

· 试验研究 ·

铜胁迫对粉葛幼苗生长及生理指标的影响

高 昆^{1,2}, 冀中英¹

(1. 山西大同大学 生命科学学院, 山西 大同 037009; 2. 山西大同大学 设施农业技术研发中心, 山西 大同 037009)

摘 要:近年来,由铜导致的土壤污染逐渐加重,严重影响了药用植物的品质。本实验通过水培法,研究施用不同浓度的铜离子对粉葛幼苗生长及生理指标的影响,旨在为粉葛的安全种植提供一定科学依据。研究表明:铜胁迫处理对粉葛幼苗的生长具有低促高抑的作用,在铜离子浓度为 $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,叶片舒展,叶色发绿,生长良好,但当浓度为 $0.06 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时出现叶缘发黄、甚至凋落死亡。随着铜离子浓度增大,叶片的叶长增长率和叶宽增长率均呈先增后降趋势,在 $0.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时达到最大。在生理指标方面,低浓度铜离子($0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)处理时,SPAD 值和可溶性蛋白含量均呈现升高趋势,高浓度铜离子($0.06 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)处理时,两者均呈现降低趋势,且在高浓度下随着铜胁迫处理的时间延长,SPAD 值持续下降。粉葛幼苗中丙二醛含量、相对电导率和可溶性糖的含量均随着铜离子浓度的升高而逐渐增大。

关键词:粉葛;铜胁迫;SPAD 值;丙二醛;可溶性糖

中图分类号:945.78 **文献标识码:**A **文章编号:**0488-5368(2021)10-0001-08

Effect of Copper Stress on Growth and Physiological Indexes of *Pueraria Thomsonii* Benth Seedlings

GAO Kun^{1,2}, JI Zhongying¹

(1. School of Life Science, Shanxi Datong University, Datong, Shanxi 037009, China;

2. Protected Agricultural Technology Development Center, Shanxi Datong University, Datong, Shanxi 037009, China)

Abstract: In recent years, soil pollution caused by copper has been gradually aggravated, which has seriously affected the quality of medicinal plants. In this experiment, the effect of different concentrations of copper ions on the growth and physiological indexes of *Pueraria thomsonii* Benth seedlings was studied by solution culture. The purpose is to provide a scientific basis for the safe cultivation of *P. thomsonii* Benth. The results were as follows: the growth of *P. thomsonii* Benth seedlings was promoted at lower concentration copper stress while it was inhibited at higher concentrations copper stress. At copper ions concentrations of $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $0.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, the leaves were green, stretched, and grew well, but at $0.06 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, leaves showed yellow margins, some leaves even became dying and fell. The growth rate of length and width of leaves were first increased then decreased with the increase of the copper ions concentration, and was maximum at $0.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. In terms of physiological indexes, at low concentration ($0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $0.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) treatment, SPAD values and soluble protein content showed a rising trend, both of them showed a decreasing trend when it was at high concentration ($0.06 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), and the SPAD value gradually decreased as the time of high concentration copper stress was prolonged. The content of malondialdehyde, the relative conductivity and the content of soluble sugar of *P. thomsonii* Benth seedlings increased with the increase of copper ion concentration.

收稿日期:2020-09-07 修回日期:2020-10-20

基金项目:大同市科技局项目(2018174)。

第一作者简介:高昆(1970-),女,山西大同人,硕士,副教授,主要研究方向为植物生理学和生态学。

Key words: *Pueraria thomsonii* Benth; Copper stress; SPAD values; Malondialdehyde; Soluble sugar

铜作为植物体内的微量营养元素之一,对植物进行正常的生命活动是十分重要的^[1],铜也构成了某些金属蛋白酶,参加植物很多的生物反应^[2],但铜过量会破坏细胞膜结构和功能,抑制植物的抗氧化酶系统和植物的光合作用^[3],从而导致植物的生物量减少、生长发育遭到妨碍,严重会引起萎黄病和坏死^[4]。除此之外,含量过高的铜还会对植物矿质营养元素的吸收和运输造成一定的影响^[5]。在韦美玉,熊思,董丽欣等人的研究中发现,低浓度 CuSO_4 对芹菜、玉米幼苗、年幼的苹果树木的正常生长发育具有积极的影响,而高浓度 CuSO_4 对它们会产生一定的阻碍作用,进而导致它们的质量和产量下降^[6-8]。

在现今的生活中,铜的使用量越来越多,导致了铜污染物排放也越来越多,铜已经成为了影响生态环境的元素之一^[9]。根据 2014 年《全国土壤污染调查公报》^[10]的报道显示,铜是耕地和金属冶炼工业园区及其周边土壤的主要污染物^[11]。一般情况下,土壤中铜的总含量为 $15\sim 40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,但当土壤中铜的总含量为 $150\sim 400\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,会给植物带来毒害作用^[6]。

