

不同抗旱措施配施菌肥对河西绿洲土壤改良和制种玉米产量的影响

肖让¹, 张永玲¹, 赵芸晨², 郭世乾³, 崔增团³, 师伟杰⁴, 吴克倩¹, 俞海英¹

(1.河西学院土木工程学院, 河西走廊水资源保护利用研究所, 甘肃 张掖 734000; 2.河西学院农业与生态工程学院, 甘肃 张掖 734000; 3.甘肃省耕地质量建设保护总站, 兰州 730020; 4.张掖市甘州区农业技术推广中心, 甘肃 张掖 734000)

摘要:为探讨地膜覆盖和施用保水剂配施菌肥后河西绿洲土壤微生物数量、酶活性变化及制种玉米产量和水分利用效率的影响,在河西走廊绿洲灌区设置单地膜覆盖(AF)、单施保水剂(AW)、单施菌肥(AB)、保水剂配施菌肥(WB)、地膜覆盖配施菌肥(FB)、露地不施保水剂和菌肥(CK)6个处理,分析制种玉米播种前和收获后0—20、20—40 cm土壤微生物数量及酶活性动态变化和产量变化。结果表明:(1)菌肥单施或配施均可提高土壤过氧化氢酶、脲酶、蔗糖酶、磷酸酶活性和增加真菌、细菌、放线菌数量及土壤微生物碳氮含量,改善土壤微生物环境,其中保水剂配施菌肥处理改善效果最佳,其次为地膜配施菌肥处理。(2)菌肥单施对制种玉米生长影响较小,但地膜配施菌肥可显著提高制种玉米叶面积指数和干物质积累量,并能调节产量构成因子。(3)不同抗旱措施及其配施菌肥能够不同程度促进制种玉米籽粒产量形成,其中地膜配施菌肥制种玉米籽粒产量最高(10 105.64 kg/hm²),其次为单地膜覆盖(8 967.24 kg/hm²)和保水剂配施菌肥(8 323.93 kg/hm²),分别较CK显著增产61.99%, 43.74%, 33.43%。(4)地膜配施菌肥制种玉米水分利用效率最高(2.40 kg/m³),其次为单地膜覆盖(2.15 kg/m³)和保水剂配施菌肥(1.89 kg/m³),分别较CK显著提高80.10%, 61.84%, 41.80%。因此,综合考虑产量、水分生产效率及土壤微环境等指标,抗旱措施配施菌肥最佳组合方式为地膜配施菌肥,既能促进制种玉米的生长发育,又能提高灌溉水利用效率和水分利用效率,在增产的同时,还能改善耕作层土壤微环境,对河西灌区制种玉米可持续发展具有重要的意义。

关键词:地膜覆盖; 保水剂; 菌肥; 制种玉米; 土壤酶活性; 土壤微生物; 产量

中图分类号:S5213;S144

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2021)03-0341-09

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.03.047

Effects of Different Drought Resistance Measures Combined with Microbial Fertilizer on Soil Amelioration and Yield of Seed Maize in Hexi Corridor

XIAO Rang¹, ZHANG Yongling¹, ZHAO Yunchen², GUO Shiqian³,

CUI Zengtuan³, SHI Weijie⁴, WU Keqian¹, YU Haiying¹

(1.College of Civil Engineering, Hexi University, Research Institute of Water Resources Protection and Utilization in Hexi Corridor, Zhangye, Gansu 734000; 2.College of Agricultural and Ecological Engineering,

Hexi University, Zhangye, Gansu 734000; 3.Cultivated Land Quality and Construction Protection Station of Gansu,

Lanzhou 730020; 4.Agricultural Technology Promotion Center of Ganzhou District in Zhangye, Zhangye, Gansu 734000)

Abstract: The aim of this study was exploring the effects of plastic film mulching and application of water retaining agent combined with microbial fertilizer on quantity of soil microorganism, enzyme activity, and yield and water use efficiency of seed maize in Hexi Corridor. In oasis irrigation area of the Hexi Corridor, six treatments were set up, which were single plastic film mulching (AF), single application of super absorbent polymer (AW), single application of microbial fertilizer (AB), application of super absorbent polymer combined with microbial fertilizer (WB), plastic film mulching combined with microbial fertilizer (FB) and neither super absorbent polymer nor microbial fertilizer in open field (CK). The dynamic changes of soil microbial quantity, enzyme activity in 0—20 and 20—40 cm soil layer before sowing and after harvesting, and the yield of seed maize were analyzed. The results showed that: (1) Single or combined application of microbial fertilizer both could improve the activity of soil catalase, urease, invertase, phosphatase, and increase the

收稿日期:2020-12-28

资助项目:国家自然科学基金项目(41867010);河西学院横向科研项目(H2018005, H2019009, H2019033, H2020024)

第一作者:肖让(1979—),男,硕士,副教授,主要从事旱区作物水肥一体化研究。E-mail: xiaorang999@163.com

通信作者:张永玲(1977—),女,硕士,副教授,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: zhangyl5266@163.com

number of fungi, bacteria and actinomycetes, and the content of soil microbial carbon and nitrogen, and improve the soil microbial environment. Among them, the effect of super absorbent polymer combined with microbial fertilizer was the best, and followed by the treatment of FB. (2) The treatment of AB had little influence on the growth of seed maize, but the treatment of FB could significantly increase the leaf area index and dry matter accumulation of seed maize, and could adjust the yield composition factors. (3) Different drought resistance measures and the combined application of microbial bacterial fertilizers could promote yield formation of seed maize. Among the different treatments, the grain yield of the FB treatment was the highest (10 105.64 kg/hm²), followed by the treatment of AF (8 967.24 kg/hm²) and WB (8 323.93 kg/hm²), and the production increased by 61.99%, 43.74% and 33.43% compared with CK, respectively. (4) The water use efficiency was the highest in the treatment of FB (2.40 kg/m³), followed by AF (2.15 kg/m³) and WB (1.89 kg/m³), and the water use efficiency significantly improved by 80.10%, 61.84% and 41.80% compared with CK, respectively. Therefore, comprehensive considering the yield, water production efficiency and soil microenvironment, the best combination of drought resistant measures combined with microbial fertilizer was plastic film mulching combined with microbial fertilizer, which could not only promote the growth and development of seed maize, but also improve irrigation water use efficiency and water use efficiency, meanwhile improve the soil micro-environment of the tillage layer, which was of great significance to the sustainable development of seed maize production in the Hexi Corridor.

