

重金属 Cu^{2+} 胁迫对绿豆生理生化指标的影响

庄枫红, 张晓娟* (华南师范大学生命科学学院, 广东广州 510631)

摘要 [目的]探究重金属 Cu^{2+} 对绿豆幼苗生长发育的影响, 以期为进一步研究重金属 Cu^{2+} 对植物生长发育的毒害机制提供参考。[方法]绿豆在水培(1/2 Hoaglands 营养液)条件下, 外源添加 0, 100, 200, 400, 600 mg/L 的 CuSO_4 进行胁迫处理, 测定其对绿豆幼苗株高和鲜重, 叶片叶绿素含量、丙二醛含量、可溶性糖含量以及抗氧化酶活性的影响。[结果]随着 Cu^{2+} 浓度的增加, 绿豆幼苗的平均株高和平均鲜重受抑制程度逐渐升高, 其中最高抑制率分别为 45.4% 和 53.8%; Cu^{2+} 胁迫下的绿豆叶片叶绿素含量均高于对照组, 呈先上升后下降的趋势; 丙二醛及可溶性糖含量随 Cu^{2+} 浓度增加而升高, 最高增长率分别为 132% 和 80.9%; 绿豆叶片受到 Cu^{2+} 胁迫后, 其抗氧化酶活性均有不同程度的升高, SOD、POD 及 CAT 活性最高增长分别为对照的 2.36、2.29 和 2.53 倍。[结论]绿豆幼苗在受到重金属 Cu^{2+} 胁迫时, 其生长被显著地抑制, 叶片细胞膜系统受到损伤, 但其叶绿素、可溶性糖含量及抗氧化酶活性升高, 表现出一定的抗性。

关键词 绿豆; Cu^{2+} 胁迫; 生长发育; 生理生化指标

中图分类号 Q945.78 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2020)08-0043-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2020.08.011



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Effects of Heavy Metal Cu^{2+} Stress on Physiological-biochemical Characteristic of Mung Bean

ZHUANG Feng-hong, ZHANG Xiao-juan (School of Life Sciences, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510631)

Abstract [Objective] Mung bean was used as material to explore the effects of heavy metal Cu^{2+} on its growth and development, so as to provide reference for further studying of the toxic mechanism of heavy metal Cu^{2+} on plant growth and development. [Method] Under the condition of water culture (1/2 Hoaglands nutrient solution), different concentrations of CuSO_4 (0, 100, 200, 400, 600 mg/L) were added for stress treatment, and the effects of CuSO_4 on the plant height and fresh weight of mung bean, the content of chlorophyll, malondialdehyde and soluble sugar and the antioxidant enzyme activity of leaves were measured. [Result] With the increase of Cu^{2+} concentration, the inhibition degree of the average plant height and fresh weight of mung bean increased gradually, and the highest inhibition rate was 45.4% and 53.8% respectively. The chlorophyll content of mung bean leaves in the stress treatment group was higher than that in the control group, which showed a trend of increasing at first and decreasing later. The content of malondialdehyde and soluble sugar increased with the increase of Cu^{2+} concentration, with the highest growth rates of 132% and 80.9% respectively. Besides, the antioxidant enzyme activity of mung bean leaves increased when treated with Cu^{2+} . The highest activity of SOD, POD and CAT rose 2.36, 2.29 and 2.53 times, respectively. [Conclusion] Under the stress of heavy metal Cu^{2+} , the growth of mung bean was significantly inhibited and the cell membrane system was damaged, but the contents of chlorophyll, soluble sugar and antioxidant enzyme activity increased, showing certain resistance.

Key words Mung bean; Cu^{2+} stress; Growth and development; Physiological-biochemical characteristic

随着工业的迅猛发展, 经济水平快速增长, 人们的生活水平得到不断提高。但同时污水灌溉、大气沉降、农药及化肥的使用、矿产资源的开发等造成了严重的土壤重金属污染。据报道, 我国受农药和重金属污染的耕地面积已达上千万公顷, 主要集中在长三角、珠三角以及东北地区^[1]。其中珠三角地区部分城市约有 40% 的农田土壤重金属污染超标^[2]。重金属元素 Cu 是植物生长所必须的微量元素, 低浓度的 Cu 有利于植物的生长, 然而, 当土壤中 Cu 污染严重时, 高浓度的 Cu 会对植物的生长造成毒害。有研究表明, 高浓度 Cu 抑制黑麦草的根系长度以及叶绿素合成^[3]。蓖麻叶片中的 MDA 含量和细胞膜透性在高浓度 Cu 处理后显著升高^[4]。一定浓度的 Cu 胁迫下, 水稻和小麦种子的萌发、幼苗的生物量、根长及叶绿素含量均受到显著抑制, 幼苗丙二醛含量显著升高^[5]。

