

生物炭对盐渍土理化性质和紫花苜蓿生长的影响

张进红^{1,2} 吴波^{1,2} 王国良^{1,2} 贾春林^{1,2}

(1. 山东省农业可持续发展研究所, 济南 250100; 2. 农业农村部华东都市农业重点实验室, 济南 250100)

摘要: 为揭示生物炭对滨海盐渍土理化性质和紫花苜蓿生长的影响规律,采用盆栽试验方法,研究了不同生物炭添加量(炭土质量分数 0、0.5%、1%、2%、5%、10%)处理下黄河三角洲盐渍化土壤养分、结构、盐分以及紫花苜蓿产量、品质等变化特征,并采用灰色关联度法评价了生物炭的应用效果。结果表明,添加生物炭后,土壤有机质和全氮含量分别增加了 16.27%~246.65% 和 6.38%~58.51%,全磷、有效磷和全钾含量变化相对较小;土壤容重显著降低,低量生物炭处理显著提高了盐渍化土壤大于 0.25 mm 团聚体的含量和团聚体稳定性;水溶性盐总量降低了 38.90%~46.17%,其中 Mg^{2+} 、 Cl^{-} 和 SO_4^{2-} 含量降幅较大;紫花苜蓿产量提高了 8.19%~43.00%,品质无显著变化。整体而言,随着施炭量的增加,土壤肥力有所提高,团聚体稳定性降低,盐分含量和紫花苜蓿产量呈先降后增的趋势。施用生物炭改善了盐渍化土壤的理化性质,促进了紫花苜蓿生长,生物炭用量 0.5% 时施用效果最优。

关键词: 生物炭; 滨海盐渍土; 理化性质; 紫花苜蓿; 产量

中图分类号: S156.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)08-0285-10 OSID: 

Effects and Evaluation of Biochar on Physical – Chemical Properties of Coastal Saline Soil and Alfalfa Growth

ZHANG Jinhong^{1,2} WU Bo^{1,2} WANG Guoliang^{1,2} JIA Chunlin^{1,2}

(1. Shandong Institute of Agricultural Sustainable Development, Jinan 250100, China

2. Key Laboratory of East China Urban Agriculture, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Jinan 250100, China)

Abstract: In order to find out the effects of biochar on salt-affected soil physical – chemical properties and alfalfa growth in the Yellow River Delta, a pot experiment was conducted. Soil nutrients, soil structure, soil salinity, alfalfa yield and quality were analyzed under different biochar application levels (0, 0.5%, 1%, 2%, 5% and 10%). Based on grey correlation method, the biochar application effect was evaluated. The results showed that after biochar additions, soil organic matter and total nitrogen content were increased by 16.27% ~ 246.65% and 6.38% ~ 58.51%, respectively, but the changes of total phosphorus, available phosphorus and total potassium contents were relatively small. Meanwhile, soil bulk density was decreased significantly, while aggregates more than 0.25 mm and soil aggregates stability enhanced under lower biochar rate. Compared with CK, biochar addition treatment reduced soil water-soluble salt contents by 38.90% ~ 46.17%, and the contents of Mg^{2+} , Cl^{-} , and SO_4^{2-} had significant reductions. The alfalfa yield was increased by 8.19% ~ 43.00%, however, there was no significant difference in quality. With the increase of biochar application, soil fertility appeared a increasing trend, while aggregate stability showed an opposite character. Soil salt content and alfalfa yield were decreased first and then increased. Overall, biochar application improved the salt-affected soil physical – chemical properties and alfalfa growth. And 0.5% biochar addition rate had the best application effect.

Key words: biochar; coastal saline soil; physical – chemical properties; alfalfa; yield

收稿日期: 2020 – 05 – 20 修回日期: 2020 – 06 – 16

基金项目: 山东省自然科学基金项目 (ZR2017YL020)、国家牧草产业技术体系项目 (CARS – 34) 和国家重点研发计划项目 (2019YFD1002703)

作者简介: 张进红 (1984—), 女, 助理研究员, 博士, 主要从事生物炭在牧草中的应用研究, E-mail: 87283625@163.com

通信作者: 王国良 (1977—), 男, 副研究员, 博士, 主要从事牧草育种与栽培研究, E-mail: wangguoliang@126.com

0 引言

黄河三角洲地区濒临渤海湾及莱州湾,土地资源丰富,且黄河每年新淤土地 1 000 hm²左右,是中国东部沿海后备土地资源最好、开发潜力较大的地区^[1]。由于受气候条件、土壤母质、海水以及沉积环境等因素影响,该地区盐渍化土壤广为分布^[2]。随着粮经饲三元种植结构不断调整,被誉为“牧草之王”的紫花苜蓿种植产业在黄河三角洲地区迅速发展,栽培面积日益扩大,但土壤盐渍化严重影响了该地区紫花苜蓿的生产力。

生物炭是农林废弃物等生物质在缺氧或无氧条件下经热裂解形成的稳定、高度芳香化的富碳产物^[3],近年来,生物炭被广泛应用于土壤改良。生物炭丰富的孔隙结构不仅为微生物生长繁殖提供良好场所,其巨大的比表面积和表面能还可促进土壤团聚体形成^[4]、减少养分流失^[5]、减缓盐分胁迫^[6],从而改善土壤养分和结构状况,促进作物生长和产量提高^[7]。因此,将农业废弃物转化为生物炭、将生物炭作为土壤改良剂再还田改土是一项多赢策略^[8]。

通过生物炭耦合作物根系,增强或减弱生物化学反应强度,从而减缓资源限制作用,并降低机械阻力,进而影响作物生理生化反应及生产力,这一过程被认为可以较全面地解释生物炭—土壤—作物连续体之间的相互作用关系^[9-10]。但关于生物炭改善盐渍化土壤性质,进而提高紫花苜蓿生产力的研究尚不多见。本文采用盆栽试验方法,研究不同生物炭用量对黄河三角洲盐渍化土壤养分、盐分、结构和紫花苜蓿生产力的影响,采用灰色关联度模型评价生物炭在盐碱地的应用效果,以期为黄河三角洲盐碱地区选择性应用生物炭和促进紫花苜蓿增产提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

土壤采自东营农高区(山东省农业科学院东营试验示范基地)0~20 cm 土层,风干,过 2 mm 筛备用。供试土壤为砂壤土,pH 值为 7.34,电导率为 452 μS/cm,有机质含量(质量比,下同)为 18.72 g/kg,碱解氮含量为 25.96 mg/kg,速效磷含量为 23.64 mg/kg,速效钾含量为 720.0 mg/kg。生物炭为杏仁壳生物炭,pH 值为 8.07,电导率为 1 665 μS/cm,有机质含量为 517.21 g/kg,碱解氮含量为 34.07 mg/kg,速效磷含量为 145.76 mg/kg,速效钾含量为 6.90 g/kg。供试作物为鲁苜 1 号紫花苜蓿。

