

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2017.01.2016041703

周玉祥, 宋子岭, 孔涛, 等. 不同秸秆生物炭对露天煤矿排土场土壤微生物数量和酶活性的影响[J]. 环境化学, 2017, 36(1): 106-113.
ZHOU Yuxiang, SONG Ziling, KONG Tao, et al. Effect of straw biochar on soil microbe number and soil enzyme activities in opencast coal mine dump[J]. Environmental Chemistry, 2017, 36(1): 106-113.

不同秸秆生物炭对露天煤矿排土场 土壤微生物数量和酶活性的影响*

周玉祥¹ 宋子岭^{2**} 孔涛² 杨星辰¹ 祁文辉¹

(1. 辽宁工程技术大学矿业学院, 阜新, 123000; 2. 辽宁工程技术大学环境科学与工程学院, 阜新, 123000)

摘要 采用盆栽实验研究了水稻秸秆和玉米秸秆两种生物炭在1%、3%、5%的3种用量下对露天煤矿排土场土壤紫花苜蓿干重、土壤微生物数量和土壤酶活性的影响规律. 结果表明, 紫花苜蓿的出苗率和干重随着生物炭用量的增加而提高, 其中5%用量的水稻秸秆生物炭和玉米秸秆生物炭分别将紫花苜蓿干重显著提高了42.54%和27.63%. 3%和5%用量的生物炭显著增加了土壤细菌、真菌、放线菌数量, 土壤真菌与细菌数量比值, 土壤过氧化氢酶、淀粉酶、蛋白酶、脱氢酶活性, 显著降低了土壤磷酸酶活性, 显著提高了表征土壤肥力质量的土壤肥力生物指数(BIF)和酶活性指数(EAN), 其中5%用量的水稻秸秆生物炭和玉米秸秆生物炭将BIF分别提高了125.94%和84.67%, 将EAN分别提高了109.71%和66.93%. 两种秸秆生物炭之间比较, 在各用量下水稻秸秆生物炭处理的紫花苜蓿出苗率、干重, 土壤微生物数量和土壤酶活性均高于玉米秸秆生物炭处理, 其中5%用量下, 水稻秸秆生物炭处理的出苗率、细菌、真菌、放线菌数量, 蛋白酶、脱氢酶活性, BIF、EAN比玉米秸秆生物炭处理显著提高了26.11%、24.71%、30.23%、30.38%、27.37%、24.44%、22.35%、25.63%. 综上所述, 生物炭能够提高排土场土壤的生态质量, 进而增加了紫花苜蓿产量, 其中5%用量的水稻秸秆生物炭效果最好.

关键词 秸秆生物炭, 土壤微生物数量, 土壤酶活性, 紫花苜蓿.

Effect of straw biochar on soil microbe number and soil enzyme activities in opencast coal mine dump

ZHOU Yuxiang¹ SONG Ziling^{2**} KONG Tao² YANG Xingchen¹ QI Wenhui¹

(1. College of Mining Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, 123000, China;

2. College of Environmental Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, 123000, China)

Abstract: Effects of rice and corn straw biochar with 1%, 3%, 5% rate of soil weight on *Medicago sativa* dry weight, soil microbe number and enzyme activities in opencast coal mine dump were investigated by indoor culture experiments. The results showed that emergence rate and dry weight of *Medicago sativa* were enhanced with increasing amount of biochar, and application of 5% rice straw biochar and corn straw biochar enhanced the *Medicago sativa* dry weight by 42.54% and 27.63% respectively. Application of 3% and 5% biochar significantly increased the number of soil bacteria, fungi, acitnomyce, ratio of fungi and bacteria number, activities of catalase, amylase, protease,

2016年4月17日收稿(Received: April 17, 2016).

* 国家自然科学基金(U1361211, 51474119)和辽宁省自然科学基金(2015020805)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (U1361211, 51474119) and Natural Science Foundation of Liaoning Province of China (2015020805).

* ** 通讯联系人, Tel: 13704988822, Email: zyhjoy@126.com

Corresponding author, Tel: 13704988822, Email: zyhjoy@126.com

dehydrogenase, decreased phosphatase activity, enhanced biological index of fertility (BIF) and enzyme activities number (EAN) which represented soil fertility quality. Application of 5% rice straw biochar and corn straw biochar enhanced BIF by 125.94% and 84.67%, EAN by 109.71% and 66.93% respectively. Emergence rate, dry weight of *Medicago sativa*, number of soil microbes, activities of soil enzyme under rice straw biochar treatment were all higher than that under corn straw biochar treatment at three rates. Emergence rate of *Medicago sativa*, number of bacteria, fungi, actinomycete, activities of protease, dehydrogenase, BIF and EAN under rice straw biochar with 5% amount were significantly enhanced by 26.11%, 24.71%, 30.23%, 30.38%, 27.37%, 24.44%, 22.35%, 25.63% compared with that under corn straw biochar. All the analysis showed biochar could ameliorate soil ecological quality of dump and increase *Medicago sativa* yield. Soil ecological quality of 5% rate of rice straw biochar treatment was the highest.

