

曹 萌,南冠君,高玉琼,等. 重金属对豌豆幼苗抗性生理指标的影响[J]. 江苏农业科学,2019,47(7):161-165.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.07.039

重金属对豌豆幼苗抗性生理指标的影响

曹 萌,南冠君,高玉琼,郭利影,孟宪鑫,杨广德

(西安交通大学药学院,陕西西安 710061)

摘要:通过水培试验,研究不同浓度的汞(Hg)、铜(Cu)、镉(Cd)、铬(Cr)、铅(Pb)单一胁迫对豌豆幼苗抗性生理指标的影响,结果表明,随 Hg、Cr 胁迫浓度的增加,豌豆幼苗根长呈先增后减趋势,随 Cu、Cd、Pb 胁迫浓度的增加,豌豆幼苗根长呈减小趋势;豌豆幼苗对重金属的富集能力大小依次为 $Cd > Hg > Pb > Cu > Cr$,各器官重金属积累量变化顺序为根 > 茎 > 叶,且随重金属浓度的增加而增加;随重金属胁迫浓度的增加,叶绿素、脯氨酸含量及超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性大致呈先升后降趋势,MDA 含量大致呈增加趋势;随 Cu、Cd、Pb 胁迫浓度的增加,幼苗可溶性蛋白含量大致呈下降趋势,随 Hg、Cr 胁迫浓度的增加,可溶性蛋白含量呈先升后降趋势。因此,低浓度重金属胁迫可提高豌豆幼苗的抗氧化能力,幼苗呈一定的抗逆性,但对不同重金属的抗性大小存在差异,豌豆幼苗可用于 Hg 污染环境的治理。

关键词:豌豆;重金属;汞;铜;富集能力;抗性生理指标

中图分类号: S643.301 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)07-0161-05

近年来,随着金属矿山的大量开采,冶金工业和工农业生产的迅速发展,大量重金属元素进入土壤和水源,导致土壤、水体和生物受到不同程度的重金属污染^[1-2],造成土壤生产力下降、农产品被污染、生态环境遭受破坏,同时,重金属通过植物吸收并经食物链进入人体,并威胁人类健康^[3]。因此,科学预测与评价重金属环境污染,提出科学的重金属治理措施具有十分重要的意义。

汞(Hg)、铜(Cu)、镉(Cd)、铬(Cr)、铅(Pb)等是农业生产中较为常见的 5 种重金属,会与蛋白质结合,抑制酶的活性,或破坏质膜的选择透性,阻碍植物正常代谢,对植物造成不同程度的伤害。国内外有关于重金属胁迫对植物体可溶性蛋白、丙二醛(MDA)、游离脯氨酸(Pro)含量及超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性等影响的研究报道。简敏非等研究 Cd、Pb 胁迫对丁香蓼生理生化影响时发现,Cd、Pb 可抑制丁香蓼的生长,且随污染物浓度的增加而抑制作用增强^[4]。夏吉林等研究重金属 Zn、Cu、Pb 胁迫对长鬃蓼部分抗性生理指标的影响时发现,长鬃蓼对 Zn、Cu、Pb 的抗性不同^[5]。Tang 等研究高浓度 Cr 胁迫对茶树生理生化指标变化时发现,高浓度 Cr 胁迫对茶树的正常代谢、功能和细胞结构有较强的抑制和破坏作用^[6]。Imtiyaz 等研究钴(Co)、Pb 胁迫对大豆生理指标的影响时发现,Co、Pb 胁迫可显著降低种子发芽率、幼苗生长和生物量^[7]。

豌豆(*Pisum sativum* L.)是世界第四大豆类作物,其蛋白质含量较高,一般可作为人类食品和动物饲料^[8-9]而被广泛食用。目前,Hg、Cu、Pb、Cd、Cr 等 5 种重金属胁迫对豌豆幼

苗不同器官生理指标影响的研究鲜见报道。本试验以豌豆幼苗为材料,测定 Hg、Cu、Cd、Cr、Pb 不同浓度胁迫下豌豆幼苗叶、茎、根不同器官对重金属吸收积累的影响,探讨其抗性生理指标的变化,为豌豆的无害化栽培及重金属污染预测、安全性评价和治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与仪器