Keywords: film mulching; super absorbent polymer; microbial fertilizer; seed maize; soil enzyme activity; soil microorganism; yield

河西走廊中段张掖灌区是全国最大的杂交玉米种子生产基地,大力发展制种玉米产业不仅承担全国供种重任,而且能以特色产业发展带动当地精准脱贫,建立健全防止返贫致贫长效机制,确保已脱贫农户真脱贫、不返贫。该区域内年均降水量仅为 130 mm 左右,仅占制种玉米正常耗水量的 1/3,严重的土壤水分亏缺完全制约了该区域内农林产业快速发展。为此,张掖市于 2012 年开始聚焦产业振兴,大力发展高效节水农业,改善土壤水肥环境,有效提高旱作农业生产效率。多种高效节水灌溉措施中尤以膜下滴灌节水施肥方式效果最佳,已在该区域内广泛用于制种玉米^[1]、洋葱^[2]等主栽作物,也在甜椒^[3]、苜蓿^[4]等经济作物中大面积推广,并取得了较好的节水增产和提高品质效果。由于覆盖地膜造成作物生育期内土壤孔隙度和通透性降低,阻碍土壤空气的循环和交换,致使土壤中 CO₂ 含量过高,影响土壤中微生物数量的消长、酶活性提高和土壤正常结构的形成,使土壤生态系统发生改变,不利于农田生产能力提高^[5]。菌肥是添加多个菌种改善土壤环境的一种新型生物肥料,施入土壤后快速增殖形成群体优势,通过微生物的活动为植物提供营养、协助植物吸收养分、促进生长、增强抗性、减少病虫害发生,并具有培肥地力、提高肥料利用率等功效^[6]。已有研究^[7]表明,增施菌肥可显著增加土壤中微生物数量,提高土壤酶活性和有机质含量,而且具有解钾、释磷、固氮的功能。目前,菌肥已被广泛应用于农业生产,但受自

然环境的制约,其表现效果不同。孟阿静等^[8]以日光温室为番茄生长环境,通过增施菌肥发现,番茄单果重和单株结果数可显著提高 12.35% 和 13.47%,同时可改善果实品质,维生素 C 和番茄红素含量显著提高 130.56%, 30.33%;田露等^[9]研究发现,在黄土高原旱作农田增施菌肥可改善燕麦土壤微生物生物量碳、氮含量和土壤酶活性,且能够促进燕麦籽粒产量和生物产量提高 8.40%~20.12% 和 10.80%~25.09%;同时,王丹等^[10]亦在不同生态区开展了菌肥与土壤环境、作物产量等相关研究,拓展了该项技术覆盖范围。先前研究为菌肥利用技术提供了可能选择,对发展可持续农业、改善土壤质量具有重要的指导意义。然而当前研究主要集中单一增施菌肥对土壤环境、作物产量影响等方面,而对不同抗旱措施与菌肥配施关注较少,且该项技术在河西绿洲对土壤改良和制种玉米产量的影响研究更是鲜有报道。本研究立足于河西绿洲制种玉米特色产业,开展不同抗旱措施配施菌肥对土壤改良和制种玉米生长发育以及产量和水分利用效率影响的大田试验,以期菌肥在制种玉米及其他大田作物种植上的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2018—2019 年在甘肃省张掖市甘州区党寨镇田家闸村制种玉米水肥一体化综合示范基地(100°06′—100°52′E, 38°32′—39°24′N)进行。该试验区属温带大陆性气候区,海拔 1 474 m,年平均气

温 7.25 ℃, 年均降水量 130 mm, 年日照时间 2 975 h, 无霜期 157 天。试验田土壤为沙壤土, 耕层土壤田间最大持水量 26.8%, 作物萎蔫系数为 7.3%, 土壤容重 1.38 g/cm³。0—40 cm 耕层土壤 pH 为 8.35, 有机质含量 16.30 g/kg, 速效磷、碱解氮和速效钾含量依次为 15.80, 45.32, 125.36 mg/kg, 肥力中等。2018 年降水量 118.2 mm, 蒸发量 1 898.5 mm, 2019 年降水量 207.5 mm, 蒸发量 1 736.9 mm。

保水剂:选用农林保水剂(长效型), 选购于甘肃海瑞达生态环境科技有限公司, 在播种前与种肥进行混合施入土壤, 施用量为 45.0 kg/hm², 施入深度为 10—15 cm。

菌肥:选购于青岛海大生物集团有限公司“海状元”, 其有效活菌数 $\geq 2.0 \times 10^8$ 个/g, 有机质 $\geq 40\%$, 施用量为 600 kg/hm²。

1.2 试验设计

试验以制种玉米(*Zea mays* L.) 为供试材料, 品种为“NC242”, 其亲本均由甘肃中种国际种子有限公司提供, 种植密度为 8.0×10^4 株/hm²。设单地膜覆盖(AF)、单施保水剂(AW)、单施菌肥(AB)、保水剂配施菌肥(WB)、地膜覆盖配施菌肥(FB)、露地不施保水剂和菌肥(CK)6 个处理, 每个处理 3 次重复, 共 18 个小区, 小区面积 90 m² (5 m × 18 m), 采用裂区试验设计。地表铺设滴灌带(大禹节水集团股份有限公司生产), 其中单地膜覆盖(AF)和地膜覆盖配施菌肥(FB)采用膜下滴灌灌溉。

种植采用播种机穴播, 先播母本, 父本分期播种。2018 年 4 月 17 日播种母本, 4 月 26 日和 30 日分别第 1 期和第 2 期播种父本, 9 月 30 日收获; 2019 年 4 月 12 日播种母本, 4 月 19 日和 4 月 24 日分别第 1 期和第 2 期播种父本, 9 月 15 日收获。地表用 1.2 m 宽地膜全膜覆盖, 膜与膜之间重叠 5 cm 并用土压实, 父母本均种植于膜上。父母本种植行比为 1 : 4, 即 1 行父本, 4 行母本, 东西行向种植, 母本宽窄行种植, 行距 0.45 m, 株距 0.2 m, 父本在 2 行母本中间播种, 行距 1.35 m, 株距 0.2 m, 每小区铺设 5 行膜, 每膜种植 2 行。保水剂和菌肥均在播种前与基施化肥进行混合, 基施化肥 N 105 kg/hm², P₂O₅ 138 kg/hm² 和 K₂O 75 kg/hm²。氮肥追施用量 345 kg/hm², 水肥耦合滴灌施入, 追肥施用时间分别为拔节期、吐丝期、灌浆期, 追施比例分别为 3 : 4 : 3。2018 年制种玉米生育期内灌溉 7 次, 分别为播种后第 51, 65, 73, 90, 98, 108, 116 天, 灌水定额分别为 457.4, 571.7, 232.9, 457.4, 522, 514.5, 502.9 m³/hm², 灌溉定额为 3 258.8 m³/hm²; 2019 年制种玉米生育期内灌溉 6 次, 分别为播种后第 46, 62, 82, 95, 101, 120 天, 灌水定额分别为 413.6, 522.5, 470.1, 419.3, 562.8, 531.0 m³/hm²,