葛(*Pueraria lobata*)是多年生豆科(Leguminosae)藤本植物,主要分布于热带和温带,中国拥有丰富的葛属植物种质资源,约有 9 个种,2 个变种,其中野葛(*Pueraria lobata* (Willd.) Ohwi)和粉葛(*Pueraria lobata* (Willd.) Ohwi var. *thomsonii* (Benth.) Vaniot der Maesen)在中国的开发应用最广,分布也最广^[12]。葛的各部分均具有使用价值,葛的根、叶、花都可以入药,葛根还可以被开发为保健食品;葛藤纤维可用于织物与造纸;葛叶可被用作天然的优质饲料。除此之外,葛还具有保持和改良水土的生态作用^[12-13]。并且在本次新冠肺炎疫情中,葛根汤颗粒在预防以及早期治疗过程中发挥了重要作用。

实验选用的葛品种是粉葛(*P. thomsonii* Benth),它的叶呈绿色,块根比较粗大、形状类似长棒形或纺锤形^[14]。粉葛适合生长在相对温暖、湿润的气候,能抵抗一定程度的寒冷和干旱^[15]。它的适应性也比较广,病虫害也相对较少,在大多数土壤中均可栽培,但黏土与碱性土除外^[15]。粉葛的主要利用部位是根部,即葛根。葛根的地上部分含有葛根素^[16],在临床上被大量应用,可用于治疗冠心病、偏头痛等^[17]。研究表明,葛根可以使

心率减慢,血压降低^[18],还可以使脑血管扩张,改善大脑供氧^[19]。除此之外,葛根也能够使脑微循环障碍得到改善,降低血脂,调节血糖^[20]。

近些年来,葛在发掘种质资源、改善栽培技术以及临床应用等方面的研究颇多,还未见重金属胁迫对葛幼苗生长和生理特性的影响方面的报道。本实验研究铜胁迫时对粉葛生长及其生理指标的影响,以期为葛根安全规范种植和保证药材的品质提供一定的理论根据。

1 材料与方法

1.1 材料

本实验所选用的粉葛幼苗购买于广西藤县绿州农业发展有限公司,所购的幼苗带有一部分根和叶。

1.2 方法

1.2.1 粉葛幼苗的栽培 挑选粗细一致且无病虫害的粉葛幼苗,先用自来水冲洗至洁净,然后置于装有常温自来水的透明玻璃瓶中培养 5 d,进行缓苗。

1.2.2 粉葛幼苗的铜胁迫 Cu^{2+} 以 $\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 的形式提供,选取生长势基本一致的粉葛幼苗,并将其分成 5 组,每组 3 瓶,每瓶 2 株,5 组分别如下:

处理①——对照(不施 CuSO_4 溶液);

处理②——施 $0.01\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{ CuSO}_4$ 溶液;

处理③——施 $0.03\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{ CuSO}_4$ 溶液;

处理④——施 $0.06\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{ CuSO}_4$ 溶液;

处理⑤——施 $0.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{ CuSO}_4$ 溶液;

②~⑤组各添加 100 mL 上述浓度的 CuSO_4 溶液,①组添加 100 mL 的蒸馏水作为对照。每瓶上做好溶液体积的刻度标记,胁迫处理期间,若溶液体积低于刻度线,则需要及时添加适量的蒸馏水以补充损失的水分,保持铜离子浓度恒定。在铜胁迫 0 d, 3 d, 6 d, 9 d, 12 d 时,对 5 组分别取样测定。

1.2.3 形态观察 观察并记录各组粉葛幼苗铜胁迫处理 12 d 后叶片的形态特征,并将铜胁迫对粉葛幼苗的影响程度分为 5 个级别:

1 级——叶尖、叶缘焦枯并有小部分叶脱落;

2 级——叶尖、叶缘变黄;

3 级——生长正常(无叶尖、叶缘变黄和叶片脱落现象);

4 级——小部分叶片舒展、叶色浓绿;

5 级——大部分叶片舒展、叶色浓绿。

1.2.4 测定生长指标 叶长、叶宽的增长率:各组随机选取3株幼苗,在铜胁迫0 d,3 d,12 d时,用直尺测定同一叶位同一叶片的叶长、叶宽(精确到0.1 cm),并计算增长率(A),计算方法按潘雪峰^[21]的方法测定,方法如下:

$$A = \frac{D - C}{C} \times 100\%$$

式中,A——叶长(或叶宽)的增长率,C——铜胁迫0d时的叶长(或叶宽),D——铜胁迫3 d,12 d的叶长(或叶宽)。

1.2.5 测定各项生理指标 各组随机摘取粉葛幼苗长势相近的叶片,然后测定各项生理指标。处理①~⑤各重复3次,各指标及其测定的方法如下:

(1)在铜胁迫3 d,6 d,9 d,12 d后用SPAD-502PLUS叶绿素计测定叶片铜胁迫下的SPAD值;

