

生物有机肥部分替代化肥对莴笋及土壤理化性质和微生物的影响

张迎春, 颌建明, 李 静, 牛天航, 夏国栋, 毛振宇, 王庆玲, 陈艺易

(甘肃农业大学园艺学院, 兰州 730070)

摘要: 以莴笋为试材,通过田间试验,以不施肥(CK)和常规施肥(CF)为对照,研究常规施肥总施肥量减量20%(F₁)和30%(F₂),配施3 000 kg/hm²(B₁),6 000 kg/hm²(B₂)生物有机肥对莴笋干物质积累、养分吸收、肥料利用率及土壤理化性质和土壤微生物数量的影响,为莴笋合理施肥提供科学依据。结果表明,与CF相比,F₁B₂处理莴笋根、茎、叶干物质积累量分别增加5.74%,22.19%和17.82%,氮、磷、钾养分积累量分别提高128.81%,113.19%和23.15%。化肥减量配施生物有机肥使氮、磷、钾肥的吸收利用率、农学利用率和偏生产力均显著提高,常规施肥的土壤氮素、磷素、钾素依存率均最高。生物有机肥显著提高土壤养分含量,F₁B₂和F₂B₂处理土壤有机质含量比CF处理分别增加71.65%和58.51%,全氮、磷、钾含量分别增加84.53%,75.41%,19.94%和70.17%,72.13%,9.28%,碱解氮、速效磷和速效钾含量分别增加75.90%,17.06%,24.35%和42.94%,13.48%,11.42%。生物有机肥部分替代化肥可增加莴笋根际土壤细菌数和放线菌数,抑制真菌的生长。同CF相比,F₁B₂处理的好氧自生固氮菌、厌氧自生固氮菌、硝化细菌和反硝化细菌的数量分别增加了1.36,6.10,47.50,23.76倍。细菌数量与有机质、碱解氮、速效磷、全氮含量呈显著正相关性,放线菌数量与全磷含量呈显著正相关,固氮菌和氮转化细菌的数量与碱解氮、全氮含量呈显著或极显著正相关。主成分分析综合得分表明,不同施肥处理土壤肥力次序为F₁B₂>F₂B₂>F₁B₁>F₂B₁>CF>CK。生物有机肥部分替代化肥不仅能提高莴笋养分积累量和肥料利用率,还能显著提高土壤养分含量,调节土壤微生物结构,改善莴笋根际土壤理化性状,综合对莴笋养分吸收积累和肥料利用效率的提高及土壤的培肥效果,F₁B₂处理最好,是实现肥料资源合理利用和改善土壤环境的良好施肥模式。

关键词: 莴笋; 生物有机肥; 干物质积累; 肥料利用率; 土壤微生物; 土壤理化性质

中图分类号: S636.9

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)04-0196-10

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.04.028

Effects of Partial Substitution of Chemical Fertilizer by Bio-organic Fertilizer on Asparagus Lettuce and Soil Physical-chemical Properties and Microorganisms

ZHANG Yingchun, XIE Jianming, LI Jing, NIU Tianhang,

XIA Guodong, MAO Zhenyu, WANG Qingling, CHEN Yiyi

(College of Horticulture, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070)

Abstract: A field experiment was conducted using asparagus lettuce as test material to study the effects of different fertilizer combinations on dry matter accumulation, nutrients absorption, fertilizer use efficiency, soil physical-chemical properties and soil microbial quantity, which could provide the scientific basis for reasonable fertilization of asparagus lettuce. The experiment used a completely randomized block design to set a conventional fertilization (CF), reduction of 20% (F₁) and 30% (F₂) and combined with 3 000 kg/hm² (B₁) and 6 000 kg/hm² (B₂) bio-organic fertilizer. The results showed that compared with the CF, the accumulations of dry matter in roots, stems and leaves of F₁B₂ treatment were increased by 5.74%, 22.19% and 17.82%, respectively, and the accumulations of N, P and K nutrients were increased by 128.81%, 113.19% and 23.15%, respectively. The reduction of fertilizer combined with bio-organic fertilizer could significantly improve the fertilizer use efficiency, agronomic efficiency and partial factor productivity of N, P and K fertilizers. The soil N, P and K dependent rates of CF were the highest. The application of bio-organic fertilizer could significantly increase soil nutrients contents. Compared with CF, the contents of soil organic

收稿日期: 2019-02-04

资助项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0201005); 甘肃省引导科技创新发展专项(2018ZX-02); 甘肃省科技重大专项(17ZD2NA015)

第一作者: 张迎春(1992—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事设施蔬菜栽培生理与生长调控研究。E-mail: 1334200316@qq.com

通信作者: 颌建明(1970—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事蔬菜学和设施农业研究。E-mail: xiejianming@gsau.edu.cn

matter, total N, P, K and alkaline N, available P and available K were increased by 71.65%, 84.53%, 75.41%, 19.94%, 75.90%, 17.06% and 24.35% respectively in F_1B_2 , and were increased by 58.51%, 70.17%, 72.13%, 9.28%, 42.94%, 13.48% and 11.42% respectively in F_2B_2 . The combination of chemical fertilizer and bio-organic fertilizer could increase the number of bacteria and actinomycetes in the soil of asparagus lettuce, and inhibit the growth of fungi. Compared with CF, the number of aerobic azotobacter, anaerobic azotobacter, nitrifying bacteria and denitrifying bacteria were increased by 1.36, 6.10, 47.50 and 23.76 times, respectively in F_1B_2 . The number of bacteria was significantly positively correlated with the contents of organic matter, alkaline N, available P and total N. There was a significant positive correlation between the number of actinomycetes and the contents of total P. The number of azotobacters and nitrogen transformational bacteria showed a significant or extremely significant positive correlation with the contents of alkaline N and total N. According to the principal component analysis and comprehensive scores, the soil quality under different fertilization treatments with the following sequence of F_1B_2 , F_2B_2 , F_1B_1 , F_2B_1 , CF and CK. The partial substitution of chemical fertilizer by bio-organic fertilizer could not only improve the amount of asparagus lettuce's nutrients accumulation and fertilizer use efficiency, but also significantly increase the contents of soil nutrients, regulate the structure of soil microbial community, and improve soil physical and chemical properties. In summary, the partial substitution of chemical fertilizer by bio-organic fertilizer had a good effect on the nutrients accumulation of asparagus lettuce, and could improve the fertilizer use efficiency and soil fertility. The F_1B_2 was a good fertilization mode with a rational use of fertilizer resources and improved soil environment.

Keywords: asparagus lettuce; bio-organic fertilizer; dry matter accumulation; fertilizer use efficiency; soil microorganism; soil physical-chemical properties

蔬菜是人们日常最基本的食物之一,在我国居民饮食中占据重要地位,蔬菜生产也已发展成农民重要的经济来源和农业重要的经济支柱^[1]。近年来,我国蔬菜产业发展迅速,形成良好的供应市场^[1],但随着蔬菜栽培年限的增长,以及农民为求高产的不合理施肥措施,严重制约着蔬菜产业的可持续发展^[2]。施肥是保证作物生长养分需求和提高产量的物质基础,但农民对产量盲目追求,致使化肥过量施用的问题日渐突显^[3]。在蔬菜生产中不仅过量施肥问题普遍,而且氮磷钾施用比例严重失调^[4]。化肥过量施用是造成资源浪费、环境污染和肥料利用效率降低的主要原因^[5],同时导致土壤理化性状发生改变,进而造成土壤板结、土壤养分失调、土壤肥力下降,并且增加温室气体向环境中排放等一系列问题^[6]。因而,减少化肥用量、生物有机肥部分替代和依据作物需肥规律施肥,是提高作物产量、高效利用资源和保护环境的重要途径^[7]。生物有机肥中含有大量活菌及各种生物活性物质,能快速活化土壤养分,有效改善根际生态环境,为作物提供营养元素。有研究^[8]表明,施用生物有机肥能够改善土壤理化性状,提高土壤肥力,改善土壤微生物群落结构^[9],通过优化根际环境促进作物生长,进而实现作物增产^[10]。施用适量的有机肥有利于减少 N_2O 和 CO_2 等温室气体的排放^[11]。