Keywords: straw biochar, soil microbe number, soil enzyme activity, *Medicago sativa*.

秸秆在我国产量丰富,每年约 8 亿吨,然而目前多数秸秆被焚烧,造成大气污染,因而,合理利用秸秆成为亟需解决的问题.生物炭是生物质在厌氧条件下高温裂解后生成的富含孔隙、具有芳香烃结构的物质,具有改善土壤肥力、增加农作物产量、减少环境污染、增加土壤碳封存的作用^[1].众多学者将秸秆制备的生物炭在新疆风沙土和灰漠土^[2]、红壤性水稻土^[3]、褐土烟田^[4]、设施土壤^[5]等类型的土壤上进行了试验,结果表明秸秆生物炭能够提高土壤肥力,增加作物产量.露天煤矿排土场由于土壤质地黏重、渗透性差、养分缺乏,导致其植被稀疏,水土流失加剧,其土壤改良成为露天煤矿排土场复垦的难点.目前对排土场土壤进行改良的方式包括加入粉煤灰^[6]、矿物肥料^[7]、农业废弃物^[8]、菌根真菌^[9]等改良措施.而应用生物炭来改良露天煤矿排土场土壤的研究尚未见报道.土壤微生物数量和土壤酶活性是土壤生态系统的重要组成部分,可以作为土壤生态质量变化的预警指标^[10].

本研究将两种秸秆制备的生物炭应用于露天煤矿排土场的改良中,从土壤微生物数量、酶活性的角度揭示土壤质量改良状况,同时分析比较两种秸秆生物炭的改良效果.研究结果对露天煤矿排土场土壤改良和秸秆资源合理利用具有参考价值.

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 盆栽实验

水稻秸秆制备的生物炭和玉米秸秆制备的生物炭购自于河北唐山新能源有限公司.生物炭制备时的厌氧裂解温度为 500 °C,时间为 6 h,水稻秸秆生物炭和玉米秸秆生物炭的化学性质见表 1.土壤取自内蒙古锡林浩特市胜利煤田一号露天矿排土场 0—20 cm 深度土壤,土壤为草甸土,pH 值为 7.84,土壤养分贫瘠,有机质含量 1.76 g·kg⁻¹,全氮 0.13 g·kg⁻¹,水解氮 19.06 mg·kg⁻¹,有效磷 10.15 mg·kg⁻¹,速效钾 138.63 mg·kg⁻¹.将土样过 2 mm 筛,风干后进行盆栽实验.

表 1 两种秸秆生物炭的化学性质

Table 1 Chemical properties of the two straw biochar

生物炭 Biochar	碳 C/%	氮 N/%	全磷 Total P/ (g·kg ⁻¹)	全钾 Total K/ (g·kg ⁻¹)	pH	CEC/ (cmol·kg ⁻¹)
水稻秸秆生物炭 Rice straw biochar	58.22	1.64	4.03	48.65	10.62	32.43
玉米秸秆生物炭 Corn straw biochar	65.41	2.44	5.86	25.96	10.14	20.12

进行盆栽实验时,将 5 kg 排土场土壤(干土)放入塑料花盆中,水稻秸秆生物炭和玉米秸秆生物炭分别设置了 1%、3%、5%土壤干重的 3 个用量处理,同时设置了不加生物炭的对照(CK).每组处理设置 5 个重复.紫花苜蓿(*Medicago sativa*)耐干旱,能在贫瘠土壤中生长,且是一种优质牧草,适合于露天矿排土场土壤的改良,因而本研究选取紫花苜蓿作为试验植物,在花盆中播入紫花苜蓿,每盆播入 30 粒种

子.紫花苜蓿发芽后,计算发芽率.间苗,每盆保留大小一致的紫花苜蓿苗 10 棵,定期浇水,使土壤含水量保持在田间持水量的 60%.经过 60 d 培养后,收获紫花苜蓿称取鲜重,同时采集土样,过 2 mm 筛后测定土壤微生物数量和土壤酶活性.

1.2 指标测定

土壤细菌数量采用牛肉膏蛋白胨培养基、真菌数量采用马丁氏培养基、放线菌数量采用高氏一号培养基,通过平板计数法计算微生物的数量.脱氢酶(Dehydrogenase, DH)活性采用氯化三苯基四氮唑比色法^[11],淀粉酶(Amylase, AM)活性采用二硝基水杨酸比色法^[11],碱性磷酸酶(Phosphatase, AP)活性采用对硝基苯磷酸盐法^[11],过氧化氢酶活性(Catalase, CA)采用容量法^[12],脲酶(Urease, UR)活性采用次氯酸钠比色法^[13],蛋白酶(Protease, PR)活性采用茚三酮比色法^[14].