游离蛋白质、MDA、SOD、POD、CAT、Pro 检测试剂盒,购于南京建成生物工程研究所;磷酸氢二钠、磷酸二氢钠、乙醇、氯化钠,均为分析纯等级。SP-752 型紫外可见分光光度计,由上海光谱仪器有限公司生产;福立 AA1700 型原子吸收分光光度计,由浙江省福立分析仪器有限公司生产。

1.2 试验方法

试验于 2017 年 5—7 月在西安交通大学药学实验教学中心进行。当年产豌豆种子,0.2% $KMnO_4$ 溶液漂洗 15 min 进行表面消毒;豆芽机中 25 ℃ 去超纯水发芽培养 7 d 左右,待幼苗长到 2 叶 1 心时,将其分别转入含有 4 种不同浓度的重金属溶液中继续培养,观察幼苗生长变化情况。Hg 的使用浓度分别为 0(control group,CG)、1、2、5 mg/L,Cu 的使用浓度分别为 0(CG)、15、30、45 mg/L,Cd 的使用浓度分别为 0(CG)、4、8、10 mg/L,Cr 的使用浓度分别为 0(CG)、5、10、15 mg/L,Pb 的使用浓度分别为 0(CG)、20、40、80 mg/L。重金属胁迫处理后 4 d,测定豌豆幼苗各生化指标及生物量。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 形态指标 采用直尺测量豌豆幼苗的根长度,称量其湿质量;烘箱中 105 ℃ 杀青 15 min,80 ℃ 干燥至恒质量,称量其干质量。

1.3.2 幼苗中的重金属含量 幼苗用自来水冲洗,浸入 20 mmol/L 乙二胺四乙酸(EDTA)溶液 10 min 以除去表面吸附的金属;超纯水洗涤,烘箱中干燥;研磨,称质量,用硝酸、过

收稿日期:2018-01-04

基金项目:国家自然科学基金(编号:81373368)。

作者简介:曹 萌(1992—),女,陕西咸阳人,硕士研究生,从事中药物质基础分析研究。E-mail:caomengpax@163.com。

通信作者:杨广德,博士,教授,从事中药物质基础分析研究。Tel:(029)82657833;E-mail:jmw52@xjtu.edu.cn。

氧化氢体积比为 4∶1 的混合液消化;采用原子吸收光谱法分析消化液中的重金属元素含量,仪器参数设置及分析条件见表 1;计算豌豆幼苗对重金属的蓄积能力,公式为

蓄积能力 = (C_{max} - C_{c0})/C_{max}。

表 1 元素分析方式及仪器工作条件

重金属种类	分析方法	灯电流 (mA)	负高压 (V)	波长 (nm)	狭缝宽度 (nm)	其他条件
汞	氢化物发生法	1	350	253.7	0.4	载气:氩气,分压为 0.25 MPa;还原剂:1% KBH ₄ 和 0.1% NaOH 混合溶液;载液:1% HCl 溶液
铜	火焰原子吸收法	4	255	324.8	0.2	火焰类型:空气-乙炔火焰;乙炔流量:1.3 L/min,空气流量:15 L/min
铬	火焰原子吸收法	3	350	357.9	0.2	火焰类型:空气-乙炔火焰;乙炔流量:1.5 L/min,空气流量:15 L/min
镉	石墨炉原子吸收法	4	365	228.8	0.2	干燥:温度 100 ℃ 持续 10 s;灰化:温度 300 ℃ 持续 10 s;原子化:温度 1 700 ℃ 持续 3 s
铅	石墨炉原子吸收法	4	375	283.3	0.2	干燥:温度 100 ℃ 持续 10 s;灰化:温度 400 ℃ 持续 10 s;原子化:温度 2 000 ℃ 持续 3 s

1.3.3 生化指标 采用混合液法测定叶绿素含量^[10-11];分别采用考马斯亮蓝 G-250 染色法、硫代巴比妥酸(TBA)法、氮蓝四唑(NBT)法、愈创木酚比色法、紫外吸收法测定可溶性蛋白含量、MDA 含量、SOD 活性、POD 活性、CAT 活性;采用酸性茚三酮法测定游离脯氨酸(Pro)含量。所有测定均按检测试剂盒中的操作方式进行。

