



减肥条件下生物炭施用方式对土壤肥力及酶活性的影响

刘遵奇, 兰宇, 杨铁鑫, 张艺潇, 孟军

引用本文:

刘遵奇, 兰宇, 杨铁鑫, 等. 减肥条件下生物炭施用方式对土壤肥力及酶活性的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(4): 544–551.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0143>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同土壤水势下贝莱斯芽孢杆菌B006菌剂对茄子的促生增产作用

耿妍, 郭荣君, 张爱香, GOVRINERiMoshe, 李世东

农业资源与环境学报. 2020, 37(3): 398–406 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0026>

外加辐处理下秸秆生物质炭对土壤酶活性的影响

尚艺婕, 王海波, 史静

农业资源与环境学报. 2015(1): 22–27 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2014.0266>

生物炭不同施加方式对水稻生长及产量的影响

王悦满, 高倩, 薛利红, 杨林章, 李辉信, 冯彦房

农业资源与环境学报. 2018, 35(1): 58–65 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0162>

自然降雨条件下不同施肥模式和耕作方式对坡耕地紫色土肥力质量的影响

彭石磊, 何丙辉, 王润泽, 唐柄哲

农业资源与环境学报. 2018, 35(4): 318–326 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0045>

有机物料还田和减施氮肥对麦-玉周年农田碳氮水足迹及经济效益的影响

李春喜, 刘晴, 邵云, 李斯斯, 李晓波, 翁正鹏

农业资源与环境学报. 2020, 37(4): 527–536 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0150>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

刘遵奇, 兰宇, 杨铁鑫, 等. 减肥条件下生物炭施用方式对土壤肥力及酶活性的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(4): 544-551.

LIU Zun-qi, LAN Yu, YANG Tie-xin, et al. Effect of biochar application pattern on soil fertility and enzyme activity under limited fertilization conditions[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(4): 544-551.



开放科学 OSID

减肥条件下生物炭施用方式对土壤肥力及酶活性的影响

刘遵奇, 兰宇, 杨铁鑫, 张艺潇, 孟军*

(沈阳农业大学 辽宁省生物炭工程技术研究中心, 沈阳 110866)

摘要:为研究生物炭逐年施加和一次性施入4年后对土壤肥力和酶活性的影响,采用定位试验设置100%(F1)、80%(F2)和60%(F3)推荐施肥量的三种施肥水平×四种施炭量(CK:0 t·hm⁻², B1:2.6 t·hm⁻²·a⁻¹, B2:13 t·hm⁻², B3:26 t·hm⁻²)共12个处理,分析土壤氮磷钾养分含量和酶活性指标的变化,其中B1处理逐年施加,B2和B3处理一次性施加。结果表明生物炭对土壤氮素提高效果显著,其中全氮含量较对照处理提高23.08%~52.25%,硝态氮含量是对照的1.80~2.46倍,并随施炭量提高而增加,提升效果优于铵态氮。60%推荐施肥条件下,施加13 t·hm⁻²和26 t·hm⁻²生物炭土壤速效磷含量分别高于不施炭对照84.99%和159.23%。土壤全钾含量未因生物炭加入发生显著变化,但是速效钾含量较对照提高了18.99%~61.24%。土壤酶活性主要受生物炭施加方式的影响:逐年施加生物炭(B1)显著提高了酸性磷酸酶活性,但降低了土壤脲酶和过氧化氢酶活性,而一次性施炭可提高土壤脲酶活性。研究表明,生物炭对土壤氮磷肥力和速效钾肥力均有一定的提升效果,其中对氮素的提高效果最理想,可弥补减肥40%引起的土壤氮素降低。逐年施炭对土壤酶活性影响显著,新鲜生物炭中所含物质是影响酶活性的主要因素。

关键词:施炭方式;土壤肥力;土壤酶活性

中图分类号:X71

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2020)04-0544-08

doi: 10.13254/j.jare.2019.0143

Effect of biochar application pattern on soil fertility and enzyme activity under limited fertilization conditions

LIU Zun-qi, LAN Yu, YANG Tie-xin, ZHANG Yi-xiao, MENG Jun*

(Liaoning Biochar Engineering & Technology Research Center, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: The aim of this study was to determine the effect of biochar application on soil fertility and enzyme activity. The soil nitrogen (N), phosphorus (P), and potassium (K) contents and enzyme activity were measured in 12 treatments, including 3 fertilizer application rates: 100%, 80% and 60% of full recommended fertilization, marked as F1, F2, F3, and 4 biochar application rates: CK: 0 t·hm⁻², B1: 2.6 t·hm⁻²·a⁻¹, B2: 13 t·hm⁻², B3: 26 t·hm⁻². The results showed that biochar amendment compensated soil N decline by reducing 40% of N fertilizer inputs. In detail, biochar caused 23.08%~52.25% increase of soil total N content and 39.39%~85.76% increase of soil ammonium (NH₄⁺-N) concentration when compared with control soil. Meanwhile, soil nitrate (NO₃⁻-N) concentration was 1.80~2.46 times of control. The soil P availability was elevated by biochar addition at F3 fertilization rate, e.g., the available P content in B2×F3, B3×F3 were 84.98% and 159.23% higher than their corresponding control. Furthermore, although soil total K content was not affected by biochar, the soil available K content was 18.99%~61.24% higher than in the control. Soil enzyme activity was mainly affected by biochar application pattern: One-time biochar application (B2 and B3) improved soil urease activity, and when biochar was applied annually (B1), it enhanced acid phosphatase activity, but soil urease and catalase activity was inhibited, implying that labile fraction in fresh biochar was the main substances affecting soil enzyme activity. Our results indicated that biochar application is an effective measure for soil fertility improvement and its application pattern has a great influence on soil enzyme activity.