土壤肥力生物指数(Biological index of fertility, BIF)和酶活性指数(Enzyme activity number, EAN)是不同土壤酶活性的综合性指数,均表征土壤肥力质量的高低,其计算公式如下: $BIF = (1.5 \times DH + k \times 100 \times CA) / 2$,其中, k 为比例系数,一般取 0.01^[15]; $EAN = 0.2 \times (0.15 \times DH + CA + 1.25 \times 10^{-5} \times AP + 4 \times 10^{-2} \times PR + 6 \times 10^{-4} \times AM)$ ^[15].

1.3 数据分析

所有的数据均在土壤烘干(105 °C)重量的基础上进行计算.所有的实验数据应用 SPSS 17.0 软件在 0.05 水平上进行显著性差异比较;用 Excel 2007 进行绘图.

2 结果与讨论(Results and discussion)

2.1 生物炭对紫花苜蓿种子发芽率和紫花苜蓿干重的影响

紫花苜蓿的出苗率和干重如图 1 所示,随着生物炭用量的增加,紫花苜蓿出苗率和干重不断提高,低用量生物炭(1%)处理下的紫花苜蓿出苗率和干重与对照没有显著差异,高用量生物炭(5%)处理的出苗率和干重显著高于对照,高用量下水稻秸秆生物炭和玉米秸秆生物炭处理的出苗率分别比对照提高了 121.53% 和 75.67%,紫花苜蓿干重分别比对照提高了 42.54% 和 27.63%.两种秸秆生物炭之间比较,出苗率在低用量的两种秸秆生物炭之间没有显著差异,而在中、高用量下,水稻秸秆生物炭处理的出苗率均高于玉米秸秆生物炭,分别高出了 26.51% 和 26.11%.水稻秸秆生物炭处理的紫花苜蓿干重在各用量下均高于玉米秸秆生物炭,然而两者之间差异不显著,随着生物炭用量的提高,水稻秸秆生物炭与玉米秸秆生物炭处理下的紫花苜蓿干重的差距有扩大的趋势.

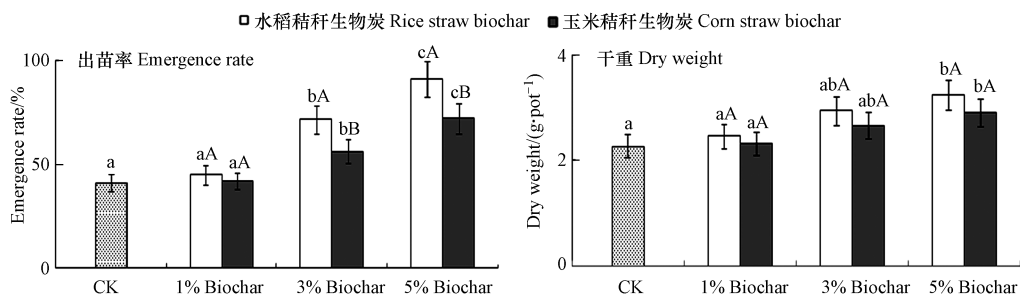


图 1 生物炭对紫花苜蓿出苗率和干重的影响

注:不同小写字母表示同一生物炭不同用量之间存在显著差异($P < 0.05$),不同大写字母表示相同用量下不同生物炭之间存在显著差异($P < 0.05$),下同

Fig.1 Effect of biochar on emergence rate and dry weight of *Medicago sativa*

Note: Different lowercase letters indicate significant difference within different rate for same biochar ($P < 0.05$), different capital letters indicate significant difference within different biochar for same rate ($P < 0.05$). The same below

2.2 生物炭对土壤微生物数量的影响

随着生物炭用量的增加,土壤细菌、真菌和放线菌数量不断增加(图 2).低用量的生物炭处理下,土壤细菌、放线菌数量与对照之间没有显著差异,而土壤真菌数量显著高于对照.中、高用量生物炭处理均

显著提高了 3 种类型土壤微生物数量,其中在中等用量水稻秸秆生物炭和玉米秸秆生物炭处理下,土壤细菌、真菌、放线菌数量分别比对照提高了 49.02%、128.13%、70.93% 和 34.31%、103.13%、44.19%;高用量处理下分别提高了 107.84%、250.00%、139.53% 和 66.67%、168.75%、83.72%。生物炭具有较大的孔隙度,并可吸附土壤中的养分和水,为土壤细菌、真菌、放线菌的生长繁殖提供良好的栖息地^[16],且利于微生物躲避土壤掠夺性动物的侵袭^[17],因而生物炭的施用提高了本研究中排土场土壤微生物的数量。

