

张莉, 任建新, 韩国君, 等. 尿素混合生物质炭穴施对土壤氮含量及酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(9): 1974–1982.
ZHANG Li, REN Jian-xin, HAN Guo-jun, et al. Effects of hole application of urea mixed with biochar on nitrogen content and enzyme activity[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(9): 1974–1982.



开放科学 OSID

尿素混合生物质炭穴施对土壤氮含量及酶活性的影响

张莉, 任建新, 韩国君*, 马乐元, 孙小妹

(甘肃农业大学资源与环境学院, 兰州 730070)

摘要:为研究尿素与生物质炭混合穴施条件下, 生物质炭对土壤氮素转化及土壤酶活性的影响, 设单施尿素(N_{120} 、 N_{180} 、 N_{240})、尿素混合生物质炭穴施($N_{120}B$ 、 $N_{180}B$ 、 $N_{240}B$)处理, 施氮量分别为 $240\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (N_{240})、 $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (N_{180})、 $120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (N_{120}) 和不施氮(CK), 生物质炭施用量为 $10\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。测定土壤硝态氮、铵态氮、无机氮和碱解氮的含量, 以及土壤脲酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶的活性。研究表明, 第5 d 尿素穴施处理的土壤铵态氮、硝态氮、无机氮和碱解氮含量分别是尿素混合生物质炭穴施处理的4.5~8.2、2.0~3.0、2.55~5.81、3.13~4.46倍, 第10 d 尿素穴施处理的土壤铵态氮、硝态氮、无机氮和碱解氮含量分别是尿素混合生物质炭穴施处理的24.5~58.9、1.21~1.37、2.99~3.82、1.34~1.48倍, 第15 d 各处理间土壤氮含量差异不显著。第5 d 和第10 d, 尿素混合生物质炭穴施处理的土壤脲酶活性均显著高于尿素穴施处理, 但在第15 d 后处理间无显著差异, 第5 d 尿素混合生物质炭穴施处理的土壤脲酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶活性分别是尿素穴施处理的1.80~2.55、1.07~1.77、1.18~1.22倍, 第10 d 尿素混合生物质炭穴施处理的土壤蔗糖酶活性最高, $N_{240}B$ 处理的土壤碱性磷酸酶活性最高, 混合生物质炭处理的蔗糖酶活性是单施尿素处理的2.35~2.37倍。因此, 生物质炭促进土壤脲酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶活性, 吸附土壤中的 NH_4^+ 和 NO_3^- , 赋予土壤氮素缓慢释放特性, 尿素混合生物质炭穴施可以促进土壤酶活性, 有效降低土壤有效氮素流失的风险。

关键词:减量施氮; 生物质炭; 土壤有效氮; 土壤酶

中图分类号: S153.6; S154.2 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2020)09-1974-09 doi:10.11654/jaes.2020-0135

Effects of hole application of urea mixed with biochar on nitrogen content and enzyme activity

ZHANG Li, REN Jian-xin, HAN Guo-jun*, MA Le-yuan, SUN Xiao-mei

(College of Resources and Environment, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Biochar is widely recognized as an excellent soil ameliorant as it improves soil properties and protects the soil environment. In this study, potted experiments were conducted to investigate the effects of corn straw biochar on soil enzyme activities and soil nitrogen when urea was mixed with biochar in a hole application. In total, seven treatments were tested, including conventional urea treatment (N_{120} , N_{180} , and N_{240}) and combined hole application of biochar and urea ($N_{120}B$, $N_{180}B$, and $N_{240}B$). The amounts of applied nitrogen were 240, 180, and $120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ for N_{240} , N_{180} , and N_{120} , respectively, and $10\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ each for the control treatment and urea mixed with biochar in the hole application. Soil nitrogen (nitrate, ammonium nitrogen, inorganic nitrogen, and available nitrogen) and soil enzymes (urease, sucrase, and alkaline phosphatase) were measured. The results demonstrated that the contents of ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, inorganic nitrogen, and available nitrogen in soil after a single application of the urea treatments were 4.5~8.2, 2.0~3.0, 2.55~5.81, and 3.13~4.46 times those of the mixed urea and biochar treatment on the 5th day. The corresponding contents were 24.5~58.9, 1.21~1.37, 2.99~3.82, and 1.34~1.48 times those of the urea and mixed biochar treatments on the 10th day. No significant difference was observed between the soil

收稿日期: 2020-02-08 录用日期: 2020-06-03

作者简介: 张莉(1995—), 女, 甘肃天水人, 硕士研究生, 研究方向为农业资源利用。E-mail: 843858361@qq.com

*通信作者: 韩国君 E-mail: hangj@gsau.edu.cn

基金项目: 甘肃农业大学科技创新基金(GAUXKJS-2018209); 国家自然科学基金项目(31960631)

Project supported: Science and Technology Innovation Fund of Gansu Agricultural University (GAUXKJS-2018209); The National Natural Science Foundation of China(31960631)

nitrogen contents of the treatments on the 15th day. On the 5th and 10th days, the activity of urease in the soil subjected to the urea mixed biochar treatment was significantly higher than that in the soil subjected to the urea treatments, but no significant difference was observed between the soil enzyme contents of the treatments on the 15th day. The activities of urease, sucrase, and alkaline phosphatase in the soil subjected to the mixed urea and biochar treatment were 1.80~2.55, 1.07~1.77, and 1.18~1.22 times of those in the soil that underwent single urea treatments on the 5th day. The activity of sucrase in the soil with the mixed urea and biochar N₁₈₀B treatment was the highest on the 10th day, while the activity of alkaline phosphatase was the highest for the N₂₄₀B treatment, and the activity of sucrase in the soil with the mixed urea and biochar treatments was 2.35~2.37 times of that of the soil subjected to the single urea treatments. Biochar application significantly enhanced the soil urease, sucrase, and alkaline phosphatase activities. Biochar adsorbed NH₄⁺ and NO₃⁻ from the soil and endowed it with release characteristics, while the hole application of urea mixed with biochar promoted the soil enzyme activities and reduced the risk of effective nitrogen loss from the soil.

