

Pb、Cu 胁迫对玉米(*Zea mays* L.)生长、 细胞色素合成以及重金属吸收特性的影响

陆 干, 李磊明, 陶祥运, 刘小红, 司友斌*

(安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036)

摘 要: 通过水培试验, 以玉米作为供试植株, 研究 Pb、Cu 胁迫对玉米生长发育、细胞色素合成以及重金属吸收的影响。结果表明, Pb、Cu 单一胁迫下玉米根长较对照组均偏低, 复合胁迫下根长随着 Pb、Cu 复合浓度的增加而减小。玉米植株在重金属 Pb、Cu 单一胁迫下生物量变化不明显, 但在不同水平 Pb、Cu 复合胁迫下, 表现随着重金属胁迫浓度增加, 玉米植株生物量先增加后减小。玉米叶绿素含量随着 Pb 胁迫浓度增加而增加、随着 Cu 浓度增加而降低; Pb、Cu 单一胁迫下 β -类胡萝卜素含量随着 Pb 浓度增加先降低后增加, 随着 Cu 含量增加先增加后降低; Pb、Cu 单一胁迫下花青素含量较对照组均增大, Cu 胁迫下花青素含量增加更明显, 最低增加 0.65%, 最高增加 21.25%。玉米不同器官对 Pb、Cu 积累有一定差异, 在单一重金属胁迫下 Pb、Cu 在玉米体内积累量与胁迫浓度呈正相关, 分布顺序为根系>茎叶, 根部是积累 Pb、Cu 主要器官。Pb、Cu 复合胁迫下加剧了重金属向玉米体内的迁移累积, 随着 Pb、Cu 复合胁迫浓度的增大, 根部吸收 Pb、Cu 逐步增大, 而茎叶吸收 Pb、Cu 趋于平稳。相关分析显示, 玉米细胞色素的合成取决于被胁迫的重金属类型, β -类胡萝卜素含量与植株体内 Pb 含量显著正相关, 花青素含量与 Cu 含量显著正相关, 揭示 Pb 对 β -类胡萝卜素诱导作用强、Cu 对花青素诱导作用强。

关键词: 重金属; 玉米; 细胞色素; 吸收特性

中图分类号: S513

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2017)05-0905-07

Effects of lead and copper stress on growth, pigment content and heavy metal absorption in corn (*Zea mays* L.)

LU Gan, LI Leiming, TAO Xiangyun, LIU Xiaohong, SI Youbin

(School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036)

Abstract: The influencing mechanism of Pb and Cu stress to the growth, synthesis of cytochrome and adsorption of heavy metal of corn was investigated using a hydroponics experiment. The results showed that single stress of Pb or Cu led to a relatively low root length of the corn, while Pb and Cu combined stress demonstrated a negative correlation between the root length and the compound concentration. The biomass of corn samples remained relatively stable in single stress experiment of Pb or Cu and it just increased firstly and then decreased with the increasing Pb or Cu concentration. The content of chlorophyll presented a negative correlation with Cu concentration, and a positive correlation with Pb concentration. The content of β -carotenoids in the single stress experiment increased firstly and then decreased with the increase of Cu concentration. The β -carotene decreased firstly and then increased with the increase of Pb concentration. The content of anthocyanin increased relatively in the single stress treatment of Pb or Cu, but the increased extent caused by Cu stress was more significant, with the lowest increase of 0.65% and the highest increase of 21.25%. The adsorption abilities of different corn organs to heavy metal Pb and Cu exhibited some differences. The accumulation of heavy metals in corn (root > stem and leaf) kept a positive correlation with the treatment concentration. The absorption abilities of roots gradually increased with the increase of heavy metal Pb and Cu combined stress, while the absorption abilities of stems and leaves remained relatively stable, which indicated that the abilities of corn plant to migrate and accumulate heavy metal were stimulated by Pb and Cu combined

收稿日期: 2017-03-13

基金项目: 国家科技支撑计划课题 (2015BAD05B04) 和国家重点研发计划课题 (2017YFD0801102) 共同资助。

作者简介: 陆 干, 硕士研究生。E-mail: 1053396074@qq.com

* 通信作者: 司友斌, 教授, 博士。E-mail: youbinsi@ahau.edu.cn

stress. The correlation analysis between cytochrome synthesis and heavy metal indicated that the synthesis of corn cytochrome depend on the metal type. There was significant correlation between Pb content and β -carotenoid content, while Cu content was significantly correlated with anthocyanin content. The results revealed that Pb exerted more effects in inducing β -carotenoids, while Cu made much more important roles in inducing anthocyanins. All of these would provide a scientific basis for plant heavy metal toxicity and resistance mechanism.

Key words: heavy metal; corn (*Zea mays* L.); cytochrome; absorption characteristics

Pb、Cu 是一类重金属污染物, 其中 Cu 亦是植物必需元素, 二者对植物生长的影响存在一定差异, 但是无论是 Cu 还是 Pb, 当其在植物体内含量超过某一界限浓度时, 都会对植物产生毒害作用, 轻则引起植物代谢过程发生紊乱, 生长发育受阻, 重则导致植物死亡^[1]。一般来说, 植物受到重金属污染时会出现生长迟缓、植株矮小、根系伸长受抑制直至停止, 同时叶片失绿、出现褐斑等症状^[2]。