灌溉定额为 2 919.3 m³/hm²。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤微生物和酶活性 制种玉米收获后(2018 年 9 月 30 日和 2019 年 9 月 15 日), 采用五点法分别在各试验小区中长势一致的制种玉米株间取样, 取样深度为 40 cm, 每 20 cm 为梯度进行采样, 一部分测定土壤含水量, 另一部分用信封装袋、标记, 带回实验室放置在 4 ℃ 冷藏室立即测定微生物数量和酶活性。采用氯仿熏蒸浸提法^[11] 测定土壤微生物碳、氮含量, 细菌采用牛肉膏蛋白胨培养基法^[12] 测定、真菌采用 PDA 培养基法^[12] 测定、放线菌采用高氏一号培养基法^[12] 测定。过氧化氢酶活性测定采用紫外分光光度法^[13] 测定; 脲酶活性测定采用苯酚钠一次氯酸钠比色法^[13] 测定; 蔗糖酶活性测定采用比色法^[13] 测定; 磷酸酶活性测定采用磷酸苯二钠比色法^[13] 测定。

1.3.2 土壤水分 生育期内, 每隔 15 天在长势一致的 2 株玉米中间位置取土, 利用烘干法测定土壤含水量。测深 100 cm, 以 20 cm 为梯度, 共 5 个层次。

土壤贮水量 $SWS(mm) = h \times \rho \times \omega \times 10$
式中: h 为土层深度(cm); ρ 为土壤容重(g/cm³); ω 为土壤含水量(%)。

1.3.3 叶面积指数和干物质 分别在制种玉米苗期、拔节期、大喇叭口期、吐丝期、灌浆期和成熟期, 随机选取 5 株玉米, 带回实验室将每株玉米的所有叶片延叶鞘与叶片连接处剪下后利用 YMJ-B 叶面积测量仪(浙江拓普云农科技股份有限公司生产)测量叶面积, 最后取平均值并计算叶面积指数(LAI=总叶面积/土地面积)。随后将植株分解后用纸袋标记分装, 105 ℃ 恒温烘箱杀青 40 min, 然后将温度调至 80 ℃, 烘干至恒质量。

1.3.4 产量及农艺性状 制种玉米成熟后按小区单独收获, 自然风干后脱粒并计产。同时选取代表该区长势的玉米 20 株, 测定果穗直径、果穗长度、穗粒数、单株穗粒重、百粒重等指标。

1.3.5 籽粒水分利用效率 制种玉米耗水量计算公式为:

耗水量(ET, mm) = 播前 100 cm 土壤贮水量 - 收获时 100 cm 土壤贮水量 + 生育期降水量 + 生育期灌水量

水分利用效率($WUE, kg/m^3$) = 籽粒产量/生育期耗水量

1.4 数据统计分析

采用 Excel 2010 软件对所测数据进行计算, 利用 SPSS 19.0 软件中 LSD 多重比较法比较各处理相关数据差异的显著性, Origin Pro 8.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同抗旱措施配施菌肥对制种玉米田土壤酶活性的影响

由表 1 可知,保水剂和菌肥单施或配施较 CK 均可提高 0—40 cm 耕层内土壤酶活性,而单一地膜覆盖造成酶活性不同程度降低。0—20 cm 耕层内,与 CK 相比,处理 WB、AB 和 FB 可显著提高过氧化氢酶和脲酶活性,分别达 74.97%,68.10%,59.55%和 80.52%,49.13%,46.15%,单施保水剂处理 AW 仅分别提高 3.01%和 4.47%,无显著差异,而单地膜覆盖处理 AF 不利于过氧化氢酶和脲酶活性提高,分别降低 13.58%和 5.58%。处理 WB、FB、AB 和 AW 显著提高

蔗糖酶和磷酸酶活性,分别达 155.96%,128.68%,44.60%,20.27%和 44.91%,19.22%,27.86%,16.39%,而处理 AF 分别降低 2.24%和 5.21%。20—40 cm 耕层内土壤酶活性响应趋势与 0—20 cm 耕层相似,但随土层深入逐渐降低,处理 AW、AB、WB 和 FB 亦可提高过氧化氢酶、脲酶、蔗糖酶和磷酸酶活性,增幅分别为 1.30%~76.37%,18.80%~83.36%,18.81%~150.31%,12.85%~52.01%,其中处理 WB 增幅最大,其次为 AB、FB、AW 增幅最小。处理 AF 依然不利于深层土壤酶活性提高,其中过氧化氢酶和蔗糖酶活性显著降低 20.90%和 30.80%,脲酶和磷酸酶活性仅降低 0.92%和 4.42%,无显著差异。

表 1 不同抗旱措施配施菌肥对制种玉米田土壤酶活性的影响

土层深度/cm	处理	过氧化氢酶		脲酶		蔗糖酶		磷酸酶	
		测定值/	变异	测定值/	变异	测定值/	变异	测定值/	变异
		(mL·g ⁻¹)	系数/%	(mg·g ⁻¹)	系数/%	(mg·g ⁻¹)	系数/%	(mg·g ⁻¹)	系数/%
0—20	AF	5.721±0.573d	10.016	0.761±0.028d	3.679	1.394±0.028d	2.009	227.687±13.509d	5.933
	AW	6.819±0.408c	5.983	0.842±0.075c	8.907	1.715±0.091bc	5.306	279.551±29.844c	10.676
	AB	11.128±0.774ab	6.955	1.202±0.076b	6.323	2.062±0.203b	9.845	307.122±16.729b	5.447
	WB	11.583±1.019a	8.797	1.455±0.093a	6.392	3.650±0.131a	3.589	348.074±9.668a	2.778
	FB	10.562±0.682b	6.457	1.178±0.040b	3.396	3.261±0.287a	8.801	286.365±10.126bc	3.536
	CK	6.620±0.216c	3.263	0.806±0.082cd	10.174	1.426±0.054cd	3.787	240.195±7.605d	3.166
	AF	5.155±0.303e	5.878	0.643±0.016d	2.488	0.883±0.036e	4.077	213.809±18.830d	8.807
20—40	AW	6.802±0.751d	11.917	0.771±0.037c	4.799	1.516±0.171cd	11.280	252.433±15.772c	6.248
	AB	10.524±0.802b	7.621	1.115±0.081a	7.265	1.807±0.050c	2.767	276.970±25.005b	9.028
	WB	11.494±0.679a	5.907	1.190±0.097a	8.151	3.194±0.093a	2.912	340.035±23.571a	6.932
	FB	8.791±0.428c	4.869	0.929±0.046b	4.952	2.405±0.194b	8.067	271.274±11.709bc	4.316
	CK	6.517±0.111d	1.703	0.649±0.018d	2.773	1.276±0.079d	6.191	223.686±6.332d	2.831

注:过氧化氢酶活性单位 mL/g 表示 1 g 干土 1 h 内消耗的 0.1 mol/L KMnO₄ 体积数;脲酶活性单位 mg/g 表示 24 h 后 1 g 土壤中 NH₃-N 的质量;蔗糖酶活性单位 mg/g 表示 24 h 后 1 g 土壤中葡萄糖的质量;磷酸酶活性单位 mg/g 表示 24 h 后 1 g 土壤中释放出酚的质量;表中数据为平均值±标准误差;同列不同小写字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)。下同。

