

生物炭对土壤酶活性和糜子产量的影响

尚 杰,耿增超,陈心想,张 雯,赵 军,王 森,王亚萍

(西北农林科技大学资源环境学院,农业部西北植物营养与农业环境重点实验室,陕西 杨凌 712100)

摘 要:为探讨生物炭对土壤主要酶活性和糜子产量的影响,采用糜子盆栽种植方式,分别在砂土、壤土和盐土三种土壤上设置了生物炭施用量为 B0(0 t·hm⁻²)、B15(15 t·hm⁻²)、B30(30 t·hm⁻²)、B45(45 t·hm⁻²)和 B60(60 t·hm⁻²)五个水平。结果表明:砂土、壤土和盐土这三种土壤分别对应生物炭用量为 45 t·hm⁻²、45 t·hm⁻²和 30 t·hm⁻²时土壤总体酶活性(*E_t*)达到最高,并且盐土、砂土和壤土的总体酶活性指标最大值分别比相应对照 B0 增加 16.59%、7.29%、4.07%,说明生物炭对盐土酶活性的影响显著高于砂土,砂土高于壤土;在砂土中施用生物炭后,对糜子有明显的增产效果,而壤土和盐土上增产效果不显著;生物炭的施用还促进了砂土中糜子生物量的积累,并且在壤土上糜子的生物量的积累高于盐土和砂土。总之,在土壤中施用生物炭,不仅可以促进糜子增产,增加土壤总体酶活性,还可以改良土壤生物学特性。

关键词: 生物炭;蔗糖酶;过氧化氢酶;脲酶;碱性磷酸酶;总体酶活性指标;糜子产量

中图分类号: S182 **文献标志码:** A

Effects of biochar on soil enzyme activities and millet yield

SHANG Jie, GENG Zeng-chao, CHEN Xin-xiang, ZHANG Wen, ZHAO Jun, WANG Sen, WANG Ya-ping

(College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Key Laboratory of Plant Nutrition and Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling, Shaanxi, 712100, China)

Abstract: In order to study the effects of biochar on soil enzyme activities and millet yield, setting five treatments antaining different amounts of biochar, they were B0(0 t·hm⁻²), B15(15 t·hm⁻²), B30(30 t·hm⁻²), B45(45 t·hm⁻²) and B60(60 t·hm⁻²), and a pot cultivation experiment was set up in sandy soil, loam soil and saline soil, respectively. The results showed that soil enzyme activities reached the highest when the amounts of biochar were 45 t·hm⁻², 45 t·hm⁻² and 30 t·hm⁻² in sand, loam and saline soil respectively. The maximal values of total enzyme activity index in saline, sand and loam soil increased 16.59%, 7.29%, and 4.07% more respectively than the control B0. This implied the effect of biochar on enzyme activity in saline soil was higher than that in sand, followed by that in loam soil. Obvious effects in increasing millet yield could be achieved by application of biochar in the sand, whereas no significant effects could be observed in loam and saline soil. The use of biochar promoted the accumulation of millet biomass in sand soil, and accumulation of millet biomass in the loam soil was higher than that of saline and sand soil. In conclusion, the application of biochar in the soil could not only promote millet yield and increase soil enzyme activities, but also improve biological properties of soil.

Keywords: biochar; invertase; catalase; urease; alkaline phosphatase; total enzyme activity index; millet yield

生物炭(biochar)是由植物生物质在完全或部分缺氧条件下经热裂解、炭化产生的一类高度芳香化、难溶性的固态物质^[1]。其发达的多孔结构使土壤的孔隙度增大,容重降低,使土壤结构得到改善^[2],因而为微生物的生存^[3]、土壤养分的吸附保存^[4]和作物根系的生长^[5]提供了有利空间和条件。生物炭对不同作物有一定的增产、促长作用,已成为国内外研究者的普遍共识,但对于不同类型的土壤,生物炭的用量有一定范围,因此,研究不同土壤上生物炭对作物最大增产时的用量是非常必要的。

收稿日期: 2014-03-02
基金项目: 农业部“948”项目“生物炭技术引进与消化”(2010-Z19); 国家林业局“948”项目“林果木生物质综合转化技术引进”(2009-4-64); 陕西省科技攻关项目(2010K02-12-1); 陕西省自然科学基金研究计划项目(2010JM5004)
作者简介: 尚 杰(1989—),男,甘肃泾川人,硕士研究生,主要从事土壤养分研究。E-mail: xnshangjie@163.com。
通信作者: 耿增超(1963—),男,陕西韩城人,教授,博士生导师,主要从事农林废弃物资源化利用及森林土壤研究。E-mail: gengzengchao@126.com。

