

施生物炭与有机肥对白浆土土壤酶活性的影响

陆欣春, 郑永照, 陈旭, 韩晓增, 邹文秀, 董本春, 严君

引用本文:

陆欣春, 郑永照, 陈旭, 韩晓增, 邹文秀, 董本春, 严君. 施生物炭与有机肥对白浆土土壤酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(3): 568–574.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0169>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

氮肥减量配施有机肥对苹果产量品质及土壤生物学特性的影响

杨莉莉, 王永合, 韩稳社, 马林英, 杨乖成, 韩艳云, 同延安

农业环境科学学报. 2021, 40(3): 631–639 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1160>

生物炭折流湿地对生活污水的净化效果

王若凡, 汪文飞, 王煜钧, 孙鹤洲, 刘傲展

农业环境科学学报. 2020, 39(9): 2001–2007 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0258>

冬闲稻田养鸡结合生物炭施用对双季稻田产量及土壤有机碳、活性碳氮的影响

周玲红, 张浪, 魏甲彬, 成小琳, 肖志祥, 徐华勤, 唐剑武, 唐启源

农业环境科学学报. 2018, 37(9): 1961–1969 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1389>

渭北旱地麦田配施有机肥减量施氮的作用效果

张昊青, 于昕阳, 翟丙年, 金忠宇, 马臣, 王朝辉

农业环境科学学报. 2017, 36(1): 124–133 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0827>

有机无机肥配施对苹果园温室气体排放的影响

马艳婷, 赵志远, 冯天宇, SOMPOUVISSETThongsouk, 孔旭, 翟丙年, 赵政阳

农业环境科学学报. 2021, 40(9): 2039–2048 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1477>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

陆欣春, 郑永照, 陈旭, 等. 施生物炭与有机肥对白浆土土壤酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(3): 568–574.

LU X C, ZHENG Y Z, CHEN X, et al. Effects of biochar application and organic fertilizer on the enzymatic activity in Albic soil[J].
Journal of Agro-Environment Science, 2022, 41(3): 568–574.



开放科学 OSID

施生物炭与有机肥对白浆土土壤酶活性的影响

陆欣春¹, 郑永照², 陈旭¹, 韩晓增¹, 邹文秀¹, 董本春², 严君^{1*}

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 哈尔滨 150081; 2. 通化市农业科学研究院, 吉林 梅河口 135007)

摘要:为探讨施生物炭和有机肥对白浆土土壤酶活性的影响,以白浆土为试验土壤进行施生物炭(C₁:施生物炭 15 000 kg·hm⁻²、C₂:施生物炭 30 000 kg·hm⁻²)与有机肥(OM)的定位试验,监测施用后 3 a 肥效,采集土壤测定 β-1,4-葡萄糖苷酶(BG)、β-1,4-N-乙酰葡萄糖苷酶(NAG)、亮氨酸氨基肽酶(LAP)、酸性磷酸酶(AP)活性。结果表明,在白浆土上施生物炭和有机肥连续 3 a 均增加了玉米产量,但从经济效益分析施生物炭仍为负效益,施有机肥为正效益。3 a 后仅 C₂ 显著增加了有机质含量,其他处理下有机质和全氮含量增加均不显著。与常规处理相比,C₁ 仅显著提高了 BG 酶活性,提高了 82.2%,对其他 3 种酶活性提高均不显著,C₂ 可显著提高 4 种酶活性 23.1%~47.9%;施有机肥可显著提高 AP 和 LAP 酶活性。施生物炭 30 000 kg·hm⁻² 对白浆土土壤改良效果较好,其后效可维持 3 a 以上,但经济效益仍为负。因此实际生产中还应以施用有机肥培肥土壤为重,对于出现严重减产的地块可以考虑通过施用生物炭一次性改良土壤。

关键词:白浆土;生物炭;有机肥;产量;土壤酶活性

中图分类号:S156 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2022)03-0568-07 doi:10.11654/jaes.2021-0169

Effects of biochar application and organic fertilizer on the enzymatic activity in Albic soil

LU Xinchun¹, ZHENG Yongzhao², CHEN Xu¹, HAN Xiaozeng¹, ZOU Wenxiu¹, DONG Benchun², YAN Jun^{1*}

(1. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin, 150081, China; 2. Institute of Agricultural Science, Tonghua City, Mehekou 135007, China)

