

生物炭连续还田后效对盐碱土稻田养分、酶活性和腐殖质组分的影响

李红宇,林添,王志君,赵海成,郑桂萍,吕艳东,钱永德,范名宇

(黑龙江八一农垦大学农学院,黑龙江省现代农业栽培技术与作物种质改良重点实验室,黑龙江 大庆 163319)

摘 要:为明确生物炭连续还田对苏打盐碱土稻田的改良效果,于 2014—2019 年通过盆栽试验研究了生物炭连续还田对苏打盐碱土稻田养分含量、电导率、pH 值、酶活性和腐殖质组分的影响。结果表明:生物炭还田量为 7.5~16.5 t·hm⁻² 时,土壤全氮、全磷、有效磷和速效钾含量分别提高 19.09%~30.00%、34.58%~45.37%、19.04%~39.16%、38.65%~63.12% ($P<0.05$);生物炭还田量 12.0~16.5 t·hm⁻²,土壤碱解氮含量提高 5.34%~6.87% ($P<0.05$);土壤电导率随生物炭还田量增大呈先增后降的趋势,峰值在 7.5 t·hm⁻²;土壤 pH 值与生物炭还田量显著正相关,并且生物炭 12.0~16.5 t·hm⁻² pH 值显著高于不添加生物炭处理;生物炭年还田量 7.5~12.0 t·hm⁻² 时,有机质含量、腐殖质全碳量、胡敏素碳量分别较不添加生物炭处理提高 48.74%~70.51%、47.40%~69.94%、68.94%~96.48%;HA/FA 和 PQ 随生物炭还田量增大呈先增后降的趋势,峰值在 12 t·hm⁻²;生物炭还田量 7.5 kg·hm⁻² 时,脲酶活性较不添加生物炭处理提高 89.03% ($P<0.05$),碱性磷酸酶降低 41.27% ($P<0.05$);生物炭还田量 12.0 kg·hm⁻² 时,脲酶活性提高 53.33% ($P<0.05$),蔗糖酶活性提高 41.84% ($P<0.05$)。因此,生物炭连续还田能够有效改良苏打盐碱土稻田,7.5~12.0 t·hm⁻² 为适宜生物炭还田量。

关键词:生物炭连续还田;盐碱土;土壤养分;酶活性;腐殖质组分

中图分类号:S156.4⁺5 文献标志码:A

Effects of biochar continuous returning on soil nutrients, enzyme activities and humus components in soda saline-alkali paddy field soil

LI Hongyu, Lin Tian, WANG Zhijun, ZHAO Haicheng, ZHENG Guiping,
LV Yandong, QIAN Yongde, FAN Mingyu

(College of Agronomy, Heilongjiang Bayi Agricultura University, Key Laboratory of Crop Genetic, Breeding and Cultivation, Heilongjiang Provincial Department of Education, Daqing, Heilongjiang 163000, China)

Abstract: To understand the improvement effects of biochar on soda saline-alkali soil paddy field, pot experiments were set up during 2014 to 2019. The effects of continuous biochar returning on content of soil nutrient content, electric conductivity, pH, enzymatic activities and humus component were studied. The results showed that under biochar returning of 7.5~16.5 t·hm⁻², the contents of total N, total P, available P and available K in the soil increased by 19.09%~30.00%, 34.58%~45.37%, 19.04%~39.16%, 38.65%~63.12% ($P<0.05$) respectively. Under biochar returning of 12.0~16.5 t·hm⁻², Alkaline N in the soil increased by 5.34%~6.87% ($P<0.05$). The soil electrical conductivity first increased and then decreased with the amount of biochar returning, and the peak value appeared at 7.5 t·hm⁻². Soil pH was significantly positively correlated with biochar returning amount, and soil pH of biochar 12.0~16.5 t·hm⁻² was significantly higher than that without biochar. Under biochar returning of 7.5~12.0 t·hm⁻², compared with the treatment without biochar, organic matter content, total humus carbon and humin carbon content increased by 48.74%~70.51%, 47.40%~69.94% and 68.94%~96.48% respectively. HA/FA and PQ increased first and then decreased with biochar returning amount, and the peak value was 12 t·hm⁻². Under biochar returning of 7.5 t·hm⁻², compared with the treatment without biochar, urease ac-

tivity increased by 89.03% and alkaline phosphatase decreased by 41.27%. Under biochar returning of $12.0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, urease activity was increased by 53.33% ($P < 0.05$), and the invertase activity was increased by 41.84% ($P < 0.05$). Therefore, continuous biochar returning effectively improved the paddy field of soda saline-alkali soil. The $7.5 \sim 12.0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ amount is recommended as the suitable biochar returning from this study.

