

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2020.04.013

方成, 岳明灿, 王东升, 等. 化肥减施配施微生物菌剂对鲜食玉米生长和土壤肥力的影响. 土壤, 2020, 52(4): 743–749.

化肥减施配施微生物菌剂对鲜食玉米生长和土壤肥力的影响^①

方成¹, 岳明灿¹, 王东升², 李伟明², 徐莉¹, 陈小云¹, 焦加国^{1*}

(1 南京农业大学资源与环境科学学院/江苏省有机固体废弃物资源化协同同化中心, 南京 210095; 2 南京市蔬菜科学研究所, 南京 210042)

摘要: 本试验研究了化肥减施配施 EM 微生物菌剂对鲜食玉米产量、品质和土壤肥力的影响。共设置不施加任何肥料和菌剂(CK)、全量化肥(依据当地化肥施用量, CF)、减施 40% 化肥(RCF)、减施 40% 化肥和灌施加喷施 EM 菌剂(RCF+EM)、减施 40% 化肥和灌施加喷施清水(RCF+W)5 个处理。结果表明, RCF+EM 处理的玉米产量高于 CF 处理, 但未达到显著水平; 玉米可溶性糖、可溶性蛋白和维生素 C 含量都高于 CF 处理, 其中可溶性蛋白含量达到显著水平, 增幅为 11.79%; RCF+EM 处理下的土壤 pH、有机质、速效养分和微生物生物量碳氮均高于 CF 处理, 其中 pH、速效钾和微生物生物量氮达到显著水平, 增幅依次是 20.08%、15.81%、59.96%; RCF+EM 处理的土壤真菌数量显著低于 CF 处理, 而细菌、放线菌数量则显著高于 CF 处理, 增幅分别达到 153.42% 和 124.17%。综上, 减施化肥配施 EM 菌剂对鲜食玉米产量无显著影响, 但可显著提高果实品质、改善土壤肥力、提高土壤微生物菌群数量。

关键词: 化肥减施; EM 菌剂; 产量; 品质; 土壤养分; 土壤微生物生物量

中图分类号: S-3, S365, S513 文献标志码: A

Effects of Fertilizer Reduction Combined with Microbial Agent Application on Growth and Soil Fertility of Fresh Corn

FANG Cheng¹, YUE Mingcan¹, WANG Dongsheng², LI Weiming², XU Li¹, CHEN Xiaoyun¹, JIAO Jiagu^{1*}

(1 College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University/Jiangsu Collaborative Innovation Center for Organic Solid Waste Recycling, Nanjing 210095, China; 2 Nanjing Institute of Vegetable Science, Nanjing 210042, China)

Abstract: In this study, the effects of reduced chemical fertilizers combined with effective microbial (EM) agents application on the yield and quality of fresh corn and soil property were evaluated. The designed treatments include: no fertilizer (CK), full chemical fertilizer application according to local fertilizer application rate (CF); 60% chemical fertilizer application (RCF); 60% chemical fertilizer application combined with EM agents application (RCF+EM); 60% chemical fertilizer application combined with water (RCF+W). The results showed that fresh corn yield was higher under the RCF+EM treatment than that under the CF treatment, although the difference was not significant ($P>0.05$); The soluble sugar, soluble protein and vitamin C contents in fresh corn were higher under RCF+EM treatment than those under CF treatment, especially the soluble protein, which was significantly higher, with 11.79% higher than that under CF treatment ($P<0.05$); pH, organic matter, available nutrients and microbial carbon and nitrogen in the soil were also increased under the RCF+EM treatment compared to that under the CF treatment, and pH, available potassium and soil microbial biomass nitrogen were 20.08%, 15.81% and 59.96% higher under the RCF+EM treatment than those under the CF treatment ($P<0.05$). The number of fungi in the soil under RCF+EM treatment was significantly lower than that under CF treatment, while the number of bacteria and actinomycetes were significantly higher, with 153.42% and 124.17% increment respectively compared to the CF treatment. Therefore, the treatment with 60% chemical fertilizer application combined with EM agents can achieve the same yield of fresh corn as the full chemical fertilizer application treatment, meanwhile significantly improve the fresh corn quality and promote soil fertility and the number of soil microbial.

