5 t/hm<sup>2</sup>; 高量生物炭和黄腐酸(BC2+FA): 生物炭 30 t/hm<sup>2</sup> 和黄腐酸 1.5 t/hm<sup>2</sup>。每个处理同时设置 3 个重复, 不同处理的试验田块采用完全随机区组设计。各试验小区面积为 4 m×4 m=16 m<sup>2</sup>, 6 个不同处理共 18 个小区。

在玉米播种前, 先将各处理材料均匀洒在表土层, 用机械与基肥磷酸一铵和尿素(用量分别为 225 kg/hm<sup>2</sup> 和 150 kg/hm<sup>2</sup>) 一同与 0~20 cm 土壤混匀, 一周后进行玉米播种。在玉米出苗期、拔节期和抽穗期分别追施尿素 3 次, 施用量分别为 150 kg/hm<sup>2</sup>、150 kg/hm<sup>2</sup>、225 kg/hm<sup>2</sup>。试验期间病虫害、旱涝等问题参照常规处理方式统一进行。

### 1.4 样品采集和测定方法

样品采集共包含 3 个时期: ①试验开始前, 用取土器在每个小区内取 0~20 cm 土壤, 每个小区取 3 个点混合均匀。样品带回风干后测定土壤有机质、电导率和 pH; 用不锈钢环刀(高 5 cm, 直径 5 cm) 取表层原状土测定土壤容重、土壤田间持水量和饱和含水量。②玉米播种后, 到玉米成熟收获结束前(6~9 月), 每月 10 日左右于晴朗天气用土钻(华通 LX-1) 采集一次土样, 取样深度为 0~20 cm, 共取土 4 次, 土样风干后测定 EC 和 pH 值; ③玉米成熟时, 采集 0~20 cm 土样, 同时取表层原状土放置于塑料盒中带回实验室用土壤团聚体分析仪(东鑫 XY-100) 测定土壤水稳性团聚体组成。

样品测定具体方法<sup>[28]</sup>: 用重铬酸钾-外加热法测定土壤有机碳; 环刀法测定土壤容重、土壤田

间含水率、土壤饱和含水率和土壤田间持水量; 用湿筛法测定土壤水稳性团聚体组成。以土水比 1:5 配制土壤溶液, 用多参数电导率仪(Mettler Toledo S479 SevenExcellence, SUI) 测定浸提液电导率和 pH。

### 1.5 数据处理

用 SPSS 16.0 软件对测定数据进行统计分析, 用 One-way ANOVA 方法进行单因素方差分析, 用 LSD 法进行多重比较, 显著性水平设为 0.05。图片用 Sigma plot 12.5 软件制作。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理对土壤容重的影响

不同处理的试验前、后的土壤容重结果(图 1)显示, BC2 和 BC2+FA 处理的土壤容重下降, 分别比试验前降低 2.9% 和 1.4%。其他处理试验田的土壤容重相比处理前均增加, 增加约 0.08~0.09 g/cm<sup>3</sup>。所有处理中, CK 处理实验后的土壤容重增加量最大, 为 0.09 g/cm<sup>3</sup>。各个处理的试验前土壤容重相近, 各处理间无显著性差异。试验后 BC2 处理显著低于其他处理。结果表明, 施用低量生物炭没有起到降低土壤容重的作用, 单一施加高量生物炭可以降低土壤容重。

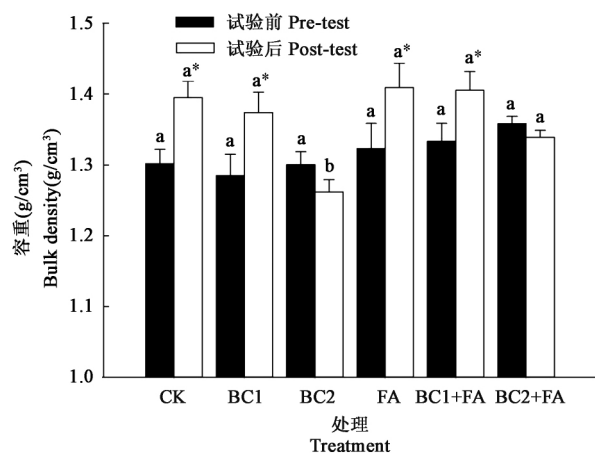


图 1 不同处理对土壤容重的影响

Fig.1 Soil bulk density of different treatments.