绿豆又名青小豆, 在世界各热带、亚热带地区广泛栽培, 是广受欢迎的药食两用作物, 也是我国传统的豆类作物, 在我国已经有 2 000 多年的栽培史。绿豆生长周期短、适应性强, 籽粒蛋白质含量高、脂肪含量低, 食用绿豆有降压、消暑

等保健功能。近年来, 随着人们生活质量的提高以及饮食健康观的转变, 人们对绿豆的需求逐渐增加。绿豆的生长发育受到温度、水分等条件的影响, 备受关注的重金属污染对绿豆的生长也有明显的影响^[6]。有研究表明, Cd^{2+} 胁迫导致绿豆叶片净光合速率降低, DNA 含量降低^[7]。 Hg^{2+} 和 Pb^{2+} 污染能够抑制绿豆种子的萌发和幼苗的生长^[8]。然而, 重金属 Cu^{2+} 对绿豆生长发育影响的相关研究较少。本研究以绿豆为研究对象, 探讨不同浓度的 CuSO_4 对绿豆幼苗生长, 抗氧化酶活性以及幼苗伤害程度的影响, 为进一步深入了解重金属对绿豆生长的毒害机制提供参考, 也为重金属污染的综合治理提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料 试验所用绿豆种子购自广东省农业科学研究院蔬菜所。

1.2 试验方法 选取籽粒饱满的绿豆种子, 用 5% 次氯酸钠溶液消毒 5 min, 蒸馏水冲洗 5 次, 待用。取干净的培养盒, 内铺 3 层干净滤纸, 分别加入 15 mL 含有 0, 100, 200, 400, 600 mg/L CuSO_4 的 1/2 Hoaglands 营养液, 选取 100 粒大小一致的绿豆种子均匀摆在培养盒中, 每个处理设置 3 个平行实验组。将培养盒放入温度 25 °C, 湿度 60%, 光照度 4 000 lx 的光照恒温培养箱中连续培养 7d, 期间每天更换 1 次营养液。处理第 8 d 测量绿豆幼苗株高、鲜重, 绿豆幼苗叶片的叶

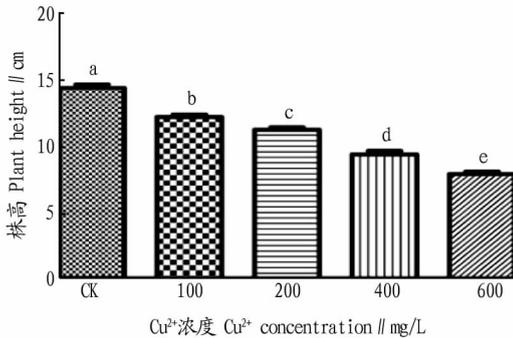
作者简介 庄枫红(1992—), 女, 广东潮州人, 助理实验师, 硕士, 从事植物生理生态研究。*通信作者, 助理实验师, 硕士, 从事生物化学与分子生物学研究。

收稿日期 2019-10-25

绿素、丙二醛、可溶性糖含量以及抗氧化酶活性。

1.3 测定指标及方法 植株株高的测量和鲜重的称量采用常规法,用直尺测量株高,用电子天平称植株鲜重。采用乙醇提取法测定叶绿素含量;采用硫代巴比妥酸法测定丙二醛含量;采用蒽酮比色法测定可溶性糖含量;采用氮蓝四唑法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性;采用愈创木酚比色法测定过氧化物酶(POD)活性;采用紫外吸收法测定过氧化氢酶(CAT)活性^[9-10]。

1.4 数据分析 采用 Excel 2003 整理数据并借助 Graphpad 5 进行数据分析,多组间采用 One Way ANOVA 分析($P < 0.05$)。