Keywords: reduced nitrogen application; biochar; soil available nitrogen; soil enzymes

随着农田土壤提质增效及固碳减排的需求日趋增加,亟需采取有效措施提升土壤肥力和固碳能力,提高农田可持续发展^[1]。生物质炭(Biochar)碳含量高,可在土壤中稳定储存数百年。如果所有燃烧的秸秆都转化为生物炭,碳排放可以减少近一半^[2]。因此,生物质炭固碳技术是一种非常有前途的碳减排技术。作物增产最有效的途径是施肥,全世界作物产量增加的一半是来自施用的化肥。施肥是农田作物增产最传统、最有效的途径,研究表明我国化肥对粮食产量的贡献率为40.8%,全世界约有50%的农田作物增产依靠化肥的施用,化肥施用在粮食生产中发挥着重要的作用^[3-4]。然而,我国农业生产中平均施氮量为360 kg·hm⁻²,远高于世界平均水平120 kg·hm⁻²,为美国2.6倍,欧盟2.5倍^[5]。生物质炭具有的吸附性,能够赋予肥料养分缓释性能,从而与肥料形成协同互补的关系^[6]。生物质炭与肥料混合施用对作物的生长和产量可产生积极的影响。研究显示,土壤中施入生物质炭后,微生物的反硝化作用会受到抑制并降低氮氧化物的排放^[7]。在同一氮肥条件下,玉米季和小麦季中生物质炭还田处理分别比秸秆直接还田处理的N₂O排放通量降低了26%~51%和4%~27%^[8]。生物质炭本身偏碱性,碱性物质的增加能够提高N₂O还原酶活性,从而减少氮排放,其多孔隙结构和较大比表面积可改善土壤通气性,增加对土壤NH₄⁺-N、NO₃⁻-N的吸附固持,减少N₂O的排放。土壤和生物质炭对NH₄⁺有吸附作用,而土壤有效氮以NO₃⁻-N为主。Doydora等^[9]研究发现,生物质炭与粪肥混合施入土壤,可使NH₃损失量降低50%以上,提高氮肥利用率。但Yao等^[10]研究表明,生物质炭能吸附土壤中的NH₄⁺-N和NO₃⁻-N,但其对NO₃⁻-N的吸附作用较弱。施用玉米秸秆生物质炭的黑土对NH₄⁺-N的吸附量最

大,添加生物质炭量达3.6%时,土壤NH₄⁺-N淋失量最低^[11]。土柱模拟淋溶试验表明,当生物质炭质量分数为2%以上时,总氮和NH₄⁺的淋洗显著降低,而当生物质炭质量分数为4%以上时,NO₃⁻淋洗显著降低^[12]。较多生物质炭(>4%)的施用会使土壤碳氮比增加,降低土壤养分的有效性^[13]。因此,生物质炭等有机物料与氮肥的混合施用会影响土壤有效氮含量,且生物质炭施用量要在一个适合的范围内才能提高土壤肥力、土壤质量和氮素利用率。生物质炭的施用还能增加土壤速效磷、速效钾和有效氮含量,提高土壤保肥能力,改善土壤的理化性质和植物的生长环境^[14]。吴嘉楠等^[15]研究发现,生物质炭与氮肥配施能够显著增加土壤中¹⁵N残留量,提高土壤有效氮和微生物量碳氮的含量。这与生物质炭能够改善土壤通气性、改变作物生长环境有关。生物质炭还可以减少氮素向深层土壤的淋洗,从而减少氮素损失以及过量施肥对环境造成的负面影响。作物收获后,生物质炭吸附的氮素保留在土壤中,有很强的后效作用^[16-17]。生物质炭可提供给肥料养分的缓释载体,达到保肥的效果并提高氮肥利用率。

土壤酶是土壤中最重要活性成分之一,参与土壤中的各种生化过程。土壤酶活性代表了土壤中各种生化过程的强度和方向。生物质炭和氮肥混合施用能不同程度地提高土壤酶活性。研究表明,添加生物炭能显著提高土壤中转化酶和脲酶的活性^[18]。生物质炭和氮肥配施降低了土壤微生物碳氮比,提高土壤氮素的生物活性^[19],大豆秸秆还田能提高土壤蔗糖酶、过氧化氢酶、脲酶的活性^[18]。尿素配施生物质炭氮素利用率较单施尿素提高了21%~42%。添加生物质炭提高了土壤脲酶活性,但抑制了过氧化氢酶和碱性磷酸酶的活性^[20]。在陇中黄土高原干旱雨养农业

区,一次性施入土壤 $15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 生物质炭,生物质炭配施氮肥显著提高了小麦籽粒和茎秆碳和磷含量,降低了碳氮比、氮磷比^[21]。添加生物炭影响土壤氮素矿化和土壤酶活性,但研究结果各不同。近年来,生物质炭与肥料复合成的新型生物质炭肥已成为诸多领域关注的焦点和热点,并广泛应用于土壤改良培肥、农业生产应用、废弃物生物质利用以及环境治理等领域^[22-23]。生物质炭对土壤有效氮含量及微生物活动的变化趋势尚未有统一结论,受土壤类型和气候变化等条件的制约,基于上述原因,本试验探讨了尿素混合生物质炭施入偏碱性灌淤土后对土壤氮含量和土壤酶活性的影响,以期降低氮肥施用量、提高该土壤类型地区氮素肥力提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验处理

以玉米秸秆生物质炭为原料,施用量为 $10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。尿素(含N 46%)施用量以纯氮计为:240、180、120 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (表1)。将尿素与生物质炭充分搅拌混合后,穴施至土壤10~15 cm深度。土壤相对含水量保持在田间持水量的70%~80%。设置处理为:常量施肥(N_{240})、减量施肥(N_{180})、减量施肥(N_{120})、常量施肥+生物质炭(N_{240}B)、减量施肥+生物质炭(N_{180}B)、减量施肥+生物质炭(N_{120}B)和不施肥处理(CK)7个处理。每个处理4次重复。

表1 不同处理氮肥和生物质炭用量

Table 1 The amount of nitrogen fertilizer and biochar used in different treatments

处理Treatments	CK	N_{120}	N_{180}	N_{240}	N_{120}B	N_{180}B	N_{240}B
氮肥用量/ $(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$	0	120	180	240	120	180	240
生物质炭用量/ $(\text{t} \cdot \text{hm}^{-2})$	0	0	0	0	10	10	10