重金属胁迫可导致酶的失活、变性, 还可导致碳水化合物合成、氮素代谢等失衡。过量 Cu^{2+} 对植物体产生毒性的生物学机理可能有两方面: 一是干扰离子间平衡系统, 导致离子吸收、运输、渗透和调节等发生障碍而使代谢紊乱; 二是 Cu^{2+} 取代某些酶蛋白中维持特定功能所必需的元素或与酶蛋白中非活性基团结合导致蛋白变性^[3]。研究发现, 随着 Pb 浓度升高, 玉米中超氧化物歧化酶 (SOD) 与过氧化氢酶 (CAT) 活性逐渐增强, 过氧化物酶 (POD) 活性则呈先上升后下降的趋势^[4]。

重金属毒害可以抑制某些细胞器参与生理生化进程, 严重时还会造成其功能丧失。但重金属毒害也将引起植物一些氧化应激反应, 几乎所有植物都具备拥有稳定的细胞浓度调节机制来调节细胞内金属离子的浓度, 从而最大限度地减少可能造成的损害。植物可能拥有几个潜在的细胞机制参与重金属的解毒^[5]。植物体内的抗氧化系统产生超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD) 和过氧化氢酶 (CAT), 这些酶类能清除重金属诱导产生的自由基, 保护细胞免受伤害。以上这些反应均在一些植物叶片及根系中被观察到^[6]。

β -类胡萝卜素和花青素是保护植物器官受压中最为重要的 2 种植物色素。 β -类胡萝卜素是一种并不具有抗氧化功能的细胞色素, 它在保护植物的光合作用方面具有重要意义^[7]。花青素可以对重金属作出应激反应, 植物受到重金属胁迫时将产生花青素和类胡萝卜素^[8], 同时也有研究表明它们增加植物的抗氧化能力来维持植物在受到生物与非生物胁迫下的正常生理水平^[9]。

已有一些研究主要关注植物如何应对来自单一重金属的毒害作用^[10-11], 但很少有人对复合胁迫下

的细胞色素合成进行研究。苏春田等^[12]研究表明重金属元素在玉米根、茎、叶中含量较高, 但富集系数均较低, 其中以叶最大, 种子平均富集系数最小。本研究以玉米 (*Zea mays* L.) 植株为材料, 基于矿区农田重金属污染问题, 着重研究重金属 Pb 和 Cu 复合胁迫下植株细胞色素合成以及重金属吸收特性, 研究结果将为植物重金属毒害及其抗性机理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 仪器与试剂

主要试剂: 硝酸铅 (PbNO_3), 硫酸铜 ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), 分析纯; 甲醇、乙腈、甲酸、甲基叔丁基醚、二丁基羟基甲苯 (BHT), 均为色谱纯。

供试玉米 (*Zea mays* L.) 作物品种为郑单 958。

试验仪器主要有: 电感耦合等离子光谱仪 (iCAP 6300, 美国 Thermo Fisher), 高效液相色谱仪 (Agilent 1200, 美国 Agilent Technologies)。

1.2 试验设计和处理

试验共设置 15 个处理, 分别为空白对照 (CK, 不添加任何重金属); 单一 Pb 处理组 ($50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 分别以 Pb1、Pb2、Pb3 代替; 单一 Cu 处理组 ($10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 分别以 Cu1、Cu2、Cu3 代替; Pb、Cu 复合污染处理组, Pb、Cu 以单一处理组的不同浓度同时添加, 分别以 Pb1Cu1、Pb1Cu2、Pb1Cu3、Pb2Cu1、Pb2Cu2、Pb2Cu3、Pb3Cu1、Pb3Cu2 和 Pb3Cu3 代替。每个处理重复 3 次, 外源重金属均以水溶液形式添加于营养液中^[13], 并通过摩尔质量控制 Pb 和 Cu 含量, 该营养液主要含有 SO_4^{2-} 、 PO_4^{3-} 和 NO_3^- 等阴离子, 为防止配制营养液时产生沉淀, 将配方中的各种化合物进行分类, 随后通过浓缩营养液 (母液) 稀释法稀释成工作营养液。

选取籽粒饱满的玉米种子, 用 $0.3\% \text{H}_2\text{O}_2$ 消毒 30 min, 洗净后均匀置于铺满小砂石的托盘中, 将托盘放于 25°C 左右培养箱中催芽。一周后, 选择长势一致的幼苗培养于上述营养液中。幼苗置于 $26/20^\circ\text{C}$ 下长日光周期为 16 h / 8 h (光/暗), 光照强度为 $190 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[13]。一周后收获测定。

1.3 测定项目及方法

玉米叶片叶绿素以 80%乙醇提取,紫外分光光度计测定^[14]。

β -类胡萝卜素提取^[15-18]:称取 1 g 玉米叶片,加入含 0.1% BHT (二丁基羟基甲苯)的 1 mol·L⁻¹ KOH 乙醇溶液(固液比 1:10),于 60 °C 水浴锅中加热 30 min,避光冷却至室温后过滤至 100 mL 容量瓶中,剩余残渣加入 5 mL 饱和 NaCl、10 mL 石油醚,振荡 10 min 后过滤至上述 100 mL 容量瓶中,提取 3 次;经 60 mL 分液漏斗将上层溶液转移至 25 mL 容量瓶中,过 0.45 μ m 滤膜,待测。

β -胡萝卜素的高效液相色谱测定条件:色谱柱为 Agilent 5 TC-C18 柱(250×4.6 μ m);流动相为 0.1% BHT 的甲醇:0.1%BHT 的甲基叔丁基醚=40:60 (体积比);流速 1.0 mL·min⁻¹;检测波长 430 nm;柱温 30 °C;进样量 20 μ L。