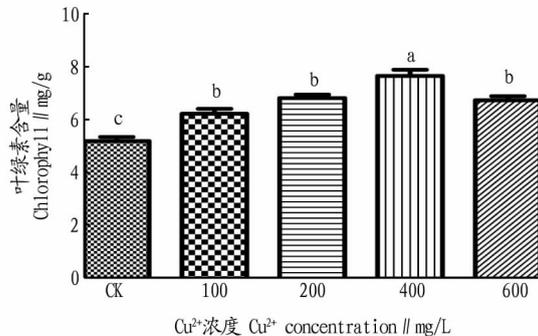
注:不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著

Note: Different lowercases indicated significant differences at 0.05 level

图 1 Cu²⁺胁迫对绿豆幼苗生长的影响

Fig.1 Effects of Cu²⁺ stress on the growth of mung bean

2.2 不同浓度 Cu²⁺胁迫对绿豆叶片叶绿素含量的影响 植物的光合作用离不开叶绿素,光合作用的强弱关系到植物体内有机物合成的多少。由图 2 可知,处理组绿豆叶片叶绿素含量均高于对照,随着 Cu²⁺浓度的增加,绿豆叶片叶绿素含量呈先增加后降低趋势,当 Cu²⁺浓度达到 400 mg/L 时,处理组叶绿素含量达到最高,比对照组增加 47.7%。由此可知,低浓度的 Cu²⁺对绿豆叶片中叶绿素的积累具有促进作用。叶绿素含量的增加有利于合成更多的有机物来抵抗 Cu²⁺带来的毒害,说明绿豆对重金属 Cu²⁺带来的胁迫具有一定的抗逆性。当 Cu²⁺浓度增加到 600 mg/L 时,叶绿体结构受到破坏,叶绿素含量下降,光合作用受阻。



注:不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著

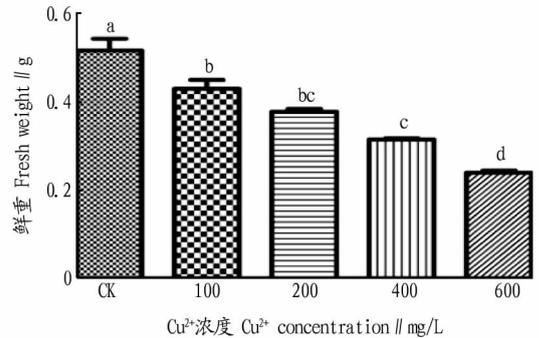
Note: Different lowercases indicated significant differences at 0.05 level

图 2 Cu²⁺胁迫对绿豆幼苗叶绿素含量的影响

Fig.2 Effects of Cu²⁺ stress on the chlorophyll content in mung bean

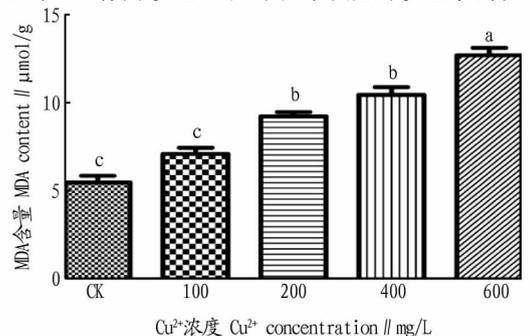
2 结果与分析

2.1 不同浓度 Cu²⁺胁迫对绿豆幼苗生长的影响 株高和鲜重是衡量植物生长状态的重要指标。由图 1 可知,随着 Cu²⁺浓度的增加,绿豆幼苗的生长逐渐受到抑制。100、200、400、600 mg/L Cu²⁺胁迫处理的绿豆平均株高均显著小于对照(CK),分别降低 15.2%、22.0%、35.1%和 45.4%。绿豆幼苗鲜重也随着 Cu²⁺浓度的升高而显著降低,分别降低 16.7%、26.9%、39.1%和 53.8%。结果表明,重金属 Cu²⁺对绿豆幼苗的生长具有抑制作用。试验组中最低浓度的 Cu²⁺对绿豆生长也具有一定的抑制效果,说明绿豆生长所需要的 Cu²⁺低于 100 mg/L。



2.3 不同浓度 Cu²⁺胁迫对绿豆叶片丙二醛含量的影响 丙二醛(MDA)是细胞膜脂过氧化的产物之一,植物体内 MDA 积累的量越多,膜脂过氧化的程度就越大。由图 3 可知,随着 Cu²⁺浓度的增加,MDA 的含量呈逐渐增加趋势,与对照相比,不同 Cu²⁺浓度处理的 MDA 含量分别增加 29.8%、68.9%、91.3%和 132%。低浓度 Cu²⁺处理的 MDA 含量有所增加,但未达到显著水平,当 Cu²⁺浓度达到 200 mg/L 时,丙二醛含量显著高于对照。由此可知,随着 Cu²⁺胁迫增强,绿豆叶片 MDA 含量升高,叶片膜脂过氧化程度逐渐加大。

