DOI: 10.5846/stxb201107030993
肖家欣,杨慧,张绍铃. 丛枝菌根真菌对枳根净离子流及锌污染下枳苗矿质营养的影响. 生态学报,2012,32(7):2127-2134.
Xiao J X, Yang H, Zhang S L. Effects of arbuscular mycorrhizal fungus on net ion fluxes in the roots of trifoliate orange(*Poncirus trifoliata*) and mineral nutrition in seedlings under zinc contamination. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(7): 2127-2134.

丛枝菌根真菌对枳根净离子流及锌污染下枳苗矿质营养的影响

肖家欣[1,2,*],杨 慧[1],张绍铃[2]
(1. 安徽师范大学生命科学学院,生物环境与生态安全安徽省高校省级重点实验室,芜湖 241000;2. 南京农业大学园艺学院,南京 210095)

摘要:盆栽实验研究了不同施 Zn 水平(0、300 mg/kg 和 600 mg/kg)下,接种丛枝菌根真菌 *Glomus intraradices* 对枳苗生长、Zn、Cu、P、K、Ca、Mg 分布的影响,并采用非损伤微测技术测定分析了菌根化与非菌根化枳根净 Ca^{2+}、H^+、NO_3^- 离子流动态。结果表明:(1)在不同施 Zn 水平下,接种菌根真菌显著提高了枳苗地上部及根部鲜重;随着施 Zn 水平的提高,菌根侵染率呈降低趋势,枳苗地上部与根部 Zn 含量呈增加趋势,且接种株根部 Zn 含量显著高于未接种株。(2)接种株未施 Zn 处理的地上部 Cu、P、K、Mg 和根部 Cu 含量、施 600 mg/kg Zn 处理的根部 Cu 及施 300 mg/kg Zn 处理的根部 P 含量均显著高于对照,而菌根真菌侵染对枳苗 Ca 含量并无显著性影响。(3)接种株未施 Zn 处理的根部距根尖端 0 μm 和 600 μm 处净 Ca^{2+} 流出速率、600 μm 处净 H^+ 流入速率、2400 μm 处净 NO_3^- 流入速率均显著高于未接种株。

关键词:丛枝菌根真菌;枳;净离子流;锌;矿质营养

Effects of arbuscular mycorrhizal fungus on net ion fluxes in the roots of trifoliate orange(*Poncirus trifoliata*) and mineral nutrition in seedlings under zinc contamination

XIAO Jiaxin[1,2,*], YANG Hui[1], ZHANG Shaoling[2]
1 *Key Laboratory of Biotic Environment and Ecological Security, Anhui Province, College of Life Sciences, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui Province* 241000, *China*
2 *College of Horticulture, Nanjing Agricultural University, Nanjing* 210095, *China*

Abstract: We investigated the effects of arbuscular mycorrhizal fungus inoculation on net ion flux in the roots of trifoliate orange (*Poncirus trifoliata* (L.) Raf.) and mineral nutrition in seedlings under zinc contamination. A pot experiment was conducted to study plant growth as well as the distribution of zinc, copper, phosphorus, potassium, calcium, and magnesium in trifoliate orange seedlings inoculated by the arbuscular mycorrhizal fungus, *Glomus intraradices*, under greenhouse conditions. Plants were grown in yellow soil: quartz sand (9:1, v/v) medium and were irrigated with solutions containing three different zinc concentrations (0, 300 and 600 mg/kg), which corresponded to control, medium and high zinc contamination treatments, respectively. Meanwhile, a non-invasive micro-test technique was used to determine the net fluxes of Ca^{2+}, H^+ and NO_3^- along mycorrhizal and non-mycorrhizal roots of trifoliate orange seedlings grown in medium with no zinc added. Arbuscular mycorrhizal colonization significantly increased the fresh weight of shoots and roots exposed to

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金项目(20103424120002);安徽省自然科学基金项目(070411004);安徽省高等学校省级自然科学研究项目(KJ2012A128);中国博士后科学基金项目(20080430172)
收稿日期:2011-07-03; 修订日期:2012-02-01
* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xjx0930@163.com

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

different zinc levels. With increasing zinc concentrations, the mycorrhizal colonization percentage decreased, while the zinc levels in the shoots and roots progressively increased. Zinc concentrations in the roots were significantly higher in arbuscular mycorrhizal seedlings than in non-arbuscular mycorrhizal seedlings. The shoot/root ratios of the zinc translocation coefficient gradually decreased in arbuscular mycorrhizal seedlings with increasing zinc concentrations. This indicated that at medium or high levels of zinc contamination, a lot of zinc was immobilized in roots through the establishment of mycorrhizae. Therefore, phytotoxicity might be alleviated. Copper, phosphorus, potassium, and magnesium concentrations in shoots of plants grown in medium with no added zinc were significantly higher in arbuscular mycorrhizal seedlings than those in non-arbuscular mycorrhizal seedlings. Similarly, copper concentrations in the roots of plants in medium with 600 mg/kg of added zinc and phosphorus concentrations in roots of plants in medium with 300 mg/kg added zinc were higher in arbuscular mycorrhizal seedlings. Arbuscular mycorrhizal colonization had no significant effects on calcium concentrations in seedlings. Copper and phosphorus concentrations gradually decreased in both arbuscular mycorrhizal and non-arbuscular mycorrhizal seedlings with increasing zinc levels, which demonstrated that zinc levels in seedlings are negatively correlated with copper or phosphorus. With no added zinc, phosphorus, potassium, magnesium and copper uptake was promoted by arbuscular mycorrhizal fungus infection. Under zinc contamination, phosphorus, and copper uptake was still accelerated by mycorrhizal colonization. Thus, the effects of mycorrhizal colonization were not only related to the degree of zinc pollution, but were also correlated with the species of fungi and host plants. Additionally, net Ca^{2+} efflux at 0 μm and 600 μm, net H^+ influx at 600 μm, and net NO_3^- influx at 2400 μm from the root tip of arbuscular mycorrhizal seedlings in medium with no added zinc were significantly higher than those of non-arbuscular mycorrhizal seedlings. These results suggest that mycorrhizal symbiosis activates Ca^{2+}-ATPase, Ca^{2+}/H^+ antiporters and NO_3^-/H^+ symporters in root plasma membranes. Nutrient uptake and stimulation of growth are mediated by arbuscular mycorrhizal fungi. Furthermore, the variations detected in arbuscular mycorrhizal roots for Ca^{2+}, H^+ and NO_3^- fluxes point to a significant involvement of the fungus.

