

添加铜尾矿矿砂的栽培基质对 黄花苜蓿幼苗生长及部分生理指标的影响

许敏¹, 韩玉林^{1,①}, 原海燕², 赵文进¹, 张继露¹, 付佳佳³

[1. 江西财经大学艺术学院园林系 江西省生态环境实验教学示范中心, 江西 南昌 330032;
2. 江苏省·中国科学院植物研究所(南京中山植物园), 江苏 南京 210014; 3. 南昌工学院, 江西 南昌 330108]

摘要: 采用盆栽法对种植于添加铜尾矿矿砂(体积分数 0%、25%、50%、75% 和 100%)栽培基质中的黄花苜蓿(*Medicago falcata* Linn.)幼苗的生长及部分生理指标的变化进行了分析。结果表明:随栽培基质中铜尾矿矿砂体积分数的提高,黄花苜蓿的株高、根长、地上和地下部分干质量以及耐性指数均呈逐渐下降的趋势且总体上低于对照,但仅在铜尾矿矿砂体积分数较高(75% 和 100%)的条件下株高和地上部分干质量与对照差异显著($P < 0.05$);地上和地下部分的 CAT 活性和叶片光合色素(包括叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素)含量均逐渐下降且总体上低于对照,而地上和地下部分的 POD 活性、GSH 含量和 O_2^- 含量则总体上呈逐渐增加的趋势且高于对照。在铜尾矿矿砂体积分数 25% ~ 75% 的条件下,地上和地下部分的 SOD 活性逐渐增加且显著高于对照;而在铜尾矿矿砂体积分数 100% 的条件下,地上部分的 SOD 活性显著低于对照,而地下部分的 SOD 活性则略降低但显著高于对照。各处理组幼苗地上和地下部分的 MDA 含量均不高于对照;而各处理组 AsA 含量变化则呈波动趋势。综合分析结果表明:黄花苜蓿对铜尾矿矿砂具有一定的适应性,可用于铜尾矿矿砂的绿化固着以及铜污染环境的植物修复。

关键词: 黄花苜蓿; 铜尾矿矿砂; 生长指标; 生理指标; 耐性指数

中图分类号: Q945.78; X53 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2014)02-0074-06

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2014.02.11

Effect of culture substrate added with copper tailing sand on growth and some physiological indexes of *Medicago falcata* seedlings XU Min¹, HAN Yulin^{1,①}, YUAN Haiyan², ZHAO Wenjin¹, ZHANG Jilu¹, FU Jiajia³ (1. Experimental Teaching Demonstration Center of Ecological Environment of Jiangxi Province, Department of Landscape Architecture, College of Arts, Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang 330032, China; 2. Institute of Botany, Jiangsu Province and the Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210014, China; 3. Nanchang Institute of Science and Technology, Nanchang 330108, China), *J. Plant Resour. & Environ.* 2014, 23(2): 74-79

Abstract: Changes of growth and some physiological indexes of *Medicago falcata* Linn. seedlings planted in culture substrate added with copper tailing sand of volume ratio of 0%, 25%, 50%, 75% and 100% were analyzed by pot culture method. The results show that with rising of volume ratio of copper tailing sand in culture substrate, seedling height, root length, dry weights of above- and under-ground parts, and tolerance index of *M. falcata* all appear the trend of decreasing gradually and are generally lower than those of the control. But only under condition of copper tailing sand with higher volume ratio (75% and 100%), there are significant differences in seedling height and dry weight of above-ground part ($P < 0.05$) with those of the control. CAT activity in above- and under-ground parts and photosynthetic pigment (including Chla, Chlb and carotenoid) content in leaf all decrease gradually and are generally lower than those of the control, while POD activity, GSH content and O_2^- content in above- and under-ground parts generally appear the increasing trend and are higher than those of the control. Under

收稿日期: 2013-10-14

基金项目: 江西省研究生创新基金项目(YC2012-S073)

作者简介: 许敏(1989—),女,江苏泰州人,硕士研究生,主要从事植物抗逆生理研究。

①通信作者 E-mail: hyl1957@163.com

condition of copper tailing sand with volume ratio of 25%–75%, SOD activity in above- and under-ground parts increases gradually and is significantly higher than that of the control, but under condition of copper tailing sand with volume ratio of 100%, SOD activity in above-ground part is significantly lower than that of the control while that in under-ground part decreases slightly but is significantly higher than that of the control. MDA content in above- and under-ground parts of every treatment group is not lower than that of the control, while AsA content of every treatment group appears the fluctuation trend. The comprehensive analysis result indicates that *M. falcata* has a certain adaptability to copper tailing sand, so it can be used for green fixing of copper tailing sand and for phytoremediation in Cu polluted environment.

