网络出版时间:2026-01-09 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.07.009

基施和追施丛枝菌根真菌对玉米生长及光合特性的影响

张鹏[1],崔英[2],姬敏嘉[2],谢岷[1],刘雪平[2],樊丽[3],曹福中[2]

(1 内蒙古农业大学 农学院,内蒙古 呼和浩特 010019;2 鄂尔多斯市农牧技术推广中心,内蒙古 鄂尔多斯 017200;
3 内蒙古农业大学 园艺与植保学院,内蒙古 呼和浩特 010091)

[摘 要] 【目的】探究基施和追施丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi,AMF)在不同土壤条件下对玉米生长及叶绿素荧光特性的影响,明确适宜的施用时期及配套的AMF菌剂组合,为AMF在不同土壤条件下助力玉米增产稳质提供理论依据。【方法】采用三因素盆栽试验设计,包括施用时期(基施(J)和追施(Z))、土壤类型(基质(C)、沙土(S)和盐碱土(Y))、菌剂组合(根内根孢囊霉(R)、摩西斗管囊霉(F)、根内根孢囊霉+摩西斗管囊霉(H)),以不施用AMF(K)为对照,系统研究基施和追施AMF在不同土壤条件下的施用效果。【结果】在不同土壤条件下,AMF菌肥施用效果表现为根内根孢囊霉+摩西斗管囊霉>摩西斗管囊霉>根内根孢囊霉,且在追施条件下对玉米生长的促进效果最为显著。在基质中,ZCH处理玉米的总根长、株高、生物量、SPAD值和光合性能指数(PI_{abs})分别较ZCK显著增加11.84%,14.25%,13.80%,16.10%和19.65%;在沙土中,ZSH处理玉米的总根长、株高、生物量、SPAD值和PI_{abs}分别较ZSK显著增加10.81%,13.81%,15.76%,15.13%和16.46%;在盐碱土中,ZYH处理玉米的总根长、株高、生物量、SPAD值和PI_{abs}分别较ZYK显著增加12.36%,8.43%,15.43%,19.34%和17.15%。【结论】追施根内根孢囊霉+摩西斗管囊霉能够显著提高根系侵染率并优化根系构型,从而增强根系对水分和养分的吸收能力,促进玉米地上部生物量的积累,在此基础上进一步提升叶片的光合性能。

[关键词] 玉米栽培;丛枝菌根真菌;施用时期;土壤类型;光合特性

[中图分类号] S513 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)07-0075-12

Effects of basal and topdressing application of arbuscular mycorrhizal fungi on maize growth and photosynthetic characteristics

ZHANG Peng[1],CUI Ying[2],JI Minjia[2],XIE Min[1],LIU Xueping[2],
FAN Li[3],CAO Fuzhong[2]

(1 *Agricultural College,Inner Mongolia Agricultural University,Huhhot,Inner Mongolia* 010019,*China*;
2 *Erdos Agricultural and Animal Husbandry Technology Extension Center,Erdos,Inner Mongolia* 017200,*China*;
3 *College of Horticulture and Plant Protection,Inner Mongolia Agricultural University,Huhhot,Inner Mongolia* 010091,*China*)

Abstract:【Objective】This study aims to investigate the effects of basal and topdressing applications of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on maize growth and chlorophyll fluorescence characteristics under different soil conditions, to identify the optimal application timing and suitable AMF fungal combinations. The findings can provide a theoretical basis for using AMF to enhance maize yield and quality under various soil conditions.

[收稿日期] 2025-04-06 [修回日期] 2025-06-04
[基金项目] 鄂尔多斯市重点研发计划项目(YF20232310);西部之光项目"丛枝菌根真菌对甘草促生作用机制解析研究"
[作者简介] 张鹏(1998—),男,内蒙古乌兰察布人,在读博士,主要从事作物栽培学与耕作学研究。E-mail:zp@emails.imau.edu.cn
[通信作者] 樊丽(1982—),女,河北张家口人,教授,博士,博士生导师,主要从事作物生理生态研究。E-mail:chenlugb@126.com
曹福中(1978—),男,吉林长春人,研究员,主要从事作物生理生态研究。E-mail:ordosnmjs_xccy@163.com

【Method】A three-factor design was adopted for pot experiment, including application timing (basal application (J) and topdressing (Z)), soil types(substrate (C), sandy soil (S), and saline-alkali soil (Y)), and AMF fungal combinations(*Rhizopus intraradices* (R), *Funneliformis mosseae* (F), and *Rhizopus intraradices*+*Funneliformis mosseae* (H)). The effects of basal and topdressing AMF application under different soil conditions were systematically studied with no AMF(K) application as control.【Result】Under different soil conditions, the promoting effects of AMF biofertilizers on maize followed the order: *Rhizoglomus intraradices*+*Funneliformis mosseae*>*Funneliformis mosseae*>*Rhizoglomus intraradices*, with the most pronounced growth-promoting effects observed under topdressing treatments. In substrate soil, the ZCH treatment significantly increased the total root length, plant height, biomass, SPAD value, and PI_{abs} by 11.84%, 14.25%, 13.80%, 16.10%, and 19.65%, respectively, compared with ZCK. In sandy soil, the ZSH treatment increased these indicators by 10.81%, 13.81%, 15.76%, 15.13%, and 16.46%, respectively, compared with ZSK. In saline-alkali soil, the ZYH treatment increased these indicators by 12.36%, 8.43%, 15.43%, 19.34%, and 17.15%, respectively, compared with ZYK.【Conclusion】Topdressing treatment with *Rhizopus intraradices*+*Funneliformis mosseae* significantly enhanced AMF root colonization and optimized root architecture, thereby improving the efficiency of water and nutrient uptake, which in turn promoted aboveground biomass accumulation. On this basis, the photosynthetic performance of maize leaves was further improved.

Key words: maize cultivation; arbuscular mycorrhizal fungi(AMF); application timing; soil types; photosynthetic characteristics

玉米作为全球主要粮食作物之一,在世界范围内广泛种植,也是中国种植面积最大的粮食作物之一[1]。玉米不仅是粮食安全的重要保障,还广泛应用于饲料生产和工业原料等领域,具有不可替代的地位。玉米植株生长速度快、个体生物量大,对养分的需求量较高[2]。在玉米种植过程中,合理供应养分是确保高产稳产的关键。然而耕地沙化和盐渍化已成为限制作物生长、导致减产的重要因素,每年都会造成产量及利润的严重损失[3]。沙土质地疏松,易引发土壤干旱及肥料流失,导致玉米根系养分吸收受阻,进而影响其生长发育。与此同时,盐碱土由于含盐量较高,易引发渗透胁迫和离子毒害,破坏玉米细胞的正常生理代谢功能,显著降低玉米产量;此外,化肥的不合理施用会加剧土壤沙化和盐渍化[4]。长期依赖化肥不仅会破坏土壤的理化结构,还容易导致土壤养分失衡和盐分积累,进一步恶化耕地质量。因此,如何合理高效地提升沙地和盐碱地的生产力,已成为当前研究关注的热点。

微生物菌剂能够改善土壤结构,提高速效养分含量,缓解不良土壤对作物的负面影响[5-6]。丛枝菌根真菌(AMF)是一种广泛分布于自然界中的共生真菌,可与80%以上的陆生植物形成菌根共生体系[7-8]。AMF在促进宿主植物根系生长,增强植物抗逆性以及改善土壤生态系统方面发挥着重要作用[9-10]。玉米与AMF具有良好的亲和性,当AMF侵染玉米根系后促使根尖表皮增厚,细胞层数增加,有效促进根系的生长与分化,且两者形成的菌根共生体系进一步扩大根系吸收面积,增强玉米对水分和养分的吸收能力[11-12]。此外,AMF还能提高细胞中渗透调节物质的积累水平,并激活其抗氧化防御系统,有效缓解逆境胁迫对玉米的影响,从而促进作物的生长和光合作用效率[13-15]。