Key Words: arbuscular mycorrhizal fungus; trifoliate orange; net ion flux; zinc; mineral nutrition

丛枝菌根(arbuscular mycorrhiza, AM)是土壤中的 AM 真菌与寄主根系之间形成的一种互惠共生体,全球 80% 的陆生植物(包括枳)都可以观察到 AM 的结构,即使在 Zn 等重金属污染的土壤中亦发现有 AM 真菌的广泛分布[1-3]。研究表明,在 Zn 污染条件下,AM 真菌一方面可显著促进寄主的生长,减轻过量 Zn 对寄主的毒害[4-6];另一方面,AM 真菌会影响寄主对 Zn 的吸收与转运,加快土壤 Zn 的植物修复[7-8]。枳(*Poncirus trifoliata* (L.) Raf.)是我国目前柑橘栽培中应用最普遍的砧木之一,虽然具有一定的抗逆性,但对 Zn 过量胁迫的耐受性相对较差[9]。已有的研究表明,在 5 种不同的 AM 真菌中,*Glomus intraradices* 接种处理最有利于提高枳对重度 Zn 污染的耐受性[10]。然而,在不同程度 Zn 污染的条件下,AM 真菌对枳体内的 Zn 及相关矿质元素的吸收及其分布有何影响?并不十分清楚。Ramos 等[11]利用非损伤微测技术研究发现,外生菌根真菌侵染的桉树根部养分吸收过程与 pH 值变化及 Ca^{2+} 离子流振荡相关。而 AM 真菌侵染的寄主根部养分吸收过程与 Ca^{2+} 等离子流动态是否亦存在关联?进一步地,AM 提高枳对 Zn 污染的耐受性是否亦与 Ca^{2+} 等离子流变化相关?均不清楚。因此,研究枳菌根净 Ca^{2+}、H^+ 等离子流变化规律,对探讨枳菌根对矿质元素吸收及其抗 Zn 毒害的机理具有重要意义。鉴于此,本研究以枳实生苗为试材,拟采用非损伤微测技术测定分析 *G. intraradices* 侵染的枳苗根系不同部位净 Ca^{2+}、H^+、NO_3^- 离子流动态,并研究不同施 Zn 水平下,AM 真菌 *G. intraradices* 对枳苗体内矿质元素分布的影响,旨在进一步揭示 AM 提高枳耐 Zn 污染的机制,以期为生产实践提供理论与实践依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验基质为黄壤土与石英砂(9:1,体积比例)的混合物,并用 0.5% 甲醛溶液密闭熏蒸灭菌 7 d 后晾干备

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

用。基质的理化性质为: pH 值 6.1,有机质 1.2%,有效 K 39.28 mg/kg,有效 P 11.047 mg/kg,有效 Ca 394.067 mg/kg,有效 Mg 11.33 mg/kg,有效 Zn 0.47 mg/kg,有效 Cu 0.091 mg/kg。另以溶液的形式向基质中加入 N(N_2H_4CO) 300 mg/kg、P(KH_2PO_4) 150 mg/kg 和 K(K_2SO_4) 200 mg/kg。试验设 3 个不同施 Zn 水平(以 $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 施入) ,即每公斤试验基质中施 Zn 量分别为 0、300 mg 和 600 mg(以 Zn0、Zn300 和 Zn600 处理表示) ,其中添加的 Zn 污染浓度是参照国家环境质量标准中的 Zn 含量二级、三级标准及有关文献[7] 确定的,均匀混合后平衡 1 周。选取子粒饱满的枳种子,消毒灭菌后于 25 ℃培养箱内催芽处理,待种子露白发芽后播种于装有 3.0 kg 试验基质的塑料花盆(3.5 L) 中。

供试的 AM 真菌为根内球囊霉 *Glomus intraradices*(BGC AH01) ,由北京市农林科学院植物营养与资源研究所提供。在播种时每盆接种 *G. intraradices*(以+AM 表示) 菌剂 40 g(约 500 个孢子) ,未接种 (以-AM 表示) 为对照,对照加入等量的无菌试验基质,共 6 个处理,每处理重复 6 次,随机区组排列,每盆栽植 8 株枳实生苗。然后均置于同一玻璃温室(通风良好,接近自然条件) 中培养,从种子萌发直至收获约经历 260 d。

