

卢洪美, 王晨宇, 巩梦梦, 等. 微生物菌肥配施生物质炭对土壤肥力及黑麦草生长的影响[J]. 江苏农业学报, 2024, 40(12): 2266-2272.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2024.12.009

微生物菌肥配施生物质炭对土壤肥力及黑麦草生长的影响

卢洪美, 王晨宇, 巩梦梦, 谷勋刚
(安徽农业大学资源与环境学院, 安徽 合肥 230036)

摘要: 为探究微生物菌肥配施生物质炭对土壤肥力与黑麦草生长的增效机制, 本研究以邦德 3 为供试材料, 采用盆栽方式, 设置不施肥对照(CK)、有机物料(T1)、生物质炭(T2)、未灭菌微生物菌肥(T3)、灭菌微生物菌肥(T4)、生物质炭与菌剂配施(T5)、生物质炭与微生物菌肥配施(T6)等处理, 分析不同处理对土壤有机质含量、有效磷含量、速效钾含量及过氧化氢酶活性、脲酶活性、蔗糖酶活性、碱性磷酸酶活性、黑麦草叶片养分含量和产量的影响。结果表明: 随着黑麦草的生长, 不同施肥处理的土壤有机质含量、有效磷含量、速效钾含量总体呈先增加后减少的趋势; 在不同生长时期, 微生物菌肥配施生物质炭处理(T6)的土壤有机质含量、有效磷含量、速效钾含量整体上均显著高于其他处理。黑麦草收获时, T6、T5 和 T3 处理的土壤过氧化氢酶、脲酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶的活性均显著高于 CK, 其中, T6 处理增加最为显著, 土壤过氧化氢酶、脲酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶的活性分别比 CK 提高 230.91%、73.03%、24.00% 和 238.28%。T1~T6 处理的黑麦草产量和叶片全氮、全磷、全钾含量均显著高于 CK, 其中, T6 处理增加最为显著, 产量(鲜重)和叶片全氮、全磷、全钾含量分别比 CK 增加 104.37%、81.70%、271.43% 和 153.48%。因此, 微生物菌肥配施生物质炭可有效提高黑麦草产量和土壤速效养分含量, 增加土壤肥力和促进黑麦草生长。本研究结果可为黑麦草的优质种植和微生物菌肥的高效利用提供依据。

关键词: 黑麦草; 微生物菌肥; 生物质炭; 土壤肥力; 产量

中图分类号: S543+.606.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-4440(2024)12-2266-07

Effects of microbial fertilizer combined with biochar on soil fertility and ryegrass growth

LU Hongmei, WANG Chenyu, GONG Mengmeng, GU Xungang
(College of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract: In order to explore the synergistic mechanism of microbial fertilizer combined with biochar on soil fertility and ryegrass growth, this study used Bangde 3 as the test material, and used pot methods to set up no fertilization control (CK) and treatments such as organic material (T1), biochar (T2), unsterilized microbial fertilizer (T3), sterilized microbial fertilizer (T4), biochar and microbial agent application (T5), biochar and microbial fertilizer application (T6). The

effects of different treatments on soil organic matter content, available phosphorus content, available potassium content, and activities of catalase, urease, sucrase, alkaline phosphatase, as well as ryegrass leaf nutrient content and yield were analyzed. The results showed that with the growth of ryegrass, the soil organic matter content, available phosphorus content and available potassium content of different

收稿日期: 2024-03-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(31770729); 安徽昆虫生物科技有限公司项目(KJ2021092)