Abstract: This study conducted an experiment in northeast China designed to better understand the influence of biochar and organic fertilizer application on enzymatic activity in Albic soil. The effects of biochar (C₁, 15 000 kg·hm⁻² and C₂, 30 000 kg·hm⁻²) and organic fertilizer (OM) application on β-1,4-glucosidase (BG), β-1,4-N-acetylglucosaminidase (NAG), leucine amino glucosidase (LAP), and acid phosphatase (AP) relating to carbon, nitrogen, and phosphorus cycling on Albic soil were investigated. The results showed that the maize yield increased following the application of biochar and organic fertilizer for three consecutive years; however, the application of the former had a negative impact in terms of economic benefits. Significant increases to the soil organic matter and total nitrogen content were only observed in the C₂ treatments. Compared with the control treatment, BG enzyme activity significantly increased by 82.2% in the C₁ treatment, and all four enzyme activities were significantly increased by 23.1%~47.9% in the C₂ treatment. The treatment with organic fertilizer application was found to significantly increase AP and LAP enzymatic activities. The results showed that the most effective means to improve Albic soils was biochar application of 30 000 kg·hm⁻²; its subsequent effects might be maintained for >3 a, while attention should be directed toward the resultant negative economic benefits. Therefore, organic fertilizer should be considered a priority to improve soil fertility in Albic soils, and a one-time biochar application should be considered for plots characterized by severe reductions in yield.

Keywords: Albic soil; biochar; organic fertilizer; yield; soil enzymatic activity

收稿日期:2021-02-09 录用日期:2021-11-19

作者简介:陆欣春(1982—),男,内蒙古赤峰人,高级工程师,主要从事植物营养与土壤肥力调控研究。E-mail:luxinchun@iga.ac.cn

*通信作者:严君 E-mail:yanjun@iga.ac.cn

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0300605);黑龙江省应用技术与开发计划项目(GA19B105,GA19B101);国家自然科学基金项目(41771327,41807085)

Project supported: The National Key Research and Development Program of China(2017YFD0300605); Applied Technology Research and Development Program of Heilongjiang(GA19B105,GA19B101); The National Natural Science Foundation of China(41771327,41807085)

土壤的生物化学反应有土壤酶的参与,因此研究者能够通过监测土壤酶活性和计算酶的生态化学计量比来估计土壤生物化学过程中微生物对C、N、P等养分元素的吸收利用,探讨土壤生化过程的强弱^[1-6]。当前,关于酶化学计量比的研究多以 β -1,4-葡萄糖苷酶(β -1,4-glucosidase, BG)、 β -1,4-N-乙酰葡萄糖氨糖苷酶(β -1,4-N-acetylglucosaminidase, NAG)、亮氨酸氨基肽酶(Leucine aminopeptidase, LAP)、酸性磷酸酶(Acid phosphatase, AP)代表C、N、P元素的相关酶活性^[2, 4-5, 7]。研究表明当微生物生长具有足够的能量和营养时,微生物将不会分泌酶,酶的生态化学计量比不变^[8]。但当土壤养分有效性变化时,微生物会分泌酶并改变不同酶的配比^[9],以从土壤中获得所需要的能量(C)和养分(N、P)^[10],酶的生态化学计量比亦相应变化。模型模拟与试验分析的结果也证明,土壤酶的相对活性与养分的有效性相耦合^[11-12]。酶的生态化学计量比可以更好地反映微生物的代谢和营养需求之间的生化平衡^[2, 7],是衡量土壤微生物能量和养分资源限制状况、揭示土壤养分循环的重要指标^[13]。

白浆土是区域性低产土壤,是我国东北地区主要农田土壤之一,在黑龙江和吉林两省分布相对集中,主要分布在两省的东部,总面积为527.20万 hm^2 ,耕地白浆土面积为166.68万 hm^2 ,约占白浆土总面积的31.6%^[14]。因此,改良和利用好这类土壤资源,对于改变白浆土区低产面貌、提高东北商品粮产量、保障我国粮食总产具有重要意义。目前改良白浆土的有效措施包括施用有机肥和生物炭等,关于施用有机肥和生物炭对白浆土土壤理化性质、微生物属性研究已有大量报道,施用有机肥可以提高土壤肥力和土壤酶活性(脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶、蛋白酶等)^[15-17],而施有机肥和生物炭对白浆土土壤参与土壤C、N、P循环的酶活性和酶计量比的影响还鲜有报道,本文依托设置在白浆土上的长期定位试验,探讨外源施入有机物料(生物炭和有机肥)对白浆土土壤生态酶化学计量特征的影响。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于吉林省通化农科院梅河口市海龙镇前进村试验田(42°36' N, 125°53' E)进行,试验田土壤基本理化性质为:有机碳15.1 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮1.42 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全磷0.73 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全钾12.6 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮120.1 $\text{mg} \cdot$

kg^{-1} ,速效磷61.4 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾136.7 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH值4.52(水土比2.5:1)。试验田地势平坦,属于温带大陆性季风气候,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥。年均气温4~6 $^{\circ}\text{C}$,年降水量600~750 mm,其中6—9月的降水量占全年降水的70%左右。土壤类型为典型白浆土。

1.2 试验设计

试验起始于2018年,试验设置4个处理:常规对照 C_0 、施生物炭 C_1 (15 000 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)、施生物炭 C_2 (30 000 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)、施有机肥OM(鸡粪,15 000 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。每个处理3次重复,共12个小区,小区面积为30 m^2 。2019年和2020年继续进行种植,各处理不再施用有机肥和生物炭,但化肥继续施用。