1.2　测定方法

采用曲利苯蓝乳酸酚法测定菌根侵染率[12] 。常规方法测定单株地上部和根部鲜重与干重。菌根依赖性(%) = 100×接种的植株干重/未接种植株干重[13] 。另取一部分样品置于 105 ℃烘箱中杀青 15min 后,置于 70 ℃条件下烘至恒重,用不锈钢电动粉碎机粉碎过筛,采用硝酸-高氯酸(体积分数 4:1) 消煮法浸提,消化液用电感耦合等离子体发射光谱仪(Pekin Elmer Optimal 2100 DV) 测定矿质元素含量[14] 。

利用非损伤微测技术: 扫描离子选择电极技术(the NMT: SIET system BIO-IM-YG, Younger USA LLC) [15] 测定 Zn0 处理下菌根化与非菌根化枳根 Ca^{2+}、H^+、NO_3^- 离子流变化。Ca^{2+}、H^+、NO_3^- 测试液配方: 0.1 mmol/L KCl,0.1 mmol/L $CaCl_2$,0.1 mmol/L KNO_3,0.1 mmol/L NaCl,0.3 mmol/L MES,pH 值 6.0。校正液配方(1) Ca^{2+} 校正液 1: 0.1 mmol/L KCl,0.05 mmol/L $CaCl_2$,0.1 mmol/L KNO_3,0.1 mmol/L NaCl,0.3 mmol/L MES (pH 值 6.0) ; Ca^{2+} 校正液 2:0.1 mmol/L KCl,0.5 mmol/L $CaCl_2$,0.1 mmol/L KNO_3,0.1 mmol/L NaCl,0.3 mmol/L MES(pH 值 6.0) 。(2) H^+ 校正液 1: pH 值 6.5,0.1 mmol/L KCl,0.1 mmol/L $CaCl_2$,0.1 mmol/L KNO_3,0.1 mmol/L NaCl,0.3 mmol/L MES; H^+ 校正液 2: pH 值 5.5,0.1 mmol/L KCl,0.1 mmol/L $CaCl_2$,0.1 mmol/L KNO_3,0.1 mmol/L NaCl,0.3 mmol/L MES。(3) NO_3^- 校正液 1: 0.1 mmol/L KCl,0.1 mmol/L $CaCl_2$,0.05 mmol/L KNO_3,0.1 mmol/L NaCl,0.3 mmol/L MES(pH 值 6.0) ; NO_3^- 校正液 2: 0.1 mmol/L KCl,0.1 mmol/L $CaCl_2$,0.5 mmol/L KNO_3,0.1 mmol/L NaCl,0.3 mmol/L MES(pH 值 6.0) (旭月(北京) 科技有限公司) 。测试前将根系置于对应的测试液中平衡 30 min,之后在每个待测根系选取 8 个测试点(距根尖端 0、100、300、600、1000、1600、2400 μm 和 3000 μm) ,用于检测净 Ca^{2+}、H^+、NO_3^- 离子流,每个测试点测量 5 min。不同选择性微电极前段分别灌充不同离子交换剂,即 Ca^{2+}: 21048(Sigma 货号) ,H^+: 95293(Sigma 货号) ,NO_3^-: XY-SJ-NO_3^--01; 电极灌充液分别为: 100 mmol/L $CaCl_2$、15 mmol/L NaCl +40 mmol/L KH_2PO_4 和 10 mmol/L KNO_3; Ag/AgCl 丝(旭月(北京) 科技有限公司) 插入到电极的后面,使 Ag/AgCl 丝尖端和电极灌充液接触。

1.3　数据分析

所获得的数据采用 SPSS 及 EXCEL 进行统计分析,利用 SPSS 软件 two-way ANOVA 过程作不同处理之间差异显著性测验,采用 LSD 法作多重比较分析。

2　结果与分析

2.1　枳实生苗菌根侵染率、生物量及菌根依赖性

由表 1 可知,未接菌种 (-AM,对照) 中未发现 AM 真菌侵染,随着土壤施 Zn 量的增加,接种处理(+AM) 的菌根侵染率呈下降趋势,在施 600 mg/kg Zn 时其菌根侵染率仍达 46% 。不同施 Zn 水平条件下,接种株地上部与根部鲜重、干重均显著高于对照,而随着施 Zn 量的升高,其对应值呈下降趋势。枳苗的菌根依赖性大小依次为: Zn600 >Zn300>Zn0。

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 1 枳苗菌根侵染率、生物量及菌根依赖性

Table 1 Mycorrhizal colonization, biomass and mycorrhizal dependency of *Poncirus trifoliata* seedlings

施 Zn 量 Zn application concentration /(mg/kg)	处理 Treatment	菌根侵染率 Mycorrhizal colonization percentage/%	地上部鲜重 Shoot fresh weight /(g/株)	根部鲜重 Root fresh weight /(g/株)	地上部干重 Shoot dry weight /(g/株)	根部干重 Root dry weight /(g/株)	菌根依赖性 Mycorrhizal dependency/%
0	-AM	0d	1.30d	1.11d	0.42d	0.14d	
	+AM	68.70a	1.81b	1.53b	0.60b	0.20b	143
300	-AM	0d	1.52c	1.34c	0.49c	0.16c	
	+AM	59.20b	2.31a	1.90a	0.72a	0.27a	152
600	-AM	0d	0.60f	0.53f	0.19f	0.07f	
	+AM	45.80c	1.17e	0.90e	0.37e	0.13e	192