Key words: *Medicago falcata* Linn.; copper tailing sand; growth index; physiological index; tolerance index

铜是生物必需的营养元素之一,适量的铜对人和动植物都有益,但过量的铜对生物的生长和代谢均具有毒害作用^[1]。铜矿开采过程中产生的铜尾矿矿砂及其渗出液中均含有过量的铜及其他重金属元素,而其中的氮、磷及有机质含量却极端贫瘠,pH值也较低。因此,用于改良和修复铜尾矿矿砂的植物除应具有较强的抗重金属胁迫能力外,还应具备较强的耐贫瘠能力。

研究表明:部分豆科植物对铜污染土壤具有一定的耐受能力和修复作用。如:在安徽省的铜陵铜矿废弃地及甘肃省的白银铜矿废弃地上均自然生长着较多的豆科(Leguminosae)植物^[2];而豆科植物苜蓿(*Medicago sativa* Linn.)对重金属污染土壤也具有一定的修复作用^[3]。黄花苜蓿(*M. falcata* Linn.)也是一种豆科植物,具有耐低温、耐干旱及耐盐碱能力,是优良的绿肥及牧草种质资源之一^[4],然而,目前有关黄花苜蓿对铜的耐性及其对铜污染土壤修复作用的研究尚未见报道。

鉴于此,作者采用盆栽实验方法,将黄花苜蓿幼苗栽植于添加了铜尾矿矿砂的栽培基质中,对黄花苜蓿幼苗生长以及部分生理指标的变化进行分析,以期探讨豆科植物对重金属铜的耐性机制,并为利用黄花苜蓿修复Cu污染环境提供参考依据。

1 材料和方法

1.1 材料

实验用黄花苜蓿种子购于江苏省沭阳种苗市场;供试铜尾矿矿砂取自江西省德兴铜尾矿矿坝,园土取自江西财经大学麦庐校区。采用Han等^[5-6]的方法播种并培养黄花苜蓿幼苗,选择株高约10cm且生长一致的幼苗进行胁迫实验。

1.2 方法

1.2.1 胁迫处理方法 将铜尾矿矿砂与园土按比例混合制成栽培基质,其中铜尾矿矿砂的体积分数分别为0%(对照)、25%、50%、75%和100%。将各栽培基质分别装入直径15cm、高10cm的塑料盆中,每处理3盆(每盆视为1次重复),每盆栽植5株幼苗,共15盆。置于室外自然光照条件下培养,并根据土壤湿度状况及时补充适量水分。处理30d后将各处理组幼苗全部取出,冲洗干净并吸干表面水分,用于各项生长和生理指标的测定。

1.2.2 各指标测定方法 每处理随机选取3株幼苗,用直尺分别测量株高和根长,结果取平均值,并按照公式“耐性指数=(处理组幼苗平均根长/对照组幼苗平均根长)×100%^[5]”计算耐性指数。将植株的地上与地下部分分开后,分别置于105℃干燥箱内杀青0.5h,然后于60℃条件下干燥至恒质量,分别称取地上和地下部分的干质量。

参照文献[7],采用丙酮提取法测定光合色素含量,采用硫代巴比妥酸法测定丙二醛(MDA)含量,采用氮蓝四唑(NBT)法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性,采用愈创木酚法测定过氧化物酶(POD)活性,采用紫外吸收法测定过氧化氢酶(CAT)活性;参照文献[8],采用二联吡啶法测定抗坏血酸(AsA)含量;参照文献[9],采用2-硝基苯甲酸(DTNB)法测定谷胱甘肽(GSH)含量;参照文献[10],采用羟胺氧化反应法测定超氧阴离子自由基(O₂⁻)含量。其中,光合色素含量测定使用的样品为各处理组幼苗相同部位的叶片,其余指标测定使用的样品为各处理组地上和地下部分的相同部位;各指标均重复测定3次,结果取平均值。