综上所述,AMF在促进作物生长和降低逆境对作物影响方面的作用已被广泛证实。但仍缺乏对不同土壤条件下AMF菌剂在不同施用时期的效应研究。鉴于此,本研究通过开展玉米盆栽试验,在基质、沙土和盐碱土3种典型土壤条件下,系统探究基施和追施AMF对玉米生长、根系构型及光合特性的影响,旨在筛选适配不同土壤类型的优势AMF菌种及其最佳施用时期,为实现玉米多土质条件下的高产优质栽培提供菌剂施用策略与理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验供试玉米品种为'玉龙10号'。供试菌剂购于长江大学根际生物研究所。试验土壤为基质、沙土和盐碱土,沙土和盐碱土采集于内蒙古鄂尔多斯市达拉特旗王爱召镇西社村(100°11′E,40°22′N),基础地力见表1。

1.2　试验设计

试验于2024年1月13日至4月18日在内蒙古农业大学南校区日光温室（111°43′48″ E，40°48′36″ N）进行。试验采用三因素试验设计（表2），施用时期设置基施和追施2个处理；土壤类型设置基质、沙土和盐碱土3个处理；菌剂组合设置根内根孢囊霉、摩西斗管囊霉、根内根孢囊霉＋摩西斗管囊霉（1∶1混合菌剂）及灭菌对照（121 ℃高压灭菌30 min）共4个处理。将玉米种子播于穴苗盘中育苗，待发芽后挑选长势一致的玉米幼苗移栽在栽培盆（19 cm×18 cm×14 cm）中，每盆土壤1 000 g，每盆定植3株。AMF处理采用“分层接种法”，所有处理的菌剂施用量一致，施用菌剂10 g。具体施用方式为：基施处理在种子育苗时施用菌剂，追施处理则在种子发芽移栽后1周施用菌剂。对照组加入相同质量、经高压蒸汽灭菌后的AMF菌剂。试验共24个处理，每个处理重复3次，共72盆，随机排列，并于施用菌剂3个月后进行相关指标的测定。

表1　试验土壤基础地力

Table 1　Basic fertility of the experimental soil

土壤类型 Soil type	铵态氮/(mg·kg^{-1}) AN	速效磷/(mg·kg^{-1}) AP	速效钾/(mg·kg^{-1}) AK	pH值 pH value
基质 Substrate	8.35±0.14 a	8.31±0.12 a	172.86±16.34 a	7.19±0.05 c
沙土 Sandy soil	3.98±0.41 b	3.52±0.29 b	100.79±26.92 b	8.24±0.06 b
盐碱土 Saline-alkali soil	4.87±0.75 b	3.68±0.63 b	105.82±15.51 b	8.54±0.04 a

注：同列数据后标不同小写字母表示不同处理间差异显著（$P<0.05$）。下同。

Note：Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between treatments ($P<0.05$). The same below.

表2　试验因素及水平

Table 2　Test factors and level

因素A施用时期 Factor A application time	因素B土壤类型 Factor B soil type	因素C菌剂组合 Factor C fungal combinations	处理缩写 Processing abbreviations
基施(J) Application	基质(C) Substrate	根内根孢囊霉(R) *Rhizopus intraradices*	JCR
		摩西斗管囊霉(F) *Funneliformis mosseae*	JCF
		根内根孢囊霉＋摩西斗管囊霉(H) *Rhizopus intraradices* ＋*Funneliformis mosseae*	JCH
		对照(K) Control	JCK
	沙土(S) Sandy soil	根内根孢囊霉(R) *Rhizopus intraradices*	JSR
		摩西斗管囊霉(F) *Funneliformis mosseae*	JSF
		根内根孢囊霉＋摩西斗管囊霉(H) *Rhizopus intraradices* ＋*Funneliformis mosseae*	JSH
		对照(K) Control	JSK
	盐碱土(Y) Saline-alkali soil	根内根孢囊霉(R) *Rhizopus intraradices*	JYR
		摩西斗管囊霉(F) *Funneliformis mosseae*	JYF
		根内根孢囊霉＋摩西斗管囊霉(H) *Rhizopus intraradices* ＋*Funneliformis mosseae*	JYH
		对照(K) Control	JYK
追施(Z) Topdressing	基质(C) Substrate	根内根孢囊霉(R) *Rhizopus intraradices*	ZCR
		摩西斗管囊霉(F) *Funneliformis mosseae*	ZCF
		根内根孢囊霉＋摩西斗管囊霉(H) *Rhizopus intraradices* ＋*Funneliformis mosseae*	ZCH
		对照(K) Control	ZCK
	沙土(S) Sandy soil	根内根孢囊霉(R) *Rhizopus intraradices*	ZSR
		摩西斗管囊霉(F) *Funneliformis mosseae*	ZSF
		根内根孢囊霉＋摩西斗管囊霉(H) *Rhizopus intraradices* ＋*Funneliformis mosseae*	ZSH
		对照(K) Control	ZSK
	盐碱土(Y) Saline-alkali soil	根内根孢囊霉(R) *Rhizopus intraradices*	ZYR
		摩西斗管囊霉(F) *Funneliformis mosseae*	ZYF
		根内根孢囊霉＋摩西斗管囊霉(H) *Rhizopus intraradices* ＋*Funneliformis mosseae*	ZYH
		对照(K) Control	ZYK

1.3　测定指标及方法

1.3.1　侵染率测定　菌根侵染率的测定采用透明压片法制片，台盼蓝染色法进行染色。取各处理玉米根系1～2 g流水清洗干净，去除附着在根系表面

的杂质,擦干多余水分,剪成1 cm长的根段;在装有质量分数10% KOH溶液煮沸15 min,流水冲洗1~2 min,沥干水分;在装有质量分数1% HCl溶液中酸化10 min,流水冲洗,沥干水分;在装有质量分数0.05%台盼蓝溶液中煮沸染色20 min,流水冲洗浮色,沥干水分;最后放入甘油中脱色24 h以上。随机挑选30条染色的根段,在显微镜下观察每条根段的侵染情况。根据菌丝、丛枝等结构在根段上的覆盖面积比例,评估每条根段的侵染程度并归类到所属侵染等级(0%,10%,20%,……,100%)。记录每个侵染等级下的根段数量。菌根侵染率按以下加权公式计算:

$$\text{侵染率} = \sum(0\% \times \text{根段数} + 10\% \times \text{根段数} + 20\% \times \text{根段数} + \cdots\cdots + 100\% \times \text{根段数}) / \text{观察总根段数}。$$

1.3.2 根系构型测定 将玉米根系用水清洗干净,使用Epson Scan(WinRHIZO,中国)扫描仪测定并分析根系形态参数,包括总根长、根表面积、根直径、根体积。

1.3.3 农艺性状指标 使用卷尺和游标卡尺分别测量各处理玉米的株高和茎粗。

1.3.4 生物量测定 将不同处理玉米的地上部植株在105 ℃烘箱中杀青30 min后,在80 ℃恒温烘箱中烘干至恒质量后测定。

1.3.5 SPAD值测定 使用SPAD-502 Plus仪测定各处理玉米叶片的相对叶绿素含量。

1.3.6 荧光特性测定 使用多功能植物效率仪M-PEA-2(英国Hansatech公司)进行测定。先测定光下最大荧光(F_m')、稳态荧光(F_s)和最小荧光(F_o'),暗适应30 min后,设定光强度190 μmol/(m²·s),测定叶片初始荧光(F_o)和最大荧光(F_m),并对潜在光化学效率(F_v/F_o)、最大光化学效率(F_v/F_m)、光化学猝灭系数(qP)、非光化学猝灭系数(NPQ)和光合性能指数(PI_{abs})等参数进行计算[16]。