数据为平均值,同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)

2.2 枳实生苗不同部位几种矿质元素含量

随着施 Zn 量的增加,枳苗地上部与根部 Zn 含量均呈上升趋势,Zn300 和 Zn600 处理的接种株根部 Zn 含量均显著高于对照,而 Zn300 处理的接种株地上部 Zn 含量却低于对照,接种株地上部/根部 Zn 的转运系数大小依次是: Zn0>Zn300>Zn600。地上部与根部 Cu 含量随施 Zn 量增加均呈下降趋势,Zn0 处理的接种株地上部和根部 Cu 含量及 Zn600 处理接种株根部 Cu 含量均显著高于对照(图 1)。

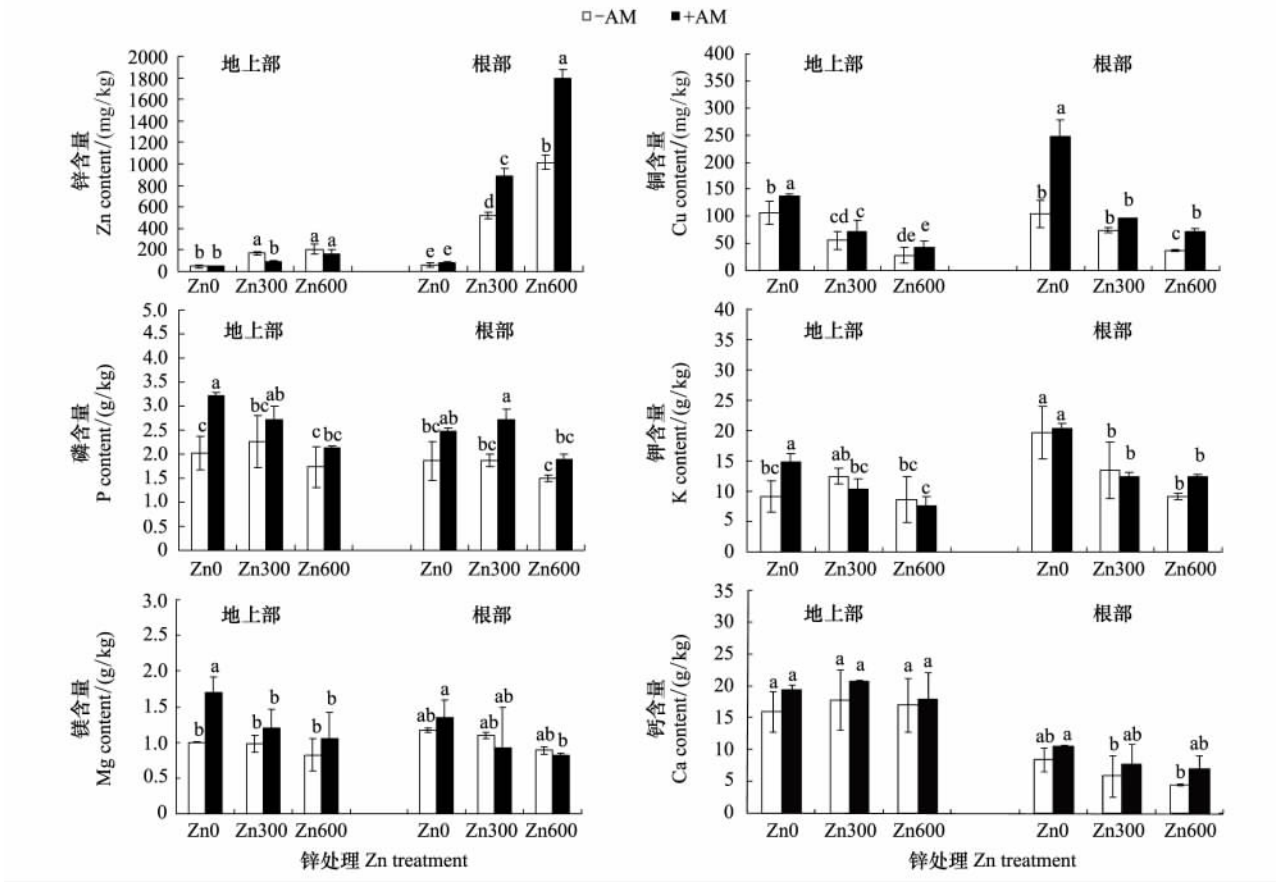

图 1 枳苗地上部与根部 Zn、Cu、P、K、Mg 和 Ca 含量

Fig. 1 Contents of zinc, copper, phosphorus, potassium, magnesium, and calcium in the shoots and roots of *Poncirus trifoliata* seedlings

各处理接种株 P 含量均相对较高,其中接种株 Zn0 处理的地上部 P 含量和 Zn300 处理的根部 P 含量均显著高于对照; 随着施 Zn 量的增加,根部 K 含量呈下降趋势,接种株 Zn0 处理的地上部 K、Mg 含量均显著高于对照,Zn300 处理和 Zn600 处理的接种株地上部与根部 K、Mg 含量与对照并无显著差异; 而各施 Zn 处理接