1.4 统计分析

采用 SPSS 18.0 软件对数据进行统计分析,采用 LSD 法进行多重差异显著性比较。

2 结果与分析

2.1 重金属胁迫对豌豆幼苗形态指标的影响

试验表明,重金属溶液胁迫培养 4 d,豌豆幼苗受重金属毒害症状最先在植株根部表现出来,重金属浓度较低时,须根根尖部发黑,幼苗受到轻度伤害,随胁迫浓度的增加,整个须根发黑,有些甚至腐烂。由表 2 可见,随 Cu、Cd、Pb 胁迫浓度的增加,豌豆幼苗根长总体呈逐渐减小趋势,相应最高浓度胁迫时豌豆幼苗根长分别比对照(0 mg/L)处理短了 11.2%、26.7%、16.5%,这说明豌豆幼苗对 Cu、Cd、Pb 胁迫较为敏感;随 Hg、Cr 胁迫浓度的增加,豌豆幼苗根长总体呈先增加后减小趋势,这说明低浓度 Hg、Cr 胁迫对豌豆幼苗生长有一定的促进作用,幼苗对重金属 Hg、Cr 的耐受性相对较强。

2.2 重金属在豌豆幼苗不同器官中的积累与分布

试验结果表明,豌豆幼苗对 Hg、Cu、Cd、Cr、Pb 的蓄积能力分别为 24.62、11.70、288.16、6.96、20.78,大小依次为 Cd>Hg>Pb>Cu>Cr。由表 3 可见,随 Hg 胁迫浓度的增加,豌豆幼苗茎、根部重金属含量有显著增加(P<0.05);随 Cu 胁迫浓度的增加,豌豆幼苗不同器官中 Cu 含量呈显著上升后逐渐下降趋势;随 Cd 胁迫浓度的增加,豌豆幼苗叶中的 Cd 含量呈先升后降趋势,茎、根中 Cd 含量明显增加趋势;随 Cr、Pb 胁迫浓度的增加,豌豆幼苗叶、茎中的 Cr、Pb 含量呈先升后降趋势,根中 Cr、Pb 含量较对照有显著增加;幼苗中根部的重金属含量高于地上部分,豌豆幼苗不同器官对重金属的吸收能力大小顺序为根>茎>叶。

式中:C_{max}为最大胁迫浓度时整株幼苗体内的重金属含量;C_{c0}为对照组整株幼苗体内的重金属含量;C_{max}为重金属的最大胁迫浓度。

表 2 重金属胁迫对豌豆幼苗形态指标的影响

重金属种类	胁迫浓度 (mg/L)	根长 (cm)	湿质量 (g)	干质量 (g)
Hg	0(CG)	10.06	0.42	0.04
	1	13.44	0.44	0.04
	2	11.60	0.42	0.04
	5	10.49	0.40	0.04
Cu	0(CG)	12.07	0.42	0.05
	15	11.29	0.36	0.04
	30	10.44	0.36	0.04
	45	10.72	0.35	0.04
Cd	0(CG)	17.58	0.46	0.04
	4	14.18	0.41	0.04
	8	12.69	0.39	0.03
	10	12.88	0.37	0.04
Cr	0(CG)	10.96	0.44	0.04
	5	10.83	0.45	0.04
	10	11.91	0.44	0.04
	15	11.04	0.45	0.04
Pb	0(CG)	9.30	0.45	0.05
	20	8.60	0.43	0.04
	40	8.47	0.40	0.04
	80	7.77	0.40	0.04

2.3 重金属胁迫对豌豆幼苗抗性生理指标的影响

2.3.1 叶绿素含量 叶绿素(Chl)含量高低是反映植物叶片光合作用能力大小的重要生理指标;叶绿素 a 含量(Chl a)与叶绿素 b 含量(Chl b)的比值反映捕光色素复合体Ⅱ在所有叶绿素结构中所占的比例,该值越高,说明捕光能力越强^[12]。由表 4 可见,不同重金属胁迫下,豌豆幼苗体内的叶绿素含量大小大致表现为 Cr>Hg>Cu>Pb>Cd;随 Cu 胁迫浓度的增加,幼苗中叶绿素含量大致呈下降趋势,可能是 Cu 被吸收进入细胞后不断累积,导致叶绿体结构被破坏;随 Hg、Cd、Cr、Pb 胁迫浓度的增加,叶绿素含量大致呈先升后降趋势,说明低浓度重金属胁迫可一定程度增强植物光合作用的能力;Chl a/Chl b 值处理间相互差异不显著(P>0.05),说明