1.4 数据处理

使用Microsoft Excel 2019进行数据处理。所有数据均为"平均值±标准误差",采用SPSS 26软件进行方差分析,采用Waller-Duncan检验差异显著性($P<0.05$),运用Origin 2022软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同土壤条件下基施和追施AMF菌肥对玉米的影响

由表3可知,土壤类型和菌剂组合对AMF的根系侵染率,玉米的根系发育、植株生长及荧光特性均有极显著影响($P<0.01$);施用时期对茎粗和根直径无显著影响,对其他指标均有显著或极显著影响;施用时期和土壤类型互作对玉米茎粗、SPAD值和根直径有极显著($P<0.01$)或显著($P<0.05$)影响;施用时期和菌剂组合互作对玉米植株生物量、总根长、根体积和荧光特性有极显著($P<0.01$)或显著($P<0.05$)影响;土壤类型和菌剂组合互作对玉米的根系发育和植株生长有极显著($P<0.01$)或显著($P<0.05$)影响。

表3 施用时期、土壤类型和菌种组合三因素方差分析表(*F*值)

Table 3 Analysis of variance (ANOVA) for the three factors of application timing, soil type, and fungal combination (*F* values)

指标 Index	变异来源 Source of variation						
	施用时期(A) Application time	土壤类型(B) Soil type	菌剂组合(C) Fungal combinations	A×B	A×C	B×C	A×B×C
侵染率 Infestation rate	76.59**	435.33**	62.81**	0.81ns	1.33ns	1.27ns	0.37ns
株高 Plant height	6.76*	64.98**	65.64**	0.88ns	2.04ns	3.93**	0.41ns
茎粗 Stem thick	1.64ns	28.40**	55.60**	12.64**	0.09ns	3.03*	0.71ns
生物量 Biomass	121.89**	8 099.61**	290.28**	2.59ns	15.62**	3.86**	0.44ns
SPAD值 SPAD value	50.03**	200.54**	149.14**	7.76**	2.18ns	1.91ns	0.74ns
总根长 Total root length	13.33**	139.82**	93.56**	1.32ns	6.62**	0.19ns	0.22ns
根表面积 Root surface	16.68**	510.43**	67.61**	1.47ns	2.15ns	3.09*	0.56ns
根体积 Root volume	82.59**	426.45**	212.39**	0.39ns	10.74**	4.05**	0.81ns
根直径 Root diameter	3.40ns	127.75**	40.39**	3.22*	0.86ns	0.77ns	1.14ns
最大光化学效率 F_v/F_m	21.62**	59.49**	50.97**	1.43ns	3.04*	0.99ns	0.71ns
潜在光化学效率 F_v/F_o	50.37**	208.52**	72.39**	0.53ns	4.13*	13.61**	0.14ns
光化学淬灭系数 qP	56.08**	445.34**	113.32**	0.66ns	3.55*	1.12ns	1.82ns
非光化学淬灭系数 NQP	90.59**	523.13**	145.68**	0.46ns	4.85**	0.62ns	0.93ns
光合性能指数 PI_{abs}	47.30**	1 274.17**	154.14**	1.38ns	5.73**	3.99**	0.29ns

注:*代表0.05显著水平;**代表0.01显著水平;ns代表不显著。

Note: * represents significant difference ($P<0.05$); ** represents extremely significant difference ($P<0.01$); ns stands for no significant difference.

2.2　不同土壤条件下基施和追施AMF菌肥对玉米根系侵染率的影响

由表4可知，在不同土壤条件下施用不同AMF菌剂均能对玉米根系进行侵染，整体侵染效果表现为追施优于基施；在同一施用时期下，AMF混合菌剂的侵染效果显著优于单一菌剂。在基质中，ZCH的侵染效果较ZCF和ZCR显著增加7.15%和11.90%；在沙土中，ZSH的侵染效果较ZSF和ZSR显著增加6.57%和10.36%；在盐碱土中，ZYH的侵染效果较ZYF和ZYR显著增加7.54%和12.59%。

表4　不同土壤下基施和追施AMF对玉米根系侵染率的影响

Table 4　Effects of basal and topdressing application of AMF on maize root inoculation rate under different soil conditions　%

处理 Treatment	侵染率 Infestation rate	处理 Treatment	侵染率 Infestation rate	处理 Treatment	侵染率 Infestation rate
JCF	56.62±0.02 de	JSF	48.39±0.01 c	JYF	44.22±0.01 bc
JCR	55.80±0.02 e	JSR	47.76±0.02 c	JYR	43.23±0.01 c
JCH	62.06±0.01 b	JSH	52.25±0.01 b	JYH	46.21±0.01 b
JCK	0	JSK	0	JYK	0
ZCF	61.41±0.02 bc	ZSF	52.69±0.01 b	ZYF	46.83±0.01 b
ZCR	58.80±0.02 cd	ZSR	50.88±0.01 b	ZYR	44.73±0.02 bc
ZCH	65.80±0.01 a	ZSH	56.15±0.01 a	ZYH	50.36±0.01 a
ZCK	0	ZSK	0	ZYK	0

2.3　不同土壤条件下基施和追施AMF菌肥对玉米根系构型的影响

表5～7为不同土壤中基施和追施AMF对玉米根系构型的影响。由表5～7可以看出，在不同土壤条件下基施和追施AMF可以有效促进玉米根系生长，整体趋势表现为CH＞CF＞CR＞CK。

由表5可知，在基质条件下，基施AMF玉米的总根长、根表面积和根体积分别较其对照增加2.24%～6.57%，1.22%～13.12%和4.94%～13.58%；追施AMF玉米的总根长、根表面积和根体积分别较其对照增加4.79%～11.84%，4.03%～15.06%和6.13%～17.18%；通过比较发现，追施AMF可以更好地促进玉米根系生长发育，其中ZCH玉米的总根长、根表面积和根体积分别较JCH增加2.73%，3.38%和3.80%。

表5　基质中基施和追施AMF对玉米根系构型的影响

Table 5　Effects of basal and topdressing application of AMF on maize root morphology in substrate

处理 Treatment	总根长/cm Total root length	根表面积/cm^2 Root surface	根体积/cm^3 Root volume	根直径/mm Root diameter
JCF	344.12±7.03 bc	81.22±2.94 bc	1.73±0.02 d	0.85±0.02 bc
JCR	339.64±5.97 cd	79.37±2.70 c	1.70±0.01 d	0.86±0.01 b
JCH	354.01±7.13 ab	88.70±1.61 a	1.84±0.02 b	0.90±0.02 a
JCK	332.20±4.34 de	78.41±2.06 c	1.62±0.02 e	0.93±0.01 a
ZCF	347.18±5.61 bc	84.38±0.87 b	1.80±0.04 c	0.84±0.03 bc
ZCR	340.74±4.08 cd	82.91±1.20 bc	1.73±0.02 d	0.83±0.03 c
ZCH	363.67±5.86 a	91.70±3.96 a	1.91±0.02 a	0.92±0.01 a
ZCK	325.18±6.35 e	79.70±2.59 c	1.63±0.02 e	0.92±0.01 a

表6　沙土中基施和追施AMF对玉米根系构型的影响

Table 6　Effects of basal and topdressing application of AMF on maize root morphology in sandy soil

处理 Treatment	总根长/cm Total root length	根表面积/cm^2 Root surface	根体积/cm^3 Root volume	根直径/mm Root diameter
JSF	327.12±2.69 cd	74.67±1.36 cd	1.60±0.02 bc	0.79±0.02 d
JSR	322.41±2.73 d	74.43±1.89 cd	1.56±0.01 d	0.82±0.03 bc
JSH	336.30±5.34 b	77.75±0.44 b	1.67±0.03 b	0.85±0.02 ab
JSK	313.99±2.80 e	72.12±2.67 de	1.51±0.02 e	0.86±0.02 a
ZSF	330.51±7.44 bc	77.12±0.80 bc	1.67±0.04 b	0.81±0.01 cd
ZSR	327.41±2.10 cd	74.10±1.11 de	1.64±0.03 bc	0.81±0.01 cd
ZSH	349.24±2.50 a	80.60±0.53 a	1.76±0.03 a	0.86±0.01 ab
ZSK	315.18±3.66 e	71.39±1.81 e	1.50±0.03 e	0.87±0.02 a

