

单一及复合污染下铅铜在玉米幼苗体内积累与迁移的动态变化

李 凡, 张义贤

(山西大学生命科学学院, 山西 太原 030006)

摘 要:采用光照培养箱培养及原子吸收分光光度法,研究了不同浓度($10\sim 100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 单一及复合污染后玉米幼苗体内各器官中积累与迁移的动态变化规律。结果表明,在单一污染条件下, Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 在玉米体内的积累量与重金属处理浓度和处理时间呈正相关,分布顺序为根>茎>叶,积累量为 $\text{Pb}^{2+}>\text{Cu}^{2+}$,根茎间迁移率随着处理浓度增高逐渐减小,茎叶间迁移率变化规律为先减小后增大;复合污染后,随着处理浓度和处理时间的增加, Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 在玉米体内的积累量逐渐增大,其中 $(100+100)\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度下30 d处理时积累量达到最大值, Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 在玉米各器官中的分布规律为根>茎>叶,积累能力为 $\text{Pb}^{2+}>\text{Cu}^{2+}$,根茎间的迁移率表现为在10~20 d时随浓度增高逐渐上升,30 d时逐渐下降,而茎叶间的迁移率则表现为随处理浓度的增加先升高后降低。 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 复合污染后玉米体内 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 的含量均大于单一处理, Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 复合处理具有协同效应。实验结果也证明玉米是一种易富集 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 的作物。

关键词:重金属;玉米幼苗;积累;分布

中图分类号:X503.231 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2010)01-0019-06

Dynamics of Accumulation and Distribution of Cu, Pb in *Zea mays* L. Seedlings Under Single or Combined Pollution of Cu and Pb

LI Fan, ZHANG Yi-xian

(School Life Science, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: The elements Cu and Pb are two important heavy metal pollutants. Pb^{2+} is a non-essential element which has an obvious toxic effect on cell ultrastructure, seed vitality, growth, development and nutrient metabolism with its accumulation in crops. Cu^{2+} is an essential element, which may promote growth and development with an optimum quantity, but its excessiveness can have some obvious biological toxicity. The accumulation and distribution of Cu^{2+} and Pb^{2+} in *Zea mays* seedlings under different concentrations ($10, 50, 100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) were studied in this experiment using atomic absorption spectrometry after the treatment of 10, 20 and 30 d. The result showed that under single or combined pollution of Cu^{2+} and Pb^{2+} , the content of heavy metals in *Z. mays* seedlings enhances with the increasing of treatment concentration and treatment duration, and the accumulation amount in roots of *Z. mays* seedlings was the largest at 30 d with $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ of heavy metals. The content of Cu^{2+} or Pb^{2+} in different organs of *Z. mays* seedlings was characterized by roots>stems>leaves, and the accumulation amount in each organ was $\text{Pb}^{2+}>\text{Cu}^{2+}$. The accumulation amount of Cu^{2+} , Pb^{2+} in *Z. mays* Seedlings under combined pollution was much more than that under single pollution, and it indicated that compared with the single pollution, the combined pollution by Cu^{2+} and Pb^{2+} displays some kind of synergistic effect. Meanwhile, the mobility of Cu^{2+} , Pb^{2+} was basically dependent on Cu^{2+} , Pb^{2+} concentration and treatment duration. The mobility between roots and stems under Cu^{2+} or Pb^{2+} single pollution increased with heavy metal concentration, but the mobility between stems and leaves firstly declined, and then increased with increasing of Cu^{2+} or Pb^{2+} concentration. The mobility between stems and leaves under combined pollution was larger than that under single pollution.

