

任 祺,韩 丽,张永福,等. 不同丛枝菌根真菌对玉米生长生理的影响[J]. 江苏农业科学,2015,43(5):63–66.
doi:10.15889/j.issn.1002–1302.2015.05.019

不同丛枝菌根真菌对玉米生长生理的影响

任 祺^{1,2}, 韩 丽^{1,2}, 张永福^{1,2}, 黄鹤平^{1,2}, 陈丽娟^{1,2}, 杨曾华¹, 王定康³

(1. 昆明学院农学院, 云南昆明 650214; 2. 云南省高校都市型现代农业工程研究中心, 云南昆明 650214;
3. 昆明学院生命科学与技术系, 云南昆明 650214)

摘要:以玉米“云瑞 47”为研究材料,通过盆栽试验揭示了接种 *Glomus mosseae*(Gm)、*Glomus versiform*(Gv)、*Glomus etunicatum*(Ge)、*Glomus intraradices*(Gi)以及混合菌剂(G4)对玉米生长生理的影响。结果表明,5 个接种处理的菌根侵染率呈现 G4 > Gm、Gv > Ge > Gi 的趋势;从各菌剂效应结果来看,混合菌剂对玉米的促生效应优于单种菌剂;对比单种菌剂,Gm 和 Gv 对玉米的促生效果较好,而 Ge 和 Gi 对玉米则无明显影响。本研究初步证实了混合菌剂在玉米生长方面的良好表现,同时筛选出 Gm 和 Gv 是适合玉米接种的优良菌种。

关键词:丛枝菌根真菌;混合菌剂;玉米;生长生理

中图分类号: S513.04 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002–1302(2015)05–0063–04

丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)是一类广泛存在于农田生态系统的内生真菌,可与绝大多数农作物根系形成植物-微生物共生体,这种共生关系的建立对农作物的影响显而易见^[1]。大量研究证实,AMF 能够增强农作物的光合作用;促进作物生长,增加产量;促进作物对大量元素和微量元素的吸收利用,尤其是在缺磷环境下对磷元素吸收;还能提高农作物对重金属、高盐、高温、干旱和病害等不良环境的抗性和耐受性^[2]。因此,AMF 作为一种新型菌肥在农作物上的应用已成为研究热点。玉米是 AMF 最为普遍的宿主之一,当 AMF 菌丝侵入到玉米根系形成有益共生联合体后,对玉米的促生作用已被大量试验证实。AMF 能够显著提高

玉米根系的活力和吸收能力^[3];增强玉米叶片的光合作用^[3];改善玉米的矿质营养,尤其是磷元素^[4];减弱石油和盐胁迫对玉米的伤害^[4];增强玉米对锌污染的适应性^[5]等。之前笔者已经证实,摩西球囊霉菌(*Glomus mosseae*)是侵袭玉米的主要 AMF 类群^[6]。同时发现已往研究主要集中在 *G. mosseae* 对玉米效应的表现,而探索其他菌剂对玉米生长生理影响的研究较少。尽管不同 AMF 对植物侵染并无严格专一性,但不同 AMF 与宿主之间的亲和力存在一定差异。研究多种 AMF 对植物的影响,可以筛选出适合某种植物的优良菌种,为推进 AMF 在田间的应用具有重要意义。本研究结合前人的研究进展,通过盆栽接种试验,研究接种 4 种不同的 AMF 对玉米生长生理以及吸收矿质营养元素的影响,旨在筛选出对玉米亲和力好、促生效应明显的菌株,为用 AMF 在玉米育苗和栽培等方面的应用提供指导。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 玉米种子来源 试验用玉米品种为云南市面上常见的“云瑞 47”,从云南省农业科学院购买。

收稿日期:2014–06–25

基金项目:云南省应用基础研究自筹经费项目(编号:2013FZ099);
云南省高校都市型现代农业工程研究中心科研项目(编号:DS–C201402);;云南省高校优势特色重点学科(生态学)建设项目。

作者简介:任 祺(1983—),女,陕西渭南人,博士,讲师,主要从事农业生态学研究。E-mail:10067994@qq.com。

通信作者:王定康(1966—),男,云南宣威人,教授,从事植物生态学的教学与科研工作。E-mail:wdk117@163.com。

[5] Winkler R G, Helentjaris T. The maize *Dwarf3* gene encodes a cytochrome P450 – mediated early step in gibberellin biosynthesis[J]. *Plant Cell*, 1995, 7(8):1307–1317.