2.2 不同抗旱措施配施菌肥对制种玉米田土壤微生物数量的影响

由表 2 可知,菌肥配施对制种玉米田土壤真菌、细菌、放线菌等微生物数量影响差异显著,较 CK 均可提高 0—40 cm 耕层内土壤微生物数量。与 CK 相比,处理 AW、AB、WB 和 FB 可显著提高 0—40 cm 耕层内土壤中真菌和细菌数量,其中处理 WB 增幅最大,分别为 127.19%~298.48%和 66.78%~146.74%,其次为 FB、AB、AW 增幅最小,仅分别为 21.23%~27.88%和 15.51%~18.16%,且各处理在 20—40 cm 土层内促进真菌和细菌数量繁殖较 0—20 cm 更具有优势。处理 WB、FB 和 AB 可显著增加 0—20、20—40 cm 放线菌数量,分别达 80.92%,62.45%,60.07%和 58.13%,34.21%,29.82%,而单施保水剂处理 AW 仅分别提高 13.76%和 2.18%,无显著差异。可以看出,各处理在 0—20 cm 土层内促进放线菌数量繁殖较 20—40 cm 更具有优势。处理 WB、FB 和 AB 可显著增加

0—40 cm 土壤微生物量碳氮,依次分别为 106.17%,77.34%,48.59%和 197.96%,90.05%,73.30%,而单施保水剂处理 AW 与 CK 无显著差异。处理 AF 不利于微生物繁殖,造成制种玉米收获后土壤微生物数量不同程度减少,较 CK 显著降低 0—20 cm 耕层内土壤真菌数量、土壤微生物量碳氮和 20—40 cm 耕层内土壤细菌和放线菌数量,分别达 32.30%,17.69%和 25.31%,18.41%。

2.3 不同抗旱措施配施菌肥对制种玉米叶面积指数的影响

由图 1 可知,随着制种玉米生育期推移,叶面积指数呈先增大后减小趋势,且各处理均在吐丝期达到最大值,随后进入叶片衰老期,叶面积指数逐渐减小。苗期至灌浆期,地膜覆盖处理 AF 和 FB 叶面积指数大于 AW、AB、WB 和 CK,且地膜覆盖配施菌肥处理 FB 增幅效果优于单地膜覆盖处理 AF。2018 年和 2019 年综合平均数据分析发现,FB 和 AF 苗期至吐丝期内叶面积

指数较 CK 分别显著增加 21.87%~88.31%和 16.80%~74.80%,且在生育前期增幅效果较生育中期更加显著。灌浆期各处理间叶面积指数均无显著差异,但至成熟

期,由于制种玉米覆膜后早衰,处理 FB 和 AF 显著低于 CK,降幅分别达 9.29%和 16.70%,而处理 AW 和 WB 较 CK 仅分别增加 3.13%和 4.19%,无显著差异。

表 2 不同抗旱措施配施菌肥对制种玉米田土壤微生物数量的影响

土层深度/cm	处理	真菌		细菌		放线菌		土壤微生物量碳氮	
		测定值/	变异	测定值/	变异	测定值/	变异	测定值/	变异
		(cuf·mg ⁻¹)	系数/%	(cuf·mg ⁻¹)	系数/%	(cuf·mg ⁻¹)	系数/%	(mg·kg ⁻¹)	系数/%
0—20	AF	102.86±9.68e	9.41	280.81±30.64d	10.91	302.19±12.66d	4.19	33.46±4.56e	13.63
	AW	184.19±4.59c	2.49	355.37±27.19c	7.65	385.73±31.05c	8.05	41.72±4.88d	11.70
	AB	216.53±12.51b	5.78	442.72±20.85b	4.71	542.76±60.46b	11.14	60.40±5.12c	8.48
	WB	345.20±10.66a	3.09	513.08±36.91a	7.19	613.45±10.77a	1.76	83.81±8.42a	10.05
	FB	318.07±30.19a	9.49	474.55±41.42ab	8.73	550.81±28.81b	5.23	72.09±2.17b	3.01
	CK	151.94±16.27d	10.71	307.64±11.49d	3.73	339.07±17.66cd	5.21	40.65±5.65d	13.90
20—40	AF	35.23±4.06d	11.52	54.73±5.15e	9.41	63.24±4.02d	6.36	4.07±0.19d	4.67
	AW	47.11±2.57c	5.46	86.59±9.84c	11.36	79.20±7.67c	9.68	4.39±0.27cd	6.15
	AB	98.35±3.02b	3.07	137.53±10.68b	7.77	100.62±10.18b	10.12	7.66±0.16b	2.09
	WB	146.80±9.24a	6.29	180.81±7.77a	4.30	122.57±9.67a	7.89	13.17±1.08a	8.20
	FB	109.93±10.65b	9.69	150.60±9.83b	6.53	104.03±4.83b	4.64	8.40±0.45b	5.36
	CK	36.84±1.87d	5.08	73.28±3.01d	4.11	77.51±2.90c	3.74	4.42±0.53c	11.99