莴笋(*Lactuca sativa* Var. *Angustana*)是一种生

长周期较短的作物,生长前期养分需求量较大,但生物有机肥肥效缓慢,前期养分供应能力不足,单施生物有机肥无法满足其生长需求,因此需有机肥和化肥配合施用,同时也能有效解决上述问题。生物有机肥兼具菌肥和有机肥的双重功效,部分替代化肥对作物产量、品质以及土壤肥力均有明显促进作用,已成为目前相关研究的重点。近年来,已有一些学者研究了生物有机肥部分替代化肥对土壤理化性状和微生物的影响,如温延臣等^[12]在探究有机肥替代化肥对土壤肥力的影响时发现,与单施化肥相比,连续 3 年有机肥部分替代化肥施用后,土壤全氮和有机质含量显著提高。有研究^[13]表明,化肥与生物有机肥配施增产效果显著,并提高土壤中有效养分含量。陶磊等^[14]研究发现,有机肥部分替代化肥在调节土壤微生物群落结构和改善土壤性状方面有显著作用。土壤微生物则集中于对三大类微生物的研究,宋以玲等^[15]的研究结果表明,化肥减量配施生物有机肥增加油菜根际土壤细菌和放线菌数量,降低真菌数量。有机肥部分替代化肥对作物产量、品质和肥料吸收利用率及土壤性状方面的研究较多,而生物有机肥部分替代化肥对土壤功能微生物及对土壤质量综合评价鲜有报道。本文通过大田试验,研究生物有机肥部分替代化肥对莴笋养分利用、土壤理化性状和根际土壤微生物数量的影响,旨在为莴笋田间生产提供科学合

理的施肥方案。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试作物为尖叶茼蒿,采用垄面覆膜一垄双行栽培,垄宽 50 cm,沟宽 30 cm,株距 35 cm。供试土壤 pH 6.57,EC 426.85 $\mu\text{S}/\text{cm}$,有机质含量 15.73 g/kg,碱解氮、速效钾和速效磷的含量分别为 86.63,139.67,91.60 mg/kg。供试肥料为过磷酸钙(P_2O_5 16%)、尿素(N46%)和硫酸钾(K_2O 52%),供试生物有机肥由甘肃绿能农业科技股份有限公司生产,有机质含量 40%,腐殖酸含量 25%,有效活菌数 0.2 亿/g,氮、磷、钾总含量为 5%。生物有机肥作基肥在茼蒿播种前一次性施入,化肥分 3 次追施。

1.2 试验设计

试验于 2017 年 12 月 20 日至 2018 年 5 月 10 日在天水市武山县洛门镇王家庄村一农户塑料大棚内进行,试验选用大棚长 42.5 m,宽 9.5 m,面积为 406 m^2 。试验采用两因素随机区组设计,设化肥减施 20%(F_1)和化肥减施 30%(F_2)2 个水平,设配施生物有机肥 3 000 kg/hm^2 (B_1)和配施生物有机肥 6 000 kg/hm^2 (B_2)2 个水平,不施肥(CK)和常规施肥(CF)2 个对照,共 6 个处理,各处理重复 3 次,随机排列,共计 18 个小区,面积 22 m^2 。其中化肥减施 20%和 30%均是在常规施肥总量的基础上减施,即化肥施肥总量较常规施肥总量减施 20%(N 减施 17%, P_2O_5 减施 18%, K_2O 减施 25.5%);化肥施肥总量较常规施肥总量减施 30%(N 减施 30%, P_2O_5 减施 26%, K_2O 减施 35%),具体施肥量见表 1。茼蒿采用直播方式,于 2017 年 12 月 20 日播种,田间管理措施均与当地农民习惯保持一致。

表 1 不同处理施肥量 单位:kg/hm²

处理	肥料用量			
	尿素	过磷酸钙	硫酸钾	生物有机肥
CK	0	0	0	0
CF	772.5	634.5	634.5	0
F ₁ B ₁	640.5	520.5	472.5	3000
F ₁ B ₂	640.5	520.5	472.5	6000
F ₂ B ₁	541.5	469.5	412.5	3000
F ₂ B ₂	541.5	469.5	412.5	6000

1.3 测定项目与方法

1.3.1 干物质和养分测定 于茼蒿成熟期采取植株样品,将采集的 3 株茼蒿按不同器官(根、茎、叶)分开,分别称鲜重后装信封袋,置于烘箱内 105 $^{\circ}\text{C}$ 杀青 30 min,然后在 80 $^{\circ}\text{C}$ 条件下烘干至恒重,称量各部位干重。用粉碎机将烘干的样品粉碎后过筛,采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{—H}_2\text{O}_2$ 法消煮,全氮采用全自动凯氏定氮仪

(K1100)测定,全磷采用钼锑抗比色法测定(TU—1900),全钾采用火焰光度法测定(API302)^[16]。

1.3.2 根际土壤各项指标测定 在茼蒿成熟期采集各小区 0—20 cm 耕层土壤,清除地被物后按“S”形布点法用土钻取土,剔除石砾和植物残根等杂物,混合均匀后迅速装入灭菌的采样袋中,带回实验室后一部分样品立即进行土壤微生物数量测定;另一部分样品自然风干后研磨过筛,用于土壤养分的测定。

有机质含量采用重铬酸钾容量法测定,碱解氮含量采用碱解扩散法测定,速效磷含量采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法测定,速效钾含量采用乙酸铵浸提—火焰光度法测定^[16]。

细菌、真菌、放线菌和好氧自生固氮菌采用平板培养法,硝化细菌、反硝化细菌和厌氧自生固氮菌采用最大或然数法。细菌采用营养琼脂培养基,真菌采用马丁(Martin)培养基,放线菌采用改良高氏 I 号培养基,好氧自生固氮菌采用阿须贝(Ashby)培养基。硝化细菌用格里斯试剂、二苯胺试剂显色,反硝化细菌用奈氏试剂、格里斯试剂、二苯胺试剂显色,厌氧自生固氮菌观察气泡及测定丁酸的生成^[17]。

1.4 计算方法^[18]

吸收利用率(RE ,%)=(施肥区地上部养分吸收量—不施肥区地上部养分吸收量)/施肥量 $\times 100\%$

农学利用率(AE ,kg/kg)=(施肥区产量—不施肥区产量)/施肥量

偏生产力(PFP ,kg/kg)=施肥区产量/施肥量

土壤养分依存率(SDR ,%)=不施肥区地上部养分吸收量/施肥区地上部养分吸收量 $\times 100\%$

1.5 数据处理

数据处理和统计分析在 Microsoft Excel 2010 和 SPSS 17.0 软件中进行。

2 结果与分析

2.1 生物有机肥部分替代化肥对茼蒿干物质积累与分配的影响

表 2 为化肥减量配施生物有机肥对茼蒿干物质积累及分配的影响。各施肥处理相对于 CK,茼蒿全株干物质积累量均显著增加($P<0.05$)。随着化肥用量的减少,各施肥处理茼蒿干物质积累先增大后减小,其中 F_1B_2 干物质积累最多,为 5 846.68 kg/hm^2 ,与 CF 相比,增加 18.39%,根、茎、叶分别增加 5.74%,22.19%和 17.82%。当化肥减量相同时, F_1B_2 干物质积累量比 F_1B_1 增加 10.00%, F_2B_2 干物质积累量为 4 894.16 kg/hm^2 ,比 F_2B_1 增加 7.58%。