花青素提取^[19-20]:称取 1 g 玉米叶片,以 0.1% TFA (三氟乙酸)的甲酸溶液提取(固液比 1:20),随后置于离心机中 3 000 r·min⁻¹ 离心 30 min,提取 3 次后合并上清液过 0.45 μ m 滤膜,待测。

花青素的高效液相色谱测定条件:色谱柱为 Agilent 5 TC-C18 柱(250×4.6 μ m);流动相为 7.5% 甲酸溶液:乙腈=8:92 (体积比);检测波长 520 nm;流速 0.8 mL·min⁻¹;柱温 30 °C;进样量 20 μ L。

植株中重金属含量测定:将采得植株样品置于 110 °C 杀青 15 min 后 65 °C 下烘干至恒重;用粉碎机将烘干样品粉碎,准确称取(0.500±0.002) g,用硝酸-盐酸消煮,完全消解后,冷却、定容至 25 mL 容量瓶中。使用电感耦合等离子体发射光谱仪

(ICP-AES)测定重金属 Pb 和 Cu 含量。

试验过程中采用国家标准物质 GSS-1 和 GSS-12 进行质量控制,测量值与参考值相对标准偏差 RSD 均小于 10%。所有样品均设置 2 组平行样,其相对标准偏差均不超过 5%。试验器皿均使用稀硝酸浸泡过夜,自来水冲洗干净后超纯水润洗烘干。

1.4 数据分析

玉米植株茎叶重金属转运系数=玉米茎叶重金属含量/玉米根系重金属含量。

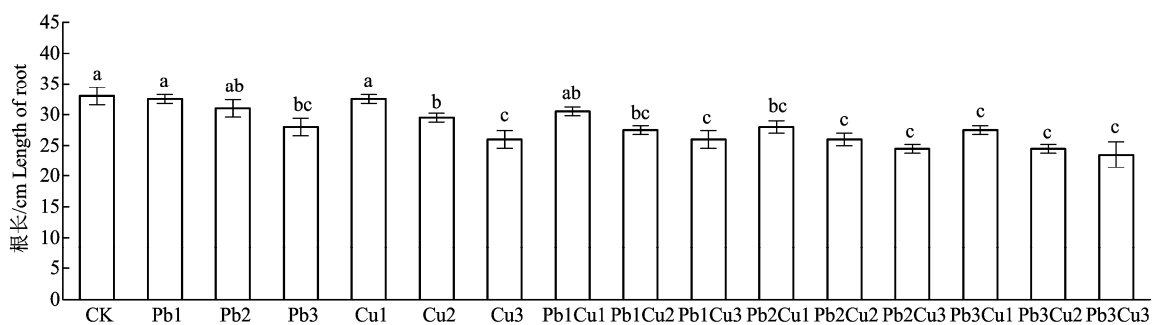
采用 Excel 以及 Origin7.5、SPSS19.0 统计软件进行数据处理分析。

2 结果与分析

2.1 Pb、Cu 胁迫对玉米生长的影响

由图 1 可见,不同浓度 Pb 和 Cu 处理对玉米根长具有明显的抑制作用。单一 Pb 和 Cu 处理下玉米根长度均低于对照组,且 Pb 和 Cu 浓度越大,根长越小,相比对照降低 1.5%~21.2%。Pb 和 Cu 复合胁迫时,玉米根长度随着复合胁迫浓度的增大而下降,且相比对照降低 7.6%~28.8%。通过与对照根伸长比较,高浓度重金属胁迫抑制玉米根系的伸长($P<0.05$)。

如图 2 所示,玉米植株在重金属 Pb、Cu 胁迫下生物量变化不显著,单一 Pb、Cu 处理下玉米生物量随着重金属胁迫水平先增加后减小。Pb、Cu 复合胁迫时玉米生物量与重金属胁迫水平呈负相关,玉米生物量随着重金属胁迫水平增加而降低。这是由于低浓度重金属促进植株的生长,过量的重金属对植物生长产生抑制作用。



数据为平均值,不同小写字母分别表示各种处理内不同样品之间的差异分别达到显著($P<0.05$)水平,用 LSD 比较(下同)

The data are mean values, different small letters show significant different ($P<0.05$) results among the different samples of every treatment by LSD (The same below)

图 1 Pb、Cu 胁迫对玉米生长期根伸长的影响

Figure 1 Effects of Pb and Cu stress on root elongation of *Zea mays* L. growth

2.2 Pb、Cu 胁迫对玉米细胞色素合成的影响

由图 3 可见,Pb、Cu 胁迫对玉米叶片叶绿素含量有显著影响。在 Pb 浓度为 50 mg·kg⁻¹ 处理下,

叶绿素含量低于对照组,随着 Pb 浓度增加,处理组叶绿素含量分别为对照的 103%和 132%,在单一 Cu 胁迫处理下,叶绿素含量随着 Cu 浓度增加先升

后降, 3个处理组叶绿素含量分别为对照的 127%、106%和 91%, 差异不显著。复合胁迫下, 在 Pb 浓度为 50 mg·kg⁻¹ 与 150 mg·kg⁻¹ 的 3 个处理中, 随着 Cu 浓度的提高, 玉米叶片叶绿素含量呈先升高后降低的趋势, 且均高于各自 Pb 处理下叶绿素含量, 说明 Cu 的添加可以缓解高浓度 (50 mg·kg⁻¹ 与 150 mg·kg⁻¹) Pb 胁迫对玉米幼苗生长的毒害。而在 Pb 浓度为 200 mg·kg⁻¹ 的 3 个处理中, 随着 Cu 浓度提高, 玉米叶片叶绿素含量均低于 200 mg·kg⁻¹ Pb 处理下叶绿素含量, 说明高浓度 Pb 处理下, Cu 与 Pb 协同作用共同阻碍叶绿素的合成。