Keywords: biochar application pattern; soil fertility; soil enzyme activity

收稿日期:2019-03-21 录用日期:2019-07-05

作者简介:刘遵奇(1989—),男,吉林蛟河人,讲师,从事生物炭在土壤改良中应用研究。E-mail:liuzunqi@syau.edu.cn

*通信作者:孟军 E-mail:mengjun1217@syau.edu.cn

基金项目:国家重点研发计划(2017YDF0200800);沈阳农业大学公开招聘博士科研启动项目;科技部中青年科技创新领军人才(2017RA2211);辽宁省兴辽英才计划(XLYC1802094)

Project supported: National Key R&D Program of China (2017YDF0200800); PhD Launched Fund of Shenyang Agricultural University; The Innovative Talents Promotion Plan of Ministry of Science and Technology (2017RA2211); The Project of Promoting Talents in Liaoning Province (XLYC1802094)

近年来,生物炭因其具有优良特性被广泛应用于土壤改良领域。研究认为生物炭可以有效改良土壤结构、补充土壤碳库、提高保肥保水能力,并且为土壤中物质周转主导者——微生物的生存与繁殖提供良好条件^[1],从而在提升土壤质量与肥力方面发挥作用。

关于生物炭影响土壤肥力的相关研究显示,生物炭可以减少施肥土壤中的养分损失,例如磷素和氮素^[2-3]。原因是生物炭可对养分元素(例如 NH_4^+-N ^[4])起到直接吸附作用,减少其淋失;或者通过提高土壤持水能力,避免较强的淋溶作用发生^[5];再者,生物炭可促进微生物对矿质养分的固持,使土壤中的养分转化为细胞中的有机养分,也可以提高养分在土壤中的固定量^[6]。另外,不可忽视的是无论施肥与否,生物炭都会对土壤自身养分的有效性产生影响。虽然多数研究认为生物炭可以活化土壤养分^[7-8],提高土壤养分有效性,但也有研究认为这种作用在很大程度上受所施肥料类型和试验时间的影响。例如以氮素为例,研究认为生物炭在短期内(<6个月)会降低土壤矿质氮的含量,主要是因为生物炭促进微生物对氮素的固定,而少数长期试验显示生物炭对氮素以及磷素的影响是中性或积极的^[9]。由此可以看出,试验时间是影响养分对生物炭响应的重要因素。因此,本试验通过设置逐年施炭和一次性施炭的处理对比,旨在明确两种生物炭施加方式对土壤养分的影响差异。同时通过减肥处理,明确生物炭对土壤养分的提高幅度,从而为利用生物炭进行化肥减施提供参考。

土壤酶主要来自土壤微生物和植物根系,而土壤肥力直接影响土壤微生物和植物的生长情况,因此土壤中酶活性与土壤肥力水平密切相关^[10]。当前有研究显示生物炭对提高土壤酶活性具有积极作用。程效义等^[11]研究显示:施加 $20\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $40\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的生物

炭后,连作设施土壤中的脲酶、酸性磷酸酶和过氧化氢酶活性均有不同程度的提高。Demisie等^[12]研究发现生物炭可以提高与土壤有机质矿化相关的酶活性,因为生物炭中包含的有机碳组分或营养物质可作为产酶微生物的底物,生物炭通过刺激微生物提高了土壤酶的活性。然而,生物炭经过与土壤的长期相互作用后,其中所含活性物质与养分逐渐被消耗^[13],对土壤酶的影响势必会发生改变,因此,推测不同施炭方式会对土壤酶活性产生直接影响,但是目前鲜见报道。本试验以逐年施炭和一次性施炭4年后的土壤为材料,观察其中与土壤养分相关的酶活性变化,以期明确生物炭对土壤酶的影响周期,为选择生物炭施加方式和用量提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于2014年5月上旬在沈阳市辽中区进行,该试验区土壤类型为草甸土,基本性质:pH 7.55;容重 $1.25\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$;有机质 $17.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$;全氮 $0.95\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$;全磷 $1.15\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$;全钾 $16.6\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。玉米秸秆生物炭由辽宁金和福农业科技股份有限公司提供,热解温度在 $500\sim 600\text{ }^\circ\text{C}$ 之间。基本性质:全碳 42.5% ;全氮 $8.9\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$;全磷 $3.8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$;全钾 $32.3\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$;速效氮 $0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;速效磷 $120\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;速效钾 $289\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

本试验共设置12个处理(表1),包括3个施肥量(F1、F2、F3) \times 4个施炭量(CK、B1、B2、B3)。F1为推荐施肥量的100%,F2和F3分别为推荐施肥量的80%和60%。CK处理不施加生物炭,B1逐年施加生物炭,B2和B3为一次性施加,施入量如表1所示。随机区组设计,每个处理重复3次,小区面积为 80 m^2 。试验中所施氮肥为尿素,磷肥为过磷酸钙,钾肥

表1 试验处理
Table 1 Experimental design

处理 Treatments		N/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	P_2O_5 / $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	K_2O / $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	生物炭施用量 Biochar application rate	
施肥 Fertilizer application	施炭 Biochar application				逐年施加 Year by year/ $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$	一次性施加 One off/ $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$
F1	B1	120	70	105	2.6	—
	B2	120	70	105	—	13
	B3	120	70	105	—	26
F2	B1	96	56	84	2.6	—
	B2	96	56	84	—	13
	B3	96	56	84	—	26
F3	B1	72	42	63	2.6	—
	B2	72	42	63	—	13
	B3	72	42	63	—	26

为硫酸钾。每年4月下旬将化肥和玉米秸秆炭均匀平铺于小区后用旋耕机同土壤混匀,然后起垄播种,试验作物为玉米。于2017年10月下旬收获后取耕层0~20 cm土壤,每个小区取3点进行混匀,带回试验室,风干后分别过20目和100目筛,备用。