表7 盐碱土中基施和追施AMF对玉米根系构型的影响

Table 7 Effects of basal and topdressing application of AMF on maize root morphology in saline-alkali soil

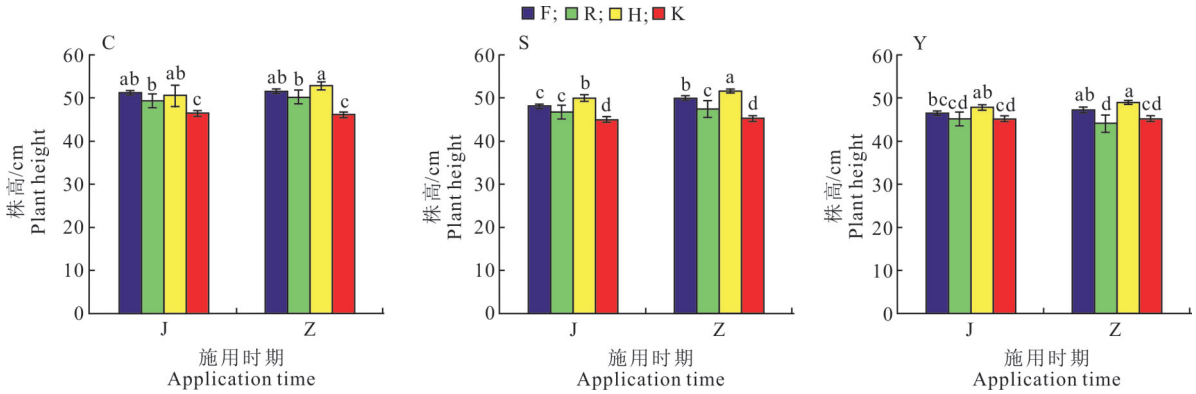
处理 Treatment	总根长/cm Total root length	根表面积/cm^2 Root surface	根体积/cm^3 Root volume	根直径/mm Root diameter
JYF	318.18±5.02 b	66.28±0.89 bc	1.51±0.03 cd	0.75±0.04 abc
JYR	314.00±6.66 bc	65.97±0.57 bc	1.50±0.03 de	0.76±0.03 ab
JYH	323.81±3.22 b	68.18±0.55 b	1.57±0.01 b	0.80±0.02 a
JYK	304.23±7.81 cd	63.51±1.86 d	1.47±0.02 de	0.81±0.01 a
ZYF	324.44±4.54 b	67.43±0.11 b	1.59±0.02 b	0.70±0.05 c
ZYR	317.63±4.97 b	66.10±0.21 bc	1.55±0.05 bc	0.74±0.05 bc
ZYH	340.30±4.42 a	71.93±1.71 a	1.66±0.03 a	0.77±0.03 ab
ZYK	302.87±7.09 d	64.06±2.11 cd	1.45±0.02 e	0.81±0.02 a

由表6可知,在沙土条件下,基施AMF玉米的总根长、根表面积和根体积分别较其对照增加2.68%～7.11%,3.20%～7.81%和3.31%～10.60%;追施AMF玉米的总根长、根表面积和根体积分别较其对照增加3.88%～10.81%,3.80%～12.90%和9.33%～17.33%;通过比较发现,追施AMF可以更好地促进玉米根系生长发育,其中ZSH玉米的总根长、根表面积和根体积分别较JSH增加3.85%,3.67%和5.39%。

由表7可知,在盐碱土条件下,基施AMF玉米的总根长、根表面积和根体积分别较其对照增加3.21%～6.44%,3.87%～7.35%和2.04%～6.80%;追施AMF玉米的总根长、根表面积和根体积分别较其对照增加4.87%～12.36%,3.18%～12.29%和6.90%～14.48%;比较发现,追施AMF可以更好地促进玉米根系生长发育,其中ZYH玉米的总根长、根表面积和根体积分别较JYH增加5.09%,5.50%和5.73%。

2.4 不同土壤条件下基施和追施AMF菌肥对玉米株高的影响

图1为不同土壤中基施和追施AMF对玉米株高的影响。



图柱上标不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Different lowercase letters indicate significant differences among treatments within the same figure ($P<0.05$). The same below.

图1 不同土壤条件下基施和追施AMF对玉米株高的影响

Fig. 1 Effects of basal and topdressing application of AMF on maize plant height under different soil conditions

由图1可以看出,在不同土壤条件下,基施和追施AMF相较于CK均有效提高玉米株高,株高总体趋势表现为CH>CF>CR>CK。在基质中进行AMF施用时,基施条件下JCH、JCF和JCR玉米的株高分别较JCK显著提高8.93%,9.79%和6.00%;追施条件下ZCH、ZCF和ZCR玉米的株高分别较ZCK显著提高14.25%,11.38%和8.28%。此外,通过比较基施和追施AMF对玉米株高的影响发现,追施AMF对玉米株高的提升效果较好,其中ZCH的株高提高幅度最大,较JCH提高4.13%。

由图1可知,在沙土中进行AMF施用时,基施条件下JSH、JSF和JSR玉米的株高分别较JSK显著提高11.33%,6.96%和4.15%;追施条件下ZSH、ZSF和ZSR玉米的株高分别较ZSK显著提高13.81%,9.85%和4.78%。此外,通过比较基施和追施AMF对玉米株高的影响发现,追施AMF对株高的提升效果更为显著,其中ZSH的株高提高幅度最大,较JSH提高3.06%。

如图 1 所示，在盐碱土中进行 AMF 施用时，基施条件下 JYH 玉米的株高较 JYK 显著提高 5.90%；追施条件下 ZYH 和 ZYF 玉米的株高分别较 ZYK 显著提高 8.43% 和 4.80%。此外，通过比较基施和追施 AMF 对玉米株高的影响发现，追施 AMF 对株高的提升效果较好，其中 ZYH 株高提高幅度最大，较 JYH 提高 2.23%。

2.5　不同土壤条件下基施和追施 AMF 菌肥对玉米茎粗的影响

图 2 为不同土壤中基施和追施 AMF 对玉米茎粗的影响。由图 2 可以看出，在不同土壤条件下，基施和追施 AMF 相较于 CK 均有效增加玉米茎粗，茎粗总体趋势表现为 CH＞CF＞CR＞CK。在基质中施用 AMF 菌肥时，基施条件下 JCH、JCF 和 JCR 玉米的茎粗较 JCK 显著增加 21.02%，12.50% 和 11.08%；追施条件下 ZCH 玉米的茎粗较 ZCK 显著增加 23.30%。此外，通过比较基施和追施 AMF 对玉米茎粗的影响发现，追施 AMF 对茎粗的增加效果较好，其中 ZCH 茎粗增加幅度最大，较 JCH 提高 1.88%。