每年玉米成熟后收获测产,采集土壤样品,风干后备用。

2020年秋季采集的土壤鲜样立即带回实验室,过2 mm筛后,一部分立即保存在-4 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱,用于测定土壤酶活性,另一部分土壤风干,以便后续测定。

1.3 测定项目及方法

土壤酶活性采用微孔板荧光法^[18]测定。

土壤有机碳、全氮含量采用元素分析仪测定(EA3000, Euro Vector, Italy)。

1.4 数据处理

土壤生态酶化学计量的计算公式参考文献^[19]。

使用Excel和SPSS 20.0对试验数据进行处理及方差分析,多重比较采用LSD最小极差法。用Origin 2019做图。

2 结果与分析

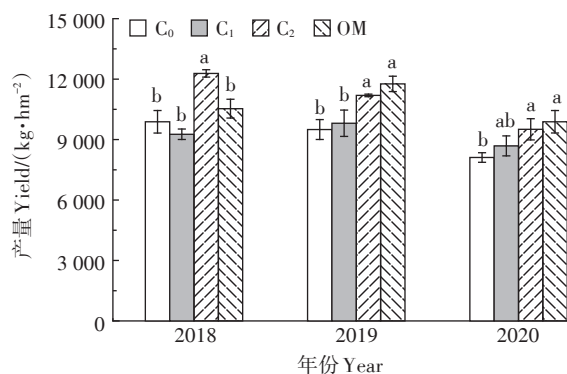
2.1 施生物炭和有机肥对玉米产量和经济效益的影响

3 a玉米产量结果显示(图1),与对照(C_0)相比, C_1 处理3 a均未显著增产, C_2 处理3 a均显著增加玉米产量,增产17.2%~24.3%,施有机肥处理第1年增产不显著,第2、3年增产均达显著水平。

根据连续3 a试验所获得的玉米产量估算经济效益(表1),施用15 000 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (C_1)连续3 a所获得玉米效益稍高于投入的生物炭价格,施用30 000 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (C_2)连续3 a所获得玉米效益低于投入的生物炭价格,施用有机肥处理为正收益。

2.2 施生物炭与有机肥对土壤C、N含量的影响

施生物炭和有机肥1 a后,白浆土的有机质含量和土壤N、P、K等含量均有一定幅度增加^[20],而其施入土壤3 a后,土壤有机质含量及全氮含量仍有一定增



同一年份间不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)
Different lowercase letters indicate significant differences among treatments in the same year($P<0.05$)

图1 施生物炭和有机肥对玉米产量的影响

Figure 1 Effects of biochar and organic fertilizer on maize yield

表1 施生物炭和有机肥3年累计获得的经济效益

Table 1 Effects of biochar and organic fertilizer on cumulative economic benefit for three years

处理 Treatment	累计收入/(元·hm ⁻²) Income/ (yuan·hm ⁻²)	与对照相比 Compared to C ₀	
		增加产量 Increased yield/ (kg·hm ⁻²)	增加效益/(元·hm ⁻²) Increased income/ (yuan·hm ⁻²)
C ₁	16 543	270.5	-14 222
C ₂	19 494	5 495.2	-20 368
OM	19 140	4 690.4	5 568

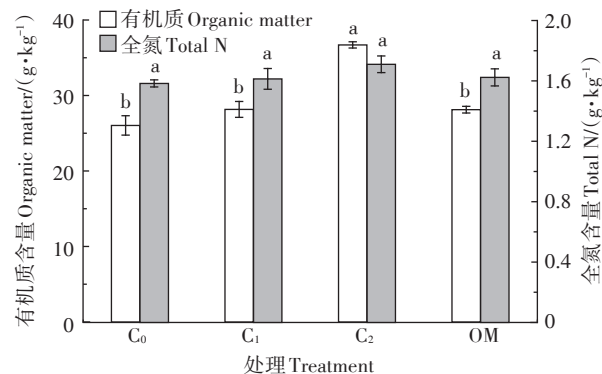
注:生物炭价格1.0元·kg⁻¹;有机肥0.2元·kg⁻¹;玉米2018年和2019年以1.6元·kg⁻¹计,2020年以2.2元·kg⁻¹计。

Note: The price of biochar is 1.0 yuan·kg⁻¹; the price of organic matter is 0.2 yuan·kg⁻¹; the price of maize was 1.6 yuan·kg⁻¹ in 2018 and 2019, and 2.2 yuan·kg⁻¹ in 2020.