[6] Bensen R J, Johal G S, Crane V C, et al. Cloning and characterization of the maize *An1* gene[J]. *Plant Cell*, 1995, 7(1):75–84.

[7] Saghai – Maroof M A, Soliman K M, Jorgensen R A, et al. Ribosomal DNA spacer – length polymorphisms in barley: mendelian inheritance, chromosomal location, and population dynamics[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1984, 81(24):8014–8018.

[8] 张 岩. 玉米株高和穗位高 QTL 定位与遗传基础研究[D]. 北京:中国农业科学院,2010.

[9] 王翠玲,孙朝辉,库丽霞,等. 利用永久 F₂ 群体在不同光周期环境下定位玉米株高 QTL[J]. *作物学报*, 2011, 37(2):271–279.

[10] 兰进好,褚 栋. 玉米株高和穗位高遗传基础的 QTL 剖析[J]. *遗传*, 2005, 27(6):925–934.

[11] 杨晓军,路 明,张世煌,等. 玉米株高和穗位高的 QTL 定位[J]. *遗传*, 2008, 30(11):1477–1486.

[12] 许 诚,王 彬,毛克举,等. 利用单片段代换系群体定位玉米株型性状 QTL[J]. *玉米科学*, 2014, 22(2):28–34.

[13] 李清超,李永祥,杨钊钊,等. 基于多重相关 RIL 群体的玉米株高和穗位高 QTL 定位[J]. *作物学报*, 2013, 39(9):1521–1529.

[14] 郑德波,杨小红,李建生,等. 基于 SNP 标记的玉米株高及穗位高 QTL 定位[J]. *作物学报*, 2013, 39(3):549–556.

[15] Li Y L, Dong Y B, Niu S Z, et al. The genetic relationship among plant – height traits found using multiple – trait QTL mapping of a dent corn and popcorn cross[J]. *Genome*, 2007, 50(4):357–364.

1.1.2 菌根菌剂来源 供试 AMF 为摩西球囊霉 (*G. mosseae*, Gm)、地表球囊霉 (*G. versiform*, Gv)、幼套球囊霉 (*G. etunicatum*, Ge) 和根内球囊霉 (*G. intraradices*, Gi), 菌源由北京市农林科学院植物营养与资源研究所提供, 经玉米扩繁后得到的孢子、菌根菌段和菌丝作为接种物, 检测选择高侵染率无病害的根土混合物保存备用。

1.1.3 供试土壤理化性质 供试土壤采自昆明学院观物山, 理化性质: 有机质 20.73 g/kg、碱解氮 310.67 mg/kg、速效磷 42.86 mg/kg、有效钾 267.95 mg/kg、pH 值 7.96。土壤过 2 mm 筛后于烘箱中 160 ℃ 高温灭菌 2 h, 自然冷却后继续 160 ℃ 烘 2 h, 备用。

1.2 试验设计

试验于 2012 年 6 月在昆明学院农学院的试验基地进行。共设不接菌剂 (CK)、分别接种 4 种菌剂 (Gm、Gv、Ge 和 Gi) 和混合接种 4 种菌剂 (G4) 6 个处理。基质为过 1 mm 筛后的沙土混合物, 干热灭菌后装入营养钵 (16.5 cm × 15.0 cm, 0.2% 高锰酸钾溶液消毒 24 h)。玉米种子经 H₂O₂ 消毒处理后播种, 单接菌处理每盆加入 100 g 包含玉米根段的菌根菌剂, 混合接菌处理加入 100 g 的混合菌剂 (每种 25 g), 不接菌处理覆盖不接菌剂扩繁的玉米根段及沙土混合物, 以保证微生物区系一致。每个处理 4 次重复, 随机排列。常规管理, 定期浇水补充营养液, 待玉米播种 60 d 后取样测定菌根侵染参数及各项生长生理指标。

1.3 测定方法

1.3.1 菌根侵染率的测定 菌根侵染率测定和观察方法见 Philips 等的方法^[7], 将每玉米根系随机选取 30 条根段, 曲利本蓝染色后制片, 镜检。根据根段中菌根侵染 (0, >0 ~ 1%, >1% ~ 10%, >10% ~ 50%, >50% ~ 90% 和 >90%) 和丛枝丰度 (0, >0 ~ 10%, >10% ~ 50%, >50%) 的分级标准,