注: 不同小写字母表示同一时期不同处理间在  $P<0.05$  水平差异显著。\* 表示该处理实验后与试验前相比在  $P<0.05$  水平差异显著。

Note: Different small letters indicate significant difference between different treatments at the same period at  $P<0.05$  level. \* indicates significant difference at  $P<0.05$  level between post-test and pre-test.

### 2.2 不同处理对土壤持水性的影响

不同处理试验后的土壤含水量、饱和含水量和田间持水量结果(图2)显示,与CK相比,单一施加低量生物炭(BC1处理)时,显著提高了其土壤含水率、土壤饱和含水率和田间持水量,分别由16.69%、22.04%、20.88%提高至26.47%、38.31%、35.03%,土壤保水保肥能力增强。但BC2+FA的土壤保水能力未见增强,且其土壤各项含水率指标(15.69%、18.41%、17.65%)比CK还略低。

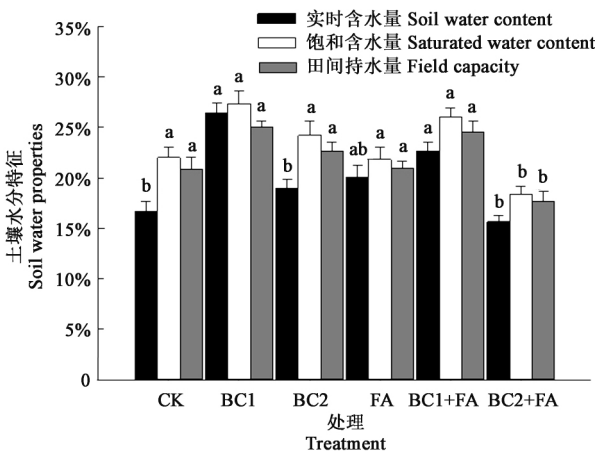


图2 玉米收获时不同处理间土壤水分特征  
Fig.2 Soil water content and field capacity after maize harvest.

注:不同字母表示同一指标不同处理间在  $P < 0.05$  水平差异显著。

Note: Different small letters of the same index indicate significant difference between treatments at  $P < 0.05$  level.

### 2.3 不同处理对土壤有机质含量的影响

不同处理试验前、后的土壤有机质含量结果(图3)显示,试验前土壤各处理间有机质含量无显著性差异,试验前土壤有机质含量在3.45~3.82 g/kg范围内,试验后各处理的有机质含量分别为:3.6 g/kg(CK)、4.7 g/kg(BC1)、5.9 g/kg(BC2)、4.37 g/kg(FA)、4.96 g/kg(BC1+FA)、6.31 g/kg(BC2+FA),可见添加生物炭或黄腐酸后,各处理的有机质含量均较CK升高,因两种材料都是有机物,施用量增加土壤有机质含量也会相应升高,且各处理与CK间呈显著差异。BC2和BC2+FA处理对有机质增加效果最显著。

### 2.4 不同处理对团聚体组成的影响

土壤水稳性团聚体是评价土壤结构稳定性的关键指标,是土壤生物、物理、化学等因素相互作用

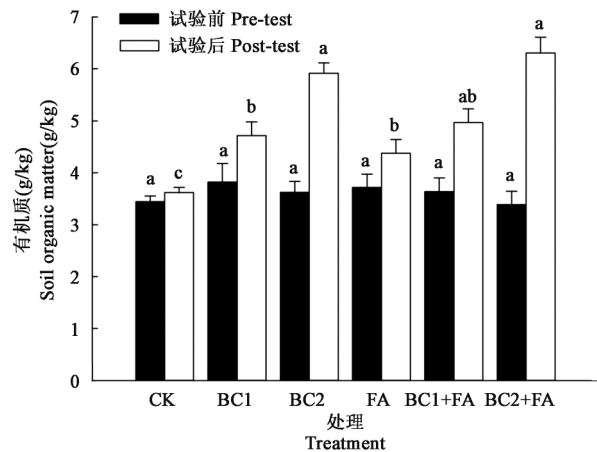


图3 不同处理对土壤有机质含量的影响

Fig.3 Soil organic matter content of different treatments.

注:同一时期不同小写字母表示处理间在  $P < 0.05$  水平差异显著。

Note: Different small letters at the same time indicate significant difference between treatments at  $P < 0.05$  level.

