

# 不同秸秆混合生物炭对盐碱土壤养分及酶活性的影响

黄哲<sup>1</sup>, 曲世华<sup>1</sup>, 白岚<sup>1</sup>, 尚少鹏<sup>1</sup>, 李玉梅<sup>2</sup>, 张连科<sup>2</sup>

(1. 包头市环境科学研究院, 包头 014010; 2. 内蒙古科技大学 能源与环境学院, 包头 014010)

**摘要:** 研究不同秸秆混合生物炭对盐碱土壤养分含量和酶活性的影响差异, 为盐碱土壤改良和资源的合理利用提供理论参考。以玉米秸秆、玉米芯、芦苇分别和剩余活性污泥混合在 450℃ 裂解得到的混合生物炭为添加材料, 以内蒙古盐碱土壤为供试土壤, 研究不同混合生物炭添加对盐碱土壤 pH 值、阳离子交换能力、养分含量及土壤脲酶活性、蔗糖酶活性、过氧化氢酶活性的影响。结果表明: 不同混合生物炭表面化学官能团种类一致, 含量有差异; 混合生物炭的添加能够小幅度降低土壤 pH 值; 三种混合生物炭的加入大幅度提高了土壤阳离子交换能力, 且随着混合生物炭添加量的增加而增强; 混合生物炭的添加显著提高了盐碱土壤的养分含量, 由玉米秸秆和污泥制备的混合生物炭主要增加总磷和速效磷含量, 而添加芦苇和污泥制备的混合生物炭显著提高了土壤速效钾水平; 添加混合生物炭对土壤蔗糖酶和脲酶活性有显著的促进作用, 尤其是高添加量 (25 g/kg) 对 2 种酶的促进作用显著高于低添加量 (10 g/kg, 20 g/kg); 混合生物炭对土壤过氧化氢酶活性的影响表现为中、低添加量 (20 g/kg, 10 g/kg) 的生物炭对过氧化氢酶的促进作用显著高于高添加量 (25 g/kg)。

**关键词:** 混合生物炭; 盐碱土壤; 养分; 酶活性

中图分类号: S156

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)04-0290-06

## Effects of Different Straw Mixing Biochar on Nutrient and Enzyme Activity of Saline Soil

HUANG Zhe<sup>1</sup>, QU Shihua<sup>1</sup>, BAI Lan<sup>1</sup>, SHANG Shaopeng<sup>1</sup>, LI Yumei<sup>2</sup>, ZHANG Lianke<sup>2</sup>

(1. Baotou Institute of Environment Science, Baotou 014010, China; 2. School of Energy and Environment, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

**Abstract:** The various effects of different straw biochar on nutrient contents and enzyme activities were studied in order to provide information for saline soil and proper management of residue. The saline soil that originated from the Inner Mongolia was used as the sample. The influences of corn stover, corn cob, reed and municipal sludge mixing biochar that pyrolyzed that 450℃ on soil pH, CEC, nutrient contents and enzyme activities were investigated. The results showed that kinds of mixing biochar surface chemical functional groups were consistent and there were differences in contents; pH value was slightly lowered due to the increasing amount of mixing biochar, CEC in the saline soil was significantly improved. The three mixing biochar could ameliorate the nutrient content of saline soil. The application of biochar prepared by corn stover and sludge mainly promoted the level of available K while the biochar prepared by reed and sludge improved the contents of total P and available P. Adding mixing biochar had the significant promotive effects on the activities of sucrase and urease in the soil, and the promotive effects of adding high dose of biochar were significantly greater than those of adding middle dose or low dose of biochar. The impact of adding biochar on the activity of catalase in the saline soil presented that adding middle dose or low dose of biochar had significantly greater promotive effect on catalase activity than adding high dose of biochar.