表 3 重金属在豌豆幼苗不同器官中的积累与分布

重金属种类	浓度 (mg/L)	重金属含量(mg/kg)			
		叶	茎	根	总含量
Hg	0(CG)	1.92c	1.89d	1.90d	1.94d
	1	1.96bc	10.04c	119.73c	50.14c
	2	1.98b	20.31b	248.40b	77.09b
	5	2.49a	48.43a	361.04a	125.03a
Cu	0(CG)	32.78c	0.21d	16.77c	7.97c
	15	87.02b	29.17c	752.41b	149.55b
	30	238.61a	362.16a	1 498.54a	438.72a
	45	33.91c	50.05b	1 427.06a	534.50a
Cd	0(CG)	0.62c	0.64c	4.01d	4.22d
	4	78.13a	189.90b	2 669.30c	806.96c
	8	43.02b	196.51b	7 297.46b	1 923.90b
	10	7.95c	251.93a	10 308.20a	2 885.80a
Cr	0(CG)	6.34c	32.29c	46.84d	47.42b
	5	44.87a	41.09a	271.88c	124.85a
	10	17.92b	36.29b	347.40b	142.13a
	15	1.94d	15.95d	764.68a	151.83a
Pb	0(CG)	13.33c	12.97b	22.89b	15.55c
	20	573.62b	636.06a	3 141.69a	981.90b
	40	1 019.86a	862.38a	3 131.94a	1 583.35a
	80	584.84b	666.59a	3 313.36a	1 678.24a

注:同列数据后不同小写字母表示同一金属处理间差异显著($P<0.05$)。表 4、表 6、表 8 同。

表 4 重金属胁迫对豌豆幼苗叶片叶绿素含量的影响

重金属种类	浓度 (mg/L)	Chl a (mg/g)	Chl b (mg/g)	Chl a/Chl b
Hg	0(CG)	0.79ab	0.27	2.84
	1	0.66b	0.24	2.72
	2	0.88a	0.29	2.97
	5	0.66b	0.21	3.03
Cu	0(CG)	0.67a	0.22a	3.05
	15	0.49b	0.17a	2.84
	30	0.61a	0.15a	3.97
	45	0.45b	0.12b	3.71
Cd	0(CG)	0.59	0.24	2.49
	4	0.61	0.23	2.58
	8	0.61	0.24	2.55
	10	0.53	0.21	2.46
Cr	0(CG)	0.75b	0.27b	2.81
	5	0.91a	0.36a	2.50
	10	0.90a	0.33ab	2.71
	15	0.78b	0.31ab	2.48
Pb	0(CG)	0.60ab	0.22ab	2.64
	20	0.58b	0.19b	2.96
	40	0.67a	0.28a	2.41
	80	0.48c	0.21ab	2.25

幼苗的捕光能力受重金属胁迫的影响相对较小。

2.3.2 可溶性蛋白含量 可溶性蛋白含量高低是衡量植物是否发生重金属胁迫的重要指标^[13]。由表 5 可见,不同浓度 Hg、Cu、Cr、Pb 胁迫下,豌豆幼苗叶中的可溶性蛋白含量显著高于茎、根($P<0.05$),而不同浓度 Cd 胁迫下恰恰相反,豌豆幼苗叶中的可溶性蛋白含量显著低于茎、根;随 Cu、Cd、Pb 胁

迫浓度的增加,幼苗体内可溶性蛋白含量大致呈下降趋势,说明 Cu、Cd、Pb 胁迫可能抑制了幼苗原来正常蛋白质的合成,使其对重金属污染的抗逆性减弱;随 Hg、Cr 胁迫浓度的增加,幼苗体内可溶性蛋白含量大致呈先增后减趋势,可能是低浓度重金属胁迫诱导幼苗体内产生新的逆境蛋白,从而增强幼苗对 Hg、Cr 胁迫的抗性。