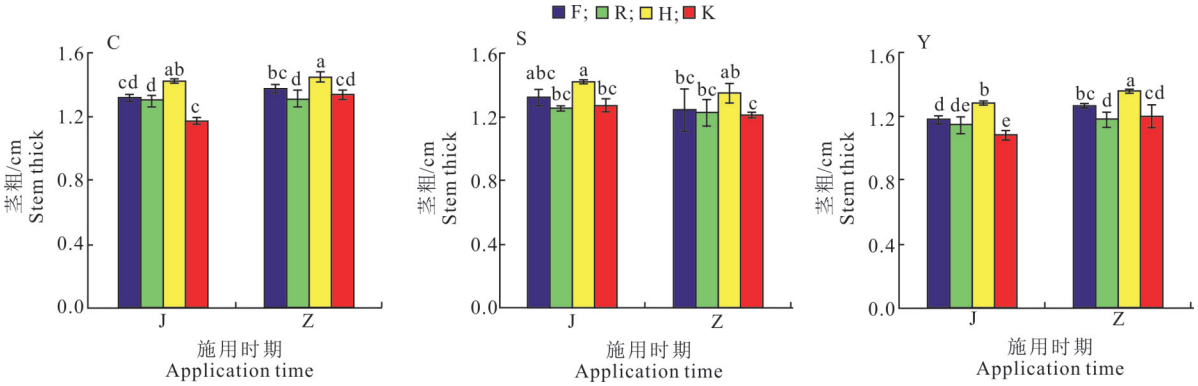


图 2　不同土壤条件下基施和追施 AMF 对玉米茎粗的影响

Fig. 2　Effects of basal and topdressing application of AMF on maize stem thick under different soil conditions

由图 2 可知，在沙土中施用 AMF 时，基施条件下 JSH 玉米的茎粗较 JSK 显著增加 11.84%；追施条件下 ZSH 玉米的茎粗较 ZSK 显著增加 11.26%。此外，通过比较基施和追施 AMF 对玉米茎粗的影响发现，基施 AMF 对茎粗的增加效果较好，其中 JSH 茎粗增加幅度最大，较 ZSH 提高 4.71%。

由图 2 还可知，在盐碱土中施用 AMF 时，基施条件下 JYH 和 JYF 玉米的茎粗较 JYK 分别显著增加 18.40% 和 8.90%；追施条件下 ZYH 和 ZYF 玉米的茎粗较 ZYK 分别显著增加 13.30% 和 5.26%。此外，通过比较基施和追施 AMF 对玉米茎粗的影响发现，追施 AMF 的茎粗表现较基施 AMF 更好，其中 ZYH 茎粗为 1.39 cm，较 JYH 增加 5.96%。

2.6　不同土壤条件下基施和追施 AMF 菌肥对玉米生物量的影响

图 3 为不同土壤中基施和追施 AMF 对玉米地上部生物量的影响。

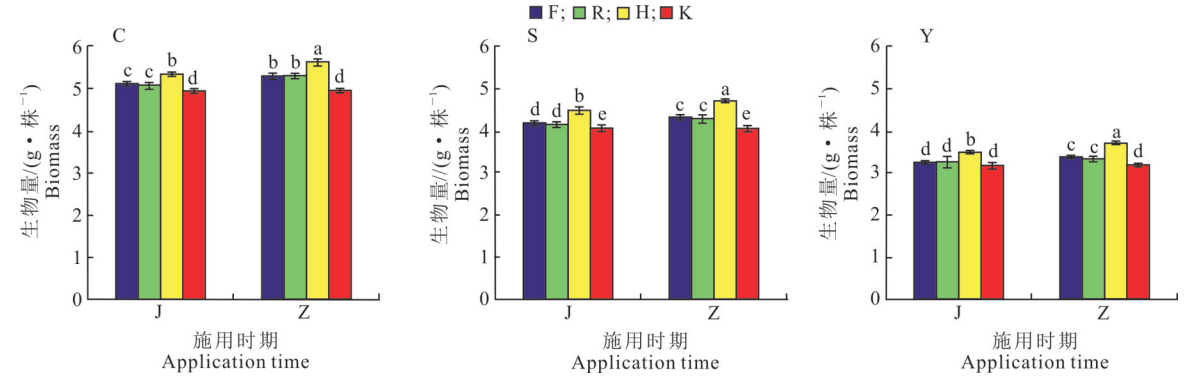


图 3　不同土壤条件下基施和追施 AMF 对玉米地上部生物量的影响

Fig. 3　Effects of basal and topdressing application of AMF on maize aboveground biomass under different soil conditions

由图 3 可以看出，在不同土壤条件下，基施和追施 AMF 相较于 CK 均有效增加玉米地上部生物量，

生物量总体趋势表现为CH>CF>CR>CK。在基质中施用AMF时,基施条件下JCH、JCF和JCR玉米地上部的生物量分别较JCK显著增加8.01%,3.37%和3.03%;追施条件下ZCH、ZCF和ZCR玉米地上部的生物量分别较ZCK显著增加13.80%,7.02%和7.21%。此外,通过比较基施和追施AMF对玉米地上部生物量的影响发现,追施AMF对生物量的增加效果更为显著,其中ZCH生物量增加幅度最大,较JCH提高5.36%。

由图3可知,在沙土中施用AMF时,基施条件下JSH、JSF和JSR玉米地上部的生物量分别较JSK显著增加10.61%,3.21%和2.63%;追施条件下ZSH、ZSF和ZSR玉米地上部的生物量分别较ZSK显著增加15.76%,6.40%和5.58%。此外,通过比较基施和追施AMF对玉米地上部生物量的影响发现,追施AMF对生物量的增加效果更为显著,其中ZSH生物量增加幅度最大,较JSH提高4.83%。

由图3还可知,在盐碱土施用AMF时,基施条件下JYH玉米的生物量较JYK显著增加9.52%;追施条件下ZYH、ZYF和ZYR玉米的生物量分别较ZYK显著增加15.43%,5.42%和4.90%。此外,通过比较基施和追施AMF对玉米生物量的影响发现,追施AMF对生物量的增加效果更为显著,其中ZYH生物量增加幅度最大,较JYH提高5.73%。

2.7 不同土壤条件下基施和追施AMF菌肥对玉米光合特性的影响

表8~10为不同土壤中基施和追施AMF对玉米光合特性的影响。由表8~10可以看出,在不同土壤条件下,基施和追施AMF可以有效提高玉米最大光化学效率(F_v/F_m)、潜在光化学效率(F_v/F_o)、光化学淬灭系数(qP)、光合性能指数(PI_{abs})和SPAD值,整体趋势表现为CH>CF>CR>CK;同时有效降低非光化学淬灭系数(NQP),整体趋势表现为CH<CF<CR<CK。

如表8所示,在基质条件下,基施AMF玉米叶片的F_v/F_m、F_v/F_o、qP、PI_{abs}和SPAD值分别较其对照增加4.29%~10.00%,2.27%~6.25%,2.63%~10.53%,6.50%~14.97%和4.65%~16.82%;追施AMF玉米叶片的F_v/F_m、F_v/F_o、qP、PI_{abs}和SPAD值分别较其对照增加5.63%~12.68%,5.98%~9.40%,10.67%~16.00%,10.20%~19.55%和5.71%~16.10%。比较发现,追施AMF可以更好地促进玉米根系生长发育,其中ZCH玉米叶片的F_v/F_m、F_v/F_o、qP、PI_{abs}和SPAD值分别较JCH增加3.90%,2.67%,3.57%,3.69%和3.22%。另外,ZCH的玉米叶片NQP较JCH显著降低23.08%。

表8 基质中基施和追施AMF对玉米光合特性的影响

Table 8 Effects of basal and topdressing application of compound AMF on corn photosynthetic characteristics in substrate