2.4 不同浓度 Cu²⁺胁迫对绿豆叶片可溶性糖含量的影响 可溶性糖是植物体光合作用的产物,为植物的生命活动提供能量,也可作为渗透调节剂维持细胞内渗透平衡。可溶



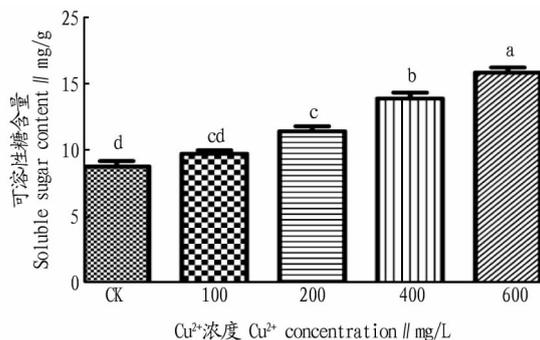
注:不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著

Note: Different lowercases indicated significant differences at 0.05 level

图 3 Cu²⁺胁迫对绿豆幼苗 MDA 含量的影响

Fig.3 Effects of Cu²⁺ stress on the MDA content in mung bean

性糖含量增加可以降低重金属对机体的毒害,从而提高植物体的抗逆能力。由图 4 可知,随着 Cu²⁺浓度的增加,绿豆叶片中可溶性糖含量逐渐增加。与对照相比,不同浓度 Cu²⁺处理的绿豆叶片可溶性糖含量分别增加 10.8%、30.3%、58.6% 和 80.9%。低浓度的 Cu²⁺处理与对照无显著差异,当 Cu²⁺浓度达到 200 mg/L 时,绿豆叶片可溶性糖含量显著增加。结果表明,随着 Cu²⁺胁迫程度增大,绿豆叶片合成更多的可溶性糖来提供能量,维持细胞渗透平衡,抵抗 Cu²⁺毒害。

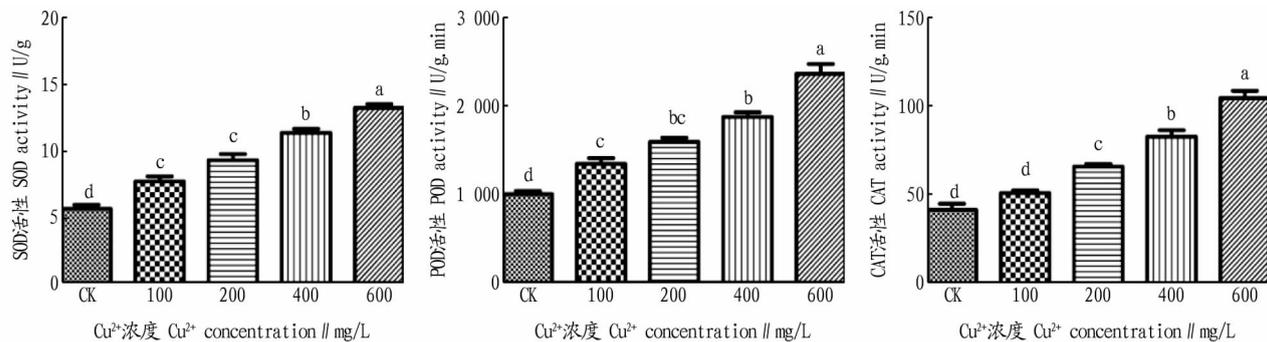


注:不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著

Note: Different lowercases indicated significant differences at 0.05 level

图 4 Cu²⁺胁迫对绿豆幼苗可溶性糖含量的影响

Fig.4 Effects of Cu²⁺ stress on the content of soluble sugar in mung bean



注:不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著

Note: Different lowercases indicated significant differences at 0.05 level

图 5 Cu²⁺胁迫对绿豆幼苗抗氧化酶活性的影响

Fig.5 Effects of Cu²⁺ stress on the antioxidant enzyme activity of mung bean

豆幼苗茎长和生物量均显著低于对照。该研究用不同浓度的 Cu²⁺处理绿豆,绿豆幼苗的平均株高和鲜重都随着铜离子浓度的增加而降低,最高 Cu²⁺浓度的处理中绿豆幼苗的平均株高和鲜重分别降低 45.4% 和 53.8%,但绿豆幼苗未出现萎蔫死亡的现象,说明绿豆植株对重金属 Cu²⁺有一定的耐受性。