Key words: Fertilizer application; EM microbial agent; Yield; Quality; Soil nutrient; Soil microbial quantity

①基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0200700)和江苏省优势学科项目资助。

* 通讯作者(jiaguojiao@njau.edu.cn)

作者简介: 方成(1996—), 女, 湖南常德人, 硕士研究生, 主要从事农作物减肥减药和土壤改良的研究。E-mail: shanicefang@163.com

玉米是我国重要粮食作物,种植范围广、用途多、产量高,不仅可以作为食物食用,在工业上还可以用于生产酒精、肥料等。随着国内和国际对玉米需求量的增加,施肥就起到了不可或缺的作用。施肥能提高土壤肥力以及作物对氮磷钾的吸收利用,进而使作物达到增产的效果。但是大量研究表明,目前中国化肥施用量已经超过了其经济意义上的最优施用量,粮食作物的过量施肥程度较高,其中玉米的过量施肥程度达到了 32.76%^[1-2]。

当前我国玉米的种植模式是肥料资源高投入追求玉米高产出,然而肥料养分损失严重,增产效果不明显,同时养分因得不到充分利用而进入土壤之中,不可避免地对环境产生影响^[3-4]。为提高我国玉米竞争力和保护生态环境,减肥增效的研究具有重大意义。减施化肥可有效提高肥料利用率,改善土壤理化性质,减少化肥对环境的污染,有机肥在提高土壤养分的同时也能改善土壤理化性质、平衡养分、培肥土壤^[5-6],故在我国化肥减施配施有机肥的研究诸多。而前人在研究中发现微生物肥料的研究和推广可提高化肥利用率,减少化肥用量,减轻化肥对环境造成的严重污染的局势,并增加我国经济作物在国际市场的竞争能力^[7],所以微生物肥料产品非常广阔的市场前景促使我们对微生物菌肥的应用进行深入研究。

微生物菌肥中含有大量微生物菌群、微量元素、有机质和活性酶,能对作物生长产生调控作用,提高植物对水分和肥料的吸收利用率,降低或抑制土壤中有毒微生物的生长和繁殖,改善土壤结构^[8]。土壤肥力的高低直接由土壤中有效养分含量决定,而微生物菌肥中的解磷菌能够分解土壤中固定的有机、无机态磷,这些被固定的磷含量占土壤磷素总量的 95%,同时也能够阻止有效磷的转化固定^[9-11]。微生物菌肥的施用能够提升蔬菜的维生素 C 含量、可溶性糖、可溶性固形物含量、干物质质量^[12],可溶性蛋白以及游离氨基酸含量等^[13]。尉辉^[14]研究表明,EM (effective microorganism) 菌剂能够提高大蒜产量、提高叶片叶绿素含量、促进植株干物质积累。EM 是有效微生物群的英文简称,由光合细菌、放线菌、乳酸菌、酵母菌和丝状菌等 10 个属 80 多种有益微生物构成^[15]。因此,微生物菌肥不仅能够改善土壤结构、增强土壤肥力^[16],而且有助于保持土壤生态系统的平衡。

目前在微生物菌肥的应用研究中,多集中于对水稻、番茄、烤烟等的研究,而在玉米的应用研究相对较少。在玉米研究中,大多主要关注微生物菌肥对土壤理化性质和玉米生长发育的影响,对玉米品质产

量,特别是鲜食玉米、土壤生物性状的研究较少。因此,本试验研究在适量减施化肥条件下配施微生物菌肥,探究微生物菌剂对鲜食玉米的生长状况、品质产量以及土壤性质的影响,以期微生物菌剂替代部分化肥的田间施用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验在南京市蔬菜花卉科学研究所设施大棚内进行,位于南京市江宁区横溪街道(31°43'14.03"N, 118°46'12.28"E),年平均气温 15.4 °C,年均降水量 1 106 mm。土壤类型为黄棕壤,土壤基础理化性质为有机质 17.27 g/kg,全氮 0.94 g/kg,全磷 0.44 g/kg,碱解氮 84.12 mg/kg,有效磷 46.13 mg/kg,速效钾 129.25 mg/kg, pH 4.94。

供试作物为鲜食玉米晶甜 7 号。供试菌剂为 EM 微生物菌剂,是一种由光合细菌、乳酸菌群和革兰氏阳性放线菌群等 10 个属 80 多种微生物构成的复合菌群制剂。供试有机肥由南通惠农生物有机肥有限公司提供,总养分 ≥ 5%,有机质 ≥ 45%;复合肥由安徽省司尔特肥业股份有限公司生产, N+P₂O₅+K₂O ≥ 45%, 3 种养分等量。