Keywords: biochar continuous returning; saline-alkali soil; soil nutrient; enzymatic activity; humus component

目前,全球盐碱地总面积约 $1.10 \times 10^9 \text{ hm}^2$, 其中中国盐碱地总面积为 $3.69 \times 10^7 \text{ hm}^2$ [1-2]。盐碱化耕地是中国最主要的中低产田类型之一,提升盐碱耕地质量对提高粮食产量意义重大。同时,盐碱地的开发利用为我国提供了重要的后备耕地资源 [3]。盐碱地改良和治理的核心措施是增加土壤有机质含量,有机质含量的提高利于改善土壤物理性质、加速土体脱盐、提高养分含量。生物炭是一种具有高碳含量、有机物和无机矿物的新型碳质复合材料,孔隙结构丰富、比表面积巨大、吸附能力强,可明显改善土壤微观结构,促进团聚体形成,固存矿质养分,提高土壤通透性和肥力,增加有机碳含量 [4]。生物炭对苏打盐碱土改良效果显著。李少朋等 [5] 对天津滨海盐碱土的研究表明,施用生物炭后土壤有机碳、速效养分含量以及酶活性明显增加,是盐碱地复垦和生态重建的改良剂。孔祥清等 [6] 改良松嫩平原苏打盐碱地的实践显示,生物炭还田增加盐碱土水分渗透性能,提高盐碱地的有机质、速效磷、速效钾、全氮、全磷和全钾含量。屈忠义等 [7] 研究内蒙古硫酸盐—氯化物型盐土发现施用生物炭 $22.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 可以显著降低中度盐碱地土壤 EC 和 pH 值,促进土壤微生物的生长繁殖。韩剑宏等 [8] 研究认为生物炭和腐殖酸都具有改良土壤盐碱性、提高土壤肥力的作用,二者联合配施对降低土壤 pH 值、电导率 (EC)、碱化度 (ESP) 及提高土壤养分的效果更明显。郭琴波等 [9] 对生物炭等量代换氮肥的研究显示,减氮 30% 同时配施生物炭可显著提高土壤肥力,减少土壤有机碳 (SCO) 矿化,增加土壤固碳,提高土壤酶活性及水稻产量。虽然生物炭对盐碱地培肥改良的机理和效果方面已有部分研究,但是关于生物炭连续还田对苏打盐碱地影响的长期定位试验报道较少。本试验研究了生物炭连续还田对苏打盐碱土稻田养分含量、酶活性和腐殖质组分的影响,以期对苏打盐碱地的生物炭改良提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与试验设计

参试水稻品种为垦鉴稻 5 号。生物炭为水稻秸

秆炭 (辽宁金和福农业开发有限公司), 其碳含量为 56.61%, 氮含量为 13.60%, 灰分含量为 21.07%, pH 值 9.04。盆栽试验, 盆钵高 30.5 cm, 直径 30 cm。单因素完全随机试验设计, 生物炭每年还田量分别为 $0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (BC0)、 $3.0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (BC3.0)、 $7.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (BC7.5)、 $12.0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (BC12.0) 和 $16.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (BC16.5), 每个处理种植 12 盆。

试验于 2014—2019 年在黑龙江八一农垦大学进行。参试土壤取自黑龙江八一农垦大学校内的未开垦原生苏打盐碱土 (OS)。参试土壤的基础值为全盐含量 $5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH 8.71, 碱解氮含量 $89.52 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有效磷含量 $17.23 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾含量 $233.88 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有机质含量 $16.92 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。每盆装风干、粉碎、混匀的盐碱土 12.00 kg , 将生物炭和基肥埋在盆钵中间, 之后向盆钵内加水至水层稳定, 采用电动搅拌机搅浆。搅浆后 5 d 插秧, 插秧规格为 4 穴 · 盆⁻¹, 3 苗 · 穴⁻¹。参试肥料为尿素、硫酸铵、磷酸二铵和硫酸钾, 基肥 N、P、K 施用量按照 39.6 、 69.0 、 $42.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 计算, 分蘖肥和调节肥 N 施用量分别为 28.35 、 $9.35 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 穗肥 N 和 K 施用量分别为 $14.39 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $28.50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。其他栽培管理措施按当地常规生产进行。

水稻收获后, 土壤原位保留至下一年春季。每年春季将同一处理各盆土壤粉碎后重新混合均匀, 之后等分为 12 盆, 用于试验。各处理每年采用相同的方法添加与第一年等量的生物炭。

1.2 土壤取样及指标测定方法

生物炭连续还田第 6 年 (2019 年) 的 10 月中旬 (水稻收获后), 每处理使用土壤取样器采集 $0 \sim 10 \text{ cm}$ 土壤样品, 每盆取 1 个样点, 4 个样点混合为一个样品, 每处理 3 个重复。土壤样品置于避光通风处风干, 挑去肉眼可见细根和杂质, 过 2 mm 筛, 备用。参照鲁如坤 [10] 方法测定土壤化学性质。采用重铬酸钾法测定土壤有机质含量, 采用凯氏定氮法测定全氮含量, 采用氢氧化钠熔融—钼锑抗比色法测定土壤全磷含量, 采用原子吸收分光光度法测定土壤全钾含量、速效钾含量, 土壤碱解氮含量采用扩散法测定, 采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法测定土壤速效磷含量, 采用 pH 计 (电位法) 测定土壤

pH 值,采用电导率仪(电极法)测定土壤电导率。采用重铬酸钾氧化法测定土壤腐殖质组成^[11-12]。土壤酶活性测定参照松松荫^[13]相关方法:土壤过氧化氢酶采用高锰酸钾滴定法,蔗糖酶活性的测定采用 3,5-二硝基水杨酸比色法,脲酶活性的测定采用苯酚-次氯酸钠比色法,土壤酸性磷酸酶用磷酸苯二钠法测定。