叶绿素是进行光合作用所必需的重要物质之一,叶绿素总量可以反映植物光合作用的强弱。该研究结果与牟祚民等^[15]的研究类似,Cu²⁺胁迫下的绿豆幼苗叶片叶绿素含量均高于对照。随着 Cu²⁺浓度的增加,绿豆幼苗叶绿素含量呈先升高后下降的趋势,这与郭锋等^[16]的研究结果类似。分析其原因可能是绿豆幼苗受到重金属胁迫时,刺激了绿豆叶片叶绿素的合成,增强光合作用,积累更多的有机物质,而当

2.5 不同浓度 Cu²⁺胁迫对绿豆叶片抗氧化酶活性的影响 当植物受到逆境胁迫时,细胞内活性氧的含量增多,植物体内进化形成的抗氧化酶系统可以一定程度地清除活性氧,从而减轻对植物产生的伤害。SOD、POD 和 CAT 是重要的抗氧化酶。其中,SOD 可以将细胞内产生的超氧阴离子自由基,生成 H₂O₂,POD 和 CAT 再进一步催化 H₂O₂ 分解为无毒的 H₂O 和 O₂。由图 5 可知,与对照相比,当绿豆幼苗受到 Cu²⁺胁迫时,随着 Cu²⁺浓度的增加,绿豆叶片 SOD、POD 及 CAT 酶活性均呈上升趋势,在 Cu²⁺浓度最高时 3 种酶的酶活性达到最高值,分别是对照的 2.36、2.29 和 2.53 倍。其中,低浓度 Cu²⁺处理(100 mg/L)的 CAT 活性与对照无显著差异,高浓度的 Cu²⁺处理与对照差异显著。由此可知,绿豆幼苗受到 Cu²⁺胁迫时,细胞内 SOD、POD 和 CAT 活性升高,体内产生的活性氧得到较好地清除,减轻绿豆幼苗受到的伤害,说明绿豆对重金属 Cu²⁺污染具有一定的抗性。

3 结论与讨论

重金属污染对植物产生毒害,导致植物代谢紊乱、生长缓慢^[11]。铜是植物正常生长发育必须的微量元素,是某些金属蛋白酶的结构元素,但过量的铜会导致植物生长发育迟缓^[12]。张亚娟等^[13]研究表明,在受到重金属 Cu²⁺胁迫后,9 个不同的大麻品种生长均受到显著抑制,鲜重均显著低于对照。齐文靖等^[14]的研究表明,重金属 Cu²⁺胁迫作用下的绿

Cu²⁺浓度逐渐增高达到 600 mg/L 时,叶绿体结构破坏加剧,叶绿体含量下降。

MDA 是植物受到逆境胁迫后脂膜过氧化的产物。MDA 含量的高低能够反映细胞膜脂过氧化的程度和植物对逆境条件反应的强弱。研究显示,高浓度长时间的铜胁迫致使臭牡丹 MDA 含量显著升高,出现膜脂过氧化现象^[17]。该研究结果显示,绿豆幼苗受到重金属 Cu²⁺胁迫后,叶片 MDA 含量均显著升高,且随着 Cu²⁺浓度的增加,MDA 含量呈逐渐上升趋势,这与庄媛等^[18]的结果类似,说明绿豆叶片细胞中活性氧产生与清除代谢在受到重金属 Cu²⁺胁迫时失去平衡,导致膜脂过氧化,细胞膜结构和功能受到损害。植物在应对不利环境时,细胞会大量积累有机溶质,以提高细胞液浓度,增强吸水 and 持水能力,从而提高抗胁迫能力。可溶性糖是光合作

