

菌根对紫色土上间作玉米生长及磷素累积的影响*

贾广军 张仕颖 谷林静 张乃明 张龙杰 段红平 夏运生**

(云南农业大学资源与环境学院 昆明 650201)

摘要 丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)在土壤与植物系统的磷素循环中发挥着关键的作用。本文通过盆栽模拟试验研究了不同 AMF 接种状况[不接种(NM)、接种 *Glomus mosseae*(GM)、接种 *G. etunicatum*(GE)]和玉米/大豆间作体系不同根系分隔方式(不分隔、尼龙网分隔、塑料膜分隔)对间作玉米植株生长及磷素吸收累积的影响。研究表明:GM 处理下的间作玉米根系侵染率在不同根系分隔方式之间的差异不显著,而 GE 处理则在塑料膜分隔处理下对玉米的侵染率最高。接种不同 AMF 对间作玉米促生效果不同,GM 和 GE 处理在不同根系分隔情况下表现出各自的优势,与未接种处理相比,GM 处理能使玉米生物量、株高有一定程度增加并在根系不分隔处理下玉米磷吸收较多、生长较好;GE 处理能使植株生物量有一定程度增加并在尼龙网分隔处理下的玉米磷吸收较多、生长较好。间作体系不同根系分隔方式对玉米的影响也不同,其中玉米地上部生物量在根系分隔处理下普遍小于不分隔处理,但根系生物量的大小情况则刚好相反。另外,无论何种接种状况,玉米根系磷含量及吸收量均以尼龙网分隔处理显著较高。而根系磷吸收效率则以接种 *G. mosseae* 且不分隔根系处理显著高于分隔处理。所有复合处理中,以接种 *G. etunicatum* 与尼龙网分隔根系组合处理对间作玉米的生长及磷素累积的促进作用最好,若应用于滇池流域,可望有效控制坡耕地土壤磷素的迁移。

关键词 紫色土 玉米(*Zea mays* L.) 间作 丛枝菌根真菌(AMF) 根系分隔 磷积累

中图分类号: S513 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2014)05-0516-09

Effect of mycorrhizal inoculation on growth and phosphorus accumulation of intercropped maize on purple soil

JIA Guangjun, ZHANG Shiyong, GU Linjing, ZHANG Naiming, ZHANG Longjie, DUAN Hongping, XIA Yunsheng

(College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) plays a critical role in phosphorus (P) cycle in the soil-plant system. AMF can reduce P fertilization amount through improving utilization ratio of P fertilizer and activating soil P availability. Intercropping system of different crops also increases nutrient uptake and utilization efficiency compared with monoculture system. AMF inoculation in intercropping system to reduce soil P loss has become a research hotspot. However, the beneficial effects of combination of AMF and intercropping on plant growth and P accumulation have not been fully understood on the purple soil. In this study, growth and P accumulation of maize (*Zea mays* L.) intercropped with soybean on purple soil was studied through a pot cultural experiment under different root separation ways and AMF inoculation. Three inoculation treatments [no AMF (NM), *Glomus mosseae* inoculation (GM), *G. etunicatum* inoculation (GE)] and three roots separation ways (no separation, nylon net separation, plastic-film separation) were set up. The study may provide a theoretical basis for exploring P nutrient use efficiency of intercropping system with AMF technology. Results showed that differences in AMF colonization rate of intercropped maize among different roots separation ways were not significant under GM treatment, while AMF colonization rate was significantly highest under plastic-film separation and *G. etunicatum* inoculation (GE treatment). Different AMF treatments showed different effects on intercropped maize growth. GE and GM treatments under three roots separation ways showed obviously different advantages. Compared to NM treatment, GM treatment

* 国家自然科学基金项目(41161041)资助

** 通讯作者: 夏运生, 主要从事菌根生理及污染控制研究。E-mail: yshengxia@163.com

贾广军, 主要从事农业环境保护方面的研究。E-mail: jiaguangjun1@163.com

收稿日期: 2013-11-09 接受日期: 2014-03-11

increased dry biomass and plant height of intercropped maize, improved P uptake under no roots separation; while GE treatment increased dry biomass, improved P uptake under nylon net separation of roots. Furthermore, P uptake amount of intercropped maize under AMF inoculation treatments were higher than no AMF inoculation treatments. The shoots dry biomass of intercropped maize was lower under roots separation treatments than not separation treatment, roots dry biomass showed opposite trend. Whether inoculating AMF or not, root P content and uptake were significantly higher under roots separation with nylon net, while root P uptake efficiency was significantly higher under combination of no roots separation and *G. mosseae* inoculation than under root separation. In conclusion, AMF inoculation could promote plants growth and roots P accumulation, and showed greater advantages under nylon net separation. Nylon net separation of roots significantly improved growth of maize. The treatment of GE inoculation plus roots separation with nylon net was the best one for intercropped maize growth and P accumulation, which could effectively control P loss from slope farmland in the Dianchi Lake Basin.

Keywords Purple soil; Maize (*Zea mays* L.); Intercropping; Arbuscular mycorrhizal fungi; Roots separation; Phosphorus accumulation

(Received Nov. 9, 2013; accepted Mar. 11, 2014)

菌根是土壤中菌根真菌与植物根系共生所形成的复合吸收结构^[1]。共生体系中的菌根真菌可以通过多种方式或途径影响宿主植物的矿质营养和生长发育过程。其中,丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)促进植物对矿质养分如氮、磷以及水分的吸收利用,提高作物的抗逆性,改良土壤结构及根际环境,增强土壤肥力等已为人们所熟知^[2-5]。自然条件下 AMF 种类数量丰富,适应能力强。地球上 80%以上的陆生植物均可与 AMF 形成互惠共生体^[6],可以适应多种生态环境。

磷是植物生长发育所必需的营养元素之一。据统计,紫色土坡耕地多分布在山地丘陵,土层薄,降雨侵蚀严重,中性土和石灰性土磷含量较低^[7]。另外紫色土是云南省重要的耕地资源,云南省大部分紫色土壤普遍缺磷,土壤磷的缺乏已成为作物增产的限制因素之一。磷肥供应的增长必将受到磷酸盐贮量的限制,并且化学工业也远远不能满足农业生产对磷肥的需求^[4]。前人研究表明^[4-5,8],接种AMF有扩大植株根系吸收面积、增强土壤磷酸酶活性、分泌有机酸等特点。在这种背景下应用菌根技术的上述作用来提高磷肥利用率和活化土壤有效磷含量,从而减少磷肥施用量,不仅可以为农业生产带来巨大经济效益,而且也为环境带来一定生态效益。

