

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2022.06.005

司海丽, 纪立东, 李磊, 等. 生物有机肥对宁夏盐碱地土壤养分和生物学特性的影响. 土壤, 2022, 54(6): 1124–1131.

生物有机肥对宁夏盐碱地土壤养分和生物学特性的影响^①

司海丽¹, 纪立东^{1*}, 李磊¹, 勉有明², 朱英³, 刘菊莲¹, 尚红莺¹, 杨洋¹

(1 宁夏农林科学院农业资源与环境研究所, 银川 750002; 2 宁夏农林科学院固原分院, 宁夏固原 756000; 3 宁夏吴忠国家农业科技园区管理委员会, 宁夏吴忠 751100)

摘要: 为了探讨生物有机肥施用对宁夏引黄灌区盐碱地土壤化学和微生物特性的影响, 明确生物有机肥的最佳施用量及施肥模式, 以田间连续 4 年定位试验为依托, 研究了生物有机肥施用量 0(CK)、4.5(T1)、9.0(T2)、13.5 t/hm²(T3)及生物有机肥 9.0 t/hm² 配施无机化肥 N 360 kg/hm²(T4)对盐碱地土壤养分含量、酶活性、微生物生物量、微生物群落碳源代谢活性及多样性和玉米产量的影响。结果表明: ①施用生物有机肥可明显降低土壤 pH 和全盐含量, 土壤养分含量及土壤酶活性随着生物有机肥施用量增加呈递增趋势, 且在 T2 处理基础上增施无机化肥可显著增加土壤速效钾含量 14.73%; ②土壤微生物群落碳源代谢活性及多样性指数均随着生物有机肥施用量的增加而增加, T3 处理土壤培养 192 h 时 AWCD 值为 0.84, 经 Tukey 检验分析, Shannon 和 McIntosh 指数较 CK 处理分别增加 10.11% 和 62.67%; ③随着生物有机肥施用量增加, 土壤微生物生物量碳、氮、磷含量呈递增趋势, 各处理平均分别比 CK 处理增加 66.78%、59.19% 和 51.84%; ④施用生物有机肥可明显增加玉米产量, 提高玉米产值, 其中以生物有机肥施用 9.0 t/hm² 配施无机化肥 N 360 kg/hm² 时, 玉米产量和净收入最佳, 分别为 11 499 kg/hm² 和 8 709 元/hm²。因此, 长期施用生物有机肥可改善宁夏盐碱土壤质地, 提高土壤质量, 增加土壤生物活性及玉米产量, 其中以生物有机肥施用 9.0 t/hm² 配施无机化肥 N 360 kg/hm² 时综合效果最佳。

关键词: 生物有机肥; 盐碱地; 土壤养分; 土壤微生物特性; 玉米产量

中图分类号: S144 **文献标志码:** A

Effects of Long-term Application of Bioorganic Fertilizer on Soil Nutrients and Biological Characteristics of Saline Alkali Land in Ningxia

SI Haili¹, JI Lidong^{1*}, LI Lei¹, MIAN Youming², ZHU Ying³, LIU Julian¹, SHANG Hongying¹, YANG Yang¹

(1 Institute of Agricultural Resources and Environment, Ningxia Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, China; 2 Guyuan Branch, Ningxia Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Guyuan, Ningxia 756000, China; 3 Ningxia Wuzhong National Agricultural Science and Technology Park Management Committee, Wuzhong, Ningxia 751100, China)

Abstract: In order to investigate the effects of bioorganic fertilizer application on the chemistry and microbial characteristics of saline-alkali soil in Ningxia Yellow River Diversion Irrigation Area, and to clarify the optimal application amount and fertilization mode of bio-organic fertilizer, the treatments were included applying bioorganic fertilizer 0 t/hm² (CK), 4.5 t/hm² (T1), 9 t/hm² (T2) 13.5 t/hm² (T3), and 9 t/hm² of bioorganic fertilizer and N 360 kg/hm² of inorganic chemical fertilizers (T4) based on the field positioning experiment for 4 consecutive years, soil nutrient contents, enzyme activities, microbial biomass, microbial community carbon metabolism activities and diversities, and maize yields in saline-alkali soil were determined and compared. The results show that: 1) Application of bioorganic fertilizer can significantly reduce soil pH and total salt content, and soil nutrient contents and soil enzyme activities are increased with the increase of bioorganic fertilizer application, and T4 treatment significantly increases soil available potassium content by 14.73%; 2) Carbon source metabolic activity and diversity index of soil microbial community both are increased with the increase of bio-organic fertilizer application, AWCD value of T3 treatment is

①基金项目: 宁夏回族自治区农业高质量发展和生态保护科技创新示范项目(NGSB-2021-11-07)、自治区重点研发计划项目(2019BCF01001)和自治区农业科技自主创新专项(NKYJ-22-02)资助。

* 通讯作者(jili521010@163.com)

作者简介: 司海丽(1988—), 女, 宁夏银川人, 硕士, 农艺师, 主要从事农业废弃物利用与新型肥料研发方面的研究。E-mail: sihaili_0427@163.com