用的产物,既是植物体的能量来源,也是渗透调节不可或缺的部分。已有研究表明,植物在受到重金属镍胁迫时,体内可溶性糖含量与对照相比显著升高^[19]。在 Cu^{2+} 胁迫下,绿豆幼苗可溶性糖含量随着 Cu^{2+} 浓度的升高呈上升趋势,当 Cu^{2+} 浓度达到 300 mg/L 时,绿豆幼苗的可溶性糖增加达到显著水平^[14]。该研究结果显示,绿豆幼苗受到 Cu^{2+} 胁迫时,体内可溶性糖含量随着 Cu^{2+} 浓度的增加呈逐渐上升趋势,当浓度达到 200 mg/L 时,绿豆幼苗可溶性糖含量与对照相比达到显著水平 ($P < 0.01$),说明绿豆幼苗在高浓度 Cu^{2+} 胁迫下,叶绿素含量升高,光合作用增强,呼吸作用加强,可溶性糖含量增加,以抵抗 Cu^{2+} 胁迫对绿豆幼苗造成的伤害。

当植物受到胁迫时,细胞内活性氧的产生及其清除体系会失去平衡,为保护自身减少植物受到的外界伤害,植物进化形成了自由基清除酶系统,清除植物体内因胁迫而产生的大量自由基,从而减轻自由基对生物膜系统所产生的伤害,保护生物膜不受破坏。SOD、POD 和 CAT 的酶活性也能反映植物抗逆性的强弱。该研究结果显示,绿豆幼苗在受到重金属 Cu^{2+} 的胁迫下,其体内 SOD、POD 及 CAT 酶活性均随着 Cu^{2+} 浓度的升高呈上升趋势,这与马晓华等^[20]的研究结果类似。说明绿豆幼苗在受到胁迫时,体内这 3 种抗氧化酶被激活,清除细胞内的自由基,使得植物在受到重金属 Cu^{2+} 胁迫时,降低受伤害程度。

综上所述,绿豆在受到重金属 Cu^{2+} 胁迫时生长受到抑制,MDA 含量升高,细胞膜脂过氧化,然而绿豆幼苗可以通过调节自身叶绿素的合成,渗透调节物可溶性糖的增多,保护酶系统的活性升高来抵抗 Cu^{2+} 的毒害,说明绿豆在应对重金属 Cu^{2+} 胁迫时具有一定的抗性。

(上接第 42 页)

强优势国审杂交品种^[2],该研究构建了荃玉 9 号 $F_{2,3}$ 群体,并对群体植株的单株产量、穗行数、行粒数、穗长、秃尖长、穗粗、轴粗、粒深和百粒重共 9 个农艺性状进行了变异系数分析、相关性分析和通径分析等。其中,秃尖长变异系数最大,说明秃尖长在 $F_{2,3}$ 群体中选育潜力较大^[7],这与王楠等^[8]、余学杰等^[9]、田龙等^[10] 研究结果一致;轴粗变异系数最小,说明在该性状在 $F_{2,3}$ 群体中表现相对一致,选育潜力小。单株产量与穗行数、行粒数、穗长、穗粗、粒深呈极显著正相关这与前人研究一致^[11-13]。通过逐步回归分析,排除非主要的影响因子,对单株产量影响作用大到小依次为行粒数>粒深>穗粗,表明在该群体利用中穗行数对提高单株产量是重要的,其次是粒深和穗粗,由于各性状间是相辅相成,同时也是相互制约的所以在育种过程中着重选择某个性状时,也要兼顾的其他性状的协调。该研究 $F_{2,3}$ 群体的结论与前人的研究^[9] 结论有差别,这可能是由于材料、生态环境、调查的农艺性状不同等原因产生的,所以在特定的环境对新构建的群体进行通径分析,了解目标性状与其他性状间相关作用大小对该环境下实现育种目标有重要意义。