Keywords: heavy metal; *Zea mays* seedling; accumulation; distribution

收稿日期:2009-06-10

基金项目:山西省自然科学基金项目(2006011074)

作者简介:李 凡(1984—),男,山西太原人,硕士研究生,主要从事植物遗传学研究。E-mail:lifan19840729@163.com

通讯联系人:张义贤 E-mail:zhangyx@sxu.edu.cn

Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 是两种重要的重金属污染物,具有在环境中易积累、难降解的特性^[1-2]。其中, Pb^{2+} 是作物生长的非必需元素,进入作物体内后会降低种子活力、抑制根系生长、引起各种生理代谢异常^[3-5]。 Cu^{2+} 是作物生长发育必需的微量营养元素,也是部分氧化还原酶的组成部分,但过量的铜可使作物细胞膜及多种细胞器的膜系统受损,使 K^+ 等从细胞中渗出,抑制多种酶的活性,从而造成毒害效应^[6-8]。目前, Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 对玉米污染的研究主要集中在单一污染方面,有关 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 的复合污染还未见报道。本实验主要研究了不同浓度的重金属 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 单一及复合污染在玉米幼苗体内的富集、迁移及分布的动态变化,以期了解玉米在单一及复合重金属污染条件下对重金属的吸收代谢提供实验依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验所用玉米(*Zea mays*)品种为海禾一号,由山西省农科院品种资源所提供,该玉米在生长过程中未受任何重金属污染。

1.2 材料培养及处理

选取饱满、大小均一的玉米种子,用5%的 NaClO 消毒30 min,然后用去离子水冲洗干净,30℃温水浸种5 h,置于28℃恒温培养箱中避光发芽,种子萌发后播于10 cm口径的塑料盆中,每盆5粒,保持每盆土重一致。分别加入不同浓度 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 溶液(CuCl_2 和 PbCl_2 用去离子水配制,浓度以纯金属离子计),处理

时间为10~30 d,所有处理均在光照培养箱中进行,昼夜温度(24℃/18℃),每12 h补充1次去离子水。

Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 单一处理的投加浓度分别为10、50、100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$;复合处理(Cu^{2+} + Pb^{2+})的投加浓度分别为:(10+10)、(50+50)、(100+100) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (文中所涉及到的重金属浓度均指投加浓度),实验所用土壤中 Cu 、 Pb 的背景值分别为0.024和0.159 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$;对照用去离子水处理(以CK表示),每一处理组设3个重复。

1.3 测试方法

重金属处理的玉米幼苗培养至10、20、30 d时分别取样,将各处理组幼苗的根、茎、叶分别切离,用去离子水冲洗数次,自然晾干后放入烘箱(70℃)烘干,取出研磨成粉状,称取干重为0.5 g的植株样品,加入 $\text{HNO}_3\text{--HClO}_4$ (4:1)湿法消化,定容后用SHMADZU(AA-6300)原子吸收分光光度计测定 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 的含量,重金属含量以 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 计。

迁移率的计算公式为:

根茎迁移率=茎中重金属含量/(根中重金属含量+茎中重金属含量) $\times 100\%$

茎叶迁移率=叶中重金属含量/(茎中重金属含量+叶中重金属含量) $\times 100\%$

实验所得数据通过SPSS软件进行ANOVA分析。

2 结果与分析

2.1 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 单一污染在玉米幼苗体内的积累与分布

Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 单一污染下玉米幼苗各部位 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 的积累含量结果(表1)显示,玉米幼苗对 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 具有很