有研究表明,生物炭的施用能促进与 N、P 等矿物质元素利用相关的土壤酶活性,而抑制参与土壤碳矿化等的土壤酶活性^[6]。土壤酶活性的变化能够调控作物吸收养分的有效性^[7],反映土壤微生物活性的高低,表征土壤养分转化和运移能力的强弱^[8],是土壤质量的潜在敏感指标和评价土壤肥力的重要参数之一^[7-8]。因此,土壤酶学特征也已作为一种潜在的指标体系指示有关土壤质量^[9]。另外,土壤类型对土壤酶活性也有很大影响^[10-11],因而研究不同类型土壤主要酶活性的变化规律,可以为农田科学管理提供一定的理论依据。目前,施肥、耕作制度、农药的施用等对土壤酶的影响研究已有较多报道,而有关施用生物炭对土壤酶活性的影响研究还鲜有报道。因此,研究生物炭对土壤酶活性的影响是非常必要的,可为利用生物炭改良土壤生物学特

性及提高作物产量提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1) 供试土壤。分别为采自陕西省杨凌农业高新示范区二道塬的塿土、陕西省杨陵示范区渭河河滩的新积土和陕西省渭南市大荔县许庄镇黄家东小坡果园的盐土。根据国际制土壤质地分级标准,塿土、新积土的质地分别为壤土和砂土,其性质和颗粒组成见表 1。盐土的基本性质见表 2。

2) 供试作物。宁夏固原市农业科学研究所选育糜子(宁糜 14 号)。

3) 供试生物炭。所用生物炭系市场采购的木炭,磨细过 1 mm 筛,其基本性质见表 3。

表 1 供试壤土和砂土的基本理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of loam and sand soil in the pot experiment

土壤类型 Soil type	pH (H ₂ O)	有机质 OM /(g·kg ⁻¹)	全氮 TN /(g·kg ⁻¹)	有效磷 AP /(mg·kg ⁻¹)	速效钾 AK /(mg·kg ⁻¹)	颗粒组成 Mechanical analysis/%		
						砂粒 Sand	粉粒 Silt	粘粒 Clay
壤土 Loam soil	7.77	9.58	0.76	49.95	1524.07	61.74	32.09	6.17
砂土 Sand soil	8.46	4.17	0.56	4.99	64.74	86.45	11.02	2.53

注:OM: 有机质 Organic matter; TN: 全氮 Total nitrogen; AP: 有效磷 Available phosphorus; AK: 速效钾 Available potassium; CEC: 阳离子交换量 Cation exchange content; TK: 全钾 Total potassium; TP: 全磷 Total phosphorus. 下同 The same below.

表 2 供试盐土基本化学性质

Table 2 Basic chemical properties of saline soil in the pot experiment

有机质 OM/(g·kg ⁻¹)	有效磷 AP/(mg·kg ⁻¹)	速效钾 AK/(mg·kg ⁻¹)	水溶性盐 /(mg·kg ⁻¹)	pH (H ₂ O)	CEC /(cmol(+)·kg ⁻¹)	K ⁺ (cmol·kg ⁻¹)
8.50	35.99	769.71	5.95	8.72	4.46	3.83
Na ⁺ /(cmol·kg ⁻¹)	Ca ²⁺ /(cmol·kg ⁻¹)	Mg ²⁺ /(cmol·kg ⁻¹)	Cl ⁻ /(cmol·kg ⁻¹)	SO ₄ ²⁻ /(cmol·kg ⁻¹)	1/2 CO ₃ ²⁻ + HCO ₃ ⁻ /(cmol·kg ⁻¹)	
26.37	20.73	11.81	2.10	31.78	0.56	

表 3 供试生物炭基本化学性质和元素含量

Table 3 Chemical properties and element contents of biochar in the pot experiment

pH (H ₂ O)	CEC /(cmol·kg ⁻¹)	C /%	H /%	N /%	O /%	全钾 TK/%	全磷 TP/%	粗灰分 Ash content/%
8.73	6.63	81.13	2.36	0.69	13.15	11.01	2.64	2.67

1.2 试验设计

试验于 2011 年 6 月 15 日至 2011 年 8 月 23 日,在西北农林科技大学资环学院土壤发生与分类实验室进行。采用室外盆栽的方式,分别在砂土、壤土和盐土上各设 5 个处理,即生物炭施用量分别为 B0(0 t·hm⁻²)、B15(15 t·hm⁻²)、B30(30 t·hm⁻²)、B45(45 t·hm⁻²)和 B60(60 t·hm⁻²),每个处理 5 次重复,每盆(直径 25 cm×高度 40 cm)用土量为 5 kg,除生物炭