0.84 when cultured for 192 h, and Tukey test analysis shows that Shannon and McIntosh indices are increased by 10.11% and 62.67%, respectively, compared with CK treatment; 3) With the increase of bioorganic fertilizer application, soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus contents are increased by 66.78%, 59.19% and 51.84%, respectively, compared with CK treatment; 4) The application of bioorganic fertilizer can significantly increase corn yield and output value, and among them, T4 treatment has the best corn yield and net income, which are 11 499 kg/hm² and 8 709 yuan/hm², respectively. Thus, the long-term application of bioorganic fertilizer can improve the texture of saline-alkali soil in Ningxia, improve soil quality, increase soil biological activity and corn yield, and the application of bio-organic fertilizer 9.0 t/hm² and inorganic fertilizer N 360 kg/hm² is recommended.

Key words: Bio-organic fertilizer; Saline-alkali land; Soil nutrients; Soil microbial characteristics; Corn yield

玉米是我国重要的粮食作物之一,农业生产上主要通过大量施用化肥来保证其充足的养分供应,但随着化肥长期施用,导致土壤板结,盐渍化严重,土壤微生物群落多样性降低,作物产量不断下降。生物有机肥含有丰富的有机碳和多种矿质营养元素,而且含有大量有益微生物,对提升地力、丰富土壤微生物、促进农牧良性循环有很大帮助^[1-2],因此,通过生物有机肥替代化肥施用对增加土壤肥力、增强土壤微生物活性具有重要意义。同时,生物有机肥的施用还能显著提高土壤总有机碳、可溶性有机碳等含量,对改善土壤微生态环境具有显著作用^[3-8]。大量研究表明,生物有机肥可以在盐碱土中广泛使用,在一定程度上改善盐碱土的微生物环境,促进玉米根系生长,提高功能叶片渗透调节物质含量,提高玉米耐盐碱胁迫能力^[9]。同时,有机肥还能提高盐碱地土壤微生物数量、微生物生物量碳氮、土壤呼吸强度及土壤酶活性^[10]。张宇冲等^[11]研究表明,施用生物有机肥显著增加了盐碱地土壤细菌数量、土壤硝酸还原酶活性和脲酶活性,能够有效降低土壤氮素损失,提高玉米产量。王宇峰等^[12]、陈琳等^[13]研究发现,施用有机肥可提高土壤有机质含量,一定程度上提高土壤微生物代谢功能多样性及碳源利用的能力。李玉等^[14]通过连续两年在盐碱地上施用有机肥,发现在盐碱环境下,施用有机肥可明显提高小麦单位面积穗数和籽粒质量,从而提高小麦产量,且小麦产量随着有机肥替代量的增加而增加。

目前,国内关于有机肥长期替代化肥对土壤生物学活性影响的研究多集中于东北黑土、南方红壤、潮土和黄绵土等土壤类型,而对于宁夏盐碱土-大陆气候这一特殊生态条件下的研究鲜有报道。同时,玉米作为宁夏主要的粮饲兼用作物,种植面积大,需求范围广,因此开展宁夏盐碱地玉米种植研究十分必要。本研究以田间连续4年定位试验为依托,探究生物有机肥不同施用量对宁夏盐碱地玉米种植土壤养分、酶

活性、微生物生物量和玉米产量的影响,同时利用碳素的微平板测定方法(Biolog),分析生物有机肥施用对盐碱地土壤微生物群落碳源代谢活性及多样性的影响,以期对盐碱土质地改善、肥效提升提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2017—2020年在宁夏银川北部引黄灌区黄渠桥镇金茂源家庭农场(海拔约1 090 m)进行。该地区属于大陆性气候,四季分明,年日照时数3 000 h以上,昼夜温差大,年有效积温1 535℃左右,年均气温8.8℃左右,年均降水量200 mm左右,蒸发量较强,为年均降水量10倍左右。试验区地势低洼,东西走向稍有起伏,土壤质地为粉砂质黏壤土,碱性,表层偶见白斑,属于氯化物-硫酸盐盐渍土,耕层土壤基本化学性质为:pH为8.78,全盐3.20 g/kg,有机质12.98 g/kg,碱解氮40.20 mg/kg,有效磷13.65 mg/kg,速效钾175.91 mg/kg。

1.2 试验设计

试验采用随机区组设计,连续4年定位,共设5个处理:①CK,不施肥;②T1,施用生物有机肥4.5 t/hm²;③T2,施用生物有机肥9.0 t/hm²;④T3,施用生物有机肥13.5 t/hm²;⑤T4,施用生物有机肥9.0 t/hm²+无机化肥N 360 kg/hm²(N:P:K=24:8:3),即尿素775.86 kg/hm²、重过磷酸钙260.87 kg/hm²、硫酸钾86.54 kg/hm²。每个处理3次重复,共15个小区,小区面积8 m×10 m=80 m²。

供试肥料:生物有机肥(N+P₂O₅+K₂O≥50 g/kg,有机质≥450 g/kg,有效活菌数≥0.2 亿/g),由宁夏顺宝现代农业股份有限公司生产;尿素(含N 464 g/kg),由中国农资集团股份有限公司生产;重过磷酸钙(含P₂O₅ 460 g/kg),由钟祥市楚明磷化有限公司生产;硫酸钾(含K₂O 520 g/kg),由唐山三孚钾肥有限公司生产。