加,土壤有机质含量增加了8.1%~40.7%,仅C₂达显著水平,土壤全氮含量增加了2.1%~8.2%,均未达到显著水平(图2)。

2.3 施生物炭和有机肥对土壤酶活性的影响

土壤BG活性为108.8~198.2 nmol·g⁻¹·h⁻¹(图3),变化幅度较大,与对照相比,施生物炭(C₁、C₂)可显著增加BG活性,增幅分别为82.2%和38.1%,施有机肥对BG活性影响不显著。土壤NAG+LAP活性为28.9~72.8 nmol·g⁻¹·h⁻¹,与常规对照相比,仅C₂显著增加了土壤NAG活性,C₁对NAG活性影响不显著,施有机肥土壤NAG活性均显著低于对照。与对照相比,C₂和OM处理均可显著增加土壤LAP活性。土壤AP活性为350.5~518.4 nmol·g⁻¹·h⁻¹,与常规对照相比,施生物炭(C₁、C₂)可增加AP活性,分别增加10.7%和47.9%,其中C₂达到显著水平。



不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同
Different lowercase letters indicate significant differences among treatments($P<0.05$). The same below

图2 施生物炭和有机肥对白浆土有机质、全氮含量的影响

Figure 2 Effects of biochar and organic fertilizer on content of soil organic matter and total N

2.4 土壤酶活性计量比

土壤BG:(NAG+LAP):(EEA_{C:N})平均为2.81,其中施有机肥处理最高,显著高于其他处理,其次为C₁处理,再次是C₀和C₂处理;BG:AP:(EEA_{C:P})平均为0.35,以C₁处理最高,显著高于其他处理,而其他处理之间无显著差异;(NAG+LAP):AP:(EEA_{N:P})平均为0.13,施有机肥处理最低,显著低于其他处理(图4)。

2.5 土壤C、N、P酶活性相关性分析

ln(BG)、ln(NAG+LAP)和ln(AP)之间存在线性关系,ln(BG)与ln(NAG+LAP)和ln(AP)的相关系数分别为0.450 1和0.292 0,ln(NAG+LAP)和ln(AP)的相关系数为0.302 2(图5)。全球尺度土壤C、N、P循环相关的酶活性比约为1:1:1^[21],本文中常规处理土壤C、N、P循环相关的酶活性比更接近该比例;而施用有机肥和生物炭使土壤C、N、P循环相关的酶活性比远离1:1:1。

3 讨论

白浆土是我国东北地区典型的低产耕地资源之一,外源添加有机物质是培肥和改良白浆土的重要措施。本试验中施用生物炭和有机肥后对玉米均有一定增产效果,并且其后效可增加玉米产量,其中C₂处理3 a均显著增产,施有机肥处理第2、3年均显著增产。但由于生物炭造价较高,根据本试验经济效益估算,与常规对照相比,施生物炭处理的经济效益均为负,并且按照每年所增加的经济效益均值估算还需近10年才能产生正效益,而生物炭的后效能否持续10余年以及是否能稳定增产还有待验证。而施有机肥