用量不同外,各处理氮、磷、钾肥(分别为硝酸铵、磷酸二氢钙、硫酸钾)均作基肥施用,用量均为每公顷 225 kg N、180 kg P₂O₅、150 kg K₂O。种植前将土壤、生物炭和肥料充分混匀装盆后种植糜子,每盆定植 25 株。作物适时种植、收获,生长期间按统一标准管理。

1.3 测定方法

作物成熟后,用剪刀将穗剪下,植株沿茎基部剪

下,分别装入干净信封中,置于恒温箱中 90℃ 杀青 30 min、65℃ 烘至恒重后称量,计算地上部生物量及产量。糜子收获后,在每盆中用土钻采集表层(0 ~ 20 cm)土样,除杂、混匀后作为土壤分析样品,经风干、磨细并过筛(1 mm)后备用。

酶活性的测定用常规分析方法^[11],蔗糖酶采用 3,5-二硝基水杨酸比色法,以每克土 24 h 产生的葡萄糖毫克数表示($\text{mg C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$);碱性磷酸酶采用磷酸苯二钠比色法,以每克土 24 h 产生酚毫克数表示($\text{mg phenol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$);脲酶采用靛酚蓝比色法,以每克土 24 h 后土壤中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的毫克数表示($\text{mg NH}_4^+ - \text{N} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$);过氧化氢酶采用高锰酸钾滴定法,以单位土重消耗的 $0.02 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{KMnO}_4$ 溶液的毫升数表示($\text{mL } 0.02 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{KMnO}_4 \cdot \text{g}^{-1}$)。

土壤总体酶活性指标 E_t (Total enzyme activity index)的计算,采用整个供试土样酶活性的平均值为参比,分别计算各土样酶活性的相对值,然后累加即为各土壤的总体酶活性指标,具体公式:

$$E_t = \sum_{i=1}^n X_i / \bar{X}$$

式中, X_i 为土壤酶(i)的活性值, $\bar{X}$ 为整个供试土样酶活性的平均值。 E_t 的物理意义为:定量指示供试

土样中土壤总体酶活性的大小^[12]。

1.4 数据处理

采用 Excel 2007 及 DPS 7.05 软件对试验数据进行统计分析和作图。采用单因素方差分析法(One-way ANOVA)分析不同生物炭用量对土壤酶活性指标的影响,采用最小显著极差法(LSD)进行多重比较。显著性水平设为 0.05,结果以“平均值 ± 标准误”表示。

2 结果与分析

2.1 生物炭对土壤酶活性的影响

2.1.1 生物炭对砂土酶活性的影响 如表 4 所示,砂土中,蔗糖酶活性随生物炭用量的增加而显著提高,其中 B45 和 B60 处理显著高于其他处理,较 B0 分别提高了 34.9% 和 37.3%;各处理间过氧化氢酶活性没有显著差异;脲酶活性呈递减趋势,即随生物炭用量的增加,脲酶的活性有所降低;同蔗糖酶活性变化相似,碱性磷酸酶活性亦随生物炭用量的增加而提高,B45 最高,较 B0 显著提高 12.0%,但施生物炭的四个处理间无显著差异。说明在砂土中,随生物炭用量的增加,有利于蔗糖酶和碱性磷酸酶活性的增加,不利于脲酶活性的提高,对过氧化氢酶活性影响不显著。

表 4 生物炭对砂土酶活性的影响
Table 4 Effects of biochar on sand soil enzyme activities

处理 Treatment	土壤酶活性 Soil enzyme activities			
	蔗糖酶	过氧化氢酶	脲酶	碱性磷酸酶
	$\text{/(mg C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$ Invertase	$\text{/(mL } 0.02 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{KMnO}_4 \cdot \text{g}^{-1})$ Catalase	$\text{(mg NH}_4^+ - \text{N} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$ Urease	$\text{/(mg phenol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$ Alkaline phosphatase
B0	12.848 ± 1.250b	1.614 ± 0.009a	0.395 ± 0.024a	0.613 ± 0.042b
B15	15.465 ± 0.479ab	1.582 ± 0.015a	0.393 ± 0.009a	0.640 ± 0.024ab
B30	14.312 ± 0.442b	1.585 ± 0.116a	0.369 ± 0.012ab	0.643 ± 0.011ab
B45	17.332 ± 1.362a	1.659 ± 0.028a	0.339 ± 0.009b	0.686 ± 0.017a
B60	17.642 ± 0.944a	1.644 ± 0.025a	0.362 ± 0.004ab	0.636 ± 0.013ab

注:同列数据后不同小写字母表示各处理间差异显著($P < 0.05$),下同。
Note: The different letters in peer data of same indicator indicate the significant difference at $P < 0.05$. The same as below.