定义每条根段的相关信息。用 Myccalc 软件计算出菌根侵染频度 (F%), 整个根系的菌根侵染强度 (M%), 侵染根段的菌根侵染强度 (m%), 侵染根段的丛枝丰度 (a%) 和整个根系的丛枝丰度 (A%) 等参数。

1.3.2 生物量的测定 随机选取单株, 去除根系泥土, 在 105 ℃ 下烘干至恒质量, 分别测定部位生物量, 并计算菌根依赖性指数 (IMD), $IMD = (\text{接菌植株总干质量} / \text{不接菌植株总干质量}) \times 100\%$ ^[8]。

1.3.3 叶面积的测定 使用美国 CID 生产的 CI-202 叶面积仪进行测定。

1.3.4 生理指标的测定 玉米叶片中的全氮、全磷和全钾含量测定参照鲍士旦的方法^[9]; 可溶性糖测定采用蒽酮法^[10]; 可溶性蛋白测定采用考马斯亮蓝法^[11]; 硝酸还原酶活性采用磺胺显色法^[12]。

1.4 数据处理

所有数据通过 SPSS 13.0 软件进行统计分析, 处理间差异采用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 和 Duncan's 多重比较, 差异显著性水平为 $\alpha = 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 不同 AMF 对玉米根系侵染率的影响

由表 1 可见, 接种菌剂的玉米根系均被侵染, 而未接种菌剂的根系未发现丛枝菌根结构。结果表明, 不同菌剂处理根系侵染率参数呈现差异。F% 结果呈现 G4 > Gm > Gv > Ge、Gi 趋势; M% 表现为 G4 > Gm、Gv > Ge > Gi; m% 依次为 G4、Gv、Gm > Ge > Gi; a% 为 Ge、Gi > Gm、Gv、G4; A% 为 G4 > Gm、Gv > Ge > Gi。综合各侵染参数结果, 4 种单菌剂和混合菌剂对玉米的侵染效果不同, 混合菌剂侵染率最高, Gm 和 Gv 其次, Ge 和 Gi 最低。可见, 混合接种的侵染率高于单接菌。

表 1 不同处理的玉米根系侵染率参数比较

处理	参数				
	F%	M%	m%	a%	A%
CK	0	0	0	0	0
Gm	56.67 ± 1.36b	8.99 ± 0.51b	15.92 ± 1.05a	52.78 ± 1.56b	4.75 ± 0.31b
Gv	50.83 ± 1.59c	8.81 ± 0.40b	17.41 ± 1.10a	62.08 ± 1.56b	5.47 ± 0.30b
Ge	43.33 ± 1.37d	4.81 ± 0.78c	10.74 ± 1.67b	71.57 ± 1.84a	3.42 ± 0.53c
Gi	40.00 ± 1.35d	2.90 ± 0.04d	7.27 ± 0.23c	75.09 ± 0.42a	2.18 ± 0.02d
G4	63.3 ± 1.37a	11.96 ± 0.77a	18.84 ± 0.85a	65.21 ± 2.91b	7.78 ± 0.7a

注: F%: 菌根侵染频度; M%: 整个根系的菌根侵染强度; m%: 侵染根段的菌根侵染强度; a%: 侵染根段的丛枝丰度; A%: 整个根系的丛枝丰度。CK: 不接菌剂; Gm: 接摩西球囊霉; Gv: 接地表球囊霉; Ge: 接幼套球囊霉; Gi: 接根内球囊霉; G4: 混合接种 4 种菌剂。同列数据后不同小写字母表示差异达显著水平 ($P < 0.05$)。

2.2 不同 AMF 对玉米表型形态特征的影响

由表 2 可知, 接种不同 AMF 对玉米表型形态特征影响有所差异。与对照相比, 接种处理对玉米叶片数、株高和总叶面积有一定影响, 但对茎粗影响不明显。从总叶片数可以看出, Gm、Gv 和 G4 处理对比对照显著增加, G4 处理的叶片数最多, 与 Gv、Ge、Gi 处理间差异达到显著水平, 但与 Gm 间无显著差异。株高结果表明, Gm、Gv 和 G4 处理能显著促进玉米的株高, 分别比对照增加 5.52%、5.42% 和 7.81%, 但此 3 个处理间差异不显著。总叶面积结果显示, 对比 CK, Gv 和 G4 处理显著提高了玉米的总叶面积, 幅度分别为 7.33% 和 6.90%, 但 Gv 和 G4 处理间未见显著差异。综上分析, 混合菌