高的土壤真菌/细菌比值表明土壤生态系统更为持续稳定^[18]。随着生物炭用量的增加,土壤真菌与细菌数量比值在不断提高,3 种用量下土壤真菌细菌数量之比均显著高于对照,然而在 3 种用量之间差异并不显著。生物炭提高了土壤真菌和细菌的比例,原因在于真菌比细菌更容易降解生物炭中的顽固性碳,且能更好地在生物炭的孔隙中生长以及利用额外的资源^[19], Bamminger 等^[20]将生物炭应用于农田土壤, Muhammad 等^[21]将生物炭应用于砂质土壤,他们的研究结果均表明生物炭增加了真菌的丰度,提高了土壤真菌和细菌的比例,这与本研究结果是一致的。

两种秸秆生物炭之间比较,在低、中、高用量下 3 种类型土壤微生物数量在水稻秸秆生物炭处理下均高于玉米秸秆生物炭处理,然而在低用量和中用量处理下两种秸秆生物炭之间差异不显著,仅在高用量处理中表现出了显著的差异,高用量下水稻秸秆生物炭处理的土壤细菌、真菌、放线菌数量分别比玉米秸秆生物炭处理提高了 24.71%、30.23% 和 30.38%。在 3 种用量下,水稻秸秆生物炭处理的土壤真菌细菌比例均高于玉米秸秆生物炭处理,表明水稻秸秆生物炭更有利于提高土壤真菌的数量。水稻秸秆生物炭对土壤微生物数量的提高效果均高于玉米秸秆生物炭,原因可能在于水稻秸秆生物炭的阳离子交换量 CEC ($32.4 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$) 大幅高于玉米秸秆生物炭 ($20.1 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$),而 CEC 可以作为土壤保水保肥能力的指标,导致了水稻秸秆生物炭处理的土壤水肥保有量高于玉米秸秆生物炭处理土壤,土壤水肥则能够促进土壤微生物的繁殖。李明等^[3]将水稻和玉米秸秆生物炭应用于红壤中,发现水稻秸秆生物炭对土壤微生物的提高效果好于玉米秸秆生物炭,支持了本研究结果。

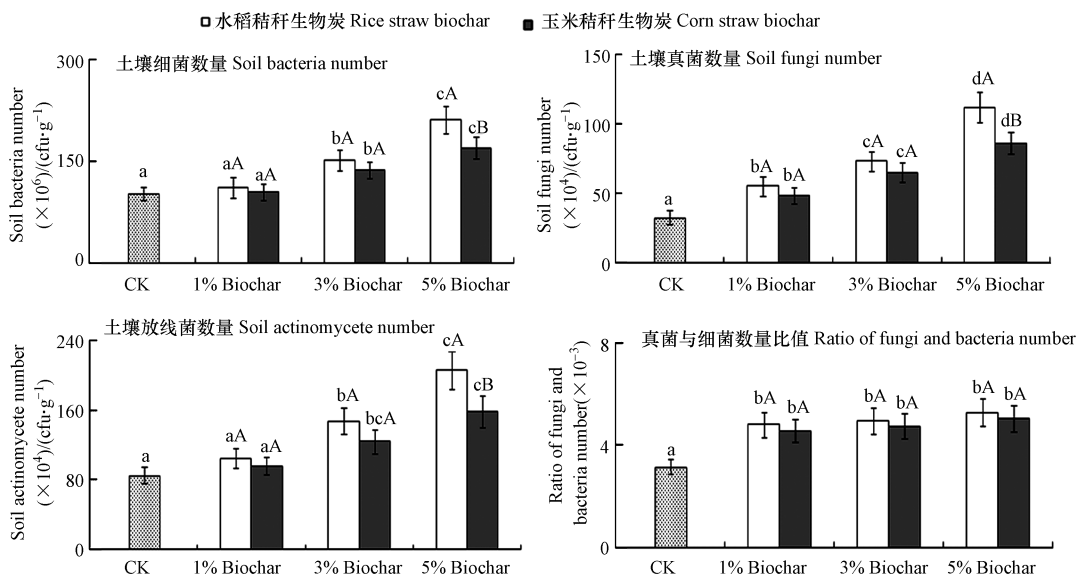


图 2 生物炭对土壤细菌、真菌、放线菌数量和真菌与细菌数量比值的影响

Fig.2 Effect of biochar on number of soil bacteria, fungi, actinomycete and ratio of fungi number and bacteria number

2.3 生物炭对土壤酶活性的影响

土壤酶活性如图 3 所示,随着生物炭用量的增加,土壤磷酸酶活性呈现不断降低的趋势,过氧化氢酶、淀粉酶、蛋白酶、脱氢酶活性呈现不断提高的趋势,脲酶活性没有明显变化。在低、中用量下,土壤磷酸酶活性低于对照,然而差异并不显著,高用量生物炭下,土壤磷酸酶活性显著低于对照,水稻秸秆生物炭和玉米秸秆生物炭分别比对照降低了 33.10% 和 36.91%。磷酸酶是土壤磷循环中的关键酶,能够将磷酸基团从有机磷复合物中水解出来^[22]。生物炭因其较强的表面离子交换能力,可以通过提供表面负电荷或者影响与磷结合的铁、铝等元素,增加土壤磷素有效性^[23]。通过测定土壤有效磷含量可知,对照土

壤的有效磷含量为 $9.42 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 1%、3%、5%用量水稻秸秆生物炭处理的土壤有效磷含量分别为10.87、13.52、16.65 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 1%、3%、5%用量玉米秸秆生物炭处理的土壤有效磷含量分别为 11.68、15.68、19.74 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 可以看出, 随着生物炭用量的增加, 土壤有效磷含量明显增加. 而有效磷含量的增加会反馈抑制土壤磷酸酶的活性, 因而本研究中生物炭处理导致土壤磷酸酶活性降低.