2.1.2 生物炭对壤土酶活性的影响 如表 5 所示,在壤土中,随生物炭用量的增加,蔗糖酶和脲酶活性并没有显著差异;过氧化氢酶活性则显著降低,B60 最低,较 B0 显著降低 2.22%;碱性磷酸酶活性随生物炭用量的增加而提高,B60 最高,较其他处理间均达到显著差异,且 B60 较 B0 显著增加了 27.71%。由此可知,随生物炭用量的增加,壤土中四种酶活性变化规律并不一致,各处理蔗糖酶和脲酶活性没有显著差异,过氧化氢酶活性显著降低,而碱性磷酸酶活性有所增加。这与壤土土壤养分状况密切相关。

2.1.3 生物炭对盐土酶活性的影响 如表 6 所示,在盐土中,不同用量生物炭对蔗糖酶活性影响较为复杂,B30 活性最高,较 B0 显著提高了 41.7%,达到了显著性差异;各处理间过氧化氢酶活性均未达到显著差异,说明生物炭的施用对盐土过氧化氢酶活性没有显著影响;脲酶活性随生物炭用量的增加而显著提高,B30、B45、B60 较 B0 分别提高了 25.5%、30.0%、48.0%,说明施用生物炭可以显著提高盐土的脲酶活性;与蔗糖酶活性变化相似,各处理碱性磷酸酶活性大小顺序为 B15 > B30 > B0 > B45 > B60,除

B30 外, B15 较其它处理均达到了显著性差异。由此看出低量的生物炭可以增加盐土蔗糖酶和碱性磷酸酶的活性, 较高量的生物炭则起抑制作用, 说明生物炭用量对盐土蔗糖酶、脲酶和碱性磷酸酶活性产生了比较大的影响。

表 5 生物炭对壤土酶活性的影响

Table 5 Effects of biochar on loam soil enzyme activities

处理 Treatment	土壤酶活性 Soil enzyme activities			
	蔗糖酶	过氧化氢酶	脲酶	碱性磷酸酶
	$\text{/(mg C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$ Invertase	$\text{/(mL 0.02 mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{KMnO}_4 \cdot \text{g}^{-1})$ Catalase	$\text{(mg NH}_4^+ - \text{N} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$ Urease	$\text{/(mg phenol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$ Alkaline phosphatase
B0	18.504 ± 1.899a	2.250 ± 0.000a	0.438 ± 0.015a	0.629 ± 0.115b
B15	15.203 ± 0.220a	2.238 ± 0.013ab	0.440 ± 0.006a	0.612 ± 0.016b
B30	15.030 ± 2.479a	2.218 ± 0.008bc	0.441 ± 0.025a	0.614 ± 0.007b
B45	19.627 ± 0.104a	2.213 ± 0.013bc	0.456 ± 0.005a	0.714 ± 0.005b
B60	16.975 ± 1.390a	2.205 ± 0.005c	0.444 ± 0.012a	0.803 ± 0.028a

表 6 生物炭对盐土酶活性的影响

Table 6 Effects of biochar on saline soil enzyme activities

处理 Treatment	土壤酶活性 Soil enzyme activities			
	蔗糖酶	过氧化氢酶	脲酶	碱性磷酸酶
	$\text{/(mg C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$ Invertase	$\text{/(mL 0.02 mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{KMnO}_4 \cdot \text{g}^{-1})$ Catalase	$\text{(mg NH}_4^+ - \text{N} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$ Urease	$\text{/(mg phenol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$ Alkaline phosphatase
B0	17.114 ± 0.338c	2.105 ± 0.031a	0.290 ± 0.019c	0.973 ± 0.006b
B15	21.584 ± 0.754ab	2.103 ± 0.012a	0.325 ± 0.025bc	1.079 ± 0.043a
B30	24.248 ± 1.328a	2.105 ± 0.014a	0.368 ± 0.025b	1.014 ± 0.047ab
B45	20.124 ± 0.971bc	2.062 ± 0.019a	0.377 ± 0.010ab	0.967 ± 0.009b
B60	20.741 ± 1.839b	2.055 ± 0.009a	0.430 ± 0.004a	0.938 ± 0.013b

2.1.4 土壤总体酶活性指标 由以上结果可知, 尽管单一酶活性可以提供一些重要的信息, 但所反映的信息并不全面, 无法涵盖全部或整体酶的信息。因而采用单一酶活性作为评价土壤肥力重要指标, 具有一定的片面性, 为了能够评价酶活性的整体水平, 作者采用和文祥等^[12]等提出的土壤总体酶活性评价指标 E_t (Total enzyme activity index) 对该研究的四种酶活性的整体水平进行综合分析。