1.2 取样方式

供试土壤采自中国科学院沙坡头沙漠研究试验站试验田,土壤类型为灌淤土。采集耕作层0~20 cm的土壤,置于阴凉自然风干,去除肉眼可见的细根和石块后研磨过2 mm筛保存备用。供试土壤有机质含量为 $17.89 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮含量为 $1.12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾为 $156 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷为 $45.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤pH为8.02。

供试生物质炭来源于金和福农业科技股份有限公司,为玉米秸秆在 $500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温裂解产生的生物质炭,pH为6.7,比表面积为 $300 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$,灰分含量为35.64%,碳含量为53.28%,氮素含量为1.04%。

进行盆栽控制性试验,每盆装土5 kg。施肥前采集基础土样,分析其理化性质。分别于2019年6月29日(第5 d取样)、2019年7月4日(第10 d取样)和2019年7月9日(第15 d取样)采集0~20 cm土样,取样时避开生物质炭。土样采集完成后先过2 mm筛,一部分土样进行 $4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷藏保鲜,用于 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 及酶(土壤脲酶、土壤蔗糖酶和土壤碱性磷酸酶)活性测定;一部分风干后磨细过筛测定土壤全氮和土壤碱解氮含量。

1.3 测定方法

土壤 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量用 $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KCl 浸提-靛酚蓝比色法测定。土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量用紫外双波段比色法紫外分光光度法测定。土壤碱解氮含量用碱解扩散法测定。

土壤脲酶活性用靛酚蓝比色法测定,酶活性以24 h后1 g土壤中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的质量表示;土壤蔗糖酶活性用3,5-二硝基水杨酸比色法测定,酶活性以24 h后1 g土壤生成葡萄糖毫克数表示;土壤磷酸酶活性用磷酸苯二钠比色法测定,酶活性以24 h后1 g土壤中释放出的酚的毫克数表示。

1.4 数据分析

用SPSS 20.0进行ANOVA单因素方差分析,用Duncan's新复极差法多重比较处理之间的显著性($P < 0.05$)和交互作用分析。用Origin 9.1进行作图。

2 结果与分析

2.1 尿素混合生物质炭穴施对土壤有效氮的影响

2.1.1 对土壤 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的影响

由图1可以看出,单施尿素 N_{120} 、 N_{180} 、 N_{240} 处理的土壤 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量显著高于尿素混合生物质炭 N_{120}B 、 N_{180}B 、 N_{240}B 处理,不同施氮水平下的土壤 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量无显著差异。第5 d单施尿素处理的土壤 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量是混合生物质炭处理的4.50~8.20倍,尿素混合生物质炭 N_{120}B 、 N_{180}B 、 N_{240}B 处理的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量与CK无显著差异;第10 d单施尿素处理的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量是尿素混合生物质炭处理的24.5~58.9倍,差异极显著,CK处理与尿素混合生物质炭处理间的土壤 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量差异不显著;第15 d单施尿素处理的土壤 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量是尿素添加生物质炭处理的1.94~2.96倍。

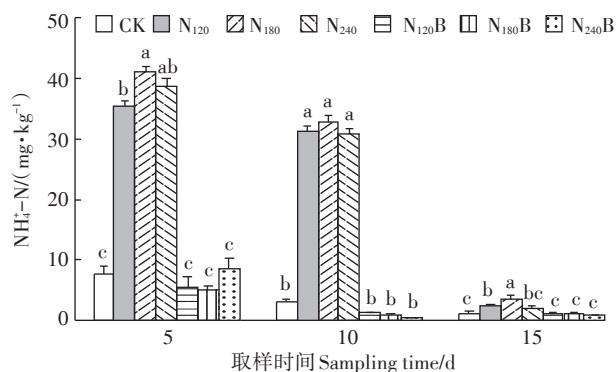
2.1.2 对土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的影响

由图2可以看出,土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的变化趋势与土壤 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的变化趋势相反,单施尿素处理和尿素混合生物质炭处理的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量均高于CK。各施氮量处理的

土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量无显著差异,但不同氮素水平与生物质炭的混合穴施能够增加土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量。第5 d 单施尿素 N_{120} 、 N_{180} 、 N_{240} 处理的土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量是尿素混合生物质炭处理的2.0~3.0倍,差异显著,尿素添加生物质炭 N_{120}B 、 N_{180}B 、 N_{240}B 处理的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量分别是CK的1.85、1.35、1.82倍;第10 d 单施尿素处理的土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量分别是生物质炭混合尿素处理的1.23、1.37、1.21倍,差异不显著,尿素混合生物质炭处理的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量是CK的3.09~3.34倍;第15 d 各处理的土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量均达最高,添加生物质炭 N_{120}B 、 N_{180}B 、 N_{240}B 处理的土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量是CK的1.73~1.80倍,单施尿素处理与添加生物质炭处理的土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量几乎无差异。

2.1.3 对土壤无机氮的影响

由图3可以看出,单施氮肥 N_{120} 、 N_{180} 、 N_{240} 处理与



不同小写字母代表相同取样时间不同处理间差异显著。下同
Different lowercase letters indicate significant differences among treatments at the same sampling time. The same below

图1 不同施肥处理对土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的影响

Figure 1 Effects of different fertilization treatments on soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$ content

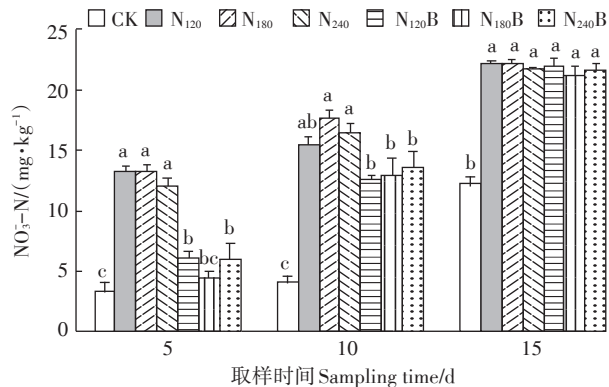


图2 不同施肥处理对土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的影响

Figure 2 Effects of different fertilization treatments on soil $\text{NO}_3\text{-N}$ content