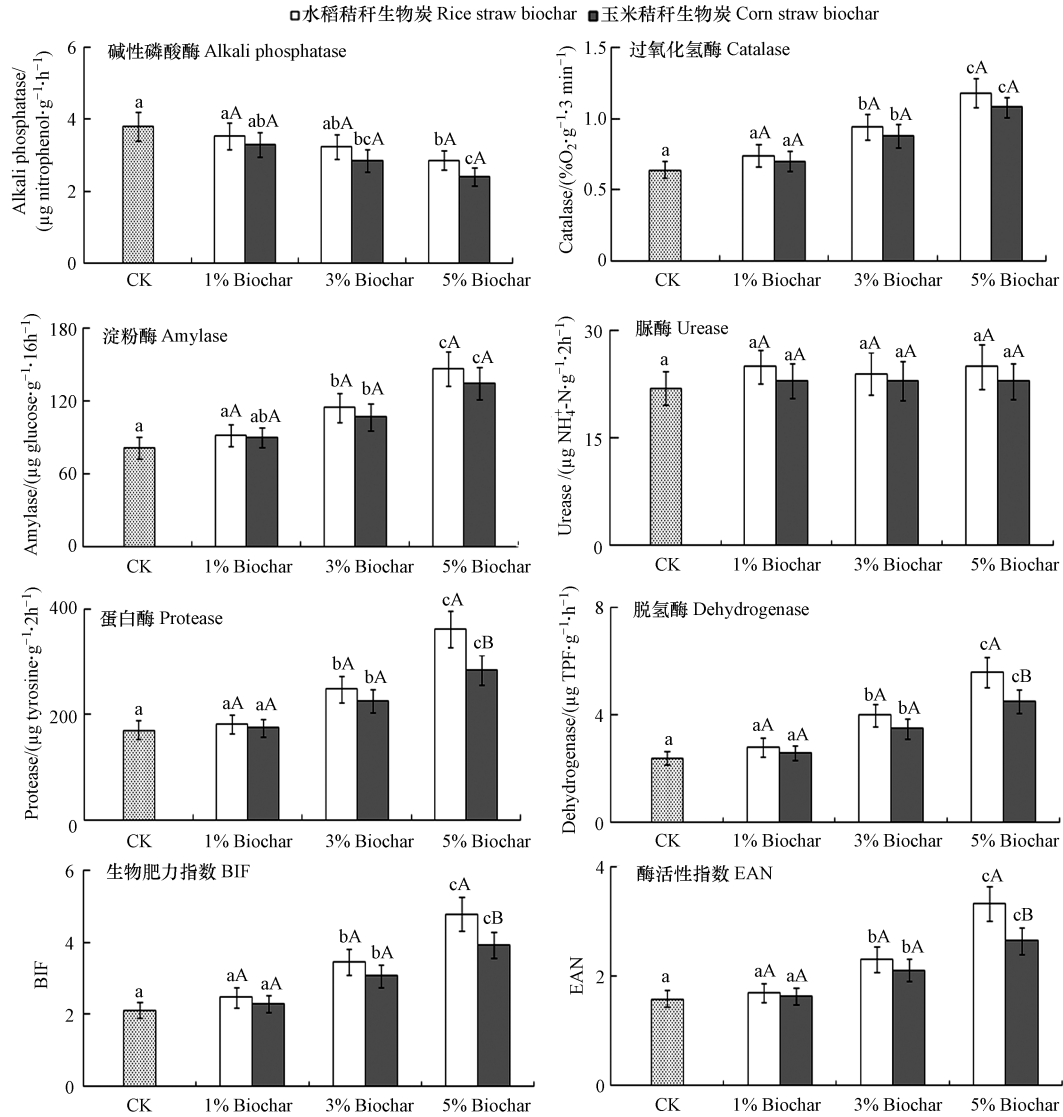


图3 生物炭对土壤磷酸酶、过氧化氢酶、淀粉酶、脲酶、蛋白酶、脱氢酶活性和BIF、EAN的影响

Fig.3 Effect of biochar on activities of soil phosphatase, catalase, amylase, urease, protease, dehydrogenase and BIF, EAN