1.3 数据分析

采用 EXCEL 2010 和 SPSS 23.0 进行数据的统计和分析。采用 SSR 法检验处理间的差异显著性,以 $P<0.05$ 作为显著性差异水平。

2 结果与分析

2.1 生物炭连续还田对土壤氮磷钾含量的影响

由表 1 可见,连续种植水稻 6 a 后,BC₀ 的土壤全氮、全磷、有效磷和速效钾含量显著低于 OS,而全钾、碱解氮和有效磷差异不显著。除全钾处理间无显著差异外,全氮、全磷、碱解氮、有效磷和速效钾均随生物炭还田量增大呈增加趋势。其中 BC7.5、BC12.0、BC16.5 的土壤全氮含量较 BC0 分别提高 19.09%、25.45%、30.00% ($P<0.05$),BC7.5、BC12.0、BC16.5 的全磷含量分别提高 34.58%、36.78%、45.37% ($P<0.05$),BC12.0 和 BC16.5 的碱解氮分别提高 5.34%、6.87% ($P<0.05$),BC3.0、BC7.5、BC12.0、

BC16.5 的有效磷含量分别提高 13.61%、19.04%、26.39%、39.16% ($P<0.05$),BC7.5、BC12.0、BC16.5 的速效钾含量分别提高 38.66%、53.32%、63.12% ($P<0.05$)。

2.2 生物炭连续还田对土壤 pH 值和电导率的影响

由图 1 可看出,连续种植 6 a 水稻后,BC0、BC3.0、BC7.5、BC12.0 和 BC16.5 土壤 pH 值由 OS 的 8.71 下降至 6.65、6.93、7.04、7.11、7.14,差异显著。土壤 pH 值随着生物炭还田量的增加呈增加趋势,BC3.0 与 BC0 差异不显著,BC7.5、BC12.0、BC16.5 的 pH 值分别提高 5.76%、6.91%、7.27% ($P<0.05$)。土壤电导率也大幅度降低,BC0、BC3.0、BC7.5、BC12.0 和 BC16.5 由 OS 的 758.8 $\mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$ 下降至 315.7、330.8、375.1、345.0、345.6 $\mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。土壤电导率随着生物炭还田量的增加呈先增后降的趋势,其中 BC7.5 电导率较 BC0 和 BC3.0 分别提高 18.79%和 13.38% ($P<0.05$)。

2.3 生物炭连续还田对土壤腐殖质组分的影响

表 2 显示,连续种植 6 a 水稻后,各处理的土壤有机质及腐殖质各组分均较 OS 大幅增加,有机质含量、腐殖质全碳量、腐殖酸总碳量、胡敏酸碳量、富里酸碳量和胡敏素碳量增幅分别为 21.81%~146.74%、29.85%~161.75%、57.27%~127.27%、122.50%~125%、295.24%~695.24%、9.21%~159.91%。

表 1 不同生物炭处理土壤氮磷钾含量

Table 1 Contents of soil nitrogen, phosphorus and potassium under different biochar treatments

处理 Treatment	全氮 Total N /(g · kg ⁻¹)	全磷 Total P /(g · kg ⁻¹)	全钾 Total K /(g · kg ⁻¹)	碱解氮 Alkaline N /(mg · kg ⁻¹)	有效磷 Available P /(mg · kg ⁻¹)	速效钾 Available K /(mg · kg ⁻¹)
OS	1.27±0.02c	0.507±0.010b	19.68±0.63a	89.52±0.95c	17.23±0.28d	233.88±13.67c
BC0	1.10±0.04d	0.454±0.015c	21.91±1.14a	89.87±1.87c	16.75±0.69d	182.50± 8.89d
BC3.0	1.15±0.04d	0.483±0.010bc	21.96±1.14a	91.92±1.19bc	19.03±0.30c	192.53± 7.28d
BC7.5	1.31±0.02bc	0.611±0.019a	21.70±0.79a	91.58±1.44bc	19.94±0.79bc	253.05±17.11bc
BC12.0	1.38±0.03ab	0.621±0.019a	21.56±1.12a	94.67±0.96ab	21.17±0.50b	279.82±13.43ab
BC16.5	1.43±0.04a	0.660±0.018a	19.64±0.29a	96.04±1.96a	23.31±0.46a	297.70±16.26a

注:不同字母表示处理间的差异显著($P<0.05$),下同。
Note: Different letters indicate significant differences among treatments at the 0.05 level. The same below.

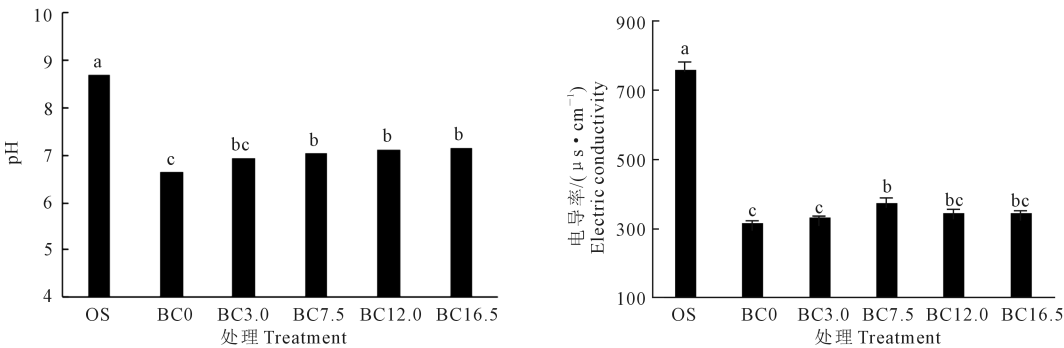


图 1 不同生物炭处理土壤 pH 值和电导率的比较

Fig.1 Comparison of soil pH and electrical conductivity under different biochar treatments