**Keywords:** mixing biochar; saline soil; nutrient; enzyme activity

据统计, 当前中国每年秸秆产量约为 8 亿 t, 合理开发利用秸秆等农业废弃物资源仍然是亟需解决的

问题<sup>[1]</sup>。已有研究表明农林作物秸秆的施用可以提高土壤肥力, 但由于秸秆类材料易被微生物分解, 其

改良效果并不长久,还可能会引起二氧化碳等温室气体释放增加,其直接还田利用面临严峻的现实挑战<sup>[2]</sup>。截至 2015 年末,我国污泥的产量已达到 2 600 万 t。由于污水处理厂剩余活性污泥含有大量有机质、重金属,病原微生物,处理不当,还会引起二次污染<sup>[3]</sup>。上述两种生物质产量大,再次利用率低,且容易对环境造成影响。

生物炭(Biochar,BC)是指生物质在完全或部分缺氧的条件下以及相对较低的温度(<700℃)条件下,经热解炭化形成的一种含碳量极其丰富的、性质稳定的产物,本质属于黑炭的一种<sup>[4]</sup>。生物炭的稳定性以及良好的表面性状,使其具备在全球碳的生物地球化学循环、土壤改良及土壤污染物质的生态修复等方面得到应用的美好前景<sup>[5]</sup>。大量理论与实践应用表明<sup>[6-8]</sup>,生物炭有利于提高土壤肥力,促进农作物生长,增加作物产量。顾美英等<sup>[9]</sup>研究发现生物炭能够提高新疆灰漠土和风沙土连作棉田根际土壤养分和微生物多样性。李明等<sup>[10]</sup>研究表明水稻和玉米秸秆炭均可以提高土壤养分含量和微生物量水平,均改变了土壤微生物群落结构。王建俊<sup>[11]</sup>研究中指出将污泥加工处理后作为农肥,对农作物必须的肥料组成,将增产效果,也可以对土壤进行改良。制备材料是影响生物炭表面结构和性质的重要因素,材料不同,生物炭所含元素、基本性质也不同<sup>[12]</sup>。

目前我国盐碱土总面积约 3 600 万 hm<sup>2</sup>,占全国可利用土地面积的 4.88%<sup>[13]</sup>,在耕地面积日趋减少,人口日益膨胀,可用淡水资源日趋匮乏的今天,盐碱地作为潜在耕地的后备资源,有着巨大的开发潜力。盐碱土物理化学性状恶劣,不仅导致土壤生产力降低,而且还会引发诸多环境问题<sup>[14]</sup>,因此,对盐土的改良显得愈发重要。目前,盐碱地改良措施方法主要

有:物理方法<sup>[15]</sup>、化学方法<sup>[16]</sup>和生物方法<sup>[17]</sup>。但是传统的盐碱治理模式已经无法满足改良的需要,物理方法虽然能有效降低土壤盐分,起效快,但是基础投资大、工程复杂<sup>[18]</sup>,化学措施施用改良剂,见效快但成本较高<sup>[19]</sup>,生物措施中远离杂交、基因工程培育耐盐种对技术要求高,经济投入大且见效慢,周期长<sup>[20]</sup>。高效、经济的新技术、新材料、新方法是今后盐碱地改良研究的方向。本研究采用玉米秸秆、玉米芯、芦苇分别与剩余活性污泥按一定质量比混合均匀在 450℃裂解温度条件下制备混合生物炭,利用傅里叶红外光谱分析生物炭的官能团组成,并将其按比例添加到盐碱土壤中进行室内培养试验,研究三种混合生物炭对盐碱土壤基本理化性质及酶活性的影响。

# 1 材料与方法

## 1.1 原材料

供试玉米秸秆:在内蒙古西北部农区收集玉米秸秆,将其洗净、自然风干、粉碎过 2 mm 筛后于密封袋中备用;

供试玉米芯:在内蒙古西北部农区收集玉米芯,将其洗净、自然风干、粉碎过 2 mm 筛后于密封袋中备用;

供试芦苇秸秆:在内蒙古西北部郊区收集芦苇秸秆,将其洗净、自然风干、粉碎过 2 mm 筛后于密封袋中备用;

供试污泥:将取自内蒙古某污水处理厂污泥泵房内剩余活性污泥于实验室内自然风干、磨细过 100 目筛后置于密封袋中备用;

供试土壤:供试土壤为内蒙古盐碱地表层土壤(0—20 cm),采集后除去石块和植物残体,自然条件下风干过 100 目筛备用,其基本理化性质见表 1。

表 1 供试土壤基本理化性质

| 类别  | 总氮/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | 总磷/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | 有效磷/<br>(mg·kg <sup>-1</sup> ) | 速效钾/<br>(mg·kg <sup>-1</sup> ) | 有机碳/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | 水溶性盐/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | CEC/<br>(cmol·kg <sup>-1</sup> ) | pH 值 |
|-----|------------------------------|------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|------|
| 盐碱土 | 0.64                         | 0.23                         | 23.07                          | 228.17                         | 5.80                          | 11.04                          | 0.82                             | 8.36 |