1.2 测定指标与方法

取过100目筛的土壤测定全量养分含量。其中全氮含量使用干烧法(元素分析仪 Micro-cuba vario-elementar, 德国)测定。土壤采用碱熔融法转化为液体后,钼锑抗比色法测定全磷含量,火焰光度计法测定全钾含量^[14]。

土壤用2 mol·L⁻¹氯化钾溶液浸提后,浸提液用连续流动注射分析仪(Seal-AA3, 德国)测定NH₄⁺-N和NO₃⁻-N的含量。

土壤速效磷采用碳酸氢钠浸提,钼锑抗比色法测定。土壤速效钾采用乙酸铵浸提,火焰光度计法测定^[15]。

土壤酶活性测定之前首先将风干土壤调节含水量至60%WHC(最大持水量),在25℃下培养5 d。脲酶活性采用靛酚蓝比色法测定;过氧化氢酶活性采用容量法测定;磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法^[16](缓冲液pH=5)测定。

土壤pH值采用电极法^[15]测定,向10 g风干土壤中加入25 mL去除CO₂的水,用搅拌器搅拌1 min后放置30 min,pH计测定。

1.3 数据处理与分析

数据采用IBM SPSS Statistics version 19 统计软件进行单因素方差分析(One way ANOVA),用Duncan法进行显著性检验(P<0.05),采用Excel软件作图。

2 结果与分析

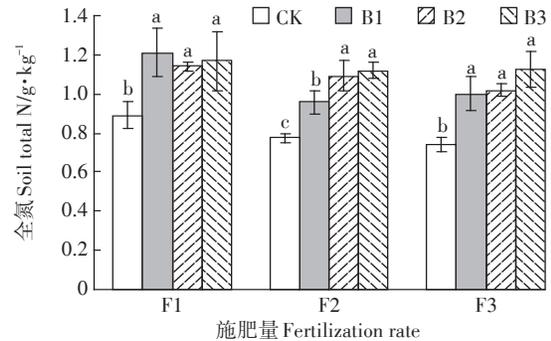
2.1 生物炭对土壤氮含量的影响

由图1可知,土壤全氮含量因生物炭的加入而显著提高。在推荐施肥量的100%、80%和60%时,生物炭土壤全氮含量增幅分别为28.08%~35.96%,24.68%~45.45%和35.14%~52.25%,这表明生物炭可在氮肥减施条件下有效地提高土壤全氮含量。不同施炭量之间全氮含量的差异表现为80%推荐施肥量下,逐年施加2.6 t·hm⁻²·a⁻¹生物炭处理全氮含量显著低于一次性施加13、26 t·hm⁻²生物炭处理。

生物炭添加亦能提高土壤NH₄⁺-N和NO₃⁻-N含量(图2a和图2b)。其中,NH₄⁺-N含量在减肥40%时(F3)受生物炭的影响最大,三种生物炭处理分别较

对照提高39.39%、65.45%和85.76%,呈随生物炭施加量增加而增加的趋势。而在100%和80%推荐施肥条件下,仅B3处理NH₄⁺-N含量显著高于对照。

相较于土壤NH₄⁺-N的变化,生物炭对NO₃⁻-N含量的提高效果更加明显(图2b)。在推荐施肥量的100%时,三种生物炭处理NO₃⁻-N含量分别是对照的1.93、2.00、2.46倍;在60%推荐施肥量时,是对照的1.80、2.19、2.46倍。同时,在100%和80%推荐施肥处



不同小写字母表示在同一施肥水平下不同生物炭处理间差异显著(P<0.05)。下同

The different lowercase letters indicate significant differences among biochar treatments at the same fertilization rate at P<0.05. The same below

图1 生物炭对土壤全氮含量的影响

Figure 1 Effect of biochar application on soil total N content

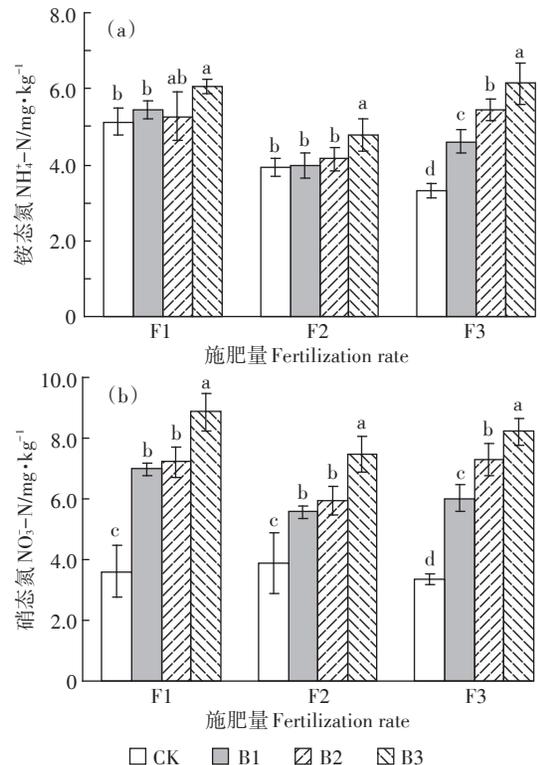


图2 生物炭对土壤NH₄⁺-N和NO₃⁻-N含量的影响

Figure 2 Effect of biochar application on soil NH₄⁺-N and NO₃⁻-N content

理中,逐年施炭(B1)处理累计施炭量为 $10.4\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,与B2处理($13\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)之间 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量差异不显著,但高炭量B3处理($26\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)土壤的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量显著高于B1和B2。从以上结果可以看出,提高生物炭用量有利于提高土壤 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的含量,而且生物炭对 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的提高作用效果优于 $\text{NH}_4\text{-N}$ 。