各处理叶中干物质积累量变化与植株总干物质积累量变化相似。在相同生物有机肥施用量下,化肥

减施 20% 的处理叶片干物质积累显著高于减量 30% 的处理。F₁B₂ 处理叶片干物质积累最大,F₁B₁ 次之,F₁B₂ 较 F₁B₁ 增加 7.00%。茼蒿笋茎中干物质积累以 F₁B₂ 最大,显著高于其他各施肥处理。相比于 F₁B₂,F₁B₁ 茎干物质积累量显著下降,与 F₂B₂ 相比,F₂B₁ 茎干物质积累也显著下降。茼蒿笋根系干物质积累以 F₂B₂ 最高,F₁B₂ 次之,两者之间无显著差异,并显著高于其他各施肥处理。

由表 2 可知,茼蒿笋干物质分配比例以茎最高,叶片次之,根系最小。其中 F₁B₂ 处理茼蒿笋各部位干物

质分配情况以茎所占比例较大为 46.82%,其次是叶占 42.78%,根系占 10.40%。植株茎中干物质分配比例均在 45% 以上,各处理无明显差异,其中 F₁B₂ 最大,F₂B₂ 次之。各施肥处理叶片干物质分配以 F₁B₁ 处理最大,为 43.97%,较 CF 提高了 2.30%。F₁B₁ 与 F₂B₁、F₁B₂ 与 F₂B₂ 相比,前者叶片分配率大于后者,且 F₁B₁ 与 F₂B₁ 差异显著。根系干物质分配比例以 F₂B₂ 最高,为 12.53%。各施肥处理根系干物质分配与叶片干物质分配变化趋势相反,F₂B₁ 较 F₁B₁,F₂B₂ 较 F₁B₂ 分别提高 12.07% 和 20.48%。

表 2 生物有机肥部分替代化肥对茼蒿笋干物质积累和分配比例的影响

处理	总积累量/ (kg·hm ⁻²)	叶		茎		根	
		干重/ (kg·hm ⁻²)	分配率/%	干重/ (kg·hm ⁻²)	分配率/%	干重/ (kg·hm ⁻²)	分配率/%
CK	3796.29±64.35e	1622.94±32.33f	42.75±0.66ab	1741.72±58.42e	45.87±0.97a	431.63±9.27d	11.38±0.40cd
CF	4938.34±111.62c	2122.70±59.59c	42.98±0.76ab	2240.60±85.13cd	45.36±0.99a	575.04±10.08b	11.65±0.43bc
F ₁ B ₁	5315.19±78.60b	2337.32±71.57b	43.97±1.01a	2401.20±52.43b	45.18±0.94a	576.68±8.15b	10.85±0.07de
F ₁ B ₂	5846.68±46.87a	2500.93±23.98a	42.78±0.75ab	2737.72±66.68a	46.82±0.77a	608.03±4.55a	10.40±0.06e
F ₂ B ₁	4549.25±106.28d	1898.48±22.95e	41.75±0.85b	2097.81±86.56d	46.10±0.90a	552.95±11.92c	12.16±0.06ab
F ₂ B ₂	4894.16±13.74c	2017.43±44.90d	41.22±0.81b	2263.47±30.37bc	46.25±0.75a	613.26±6.29a	12.53±0.13a

注:表中所列数据为平均值±标准差;同列不同字母表示各处理差异显著(P<0.05)。下同。

2.2 生物有机肥部分替代化肥对茼蒿笋养分积累与分配的影响

各处理不同器官的养分积累量及分配率见表 3。所有施肥处理的氮、磷、钾素积累量均高于不施肥处理,肥料对茼蒿笋养分吸收的促进作用明显。与单施化肥相比,配施生物有机肥的处理茼蒿笋各器官氮素积累量均显著提高。各施肥处理茼蒿笋叶片中氮素的积累量随着化肥用量的减少先增加后减小,表现为 F₁B₂>F₁B₁>F₂B₂>F₂B₁>CF,且各处理间差异显著。配施生物有机肥的各处理茎中氮素积累量以 F₁B₂ 最高,较 CF 提高了 42.21 kg/hm²,其余处理(F₁B₁、F₂B₂、F₂B₁)间无显著差异。根系氮素积累量以 F₂B₁ 最高,F₂B₂ 次之,分别较 CF 提高 5.11,4.75 kg/hm²。茼蒿笋各处理氮素分配比例在各器官中表现为叶>茎>根。叶片氮素分配率以 CK 最大,F₂B₁ 最小。茎中氮素分配比例与叶中变化趋势相反,F₂B₁ 最大,较 CF 提高 46.09%。

施用生物有机肥处理茼蒿笋各器官中磷素积累量均显著高于单施化肥处理。与叶片中氮素积累量表现趋势相似,叶片中磷素积累量以 F₁B₂ 最高,F₁B₁ 次之,两者无显著差异,较 CF 分别增加 70.63% 和 67.71%。在同一生物有机肥水平下,F₁B₁ 与 F₂B₁、F₁B₂ 与 F₂B₂ 相比,前者茎中磷素积累量显著高于后者。配施生物有机肥的各处理根系磷素积累量以 F₁B₂ 最高,F₂B₂ 其次,各处理间无显著差异,但均显著高于 CF 处理。所有处理各器官磷素分配率均为茎

最高,叶片次之,根系最小。与 CF 相比,各配施生物有机肥的处理叶片中磷素分配率均显著下降。化肥减量并配施生物有机肥的各处理茎中磷素分配率均显著高于 CF 处理,其中 F₂B₁ 最高,为 67.83%。不施肥处理根中磷素分配较多,CK 处理根系中磷素分配率显著高于施肥处理。

与 CF 相比,F₁B₁ 处理叶片钾素积累量提高 34.63%,F₁B₂ 处理提高 19.59%。在生物有机肥施用量相同的条件下,茼蒿笋叶片中钾素积累量均以化肥减量 20% 的处理高于减量 30% 的处理,且差异显著。茎中钾积累量 F₁B₂ 最高,为 135.17 kg/hm²。F₁B₁ 与 F₂B₁、F₁B₂ 与 F₂B₂ 相比,前者茎中钾素积累量均高于后者。各施肥处理根系钾素积累量除 F₂B₁ 外,其余处理无显著差异。从不同器官钾素分配率来看,均以茎分配率最高,叶其次,根最小。叶片钾素分配率 CK 最大,F₁B₁ 次之,两者之间差异不显著。F₁B₂ 与 F₂B₁ 叶片钾素分配率较 CF 有所下降,但差异不显著。茎中钾素分配率以 F₂B₁ 最大,F₁B₂ 次之,两者无显著差异,并显著高于其余处理,较 CF 分别提高 10.67% 和 6.25%。茼蒿笋根系钾素分配率 CF 处理和 F₂B₂ 处理显著高于其余处理,为 10.67% 和 10.38%。

2.3 生物有机肥部分替代化肥对茼蒿笋氮磷钾养分利用率的影响

2.3.1 生物有机肥部分替代化肥对茼蒿笋氮素利用效率的影响 从表 4 可以看出,不同施肥处理下,茼蒿植株氮肥吸收利用率以 F₂B₂ 最大,其次为 F₁B₂,CF