玉米/大豆间作是一种高/矮秆作物、禾/豆科作物间作的典型模式。前人对玉米/大豆间作模式下群体的光能、营养、水分等资源利用进行了大量研究^[9],明确了间作不同于单作的许多规律,如间作系统能提高养分吸收利用率,具有高产、稳产及高效的特性。但是有关玉米/大豆间作种植条件下,应用菌根技术对紫色土中作物的生长状况及磷素积累影响,目前尚缺乏系统报道。因此本研究采用盆栽试验,通过对根系不同的分隔方式,研究不同AMF对间作体系中玉米的生长状况及磷素吸收与累积差异,旨在充分认识紫色土中菌根共生体对间作体系中作物

的有益影响,为进一步探讨间作体系中养分利用优势和通过菌根技术强化间作体系中养分利用效率提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

采用盆栽模拟试验,于2012年6—8月在云南农业大学科研大棚里进行。试验作物种子为玉米品种‘农大108’,由市面购买获得;供试丛枝菌根真菌(AMF)由北京市农林科学院植物营养与研究所提供,分别为 *Glomus mosseae*(BGC GZ01A, 1511C0001 BGCAM0012, GM)、*G. etunicatum*(BGC GZ03C, 1511C0001BGCAM0046, GE)。菌根菌剂由玉米和苜蓿扩繁得到。

供试土壤为滇池流域宝象水库附近坡地紫色土,其化学属性为 pH 7.51,有机质 24.81 g·kg⁻¹,碱解氮 45.5 mg·kg⁻¹,速效磷 5.94 mg·kg⁻¹,速效钾 115 mg·kg⁻¹。

1.2 试验处理

本试验包括不同菌根接种状况[不接种(NM)、接种*G. mosseae* (GM)、接种*G. etunicatum* (GE)]和间作玉米/大豆的3种根系分隔方式(不分隔、尼龙网分隔和塑料膜分隔)2个因素,9个处理,每种处理重复4次。

试验所用容器为PVC管(直径16 cm,高25 cm)和花盆底座(直径22 cm)构成,然后分装灭菌土。不分隔处理装置盛装底层土2.8 kg、中间土1.8 kg、覆盖土200 g,其中接种处理每盆加入200 g菌剂与中间土混匀,对照加等量灭菌菌剂;分隔处理装置的两部分各盛装底层土1.4 kg、中间土0.9 kg、覆盖土100 g,其中接种处理每1/2盆加入100 g菌剂与中间土混匀,对照加等量灭菌菌剂。以溶液的形式向土壤中加入基础肥料(N 60 mg·kg⁻¹, P 30 mg·kg⁻¹, K 67 mg·kg⁻¹, Ca 20 mg·kg⁻¹, Mg 4.5 mg·kg⁻¹, Mn

0.92 mg·kg⁻¹, Cu 0.54 mg·kg⁻¹, Zn 1.24 mg·kg⁻¹, Mo 0.06 mg·kg⁻¹), 分别以NH₄NO₃、KH₂PO₄、K₂SO₄、CaCl₂·2H₂O、MgSO₄·7H₂O、MnSO₄·H₂O、CuSO₄·5H₂O、ZnSO₄·7H₂O、(NH₄)₆Mo₇O₂₄·4H₂O的形式加入。移苗前, 盆栽装置中的土层厚度为20 cm左右。

1.3 盆栽管理及收获

挑选大小一致且籽粒饱满的玉米和大豆种子, 用10% H₂O₂进行表面消毒10 min, 再用蒸馏水冲洗多次, 然后置于放有湿润定量滤纸的培养皿中, 于25 °C恒温培养箱中催芽2 d, 种子露白大约1 cm左右播种。不分隔处理下每盆播种4颗玉米种子和4颗大豆种子, 分隔处理分别在尼龙网或塑料膜两侧播种4颗玉米种子和4颗大豆种子。植物生长期间平均每隔3 d浇1次水, 每次250 mL。待长势稳定后, 留下比较整齐的2株玉米苗和4株大豆幼苗。

玉米、大豆生长约90 d后, 测量玉米株高并将植株及根系分开收获。根系用蒸馏水多次冲洗, 之后晾干; 取出部分根系, 剪成1 cm段, 取用部分根样采用曲利苯蓝-方格交叉法测定玉米根系的根长和菌根侵染率^[10-11]; 其他部分和地上部一起经杀青后烘干(70 °C, 72 h), 称重、磨细待测。植株含磷量及磷吸收量测定方法参见《土壤农化分析》^[12], 根系磷吸收效率(specific absorption rate, SAR)指标根

据单位根系生物量(mg)所对应的植株养分吸收量(μg)来计算^[13]。

1.4 试验数据的处理与分析

试验数据采用SPSS 11.5统计软件和EXCEL 2003软件进行基本统计、方差分析以及多重比较。菌根处理和根系分隔处理交互作用显著的前提下, 对所有处理进行LSD多重比较分析, 检验不同菌根接种状况与不同根系分隔处理之间的差异显著性($P < 0.05$)。菌根处理和根系分隔处理交互作用不显著的前提下, 对接种或未接种处理分别进行多重比较, 分析不同根系分隔处理之间的差异显著性, 并对同一根系分隔方式内处理间进行多重比较, 分析不同菌根处理间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 不同菌根接种和根系分隔方式对间作玉米根系 AMF 侵染率及植株生长的影响

由表1可知, 经双因素方差分析, 间作玉米植株AMF侵染率、根长、地上部生物量、根冠比、株高在不同菌根处理与分隔处理间存在显著交互作用, 其中玉米根长、株高有极显著的交互作用, 而玉米根系生物量在菌根处理与分隔处理间交互作用不显著, 但根系生物量在菌根处理、分隔处理内差异均分别显著。

表1 玉米植株 AMF 侵染率及生长指标在不同菌根接种和根系分隔方式下的方差分析

Table 1 Variance analysis of AMF colonization rate and growth indices of maize plants under different AMF inoculation and roots separation ways

因素 Factor	菌根侵染率 Colonization rate	根长 Root length	生物量 Dry biomass		根冠比 Roots/shoots ratio	株高 Plant height
			地上部 Shoots	根系 Roots		
菌根接种 AMF inoculation	***	*	**	***	NS	NS
根系分隔方式 Roots separation way	*	***	*	***	***	NS
菌根接种×根系分隔方式 AMF inoculation × roots separation way	**	***	**	NS	*	***

、**和*分别表示 $P < 0.001$ 、 $P < 0.01$ 和 $P < 0.05$ 水平显著; NS 表示不显著; 下同。: $P < 0.001$; **: $P < 0.01$; *: $P < 0.05$; NS: not significant. The same below.