如图 4 所示, Pb、Cu 胁迫对玉米叶片 β-类胡萝卜素含量有显著影响。单一 Pb 胁迫下, β-类胡萝卜素含量与 Pb 添加量显著 ($P < 0.05$), 并随着 Pb 处理浓度的增大先降低后增加, 最高增加 24.15%。

单一 Cu 胁迫下, β-类胡萝卜素随着 Cu 处理浓度的增大先增加后减小, 最高增加 14.43%。复合胁迫下, 同一 Cu 处理的不同水平下, β-类胡萝卜素含量均先降低后增加, 这一现象与单一 Pb 胁迫下 β-类胡萝卜素含量变化一致。

如图 5 所示, Pb、Cu 胁迫对玉米叶片花青素含量有显著影响。不同水平 Pb、Cu 胁迫下花青素含量较对照组均增大, 其中不同 Cu 浓度处理下花青素含量增加较明显, 最低增加 0.65%, 最高增加 21.25%。复合胁迫下, 在 Pb 浓度为 50 mg·kg⁻¹ 处理下, 花青素含量随着 Cu 浓度增加而增加 ($P < 0.05$), 说明 Pb、Cu 协同作用促进了花青素的合成。在 Pb 浓度为 150 mg·kg⁻¹ 与 200 mg·kg⁻¹ 的 3 个处理中, 随着 Cu 浓度增加, 花青素含量先增加后降低, 说明重金属 Pb、Cu 协同作用共同阻碍花青素的合成。

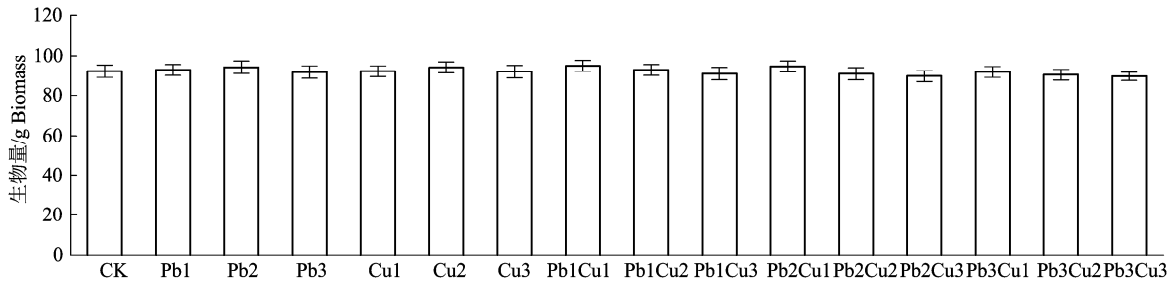


图 2 Pb、Cu 胁迫对玉米生物量变化的影响

Figure 2 Effects of Pb and Cu stress on biomass change of *Zea mays* L. growth

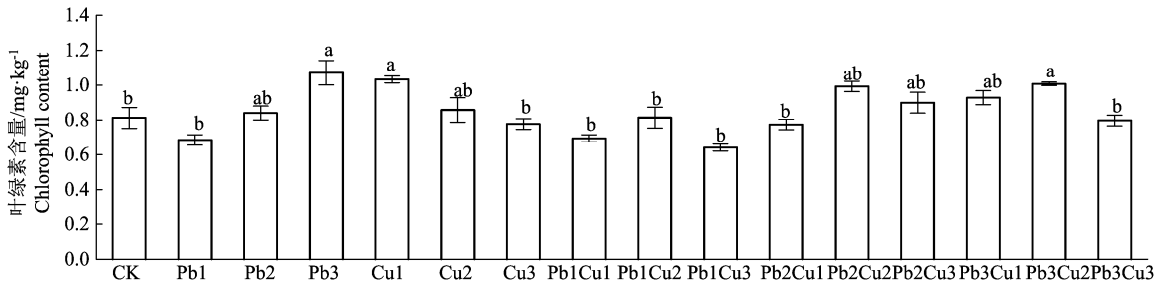


图 3 Pb、Cu 胁迫下玉米叶片叶绿素含量变化

Figure 3 Effects of Pb and Cu stress on leaf chlorophyll content of *Zea mays* L.

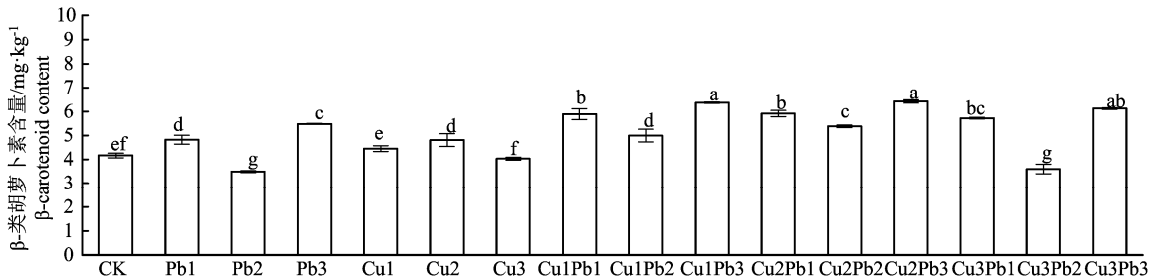


图 4 Pb、Cu 胁迫下玉米叶片 β-类胡萝卜素含量变化

Figure 4 Effects of Pb and Cu stress on leaf β-carotenoid content of *Zea mays* L.