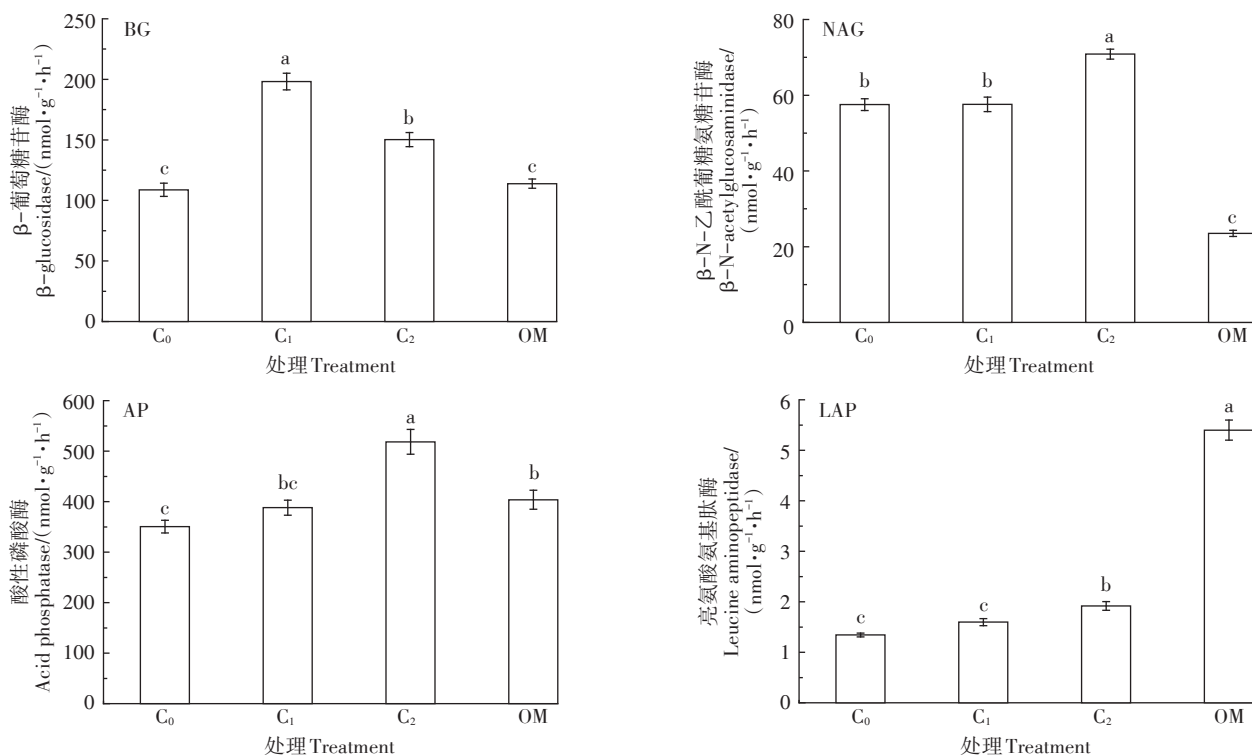


图3 施生物炭和有机肥对白浆土酶活性影响

Figure 3 Effects of biochar and organic fertilizer on soil enzyme activity

处理3 a 累积经济效益为正值。本研究调查了当地农户生产水平,农户为追求高产而长期大量施用化肥,不注重有机物料投入,造成土壤酸化,不同年际间玉米产量变异系数为20.3%,产量不稳^[18]。综上所述,实际生产中还应施用有机肥培肥土壤,而对于出现严重减产的地块可以考虑通过施用生物炭一次性改良土壤。保育土壤是重中之重,如果长期掠夺式经营导致土壤出现问题后再改良,所需投入会更高,短期内不能获得经济效益。

施生物炭和有机肥均能不同程度提高当季土壤各养分指标和土壤微生物功能多样性^[16],连续种植3 a 作物后仍可增加土壤有机质含量(图2),增加幅度与投入的有机物料量有关,有机物料投入量较小的处理有机质含量增加不显著,高量生物炭(C₂)可显著增加土壤有机质含量。土壤微生物是土壤有机质转化和养分循环的重要驱动力,外源有机物质作为土壤微生物可利用的重要能量和养分源,输入土壤后会改变土壤微生物多样性、生物量组成及其结构^[22]。本文中施用生物炭和有机肥均不同程度增加了土壤酶活性(图3),这与大多数研究结果一致^[23-25]。

本文中施入有机肥3 a 后,肥料后效已经降低,尤其施相同量的生物炭(C₁)和有机肥处理对土壤C和N

含量影响不显著,C₁增加了BG活性,而施有机肥对BG酶活性增加不显著,显著降低了NAG酶活性,从而均显著提高了EEA_{C:N}的比值(图4);与对照相比,C₁显著增加了EEA_{C:P},OM显著降低了EEA_{N:P},这是由于施生物炭增加了参与C循环的BG活性,施有机肥降低了参与N循环的NAG活性。大量研究表明,肥料通过改善土壤性质、微生物活性等来影响土壤酶活性^[26-27],理论上讲,施用化肥可以减轻土壤微生物的养分限制,但会加重微生物受C的限制^[28],施入生物炭和有机肥可以提供碳源来减少限制,但在本试验中施入的生物炭需要更多的BG转化碳源以供微生物所需。

微生物生物量C:N:P具有一定的保守性,因此酶活性计量比也相对保守,全球尺度土壤C、N和P循环相关的酶活性比约为1:1:1^[21,29-30],即使受环境影响,也在一个相对稳定的范围内波动^[28]。在小区域尺度上,土壤微生物生长受到养分限制时,C、N、P获取酶活性会偏离1:1:1的关系。而本文中土壤C、N、P循环相关的酶活性对数转换后比值平均为1:0.80:1.22,与全球生态系统1:1:1的比值相偏离,其中BG:AP平均值为0.35,低于全球水平0.62^[21],而NAG:AP平均值为0.13,也低于全球水平0.44^[21],说明相对于土壤C底物有效性来说,本试验供试土壤微生物可能