表1 不同浓度铜离子对粉葛幼苗叶片的影响程度及叶片症状

Cu ²⁺ 浓度/(mg · L ⁻¹)	叶片症状	等级
0	生长正常	3
0.01	小部分叶片舒展、叶色浓绿	4
0.03	大部分叶片舒展、叶色浓绿	5
0.06	叶尖、叶缘变黄	2
0.1	叶尖、叶缘焦枯并有小部分叶脱落	1

2.2 铜胁迫对粉葛幼苗生长指标的影响

由图1可知,粉葛幼苗叶片的叶长增长率表现出先升高后下降的趋势,并且在高浓度铜离子处理的条件下,时间越长,浓度越大,叶长增长率下降越明显,处理②~⑤组与对照组均形成极显著差异($P < 0.01$)。在处理3 d时,处理③的粉葛幼苗叶片的叶长增长率达到最大值,为8.33%,而处理⑤的叶长增长率降至最低,为6.80%。在处理12 d时,粉葛幼苗叶片的叶长增长率在处理③和处理⑤条件下,分别达到最大和最小值,分别为8.54%、6.67%。当施用的铜离子浓度低于0.03 mg ·

(2)在铜胁迫12 d后按照考马斯亮蓝G-250染色法测定可溶性蛋白质含量^[22];

(3)在铜胁迫12 d后采用硫代巴比妥酸法测定丙二醛(MDA)含量和可溶性糖含量^[23];

(4)在铜胁迫12 d后采用电导仪法^[24]测定膜的相对透性。

1.2.6 数据处理 用SPSS 19.0进行显著性分析,用Excel 2010进行绘图。

2 结果与分析

2.1 铜胁迫对粉葛幼苗外观形态的影响

由表1可知,铜离子浓度不同,对粉葛幼苗生长形态的影响有所不同,其中0.01 mg · L⁻¹和0.03 mg · L⁻¹浓度下,粉葛幼苗叶片的外观形态良好,而0.06 mg · L⁻¹和0.1 mg · L⁻¹浓度下,粉葛幼苗叶片的外观形态与对照组相比较差。

L⁻¹时,处理12 d的叶长增长率均高于3 d,而当施用的铜离子浓度高于0.03 mg · L⁻¹时,处理12 d的叶长增长率均低于3 d。根据表2可知,处理天数和处理浓度之间存在交互,浓度的作用效果十分显著,而天数的作用并不明显。处理12 d并且处理浓度为0.03 mg · L⁻¹的条件对粉葛幼苗的促进效果最明显,而在处理12 d且外施铜离子浓度为0.1 mg · L⁻¹时,对粉葛幼苗的抑制作用最显著。这说明,低浓度铜离子会促进粉葛幼苗的生长,而高浓度铜离子则会抑制其生长。

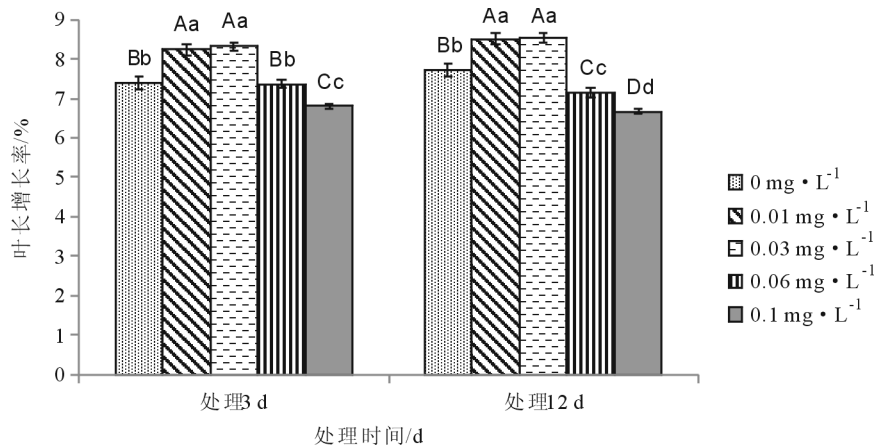


图1 不同浓度铜离子对粉葛幼苗叶长增长率的影响

表 2 主体间效应的检验

因变量:叶长

源	Ⅲ型平方和	df	均方	F	Sig.
浓度	12.911	4	3.228	188.862	0.000
天数	0.061	1	0.061	3.555	0.074
浓度 * 天数	0.391	4	0.098	5.716	0.003
误差	0.342	20	0.017		
总计	1 778.418	30			

由图 2 可知,粉葛幼苗叶片的叶宽增长率呈先上升后下降的趋势,并且在高浓度铜离子处理的条件下,时间越长,浓度越大,叶宽增长率下降并不明显,各组与对照组均形成极显著差异($P < 0.01$)。在处理 3 d 时,处理③的粉葛幼苗叶片的叶宽增长率达到最大值,为 8.76%,而处理⑤的叶宽增长率降至最低,为 7.66%。在处理 12 d 时,粉葛幼苗叶片的叶宽增长率在处理③和处理⑤条件下,分别达到最大和最小值,分别为 8.83%、7.64%。在铜离子浓度低于 $0.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,处理 12 d 的叶