2.3 Pb、Cu 胁迫对玉米重金属吸收特性的影响

如图 6 所示, 单一 Pb、Cu 胁迫下玉米茎叶 Pb 含量平均值为 5.75 mg·kg⁻¹, 其中最小值为 1.93

mg·kg⁻¹, 最大为 17.21 mg·kg⁻¹; 玉米根部 Pb 含量平均值为 15.40 mg·kg⁻¹, 其中最小值为 4.46 mg·kg⁻¹, 最大为 42.30 mg·kg⁻¹。Pb 和 Cu 复合胁迫下玉米茎叶

以及根部 Pb 含量均有所增加, 且复合浓度增大, 根部吸收 Pb 逐步增大, 但茎叶吸收 Pb 逐步趋于平稳。

如图 7 所示, 单一 Pb、Cu 胁迫下玉米茎叶 Cu 含量平均值为 $5.53 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其中最小值为 $2.46 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 最大为 $10.73 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 玉米根部吸收积累

Cu 含量平均值为 $9.46 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其中最小值为 $4.55 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 最大为 $21.24 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。Pb、Cu 复合胁迫下的玉米茎叶以及根部 Cu 含量随着复合浓度的增加亦增大, 根系吸收 Cu 较为明显, 而茎叶吸收 Cu 增加到一定程度趋于平稳。

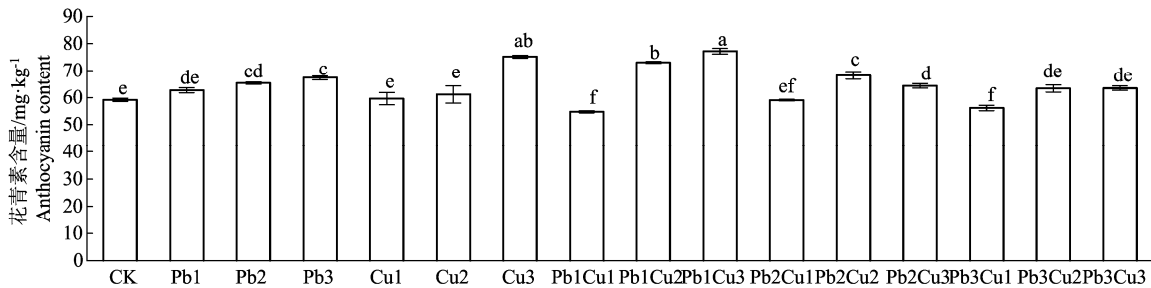


图 5 Pb、Cu 胁迫下玉米叶片花青素含量变化

Figure 5 Effects of Pb and Cu stress on leaf anthocyanin content of *Zea mays* L.

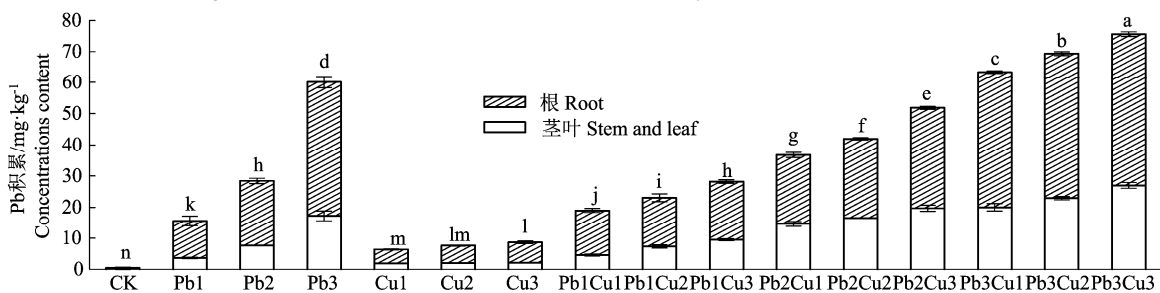


图 6 重金属胁迫下玉米植株各器官 Pb 含量

Figure 6 The contents of Pb in different organs of *Zea mays* L. under heavy metals stress

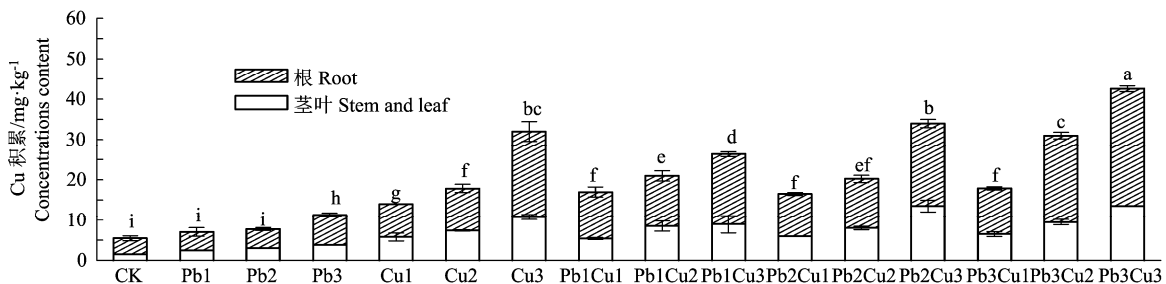


图 7 重金属胁迫下玉米植株各器官 Cu 含量

Figure 7 The contents of Cu in different organs of *Zea mays* L. plants under heavy metals stress