尿素添加生物质炭 N_{120}B 、 N_{180}B 、 N_{240}B 处理间土壤无机氮含量的差异显著。第5 d,单施氮肥 N_{120} 、 N_{180} 、 N_{240} 处理的无机氮含量是尿素混合生物质炭 N_{120}B 、 N_{180}B 、 N_{240}B 处理的2.55~5.81倍,尿素混合生物质炭穴施处理的土壤无机氮含量与对照无显著差异;第10 d,单施氮肥处理的无机氮含量是尿素混合生物质炭处理的2.99~3.82倍,添加生物质炭 N_{120}B 、 N_{180}B 、 N_{240}B 处理的土壤无机氮含量分别是CK的2.18、1.97、1.96倍,生物质炭的施入增加了土壤无机氮含量;第15 d,单施氮肥处理与尿素添加生物质炭处理的土壤无机氮含量均有所降低,但差异不显著。

2.1.4 对土壤碱解氮的影响

由图4可知,单施尿素 N_{120} 、 N_{180} 、 N_{240} 处理的土壤碱解氮含量均显著高于尿素混合生物质炭 N_{120}B 、 N_{180}B 、 N_{240}B 处理。第5 d 单施尿素 N_{120} 、 N_{180} 、 N_{240} 处理

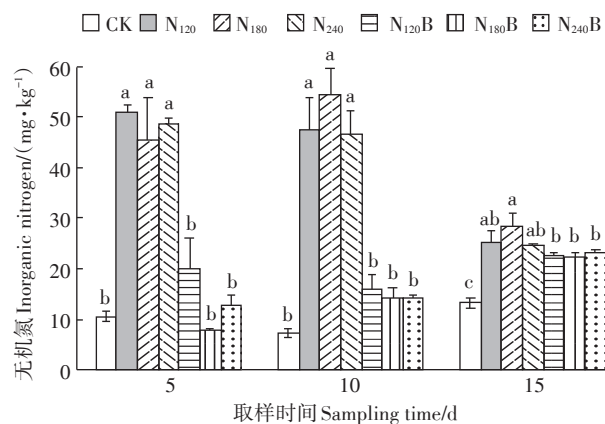


图3 不同施肥处理对土壤无机氮的影响

Figure 3 Effects of different fertilization treatments on soil inorganic nitrogen content

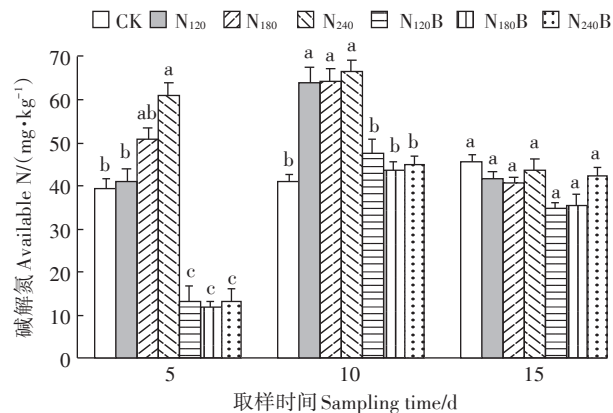


图4 不同施肥处理对碱解氮的影响

Figure 4 Effects of different fertilization treatments on soil available N content

的碱解氮含量分别是尿素混合生物质炭 $N_{120}B$ 、 $N_{180}B$ 、 $N_{240}B$ 处理的 3.13、4.26、4.46 倍,而尿素混合生物质炭穴施 $N_{120}B$ 、 $N_{180}B$ 、 $N_{240}B$ 处理的碱解氮含量分别比 CK 低 66.74%、69.85%、72.23%,造成此结果的原因可能是生物质炭穴施入土壤,能够吸附土壤中 NH_4^+ ,减缓氨化和硝化过程,使得土壤的碱解氮含量较 CK 和单施尿素处理低;第 10 d 各处理的碱解氮含量均达到最高值,其中, N_{240} 处理的碱解氮含量达最高 $66.60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,此时,尿素混合生物质炭穴施 $N_{120}B$ 、 $N_{180}B$ 、 $N_{240}B$ 处理的土壤碱解氮含量分别比单施尿素 N_{120} 、 N_{180} 、 N_{240} 处理低 25.55%、32.15%、32.47%,与对照无显著差异;第 15 d 各处理土壤碱解氮含量无显著差异。

2.2 尿素混合生物质炭穴施对土壤酶的影响

2.2.1 对土壤脲酶的影响

由图 5 可以看出,尿素混合生物质炭处理的土壤脲酶活性高于单施尿素处理,第 5 d 尿素混合生物质炭 $N_{240}B$ 处理的脲酶活性达最高 $4.92 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,尿素混合生物质炭 $N_{120}B$ 、 $N_{180}B$ 、 $N_{240}B$ 处理的脲酶活性分别是单施尿素 N_{120} 、 N_{180} 、 N_{240} 处理的 1.80~2.55 倍,是对照处理的 3.94~8.66 倍;第 10 d 尿素添加生物质炭 $N_{120}B$ 、 $N_{180}B$ 、 $N_{240}B$ 处理的土壤脲酶活性是单施尿素 N_{120} 、 N_{180} 、 N_{240} 处理的脲酶活性的 1.33~2.55 倍;第 15 d 各处理土壤脲酶活性几乎无差异。

2.2.2 对土壤蔗糖酶的影响

由图 6 可以看出,土壤蔗糖酶的活性随时间呈先增加后减少的趋势,尿素混合生物质炭 $N_{120}B$ 、 $N_{180}B$ 、 $N_{240}B$ 处理能够增强土壤蔗糖酶活性。第 5 d 添加生物质炭处理的土壤蔗糖酶活性是单施尿素处理的 1.07~1.77 倍,与对照无显著差异;第 10 d 尿素混合生物质炭 $N_{120}B$ 、 $N_{180}B$ 、 $N_{240}B$ 处理的土壤蔗糖酶活性是单施尿素 N_{120} 、 N_{180} 、 N_{240} 处理的 2.35~2.37 倍,差异极显