处理 Treatment	F_v/F_m	F_v/F_o	qP	NQP	PI_{abs}	SPAD值 SPAD value
JCF	0.75±0.01 bc	3.64±0.09 c	0.79±0.01 c	0.21±0.02 b	3.83±0.04 c	36.40±1.41 de
JCR	0.73±0.01 cd	3.60±0.03 c	0.78±0.01 cd	0.21±0.01 b	3.77±0.06 c	35.27±0.50 ef
JCH	0.77±0.01 ab	3.74±0.04 b	0.84±0.01 b	0.16±0.01 c	4.07±0.12 b	39.37±0.97 ab
JCK	0.70±0.02 d	3.52±0.02 d	0.76±0.02 de	0.24±0.01 a	3.54±0.09 d	33.70±0.98 f
ZCF	0.75±0.01 bc	3.76±0.04 b	0.83±0.01 b	0.17±0.01 c	3.92±0.10 c	38.31±0.73 bc
ZCR	0.75±0.04 bc	3.72±0.04 b	0.83±0.02 b	0.17±0.01 c	3.89±0.08 c	37.00±0.61 cd
ZCH	0.80±0.03 a	3.84±0.06 a	0.87±0.01 a	0.13±0.01 d	4.22±0.09 a	40.63±0.74 a
ZCK	0.71±0.02 cd	3.51±0.02 d	0.75±0.01 e	0.24±0.01 a	3.53±0.06 d	35.00±0.70 ef

表9 沙土中基施和追施AMF对玉米光合特性的影响

Table 9 Effects of basal and topdressing application of AMF on maize photosynthetic characteristics in sandy soil

处理 Treatment	F_v/F_m	F_v/F_o	qP	NQP	PI_{abs}	SPAD值 SPAD value
JSF	0.71±0.01 bc	3.20±0.05 bc	0.72±0.01 cd	0.28±0.02 cd	3.05±0.04 c	35.38±0.28 bc
JSR	0.72±0.01 b	3.15±0.07 c	0.71±0.02 de	0.28±0.01 bc	3.05±0.04 c	34.77±0.55 c
JSH	0.73±0.01 b	3.54±0.06 a	0.75±0.02 b	0.25±0.01 e	3.22±0.04 b	36.43±0.35 ab
JSK	0.70±0.02 cd	3.32±0.07 b	0.68±0.02 f	0.32±0.02 a	2.90±0.07 d	32.90±0.46 d
ZSF	0.73±0.01 b	3.35±0.03 b	0.74±0.01 bc	0.26±0.02 de	3.14±0.04 bc	36.00±0.17 b
ZSR	0.72±0.01 b	3.24±0.12 bc	0.74±0.01 bc	0.25±0.01 e	3.16±0.10 bc	34.40±0.46 c
ZSH	0.76±0.02 a	3.68±0.12 a	0.79±0.02 a	0.21±0.02 f	3.38±0.06 a	37.53±0.31 a
ZSK	0.69±0.01 c	3.35±0.13 b	0.69±0.01 ef	0.31±0.01 ab	2.90±0.09 d	32.60±1.75 d

表 10　盐碱土中基施和追施 AMF 对玉米光合特性的影响

Table 10　Effects of basal and topdressing application of AMF on maize photosynthetic characteristics in saline-alkali soil

处理 Treatment	F_v/F_m	F_v/F_o	qP	NQP	PI_{abs}	SPAD值 SPAD value
JYF	0.68±0.01 ba	3.32±0.05 d	0.68±0.01 cd	0.32±0.01 bc	2.89±0.05 c	32.60±0.17 cd
JYR	0.68±0.01 c	3.29±0.06 d	0.67±0.01 cd	0.33±0.01 b	2.86±0.04 c	31.77±0.58 d
JYH	0.71±0.01 b	3.40±0.01 c	0.71±0.01 b	0.29±0.01 d	3.06±0.05 b	33.63±0.75 bc
JYK	0.66±0.02 c	3.14±0.01 e	0.64±0.01 e	0.36±0.01 a	2.75±0.02 d	29.63±0.45 e
ZYF	0.71±0.01 b	3.48±0.06 b	0.69±0.01 bc	0.30±0.01 cd	3.06±0.02 b	34.60±0.17 b
ZYR	0.71±0.02 b	3.41±0.06 bc	0.68±0.02 cd	0.29±0.02 d	3.08±0.01 b	33.27±0.29 c
ZYH	0.75±0.01 a	3.57±0.03 a	0.75±0.01 a	0.24±0.01 e	3.23±0.03 a	36.40±0.95 a
ZYK	0.67±0.03 c	3.17±0.02 e	0.66±0.01 de	0.34±0.01 b	2.76±0.09 d	30.50±0.80 e

如表9所示，在沙土条件下，基施AMF玉米叶片的F_v/F_m、qP、PI_{abs}和SPAD值分别较其对照增加1.43%～4.29%，4.41%～10.29%，5.17%～11.03%和5.67%～10.74%；追施AMF玉米叶片的F_v/F_m、qP、PI_{abs}和SPAD值分别较其对照增加4.35%～10.14%，7.25%～14.49%，8.28%～16.55%和5.52%～15.13%；比较发现，追施AMF可以更好地促进玉米根系生长发育，其中ZSH玉米叶片的F_v/F_m、F_v/F_o、qP、PI_{abs}和SPAD值分别较JSH增加4.11%，3.95%，5.33%，4.97%和3.02%。另外，ZSH的玉米叶片NQP较JSH显著降低16.00%。

如表10所示，在盐碱土条件下，基施AMF玉米叶片的F_v/F_m、F_v/F_o、qP、PI_{abs}和SPAD值分别较其对照增加3.03%～7.58%，4.78%～8.28%，4.69%～10.94%，4.00%～11.27%和7.20%～13.50%；追施AMF玉米叶片的F_v/F_m、F_v/F_o、qP、PI_{abs}和SPAD值分别较其对照增加5.97%～11.94%，7.57%～12.62%，3.03%～13.64%，10.87%～17.03%和9.07%～19.34%；比较发现，追施AMF可以更好地促进玉米根系生长发育，其中ZYH玉米叶片的F_v/F_m、F_v/F_o、qP、PI_{abs}和SPAD值分别较JYH增加5.63%，5.00%，5.63%，5.56%和8.23%。另外，ZYH的玉米叶片NQP较JYH显著降低17.24%。

3　讨　论

3.1　基施和追施AMF对不同土壤条件下玉米根系侵染率的影响

侵染率是评价AMF与宿主植物根系共生关系的重要指标，其效果会受到AMF菌种、宿主植物、土壤性质及施用时期等多种因素的影响[17]。本研究发现，在沙土、盐碱土和基质中施用AMF均能有效侵染玉米根系，根系侵染率整体表现为盐碱土＜沙土＜基质，这可能是沙土和盐碱土对AMF的活性造成胁迫，从而导致侵染率降低，这与裘浪等[18]的研究结果胁迫会降低玉米AMF根系侵染率一致；而在同一土壤条件下，施用根内根孢囊霉＋摩西斗管囊霉混合菌种的侵染效果优于单一菌种，这表明不同菌种之间具有协同作用和功能互补性，对不利条件具有更强的适应能力[19]。本研究还发现，不同的施用时期也会对侵染效果产生影响，其中追施AMF对玉米根系的侵染效果较基施AMF更好，这可能是基施AMF与玉米根系萌发时间不匹配，导致侵染效果下降，而追施AMF则在玉米根系初步形成后进行，能够更高效地构建共生关系，从而提高侵染率。综上所述，在基质、沙土和盐碱土中，追施根内根孢囊霉＋摩西斗管囊霉能够对玉米根系进行更有效侵染。

3.2　基施和追施AMF对不同土壤条件下玉米根系构型的影响

施用AMF能够改善植物的生长状况，缓解逆境对宿主植物的胁迫，并促进植物根系的生长[6]。本研究发现，在基质、沙土和盐碱土中施用AMF均可有效促进玉米根系的生长，其根系构型表现出土壤类型差异：盐碱土＜沙土＜基质，而根系构型增幅表现为基质＜沙土＜盐碱土，这是由于盐碱土对根系生长的限制最为严重，而接种AMF后能够极大缓解这种胁迫，表现出AMF在逆境条件下的促生优势[20]。此外，在不同土壤下，与基施AMF相比，追施AMF处理的玉米总根长和根体积增幅更为明显。这表明追施AMF能够更好地与玉米根系构建菌根共生体系，从而提高水肥吸收能力，促进主根延伸和侧根发育，并降低土壤胁迫对玉米根系生长的影响。这一结果与谢岷等[21]的研究结果一致，接种AMF可以改变植物根系形态，促进根系生长。本研究还发现，在不同类型的AMF中，根内根孢囊霉＋摩西斗管囊霉混合施用可以更好地促进根系的生长，这可能是由于两者之间的协同作用，从而表现出更强的综合促进效应[22]。综上所述，在