2.1.1 不同处理对玉米根系 AMF 侵染率及根长的影响

经双因素方差分析, 玉米根系 AMF 侵染率和根长在接种处理与不同根系分隔处理之间的交互作用显著($P < 0.01$ 、 $P < 0.001$)。表2表明, 未接种处理无菌根侵染, 而接种 AMF 的玉米植株无论何种根系分隔方式均有一定比例的侵染。差异分析表明, 玉米/大豆根系不分隔和尼龙网分隔处理下 GM 处理的玉米侵染率均高于 GE 处理, 而在塑料膜分隔处理下 GE 处理的侵染率略高于 GM 处理, 这说明近似自然状态的根系不分隔处理中, GM 的菌根侵染率高于 GE。GM 处理下, 3 种根系分隔方式下玉米侵染率没有显著差异。而 GE 处理下, 塑料膜分隔处理玉米侵染率最高, 尼龙网分隔次之, 这说明 GE 真菌在塑料

膜分隔处理下, 侵染能力可显著增强。

从玉米/大豆根系不分隔处理来看, NM 处理的玉米根长显著大于接种处理。而在根系分隔处理中, 尼龙网分隔处理下 GM 处理的玉米根长显著小于 NM 处理和 GE 处理, 塑料膜分隔处理下接种处理显著高于不接种处理, 并且 GE 处理对促进玉米根系伸长的作用更为明显。NM 处理下, 尼龙网分隔和不分隔处理的玉米根长显著大于塑料膜分隔处理。GM 处理下, 分隔处理之间无显著差异, 而塑料膜分隔处理的玉米根长显著大于不分隔处理。GE 处理下, 根系分隔处理的玉米根长显著高于不分隔处理, 尼龙网分隔和塑料膜分隔处理之间无显著差异。这说明在接种 AMF 条件下, 根系分隔处理有助于增加玉米根长。

表 2 不同菌根接种和根系分隔方式下间作玉米根系侵染率及生长指标

Table 2 Colonization rate and growth indices of intercropped maize under different AMF inoculation and roots separation ways

处理 Treatment		侵染率 Colonization rate (%)	根长 Root length (m)	生物量 Dry biomass (g pot ⁻¹)		根冠比 Roots/shoots ratio	株高 Plant height (cm)
根系分隔方式 Roots separation way	菌根接种 AMF inoculation			地上部 Shoots	根系 Roots		
	GM	47.7±5.0ab	280.8±62.5c	18.49±2.70ab	2.71±0.44γ	0.15±0.02d	75.3±1.0a
	GE	36.6±6.0c	289.4±42.9c	16.00±0.79bc	2.84±0.03γ	0.17±0.01d	69.0±5.2ab
尼龙网分隔 Nylon net separation	NM	0d	485.8±38.3a	11.06±0.95d	3.01±0.21b	0.27±0.03a	62.8±4.5bc
	GM	51.7±5.6ab	367.1±44.2bc	14.29±2.12bcd	3.52±0.38ab	0.25±0.01ab	69.3±8.5ab
	GE	45.4±4.7b	508.4±50.3a	21.98±2.96a	4.10±0.41a	0.19±0.04cd	77.7±1.3a
塑料膜分隔 Plastic-film separation	NM	0d	339.8±64.9c	13.80±1.20cd	2.73±0.31β	0.20±0.01bcd	71.8±2.4a
	GM	46.4±6.3ab	455.0±86.0ab	16.77±3.42bc	3.26±0.43αβ	0.20±0.02bcd	75.5±3.0a
	GE	52.1±1.1a	508.6±30.5a	15.76±3.25bc	3.62±0.37α	0.24±0.07abc	57.7±6.3c

NM、GM、GE 分别表示不接种、接种 *Glomus mosseae* 和接种 *G. etunicatum*。同列不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平存在显著差异, 若因素间没有显著交互作用则采用不同字母体系(abc, xyz, αβγ), 下同。NM, GM, GE are treatments of no inoculation, inoculation with *Glomus mosseae* and inoculation with *G. etunicatum*. Different small letters in same column show significant differences at $P < 0.05$ level. Different letter systems (abc, xyz, αβγ) indicate not significant interaction between roots separation way and AFM inoculation. The same below.

2.1.2 不同处理对间作玉米植株生物量的影响

经双因素方差分析, 玉米植株地上部生物量和根冠比在接种处理与不同根系分隔处理之间的交互作用显著($P < 0.01$ 、 $P < 0.05$), 而玉米植株根系生物量在接种处理与不同根系分隔处理之间的交互作用不显著, 但接种处理间差异显著($P < 0.001$), 根系分隔处理间差异显著($P < 0.001$)。由表2可知, 无论何种根系分隔方式, 接种AMF处理的玉米生物量都不同程度地大于未接种处理, 说明接种AMF能促进玉米生物量的积累。其中, GE处理且尼龙网分隔处理的玉米生物量最大, 未接种且尼龙网分隔处理的玉米生物量最小。NM处理下, 尼龙网分隔处理的玉米地上部生物量显著小于不分隔处理, 而玉米根系生物量的大小情况刚好相反, 说明尼龙网分隔处理抑制了无AMF接种的玉米地上部生物量积累, 却促进了玉米根系生物量积累。GM处理下, 根系分隔处理的玉米生物量与不分隔处理没有显著差异。GE处理下, 尼龙网分隔处理的玉米生物量显著大于不分隔处理和塑料膜分隔处理。所有处理中, GE和尼龙网分隔处理的玉米生物量最大, 说明该处理对玉米生物量的积累效果最明显。