表1 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 单一污染在玉米幼苗体内不同部位含量的分布($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
Table 1 The contents of Cu^{2+} , Pb^{2+} in different parts of *Z. mays* seedling under single pollution($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	时间/d	Cu			Pb		
		根	茎	叶	根	茎	叶
0	10	0.55±0.04aA	0.022±0.002aA	0.001±0.000 3aA	2.32±0.02aA	0.058±0.004aA	0.005±0.000 4aA
	20	0.96±0.08aA	0.067±0.006aA	0.005±0.000 7aA	4.08±0.07aA	0.113±0.021bA	0.008±0.001bA
	30	1.23±0.13aA	0.095±0.004aA	0.008±0.001aA	11.25±0.21aB	0.216±0.012bA	0.013±0.005bA
10	10	28.26±0.65aB	20.80±0.60bB	10.54±0.48aB	135.50±1.37aC	67.17±0.83bB	24.17±0.32cB
	20	61.79±1.33aC	34.53±1.01bC	18.96±1.54cC	174.86±1.45aD	116.33±1.05bC	40.59±0.40cC
	30	105.17±1.08aD	49.61±0.59bD	27.87±1.53cD	265.84±4.15aE	182.57±0.79bD	146.16±1.72cD
50	10	33.32±2.08aE	23.95±1.20bE	11.59±0.60cB	175.22±1.71aD	77.97±0.42bE	27.45±0.52cE
	20	88.57±1.32aF	45.13±1.29bF	23.68±1.07cF	257.39±2.49aG	148.73±2.25bF	48.13±0.15cF
	30	117.35±1.06aG	54.05±1.99bG	31.86±0.94cG	343.90±0.75aH	217.26±2.98bG	154.16±0.87cG
100	10	47.75±1.02aH	25.49±0.57bE	15.10±0.58cH	264.47±1.34aE	142.42±1.18bH	34.37±0.43cH
	20	116.79±2.36aG	61.61±1.09bI	26.15±1.08cD	364.10±1.77aJ	222.34±1.78bI	61.87±1.39cI
	30	205.86±2.38aJ	72.04±0.84bJ	47.21±1.50cI	425.25±1.26aK	291.69±3.06bJ	188.17±2.55cJ

注:表中同列和同行数据差异分别以大写字母和小写字母表示,字母不同的表示差异显著($P<0.05$),以下各表同。

强的富集能力。重金属处理组的 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 含量均显著高于对照组 ($P<0.05$), 随着重金属处理浓度和处理时间的增大, 幼苗不同器官中 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 的含量逐渐增大, 处理至 30 d 时达到最大值。其中玉米根中 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 的含量显著高于茎、叶 ($P<0.05$), 表明重金属进入玉米幼苗体内后首先积累在根部, 然后向茎、叶部迁移。玉米幼苗各器官对两种重金属的富集能力为根>茎>叶, 而 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 在玉米体内积累含量的大小顺序为 $\text{Pb}^{2+}>\text{Cu}^{2+}$ 。

2.2 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 复合污染在玉米幼苗体内的积累与分布

由表 2 可见, 与单一污染相比, 不同浓度 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 复合污染后玉米幼苗体内不同器官中两种重金属含量随着处理时间增加均有不同程度提高, 且复合处理浓度越高, 重金属积累量越大, 如在 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 复合处理 (10+10) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 30 d 时, 根内 Cu^{2+} 含量比单一处理时增加了 57%, 茎内增加了 29%, 叶内增加了

103%; 而 Pb^{2+} 含量在根、茎、叶中分别增加了 63%, 76% 和 49%, 表现出明显的剂量效应关系。

在处理 10~30 d 范围内, 玉米幼苗各器官中 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 的富集能力同样表现为根>茎>叶, 除 (50+50) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Cu^{2+} + Pb^{2+} 处理 20 d 后茎中 Cu^{2+} 含量与叶中相比差异不显著外, 其他各处理组间的差异均达到显著水平 ($P<0.05$)。从两种重金属在玉米幼苗不同器官的富集量来看, Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 复合处理后不同器官中的重金属积累量依次为 $\text{Pb}^{2+}>\text{Cu}^{2+}$ 。表明玉米幼苗期对 Pb^{2+} 的吸收积累能力大于 Cu^{2+} , 这与李静等^[9]在玉米中得到的结果相似。实验结果表明, Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 复合污染促进了重金属在幼苗体内的吸收, 两种重金属的积累具有协同作用。