用的结果,同时也是土壤的养分库和微生物的生境。 $>0.25$  mm的团聚体称为大团聚体,是土壤结构的基本来源和肥力调节器,有着维持土壤水肥气热和疏松熟化层的功能。不同处理间的土壤团聚体以 $>2$  mm和0.25~2 mm的水稳性团聚体含量差异显著( $P < 0.05$ ,图4),BC1+FA处理对土壤改善效果最佳,两者含量分别为3.92%和5.11%。CK处理试验后两者含量分别为3.31%和4.26%。低用量生物炭(7.5 t/hm<sup>2</sup>)结合黄腐酸施用改善土壤团聚效果优于高用量生物炭(30 t/hm<sup>2</sup>)和黄腐酸组合处理。

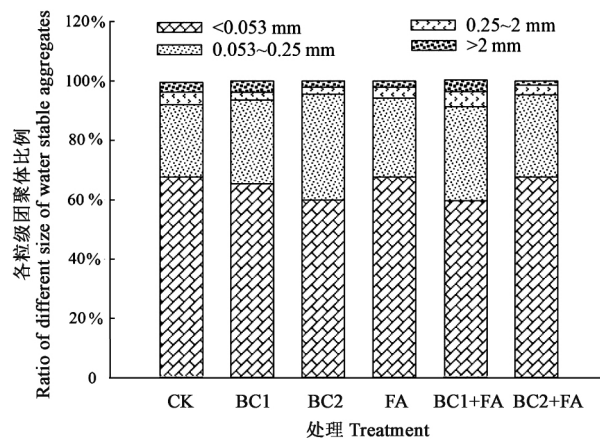


图4 不同处理对土壤团聚体组成的影响

Fig.4 Soil water-stable aggregates of different treatments.

### 2.5 不同处理对土壤盐分含量的影响

土壤浸提液电导率大小代表土壤中可溶性盐含量多少,因此常用来表征土壤盐害程度。玉米生长期不同处理的土壤浸提液电导率( $EC_{1:5}$ ) (图5)可见,各处理间6月份时的初始土壤 $EC_{1:5}$ 值存在显著差异,其中BC1、BC2、BC1+FA和BC2+FA处理的土壤浸提液电导率与CK相比下降,其中BC1和BC2+FA处理达到显著差异水平,说明生物炭的施加可以显著降低土壤盐分含量。试

验区土壤含盐量在6~9月份波动性规律一致,在7月份降雨季节,受雨水淋洗土壤中盐分得到雨水淋洗,土壤浸提液电导率均下降;而8、9月份时,日照增强降雨减少加快了土壤水分蒸发,可溶性盐沿毛细管向表土层累积,各处理的土壤浸提液电导率又均上升。至9月份,BC1+FA、BC2+FA处理的土壤浸提液电导率与其他处理显著下降,说明生物炭和黄腐酸混合处理抑制盐分在表层累积的效果最佳。

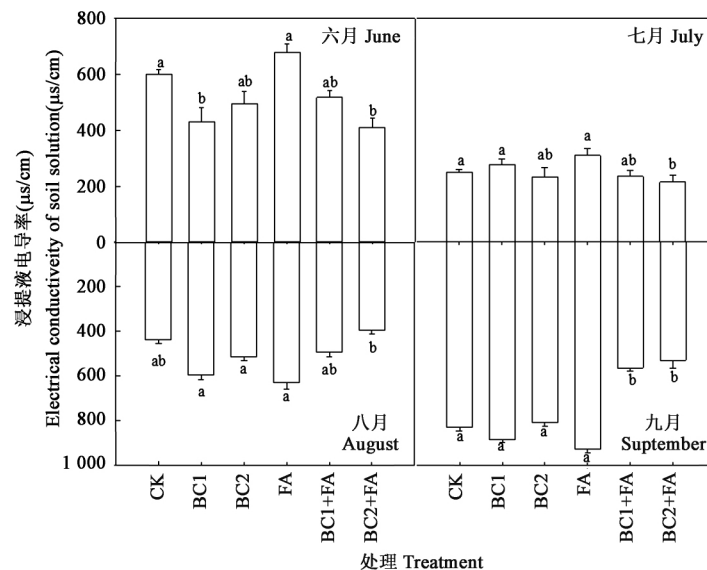


图5 不同处理对土壤浸提液电导率的影响

Fig.5 Electrical conductivity of soil solution under different treatments.

注:不同小写字母表示同一时期不同处理间在 $P<0.05$ 水平差异显著。

Note: Different small letters indicate significant difference at the same time between treatments at  $P<0.05$  level.