表 2 数据还表明, 根系不分隔处理和塑料膜分隔处理下, 3 种不同接种处理间的玉米根冠比没有显著差异。尼龙网分隔处理下, NM 和 GM 处理的玉米根冠比均显著大于 GE 处理。NM 处理下, 尼龙网分隔处理的玉米根冠比显著大于塑料膜分隔处理和不分隔处理。GM 处理下, 尼龙网分隔处理的玉米根冠比显著大于不分隔处理, 但与塑料膜分隔处理间无显著差异。GE 处理下, 塑料膜分隔处理的玉米根冠比显著大于不分隔处理, 但与尼龙网分隔处理间差

异不显著。

2.1.3 不同处理对间作玉米株高的影响

经双因素方差分析表明玉米株高在接种处理与不同根系分隔处理之间的交互作用显著($P < 0.001$)。从表 2 可以看出, 根系不分隔处理下, 3 种接种处理的玉米株高之间差异不显著。尼龙网分隔处理下, GE 和 GM 处理的玉米株高显著高于 NM 处理。塑料膜分隔处理下, GM 处理与 NM 处理的玉米株高相近, 但显著高于 GE 处理。NM 处理下, 根系不分隔处理与塑料膜分隔处理的玉米株高间无显著差异, 但显著高于尼龙网分隔处理。GM 处理下, 根系分隔处理与不分隔处理的玉米株高间没有显著差异。GE 处理下, 尼龙网分隔处理与不分隔处理的玉米株高间无显著差异, 均显著大于塑料膜分隔处理。

2.2 不同菌根接种和根系分隔方式对间作玉米植株磷累积的影响

由表3可知, 经双因素方差分析, 间作玉米植株地上部磷含量和磷吸收量、根系磷吸收效率在不同菌根处理与分隔处理间存在显著交互作用, 而玉米根系磷含量、磷吸收量在菌根处理与分隔处理间交互作用不显著, 但在菌根处理、分隔处理内差异显著。

2.2.1 不同处理对间作玉米植株磷含量的影响

经双因素方差分析, 玉米地上部磷含量在接种处理与不同根系分隔处理之间的交互作用显著($P < 0.01$)。由图1A可知, 根系不分隔处理下, 3种接种处理间的玉米地上部磷含量无显著差异; 根系分隔处理情况下, 不接种处理的玉米地上部磷含量显著高于接种处理。说明根系分隔状况下, 接种两种AMF可能抑制磷素向玉米地上部迁移。

表 3 间作玉米植株磷指标在不同菌根接种和根系分隔方式下的方差分析

Table 3 Variance analysis of phosphorus indexes of intercropped maize plants under different AMF inoculation and roots separation ways

因素 Factor	地上部 Shoots		根系 Roots		根系磷吸收效率 P uptake efficiency of roots
	磷含量 P content	磷吸收量 P uptake	磷含量 P content	磷吸收量 P uptake	
菌根接种 AMF inoculation	***	*	**	**	NS
根系分隔方式 Roots separation way	NS	NS	***	***	**
菌根接种×根系分隔方式 AMF inoculation × roots separation way	**	**	NS	NS	*

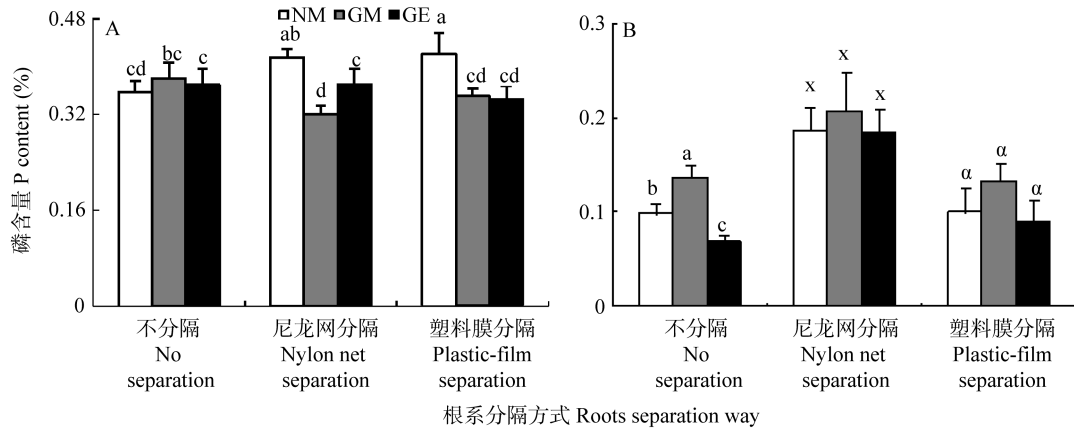


图 1 不同菌根接种和根系分隔方式下间作玉米地上部(A)和根系(B)的磷含量

Fig. 1 P contents in shoots (A) and roots (B) of intercropped maize under different AMF inoculation and roots separation ways

NM 处理下, 根系分隔处理的玉米地上部磷含量显著高于不分隔处理, 其中尼龙网分隔与塑料膜分隔处理间的差异不显著。GM 处理下, 不分隔处理的玉米地上部磷含量显著高于尼龙网分隔处理。GE 处理下, 根系不分隔与分隔处理的玉米地上部磷含量差异不显著。说明不接种 AMF 时, 分隔处理能有效增加地上部磷量, 而接种 AMF, 不分隔处理有利于磷素向玉米地上部迁移。

经双因素方差分析, 玉米根系磷含量在接种处理与不同根系分隔处理之间的交互作用不显著, 但接种处理间差异显著 ($P < 0.01$), 根系分隔处理间差异极显著 ($P < 0.001$)。对同一根系分隔处理方式下进行的多重比较(图 1B)显示: 根系不分隔处理下, 玉米根系的磷含量以 GM 处理显著较高, 以 GE 处理显著较低; 而根系分隔处理下不同 AMF 处理之间则无显著差异。无论何种根系分隔方式, 玉米根系磷含量均表现出随 GM、NM、GE 处理相应降低的趋势, 说明 GM 能够较好地促进玉米根系对磷素的吸收。