2.3 不同时间处理后 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 在玉米幼苗体内的迁移变化规律

图 1 和图 2 显示了 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 单一处理后在玉米

表 2 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 复合污染条件下玉米幼苗体内不同部位含量的分布 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 2 The contents of Cu^{2+} , Pb^{2+} in different parts of *Z. mays* seedling under combined pollution of Cu and Pb ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	时间/d	Cu			Pb		
		根	茎	叶	根	茎	叶
0	10	0.55±0.04aA	0.022±0.002aA	0.001±0.000 3aA	2.32±0.02aA	0.058±0.004aA	0.005±0.000 4aA
	20	0.96±0.08aA	0.067±0.006aA	0.005±0.000 7aA	4.08±0.07aA	0.113±0.021bA	0.008±0.001bA
	30	1.23±0.13aA	0.095±0.004aA	0.008±0.001aA	11.25±0.21aB	0.216±0.012bA	0.013±0.005bA
10+10	10	39.25±1.06aB	21.57±0.48bB	11.70±0.55cB	234.98±0.02aC	104.19±1.61bB	74.32±1.78cB
	20	59.44±0.79aC	37.49±1.05bC	34.35±1.21bC	345.74±1.52aD	162.46±2.78bC	126.34±8.16cC
	30	165.05±1.40aD	64.39±2.03bD	56.83±1.84cD	433.34±6.83aE	320.48±0.71bD	217.43±4.66cD
50+50	10	48.02±0.77aE	32.01±1.20bE	13.90±0.61cB	276.69±2.41aF	115.75±2.21bE	104.24±0.93cE
	20	117.03±1.60aF	53.24±1.29bF	65.07±2.59cF	383.02±1.97aG	192.20±4.30bF	142.46±2.52cF
	30	198.82±2.02aG	87.88±1.99bG	81.43±0.86cG	509.60±7.50aG	385.83±8.36bG	283.77±2.67cG
100+100	10	58.26±3.18aC	34.90±1.35bCE	28.51±0.78cH	327.90±2.50aI	256.30±1.99bH	151.33±3.57cH
	20	180.37±0.90aI	96.25±1.81bI	75.48±4.68cI	404.24±1.90aJ	284.17±4.96bI	186.01±7.57cI
	30	278.92±3.16aJ	116.24±1.81bJ	97.95±1.69cJ	644.28±7.34aK	437.19±7.39bJ	306.16±3.53cJ

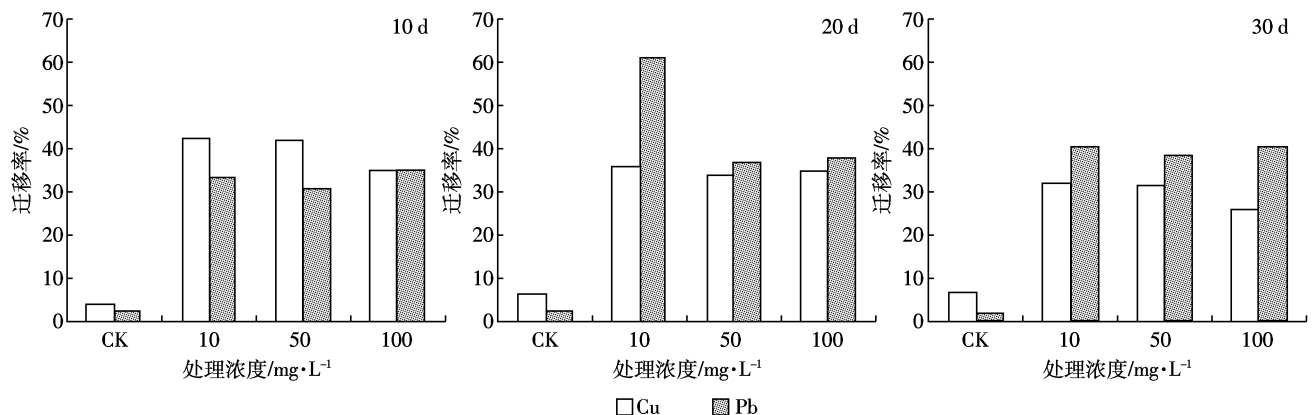
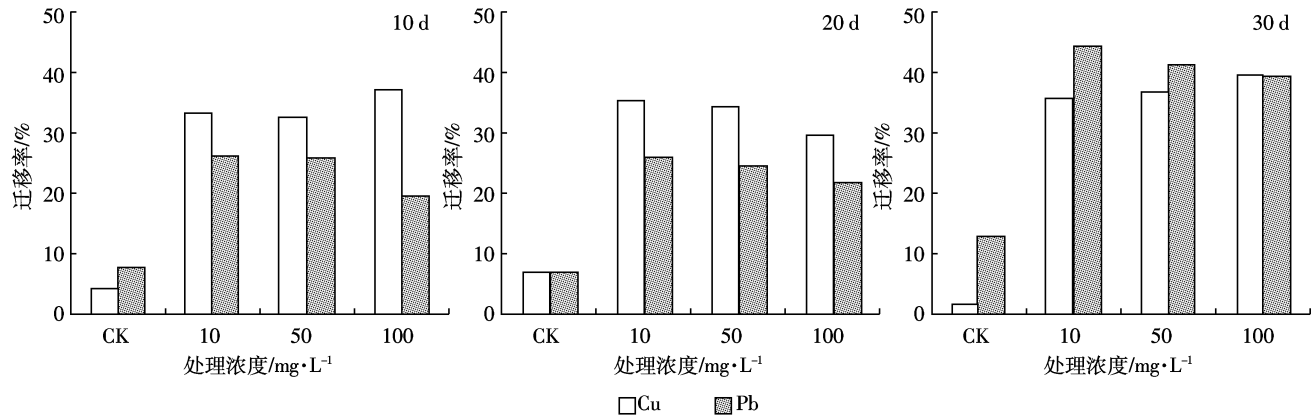