1.2 试验设计

采用盆栽试验方法,称取 1.2 kg 土壤,分别按质量分数 0、0.5%、1%、2%、5% 和 10% 加入生物炭(记为 CK、B0.5、B1、B2、B5、B10),混合均匀后装入直径 14.5 cm、深度 13 cm 的塑料盆钵中,加水饱和过夜后,播种鲁苜 1 号紫花苜蓿,播深 2 cm,出苗后每盆定苗 5 株,每个处理 3 次重复。紫花苜蓿现蕾初期试验结束。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 紫花苜蓿

利用直尺法测量苜蓿株高,干燥法测定苜蓿干草产量,分光光度法测定苜蓿叶片叶绿素含量,凯氏定氮法测定粗蛋白(Crude protein,CP)含量,滤袋法测定苜蓿中性洗涤纤维(Neutral detergent fibrir,NDF)含量和酸性洗涤纤维(Acid detergent fibrir,ADF)含量,干物质消化率(Digestible dry matter,DDM)、干物质采食量(Dry matter intakes,DMI)、相对饲喂价值(Relative feed value,RFV)和净能(Net energy,NE)计算公式为

D_{DM} = 88.9 - 0.779A_{DF} (1)

D_{MI} = 120/N_{DF} (2)

R_{FV} = 0.775D_{DM}D_{MI} (3)

N_E = 2.205(1.004 - 0.0119A_{DF}) (4)

1.3.2 土壤

(1) 土壤养分指标测定

采用 pHS-3C 型 pH 计测定 pH 值,采用重铬酸钾外加热法测定有机质含量,凯氏定氮法测定全氮含量,连续性流动分析仪测定铵态氮和硝态氮含量,碱解扩散法测定碱解氮含量,比色法测定全磷和有效磷含量,火焰光度法测定全钾和速效钾含量。

(2) 土壤结构指标测定

采用环刀法测定容重,烘干法测定含水量,湿筛法测定团聚体含量。采用平均重量直径(Mean weight diameter,MWD)、几何平均直径(Geometric mean diameter,GMD)以及大于 0.25 mm 的团聚体含量(R_{0.25})描述土壤团聚体稳定性,计算公式为

M_{WD} = ∑_{i=1}ⁿ (x_iw_i) (5)

G_{MD} = exp ((∑_{i=1}ⁿ m_ilnx_i) / (∑_{i=1}ⁿ m_i)) (6)

R_{0.25} = M_{r>0.25} / M_T (7)

式中 x_i——i 粒级团聚体平均直径
w_i——i 粒级团聚体质量比

m_i ——不同粒级团聚体的质量
 M_T ——团聚体总质量
 $M_{T>0.25}$ ——大于 0.25 mm 团聚体质量

(3) 土壤盐基离子含量测定

采用 EDTA 滴定法测定 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量,火焰光度法测定 Na^+ 、 K^+ 含量,双指示剂中和滴定法测定 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 含量,硝酸银滴定法测定 Cl^- 含量,EDTA 间接络合滴定法测定 SO_4^{2-} 含量。土壤水溶性盐总量为 8 个盐分离子质量比之和。

1.4 基于灰色关联分析的生物炭应用效果评价

1.4.1 评价对象与指标体系

以不同用量生物炭处理的土壤和苜蓿为评价对象,选取土壤 pH 值、有机质含量、全氮含量、碱解氮含量、铵态氮含量、硝态氮含量、全磷含量、有效磷含量、全钾含量、速效钾含量、容重、 $R_{0.25}$ 、MWD、GMD、总盐量以及苜蓿株高、产量、茎叶比、干鲜比、叶绿素含量、CP、ADF、NDF、DDM、DMI、RFV、NE 作为评价指标,构成数据列。所有评价对象的数据列构成数据矩阵。

1.4.2 灰色关联度分析模型

以单项指标的最优值组成灰色关联分析的参考数列,记为 $\{x_0(k)\} (k=1,2,\cdots,n)$, n 为选取的测定指标数。被评价对象的比较数列记为 $\{x_i(k)\} (i=1,2,\cdots,m)$, m 为生物炭处理数。用均值化方法对原始数据进行无量纲化处理。关联系数计算公式为

$$\varepsilon_i(k) = \frac{\min_i \min_k \Delta i(k) + \rho \max_i \max_k \Delta i(k)}{\Delta i(k) + \rho \max_i \max_k \Delta i(k)} \quad (8)$$

其中 $\Delta i(k) = |x_0(k) - x_i(k)|$

式中 $\varepsilon_i(k)$ ——关联系数

$\min_i \min_k \Delta i(k)$ ——二级最小差
 $\max_i \max_k \Delta i(k)$ ——二级最大差
 ρ ——分辨系数,取值 0.5

关联度计算公式为

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \varepsilon_i(k) \quad (9)$$

$$\gamma'_i = \sum_{k=1}^n \varepsilon_i(k) w(k) \quad (10)$$

其中 $w(k) = \frac{\gamma_i}{\sum \gamma_i}$

式中 γ_i ——等权关联度

γ'_i ——加权关联度

$w(k)$ ——权重

其中,关联度越大,表明该处理生物炭利用价值越高。

1.5 数据统计分析

所有数据采用 Microsoft Excel 2007 进行整理与绘图,使用 SPSS 16.0 软件对数据进行方差分析,采用 Duncan 法进行多重比较($\alpha=0.05$)。

2 结果与分析

2.1 土壤养分含量

与 CK 相比,生物炭施用后土壤 pH 值提高了 0.09~0.28,B2 处理 pH 值最高,为 7.71;土壤含水率无显著变化;有机质和全氮含量分别增加了 16.27%~246.65% 和 6.38%~58.51%,且生物炭用量越大,两者增加幅度越大,B10 处理有机质和全氮含量分别是 B0.5 处理的 2.98、1.49 倍(表 1)。与之不同,碱解氮、铵态氮和硝态氮含量随施炭量的增加呈降低趋势。生物炭用量 0.5%~5% 处理全磷和有效磷含量较 CK 无明显变化;用量增加至

表 1 不同生物炭用量处理的土壤养分含量
Tab.1 Soil nutrient contents in different biochar rate treatments