1.3 数据计算和统计分析

应用EXCEL 2007数据处理软件和SPSS 13.0统

计分析软件对实验数据进行统计和方差分析,并采用邓肯氏(Duncan's)新复极差法对实验数据进行差异显著性分析。

2 结果和分析

2.1 添加铜尾矿矿砂的栽培基质对黄花苜蓿幼苗生长的影响

在添加铜尾矿矿砂的栽培基质中黄花苜蓿幼苗的生长状况见表1。由表1可以看出:随着铜尾矿矿砂体积分数的提高,黄花苜蓿幼苗的株高和根长均呈不断下降的趋势。栽培基质中铜尾矿矿砂体积分数为50%、75%和100%时,幼苗株高均与对照差异显著($P<0.05$),但根长与对照差异不显著($P>0.05$)。铜尾矿矿砂体积分数为100%时,幼苗的株高和根长

均最低,分别较对照下降了23.44%和12.34%。

由表1还可以看出:随栽培基质中铜尾矿矿砂体积分数的提高,黄花苜蓿幼苗地上和地下部分干质量也呈现逐渐下降的趋势。铜尾矿矿砂体积分数为75%和100%时,幼苗的地上部分干质量均与对照有显著差异,其余处理组的地上和地下部分干质量均与对照无显著差异。在铜尾矿矿砂体积分数100%的条件下,黄花苜蓿幼苗的地上和地下部分干质量均最低,分别较对照下降了39.06%和12.50%。

统计结果(表1)表明:各处理组黄花苜蓿幼苗的耐性指数均低于对照,且随栽培基质中铜尾矿矿砂体积分数的提高呈逐渐降低的趋势。在铜尾矿矿砂体积分数100%的条件下,幼苗的耐性指数降幅最大,说明在高浓度铜胁迫条件下,黄花苜蓿幼苗对铜胁迫的耐性降低,植株生长受到抑制。

表1 添加铜尾矿矿砂的栽培基质对黄花苜蓿幼苗生长的影响($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

Table 1 Effect of culture substrate added with copper tailing sand on growth of *Medicago falcata* Linn. seedling ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

处理组 ²⁾ Treatment group ²⁾	株高/cm Seedling height	根长/cm Root length	不同部位的干质量/g Dry weight of different parts		耐性指数/% Tolerance index
			地上部分 Above-ground part	地下部分 Under-ground part	
S0(CK)	16.00±1.45a	14.83±0.17a	0.064±0.01a	0.040±0.01a	100.00
S1	15.22±1.26ab	14.61±0.35a	0.064±0.01a	0.040±0.01a	98.52
S2	13.33±1.17bc	14.22±2.14a	0.051±0.01ab	0.039±0.01a	95.89
S3	12.42±1.30c	13.94±0.92a	0.043±0.01b	0.039±0.01a	94.00
S4	12.25±0.35c	13.00±2.00a	0.039±0.01b	0.035±0.01a	87.66

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示经邓肯氏新复极差检验差异显著($P<0.05$) Different small letters in the same column indicate the significant difference ($P<0.05$) by Duncan's new multiple range test.

²⁾ S0, S1, S2, S3, S4: 栽培基质中铜尾矿矿砂的体积分数分别为0%、25%、50%、75%和100% Volume ratio of copper tailing sand in culture substrate is 0%, 25%, 50%, 75% and 100%, respectively.

2.2 添加铜尾矿矿砂的栽培基质对黄花苜蓿幼苗部分生理指标的影响

2.2.1 对叶片光合色素含量的影响 在添加铜尾矿矿砂的栽培基质中黄花苜蓿幼苗叶片光合色素(包括叶绿素a、叶绿素b和类胡萝卜素)含量的变化见表2。从表2可以看出:各处理组黄花苜蓿幼苗叶片中叶绿素a、叶绿素b和类胡萝卜素含量的变化趋势与其生长指标的变化趋势较一致,均随铜尾矿矿砂体积分数的提高而逐渐下降,且各处理组幼苗叶片的叶绿素a、叶绿素b和类胡萝卜素的含量均与对照差异显著($P<0.05$)。在铜尾矿矿砂体积分数100%的条件下,黄花苜蓿幼苗叶片中的叶绿素a、叶绿素b和类胡萝卜素的含量均最低,分别较对照下降了64.71%、65.08%和54.89%。

表2 添加铜尾矿矿砂的栽培基质对黄花苜蓿幼苗叶片光合色素含量的影响($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

Table 2 Effect of culture substrate added with copper tailing sand on content of photosynthetic pigment in leaf of *Medicago falcata* Linn. seedling ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