对同一接种处理下进行多重比较显示: 无论接种与否, 均以尼龙网分隔处理下的玉米根系磷含量显著较高, 而不分隔与塑料膜分隔处理间无显著差异, 说明尼龙网分隔能显著提高间作玉米根系的磷含量。

2.2.2 不同处理对间作玉米植株磷吸收量的影响

经双因素方差分析, 玉米地上部磷吸收量在接种处理与不同分隔处理之间的交互作用显著 ($P < 0.01$),

由图 2A 可知, 根系不分隔和塑料膜分隔处理下, 3 种接种处理的玉米地上部磷吸收量之间差异不显著。尼龙网分隔处理下, GE 处理的玉米地上部磷吸收量显著大于 NM 和 GM 处理。

NM 处理下, 玉米地上部磷的吸收量在不同根系分隔方式间无显著差异。GM 处理下, 根系不分隔处理的玉米地上部磷吸收量显著大于尼龙网分隔处理, 这与对磷含量的影响基本一致, 再一次说明分隔处理可能减少磷素向玉米地上部的迁移。GE 处理下, 尼龙网分隔处理的玉米地上部磷吸收量最大, 显著大于不分隔与塑料膜分隔处理。且所有处理中以接种 *G. etunicatum* 与尼龙网分隔根系组合处理下的玉米地上部磷吸收量最高, 说明接种 *G. etunicatum* 与尼龙网分隔根系组合处理可能极大地促进磷素向玉米地上部迁移。

经双因素方差分析, 玉米根系磷吸收量在接种处理与不同根系分隔处理之间的交互作用不显著, 但接种处理间差异显著 ($P < 0.01$), 根系分隔处理间差异显著 ($P < 0.001$)。由图 2B 可知, 对同一根系分隔方式下进行多重比较表明: 根系不分隔处理下, GM 处理的玉米根系磷吸收量显著大于 NM 和 GE 处理; 尼龙网分隔处理下, 接种处理的玉米根系磷吸收量显著大于不接种处理; 塑料膜分隔处理下, 接种处理的玉米根系磷吸收量与不接种处理之间无显著差异, 但玉米根系磷吸收量均表现出随 GM、GE、NM 处理相应降低的趋势。说明间作玉米根系在接种

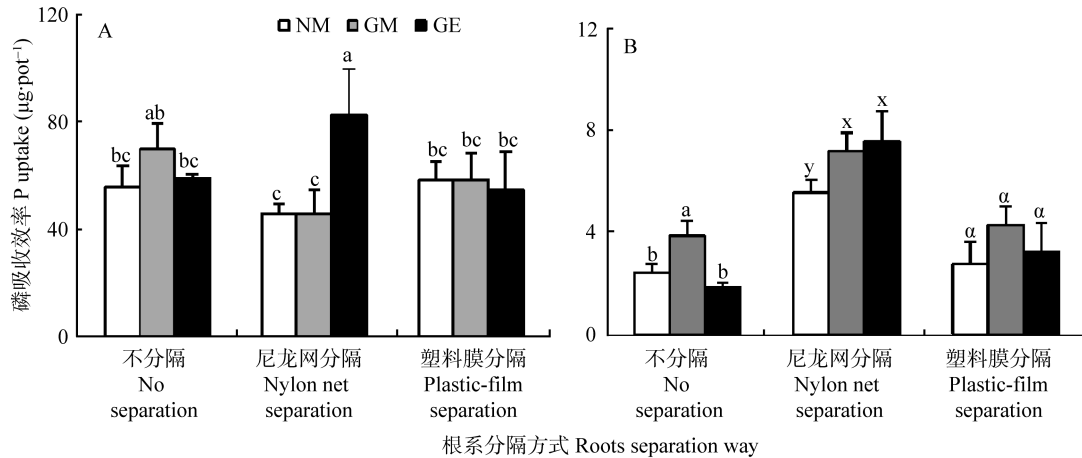


图 2 不同菌根接种和根系分隔方式下间作玉米地上部(A)和根系(B)的磷吸收量

Fig. 2 P uptake by shoots (A) and roots (B) of intercropped maize under different AMF inoculation and roots separation ways

AMF 并分隔状态下对其根系磷吸收量有一定提升作用。

对同一接种处理下进行多重比较表明: NM 处理下, 尼龙网分隔处理的玉米根系磷吸收量显著高于不分隔和塑料膜分隔处理; GM 处理下, 根系分隔处理的玉米根系磷吸收量显著大于不分隔处理; GE 处理下, 3 种根系分隔方式下的玉米根系磷吸收量无显著差异。说明间作玉米的根系磷吸收量在根系分隔状态下有一定程度增加, 并在隔尼龙网下显著增加。

2.3 不同菌根接种和根系分隔方式对玉米根系磷吸收效率的影响

经双因素方差分析, 玉米根系磷吸收效率在接种处理与不同根系分隔处理之间的交互作用显著 ($P < 0.05$)。由图 3 可知, 根系不分隔处理下, 3 种接种处理的玉米根系磷吸收效率之间差异不显著。尼龙网分隔处理下, GE 处理的玉米根系磷吸收效率显著大于 GM 处理。塑料膜分隔处理下, NM 处理的玉米根系磷吸收效率显著大于 GE 处理。

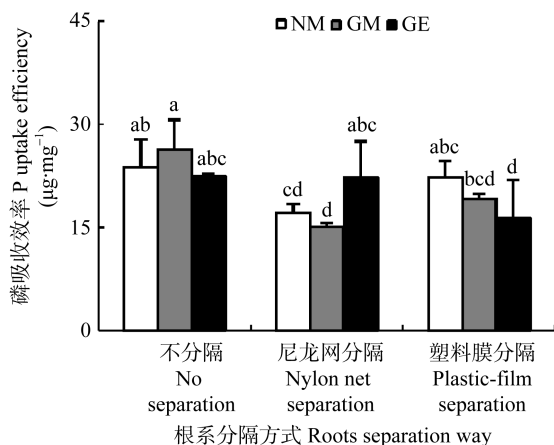


图 3 不同菌根接种和根系分隔方式下间作玉米根系的磷吸收效率

Fig. 3 P uptake efficiency of roots of intercropped maize under different AMF inoculation and roots separation ways