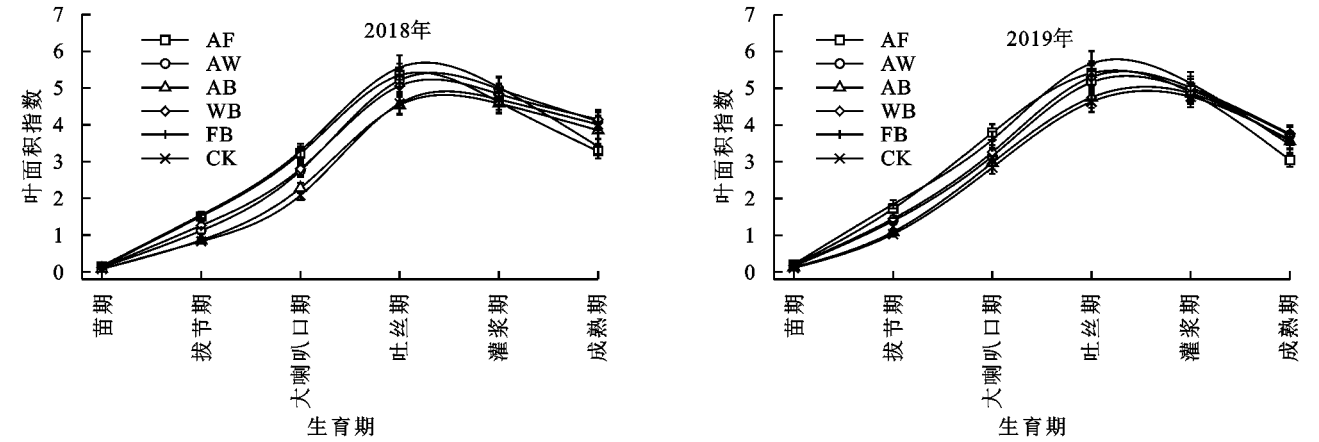


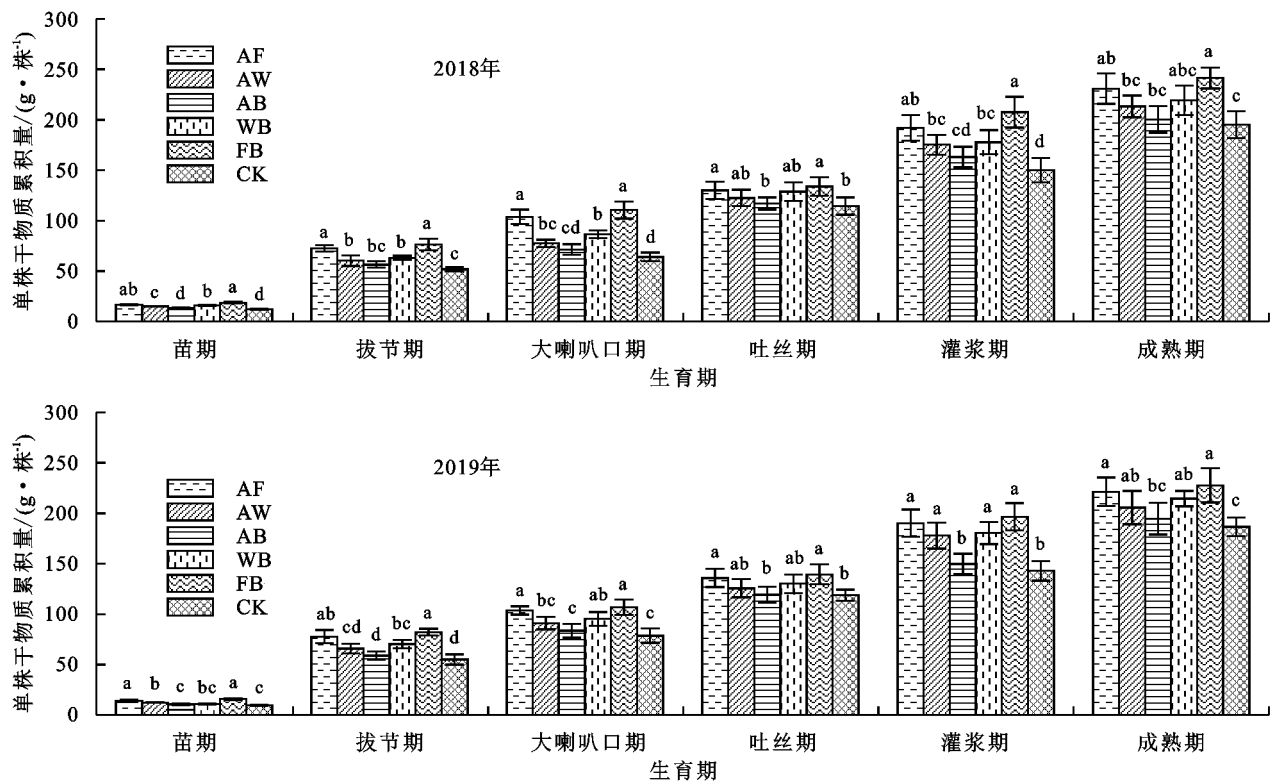
图 1 不同抗旱措施配施菌肥对制种玉米叶面积指数的影响

2.4 不同抗旱措施配施菌肥对制种玉米单株干物质积累量的影响

由图 2 可知,随着制种玉米生育期推移,单株干物质积累量呈持续增加趋势,至成熟期达到最大值。整个生育期内,地膜覆盖处理 AF、FB 和增施保水剂处理 AW、WB 较处理 CK 可显著促进单株干物质积累,其中苗期至大喇叭口期茎秆生物量积累效果最佳,吐丝期进入生殖生长初期阶段,各处理间茎秆生物量间差异逐渐减小,随后进入果实生物量积累阶段,增产效果依然显著。2018 年和 2019 年综合平均数据分析发现,处理 AF、FB、AW 和 WB 较 CK 增幅分别为 14.03%~40.54%,17.13%~57.91%,6.40%~24.87%和 11.00%~28.09%,其中处理 FB 增幅最大,其次为 AF、WB 和 AW。尽管处理 AB 在制种玉米整个生育期内较对照 CK 可增加单株干物质积累量 1.37%~9.12%,但增幅较小,两者间无显著差异。

2.5 不同抗旱措施配施菌肥对制种玉米产量构成因子的影响

由表 3 可知,2018 年和 2019 年,地膜覆盖和保水剂配施菌肥均能显著提高制种玉米产量构成因子,其中 FB 优势更为显著。综合 2 个生长季平均数据分析发现,处理 FB 和 AF 果穗长度、穗重、穗粒重、穗行数、行粒数等指标间无显著差异,较 CK 分别显著提高 15.56%,17.13%,16.92%,12.99%,13.04%,24.37%和 14.12%,14.25%,13.63%,10.49%,11.91%,17.07%。尽管 WB 和 AW 也表现出良好的优势,但增幅效果低于地膜覆盖种植方式,较 CK 各项指标增幅分别为 11.21%,11.00%,9.08%,8.41%,8.08%,9.62%和 8.68%,6.40%,7.29%,6.31%,6.27%,8.78%,且两者间无显著差异。而单施菌肥处理 AB 各项农艺指标与 CK 无显著差异,增幅分别仅为 2.53%,1.37%,3.52%,2.92%,3.79%,1.05%,显著低于地膜覆盖处理。



注:图柱上方不同小写字母表示相同生育期不同处理间差异显著($P<0.05$)。

图 2 不同抗旱措施配施菌肥对制种玉米单株干物质积累量的影响
表 3 不同抗旱措施配施菌肥对制种玉米产量构成因子的影响

年 份	处 理	果穗长度/cm	果穗直径/cm	穗重/g	穗粒重/g	穗行数/个	行粒数/个	百粒重/g
2018	AF	16.1±0.94ab	40.54±1.78a	135.85±6.61ab	114.46±3.05ab	13.3±1.18ab	25.1±1.07ab	27.43±0.89b
	AW	15.5±0.77b	38.89±1.20a	125.63±4.09bc	107.55±5.94bc	12.8±0.75bc	24.3±2.28ab	25.35±1.66c
	AB	14.3±0.60c	38.45±2.25a	119.30±8.37c	102.50±3.82c	12.6±0.49bc	23.9±0.95b	22.70±1.40d
	WB	15.8±1.18ab	39.27±2.84a	130.12±6.66ab	108.82±4.08ab	13.0±0.87ab	24.6±1.55ab	25.58±2.03c
	FB	16.4±0.72a	40.85±3.09a	139.43±8.15a	119.27±7.24a	13.7±0.29a	25.4±1.26a	29.56±1.35a
	CK	13.9±0.75c	38.10±2.63a	118.75±4.72c	99.08±3.37c	12.2±0.50c	22.5±1.93c	22.30±1.02d
2019	AF	15.4±0.88a	39.86±3.51a	130.62±7.14ab	108.46±5.57ab	13.1±0.68ab	24.7±1.32a	25.47±2.16ab
	AW	14.5±1.02b	38.58±2.17a	122.50±6.25bc	102.93±4.16bc	12.6±0.91bc	23.0±0.77bc	23.81±1.18bc
	AB	14.0±0.47bc	37.87±2.56a	117.09±7.03c	100.55±4.22bc	12.0±0.77cd	22.3±2.09c	22.99±1.64c
	WB	14.9±0.68ab	38.74±3.11a	128.71±7.65ab	105.16±5.15ab	12.9±0.42ab	23.5±1.18ab	23.96±0.97bc
	FB	15.5±1.26a	40.28±3.48a	133.77±9.02a	110.13±3.91a	13.3±0.63a	24.9±1.60a	26.63±2.32a
	CK	13.7±0.55c	37.31±2.09a	114.48±5.60c	97.07±3.13c	11.7±0.29d	22.0±0.37c	22.92±1.40c