混合生物炭的制备:将上述玉米秸秆、玉米芯、芦苇秸秆分别与污泥按质量比 5:2 混合均匀,置于白玉坩锅中,450℃温度下经管式电炉(GWL-1700GA)热解 3 h,

加热前通入氮气驱赶尽炉内空气,形成氮气环境。冷却后,过 20 目和 100 目筛储存于干燥器中备用,分别标记为 RB450,SB450,WB450,其基本理化性质见表 2。

表 2 三种混合生物炭的基本理化性质

| 混合生物炭 | C/%   | H/%  | O/%   | N/%  | pH 值 | 灰分/%  | 比表面积/(m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> ) |
|-------|-------|------|-------|------|------|-------|---|
| RB450 | 65.13 | 3.84 | 39.66 | 1.28 | 8.11 | 41.72 | 220.25                                  |
| SB450 | 63.22 | 3.07 | 37.45 | 1.31 | 8.13 | 46.32 | 247.81                                  |
| WB450 | 71.02 | 2.88 | 38.29 | 1.27 | 7.96 | 37.45 | 197.54                                  |

## 1.2 试验方法

称取 50 g 风干土样于 250 ml 培养瓶中,按照 10

g/kg,20 g/kg,25 g/kg 添加量水平分别将生物炭与土壤充分混匀,加蒸馏水至 150 ml,保鲜膜封口,保

持一定的透气性。25℃下置于自然光线、通风良好实验室内培养,每3 d补水一次,每个处理设置3次试验的重复。30 d后取样测定土壤中总氮、总磷、有效磷、速效钾、有机碳、水溶性盐含量、阳离子交换总量(CEC)、pH值及土壤脲酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶分别采用靛酚比色法、硫代硫酸钠滴定法、磷酸苯二钠比色法测定。土壤基本理化性质测定参考土壤农化分析<sup>[21]</sup>。

生物炭的基本性质分析:生物炭的官能团组成利用傅里叶红外光谱分析(FTIR)(NEXUS 670, Thermo Nicolet, 美国)。

### 1.3 数据分析

所有试验3次重复,利用Origin 8.5和Excel 2010对试验数据进行统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 混合生物炭的基本性质

在波数4 000~500 cm<sup>-1</sup>范围内绘制不同材料(RB450, SB450, WB450)混合生物炭(样品重复量n=3)的FTIR图谱,见图1。不同材料混合生物炭在不同波数635 cm<sup>-1</sup>, 1 610~1 450 cm<sup>-1</sup>, 2 362 cm<sup>-1</sup>, 3 739 cm<sup>-1</sup>等处有较明显的吸收峰,这表明混合生物炭表面含有芳香族化合物(C-H)、苯环、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、羟基(-OH)等官能团<sup>[22-24]</sup>。不同材料制备的混合生物炭的红外谱图,主要吸收峰位置变化不大,强度变化较明显,说明不同秸秆与污泥混合物碳化后的混合生物炭化学官能团种类一致,但相对含量有差异。

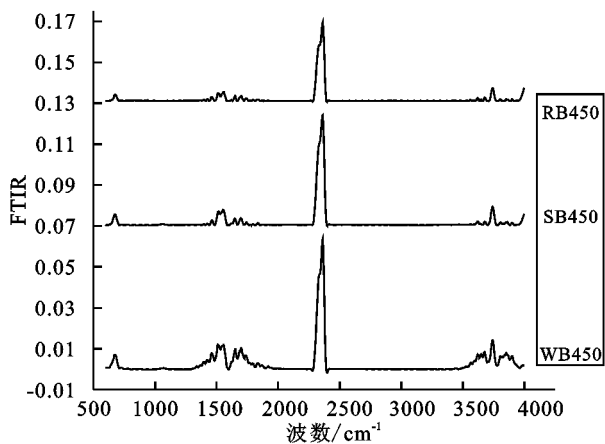


图1 不同材料制备的混合生物炭的FTIR

### 2.2 不同混合生物炭对土壤pH值和阳离子交换能力的影响

土壤pH值可以综合反映土壤其他化学性质,它与土壤微生物活性、土壤各种酶的活性、有机质的合成和分解、各种物质的转化以及土壤保肥保水的能力等有关<sup>[25]</sup>。图2A为RB450, SB450, WB450混合生