图 1 单一污染条件下 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 在玉米幼苗根茎中的迁移状况

Figure 1 The heavy metal transfer between roots and stems in *Z. mays* seedling under Cu^{2+} , Pb^{2+} single pollution

图 2 单一污染条件下 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 在玉米幼苗茎叶中的迁移状况Figure 2 The heavy metal transfer between stems and leaves in *Z. mays* seedling under Cu^{2+} , Pb^{2+} single pollution

幼苗不同器官中的迁移变化。由图 1 可知,在处理 10~30 d 范围内, Cu^{2+} 和 Pb^{2+} 在玉米根茎间的迁移率随着处理浓度增高逐渐减小,但两种重金属的迁移率有差异,如处理至第 10 d 时, Cu^{2+} 的迁移率高于 Pb^{2+} ,而在 20~30 d 处理时间内,则是 Pb^{2+} 的迁移率显著大于 Cu^{2+} 。

从 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 在玉米幼苗茎叶间的迁移情况 (图 2) 来看,处理浓度在 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下时 Cu^{2+} 和 Pb^{2+} 的迁移率与根茎间表现出相同的变化趋势,高于 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 后变化趋势与根茎间相反。如 Cu^{2+} 在 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度处理 30 d 时迁移率出现上升趋势,比根茎间的迁移率高出 13.67%。

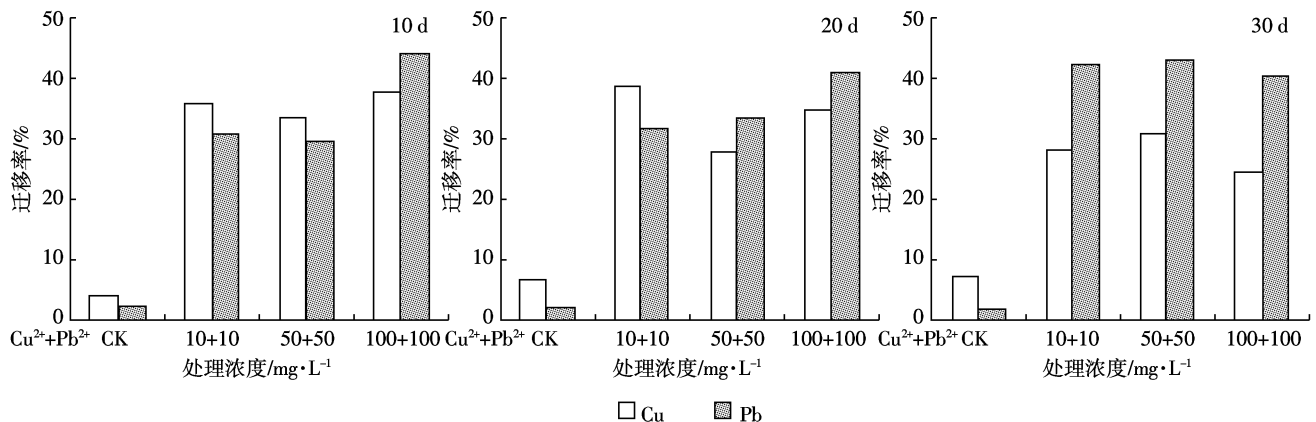
图 3 和图 4 反映了 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 复合处理后在玉米幼苗不同器官的迁移率。 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 在根茎中的迁移率表现为在 10~20 d 时随浓度增高逐渐上升,而在 30 d 时则逐渐下降 (图 3)。值得注意的是, Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 高浓度 ($100+100$) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理 10 d 后 Pb^{2+} 在根茎中的迁移率

