

李晓曼, 王建军. 丛枝菌根真菌对镍胁迫桂花幼苗光合作用及抗氧化酶活性的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(21): 223–227.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.21.054

丛枝菌根真菌对镍胁迫桂花幼苗光合作用及抗氧化酶活性的影响

李晓曼¹, 王建军²

(1. 重庆三峡职业学院农林科技系, 重庆万州 400155; 2. 长安大学, 陕西西安 710061)

摘要:以桂花幼苗为材料, 研究接种丛枝菌根真菌(AMF)对0、100、200、300、400 mg/L这5种镍(Ni)质量浓度胁迫下桂花光合作用及抗氧化酶活性等的影响。结果表明, 5种Ni胁迫质量浓度下, 未接种AMF的桂花幼苗根系菌根侵染率均为0, 而接种AMF的根系菌根侵染率则随Ni胁迫质量浓度的增大而逐渐降低; 随Ni胁迫质量浓度的增大, 接种、未接种AMF的桂花幼苗叶片叶绿素含量、类胡萝卜素含量、净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)、植株株高、茎粗、总干物质含量呈逐渐降低趋势, 且接种AMF的桂花幼苗相应指标下降幅度多显著低于未接种处理($P < 0.05$), 而胞间二氧化碳浓度(C_i)呈先降后增, 接种AMF的桂花幼苗叶片 C_i 显著低于未接种处理, 相对电导率、丙二醛(MDA)含量呈逐渐上升趋势, 且接种AMF的桂花幼苗的相应指标多显著低于未接种处理, 超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)则呈先升后降趋势, 接种AMF的桂花幼苗抗氧化酶活性显著高于未接种处理; Ni胁迫质量浓度为400 mg/L时, 接种AMF的桂花幼苗叶绿素含量、 P_n 、 G_s 、 T_r 、株高、总干物质质量、SOD活性、POD活性、CAT活性分别较未接种的分别显著增加69.72%、80.22%、61.90%、42.48%、22.12%、15.76%、60.85%、21.83%、22.03%, C_i 、相对电导率、MDA含量分别较未接种的显著降低6.98%、10.04%、19.21%。

关键词:丛枝菌根真菌; 桂花; 光合作用; 抗氧化酶; 镍

中图分类号: S685.130.1; S182

文献标志码: A

文章编号: 1002-1302(2019)21-0223-05

近年来, 随着我国工业化的飞速发展, 土壤环境污染问题日趋严重, 其中, 土壤重金属污染因其毒性强、易富集、难降解等特点而愈发被人们关注^[1-2]。据《全国土壤污染状况调查公报》显示, 我国土壤重金属总超标率为16.1%, 其中, 镍(Ni)超标量达到4.8%, 仅次于镉(Cd), 已成为我国土壤重金属污染的主要元素之一^[3]。镍是植物生长发育所必需的微量元素之一, 但当土壤中Ni含量过高时, 往往会对植物水分、养分的吸收及光合作用产生干扰, 进而影响农作物产量、品质及园林绿化植物的景观效果, 而如何提高植物对Ni胁迫的耐受性已成为亟待解决的关键问题之一^[4-5]。

丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhiza fungi, AMF)是一类在土壤中广泛存在的有益真菌, 可与绝大多数植物形成互利的共生体系, 在提高植物对生物及非生物胁迫抗性方面发挥

着非常重要的作用^[6-7]。有研究表明, 外源接种AMF可提高植物对重金属的耐受性, 其作用机制主要体现在: 一是AMF可通过菌丝体组分纤维素、几丁质等来吸附重金属, 减少重金属在植物体内的转移量^[8-9]; 二是AMF可对植物的根系分泌物、根际土壤微生物群落结构及土壤pH值产生影响, 从而降低土壤重金属的有效性, 减少植物吸收^[10-11]; 三是AMF可以改善植物矿质营养和根系形态, 从而影响植物对重金属的吸收和转移^[12-13]; 四是AMF可以提高植物的抗氧化酶活性, 从而提高植物对重金属的耐受性^[14-15]。目前, 有关提高植物对镍耐受性的方法主要为化学方法, 如外源施用甜菜碱、褪黑素、水杨酸等^[3, 16-17], 但存在成本高、周期长且易造成二次污染等缺点。