1.2 试验设计

试验采用随机区组设计,每个处理 3 次重复,共设 5 个处理:CK(不施用任何肥料和菌剂),CF(全量化肥,依据当地化肥施用量 0.75 t/hm²),RCF(减施 40% 化肥,化肥施用量 0.45 t/hm²),RCF+EM(减施 40% 化肥,灌施加喷施 EM 菌剂液体肥,化肥施用量 0.45 t/hm²,EM 菌剂 500 ml/株),RCF+W(减施 40% 化肥,灌施加喷施清水,化肥施用量 0.45 t/hm²,清水 500 ml/株)。其中除 CK 外,其他各处理施加有机肥 7.5 t/hm²。复合肥、有机肥深施;所用菌剂为保鲜菌剂,按照菌剂施用说明进行施用。鲜食玉米于 2017 年 2 月 25 日育苗,3 月 25 日定植。在阴天或者下午 4 点以后进行喷施,灌施、喷施处理为定植后每 10 d 进行一次,喷施即用清水稀释一定比例后进行叶面喷施,灌施即用清水稀释一定比例后在根系周围进行灌施,从定植至采收期间,共施用 6 次。田间管理采用常规管理模式。栽培方式为传统的畦栽,每个小区 2 m × 5 m,小区间沟宽 40 cm,种植密度 40 cm × 40 cm,每小区 48 株作物。

1.3 试验方法

1.3.1 样品采集 果实样品:在鲜食玉米成熟期采集成熟度一致、大小均匀的果实 3 穗,然后用匀浆机

进行匀浆, 保存于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱待测。土壤样品: 在玉米收获期采集 $0\sim 20\text{ cm}$ 土壤。

1.3.2 指标测定 植物长势: 于拔节期测定各小区玉米的茎粗(茎部第一节下部)、株高(自根部第一节至植株生长点高度)、SPAD(自上而下第三片叶片中部, 叶绿素仪测定)。果实品质: 维生素 C(2,6-二氯酚靛酚滴定法)、可溶性糖(蒽酮比色法)、可溶性蛋白(考马斯亮蓝 G-250 法)。产量: 自收获期收获成熟果实(一棒), 未成熟的等成熟后全部采集(二棒), 两次总和为最终产量。单果重: 每小区采集 3 穗长势均匀的果实, 计算其平均值。土壤理化性质测定参考《土壤农化分析》^[17]。微生物生物量碳采用 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 氧化法测定, 微生物生物量氮采用凯氏定氮法测定^[18-19]。土壤三大菌数量测定采用平板计数法: 细菌采用牛肉膏蛋白胨培养基、真菌采用马丁氏培养基、放线菌采用高氏一

号培养基。

1.4 数据分析

利用 Microsoft Excel 2016 软件处理数据, 并运用 SPSS 20.0 对数据进行单因素方差分析, 对其显著性差异用 LSD 和 Duncan's 检验法进行多重比较 ($P<0.05$)。

2 结果与讨论

2.1 化肥配施微生物菌剂对鲜食玉米植株长势和产量的影响

作物长势与产量是衡量施肥效果及土壤肥力的重要参数, 其大小随着外界条件的变化而变化^[20]。由表 1 可知, 与 CK 处理相比, 其他各处理除 SPAD 外, 茎粗、株高、单果重和产量都显著增加。叶绿素 (SPAD) 含量 CF 处理和 RCF+EM 处理显著高于 CK。

表 1 不同处理对鲜食玉米长势和产量的影响

Table 1 Effects of different treatments on growth and yield of fresh corn

处理	茎粗(cm)	株高(m)	SPAD	单果重(g)	产量(t/hm^2)
CK	$2.11 \pm 0.06\text{ b}$	$0.82 \pm 0.07\text{ b}$	$42.08 \pm 5.56\text{ b}$	$206.49 \pm 11.63\text{ c}$	$10.55 \pm 0.16\text{ d}$
CF	$2.35 \pm 0.09\text{ a}$	$1.22 \pm 0.10\text{ a}$	$53.66 \pm 5.30\text{ a}$	$232.85 \pm 3.46\text{ ab}$	$14.13 \pm 0.53\text{ ab}$
RCF	$2.29 \pm 0.02\text{ a}$	$1.19 \pm 0.05\text{ a}$	$50.49 \pm 5.57\text{ ab}$	$229.50 \pm 4.28\text{ b}$	$12.46 \pm 1.10\text{ c}$
RCF+EM	$2.27 \pm 0.03\text{ a}$	$1.24 \pm 0.08\text{ a}$	$51.07 \pm 2.04\text{ a}$	$244.34 \pm 9.28\text{ a}$	$14.39 \pm 0.80\text{ a}$
RCF+W	$2.33 \pm 0.05\text{ a}$	$1.19 \pm 0.04\text{ a}$	$49.97 \pm 1.94\text{ ab}$	$232.32 \pm 4.06\text{ ab}$	$12.85 \pm 0.62\text{ bc}$