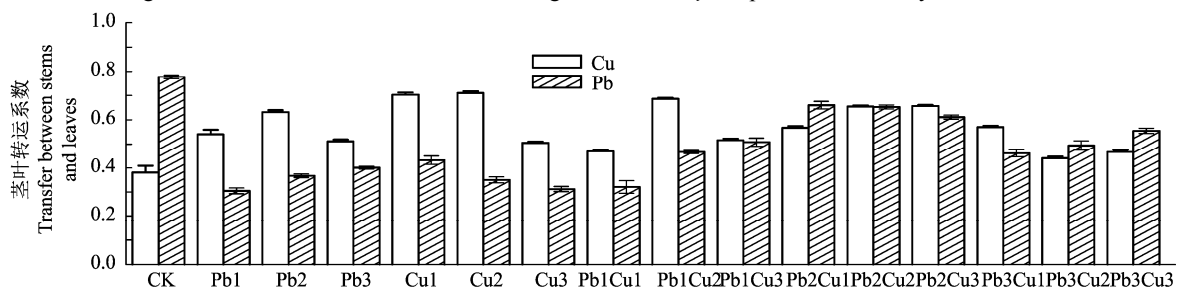


图 8 重金属胁迫下玉米茎叶 Pb、Cu 转运系数

Figure 8 The heavy metal transfer between stems and leaves in *Zea mays* L. under Pb and Cu combined pollution

如图 8 所示, 玉米地上部重金属转运系数均 <1.0 。Cu 胁迫下规律性并不明显, Pb 胁迫下基本遵循随着 Pb 浓度增大玉米茎叶吸收 Pb 增多; Pb、

Cu 复合胁迫时, 随着复合浓度的增大, Pb 向玉米根上部转运加大。

3 讨论

在不同水平的 Pb、Cu 胁迫浓度下,玉米植株根伸长均表现不同程度的降低,表明根系是高等陆生植物直接受到重金属毒害的主要器官^[21-22]。铅使玉米生长受阻的主要原因是玉米根系遭受毒害而丧失正常功能,减少细胞的有效分裂速度,抑制根系的生长,妨碍根系对养料的吸收从而影响植株的地上生长^[23]。植物生物量一定程度上反映植物的生长活力。图 2 表明低水平 Pb ($\leq 150 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、Cu ($\leq 30 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 对玉米幼苗生长有促进作用,而高水平下会抑制植株生长,降低生物量。此外玉米植株在重金属 Pb、Cu 单一胁迫下生物量变化不明显,这可能是由于重金属胁迫首先影响到植物根系的生长,进而逐步影响到地上部的生长,这与张艳丽的研究一致^[24]。根长与生物量的不同变化反映根系对重金属的敏感性要明显比地上部分高,同时也说明重金属污染的危害具有一定的隐蔽性^[25]。总叶绿素含量多少直接影响着植物体的光合速率^[26]。图 3 试验结果显示重金属高于一定浓度时,叶绿素含量随着重金属浓度升高而降低,说明 Pb、Cu 污染在一定程度上影响了叶绿素的积累,植物光合作用相应受到影响。本试验中,Pb 胁迫下叶绿素含量逐渐增加,这与孙小霞^[27]对高羊茅研究结果一致,即低浓度的 Pb 短期内会提高叶绿素含量。低浓度 Cu 胁迫对植株叶绿素合成也具有一定促进作用,究其原因在于适量的 Cu 可弥补植物体内质体蓝素所需,而质体蓝素又是植株光合作用中不可缺少的一员^[28]。类胡萝卜素是叶绿体色素的重要组成部分,可通过吸收过多光能,避免重金属对叶绿素直接伤害^[29-30]。低水平 Pb、Cu 胁迫下均促进 β -类胡萝卜素的合成,随着 Pb、Cu 胁迫水平增加, β -类胡萝卜素呈现不同的趋势。复合胁迫下,低 Pb、高 Pb 浓度 3 个处理组之间不显著,说明 Pb 影响 β -类胡萝卜素的合成作用更大。但当复合胁迫浓度过大时, β -类胡萝卜素含量呈下降趋势,说明低浓度的 Pb、Cu 复合胁迫时通过协同作用促进 β -类胡萝卜素的合成。高浓度的 Pb、Cu 复合胁迫具有拮抗作用,抑制了 Pb、Cu 复合胁迫时通过协同作用促进 β -类胡萝卜素合成。花青素属于类黄酮色素,又是保护植物器官受压的重要色素^[8]。花青素具有很强的抗氧化性,能清除超氧根阴离子、过氧化氢以及金属螯合物^[31]。重金属可以产生氧自由基^[32]。因此,花青素在重金属解毒机制方面具有很大的作用。图 5 试验结果显示两种重金属 Pb、Cu 不同胁迫水平在一定程度上

均促进花青素的合成,复合胁迫下,低 Cu 浓度 3 个处理组之间不显著,说明 Cu 影响花青素的合成作用更大。在 Pb 浓度为 $50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理下,花青素含量随着 Cu 浓度增加而增加,说明 Pb、Cu 协同作用促进了花青素的合成。在 Pb 浓度为 $150 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 与 $200 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的 3 个处理中,随着 Cu 浓度增加,花青素含量先增加后降低,说明重金属 Pb、Cu 协同作用共同阻碍花青素的合成。