供试玉米: 东润 58, 一年一熟, 机械播种与收割, 玉米行距 70 cm, 株距 40 cm。

生物有机肥、重过磷酸钙、硫酸钾于播种前一次性基施, 30% 尿素基施, 剩余 70% 尿素于玉米灌浆期随黄河水灌溉追施。统一灌水量, 灌溉方式为漫灌, 田间其他管理统一操作。

1.3 测定指标与方法

2020 年玉米收获期, 每个采样区以五点取样法采集 0~20 cm 土层土壤样品, 将同一采样区土壤样品混合均匀保存于泡沫低温保温箱中带回实验室, 并及时检测。

1) 土壤化学指标: pH、全盐、有机质、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾含量。测定方法^[15]: 分别采用酸度计测定土壤 pH, DDS-11 电导率仪测定全盐含量, 重铬酸钾滴定法测定土壤有机质含量, 凯氏定氮法测定土壤全氮含量, 扩散吸收法测定土壤碱解氮含量, 分光光度计法测定土壤有效磷含量, 火焰光度法测定土壤速效钾含量。

2) 土壤微生物特征指标: 土壤酶(蔗糖酶、磷酸酶、脲酶和过氧化氢酶)和土壤微生物生物量(碳、氮、磷含量)及 Biolog 值(包括土壤微生物群落代谢平均颜色变化率(average well color development, AWCD)值、Shannon 指数 H 值、Simpson 指数 D 值和 McIntosh 指数 U 值)。测定方法^[16]: 土壤蔗糖酶、脲酶、磷酸酶、过氧化氢酶活性分别采用 3,5-二硝基水杨酸比色法、靛酚蓝比色法、磷酸苯二钠比色法、高锰酸钾滴定法测定; 土壤微生物生物量碳、氮、磷含量分别采用熏蒸提取-容量分析法、熏蒸提取-全氮测定法和熏蒸提取-全磷测定法; Biolog 值采用 Biolog-ECO 测试板测定^[17]。

3) 玉米产量和经济效益: 收获期(2020 年 9 月 30 日)进行各小区单收单计, 实收实测。总产值=产量×单价; 净收益=产值-总投入。

1.4 数据处理

利用 Excel 2007 软件进行数据整理和图表绘制,

采用 SPSS 10.0 软件 LSD 法进行数据差异显著性分析($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 土壤养分变化

如表 1 所示, 经过连续 4 年不同施肥处理, 土壤 pH 随施肥量的增加呈现降低的趋势, 土壤耕层(0~20 cm)养分含量随生物有机肥施用量增加呈递增趋势, 且生物有机肥同一施用量下, 增施无机化肥有利于提高耕层土壤养分。连续 4 年施用生物有机肥可明显降低土壤全盐含量, 等量有机肥施用下, 增施无机化肥对土壤全盐含量影响较小; 与 CK 处理相比, T1、T2、T3 和 T4 处理土壤有机质含量分别增加了 9.63%、10.63%、13.62% 和 11.30%; T2、T3 和 T4 处理土壤全氮含量分别增加了 11.88%、17.82% 和 25.74%; 土壤碱解氮、有效磷、速效钾含量均以 T3 和 T4 处理积累最明显, 分别较 CK 处理增加了 17.02%~26.23%、37.32%~44.63%、16.97%~22.48%; 生物有机肥施用 9.0 t/hm²(T2)时, 增施无机化肥(T4)可显著增加土壤速效钾含量, 增幅 14.73%。