处理	pH 值	含水率/ %	有机质 含量/ (g·kg ⁻¹)	全氮含量/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮 含量/ (mg·kg ⁻¹)	铵态氮 含量/ (mg·kg ⁻¹)	硝态氮 含量/ (mg·kg ⁻¹)	全磷含量/ (g·kg ⁻¹)	有效磷 含量/ (mg·kg ⁻¹)	全钾含量/ (g·kg ⁻¹)	速效钾 含量/ (mg·kg ⁻¹)
CK	(7.43 ± 0.02) ^d	(9.41 ± 0.08) ^a	(16.10 ± 0.12) ^f	(0.94 ± 0.01) ^e	(19.03 ± 2.94) ^{bc}	(1.26 ± 0.33) ^a	(7.75 ± 0.14) ^a	(0.61 ± 0.003) ^b	(19.01 ± 2.39) ^b	(19.62 ± 0.21) ^a	(277.33 ± 13.68) ^d
	(7.52 ± 0.03) ^e	(8.91 ± 0.80) ^a	(18.72 ± 0.60) ^e	(1.00 ± 0.02) ^d	(27.74 ± 5.35) ^a	(1.00 ± 0.10) ^{ab}	(6.19 ± 0.36) ^b	(0.62 ± 0.003) ^b	(17.85 ± 0.32) ^b	(19.67 ± 0.34) ^a	(263.33 ± 10.37) ^d
B0.5	(7.53 ± 0.01) ^c	(9.83 ± 1.12) ^a	(20.77 ± 0.30) ^d	(1.04 ± 0.01) ^{cd}	(25.42 ± 2.37) ^{ab}	(1.04 ± 0.06) ^{ab}	(6.08 ± 0.27) ^b	(0.62 ± 0.005) ^b	(19.07 ± 0.31) ^b	(19.37 ± 0.41) ^a	(290.33 ± 3.84) ^{cd}
	(7.71 ± 0.06) ^a	(9.01 ± 0.70) ^a	(24.04 ± 0.45) ^c	(1.07 ± 0.01) ^c	(21.09 ± 0.99) ^{abc}	(0.98 ± 0.01) ^{ab}	(5.29 ± 0.04) ^c	(0.60 ± 0.009) ^b	(18.87 ± 0.74) ^b	(19.66 ± 0.02) ^a	(318.00 ± 12.17) ^e
B1	(7.64 ± 0.03) ^{ab}	(8.91 ± 0.95) ^a	(35.97 ± 0.39) ^b	(1.23 ± 0.02) ^b	(21.74 ± 4.58) ^{abc}	(0.94 ± 0.05) ^{ab}	(4.67 ± 0.14) ^c	(0.62 ± 0.003) ^b	(20.01 ± 0.45) ^b	(19.15 ± 0.35) ^a	(398.64 ± 17.61) ^b
	(7.59 ± 0.03) ^{bc}	(9.76 ± 0.67) ^a	(55.81 ± 0.81) ^a	(1.49 ± 0.02) ^a	(14.49 ± 2.33) ^c	(0.84 ± 0.02) ^b	(4.61 ± 0.25) ^c	(0.67 ± 0.012) ^a	(23.85 ± 0.33) ^a	(19.95 ± 0.70) ^a	(688.00 ± 12.00) ^a
B5											
B10											

注:同一列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$),下同。

10%,全磷和有效磷含量显著提高了 9.84% 和 25.46%。不同生物炭用量处理全钾含量无显著变化;速效钾含量随着施炭量的增加而增加,B10 处理时达到 688 mg/kg,比 CK 提高了 1.48 倍。

按照全国第二次土壤普查推荐的土壤肥力分级标准来看,生物炭施用后有机质、全氮等级由原来的 4 级分别提高至 1 级和 3 级,碱解氮保持在 6 级标准,有效磷等级由 3 级提高至 2 级水平,速效钾保持在 1 级标准,说明施用生物炭后黄河三角洲盐渍化土壤肥力有所提高(表 2)。

表 2 不同生物炭用量处理的土壤养分等级
Tab.2 Soil nutrient grade in different biochar rate treatments

处理	有机质	全氮	碱解氮	有效磷	速效钾
CK	4 级	4 级	6 级	3 级	1 级
B0.5	4 级	4 级	6 级	3 级	1 级
B1	3 级	3 级	6 级	3 级	1 级
B2	3 级	3 级	6 级	3 级	1 级
B5	2 级	3 级	6 级	2 级	1 级
B10	1 级	3 级	6 级	2 级	1 级

2.2 土壤结构

2.2.1 土壤容重

土壤容重显著降低,且降低幅度随着生物炭用量增加而增加,B10 处理土壤容重仅为 CK 的 84.33%(图 1,图中不同小写字母表示各处理间差异显著($P<0.05$),下同)。

2.2.2 土壤团聚体组成

与 CK 相比,B0.5 处理在大于 2 mm、1~2 mm、

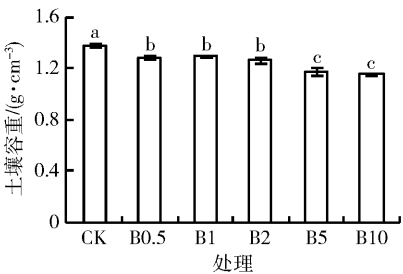


图 1 不同生物炭用量处理的土壤容重

Fig.1 Soil bulk density in different biochar rate treatments

0.5~1 mm 粒级团聚体含量显著提高了 71.10%、106.59% 和 96.77%;其他处理对以上粒级团聚体含量影响效果不显著(表 3)。1%~5% 用量生物炭处理 0.25~0.50 mm 粒级团聚体含量较 CK 显著提高了 82.90%~97.10%。从微团聚体来看,生物炭施入后,0.053~0.25 mm 和 0~0.053 mm 粒级团聚体含量较 CK 有所降低,但加大施炭量,降低幅度减小;其中 B10 处理差异不显著,B0.5 处理降幅最大,0.053~0.25 mm 和 0~0.053 mm 粒级团聚体含量分别降低 40.76% 和 58.62%。

2.2.3 土壤团聚体稳定性

B0.5 处理 MWD 和 GMD 较 CK 显著提高了 69.73% 和 205.79%,其他处理间 MWD 和 GMD 均无显著差异(图 2)。本研究土壤团聚体的 $R_{0.25}$ 为 0.42~0.72。与 CK 相比较,B10 处理 $R_{0.25}$ 差异不显著,而生物炭用量 0.5%~5% 处理 $R_{0.25}$ 显著提高,但提高幅度随施炭量的增加而减小,B0.5 处理达到最大值,比 CK 提高 72.62%。

表 3 不同生物炭用量处理的土壤水稳性团聚体组成

Tab.3 Soil water-stable aggregate contents in different biochar rate treatments							%
处理	团聚体粒级/mm						
	> 2	1 ~ 2	0. 5 ~ 1. 0	0. 25 ~ 0. 50	0. 053 ~ 0. 25	0 ~ 0. 053	
CK	(17. 23 ± 3. 79) ^b	(5. 61 ± 0. 62) ^b	(8. 35 ± 0. 97) ^b	(10. 70 ± 1. 36) ^c	(20. 41 ± 0. 82) ^a	(37. 70 ± 2. 99) ^a	
B0. 5	(29. 48 ± 3. 92) ^a	(11. 59 ± 2. 25) ^a	(16. 43 ± 2. 15) ^a	(14. 80 ± 1. 16) ^{bc}	(12. 09 ± 2. 09) ^c	(15. 60 ± 2. 13) ^c	
B1	(18. 96 ± 2. 19) ^b	(7. 77 ± 1. 31) ^{ab}	(14. 86 ± 4. 02) ^{ab}	(19. 57 ± 1. 16) ^{ab}	(14. 77 ± 1. 24) ^{bc}	(24. 07 ± 1. 03) ^b	
B2	(21. 42 ± 3. 09) ^{ab}	(6. 21 ± 1. 38) ^b	(12. 83 ± 1. 87) ^{ab}	(21. 09 ± 1. 85) ^a	(15. 01 ± 0. 44) ^{bc}	(23. 44 ± 1. 66) ^b	
B5	(14. 51 ± 0. 92) ^b	(9. 19 ± 2. 34) ^{ab}	(13. 73 ± 1. 21) ^{ab}	(19. 89 ± 3. 54) ^{ab}	(16. 35 ± 1. 05) ^{ab}	(26. 33 ± 2. 27) ^b	
B10	(14. 02 ± 3. 18) ^b	(7. 40 ± 0. 70) ^b	(10. 21 ± 0. 87) ^{ab}	(11. 69 ± 1. 03) ^c	(18. 56 ± 1. 36) ^{ab}	(38. 12 ± 2. 73) ^a	