土壤有机质含量、腐殖质全碳量和胡敏素碳量随生物炭还田量增加呈增加趋势, BC7.5、BC12.0、BC16.5 的有机质含量分别较 BC0 提高 48.47%、70.51% 和 102.57% ($P<0.05$), 腐殖质全碳量分别较 BC0 提高 47.40%、69.96% 和 101.58% ($P<0.05$), 胡敏素碳量分别较 BC0 提高 69.99%、96.52% 和 137.97% ($P<0.05$), BC3.0 的有机质含量、腐殖质全碳量和胡敏酸碳量与 BC0 差异均不显著。

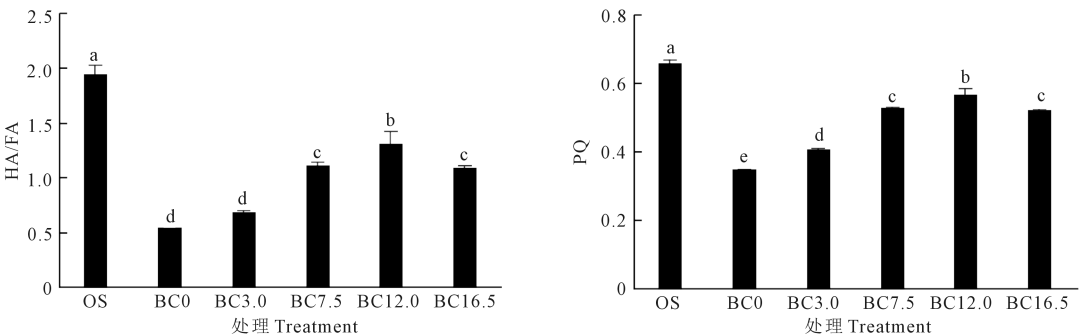
生物炭还田处理的腐殖酸总碳量和富里酸碳量均较 BC0 显著下降, BC3.0、BC7.5、BC12.0 和 BC16.5 的腐殖酸总碳量分别下降 36.00%、30.40%、26.00%、30.80%, 富里酸碳量分别下降 27.54%、

50.30%、52.09%、50.30%。BC12.0 胡敏酸碳量较 BC0 提高 16.85% ($P<0.05$), BC3.0、BC7.5 和 BC16.5 与 BC0 差异不显著。

由图 2 可以看出, 连续种植 6 a 水稻后各处理的 HA/FA 和 PQ 显著降低, 其中 HA/FA 的降低幅度为 32.65%~72.47%, PQ 的降低幅度为 14.42%~47.19%。HA/FA 和 PQ 随生物炭还田量增大均呈先增后降的趋势, 且以 BC12.0 最高。BC7.5、BC12.0、BC16.5 的 HA/FA 分别较 BC0 提高 108.00%、144.63%、103.00% ($P<0.05$), BC3.0 与 BC0 差异不显著。BC3.0、BC7.5、BC12.0、BC16.5 的 PQ 分别较 BC0 提高 16.58%、51.15%、62.07%、49.43% ($P<0.05$)。

表 2 不同生物炭处理土壤腐殖质组分的比较/(g·kg⁻¹)
Table 2 Comparison of soil humus components under different biochar treatments

处理 Treatment	有机质 Organic matter	腐殖质全碳量 Humus total carbon	腐殖酸总碳量 Humic acid carbon	胡敏酸碳量 Humic acid carbon	富里酸碳量 Fulvic acid carbon	胡敏素碳量 Humin carbon
OS	16.92±0.73e	9.28±0.66e	1.10±0.07d	0.40±0.01c	0.21±0.02d	8.68±0.64e
BC0	20.61±0.69d	12.05±0.54d	2.50±0.08a	0.89±0.04b	1.67±0.08a	9.48±0.43de
BC3.0	22.02±1.08d	13.35±0.45d	1.60±0.01c	0.82±0.03b	1.21±0.05b	11.32±0.37d
BC7.5	30.60±0.81c	17.76±0.95c	1.74±0.05bc	0.92±0.02b	0.83±0.04c	16.02±0.88c
BC12.0	35.14±2.01b	20.48±0.95b	1.85±0.03b	1.04±0.07a	0.80±0.03c	18.63±0.89b
BC16.5	41.75±0.62a	24.29±1.09a	1.73±0.06bc	0.90±0.04b	0.83±0.02c	22.56±1.03a



注: HA/FA-胡敏酸碳与富里酸碳的比; PQ-胡敏酸在可提取腐殖质 (HA+FA) 中所占的比例。
Note: HA/FA-the ratio of humic acid carbon and fulvic acid carbon; PQ-the ratio of humic acid proportion in ex-tract-able humus (HA+FA).