注: 表中数据为平均值 \pm 标准差 ($n=3$), 同列小写字母不同表示处理间差异显著 ($P<0.05$), 下表同。

除 CK 外的各处理间, 茎粗值差异不显著, 可能是由于前期玉米植株生长发育对营养元素需求不高, 对养分的吸收利用也相对较少, 各处理的施肥量足够支持玉米植株初期生长^[21]。在各处理中, 施加 EM 菌肥处理的株高大于其他处理, 增幅范围为 $1.6\% \sim 51.0\%$, 这表明 EM 菌肥对玉米的株高有促进作用, 类似研究表明适量施用生物菌肥可提高不结球白菜的株高^[22]。与 CK 相比, RCF+EM 处理显著提高叶绿素水平, 可能是由于 EM 菌剂中含有大量光和细菌、乳酸菌群和革兰氏阳性放线菌群等 80 多种微生物, 这些有益微生物群, 在土壤中能够形成有利于植物生长的微生物优势群体, 在繁殖的过程中提高土壤微生物活性, 分泌合成促进植株生长的维生素和激素等, 增强了植株代谢功能, 提高作物叶片的叶绿素含量和表观光合速率^[23]。同时李立^[24]和任大明等^[25]的研究表明, EM 菌剂可显著提高玉米叶片的叶绿素, 促进植株生长。

从表 1 得, 与 CK 相比, 各处理的单果重显著增加, 这说明施肥能有效提高鲜食玉米的单果重。温丽乐和王平^[26]研究表明, 在一定施肥水平范围内玉米

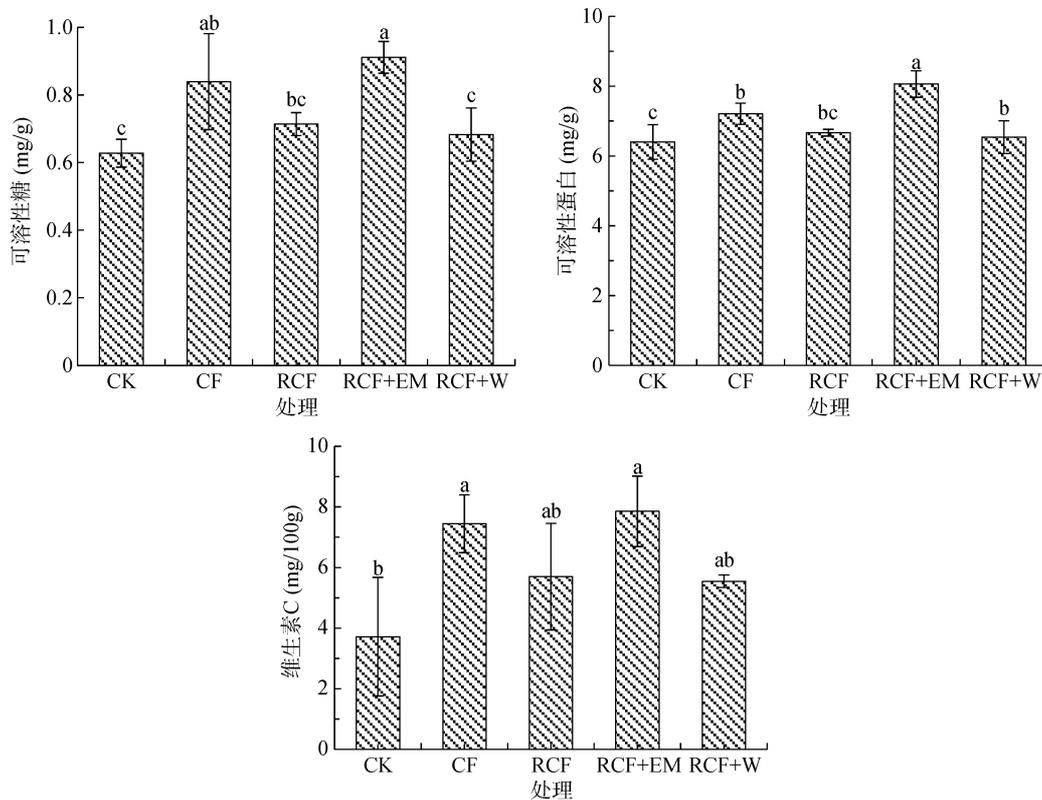
产量明显提高。RCF+EM 处理中单果重显著高于 RCF 处理, 增幅为 6.47% , 说明在减施化肥的情况下施加 EM 菌剂可以促进作物单果重。CF 处理与 RCF 处理相比, 单果重未达到显著差异, 表明减施化肥处理对单果重影响不大。RCF+EM 处理的玉米产量与 CF 处理基本相当, 并显著高于其他处理, 增产范围为 $11.98\% \sim 36.40\%$ 。有研究表明, 微生物菌剂的施用能够提升玉米植株对土壤养分的吸收, 并促进植株中营养元素向籽粒中的转移, 从而提高玉米单果重与产量^[27]。综合来看, 本试验中 EM 菌剂确实能在化肥减施的条件下, 促进玉米产量的增加, 达到和全量化肥施用相同的效果。