作者简介: 卢洪美(1998-), 女, 贵州遵义人, 硕士研究生, 主要研究方向为植物营养与土壤化学。(E-mail) 3513731803@qq.com

通讯作者: 谷勋刚, (E-mail) xgg99@ahau.edu.cn

fertilization treatments increased first and then decreased. At different growth stages, the soil organic matter content, available phosphorus content and available potassium content of microbial fertilizer combined with biochar treatment (T6) were significantly higher than those of other treatments on the whole. When ryegrass was harvested, the activities of soil catalase, urease, sucrase and alkaline phosphatase in T6, T5 and T3 treatments were significantly higher than those in CK. Among them, T6 treatment increased the most significantly, and the activities of soil catalase, urease, sucrase and alkaline phosphatase were 230.91%, 73.03%, 24.00% and 238.28% higher than CK, respectively. The yield of ryegrass and the contents of total nitrogen, total phosphorus and total potassium in leaves of T1–T6 treatments were significantly higher than those of CK. Among them, the increase of T6 treatment was the most significant, and the yield (fresh weight) and the contents of total nitrogen, total phosphorus and total potassium in leaves increased by 104.37%, 81.70%, 271.43% and 153.48%, respectively, compared with CK. Therefore, microbial fertilizer combined with biochar can effectively increase ryegrass yield and soil available nutrient content, increase soil fertility and promote ryegrass growth. This study provides a basis for the high-quality planting of ryegrass and the efficient utilization of microbial fertilizer.

Key words: ryegrass; microbial fertilizer; biochar; soil fertility; yield

黑麦草(*Lolium perenne* L.)是中国最重要的三大牧草之一,属于一年生饲用作物。黑麦草具有生长速度快、适口性好、营养成分丰富等特点,被多种畜禽所喜食,因而其种植面积不断扩大^[1-2]。磷与钾是植物生长不可或缺的营养元素,与作物的品质和产量等密切相关^[3-5]。近年来,随着高产品种的推广,农作物每年会从土壤中吸收大量的磷和钾,导致土壤中可被植物直接吸收利用的可溶性磷、钾含量的下降及缺磷、缺钾耕地面积的逐步增加^[6-7]。且肥料中磷素当季利用率一般低于 25%^[8],钾素当季利用率一般低于 50%^[9],这导致施入土壤的磷肥和钾肥增加了土壤中的总磷含量和总钾含量,但速效磷含量和速效钾含量往往仍然较低^[10]。因此,如何将土壤中难溶性的磷、钾活化为可溶性磷、钾是当前生产中备受关注的问題。

微生物菌肥与生物质炭均为无公害、无污染的土壤改良剂,近年来在土壤改良、作物增效方面有较多的应用^[11-12]。微生物菌肥作为一种新型的高效肥料,生产过程中通常会添加芽孢杆菌属^[13-15]细菌,这些细菌能够将土壤中难溶性磷和钾活化为可溶性磷、钾,进而增加土壤中有效磷、速效钾的供给,提高土壤中磷、钾的利用率^[16-22]。此外,施用微生物菌肥替代磷肥与钾肥还能够降低磷、钾肥的使用量,促进作物生长^[23-24]、提高土壤肥力和作物产量^[25]。生物质炭具有疏松多孔的结构,含有丰富的营养成分,施入到土壤中不仅可以增强土壤的固碳能力和肥力水平,还能提高土壤酶活性,进而起到减肥增产的效果^[26-27]。针对目前生物质炭与微生物菌肥配施对黑麦草根际土壤解磷和解钾能力、土壤

酶活性与作物产量形成和养分吸收利用的影响研究缺乏的现状,本研究利用盆栽试验,分析微生物菌肥、生物质炭以及两者配施对黑麦草根际土壤有效磷含量和速效钾含量及黑麦草产量和养分含量的影响,以期在黑麦草的优质生产和微生物菌肥的利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

新一代宽叶型四倍体一年生黑麦草品种邦德 3 购自郑州华丰草业科技有限公司;生物质炭购自江苏瑞竹环保科技有限公司;枯草芽孢杆菌、胶质芽孢杆菌和解淀粉芽孢杆菌的混合菌剂(混合体积比例为 1:1:1,有效含菌量为 1×10^7 CFU/mL)利用中国普通微生物菌种保藏管理中心提供的菌种发酵得到;微生物菌肥(有效活菌数 $\geq 1 \times 10^7$ CFU/g)由安徽农业大学微生物实验室利用解淀粉芽孢杆菌、胶质芽孢杆菌与枯草芽孢杆菌发酵得到;灭菌微生物菌肥由上述微生物菌肥经高温灭菌得到;有机物料为安徽省徽商集团农业生产资料有限公司提供的饲养蛾类昆虫的饲料及昆虫残体。供试土壤取自安徽省宣城市华佗岭宣木瓜种植基地,土壤有机质含量 4.55 g/kg,全氮含量 0.26 g/kg,有效磷含量 1.54 mg/kg,速效钾含量 28.00 mg/kg,碱解氮含量 14.00 mg/kg,pH 值 4.90。土壤过氧化氢酶、脲酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶测定试剂盒购自南京赛亚生物科技有限公司。