表 5 重金属胁迫对豌豆幼苗可溶性蛋白含量的影响

重金属种类	浓度 (mg/L)	可溶性蛋白含量(g/L)		
		叶	茎	根
Hg	0(CG)	0.34a	0.07b	0.10b
	1	0.28a	0.09b	0.09b
	2	0.49a	0.08b	0.13b
	5	0.39a	0.06b	0.11b
Cu	0(CG)	0.59a	0.36b	0.37b
	15	0.48a	0.33b	0.32b
	30	0.43a	0.28b	0.31b
	45	0.40a	0.32b	0.30b
Cd	0(CG)	0.35b	0.54a	0.51a
	4	0.28b	0.47a	0.53a
	8	0.24b	0.44a	0.52a
	10	0.22b	0.44a	0.52a
Cr	0(CG)	0.28a	0.09b	0.04c
	5	0.20a	0.09b	0.09b
	10	0.27a	0.12b	0.12b
	15	0.23a	0.10b	0.14b
Pb	0(CG)	0.22a	0.12b	0.05c
	20	0.23a	0.09c	0.11b
	40	0.21a	0.09b	0.12c
	80	0.19a	0.08b	0.12c

注:同行数据后不同小写字母表示不同器官间可溶性蛋白含量差异显著($P<0.05$)。

2.3.3 抗氧化酶活性 抗氧化酶 SOD、POD、CAT 及其他酶类的活性大小可衡量植物清除活性氧能力高低,是防止膜质过氧化及其他伤害的重要指标^[14]。由表 6 可知,不同浓度重金属胁迫下,豌豆幼苗体内 SOD、POD 活性多远大于 CAT 活性,对清除活性氧可起到更大的作用;对豌豆幼苗不同器官而言,茎、根中的酶活性多高于叶;低浓度重金属胁迫可明显增加豌豆幼苗中 SOD、POD 的活性,从而使幼苗抗性增强,高浓度重金属胁迫多可使豌豆幼苗中 SOD、POD 活性明显下降。

2.3.4 MDA 含量 MDA 含量高低常表示植物对逆境条件反应的强弱^[15]。由表 7 可知,随重金属胁迫浓度的增加,豌豆幼苗体内 MDA 含量大致呈增加趋势;Hg、Cu、Cd、Cr、Pb 最高浓度胁迫下,根中 MDA 含量分别较对照增加 1.52、1.09、10.73、1.37、2.99 倍,叶中 MDA 含量分别较对照增加 0.58、1.23、183.67、1.44、0.03 倍,Cd 胁迫处理的豌豆幼苗根、叶中 MDA 含量增加幅度远远高于其他重金属,说明豌豆幼苗根、叶对高浓度 Cd 胁迫的抗性相对最弱;Hg、Cu、Cd、Cr、Pb 最高浓度胁迫下,茎中 MDA 含量分较对照增加 0.36、0.12、0.23、1.52、1.10 倍,Cr、Pb 的增加幅度高于 Hg、Cu、Cd,说明豌豆幼苗茎对高浓度 Cr、Pb 胁迫的抗性较弱。