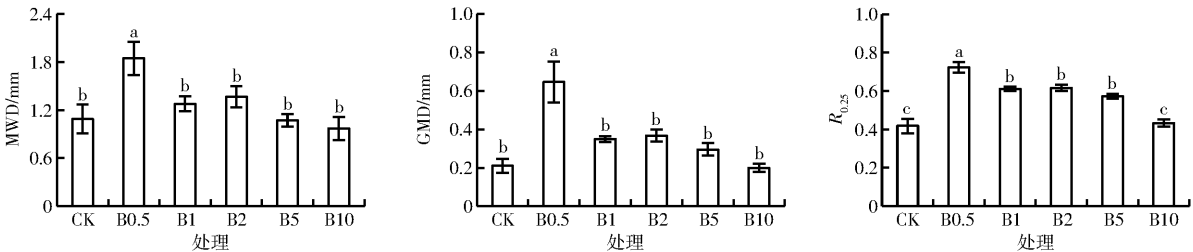


图 2 不同生物炭用量处理的土壤团聚体稳定性

Fig.2 Soil aggregate stability in different biochar rate treatments

2.3 土壤盐分离子

2.3.1 土壤水溶性盐总量和离子含量

供试土壤含大量盐分,水溶性盐总量为 3.75 g/kg,阳离子主要为 Mg^{2+} 和 Na^{+} ,阴离子以 Cl^{-} 含量最高,其次是 SO_4^{2-} (图 3)。生物炭施入后,土壤水溶性盐总量降低了 38.90% ~ 46.17%,其中 Mg^{2+} 、

Cl^{-} 和 SO_4^{2-} 含量降低的幅度较大,分别比 CK 至少降低了 4.81%、45.98% 和 37.14%;增加生物炭用量, Cl^{-} 含量呈先增加后降低趋势,而 Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 含量则先降后增。 HCO_3^{-} 和 CO_3^{2-} 含量变化差异不显著。与 CK 相比,5% ~ 10% 用量处理显著增加了 Na^{+} 、 K^{+} 和 Ca^{2+} 含量,其他用量处理差异较小。

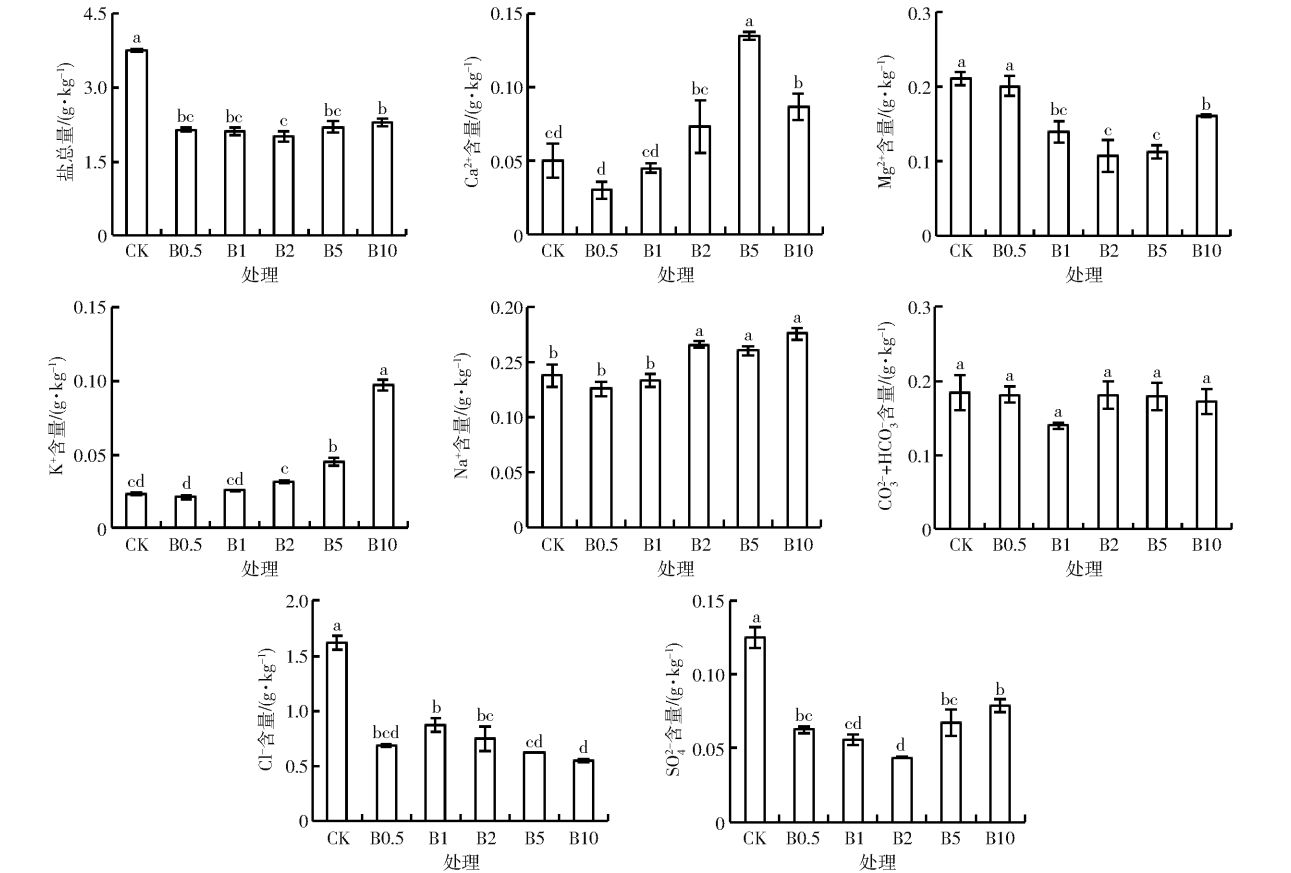


图 3 不同生物炭用量处理的土壤盐分离子含量

Fig.3 Soil salt ions contents in different biochar rate treatments

2.3.2 土壤盐分离子比值

低量生物炭 (B0.5) 处理较 CK 降低了 Ca^{2+}/K^{+} 、 Ca^{2+}/Na^{+} 、 Ca^{2+}/Mg^{2+} 比值,提高了 Mg^{2+}/K^{+} 、 Mg^{2+}/Na^{+} 、 Na^{+}/K^{+} 比值,表明与 CK 相比,低量生物炭处理下阳离子聚集程度由小到大为 Ca^{2+} 、 K^{+} 、 Na^{+} 、 Mg^{2+} (表 4)。除 B10 外,增加生物炭用量,土壤的 Ca^{2+}/K^{+} 、 Ca^{2+}/Na^{+} 、 Ca^{2+}/Mg^{2+} 比值增加,