2.6 不同抗旱措施配施菌肥对制种玉米产量和水分利用效率的影响

由表 4 可知,不同抗旱措施配施菌肥对制种玉米全生育期耗水量、产量、产值、单方水产值、灌溉水利用效率和水分利用效率等指标影响差异显著。综合 2 个生长季平均数据分析发现,与常规露地种植 CK 相比,不同抗旱措施显著降低了制种玉米全生育期耗水量,其中地膜覆盖处理 FB 和 AF 全生育期耗水量最少,分别为 4 232.22,4 180.90 m³/hm²,较 CK 分别显著减少 9.95% 和 11.04%,其次为增施保水剂处理 AW 和 WB,全生育期耗水量分别为 4 322.00,4 414.36 m³/hm²,较 CK 分别降低 8.04% 和 6.07%;不同抗旱措

施均可显著提高制种玉米产量,其中处理 FB、AF、WB 和 AW 产量分别可达 10 105.64,8 967.24,8 323.93,7 891.39 kg/hm²,较 CK 分别显著提高 61.99%,43.74%,33.43% 和 26.50%,而单施菌肥处理 AB 增幅最小,仅较 CK 显著提高 18.25%。同时受产量影响,各处理产值与产量变化一致;各处理均可显著提高单方水产值,其中处理 FB、AF、WB、AW 和 AB 分别较 CK 显著提高 4.59,3.24,2.48,1.96,1.36 元/m³;FB 水分利用效率最高,达 2.40 kg/m³,其次为 AF、AW 和 WB,较 CK 分别显著提高 80.10%,61.84%,41.80%,37.49%,而 AB 水分利用效率为 1.64 kg/m³,较 CK 仅显著提高 23.35%;处理 CK 灌溉水利用效率最低,

仅为 2.02 kg/m³,而其他处理灌溉水利用效率均不同程度提高,增幅为 18.42~61.97%,其中 FB 灌溉水利用效率最高,其次为 AF、WB 和 AW,分别为 3.28, 2.91,2.70,2.56 kg/m³。

表 4 不同抗旱措施配施菌肥对制种玉米产量和水分利用效率的影响

年 份	处 理	生育期降雨量/ (m ³ ·hm ⁻²)	全生育期灌水量/ (m ³ ·hm ⁻²)	全生育期耗水量/ (m ³ ·hm ⁻²)	产量/ (kg·hm ⁻²)	产值/ (元·hm ⁻²)	单方水产值/ (元·m ⁻³)	水分利用效率/ (kg·m ⁻³)	灌溉水利用效率/ (kg·m ⁻³)
2018	AF	1108a	3258.8a	3939.34±221.58c	9138.85±416.25b	34544.85±1088.34b	10.60±0.36b	2.32±0.11ab	2.80±0.14b
	AW	1108a	3258.8a	4151.08±196.14b	8060.08±276.03cd	30467.10±1375.14cd	9.35±0.49cd	1.94±0.07b	2.47±0.11cd
	AB	1108a	3258.8a	4341.37±248.99ab	7315.33±359.77d	27651.95±927.08d	8.49±0.25d	1.69±0.09c	2.24±0.08d
	WB	1108a	3258.8a	4288.95±175.61b	8402.61±342.75c	31761.87±1350.95c	9.75±0.33c	1.96±0.15b	2.58±0.21c
	FB	1108a	3258.8a	4001.62±209.65bc	10307.49±475.38a	38962.31±1408.53a	11.96±0.40a	2.58±0.17a	3.16±0.19a
	CK	1108a	3258.8a	4487.87±276.12a	6350.36±307.18e	24004.36±774.67e	7.37±0.26e	1.42±0.04d	1.95±0.15e
2019	AF	1834a	2919.3a	4422.45±316.39b	8795.62±511.26ab	31224.45±1262.18ab	10.70±0.27ab	1.99±0.13b	3.01±0.20ab
	AW	1834a	2919.3a	4492.91±230.08b	7722.70±390.94c	27415.59±1008.45c	9.39±0.39c	1.72±0.09cd	2.65±0.18c
	AB	1834a	2919.3a	4652.28±254.45ab	7438.94±266.47c	26408.24±674.21c	9.05±0.42c	1.60±0.07d	2.55±0.13c
	WB	1834a	2919.3a	4539.76±335.07b	8245.25±404.55bc	29270.64±1103.48bc	10.03±0.25bc	1.82±0.11bc	2.82±0.09bc
	FB	1834a	2919.3a	4462.82±296.55b	9903.78±542.19a	35158.42±1397.14a	12.04±0.48a	2.22±0.15a	3.39±0.21a
	CK	1834a	2919.3a	4911.55±187.97a	6126.47±366.82d	21748.97±877.23d	7.45±0.19d	1.25±0.06e	2.10±0.17d

2.7 经济效益评价

由表 5 可知,不同抗旱措施配施菌肥对制种玉米效益的影响差异显著。本试验均采用机械覆膜、播种,追肥、除草、去雄、砍除父本等均采用人工操作,且产量以人工实收产量计算总产值,扣除相应的人工成本和物资成本后,所得即制种玉米生产的经济效益。2 年平均值可知,FB 总产值最大,达 37 060.37 元/hm²,AF、WB、AW 和 AB 次之,分别为 32 884.65,30 516.25,28 941.34, 27 030.09 元/hm²,较 CK 分别显著提高 62.00%, 43.75%,33.39%,26.51%,18.16%,而 CK 总产值最

小,仅为 22 876.66 元/hm²;由于铺设地膜、施用保水剂、增施菌肥增加了物资成本,因此不同抗旱措施下纯效益差异显著,其中 FB 纯收益最高,达 20 249.38 元/hm²,AF、WB、AW 和 AB 次之,分别为 17 483.67, 15 427.27,15 262.36,13 039.11 元/hm²,分别较 CK 增加 9 953.70,7 187.99,5 131.59,4 966.68,2 743.43 元/hm², 尽管 CK 劳动成本和物资成本最低,但纯收益仅为 10 295.68 元/hm²,显著低于抗旱措施配施菌肥处理,其中 FB 在增加劳动成本和物资成本的同时亦显著提高制种玉米总产值,最终表现为高收益。