2.2 生物炭对土壤磷含量的影响

从图3可知,100%推荐施肥条件下,生物炭处理与对照之间土壤全磷含量差异不显著。在化肥减施时生物炭可提高土壤全磷含量。其中在减肥20%处理(F2)中,B3处理全磷含量分别高于对照和B1处理17.11%和27.14%;在减肥40%处理(F3)中,B2和B3处理分别较对照提高28.36%和38.80%,达到显著水平($P<0.05$)。通过分析发现,一次性施加 $13\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $26\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 生物炭可完全弥补减肥引起的土壤全磷含量降低。

生物炭同样可以显著提高减肥条件下的土壤速效磷水平,在100%推荐施肥条件下,对照土壤的速效磷含量为 $8.40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,当减肥40%(F3)时降低至 $2.33\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,此时B1、B2、B3处理的速效磷含量分别高于对照70.38%、84.99%和159.23%(图4),说明土壤中速效磷的来源很大程度依赖磷肥,生物炭在磷肥供应不足时对速效磷含量的提高有积极效果,不过仍低于100%施肥时的CK处理。然而,值得注意的是,在100%推荐施肥用量时,施加 $13\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $26\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 生物炭处理土壤速效磷含量分别低于对照34.40%和33.57%,说明在外源磷肥供应充足时,高量生物炭的施加反而会引起速效磷含量的降低。

2.3 生物炭对土壤钾含量的影响

由图5可知,施加生物炭和减少钾肥施加均未对土壤全钾含量产生显著影响,这是因为试验土壤的全

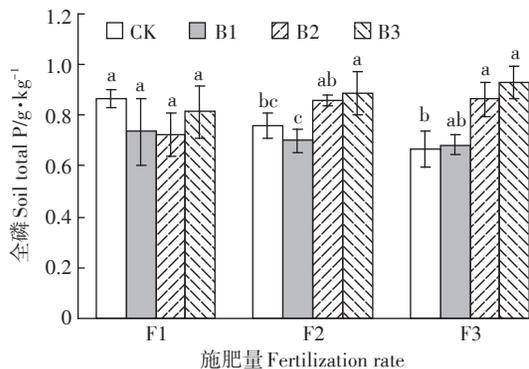


图3 生物炭对土壤全磷含量的影响

Figure 3 Effect of biochar application on soil total P content

钾含量相对较高($16.60\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),因此受外源钾投入的影响较小。

虽然生物炭对土壤全钾含量影响较小,但可以显著提高土壤速效钾含量。如图6所示,在三种施肥条件下,所有生物炭处理速效钾含量均显著高于对照。100%推荐施肥条件下(F1)提高效果最明显,B1、B2和B3处理分别高于对照33.33%、34.88%和61.24%。60%推荐施肥量下增幅较低,分别高于对照31.82%、21.90%和24.79%。

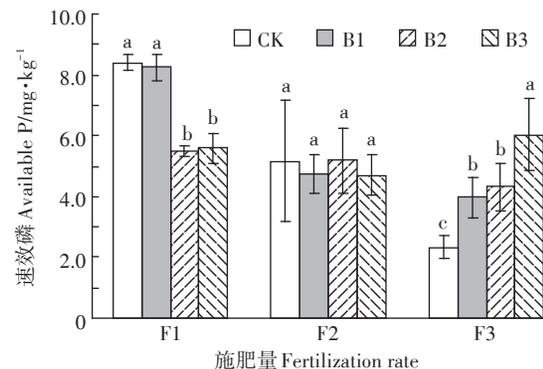


图4 生物炭对土壤速效磷含量的影响

Figure 4 Effect of biochar application on soil available P content

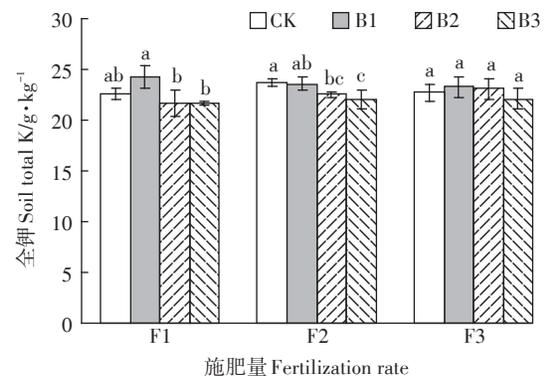


图5 生物炭对土壤全钾含量的影响

Figure 5 Effect of biochar application on soil total K content

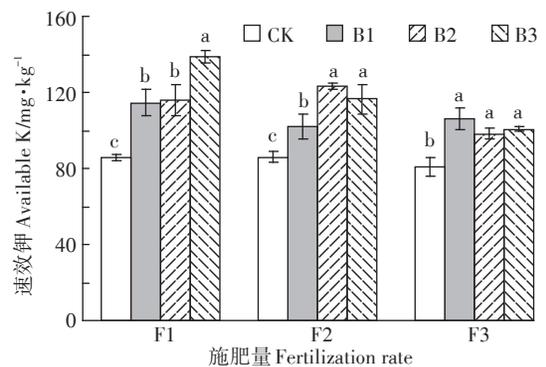


图6 生物炭对土壤速效钾含量的影响

Figure 6 Effect of biochar application on soil available K content

2.4 生物炭对土壤酶活性的影响

2.4.1 生物炭对脲酶活性的影响

土壤脲酶是尿素水解的专一性酶,其活性可反映土壤供氮能力的强弱。本试验结果显示,一次性施炭可以提高土壤脲酶活性(图7)。从图7可知,100%推荐施肥水平下,施加13 t·hm⁻²和26 t·hm⁻²生物炭的土壤脲酶活性分别高于对照36.37%和35.44%,F2施肥水平下较对照提高26.78%和34.69%。然而,逐年施加新鲜生物炭不利于土壤脲酶活性的提高,B1处理脲酶活性在三种施肥条件下均低于对照土壤,其中在60%推荐施肥条件下差异达到显著水平($P<0.05$)。