图 2 不同生物炭处理土壤 HA/FA 和 PQ 的比较

Fig.2 Comparison of soil HA/FA and PQ under different biochar treatments

2.4 生物炭连续还田对土壤酶活性的影响

由图 3 可以看出, 连续种植 6 a 水稻后, BC0 的脲酶、碱性磷酸酶、过氧化氢酶和蔗糖酶活性较 OS 无显著变化。脲酶活性随生物炭还田量增大呈先增后降的趋势, 其中以 BC7.5 脲酶活性最高, 较 OS 和 BC0 提高 102.25% 和 89.03% ($P<0.05$), 其次为 BC12.0, 较 OS 和 BC0 提高 64.05% 和 53.33% ($P<0.05$)。BC3.0 和 BC7.5 碱性磷酸酶活性显著低于 BC0, 分别降低 36.06%、41.27%; BC12.0 和 BC16.5 的碱性磷酸酶活性显著高于 BC3.0 和 BC7.5, 与 BC0 差异不显著。过氧化氢酶活性和蔗糖酶活性均随生物

炭还田量增大呈先增后降。过氧化氢酶活性以 BC7.5 活性最高, 其与 BC16.5 差异显著, 与其他处理差异不显著。蔗糖酶活性以 BC12.0 最强, 与 BC7.5 差异不显著, 较 BC0、BC3.0 和 BC16.5 分别提高 41.84%、32.02%、20.59% ($P<0.05$)。

2.5 生物炭还田量与养分含量、腐殖酸组分及酶活性的相关分析

由表 3 可以看出, 生物炭还田量与全氮、全磷、碱解氮、有效磷和速效钾含量呈极显著正相关, 与全钾含量呈显著负相关; 与 pH 值显著正相关, 与电导率无显著相关性; 与有机质含量、腐殖质全碳量和

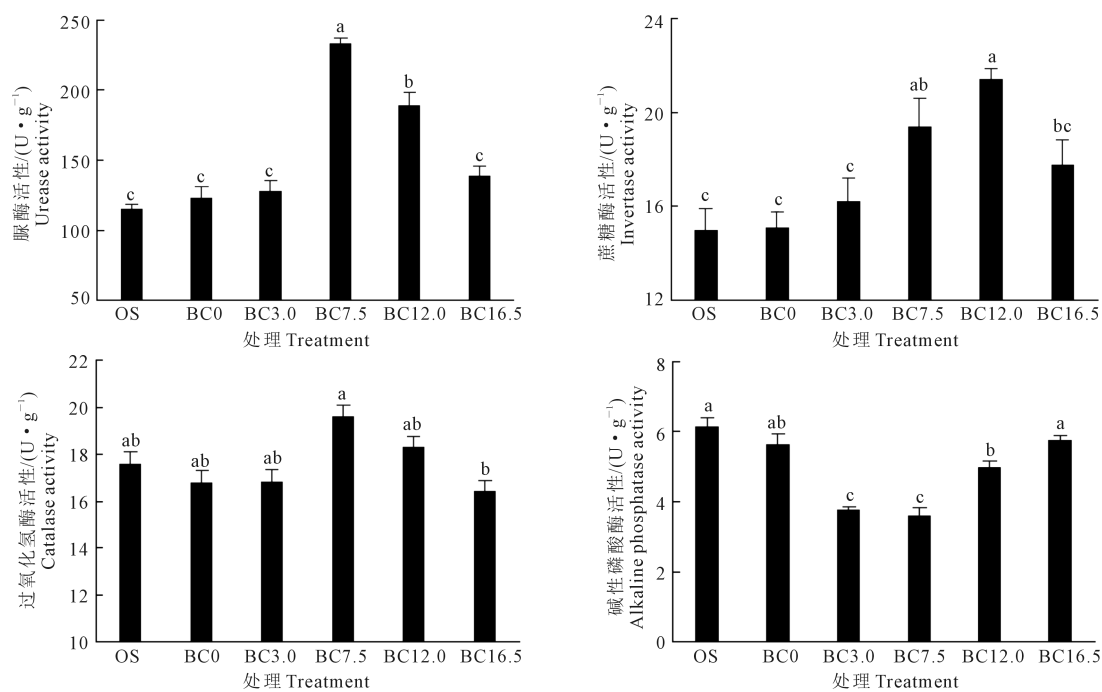


图 3 不同生物炭处理土壤酶活性的比较

Fig.3 Comparison of soil enzyme activities under different biochar treatments

表 3 生物炭还田量与养分含量、腐殖酸组分及酶活性的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between biochar returning amount and nutrient content, humic acid composition and enzyme activity

	全氮 Total N	全磷 Total P	全钾 Total K	碱解氮 Alkaline N	有效磷 Available P	速效钾 Available K	pH	电导率 Electric conductivity	有机质 Organic matter
生物炭还田量 Biochar returning amount	0.981**	0.949**	-0.828*	0.957**	0.981**	0.977**	0.899*	0.501	0.993**

	腐殖质全碳量 Humus total carbon	腐殖酸总碳量 Humic acid carbon	胡敏酸碳量 Humic acid carbon	富里酸碳量 Fulvic acid carbon	胡敏素碳量 Humin carbon	过氧化氢酶 Catalase	脲酶 Urease	碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase	蔗糖酶 Invertase
生物炭还田量 Biochar returning amount	0.996**	-0.518	0.48	-0.845*	0.997**	0.052	0.282	0.29	0.644

注：*，** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平显著。

Note: *，** indicate significance at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

胡敏素碳量呈极显著正相关,与富里酸碳量呈显著负相关,与腐殖酸总碳量和胡敏酸碳量相关不显著;与过氧化氢酶、脲酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶活性相关不显著。

3 讨 论

盐碱土由于理化性质恶劣导致离子拮抗和渗透胁迫,直接影响根际微生物的组成和活动、养分

转化及其有效性,降低有效氮、磷、钾含量^[14-15]。前人研究表明,生物炭还田可以增加盐碱土壤全氮、全磷、全钾、速效磷、速效钾含量和有效性^[16],并且生物炭本身具有大量的营养元素,较大的表面积和极强的吸附能力,增强了对土壤中养分的吸附能力,减少了养分的损失^[17]。本研究显示,土壤全氮、全磷、碱解氮、有效磷和速效钾含量均与生物炭还田量呈极显著正相关。生物炭还田量 7.5 ~ 16.5