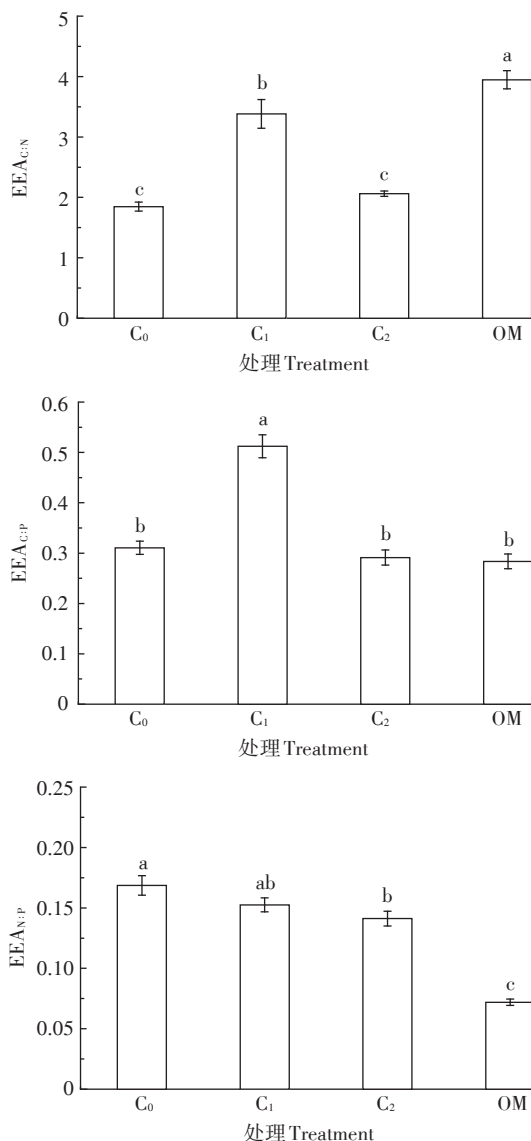


图4 施生物炭和有机肥对白浆土酶活性计量比的影响
Figure 4 Effects of biochar and organic fertilizer on soil eco-enzymatic stoichiometry ratios

存在一定的P限制,大部分研究表明AP的活性与环境P的有效性呈负相关关系^[31]。本试验供试土壤的有效P含量相对较高^[20],是由于长期施用磷肥造成土壤P累积,土壤中P的含量增高,而AP的活性则降低^[32]。在东北黑土区有效P含量已能满足作物生长需求,但受气候影响,尤其是作物苗期气温较低,土壤P有效性不足,此时仍需施入磷肥补充P供应,因此作物播种时长期施用磷肥造成了大量P累积,从而导致有效P含量增高,AP活性降低。一般来说,当微生物受到P限制时,微生物就会分泌更多的磷酸酶促进土壤有机磷矿化,缓解P限制。微生物分泌的磷酸酶增多,土壤

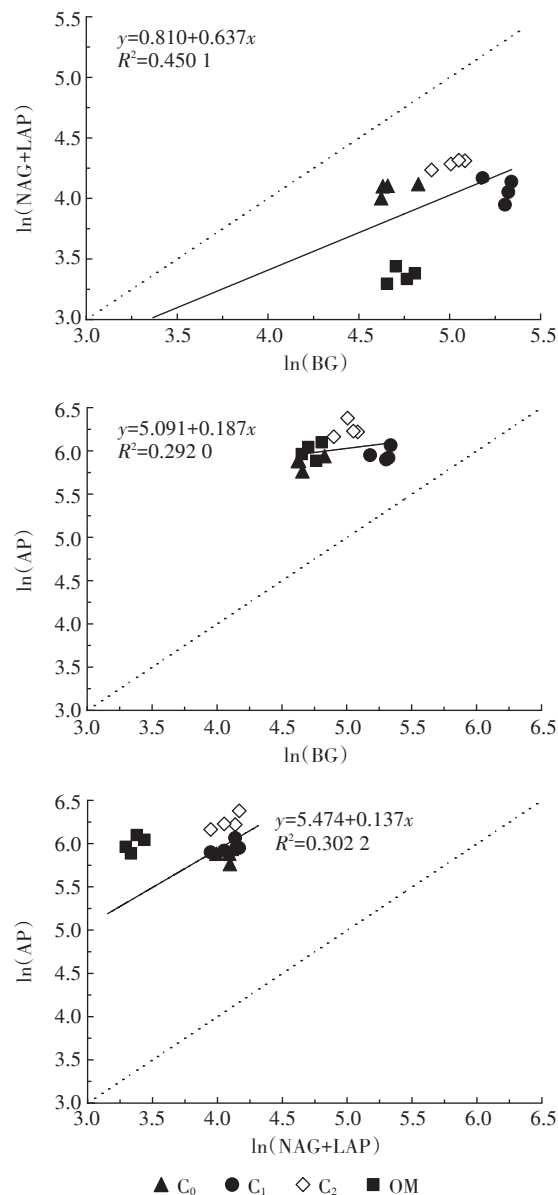


图5 不同处理土壤C、N、P酶活性关系的标准主轴回归分析
Figure 5 Standardized major axis regressions of the log-transformed soil C-, N-, and P-acquiring enzyme activities in different treatments

BG:(AP+NAG):AP的值则降低。有研究认为微生物在从土壤中获取养分方面比植物具有竞争优势^[33-34],即微生物受某一养分限制时,植物也可能受该养分限制^[35]。本文中供试土壤虽长期施用磷肥,但作物仍存在着P限制,相关试验结果也表明,长期施用磷肥的田间作物在产量上存在着显著的P限制^[36]。

4 结论

(1)在白浆土上施生物炭和有机肥可以连续3 a增加玉米产量,施生物炭30 000 kg·hm⁻²可显著增加

玉米产量,施有机肥第1年增产效果不显著,第2、3年增产效果显著。但施生物炭的经济效益仍为负值,施有机肥经济效益更高。

(2)施生物炭和有机肥3 a后,仅施生物炭 $30\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 处理显著增加了有机质含量,其他处理下有机质和全氮含量增加均不显著。

(3)施生物炭 $15\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 3 a后仅显著增加了 β -1,4-葡萄糖苷酶活性,提高了82.2%,其他3种酶活性增加均不显著,施生物炭 $30\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 可显著增加4种酶活性,提高了23.1%~47.9%;施有机肥可显著增加酸性磷酸酶和亮氨酸氨基肽酶活性。