2.4.2 生物炭对过氧化氢酶活性的影响

逐年施加生物炭会抑制土壤过氧化氢酶的活性。如图8所示,施加2.6 t·hm⁻²·a⁻¹生物炭在F1、F2和F3三种施肥条件下的过氧化氢酶活性分别较对照处理降低17.84%、11.62%和10.52%,差异均达到显著水平($P<0.05$)。一次性施加13 t·hm⁻²和26 t·hm⁻²生物炭4年后,土壤过氧化氢酶活性与对照土壤之间的差异不大,表明施入新鲜生物炭后会抑制土壤过氧化氢酶的活性,但此作用在生物炭施

入土壤4年后消失。

2.4.3 生物炭对磷酸酶活性的影响

如表2所示,逐年施加2.6 t·hm⁻²·a⁻¹(B1)生物炭对土壤酸性磷酸酶活性提高作用显著。在100%、80%和60%推荐施肥条件下分别较相对照提高80.00%、80.00%和166.67%。然而在一次性生物炭施加处理中,仅有B3×F3处理的磷酸酶活性高于对照。且B2和B3处理之间磷酸酶活性无显著差异,说明生物炭添加量不是影响磷酸酶活性的主要因素。同时由结果可以看出,不同施炭方式对磷酸酶活性的影响与对脲酶和过氧化氢酶活性的影响截然不同,即生物炭逐年施加可以提高磷酸酶的活性,但是一次性施入对磷酸酶活性无显著影响。

表2 生物炭对土壤磷酸酶活性的影响

Table 2 Effect of biochar application on soil phosphatase activity

处理 Treatments	F1	F2	F3
CK	0.15±0.00b	0.15±0.02b	0.09±0.01c
B1	0.27±0.02a	0.27±0.02a	0.24±0.05a
B2	0.14±0.02b	0.17±0.05ab	0.15±0.01bc
B3	0.15±0.01b	0.18±0.03ab	0.20±0.01ab

注:同列不同小写字母表示生物炭处理间差异显著($P<0.05$)。下同。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences ($P<0.05$). The same below.

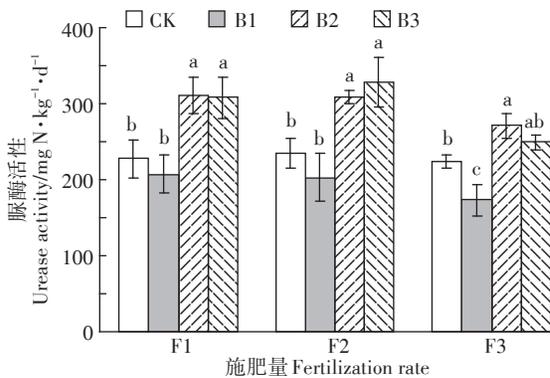


图7 生物炭对土壤脲酶活性的影响

Figure 7 Effect of biochar application on soil urease activity

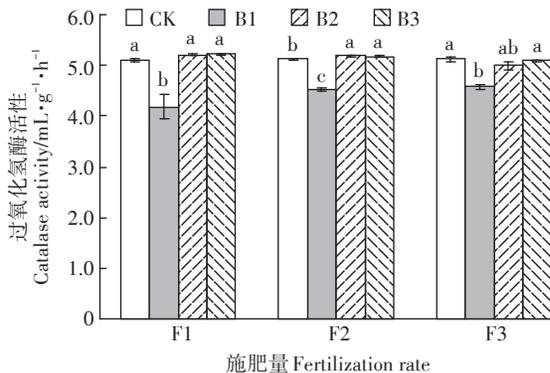


图8 生物炭对土壤过氧化氢酶活性的影响

Figure 8 Effect of biochar application on soil catalase activity

3 讨论

3.1 生物炭对土壤肥力的影响

生物炭是一种孔隙结构丰富的富碳物质,施入土壤后会通过物理作用或生物作用影响土壤肥力,改变养分有效性^[7],但是田间条件下施炭多年后的土壤养分变化尚不十分清楚。本研究结果显示,生物炭施加对土壤氮磷钾含量均有不同程度的提高作用。土壤有效氮含量提高尤为显著,这与 Nguyen 等^[18]通过荟萃分析得出的结果不同,Nguyen 等总结发现生物炭的高 C/N 特性及带入的活性物质引起微生物对土壤矿质氮的固定,因此降低了氮素有效性。然而,其分析中多数研究是基于短期试验(<1年)的结果,而本试验中生物炭已与土壤作用4年,微生物对氮素固定作用逐渐消失,所以得出不同结论。另外,Ding 等^[4]和 Laird 等^[9]研究认为生物炭中阳离子交换能力强,吸附 NH₄⁺-N 能力强于 NO₃⁻-N,而本研究结果显示生物炭对土壤 NO₃⁻-N 的提高作用高于 NH₄⁺-N,例如与对照相比,NO₃⁻-N 含量在三种施肥条件下普遍是对照的 2~3 倍,而对 NH₄⁺-N 含量最大增幅为 85.76%。产

生这一结果的原因可能是随着时间推移,生物炭在土壤中对无机氮的吸附主导作用发生了改变,而改变的原因同样与生物炭施入土壤的时间有关系,因为逐年施加的新鲜生物炭表面官能团丰富,阳离子交换能力强于土壤中陈化的生物炭,对 $\text{NH}_4\text{-N}$ 吸附能力较强,而陈化生物炭可利用丰富的孔隙结构对 $\text{NO}_3\text{-N}$ 产生吸附作用^[20],因此随着生物炭在土壤中的陈化, $\text{NO}_3\text{-N}$ 吸附能力逐渐提高。另外,生物炭抑制土壤反硝化过程,或者促进土壤自身氮素转化过程,如矿化和硝化过程也是 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量提高的潜在原因^[8,13]。试验中,生物炭可提高土壤全氮 $0.19\sim 0.39\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,占对照土壤全氮含量的 $24.68\%\sim 52.70\%$,笔者认为除了矿质氮提高贡献外,还应来自生物炭对有机氮的提高作用,因为在土壤连续施肥过程中生物炭会促进微生物将矿质氮同化为细胞中的有机氮,从而提高土壤全氮含量。例如,李玥等^[21]研究表明长期施肥条件下,生物炭可以提高棕壤有机氮中酸解全氮及酸解 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量。Reverchon等^[22]利用同位素示踪技术发现生物炭可降低肥料氮的损失,增强肥料氮在土壤中的固定。