表 5 不同抗旱措施配施菌肥对制种玉米经济效益的影响

年 份	处 理	籽粒产量/ (kg·hm ⁻²)	单价/ (元·kg ⁻²)	总产值/ (元·hm ⁻²)	人工成本/ (元·hm ⁻²)	物资成本/ (元·hm ⁻²)	总成本/ (元·hm ⁻²)	纯收益/ (元·hm ⁻²)	投入 产出比
2018	AF	9138.85b	3.78a	34544.85b	5700b	9735c	15435b	19109.57b	2.24a
	AW	8060.08cd	3.78a	30467.10cd	4500d	9213e	13713e	16753.82c	2.22a
	AB	7315.33d	3.78a	27651.95d	4500d	9525d	14025d	13626.67d	1.97b
	WB	8402.61c	3.78a	31761.87c	4950c	10173b	15123c	16638.59c	2.10ab
	FB	10307.49a	3.78a	38962.31a	6150a	10695a	16845a	22117.03a	2.31a
	CK	6350.36e	3.78a	24004.36e	4050e	8565f	12615f	11389.08e	1.90b
2019	AF	8795.62ab	3.55a	31224.45ab	5700b	9667c	15367b	15857.76b	2.03ab
	AW	7722.70c	3.55a	27415.59c	4500d	9145e	13645e	13770.90c	2.01ab
	AB	7438.94c	3.55a	26408.24c	4500d	9457d	13957d	12451.55d	1.89bc
	WB	8245.25bc	3.55a	29270.64bc	4950c	10105b	15055c	14215.95c	1.94ab
	FB	9903.78a	3.55a	35158.42a	6150a	10627a	16777a	18381.73a	2.10a
	CK	6126.47d	3.55a	21748.97d	4050e	8497f	12547f	9202.28e	1.73c

3 讨论

土壤酶是由微生物、动植物活体分泌及动植物残骸分解、释放在土壤中的一类具有催化能力的生物活性物质,参与土壤养分转化和运移,反映作物对养分

吸收利用情况,是土壤供肥能力的生物活性指标^[14]。徐忠山等^[15]研究表明,混播配施菌肥有利于增加有益酶活性,改善土壤理化性状,增强土壤生产力的可持续性。本研究表明,抗旱措施配施菌肥可显著提高

土壤耕层内酶活性,而单一地膜覆盖抑制酶活性提高,造成酶活性降低。其中,保水剂、地膜覆盖配施菌肥处理 WB 和 FB 耕层土壤中脲酶、过氧化氢酶、蔗糖酶、磷酸酶活性可分别显著提高 75.66%,81.79%,153.29%,48.34%和 47.32%,44.81%,109.70%,20.21%。珊丹等^[16]研究表明,施入菌肥会影响土壤微生物种群,分别可提高土壤中脲酶、过氧化氢酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶活性 29.0%,75.7%,92.6%,25.7%,这与本研究结论一致,类似结论在郭小强等^[17]关于增施菌肥对作物根际土壤微生态环境研究中亦得到证实,但酶活性提高幅度各异,这可能是与试验气候区、土壤质地、菌肥种类和施用量等不同有关。同时,本研究亦发现,土壤酶活性呈现出随土层加深而降低的趋势,这是由于深层土壤容重变大,孔隙度减少,透气性变差,抑制微生物以及作物根部呼吸作用,从而减少酶的释放,这与陈娟丽等^[18]研究结论相一致。

土壤微生物通过直接参与土壤中的氧化、硝化和固氮过程,完成了土壤有机质的分解和营养物质的循环转化,维持了土壤生产力和土壤生态系统的稳定。同时,微生物体内还贮存着碳/氮和营养物质,待其死亡后可被矿化,被活着的微生物再次利用^[19]。土壤环境的扰动会改变土壤微生物生活的微环境,从而直接影响土壤微生物繁衍数量^[20]。本研究表明,抗旱措施配施菌肥可显著提高土壤耕层内微生物数量和微生物量碳氮。其中,保水剂、地膜覆盖配施菌肥处理 WB 和 FB 耕层土壤中真菌、细菌、放线菌数量和微生物量碳氮可分别显著提高 160.62%,82.16%,76.68%,115.18%和 126.72%,64.12%,57.19%,78.59%,与吴红萍等^[21]、张虎天等^[22]报道配施菌肥能显著有效增加土壤微生物数量的研究结果一致。此外,有关单一地膜覆盖对土壤微生物数量的影响已有一些报道,刘岳飞等^[23]利用常规聚乙烯无色透明地膜覆盖植株土壤发现,覆盖地膜有助于提高土壤细菌丰度、多样性和均匀度指数,进而提高土壤肥力和保持土壤健康。李明等^[24]在日光温室覆盖地膜对黄瓜根际土壤微生物数量研究发现,单一地膜覆盖显著增加土壤中细菌、真菌、放线菌数量,较地表无覆盖种植分别提高了 192.52%,12.77%,106.99%。本研究发现,单一地膜覆盖处理 AF 抑制了微生物繁衍,真菌、细菌、放线菌数量和微生物量碳氮分别显著减少 26.85%,11.91%,12.28%,16.73%。前人^[23-24]研究结果和本研究结果综合表明,单一地膜覆盖对微生物数量的影响研究结果差异不同,主要受试验区环境、土壤状况和宿主作物等多因素影响,应根据不同地域特点、作物生长环境确定最佳覆盖方式。

抗旱措施配施菌肥通过改善作物生长土壤微环境,提高作物根系活力和养分吸收速率,促进生长,从而达到增产的目的。杨志刚等^[25]、田露等^[26]研究证实,抗旱措施配施菌肥改善了农田土壤水热状况和根系发育环境,进而促进作物生长发育,主要表现在株高、茎粗、叶面积等指标,但影响幅度与作物种类、抗旱材料和试验区环境等相关。抗旱措施配施菌肥技术对制种玉米生长发育影响显著,本研究发现,地膜、保水剂配施菌肥下制种玉米叶面积指数和单株干物质积累量等指标较单施菌肥显著提高,而单施菌肥条件下制种玉米生长发育较常规露地种植无显著差异。这是由于单施菌肥仅改善了土壤微生物环境,地表裸露对土壤水热环境无显著影响,而河西绿洲制种玉米耗水量大,棵间蒸发强度高,在苗期和拔节前期尤为显著,水分亏缺不利于其正常生长发育。