表 7 土壤总体酶活性参数

Table 7 The total enzyme activity index of soils

处理 Treatment	土壤类型 Soil type		
	砂土 Sand soil	壤土 Loam soil	盐土 Saline soil
B0	3.841	3.564	3.623
B15	4.027	3.357	4.040
B30	3.895	3.341	4.224
B45	4.121	3.719	3.984
B60	4.115	3.602	4.128

如表 7 所示, 砂土 B45 处理的总体酶活性参数最大, 对应的生物炭用量为 45 t·hm⁻², 其次是 B60,

B0 最小; 壤土也是在 B45 处理的总体酶活性参数最大, 其次是 B60; 盐土 B30 处理的总体酶活性参数最大, 对应的生物炭用量为 30 t·hm⁻², 其次是 B60、B15、B45, B0 最小。说明生物炭的施用对土壤酶活性的影响较大, 其影响程度的大小与生物炭用量、土壤类型以及酶的特性有关。为了更加直观地反映生物炭对这三种土壤总体酶活性影响, 以土壤类型区分, 经计算得到盐土、砂土和壤土总体酶活性指标最大值分别比相应对照 B0 增加 16.59%、7.29%、4.07%, 说明生物炭对盐土酶活性的影响明显高于砂土, 砂土高于壤土。

2.2 生物炭对糜子生物量和产量的影响

2.2.1 生物炭对糜子生物量的影响 如图 1 所示, 施用生物炭后, 对糜子生物量的积累有一定的影响, 砂土上, 糜子生物量随生物炭用量的增加先略有增加, 随后降低, B30 较 B0 增加 10.50%, B60 较 B0 降低 32.78%。说明生物炭用量较高时会对砂土上糜子生物量的积累起抑制作用; 在壤土和盐土上, 糜子生物量均无显著差异。另外, 还可以看出, 壤土上糜子生物量的积累高于砂土和盐土。

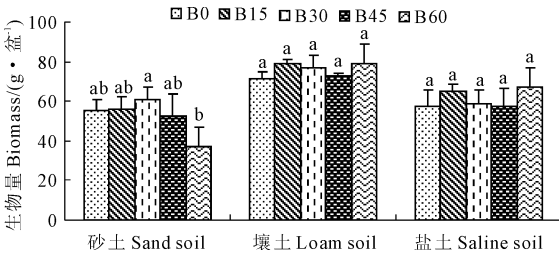


图 1 施用生物炭对糜子生物量的影响

Fig. 1 Effects of biochar on biomass of millet

2.2.2 生物炭对糜子产量的影响 如图 2 所示,施用生物炭后,砂土和盐土上糜子的产量均有增加,砂土上增加比较显著,其中, B30、B45、B60 分别较 B0 增产 65.96%、46.24%、42.99%;而盐土上糜子产量有增加的趋势,但差异并不显著;在壤土上,糜子产量没有显著的差异。说明,施用生物炭能够提高砂土上糜子的产量,对壤土和盐土上糜子的产量没有明显影响。

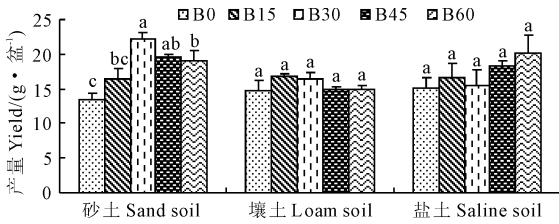


图 2 施用生物炭对糜子产量的影响

Fig. 2 Effects of biochar on yield of millet

3 讨论

3.1 生物炭与土壤酶活性的关系

土壤酶催化土壤中的许多生物化学反应,对土壤肥力有重要影响^[13]。生物炭对土壤酶活性有显著的影响,其影响程度的大小因生物炭用量和土壤类型而异。从本研究的土壤总体酶活性指标可以看出,生物炭能够有效调控土壤酶活性的强弱,在不同生物炭用量下,土壤酶活性表现出一定的规律性,即生物炭对三种不同类型土壤酶活性的影响程度大小依次是盐土>砂土>壤土,说明利用生物炭提高土壤总体酶活性时,盐土的效果高于砂土,砂土高于壤土。原因可能与生物炭在不同类型土壤中的吸附特性有关,一方面生物炭对反应底物的吸附促进酶促反应进而提高土壤酶活性,另一方面生物炭对酶分子的吸附而保护酶促反应结合位点,从而抑制酶促反应的进行^[14-15]。其具体机理还有待进一步研究。