剂促进效应较为明显, Gm 和 Gv 次之, 而 Ge 和 Gi 效果较差。

2.3 不同 AMF 对玉米生物量的影响

接种 AMF 处理能够不同程度地影响玉米的地上部、地下部干质量和总干质量, 影响效应因菌剂不同而不同 (表 3)。从地上部干质量结果可以看出, G4 和 Gm 处理能够显著增加地上部干质量, G4 处理促进效应强于 Gm 处理, 而其余 3 个接种处理影响则不显著。就地下部干质量而言, 接种处理均能增加玉米地下部干质量, 促进效应呈现 G4 > Gm > Gv > Gi > Ge 趋势。分析总干质量结果, G4、Gm 和 Gv 处理玉米的总干质量增加显著, 依次是对照的 1.16、1.14 和 1.06 倍, 而 Ge 和 Gi 处理的总干质量虽然有一定的增加, 但无统计学意义。

表 2 不同处理的玉米表型形态特征参数

处理	表型参数			
	总叶片数(张)	茎粗(cm)	株高 (cm)	总叶面积(cm ²)
CK	8.25 ±0.25c	9.81 ±0.30a	126.78 ±1.53b	2 365.16 ±48.73b
Gm	10.50 ±0.29a	9.75 ±0.26a	133.78 ±1.50a	2 503.23 ±76.57ab
Gv	9.50 ±0.30b	9.81 ±0.24a	133.65 ±1.26a	2 538.43 ±56.51a
Ge	9.00 ±0.41bc	9.74 ±0.24a	129.23 ±1.09b	2 483.27 ±44.59b
Gi	8.75 ±0.25bc	9.78 ±0.18a	126.85 ±1.69b	2 345.75 ±31.07b
G4	11.00 ±0.41a	10.37 ±0.11a	136.68 ±1.55a	2 528.31 ±29.49a

注:CK:不接菌剂;Gm:接摩西球囊霉;Gv:接地表球囊霉;Ge:接幼套球囊霉;Gi:接根内球囊霉;G4:混合接种 4 种菌剂。同列数据后不同小写字母表示差异达显著性水平($P<0.05$)。

表 3 接种不同 AMF 对玉米生物量的影响

处理	指标			
	地上部干质量(g)	地下部干质量(g)	总干质量(g)	菌根依赖性(%)
CK	24.97 ±0.60c	2.72 ±0.08c	27.69 ±0.53d	100.00
Gm	27.47 ±0.46ab	3.15 ±0.05a	31.62 ±0.49b	114.19
Gv	26.17 ±0.64bc	3.14 ±0.05a	29.31 ±0.67bc	105.85
Ge	24.46 ±0.37c	2.90 ±0.04b	28.36 ±0.38cd	102.41
Gi	25.35 ±0.49c	2.92 ±0.03b	28.27 ±0.48cd	102.09
G4	28.86 ±0.36a	3.26 ±0.02a	32.12 ±0.37a	116.00

注同表 2。
菌根依赖性评价菌剂效应的重要指标,它能够反映植物与 AMF 间的亲和关系。以 CK 为基准,接种处理的菌根依赖性大小依次为 G4>Gm>Gv>Gi>Ge(表 3),可见,混合接菌更能促进 AMF 与植物间建立良好的共生关系,对玉米的促生作用更为明显。不同菌剂与植物间的亲和力亦不一致,结果证实 Gm 和 Gv 更能促进玉米同化物质的积累,对植物生长更为有利,而 Ge 和 Gi 影响较为薄弱。