1.2 试验设计

试验于 2023 年 6–11 月在安徽农业大学开展。从试验田取土风干后,过 2 mm 筛,装入 30 cm×18

cm 的塑料盆中,每盆装风干土壤 5 kg,共 42 盆。试验设不施肥对照(CK)与有机物料(T1)、生物质炭(T2)、未灭菌微生物菌肥(T3)、灭菌微生物菌肥(T4)、生物质炭与菌剂配施(T5)、生物质炭与微生物菌肥配施(T6)等肥料处理,每个处理 6 盆。试验中 T1、T2、T3、T4 处理每盆施有机物料、生物质炭、微生物菌肥及灭菌微生物菌肥均为 20 g(以干重计),T5 处理中每盆施生物质炭 20 g 的基础上,增加 1.6 mL 混合菌剂,T6 处理中每盆施生物质炭与微生物菌肥各 10 g。上述材料均作为基肥拌土施用。2023 年 8 月 20 日每盆播种 20 粒黑麦草种子。常规管理,定期浇水。

1.3 指标的测定

1.3.1 土壤样品采集与测定 黑麦草种植后 5 d、10 d、20 d、30 d、45 d、60 d,利用土钻从每盆采集土壤样品 50 g 左右,土壤风干过筛后测定土壤有机质含量、有效磷含量和速效钾含量。土壤有机质含量、有效磷含量和速效钾含量分别采用重铬酸钾外加热-硫酸亚铁滴定法、钼锑抗比色-紫外分光光度计法、火焰光度计法^[28]测定。黑麦草收获(种植后 60 d)时,每盆另取土样测定土壤过氧化氢酶、脲酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶活性。

1.3.2 植物样品采集与测定 黑麦草种植 60 d 后收获,采集各盆植株地上部,植株洗净后去除表面水分,称量植株地上部鲜重,随后将黑麦草植株放置到 105 ℃烘箱中杀青 30 min,然后于 70 ℃烘干至恒重。取各处理植株叶片 100 g,研磨后过 0.5 mm 筛,采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮法,制备植株叶片氮、磷、钾含量的待测液,分别用凯氏定氮法、钼锑抗比色-紫外分光光度计法、火焰光度计法测定叶片全氮含量、全磷含量和全钾含量。

1.4 数据分析

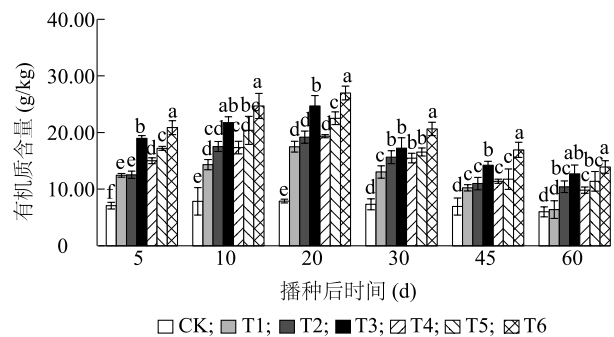
采用 Microsoft Excel 2010 软件进行数据统计和作图,采用 SPSS Statistics 22.0 软件及 Duncan's 法进行处理间差异显著性分析($\alpha=0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对土壤有机质含量的影响

不同施肥处理土壤有机质含量的变化特征如图 1 所示。从图中可以看出,与 CK 相比,不同施肥处理的土壤有机质含量均有不同程度的增加。在黑麦草生长的不同时期, T6 处理的土壤有机质含量总体显

著高于其他处理, T3 处理次之。随着黑麦草的生长,土壤中的有机质含量总体呈先增加后减少的趋势。播种后 20 d 时,各处理的有机质含量均达最大值,其中, T6 处理的土壤有机质含量最高,为 26.99 g/kg,比其他处理高 9.27%~241.65%。黑麦草收获时(播种后 60 d), T1 处理土壤有机质含量与 CK 无显著差异,其他处理的有机质含量均显著高于 CK,其中, T6 处理的有机质含量较 CK 高 132.00%。上述结果表明不同施肥处理均可促进土壤有机质含量增加,且微生物菌肥配施生物质炭对土壤有机质含量的增加效果最好。