在不同类型的土壤中,土壤单一酶活性也表现

出一定的规律。土壤蔗糖酶参与土壤有机碳循环,对增加土壤中易溶性营养物质起着重要作用^[16-17]。本研究结果显示,蔗糖酶活性在砂土和盐土中受生物炭用量的影响显著,在壤土中无显著影响。李东坡等^[18]研究表明土壤蔗糖酶活性与土壤养分关系密切,土壤养分含量高则其蔗糖酶活性强。本研究结果与李东坡等的研究结果不一致,原因可能是由于生物炭所含的难分解碳物质并不能在短时间内立即被蔗糖酶所水解,且施用时间较短,对土壤肥力的改善作用尚不显著。

过氧化氢酶酶促水解过氧化氢,其活性的高低在一定程度上可以反映土壤生物氧化过程的强弱^[19-20]。过氧化氢酶活性在壤土中受生物炭用量的影响较大,而在盐土和砂土中并无显著变化。樊军等^[21]的研究表明过氧化氢酶活性与有机 C、全 N、有效 P、C/N 均有显著的负相关关系,随土壤有机质积累,有机 C 和全 N 的增加,过氧化氢酶活性降低。由于生物炭富含有机碳,可以增加土壤有机碳的含量,随着生物炭用量的增加,土壤有机碳也增加,C/N 增大,使得过氧化氢酶活性降低,本研究中壤土和盐土的结果与之基本一致,而在砂土中的不一致可能是砂土养分有效性较差的原因。

土壤脲酶催化尿素水解成氨,可以用来表征土壤中有态氮的转化状况。脲酶活性在盐土和砂土中受生物炭用量的影响较大,而在壤土中无显著变化,但壤土的脲酶活性高于盐土和砂土。一方面,土壤脲酶活性与土壤有机质和全 N 存在显著正相关^[12,21];另一方面,周礼恺等^[22]提出脲酶活性主要集聚在微团聚体上,随粒径增大,脲酶活性有下降趋势,这与本研究的三种土壤脲酶活性变化基本规律一致。另外,脲酶属于一种专性酶,可以加速土壤潜在养分的有效化^[23],但是砂土中潜在养分有效性低,保肥性差,生物炭对土壤养分又有一定的封存作用,限制了土壤养分的利用^[24],所以随着生物炭用量增加,砂土脲酶活性降低。

土壤碱性磷酸酶是植物根系与微生物的分泌产物,其活性高低直接影响着土壤中有有机磷的分解转化和生物有效性^[11]。碱性磷酸酶活性在三种土壤中均受生物炭用量的影响较大,有研究表明,土壤碱性磷酸酶的最适 pH 值为 8.0~10.0^[25-26],本研究中盐土和砂土的 pH 高于壤土,故盐土的碱性磷酸酶活性明显高于壤土,而砂土与壤土相似,可能是砂土有机质含量低、养分有效性差的原因。

有研究还表明,生物炭能够有效提高盐土中有有机碳含量、阳离子交换量,降低盐土的 pH 值、水溶

性盐总量及其他盐分离子的含量,对盐土可以起到改良作用^[27]。以上这些均说明土壤酶活性与土壤物理和化学性质是密切相关的,利用生物炭可以改良盐土和砂土生物学特性,进而为生物炭改良土壤提供依据。

3.2 生物炭与糜子生物量和产量的关系

有研究表明^[28],施用生物炭可以显著促进作物生长,增加作物地上部干物质的积累和作物产量。本研究结果显示,三种土壤上糜子生物量并未显著增加,甚至在砂土上生物炭用量较高时会对糜子生物量产生抑制作用。但是施用生物炭对砂土中糜子有一定的增产作用,而壤土和盐土中并未有显著的增产效果。原因可能与土壤类型有关,因为在偏酸或中性、粗或中等质地的土壤上生物炭的增产效应较显著^[29];另外,生物炭含碳量高,施入土壤后,土壤 C/N 比提高,进而降低土壤养分尤其是氮素有效性^[30],因而在多数土壤上单独施用生物炭,会导致当季或几季作物无增产效应,甚至减产^[31]。因此,生物炭的增产效应可能与生物炭用量、土壤肥力状况、土壤类型和生物炭施入土壤中的时间长短等因素有关^[32],具有很大的不确定性。

4 结 论

1) 施用生物炭可以显著增加砂土的蔗糖酶、碱性磷酸酶、壤土的碱性磷酸酶和盐土的脲酶活性;显著降低了壤土的过氧化氢酶活性,对砂土的脲酶和盐土的过氧化氢酶活性起一定的抑制作用;低的生物炭用量可以增加盐土蔗糖酶和碱性磷酸酶活性,而较高的生物炭用量会抑制这两种酶活性的增加,甚至会降低这两种酶活性。