$t \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,全氮、全磷和速效钾含量分别提高 19.09% ~ 30.00%、34.58% ~ 45.37%、38.65% ~ 63.12% ($P < 0.05$); $12.0 \sim 16.5 t \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,碱解氮含量提高 5.34% ~ 6.87% ($P < 0.05$); $3.0 \sim 16.5 t \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,有效磷含量提高 13.61% ~ 39.16% ($P < 0.05$)。可见,生物炭还田量大于 $7.5 t \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,除全钾外其他养分含量均显著增加。综合分析,生物炭提高了盐碱土壤养分含量的原因主要有:(1)生物炭能够产生正、负电荷,能够有效吸附盐土中的养分,降低盐土的淋溶损失^[18];(2)生物炭本身含有大量营养元素,可显著增加盐碱土壤养分含量^[19];(3)生物炭可促进营养物质转化,提高养分有效性^[20]。

土壤腐殖质是有机物经过微生物新陈代谢降解后合成的一类非均质的呈黑色或黑褐色的有机高分子化合物^[21],一般占有机质总量的 50% ~ 70%,具有吸收、交换等多种功能,对土壤的物理、化学及生物学性质均有重要影响^[22],经常作为反映土壤肥力状况的重要指标^[23]。生物炭是土壤碳库中惰性部分的重要组成部分,是土壤腐殖质的重要来源^[24]。本研究结果表明,盐碱土有机质含量和腐殖质全碳量与生物炭还田量呈极显著正相关,还田量 $> 7.5 t \cdot \text{hm}^{-2}$ 时有机质含量和腐殖质全碳量与空白对照差异显著。前人研究多认为添加生物炭会明显提高土壤有机碳的含量,且可长时间持续进行碳的补充^[25-26],但也有研究者认为添加生物炭对土壤有机碳影响较小^[27],不同研究结果的差异也反映出土壤有机质形成的复杂性。同时,影响有机质及组成的因素也十分复杂,比如气候、土地类型、土壤层次、有机物料等。

根据腐殖质在酸碱中的溶解度分为胡敏酸、富里酸和胡敏素,其中胡敏酸最活跃,富里酸经氧化缩合形成胡敏酸碳,在胡敏酸碳的积累过程中起重要作用^[28-29]。胡敏酸碳(HA)/富里酸碳(FA)和 PQ 值常用来评价腐殖质品质,可以用来表征土壤的腐殖化程度,其比值越大说明腐殖质品质越好。本研究结果表明,胡敏酸碳量与生物炭还田量无显著相关关系,并且以生物炭还田量 $12 t \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理胡敏酸碳量最高;富里酸碳量与生物炭还田量呈显著负相关;HA/FA 和 PQ 随生物炭还田量增大呈先增后降的趋势,以还田量 $12 t \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理最高;当还田量大于 $7.5 t \cdot \text{hm}^{-2}$ 时 HA/FA 大于 1,即胡敏酸碳量大于富里酸碳量。因此,生物炭年还田量 $7.5 \sim 12.0 t \cdot \text{hm}^{-2}$ 时土壤熟化程度较高。

土壤酶是土壤有机质分解与养分转化和循环的驱动力^[30],反映土壤微生物的活性^[31],与土壤理化特征、养分含量和有机质转化有密切关系,是评价土壤供肥水平的关键因素^[32]。过氧化氢酶可反映土壤中氧化还原的能力^[33],蔗糖酶是土壤碳循环转化的关键酶^[34],脲酶直接参与土壤有机氮的转化^[35],碱性磷酸酶可以促进土壤中无机磷酸盐或有机磷酸化合物转化为无机态磷更好地被植物利用^[36]。生物炭具有疏松多孔结构,可以改善土壤的通气性,保持土壤的水分,而土壤含水量、有机质等因素对土壤酶活性有很大影响,利于增加土壤蔗糖酶、脲酶活性和土壤微生物量碳含量,减少氮素流失^[37-38]。本研究结果表明,苏打盐碱土连续种植水稻 6 a 后,未添加生物炭处理的土壤脲酶、碱性磷酸酶、过氧化氢酶和蔗糖磷酸酶活性变化不显著。生物炭连续还田处理的脲酶、过氧化氢酶和蔗糖磷酸酶活性随生物炭还田量呈先升后降的趋势,说明虽然适宜的生物炭还田量能够提高耕作层土壤酶活性,而当生物炭投入量超过一定临界值,酶活性反而下降,这与张泽慧^[39]的研究结果一致。生物炭还田 $7.5 \sim 12.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,脲酶、过氧化氢酶和蔗糖磷酸酶活性高,尽管碱性磷酸酶活性较低,但仍能维持较高的有效磷含量,可以作为生物炭还田的适宜施用量。