CK: 不施肥对照; T1: 每盆施有机物料 20 g; T2: 每盆施生物质炭 20 g; T3: 每盆施未灭菌微生物菌肥 20 g; T4: 每盆施灭菌微生物菌肥 20 g; T5: 每盆施生物质炭 20 g+芽孢杆菌混合菌液 1.6 mL; T6: 每盆施微生物菌肥和生物质炭各 10 g。同一取样时期柱上不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

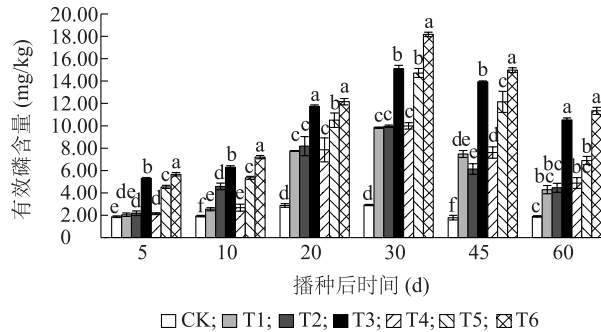
图 1 黑麦草生长过程中不同处理土壤有机质含量的变化

Fig.1 Changes of soil organic matter content in different treatments during the growth of ryegrass

2.2 不同处理对土壤有效磷含量和速效钾含量的影响

不同处理对黑麦草根际土壤有效磷含量的影响如图 2 所示。从图中可以看出,各处理黑麦草全生长期有效磷含量总体均呈先增加后减少的趋势。播种后 30 d,各处理土壤有效磷含量均达最大值。全生长期,不同施肥处理(T1~T6)的土壤有效磷含量总体均显著高于 CK。播种后 30 d, T1~T6 处理的土壤有效磷含量比 CK 显著提高 236.58%~522.45%;未灭菌微生物菌肥处理(T3)的土壤有效磷含量是灭菌微生物菌肥处理(T4)的 1.51 倍,说明未灭菌微生物菌肥对土壤难溶态磷的活化效果更好; T5 处理的土壤有效磷含量与 T3 处理无显著差异; T6 处理下土壤有效磷含量最高,显著高于其他

处理。黑麦草收获时(播种后 60 d),T3 处理和 T6 处理的土壤有效磷含量显著高于其他处理,且两者无显著差异;T5 处理次之,CK 最低。



CK、T1~T6 处理见图 1 注。同一取样时期柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

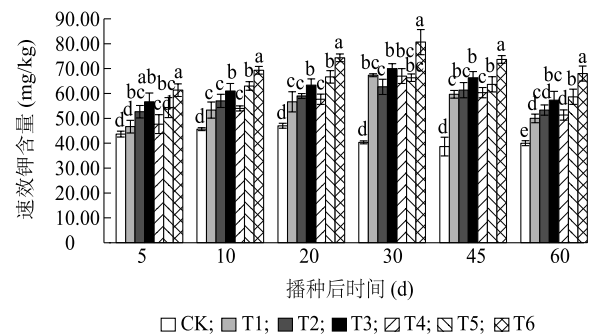
图 2 黑麦草生长过程中不同处理土壤有效磷含量的变化

Fig.2 Changes of soil available phosphorus content in different treatments during the growth of ryegrass

不同处理对黑麦草根际土壤速效钾含量的影响如图 3 所示。与土壤有效磷含量的变化相似,黑麦草生长过程中,各处理土壤速效钾含量的变化亦呈先增后减的变化趋势,播种后 20~30 d 时,各处理土壤速效钾含量达到最高值。不同施肥处理 (T1~T6) 的土壤速效钾含量总体显著高于 CK。播种后 30 d, T2、T3、T4 和 T5 处理的土壤速效钾含量分别比 CK 增加 55.39%、73.57%、66.13% 和 64.47%; T6 处理速效钾含量达最大值,为 80.67 mg/kg,比 CK 增加 100.02%,说明微生物菌肥与生物质炭配施对土壤速效钾含量的提升效果最为显著。各处理土壤速效钾含量的增加说明不同的施肥处理对土壤钾素均有一定程度的活化作用,其中,微生物菌肥和生物质炭配施处理 (T6) 对土壤钾素的活化作用最为显著,其次为 T3 和 T5 处理。