2) 砂土、壤土和盐土分别在对应生物炭施用量为 45 t·hm⁻²、45 t·hm⁻²和 30 t·hm⁻²时能使土壤总体酶活性(E_t)达到最高,并且生物炭对盐土总体酶活性的影响显著高于砂土,砂土高于壤土。总之,施用生物炭后可以显著提高土壤总体酶活性。

3) 生物炭的施用显著增加了砂土的糜子产量,较低用量的生物炭促进了砂土中糜子生物量的积累,而较高用量的生物炭则降低了其生物量的积累;生物炭对壤土的产量和生物量,盐土的生物量均没有显著影响,但壤土中糜子的生物量明显高于砂土和盐土。

鉴于土壤酶对土壤生态系统的重要性,土壤酶影响因素的复杂性,研究方法的局限性以及生物炭对土壤影响的长期性,因此,开展深入的,长期田间定位试验研究是非常必要的。

参 考 文 献:

[1] Antal M J, Gronli M. The art, science, and technology of charcoal production[J]. Industrial Engineering Chemistry Research, 2003,42 (8):1619-1640.

[2] 陈心想,耿增超.生物炭在农业上的应用[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2013,41(2):167-174.

[3] Kolb S E, Fermanich K J, Dombush M, et al. Effect of charcoal quantity on microbial biomass and activity in temperate soils[J]. Soil Science Society of American Journal, 2009,73(4):1173-1181.

[4] Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. Biochar sequestration in terrestrial ecosystems: A review[J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2006,11:403-427.

[5] Brodowski S, Amelung W, Haumaier L, et al. Morphological and chemical properties of black carbon in physical soil fractions as revealed by scanning electron microscopy and energy dispersive X-ray spectroscopy[J]. Geoderma, 2005,128:116-129.

[6] 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.

[7] 张玉兰,陈利军,张丽莉.土壤质量的酶学指标研究[J].土壤通报,2005,36(4):598-604.

[8] Paz Jimenez M D, Horra A M, Peuzzo L, et al. Soil quality: a new index based on microbiological and biochemical parameters[J]. Biology and Fertility of Soils, 2002,35:302-306.

[9] Bandick A K, Dick R P. Field management effects on soil enzyme activities[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1999,31:1471-1479.

[10] 李潮海,王小星,王 群,等.不同质地土壤玉米根际生物活性研究[J].中国农业科学,2007,4(2):412-418.

[11] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:农业出版社,1987.

[12] 和文祥,谭向平,王旭东,等.土壤总体酶活性指标的初步研究[J].土壤学报,2010,47(6):1232-1236.

[13] 曹 慧,杨 浩,孙 波,等.太湖流域丘陵地区土壤养分的空间变异[J].土壤,2002,34(4):201-205.

[14] Czimczik C I, Masiello C A. Controls on black carbon storage in soils[J]. Global Biogeochemistry Cycles, 2007,21(3):113.

[15] Lehmann J, Joseph S. Biochar for environmental management: science and technology[M]. London, UK: Earthscan Ltd, 2009.

[16] 孙翠玲,郭玉文,佟超然,等.杨树混交林地土壤微生物与酶活性的变异研究[J].林业科学,1997,33(6):488-496.

[17] 薛 立,陈红跃,邝立刚.湿地松混交林地土壤养分、微生物和酶活性的研究[J].应用生态学报,2003,14(1):157-159.

[18] 李东坡,武志杰,陈利军,等.长期定位培肥黑土土壤蔗糖酶活性动态变化及其影响因素[J].中国生态农业学报,2005,13 (2):102-105.

[19] 孙瑞莲,赵秉强,朱鲁生,等.长期定位施肥对土壤酶活性的影响及其调控土壤肥力的作用[J].植物营养与肥料学报,2003, 9(4):406-410.

[20] 牟金明,宋 日,姜亦梅,等.不同作物根茬还田对土壤酶活性的影响[J].吉林农业大学学报,1997,9(4):65-69.

[21] 樊 军,郝明德.黄土高原旱地轮作与施肥长期定位实验研究 II.土壤酶活性与土壤肥力[J].植物营养与肥料学报,2003,9 (2):146-150.