2.2 土壤酶活性变化

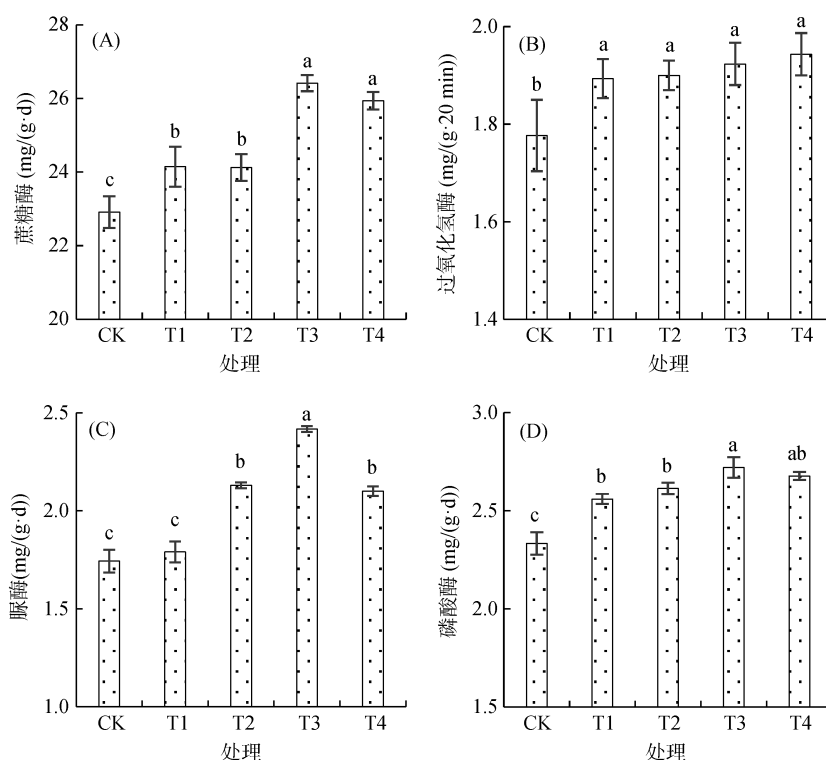
施肥对土壤酶活性影响显著(图 1), 土壤酶活性随着生物有机肥施用量增加而增加。其中, 土壤蔗糖酶活性以 T3 和 T4 处理最强(图 1A), 分别较 CK 处理增加 15.31%、13.21%。与 CK 处理相比, 施用生物有机肥可显著提高土壤过氧化氢酶活性 6.56%~9.38%, 不同施肥量之间的土壤过氧化氢酶活性变化不显著(图 1B)。土壤脲酶和磷酸酶活性随着生物有机肥施用量和施肥模式的不同变化规律一致, 即酶活性随着生物有机肥施用量的增加而增加, T3 处理土壤酶活性最高, 分别为 2.42 mg/(g·d) 和 2.72 mg/(g·d)(图 1C、1D)。综合可见, 施用生物有机肥可明显提高土壤酶活性, 与单施生物有机肥 9.0 t/hm² 相比, 配施无机化肥(T4)可显著增加土壤蔗糖酶活性, 对土壤过氧化氢酶及磷酸酶活性也有一定的促进作用。

表 1 不同施肥处理对土壤养分的影响

Table 1 Effects of different fertilization treatments on soil nutrient contents

处理	pH	全盐 (g/kg)	有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	碱解氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)
CK	9.12 ± 0.1 a	2.53 ± 0.13 a	15.05 ± 0.75 b	1.01 ± 0.02 c	47.00 ± 7.37 b	13.69 ± 0.26 c	241.67 ± 18.33 b
T1	8.90 ± 0.1 b	2.11 ± 0.14 c	16.50 ± 0.30 a	1.05 ± 0.03 bc	52.00 ± 3.21 ab	16.30 ± 0.10 b	250.00 ± 12.58 b
T2	8.92 ± 0.1 b	2.14 ± 0.03 c	16.65 ± 0.05 a	1.13 ± 0.05 ab	54.33 ± 4.33 ab	18.50 ± 0.11 a	258.00 ± 10.00 b
T3	8.79 ± 0.2 bc	2.31 ± 0.05 bc	17.10 ± 0.10 a	1.19 ± 0.03 ab	55.00 ± 3.21 a	19.80 ± 0.26 a	282.67 ± 12.67 a
T4	8.77 ± 0.1 bc	2.42 ± 0.12 ab	16.75 ± 0.35 a	1.27 ± 0.05 a	59.33 ± 2.40 a	18.80 ± 0.80 a	296.00 ± 3.06 a

注: 同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$), 下同。



(图中不同小写字母表示处理间差异在 $P < 0.05$ 水平显著, 下同)

图 1 不同施肥处理对土壤酶活性的影响

Fig. 1 Effects of different fertilization treatments on soil enzyme activities

2.3 土壤微生物生物量变化

土壤微生物生物量是衡量土壤养分和肥力水平的重要指标。如图 2 所示, 生物有机肥不同施用量对土壤微生物生物量影响不同。生物有机肥不同施用量处理中, 以 T3 处理土壤微生物生物量碳含量最高, T1 处理次之, T2 处理最低, 分别较 CK 处理提高 66.78%、43.72% 和 41.12%(图 2A)。土壤微生物生物量氮和磷含量随生物有机肥施用量增加逐渐递增, 与 CK 处理相比, T1、T2、T3 处理土壤微生物生物量氮含量分别显著提高 18.31%、33.41% 和 59.19%(图 2B), T2 和 T3 处理土壤微生物生物量磷含量分别

增加 23.67% 和 51.84%(图 2C)。此外, 在施用 9.0 t/hm² 生物有机肥基础上配施无机化肥(T4)可增加土壤微生物生物量碳、氮、磷含量, 但较 T2 处理差异不显著。

2.4 土壤微生物群落代谢 AWCD 曲线

AWCD 可反映微生物群落总体碳源利用能力和土壤微生物活性, 体现了微生物群落生理功能多样性。各处理 10 d 内 AWCD 值变化曲线如图 3 所示, 微生物碳源利用率随培养时间延长而升高, 不同处理土壤 AWCD 值在培养开始后 24 ~ 72 h 内快速升高, 72 h 后增幅减缓, 培养结束(240 h)时逐渐趋于平稳。