桂花(*Osmanthus* sp.)别称岩桂, 为木犀科木犀属植物, 是我国十大名花之一, 因其集绿化、香化、美化于一体, 在我国园林绿化中被广泛应用, 而当前利用AMF提高其对镍耐受性的研究鲜见报道。本研究以桂花幼苗为试验材料, 采用不同质量浓度Ni进行胁迫处理, 并分别接种AMF, 以分析接种AMF对镍胁迫下桂花幼苗光合作用及抗氧化酶活性的影响, 以期为提高植物对镍胁迫的耐受性提供一定的理论依据。

收稿日期: 2018-08-07

基金项目: 全国农业职业教育“十三五”科研项目(编号: 2016-135-Y-005)。

作者简介: 李晓曼(1980—), 女, 辽宁营口人, 硕士, 讲师, 从事园林植物栽培及园林规划设计研究。E-mail: 582659554@qq.com。

[11] 郭经纬, 商 桑, 穆大伟, 等. 外源NO对低温胁迫下豇豆幼苗生长和生理特性的影响[J]. 热带作物学报, 2015, 36(12): 2179–2183.

[12] 张献英, 唐力生, 犹昌艳, 等. 低温对豇豆种子萌发和出苗的影响[J]. 南方农业学报, 2013, 44(11): 1785–1790.

[13] 彭永康, 郝泗城, 王振英. 低温处理对豇豆幼苗生长和POD、COD、ATPase同工酶的影响[J]. 华北农学报, 1994, 9(2): 76–80.

[14] 张 蕾, 霍治国, 黄大鹏, 等. 海南冬季主要瓜菜寒害风险区划[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(10): 1240–1251.

[15] 李合生. 现代植物生理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2017 年 4 月在重庆三峡职业学院苗圃进行,供试植物为桂花幼苗,购自重庆科光种苗有限公司;供试丛枝菌根真菌为摩西球囊霉菌(*Glomus mosseae*),购自北京市农林科学院植物保护环境保护研究所;氯化镍(NiCl_2)分析纯,购自上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

1.2 试验方法

桂花幼苗采用直径为 40 cm、深 45 cm 的花盆栽种,每盆定植 1 株,栽培基质为改良土壤基质,定植前,以基质接种丛枝菌根真菌 20 g 为处理(AMF),以接种经高温灭活的丛枝菌根真菌 20 g(视为未接种丛枝菌根真菌,全文同)为对照(CK);缓苗生长 30 d,即 2017 年 6 月,选取长势、大小基本一致的桂花幼苗,分别采用 NiCl_2 进行 Ni 胁迫试验,设 NiCl_2 终质量浓度分别为 0、100、200、300、400 mg/L,每天按 100 mg/L 梯度递增,直至达到各处理预定质量浓度;后每隔 3 d 按预定镍质量浓度浇灌 1 次,浇灌量为 250 mL;连续镍胁迫处理 60 d,采样测定各指标。试验共设 10 个处理,每处理 20 盆,随机区组排列,试验期间进行正常养分管理及病虫害防治。

1.3 测定内容与方法

1.3.1 桂花幼苗生长及菌根侵染情况测定 胁迫处理结束,采用软尺测量桂花植株株高、茎粗,采用电子天平称量总的干物质质量;桂花幼苗根系菌根侵染情况采用 Phillips 等的方法^[18]测定,统计菌根侵染率,计算公式为:

菌根侵染率 = 侵染菌根段数/检测菌根段数 × 100%。

1.3.2 光合指标及抗氧化酶活性测定 每处理选取植株的第 2~3 张功能叶,采用美国 LI-COR 公司产 Li-6400 XT 型便携式光合测量仪测定其净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、