NM 处理下, 根系不分隔与塑料膜分隔处理的玉米根系磷吸收效率无显著差异, 但显著高于尼龙网分隔处理。GM 处理下, 根系不分隔处理的玉米根系磷吸收效率显著大于分隔处理。GE 处理下, 根系不分隔和尼龙网分隔处理的玉米根系磷吸收效率均显著大于塑料膜分隔处理。说明根系分隔处理在一定程度上降低了玉米根系的磷吸收效率。

3 讨论

3.1 不同 AMF 对间作玉米生长及磷素累积的影响

菌根真菌能与绝大多数植物形成共生体系, 并能促进宿主植物对磷等矿质元素的吸收及其生长发育^[14-15]。利用菌根真菌的生长、繁殖、侵染而改善植物生长的根际环境, 达到使作物增产、增效的目的, 使之成为农业增产的一条经济、高效新途径。本试验中, 2 种 AMF (*G. mosseae* 和 *G. etunicatum*) 均可侵染玉米, 但侵染率不同, 一方面可能是不同玉米根系分隔方式中的土壤养分含量不同所致, 而且肥力过高的土壤尤其是高磷、高氮的条件会抑制菌根结构形成^[16], 另一方面可能与 *G. mosseae* 和 *G. etunicatum* 分离地和宿主植物不同有关。虽然 2 种 AMF 对玉米的侵染能力不同, 但对玉米生长指标有着类似的影响, 接种菌根无论根系分隔状况如何, 能同时增加玉米地上部与根系干重, 说明 AMF 对植株的良好生长起到了重要作用, 这与黄京华等^[17]和李淑敏等^[18]研究的结果相一致。另外, 玉米根长及株高最大值均出现在 GE 处理中, 这说明 *G. etunicatum* 真菌与玉米的共生效果较好, 促进了根部伸长和植株生长。接种处理对于玉米地上部磷含量贡献不明显, 这是否由于间作根系分隔状况影响了根系分泌物及根际微生物活性而阻碍磷的吸收及向地上部的运输, 还有待进一步研究。地上部磷吸收量在接种处理下表现出较高水平, 尤其在 GE 处理下

达到最大值。玉米根系磷含量、磷吸收量以及根系磷吸收效率在接种处理下具有相似结果,即均在接种状态下达到最大值。接种处理对系统磷营养的吸收作用表现出一定优势,这可能是由于菌根共生体在土壤中扩大了玉米根际范围,因此扩大了根系吸收面积,使玉米能更高效地吸收磷素。

3.2 间作根系分隔方式对玉米生长及磷素累积的影响

玉米根系的生长发育及形态特征与地上部结构的形成和产量密切相关^[19]。玉米间作比单做更能充分利用养分资源,其中根系对水分和矿质养分的吸收贡献明显^[20]。郝艳如等^[21]采用隔根技术研究表明,间作体系中的根系分隔导致小麦与玉米的根系生物量、根长等指标下降。但本试验生长指标中玉米根系生物量、根长等在塑料膜分隔处理下有所增加,而且尼龙网分隔增加效果更明显,这一方面可能因为土壤类型及养分含量的差异造成的,另一方面可能因为间作植株在尼龙网分隔处理下既可以共享玉米/大豆根际微环境又能较好吸收被活化的矿质养分,还可以避免没有分隔情况下玉米大豆根系对空间和养分的竞争,故更好地表现间作优势。磷素指标中除玉米地上部磷含量外,玉米地上部磷吸收量、根系磷含量、根系磷吸收量 3 个指标的最大值都出现在尼龙网分隔处理中,其中玉米根系磷含量与磷吸收量在尼龙网分隔处理下显著大于另外 2 种处理。这可能是由于一方面间作体系本身提高了根际微生物群落多样性、改变了群落构成^[22],另一方面可能由于根系的阻隔,减少了间作体系中 2 种作物的营养竞争,使玉米能更好地吸收水分与矿质元素。总体上尼龙网分隔处理对系统磷营养的吸收表现出一定优势。

3.3 不同菌根与间作根系分隔方式对玉米生长及磷素累积的影响

接种 AMF 与间作模式均使玉米在土壤中显著增加对磷的吸收并促进其生长,接种 AMF 一方面使菌丝可以从根系到达不了的区域内吸取磷素等矿物营养,另一方面土壤中的有机磷必须经各种磷酸酶的转化才能被植株和真菌利用,而接种 AMF 可以增强活化有机磷的效率^[6,23];另外间作模式通过改良根系微环境,可以提高土壤养分有效性,增加作物产量^[24]。本试验中,对于根长来说,根系不分隔时可能由于间作根系吸收的养分已满足植株需要,真菌消耗光合产物而导致抑制玉米根系的伸长,在根系分隔处理中,根系不能充分吸收氮、磷等营养,接种 AMF 则有效促进玉米根系的伸长,通过菌丝延伸帮助植株吸收营养物质,故分隔处理的玉米根长大于

不分隔处理。玉米地上部与根系生物量最大值均出现在尼龙网分隔并 GE 处理下,这说明尼龙网分隔并接种 *G. etunicatum* 能显著提高玉米产量。塑料膜分隔处理中,不接种处理的玉米地上部磷含量及吸收量占据一定优势,而根系磷含量及吸收量则是 GM 处理时更高。这证实接种 AMF 对根系的磷含量和磷吸收量确实具有促进作用,但根系分隔处理一定程度上会影响根系磷素向地上部的运输,这是否缘于分隔处理对间作玉米根系创造的微环境和大豆根系分泌物及 AMF 的共同作用,将间作玉米吸收的磷素固定在根系中,还有待进一步研究。另外根系不分隔处理中接种 GM 处理的玉米根系磷吸收效率最高,这说明 *G. mosseae* 真菌在自然状态下能发挥更高的吸磷潜力。但总体上间作玉米在接种 *G. etunicatum* 与尼龙网分隔根系组合处理下生长最佳,对磷素的吸收量最多。