最小,但 F₁B₂与 F₂B₂差异不显著,两者均显著高于 CF 处理,分别提高 14.35 和 13.76 个百分点。在化肥施用量相同的条件下,配施生物有机肥的各处理氮肥吸收利用率表现为 F₁B₂>F₁B₁,F₂B₂>F₂B₁,随着生物有机肥用量的增加而提高。氮肥农学利用率为 22.17~53.62 kg/kg,与氮肥吸收利用率变化趋势基本一致。在相同生物有机肥施用水平下,化肥

减量 30%的处理氮肥农学利用率均高于减量 20%的处理。配施生物有机肥的处理较 CF 处理显著提高了氮肥偏生产力。氮肥偏生产力也表现出与氮肥吸收利用率相同的规律,F₁B₂处理氮肥偏生产力较 F₁B₁处理增加 10.07%,F₂B₂处理较 F₂B₁处理增加 6.68%。土壤氮素依存率表现为 CF>F₂B₁>F₂B₂>F₁B₁>F₁B₂。

表 3 生物有机肥部分替代化肥对莴笋养分积累量和分配率的影响

养分	处理	叶		茎		根	
		积累量/ (kg·hm ⁻²)	分配率/%	积累量/ (kg·hm ⁻²)	分配率/%	积累量/ (kg·hm ⁻²)	分配率/%
N	CK	25.85±0.55f	89.26±0.67a	1.49±0.15d	5.16±0.58e	1.61±0.05e	5.58±0.21a
	CF	39.36±1.10e	59.32±0.53b	24.44±1.53c	36.79±0.95d	2.57±0.31d	3.88±0.56b
	F ₁ B ₁	74.99±2.03b	53.94±0.46c	58.88±1.31b	42.36±0.61c	5.16±0.62c	3.70±0.35b
	F ₁ B ₂	79.09±1.99a	52.09±1.36d	66.65±2.46a	43.88±1.05bc	6.12±0.59b	4.02±0.33b
	F ₂ B ₁	61.97±0.19d	47.08±0.84f	62.02±2.35b	47.09±0.88a	7.68±0.10a	5.83±0.06a
	F ₂ B ₂	68.32±2.21c	49.53±0.89e	62.26±0.30b	45.16±0.58b	7.32±0.49a	5.31±0.39a
P	CK	2.30±0.10e	43.24±1.26a	2.37±0.13e	44.52±1.26e	0.65±0.03b	12.24±0.87a
	CF	4.80±0.33d	36.83±0.34b	7.58±0.64d	58.12±1.07d	0.66±0.12b	5.04±0.85c
	F ₁ B ₁	8.05±0.19a	32.01±0.88c	15.64±0.31b	62.18±0.98c	1.46±0.10a	5.81±0.39bc
	F ₁ B ₂	8.19±0.34a	29.48±0.40d	17.98±0.70a	64.68±0.17b	1.63±0.14a	5.84±0.36bc
	F ₂ B ₁	5.33±0.11c	25.18±0.44e	14.36±0.32c	67.83±0.64a	1.48±0.16a	6.98±0.59b
	F ₂ B ₂	6.82±0.18b	30.16±0.74d	14.24±0.38c	62.98±1.30bc	1.55±0.21a	6.86±0.80b
K	CK	62.09±3.23d	44.06±1.32a	67.57±2.12e	48.00±1.59b	11.18±0.57c	7.94±0.32b
	CF	82.18±3.67c	39.58±0.82bc	103.40±6.90d	49.75±1.22b	22.13±0.55a	10.67±0.46a
	F ₁ B ₁	110.64±6.10a	41.97±1.19ab	129.60±2.69ab	49.22±1.06b	23.18±0.53a	8.80±0.13b
	F ₁ B ₂	98.28±2.24b	38.44±0.08c	135.17±4.03a	52.86±0.78a	22.35±3.21a	8.70±0.97b
	F ₂ B ₁	80.28±1.99c	37.05±1.12c	119.60±8.19bc	55.06±0.93a	17.16±1.45b	7.89±0.28b
	F ₂ B ₂	86.46±1.32c	39.61±1.42bc	109.42±6.85cd	50.02±1.47b	22.67±0.69a	10.38±0.05a

表 4 生物有机肥部分替代化肥莴笋氮素利用指标

处理	吸收利用率 NRE/%	农学利用率 NAE/ (kg·kg ⁻¹)	偏生产力 NPFP/ (kg·kg ⁻¹)	土壤氮素 依存率 SNDR/%
CK	—	—	—	—
CF	4.72±0.38d	22.17±0.67d	139.38±4.38e	42.94±2.25a
F ₁ B ₁	16.63±0.53c	34.74±1.28c	176.11±5.75d	20.44±0.78bc
F ₁ B ₂	18.48±0.48ab	52.47±0.47a	193.84±4.94c	18.77±0.60c
F ₂ B ₁	17.85±0.52b	39.79±1.07b	207.01±6.36b	22.07±0.74b
F ₂ B ₂	19.07±0.41a	53.62±0.56a	220.83±5.85a	20.94±0.37bc

2.3.2 生物有机肥部分替代化肥对莴笋磷素利用效率的影响 由表 5 可知,莴笋不同处理间磷肥吸收利用率和磷肥农学利用率均以 F₁B₂处理最高,较最低的 CF 处理分别增加 241.32%和 139.24%。在相同生物有机肥施用量下,F₁B₁处理与 F₂B₁处理,F₁B₂处理与 F₂B₂处理,前者磷肥吸收利用率显著高于后者,说明化肥减量 20%并配施生物有机肥有利于提高磷肥吸收利用率。在相同化肥施用水平下,随着生物有机肥施用量的增加,莴笋磷肥农学效率也随之增加。施用生物有机肥较常规施肥(CF)处理显著提高莴笋磷肥偏生产力,其中 F₂B₂处理较 CF 处理增加 50.10%。F₁B₂与 F₂B₁处理间磷肥偏生产力差异不显著,但二者均显著高于 F₁B₁处理。与 CF 相比,配施生物有机肥的各

处理土壤磷素依存率均有所降低,其中以 F₁B₂最小,F₁B₁、F₂B₁、F₂B₂处理间无显著差异。

表 5 生物有机肥部分替代化肥莴笋磷素利用指标

处理	吸收利用率 PRE/%	农学利用率 PAE/ (kg·kg ⁻¹)	偏生产力 PPFP/ (kg·kg ⁻¹)	土壤磷素 依存率 SPDR/%
CK	—	—	—	—
CF	1.21±0.17d	26.99±0.82e	169.69±5.33d	38.13±4.04a
F ₁ B ₁	3.65±0.01b	42.75±1.58d	216.71±7.08c	19.75±0.72bc
F ₁ B ₂	4.13±0.23a	64.57±0.58a	238.53±6.08b	17.93±1.37c
F ₂ B ₁	3.20±0.09c	45.90±1.24c	238.75±7.34b	23.77±1.11b
F ₂ B ₂	3.49±0.12bc	61.84±0.64b	254.70±6.74a	22.24±1.29bc

2.3.3 生物有机肥部分替代化肥对莴笋钾素利用效率的影响 各施肥处理钾肥吸收利用率以 F₁B₁处理最大,F₁B₂处理次之,CF 处理最小,且 F₁B₁显著高于 CF 处理,与 F₁B₂处理间差异不显著(表 6)。F₁B₁处理钾肥吸收利用率较 F₂B₁处理增加 37.49%,F₂B₂处理较 F₂B₁处理增加 36.88%。莴笋各处理钾肥农学利用率以 F₁B₂处理最大,显著大于除 F₂B₂之外的其他各处理。化肥减量水平相同时,施用 6 000 kg/hm²生物有机肥的处理较施用 3 000 kg/hm²生物有机肥的处理均显著提高莴笋钾肥农学利用率,其中 F₁B₂处理较 F₁B₁处理增幅为 51.02%。生物有机