生物炭对土壤全磷的提高作用出现在60%推荐施肥量条件下,其中 $13\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $26\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 生物炭添加对其提高作用达到显著水平,这是因为原材料中的磷在热解温度达到 $700\text{ }^\circ\text{C}$ 时才开始挥发^[23],本试验使用的生物炭热解温度为 $500\sim 600\text{ }^\circ\text{C}$,因此生物炭中全磷含量(0.38%)比较可观,在提高土壤全磷含量方面发挥了积极作用。生物炭土壤中速效磷含量的变化因施肥量不同而不同,在100%推荐施肥条件下(F1),高炭量处理降低了土壤有效磷含量,而在60%推荐施肥处理中,有效磷含量随施炭量增加而提高。研究认为土壤中磷的转化过程是一种溶解-沉淀过程,土壤中磷的吸附量与解吸量取决于土壤施磷量^[24],而生物炭在土壤中促进了磷的溶解-沉淀过程,可能是导致不同施磷水平下速效磷含量对生物炭响应不一致的原因,也就是说在施磷肥充足时,生物炭土壤对磷素的吸附作用显著,降低了有效磷含量,而当施入土壤中磷肥较少时,生物炭吸附的或者一些未溶解的磷则会解吸出来,使有效磷含量升高,这一结果同样出现在Xu等^[25]关于生物炭影响酸性土壤磷有效性的研究中。目前研究认为生物炭通过影响土壤微生物群落的结构、规模和活性,从而提高土壤解磷菌数量及磷酸酶的活性,即通过生物因素使土壤有机磷矿化速率提高^[1],是生物炭提高有效磷含量的主要因素。然而,本研究结果显示酸性磷酸酶活性与速效磷含量

之间并无显著相关关系($r=0.306, P=0.069$)。由此可见,生物炭非生物因素对土壤磷的影响作用不容忽视。相关过程研究认为,生物炭通过影响有机-无机磷复合物的吸附-解吸过程进而影响磷素自身溶解性^[26];生物炭通过较高的CEC减少土壤铁和铝的交换量,使磷素溶解出来^[27]。生物炭通过改变土壤pH影响土壤磷的吸附-解吸过程^[28],例如有研究发现生物炭使碱性土壤磷的吸附能力下降,从而使有效磷含量增加^[25]。

本研究发现生物炭对土壤全钾含量影响不明显,但可以显著提高土壤速效钾的含量,增幅为 $20\%\sim 40\%$,此结果与前人研究^[29-30]一致。生物炭中有效钾含量约为 $10\sim 100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,甚至更高,可直接提高土壤速效钾的含量。本试验所用生物炭有效钾含量为 $287\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,此条件下,B1、B2、B3处理生物炭直接向土壤提供的速效钾为 $1.16、1.44、2.88\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (耕层土壤),而在F1施肥条件下B1、B2、B3处理速效钾含量较对照增加 $28.67、30.00、52.67\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,说明生物炭中速效钾的贡献只占较少部分。更多的速效钾应该来自生物炭对肥料钾的固持及对土壤钾的活化等作用^[31]。因为在本试验推荐施肥60%、80%和100%时,B3处理分别提高有效钾 $20.00、30.67、52.67\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,可见生物炭土壤速效钾的提高量随着施肥量增加而增加,间接表明生物炭对肥料钾具有固持作用。

3.2 生物炭对土壤酶活性的影响

土壤中的酶活性与土壤肥力水平密切相关,脲酶是参与土壤氮素循环的重要水解酶,可将土壤中尿素水解成氨,其活性可以表征土壤的供氮强度。过氧化氢酶活性可以表征土壤氧化过程以及土壤腐质化程度。磷酸酶是一类催化土壤有机磷化合物矿化的酶,其活性高低影响土壤有机磷的分解转化及生物有效性。本试验结果显示,虽然土壤全氮和矿质氮含量显著提高,但是脲酶活性与土壤全氮含量之间并不具有显著相关性(表3)。而所检测的三种酶活性均受施炭方式影响:逐年施加 $2.6\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 生物炭时,土壤脲酶与过氧化氢酶活性显著降低,而土壤酸性磷酸酶活性显著提高。一次性施加 $13\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $26\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 生物炭土壤脲酶活性显著提高,过氧化氢酶和酸性磷酸酶活性变化不显著。

目前关于施炭方式对土壤酶活性的影响研究还比较少,一般认为生物炭通过生物因素影响土壤酶的活性。孟繁昊等^[32]研究结果显示,生物炭与肥料配施可以有效提高土壤脲酶及过氧化氢酶活性,并且认为

表3 土壤全氮、铵态氮、硝态氮含量与脲酶活性的相关关系(r)

Table 3 Correlation coefficients(r) among soil total N, NH₄⁺-N, NO₃⁻-N and urease activity

项目 Items	全氮含量 Total N	铵态氮含量 NH ₄ ⁺ -N	硝态氮含量 NO ₃ ⁻ -N	脲酶活性 Urease activity
全氮含量	1			
铵态氮含量	0.641**	1		
硝态氮含量	0.692**	0.698**	1	
脲酶活性	0.218	0.105	0.304	1