物炭分别以不同比例(10 g/kg, 20 g/kg, 25 g/kg)施加到盐碱土壤中对土壤pH值的影响。培养结束后,添加三种混合生物炭处理的pH值与对照相比平均降低0.22个单位,不同材料制备的生物炭对盐碱土壤pH值影响效果不同。将三种混合生物炭按20 g/kg比例添加到土壤中,培养30 d后,土壤pH值降低幅度分别为:WB450(0.40个单位)>RB450(0.21个单位)>SB450(0.19个单位),混合生物炭WB450对土壤PH影响最为显著,是因为混合生物炭能够通过复杂的理化反应降低土壤pH值外,污泥基混合生物炭自身pH值(表2)较其他两种材料混合生物炭小,更有利于降低土壤pH值。杨丽艳等<sup>[26]</sup>研究生物炭对苏打盐渍土pH值时,也得出相似结论,轻度苏打盐渍土pH值随着生物炭施用量的增加先降后升。混合生物炭能够降低土壤pH值,是因为生物质碳化后比表面积增大、孔体积增大、吸附能力增强,能够吸附土壤中各种物质在土壤中发生复杂的理化反应,生物炭所含有的K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>等离子逐渐被释放与土壤中的氢离子交换,氢离子被吸附保留在生物炭表面,从而降低土壤pH值<sup>[27]</sup>。三种混合生物炭不同添加量处理下土壤pH值变化趋势一致,随着添加量的增大,pH值降低幅度先增加后减小。添加不同量(10 g/kg, 20 g/kg, 25 g/kg)的混合生物炭对土壤pH值影响效果分别为:RB450(0.2, 0.21, 0.15)、SB450(0.15, 0.19, 0.07)、WB450(0.33, 0.40, 0.25),说明加入生物炭能够小程度的降低土壤pH值,但随着生物炭添加量逐渐增加,土壤pH值降低幅度却呈现减小的趋势。

阳离子交换总量是土壤净负电荷的总量,它直接表征了土壤的肥力和缓冲能力,是进行土壤管理和质量评价以及土壤特征、分类研究的重要指标<sup>[28]</sup>。由图2B可知,加入混合生物炭后大幅度提高了土壤阳离子交换能力。土壤阳离子交换能力随着混合生物炭添加量的增大而增强,三种混合生物炭不同添加量对土壤阳离子交换总量提高倍数分别为:RB450(2.38, 3.88, 6.50)、SB450(2.88, 3.88, 6.50)、WB450(3.38, 4.38, 8.38),由此也可以看出,芦苇基混合生物炭(WB450)更有利于提高土壤肥力。陈红霞等<sup>[29]</sup>研究施用生物炭对华北平原农田土壤阳离子交换量的影响发现秸秆生物炭能够提高土壤阳离子交换量。陈心想等<sup>[30]</sup>研究了生物炭对土壤化学性质的影响,结果表明生物炭的添加显著增加土壤阳离子交换量,增幅为1.5%~58.2%,与本研究结果相比,对土壤肥力提高幅度较低。