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

种株地上部与根部 Ca 含量与对照亦无显著性差异(图 1)。

2.3　枳实生苗根部净 Ca^{2+}、H^+、NO_3^- 离子流

接种株根系净 Ca^{2+} 流出速率高于对照,其中接种株距根尖端 0 μm、100 μm、600 μm、1000 μm、1600 μm 处净 Ca^{2+} 流出速率与对照的差异均达显著水平,另外,接种株距根尖端 0 μm、600 μm 处净 Ca^{2+} 外流信号明显强于对照(图 2,图 3)。

接种株根系净 H^+ 和 NO_3^- 流入速率均相对高于对照,其中接种株距根尖端 100 μm、600 μm、1000 μm、1600 μm 处净 H^+ 流入速率与对照的差异均达显著水平(图 2),接种株距根尖端 600 μm 处净 H^+ 内流信号明显强于对照(图 3)。

接种株距根尖端 300 μm、2400 μm 处净 NO_3^- 流入速率均显著高于对照(图 2),其中接种株距根尖端 2400 μm 处净 NO_3^- 内流信号明显强于对照(图 3)。

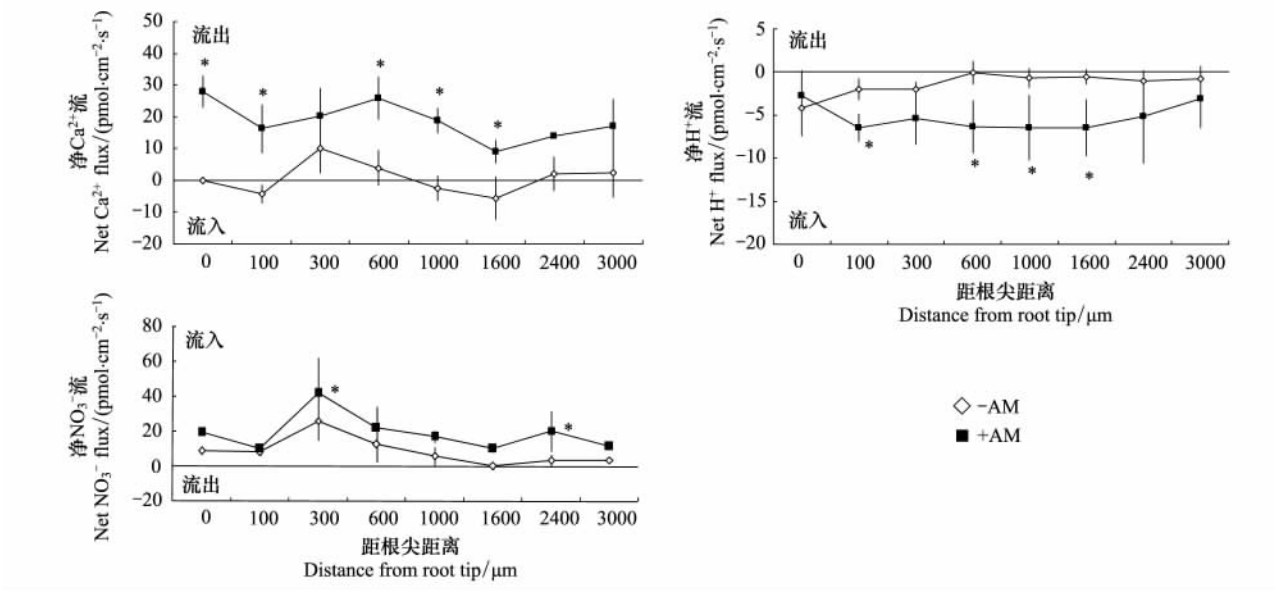

图 2　菌根化与非菌根化枳苗根系净 Ca^{2+}、H^+ 及 NO_3^- 离子流

Fig. 2　Net fluxes of Ca^{2+}, H^+ and NO_3^- along mycorrhizal and nonmycorrhizal roots of *Poncirus trifoliata* seedings

竖线代表标准差,星号表示处理间差异显著($P<0.05$)

3　讨论

AM 真菌侵染情况是 AM 真菌发挥功能的基础[16]。本研究的结果表明,随着土壤施 Zn 量的增加,菌根侵染率呈下降趋势,但在重度 Zn 污染下仍有较高的侵染率和菌根依赖性,且各施 Zn 处理下接种株的生物量均显著高于对照,其中以外施 300 mg/kg Zn 时枳苗的生物量最高(表 1)。未施 Zn 的试验基质 Zn 含量(0.47 mg/kg)居于缺乏范围,其含 Zn 量低不能满足枳苗生长对 Zn 的需求,而施 300 mg/kg Zn 时,短期内反而满足了枳苗生长对 Zn 的需求,故表现出促进生长的效应。这与申鸿[7]报道不同 Zn 污染对玉米生长的影响结果有类似之处。此外,Zn300 与 Zn600 处理的接种株根部 Zn 含量显著高于对照,接种株地上部/根部 Zn 的转运系数随施 Zn 量的增加而呈递减趋势。表明随着施 Zn 量的增加,接种株根部 Zn 的积累量明显增加。其中 Zn300 处理地上部 Zn 含量反而低于对照,表明中度 Zn 污染时,Zn 大部分积累于根部;另一方面,这还可能与 Zn300 接种株生物量增加而引起的"稀释"效应有关。有研究表明,菌根真菌菌丝可吸附 Zn 等重金属元素,起到"储留"或"过滤"作用,从而减少 Zn 的上运[8,17-20]。可见,在中度或重度 Zn 污染时,菌根的这种"固持"作用相当明显,从而减轻或避免枳苗遭受 Zn 污染的危害。