胞间 CO_2 浓度(C_i)、蒸腾速率(T_r);采用丙酮比色法测定光合色素含量,采用相对电导法(RC)测定叶片细胞膜透性;分别采用抑制氮蓝四唑(NBT)光还原比色法、愈疮木酚法和紫外分光光度法测定超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性;采用硫代巴比妥酸比色法测定丙二醛(MDA)含量。

1.4 数据分析

采用 Excel 2013 软件对数据进行整理、统计及作图,采用 SPSS 18.0 软件进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 丛枝菌根真菌对 Ni 胁迫下桂花幼苗生长的影响

由表 1 可见,随着 Ni 胁迫质量浓度的增大,接种、未接种 AMF 的桂花幼苗植株株高、茎粗、总干物质质量均呈逐渐减小趋势,接种 AMF 的植株株高、茎粗、总干物质质量均明显高于未接种处理;Ni 胁迫质量浓度分别为 100、200、300、400 mg/L 时,接种 AMF 的桂花幼苗株高较 CK 处理分别增加 6.84%、10.84%、13.80%、22.12%,除 Ni 胁迫质量浓度为 400 mg/L 的植株株高显著高于未接种的($P < 0.05$)外,其他 3 种质量浓度处理接种与未接种间差异不显著($P > 0.05$),接种 AMF 的桂花幼苗茎粗分别较 CK 处理增加 3.67%、6.82%、7.95%、7.87%,除 Ni 胁迫质量质量浓度为 300 mg/L 的植株幼苗茎粗显著高于未接种的外,其他 3 种质量浓度处理接种与未接种间差异不显著,接种 AMF 的桂花幼苗总干物质质量分别较 CK 处理增加 7.14%、11.82%、16.69%、15.76%,接种与未接种间差异显著。可见,Ni 胁迫可明显抑制桂花幼苗的生长,而接种 AMF 可明显促进 Ni 胁迫下桂花幼苗的生长。

表 1 丛枝菌根真菌对 Ni 胁迫下桂花幼苗生长的影响

Ni 胁迫质量浓度 (mg/L)	处理	株高 (cm)	茎粗 (cm)	总干物质质量 (g)
0	CK	65.25ab	4.15a	12.35a
	AMF	68.18a	4.21a	12.58a
100	CK	60.25bc	3.81b	11.06c
	AMF	64.37ab	3.95b	11.85b
200	CK	54.81cd	3.52c	9.73d
	AMF	60.75bc	3.76bc	10.88c
300	CK	48.91d	3.27d	8.51e
	AMF	55.66cd	3.53c	9.93d
400	CK	40.06e	3.05e	7.68f
	AMF	48.92d	3.29de	8.89e

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。表 2 同。

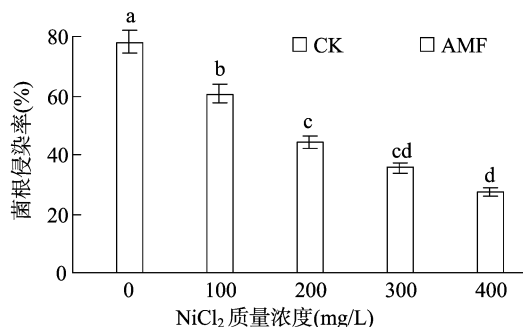
2.2 Ni 胁迫对丛枝菌根真菌侵染桂花幼苗根系的影响

由图 1 可见,5 种 Ni 质量浓度胁迫下,未接种丛枝菌根真菌的桂花幼苗根系均未发现有菌丝生成,菌根侵染率为 0;随 Ni 胁迫质量浓度的增大,接种 AMF 的桂花幼苗根系菌根侵染率逐渐降低,可能是由于 Ni 胁迫不利于 AMF 的侵染和菌根发育所致;Ni 胁迫质量浓度为 0 mg/L 时,接种 AMF 的桂花幼苗根系菌根侵染率为 78.25%,而 Ni 胁迫质量浓度分别为 100、200、300、400 mg/L 时,接种 AMF 的桂花幼苗根系