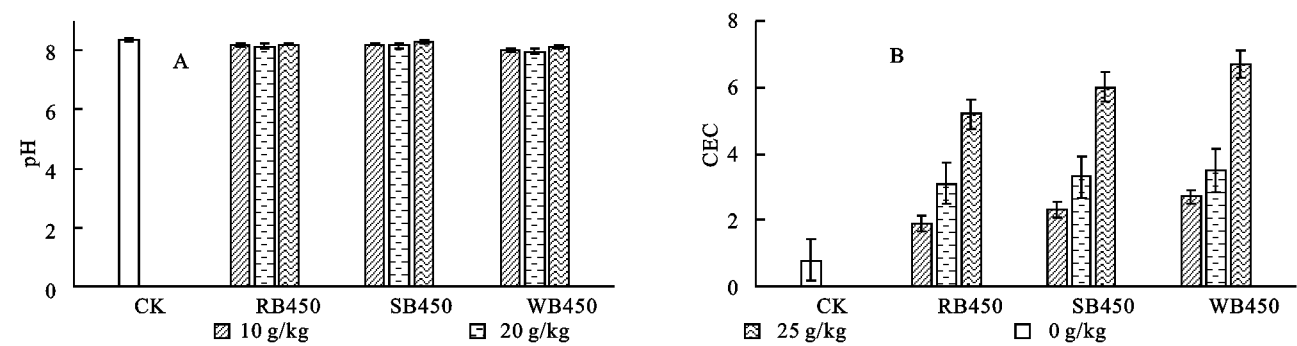


图 2 添加不同混合生物炭后土壤 pH 值和 CEC 值

2.3 不同混合生物炭对土壤基础养分含量的影响

添加混合生物炭处理的土壤总氮、总磷、有效磷、速效钾、有机碳含量分别比对照平均增加 10.76%, 53.62%, 88.61%, 94.98%, 530.33%。添加 RB450 显著增加土壤总磷和有效磷含量,增加了 56.52%~78.26%, 48.20%~181.01%,而 WB450 的输入则对土壤速效钾具有显著的提高效果,且 WB450 含有较高的 C 元素,对土壤有机碳含量提高幅度最大,提高了 240.31%~915.86%。三种混合生物炭对土壤总氮含量影响效果分别为:RB450 (1.56%~14.06%)、SB450

(7.81%~14.67%)、WB450(6.25%~14.06%),三种混合生物炭处理间,土壤总氮含量变化并没有显著差异。同一材料的不同添加量间,土壤养分含量均随着添加量的增大而升高,有机碳含量提高幅度最大,这和生物炭本身含碳量很高有关。总的来说,混合生物炭的添加显著提高了盐碱土壤的养分含量,是因为生物炭能够产生正、负电荷,能够有效吸附盐土中的养分,降低盐土的淋溶损失,同时生物炭本身含有植物生长所需的养分,尤其是对土壤中有机碳含量大幅度提高,改善了土壤的养分环境。

表 3 添加不同混合生物炭后土壤基础养分含量

| 生物炭种类及用量 |           | 总氮/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | 总磷/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | 有效磷/<br>(mg·kg <sup>-1</sup> ) | 速效钾/<br>(mg·kg <sup>-1</sup> ) | 有机碳/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) |
|----------|-----------|------------------------------|------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| CK       | 0.64±0.01 | 0.23±0.01                    | 23.07±0.27                   | 228.17±19.61                   | 5.80±0.51                      |                               |
|          | 10 g/kg   | 0.65±0.01                    | 0.36±0.01                    | 34.19±0.21                     | 411.05±81.24                   | 13.97±0.19                    |
| RB450    | 20 g/kg   | 0.71±0.02                    | 0.37±0.01                    | 39.71±0.03                     | 434.13±22.45                   | 35.91±0.03                    |
|          | 25 g/kg   | 0.73±0.01                    | 0.41±0.03                    | 64.83±0.81                     | 456.56±55.47                   | 55.86±0.88                    |
| SB450    | 10 g/kg   | 0.69±0.08                    | 0.29±0.01                    | 31.20±0.81                     | 367.27±71.24                   | 15.23±0.69                    |
|          | 20 g/kg   | 0.74±0.03                    | 0.33±0.02                    | 37.26±0.58                     | 407.23±19.61                   | 33.78±0.22                    |
|          | 25 g/kg   | 0.75±0.01                    | 0.38±0.06                    | 56.23±0.34                     | 440.29±21.55                   | 56.77±0.41                    |
|          | 10 g/kg   | 0.68±0.02                    | 0.30±0.02                    | 29.89±0.27                     | 455.23±32.41                   | 17.65±0.34                    |
| WB450    | 20 g/kg   | 0.70±0.01                    | 0.35±0.01                    | 38.11±0.21                     | 479.07±40.01                   | 41.03±0.28                    |
|          | 25 g/kg   | 0.73±0.01                    | 0.39±0.06                    | 60.19±0.84                     | 553.14±61.02                   | 58.92±0.81                    |