申鸿[7]研究发现,玉米植株 Zn 与 Cu 之间的拮抗或协助关系与土壤中的 Zn、Cu 浓度及其比例有关,Zn-Cu 混合污染对玉米植株 P 营养有显著负效应。类似地,Cavagnaro 等[21]研究显示,AM 真菌侵染的野生型与

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

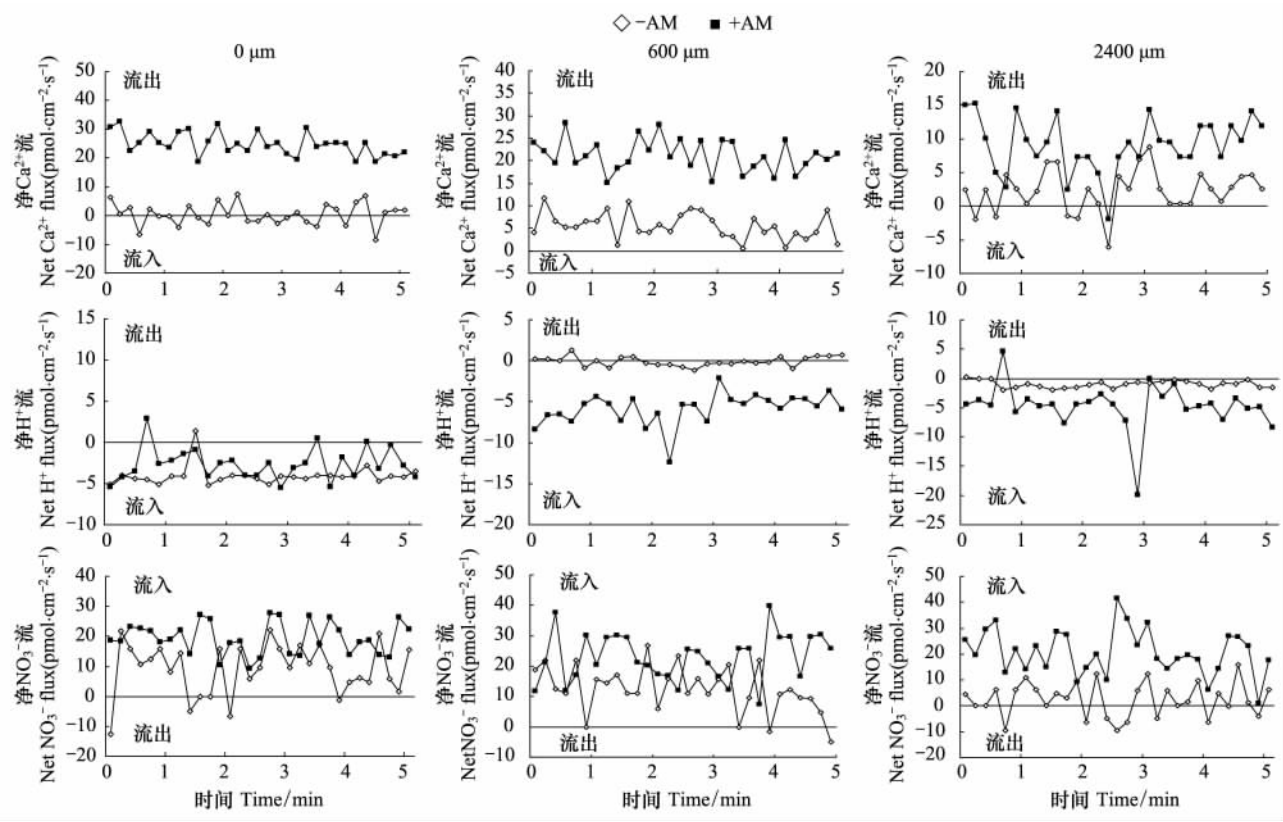

图 3 菌根化与非菌根化枳苗根系距根尖端 0 μm、600 μm、2400 μm 处净 Ca^{2+}、H^+、NO_3^- 离子流动态

Fig. 3 Ocsillations of net fluxes of Ca^{2+}, H^+ and NO_3^- at 0 μm, 600 μm and 2400 μm from the apex of mycorrhizal and nonmycorrhizal roots of *Poncirus trifoliata* seedlings

突变型番茄植株 Zn/P 比例均随着外施 Zn 量的增加而显著增加。本研究中,菌根化与非菌根化枳苗地上部和根部 Cu、P 含量均随施 Zn 量的增加而呈下降趋势,由此推测枳苗体内 Zn 与 Cu、Zn 与 P 之间均存在一定的拮抗关系。另外,在未施 Zn 的实验基质中,*G. intraradices* 的侵染能促进枳苗对 P、K、Mg 和 Cu 元素的吸收与转运。在 Zn 污染的基质中,*G. intraradices* 的侵染对 P、Cu 的吸收仍有促进作用,这与前人在玉米[4]、三叶草[17]、番茄[21]及 Cu 污染[19-20,22]上的报道结果有类似之处。而在 Zn 污染条件下,AM 对其他元素如 K、Mg、Ca 的吸收似乎并无明显的促进作用。不同的是,Andrade 等[6]研究认为,在中度 Zn 污染下,AM 真菌显著促进了豆类植株对 P、Cu、Ca 和 Mg 的吸收,这种结果上的差异进一步地说明,AM 真菌的效应除与 Zn 污染程度有关外,还与菌剂及寄主的种类等因素有关。