2.2 化肥配施微生物菌剂对鲜食玉米品质的影响

可溶性糖和可溶性蛋白是鲜食玉米的营养品质, 维生素 C(Vc) 是鲜食玉米的保健品质, 其含量的高低直接影响着蔬菜的口味和营养价值^[28]。如图 1 所示, 各施肥处理均能提高玉米品质, 果实品质总体以 RCF+EM 处理最好。与 CF 处理相比, RCF+EM 处理的果实可溶性糖无显著差异, 但显著高于 RCF 处

理和 RCF+W 处理, 增幅分别为 27.77%、33.38%; RCF+EM 处理的可溶性蛋白含量显著高于 CF 处理,

增幅达 11.79%; 维生素 C 含量, CF 与 RCF+EM 处理相近, 未达到显著水平。



(图柱上方小写字母不同表示处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下图同)
 图 1 不同处理对鲜食玉米品质的影响(平均值 \pm 标准差, $n = 3$)
 Fig. 1 Effects of different treatments on fruit quality of fresh corn

赵贞等^[29]和韦翔华等^[30]的研究结果表明, 配施微生物菌肥对黄瓜、玉米的产量, 果实的 Vc 含量、可溶性糖均有明显的促进作用。王冰清等^[31]研究表明化肥减施配施有机肥对黄瓜、苦瓜和甘蓝产量无显著影响, 但能明显提高其可溶性糖、Vc 等果实品质。本研究中, EM 菌剂中含有大量的光合菌群, 能够充分利用植株根部的分泌物, 并将其转化为糖类、氨基酸和多种维生素等生理活性物质, 刺激和调节作物的生长发育^[32], 或者植物直接吸收, 从而提升果实品

质, 促进作物增产。综合来看, 本试验中施肥处理能提高玉米品质, 减施化肥条件下施加 EM 菌剂的处理, 玉米品质基本达到常规全量化肥施用效果, 部分玉米品质特征如可溶性蛋白含量, 超过常规全量化肥施用效果, 达到最好。

2.3 化肥配施微生物菌剂对土壤理化性质的影响

由表 2 可知, 施用 EM 菌剂能够缓解土壤酸化, 提高土壤速效养分含量, 并且能够促进土壤有机质含量的提升, 但对全氮、全磷含量影响不明显。

表 2 不同处理对鲜食玉米土壤理化性质的影响
 Table 2 Effects of different treatments on soil physiochemical properties of fresh corn

处理	pH	有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	全磷 (g/kg)	碱解氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)
CK	4.91 \pm 0.18 b	15.74 \pm 3.06 a	0.99 \pm 0.04 b	0.47 \pm 0.03 b	92.58 \pm 5.23 b	48.53 \pm 15.20 c	144.42 \pm 14.36 c
CF	4.73 \pm 0.08 b	16.48 \pm 5.56 a	1.29 \pm 0.02 a	0.80 \pm 0.06 a	103.71 \pm 24.43 ab	75.14 \pm 20.01 ab	169.87 \pm 8.26 b
RCF	4.94 \pm 0.17 b	17.66 \pm 0.51 a	1.16 \pm 0.17 ab	0.74 \pm 0.04 a	95.80 \pm 1.21 b	68.58 \pm 1.54 bc	185.31 \pm 1.98 ab
RCF+EM	5.68 \pm 0.30 a	24.88 \pm 8.40 a	1.12 \pm 0.12 ab	0.71 \pm 0.04 a	120.35 \pm 8.05 a	95.58 \pm 0.34 a	196.74 \pm 8.96 a
RCF+W	4.91 \pm 0.26 b	17.77 \pm 1.37 a	1.18 \pm 0.13 ab	0.73 \pm 0.15 a	97.81 \pm 1.61 b	68.83 \pm 10.18 bc	184.02 \pm 4.12 ab