处理组 ²⁾ Treatment group ²⁾	光合色素含量/mg·g ⁻¹ Content of photosynthetic pigment		
	叶绿素a Chla	叶绿素b Chlb	类胡萝卜素 Carotenoid
S0(CK)	3.91±0.16a	1.26±0.05a	1.33±0.01a
S1	3.11±0.17b	0.95±0.40b	1.14±0.04b
S2	1.99±0.09c	0.64±0.02c	0.73±0.04c
S3	1.96±0.13d	0.52±0.01d	0.65±0.04d
S4	1.38±0.08e	0.44±0.02e	0.60±0.04d

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示经邓肯氏新复极差检验差异显著($P<0.05$) Different small letters in the same column indicate the significant difference ($P<0.05$) by Duncan's new multiple range test.

²⁾ S0, S1, S2, S3, S4: 栽培基质中铜尾矿矿砂的体积分数分别为0%、25%、50%、75%和100% Volume ratio of copper tailing sand in culture substrate is 0%, 25%, 50%, 75% and 100%, respectively.

2.2.2 对超氧阴离子自由基(O_2^-)和丙二醛(MDA)含量的影响 在添加铜尾矿矿砂的栽培基质中黄花苜蓿幼苗地上和地下部分 O_2^- 和 MDA 含量的变化见表3。由表3可见:在铜尾矿矿砂体积分数不同的栽培基质中,除铜尾矿矿砂体积分数25%处理组外,其余各处理组黄花苜蓿幼苗地上和地下部分的 O_2^- 含量均显著高于对照($P<0.05$),且随栽培基质中铜尾矿矿砂体积分数的提高呈逐渐增加的趋势。在铜尾矿矿砂体积分数100%的处理条件下,黄花苜蓿幼苗地上和地下部分的 O_2^- 含量均最高,分别较对照增加了1.31%和0.57%。

由表3还可见:在铜尾矿矿砂体积分数不同的栽培基质中,黄花苜蓿幼苗地上部分的 MDA 含量均高于对照但变化趋势无明显规律性,并且在铜尾矿矿砂体积分数100%的条件下,其地上部分的 MDA 含量较对照显著增加,增加幅度达19.05%;而地下部分的 MDA 含量则呈现在铜尾矿矿砂体积分数25%和50%的条件下上升、在铜尾矿矿砂体积分数75%和100%的条件下下降的趋势,并且在铜尾矿矿砂体积分数25%和50%的条件下显著高于对照,而在铜尾矿矿砂体积分数75%和100%的条件下与对照无显著差异($P>0.05$)。

表3 添加铜尾矿矿砂的栽培基质对黄花苜蓿幼苗地上和地下部分超氧阴离子自由基(O_2^-)和丙二醛(MDA)含量的影响($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

Table 3 Effect of culture substrate added with copper tailing sand on contents of O_2^- and MDA in above- and under-ground parts of *Medicago falcata* Linn. seedling ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

处理组 ²⁾ Treatment group ²⁾	不同部位的 O_2^- 含量/ $nmol \cdot min^{-1} \cdot g^{-1}$ Content of O_2^- in different parts		不同部位的 MDA 含量/ $mmol \cdot g^{-1}$ Content of MDA in different parts	
	地上部分 Above-ground part	地下部分 Under-ground part	地上部分 Above-ground part	地下部分 Under-ground part
	S0 (CK)	34.39±0.04c	34.78±0.03c	0.63±0.01c
S1	34.45±0.11c	34.85±0.02b	0.66±0.01bc	0.80±0.00b
S2	34.66±0.02b	34.86±0.06b	0.68±0.00b	0.81±0.00a
S3	34.68±0.04b	34.90±0.03b	0.66±0.01bc	0.66±0.01c
S4	34.84±0.01a	34.98±0.01a	0.75±0.03a	0.66±0.01c

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示经邓肯氏新复极差检验差异显著($P<0.05$) Different small letters in the same column indicate the significant difference ($P<0.05$) by Duncan's new multiple range test.

²⁾ S0, S1, S2, S3, S4: 栽培基质中铜尾矿矿砂的体积分数分别为0%、25%、50%、75%和100% Volume ratio of copper tailing sand in culture substrate is 0%, 25%, 50%, 75% and 100%, respectively.