宽增长率均高于 3 d,而当铜离子浓度高于 $0.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,处理 12 d 的叶宽增长率与处理 3 d 相差不大,并无显著差异。根据表 3 可知,浓度和天数之间存在交互,浓度和天数的作用效果均比较显著。处理 12 d 并且处理浓度为 $0.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的条件对粉葛幼苗的促进效果最明显,而在处理 12 d 且外施铜离子浓度为 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,对粉葛幼苗的抑制作用最显著。这说明铜胁迫对粉葛幼苗的生长具有低促高抑的作用。

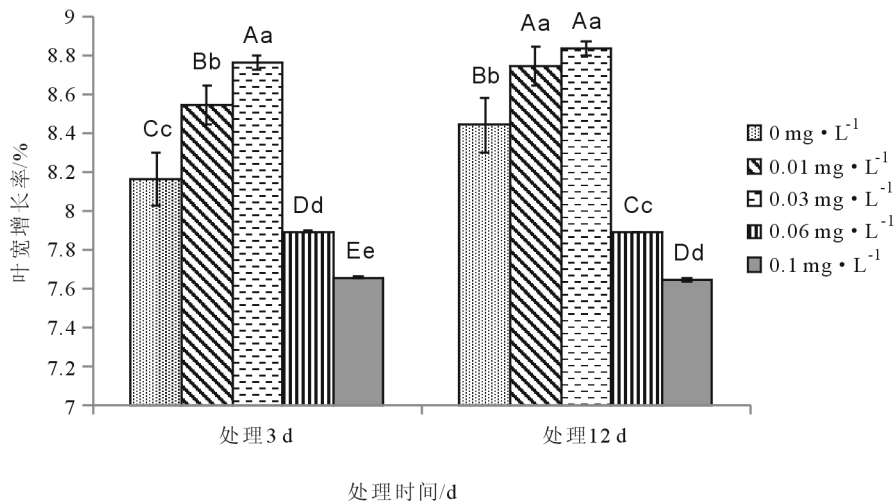


图 2 同浓度铜离子对粉葛幼苗叶宽增长率的影响

表 3 主体间效应的检验

因变量:叶宽

源	Ⅲ型平方和	df	均方	F	Sig.
浓度	5.677	4	1.419	271.552	0.000
天数	0.084	1	0.084	16.123	0.001
浓度 * 天数	0.098	4	0.025	4.696	0.008
误差	0.105	20	0.005		
总计	2 051.306	30			

2.3 铜胁迫对粉葛幼苗生理指标的影响

2.3.1 对粉葛幼苗 SPAD 值的影响 SPAD 值能够用来反映粉葛幼苗叶片的叶绿素含量。由图 3 可知,在施用低浓度铜离子的条件下,SPAD 值随着时间的延长呈上升趋势,而在高浓度铜离子处理条件下,SPAD 值则随着时间的增加表现出下降趋势,并且时间越长,浓度越大,下降程度越明显。在处理②和处理③中,时间越长,SPAD 值越大,且均与对照组(处理①)形成极显著差异($P < 0.01$),处理③比处理②增加的程度更大。在处理②中,SPAD 值升至最高为 46.87,在处理③中,SPAD 值升至最高为 48.63。在处理④和处理⑤中,随着时

间的增加,SPAD 值表现出下降的趋势,并且两个处理组均与对照呈极显著差异($P < 0.01$)。在处理④中,SPAD 值降至 36.53,达到最小值,处理⑤中的 SPAD 值均低于处理④,并且最小值为 33.60。根据表 4 可知,处理浓度和处理天数之间存在交互,并且浓度和天数的作用效果均十分显著。在处理 12 d 并且处理浓度为 $0.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的条件下,粉葛幼苗的 SPAD 值增幅最明显,而在处理 12 d 且外施铜离子浓度为 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,粉葛幼苗的 SPAD 值的降低最显著。这说明,粉葛幼苗能抵抗一定浓度的铜胁迫,但超过一定限度后,SPAD 值会出现下降,即叶绿素含量下降。