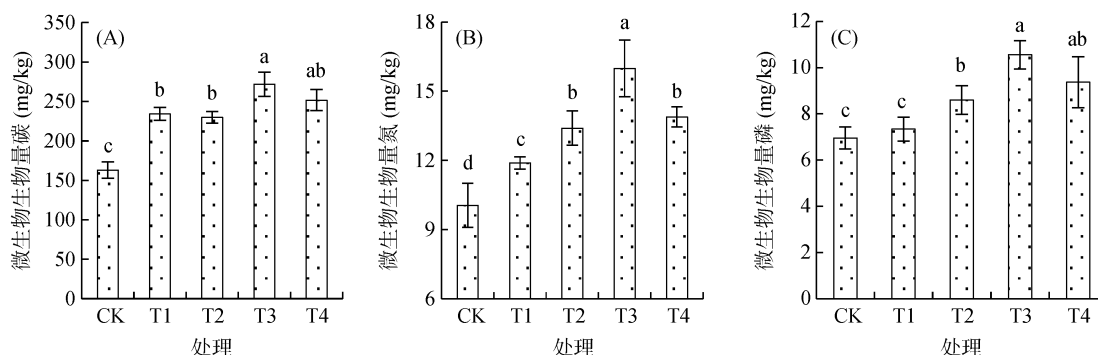


图 2 不同施肥处理对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响

Fig. 2 Effects of different fertilization treatments on soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus contents

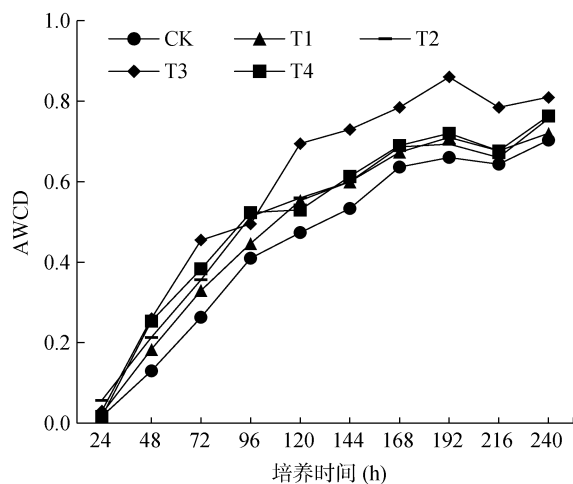


图 3 不同施肥处理对土壤 AWCD 的影响
Fig. 3 Effects of different fertilization treatments on soil AWCD

各施肥处理土壤微生物碳源利用率均高于 CK 处理,且 AWCD 值随着生物有机肥施用量的增加而增加,最高值为 T3 处理培养 192 h 时,AWCD 值为 0.84,整体说明施用生物有机肥及配施无机肥对土壤微生物代谢活性有促进作用。同时,生物有机肥施用 9.0 t/hm² 配施无机化肥 N 360 kg/hm² 时的 AWCD 值高于单施生物有机肥 9.0 t/hm²。

2.5 土壤微生物群落代谢多样性指数

Shannon 指数、Simpson 指数和 McIntosh 指数分别反映土壤微生物物种丰富度、某些最常见物种优势度和群落物种的均匀度。表 2 为 3 种指数(72 h)的计算结果及经比较检验后的差异情况。

经 Tukey 检验分析,0~20 cm 土层土壤微生物种群代谢多样性指数随生物有机肥施用量增加逐渐递增。Shannon、Simpson 和 McIntosh 指数均以 T3 处理最高,其中 Shannon 和 McIntosh 指数较 CK 处理分别显著增加 10.11% 和 62.67%。与 T2 处理相比,T4 处理对提高土壤微生物种群代谢多样性作用不明显。因此,单施生物有机肥及配施无机化肥均对于土壤微生物

表 2 不同施肥处理对土壤微生物群落代谢多样性指数的影响

处理	Shannon 指数	Simpson 指数	Mcintosh 指数
CK	2.77 ± 0.12 b	0.93 ± 0.001 a	2.17 ± 0.32 c
T1	2.80 ± 0.01 b	0.92 ± 0.011 a	2.66 ± 0.33 bc
T2	2.85 ± 0.10 b	0.93 ± 0.08 a	2.92 ± 0.29 ab
T3	3.05 ± 0.03 a	0.94 ± 0.002 a	3.53 ± 0.16 a
T4	2.86 ± 0.02 b	0.93 ± 0.001 a	3.06 ± 0.45 ab

物的物种均匀度存在积极影响,且高量生物有机肥(13.5 t/hm²)施用更利于提升微生物物种的均匀度。

2.6 玉米产量和经济效益变化

作物产量和经济效益是衡量农业生产价值的重要指标。生物有机肥不同施肥量对玉米产量和经济效益的影响差异较大(表 3)。各处理玉米产量和产值均是 T4>T3>T2>T1>CK,与 CK 处理相比,T1~T4 处理产量分别提高 40.88%、78.66%、110.15% 和 126.54%,产值同样提高相应比例。净收入随着生物有机肥施用量增加呈递减趋势,且生物有机肥配施化肥处理的净收入最高,为 8 709 元/hm²,分别比 CK、T1、T2、T3 处理净收入提高 6.86%、15.77%、33.29% 和 81.09%。因此,施用生物有机肥可明显增加玉米产量,提高玉米产值,但是由于生物有机肥成本较高,随着施用量的增加,净收入呈降低趋势,但有机无机配施可在节约成本的基础上提高净收入。