基质、沙土和盐碱土中追施根内根孢囊霉+摩西斗管囊霉能够更有效促进玉米根系的生长发育。

3.3 基施和追施AMF对不同土壤条件下玉米地上部生长的影响

施用AMF可以通过多种机制有效提高植物的株高、叶面积和生物量[23-24],包括改善养分吸收、调节植物激素水平、增强光合作用效率以及改善根系结构[25-26]。本研究发现,在基质、沙土和盐碱土中施用AMF均能有效促进玉米地上部的生长,其中在同一土壤条件下,玉米株高、茎粗和地上部生物量均表现为H>F>R>K,这与摩西斗管囊霉和根内根孢囊霉的互补与协同作用密切相关。两种菌株的联合施用能够协同提高植物的养分吸收能力并增强抗逆性,从而为植物的生长和生物量积累提供更好的支持[27]。本研究中,摩西斗管囊霉单施效果优于根内根孢囊霉单施,这是因为摩西斗管囊霉在促进植物养分吸收和根系发育方面更为有效,进而促进植物的生长和生物量积累[28],这一结果与滕秋梅等[29]的研究结果不同,可能是不同菌株对不同的宿主植物亲和力和作用机制存在差异所致。此外,施用同一AMF菌株时,追施AMF对玉米的株高、茎粗和生物量的促进作用较基施AMF更好。综上所述,在基质、沙土和盐碱土中,追施根内根孢囊霉+摩西斗管囊霉能够更有效促进玉米植株的生长发育。

3.4 基施和追施AMF对不同土壤条件下玉米光合特性的影响

叶绿素荧光可准确地反映植物对光能吸收和传递的过程,直观反映电子传递速率和光能利用效率[30-31]。F_v/F_m是评价玉米在光合作用过程中能否高效捕获和转化光能的重要指标,较高的F_v/F_m表示玉米具有较强的光合能力[32];较高的F_v/F_o表明玉米具有较高的光合效率[33];较高的qP和较低的NQP表明玉米在环境压力下仍能较好地利用光能[34];PI_{abs}是对植物光合状态的一种总体评估,较高的PI_{abs}意味着玉米的光合效率较高,能够有效进行光合作用并维持健康生长[35]。因此本研究利用以上5种荧光指标进行玉米荧光特性的评价。本研究发现,在基质、沙土和盐碱土中,相较于对照(K)处理,施用AMF可不同程度提高玉米叶片F_v/F_m、F_v/F_o、qP和PI_{abs},且其影响程度因菌株不同而表现出差异,具体表现为H>F>R>K。这一结果表明,AMF菌株能够显著提高玉米的光合效率[36],尤其是在根内根孢囊霉+摩西斗管囊霉的混合施用时,光合能力和整体光合效率提升效果最为显著。本研究还发现,施用同一AMF菌株时,追施AMF较基施AMF能够更显著地促进玉米叶片光系统Ⅱ(PSⅡ)活性,并进一步提升光合效率。这表明追施AMF能够对玉米光合作用起到更好的促进作用,增强其光合能力和适应性。综上所述,在基质、沙土和盐碱土中,追施根内根孢囊霉+摩西斗管囊霉能更有效地促进玉米叶片光能的吸收和电子传递,从而提高叶片光合速率。

4 结 论

施用时期、土壤类型和AMF菌肥对玉米的根系生长、农艺性状及叶绿素荧光特性均有显著影响。在基质、沙土和盐碱土条件下,追施根内根孢囊霉+摩西斗管囊霉能够显著提高根系侵染率并改善根系构型。根系系统的改善增强了水分和养分吸收效率,从而促进了地上部生物量的积累。在此基础上,玉米叶片的光合能力也得以提升,表现为光系统Ⅱ活性增强和光能利用效率提高。结果表明,选择适宜的施用时期和高效复合菌株可增强AMF-玉米共生体系,有效提升其在不同土壤环境下的生长表现。

[参考文献]

[1] 仇焕广,张世煌,杨军,等. 中国玉米产业的发展趋势、面临的挑战与政策建议[J]. 中国农业科技导报,2013,15(1):20-24.
QIU H G, ZHANG S H, YANG J, et al. Development of China's maize industry, challenges in the future and policy suggestions[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2013,15(1):20-24.

[2] GÓMEZ-MUÑOZ B, JENSEN L S, DE NEERGAARD A, et al. Effects of *Penicillium bilaii* on maize growth are mediated by available phosphorus[J]. Plant and Soil,2018,431(1):159-173.

[3] HOSSAIN A, KRUPNIK T J, TIMSINA J, et al. Agricultural land degradation: processes and problems undermining future food security[M]//Environment, Climate, Plant and Vegetation Growth. Cham: Springer International Publishing, 2020:17-61.

[4] ZHANG J F. Soil environmental deterioration and ecological rehabilitation [M]// Study of ecological engineering of human settlements. Singapore: Springer Singapore, 2019:41-82.

[5] TRIVEDI P, LEACH J E, TRINGE S G, et al. Plant-microbiome interactions: from community assembly to plant health[J]. Nature Reviews Microbiology, 2020, 18(11):607-621.

[6] WAHAB A, MUHAMMAD M, MUNIR A, et al. Role of arbuscular mycorrhizal fungi in regulating growth, enhancing productivity, and potentially influencing ecosystems under abiotic

and biotic stresses[J]. Plants，2023，12(17)：3102.

[7] STUTZ J C，COPEMAN R，MARTIN C A，et al. Patterns of species composition and distribution of arbuscular mycorrhizal fungi in arid regions of southwestern North America and *Namibia*，Africa[J]. Canadian Journal of Botany，2000，78(2)：237-245.

[8] SHARMAH D，JHA D K. Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in undisturbed forest，slash-and-burn field，and monoculture forest of Indo-Burma megadiverse region[J]. Brazilian Journal of Botany，2014，37(3)：339-351.

[9] BHANTANA P，RANA M S，SUN X C，et al. Arbuscular mycorrhizal fungi and its major role in plant growth，zinc nutrition，phosphorous regulation and phytoremediation[J]. Symbiosis，2021，84(1)：19-37.

[10] LI J M，WANG Q，WANG Y，et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on improvement of degraded landscape soil in an ionized rare earth mining area，subtropical China[J]. Soil Science Society of America Journal，2022，86(2)：275-292.

[11] 秦敬泽，秦泽峰，倪刚，等. AMF和PGPR单独或“跨界”互作促进植物耐盐性的研究进展[J]. 植物营养与肥料学报，2024，30(7)：1354-1366.
QIN J Z，QIN Z F，NI G，et al. Advances in the separate functions or cross -Kingdom interactions of AMF and PGPR in enhancing plant salt tolerance[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers，2024，30(7)：1354-1366.

[12] 王晓丽，秦松，刘正一，等. 丛枝菌根在盐土农业可持续发展中的作用及前景[J]. 江苏农业科学，2023，51(2)：10-19.
WANG X L，QIN S，LIU Z Y，et al. Role and application prospect of mycorrhiza in sustainable development of saline soil agriculture[J]. Jiangsu Agricultural Sciences，2023，51(2)：10-19.

[13] CI D W，QIN F F，TANG Z H，et al. Arbuscular mycorrhizal fungi restored the saline-alkali soil and promoted the growth of peanut roots[J]. Plants，2023，12(19)：3426.