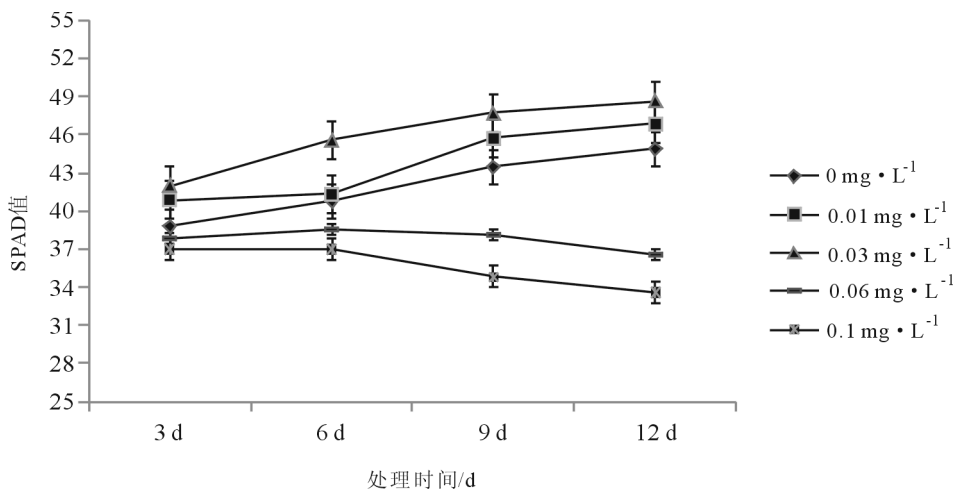


图 3 不同浓度铜离子对粉葛幼苗 SPAD 值的影响

表 4 主体间效应的检验

因变量:SPAD

源	Ⅲ型平方和	df	均方	F	Sig.
浓度	869.649	4	217.412	192.372	0.000
天数	77.389	3	25.796	22.825	0.000
浓度 * 天数	182.995	12	15.250	13.493	0.000
误差	45.207	40	1.130		
总计	10 2051.640	60			

2.3.2 对粉葛幼苗可溶性蛋白含量的影响 由图 4 可知,粉葛幼苗叶片中可溶性蛋白质的含量会随着 Cu^{2+} 浓度的增加而表现出先增加后下降的趋势,并且与对照组形成极显著差异($P < 0.01$),处理②与处理③的增幅并没有明显差异。处理②~处理⑤可溶性蛋白的含量分别为 $16.43 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $17.13 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $13.90 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $13.16 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,并且在 $0.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 铜离子处理条件下,粉葛幼

苗叶片的可溶性蛋白质含量达到最大,与对照相比升高了 13.57%,而在 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 铜离子处理条件下,可溶性蛋白质含量降至最小值,比对照组降低了 12.73%。这说明,低浓度 Cu^{2+} 可以提高粉葛幼苗中可溶性蛋白质的含量,而高浓度 Cu^{2+} 会使粉葛幼苗中的可溶性蛋白质的含量出现下降的情况。

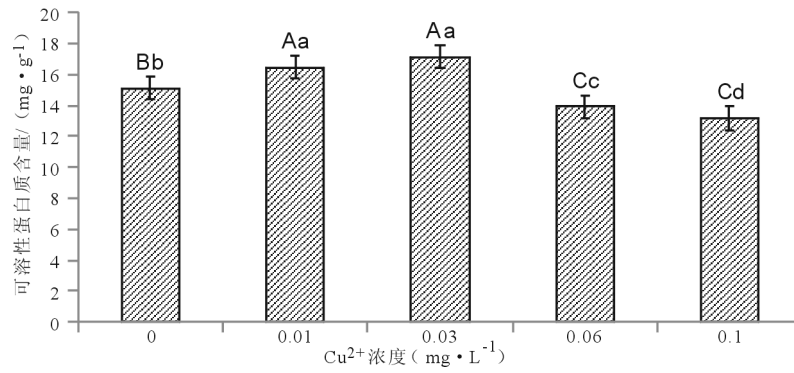


图 4 不同浓度铜离子对粉葛幼苗可溶性蛋白质含量的影响

2.3.3 粉葛幼苗丙二醛(MDA)、膜相对透性的变化 由图 5 可知,粉葛幼苗叶片中的 MDA 会随着 Cu^{2+} 浓度的升高而表现上升趋势,其中处理②、处理③与对照组之间没有形成显著差异($P>0.05$),处理④和处理⑤与对照组差异极显著($P<0.01$),处理④与处理⑤之间没有很明显的差别。在外施的铜离子浓度为 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,粉葛幼苗叶片的 MDA 含量升到最高,并且比对照组提高了 31.18%。这说明,外施铜离子会使粉葛幼苗叶片的 MDA 含量提高,并且铜离子浓度越大,MDA 含量

的提高,从一定程度上反映了细胞膜的受害程度。

膜的透性可以用电导率来反映^[33]。图 6 反映出,粉葛幼苗叶片的相对电导率表现出升高的趋势,其中处理②与对照组(处理①)之间没有形成显著差异($P>0.05$),处理③~④组均与对照呈极显著差异($P<0.01$),各组之间均有明显的差别。在处理⑤时,相对电导率上升到最大,为 29.61%,比对照组提高了 181.73%。这说明,高浓度铜离子会损伤粉葛幼苗的细胞膜。