3 讨论

3.1 对土壤养分、酶活性及微生物生物量的影响

本研究表明,施用生物有机肥可明显降低土壤 pH 和全盐含量,可能是因为有机肥在土壤中降解时会产生有机酸从而降低土壤 pH,而全盐含量降低主

表 3 不同施肥处理对玉米产量和经济效益的影响
Table 3 Effects of different fertilization treatments on maize yield and economic benefit

处理	肥料投入 (元/hm ²)	其他投入 (元/hm ²)	产量 (kg/hm ²)	产值 (元/hm ²)	净收入 (元/hm ²)
CK	0	3 525	5 076 ± 113 d	11 675	8 150
T1	5 400	3 525	7 151 ± 186 c	16 447	7 522
T2	10 800	3 525	9 069 ± 182 b	20 859	6 534
T3	16 200	3 525	10 667 ± 344 ab	24 534	4 809
T4	14 214	3 525	11 499 ± 249 a	26 448	8 709

注:生物有机肥 1 200 元/t,尿素 2.8 元/kg,过磷酸钙 3.5 元/kg,硫酸钾 3.8 元/kg;其他投入:机耕费 675 元/hm²、种子费 750 元/hm²、播种费 375 元/hm²、除草剂 225 元/hm²、人工费 300 元/hm²、农药 300 元/hm²、机收费 900 元/hm²;玉米籽粒 2.3 元/kg。

要是因为生物有机肥的施用能够降低土壤电导率,影响土壤水溶性盐分离子组成比例,这与邵翻身等^[18]、邵孝候等^[19]研究结论一致。施用生物有机肥明显提高了土壤养分含量,且随生物有机肥施用量增加呈递增趋势,这与弓萌萌等^[20]、卫婷等^[21]研究结果一致,这是由于生物有机肥本身含有大量的有机物质和未矿化营养元素,长期施用对土壤养分含量有累积效应。卫婷等^[21]认为,生物有机物料的施用可以促进微生物的代谢和繁育,提高土壤酶活性。黄媛媛等^[22]发现,生物有机肥配施化肥分别提高土壤纤维素酶、碱性磷酸酶和脲酶活性。本研究显示,生物有机肥不同施用量土壤酶活性均高于对照处理,这是因为生物有机肥施用提高了土壤 C/N,进而加快土壤微生物繁殖速度,且生物有机肥中本身含有大量功能微生物^[23]。研究还发现,土壤酶活性随生物有机肥施用量增加而提高,这与弓萌萌等^[20]的研究结果“生物有机肥施用量过高,反而会抑制或者降低土壤酶活性”不一致,这是由于土壤活性变化趋势受到肥料类型、土壤类型、生物有机肥施用梯度和施用年限等综合因素的影响。此外,本研究中,土壤微生物生物量碳、氮、磷含量同样随生物有机肥施用量增加而增加,这是由于施用足量生物有机肥不仅能够加速土壤有机质矿化分解,提高土壤养分含量,为土壤微生物提供充足的碳源、氮源^[24],维持较高的土壤微生物量,同时能有效抑制土壤中 NH_3 的挥发及 NO_3^- 的淋失,通过同化作用使较多的氮素迁移到微生物体内进行暂时固定。而磷素以多聚磷酸盐形式富集于土壤中,长期生物有机肥施用有效提高土壤酸度,同时作物根系和微生物对磷素的活化作用造成土壤有效磷含量增加,进而提高土壤微生物生物量磷含量^[25]。

3.2 对土壤微生物代谢活性及多样性的影响

生物有机肥施用可有效提供多种有益营养物质供作物生长发育所需,在一定程度上激活多种功能性微生物和酶的偏嗜性,促进土壤微生物繁殖加快,改善土壤理化性状、微生物种群结构,为植物生长营造一个适宜的生存环境,且土壤微生物群落多样性与肥料种类和施用量有关^[26]。利用 Biolog-ECO 法对微生物多样性分析虽不够全面,但 Biolog-ECO 板 AWCD 值能够反映土壤微生物利用碳源的整体能力及微生物活性,可作为反映土壤微生物代谢活性的重要指标。本研究中,生物有机肥为土壤微生物活动提供了物质和能量,促进其代谢和繁殖,与不施肥处理相比,生物有机肥处理土壤微生物活性均得到有效提高,说明施用生物有机肥更能提高土