[14] DASTOGEER K M G，ZAHAN M I，TAHJIB UL ARIF M，et al. Plant salinity tolerance conferred by arbuscular mycorrhizal fungi and associated mechanisms：a meta-analysis[J]. Frontiers in Plant Science，2020，11：588550.

[15] BEGUM N，AHANGER M A，SU Y Y，et al. Improved drought tolerance by AMF inoculation in maize (*Zea mays*) involves physiological and biochemical implications[J]. Plants，2019，8(12)：579.

[16] GAO P J，ZUO Z J，WU X B，et al. Effects of cycloheximide on photosynthetic abilities，reflectance spectra and fluorescence emission spectra in *Phyllostachys edulis*[J]. Trees，2016，30(3)：719-732.

[17] GAO X P，GUO H H，ZHANG Q，et al. Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) enhanced the growth，yield，fiber quality and phosphorus regulation in upland cotton (*Gossypium hirsutum* L.)[J]. Scientific Reports，2020，10：2084.

[18] 裘浪，王志刚，俞龙生，等. 施磷和接种丛枝菌根真菌对钒胁迫下玉米生长的影响[J]. 应用生态学报，2024，35(12)：3444-3452.
QIU L，WANG Z G，YU L S，et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi inoculation and phosphorus application on maize growth under vanadium stress[J]. Chinese Journal of Applied Ecology，2024，35(12)：3444-3452.

[19] 王炜，母洪娜，杨慧敏，等. 接种丛枝菌根真菌(AMF)对夏雪片莲生长状况和光合特性的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版)，2025，49(3)：205-212.
WANG W，MU H N，YANG H M，et al. The influence of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) inoculation on the growth status and photosynthetic characteristics of *Leucojum aestivum*[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)，2025，49(3)：205-212.

[20] 苑海鹏，叶云舒，司皓，等. 丛枝菌根真菌对植物逆境胁迫抗性及次生代谢产物合成的影响[J]. 生物技术通报，2024，40(6)：45-56.
YUAN H P，YE Y S，SI H，et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on plant stress resistance and secondary metabolite synthesis[J]. Biotechnology Bulletin，2024，40(6)：45-56.

[21] 谢岷，邓渊，雷晓光，等. 干旱胁迫下丛枝菌根真菌对草莓根系生长的影响[J]. 安徽农业科学，2017，45(19)：10-12.
XIE M，DENG Y，LEI X G，et al. Effects of inoculating arbuscular mycorrhizal fungi on root growth of strawberry under drought stress[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences，2017，45(19)：10-12.

[22] ZHANG B，SHI F，ZHENG X，et al. Effects of AMF compound inoculants on growth，ion homeostasis，and salt tolerance-related gene expression in *Oryza sativa* L. under salt treatments[J]. Rice，2023，16(1)：18.

[23] JABBOROVA D，ANNAPURNA K，AL SADI A M，et al. Biochar and arbuscular mycorrhizal fungi mediated enhanced drought tolerance in Okra (*Abelmoschus esculentus*) plant growth，root morphological traits and physiological properties[J]. Saudi Journal of Biological Sciences，2021，28(10)：5490-5499.

[24] ZHANG F，ZOU Y N，WU Q S. Quantitative estimation of water uptake by mycorrhizal extraradical hyphae in *Citrus* under drought stress[J]. Scientia Horticulturae，2018，229：132-136.

[25] 秦绍尉，张静，王伊乐，等. 内蒙古温带草地丛枝菌根真菌群落对紫花苜蓿幼苗生长的影响[J]. 北京林业大学学报，2024，46(11)：53-61.
QIN S W，ZHANG J，WANG Y L，et al. Influence of arbuscular mycorrhizal fungi from two temperate grassland types on *Medicago sativa* seedling growth in Inner Mongolia of northern China[J]. Journal of Beijing Forestry University，2024，46(11)：53-61.

[26] 王子贺，刘雅洁，金蕴，等. 盐胁迫下丛枝菌根真菌接种和虎尾草伴生对羊草生长和生理特性的影响[J]. 中国草地学报，2024，46(6)：22-35.
WANG Z H，LIU Y J，JIN Y，et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi inoculation and association with *Chloris virgata* on growth and physiological characteristics of *Leymus chinensis* under salt stress[J]. Chinese Journal of Grassland，2024，46

(6):22-35.

[27] PENG Z C, ZULFIQAR T, YANG H C, et al. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on photosynthetic characteristics of cotton seedlings under saline-alkali stress[J]. Scientific Reports, 2024, 14:8633.

[28] 李敖,郑旭,吴承勖,等. 丛枝菌根真菌对盐胁迫下核桃幼苗生长及生理的影响[J]. 园艺学报,2025,52(2):423-438.
LI A, ZHENG X, WU C X, et al. The effect of arbuscular mycorrhizal fungi on the growth and physiological characteristics of walnut seedlings under salt stress[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2025, 52(2):423-438.

[29] 滕秋梅,张中峰,李红艳,等. 丛枝菌根真菌对镉胁迫下芦竹生长、光合特性和矿质营养的影响[J]. 土壤,2020,52(6):1212-1221.
TENG Q M, ZHANG Z F, LI H Y, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on growth, photosynthesis characteristics and mineral nutrition of *Arundo donax* under Cd stress[J]. Soils, 2020, 52(6):1212-1221.

[30] 朱春艳,宋佳伟,白天亮,等. NaCl胁迫对不同耐盐性粳稻种质幼苗叶绿素荧光特性的影响[J]. 中国农业科学,2022,55(13):2509-2525.
ZHU C Y, SONG J W, BAI T L, et al. Effects of NaCl stress on the chlorophyll fluorescence characteristics of seedlings of Japonica rice germplasm with different salt tolerances[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2022, 55(13):2509-2525.

[31] 方怡然,薛立. 盐胁迫对植物叶绿素荧光影响的研究进展[J]. 生态科学,2019,38(3):225-234.
FANG Y R, XUE L. Research advances in the effect of salt stress on plant chlorophyll fluorescence[J]. Ecological Science, 2019, 38(3):225-234.

[32] 吴雨涵,刘文辉,刘凯强,等. 干旱胁迫对燕麦幼苗叶片光合特性及活性氧清除系统的影响[J]. 草业学报,2022,31(10):75-86.
WU Y H, LIU W H, LIU K Q, et al. Effects of drought stress on leaf senescence and the active oxygen scavenging system of oat seedlings[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2022, 31(10):75-86.

[33] 徐一帆,徐彩龙,李瑞东,等. 侧深施肥通过优化叶片功能与氮素积累来提高大豆产量[J]. 作物学报,2024,50(9):2335-2346.
XU Y F, XU C L, LI R D, et al. Deep side fertilization improved soybean yield by optimizing leaf function and nitrogen accumulation[J]. Acta Agronomica Sinica, 2024. 50(9):2335-2346.

[34] 李茂,任正标,郑鸣鸣,等. 指数施肥对杉木优良无性系生长和光合特性的影响[J]. 应用与环境生物学报,2020,26(2):400-409.
LI M, REN Z B, ZHENG M M, et al. Effects of exponential fertilization on the growth and photosynthetic characteristics of the superior clone of *Cunninghamia*[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2020, 26(2):400-409.

[35] 曾思洁,朱俊杰. 植物非叶组织器官光合作用研究进展[J]. 生态学杂志,2023,42(9):2241-2249.
ZENG S J, ZHU J J. Research progress on photosynthesis of non-leaf tissues and organs in plants[J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 42(9):2241-2249.

[36] 王震,高旭硕,张梦歌,等. 丛枝菌根和钼对小麦光合荧光特性的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版),2024,50(3):10-16.
WANG Z, GAO X S, ZHANG M G, et al. Effects of arbuscular mycorrhiza and molybdenum on photosynthetic fluorescence characteristics of wheat[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2024, 50(3):10-16.

(责任编辑:屈李纯)