在低用量生物炭处理下, 过氧化氢酶、淀粉酶、蛋白酶、脱氢酶活性和对照之间差异不显著, 而中、高用量的生物炭则显著提高了这4种酶的活性, 其中高用量的水稻秸秆生物炭和玉米秸秆生物炭分别将过氧化氢酶、淀粉酶、蛋白酶、脱氢酶活性提高了84.38%、79.27%、111.05%、133.33%和68.75%、64.23%、65.70%、87.50%。过氧化氢酶可以保护植物免受过氧化物的损害, 与有机质循环密切相关, 可以表征土壤肥力. 由于生物炭的加入增加了土壤有机质含量, 因而促进了过氧化氢酶的活性, 同时也表明生物炭增加了土壤肥力. 淀粉酶参与了土壤的碳循环, 由于生物炭的加入增加了土壤中碳含量, 因而激活了土壤淀粉酶活性. 蛋白酶活性通常被认为是依赖于土壤微生物生物量水平^[24], 在本研究中由于生物炭显著提高了土壤细菌、真菌和放线菌数量, 因而土壤蛋白酶活性也相应提高. 脱氢酶活性已经被普遍应用于评估土壤微生物的代谢活动^[25], 本研究中、高用量的生物炭显著提高了土壤脱氢酶活性, 意味着生物炭显著增强了土壤微生物的代谢活性. 各用量生物炭处理没有提高土壤脲酶活性, 且在各用量之间脲酶活性也没有差异. 土壤脲酶活性参与了土壤氮循环, 由于生物炭的氮含量非常少, 生物炭的添加

并不能提高土壤氮含量,因此土壤脲酶活性没有明显变化.已有的研究报道表明,生物炭添加到棕壤性大田土壤^[26]、黄瓜连作土^[27]中抑制了土壤磷酸酶活性,提高了黄土^[28]、壤土^[29]的过氧化氢酶活性,提高了茶园土壤^[30]和大田土壤^[31]蛋白酶、脱氢酶的活性,这些都与本研究的结果是一致的.

两种秸秆生物炭之间比较,水稻秸秆生物炭处理的土壤磷酸酶活性高于玉米秸秆生物炭处理.有效磷含量能够反馈抑制土壤磷酸酶活性^[22],通过前述的土壤有效磷含量测定结果可知,水稻秸秆生物炭作用下土壤的有效磷含量低于玉米秸秆生物炭处理,因而水稻秸秆生物炭对土壤磷酸酶的抑制作用相比于玉米秸秆生物炭较弱,导致了水稻秸秆生物炭处理的土壤磷酸酶活性高于玉米秸秆生物炭处理,然而差异并不显著.在各用量生物炭处理下,过氧化氢酶、淀粉酶、脲酶活性在两种秸秆生物炭之间差异也不显著,因为这3种酶活性主要与土壤中碳、氮含量密切相关,而相同用量的两种生物炭作用下,土壤中碳、氮含量也基本一致,因而两种秸秆生物炭处理下的这3种酶活性没有显著差异.土壤蛋白酶和脱氢酶活性仅在高用量处理中在两种秸秆生物炭之间有显著差异,由于蛋白酶活性与土壤微生物量密切相关,而高用量下土壤细菌、真菌、放线菌数量在两种秸秆生物炭处理间差异显著,相应导致了该用量下水稻秸秆生物炭处理的土壤蛋白酶比玉米秸秆生物炭处理显著提高了27.37%.高用量水稻秸秆生物炭处理的土壤脱氢酶活性比玉米秸秆生物炭显著提高了24.44%,表明该用量下土壤微生物代谢活动在水稻秸秆生物炭处理下显著高于玉米秸秆生物炭处理.

由于酶活性的底物和反应专一性,很难由单一的酶活性反映土壤整体肥力状况.因而人们将多种酶活性整合起来表示土壤的特定生态功能,其中土壤肥力生物指数(BIF)、酶活性指数(EAN),已经用来表示土壤肥力的高低^[22,25].随着生物炭用量的增加,土壤BIF、EAN值呈现不断提高的趋势,中、高用量生物炭处理的BIF和EAN值显著高于对照,其中高用量的水稻秸秆生物炭和玉米秸秆生物炭分别将BIF值比对照提高了125.94%和84.67%,将EAN值提高了109.71%和66.93%,表明生物炭能够提高土壤肥力,进而增加了本研究中紫花苜蓿的产量.两种秸秆生物炭之间比较,各用量下的水稻秸秆生物炭的BIF、EAN值均高于玉米秸秆生物炭,然而仅在高用量下差异显著,在此用量下水稻秸秆生物炭的BIF和EAN值分别比玉米秸秆生物炭高出了22.35%和25.63%,表明高用量水稻秸秆生物炭处理下土壤肥力高于玉米秸秆生物炭处理.

3 结论(Conclusion)

(1) 生物炭能够提高排土场土壤紫花苜蓿的出苗率和干重,其中5%高用量的水稻秸秆生物炭和玉米秸秆生物炭分别将紫花苜蓿干重显著提高了42.54%和27.63%.