壤微生物利用碳底物的持续能力和微生物代谢能力,从而提升其活性^[27-28],这与胡可等^[29]通过对玉米盆栽土壤微生态环境变化的研究发现“生物有机肥处理 AWCD 值始终显著高于对照处理”的结果一致。采用生态学理论中的 3 种经典多样性指数来反映单个样品群落内部物种数量和相对多度,具有数量特征。本研究中选择培养 72 h 时数据进行多样性指数进行分析得出,生物有机肥不同施用量处理下微生物群落多样性与对照处理相比,有升高趋势,但差异性不显著,一方面可能是由于玉米生长后期由营养生长转为生殖生长,根系代谢物减少,随之土壤环境中的碳水化合物、氨基酸等物质减少,导致土壤微生物活动减少^[30-31];另一方面则可能与土壤含水率、氧化还原电位、pH 等理化性质的变化相关^[32]。不同施肥处理对土壤微生物群落代谢多样性指数的影响表明,Shannon 指数、Simpson 指数和 McIntosh 指数都随着有机肥施用量的增加呈现增加趋势,即土壤微生物物种丰富度和微生物群落物种的均匀度均随着有机肥的施用量增加而增加,这与于会雨等^[33]在苹果幼苗土壤上的研究结果一致。

3.3 对玉米产量及经济效益的影响

生物有机肥施用有利于促进土壤有机质含量增加、细菌生长及其调节土壤微生物群落的组成和多样性,对进一步增加土壤养分的有效性、提高土壤肥力和土壤生产力具有重要意义^[34],且这些过程被视作是土壤有效养分的源与汇,通过提高土壤肥力,促进作物生长^[35],进而提高产量,增加收益^[36-37]。李小炜等^[38]研究表明,施用有机肥能显著增加玉米株高、茎粗,且随着有机肥用量的增加,效果越显著。本研究表明,随着生物有机肥施用量增加,玉米籽粒产量和产值呈递增变化,但净收入呈递减变化,这是因为土壤环境随生物有机肥施入量增加逐渐改善,有利于作物生长,进而促进作物产量和产值增加,但生物有机肥单价成本较高,随着生物有机肥投入量增加,成本投入增加幅度较大,导致纯收益降低。此外,有机无机肥料配合施用能够培育土壤肥力,改善土壤生态环境,有益于作物增产增收^[39]。本研究表明,相比单施生物有机肥,生物有机肥与无机肥配施,更有利于提高玉米根系土壤氮、磷养分和酶活性,进而促进玉米生长和产量及经济效益增加,这是因为相比单施生物有机肥,生物有机肥与无机肥配施能调理土壤 C/N 比,有利于土壤微生物活动和土壤酶活性增加,进而加快有机物质分解和矿物质矿化释放营养元素,促进作物生长,产量增加^[40]。

4 结论

长期施用生物有机肥可有效改善耕层土壤环境,提高土壤养分含量、酶活性和土壤微生物生物量,增加土壤微生物群落多样性,进而促进玉米生长和产量增加,且随着生物有机肥施用量增加,其效果越显著。与单施有机肥相比,有机无机配施对土壤养分、微生物活性及玉米产量有明显促进作用。从经济效益分析,以生物有机肥 9.0 t/hm² 配施无机化肥 N 360 kg/hm² 处理的经济效益最高。

参考文献:

- [1] 李艳平, 刘国顺, 丁松爽, 等. 混合有机肥用量对烤烟石油醚提取物和中性致香物质的影响[J]. 江西农业学报, 2016, 28(3): 11–15.
- [2] 李小萌, 陈效民, 曲成闯, 等. 生物有机肥与减量配施化肥对连作黄瓜养分利用率及产量的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(2): 309–317.
- [3] 张久明, 匡恩俊, 刘亦丹, 等. 有机肥替代不同比例化肥对土壤有机碳组分的影响[J]. 麦类作物学报, 2021, 41(12): 1534–1540.
- [4] 林仕芳, 王小利, 段建军, 等. 有机肥替代化肥对旱地黄壤有机碳矿化及活性有机碳的影响[J]. 环境科学, 2022, 43(4): 2219–2225.
- [5] 张淑娜, 林秀颜, 陈曦, 等. 有机肥施用对节水灌溉稻田土壤有机碳及其活性组分的影响[J]. 中国农村水利水电, 2021(5): 21–24, 30.
- [6] 朱利霞, 徐思薇, 陈如冰, 等. 生物有机肥替代化肥对砂姜黑土团聚体及其有机碳变化特征的影响[J]. 山东农业科学, 2021, 53(11): 75–81.
- [7] 石纹瑄, 刘世亮, 赵颖, 等. 猪粪有机肥施用对潮土速效养分含量及团聚体分布的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(5): 431–438.
- [8] 安永齐, 王小利, 靳东升, 等. 有机培肥显著提升矿区复垦土壤活性有机碳含量[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(6): 1117–1125.
- [9] 刘艳, 李波, 隗英华, 等. 生物有机肥对盐碱地玉米渗透调节物质及土壤微生物的影响[J]. 西南农业学报, 2018, 31(5): 1013–1018.
- [10] 何瑞成, 吴景贵. 有机物料对原生盐碱地土壤生物学性质的影响[J]. 土壤学报, 2018, 55(3): 774–782.
- [11] 张宇冲, 何思蓓, 高灵会, 等. 生物有机肥对芦笋土壤酶活性及细菌群落的影响[J]. 北方园艺, 2019(12): 83–91.
- [12] 王宇峰, 孟会生, 李廷亮, 等. 培肥措施对复垦土壤微生物碳氮代谢功能多样性的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(24): 81–90.
- [13] 陈琳, 谷洁, 胡婷, 等. 生物有机肥对板栗土壤微生物群落代谢活性的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(6): 1627–1632.
- [14] 李玉, 田宪艺, 王振林, 等. 有机肥替代部分化肥对滨海盐碱地土壤改良和小麦产量的影响[J]. 土壤, 2019, 51(6): 1173–1182.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [16] 温延臣, 张曰东, 袁亮, 等. 商品有机肥替代化肥对作物产量和土壤肥力的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(11): 2136–2142.
- [17] 郭莹, 王一明, 巫攀, 等. 长期施用粪肥对水稻土中微生物群落功能多样性的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2019, 25(3): 593–602.
- [18] 邵翻身, 崔志祥, 樊润威, 等. 有机物料对盐碱化土壤的改良作用[J]. 土壤通报, 1997, 28(1): 9–11.
- [19] 邵孝候, 张宇杰, 常婷婷, 等. 生物有机肥对盐渍土壤水盐动态及番茄产量的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(2): 153–160.
- [20] 弓萌萌, 王红, 张雪梅, 等. 不同有机肥施用量对苹果园土壤养分及酶活性的影响[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(3): 74–78, 97.
- [21] 卫婷, 韩丽娜, 韩清芳, 等. 有机培肥对旱地土壤养分有效性和酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(3): 611–620.
- [22] 黄媛媛, 马慧媛, 黄亚丽, 等. 生物有机肥和化肥配施对冬小麦产量及土壤生物指标的影响[J]. 华北农学报, 2019, 34(6): 160–169.
- [23] 梁路, 马臣, 张然, 等. 有机无机肥配施提高旱地麦田土壤养分有效性及酶活性[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(4): 544–554.
- [24] 胡诚, 曹志平, 罗艳蕊, 等. 长期施用生物有机肥对土壤肥力及微生物生物量碳的影响[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(3): 48–51.
- [25] 李春越, 郝亚辉, 薛英龙, 等. 长期施肥对黄土旱塬农田土壤微生物量碳、氮、磷的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(8): 1783–1791.
- [26] 徐敏, 张翔, 何雷, 等. 烟田施用不同有机肥对土壤特性和烟叶产质量的影响[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(5): 147–150, 184.
- [27] Bowles T M, Acosta-Martínez V, Calderón F, et al. Soil enzyme activities, microbial communities, and carbon and nitrogen availability in organic agroecosystems across an intensively-managed agricultural landscape[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 68: 252–262.
- [28] Kotrocó Z, Veres Z, Fekete I, et al. Soil enzyme activity in response to long-term organic matter manipulation[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 70: 237–243.
- [29] 胡可, 王琳, 秦俊梅. 菌肥与有机无机肥配施对石灰性土壤生化作用强度和微生物数量的影响[J]. 河南农业科学, 2015, 44(10): 76–80.
- [30] Chaparro J M, Sheflin A M, Manter D K, et al. Manipulating the soil microbiome to increase soil health and plant fertility[J]. Biology and Fertility of Soils, 2012, 48(5): 489–499.
- [31] Qiu M H, Zhang R F, Xue C, et al. Application of bio-organic fertilizer can control *Fusarium* wilt of cucumber plants by regulating microbial community of rhizosphere soil[J]. Biology and Fertility of Soils, 2012, 48(7): 807–816.

- [32] Ling N, Zhu C, Xue C, et al. Insight into how organic amendments can shape the soil microbiome in long-term field experiments as revealed by network analysis[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 99: 137–149.
- [33] 于会丽, 徐变变, 徐国益, 等. 生物有机肥对苹果幼苗生长、生理特性以及土壤微生物功能多样性的影响[J]. *中国农学通报*, 2022, 38(1): 32–38.
- [34] 王幸, 邢兴华, 徐泽俊, 等. 耕作方式和秸秆还田对黄淮海夏大豆产量和土壤理化性状的影响[J]. *中国油料作物学报*, 2017, 39(6): 834–841.
- [35] 王军. 蓄水单坑灌施条件下不同土温和水温对土壤水氮运移规律的影响[D]. 太原: 太原理工大学, 2015.
- [36] 张奇. 生物有机肥对贫瘠土壤养分及生物性状的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2020.
- [37] 左达, 郭鹏飞, 孙权. 有机肥施用量对酿酒葡萄产量品质及经济效益的影响[J]. *江苏农业科学*, 2020, 48(20): 137–141.
- [38] 李小伟, 白春梅, 田丽, 等. 榆林沙区玉米水肥一体化有机无机肥配施对玉米产量及土壤性状的影响[J]. *陕西农业科学*, 2018, 64(8): 77–80.
- [39] 王珍, 冯浩, 吴普特, 等. 土壤扩蓄增容肥对春玉米产量及水分利用效率的影响[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(11): 114–119.
- [40] 罗洋, 郑金玉, 郑洪兵, 等. 有机无机肥料配合施用对玉米生长发育及产量的影响[J]. *玉米科学*, 2014, 22(5): 132–136.