参考文献:

- [1] 张彬,何红波,白震,等. 保护性耕作对土壤微生物特性和酶活性的影响[J]. 土壤通报, 2010, 41(1): 230-236. ZHANG B, HE H B, BAI Z, et al. The effects of conservation tillage on the characteristics of soil microorganisms and the activities of soil enzymes[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(1): 230-236.
- [2] SINSABAUGH R L, HILL B H, SHAH J J F. Ecoenzymatic stoichiometry of microbial organic nutrient acquisition in soil and sediment[J]. *Nature*, 2009, 462: 795-798.
- [3] HILL B H, ELONEN C M, JICHA T M, et al. Sediment microbial enzyme activity as an indicator of nutrient limitation in Great Lakes coastal wetlands[J]. *Freshwater Biology*, 2010, 51: 1670-1683.
- [4] TAPIA-TORRES Y, ELSER J J, SOUZA V, et al. Ecoenzymatic stoichiometry at the extremes: How microbes cope in an ultra-oligotrophic desert soil[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2015, 87: 34-42.
- [5] CHEN X, DING Z J, TANG M, et al. Greater variations of rhizosphere effects within mycorrhizal group than between mycorrhizal group in a temperate forest[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2018, 126: 237-246.
- [6] CUI Y X, FANG L C, GUO X B, et al. Ecoenzymatic stoichiometry and microbial nutrient limitation in rhizosphere soil in the arid area of the northern Loess Plateau, China[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2018, 116: 11-21.
- [7] SINSABAUGH R L, FOLLSTAD SHAH J J. Ecoenzymatic stoichiometry and ecological theory[J]. *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics*, 2012, 43: 313-343.
- [8] ALLISON S D, WEINTRAUB M N, GARTNER T B, et al. Evolutionary evolutionary economic principles as regulators of soil enzyme production and ecosystem function[J]. *Soil Enzymology*, 2011: 229-243.
- [9] DENG L, PENG C, HUANG C, et al. Drivers of soil microbial metabolic limitation changes along a vegetation restoration gradient on the Loess Plateau, China[J]. *Geoderma*, 2019, 353: 188-200.
- [10] FANIN N, MOORHEAD D, BERTRAND I. Eco-enzymatic stoichiometry and enzymatic vectors reveal differential C, N, P dynamics in decaying litter along a land-use gradient[J]. *Biogeochemistry*, 2016, 129(1/2): 21-36.
- [11] 吴秀芝, 阎欣, 王波, 等. 荒漠草地沙漠化对土壤-微生物-胞外酶化学计量特征的影响[J]. 植物生态学报, 2018, 42(10): 1022-1032. WU X Z, YAN X, WANG B, et al. Effects of desertification on the C:N:P stoichiometry of soil, microbes, and extracellular enzymes in a desert grassland[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2018, 42(10): 1022-1032.
- [12] CHEN Y Z, CHEN J, LUO Y Q. Data-driven ENZYme (DENZY) model represents soil organic carbon dynamics in forests impacted by nitrogen deposition[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 138: 1-9.
- [13] 张星星, 杨柳明, 陈忠, 等. 中亚热带不同母质和森林类型土壤生态酶化学计量特征[J]. 生态学报, 2018, 38(16): 5828-5836. ZHANG X X, YANG L M, CHEN Z, et al. Patterns of ecoenzymatic stoichiometry on types of forest soils from different parent materials in subtropical areas[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(16): 5828-5836.
- [14] 隋跃宇, 赵军, 冯学民. 关于黑土、白浆土、沼泽土的论述——张之一文选[M]. 哈尔滨: 哈尔滨地图出版社, 2013. SUI Y Y, ZHAO J, FENG X M. Discussion on black soil, white slurry soil and swamp soil—selected works of Zhang Zhiyi[M]. Harbin: Harbin Cartographic Publishing House, 2013.
- [15] 孟庆英, 张春峰, 贾会彬, 等. 不同机械改土方式对白浆土物理特性及酶活性的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(2): 552-559. MENG Q Y, ZHANG C F, JIA H B, et al. Effects of mechanical soil amelioration method on physical properties of and enzyme activity in planosol[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(2): 552-559.
- [16] 代舟, 孟军, 田晓翠, 等. 生物炭对东北酸性土养分含量、酶活性及大豆产量的影响[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2016, 28(4): 1-5. DAI Z, MENG J, TIAN X C, et al. Effects of biochar on acid soil nutrient content, enzyme activity and the soybean yield in northeast China[J]. *Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University*, 2016, 28(4): 1-5.
- [17] 孟庆英, 韩旭东, 张春峰, 等. 白浆土施有机肥及石灰对土壤酶活性与大豆产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017(3): 56-60. MENG Q Y, HAN X D, ZHANG C F, et al. Effects of organic fertilizer and lime application on soil enzyme and soybean yield in planosol[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2017(3): 56-60.
- [18] SAIYA-CORK K R, SINSABAUGH R L, ZAK D R. The effects of long term nitrogen deposition on extracellular enzyme activity in an *Acer saccharum*, forest soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(9): 1309-1315.
- [19] ZHAO F Z, REN C J, HAN X H, et al. Changes of soil microbial and enzyme activities are linked to soil C, N and P stoichiometry in afforested ecosystems[J]. *Forest Ecology and Management*, 2018, 427: 289-295.
- [20] 陆欣春, 郑永照, 陈旭, 等. 施生物炭和有机肥对白浆土理化性质和玉米产量的影响[J]. 玉米科学, 2019(6): 137-143. LU X C, ZHENG Y Z, CHEN X, et al. Effects of biochar and organic fertilizer on soil physico-chemical properties and maize yields of albic soil[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2021, 29(6): 137-143.
- [21] SINSABAUGH R L, LAUBER C L, WEINTRAUB M N, et al. Stoichiometry of soil enzyme activity at global scale[J]. *Ecology Letters*, 2008, 11: 1252-1264.
- [22] 王曙光, 侯彦林. 磷脂脂肪酸方法在土壤微生物分析中的应用[J].