比单一处理增加 8.87%。

Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 复合处理后在玉米幼苗茎叶中的迁移率表现为:在相同处理时间内, Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 复合浓度在 ($50+50$) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下时茎叶之间的迁移率呈上升趋势,复合浓度高于 ($50+50$) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 则逐渐下降。与单一处理相比,复合处理后 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 在茎叶之间的迁移率均有所提高,特别是 ($50+50$) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 复合处理 20 d 时, Pb^{2+} 在茎叶之间的迁移率比单一处理增加了 18.12%。

3 讨论

玉米幼苗期是一生中生长代谢最为活跃的时期,对外界环境因子的胁迫非常敏感。本实验结果表明,重金属 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 进入玉米幼苗体内后大量积累在根部,表明重金属胁迫使根细胞膜结构受到损伤,透性发生了改变。在本实验中,单一污染条件下 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 在玉米幼苗体内的积累量随着重金属处理浓度和处

图 3 复合污染条件下 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 在玉米幼苗根茎中的迁移状况Figure 3 The heavy metal transfer between roots and stems in *Z. mays* seedling under Cu^{2+} and Pb^{2+} combined pollution

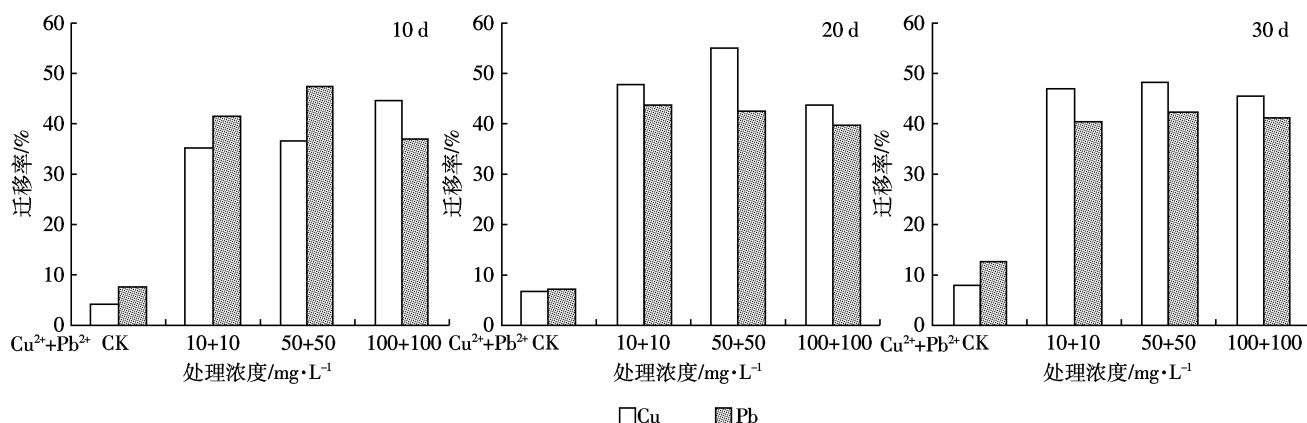


图4 复合污染条件下 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 在玉米幼苗茎叶中的迁移状况

Figure 4 The heavy metal transfer between stems and leaves in *Z. mays* seedling under Cu^{2+} and Pb^{2+} combined pollution