Mg^{2+}/K^{+} 、 Mg^{2+}/Na^{+} 、 Na^{+}/K^{+} 比值则呈降低趋势,可见随施炭量增加,不同阳离子的富集程度由大到小为 Ca^{2+} 、 K^{+} 、 Na^{+} 、 Mg^{2+} 。

与 CK 相比,各生物炭处理的 $Cl^{-}/(HCO_3^{-} + CO_3^{2-})$ 、 $SO_4^{2-}/(HCO_3^{-} + CO_3^{2-})$ 比值降低,表明施用生物炭后 $HCO_3^{-} + CO_3^{2-}$ 在土壤中的富集程度增加;增加施炭量, $Cl^{-}/(HCO_3^{-} + CO_3^{2-})$ 、 Cl^{-}/SO_4^{2-} 比值

表 4 不同生物炭用量处理的土壤盐分离子质量比

Tab.4 Ratios of soil salt ions in different biochar rate treatments

处理	Ca^{2+}/K^{+}	Ca^{2+}/Na^{+}	Ca^{2+}/Mg^{2+}	Mg^{2+}/K^{+}	Mg^{2+}/Na^{+}	Na^{+}/K^{+}	$Cl^{-}/(HCO_3^{-} + CO_3^{2-})$	Cl^{-}/SO_4^{2-}	$SO_4^{2-}/(HCO_3^{-} + CO_3^{2-})$
	比值	比值	比值	比值	比值	比值	比值	比值	比值
CK	2.16	0.36	0.24	9.15	1.54	5.96	3.50	1.29	2.71
B0.5	1.44	0.24	0.15	9.64	1.60	6.03	1.51	1.10	1.38
B1	1.77	0.34	0.32	5.52	1.05	5.25	2.50	1.58	1.58
B2	2.35	0.44	0.68	3.45	0.65	5.32	1.66	1.72	0.97
B5	2.99	0.84	1.20	2.50	0.70	3.55	1.38	0.92	1.51
B10	0.89	0.49	0.54	1.66	0.92	1.81	1.28	0.70	1.83

先升后降, $\text{SO}_4^{2-}/(\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-})$ 比值则无规律性变化,表明 Cl^- 和 SO_4^{2-} 在土壤中的富集程度因生物炭用量而异。

2.4 紫花苜蓿生长特性

2.4.1 产量、株高、茎叶比、干鲜比和叶绿素含量

生物炭施入后,苜蓿产量显著提高了 8.19% ~ 43.00%;增加施炭量,苜蓿产量呈先升后降趋势,B2 处理苜蓿产量达到最高,为 4.19 g/盆(表 5)。B0.5 处理苜蓿株高较 CK 显著提高了 27.76%,其

他处理差异较小。各处理苜蓿茎叶比、干鲜比和叶绿素含量均无显著性差异。

2.4.2 品质指标

不同生物炭用量处理苜蓿的粗蛋白、酸性洗涤纤维、中性洗涤纤维含量分别在 19.05% ~ 19.74%、23.15% ~ 25.03%、29.73% ~ 31.89% 之间,差异较小(表 6)。各生物炭处理下,苜蓿的干物质采食量、干物质消化率、相对饲喂价值和净能也均无显著差异。

表 5 不同生物炭用量处理的苜蓿株高、产量、茎叶比、干鲜比和叶绿素含量

Tab.5 Plant height, yield, stem-leaf ratio, dry-fresh ratio and chlorophyll content of alfalfa in different biochar rate treatments

处理	产量/(g·盆 ⁻¹)	株高/cm	茎叶比	干鲜比	叶绿素含量/(mg·g ⁻¹)
CK	(2.93 ± 0.22) ^c	(21.72 ± 1.12) ^c	(0.82 ± 0.00) ^a	(0.25 ± 0.010) ^a	(2.36 ± 0.12) ^a
B0.5	(3.58 ± 0.09) ^{abc}	(27.75 ± 0.69) ^a	(0.73 ± 0.05) ^a	(0.26 ± 0.016) ^a	(3.00 ± 0.03) ^a
B1	(4.03 ± 0.33) ^a	(23.36 ± 0.45) ^{bc}	(0.70 ± 0.01) ^a	(0.27 ± 0.031) ^a	(2.49 ± 0.24) ^a
B2	(4.19 ± 0.09) ^a	(25.24 ± 1.04) ^{abc}	(0.76 ± 0.05) ^a	(0.26 ± 0.003) ^a	(2.46 ± 0.24) ^a
B5	(3.85 ± 0.14) ^{ab}	(26.54 ± 1.08) ^{ab}	(0.78 ± 0.08) ^a	(0.25 ± 0.004) ^a	(2.58 ± 0.59) ^a
B10	(3.17 ± 0.15) ^{bc}	(24.59 ± 1.38) ^{abc}	(0.79 ± 0.05) ^a	(0.28 ± 0.001) ^a	(2.29 ± 0.06) ^a

表 6 不同生物炭用量处理的苜蓿品质

Tab.6 Alfalfa quality in different biochar rate treatments

处理	CP/%	ADF/%	NDF/%	DDM/%	DMI/%	RFV/%	NE/(MJ·kg ⁻¹)
CK	(19.42 ± 0.84) ^a	(23.66 ± 0.41) ^a	(31.50 ± 0.66) ^a	(70.47 ± 0.32) ^a	(3.81 ± 0.08) ^a	(208.28 ± 4.06) ^a	(1.59 ± 0.01) ^a
B0.5	(19.19 ± 0.56) ^a	(23.15 ± 0.28) ^a	(30.34 ± 0.37) ^a	(70.86 ± 0.22) ^a	(3.96 ± 0.05) ^a	(217.34 ± 3.20) ^a	(1.61 ± 0.01) ^a
B1	(19.74 ± 0.28) ^a	(23.25 ± 2.73) ^a	(29.73 ± 1.43) ^a	(70.79 ± 2.13) ^a	(4.06 ± 0.20) ^a	(222.31 ± 10.64) ^a	(1.60 ± 0.07) ^a
B2	(19.56 ± 0.27) ^a	(23.32 ± 0.51) ^a	(30.07 ± 1.29) ^a	(70.74 ± 0.40) ^a	(4.01 ± 0.17) ^a	(219.77 ± 10.79) ^a	(1.60 ± 0.01) ^a
B5	(19.17 ± 0.80) ^a	(25.03 ± 0.26) ^a	(31.89 ± 0.74) ^a	(69.40 ± 0.21) ^a	(3.77 ± 0.09) ^a	(202.65 ± 4.63) ^a	(1.56 ± 0.01) ^a
B10	(19.05 ± 0.95) ^a	(24.01 ± 0.61) ^a	(30.81 ± 0.85) ^a	(70.20 ± 0.48) ^a	(3.90 ± 0.11) ^a	(212.37 ± 7.30) ^a	(1.58 ± 0.02) ^a