肥配施化肥减量处理下,钾肥偏生产力均显著高于 CF 处理。配施生物有机肥的各处理钾肥偏生产力表现为 $F_2B_2 > F_2B_1 > F_1B_2 > F_1B_1$ 。CF 处理土壤钾素依存率显著高于配施生物有机肥的各处理。配施生物有机肥的各处理土壤钾素依存率以 F_2B_2 最大, F_2B_1 次之, F_1B_2 和 F_1B_1 最小,且 F_1B_2 和 F_1B_1 之间差异不显著。

表 6 生物有机肥部分替代化肥茼蒿笋钾素利用指标

处理	吸收利用率 KRE/%	农学利用率 KAE/ (kg·kg ⁻¹)	偏生产力 KPFP/ (kg·kg ⁻¹)	土壤钾素 依存率 SKDR/%
CK	—	—	—	—
CF	8.81±1.24c	26.99±0.82d	169.69±5.33d	69.99±2.72a
F ₁ B ₁	23.40±1.03a	47.10±1.74c	238.73±7.80c	53.98±0.88c
F ₁ B ₂	21.97±0.68a	71.13±0.64a	262.76±6.70b	55.54±0.91c
F ₂ B ₁	17.02±1.85b	52.24±1.41b	271.75±8.35b	64.96±2.18b
F ₂ B ₂	16.05±0.94b	70.38±0.73a	289.89±7.68a	66.21±0.97ab

2.4 生物有机肥部分替代化肥对土壤养分和微生物的影响

2.4.1 生物有机肥部分替代化肥对茼蒿笋根际土壤养分含量的影响 由表 7 可知,化肥减量并配施生物有机肥提高了根际土壤养分含量,与单施化肥处理相比,所有指标均达到显著水平。各施肥处理土壤有机

表 7 生物有机肥部分替代化肥对茼蒿笋根际土壤养分含量的影响

处理	有机质/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	全钾/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)
CK	18.24±0.16e	1.01±0.07e	0.57±0.04e	8.20±0.20e	71.40±0.76e	89.51±0.94e	143.00±3.27e
CF	19.40±0.63e	1.81±0.08d	1.22±0.08d	9.38±0.16d	81.78±4.18d	92.14±0.73d	154.67±2.62d
F ₁ B ₁	26.10±0.32d	2.72±0.12b	1.96±0.07bc	10.52±0.05b	107.33±2.58c	102.60±0.40c	183.00±1.63b
F ₁ B ₂	33.30±0.55a	3.34±0.15a	2.14±0.09a	11.25±0.33a	143.85±4.23a	107.86±0.68a	192.33±3.30a
F ₂ B ₁	27.45±0.86c	2.22±0.07c	1.86±0.05c	10.07±0.02c	101.15±1.74c	102.19±0.31c	168.00±2.16c
F ₂ B ₂	30.75±0.77b	3.08±0.26a	2.10±0.09ab	10.25±0.11bc	116.90±3.72b	104.56±0.54b	172.33±0.47c

由表 7 可知,增施生物有机肥的各处理土壤速效养分含量较 CF 处理均显著提高,茼蒿笋不同处理间根际土壤碱解氮含量和速效磷含量均以 F_1B_2 处理最高,较 CF 处理分别增加 75.90%和 17.06%。在相同化肥施用量下,配施 6 000 kg/hm² 生物有机肥的处理较配施 3 000 kg/hm² 生物有机肥的处理均显著增加土壤碱解氮含量, F_1B_2 较 F_1B_1 , F_2B_2 较 F_2B_1 分别提高 34.03%和 15.57%。与 CF 相比, F_1B_2 和 F_2B_2 处理土壤速效磷分别增加 17.06%和 13.48%。茼蒿笋各处理根际土壤速效钾含量以 F_1B_2 最高, F_1B_1 次之,较 CF 处理分别提高 24.35%和 18.32%。

2.4.2 生物有机肥部分替代化肥对茼蒿笋根际土壤可培养微生物数量的影响 土壤微生物的数量多少和群落组成结构可作为预测农田可持续发展潜力和科学评价土壤质量的指标。由表 8 可知,茼蒿笋不同处理根际土壤中可培养微生物数量存在不同程度的差异。各处理根际土壤三大类微生物在数量上均以细菌最

质含量均高于不施肥处理,除 CF 处理不显著,其他施肥处理均显著高于 CK 处理。 F_1B_2 处理土壤有机质含量最高,较 CF 提高了 71.65%, F_2B_2 处理次之,较 CF 提高了 58.51%。当化肥减量相同时, F_1B_2 处理有机质含量较 F_1B_1 处理增加 27.59%, F_2B_2 处理较 F_2B_1 处理增加 12.02%。说明土壤有机质的增加与生物有机肥的施用有密切关系,并随着生物有机肥用量的增大而增大。

配施生物有机肥的处理与 CF 处理相比,土壤全氮、全磷、全钾均显著增加(表 7)。各处理土壤全氮表现为 $F_1B_2 > F_2B_2 > F_1B_1 > F_2B_1 > CF > CK$, F_1B_2 与 F_2B_2 处理间差异不显著,但二者均显著高于其他处理,较 CF 处理分别提高 84.53%和 70.17%。根际土壤全磷含量与土壤全氮表现趋势相似。与 CF 相比,配施生物有机肥的处理根际土壤全磷增幅为 52.46%~75.41%,其中 F_1B_2 处理增幅最大。在同一化肥施用水平下, F_1B_2 处理土壤全磷含量显著高于 F_1B_1 处理, F_2B_2 处理显著高于 F_2B_1 处理,前者较后者分别提高 9.18%和 12.90%。根际土壤全钾含量随着化肥施用量的减少先增加后降低,其中以 F_1B_2 处理最大,较 CF 处理增加 19.94%。

多,放线菌次之,真菌最少。单施化肥处理(CF)与不施肥对照(CK)相比,显著升高土壤真菌数量和放线菌数量,却降低细菌数量。与 CK 相比,CF 根际土壤细菌数降低 19.08%,真菌数和放线菌数分别增加 91.67%和 39.25%。配施生物有机肥的各处理土壤细菌数较 CK 处理均显著增加,其中 F_2B_2 处理最高, F_1B_2 处理次之,分别是 CK 处理的 7.08,6.25 倍。同一化肥施用水平下, F_1B_2 处理根际土壤细菌数是 F_1B_1 处理的 2.31 倍, F_2B_2 处理是 F_2B_1 处理的 2.06 倍。各处理根际土壤真菌数表现为 $CF > F_2B_1 > F_1B_1 > F_1B_2 > F_2B_2 > CK$,配施生物有机肥的处理较 CF 处理降低根际土壤真菌数,其中 F_1B_2 和 F_2B_2 与 CF 差异显著,分别降低 38.22%和 38.95%。施肥显著提高土壤放线菌数,且随着化肥施用量的减少而增加。同一化肥施用量下,施用 6 000 kg/hm² 生物有机肥的处理放线菌数均显著高于施用 3 000 kg/hm² 生物有机肥的处理。说明化肥减量并配施生物有机肥有利