4 结 论

原生苏打盐碱土连续种植 6 a 水稻后,土壤全氮含量、全磷含量、速效钾含量、电导率、pH 值、HA/FA 和 PQ 显著降低,有机质含量、腐殖质全碳量、腐殖酸总碳量、胡敏酸碳量、富里酸碳量显著提高。生物炭连续还田能够显著影响苏打盐碱土养分相关指标(全氮、全磷、碱解氮、有效磷及速效钾)含量、盐碱胁迫强度相关指标(电导率和 pH 值)、土壤有机碳相关指标(有机质含量、腐殖质全碳量、腐殖酸总碳量、胡敏酸碳量、富里酸碳量、胡敏素碳量、HA/FA 和 PQ,土壤脲酶、碱性磷酸酶、过氧化氢酶及蔗糖酶活性),并且多为正向影响。综合考量,认为生物炭 $7.5 \sim 12.0 t \cdot \text{hm}^{-2}$ 是降低盐碱土壤胁迫强度,提高土壤养分含量,增加腐殖酸碳量,改善酶活性的适宜还田量。

参 考 文 献:

- [1] WICKE B, SMEETS E, DORNBURG V, et al. The global technical and economic potential of bioenergy from salt-affected soils [J]. En-

- ergy and Environmental Science, 2011, 4: 2669-2681.
- [2] 杨劲松,姚荣江.我国盐碱地的治理与农业高效利用[J].中国科学院刊,2015,30(S):162-170.
- YANG J S, YAO R J. Management and efficient agricultural utilization of salt-affected soil in China [J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2015, 30(S): 162-170.
- [3] 杨劲松,姚荣江,王相平,等.中国盐渍土研究:历程、现状与展望[J].土壤学报,2022,59(1):10-27.
- YANG J S, YAO R J, WANG X P, et al. Research on salt-affected soils in China: history, status quo and prospect [J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(1): 10-27.
- [4] TRIPATHI M, SAHU J N, GANESAN P. Effect of process parameters on as production of biochar from biomass waste through pyrolysis a review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 55: 467-481.
- [5] 李少朋,陈咄圳,周艺艺,等.生物炭施用对滨海盐碱土速效养分和酶活性的影响[J].南方农业学报,2019,50(7):1460-1465.
- LI S P, CHEN P Z, ZHOU Y Y, et al. Effects of biochar application on available nutrients and enzyme activities in coastal saline-alkali soil [J]. Journal of Southern Agriculture 2019, 50(7): 1460-1465.
- [6] 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 X Q, WEI J M, CHANG G W, 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.
- [7] 屈忠义,孙慧慧,杨博,等.不同改良剂对盐碱地土壤微生物与作物产量的影响[J].农业机械学报,2021,52(4):311-318+350.
- QU Z Y, SUN H H, YANG B, et al. Effects of different amendments on soil microorganisms and yield of processing tomato in saline alkali soil [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 311-318+350.
- [8] 韩剑宏,孙一博,张连科,等.生物炭与腐殖酸配施对盐碱土理化性质的影响[J].干旱地区农业研究,2020,38(6):121-127.
- HAN J H, SUN Y B, ZHANG L K, et al. Effect of biochar and humic acid on physical and chemical properties of saline-alkali soil [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(6): 121-127.
- [9] 郭琴波,王小利,段建军,等.氮肥减量配施生物炭对稻田有机碳矿化及酶活性影响[J].水土保持学报,2021,35(5):369-374.
- GUO Q B, WANG X L, DUAN J J, et al. Effects of nitrogen reduction combined with biochar application on organic carbon mineralization and enzyme activity in paddy field [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(5): 369-374.
- [10] 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,1999:431-472.
- LU R K. Analytical methods of soil agricultural chemistry [M]. Beijing: China Agricultural Science Press, 1999: 431-472.
- [11] 中华人民共和国林业部.LY/T 1238-1999 森林土壤腐殖质组成的测定[S].北京:中国标准出版社,1999.
- Ministry of Forestry of the PRC. LY/T 1238-1999 Determination of humus fractionation in forest soil[S]. Beijing: Standards Press of China, 1999.
- [12] 刘光崧.土壤理化分析与剖面描述[M].北京:中国标准出版社,1996:33.
- LIU G S. Soil physical and chemical analysis and description of soil profiles [M]. Beijing: Chinese standard press, 1996: 33.
- [13] 关松荫.土壤酶及其研究法.北京:农业出版社,1986:294-297.
- GUAN S Y. Soil enzyme and its research methods [M]. Beijing: Agriculture Press, 1986: 294-297.
- [14] RENGASAMY P. Soil processes affecting crop production in salt-affected soils [J]. Functional Plant Biology, 2010, 37(7): 613-620.
- [15] NELSON D R, MELE P M. Subtle changes in rhizosphere microbial community structure in response to increased boron and sodium chloride concentrations [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2007, 39(1): 340-351.
- [16] 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.
- SUN J N, DONG L K, XU G, et al. Effects of furfural and its biochar additions on physical-chemical characteristics of a saline soil [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(3): 532-538.
- [17] 李卓瑞,韦高玲.不同生物炭添加量对土壤中氮磷淋溶损失的影响[J].生态环境学报,2016,25(2):333-338.
- LI Z R, WEI G L. Effects of biochar with different additive amounts on the leaching loss of nitrogen and phosphorus in soils [J]. Ecology and Environmental Science, 2016, 25(2): 333-338.
- [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, 2017, 625: 320-335.
- [19] 黄哲,曲世华,白岚,等.不同秸秆混合生物炭对盐碱土壤养分及酶活性的影响[J].水土保持研究,2017,24(4):290-295.
- HUANG Z, QU S H, BAI L, et al. Effects of different straw mixing biochar on nutrient and enzyme activity of saline soil[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(4): 290-295.
- [20] 宋延静,张晓黎,龚骏.添加生物炭对滨海盐碱土固氮菌丰度及群落结构的影响[J].生态杂志,2014,33(8):2168-2175.
- SONG Y J, ZHANG X L, GONG J. Effects of biochar amendment on the abundance and community structure of nitrogen-fixing microbes in a coastal alkaline soil [J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(8): 2168-2175.
- [21] PICCOLO A. The supramolecular structure of humic substances: a novel understanding of humus chemistry and implications in soil science[J]. Advances in Agronomy, 2002, 75: 57-134.
- [22] 曹志洪.优质烤烟生产的土壤与施肥[M].南京:江苏科学技术出版社,1991:10-16.
- CAO Z H. Soil and fertilization of high-quality flue-cured tobacco production[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Publishing House, 1991: 10-16.
- [23] KOGUT B M, YASHIN M A, SEMENOV V M, et al. Distribution