注:n=36;**P<0.01。

生物炭中含有的可利用碳源和肥料中的氮共同作用使微生物加快繁殖,从而提高酶活性。Paz-Ferreiro等^[33]也认为生物炭通过刺激微生物活性从而促进了酶活性,并强调生物炭除了提供能源物质外,其孔隙的保护作用也有利于微生物繁殖。然而Spokas等^[20]研究显示,生物炭中可利用碳含量较低,且在土壤中很快被微生物利用,对微生物的影响时间一般较短,本试验一次性施炭处理土壤中生物炭已经风化4年,所含有的易分解物质已被微生物利用,生物炭中大部分为稳定态的碳,所以过氧化氢酶和酸性磷酸酶活性与对照土壤无显著差异。而由于逐年加入新鲜生物炭带入活性物质,促使土壤磷酸酶活性显著提高。不过一些研究认为生物炭中活性物质不仅只含有促进微生物的成分,还可能含有抑制性物质,例如呋喃、酚类等^[34],这可能是脲酶和过氧化氢酶活性降低的原因,由此推断,新鲜生物炭中所含的活性物质是引起酶活性提高或降低的主要影响因素。此外,笔者推断施炭后土壤pH可能是影响酶活性的因素之一:由于生物炭老化,阳离子逐渐减少,其对土壤pH值提高效果逐渐降低(表4),同时由于生物炭土壤中的硝化作用提高,硝态氮显著积累,导致施炭处理土壤pH值低于对照,从而有助于酸性磷酸酶活性增强,而pH较高的土壤利于脲酶活性的发挥^[35],因此pH降低后脲酶活性受到抑制,但需要有更为详尽的试验来证明该过程的机理。

4 结论

(1)生物炭施加4年后,可以提高土壤全氮和物质氮含量。全氮较对照提高23.08%~52.25%,NH₄⁺-N增幅39.39%~85.76%,NO₃⁻-N含量为对照的1.80~2.46倍。可以有效补充减施40%化肥引起的土壤氮含量降低。

(2)生物炭对60%推荐施肥条件下的土壤全磷

表4 不同施炭处理土壤pH值

Table 4 Effect of biochar application on soil pH value

处理 Treatments	F1	F2	F3
CK	7.38±0.04b	7.77±0.04a	7.86±0.04a
B1	6.56±0.13c	6.70±0.04c	6.62±0.06c
B2	7.55±0.08a	7.57±0.08b	7.40±0.09b
B3	7.64±0.08a	7.61±0.06b	7.40±0.05b

和速效磷含量均具有提高作用,其中施加13 t·hm⁻²和26 t·hm⁻²生物炭可弥补减肥导致的全磷含量下降,但速效磷含量仍低于未减肥对照处理。

(3)生物炭对全钾含量没有显著影响,但可以提高速效钾含量18.99%~61.24%。

(4)土壤酶活性主要受生物炭在土壤中作用时间的影响,施用量对其影响不显著:逐年施加2.6 t·hm⁻²·a⁻¹生物炭显著提高了磷酸酶活性,但降低了脲酶和过氧化氢酶的活性,而一次性施炭可提高土壤脲酶活性。

参考文献:

[1] Anderson C R, Condron L M, Clough T J, et al. Biochar induced soil microbial community change: Implications for biogeochemical cycling of carbon, nitrogen and phosphorus[J]. *Pedobiologia*, 2011, 54: 309-320.

[2] 刘遵奇, 孟军, 陈温福. 玉米秸秆生物炭对尿素分解的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(6): 1142-1148.
LIU Zun-qi, MENG Jun, CHEN Wen-fu. Effect of corn stalk biochar on urea hydrolysis[J]. *Journal of Agro-Environmet Science*, 2015, 34(6): 1142-1148.

[3] Sun H J, Lu H Y, Lei C, et al. Biochar applied with appropriate rates can reduce N leaching, keep N retention and not increase NH₃ volatilization in a coastal saline soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 575: 820-825.

[4] Ding Y, Liu Y X, Wu W X, et al. Evaluation of biochar effects on nitrogen retention and leaching in multi-layered soil columns[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2010, 213: 47-55.

[5] Zheng H, Wang Z Y, Deng X, et al. Impacts of adding biochar on nitrogen retention and bioavailability in agricultural soil[J]. *Geoderma*, 2013, 206: 32-39.

[6] Ippolito J A, Novak J M, Busscher W J, et al. Switchgrass biochar affects two aridisols[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2012, 41: 1123-1130.

[7] Dempster D N, Jones D L, Murphy D V. Organic nitrogen mineralization in two contrasting agro-ecosystems is unchanged by biochar addition[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 48: 47-50.

[8] Nelissen V, Rütting T, Huygens D, et al. Temporal evolution of biochar's impact on soil nitrogen processes: A ¹⁵N tracing study[J]. *GCB Bioenergy*, 2014, 7: 635-645.

[9] Gao S, DeLuca T H, Cleveland C C. Biochar additions alter phosphorus and nitrogen availability in agricultural ecosystems: A meta-analysis