菌根侵染率分别为 60.58%、44.39%、35.68%、27.22%,分别较 0 mg/L 处理的显著降低 17.67%、33.86%、42.57%、51.03 百分点($P < 0.05$)。

2.3 丛枝菌根真菌对 Ni 胁迫下桂花幼苗叶片光合色素含量的影响

由图 2 可见,随 Ni 胁迫质量浓度的增大,接种、未接种 AMF 的桂花幼苗叶片叶绿素、类胡萝卜素含量均呈逐渐下降趋势,接种 AMF 的叶绿素、类胡萝卜素含量均明显高于未接



柱形图上不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下同

图1 Ni胁迫对丛枝菌根真菌侵染桂花幼苗根系的影响

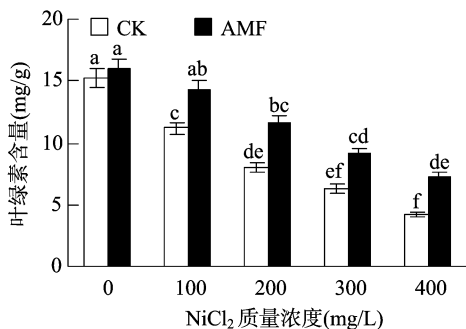
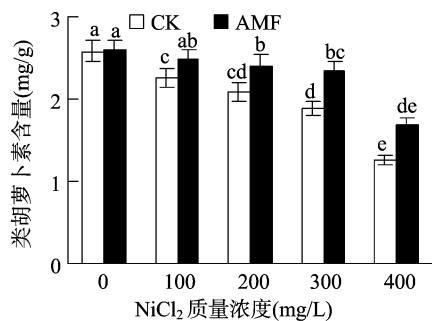


图2 丛枝菌根真菌对 Ni 胁迫下桂花幼苗叶片光合色素含量的影响

种处理;Ni胁迫质量浓度分别为100、200、300、400 mg/L时,接种AMF的桂花幼苗叶片叶绿素含量分别为14.25、11.69、9.05、7.23 mg/g,分别较未接种的显著增加27.80%、45.22%、44.34%、69.72% ($P < 0.05$);Ni胁迫质量浓度分别为100、200、300 mg/L时,接种AMF的桂花幼苗叶片类胡萝卜素含量分别为2.48、2.41、2.33 mg/g,分别较未接种的显著增加10.22%、15.31%、23.94%,而Ni胁迫质量浓度为400 mg/L时,接种AMF的桂花幼苗叶片类胡萝卜素含量为1.68 mg/g,较未接种的增加33.33%,但相互间差异不显著($P > 0.05$)。可见,Ni胁迫可明显降低桂花幼苗叶片光合色素含量,而接种AMF可明显提升Ni胁迫下桂花幼苗叶片的光合色素含量。



2.4 丛枝菌根真菌对 Ni 胁迫下桂花幼苗叶片光合作用的影响

由图3可知,随Ni胁迫质量浓度的增大,接种、未接种AMF的桂花幼苗叶片净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)均呈逐渐下降趋势,且接种AMF的 P_n 、 G_s 、 T_r 均明显高于未接种处理,而接种、未接种AMF的桂花幼苗叶片胞间二氧化碳浓度(C_i)呈先降后升趋势,接种AMF的 C_i 显著低于未接种处理;Ni胁迫质量浓度分别为100、200、300、400 mg/L时,接种AMF的桂花幼苗叶片 P_n 分别为15.55、13.15、9.98、6.65 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,分别较未接种的增加10.13%、18.58%、32.01%、80.22%,除Ni胁迫质量浓度为300 mg/L的叶片 P_n 与未接种的差异不显著($P > 0.05$)外,其他3种质量浓度处理下接种AMF的叶片 P_n 显著高于未接种的($P < 0.05$),接种AMF的桂花幼苗叶片 G_s 分别为241、201、153、102 $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,分别较未接种的显著增加7.11%、10.44%、33.04%、61.90% ($P < 0.05$),接种AMF的桂花幼苗叶片 T_r 分别为3.12、2.71、2.35、2.18 $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,分别较未接种的显著增加11.03%、15.32%、19.90%、42.48%;Ni胁迫质量浓度分别为100、400 mg/L时,接种AMF的桂花幼苗叶片 C_i 分别为260.35、358.69 $\mu\text{mol}/\text{mol}$,分别较未接种的显著降低8.88%、6.98%。可见,Ni胁迫可明显降低桂花幼苗叶片的 P_n 、 G_s 、 T_r ,增加 C_i ,光合作用受到明显抑制,而接种AMF可明显缓解Ni胁迫对桂花幼苗叶片光合作用的抑制。