- 微生物学通报, 2004, 31(1):114-117. WANG S G, HOU Y L. Application of phospholipid fatty acid method in soil microbial analysis [J]. *Microbiology China*, 2004, 31(1):114-117.
- [23] 杨莉莉, 王永合, 韩稳社, 等. 氮肥减量配施有机肥对苹果产量品种及土壤生物学特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(3): 631-639. YANG L L, WANG Y H, HAN W S, et al. Effects of reducing nitrogen fertilizer and applying organic fertilizer on apple yield and quality and soil biological characteristics[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(3): 631-639.
- [24] 田小明, 李俊华, 王成, 等. 连续3年施用生物有机肥对土壤养分、微生物生物量及酶活性的影响[J]. 土壤, 2014, 46(3): 481-488. TIAN X M, LI J H, WANG C, et al. Effects of continuous application of bio-organic fertilizer for three years on soil nutrients, microbial biomass and enzyme activity[J]. *Soils*, 2014, 46(3): 481-488.
- [25] 巩庆利, 翟丙年, 郑伟, 等. 渭北旱地苹果园生草覆盖下不同肥料配施对土壤养分和酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(1): 205-212. GONG Q L, ZHAI B N, ZHENG W, et al. Effects of grass cover combined with different fertilization regimes on soil nutrients and enzyme activities in apple orchard in Weibei dryland, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(1): 205-212.
- [26] 郭永盛, 李鲁华, 危常州, 等. 施氮肥对新疆荒漠草原生物量和土壤酶活性的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(增刊1): 249-256. GUO Y S, LI L H, WEI C Z, et al. Effect of nitrogen fertilizer on biomass amount and soil enzymes activity of desert grassland in Xinjiang [J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(Suppl 1): 249-256.
- [27] VEPSLINEN M, KUKKONEN S, VESTBERG M. Application of soil enzyme activity test kit in a field experiment[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33: 1665-1672.
- [28] ABER J, MCDOWELL W, NADELHOFFER K, et al. Nitrogen saturation in temperate forest ecosystems[J]. *BioScience*, 1998, 48(11): 921-934.
- [29] CLEVELAND C C, LIPTZIN D. C:N:P stoichiometry in soil: Is there a "redfield ratio" for the microbial biomass? [J]. *Biogeochemistry*, 2007, 85: 235-252.
- [30] 高雨秋, 戴晓琴, 王建雷, 等. 亚热带人工林下植被根际土壤酶化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2019, 43(3): 258-272. GAO Q Y, DAI X Q, WANG J L, et al. Characteristics of soil enzymes stoichiometry in rhizosphere of understory vegetation in subtropical forest plantations[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2019, 43(3): 258-272.
- [31] ALLISON S D, VITOUSEK P M. Responses of extracellular enzymes to simple and complex nutrient inputs[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(5): 937-944.
- [32] WANG S X, LIANG X Q, CHEN Y X, et al. Phosphorus loss potential and phosphatase activity under phosphorus fertilization in long-term paddy wetland agroecosystems[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, 76(1): 161-167.
- [33] HODGE A, ROBINSON D, FITTER A. Are microorganisms more effective than plants at competing for nitrogen?[J]. *Trends in Plant Science*, 2000, 5(7): 304-308.
- [34] LIPSON D A, RAAB T K, SCHMIDT S K, et al. Variation in competitive abilities of plants and microbes for specific amino acids[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1999, 29(3): 257-261.
- [35] ZHENG L, CHEN H, WANG Y Q, et al. Responses of soil microbial resource limitation to multiple fertilization strategies[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 196: 104474.
- [36] HOU E, LUO Y, KUANG Y, et al. Global meta-analysis shows pervasive phosphorus limitation of aboveground plant production in natural terrestrial ecosystems[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 637.