2.2.3 对过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)及过氧化氢酶(CAT)活性的影响 在添加铜尾矿矿砂的栽培基质中黄花苜蓿幼苗地上和地下部分 POD、SOD 和 CAT 活性的变化见表4。从表4可以看出:随栽培基质中铜尾矿矿砂体积分数的提高,黄花苜蓿幼苗地上和地下部分的 POD 活性呈逐渐增加的趋势,并在铜尾矿矿砂体积分数100%的条件下达到最高,且与对照差异显著($P<0.05$),分别较对照增加了38.87%和35.61%。

从表4还可以看出:在添加体积分数25%、50%和75%铜尾矿矿砂的栽培基质中,黄花苜蓿幼苗地上和地下部分的 SOD 活性均高于对照且逐渐增加,而在铜尾矿矿砂体积分数100%的栽培基质中则低于对照,并在铜尾矿矿砂体积分数75%的条件下达到最高。各处理组幼苗地上和地下部分的 SOD 活性均与对照有显著差异。

统计结果(表4)表明:随着铜尾矿矿砂体积分数

的提高,黄花苜蓿幼苗地上和地下部分的 CAT 活性均呈逐渐下降的趋势;并且除铜尾矿矿砂体积分数25%处理组外,其余3个处理组黄花苜蓿幼苗地上和地下部分的 CAT 活性均显著低于对照。在铜尾矿矿砂体积分数100%的栽培基质中,黄花苜蓿幼苗地上和地下部分的 CAT 活性分别较对照下降了47.97%和48.84%。

2.2.4 对谷胱甘肽(GSH)和抗坏血酸(AsA)含量的影响 在添加铜尾矿矿砂的栽培基质中黄花苜蓿幼苗地上和地下部分 GSH 和 AsA 含量的变化见表5。从表5可以看出:随栽培基质中铜尾矿矿砂体积分数的提高,幼苗地上和地下部分的 GSH 含量基本呈逐渐增加的趋势,且均高于对照。在铜尾矿矿砂体积分数100%的条件下,幼苗地上和地下部分的 GSH 含量均显著高于对照,增幅分别为19.64%和16.13%。

从表5还可以看出:随栽培基质中铜尾矿矿砂体积分数的提高,黄花苜蓿幼苗地上和地下部分的 AsA

含量变化无明显规律性。在铜尾矿矿砂体积分数 25% 的栽培基质中, 黄花苜蓿幼苗地上和地下部分的 AsA 含量均达到最高值且与对照差异显著, 分别较对照增加了 11.36% 和 2.47%。在铜尾矿矿砂体积分

数 100% 的条件下, 黄花苜蓿幼苗地下部分的 AsA 含量则显著低于对照, 降幅为 12.99%; 而幼苗地上部分的 AsA 含量则较对照略有增加, 但增幅并不大, 仅为 3.57%。

表 4 添加铜尾矿矿砂的栽培基质对黄花苜蓿幼苗地上和地下部分过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化氢酶(CAT)活性的影响 ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 4 Effect of culture substrate added with copper tailing sand on activities of POD, SOD and CAT in above- and under-ground parts of *Medicago falcata* Linn. seedling ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

处理组 ²⁾ Treatment group ²⁾	不同部位的 POD 活性/ $U \cdot g^{-1} \cdot min^{-1}$ Activity of POD in different parts		不同部位的 SOD 活性/ $U \cdot g^{-1}$ Activity of SOD in different parts		不同部位的 CAT 活性/ $U \cdot g^{-1}$ Activity of CAT in different parts	
	地上部分 Above-ground part	地下部分 Under-ground part	地上部分 Above-ground part	地下部分 Under-ground part	地上部分 Above-ground part	地下部分 Under-ground part
	S0 (CK)	31 420.00±606.96d	12 880.00±1 610.34b	236.95±1.69b	247.91±1.28d	164.00±16.97a
S1	32 420.00±911.48cd	13 145.33±783.94b	244.12±4.03a	264.41±0.31c	136.00±22.63a	98.93±5.08ab
S2	33 773.33±710.02bc	13 156.00±435.49b	246.68±5.82a	273.64±0.61b	98.67±4.62b	82.67±9.24b
S3	34 091.33±763.01b	15 866.67±1 327.30a	250.58±2.02a	284.40±1.11a	93.33±12.22b	80.00±16.00b
S4	43 633.33±960.28a	17 466.67±723.97a	224.75±3.85c	272.71±4.64b	85.33±12.22b	58.67±12.22c

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示经邓肯氏新复极差检验差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters in the same column indicate the significant difference ($P < 0.05$) by Duncan's new multiple range test.