2.5 丛枝菌根真菌对 Ni 胁迫下桂花幼苗叶片抗氧化酶活性的影响

由表2可见,随Ni胁迫浓度的增大,接种、未接种AMF的桂花幼苗叶片SOD、POD、CAT活性均呈先升后降趋势,除

Ni胁迫质量浓度为0 mg/L外,接种AMF的SOD、POD、CAT活性均显著高于未接种处理($P < 0.05$);Ni胁迫质量浓度为300 mg/L时,接种AMF的桂花幼苗叶片SOD、POD、CAT活性分别较未接种的显著增加29.58%、32.59%、24.93%,Ni胁迫质量浓度为400 mg/L时,接种AMF的桂花幼苗叶片SOD、POD、CAT活性分别较未接种的显著增加60.85%、21.83%、22.03%。可见,接种AMF可明显提升Ni胁迫下桂花幼苗叶片的抗氧化酶活性,提升抗氧化能力。

2.6 丛枝菌根真菌对 Ni 胁迫下桂花幼苗叶片细胞膜透性的影响

由图4可见,随Ni胁迫浓度的增大,接种、未接种AMF的桂花幼苗叶片相对电导率呈逐渐增加趋势,接种AMF的相对电导率多显著低于未接种处理($P < 0.05$);Ni胁迫质量浓度分别为100、200、300、400 mg/L时,接种AMF的桂花幼苗叶片相对电导率分别为11.22%、16.75%、24.26%、40.65%,分别较未接种的降低2.94%、5.26%、9.30%、10.04个百分点,除Ni胁迫质量浓度为100 mg/L的叶片相对电导率与未接种的差异不显著($P > 0.05$)外,其他3种质量浓度处理下接种AMF的叶片相对电导率显著高于未接种的;随Ni胁迫质量浓度的增大,接种、未接种AMF的桂花幼苗叶片MDA含量呈先降后增趋势;Ni胁迫质量浓度分别为100、200 mg/L时,接种AMF的桂花幼苗叶片MDA含量分别为16.85、18.56 nmol/g,分别较未接种的降低0.94%、12.70%,与未接种的差异不显著($P > 0.05$),而Ni胁迫质量浓度分别为300、400 mg/L时,接种AMF的桂花幼苗叶片MDA含量分别为23.25、31.92 nmol/g,分别较未接种的显著降低18.68%、19.21%。这说明,Ni胁迫可对桂花幼苗叶片的细胞膜造成破坏,而接种AMF可显著降低Ni胁迫下桂花幼苗叶片的细