of transformed organic matter in structural units of loamy sandy soddy-podzolic soil[J]. Eurasian Soil Science, 2016, 49(1): 45-55.

[24] 邱敬,高人,杨玉盛,等.土壤黑碳的研究进展[J].亚热带资源与环境学报,2009,4(1):88-94.

QIU J, GAO R, YANG Y S, et al. Advances on research of black-carbon in soil[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2009, 4(1): 88-94.

[25] NOVAK J M, BUSSCHER W J, LAIRD D L, et al. Impact of bio-char amendment on fertility of a southeastern coastal plain soil[J]. Soil Science, 2009, 174(2): 105-112.

[26] CHENG C H, LEHMANN J, THIES J E, et al. Oxidation of black carbon by biotic and abiotic processes [J]. Organic Geochemistry, 2006, 37(11): 1477-1488.

[27] SMITH J L, COLLINS H P, BAILEY V L. The effect of young biochar on soil respiration [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2010, 42(12): 2345-2347.

[28] ZHOU Y, SELVAM A, WONG J W C. Evaluation of humic substances during co-composting of food waste, sawdust and Chinese medicinal herbal residues [J]. Bioresource Technology, 2014, 168: 229-234.

[29] 刘敏,杨永锋,陈红丽.不同有机物配施化肥对植烟土壤腐殖质碳的影响[J].河南农业科学,2017,46(2):38-42.

LIU M, YANG Y F, CHEN H L. Effects of different organic matters with chemical fertilizer on humus carbon in tobacco-planting soil[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2017, 46(2): 38-42.

[30] DEFOREST J L. The influence of time, storage temperature, and substrate age on potential soil enzyme activity in acidic forest soils using MUB-linked substrates and l-DOPA [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2009, 41(6): 1180-1186.

[31] 高凤,杨风军,吴瑕,等.施用生物炭对白菜根际土壤中有机质含量及酶活性的影响[J].土壤通报,2019,50(1):103-108.

GAO F, YANG F J, WU X, et al. Effects of biochar application on organic matter content and enzyme activity in rhizosphere soil of Chinese cabbage[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, 50(1): 103-108.

[32] 蔡丽君,张敬涛,盖志佳,等.免耕条件下秸秆还田量对土壤酶活性的影响[J].土壤通报,2015,46(5):1127-1132.

CAI L J, ZHANG J T, GAI Z J, et al. Effect of the amount of stalk return to field on soil enzyme activities under no-tillage [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015, 46(5): 1127-1132.

[33] LIU G M, ZHANG X C, WANG X P, et al. Soil enzymes as indicators of saline soil fertility under various soil amendments[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2017, 237: 274-279.

[34] MA Q, SONG W, WANG R, et al. Physicochemical properties of biochar derived from anaerobically digested dairy manure [J]. Waste Management, 2018, 79(SEP.): 729-734.

[35] 王兴龙,朱敏,杨帆,等.配施有机肥减氮对川中丘区土壤微生物量与酶活性的影响[J].水土保持学报,2017,31(3):271-276.

WANG X L, ZHU M, YANG F, et al. Effects of reducing nitrogen and applying organic fertilizers on soil microbial biomass carbon and enzyme activity in the hilly area of central Sichuan Basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(3): 271-276.

[36] 田给林,严婷婷,毕艳孟,等.草莓连作土壤灭菌与施用有机肥对根际土壤酚酸及土壤酶活性的影响[J].园艺学报,2015,42(10):2039-2048.

TIAN G L, YAN T T, BI Y M, et al. Effects of continuous cropping soil sterilization and applying of different fertilizer on phenolic acids in rhizosphere soil of the strawberry plants and soil enzyme activities [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2015, 42(10): 2039-2048.

[37] 赵军,耿增超,尚杰,等.生物炭及炭基硝酸铵对土壤微生物量碳、氮及酶活性的影响[J].生态学报,2016,36(8):2355-2362.

ZHAO J, GENG Z C, SHANG J, et al. Effects of biochar and bio-char-based ammonium nitrate fertilizers on soil microbial biomass-carbon and nitrogen and enzyme activities[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(8): 2355-2362.

[38] GUL S, WHALEN J K, THOMAS B W, et al. Physico-chemical properties and microbial responses in biochar-amended soils; mechanisms and future directions[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2015, 206: 46-59.

[39] 张泽慧.有机物料添加对退化黑土无机氮及腐殖酸组分的模拟研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2020.

ZHANG Z H. Simulation study on inorganic nitrogen and humic acid composition of degraded black soil by adding organic materials[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2020.