2.5 生物炭施用效果

根据灰色关联度模型,计算的各处理加权关联度由大到小为 B0.5、B10、B1、B2、B5、CK(图 4),等权关联度和加权关联度分析结果一致,两者相关系数 $R=0.987$,达到显著水平。说明施用生物炭改善了盐渍化土壤理化性质,对苜蓿生长环境产生正面效应,进而促进苜蓿生长。生物炭用量 0.5% 施用效果最优,用量 0 ~ 5% 范围内,生物炭施用效果随着施炭量的增加而降低。B10 处理施用效果仅次于 B0.5,可能原因是该处理对土壤有机质、全氮、速效钾等养分含量提高幅度较大。

3 讨论

3.1 生物炭施用后盐渍化土壤肥力变化

关于如何提高盐渍化土壤肥力,利用有效的培肥条件来创造良好的土壤环境是众多学者关注的焦点,尝试了不同种类的改良剂,并得到了较多试验成果^[11-12]。其中,基于农业废弃物资源化利用而制备

得到的生物炭应用于土壤改良,近年来成为研究热点。

生物炭施入盐渍化土壤后,土壤养分含量随生物炭用量不同有所差异。本研究中,随着生物炭用量的增加,盐渍化土壤有机质、有效磷、速效钾含量增加,这一结论与生物炭在黑土^[13]、黄壤^[14]、红壤^[15]等土壤类型中的研究结果基本一致。生物炭提高盐渍化土壤有机质、有效磷、速效钾含量的可能原因是生物炭本身含有的丰富营养元素(特别是 C、

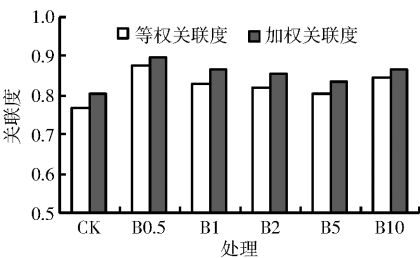


图 4 不同生物炭用量处理的关联度

Fig.4 Values of correlative degree in different biochar rate treatments

P、K等),可直接向盐渍化土壤提供养分,改善植物营养^[16],同时由于表面多孔、富含官能团、带有正负电荷等特性^[17],可通过吸附、螯合等作用,降低养分淋失^[18]。冉成等^[19]、赵铁民等^[20]研究指出,随着生物炭用量的增加,盐渍化土壤碱解氮、铵态氮和硝态氮含量呈降低趋势。本研究得到与之相同的结果。可能原因一是生物炭用量增加使土壤碳氮比增大,引起氮的生物固定,导致含量降低^[21];二是施用生物炭改善了苜蓿根际环境,增加了土壤微生物的丰度和活性,促进了苜蓿根系生长和对土壤中速效氮的吸收,进而降低了土壤中碱解氮量^[22]。

3.2 生物炭施用后盐渍化土壤结构变化

生物炭疏松多孔,具有较强的吸附能力,施入土壤后可改善土壤结构^[23]。本研究结果显示,盐渍化土壤容重随生物炭施用量的增加呈下降趋势,这与吴昱等^[13]、魏永霞等^[24-25]的研究结论一致。适合作物生长的土壤容重为 $1.00 \sim 1.30 \text{ g/cm}^3$,本研究中,生物炭施入后盐渍化土壤容重由 1.38 g/cm^3 降低至 1.16 g/cm^3 ,缓解土壤板结,有利于苜蓿生长。

土壤团聚体作为土壤团粒结构的基本单元,是土壤肥力的物质基础,其含量与稳定性影响土壤质量,是反映土壤结构状况的重要指标^[26-27]。研究表明,与CK相比,施用低量生物炭增加了大于 0.25 mm 的水稳性团聚体含量,增加了土壤水稳性团聚体的 $R_{0.25}$ 、MWD、GMD,提高了团聚体的稳定性。可能原因一是施用生物炭提高了盐渍化土壤有机质含量和土壤微生物量,增强了土壤生物活性,从而产生更多的分泌物,形成土壤团聚体的胶结物质,增强了土壤团聚体的稳定性^[28],二是生物炭表面含有多种官能团促进了土壤颗粒团聚作用^[29]。本研究中团聚体稳定性指标 MWD、GMD 和 $R_{0.25}$ 随着生物炭用量的增加呈降低趋势,这与何玉亭等^[30]、李伟等^[26]报道的红壤土团聚体稳定性随着生物炭施用量的增加而提高的结论不同。LIU 等^[31]发现施用 $4、8、16 \text{ g/kg}$ 生物炭对砂质土壤团聚体的稳定性无显著影响。造成这些差异的原因主要与土壤类型、土壤质地有关。砂土、黏土、壤土对土壤有机碳的吸附能力不同,与大分子有机质形成稳固的有机-无机复合体难易程度也不同,因而对生物炭的响应不同^[26]。另外,盐渍化土壤条件下,过量施用生物炭可能限制了土壤-微生物-生物炭之间的相互作用,从而减缓土壤团聚体的形成过程^[27]。

3.3 生物炭施用后盐渍化土壤盐分变化

黄河三角洲地区地势平缓,天然排水能力差,蒸发量是降水量的3倍,土壤盐渍化问题突出。土壤水溶性盐含量是盐碱土的一个重要属性,是限制作

物生长的主要障碍因素之一。韩剑宏等^[32]、刘鸿骄等^[33]报道指出生物炭降低了土壤盐分含量,这与本研究结论相一致。可能是因为具备高比表面积和多孔结构的生物炭降低了土壤容重,改善土壤孔隙结构,进而促进了土体盐分离子的淋洗^[29,34]。孙运朋等^[35]也发现生物炭施入土壤,能提高盐分的洗脱效果并抑制土壤表层的盐分积聚。本研究中,加大生物炭用量,土壤盐分降低的幅度减小,这可能是生物炭本身灰分含量较高,过量施用后生物炭自身的盐度会引起土壤盐度的增加。

3.4 生物炭施用后紫花苜蓿生长变化

生物炭施入盐渍化土壤后,尽管有一些对植物生长无效或负面效果的报道^[36-37],但大部分研究结果显示,生物炭能够提高盐碱地大豆^[34]、玉米^[38]、水稻^[39]、番茄^[40]等植物产量。本研究结果也显示生物炭显著提高了苜蓿产量。生物炭施用下苜蓿产量增加可能主要与土壤性质的改善相关,从而增加植物水分和养分吸收,调节气孔导度和植物激素^[41-42]。但生物炭对苜蓿营养品质无显著影响。

4 结论

(1)施加生物炭显著影响黄河三角洲盐渍化土壤养分含量。各生物炭处理下土壤有机质和全氮含量较CK至少增加了16.27%和6.38%,且增幅与施炭量呈正相关。随施炭量的增加,碱解氮、铵态氮和硝态氮含量呈下降趋势。除B10外,全磷、有效磷和全钾含量变化较小。

(2)随施炭量的增加,土壤容重逐渐降低。B0.5处理MWD和GMD较CK显著提高了69.73%和205.79%,其他处理间MWD和GMD均无显著差异。生物炭用量为0.5%~5%处理时, $R_{0.25}$ 显著提高,但提高幅度随着生物炭用量的增加而减小。

(3)生物炭施入后,土壤水溶性盐总量降低了38.90%~46.17%,其中 Mg^{2+} 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 含量降幅较大;增加施炭用量, Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 含量先降、后增, Cl^- 含量则先增、后降。随施炭量增加,阳离子在土壤中的富集程度由大到小依次为 Ca^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 的富集程度因生物炭用量而不同。