2.4 不同混合生物炭对土壤酶活性的影响

蔗糖酶通过水解蔗糖为土壤中生物体所吸收利用并提供能量,其活性可以反映土壤中易溶性物质的利用以及土壤有机质积累和转化的状况,脲酶能促进尿素和有机物分子中碳氢键的水解,主要表征土壤氮素的供应强度,而过氧化氢酶活性可以反映土壤有机质的含量水平并判断其转化状况<sup>[31-33]</sup>。

通过室内培养试验发现,施用生物炭可提高土壤中蔗糖酶、脲酶和过氧化氢酶的活性。从图 3 可以看出,添加混合生物炭土壤蔗糖酶的活性均高于空白对照(CK)土壤,而且随着生物炭添加量的增加,土壤蔗糖酶的活性有不同程度的提高。三种混合生物炭对土壤蔗糖酶活性变化为:RB450(9.09%<29.09%<

60%)>SB450(3.64%<12.73%<50.91%)>WB450(1.82%<18.18%<50.91%),三种混合生物炭对土壤蔗糖酶活性影响效果为:RB450>SB450>WB450,但差异不显著,不同添加量处理对土壤蔗糖酶活性影响较大,高水平添加量(25 g/kg)具有显著的促进作用。混合生物炭不同添加量处理对土壤脲酶活性影响效果与蔗糖酶具有相同变化趋势,不同的是土壤脲酶活性受 WB450 影响比 RB450 大,对土壤脲酶活性影响最大的添加 25 g/kg 的 WB450,提高幅度为 42.85%。添加生物炭土壤中过氧化氢酶活性显著高于对照土壤,表明混合生物炭对土壤过氧化氢酶活性具有促进作用。不同的生物炭添加量对土壤过氧化氢酶活性的促进作用存在差异,低添加量

(10 g/kg)对土壤过氧化氢酶活性的促进作用显著高于高添加量(25 g/kg),RB450 处理对土壤过氧化氢酶活性具有显著促进作用较 SB450,WB450。

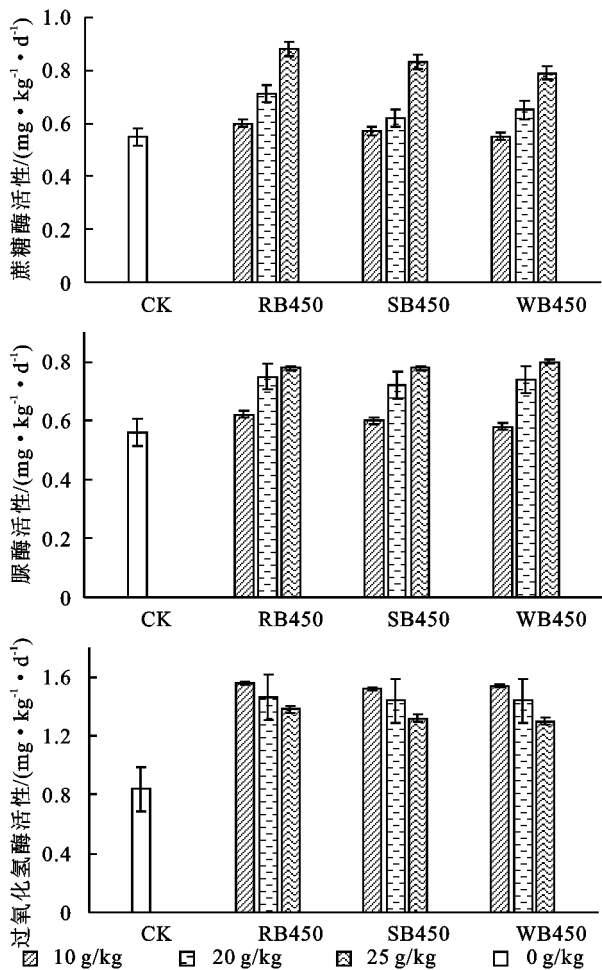


图3 添加不同混合生物炭后土壤酶活性

### 3 结论

(1) 不同混合生物炭表面化学官能团种类一致,其表面主要含有芳香族化合物(C-H)、苯环、 $\text{NO}_3^-$ 、羟基(-OH)等官能团,但含量有差异

(2) 三种混合生物炭均可以降低盐碱土壤 pH 值,与对照土壤相比平均降低了 0.22 个单位。混合生物炭 WB450 对土壤 pH 值影响效果最为显著;三种混合生物炭不同添加量处理下土壤 pH 值变化趋势一致,均随着添加量的增大,pH 值降低幅度先增加后减小;三种混合生物炭的加入大幅度提高了土壤阳离子交换能力,且随着混合生物炭添加量的增大而增强。