有研究发现,化肥的大量长期施用,特别是氮肥的高投入能够显著降低土壤 pH,加剧土壤酸化程度^[33]。本试验中 CF 处理土壤 pH 低于其他处理,与前人研究结果一致;同时,减施化肥配施 EM 菌剂与其他各处理相比能够显著提高土壤 pH,与 CF 处理相比,增幅达到 20.08%,表明 EM 菌剂能提升土壤 pH。

土壤有机质含量的增加不仅对土壤酸碱缓冲能力具有积极作用,还能反映土壤肥力水平的高低。与 CK 相比,其他各处理均能提高土壤有机质含量,但各处理间差异不显著。

土壤碱解氮和有效磷在 CF 处理与 RCF+W 处理间无显著差异,在 CF 处理与 RCF+EM 处理间无显著差异,但 RCF+EM 处理显著高于 RCF+W 处理,增幅为 23.04% 和 38.86%,可能是 EM 菌剂中的有益微生物能够矿化释放土壤中被固持的矿质态氮与难溶性磷素^[34-35],使 RCF+EM 处理与 CF 处理间碱解氮和有效磷达到相同水平。RCF+EM 处理的速效钾含量显著高于 CF 处理,增幅达 15.82%,减施化肥

的 3 个处理间差异不显著。钾是品质元素,玉米地土壤全量化肥处理速效钾含量较低,可能被植株吸收转移至果实中促进其品质提升。

2.4 化肥配施微生物菌剂对土壤微生物的影响

2.4.1 化肥配施微生物菌剂对土壤微生物生物量碳氮的影响

作为土壤生态系统的重要组成部分,土壤微生物生物量的变化是评价土壤肥力高低的重要依据^[36]。由图 2 可知,土壤微生物生物量碳氮含量均在配施 EM 菌剂处理达到最高,表明菌剂中微生物的繁殖发育能够促进土壤养分的固持与转化,共同维持良好的土壤质量。与其他各处理相比,RCF+EM 处理微生物生物量氮含量显著提高,其他各处理间没有显著差异。常会庆等^[37]研究发现,菌肥、有机肥、尿素的配施对土壤微生物生物量碳氮有明显的提高作用,且配施的效果要明显地优于其单因素或双因素的施用,其中又以菌肥和有机肥的作用最大。RCF 处理的微生物生物量碳氮高于 CF 处理,可能是由于其 pH 高于 CF 处理,导致其含量较高。

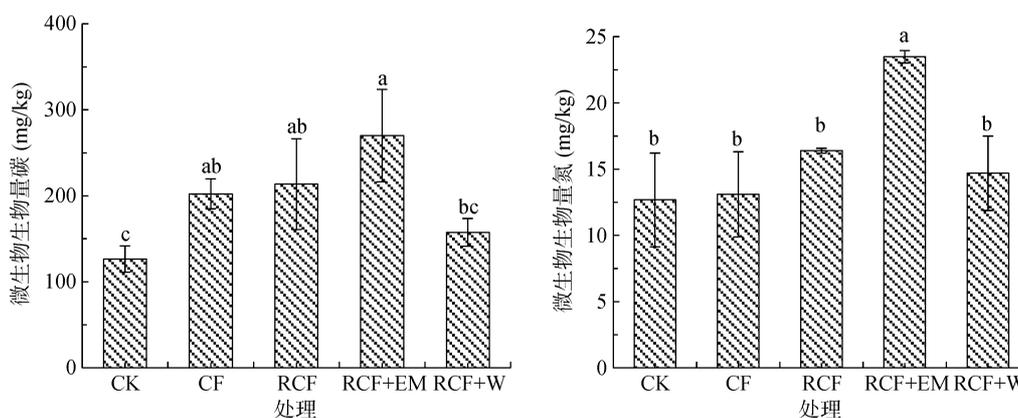


图 2 不同处理对鲜食玉米土壤微生物生物量碳氮的影响

Fig. 2 Effects of different treatments on soil microbial biomass C and N of fresh corn

2.4.2 化肥配施微生物菌剂对鲜食玉米土壤三大菌数量的影响

土壤细菌、真菌及放线菌共同构成土壤微生物群落。由表 3 可知,不同施肥条件,土壤细菌、真菌、放线菌数量变化并不一致。整体来看,配施 EM 菌剂能够提高土壤中微生物数量。较 CF 处理,RCF+EM 处理显著增加了土壤中细菌和放线菌数量,增幅分别达到 153.42% 和 124.17%。