3.4 菌根与间作因素在滇池流域磷素迁移减控中的前景分析

云南省玉米多采用穴播方式播种,土地磷素吸收量为单位面积穴数与每穴磷素吸收量的乘积。根据云南省各地的玉米播种情况,玉米播种密度大约为 5 000 穴·667m⁻²^[25],如以每盆等同于每穴计算磷素吸收量,就可以得出接种 *G. etunicatum* 和尼龙网分隔组合处理相对应的大田磷素吸收量可达 0.45 kg·667m⁻²。据统计,滇池流域大约有 13 000 hm² 左右的旱地用作农田^[26],如按上述组合进行播种并收获,就可截留大约 9 t 磷素,可见其对减轻滇池水体富营养化状况存在不容忽视的贡献。

4 结论

1) 接种 AMF 能促进玉米的生长及植株根系磷素积累,其中 *G. etunicatum* 真菌在尼龙网分隔处理时表现出明显优势。

2) 间作玉米/大豆根系不同分隔方式对玉米生长及植株磷素积累的影响差异较大,其中尼龙网分隔处理明显改善了玉米生长状况。

3) 接种 *G. etunicatum* 与尼龙网分隔根系组合处理是促进间作玉米生长的最佳组合,若推广应用于滇池流域坡耕地,能有效截留土壤磷素,控制磷素的迁移。

参考文献

- [1] 王立, 贾文奇, 马放, 等. 菌根技术在环境修复领域中的应用及展望[J]. 生态环境学报, 2010, 19(2): 487-493
Wang L, Jia W Q, Ma F, et al. Perspective of mycorrhizal technology application for environmental remediation[J]. Ecology and Environment, 2010, 19(2): 487-493

- [2] 李晓林, 冯固. 丛枝菌根生态生理[M]. 北京: 华文出版社, 2001
Li X L, Feng G. Arbuscular Mycorrhizal Ecological Physiological[M]. Beijing: Sino-Culture Press, 2001
- [3] 易时来, 温明霞, 李学平, 等. VA 菌根改善植物磷素营养的研究进展[J]. 中国农学通报, 2004, 20(5): 164–166, 173
Yi S L, Wen M X, Li X P, et al. Progresses in improvement of plant P nutrition by VA Mycorrhizal Fungi[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2004, 20(5): 164–166, 173
- [4] 宋勇春, 李晓林, 冯固. 泡囊丛枝(VA)菌根对玉米根际磷酸酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2001, 12(4): 593–596
Song Y C, Li X L, Feng G. Effect of VAM fungi on phosphatase activity in maize rhizosphere[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(4): 593–596
- [5] Zhang G Y, Zhang L P, Wei M F, et al. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi, organic fertilizer and soil sterilization on maize growth[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(4): 192–196
- [6] 刘润进, 李晓林. 丛枝菌根及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000
Liu R J, Li X L. Arbuscular Mycorrhiza and Its Application[M]. Beijing: Science Press, 2000
- [7] 花可可, 朱波, 王小国. 紫色土坡耕地可溶性有机碳径流迁移特征[J]. 农业工程学报, 2013, 29(5): 81–88
Hua K K, Zhu B, Wang X G. Characteristics of dissolved organic carbon transport via overland flow and interflow on sloping cropland of purple soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(5): 81–88
- [8] 苏友波, 林春, 张福锁, 等. 不同 AM 菌根菌分泌的磷酸酶对根际土壤有机磷的影响[J]. 土壤, 2003, 35(4): 334–338
Su Y B, Lin C, Zhang F S, et al. Effect of arbuscular mycorrhiza fungi (*Glomus Mosseae*, *Glomus Versiformeae*, *Gigaspora Margarita* and *Gigaspora Rosea*) on phosphatase activities and soil organic phosphate content in clover rhizosphere[J]. Soils, 2003, 35(4): 334–338
- [9] 孟维伟, 王旭清, 刘佳, 等. 玉米大豆间作对资源利用及产量、效益影响的研究进展[J]. 山东农业科学, 2013, 45(3): 132–135
Meng W W, Wang X Q, Liu J, et al. Research advances on resource utilization, yield and economic benefit in maize-soybean intercropping system[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2013, 45(3): 132–135
- [10] 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
- [11] Giovannetti M, Mosse B. Evaluation of techniques for measuring vesicular arbuscular mycorrhizal infection in roots[J]. New Phytologist, 1980, 84(3): 489–500
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 第3版. 北京: 中国农业出版社, 2007: 268–270, 389–391
Bao S D. Soil Agro-chemical Analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2007: 268–270, 389–391
- [13] Azcón R, Ambrosano E, Charest C. Nutrient acquisition in mycorrhizal lettuce plants under different phosphorus and nitrogen concentration[J]. Plant Science, 2003, 165(5): 1137–1145
- [14] 谷林静, 白来汉, 张乃明, 等. 菌根技术对磷石膏农用的强化效应[J]. 农业工程学报, 2013, 29(17): 152–159
Gu L J, Bai L H, Zhang N M, et al. Strengthening effect of mycorrhizal technology on application of phosphogypsum in agriculture[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(17): 152–159
- [15] Satter M, Hanafi M, Mahmud T, et al. Influence of arbuscular mycorrhiza and phosphate rock on uptake of major nutrients by *Acacia mangium* seedlings on degraded soil[J]. Biology and Fertility of Soils, 2006, 42(4): 345–349
- [16] 张旭红. 丛枝菌根真菌在不同土壤环境因子下的适应性研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2003
Zhang X H. The adaptability of arbuscular mycorrhizal fungi to different soil environmental factors[D]. Baoding: Hebei Agriculture University, 2003
- [17] 黄京华, 刘青, 李晓辉, 等. 丛枝菌根真菌诱导玉米根系形态变化及其机理[J]. 玉米科学, 2013, 21(3): 131–135
Huang J H, Liu Q, Li X H, et al. Mechanism of maize root morphology change induced by arbuscular mycorrhizal fungi[J]. Journal of Maize Sciences, 2013, 21(3): 131–135
- [18] 李淑敏, 李隆, 张福锁. 蚕豆/玉米间作接种 AM 真菌与根瘤菌对其吸磷量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(3): 136–139
Li S M, Li L, Zhang F S. Effect of inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi and rhizobium on the P uptake in faba bean/maize intercropping system[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2005, 13(3): 136–139
- [19] 鄂玉江, 戴俊英, 顾慰连. 玉米根系的生长规律及其与产量关系的研究——玉米根系与叶的相互作用及其与产量的关系[J]. 作物学报, 1988, 14(4): 310–314
E Y J, Dai J Y, Gu W L. The research about the root growth rule of maize and its relationship with the yield—The interactions between maize root system and leaf and their relationships with the production[J]. Acta Agronomica Sinica, 1988, 14(4): 310–314
- [20] 叶优良, 肖焱波, 黄玉芳, 等. 小麦/玉米和蚕豆/玉米间作对水分利用的影响[J]. 中国农学通报, 2008, 24(3): 445–449
Ye Y L, Xiao Y B, Huang Y F, et al. Effect of wheat/maize and faba bean/maize intercropping on water use[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2008, 24(3): 445–449
- [21] 郝艳如, 劳秀荣, 赵秉强, 等. 隔根对小麦/玉米间套种植生长特性的影响[J]. 麦类作物学报, 2003, 23(1): 71–74
Hao Y R, Lao X R, Zhao B Q, et al. Effect of separating root method on wheat and corn intercropping system[J]. Journal of Triticeae Crops, 2003, 23(1): 71–74
- [22] 宋亚娜, Marschner P, 张福锁, 等. 小麦/蚕豆, 玉米/蚕豆和小麦/玉米间作对根际细菌群落结构的影响[J]. 生态学报, 2006, 26(7): 2268–2274
Song Y N, Marschner P, Zhang F S, et al. Effect of intercropping on bacterial community composition in rhizosphere of wheat (*Triticum aestivum* L.), maize (*Zea mays* L.) and faba bean (*Vicia faba* L.)[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(7): 2268–2274
- [23] He Y, Ding N, Shi J C, et al. Profiling of microbial PLFAs: Implications for interspecific interactions due to intercropping