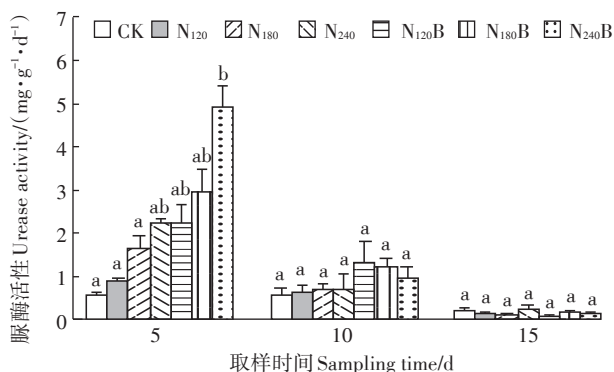


图 5 不同施肥处理对土壤脲酶的影响

Figure 5 Effects of different fertilization treatments on soil urease activity

著,其中, $N_{180}B$ 处理的蔗糖酶活性达最高 $16.06 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;第 15 d 各处理土壤蔗糖酶活性几乎无差异。

2.2.3 对土壤碱性磷酸酶的影响

由图 7 可以看出,土壤碱性磷酸酶的活性随时间呈先增加后减少的趋势,尿素混合生物质炭 $N_{120}B$ 、 $N_{180}B$ 、 $N_{240}B$ 处理的土壤碱性磷酸酶活性稍高于单施尿素 N_{120} 、 N_{180} 、 N_{240} 处理,但整体无显著差异。第 5 d,尿素添加生物质炭 $N_{120}B$ 、 $N_{180}B$ 、 $N_{240}B$ 处理的土壤碱性磷酸酶活性分别是单施尿素 N_{120} 、 N_{180} 、 N_{240} 处理的 1.18、1.22、1.19 倍;第 10 d 尿素添加生物质炭处理的土壤磷酸酶含量与对照处理的差异不显著,约为单施尿素处理的 1.03 倍;第 15 d 各处理间土壤碱性磷酸酶活性差异不显著。

3 讨论

3.1 添加生物质炭对土壤有效氮的影响

生物质炭能够通过阳离子交换吸附土壤中的

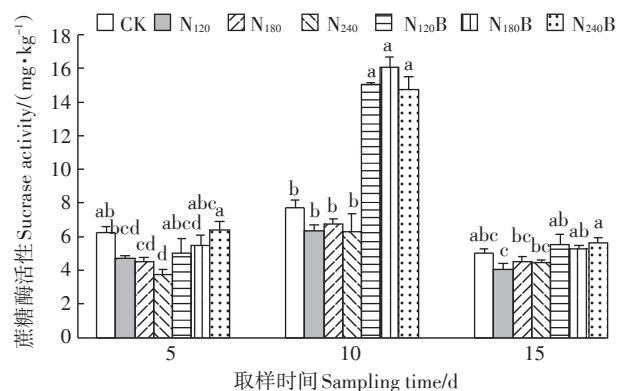


图 6 不同施肥处理对土壤蔗糖酶的影响

Figure 6 Effects of different fertilization treatments on soil sucrase activity

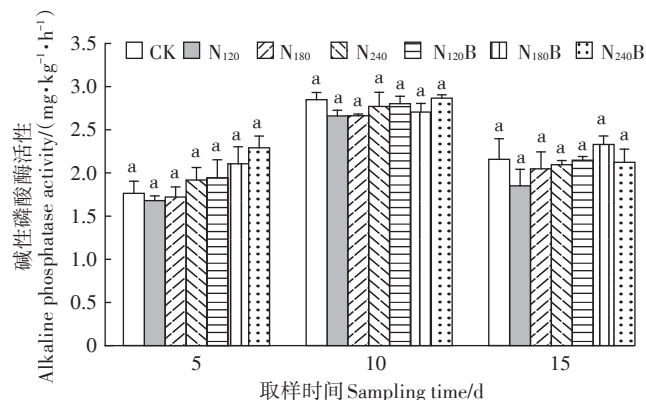


图 7 不同施肥处理对土壤碱性磷酸酶的影响

Figure 7 Effects of different fertilization treatments on soil alkaline phosphatase activity

NO_3^- 和 NH_4^+ ,从而显著增加土壤有效氮的含量^[24]。研究表明,添加生物质炭的土壤,土壤 NH_4^+-N 质量分数很低,而 $\text{NO}_3^- -\text{N}$ 质量分数相对较高^[25]。将生物质炭加入到pH 7.6的碱性土壤中培养,得出生物质炭可使土壤 NH_4^+-N 含量大幅降低,而硝态氮含量升高^[26]。旱地土壤通气性好, NH_4^+ 很快通过硝化作用转化为 NO_3^- ^[27]。本研究结果显示,不同施氮量下的土壤 NH_4^+-N 含量随时间逐渐降低,施氮量的多少对土壤 $\text{NO}_3^- -\text{N}$ 和土壤 NH_4^+-N 影响不显著,但生物质炭和尿素的混合穴施显著降低了土壤的 NH_4^+-N 含量,增加了 $\text{NO}_3^- -\text{N}$ 含量。生物质炭的多孔隙结构能够改善土壤的通气性,吸附土壤中的 NH_4^+ ,生物质炭对 NH_4^+ 吸附,降低 NH_4^+-N 含量,促进硝化作用的进行,使其他形式的 NH_4^+ 能够快速转化为 NO_3^- ^[27];生物质炭本身含高碳、氮,作为碳源和氮源可为微生物的生长和繁殖提供能量,因此,加入生物质炭的土壤中,硝化细菌获得了基质而得以快速繁殖,微生物活性增强,从而加快硝化作用, NO_3^- 含量也相应提高^[28],土壤微生物对外源碳、氮产生不同的响应,利用情况各不相同,且不同类型土壤本身可供微生物利用的碳氮源种类和数量不同,造成不同土壤对氮素转化过程产生不同影响。施氮量对土壤无机氮含量的影响不明显,生物质炭可降低土壤无机氮含量,但生物质炭对 NH_4^+ 较强的吸附固持作用可减缓氨挥发过程以及减少无机氮的吸附固定,从而满足了后期对氮素的需求^[16,29]。土壤碱解氮也称有效氮,是 NH_4^+-N 、 $\text{NO}_3^- -\text{N}$ 、氨基酸、酰胺和易水解蛋白质的总和,碱解氮是衡量土壤供氮能力的指标之一。研究表明,生物质炭的施用能够提高土壤碱解氮含量,提高土壤肥力^[14-15]。土壤有效氮含量受土壤类型、土壤基础肥沃度、肥料施用量、温度水分等条件的影响,因此研究结果各不相同。本试验结果显示:第5 d和第10 d,单施尿素处理的土壤碱解氮含量是尿素添加生物质炭处理的3.13~4.46、1.34~1.48倍,生物质炭的添加会降低土壤碱解氮含量,至第15 d取样,单施氮肥处理的土壤碱解氮含量与添加生物质炭处理的碱解氮含量几乎无差异。产生此结果的原因可能是:施入生物质炭初期,生物质炭通过阳离子交换作用吸附 NH_4^+ 、 NO_3^- ,从而使有机氮含量增加,但随着时间的推移,土壤中加入生物质炭后,改变了原有的碳、氮库,土壤碳氮比的提高反而降低了土壤中微生物对有机氮的矿化速率,减少土壤有效氮含量。