本研究发现,地膜配施菌肥处理产量增幅最大,较单地膜覆盖、保水剂配施菌肥、单施保水剂和单施菌肥处理分别提高 12.70%,21.40%,28.06%,36.99%,较 CK 可显著提高 61.99%。可以看出,单施菌肥可以改善土壤微生物环境,增强土壤菌群活力,但无法改善土壤水热环境,不利于作物产量积累。通过抗旱措施配施菌肥可弥补这一缺陷,可以有效、综合改善土壤水热和微生物环境,提高作物产量,其中地膜配施菌肥增产效果显著高于保水剂配施菌肥处理。李星星等^[27]研究表明,增施菌肥可提高作物产量,这与本试验结论一致,但增产幅度略有差异,可能与试验区环境、作物种类和肥料用量等有关。同时本研究发现,地膜配施菌肥处理水分利用效率和灌溉水利用效率最高,分别较 CK 显著提高 80.10%和 61.97%,而其他处理水分利用效率和灌溉水利用效率较 CK 分别提高 23.35%~61.84%和 18.42%~43.73%。可见,地膜配施菌肥有利于提高水分利用效率,而单施菌肥对水分利用效率和灌溉水利用效率无显著影响。

4 结论

(1)菌肥单施或配施均可提高土壤过氧化氢酶、脲酶、蔗糖酶、磷酸酶活性和增加真菌、细菌、放线菌数量及土壤微生物碳氮含量,改善土壤微生物环境,但与抗旱措施配施较单施效果更为显著,其中保水剂配施菌肥处理改善效果最佳,其次为地膜配施菌肥处理。

(2)不同抗旱措施可促进制种玉米叶片发育和干物质积累,而菌肥单施对制种玉米生长影响较小,但地膜配施菌肥可显著提高制种玉米叶面积指数和干物质积累量,并能调节产量构成因子。

(3)不同抗旱措施及其配施菌肥能够不同程度

促进制种玉米籽粒产量形成,但地膜配施菌肥制种玉米籽粒产量、水分利用效率和灌溉水利用效率最大,分别可达 9 903.78~10 307.49 kg/hm², 2.22~2.58 kg/m³, 3.16~3.39 kg/m³。

综合考虑产量、水分生产效率及土壤微环境等指标,抗旱措施配施菌肥最佳组合方式为地膜配施菌肥,既能促进制种玉米的生长发育,又能提高灌溉水利用效率和水分利用效率,在增产的同时,还能改善耕作层土壤微环境,对河西灌区制种玉米可持续发展具有重要的意义。

参考文献:

[1] 郑荣,王娟,缪纯庆,等.膜下滴灌条件下制种玉米灌水制度研究[J].灌溉排水学报,2015,34(9):55-58.

[2] 邓浩亮,张恒嘉,肖让,等.膜下滴灌调亏在提升河西绿洲洋葱产量及品质的应用[J].水土保持学报,2020,34(4):201-208.

[3] 乔延丽,安进强,张芮,等.膜下滴灌水分调控对甜椒生长和产量的影响[J].水土保持学报,2015,29(3):237-241,248.

[4] 周晨莉,张恒嘉,巴玉春,等.调亏灌溉对膜下滴灌苤蓝生长发育和产量的影响[J].水土保持学报,2020,34(4):193-200.

[5] 周盛茂.地膜覆盖方式对土壤物理和生物性状与作物生长的影响[D].河北 保定:河北农业大学,2013.

[6] Beneduzi A, Ambrosini A, Passaglia L M P. Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): Their potential as antagonists and biocontrol agents Genetics and Molecular [J].Biology,2012,35(4):1044-1051.

[7] 杨爽,李海鹏,杨培鑑,等.微生物菌肥对草莓水分利用效率和产量的影响[J].江苏农业科学,2015,43(3):147-148.

[8] 孟阿静,马彦茹,杨新华,等.微生物菌肥对温室番茄产量和品质的影响[J].北方园艺,2014(7):169-171.

[9] 田露,刘景辉,赵宝平,等.保水剂和微生物菌肥配施对旱作燕麦土壤微生物生物量碳、氮含量及酶活性的影响[J].水土保持学报,2020,34(5):361-368.

[10] 王丹,赵亚光,马蕊,等.微生物菌肥对盐碱地枸杞土壤改良及细菌群落的影响[J].农业生物技术学报,2020,28(8):1499-1510.

[11] 黄懿梅,安韶山,曲东,等.两种测定土壤微生物量氮方法的比较初探[J].植物营养与肥料学报,2005,11(6):830-835.

[12] 沈萍,陈向东.微生物学实验[M].北京:高等教育出版社,2007.

[13] 关松荫.土壤酶及其研究方法[M].北京:农业出版社,1986.

[14] 王永慧,轩清霞,王丽丽,等.不同耕作方式对土壤有机碳矿化及酶活性影响研究[J].土壤通报,2020,51(4):876-884.

[15] 徐忠山,刘景辉,逯晓萍,等.施用有机肥提高黑土土壤酶活性、增加细菌数量及种类多样性[J].中国土壤与肥料,2020(4):50-55.

[16] 珊丹,何京丽,邢恩德,等.微生物菌肥对草原矿区排土场土壤微生物与土壤酶活性的影响[J].水土保持通报,2017,37(3):81-85.

[17] 郭小强,毛宁,张希彪,等.不同施肥处理对辣椒根际土壤微生物区系和酶活性的影响[J].作物杂志,2014(6):123-126.

[18] 陈娟丽,师尚礼,祁娟.复合菌肥与化肥配施对高寒地区土壤微生物数量和土壤酶活性的影响[J].草原与草坪,2016,36(1):7-13.

[19] Mbuthia L W, Acosta-Martinez V, Debryun J, et al. Long term tillage, cover crop, and fertilization effects on microbial community structure, activity: Implications for soil quality [J].Soil Biology and Biochemistry,2015,89:24-34.

[20] 谢志煌,高志颖,郭丽丽,等.土壤微生物活性和生物量对干湿交替的响应[J].土壤与作物,2020,9(4):348-354.

[21] 吴红萍,金映虹,陈喜蓉.微生物菌肥对不同林地土壤微生物及林木生长的影响[J].基因组学与应用生物学,2018,37(3):1231-1236.

[22] 张虎天,尚虎山.菌肥拌种和种植模式对豌豆/玉米根际微生物群落的影响[J].水土保持通报,2015,35(6):168-171.

[23] 刘岳飞,吴人敏,张传进,等.地膜对植椒土壤生物学特性和细菌多样性的影响[J].土壤学报,2019,56(4):986-993.

[24] 李明,崔世茂,王怀栋.不同地表覆盖对温室黄瓜根际土壤微生物和养分变化的影响[J].水土保持学报,2014,28(1):173-177.

[25] 杨志刚,叶英杰,常海文,等.微生物菌肥及土壤修复剂对干制辣椒生长、品质及产量的影响[J].北方园艺,2020(19):1-7.

[26] 田露,刘景辉,赵宝平,等.保水剂与微生物菌肥配施对黄土高原旱作燕麦生长及水分利用的影响[J].水土保持通报,2020,40(3):317-324.

[27] 李星星,张胜,蒙美莲,等. F01 复合微生物菌剂对马铃薯生长、产量和品质的影响[J].北方农业学报,2019,47(5):48-53.