2.4 不同 AMF 对玉米叶片可溶性糖、可溶性蛋白含量以及硝酸还原酶活性的影响

可溶性糖是植物重要的光合同化物和代谢能源,本研究测定结果表明(表 4),菌剂 G4、Gm 和 Gv 对玉米叶片可溶性糖含量有显著增加作用,比对照分别增加 16.90%、13.79% 和 12.93%,混合菌剂对可溶性糖的促进效应优于单种菌剂。硝酸盐还原酶与植物氮代谢密切相关,是反映氮代谢水平的关键酶,各菌剂对玉米叶片此酶活性的影响与可溶性糖含量结果一致,亦是 G4、Gm 和 Gv 处理显著高于 CK,分别比对照高出 5.5%、5.1% 和 4.8%,且 G4 的影响更为明显。不同菌剂对玉米叶片的可溶性蛋白含量影响不同,仅 G4 和 Gm 处理的含量显著增加,而其他菌剂都不会影响到可溶性蛋白的含量。

表 4 接种不同 AMF 对玉米可溶性蛋白、可溶性糖含量以及硝酸还原酶活性的影响

处理	可溶性蛋白含量 (mg/g)	可溶性糖含量 (%)	硝酸盐还原酶含量 [μg/(g·h)]
CK	24.13 ±0.54c	0.580 ±0.027b	3.11 ±0.03b
Gm	24.88 ±0.33ab	0.660 ±0.020a	3.27 ±0.03a
Gv	24.58 ±0.64abc	0.655 ±0.024a	3.26 ±0.04a
Ge	23.60 ±0.39bc	0.588 ±0.011b	3.11 ±0.04b
Gi	23.25 ±0.52c	0.580 ±0.015b	3.08 ±0.04b
G4	25.68 ±0.35a	0.678 ±0.015a	3.28 ±0.03a

注同表 2。

可溶性糖是植物重要的光合同化物和代谢能源。本研究测定结果(表 4)表明,菌剂 G4、Gm 和 Gv 对玉米叶片可溶性糖含量有显著增加作用,比对照依次增加 16.90%、13.79% 和 12.93%,混合菌剂对可溶性糖的促进效应优于单种菌剂。

硝酸盐还原酶与植物氮代谢密切相关,是反映氮代谢水平的关键酶,各菌剂对玉米叶片此酶活性的影响与可溶性糖含量结果一致,亦是 G4、Gm 和 Gv 处理显著高于 CK,分别比对照高出 5.5%、5.1% 和 4.8%,且 G4 的影响更为明显。不同菌剂对玉米叶片的可溶性蛋白含量影响不同,仅 G4 和 Gm 处理的含量显著增加,而其他菌剂都不会影响到可溶性蛋白的含量。

2.5 不同 AMF 对玉米叶片矿质元素含量的影响

氮、磷、钾元素是植物生长发育的必需营养元素,是构成植物体内许多重要化合物的重要组分。结果表明,AMF 菌剂对玉米叶片的矿质元素有一定的影响,但不同菌剂的影响效应存在差异。由表 5 可以看出,对比 CK、G4、Gm 和 Gv 处理能够显著促进玉米叶片对 N 和 K 元素的吸收,而 Ge 和 Gi 对这 2 种元素虽有一定的提高效应,但对比 CK 未见显著差异。接种 AMF 对磷元素的促进效应比较明显,各接种处理都能提高磷元素的吸收利用,其中菌剂 G4、Gm、Gv 和 Gi 显著改善了叶片的磷元素含量,分别比对照增加了 7.8%、5.5%、5.9% 和 4.7%。可见,混合菌剂促进玉米对矿质元素的吸收作用强于单种菌剂;单种菌剂间差异明显,Gm 和 Gv 改善玉米吸收氮、磷、钾的作用优于 Ge 和 Gi 菌剂。

表 5 接种不同 AMF 对玉米叶片矿质元素含量的影响

处理	N 含量 (g/kg)	P 含量 (g/kg)	K 含量 (g/kg)
CK	20.97 ±0.68b	2.56 ±0.04c	24.16 ±0.62b
Gm	23.28 ±0.42a	2.70 ±0.02ab	26.60 ±0.38a
Gv	23.46 ±0.44a	2.71 ±0.02ab	26.34 ±0.45a
Ge	21.40 ±0.33b	2.62 ±0.04bc	24.74 ±0.36b
Gi	20.36 ±0.82b	2.68 ±0.02ab	24.19 ±0.54b
G4	24.17 ±0.60a	2.76 ±0.02a	26.92 ±0.37a