理时间的增加而增大,且 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 在玉米幼苗各器官中的富集能力为根>茎>叶。代全林等^[10]研究了含 Pb^{2+} 土壤中处理 60 d 时玉米不同器官中 Pb^{2+} 的积累能力,发现其富集能力为根>茎>叶,且 Pb^{2+} 的积累量随着处理浓度的增加而增大。王征帆^[11]研究了 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cu^{2+} 处理 7~54 d 内玉米体内 Cu^{2+} 积累量的变化规律,证明 Cu^{2+} 的积累量随着处理时间的延长而增大, Cu^{2+} 在玉米各器官的累积顺序为根部大于茎叶部,这些都与本实验所得结果相一致。

协同作用是指一种金属元素促进另一种或多种金属元素的吸收,两种或多种金属元素的联合效应超过各自单一效应之和的现象,这种相互作用影响作物对重金属的累积过程^[12]。从本实验可以看出,不同浓度 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 复合污染后玉米体内 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 的含量均大于单一处理,说明 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 在玉米体内的积累具有协同作用。郭平等^[13]研究了不同浓度 ($0.01 \sim 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 复合处理后在向日葵体内的富集能力,证明复合污染后 Pb^{2+} 的积累量要远大于单一处理; Cu^{2+} 的积累量表现为低浓度 ($0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 时大于单一处理组,较高浓度 ($1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 时小于单一处理组。本实验中 Pb^{2+} 在玉米幼苗体内的积累规律与上述结果一致,但 Cu^{2+} 的积累规律存在差异,这可能与不同作物对重金属的耐性与代谢机制不同有关。

本实验结果表明,无论单一与复合处理条件,随着处理时间的延长,玉米幼苗根内富集的 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 均通过体内运输系统向茎叶部转移,如单一处理至 10 d 时, Cu^{2+} 在根茎间的迁移率大于 Pb^{2+} , 而处理时间为 20~30 d 时, Pb^{2+} 的迁移率超过 Cu^{2+} , 且随着重金属浓度增加迁移率逐渐下降,表明幼苗生长早期 Cu^{2+} 在玉米体内的转移率大于 Pb^{2+} , 这是由于 Cu^{2+} 作为作物生

长发育的必需元素,在玉米幼苗生长发育早期参与茎叶中的某些代谢活动,因此更易向茎叶中迁移。复合处理条件下 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 在玉米幼苗体内的迁移率比单一处理有所增加,这种规律在茎叶中表现得更为明显,表明复合处理后 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 在玉米体内的迁移率变化也具有一定的协同作用,其作用机理目前尚不清楚,有待于进一步研究。

4 结论

(1) 玉米是一种较易富集 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 的作物,单一污染条件下 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 在玉米幼苗体内的富集能力与处理浓度和染毒时间呈正相关,在 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度 30 d 时 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 的积累量达到最大值。 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 在玉米不同部位的富集量为根>茎>叶, Pb^{2+} 比 Cu^{2+} 更易在玉米体内富集。

(2) 复合污染后两种重金属在玉米幼苗体内的积累具有协同作用。具体表现为复合污染促进了 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 在幼苗体内的吸收, Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 在玉米体内的积累量随处理浓度和处理时间的增加而增大,玉米各器官中 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 的分布规律为根>茎>叶,积累能力顺序为 $\text{Pb}^{2+} > \text{Cu}^{2+}$ 。

(3) 玉米体内 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 的迁移率变化规律表现为:单一处理后 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 根茎间的迁移率随着处理浓度增高逐渐减小,而茎叶中的迁移率随处理浓度增高先减小后增大;复合处理后茎叶间的迁移率大于单一处理,但根茎之间的迁移率与单一处理差别不明显。

参考文献:

- [1] 周启星,孔繁翔,朱琳.生态毒理学[M].北京:科学出版社,2004: 316-322.