土壤微生物数量的增加可能是微生物菌剂的施用提升了土壤 pH 及有机质含量,酸度的改善更适于微生物的繁殖生长,同时增加了土壤中活性有机碳源的数量,为土壤中微生物提供了充足的能源^[38-39]。RCF 与 RCF+W 处理间土壤微生物总数未达到显著差异,真菌数量 CF、RCF 和 RCF+W 处理都显著高

于 RCF+EM 处理,说明配施 EM 菌剂能间接抑制因化肥施用过多而产生的真菌生长,这与段雪娇^[40]研究中得出的细菌及放线菌的大量繁殖在一定程度上抑制了土壤中真菌的生长结论相符合。

表 3 不同处理对鲜食玉米土壤微生物数量的影响
Table 3 Effects of different treatments on soil microbial population of fresh corn

处理	细菌 ($\times 10^7$ cfu/g)	真菌 ($\times 10^4$ cfu/g)	放线菌 ($\times 10^5$ cfu/g)
CK	0.88 ± 0.39 b	1.64 ± 0.38 bc	0.91 ± 0.16 b
CF	1.61 ± 0.32 b	3.63 ± 1.17 a	1.84 ± 0.52 b
RCF	1.48 ± 0.79 b	2.85 ± 0.96 ab	2.28 ± 0.42 b
RCF+EM	4.08 ± 0.73 a	0.78 ± 0.15 c	4.08 ± 1.02 a
RCF+W	1.18 ± 0.41 b	2.54 ± 0.53 ab	2.34 ± 1.00 b

3 结论

本研究结果表明,减施化肥配施 EM 菌剂能提高鲜食玉米产量,并达到施用全量化肥的效果,同时果实品质可溶性糖和维生素 C 的含量也能达到全肥的效果,可溶性蛋白与全肥处理相比显著增加。配施 EM 菌剂处理能改善土壤理化性质,缓解土壤酸碱度,显著提高土壤 pH,并且能够促进土壤速效养分和有机质含量的提升,土壤微生物生物量碳氮含量达到最高,其中微生物生物量氮含量与其他各处理相比差异达到显著水平,细菌、放线菌数量显著高于其他各处理。

参考文献:

- [1] 史常亮, 郭焱, 朱俊峰. 中国粮食生产中化肥过量施用评价及影响因素研究[J]. 农业现代化研究, 2016, 37(4): 671-679.
- [2] 孔凡斌, 郭巧苓, 潘丹. 中国粮食作物的过量施肥程度评价及时空分异[J]. 经济地理, 2018, 38(10): 201-210, 240.
- [3] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924.
- [4] 邱君. 农业污染治理政策分析[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2008.
- [5] 柳小刚, 闫耀廷, 张吉宁. 化肥减量配施有机肥对玉米生长发育及产量的影响[J]. 农业科技与信息, 2018, 15(15): 28-30.
- [6] 王立刚, 李维炯, 邱建军, 等. 生物有机肥对作物生长、土壤肥力及产量的效应研究[J]. 土壤肥料, 2004(5): 12-16.
- [7] 沈德龙, 李俊, 姜昕. 我国微生物肥料产业现状及发展方向[J]. 中国农业信息, 2014(9): 41-42, 64.
- [8] 吴建峰, 林先贵. 我国微生物肥料研究现状及发展趋势[J]. 土壤, 2002, 34(2): 68-73.
- [9] Bianco C, Defez R. Improvement of phosphate solubilization and Medicago plant yield by an indole-3-acetic acid-overproducing strain of *Sinorhizobium meliloti*[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2010, 76(14): 4626-4632.
- [10] Panhwar Q A, Jusop S, Naher U A, et al. Application of potential phosphate-solubilizing bacteria and organic acids on phosphate solubilization from phosphate rock in aerobic rice[J]. The Scientific World Journal, 2013, 2013: 272409.
- [11] Mehta P, Walia A, Chauhan A, et al. Plant growth promoting traits of phosphate-solubilizing rhizobacteria isolated from apple trees in trans Himalayan region of Himachal Pradesh[J]. Archives of Microbiology, 2013, 195(5): 357-369.
- [12] 龙明华, 于文进, 唐小付, 等. 复合微生物肥料在无公害蔬菜栽培上的效应初报[J]. 中国蔬菜, 2002(5): 4-6.
- [13] 王鸿磊, 王红艳, 崔丛光. 黄瓜专用生物有机肥对设施黄瓜生长及品质的影响[J]. 北方园艺, 2013(1): 29-31.
- [14] 尉辉. 大蒜连作障碍的主要表现及 EM 菌剂调节的研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2011.
- [15] 冷鹏, 方瑞元, 张祥胜, 等. 新型 EM 菌肥对有机蔬菜产量及重金属含量的影响[J]. 中国果菜, 2018, 38(10): 25-28.
- [16] 孙红霞, 武琴, 郑国祥, 等. EM 对茄子、黄瓜抗连作障碍和增强土壤生物活性的效果[J]. 土壤, 2001, 33(5): 264-267.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [18] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1987, 19(6): 703-707.
- [19] Wu J. The turnover of organic C in soils[D]. UK: University of Reading, 1991.
- [20] 范围, 吴景贵, 李建明, 等. 秸秆均匀还田对东北地区黑钙土土壤理化性质及玉米产量的影响[J]. 土壤学报, 2018, 55(4): 835-846.
- [21] 陈治嘉. 两种化肥减施途径的玉米施肥效应研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2017.
- [22] 谢静静. 化肥减量配施生物菌肥对不结球白菜生长及产量和品质的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2015.
- [23] 李维炯, 倪永珍. EM(有效微生物群)的研究与应用[J]. 生态学杂志, 1995, 14(5): 58-62, 65.
- [24] 李立. EM 对玉米生长发育和产量的影响及替氮效应的研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2007.
- [25] 任大明, 王术, 刘江, 等. 有效微生物群在玉米生产中作用机理研究[J]. 玉米科学, 1999, 7(1): 62-64.
- [26] 温丽乐, 王平. 氮、磷施用水平对土壤水肥状况及玉米产量的影响[J]. 作物研究, 2019, 33(1): 15-17, 22.
- [27] 李翠兰, 李志洪, 高强, 等. 有机无机复合肥及调节剂对玉米产量及磷素吸收的影响[J]. 玉米科学, 2010, 18(5): 105-107, 113.
- [28] 吴雪, 王坤元, 牛晓丽, 等. 番茄综合营养品质指标构建及其对水肥供应的响应[J]. 农业工程学报, 2014, 30(7): 119-127.
- [29] 赵贞, 杨延杰, 林多, 等. 微生物菌肥对日光温室黄瓜生长发育及产量品质的影响[J]. 中国蔬菜, 2012(18): 149-153.
- [30] 韦翔华, 李华兴, 冯宏, 等. 不同肥料对后茬土壤微生物及玉米生长的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(2): 138-142.
- [31] 王冰清, 尹能文, 郑棉海, 等. 化肥减量配施有机肥对蔬菜产量和品质的影响[J]. 中国农学通报, 2012, 28(1): 242-247.
- [32] 粟丽, 洪坚平, 谢英荷, 等. 生物菌肥对采煤塌陷复垦土壤生物活性及盆栽油菜产量和品质的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(5): 939-944.
- [33] 李大明, 柳开楼, 叶会财, 等. 长期不同施肥处理旱地红壤剖面养分分布差异[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(3): 633-640.
- [34] Choi W J, Ro H M, Chang S X. Recovery of fertilizer-derived inorganic-¹⁵N in a vegetable field soil as

- affected by application of an organic amendment[J]. *Plant and Soil*, 2004, 263(1): 191–201.
- [35] Blankenau K, Olf H, Kuhlmann H. Strategies to improve the use efficiency of mineral fertilizer nitrogen applied to winter wheat[J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2002, 188(3): 146–154.
- [36] 汤宏, 沈健林, 张杨珠, 等. 秸秆还田与水分管理对稻田土壤微生物量碳、氮及溶解性有机碳、氮的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(1): 240–246.
- [37] 常会庆, 洪坚平. 菌肥、有机肥、尿素配施对土壤生物量碳、氮的影响[J]. *安徽农业科学*, 2007, 35(21): 6521–6523, 6535.
- [38] 邓兆权, 祖庆学, 林松, 等. 有机菌肥与水溶性肥料配施对植烟土壤及烤烟品质的影响[J]. *江西农业学报*, 2018, 30(7): 56–61.
- [39] 吴江利, 罗学刚, 李宝强, 等. 微生物菌肥作用下荒漠土壤微生物群落结构和功能研究[J]. *中国农学通报*, 2015, 31(9): 216–223.
- [40] 段雪娇. 微生物菌剂对水稻土土壤微生物数量及酶活性的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015.