注同表 2。

3 结论与讨论

AMF 是一类与活体植物寄主根系建立共生关系后才能繁衍的微生物,独特的生物特性严重限制了人们对其多样性和生态功能的挖掘^[13]。土壤中存在的 AMF 类型及其作用功

能可能远超过现有的认识。一般而言,自然条件下植物根系会被多种 AMF 侵染,但是菌根效应高低会受到 AMF 类型、土壤环境、寄主类型和人类活动等多种因素的影响^[13],各因素间相互作用从而形成特定的共生复合体,最终决定了菌根效应。在众多 AMF 种类中筛选对植物有价值的类型,对于开发 AMF 在植物生长和抗逆性方面的运用具有重要意义。

AMF 对植物的侵染率是菌根效应的基础,某种菌剂是否与植物根系产生有效侵染是其发挥生态功能的基础。本研究证实了 Gm、Gv、Ge 和 Gi4 种单菌剂以及混合菌剂都能对玉米产生有效侵染,而且混合菌剂的侵染率最高,这与马放等^[14]、Singh 等^[15]在水稻和菊花上的研究一致,但与陈志超等^[16]、龙良鲲鹏等^[17]以及王立等^[18]在短命植物、番茄和白三叶草上的研究不同。笔者认为,多种菌剂与植物建立的共生关系具有复杂性:一方面,不同菌剂都须与植物形成良好的共生关系才能完成生活史,彼此之间存在着对生态位点和光合产物的竞争;另一方面,某种菌剂侵染植物后对根系生物量的影响以及根系结构的改变更有助于其他菌剂的进入。混合菌剂是否提高 AMF 侵染率取决于这 2 种关系协调的结果。同时,本研究还发现不同 AMF 的侵染率亦有明显差异,Gm 和 Gv 侵染率高于 Ge 和 Gi。可见,AMF 类型是影响侵染率的重要因素,这在沙田柚、切花菊、葡萄、猕猴桃和牡丹等植物上都已证实。

AMF 对植物基本生长指标的影响是其生态效应的基本表现,也是其促生作用最直观的呈现,不同菌剂的促生效应不一致。孔佩佩等研究 5 种 AMF 对切花菊生长的影响,结果表明 *G. intraradices* 促进效果最好,能明显增加植株株高、叶片数、根长和花瓣面积,促进切菊花生长^[19]。有研究发现,*Glomus mosseae* 比其他 2 种菌剂更能促进柚苗的生长。在牡丹上证实,接种 AMF 能显著促进牡丹生长,其中,*G. constrictum* 和 *G. geosporum* 是适宜牡丹生长的优良菌种^[20]。本试验结果表明,混合菌剂以及 Gm 和 Gv 对玉米生长有一定促进作用,且混合菌剂优于单菌剂,但 Ge 和 Gi 对促进玉米生长不明显,这与菌根依赖性结果一致。

可溶性糖、可溶性蛋白和硝酸还原酶是反映植物健康程度的常见生理指标,AMF 对植物上述 3 种生理指标值的改善作用已被证实。陈丹明等发现接种 AMF 的牡丹叶片硝酸还原酶活性、可溶性糖和可溶性蛋白含量均显著高于对照。接种处理的番茄叶片可溶性糖、可溶性蛋白、硝酸还原酶活性均比对照有所增加,可溶性糖增加最为显著^[20]。本研究发现,混合菌剂对玉米叶片的上述 3 种指标值的提高作用最明显,Gm 和 Gv 次之,而 Ge 和 Gi 则无明显影响。

AMF 对植物吸收矿质元素的改善作用已成为一种普遍认识,尤其对磷元素的吸收利用。本研究结果发现除 Ge 外,其他菌剂处理都能显著提高玉米叶片的 P 含量,并且 G4、Gm 和 Gv 亦能影响到 N 和 K 的含量。笔者认为菌剂对玉米矿质元素的影响可能是因为以下几个方面:首先,共生体的存在改变了根系的结构更有利于植物营养元素的吸收;其次,根外菌丝的存在扩大了根系的吸收范围;再次,AMF 真菌能够加强植物细胞内物质的循环。在多种机理的综合作用下,AMF 促进了植物对营养元素的吸收利用。但这些只是对 AMF 改善矿质营养的初步认识,具体机制仍需进一步探索。