(2) 3%中等用量和5%高用量的生物炭显著提高了土壤细菌、真菌、放线菌数量,土壤过氧化氢酶、淀粉酶、蛋白酶、脱氢酶活性和土壤肥力生物指数(BIF)、酶活性指数(EAN),表明中、高用量的生物炭能够显著提高土壤肥力,其中5%高用量生物炭对土壤肥力提高效果最大.

(3) 水稻秸秆生物炭处理下土壤微生物数量、土壤酶活性、紫花苜蓿出苗率和干重各指标均高于玉米秸秆生物炭处理,表明水稻秸秆生物炭对露天煤矿排土场土壤的改良效果更好.

参考文献(References)

- [1] 王萌萌,周启星.生物炭的土壤环境效应及其机制研究[J].环境化学,2013,32(5):768-780.
WANG M M, ZHOU Q X. Environmental effects and their mechanisms of biochar applied to soils[J]. Environmental Chemistry, 2013, 32(5):768-780(in Chinese).
- [2] 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.
GU M Y, LIU H L, LI Z Q, et al. Impact of biochar application on soil nutrients and microbial diversities in continuous cultivated cotton fields in Xinjiang[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(20):4128-4138(in Chinese).
- [3] 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.
LI M, LI Z P, LIU M, et al. Effects of different straw biochar on nutrient and microbial community structure of a red paddy soil[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(7):1361-1369(in Chinese).

- [4] 王梅勋,陈利军,王家民,等.玉米秸秆生物炭对烟田褐土水分库容及烤烟生物量的影响[J].土壤,2015,47(6):1076-1084.
WANG M X, CHEN L J, WANG J M, et al. Effects of maize straw biochar on soil water storage capacity and tobacco biomass in tobacco-planting cinnamon soil[J].Soils, 2015,47(6):1076-1084(in Chinese).
- [5] 陈延华,廖上强,李艳梅,等.生物炭和园林废弃物堆腐物对设施蔬菜的影响: I 土壤理化性质及产量[J].农业环境科学学报, 2015, 34(5):913-919.
CHEN Y H, LIAO S Q, LI Y M, et al. Impacts of biochar and garden waste compost on greenhouse vegetables: I. soil physicochemical properties and vegetable yields[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015,34(5):913-919(in Chinese).
- [6] 杨丹,马云东.用粉煤灰对煤矿排土场土壤改良可行性研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2006, 25(S2):324-326.
YANG D, MA Y D. Feasibility studies on coal-fly-ash application in refuse dump of coal mine for soil improvement[J]. Journal of Liaoning Technical University(Science Edition), 2006, 25(S2):324-326(in Chinese).
- [7] 黄继民,耿宝军,马险锋.矿物肥料对排土场土壤物理性质的改良效应[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2009, 28(S2):169-171.
HUANG J M, GENG B J, MA X F. Ameliorative effect of mineral fertilizers on soil physical properties of dump[J]. Journal of Liaoning Technical University(Science Edition), 2006, 28(S2):169-171(in Chinese).
- [8] 卢莎,胡献舟,唐小玲.蘑菇废料在矿山排土场覆土层改良中的综合利用[J].中南林业科技大学学报(自然科学版),2011, 31(10):150-153.
LU S, HU X Z, TANG X L. Comprehensive utilization of mushroom cultivation waste to improve overlaying soil layer in mine dumping site [J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2011, 31(10):150-153(in Chinese).
- [9] 王海娟,包玉英,牛天心,等.菌剂与肥料配施对露天矿排土场苜蓿生长及土壤养分含量的影响[J].华北农学报,2014, 29(4):186-191.
WANG H J, BAO Y Y, NIU T X, et al. Effect of combined application of microbial inoculum and fertilizer on fertility of open-pit mine dump reclaimed soil[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2014, 29(4):186-191(in Chinese).
- [10] 唐玉妹,魏朝富,颜廷梅,等.土壤质量生物学指标研究进展[J].土壤,2007,39(2):157-163.
TANG Y S, WEI C F, YAN T M, et al. Biological indicator of soil quality: A review[J]. Soil, 2007, 39(2):157-163(in Chinese).
- [11] NARASIMHA G, SRIDEVI A, REDDY A V S, et al. Effect of cotton ginning mill industrial effluents on soil dehydrogenase, phosphatase, amylase and invertase enzyme activities[J]. International Journal of Agricultural and Food Science, 2012, 2(1):1-6.
- [12] KIZILKAYA R, AKCA I, ASKIN T. Effect of soil contamination with azadirachtin on dehydrogenase and catalase activity of soil[J]. Eurasian Journal of Soil Science, 2012, 24(2):98-103.
- [13] EMAMI S, POURBABAEE A A, ALIKHANI H A. Effect of paraffin on the urease activity of soil[J]. Technical Journal of Engineering and Applied Sciences, 2013, 3(15):1526-1529.
- [14] SHAHRIARI F, HIGASHI T, TAMURA K. Effects of clay addition on soil protease activities in Andosols in the presence of cadmium[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2010, 56(4):560-569.
- [15] SAVIOZZIA A, CARDELLI R, DI-PUCCIO R. Impact of salinity on soil biological activities: a laboratory experiment[J].Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2011, 42(3):358-367.
- [16] LIANG B, LEHMANN J, SOHI S P, et al. Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil[J]. Organic Geochemistry, 2010, 41(2):206-213.
- [17] WARNOCK D D, LEHMANN J, KUYPER T W, et al. Mycorrhizal responses to biochar in soil-concepts and mechanisms[J]. Plant and Soil, 2007, 300:9-20.
- [18] VRIES F T D, HOFFLAND E, EEKEREN N V, et al. Fungal/bacterial ratios in grasslands with contrasting nitrogen management[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38(8):2092-2103.
- [19] LEHMANN J, RILLIG M C, THIES J, et al. Biochar effects on soil biota-a review[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43(9):1812-1836.
- [20] BAMMINGER C, ZAISER N, ZINSSER P, et al. Effects of biochar, earthworms, and litter addition on soil microbial activity and abundance in a temperate agricultural soil[J]. Biology & Fertility of Soils, 2014, 50(8):1189-1200.
- [21] MUHAMMAD N, DAI Z, XIAO K, et al. Changes in microbial community structure due to biochars generated from different feedstocks and their relationships with soil chemical properties[J]. Geoderma, 2014, s226-227(1):270-278.
- [22] 孔涛,孟凡浩,关飞,等.古龙酸母液对盐碱土壤微生物数量和酶活性的影响[J].环境化学,2015,34(11):2053-2058.
KONG T, MENG F H, GUAN F, et al. Effect of a residue after evaporation from vitamin C fermentation on microbes quantity and enzyme activities of alkali-saline soil[J].Environmental Chemistry, 2015,34(11):2053-2058(in Chinese).
- [23] 张晗芝,黄云,刘钢,等.生物炭对玉米苗期生长、养分吸收及土壤化学性状的影响[J].生态环境学报,2010, 19(11):2713-2717.
ZHANG H Z, HUANG Y, LIU G, et al. Effects of biochar on corn growth, nutrient uptake and soil chemical properties in seeding stage [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(11):2713-2717(in Chinese).
- [24] GARCIA C, HERNANDEZ T, COSTA F. Microbial activity in soils under mediterranean environmental conditions[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1994, 26(9):1185-1191.