参考文献

- [1] 守合热提·牙地卡尔,张正,郭媛,等.冬季亚麻在南方重金属污染农田的利用前景[J].中国麻业科学,2017,39(2):75-80.
- [2] 蔡美芳,李开明,谢丹平,等.我国耕地土壤重金属污染现状与防治对策研究[J].环境科学与技术,2014,37(S2):223-230.
- [3] 张刚,翁悦,李德香,等.铜胁迫对黑麦草种子萌发及幼苗生理生态的影响[J].东北师大学报(自然科学版),2019,51(1):119-124.
- [4] 李春雷. Cu^{2+} 胁迫对蓖麻生理反应和积累特性的影响[D].武汉:华中农业大学,2016.
- [5] 陈玉胜,陈全战,邹旭婷.铜胁迫对水稻和小麦种子萌发的影响[J].南京晓庄学院学报,2018,34(6):82-86.
- [6] 赵吉平,王彩萍,侯小峰,等.论绿豆的经济价值及产业化开发利用[J].农业科技通讯,2016(5):9-10.
- [7] 李惠民,罗芬兰,贺军民.NO 对 Cd^{2+} 胁迫下绿豆幼苗 DNA 及光合作用的影响[J].地球环境学报,2018,9(4):363-371.
- [8] 常云霞,陈臻,阮先乐,等. Hg^{2+} 、 Pb^{2+} 对野生型绿豆种子萌发、幼苗生长及抗氧化酶活性的影响[J].河南农业科学,2014,41(7):37-41.
- [9] 夏建国,兰海霞,吴德勇.铅胁迫对茶树生长及叶片生理指标的影响[J].农业环境科学学报,2010,29(1):43-48.
- [10] 李玲,李焱辉,蒋素梅,等.植物生理学模块实验指导[M].北京:科学出版社,2009.
- [11] 卢楠.重金属 Cd 、 Pb 复合污染对植物生理生化和细胞结构影响的研究进展[J].现代农业科技,2009(8):176-177.
- [12] 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(3):469-475.
- [13] 张亚娟,王倩,龙瑜菡,等.不同大麻品种种子萌发期耐重金属铜胁迫能力评价[J].中国麻业科学,2018,40(4):183-191.
- [14] 齐文靖,于晗,张佳慧,等.不同重金属胁迫对绿豆种子萌发和幼苗部分生理指标的影响[J].北方园艺,2018(21):1-5.
- [15] 牟祚民,姜贝贝,潘远智,等.重金属胁迫对天竺葵生长及生理特性的影响[J].草业科学,2019,36(2):434-441.
- [16] 郭锋,樊文华.外源硒对镉胁迫下绿豆幼苗生理特性的影响[J].水土保持学报,2012,26(4):256-260.
- [17] 张婷婷,崔乐怡,龙昌莲,等.逆境条件下镉对臭牡丹幼苗生理变化的影响[J].广东农业科学,2018,45(4):94-99.
- [18] 庄媛,王小平.绿豆幼苗对 Cr^{3+} 胁迫响应的研究[J].安徽农业科学,2011,39(26):15867-15868.
- [19] 曾小颢,唐健民,朱成豪,等.重金属镍胁迫对向日葵幼苗生理生化特性的影响[J].广西植物,2019,39(12):1702-1709.
- [20] 马晓华,张旭东,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(2):194-200.

参考文献

- [1] 李芦江,杨克诚,潘光堂,等.玉米人工合成群体的改良与利用[J].玉米科学,2011,19(1):1-7.
- [2] 张知仪,谭君,强优势,高赖氨酸玉米新品种荃玉 9 号的选育研究[J].种子,2013,32(11):100-102.
- [3] 杜家菊,陈志伟.使用 SPSS 线性回归实现通径分析的方法[J].生物学通报,2010,45(2):4-6.
- [4] 栗建枝,成错,赵太存.玉米杂交种穗部性状对单株产量影响的研究[J].种子科技,2018(2):96-98.
- [5] 敬艳辉,邢留伟.通径分析及其应用[J].统计教育,2006(2):24-26.
- [6] 丁山,郭去,宋军,等.玉米主要性状与产量的回归模型及相关分析[J].西南农业学报,2008,21(5):1226-1230.
- [7] 卓越.玉米杂交组合主要性状与产量的相关和通径分析[J].安徽农业科学,2015,43(7):55-57.
- [8] 王楠,王树星,张乐,等.玉米产量性状与产量的相关性及相关分析[J].黑龙江农业科学,2019(1):23-27.
- [9] 余学杰,石海春,柯永培,等.一个玉米 $F_{2,3}$ 群体主要性状的变异及相关分析[J].玉米科学,2008,16(3):22-25.
- [10] 田龙,韩媛芬,丁维汉.陕西省玉米品种农艺性状与产量相关性研究[J].陕西农业科学,2017,63(6):1-4.
- [11] 蒋辅燕,陈洪梅,张培高,等.28 个玉米杂交组合产量及穗部性状研究[J].西南农业学报,2013,26(3):903-908.
- [12] 李淑君,董昕,付忠军,等.二十个玉米自交系穗部性状配合力及相关性分析[J].南方农业,2018,12(28):8-13,17.
- [13] 鲁珊,肖荷霞,毛彩云,等.玉米杂交种主要农艺性状的相关和通径分析[J].安徽农业科学,2017,45(21):26-27,58.