AMF 真菌类型不同,菌根侵染率及其对植物的影响亦不

相同。本研究已经初步证实混合菌剂对玉米侵染率高且促生效应较为明显,Gm 和 Gv 次之,而 Ge 和 Gi 的影响效应则不明显。先前已有理论提出不同菌种对同一植物的效应不同,表现在菌根侵染、植物营养、矿质元素吸收和植物基因表达上^[13],本研究结果与之类似。同时,混合菌剂的接种效应明显,说明多种菌剂存在能弥补单一菌剂的不足,产生良好的促生作用。此外,本研究发现对玉米生长生理效应促进较为明显的菌剂,它的侵染率亦较高。是否高的侵染率就代表好的促生效应? 这点还不能确定,是亟待研究的方向。

参考文献:

- [1] Yao M K, Tweddell R J, Désilets H. Effect of two vesicular - arbuscular mycorrhizal fungi on the growth of micropropagated potato plantlets and on the extent of disease caused by *Rhizoctonia solani* [J]. *Mycorrhiza*, 2002, 12(5): 235 - 242.
- [2] 林双双, 孙向伟, 王晓娟, 等. 我国菌根学研究进展及其应用展望 [J]. *草业学报*, 2013, 22(5): 310 - 325.
- [3] 姜德锋, 蒋家慧, 李 敏, 等. AM 菌对玉米某些生理特性和籽粒产量的影响 [J]. *中国农业科学*, 1998, 31(1): 15 - 20.
- [4] 王春丽, 史衍玺, 孔凡美. 石油和盐胁迫下接种 AM 真菌对玉米生长和生理的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24(2): 247 - 251.
- [5] 申 鸿, 刘 于, 白淑兰, 等. AM 真菌对锌污染土壤中玉米微量元素营养的影响 [J]. *西南农业大学学报*, 2006, 28(2): 205 - 212.
- [6] 任 祺, 王建武, 冯远娇, 等. 应用克隆文库研究玉米根系 AMF 多样性方法的建立 [J]. *玉米科学*, 2011, 19(5): 19 - 24.
- [7] Phillips J M, Hayman D S. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular - arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection [J]. *Transactions of the British Mycological Society*, 1970, 55(1): 158 - 161.
- [8] Graham J H, Syvertsen J P. Host determinants of mycorrhizal dependency of citrus rootstock seedlings [J]. *New Phytologist*, 1985, 101(4): 667 - 676.
- [9] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 78 - 87.
- [10] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 39 - 42.
- [11] 刘永军, 郭守华, 杨晓玲. 植物生理生化实验技术 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 146 - 147.
- [12] 许 仲, 苍 晶, 郝再彬. 植物生理学理论与技术 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨出版社, 2002: 56 - 80.
- [13] 王宇涛, 辛国荣, 李韶山. 丛枝菌根真菌最新分类系统与物种多样性研究概况 [J]. *生态学报*, 2013, 33(3): 834 - 843.
- [14] 马 放, 李 哲, 王 立, 等. 丛枝菌根真菌对农药三环唑的残留减量研究 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2013, 45(4): 58 - 63.
- [15] Singh K P, Kumar K R, Prasad K V, et al. Influence of VAM inoculation on root colonization, survival, physiological and biochemical characteristics of *Chrysanthemum* plantlets [J]. *Indian Journal of Horticulture*, 2008, 65(4): 974 - 1012.
- [16] 陈志超, 石兆勇, 田长彦, 等. 接种 AM 真菌对短命植物生长发育及矿质养分吸收的影响 [J]. *植物生态学报*, 2008, 32(2): 648 - 653.
- [17] 龙良鲲鹏, 黎志坤, 姚 青, 等. 番茄菌根化育苗及对青枯病的防治试验 [J]. *中国蔬菜*, 2009(4): 52 - 55.
- [18] 王 立, 徐亚男, 马 放, 等. 不同 AMF 菌剂对白三叶草坪的扶壮作用 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2012, 44(10): 43 - 47.
- [19] 孔佩佩, 杨树华, 贾瑞冬, 等. 不同丛枝菌根真菌对切花菊生长的影响 [J]. *中国农学通报*, 2011, 27(31): 222 - 227.
- [20] 陈丹明, 郭 娜, 郭绍霞. 丛枝菌根真菌对牡丹生长及相关生理指标的影响 [J]. *西北植物学报*, 2010, 30(1): 131 - 135.