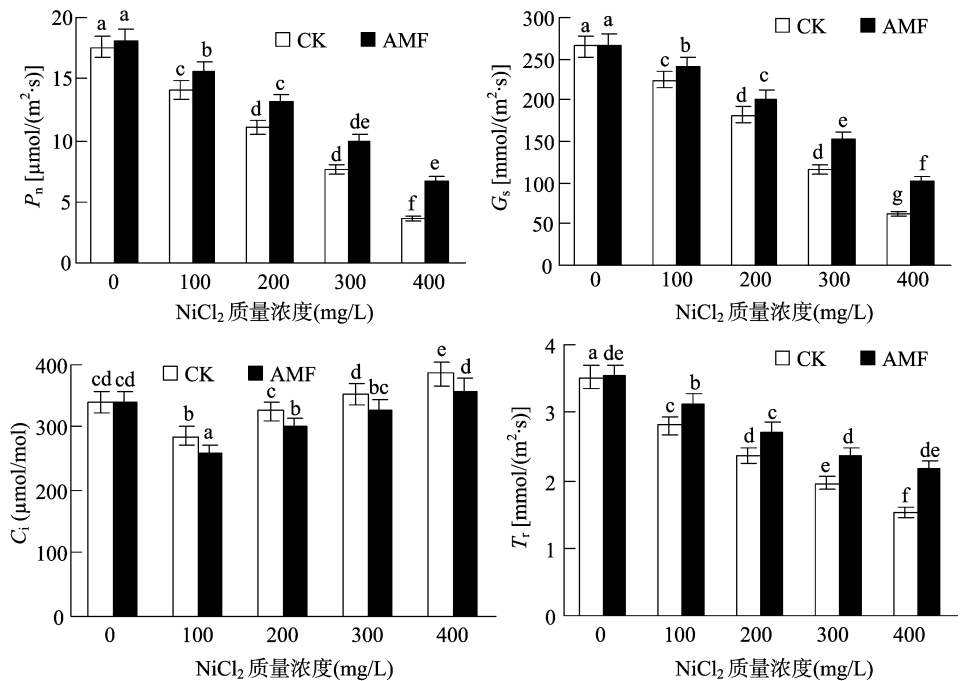


图3 丛枝菌根真菌对 Ni 胁迫下桂花幼苗叶片光合作用的影响

表 2 丛枝菌根真菌对 Ni 胁迫下桂花幼苗叶片抗氧化酶活性的影响

Ni 胁迫质量浓度 (mg/L)	处理	SOD 活性 [U/(g · min)]	POD 活性 [U/(g · min)]	CAT 活性 [U/(g · min)]
0	CK	170.06a	85.69a	258.91b
	AMF	175.88a	90.86ab	265.82b
100	CK	213.28b	122.68b	285.25b
	AMF	275.65cd	165.93c	460.06c
200	CK	251.19bc	213.29d	429.37c
	AMF	333.89d	273.15e	596.75d
300	CK	315.26d	258.46e	618.59d
	AMF	408.52e	342.69f	772.83e
400	CK	165.24a	70.09a	210.06a
	AMF	265.79cd	115.39b	256.33b