于提高莴笋根际土壤细菌数和放线菌数,降低真菌数。生物有机肥在调控土壤微生物数量和减轻土传病害方面有较好的作用,有利于减少土壤中致病真菌的数量,提高土壤质量。

施肥有利于莴笋根际土壤固氮菌数量的增加(表 8),各施肥处理固氮菌数较 CK 均有所提高,但 CF 处理与其差异不显著。配施生物有机肥对根际土壤固氮菌的数量影响显著,且随着生物有机肥施用量的增加而增加。莴笋根际土壤好氧自生固氮菌的数量以 F₁B₂处理最高,F₂B₂处理次之,二者无显著差异,但均显著高于其他处理,较 F₁B₁处理和 F₂B₁处理分别提高了 37.69%和 35.59%。在生物有机肥施用量相同的情况下,化肥减量 20%的处理与减量 30%的处理好氧自生固氮菌的数量无显著差异。厌氧自生固氮菌的数量以 F₂B₂处理最高,显著高于除 F₁B₂处理以外的其他处理,而 F₁B₁、F₁B₂、F₂B₁处理间无显著差异。在同一化肥施用水平下,F₁B₂处理和 F₂B₂处理的厌氧自生固氮菌数均高于 F₁B₁处理和 F₂B₁处

理,分别增加 41.90%和 59.72%。

由表 8 可知,配施生物有机肥对莴笋根际土壤硝化细菌的数量影响显著。100%常规施肥(CF)较不施肥处理(CK)降低土壤硝化细菌的数量,但差异不显著。配施生物有机肥的各处理土壤硝化细菌的数量均显著高于不施肥处理,其中 F₁B₂处理最高,是 CK 处理的 37.96 倍,其次是 F₂B₂处理,是 CK 处理的 23.78 倍。同一化肥施用水平下,配施 6 000 kg/hm²生物有机肥的处理较配施 3 000 kg/hm²生物有机肥的处理显著增加硝化细菌的数量,F₁B₂处理和 F₂B₂处理分别比 F₁B₁处理和 F₂B₁处理高 3.52, 3.24 倍。同一生物有机肥施用水平下,硝化细菌的数量均是化肥减量 20%的处理显著高于减量 30%的处理。各处理根际土壤反硝化细菌的数量表现为 F₁B₂>F₁B₁>F₂B₂>F₂B₁>CK>CF,其中前三者之间无显著差异,后三者之间也无显著差异,但前三者显著高于后三者。与 CK 相比,CF 处理反硝化细菌的数量降低 72.19%。

表 8 生物有机肥部分替代化肥对莴笋根际土壤微生物数量的影响

处理	细菌/ (×10 ⁶ cfu·g ⁻¹)	真菌/ (×10 ³ cfu·g ⁻¹)	放线菌/ (×10 ⁵ cfu·g ⁻¹)	好氧自生固氮菌/ (×10 ⁶ cfu·g ⁻¹)	厌氧自生固氮菌/ (×10 ⁶ mpn·g ⁻¹)	硝化细菌/ (×10 ⁴ mpn·g ⁻¹)	反硝化细菌/ (×10 ⁶ mpn·g ⁻¹)
CK	1.73±0.17e	2.88±0.58b	2.93±0.12f	0.54±0.15c	0.29±0.06c	0.23±0.03e	25.96±21.83b
CF	1.40±0.21e	5.52±0.60a	4.08±0.10e	0.76±0.10c	0.42±0.03c	0.18±0.01e	7.22±5.05b
F ₁ B ₁	4.67±0.37d	4.20±0.59ab	4.50±0.12d	1.30±0.16b	2.10±0.30b	1.93±0.06c	163.93±17.83a
F ₁ B ₂	10.81±0.57b	3.41±0.60b	4.77±0.06c	1.79±0.10a	2.98±0.60ab	8.73±0.60a	178.80±0.00a
F ₂ B ₁	5.95±0.21c	4.22±0.60ab	5.44±0.10b	1.18±0.16b	2.11±0.30b	1.29±0.12d	35.86±15.79b
F ₂ B ₂	12.25±0.10a	3.37±0.60b	5.77±0.12a	1.60±0.06a	3.37±0.60a	5.47±0.30b	151.52±17.86a

2.5 莴笋根际土壤微生物数量与土壤养分含量的相关性

相关性分析表明(表 9),不同施肥处理下莴笋根际土壤细菌数与土壤有机质含量呈极显著正相关关系($P<0.01$),与碱解氮、速效磷、全氮含量呈显著正相关关系($P<0.05$)。真菌数与土壤有机质、碱解氮、速效磷、速效钾和全氮呈负相关关系,但未达到显著水平,与全磷、全钾呈正相关关系。放线菌与土壤各养分含量之间呈正相关关系,其中与全磷之间达到显著正相关关系。好氧自生固氮菌与各土壤养分含量均呈极显著正相关关系,其中有机质与好氧自

生固氮菌数量的相关系数最大。厌氧自生固氮菌与有机质、速效磷、全氮、全磷呈极显著正相关关系,与碱解氮、速效钾、全钾呈显著正相关关系。硝化细菌数量与碱解氮含量呈极显著正相关关系,与有机质、全氮含量呈显著正相关关系。反硝化细菌数量与碱解氮、速效磷、速效钾、全氮含量呈显著正相关关系。土壤微生物数量与土壤养分含量之间的相关关系表明,生物有机肥部分替代化肥可通过改善莴笋根际土壤微生物的组成结构和数量来改变土壤养分的含量,从而起到优化土壤质量和提高土壤肥力的作用。

表 9 土壤中可培养微生物数量与土壤养分含量之间的相关性

项目	有机质	碱解氮	速效磷	速效钾	全氮	全磷	全钾
细菌	0.936**	0.869*	0.868*	0.710	0.864*	0.803	0.732
真菌	-0.299	-0.243	-0.202	-0.073	-0.079	0.028	0.055
放线菌	0.796	0.648	0.805	0.615	0.770	0.881*	0.718
好氧自生固氮菌	0.984**	0.976**	0.977**	0.925**	0.983**	0.940**	0.936**
厌氧自生固氮菌	0.971**	0.893*	0.958**	0.828*	0.929**	0.923**	0.841*
硝化细菌	0.882*	0.938**	0.809	0.779	0.845*	0.697	0.771
反硝化细菌	0.808	0.854*	0.830*	0.875*	0.873*	0.767	0.797

注: ** 和 * 分别表示相关性达到 1%和 5%显著水平。

2.6 莴笋根际土壤各项指标主成分分析

为了全面反映生物有机肥部分替代化肥对莴笋根际土壤的影响,对土壤各项指标进行主成分分析。对标准化后的数据指标降维,根据特征值>1 的原则,提取了 2 个主成分,其特征值分别为 11.460 和 1.423。由表 10 可知,主成分 1 和主成分 2 的方差贡献率分别为 81.86%和 10.17%,累积方差贡献率为 92.03%,可以反映土壤肥力系统的变异信息。

表 10 主成分分析的特征根与方差贡献率

项目	特征值	方差	累积方差
		贡献率/%	贡献率/%
主成分 1	11.460	81.86	81.86
主成分 2	1.423	10.17	92.03

由表 11 可知,土壤细菌、好氧自生固氮菌、厌氧自生固氮菌、有机质、碱解氮、速效磷、速效钾、全氮、全磷和全钾在主成分 1 上有较高的因子载荷量,综合了大部分变异信息,其次是放线菌、硝化细菌和反硝化细菌,载荷值在 0.8 左右。主成分 2 载荷值最大的指标是土壤真菌的数量,代表了土壤真菌数量水平。对莴笋土壤肥力系统而言,所有土壤指标在 2 个主成分上均有较高的载荷值,主成分 1 和主成分 2 可以反映土壤肥力水平的高低。