(4)生物炭施入后,苜蓿产量提高了8.19%~43.00%,但苜蓿茎叶比、干鲜比、叶绿素含量和品质指标无显著变化。

(5)灰色关联度模型评价表明,施用生物炭改善了盐渍化土壤的理化性质,促进了苜蓿生长;生物炭用量0.5%时施用效果最优。

参 考 文 献

- [1] 常春艳, 赵庚星, 李晋, 等. 黄河三角洲典型生态脆弱区土壤退化遥感反演[J]. 农业工程学报, 2015, 31(9): 127–132.
CHANG Chunyan, ZHAO Gengxing, LI Jin, et al. Remote sensing inversion of soil degradation in typical vulnerable ecological region of Yellow River Delta[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(9): 127–132. (in Chinese)
- [2] 张天举, 陈永金, 刘加珍. 基于典范对应分析的滨海湿地土壤季节性盐渍化特征[J]. 生态学报, 2019, 39(9): 1–11.
ZHANG Tianju, CHEN Yongjin, LIU Jiazhen. Characteristics of soil salinization in coastal wetlands based on canonical correspondence analysis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(9): 1–11. (in Chinese)
- [3] 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 Wenfu, ZHANG Weiming, MENG Jun. Advances and prospects in research of biochar utilization in agriculture[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(16): 3324–3333. (in Chinese)
- [4] SOINNE H, HOVI J, TAMMEORG P, et al. Effect of biochar on phosphorus sorption and clay soil aggregate stability[J]. Geoderma, 2014, 219: 162–167.
- [5] ZHENG H, WANG Z Y, DENG X, et al. Impacts of adding biochar on nitrogen retention and bioavailability in agricultural soil[J]. Geoderma, 2013, 206: 32–39.
- [6] LASHARI M S, YE Y, JI H, et al. Biochar-manure compost in conjunction with pyroligneous solution alleviated salt stress and improved leaf bioactivity of maize in a saline soil from central China: a 2-year field experiment[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2015, 95(6): 1321–1327.
- [7] 邵慧芸, 张阿凤, 王旭东, 等. 两种生物炭对烤烟生长、根际土壤性质和微生物群落结构的影响[J]. 环境科学学报, 2019, 39(2): 537–544.
SHAO Huiyun, ZHANG Afeng, WANG Xudong, et al. Effects of two kinds of biochar on the flue-cured tobacco growth, soil properties and microbial community structure of rhizosphere soil[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(2): 537–544. (in Chinese)
- [8] 尚杰, 耿增超, 王月玲, 等. 施用生物炭对壤土微生物量碳、氮及酶活性的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(6): 1142–1151.
SHANG Jie, GENG Zengchao, WANG Yueling, et al. Effect of biochar amendment on soil microbial biomass carbon and nitrogen and enzyme activity in tier soils[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(6): 1142–1151. (in Chinese)
- [9] 刘悦, 黎子涵, 邹博, 等. 生物炭影响作物生长及其与化肥混施的增效机制研究进展[J]. 应用生态学报, 2017, 28(3): 1030–1038.
LIU Yue, LI Zihan, ZOU Bo, et al. Research progress in effects of biochar application on crop growth and synergistic mechanism of biochar with fertilizer[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(3): 1030–1038. (in Chinese)
- [10] 冯雷, 徐万里, 唐光木, 等. 生物炭配施氮素对陆地棉盛花期根系形态与构型的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(3): 241–249.
FENG Lei, XU Wanli, TANG Guangmu, et al. Effects of biochar combined with nitrogen on root morphology and system architecture during *Gossypium hirsutum* L. full-bloom stage[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 241–249. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190326&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.026. (in Chinese)
- [11] 王睿彤, 孙景宽, 陆兆华. 土壤改良剂对黄河三角洲滨海盐碱土生化特性的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(2): 425–431.
WANG Ruitong, SUN Jingkuan, LU Zhaohua. Effect of soil ameliorants on the biochemical properties of coastal saline-alkali soil in the Yellow River Delta[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(2): 425–431. (in Chinese)
- [12] 王凡, 屈忠义. 生物炭对盐渍化农田土壤的改良效果研究进展[J]. 北方农业学报, 2018, 46(5): 72–79.
WANG Fan, QU Zhongyi. Progress research on the improvement effect of biochar on salinized farmland soil[J]. Journal of Northern Agriculture, 2018, 46(5): 72–79. (in Chinese)
- [13] 吴昱, 赵雨森, 刘慧, 等. 秸秆生物炭对黑土区坡耕地生产能力影响分析与评价[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 247–256.
WU Yu, ZHAO Yusen, LIU Hui, et al. Analysis and evaluation of influence of straw biochar on soil productivity of sloping land in black soil region[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 247–256. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170731&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.031. (in Chinese)
- [14] 侯建伟, 邢存芳, 邓晓梅, 等. 不同秸秆生物炭对黄壤理化性质及综合肥力的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(11): 1–11.
HOU Jianwei, XING Cunfang, DENG Xiaomei, et al. Effect of straw biochar on yellow soil physicochemical properties and comprehensive fertility[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2019, 47(11): 1–11. (in Chinese)
- [15] 郭碧林, 陈效民, 景峰, 等. 施用生物炭对红壤性水稻土重金属钝化与土壤肥力的影响[J]. 水土保持学报, 2019,