2.3 不同处理对土壤过氧化氢酶、脲酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶活性的影响

不同施肥处理黑麦草种植 60 d 后土壤过氧化氢酶、脲酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶活性的变化特征如图 4 所示。从图中可以看出,与 CK 相比,不同施肥处理的土壤过氧化氢酶活性均有不同程度的增加,增幅为 100.18%~230.91%。T6 处理过氧化氢酶活性最高,比 CK 显著增加 230.91%; T3、T5 处理过氧化氢酶活性分别比 CK 提高 200.06% 和 214.31%,上述结果说明微生物菌肥配施生物质炭能有效提高



CK、T1~T6 处理见图 1 注。同一取样时期柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 3 黑麦草生长过程中不同处理土壤速效钾含量的变化

Fig.3 Changes of soil available potassium content in different treatments during the growth of ryegrass

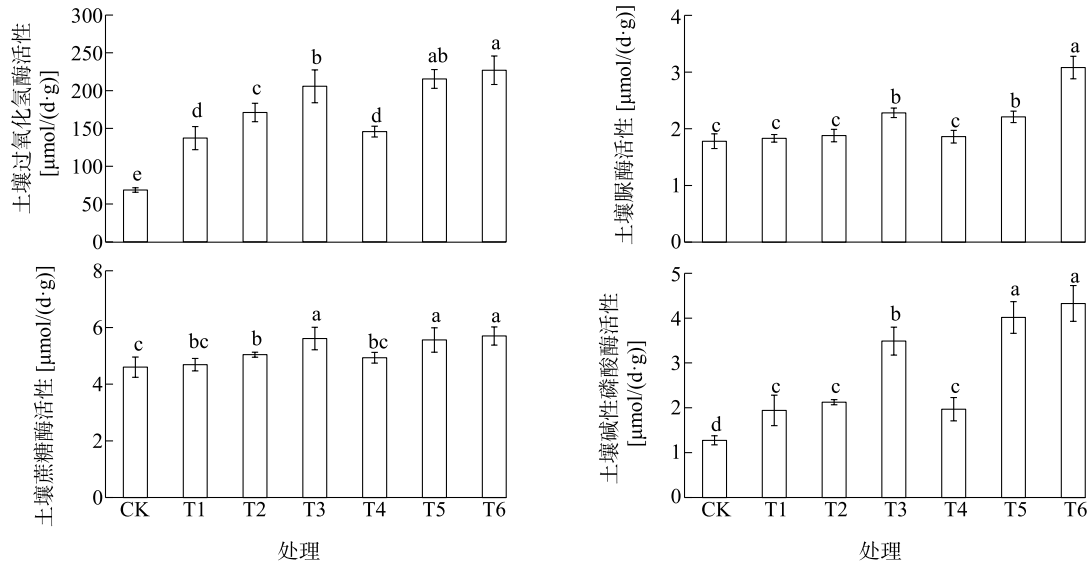
土壤过氧化氢酶活性。T3、T5 和 T6 处理土壤脲酶活性均显著高于 CK,分别提高 28.09%、24.16% 和 73.03%,T1、T2 和 T4 处理与 CK 无显著差异。T3、T5 和 T6 处理土壤蔗糖酶活性显著高于其他处理,其中 T6 处理比 CK 提高 24.00%,T1、T4 处理土壤蔗糖酶活性与 CK 无显著差异。不同施肥处理的土壤碱性磷酸酶活性均显著高于 CK,其中,T3、T5 和 T6 处理分别比 CK 显著增加 172.66%、213.28% 和 238.28%,T1、T2 和 T4 处理的土壤碱性磷酸酶活性增量相对较小。

2.4 不同处理对黑麦草鲜重和叶片氮、磷、钾含量的影响

不同处理对黑麦草产量和收获期叶片氮、磷、钾含量的影响如表 1 所示。从表中可以看出,不同施肥处理的黑麦草鲜重均显著高于不施肥对照 (CK),其中,T6 处理的产量增加最为显著,增量约 104.37%,其次为 T3 和 T5 处理,增量分别为 84.94% 和 75.70%,T1 处理的增量相对较低,仅为 43.51%。上述结果说明微生物菌肥配施生物质炭能更好地促进黑麦草的生长。与产量相似,施肥处理的黑麦草叶片全氮含量、全磷含量、全钾含量亦显著高于不施肥对照 (CK)。其中,T6 处理全氮含量、全磷含量、全钾含量均为最高,分别比 CK 增加 81.70%、271.43% 和 153.48%。T3 和 T5 次之,T1、T2、T4 处理的差异相对较小。T3 处理下氮、磷、钾含量均高于 T1 处理,分别较 T1 处理提高 23.26%、39.29%、39.06%,说明施用微生物菌肥能提高黑麦草叶片养分含量。T5 处理叶片氮、磷、钾含量分别