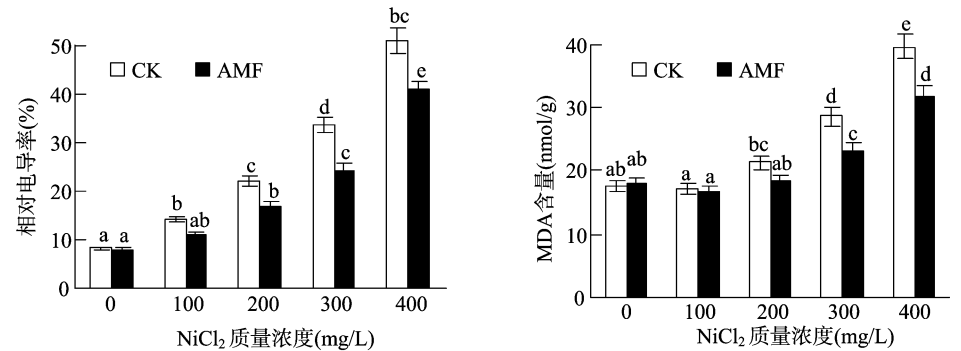


图4 丛枝菌根真菌对Ni胁迫下桂花幼苗叶片细胞膜透性的影响

胞膜破坏程度,可能是由于接种 AMF 可明显提升 Ni 胁迫下桂花幼苗叶片的抗氧化水平,进而降低活性氧水平所致。

3 结论与讨论

菌根侵染率是衡量植物根系菌根化的重要指标,侵染率越高说明菌根效应越强^[19]。本研究结果表明,随镍(Ni)胁迫

质量浓度的增大,接种丛枝菌根真菌(AMF)的桂花幼苗根系菌根侵染率逐渐降低,Ni 胁迫质量浓度分别为 0、400 mg/L 时,接种 AMF 的桂花幼苗根系菌根侵染率分别为 78.25%、27.22%,差异显著($P < 0.05$),可能是由于重金属胁迫会对丛枝菌根真菌合成和侵染产生一定的抑制作用,这与尹大川等的研究结果^[14,19]较为一致。

叶片光合色素是植物进行光合作用的重要色素,其含量高低与植物光合作用强弱密切相关。本研究结果表明,随着 Ni 胁迫质量浓度的增大,桂花叶片叶绿素、类胡萝卜素含量呈逐渐下降趋势,而接种 AMF 的桂花其叶绿素、类胡萝卜素含量均明显高于未接种处理。净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)、胞间二氧化碳(C_i)是衡量光合作用的重要参数。本研究结果表明,随着 Ni 胁迫质量浓度的增大,桂花叶片 P_n 、 G_s 、 T_r 呈逐渐降低趋势,而 C_i 则呈先降后增趋势,接种 AMF 的桂花幼苗叶片 P_n 、 G_s 、 T_r 明显高于未接种处理、 C_i 则明显低于未接种处理;Ni 胁迫质量浓度为 400 mg/L 时,接种 AMF 的桂花幼苗叶片叶绿素含量、 P_n 、 G_s 、 T_r 分别较未接种显著增加 69.72%、80.22%、61.90%、42.48% ($P < 0.05$),而 C_i 则较未接种显著降低 6.98%,这种造成光合速率下降的原因可能是由于 Ni 胁迫可使叶肉细胞光合活性下降所致,而接种 AMF 可明显缓解桂花因 Ni 胁迫而造成的光合色素降解,进而提高光合速率,同时,接种 AMF 可明显提升 Ni 胁迫下桂花的叶肉细胞光合活性,从而提高光合速率,这与尹大川等的研究结果^[14,19]较为一致。

植物在遭遇生物和非生物胁迫时,会启动自身的抗氧化防御体系,以最大程度地减少逆境对自身造成的伤害^[20]。本研究结果表明,随 Ni 胁迫质量浓度的增大,桂花叶片超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性均呈先增后降趋势,而接种 AMF 的 SOD、POD、CAT 活性均明显高于未接种处理。相对电导率和丙二醛(MDA)含量是衡量膜质过氧化程度的重要指标。本研究结果表明,随 Ni 胁迫质量浓度的增大,桂花叶片的相对电导率和 MDA 含量呈增加趋势,且接种 AMF 的相对电导率、MDA 含量均明显低于未接种处理;Ni 胁迫质量浓度为 400 mg/L 时,接种 AMF 的桂花幼苗叶片 SOD、POD、CAT 活性分别较未接种的显著增加 60.85%、21.83%、22.03%,而相对电导率、MDA 含量分别较未接种的显著降低 10.04%、19.21%,接种 AMF 可明显提升镍胁迫下桂花叶片的抗氧化酶活性,活性氧清除能力有明显增加,细胞受伤害程度有明显降低,这与尹大川等的研究结果^[14,19]较为一致。

另外,本研究结果表明,随 Ni 胁迫质量浓度的增大,桂花幼苗植株株高、茎粗、总干物质质量呈逐渐下降趋势,接种 AMF 的植株株高、茎粗、总干物质质量均明显高于未接种处理;Ni 胁迫质量浓度为 400 mg/L 时,接种 AMF 的桂花株高、总干物质质量分别较未接种的显著增加 22.12%、15.76%,这可能是由于接种 AMF 可明显提升镍胁迫下桂花的光合速率,缓解镍胁迫对桂花生长发育造成的伤害,进而促进桂花生长,这与尹大川等的研究结果^[14,19]较为一致。

参考文献:

- [1] 黄益宗,郝晓伟,雷 鸣,等. 重金属污染土壤修复技术及其修复实践[J]. 农业环境科学学报,2013,32(3):409–417.
- [2] McBride M B. Environmental chemistry of soils [M]. New York:

Oxford University Press,1994.