- 33(3):298–304.
- GUO Bilin, CHEN Xiaomin, JING Feng, et al. Effects of biochar application on heavy metal passivation and soil fertility in the red paddy soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(3): 298–304. (in Chinese)
- [16] 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.
- [17] 陈颖, 刘玉学, 陈重军, 等. 生物炭对土壤有机碳矿化的激发效应及其机理研究进展[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(1): 314–320.
- CHEN Ying, LIU Yuxue, CHEN Chongjun, et al. Priming effect of biochar on the mineralization of native soil organic carbon and the mechanisms: a review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(1): 314–320. (in Chinese)
- [18] ULLAH S, DAHLAWI S, NAEEM A, et al. Biochar application for the remediation of salt-affected soils: challenges and opportunities[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 625: 320–335.
- [19] 冉成, 邵玺文, 朱晶, 等. 生物炭对苏打盐碱稻田土壤养分及产量的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(5): 46–51.
- RAN Cheng, SHAO Xiwen, ZHU Jing, et al. Amending soda saline-alkali paddy soil with biochar improves soil nutrients and rice yield[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(5): 46–51. (in Chinese)
- [20] 赵铁民, 李渊博, 陈为峰, 等. 生物炭对滨海盐渍土理化性质及玉米幼苗抗氧化系统的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(2): 196–200.
- ZHAO Tiemin, LI Yuanbo, CHEN Weifeng, et al. Effect of biochar on the physicochemical properties of coastal saline soil and the antioxidation system activity in maize seedlings[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(2): 196–200. (in Chinese)
- [21] 魏永霞, 石国新, 冯超, 等. 黑土区坡耕地施加生物炭对土壤结构与大豆产量的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2019, 50(8): 309–320.
- WEI Yongxia, SHI Guoxin, FENG Chao, et al. Effects of applying biochar on soil structure and soybean yield on slope farmland in black soil region[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(8): 309–320. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190834&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.034. (in Chinese)
- [22] OLMO M, VILLAR R, SALAZAR P, et al. Changes in soil nutrient availability explain biochar's impact on wheat root development[J]. *Plant and Soil*, 2016, 399(1–2): 333–343.
- [23] 魏永霞, 石国新, 吴昱, 等. 黑土区坡耕地生物炭施用模式效应与土地生产力评价[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(11): 251–259.
- WEI Yongxia, SHI Guoxin, WU Yu, et al. Effect and comprehensive evaluation of biochar application mode on slope farmland in black soil region[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(11): 251–259. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181129&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.029. (in Chinese)
- [24] 魏永霞, 张翼鹏, 张雨凤, 等. 黑土坡耕地连续施加生物炭的土壤改良和节水增产效应[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(2): 284–291, 312.
- WEI Yongxia, ZHANG Yipeng, ZHANG Yufeng, et al. Influences of two consecutive years supply of biochar on soil improvement, water saving and yield increasing in sloping farmland of black soil region[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(2): 284–291, 312. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180236&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.036. (in Chinese)
- [25] 魏永霞, 刘志凯, 冯鼎锐, 等. 生物炭对草甸黑土物理性质及雨后水分动态变化的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(8): 201–207.
- WEI Yongxia, LIU Zhikai, FENG Dingrui, et al. Influences of biochar on physical properties of meadow black soil and dynamic changes of soil water after individual rainfall[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(8): 201–207. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160825&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.08.025. (in Chinese)
- [26] 李伟, 代镇, 张光鑫, 等. 生物炭和氮肥配施提高垆土团聚体稳定性及作物产量[J]. *植物营养与肥科学报*, 2019, 25(5): 782–791.
- LI Wei, DAI Zhen, ZHANG Guangxin, et al. Combination of biochar and nitrogen fertilizer to improve soil aggregate stability and crop yield in lou soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(5): 782–791. (in Chinese)
- [27] 李江舟, 代快, 张立猛, 等. 施用生物炭对云南烟区红壤团聚体组成及有机碳分布的影响[J]. *环境科学学报*, 2016, 36(6): 2114–2120.
- LI Jiangzhou, DAI Kuai, ZHANG Limeng, et al. Effects of biochar application on soil organic carbon distribution and soil aggregate composition of red soils in Yunnan tobacco planting area[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(6): 2114–2120. (in Chinese)
- [28] 袁晶晶, 同延安, 卢绍辉, 等. 生物炭与氮肥配施改善土壤团聚体结构提高红枣产量[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(3): 159–165.

- YUAN Jingjing, TONG Yan'an, LU Shaohui, et al. Biochar and nitrogen amendments improving soil aggregate structure and jujube yields[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(3): 159–165. (in Chinese)
- [29] 岳燕, 林启美, 郭维娜, 等. 不同土层加入生物质炭对盐分淋洗的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(3): 62–67.
YUE Yan, LIN Qimei, GUO Weina, et al. Effect of biochar on salt leaching in different soil layers[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(3): 62–67. (in Chinese)
- [30] 何玉亭, 王昌全, 沈杰, 等. 两种生物质炭对红壤团聚体结构稳定性和微生物群落的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(12): 2333–2342.
HE Yuting, WANG Changquan, SHEN Jie, et al. Effects of two biochars on red soil aggregate stability and microbial community[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(12): 2333–2342. (in Chinese)
- [31] LIU X H, HAN F P, ZHANG X C. Effect of biochar on soil aggregates in the Loess Plateau: results from incubation experiments[J]. International Journal of Agriculture and Biology, 2012, 14(6): 975–979.
- [32] 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.
HAN Jianhong, LI Yanwei, ZHANG Lianke, et al. Effect of biochar and FGD-gypsum application on soil basic physical and chemical properties and maize growth of saline soil[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(9): 5291–5297. (in Chinese)
- [33] 刘鸿骄, 侯亚红, 王磊. 秸秆生物炭还田对围垦盐碱土壤的低碳化改良[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(1): 75–80.
LIU Hongjiao, HOU Yahong, WANG Lei. Amelioration effect of reed straw biochar returning to salty soil in the view of low carbon point[J]. Environmental Science and Technology, 2014, 37(1): 75–80. (in Chinese)
- [34] 孔祥清, 韦建明, 常国伟, 等. 生物炭对盐碱土理化性质及大豆产量的影响[J]. 大豆科学, 2018, 37(4): 647–651.
KONG Xiangqing, WEI Jianming, CHANG Guowei, et al. Effect of biochar on the physical and chemical properties of saline-alkali soil and soybean yield[J]. Soybean Science, 2018, 37(4): 647–651. (in Chinese)
- [35] 孙运朋, 杨劲松, 姚荣江, 等. 生物炭和无机肥对盐碱滩涂围垦农田土壤性状的影响[J]. 土壤通报, 2017, 48(2): 454–459.
SUN Yungpeng, YANG Jinsong, YAO Rongjiang, et al. Effects of biochar and chemical fertilizer application on soil properties in farmland reclaimed from salinity coastal tidal flat[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, 48(2): 454–459. (in Chinese)
- [36] LUO X, LIU G, XIA Y, et al. Use of biochar-compost to improve properties and productivity of the degraded coastal soil in the Yellow River Delta, China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2017, 17(3): 780–789.
- [37] LONARDO S D, BARONTI S, VACCARI F P, et al. Biochar-based nursery substrates: the effect of peat substitution on reduced salinity[J]. Urban Forestry and Urban Greening, 2017, 23: 27–34.
- [38] 朱成立, 吕雯, 黄明逸, 等. 生物炭对咸淡轮灌下盐渍土盐分分布和玉米生长的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 226–234.
ZHU Chengli, LÜ Wen, HUANG Mingyi, et al. Effects of biochar on coastal reclaimed soil salinity distribution and maize growth with cycle fresh and saline water irrigation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 226–234. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190125&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.025. (in Chinese)
- [39] 赵海成, 郑桂萍, 靳明峰, 等. 连年秸秆与生物炭还田对盐碱土理化性状及水稻产量的影响[J]. 西南农业学报, 2018, 31(9): 1836–1844.
ZHAO Haicheng, ZHENG Guiping, JIN Mingfeng, et al. Effects of successive straw and biochar residue incorporation on physical and chemical characters of saline alkali soil and rice yield[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2018, 31(9): 1836–1844. (in Chinese)
- [40] USMAN A R A, AL-WABEL M I, YONG S O K, et al. Conocarpus biochar induces changes in soil nutrient availability and tomato growth under saline irrigation[J]. Pedosphere, 2016, 26(1): 27–38.
- [41] ALI S, RIZWAN M, QAYYUM M F, et al. Biochar soil amendment on alleviation of drought and salt stress in plants: a critical review[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(14): 12700–12712.
- [42] FARHANGI-ABRIZ S, TORABIAN S. Biochar increased plant growth-promoting hormones and helped to alleviate salt stress in common bean seedlings[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2018, 37(2): 591–601.