## 3 讨论

尽管已有研究证明腐植酸与生物炭综合利用可以提高作物产量改善生长环境<sup>[26]</sup>,但Jay等<sup>[29]</sup>在研究中发现短期内其对作物没有增产效果。因此,黄腐酸和生物炭在滨海研究地对作物产量的提高效果还需进一步验证。本研究中,低生物炭添加量并没有起到降低土壤容重的作用,这与大多数研究<sup>[18,30,31]</sup>中添加类似剂量生物炭可以显著降低土壤容重的结论略有差异,分析原因可能有以下几个方面:①将各处理所需物料施加到土壤0~20 cm土层时,下层土壤经过翻耕与浅层土混合,土壤颗粒组成发生变化;②雨季时雨水淋洗促使土壤板结,土壤结构得不到有效改善;③玉米

收获时期,土壤处于返盐状态,盐分在土壤表层积累。

土壤水稳性团聚体组成的差异更多地受到耕作方式的影响,土壤扰动造成了短期内的差异性(图4),与Liu等<sup>[32]</sup>研究结果一致。试验中添加改良材料改变了土壤结构,随着植物生长,土壤团聚体在土壤生物和水、空气作用下产生变化。高用量生物炭虽降低了土壤容重,但不利于土壤团聚体的形成,不能起到有效的保水保肥作用。

对比单施生物炭(BC1、BC2)和生物炭与黄腐酸混施(BC1+FA、BC2+FA)处理,单一施用黄腐酸能提高土壤保水持水性。分析不同处理的土壤容重(图1)和土壤水分特征(图2)发现,土壤容重的降低也没有增加土壤的持水能力。添加高量生物炭(BC2)使土壤容重降低,土壤的孔隙度

增加,土壤的饱和含水率和田间持水量也就降低,添加低量生物炭(BC1)则可以提高土壤保水持水性。这表明适量的生物炭添加量可以提高土壤的保水持水性<sup>[33]</sup>,但生物炭本身是疏水性质的,随着施用量的增加,反而不利于土壤性质的改善。黄腐酸添加对土壤容重的影响小于生物炭,黄腐酸可以使土壤的保水持水性维持在较为稳定的状态。生物炭和黄腐酸的添加显著提高了土壤有机质含量(图3),增加了土壤碳库储备<sup>[34]</sup>,生物炭用量越多,对土壤碳增量效果越明显<sup>[35]</sup>,同时有利于土壤有机物质的固存,进而提高土壤生物活性,促进土壤肥力转化与作物吸收<sup>[36]</sup>。

生物炭和黄腐酸联合使用时土壤盐分含量明显低于其他处理(图5),有效抑制了盐分在表层土壤的累积。生物炭和黄腐酸添加能够吸收盐分<sup>[37,38]</sup>,同时雨水冲刷及作物生长改善了土壤结构,阻止深层盐分随毛管水向土表移动。由于生物炭亲水性差,导致盐分在土体中迁移能力降低。生物炭和黄腐酸对土壤结构性质的改善作用是使生物炭及黄腐酸复合物料可以抑制土壤表层返盐的直接因素<sup>[26]</sup>。

将生物炭和黄腐酸施用到滨海盐碱地中,由于雨量过多短期内低用量生物炭对土壤结构改善效果不明显,生物炭和黄腐酸混合处理下,土壤表层抑制盐分累积效果明显,30 t/hm<sup>2</sup>生物炭和1.5 t/hm<sup>2</sup>黄腐酸混合施用对降低土壤盐分、提高土壤质量的应用效果最佳。