3.2 添加生物质炭对土壤酶活性的影响

土壤酶代表土壤中生物化学反应活跃程度,其活

性的高低体现了土壤中物质代谢的旺盛程度,是表征土壤质量的重要指标^[30]。研究表明,施用生物质炭可以提高土壤蔗糖酶活性,降低碱性磷酸酶活性^[18,20]。秸秆还田能够提高土壤酶活性,土壤中蔗糖酶活性与不还田处理相比明显提高,是一种有效促进土壤中氮素养分的途径^[31]。徐福利等^[32]研究表明,适量施氮能够增强微生物活性和土壤脲酶活性,一旦超过氮肥用量的最大范围,脲酶活性将会降低。顾美英等^[33]研究表明,土壤蔗糖酶活性随生物质炭施用量的增加呈先增加后减少的趋势,碱性磷酸酶则呈先减少后增加再减少的趋势。本试验研究结果显示:施氮量对土壤酶活性的影响不大,但添加生物质炭后第5 d和第10 d,土壤脲酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶活性均比单施氮肥处理高,第15 d,各处理间土壤酶活性差异不明显。尿素混合生物质炭穴施处理显著增强土壤酶活性。这与张志龙等^[34]的研究结果一致。本试验研究发现,第5 d,生物质炭的添加降低了土壤 NH_4^+-N 和 $\text{NO}_3^- -\text{N}$ 含量,但提高了土壤脲酶活性,造成该现象的可能原因有:一是生物质炭的添加减缓了土壤氨化和硝化过程,但因其本身作为碳、氮源,能够为土壤微生物提供基质以供其快速繁殖,增强土壤微生物活动,提高土壤酶活性^[28],二是生物质炭的保肥作用有利于氮素的保存,会使土壤固定态 NH_4^+ 含量增加,固定态 NH_4^+ 是土壤有效氮的潜在“氮库”,间接增强土壤脲酶活性,而土壤脲酶增加的同时也会造成氮素以 NH_4^+ 或其他形式损失^[35],该现象还需进一步研究探讨。生物质炭与土壤酶活性,尤其是与土壤脲酶之间的作用比较复杂,一方面生物质炭能够吸附酶促反应的结合位点,从而提高土壤酶活性,另一方面生物质炭的缓释特性对酶促反应的结合位点形成一层保护膜,同时其吸附特性吸附固持酶分子,从而阻止了酶促反应的进行。因此,生物质炭施用对土壤酶活性的影响结果各不相同。

3.3 无机氮与酶活性之间的关系

施入土壤的无机氮和有机氮在微生物和土壤酶的作用下经过一系列生物化学过程,调控土壤的养分供应情况,李涛等^[36]研究表明,有机物料与施氮量的不同可引起土壤无机氮含量的变化,进而影响土壤酶活性的高低,秸秆还田施氮带来的无机氮含量的升高可能导致脲酶活性降低。本试验结果表明,第5 d和第10 d,单施氮肥 N_{120} 、 N_{180} 、 N_{240} 处理的无机氮含量分别是尿素混合生物质炭 N_{120}B 、 N_{180}B 、 N_{240}B 处理的2.55~5.81、2.99~3.82倍,第15 d,各处理的无机氮含

量均降低,且差异不显著。生物质炭的添加显著增强土壤脲酶活性,第15 d取样时,尿素混合生物质炭处理的土壤脲酶活性与单施尿素处理差异性不显著,造成该结果的原因可能有:一是低碳氮比有利于土壤氮素的供给,而玉米秸秆生物质炭的碳氮比较高,需要补充氮肥来减缓氮素固持作用,本试验中的氮肥为一次性施入,故单施尿素处理的无机氮含量远高于尿素添加生物质炭处理,生物质炭的添加为微生物提供了碳氮源和能源,其本身的高碳氮比使得氮素的供应紧张,从而降低了土壤脲酶活性。二是尿素前期释放较快,生物质炭释放较慢,尿素与生物质炭配施使氮素供应充足,土壤微生物活跃,脲酶活性高,土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 迅速转化为 $\text{NO}_3^+\text{-N}$,而后期尿素含量降低,容易脱靶,氮素供给主要依靠生物质炭提供的碳氮源,生物质炭的缓释特性能够延迟尿素的水解过程和氨化过程,土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和无机氮含量减少,导致脲酶活性降低^[37]。

4 结论

(1)取样第5 d和第10 d,尿素混合生物质炭穴施处理的土壤有效氮含量均小于单施尿素处理,但到第15 d,各处理间土壤氮含量差异不显著。这表明,生物质炭能够吸附土壤中的 NH_4^+ ,赋予土壤速效养分缓慢释放性能,降低土壤有效氮含量,减少土壤氮素流失以提高氮素利用效率。

(2)第5 d和第10 d,尿素混合生物质炭穴施处理的土壤酶活性均显著高于尿素穴施处理,第15 d,各处理间土壤酶均无显著差异。生物质炭与尿素的混合穴施能够促进土壤脲酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶活性,生物质炭对 NH_4^+ 的吸附和缓释特性使其与尿素混合穴施时,延缓尿素的水解和氨化过程,促进硝化作用,增强土壤微生物活动,有效增加土壤氮素养分含量。

参考文献:

- [1] 徐敏, 伍钧, 张小洪, 等. 生物炭施用的固碳减排潜力及农田效应[J]. 生态学报, 2018, 38(2): 393-404.
- [2] 李飞跃, 梁媛, 汪建飞, 等. 生物炭固碳减排作用的研究进展[J]. 核农学报, 2013, 27(5): 681-686.
- [3] 张运红, 姚健, 和爱玲, 等. 尿素硝酸铵溶液减量增效施用对小麦产量和氮素吸收利用的影响[J]. 河南农业科学, 2017, 46(11): 6-12.
- [4] ZHANG Yun-hong, YAO Jian, HE Ai-ling, et al. Effect of the reducing and efficiency-increasing application of urea ammonium nitrate solution on the yield and nitrogen uptake and utilization of wheat[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2017, 46(11): 6-12.
- [5] 陶瑞, 李锐, 谭亮, 等. 减少化肥配施有机肥对滴灌棉花N、P吸收和产量的影响[J]. 棉花学报, 2014, 26(4): 342-349.
- [6] TAO Rui, LI Rui, TAN Liang, et al. Effects of application different organic manures with chemical fertilizer on cotton yield, N and P utilization efficiency under drip irrigation[J]. *Cotton Science*, 2014, 26(4): 342-349.
- [7] 唐汉, 王金武, 徐常塑, 等. 化肥减施增效关键技术研究进展分析[J]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 1-19.
- [8] TANG Han, WANG Jin-wu, XU Chang-su, et al. Research progress analysis on key technology of chemical fertilizer reduction and efficiency increase[J]. *Transaction of The Chinese Society For Agricultural Machinery*, 2019, 50(4): 1-19.
- [9] 何绪生, 张树清, 余雕, 等. 生物炭对土壤肥料的作用及未来研究[J]. 中国农学通报, 2011, 27(15): 16-25.
- [10] HE Xu-sheng, ZHANG Shu-qing, SHE Diao, et al. Effects of biochar on soil and fertilizer and future research[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(15): 16-25.
- [11] Lehmann J, Da S J, 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, 2(2): 343-357.
- [12] 韩继明, 潘根兴, 刘志伟, 等. 减氮条件下秸秆炭化与直接还田对旱地作物产量及综合温室效应的影响[J]. 南京农业大学学报, 2016, 39(6): 986-995.
- [13] HAN Ji-ming, PAN Gen-xing, LIU Zhi-wei, et al. Contrasting effect of straw return and its biochar on changes in crop yield and integrated global warming effects under different nitrogen levels[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2016, 39(6): 986-995.
- [14] Doydora S A, Cabrera M L, Das K C, et al. Release of nitrogen and phosphorus from poultry litter amended with acidified biochar[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2011, 8(12): 1491-1502.
- [15] Yao Y, Gao B, Zhang M, et al. Effect of biochar amendment on sorption and leaching of nitrate, ammonium, and phosphate in a sandy soil[J]. *Chemosphere*, 2012, 89(11): 1467-1471.
- [16] 王冰, 赵闪闪, 秦治家, 等. 生物质炭对黑土硝态氮淋失的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(2): 73-79, 87.
- [17] WANG Bing, ZHAO Shan-shan, QIN Zhi-jia, et al. Effects of biochar addition on leaching of nitrate nitrogen in black soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(2): 73-79, 87.
- [18] 高德才, 张蕾, 刘强, 等. 旱地土壤施用生物炭减少土壤氮损失及提高氮素利用率[J]. 农业工程学报, 2014, 30(6): 54-61.
- [19] GAO De-cai, ZHANG Lei, LIU Qiang, et al. Application of biochar in dry land soil decreasing loss of nitrogen and improving nitrogen using rate[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(6): 54-61.