(3) 添加混合生物炭处理的土壤总氮、总磷、有效磷、速效钾、有机碳含量分别比对照平均增加 10.76%,53.62%,88.61%,94.98%,530.33%。混合生物炭的添加显著提高了盐碱土壤的养分含量,RB450 主要增加总磷和速效磷含量,而添加 WB450

显著提高了土壤速效钾水平。三种混合生物炭处理间,土壤总氮含量变化并没有显著差异。

(4) 添加混合生物炭后土壤中三种酶活性均高于空白对照(CK)土壤。三种混合生物炭对土壤蔗糖酶活性影响效果为:RB450>SB450>WB450,且随着生物炭添加量的增加而增加;混合生物炭不同添加量处理对土壤脲酶活性影响效果与蔗糖酶具有相同变化趋势,不同的是土壤脲酶活性受 WB450 影响比 RB450 大;不同的生物炭添加量对土壤过氧化氢酶活性的促进作用存在差异,低添加量(10 g/kg)对土壤过氧化氢酶活性的促进作用显著高于高添加量(25 g/kg),RB450 处理对土壤过氧化氢酶活性具有显著促进作用较 SB450,WB450。

#### 参考文献:

- [1] 方放,李想,石祖梁,等.黄淮海地区农作物秸秆资源分布及利用结构分析[J].农业工程学报,2015,31(2):228-234.
- [2] 包建财,郁继华,冯致,等.西部七省区作物秸秆资源分布及利用现状[J].应用生态学报,2014,25(1):181-187.
- [3] 郭广慧,陈同斌,杨军,等.中国城市污泥重金属区域分布特征及变化趋势[J].环境科学学报,2014,34(10):2455-2461.
- [4] 柯跃进,胡学玉,易卿,等.水稻秸秆生物炭对耕地土壤有机碳及其  $\text{CO}_2$  释放的影响[J].环境科学,2014,35(1):93-99.
- [5] 陈温福,张伟明,孟军.生物炭与农业环境研究回顾与展望[J].农业环境科学学报,2014,33(5):821-828.
- [6] 曾爱,廖允成,张俊丽,等.生物炭对矮土土壤含水量、有机碳及速效养分含量的影响[J].农业环境科学学报,2013,34(5):1009-1015.
- [7] 高海英,何绪生,陈心想,等.生物炭及炭基硝酸铵肥料对土壤化学性质及作物产量的影响[J].农业环境科学学报,2012,18(10):1948-1955.
- [8] 勾芒芒,屈忠义,杨晓,等.生物炭对砂壤土节水保肥及番茄产量的影响研究[J].农业机械学报,2014,45(1):137-142.
- [9] 顾美英,刘洪亮,李志强,等.新疆连作棉田施用生物炭对土壤养分及微生物群落多样性的影响[J].中国农业科学,2014,47(20):4128-4138.
- [10] 李明,李忠佩,刘明,等.不同秸秆生物炭对红壤性水稻土养分及微生物群落结构的影响[J].中国农业科学,2015,48(7):1361-1369.
- [11] 王建俊,王格格,李刚,等.污泥资源化利用[J].当代化工,2015,8(1):98-100.
- [12] 关连珠,周景景,张昀,等.不同来源生物炭对砷在土壤中吸附与解吸的影响[J].应用生态学报,2013,24(10):2941-2946.
- [13] 杨海霞,郭绍霞,刘润进.盐碱地生境中丛枝菌根真菌