#### 参 考 文 献

- [1] Johannes L, Stephen J. Biochar for Environmental Management Science and Technology [M]. London: Earthscan, 2009, 1.
- [2] 郑普山,郝保平,冯悦晨,等.不同盐碱地改良剂对土壤理化性质、紫花苜蓿生长及产量的影响[J].中国生态农业学报, 2012, 20(9): 1216-1221.  
Zheng P S, Hao B P, Feng Y C, et al.. Effects of different saline-alkali land amendments on soil physicochemical properties and alfalfa growth and yield [J]. Chin. J. Eco-Agric., 2012, 20(9): 1216-1221.
- [3] 王继和,刘虎俊.加拿大阿尔伯塔省盐渍化土地治理与研究[J].干旱区研究, 1999, 16(1): 67-71.  
Wang J H, Liu H J. Saline soil management and research of Alberta in Canada [J]. Arid Zone Res., 1999, 16(1): 67-71.
- [4] Yuan J H, Xu R K, Zhang H. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures [J]. Bioresour. Technol., 102(3): 3488-3497.
- [5] Chintala R, Schumacher T E, McDonald L M, et al.. Phosphorus sorption and availability from biochars and soil/biochar mixtures [J]. Clean-Soil Air Water, 2013, 41(9): 1-9.
- [6] 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.  
Chen H X, Du Z L, Guo W, et al.. Effects of biochar amendment on cropland soil bulk density, cation exchange capacity, and particulate organic matter content in the North China Plain [J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2011, 22(11): 2930-2934.
- [7] 李冬,陈蕾,夏阳,等.生物炭改良剂对小白菜生长及低质土壤氮磷利用的影响[J].环境科学学报, 2014, 34(9): 2384-2391.  
Li D, Chen L, Xia Y, et al.. The effects of biochar on growth and uptake of nitrogen and phosphorus for Chinese cabbage in poor quality soil in Ningxia [J]. Acta Sci. Circum., 34(9): 2384-2391.
- [8] Akhtar S S, Andersen M N, Liu F. Biochar mitigates salinity stress in potato [J]. J. Agron. Crop Sci., 2015, 201(5): 368-378.
- [9] Thomas S C, Frye S, Gale N, et al.. Biochar mitigates negative effects of salt additions on two herbaceous plant species [J]. J. Environ. Manage., 2013, 129(15): 62-68.
- [10] 陈温福,张伟明,孟军.农用生物炭研究进展与前景[J].中国农业科学, 2013, 46(16): 3324-3333.  
Chen W F, Zhang W M, Meng J. Advances and prospects in research of biochar utilization in agriculture [J]. Sci. Agric. Sin., 2013, 46(16): 3324-3333.
- [11] Yin Y F, He X H, Gao R, et al.. Effects of rice straw and its biochar addition on soil labile carbon and soil organic carbon [J]. J. Integr. Agric., 2010, 13(3): 491-498.
- [12] Ashleigh J F, Malcolm A S, Andreas H, et al.. Production factors controlling the physical characteristics of biochar derived from phytoremediation willow for agricultural applications [J]. Bioenerg. Res., 2014, 7(1): 371-380.
- [13] Marx S, Chiyanzu I, Piyo N. Influence of reaction atmosphere and solvent on biochar yield and characteristics [J]. Bioenerg. Res., 2014, 164: 177-183.
- [14] Yuan J H, Xu R K, Zhang H. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures [J]. Bioenerg. Res., 2011, 102(3): 3488-3497.
- [15] Collison M, Collison L, Sakrabani D R, et al.. Biochar and carbon sequestration: A regional perspective [R]. UEA, Norwich: Low Carbon Innovation Centre, 2009.
- [16] Kusmierz M, Oleszczuk P. Biochar production increases the polycyclic aromatic hydrocarbon content in surrounding soils and potential cancer risk [J]. Environ. Sci. Pollut. R., 2014, 21(5): 3646-3652.
- [17] 回振龙,李朝周,史文煊,等.黄腐酸改善连作马铃薯生长发育及抗性生理的研究[J].草业学报, 2013, 22(4): 130-136.  
Hui Z L, Li C Z, Shi W X, et al.. A study on the use of fulvic acid to improve growth and resistance in continuous cropping of potato [J]. Acta. Pratacult. Sin., 2013, 22(4): 130-136.