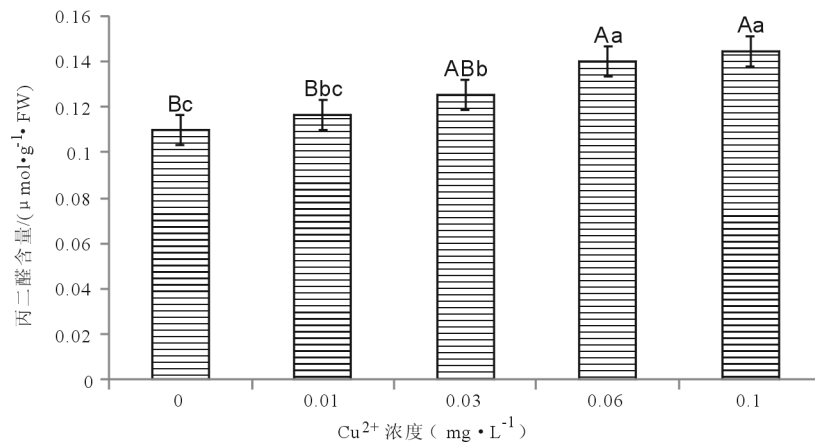


图 5 不同浓度铜离子对粉葛幼苗丙二醛含量的影响

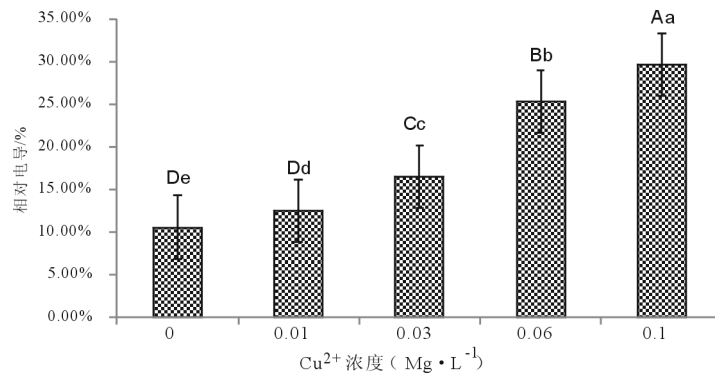


图 6 不同浓度铜离子对粉葛幼苗相对电导率的影响

2.3.4 对粉葛幼苗糖含量的影响 从图 7 可以得到,随着铜离子浓度增大,粉葛幼苗叶片中的可溶性糖含量逐渐攀升,铜离子浓度达到 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,增幅最明显,处理②、处理③与对照组形成的差

异并没有那么显著($P>0.05$),处理④与对照组形成了较为显著的差异($P<0.05$),处理⑤则与对照组形成了极显著差异($P<0.01$)。处理②~处理⑤可溶性糖的含量分别为 $0.38 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot$

FW、 $0.40 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{FW}$ 、 $0.44 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{FW}$ 、 $0.60 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{FW}$,相对于对照组(处理①)分别增加了 5.04 %、12.89 %、22.97 %、68.

52 %。这说明铜离子浓度高低会影响粉葛幼苗中可溶性糖的含量。

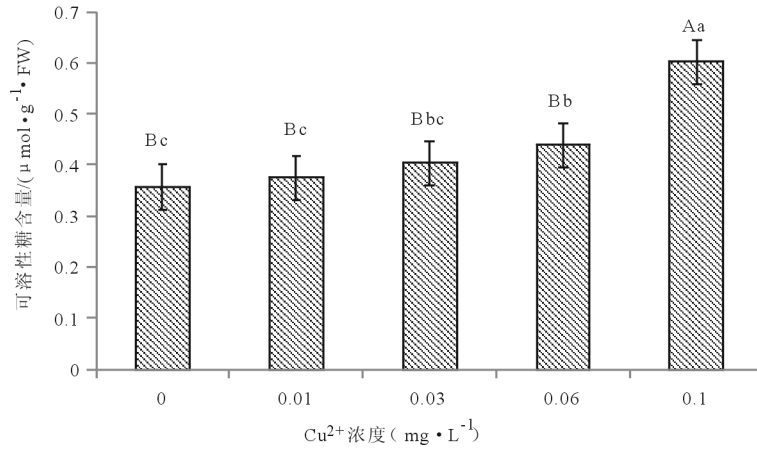


图7 不同浓度铜离子对粉葛幼苗可溶性糖含量的影响

3 结论与讨论

重金属的毒害作用会导致植物体内的生命活动发生混乱,从而阻碍植物的生长,严重会引起死亡。然而,大部分植物都会对重金属的毒害作用表现出应激保护效应,如植物具备的细胞渗透调节机制^[26],提供重金属离子的附着位点^[4],液泡隔离、吸收重金属离子^[4]等。铜离子在不同植物中的含量不同,粉葛中铜含量为 $0.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[27]。