²⁾ S0, S1, S2, S3, S4: 栽培基质中铜尾矿矿砂的体积分数分别为 0%、25%、50%、75% 和 100% Volume ratio of copper tailing sand in culture substrate is 0%, 25%, 50%, 75% and 100%, respectively.

表 5 添加铜尾矿矿砂的栽培基质对黄花苜蓿幼苗地上和地下部分谷胱甘肽(GSH)和抗坏血酸(AsA)含量的影响 ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 5 Effect of culture substrate added with copper tailing sand on contents of GSH and AsA in above- and under-ground parts of *Medicago falcata* Linn. seedling ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

处理组 ²⁾ Treatment group ²⁾	不同部位的 GSH 含量/ $\mu g \cdot g^{-1}$ Content of GSH in different parts		不同部位的 AsA 含量/ $\mu g \cdot g^{-1}$ Content of AsA in different parts	
	地上部分 Above-ground part	地下部分 Under-ground part	地上部分 Above-ground part	地下部分 Under-ground part
	S0 (CK)	0.56±0.00b	0.31±0.01b	3.08±0.07b
S1	0.57±0.01b	0.33±0.04ab	3.43±0.33a	6.23±0.20a
S2	0.63±0.06a	0.34±0.02ab	3.07±0.06b	5.59±0.12bc
S3	0.68±0.01a	0.35±0.02ab	3.12±0.04ab	4.78±0.07d
S4	0.67±0.02a	0.36±0.01a	3.19±0.14ab	5.29±0.19cd

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示经邓肯氏新复极差检验差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters in the same column indicate the significant difference ($P < 0.05$) by Duncan's new multiple range test.

²⁾ S0, S1, S2, S3, S4: 栽培基质中铜尾矿矿砂的体积分数分别为 0%、25%、50%、75% 和 100% Volume ratio of copper tailing sand in culture substrate is 0%, 25%, 50%, 75% and 100%, respectively.

3 讨论和结论

在受到重金属胁迫时, 植物的生长状况能够直接反映出植物对重金属胁迫的抗性^[6]。因此, 植物的生长指标是分析植物对重金属抗性的重要依据之一。研究表明: 在铜尾矿矿砂体积分数不同的栽培基质中, 黄花苜蓿幼苗的株高、根长以及地上部分和地下部分的干质量均低于对照, 且随铜尾矿矿砂体积分数的提高呈逐渐降低的趋势。说明在铜尾矿矿砂的胁迫下黄花苜蓿幼苗的生长受到一定程度的影响。

光合色素含量的变化在一定程度上反映了植物的光合作用强度, 从而影响植物的生长^[11]。随栽培基质中铜尾矿矿砂体积分数的提高, 黄花苜蓿幼苗叶片的光合色素(包括叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素)含量呈逐渐下降的趋势, 并且在铜尾矿矿砂体积分数 100% 的栽培基质中幼苗的光合色素含量降至最低。说明铜胁迫条件下黄花苜蓿幼苗的叶绿体膜受到破坏、光合色素含量降低, 植株的光合作用受到明显抑制。

超氧阴离子自由基 (O_2^-) 是生物体内氧代谢首先形成的自由基。如果生物体内产生的 O_2^- 过多或机体

对 O_2^- 的清除能力减弱,则将造成机体内 O_2^- 水平升高,从而对机体产生氧化损伤^[12]。黄花苜蓿幼苗地上和地下部分的 O_2^- 含量均随栽培基质中铜尾矿矿砂体积分数的提高而持续上升,说明在铜胁迫条件下黄花苜蓿的组织结构受到损伤,造成细胞膜脂出现过氧化反应,进而产生膜脂过氧化分解产物丙二醛(MDA),导致膜系统的结构和功能受到破坏^[13]。黄花苜蓿幼苗地上部分的MDA含量均高于对照,而地下部分的MDA含量均不低于对照,说明在铜胁迫条件下黄花苜蓿幼苗地上部分细胞膜的膜脂过氧化程度加剧。

在通常情况下,植物可通过启动抗氧化酶系统有效清除体内产生的活性氧、维持活性氧的代谢平衡并保护细胞膜结构,这在一定程度上使植物能够抵御逆境胁迫^[14]。在添加铜尾矿矿砂的栽培基质中,黄花苜蓿幼苗地上和地下部分的过氧化物酶(POD)和超氧化物歧化酶(SOD)活性基本上均显著高于对照,说明在铜胁迫条件下黄花苜蓿幼苗体内的抗氧化酶系统被启动,对黄花苜蓿抗铜胁迫有重要作用。