- 多样性与功能变化特征[J]. 应用生态学报, 2015, 26(1):311-320.
- [14] 吕晓,徐慧,李丽,等. 盐碱地农业可持续利用及其评价[J]. 土壤, 2012, 44(2):203-207.
- [15] 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.
- [16] 张洋,李素艳,张涛,等. 滨海盐碱土壤改良技术[J]. 吉林农业大学学报, 2016, 38(2):164-168.
- [17] 沈婧丽,王彬,田小萍,等. 不同改良模式对盐碱地土壤理化性质及水稻产量的影响[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(2):338-344.
- [18] 李娟,韩霖昌,张扬,等. 盐碱地综合治理的工程模式[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(3):188-193.
- [19] 高世昌,周同. 中国的土地整治与农村发展[J]. 中国土地, 2016, 32(5):14-18.
- [20] 高文武,徐国佳,孙艳,等. 东北地区苏打盐碱地高效治理与种稻改良技术[J]. 现代农业科技, 2016(3):252-252.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社, 2000:152-173.
- [22] 孙克静,张海荣,唐景春. 不同生物质原料水热生物炭特性的研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(11):2260-2265.
- [23] 丁文川,田秀美,王定勇,等. 腐殖酸对生物炭去除水中Cr(VI)的影响机制研究[J]. 环境科学, 2012, 33(11):3847-3853.
- [24] 张涵瑜,王兆伟,高俊红,等. 芦苇基和污泥基生物炭对水体中诺氟沙星的吸附性能[J]. 环境科学, 2016, 34(2):689-696.
- [25] 唐琨,朱伟文,周文新,等. 土壤 pH 值对植物生长发育影响的研究进展[J]. 作物研究, 2013, 27(2):207-212.
- [26] 杨艳丽. 生物质炭对苏打盐渍土理化性质的影响研究[D]. 北京:科学院研究生院, 2015.
- [27] Agblevor F A, Mante O, Abdoulmoumine N, et al. Production of stable biomass pyrolysis oils using fractional catalytic pyrolysis[J]. Energy & Fuels, 2010, 24(7):4087-4089.
- [28] Mazzetto A M, Feigl B J, Cerri C E, et al. Comparing how land use change impacts soil microbial catabolic respiration in Southwestern Amazon. [J]. Brazilian Journal of Microbiology, 2016, 47(1):63-72.
- [29] 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.
- [30] 陈心想,何绪生,耿增超,等. 生物炭对不同土壤化学性质、小麦和糜子产量的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(20):6534-6542.
- [31] 陈心想,耿增超,王森,等. 施用生物炭后壤土土壤微生物及酶活性变化特征[J]. 农业环境科学学报, 2014(4):751-758.
- [32] 黄剑. 生物炭对土壤微生物量及土壤酶的影响研究[D]. 北京:中国农业科学院, 2012.
- [33] 赵军,耿增超,张雯,等. 生物炭及炭基硝酸铵肥料对土壤酶活性的影响[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2015, 43(9):123-130.

~~~~~

(上接第 289 页)

- [8] 周宁,郝晋珉,孟鹏,等. 黄淮海平原县域农村居民点布局优化及其整治策略[J]. 农业工程学报, 2015, 31(7):259-263.
- [9] 杨立,郝晋珉,王绍磊,等. 基于空间相互作用的农村居民点用地空间结构优化[J]. 农业工程学报, 2011, 27(10):308-315.
- [10] 张颖,徐辉. 基于 MCR 模型的农村居民点布局适宜性分区及优化模式研究:以南京市六合区金牛湖街道为例[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(11):1486-1492.
- [11] 孔雪松,金璐璐,郗昱,等. 基于点轴理论的农村居民点布局优化[J]. 农业工程学报, 2014, 30(8):192-200.
- [12] 冯电军,沈陈华. 基于扩展断裂点模型的农村居民点整理布局优化[J]. 农业工程学报, 2014, 30(8):201-209.
- [13] 邹亚锋,刘耀林,孔雪松,等. 加权 Voronoi 图在农村居民点布局优化中的应用研究[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2012, 37(5):560-563.
- [14] 乔伟峰,吴兴国,张小林,等. 基于耕作半径分析的县域农村居民点空间布局优化[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(12):1157-1163.
- [15] 叶琴丽,王成,蒋福霞,等. 基于耕作半径的丘陵区纯农型农户集聚规模研究:以重庆市沙坪坝区白林村为例[J]. 西南大学学报:自然科学版, 2013, 35(11):133-140.
- [16] 谢作轮,赵锐锋,姜朋辉,等. 黄土丘陵沟壑区农村居民点空间重构:以榆中县为例[J]. 地理研究, 2014, 33(5):937-947.
- [17] 刘超,杨海娟,龙冬平,等. 基于加权 Voronoi 图的农村居民点等级评价与整理方向研究[J]. 陕西师范大学学报:自然科学版, 2014(3):91-96.