综上所述,在旱作覆膜条件下,秸秆中加腐解剂还田可提高秸秆还田效果,能够有效培肥土壤。就试验所研究三种秸秆腐解剂来看,小麦、玉米秸秆中添加“满园春”生物发酵剂效果最好,可将模拟实验推广至大田做更深入的研究。

参 考 文 献:

[1] Trond M Henriksen, Tor A Breland. Carbon mineralization, fungal and bacterial growth, and enzyme activities as affected by contact between crop residues and soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35:41-48.

[2] 韩鲁佳,闫巧娟,刘向阳,等.中国农作物秸秆资源及其利用现状[J].*农业工程学报*,2002,18(3):87-91.

[3] 张福锁.我国肥料产业与科学施肥战略研究报告[M].北京:中国农业大学出版社,2008:50-54.

[4] 刘荣乐,金继运,吴荣贵,等.我国北方土壤-作物系统内钾素循环特征及秸秆还田与施钾肥的影响[J].*植物营养与肥料学报*,2000,6(2):123-132.

[5] 王小彬,蔡典雄,张镜清,等.旱地玉米秸秆还田对土壤肥力的影响[J].*中国农业科学*,2000,33(4):54-61.

[6] 劳秀荣,吴子一,高燕春.长期秸秆还田改土培肥效应的研究[J].*农业工程学报*,2002,18(2):49-52.

[7] 武志杰,张海军,许广山,等.玉米秸秆还田培肥土壤的效果[J].*应用生态学报*,2002,13(5):539-542.

[8] 刘世平,聂新涛,张洪程,等.稻麦两熟条件下不同土壤耕作方式与秸秆还田效用分析[J].*农业工程学报*,2006,22(7):48-51.

[9] 谭德水,金继运,黄绍文,等.不同种植制度下长期施钾与秸秆还田对作物产量和土壤钾素的影响[J].*中国农业科学*,2007,40(1):133-139.

[10] 迟凤琴,匡恩俊,宿庆瑞,等.不同还田方式下有机物料有机碳分解规律研究[J].*东北农业大学学报*,2010,41(2):60-65.

[11] 王允青,郭熙盛.不同还田方式作物秸秆腐解特征研究[J].*中国生态农业学报*,2008,16(3):607-610.

[12] 翟修彩,刘明,李忠佩,等.不同添加剂处理秸秆腐解物对红壤性质的影响[J].*土壤*,2013,45(5):868-874.

[13] 马超,周静,刘满强,等.秸秆促腐还田对土壤养分及活性有机碳的影响[J].*土壤学报*,2013,50(5):915-921.

[14] 易镇邪,符呈祥,褚百凤,等.快腐剂处理还田早稻秸秆对晚季土壤化学与生物学特性的影响[J].*中国农学通报*,2012,28(27):94-98.

[15] 吴琴燕,陈宏州,杨敬辉,等.不同腐解剂对麦秸秆腐解的初步研究[J].*上海农业学报*,2010,26(4):83-86.

[16] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.

[17] 李振高,骆永明,滕应.土壤与环境微生物研究法[M].北京:科学出版社,2008,322-331.

(上接第 151 页)

[22] 周礼恺,张志明,陈恩凤.黑土的酶活性[J].*土壤学报*,1981,18(2):158-165.

[23] 王天元,宋雅君,滕鹏起.土壤脲酶及脲酶抑制剂[J].*化学工程师*,2004,107(8):22-24.

[24] Glaser B, Lehmann J, Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoals: A review [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002,35(4):219-230.

[25] 和文祥,朱铭莪,张一平.土壤酶与重金属关系的研究现状[J].*土壤与环境*,2000,9(2):139-142.

[26] Frankenberger J R, Johan son J B, Nelson C O. Urease activity in sewage sludge amended soils[J]. *Soil Biol Biochem*, 1983,15:543-549.

[27] 张雯,耿增超,陈心想,等.生物质炭对盐土改良效应研究[J].*干旱地区农业研究*,2013,31(2):73-77.

[28] Zhang W J, Li Z F, Zhang Q Z, et al. Impacts of biochar and nitrogen fertilizer on spinach yield and tissue nitrate content from a pot ex-

periment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011,30(10):1946-1952.

[29] Jeffery S, Verheijen F G A, van der Velde M, et al. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2011,144(1):175-187.

[30] Zhong X M, Zhu Y N, Liu J, et al. Influence of bamboo-charcoal coating on N leaching and effectiveness of fertilizers[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006,25(Supplement):154-157.

[31] Khan M A, Kim K W, Wang M Z, et al. Nutrient-impregnated charcoal: an environmentally friendly slow-release fertilizer[J]. *The Environmentalist*, 2008,28(3):231-235.

[32] Lu G Y, Zhang Y, Wang X F, et al. Effects of carbon base fertilizers on soil physical properties and maize yield[J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2011,15(5):50-53.