- [13] Nelissen V, Rütting T, Huygens D, et al. Temporal evolution of biochar's impact on soil nitrogen processes: A ^{15}N tracing study[J]. *GCB Bioenergy*, 2015, 7(4):635-645.
- [14] 黄超, 刘丽君, 章明奎. 生物质炭对红壤性质和黑麦草生长的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2011, 37(4):439-445.
HUANG Chao, LIU Li-jun, ZHANG Ming-kui, et al. Effects of biochar on properties of soil and ryegrass growth[J]. *Journal of Zhejiang University(Agric Life Sci)*, 2011, 37(4):439-445.
- [15] 吴嘉楠, 闫海涛, 彭桂新, 等. 生物质炭与氮肥配施对土壤氮素变化和烤烟氮素利用的影响[J]. 土壤, 2018, 50(2):256-263.
WU Jia-nan, YAN Hai-tao, PENG Gui-xin, et al. Effects of biochar addition combined with nitrogen fertilizer on soil nitrogen and nitrogen utilization of flue-cured tobacco[J]. *Soil*, 2018, 50(2):256-263.
- [16] 葛顺峰, 朱占玲, 陈倩, 等. 添加外源碳对苹果园土壤无机氮变化和氨挥发损失的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(6):257-261, 271.
GE Shun-feng, ZHU Zhan-ling, CHEN Qian, et al. Effects of exogenous carbon on inorganic nitrogen and ammonia volatilization in apple orchard soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(6):257-261, 271.
- [17] 马莉, 侯振安, 吕宁, 等. 生物炭对小麦生长和氮素平衡的影响[J]. 新疆农业科学, 2012, 49(4):589-594.
MA Li, HOU Zhen-an, LÜ Ning, et al. Effects of biochar application on wheat growth and nitrogen balance[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2012, 49(4):589-594.
- [18] 周震峰, 王建超, 饶潇潇. 添加生物质炭对土壤酶活性的影响[J]. 江西农业大学学报, 2015(6):110-112.
ZHOU Zhen-feng, WANG Jian-chao, RAO Xiao-xiao. Effects of biochar on soil enzyme activity[J]. *Journal of Jiangxi Agricultural University*, 2015(6):110-112.
- [19] 马昱萱, 刘立志, 张宇飞, 等. 添加碳氮对大豆秸秆还田土壤酶活性及微生物量碳的影响[J]. 东北林业大学学报, 2019, 47(10):75-80.
MA Yu-xuan, LIU Li-zhi, ZHANG Yu-fei, et al. Effects of carbon and nitrogen addition on soil enzyme activity and microbial biomass carbon content of soybean straw after returning to field[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2019, 47(10):75-80.
- [20] 冯爱青, 张民, 李成亮, 等. 秸秆及秸秆黑炭对小麦养分吸收及土壤酶活性的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(15):5269-5277.
FENG Ai-qing, ZHANG Min, LI Cheng-liang, 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.
- [21] 南学军, 蔡立群, 武均, 等. 生物质炭与氮肥配施对春小麦产量及其C:N:P的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(8):1154-1162.
NAN Xue-jun, CAI Li-qun, WU Jun, et al. Effects of combined application of biochar and N-fertilizer on yield and C:N:P ration of spring wheat[J]. *Chinese Journal of Eco-Agricultural*, 2017, 25(8):1154-1162.
- [22] 黄婷. 生物质炭对滴灌棉花氮磷养分吸收的影响机制[D]. 石河子:石河子大学, 2017:2-4.
HUANG Ting. Mechanism of biochar effects on nitrogen and phosphorus of cotton uptake under drip irrigation conditions[D]. Shihezi: Shihezi University, 2017:2-4.
- [23] 戴静, 刘阳生. 生物炭的性质及其在土壤环境中应用的研究进展[J]. 土壤通报, 2013, 44(6):1520-1525.
DAI Jing, LIU Yang-sheng. Review of research on the properties of biochar and its application in soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44(6):1520-1525.
- [24] Glaser B, Haumaier L, Guggenberger G, et al. Black carbon in soils: The use of benzenecarboxylic acids as specific markers[J]. *Organic Geochemistry*, 1998, 29(4):813-816.
- [25] 张垚, 索龙, 潘凤娥, 等. 生物质炭对砖红壤性质与养分及硝化作用的影响[J]. 农业资源与环境, 2016, 33(1):55-59.
ZHANG Yao, SUO Long, PAN Feng-e, et al. Effects of biochar application on soil physical properties, nutrients and nitrification in latosol[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, 33(1):55-59.
- [26] 罗煜, 赵小蓉, 李贵桐, 等. 生物质炭对不同pH值土壤矿质氮含量的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(19):166-173.
LUO Yu, ZHAO Xiao-rong, LI Gui-tong, et al. Effects of biochar on mineral nitrogen content in soils with different pH values[J]. *Transaction of the CSAE*, 2014, 30(19):166-173.
- [27] 郑孟菲, 程利峰, 胡新喜, 等. 生物炭与不同用量氮肥配施对小白菜生长和品质的影响[J]. 中国瓜菜, 2019, 32(4):30-34.
ZHENG Meng-fei, CHENG Li-feng, HU Xin-xi, et al. Effects of combined application of biochar and different amounts of nitrogen fertilizer on the growth and quality of pakchoi[J]. *China Cucurbits and Vegetables*, 2019, 32(4):30-34.
- [28] Berglund L M, DeLuca T H, Zackrisson O. Activated carbon amendments to soil alters nitrification rates in Scots pine forests[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(12):2069-2071.
- [29] 周志红, 李心清, 邢英, 等. 生物炭对土壤氮素淋失的抑制作用[J]. 地球与环境, 2011, 39(2):278-284.
ZHOU Zhi-hong, LI Xin-qing, XING Ying, et al. Effect of biochar amendment on nitrogen leaching in soil[J]. *Earth and Environment*, 2011, 39(2):278-284.
- [30] 赵军, 耿增超, 尚杰, 等. 生物质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 Jun, GENG Zeng-chao, SHANG Jie, 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.
- [31] 王杰, 李刚, 修伟明, 等. 氮素和水分对贝加尔针茅草原土壤酶活性和微生物量碳氮的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2014, 31(3):237-245.
WANG Jie, LI Gang, XIU Wei-ming, et al. Effects of nitrogen and water on soil enzyme activity and soil microbial biomass in *Stipa bicalensis* Steppe, Inner Mongolia of North China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2014, 31(3):237-245.
- [32] 徐福利, 梁银丽, 张成娥, 等. 施肥对日光温室黄瓜生长和土壤生物学特性的影响[J]. 应用生态学报, 2004(7):1227-1230.
XU Fu-li, LIANG Yin-li, ZHANG Cheng-e, et al. Effects of fertiliza-

- tion on cucumber growth and soil biological characteristics in sunlight greenhouse[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004(7): 1227-1230.
- [33] 顾美英, 葛春辉, 马海刚, 等. 生物炭对新疆沙土微生物区系及土壤酶活性的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2016, 34(4): 225-230, 273.
- GU Mei-ying, GE Chun-hui, MA Hai-gang, et al. Effects of biochar application amount on microbial flora and soil enzyme activities in sandy soil of Xinjiang[J]. *Agricultural Research in the Arid Area*, 2016, 34(4): 225-230, 273.
- [34] 张志龙, 陈效民, 曲成闯, 等. 生物质炭对黄瓜连作土壤中微生物量碳氮及酶活性的影响[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(5): 1384-1391.
- ZHANG Zhi-long, CHEN Xiao-min, QU Cheng-chuang, et al. Effects of biochar addition on soil microbial biomass C, N and enzyme activities in cucumber continuous cropping[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(5): 1384-1391.
- [35] 朱洪霞. 缓/控释复合肥料对土壤氮素和酶活性的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2007: 22-24.
- ZHU Hong-xia. Effects of slow/controlled release compound fertilizer on soil nitrogen and enzyme activity[D]. Chongqing: Southwest University, 2007: 22-24.
- [36] 李涛, 何春娥, 葛晓颖, 等. 秸秆还田施氮调节碳氮比对土壤无机氮、酶活性及作物产量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2016, 24(12): 1633-1642.
- LI Tao, HE Chun-e, GE Xiao-ying, et al. Responses of soil mineral N contents, enzyme activities and crop yield to different C/N ratio mediated by straw retention and N fertilization[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(12): 1633-1642.
- [37] 武鹏, 王玉凤, 张翼飞, 等. 不同土层深度配施缓释/普通尿素对土壤氮素和酶活性及玉米产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(1): 129-138.
- WU Peng, WANG Yu-feng, ZHANG Yi-fei, et al. Effects of slow-release/common urea combined application on soil nitrogen and enzyme activities and corn yield[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(1): 129-138.