- [18] Fagbenro J A , Oshunsanya S O , Oyeleye B A . Effects of gliricidia biochar and inorganic fertilizer on moringa plant grown in an Oxisol [J]. *Commun. Soil Sci. Plan.* , 2015 , 46( 5) : 619-626.
- [19] 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 博士学位论文 2012: 69-84.  
Zhang W M . Application and physicochemical properties of biochar on cropping [D]. Shenyang: Shenyang Agriculture University , Doctor dissertation , 2012: 69-84.
- [20] Hans P S , Claudia K , Claudio N , *et al.* . Biochar and biochar-compost as soil amendments to a vineyard soil: Influences on plant growth , nutrient uptake , plant health and grape quality [J]. *Agric. Ecosyst. Environ.* , 2014 , 191: 117-123.
- [21] Clare A , Shackley S , Joseph S , *et al.* . Competing uses for China's straw: The economic and carbon abatement potential of biochar [J]. *GCB Bioenergy* , 2015 , 7( 6) : 1272-1282.
- [22] Scholz S B , Sembres T , Roberts K , *et al.* . Biochar Systems for Smallholders in Developing Countries: Leveraging Current Knowledge and Exploring Future Potential for Climate-Smart Agriculture ( World Bank Studies) [M]. Washington: The World Bank , 2014.
- [23] Camps A M . Environmental benefits and risks of biochar application to soil [J]. *Agric. Ecosyst. Environ.* , 2014 , 191: 1-4.
- [24] 廖上强 陈延华 李艳梅 等. 生物炭基尿素对芹菜产量、品质及土壤硝态氮含量的影响 [J]. *农业资源与环境学报* , 2015 32( 5) : 443-448.  
Liao S Q , Chen Y H , Li Y M , *et al.* . Effect of biochar-based urea on yield and quality of celery and soil  $\text{NO}_3^-$ -N content [J]. *J. Agric. Res. Environ.* , 2015 , 32( 5) : 443-448.
- [25] Masahide Y , Yasuyuki O , Irhas F W , *et al.* . Effects of the application of charred bark of *Acacia mangium* on the yield of maize , cowpea and peanut , and soil chemical properties in South Sumatra Indones [J]. *Soil Sci. Plant Nutr.* , 2006 , 52 ( 4) : 489-495.
- [26] Zhang L , Sun X Y , Tian Y , *et al.* . Biochar and humic acid amendments improve the quality of composted green waste as a growth medium for the ornamental plant *Calathea insignis* [J]. *Sci. Hortic. Amsterdam* , 2014 , 176( 11) : 70-78.
- [27] Zhang J B , Yang J S , Yao R J , *et al.* . The effects of farmyard manure and mulch on soil physical properties in a reclaimed coastal tidal flat salt-affected soil [J]. *J. Integr. Agr.* , 2014 , 13( 8) : 1782-1790.
- [28] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社 2000.  
Bao S D . Soil Agrochemical Analysis [M]. Beijing: China Agriculture Press , 2000.
- [29] Jay C N , Fitzgerald J D , Hippias N A , *et al.* . Why short-term biochar application has no yield benefits: Evidence from three field-grown crops [J]. *Soil Use Manage.* , 2015 , 31( 2) : 241-250.
- [30] Inal A , Gunes A , Sahin O , *et al.* . Impacts of biochar and processed poultry manure , applied to a calcareous soil , on the growth of bean and maize [J]. *Soil Use Manage.* , 2015 , 31 ( 1) : 106-113.
- [31] Headlee W L , Brewer C E , Hall R B . Biochar as a substitute for vermiculite in potting mix for hybrid poplar [J]. *Bioenerg. Res.* , 2014 , 7( 1) : 120-131.
- [32] Liu Z , Chen X , Jing Y , *et al.* . Effects of biochar amendment on rapeseed and sweet potato yields and water stable aggregate in upland red soil [J]. *Catena* , 2014 , 123: 45-51.
- [33] Hallin I L , Douglas P , Doerr S H , *et al.* . The effect of addition of a wettable biochar on soil water repellency [J]. *Eur. J. Soil. Sci.* , 2015 , 66( 6) : 1063-1073.
- [34] Zhang M , Ok Y S . Biochar soil amendment for sustainable agriculture with carbon and contaminant sequestration [J]. *Carbon Manag.* , 2014 , 5( 3) : 255-257.
- [35] Mitra S , Singh P , Manzoor S , *et al.* . Can rice and wheat biochar amendment protect the carbon loss from tropical soils—An experimental study [J]. *Environ. Prog. Sustain.* , 2016 , 35 ( 1) : 183-188.
- [36] Li H , Wang Y , Wang T , *et al.* . Effect of biochar on organic matter conservation and metabolic quotient of soil [J]. *Environ. Prog. Sustain.* , 2015 , 34( 5) : 1467-1472.
- [37] Lashari M S . Biochar effects on soil salinity and improve soil fertility [A]. In: *The International Symposium on Soil Organic Matter Dynamics* [C]. China Nanjing , 2013.
- [38] Khaled H , Fawy H A . Effect of different levels of humic acids on the nutrient content , plant growth , and soil properties under conditions of salinity [J]. *Soil Water Res.* , 2011 , 6( 1) : 21-29.

(责任编辑: 李爱花)