谷胱甘肽(GSH)和抗坏血酸(AsA)是普遍存在于植物体内的水溶性抗氧化剂,在植物抗氧化胁迫及清除活性氧等方面都有重要作用^[9]。在添加铜尾矿矿砂的栽培基质中,黄花苜蓿幼苗地上和地下部分的GSH含量均高于对照,说明铜胁迫能够促进黄花苜蓿体内GSH的合成,这对增强黄花苜蓿耐铜性有重要作用。栽培基质中添加体积分数25%的铜尾矿矿砂对黄花苜蓿幼苗地上和地下部分AsA的合成有促进作用,而栽培基质中添加体积分数100%的铜尾矿矿砂则抑制了幼苗体内AsA的合成,使幼苗生长受到抑制。

总体上而言,虽然在栽培基质中添加不同体积分数的铜尾矿矿砂对黄花苜蓿幼苗的生长及光合色素含量均有一定的影响,对幼苗的抗氧化系统也有一定的损伤,但在纯铜尾矿矿砂(体积分数100%)中栽植30d,黄花苜蓿幼苗依然能够生长,说明黄花苜蓿具有一定的抗铜胁迫能力,可用于铜尾矿矿砂的绿化固着和铜污染环境的植物修复。

参考文献:

- [1] 吴雪,杨晓婷,王冰,等. 外源乙酸和EDTA对铜尾矿矿砂中芦苇幼苗生长及部分金属元素积累的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2011, 20(4): 29-34.
- [2] 黄铭洪. 环境污染与生态恢复[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 168-169.
- [3] JADIA C D, FULEKAR M H. Phytotoxicity and remediation of heavy metals by Alfalfa (*Medicago sativa*) in soil-vermicompost media[J]. Advances in Natural and Applied Sciences, 2008, 2(3): 141-151.
- [4] 王俊杰,云锦凤,吕世杰. 黄花苜蓿种质的优良特性与利用价值[J]. 内蒙古农业大学学报:自然科学版, 2008, 29(1): 215-219.
- [5] HAN Y L, HUANG S Z, YUAN H Y, et al. Organic acids on the growth, anatomical structure, biochemical parameters and heavy metal accumulation of *Iris lactea* var. *chinensis* seedling growing in Pb mine tailings[J]. Ecotoxicology, 2013, 22(6): 1033-1042.
- [6] HAN Y L, HUANG S Z, YUAN H Y, et al. Effect of Pb and Zn combined stress on the growth and elements accumulation of two different ecotype species of *Iris* L. in artificial contaminated soils [J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2013, 22(5): 1548-1555.
- [7] 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: 134-168.
- [8] KAMPFENKEL K, Van MONTAGU M, INZÉ D. Extraction and determination of ascorbate and dehydroascorbate from plant tissue [J]. Analytical Biochemistry, 1995, 225(1): 165-167.
- [9] MA F W, CHENG L L. The sun-exposed peel of apple fruit has higher xanthophyll cycle-dependent thermal dissipation and antioxidants of the ascorbate—glutathione pathway than the shade peel [J]. Plant Science, 2003, 165(4): 819-827.
- [10] 王爱国,罗广华. 植物的超氧化物自由基与羟胺反应的定量关系[J]. 植物生理学通讯, 1990(6): 55-57.
- [11] 高霁,郝兴宇,居辉,等. 自由大气CO₂浓度升高对夏大豆光合色素含量和光合作用的影响[J]. 中国农学通报, 2012, 28(6): 47-52.
- [12] 李国婧. 超氧阴离子的产生及其在植物体内作用的研究[J]. 生物技术世界, 2012(4): 24-25.
- [13] 张丽丽,赵九洲,赵婷婷,等. 重金属铅和镉对溪荪生理特性的影响[J]. 湿地科学, 2011, 9(2): 198-202.
- [14] LIANG Y C, CHEN Q, LIU Q, et al. Exogenous silicon (Si) increases antioxidant enzyme activity and reduces lipid peroxidation in roots of salt-stressed barley (*Hordeum vulgare* L.) [J]. Journal of Plant Physiology, 2003, 160(10): 1157-1164.

(责任编辑:佟金凤)