与对照相比,接种株根冠及伸长区净 Ca^{2+} 流出速率、净 H^+ 流入速率及成熟区净 NO_3^- 流入速率均明显提高(图 2、图 3)。NO_3^- 流入速率的提高,表明 AM 有利于提高植株对硝态 N 的吸收。研究表明,嵌在丛枝周围的寄主植物的原生质膜具有很高的 H^+-ATPase 活性[23],结合本研究显示的净 Ca^{2+}、H^+ 离子流的方向与速率结果来看,推测枳菌根的形成可能活化了根细胞质膜 Ca^{2+}-ATPase 及 Ca^{2+}/H^+ 反向转运体,在 Ca^{2+} 外流的同时,H^+ 则通过反向转运体内流;另一方面,AM 真菌也可能通过活化根细胞质膜 NO_3^-/H^+ 同向转运体,在 NO_3^- 离子内流的同时,H^+ 通过同向转运体进入胞内。业已清楚,Ca^{2+}、H^+ 都是细胞内第二信使,其进出细胞动态可能对胞内微生态产生影响,进而引发一系列的生理生化反应。另一方面,AM 真菌的侵染可改善枳根系结构[24]和根系周围的土壤结构[25],也有利于寄主枳对矿质元素的吸收。另外,接种株根系净 Ca^{2+} 外流速率高于对照,这与上述 Zn0 处理 AM 真菌接种对 Ca 的吸收并无明显的影响相吻合。接种株根系净 H^+ 内流速率明显增强,从而引起根表 pH 变化,如阻止根际土壤酸化。这与外生菌根真菌(ECM)侵染的桉树根部对应离子流方向(如 H^+ 外流、Ca^{2+} 内流)[11]具有相反的趋势。AM 真菌与 ECM 真菌的侵染方式存在明显的差异,H^+、Ca^{2+} 离子

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

流方向的差异与其不同的侵染方式之间有何关联？以及这些差异对各自寄主抗逆性又有何影响？等等，还需要深入地研究。

致谢：感谢旭月（北京）科技有限公司孙娟在非损伤微测技术测定分析过程中给予的帮助。

References:

[1] Niu Z C, Tang M, Huang J C, Wang S, Sheng M. Effects of lead and zinc in the soil on the distribution of arbuscular mycorrhizal fungi. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2007, 27(6): 1233-1238.

[2] Xiao Y P, Li T, Fei H Y, Zhao Z W. Species diversity of arbuscular mycorrizal fungi in Jinding Pb-Zn mining area of Lanping, Yunnan. Mycosystema, 2008, 27(5): 652-662.

[3] Bedini S, Turrine A, Rigo C, Argese E, Giovannetti M. Molecular characterization and glomalin production of arbuscular mycorrhizal fungi colonizing a heavy metal polluted ash disposal island, downtown Venice. Soil Biology and Biochemistry, 2010, 42(5): 758-765.

[4] Shen H, Chen B D, Feng G, Liu Y, Li X L. Influence of arbuscular mycorrhizal fungi on maize growth in a zinc polluted soil. Agro-Environmental Protection, 2002, 21(5): 399-402.

[5] Medina A, Vassileva M, Barea J M, Azcón R. The growth-enhancement of clover by *Aspergillus*-treated sugar beet waste and *Glomus mosseae* inoculation in Zn contaminated soil. Applied Soil Ecology, 2006, 33(1): 87-98.

[6] Andrade S A L, Gratão P L, Schiavinatoa M A, Silveira A P D, Azevedo R A, Mazzafera P. Zn uptake, physiological response and stress attenuation in mycorrhizal jack bean growing in soil with increasing Zn concentrations. Chemosphere, 2009, 75(10): 1363-1370.

[7] Shen H. Studies on the Mechanisms of Arbuscular Mycorrhizae (AM) in Heavy Metals Tolerance [D]. Chongqing: Southwest Agricultural University, 2004.

[8] Arriagada C, Pereira G, García-Romera I, Ocampo J A. Improved zinc tolerance in *Eucalyptus globulus* inoculated with *Glomus deserticola* and *Trametes versicolor* or *Coriolopsis rigida*. Soil Biology and Biochemistry, 2010, 42(1): 118-124.

[9] Qi X X, Xiao J X, Xu C L, Ren Q, Shen Y, Yang H. Effects of zinc stress on physiological character and zinc distribution of the three citrus rootstocks. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(24): 313-317.

[10] Yang H, Xiao J X, Yang A N, Shen Y, Zhang S L, An J, Wu X J. Effects of five arbuscular mycorrhizal fungi on the tolerance of trifoliate orange (*Poncirus trifoliata* (L.) Raf.) seedlings against zinc contamination. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(1): 93-97.

[11] Ramos A C, Lima P T, Dias P N, Kasuya M C M, Feijó J A. A pH signaling mechanism involved in the spatial distribution of calcium and anion fluxes in ectomycorrhizal roots. New Phytologist, 2009, 181(2): 448-462.

[12] Phillips J M, Hayman D S. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. Transactions of the British Mycological Society, 1970, 55(1): 158-161.