同一玉米品种不同器官对同一金属元素的积累能力也不同^[33]。玉米根系中 Pb、Cu 含量远远大于茎叶中 Pb、Cu 含量,外源添加 Pb、Cu 含量越高,玉米植株根系 Pb、Cu 含量越高,玉米茎叶吸收 Pb、Cu 量也逐渐增加,在重金属胁迫下 Pb、Cu 在玉米体内积累量与重金属处理浓度呈正相关 ($P < 0.05$),分布顺序为根系 > 茎叶,根部是积累 Pb、Cu 的主要器官,根茎间迁移率随着处理浓度增大先增加后减小。曹莹等^[34]研究表明复合污染条件下,玉米体内铅含量从大到小依次为根、下叶、茎、上叶和籽粒。转运系数越小说明重金属越容易积累在根部^[35]。

通过玉米细胞色素合成与体内重金属含量相关性分析可知,植株体内 β -类胡萝卜素含量与 Pb 含量显著相关 ($P < 0.05$),花青素含量与 Cu 含量显著相关 ($P < 0.05$),表明 β -类胡萝卜素和花青素的合成取决于被胁迫的重金属类型,这与前人研究重金属类型、浓度与细胞色素间关系一致^[36-39]。类似报道如拟南芥属中,Cu 胁迫下导致了花青素积累^[39]。植株体内细胞色素合成与重金属胁迫之间的相关性将为植物重金属毒害及其抗性机理提供科学依据。

4 结论

低浓度 Pb、Cu 胁迫促进玉米植株生长发育,其根伸长增加,而高浓度 Pb、Cu 胁迫下玉米生长受抑制,根伸长下降。

Pb、Cu 胁迫对玉米叶片叶绿素含量有显著影响; β -类胡萝卜素和花青素的合成取决于被胁迫的重金属类型,植株体内 β -类胡萝卜素含量与 Pb 含量显著相关,花青素含量与 Cu 含量显著相关。

不同水平 Pb、Cu 胁迫下,玉米植株重金属含量从大到小均为根 > 茎叶,根茎转运系数小于 1.0,说明玉米具有一定的富集 Pb、Cu 能力,尤其以根部吸持 Pb、Cu 能力最强,这将阻止 Pb、Cu 向茎叶运输,从而减轻玉米植株毒害。

参考文献:

- [1] 乔琳,傅兆麟. Cu、Fe、Zn 和 Pb 对玉米种子萌发率及

- 淀粉酶活性的影响[J]. 种子, 2010, 29(6): 36-38.
- [2] 王志香, 周光益, 吴仲民, 等. 植物重金属毒害及其抗性机理研究进展[J]. 河南林业科技, 2007, 27(2): 26-28.
- [3] 林文章, 徐磊. 铜污染对高等植物的生理毒害作用研究[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(1): 201-204.
- [4] 张红利, 李雪梅, 陈强, 等. 铅对不同玉米幼苗抗氧化活性及根系活力的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2006, 28(2): 119-122.
- [5] GRATÃO P L, POLLE A, LEA P J, et al. Making the life of heavy metal-stressed plants a little easier[J]. *Funct Plant Biol*, 2005, 32(6): 481-494.
- [6] CUYPERS A N N, VANGRONSVELD J, CLIJSTERS H. Peroxidases in roots and primary leaves of *Phaseolus vulgaris* copper and zinc phytotoxicity: a comparison[J]. *J Plant Physiol*, 2002, 159(8): 869-876.
- [7] STRZĄŁKA K, KOSTECKA-GUGAŁA A, LATOWSKI D. Carotenoids and environmental stress in plants: significance of carotenoid-mediated modulation of membrane physical properties[J]. *Russ J Plant Physiol*, 2003, 50(2): 168-173.
- [8] HALE K L, MCGRATH S P, LOMBI E, et al. Molybdenum sequestration in *Brassica* species. A role for anthocyanins?[J]. *Plant Physiol*, 2001, 126(4): 1391-1402.
- [9] NEILL S O, GOULD K S, KILMARTIN P A, et al. Antioxidant activities of red versus green leaves in *Elatostema rugosum*[J]. *Plant Cell Physiol*, 2002, 25(4): 539-547.
- [10] TEWARI R K, KUMAR P, SHARMA P N. Antioxidant responses to enhanced generation of superoxide anion radical and hydrogen peroxide in the copper-stressed mulberry plants[J]. *Planta*, 2006, 223(6): 1145-1153.
- [11] LI X, YANG Y, ZHANG J, et al. Zinc induced phytotoxicity mechanism involved in root growth of *Triticum aestivum* L.[J]. *Ecotox Environ Safe*, 2012, 86: 198-203.
- [12] 苏春田, 唐健生, 潘晓东, 等. 重金属元素在玉米植株中分布研究[J]. 中国农学通报, 2011, 7(8): 323-327.
- [13] KIDD P S, LIUGANY M, POSCHENRIEDER C H, et al. The role of root exudates in aluminium resistance and silicon-induced amelioration of aluminium toxicity in three varieties of maize(*Zea mays* L.) [J]. *J Exp Bot*, 2001, 52(359): 1339-1352.
- [14] VERNON L P. Spectrophotometric determination of chlorophylls and pheophytins in plant extracts[J]. *Anal Chem*, 1960, 32(9): 1144-1150.
- [15] ALVES A B, SILVA M G, CARVALHO P R N, et al. Validação e estimativa da incerteza de método para análise de licopeno e β -caroteno em polpa de tomate por cromatografia líquida de alta eficiência[J]. *Quim Nova*, 2010, 33(9): 1962-1966.
- [16] HA J, SHIM Y S, SEO H Y, et al. Rapid method for determination of β -carotene in foods using ultra high performance liquid chromatography[J]. *Food Sci Biotechnol*, 2010, 19(5): 1199-1204.
- [17] KIM J K, KIM J I, LEE N K, et al. Extraction of β -carotene produced from yeast *Rhodospiridium* sp. and its heat stability[J]. *Food Sci Biotechnol*, 2010, 19(1): 263-266.
- [18] TSAI Y C, WU W B, CHEN B H. Preparation of carotenoids and chlorophylls from *Gynostemma pentaphyllum* (Thunb.) Makino and their antiproliferation effect on hepatoma cell[J]. *J Med Food*, 2010, 13(6): 1431-1442.
- [19] HE J, GIUSTI M M. High-purity isolation of anthocyanins mixtures from fruits and vegetables—A novel solid-phase extraction method using mixed mode cation-exchange chromatography[J]. *J Chromatogr A*, 2011, 1218(44): 7914-7922.
- [20] LUQUE-RODRÍGUEZ J M, DE CASTRO M D L, PÉREZ-JUAN P. Dynamic superheated liquid extraction of anthocyanins and other phenolics from red grape skins of winemaking residues[J]. *Bioresource Technol*, 2007, 98(14): 2705-2713.
- [21] KARATAGLIS S, SYMEONIDIS L, MOUSTAKAS M. Effect of toxic metals on the multiple forms of esterases of *Triticum aestivum* cv. Vergina[J]. *J Agron Crop Sci*, 1988, 160(2): 106-112.
- [22] LIDON F C, HENRIQUES F S. Effects of copper toxicity on growth and the uptake and translocation of metals in rice plants[J]. *J Plant Nutr*, 1993, 16(8): 1449-1464.
- [23] 郭靛, 黎云祥, 杨小宁, 等. 微量重金属元素对玉米生长影响的研究进展[J]. 资源与环境, 2008, 24(7): 636-640.
- [24] 张艳丽. Cu、Pb 胁迫对小麦种子萌发及幼苗生长的影响[D]. 成都: 四川师范大学, 2008.
- [25] 蒋煜封, 胡雪菲, YVES U J, 等. 典型工业区土壤重金属污染特征及生物有效性研究[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(7): 58-64.
- [26] 彭立, 杨振乾, 刘敏敏, 等. 大气污染物与绿化植物光合速率的关系研究[J]. 生态环境学报, 2015, 24(7): 1166-1170.
- [27] 孙小霞. 高羊茅对铅递进胁迫的生理响应[J]. 河南科技大学学报, 2006, 27(6): 75-78.
- [28] 王友保, 黄永杰, 严密, 等. 铜污染对高羊茅生长及活性氧代谢影响的研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(6): 167-170; 191.
- [29] D'AMBROSIO N, ARENA C, DE SANTO A V. Temperature response of photosynthesis, excitation energy dissipation and alternative electron sinks to carbon assimilation in *Beta vulgaris* L.[J]. *Environ Exp Bot*, 2006, 55(3): 248-257.
- [30] 杨青华, 马二培, 马兴立. 丁二酸浸种对玉米叶片光合色素含量及相关酶活性的影响[J]. 华北农学报, 2009, 24(5): 155-158.
- [31] GÜLÇİN İ, BERASHVILI D, GEPDIREMEN A. Antiradical and antioxidant activity of total anthocyanins from *Perilla pankinensis* decne[J]. *J Ethnopharmacol*, 2005, 101(1): 287-293.
- [32] DIETZ K J, BAIER M, KRÄMER U. Free radicals and reactive oxygen species as mediators of heavy metal toxicity in plants[M]// Gupta D K, Corpas F J, Palma J M. Heavy metal stress in plants. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 1999: 73-97.
- [33] 陈建军, 于蔚, 祖艳群, 等. 玉米 (*Zea mays*) 对镉积累与转运的品种差异研究[J]. 生态环境学报, 2014, 23(10): 1671-1676.
- [34] 曹莹, 黄瑞冬, 王国骄, 等. 铅和镉复合胁迫对玉米吸收铅特性及产量影响[J]. 玉米科学, 2007, 15(3): 91-94.
- [35] PÉREZ-DE-MORA, BURGOS P, MADEJÓN E, et al. Microbial community structure and function in a soil contaminated by heavy metals: effects of plant growth and different amendments [J]. *Soil Biol Biochem*, 2006, 38: 327-341.
- [36] COLLIN V C, EYMERY F C O, GENTY B, et al. Vitamin E is essential for the tolerance of *Arabidopsis thaliana* to metal-induced oxidative stress[J]. *Plant Cell Environ*, 2008, 31(2): 244-257.
- [37] SINHA S, BHATT K, PANDEY K, et al. Interactive metal accumulation and its toxic effects under repeated exposure in submerged plant *Najas indica* Cham[J]. *B Environ Contam Tox*, 2003, 70(4): 696-704.
- [38] FARGAŠOVÁ A. Phytotoxic effects of Cd, Zn, Pb, Cu and Fe on *Sinapis alba* L. seedlings and their accumulation in roots and shoots[J]. *Biologia plantarum*, 2001, 44(3): 471-473.
- [39] BAEK S A, HAN T, AHN S K, et al. Effects of heavy metals on plant growths and pigment contents in *Arabidopsis thaliana*[J]. *Plant Pathology J*, 2012, 28(4): 446-452.