本研究发现,粉葛幼苗在低浓度铜离子条件下 ($0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),叶片长势好,叶色浓绿,然而,随着铜离子浓度的增加叶尖、叶缘逐渐变黄、焦枯,甚至有一小部分脱落死亡。除此之外,本研究还发现,随着铜离子浓度的逐渐上升,粉葛幼苗叶片的叶长和叶宽增长率均呈现出先升后降的趋势,这与潘雪峰^[21]、赵艳^[28]、周娜娜^[29]等人的研究结果一致,并且在铜离子浓度达到 $0.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,叶长和叶宽的增长率均达到最大值。这可能是由于在低浓度铜离子处理条件下,激活了粉葛幼苗的抗逆性反应,从而促进了其叶片的生长,而高浓度的铜离子会使植物体内的代谢紊乱,从而阻碍了叶片的生长。

根据乔润雨^[30]、宋慧^[31]等人的报道显示,用 SPAD 值来反映不同蔬菜和甜瓜幼苗不同位置叶片的叶绿素含量是可靠的,两者之间表现有正相关性^[32],并且方法操作简单。本研究发现,低浓度铜离子处理条件下,SPAD 值随着时间的延长而逐渐上升,但是,在施用高浓度铜离子的情况下,SPAD 值则会随着时间的增加而逐渐下降,并且时间越长,浓度越大,下降越明显。这说明,低浓度铜离子会促进叶绿素含量的增加,而高浓度铜离子则会降

低叶绿素含量。这可能是由于铜是电子传递链中的质体蓝素的组成成分^[33],并且少量的铜离子有助于叶绿素的合成。但是,铜离子不是越多越好,铜离子浓度过高一方面会引起铜离子替代叶绿素中的镁离子,从而阻碍了叶绿素的合成,另一方面也会破坏叶绿体的结构,影响类囊体膜的组成和光系统之间的协调功能,最终妨碍了光合作用的进行^[26]。

本研究发现,粉葛幼苗叶片中的可溶性蛋白质含量在低浓度铜离子条件下有所增加,而在高浓度铜离子处理条件下则显著下降,这与朱健^[34]等人的研究结果一致。表现出这种趋势的原因可能是在粉葛幼苗体内产生了一些抵抗逆境胁迫的蛋白,使得可溶性蛋白质含量升高。然而,铜离子的积累会阻碍蛋白质的正常合成,最终导致可溶性蛋白质的含量出现降低的情况。

膜脂过氧化作用的产物主要是 MDA^[35]。用电导率来反映质膜透性也是可靠的,它们之间表现有一定的正相关。因此,以上两种方法均可以用来衡量粉葛幼苗细胞膜受铜胁迫伤害的程度。本研究发现,无论是丙二醛含量还是相对电导率都在逐渐上升,与赵淑玲^[33]、马晓华^[26]等人的研究结果一致。这可能是由于铜胁迫造成粉葛幼苗细胞膜受到破坏,从而造成丙二醛含量增加,与此同时,膜的透性程度增加,引起一些电解质向胞外渗出,相对电导率也相应增大。

可溶性糖是植物在逆境条件下为保护细胞的渗透调节物质^[35]。本次的研究发现,可溶性糖的含量会随着铜离子浓度的不断增大而逐渐升高,这可能是由于粉葛幼苗为提升细胞的渗透调节能力而采取的一种手段。综上,铜胁迫会影响粉葛幼苗

的生长及生理指标,铜离子浓度低时,会促进粉葛幼苗的生长及生理响应,而高浓度的铜离子会使叶绿素和可溶性蛋白的含量出现降低的情况,电解质也易向胞外渗出,同时产生了MDA和可溶性糖,从而阻碍了粉葛幼苗的正常生长发育。

参 考 文 献:

- [1] 李蕊蕊,赵明柳,董海霞,等. 生物炭对铜污染土壤的修复及水稻Cu累积的影响[J/OL]. 生态与环境学报, 2020: 1-18.
- [2] 公勤,康群,王玲,等. 重金属铜对植物毒害机理的研究现状及展望[J]. 南方农业学报, 2018, 49(03): 469-475.
- [3] 公勤,王玲,戴同威,等. 铜处理对菠菜幼苗矿质营养吸收和细胞超微结构的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(03): 941-950.
- [4] 林爱军,王凤花,谢文娟,等. 土壤铜污染对植物的毒性研究进展[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(35): 21740-21742, 21847.
- [5] 朱成豪,唐健民,高丽梅,等. 重金属铜、锌、镉复合胁迫对麻疯树幼苗生理生化的影响[J]. 广西植物, 2019, 39(06): 752-760.
- [6] 董丽欣,李保国,齐国辉,等. 土壤铜、硫污染对苹果幼树生长发育的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(06): 198-201+206.
- [7] 韦美玉,刘丽萍. 铜污染对芹菜生长及生理特性的影响[J]. 北方园艺, 2011, (09): 33-36.
- [8] 熊思,林爱军,宋亮,等. 铜污染对玉米幼苗的毒性及其机制研究[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2013, 40(06): 82-87.
- [9] 许志敏,刘燕珍,陈琳,等. 铜锌复合胁迫对8种观赏草种子萌发特性及幼苗生长的影响[J]. 河南农业科学, 2020, 49(03): 129-137.
- [10] 全国土壤污染状况调查公报(2014年4月17日)[J]. 环境教育, 2014(06): 8-10.
- [11] 张黛静,杨惠荔,马建辉,等. 外源Si、NO对铜胁迫下小麦幼苗根系生长及光合作用的影响[J]. 河南农业科学, 2019, 48(12): 37-43.
- [12] 梁洁,李琳,唐汉军. 葛的功能营养特性与开发应用现状[J]. 食品与机械, 2016, 32(11): 217-224.
- [13] 丁艳芳. 葛藤的价值及其开发前景[J]. 西北林学院学报, 2003, 18(03): 86-89.
- [14] 王婷,胡亮,李桂花. 优质粉葛栽培技术[J]. 北方园艺, 2011(06): 62-63.
- [15] 胡晓鹏,胡海强,郑云. 葛根高产栽培技术[J]. 现代农业科技, 2009(13): 129.
- [16] 王允亮,叶杨,程佳伟,等. 葛根素和小檗碱联合用药干预NASH细胞模型的实验研究[J]. 中国中西医结合消化杂志, 2015, 23(05): 321-326.
- [17] 杨晓春,宛晓春,万平,等. 葛根的研究及其开发前景[J]. 林业科技通讯, 1996(01): 16-17.
- [18] 丁友芳,张晓霞,史玲玲,等. 葛根净光合速率日变化及其与环境因子的关系[J]. 北京林业大学学报, 2010, 32(05): 132-137.
- [19] 魏立明. 三种中药制剂对卡马西平药动学及药效学的影响研究[D]. 兰州大学, 2013.
- [20] 杨永红,韦建荣,李崇兴,等. 葛根研究进展[J]. 中兽医医药杂志, 2008(03): 71-74.
- [21] 潘雪峰,李明,赵盼,等. 铜胁迫对穿心莲幼苗生长及生理特性的影响[J]. 植物科学学报, 2015, 33(02): 218-225.
- [22] 陈明涛,赵忠,权金城. 干旱对4种苗木根尖可溶性蛋白组分和含量的影响[J]. 西北植物学报, 2010, 30(06): 1157-1165.
- [23] 何天友,于增金,沈少炎,等. 花吊丝竹对干旱胁迫的光合和生理响应[J]. 森林与环境学报, 2020, 40(01): 68-75.
- [24] 石贵玉,梁士楚,黄雅丽,等. 互花米草幼苗对重金属镉胁迫的生理响应[J]. 广西植物, 2013, 33(06): 812-816.
- [25] 陈祥伟,刘才,王恩姮. Ca²⁺和K⁺对紫椴叶片渗透调节指标的影响[J]. 东北林业大学学报, 2007(07): 1-3.
- [26] 马晓华,张旭乐,钱仁卷,等. 镉与铜胁迫下无柄小叶榕的生理响应[J]. 森林与环境学报, 2019, 39(02): 194-200.
- [27] 袁鹏. 粉葛组织培养及其铜、铅、镉含量研究[D]. 西南交通大学, 2011.
- [28] 赵艳,徐迎春,柴翠翠,等. 铜胁迫对狭叶香蒲生长及生理特性的影响[J]. 广西植物, 2010, 30(03): 367-372.
- [29] 周娜娜,武耀廷,高华援,等. 铜胁迫对花生幼苗生长及生理代谢的影响[J]. 东北农业科学, 2019, 44(06): 6-9.
- [30] 乔润雨,刘文锋,刘泽群,等. 绿色蔬菜叶片叶绿素含量与SPAD值相关性研究[J]. 国土与自然资源研究, 2018(01): 80-82.
- [31] 宋慧,黄芸萍,臧全宇,等. 甜瓜幼苗不同叶位SPAD值与叶绿素含量的变化规律及相关性[J]. 华北农学报, 2019, 34(S1): 99-104.
- [32] 田发祥,谢运河,柳赛花,等. 不同氮肥抑制剂对湖南早稻生产的影响[J]. 湖南农业科学, 2018(11): 46-49.
- [33] 赵淑玲,王瀚,王让军,等. Cu²⁺胁迫对花椰菜种子的萌发及幼苗生理特性的影响[J]. 北方园艺, 2017(05): 16-20.
- [34] 朱健,张志红,范菲菲,等. 铜胁迫对海菜花幼苗生理特征的影响[J]. 江苏农业学报, 2015, 31(04): 883-886.
- [35] 张志雯,秦素平,陈于和,等. 硅对铬、铜胁迫下小麦幼苗生理生化指标的影响[J]. 华北农学报, 2014, 29(S1): 229-233.