- [J]. *Science of The Total Environment*, 2019, 654:463-472.
- [10] 陈心想, 何绪生, 耿增超, 等. 施用生物炭后土壤生物活性与土壤肥力的关系[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(3):47-54.
CHEN Xin-xiang, HE Xu-sheng, GENG Zeng-chao, et al. Relationship between soil biological activities and soil fertility after biochar application[J]. *Agricultural Research in Arid Areas*, 2015, 33(3):47-54.
- [11] 程效义, 兰宇, 任晓峰, 等. 生物炭对连作设施土壤酶活性及黄瓜根系性状的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2017, 48(4):418-423.
CHENG Xiao-yi, LAN Yu, REN Xiao-feng, et al. Effect of biochar on enzymatic activities and root characteristics of cucumber in continuous cropping soil of greenhouse[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2017, 48(4):418-423.
- [12] Demisie W, Liu Z, Zhang M. Effect of biochar on carbon fractions and enzyme activity of red soil[J]. *Catena*, 2014, 121(5):214-221.
- [13] Nelissen V, Rütting T, Huygens D, et al. Maize biochar accelerate short-term soil nitrogen dynamics in a loamy sand soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 55:20-27.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 三版. 北京: 中国农业出版社, 2010.
BAO Shi-dan. Soil agro-chemistry analysis[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agricultural Press, 2010.
- [15] 全国农业技术推广服务中心. 土壤分析技术规范[M]. 二版. 北京: 中国农业出版社, 2006.
National Agricultural Technology Extension Service Center. Specification for soil analysis techniques[M]. 2nd Edition. Beijing: China Agricultural Press, 2006.
- [16] 林先贵. 土壤微生物研究原理与方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010:251-253.
LIN Xian-gui. Principles and methods of soil microbiology research [M]. Beijing: High Education Press, 2010:251-253.
- [17] Peiris C, Gunatilake S R, Wewalwela J J, et al. Biochar for sustainable agriculture: Nutrient dynamics, soil enzymes, and crop growth[M]// Ok Y S, Daniel C W, Bolan T N, et al. Biochar from biomass and waste. Amsterdam; Elsevier, 2019:211-224.
- [18] Nguyen T T N, Xu C Y, Tahmasbian I, et al. Effects of biochar on soil available inorganic nitrogen: A review and meta-analysis[J]. *Geoderma*, 2017, 288:79-96.
- [19] Laird D, Fleming P, Wang B, et al. Biochar impact on nutrient leaching from a midwestern agricultural soil[J]. *Geoderma*, 2010, 158(3/4):436-442.
- [20] Spokas K A, Cantrell K B, Novak J, et al. Biochar: A synthesis of its agronomic impact beyond carbon sequestration[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2012, 41:973-989
- [21] 李玥, 余亚琳, 张欣, 等. 连续施用炭基肥及生物炭对棕壤有机氮组分的影响[J]. 生态学杂志, 2017, 67(10):2903-2909.
LI Yue, YU Ya-lin, ZHANG Xin, et al. Effect of continuous application of biochar-based fertilizer and biochar on organic nitrogen fraction in brown soil[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 67(10):2903-2909.
- [22] Reverchon F, Flicker R C, Yang H, et al. Changes in $\delta^{15}\text{N}$ in a soil-plant system under different biochar feedstocks and application rates [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2014, 50:275-283.
- [23] 刘玉学, 唐旭, 杨生茂, 等. 生物炭对土壤磷素转化的影响及其机理研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(6):1690-1695.
LIU Yu-xue, TANG Xu, YANG Sheng-mao, et al. Review on the effect of biochar on soil phosphorus transformation and mechanisms[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(6):1690-1695.
- [24] Mendoza R E, Canduci A, Aprile C. Phosphorus release from fertilized soils and its effect on the changes of phosphate concentration in soil solution[J]. *Fertilizer Research*, 1990, 23:165-172.
- [25] Xu G, Sun J N, Shao H B, et al. Biochar had effects on phosphorus sorption and desorption in three soils with differing acidity[J]. *Ecological Engineering*, 2014, 62(1):54-60.
- [26] Gao S, DeLuca T H. Wood biochar impacts soil phosphorus dynamics and microbial communities in organically-managed croplands[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 126:144-150.
- [27] DeLuca T H, MacKenzie M D, Gundale M J. Biochar effects on soil nutrient transformations[M]//Lehmann J, Joseph S. Biochar for environmental management: Science, technology and implementation. 2nd edition. London: Earthscan Publishers, 2015:421-454.
- [28] 徐刚, 张友, 武玉, 等. 生物炭对土壤中氮磷有效性影响的研究进展[J]. 中国科学: 生命科学, 2016, 46(9):1085-1090.
XU Gang, ZHANG You, WU Yu, et al. Effects of biochar application on nitrogen and phosphorus availability in soils: A review[J]. *Scientia Sinica*, 2016, 46(9):1085-1090.
- [29] Lehmann J, Jr J P D S, Steiner C, et al. Nutrient availability and leaching in an archaeological anthrosol and a ferralsol of the central amazon basin: Fertilizer, manure and charcoal amendments[J]. *Plant and Soil*, 2003, 249(2):343-357.
- [30] Zhao X, Wang J W, Xu H J, et al. Effects of crop-straw biochar on crop growth and soil fertility over a wheat-millet rotation in soils of China[J]. *Soil Use and Management*, 2015, 30(3):311-319.
- [31] 聂新星, 陈防. 生物炭对土壤钾素生物有效性影响的研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2016(2):1-6.
NIE Xin-xing, CHEN Fang. Advances of the effects of biochar application on soil potassium bioavailability[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2016(2):1-6.
- [32] 孟繁昊, 高聚林, 于晓芳, 等. 生物炭配施氮肥改善表层土壤生物化学性状研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(5):1214-1226.
MENG Fan-hao, GAO Ju-lin, YU Xiao-fang, et al. Improvement of biochemical property of surface soil by combined application of biochar with nitrogen fertilizer[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(5):1214-1226.
- [33] Paz-Ferreiro J, Fu S L, Méndez A, et al. Interactive effects of biochar and the earthworm *Pontoscolex corethrurus*, on plant productivity and soil enzyme activities[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2014, 14(3):483-494.
- [34] Zimmerman A R, Gao B, Ahn M Y. Positive and negative carbon mineralization priming effects among a variety of biochar-amended soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(6):1169-1179.
- [35] Dharmakeerthi R S, Thenabadu M W. Urease activity in soils: A review[J]. *Journal of the National Science Foundation of Sri Lanka*, 2013, 24(3):159-195.