2.3.5 脯氨酸含量 植物在逆境胁迫时体内 Pro 往往会积累,对植物产生一定的保护作用^[16]。由表 8 可知,随重金属

表 6 重金属胁迫对豌豆幼苗中抗氧化酶活性的影响

重金属种类	浓度 (mg/L)	抗氧化酶活性(U/mg)								
		超氧化物歧化酶(SOD)			脱氢氧化酶(POD)			过氧化氢酶(CAT)		
		叶	茎	根	叶	茎	根	叶	茎	根
Hg	0(CG)	100.68b	371.35b	310.99a	120.47b	676.02b	474.87a	31.32b	231.13a	130.87a
	1	129.01a	416.29a	326.84a	159.47a	648.55b	480.83a	57.33a	43.00c	101.64b
	2	89.47c	333.98c	242.84b	102.59c	826.87a	349.08b	33.73b	131.87b	92.88b
	5	70.96d	293.75d	238.42b	5.17d	550.07c	331.10b	62.16a	10.75d	77.40c
Cu	0(CG)	25.35a	26.23b	21.06c	100.03a	115.68b	95.21a	3.61a	20.90c	69.88a
	15	28.73a	32.37a	33.91a	111.32a	119.89b	93.81a	2.61b	15.51c	58.54b
	30	24.16a	37.28a	30.78ab	71.69b	148.21a	76.45b	2.54b	44.51b	44.99c
	45	19.02b	35.61a	27.28b	59.77b	148.17a	35.69c	2.75b	62.37a	7.74d
Cd	0(CG)	68.58d	57.42b	26.21b	92.18bc	102.25a	84.27a	98.18a	46.27b	45.81b
	4	91.98b	64.51a	26.55b	99.14b	71.37b	82.98a	102.73a	50.22a	47.12ab
	8	125.20a	65.59a	43.04a	136.04a	32.55c	78.75a	102.83a	56.96a	53.26ab
	10	78.00c	53.52b	24.04b	85.02c	32.25c	50.67b	71.49b	52.46a	54.32a
Cr	0(CG)	108.37b	180.21b	562.00a	136.23b	421.87a	727.25a	27.36a	34.81c	167.70a
	5	151.38a	204.70a	227.89b	165.83a	381.06b	387.48b	18.81b	84.05a	16.82b
	10	110.38b	175.71b	189.22c	77.33c	273.90c	182.47c	13.03bc	62.96b	25.80b
	15	97.02c	160.46c	171.92c	35.58d	202.04d	122.40d	11.73c	67.08b	22.11b
Pb	0(CG)	128.09b	150.72c	409.02a	138.33d	306.40c	384.47a	110.81b	108.24c	463.08a
	20	127.72b	174.60b	207.42b	226.67a	437.55a	105.78d	103.66b	193.50b	198.46b
	40	147.90a	202.39a	184.49c	195.91b	384.03b	294.67b	93.90c	243.04a	201.18b
	80	151.78a	202.09a	199.36bc	175.55c	375.52b	250.28c	139.98a	233.92a	187.36b

表 7 重金属胁迫对豌豆幼苗 MDA 含量的影响

重金属种类	浓度 (mg/L)	MDA 含量(nmol/mg)		
		叶	茎	根
Hg	0(CG)	19.11	53.79	45.64
	1	19.84	40.36	63.72
	2	28.58	58.68	63.90
	5	30.13	73.36	114.82
Cu	0(CG)	14.23	23.73	16.92
	15	15.25	22.63	19.17
	30	30.68	24.36	19.57
	45	31.75	26.56	35.41
Cd	0(CG)	0.09	7.11	1.23
	4	20.05	4.81	6.75
	8	19.30	7.12	4.43
	10	16.62	8.74	14.43
Cr	0(CG)	16.30	32.61	60.55
	5	33.28	32.67	59.53
	10	37.54	34.93	52.17
	15	39.71	82.28	143.45
Pb	0(CG)	31.97	17.98	23.28
	20	27.94	41.49	67.71
	40	29.27	34.02	55.89
	80	32.91	37.82	92.79

胁迫浓度的增加,豌豆幼苗脯氨酸含量大致呈先升后降趋势;低浓度 Hg、Cd、Pb 胁迫下,豌豆幼苗叶中的 Pro 含量较对照有所增加,但随胁迫浓度的进一步增加,Pro 含量多呈明显下降趋势,可能是过量的重金属胁迫引起细胞代谢紊乱;随 Cu、Cr 胁迫浓度的增加,豌豆幼苗叶中 Pro 含量大致呈不断上升趋势,说明豌豆幼苗叶对高浓度 Cu、Cr 胁迫有较强的抗性;随 Hg、Cd、Cr 胁迫浓度的增加,豌豆幼苗茎中 Pro 含量不断上升,植物抗重金属胁迫能力增强,而高浓度 Cu、Pb 胁迫下,幼

苗茎中 Pro 含量较对照有所降低,说明豌豆幼苗茎对 Hg、Cd、Cr 的胁迫抗性强于 Cu、Pb;高浓度重金属胁迫下,豌豆幼苗根中 Pro 含量较对照均有显著增加($P<0.05$),说明幼苗根部对高浓度重金属的胁迫抗能力较强。

表 8 重金属胁迫对豌豆幼苗 Pro 含量的影响

重金属种类	浓度 (mg/L)	Pro 含量(μg/g)		
		叶	茎	根
Hg	0(CG)	105.35bc	40.70c	23.07c
	1	132.07a	43.31bc	62.84a
	2	114.67b	45.53ac	56.27ab
	5	100.91c	51.39a	49.70b
Cu	0(CG)	50.40b	52.50b	45.00c
	15	57.11b	64.28a	55.58a
	30	55.00b	31.50c	53.43a
	45	209.42a	25.00c	52.25b
Cd	0(CG)	84.49b	26.42c	3.57c
	4	119.31a	40.04b	15.27ab
	8	114.90a	41.04b	12.79b
	10	93.85b	49.40a	18.02a
Cr	0(CG)	59.55	57.78b	32.92c
	5	59.82	42.51c	68.25a
	10	56.36	52.27b	34.88c
	15	63.28	76.86a	43.49b
Pb	0(CG)	99.14b	73.57b	30.26b
	20	141.03a	75.75ab	42.15a
	40	157.01a	84.05a	31.77b
	80	110.23b	70.02b	44.82a