比 T2 处理提高 17.63%、62.96%、45.85%,说明物质炭与菌液混合处理后对黑麦草养分提高具有更

好的效果。



CK、T1~T6 见图 1 注。柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 4 不同处理对土壤酶活性的影响

Fig.4 Soil enzyme activity under different treatments

表 1 不同处理对作物生长与氮磷钾含量的影响

Table 1 Effects of different treatments on crop growth and nitrogen, phosphorus and potassium contents of crops

处理	鲜重 (g)	干重 (g)	全氮含量 (%)	全磷含量 (%)	全钾含量 (%)
CK	17.86±0.62e	2.39±0.24e	2.24±0.19d	0.14±0.01f	1.87±0.05d
T1	25.63±1.82d	3.13±0.17d	3.01±0.13c	0.28±0.02e	2.97±0.03c
T2	28.81±1.93c	3.30±0.23c	2.95±0.17c	0.27±0.00e	2.77±0.01c
T3	33.03±1.00b	3.90±0.10b	3.71±0.16ab	0.39±0.03c	4.13±0.33b
T4	29.02±0.63c	3.12±0.20d	3.06±0.10c	0.30±0.01d	3.06±0.11c
T5	31.38±0.80b	4.03±0.07b	3.47±0.26b	0.44±0.01b	4.04±0.05b
T6	36.50±2.81a	5.04±0.14a	4.07±0.44a	0.52±0.01a	4.74±0.38a

CK、T1~T6 处理见图 1 注。同一列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

3 讨论与结论

土壤速效养分含量对植物生长发育、产量和品质有重要影响。近年来,如何提高低肥力土壤的速效养分含量越来越受到关注。大量研究发现,在低肥力土壤中施用生物质炭或微生物菌肥可促进作物生长,提高土壤养分利用效率,提升作物抗病水平和减少环境污染^[28-31]。本研究发现,与不施肥对照(CK)相比,施用生物质炭、微生物菌肥、有机物料及生物质炭与微生物菌肥配施等处理均能提高土壤有机质含量、有效磷含量与速效钾含量,施肥处理

(T1~T6)土壤有机质含量、有效磷含量和速效钾含量均呈先增加后减少的趋势,说明黑麦草生长过程中土壤微生物活性发生变化。微生物菌肥与生物质炭配施处理的土壤有机质含量、有效磷含量和速效钾含量整体上都显著高于单施微生物菌肥和生物质炭处理。原因可能是微生物菌肥配施生物质炭既能弥补单施微生物菌肥在作物前期养分释放缓慢的缺点,又能保障作物在生长后期对养分的吸收利用,提高对土壤难溶性磷、钾养分的利用率。土壤提供的养分一般无法满足作物生长的需求^[32-33],微生物菌肥与生物质炭配施及微生物菌肥单施均可改善土壤

磷、钾等速效养分含量,提高养分利用效率,这与其他学者的研究结果^[34-36]一致。

酶是土壤物质转化的一种生物催化剂,对土壤物质循环具有重要的意义。酶活性的强弱对土壤养分的有效性有重要影响,可用来表示土壤质量的好坏^[37]。本研究结果表明,与其他处理相比,微生物菌肥配施生物质炭处理可更好地增强土壤中过氧化氢酶、脲酶、蔗糖酶及碱性磷酸酶的活性。原因可能是微生物菌肥配施生物质炭处理可更好地增强土壤透气性,提高土壤肥力水平,促进根系生长环境的改善。Dabhi 等^[38]、Zaitun 等^[39] 研究结果表明,土壤中增施微生物菌肥和生物质炭可以提高作物养分含量。本研究同样发现,微生物菌肥配施生物质炭处理能更好地提高黑麦草产量和叶片全氮、全磷、全钾含量,且配施处理比单纯施用微生物菌肥或生物质炭有更好的提升效果。

参考文献:

- [1] ABRAHA A B, TRUTER W F, ANNANDALE J G, et al. Forage yield and quality response of annual ryegrass (*Lolium multiflorum*) to different water and nitrogen levels[J]. Afr J Range Forage Sci, 2015,32:125-131.
- [2] LERMI G A, ERKOVAN I H, KOÇ A. Determination of combined effects of organic and mineral fertilizer on forage yield and quality of annual ryegrass[J]. Agronomy, 2023, 13(12):2935.
- [3] WANG Q, SHAN C, ZHANG P, et al. The combination of nanotechnology and potassium: applications in agriculture[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2024, 31(2):1890-1906.
- [4] ANJALI T, SHARMA R P, SANKHYAN N K, et al. Maize grain quality as influenced by 46 years' continuous application of fertilizers, farmyard manure (fym), and lime in an alfisol of north-western Himalayas[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2021, 52(2):149-160.
- [5] WYNGAARD N, CABRERA M L, JAROSCH K A, et al. Phosphorus in the coarse soil fraction is related to soil organic phosphorus mineralization measured by isotopic dilution[J]. Soil Biol Biochem, 2016, 96:107-118.
- [6] ZHU J, LI M, WHELAN M. Phosphorus activators contribute to legacy phosphorus availability in agricultural soils: a review[J]. Sci Total Environ, 2018, 612:522-537.
- [7] CHOUDHARY M, GARG K, REDDY B M, et al. Unlocking growth potential: synergistic potassium fertilization for enhanced yield, nutrient uptake, and energy fractions in Chinese cabbage[J]. Heliyon, 2024, 10(7):e28765.
- [8] 张登晓,高雅,介红彬,等. 生物质炭对农田磷有效性的影响研究进展[J]. 河南农业大学学报, 2021, 55(2):199-205.
- [9] 张磊,张维乐,鲁剑巍,等. 秸秆还田条件下不同供钾能力土壤水稻、油菜、小麦钾肥减量研究[J]. 中国农业科学, 2017, 50(19):3745-3756.
- [10] 郭艳兰,牟德生,张勤德,等. 化肥减量配施不同用量微生物菌肥对黑比诺葡萄生长、品质及土壤肥力的影响[J]. 江苏农业学报, 2023, 39(9):1938-1944.
- [11] 汪钱龙,张德智,王菊芬,等. 不同植物促生细菌对玉米生长的影响及其生长素分泌能力研究[J]. 云南农业大学学报(自然科学版), 2015, 30(4):494-498.
- [12] 刘云峰,杨宁,温丹,等. 微生物菌肥在园艺作物上的应用研究[J]. 安徽农业科学, 2022, 50(7):11-15.
- [13] 苏正川,熊仁科,罗小艳. 解淀粉芽孢杆菌的作用及其产品开发[J]. 农药科学与管理, 2019, 40(6):21-30.
- [14] 胡肖盼,刘文硕. 不同浓度胶质芽孢杆菌对草莓生长发育的影响[J]. 现代农业科技, 2023(11):42-44.
- [15] 张爱民,李乃康,赵钢勇,等. 土壤中解磷、解钾微生物研究进展[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2015, 35(4):442-448.
- [16] ETESAMI H, EMAMI S, ALIKHANI H A. Potassium solubilizing bacteria (KSB): mechanisms, promotion of plant growth, and future prospects: a review[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2017, 17(4):897-911.
- [17] 曹秋艳,李海渤,冯慧敏,等. 施用微生物菌肥对无花果鲜食品质和贮藏特性的影响[J]. 江苏农业学报, 2023, 39(3):807-813.
- [18] 何永梅,孔志强,陈胜文,等. 生物菌肥及其在蔬菜生产上的应用[J]. 科学种养, 2019(9):33-35.
- [19] IBARRA-GALEANA J A, CASTRO-MARTÍNEZ C, FIERRO-CORONADO R A, et al. Characterization of phosphate-solubilizing bacteria exhibiting the potential for growth promotion and phosphorus nutrition improvement in maize (*Zea mays* L.) in calcareous soils of Sinaloa, Mexico[J]. Annals of Microbiology, 2017, 67(12):801-811.
- [20] AYANA R B. *Bacillus velezensis* AR1 mediated plant nourishing through solubilization of hardly soluble phosphorus nutrient sources[J]. Cogent Food & Agriculture, 2023, 9(2):366.
- [21] 潘纪源,董庆龙,温海彬,等. 巨大芽孢杆菌菌剂对苹果产量、品质及土壤微生物的影响[J]. 园艺学报, 2023, 50(11):2453-2465.
- [22] 宋嘉欣,石文昕,刘世辉,等. 微生物菌肥对茄子生长发育及土壤环境的影响[J]. 天津农学院学报, 2023, 30(5):16-22.
- [23] 阎世江,田如霞,张京社,等. 生物菌肥对茄子生长及品质的影响[J]. 蔬菜, 2019(12):41-46.
- [24] 张艺灿,刘凤之,王海波. 根际溶磷微生物促生机制研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2020(2):1-9.
- [25] REN H, GUO H, SHAFIQU L ISLAM M, et al. Improvement effect of biochar on soil microbial community structure and metabolites of decline disease bayberry[J]. Front Microbiol, 2023, 14:1154886.
- [26] ABDELRAOUF R, ABDOL S, MAHMOUD ABBAS M, et al. Influence of n-fertilization stress and agro-organic wastes (biochar) to