- which increase phosphorus uptake in phosphorus limited acidic soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 57: 625–634
- [24] Betencourt E, Duputel M, Colomb B, et al. Intercropping promotes the ability of durum wheat and chickpea to increase rhizosphere phosphorus availability in a low P soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 46: 181–190
- [25] 白来汉, 张仕颖, 张乃明, 等. 不同磷石膏添加量与接种菌根对玉米生长及磷、砷、硫吸收的影响[J]. *环境科学学报*, 2011, 31(11): 2485–2492
- Bai L H, Zhang S Y, Zhang N M, et al. Effect of different phosphogypsum addition levels and mycorrhizal inoculation on growth and phosphorus, sulfur and arsenic uptake by maize plants (*Zea mays* L.)[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(11): 2485–2492
- [26] 郑丙辉, 鄧永宽, 郑凡东, 等. 滇池流域生态环境动态变化研究[J]. *环境科学研究*, 2002, 15(2): 16–18
- Zheng B H, Zhi Y K, Zheng F D, et al. Study on ecological environment dynamic change in Dianchi Lake basin[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2002, 15(2): 16–18

农业资源研究中心“百人计划”招聘启事

中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心(以下简称中心)面向国家水安全、粮食安全、生态环境安全的重大战略需求和农业资源与生态学前沿领域开展应用基础研究。根据中心科研布局与学科发展的需要,现诚聘海内外杰出人才若干名。

一、招聘研究领域

农业水文学、农业生态学、水化学与农田面源污染、土壤微生物生态学、农业灌溉工程、农业遥感与模型、作物遗传育种、植物生理等相关领域。

二、报名条件

1. 具有中国国籍的公民或自愿放弃外国国籍来华或回国定居的专家学者,年龄 40 周岁以下,身体健康;
2. 恪守科学道德,学风正派、诚实守信、严谨治学、尊重他人,具有团队合作精神,并对所招聘的研究领域有浓厚的研究兴趣和艰苦创业的奉献精神;
3. 具有博士学位且在相关研究领域已有连续 3 年以上在海外科研工作经历,在国外获得相应职位(或优秀的博士后研究人员),或在国内外学科领域已取得有影响的科研成果且获得研究员(教授)职位;
4. 独立主持或作为主要骨干参与过课题(项目)研究的全过程并做出显著成绩;
5. 在本学科领域有较深的学术造诣,做出过具有国际水平的研究成果,在重要核心期刊上发表过 3 篇及以上有影响的学术论文并被引用(第一或通讯作者),或掌握关键技术、拥有重大发明专利等,其研究水平足以担当我中心的学术带头人;
6. 在国内外学术界有一定的影响,能把握本学科领域的发展方向,具有长远的战略构思,能带领一支队伍在国际科学前沿从事研究并做出具有国际水平的创新成果。

三、岗位及待遇

1. 聘为研究员(全职)、研究组组长、研究生导师;
2. 入选“百人计划”后由中国科学院提供科研经费 200 万元人民币;
3. 研究中心提供每年 30 万元人民币的研究组研究经费;
4. 研究中心创新领域前沿研究课题 1 项,经费 50 万元人民币;
5. 依据科研工作需要提供 100 平米的科研用房(待新科研大楼建成后再行改善),以及所需的相关设施与试验用地,并配备选聘的科研助手;
6. 基本年薪: 20 万元人民币+研究生导师津贴,绩效奖励根据工作业绩另行发放;
7. 购房补贴 90 万元人民币;
8. 安家费 10 万元人民币;
9. 享有中心其他良好福利待遇;
10. 协助安置配偶就业和子女就学,随迁配偶在暂未落实工作期间,第一年可享受引进人才配偶生活补贴 1000 元/月。

四、应聘材料

1. 填写《中国科学院“百人计划”候选人推荐(自荐)表》(见 www.sjziam.cas.cn);
2. 相关证明材料复印件(已取得的重要科研成果证明、国内外任职情况证明、最高学位证书、身体健康状况证明等);
3. 发表论文目录及代表性论文 3 篇(全文,复印件);
4. 两位海内外教授级同行的推荐信函;
5. 本人认为有必要提供的其他相关材料。

五、联系方式

有意者请将本人应聘材料电子文档发至以下联络方式(邮件主题注明方式:姓名+百人计划+研究领域或方向):

联系人: 韩一波 电话: 86-311-85871740

传真: 86-311-85815093

E-mail: ybhan@genetics.ac.cn

网址: www.sjziam.cas.cn

通讯地址: 河北省石家庄市槐中路 286 号

邮编: 050022