3 结论与讨论

本试验结果表明,随 Hg、Cu、Cd、Cr、Pb 胁迫浓度的升高,豌豆幼苗根部发黑,甚至出现腐烂的症状,说明重金属胁迫能

不同程度影响豌豆幼苗的生长;豌豆幼苗各器官中重金属含量高低顺序为根>茎>叶,说明根部作为植物吸收环境中的第一道器官,对重金属有更强的富集能力,对叶、茎能起到一定的保护作用,这与蔡卓等的研究结果^[17]一致;叶绿素是植物进行光合作用的重要物质^[5],低浓度重金属胁迫对豌豆幼苗中的叶绿素合成有一定促进作用,高浓度则会抑制叶绿素的合成,而捕光能力无明显变化;Hg、Cr 胁迫下,豌豆幼苗体内原来正常的蛋白质合成受到抑制,同时诱导产生新的逆境蛋白,当胁迫加重时,细胞结构受到破坏,蛋白质合成受阻,含量下降,这与从心黎等的研究结论^[18]吻合。

超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)及其他酶类相互协调作用,可清除植物在逆境条件下产生的活性氧自由基,使植物体内活性氧维持在一个较低水平上,从而防止活性氧引起膜质过氧化及其他伤害。本试验中,随重金属胁迫浓度的增加,SOD、POD、CAT 活性大致呈先升后降趋势,低浓度重金属胁迫下,SOD、POD、CAT 活性较对照(0 mg/L)处理有明显增加,这表明一定浓度重金属胁迫能刺激幼苗产生抵抗逆境的防御机制,且浓度越高,刺激效应越大,但过高浓度的重金属胁迫会使酶活性受到抑制,使清除活性氧的能力下降,植物细胞膜受到伤害,这与马文丽等的研究结果^[19-21]相似;根中的 SOD、POD、CAT 活性较地上部分有明显下降,表明幼苗根是受重金属伤害最为严重的部位,其应激性反应会对幼苗产生一定的保护作用。

植物器官在逆境下会产生丙二醛(MDA),MDA 能与蛋白质、核酸、氨基酸等物质交联,形成不溶性化合物,从而干扰细胞正常的生命活动,影响植物的生长发育^[15]。在一定重金属胁迫强度下,细胞的各种保护机制使 MDA 含量维持在一定的水平,但胁迫强度超过特定值,会导致细胞内代谢失调,自由基积累,膜脂过氧化作用增强,MDA 含量大幅度升高。刘丽欣等也证实高浓度 Cd 会对粟米幼苗产生较强的毒害作用,MDA 含量增加^[22],但不同的是,该研究发现,低浓度 Cd 会降低粟米中的 MDA 含量,与本试验结果不一致,这可能是由于不同植物的重金属耐受性不同所致。

植物在逆境胁迫时,体内会出现脯氨酸(Pro)积累,对植物起到一定的保护作用^[16]。本研究结果显示,低浓度重金属胁迫下,Pro 可能参与体内活性氧自由基的清除、细胞渗透性的调节,从而减轻了重金属对细胞膜和蛋白质造成的损伤,增强了豌豆抗重金属胁迫的能力,但当重金属胁迫浓度超过一定范围时,豌豆幼苗 Pro 含量开始下降,细胞代谢紊乱,这与张家洋的研究结果^[21]一致。综合重金属胁迫时豌豆幼苗体内 Pro 积累量的变化趋势发现,豌豆幼苗根、茎、叶普遍对 Cr 胁迫的抗性较强,对 Pb、Cd 的抗性较弱。

因此,豌豆幼苗对 5 种重金属胁迫的抗性能力由强到弱依次为 Cr、Hg、Cu、Pb、Cd,豌豆幼苗对 5 种重金属的蓄积能力大小依次为 Cd>Hg>Pb>Cu>Cr,结合抗性与蓄积能力,豌豆幼苗可作为修复植物治理 Hg 严重污染环境。

参考文献:

[1]方斌斌,于洋,姜伟立,等.太湖流域水体和沉积物重金属时空分布特征及潜在生态风险评价[J].生态与农村环境学报,2017,33(3):215-224.