- [25] 孔涛,刘民,马瑜,等.黄瓜产量及土壤酶活性对基于古龙酸母液与废弃培养基有机肥的响应[J].环境化学,2015,34(12):2275-2280.
KONG T, LIU M, MA Y, et al. Response of cucumber yield and soil enzyme activities to organic fertilizer of residue after evaporation from vitamin C fermentation and abandoned medium[J]. Environmental Chemistry, 2015, 34(12):2275-2280(in Chinese).
- [26] 冯爱青,张民,李成亮,等.秸秆及秸秆黑炭对小麦养分吸收及棕壤酶活性的影响[J].生态学报,2015,35(15):5269-5277.
FENG A Q, ZHANG M, LI C L, et al. Effects of straw and straw biochar on wheat nutrient uptake and enzyme activity in brown soil[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015,35(15):5269-5277(in Chinese).
- [27] 邹春娇,张勇勇,张一鸣,等.生物炭对设施连作黄瓜根域基质酶活性和微生物的调节[J].应用生态学报,2015,26(6):1772-1778.
ZOU C J, ZHANG Y Y, ZHANG Y M, et al. Regulation of biochar on matrix enzyme activities and microorganisms around cucumber roots under continuous cropping[J].Chinese Journal of Applied Ecology, 2015,26(6):1772-1778(in Chinese).
- [28] 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 biochar-based ammonium nitrate fertilizers on soil microbial biomass carbon and nitrogen and enzyme activities[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016,36(8):2355-2362(in Chinese).
- [29] 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,2014,33(4):751-758.
CHEN X X, GENG Z C, WANG S, et al. Effects of biochar amendment on microbial biomass and enzyme activities in loess soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(4):751-758(in Chinese).
- [30] 胡云飞,李荣林,杨亦扬.生物炭对茶园土壤 CO₂ 和 N₂O 排放量及微生物特性的影响[J].应用生态学报,2015,26(7):1954-1960.
HU Y F, LI R L, YANG Y Y. Effects of biochar on CO₂ and N₂O emissions and microbial properties of tea garden soils[J].Chinese Journal of Applied Ecology, 2015,26(6):1954-1960(in Chinese).
- [31] OLESZCZUK P, JOSKO I, FUTA B, et al. Effect of pesticides on microorganisms, enzymatic activity and plant in biochar-amended soil [J]. Geoderma, 2014, s214-215(2):10-18.