表 11 主成分分析的载荷值与特征向量

土壤指标	主成分 1		主成分 2	
	载荷值	特征向量	载荷值	特征向量
真菌(X ₁)	-0.227	-0.067	0.945	0.792
细菌(X ₂)	0.915	0.270	-0.237	-0.199
放线菌(X ₃)	0.780	0.230	0.355	0.298
好氧自生固氮菌(X ₄)	0.999	0.295	-0.010	-0.008
厌氧自生固氮菌(X ₅)	0.968	0.286	-0.068	-0.057
硝化细菌(X ₆)	0.880	0.260	-0.314	-0.263
反硝化细菌(X ₇)	0.872	0.258	-0.227	-0.190
有机质(X ₈)	0.986	0.291	-0.058	-0.049
碱解氮(X ₉)	0.972	0.287	-0.060	-0.050
速效磷(X ₁₀)	0.985	0.291	0.059	0.049
速效钾(X ₁₁)	0.930	0.275	0.130	0.109
全氮(X ₁₂)	0.981	0.290	0.124	0.104
全磷(X ₁₃)	0.948	0.280	0.288	0.241
全钾(X ₁₄)	0.939	0.277	0.262	0.220

将各因子在主成分上的载荷值与特征值进行计算,可得到主成分的特征向量:

特征向量=载荷值/特征值^{1/2}

为进一步反映原始因子与主成分之间的线性关系,由特征向量和标准化后的数据,可得到主成分表达式为:

$Y_1 = -0.067X_1 + 0.270X_2 + 0.230X_3 + 0.295X_4 + 0.286X_5 + 0.260X_6 + 0.258X_7 + 0.291X_8 +$

$0.287X_9 + 0.291X_{10} + 0.275X_{11} + 0.290X_{12} + 0.280X_{13} + 0.277X_{14}$

$Y_2 = 0.792X_1 - 0.199X_2 + 0.298X_3 - 0.008X_4 - 0.057X_5 - 0.263X_6 - 0.190X_7 - 0.049X_8 - 0.050X_9 + 0.049X_{10} + 0.109X_{11} + 0.104X_{12} + 0.241X_{13} + 0.220X_{14}$

把标准化后的数据代入上式,可计算出各施肥处理在 2 个主成分上的得分情况。根据主成分函数模型:

$F = \sum_{i=1}^m biy_i$

式中:F 为主成分得分;b 为贡献率(%);m 为主成分个数。即 $F = 0.8186Y_1 + 0.1017Y_2$,可计算出各处理的综合得分。不同施肥处理下各项土壤指标综合得分情况(图 1)显示,配施生物有机肥的处理综合得分均高于常规施肥处理,其中 F₁B₂ 处理得分最高,也即 F₁B₂ 处理的土壤肥力最高,F₂B₂ 处理次之。

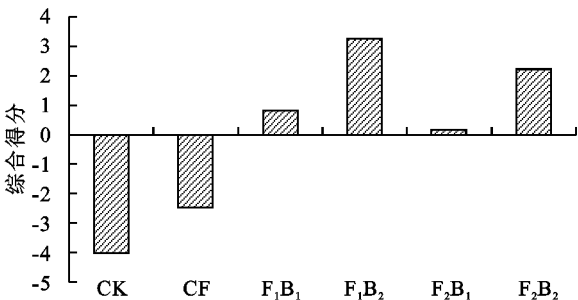


图 1 不同施肥处理土壤综合得分

3 讨论

干物质是作物对所吸收养分和光合产物的积累,其积累量体现了光合能力的大小,可反映作物的生长状况,是产量形成的物质基础,合理施肥有助于优化干物质的积累和分配^[19]。本研究结果也表明,化肥减量 20%较常规施肥增加了莴笋各器官干物质积累量,尤其是 F₁B₂ 显著增加;化肥减量 30%时,莴笋总干物质积累量较常规施肥有所下降,尤其是 F₂B₁ 处理,说明施肥量过高或过低都不利于莴笋干物质积累,生物有机肥替代 20%的化肥能为莴笋生育期内提供充足的养分,有助于干物质的积累。本试验中,在化肥减量相同的条件下,配施 6 000 kg/hm² 生物有机肥更有助于莴笋各器官中干物质的积累,与崔红艳等^[20]研究认为,有机无机肥配施有利于胡麻花前干物质的积累和花后向籽粒分配的结果类似。主要是因为生物有机肥中含有大量有机养分和有益微生物,为作物提供长效养分,并且能优化根际环境,提高根系活力,进而促进莴笋生长,有利于干物质积累和合理分配。化肥减量 30%时,莴笋叶片中干物质分配比例较其他处理低,而根系中分配比例较其他处理高,可能是化肥减量较多,养分供应不足,为保证根系的基本生长功能,以满足植株对养分和水分的需求。

养分资源合理利用是推动蔬菜产业可持续发展的有效途径,减少化肥用量适宜生物有机肥替代不仅能提高产量和养分利用效率,降低肥料损失,还能防止因化肥过量施用而造成的环境问题^[4]。养分的积累和分配因施肥不同有较大的差异,合理施肥有利于养分的积累和高效利用。本试验发现,增施生物有机肥后莴笋各器官中氮素和磷素积累量均显著提高,与李杰等^[21]研究发现配施生物有机肥可提高氮、磷肥利用率及其积累量的结果相似,可能是因为生物有机肥施入后可使根际土壤中的微生物大量繁殖,发挥固氮和氮转化作用,使肥料和土壤中的养分有效地供给作物。但李杰等^[21]的增施生物有机肥后,花球和功能叶钾素积累量高于单施化肥处理的结论与本试验结果不同,本研究发现,化肥减量 30% 配施 3 000 kg/hm² 生物有机肥时,莴笋叶片和根系中钾素积累量相对降低,可能是因为化肥减量较多,配施生物有机肥的量较少而引起的,该处理的干物质积累量也有所降低,说明养分的吸收积累直接影响着干物质的积累。茎中氮、磷、钾素分配除 F₁B₁ 和 F₂B₂ 钾素分配率与常规施肥基本持平外,其他处理均显著提高,说明生物有机肥部分替代化肥有利于提高产品器官中各养分的分配比例。赵亚南等^[3]研究表明,减量施肥可大幅度提高肥料利用率。谢军等^[22]研究表明,有机肥氮替代 50% 化肥氮提高了氮素利用率。在本试验中也发现,生物有机肥部分替代化肥使氮、磷、钾肥的吸收利用率、农学利用率和偏生产力均显著提高,说明在化肥减量并配施生物有机肥的条件下可促使养分向有效态转化,提高土壤氮、磷、钾的含量,协调土壤养分平衡供应,对提高养分资源的利用效率有显著作用。常规施肥的土壤氮素、磷素、钾素依存率均最高,说明常规施肥主要依赖基础地力来提供养分,造成肥料资源的浪费。

相关研究^[23]表明,生物有机肥能改善土壤理化性状,培肥土壤,对土壤微生物数量有一定的影响。本试验中,增施生物有机肥显著提高了根际土壤全氮、磷、钾养分和土壤速效养分,以及土壤有机质含量,这与孙薇等^[24]的研究结果相似,一方面可能是因为生物有机肥中本就含有大量有机质,能提高土壤肥力;另一方面可能是因为生物有机肥中的有益菌大量繁殖,并且活化土壤中的土著微生物,有利于固定和释放土壤养分。生物有机肥具有很好的残效,长期施用可提高土壤基础地力,基础地力高的土壤对肥料的依赖性较低,同时使作物获得高产的潜力大^[18]。Zhao 等^[25]认为,施用生物有机肥可显著改变根际微

生物群落结构,使细菌多样性增加,真菌多样性下降。本研究也发现,增施生物有机肥显著提高了土壤细菌数和放线菌数,真菌数有所下降,这与宋以玲等^[15]和丁文娟等^[26]的研究结果相似,可能是生物有机肥的施入有助于土壤中有益微生物的大量繁殖,从而抑制了真菌的生长。本研究发现,生物有机肥的施用有利于功能细菌的繁殖,好氧自生固氮菌、厌氧自生固氮菌、硝化细菌和反硝化细菌的数量较常规施肥均显著提高,与刘金光等^[27]研究发现持续施用有机肥可有效提高连作花生根际有益微生物种群数量的结果相似。其中 F₁B₂ 处理效果最为显著,这可能是因为该处理适宜的生物有机肥和化肥用量能为微生物提供持续的氮源和丰富的碳源,且生物有机肥中的腐殖酸可改善土壤理化性状,促进莴笋根系生长,根系分泌物进而促使土壤功能细菌数量的增加。