- ZHOU Qi-xing, KONG Fan-xiang, ZHU Lin. Ecotoxicology: principle and methods[M]. Beijing: Science Press, 2004:316-322.
- [2] 林凡华, 陈海博, 白 军. 土壤环境中重金属污染危害的研究[J]. 环境科学与管理, 2007, 32(7):74-76.
- LIN Fan-hua, CHEN Hai-bo, BAI Jun. In soil environment heavy metal pollution harm research[J]. *Environmental Science and Management*, 2007, 32(7):74-76.
- [3] 苗明升, 朱圆圆, 曹明霞, 等. 重金属铅对玉米萌发和早期生长发育的影响[J]. 山东师范大学学报, 2003, 18(1):82-84.
- MIAO Ming-sheng, ZHU Yuan-yuan, CAO Ming-xia, et al. The influence of lead on the bourgeon and development of *Zea Mays*[J]. *Journal of Shandong Normal University(Natural Science)*, 2003, 18(1):82-84.
- [4] 张义贤, 张丽萍. 重金属对大麦幼苗膜脂过氧化及脯氨酸和可溶性糖含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(4):857-860.
- ZHANG Yi-xian, ZHANG Li-ping. Effects of heavy metals on membrane lipid peroxidation, proline and soluble sugar in roots of *Hordeum vulgare*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(4):857-860.
- [5] 张义贤, 李晓科. 镉、铅及其复合污染对大麦幼苗部分生理指标的影响[J]. 植物研究, 2008, 28(1):43-46.
- ZHANG Yi-Xian, LI Xiao-Ke. Effects of Cd, Pb and their combined pollution on physiological indexes in leaf of the *Hordeum vulgare* seedling[J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2008, 28(1):43-46.
- [6] De Vos C H R, Schat H, Vooijs R, et al. Copper-induced damage to permeability barrier in roots of silene cucubabus[J]. *Plant Physiol*, 1989, 135:164-169.
- [7] Scandalios S G. Oxygen stress and superoxide dismutases[J]. *Plant Physiol*, 1993, 101:7-13.
- [8] 李向科, 张义贤. 重金属 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 在大麦幼苗体内积累和分布的研究[J]. 农业环境科学报, 2007, 26(增刊):484-488.
- LI Xiang-ke, ZHANG Yi-xian. Study of Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} on accumulation and distribution in *Hordeum vulgare* seedling[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(sup):484-488.
- [9] 李 静, 依艳丽, 李亮亮, 等. 几种重金属(Cd、Pb、Cu、Zn)在玉米植株不同器官中的分布特征[J]. 植物生理科学, 2006, 22(4):244-247.
- LI Jing, YI Yan-li, LI Liang-liang, et al. Distribution of heavy metal (Cd、Pb、Cu、Zn) in different organs of Maize[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22(4):244-247.
- [10] 代全林, 袁剑刚, 方 炜. 玉米各器官积累 Pb 能力的品种间差异[J]. 植物生态学报, 2005, 29(6):992-996.
- DAI Quan-lin, YUAN Jian-gang, FANG Wei. Difference of Pb accumulation among plant tissues of 25 *Zea mays* varieties[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29(6):992-996.
- [11] 王征帆. 铜在玉米体内的累积规律研究[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(14):6056-6057.
- WANG Zheng-fan. Research on the accumulation law of copper in corn[J]. *Journal of Anhui Agri Sci*, 2008, 36(14):6056-6057.
- [12] 孟紫强. 环境毒理学[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2000:119-121.
- MENG Zi-qiang. Environmental toxicology [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2000:119-121.
- [13] 郭 平, 刘 畅, 张海博, 等. 向日葵幼苗对 Pb、Cu 富集能力与耐受性研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(6):92-95.
- GUO Ping, LIU Chang, ZHANG Hai-bo, et al. Studies on enrichment and tolerance ability to Pb, Cu of sunflower seedlings[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(6):92-95.