- improve yield and water productivity of sweet pepper under sandy soils conditions[J]. *Plant Arch*, 2020, 20: 3208-3217.
- [27] 陈贵云, 王惠芳, 王 铎, 等. 烟秆生物质炭肥施用对烤烟产质量的影响[J]. *中国农学通报*, 2024, 40(1): 12-19.
- [28] 董万鹏, 吴 楠, 龙 婷, 等. 微生物菌肥对玫瑰防病促生作用及土壤微环境的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2023(8): 121-127.
- [29] 决 超. 微生物菌肥与土壤改良基质对连作马铃薯土壤性质及微生物群落的影响[J]. *江苏农业科学*, 2023, 51(1): 218-224.
- [30] TAGGART COSETTE B, MUIR JAMES P, BRADY JEFF A, et al. Impacts of biochar on *Trifolium incarnatum* and *Lolium multiflorum*; soil nutrient retention and loss in sandy loam amended with dairy manure[J]. *Agronomy*, 2022, 13(1): 26.
- [31] 朱长伟, 孟威威, 石 柯, 等. 不同轮耕模式下小麦各生育时期土壤养分及酶活性变化特征[J]. *中国农业科学*, 2022, 55(21): 4237-4251.
- [32] KENTA I, FUJIO N, SAÏDOU S, et al. Understanding yield-limiting factors for sorghum in semi-arid sub-Saharan Africa: beyond soil nutrient deficiency[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2024, 70(2): 114-122.
- [33] ANKIT G, KUMAR V S, SINGH R C, et al. Quantifying the fertility status and relationship between soil properties under major tea estates of north-western Himalaya[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2024, 55(3): 287-301.
- [34] OLLIO I, MIGUEL S V, GÓMEZ S D, et al. Effect of biofertilizers on broccoli yield and soil quality indicators[J]. *Horticulturae*, 2023, 10(1): 42.
- [35] KAUR G, VATS K A, SINGH R, et al. Effect of vermicompost, biofertilizers and in organic fertilizers on nutrient uptake and physico-chemical properties of soil: a case study of Chickpea (*Cicer arietinum* L.)[J]. *International Journal of Environment and Climate Change*, 2023, 13(10): 4519-4525.
- [36] YIN J, SONG Z, GUO X S, et al. Adjusting the fertilizer application structure for nutrient saving and yield increase in potato[J]. *International Journal of Plant Production*, 2023, 17(2): 379-387.
- [37] TANG Z, HE N, ZHANG L, et al. Straw and biochar application alters the structure of rhizosphere microbial communities in direct-seeded rice (*Oryza sativa* L.) paddies[J]. *Agronomy*, 2024, 14(2): 316.
- [38] DABHI V R, SURVE H V, BAMBHANEYYA M S, et al. Response of seed size and bio-fertilizer on yield, quality, nutrient content and uptake of groundnut crop under rainfed condition[J]. *International Journal of Plant Soil Science*, 2022, 34(24): 69-75.
- [39] ZAITUN Z, SUFARDI S, SUWARNO S, et al. Contribution biochar residue to the role of compost and urea in improving crop yields, soil chemistry properties, and the diversity of soil surface insects in the maize (*Zea mays* L.) crop land[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2023, 1266(1): 12077. Doi: 10.1088/1755-1315/1266/1/01.

(责任编辑: 石春林)