土壤微生物与土壤理化性质有着密切的关系,关于此已有很多研究。本研究通过对土壤理化性质与土壤三大类微生物及功能细菌数量的相关性分析发现,细菌与有机质、碱解氮、速效磷、全氮呈显著正相关性,放线菌与全磷呈显著正相关性,真菌与土壤有机质、全氮及速效养分呈负相关,固氮菌和氮转化细菌的数量与碱解氮、全氮含量显著正相关。这与姚宝辉等^[28]研究发现,土壤细菌、真菌与土壤有机质、全氮、全磷等养分呈正相关性的结论有所差异,可能是和研究区域不同有关。环境湿度、温度等因素也会影响土壤微生物数量,为更深入地探讨土壤理化性状与微生物数量之间的关系,应排除外界环境的干扰,通过长期试验进一步研究。通过主成分分析发现,施用生物有机肥的处理综合得分高于 CF,且随着生物有机肥用量的增加得分越高,说明生物有机肥对土壤综合质量有较大的影响,可能是因为生物有机肥的施入能改善土壤生态系统,良好的土壤生态系统是蔬菜产业可持续发展的基础,有利于作物生长和土壤有益微生物繁殖,进而增加土壤酶和土壤活性物质,从而提高土壤肥力^[29]。

4 结 论

生物有机肥替代 20% 的化肥可显著增加莴笋干物质积累量和养分积累量,替代 30% 的化肥使干物质积累量和钾素积累量有所下降,其中 F₂B₁ 处理干物质积累量显著下降。施用生物有机肥可提高氮、磷、钾肥的利用率,降低对土壤氮、磷、钾素的依存率。生物有机肥施入后土壤各养分含量均显著提高,土壤细菌和放线菌数量增加,真菌数量减少,固氮菌和氮转化细菌的数量均显著增加。其中,生物有机肥施用量为 6 000 kg/hm²,化肥施用量为 N(640.5 kg/hm²)、P₂O₅

(520.5 kg/hm²)、K₂O(472.5 kg/hm²)的处理(F₁B₂)可显著提高莴笋各器官干物质积累量和养分吸收积累量,在肥料利用率、土壤养分含量、土壤微生物组成结构各方面都优于其他处理,是实现养分高效管理、肥料资源合理利用的科学施肥方式。

参考文献:

[1] 李斯更,王娟娟.我国蔬菜产业发展现状及对策措施[J].中国蔬菜,2018,352(6):6-9.

[2] 张怀志,唐继伟,袁硕,等.津冀设施蔬菜施肥调查分析[J].中国土壤与肥料,2018(2):54-60.

[3] 赵亚南,宿敏敏,吕阳,等.减量施肥下小麦产量、肥料利用率和土壤养分平衡[J].植物营养与肥料学报,2017,23(4):864-873.

[4] 张绪成,于显枫,王红丽,等.半干旱区减氮增钾、有机肥替代对全膜覆盖垄沟种植马铃薯水肥利用和生物量积累的调控[J].中国农业科学,2016,49(5):852-864.

[5] 周建斌.作物营养从有机肥到化肥的变化与反思[J].植物营养与肥料学报,2017,23(6):1686-1693.

[6] 付丽军,张爱敏,王向东,等.生物有机肥改良设施蔬菜土壤的研究进展[J].中国土壤与肥料,2017(3):1-5.

[7] 黄绍文,唐继伟,李春花,等.我国蔬菜化肥减施潜力与科学施用对策[J].植物营养与肥料学报,2017,23(6):1480-1493.

[8] 顾欣,孙权,王锐,等.菌肥与有机肥配施对拱棚西瓜土壤的改良效果[J].干旱地区农业研究,2017,35(3):219-225.

[9] Huang N, Wang W W, Yao Y L, et al. The influence of different concentrations of bio-organic fertilizer on cucumber *Fusarium* wilt and soil microflora alterations[J].PLoS One,2017,12(2):e0171490.

[10] Loh S K, James S, Ngatiman M, et al. Enhancement of palm oil refinery waste: Spent bleaching earth (SBE) into bioorganic fertilizer and their effects on crop biomass growth[J].Industrial Crops and Products,2013,49:775-781.

[11] 毕智超,张浩轩,房歌,等.不同配比有机无机肥料对菜地 N₂O 排放的影响[J].植物营养与肥料学报,2017,23(1):154-161.

[12] 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.

[13] Bhardwaj S K, Sharma S D, Kumar P. Effect of con-

[14] 陶磊,褚贵新,刘涛,等.有机肥替代部分化肥对长期连作棉田产量、土壤微生物数量及酶活性的影响[J].生态学报,2014,34(21):6137-6146.

[15] 宋以玲,于建,陈士更,等.化肥减量配施生物有机肥对油菜生长及土壤微生物和酶活性影响[J].水土保持学报,2018,32(1):352-360.

[16] 鲍士旦.土壤农化分析.[M].3 版.北京:中国农业出版社,2000.

[17] 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.

[18] 廖育林,鲁艳红,聂军,等.长期施肥稻田土壤基础地力和养分利用效率变化特征[J].植物营养与肥料学报,2016,22(5):1249-1258.

[19] 崔正勇,李新华,裴艳婷,等.氮磷配施对冬小麦干物质积累、分配及产量的影响[J].西北农业学报,2018,27(3):339-346.

[20] 崔红艳,胡发龙,方子森,等.有机无机肥配施对胡麻的耗水特性和干物质积累与分配的影响[J].水土保持学报,2015,29(3):282-288.

[21] 李杰,贾豪语,颀建明,等.生物肥部分替代化肥对花椰菜产量、品质、光合特性及肥料利用率的影响[J].草业学报,2015,24(1):47-55.

[22] 谢军,赵亚南,陈轩敬,等.有机肥氮替代化肥氮提高玉米产量和氮素吸收利用效率[J].中国农业科学,2016,49(20):3934-3943.

[23] 王兴龙,朱敏,杨帆,等.配施有机肥减氮对川中丘区土壤微生物量与酶活性的影响[J].水土保持学报,2017,31(3):271-276.

[24] 孙薇,钱勋,付青霞,等.生物有机肥对秦巴山区核桃园土壤微生物群落和酶活性的影响[J].植物营养与肥料学报,2013,19(5):1224-1234.

[25] Zhao J, Liu J, Liang H, et al. Manipulation of the rhizosphere microbial community through application of a new bio-organic fertilizer improves watermelon quality and health[J].PLoS One,2018,13(2):e0192967.

[26] 丁文娟,曹群,赵兰凤,等.生物有机肥施用期对香蕉枯萎病及土壤微生物的影响[J].农业环境科学学报,2014,33(8):1575-1582.

[27] 刘金光,李孝刚,王兴祥.连续施用有机肥对连作花生根际微生物种群和酶活性的影响[J].土壤,2018,50(2):305-311.

[28] 姚宝辉,王缠,郭怀亮,等.人工草地建设对甘南草原土壤理化特性和微生物数量特征的影响[J].水土保持学报,2019,33(1):192-199.

[29] 曲成闯,陈效民,韩召强,等.施用生物有机肥对黄瓜不同生育期土壤肥力特征及酶活性的影响[J].水土保持学报,2017,31(6):282-287.