[2]Dong T X,Yang H X,Li H F,et al. Accumulation characteristics of heavy metals in the soil with wheat-corn rotation system in North China[J]. Journal of Agricultural Resources & Environment,2014,32(4):355-365.

[3]卢恒,徐宁,孟繁蕴.冬虫夏草重金属的含量测定和健康风险评估[J].环境化学,2017,36(5):1003-1008.

[4]简敏菲,史雅甜,陈涛,等.重金属镉、铅胁迫下湿地植物丁香蓼的生理生化特征研究[J].江西师范大学学报(自然科学版),2017,41(1):93-98.

[5]夏吉林,姜贝贝,余婷,等.重金属铜、锌、铅胁迫对长鬃蓼部分抗性生理指标的影响[J].湖北农业科学,2016,55(11):2751-2754.

[6]Tang J. Effects of high concentration of chromium stress on physiological and biochemical characters and accumulation of chromium in tea plant(*Camellia sinensis* L.)[J]. African Journal of Biotechnology,2012,11(9):2248-2255.

[7]Imtiyaz S,Agnihotri R K,Ahmad S,et al. Effect of cobalt and lead induced heavy metal stress on some physiological parameters in *Glycine max* [J]. International Journal of Agriculture and Crop Sciences,2014,7(1):26-34.

[8]黄运湘,廖柏寒,肖浪涛,等.镉处理对大豆幼苗生长及激素含量的影响[J].环境科学,2006,27(7):1398-1401.

[9]时振振,李胜,杨柯,等.盐胁迫下豌豆幼苗对内外源 NO 的生理生化响应[J].草业学报,2014,23(5):193-200.

[10]张志良.植物生理学实验指导[M].北京:高等教育出版社,1990:59-62.

[11]高俊凤.植物生理学实验技术[M].西安:世界图书出版公司,2000:34-50.

[12]徐冉,侯和胜,佟少明.藻类叶绿素 a/叶绿素 b 型捕光蛋白复合体结构与功能的研究进展[J].天津农业科学,2016,22(2):31-34.

[13]付世景,宗良纲,孙静克.镉污染板蓝根生理指标的变化及其对镉积累的研究[J].安徽农业科学,2007,35(3):649-651.

[14]王志松,薛晓丽,费洋.重金属胁迫对人参生长发育及生理生化特性的影响[J].江苏农业科学,2016,44(4):253-256.

[15]谢翔宇,翁铂森,赵素贞,等. Cd 胁迫下接种丛枝菌根真菌对秋茄幼苗生长与抗氧化酶系统的影响[J].厦门大学学报(自然科学版),2013,52(2):244-253.

[16]王丹,宣继萍,郭海林,等.结缕草的抗寒性与体内碳水化合物、脯氨酸、可溶性蛋白季节动态变化的关系[J].草业学报,2011,20(4):98-107.

[17]蔡卓,卢登峰,何晓良,等.重金属镉在芦荟体内的积累及对芦荟抗氧化酶活性的影响[J].南方农业学报,2013,44(2):210-213.

[18]从心黎,黄绵佳,曾丽萍,等.重金属铜影响香蕉幼苗生长的机理初探[J].南方农业学报,2011,42(11):1337-1339.

[19]马文丽,金小弟,王转花.镉处理对乌麦种子萌发幼苗生长及抗氧化酶的影响[J].农业环境科学学报,2004,23(1):55-59.

[20]苑丽霞,孙毅,杨艳君.镉胁迫对油菜生长发育中生理生化特性的影响[J].安徽农业科学,2014,42(9):2544-2547,2558.

[21]张家洋.重金属铅镉短期胁迫对蓬莱蕉生理生化指标的影响[J].水土保持学报,2016,30(2):340-345.

[22]刘丽欣,迟鑫,王建,等.重金属 Cd 对粟米生理生化指标的影响[J].安徽农学通报,2017,23(7):27-30.