[13] Graham J H, Syvertsen J P. Host determinants of mycorrhizal dependency of citrus rootstock seedlings. New Phytologist, 1985, 101(4): 667-676.

[14] Xiao J X, Yan X, Peng S A, Fang Y W. Seasonal changes of mineral nutrients in fruit and leaves of 'Newhall' and 'Skagg's Bonanza' navel oranges. Journal of Plant Nutrition, 2007, 30(5): 671-690.

[15] Sun J, Chen S L, Dai S X, Wang R G, Li N Y, Shen X, Zhou X Y, Lu C F, Zheng X J, Hu Z M, Zhang Z K, Song J, Xu Y. NaCl-induced alternations of cellular and tissue ion fluxes in roots of salt-resistant and salt-sensitive poplar species. Plant Physiology, 2009, 149(2): 1141-1153.

[16] Koide R T, Mosse B. A history of research on arbuscular mycorrhiza. Mycorrhiza, 2004, 14(3): 145-163.

[17] Tao H Q, Song Y C, Li X L, Lu J L. Effect of arbuscular mycorrhizal infection on growth of red clover at different levels of Zn pollution. Journal of China Agricultural University, 1999, 4(3): 81-85.

[18] Wang F Y, Lin X G. Role of arbuscular mycorrhizae in phytoremediation of heavy metal-contaminated soils. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(2): 793-801.

[19] Shen H, Liu Y, Li X L, Chen B D, Feng G, Bai S L. Influence of arbuscular mycorrhizal fungus (*Glomus caledonium*) on maize seedlings grown in copper contaminated soil. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005, 11(2): 199-204.

[20] Yang X M, Chen B D, Zhu Y G, Wang D M, Wang Y S. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi (*Glomus intraradices*) on growth and mineral nutrition of maize plants in copper contaminated soils. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(3): 1052-1058.

[21] Cavagnaro T R, Dickson S, Smith F A. Arbuscular mycorrhizas modify plant responses to soil zinc addition. Pant Soil, 2010, 329(1/2): 307-313.

[22] Xiao X Y, Chen B D, Zhu Y G. The influences of arbuscular mycorrhizal fungi on growth and mineral nutrition of plants grown in copper mine

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

tailing. Acta Scientiae Circumstantiae, 2006, 26(2): 312-317.

[23] Gianinazzi-Pearson V, Arnould C, Oufattole M, Arango M, Gianinazzi S. Differential activation of H^+-ATPase genes by an arbuscular mycorrhizal fungus in root cells of transgenic tobacco. Planta, 2000, 211(5): 609-613.

[24] Yao Q, Wang L R, Zhu H H, Chen J Z. Effect of arbuscular mycorrhizal fungal inoculation on root system architecture of trifoliate orange (*Poncirus trifoliata* L. Raf.) seedlings. Scientia Horticulturae, 2009, 121(4): 458-461.

[25] Wu Q S, Xia R X, Zou Y N. Improved soil structure and citrus growth after inoculation with three arbuscular mycorrhizal fungi under drought stress. European Journal of Soil Biology, 2008, 44(1): 122-128.

参考文献:

[1] 牛振川, 唐明, 黄继珥, 王森, 盛敏. 土壤铅和锌对植物根际丛枝菌根真菌分布的影响. 西北植物学报, 2007, 27(6): 1233-1238.

[2] 肖艳萍, 李涛, 费洪运, 赵之伟. 云南金顶铅锌矿区丛枝菌根真菌多样性的研究. 菌物学报, 2008, 27(5): 652-662.

[4] 申鸿, 陈保东, 冯固, 刘于, 李晓林. 锌污染土壤接种丛枝菌根真菌对玉米苗期生长的影响. 农业环境保护, 2002, 21(5): 399-402.

[7] 申鸿. 丛枝菌根(AM)对重金属污染耐受性机理研究 [D]. 重庆: 西南农业大学, 2004.

[9] 齐笑笑, 肖家欣, 徐春丽, 任群, 申燕, 杨慧. 锌胁迫对3种柑橘砧木的生理特性和锌分配的影响. 中国农学通报, 2009, 25(24): 313-317.

[10] 杨慧, 肖家欣, 杨安娜, 申燕, 张绍铃, 安静, 吴雪俊. 五种丛枝菌根真菌对枳实生苗耐Zn污染的影响. 生态学杂志, 2011, 30(1): 93-97.

[17] 陶红群, 宋勇春, 李晓林, 陆景陵. 不同锌污染水平下丛枝菌根对三叶草生长的影响. 中国农业大学学报, 1999, 4(3): 81-85.

[18] 王发园, 林先贵. 丛枝菌根在植物修复重金属污染土壤中的作用. 生态学报, 2007, 27(2): 793-801.

[19] 申鸿, 刘于, 李晓林, 陈保东, 冯固, 白淑兰. 丛枝菌根真菌(*Glomus caledonium*)对铜污染土壤生物修复机理初探. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(2): 199-204.

[20] 杨秀梅, 陈保冬, 朱永官, 王冬梅, 王幼珊. 丛枝菌根真菌(*Glomus intraradices*)对铜污染土壤上玉米生长的影响. 生态学报, 2008, 28(3): 1052-1058.

[22] 肖雪毅, 陈保冬, 朱永官. 丛枝菌根真菌对铜尾矿上植物生长和矿质营养的影响. 环境科学学报, 2006, 26(2): 312-317.

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net