- [3] 刘仕翔,黄益宗,罗泽娇,等. 褪黑素对水稻幼芽镍胁迫的缓解作用[J]. 环境科学,2017,38(4):1675–1682.
- [4] 黄锦孙,韦东普,郭雪雁,等. 田间土壤外源铜镍在小麦中的累积及其毒害研究[J]. 环境科学,2012,33(4):1369–1375.
- [5] 姚俊朝,殷永泉,崔兆杰,等. Ni 和 V 胁迫对翅碱蓬和棉花生长生理的影响[J]. 环境科学与技术,2013,36(12):33–37.
- [6] 贾振宇,于 洁,德 英,等. 丛枝菌根真菌接种对羊草抗旱性的影响[J]. 干旱区资源与环境,2017,31(1):132–136.
- [7] Matsubara Y, Tamura H, Harada T. Growth enhancement and verticillium wilt control by vesicular – arbuscular mycorrhizal fungus inoculation in eggplant *Solanum melongena* [J]. Journal of the Japanese Society for Horticultural Science,1995,64(3):555–561.
- [8] Gaur A, Adholeya A. Prospects of arbuscular mycorrhizal fungi in phytoremediation of heavy metal contaminated soils [J]. Current Science,2004,86(4):528–534.
- [9] Gohre V, Paszkowski U. Contribution of the arbuscular mycorrhizal symbiosis to heavy metal phytoremediation [J]. Planta,2006,223(6):1115–1122.
- [10] Li X L, Christie P. Changes in soil solution Zn and pH and uptake of Zn by arbuscular mycorrhizal red clover in Zn – contaminated soil [J]. Chemosphere,2001,42(2):201–207.
- [11] Hildebrandt U, Regvar M, Bothe H. Arbuscular mycorrhiza and heavy metal tolerance [J]. Phytochemistry,2007,68(1):139–146.
- [12] 黄 晶,凌婉婷,孙艳娣,等. 丛枝菌根真菌对紫花苜蓿吸收土壤中镉和锌的影响[J]. 农业环境科学学报,2012,31(1):99–105.
- [13] 王凯渊,蒋园园,宋文俊,等. AM 真菌与镉互作影响桑生长和无机元素吸收转运[J]. 菌物学报,2017,36(7):996–1009.
- [14] 尹大川,邓 勋,宋小双,等. Cd 胁迫下外生菌根菌对樟子松生理指标和根际土壤酶的影响[J]. 生态学杂志,2017,36(11):3072–3078.
- [15] Zhang X H, Wang L M, Zhang X, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on upland rice oxidative stress induced by Cu and Pb contamination in soil [J]. Agricultural Science & Technology,2014,15(1):123–126.
- [16] 巴青松,张根生,凌 玉,等. 根施甜菜碱对镍胁迫下小麦幼苗生长生理的影响[J]. 西北植物学报,2017,37(2):315–320.
- [17] 孙天国,沙 伟,张 建. 水杨酸对镍胁迫下甜瓜幼苗生理活性的影响[J]. 北方园艺,2010(11):39–41.
- [18] 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.
- [19] 杨 国,卢 可,朱高樨,等. 丛枝菌根真菌摩西球囊菌对铜胁迫下白术幼苗光合特性及抗氧化酶活性的影响[J]. 植物生理学报,2018,54(4):618–626.
- [20] 樊瑞苹,周 琴,周 波,等. 盐胁迫对高羊茅生长及抗氧化系统的影响[J]. 草业学报,2012,21(1):112–117.