

# 钾镉双重处理对籽粒苋幼苗生长及元素积累的影响

李虹颖<sup>1,2</sup>, 苏彦华<sup>1,①</sup>

(1. 中国科学院南京土壤研究所 土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 江苏 南京 210008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 采用水培法对不同浓度 K-Cd 双重处理条件下籽粒苋 (*Amaranthus hypochondriacus* Linn.) 幼苗根、茎和叶干质量以及根和地上部分 Cd、K、P、Ca、Zn、Fe、Mn 和 Cu 含量的变化进行了分析。结果表明: 在 Cd 浓度相同的条件下, 随 K 浓度的提高 (0.0、2.5 和 20.0 mmol · L<sup>-1</sup>), 籽粒苋根、茎和叶的干质量均呈逐渐增加的趋势; 各部位的 Cd 含量均呈现逐渐下降的趋势; 根和地上部分的 K 和 Zn 含量增加、Ca 含量无明显变化、Fe 含量呈持续降低的趋势; 根中 Mn 含量无明显变化规律、Cu 含量逐渐降低, 而地上部分 Mn 含量总体上增加、Cu 含量则无明显的变化规律。在 K 浓度相同的条件下, 随 Cd 浓度的提高 (0、5、25 和 45 μmol · L<sup>-1</sup>), 籽粒苋幼苗茎和叶的干质量逐渐降低, 根的干质量在较高浓度 Cd 处理条件下也均降低; 不同部位 Cd 含量均不断增加; 根和地上部分的 Ca、K、Zn 和 Mn 含量基本呈逐渐降低的趋势、Fe 含量呈先增加后降低的趋势; 根中 P 和 Cu 含量大体呈持续降低的趋势、地上部分 P 和 Cu 含量则呈先增加后降低的趋势。在不同浓度 K-Cd 双重处理条件下籽粒苋的根冠比差异不显著, 其中 5 μmol · L<sup>-1</sup> Cd 处理组幼苗的根冠比均最大。总体上看, 在 K-Cd 双重处理条件下籽粒苋幼苗根、茎和叶中 Cd 含量的增幅均小于 Cd 单一处理, Cd 的迁移系数也有所降低。研究结果显示: 较高浓度的 Cd 处理对籽粒苋幼苗的生长及体内营养元素积累均有一定的抑制作用, 而添加 K 能够减弱籽粒苋对 Cd 的积累和迁移能力, 减轻 Cd 胁迫的伤害程度。据此, 建议在用籽粒苋进行 Cd 污染环境修复时施用适量的 K 肥。

**关键词:** 籽粒苋; K-Cd 双重处理; 生长; Cd 迁移系数; 大量元素; 微量元素

中图分类号: Q945.12; Q946.91; X53 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2013)01-0036-07

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2013.01.06

**Effect of K-Cd double treatment on growth and element accumulation of *Amaranthus hypochondriacus* seedling** LI Hongying<sup>1,2</sup>, SU Yanhua<sup>1,①</sup> (1. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, the Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China), *J. Plant Resour. & Environ.* 2013, 22(1): 36-42

**Abstract:** Under K-Cd double treatment with different concentrations, changes of dry weights of root, stem and leaf and contents of Cd, K, P, Ca, Zn, Fe, Mn and Cu in root and above-ground part of *Amaranthus hypochondriacus* Linn. seedling were researched by water culture method. The results show that under condition of same concentration of Cd, as rising of K concentration (0.0, 2.5 and 20.0 mmol · L<sup>-1</sup>), dry weights of root, stem and leaf of *A. hypochondriacus* appear the gradually increasing trend; Cd content in different organs appear the gradually decreasing trend, K and Zn contents increase, Ca content has no obvious change and Fe content appears the continuously reducing trend in root and above-ground part; Mn content has no regular change and Cu content gradually decreases in root; and Mn content generally increases, Cu content has no regular change in above-ground part. Under condition of same concentration of K, as rising of Cd concentration (0, 5, 25 and 45 μmol · L<sup>-1</sup>), dry weights of stem and leaf of *A. hypochondriacus* appear the gradually decreasing trend, that of root also decreases under higher concentration of Cd; Cd content in different organs all increases continuously; generally, contents of Ca, K, Zn and Mn in root and above-ground part of *A. hypochondriacus* appear the gradually

收稿日期: 2012-02-27

基金项目: 国家转基因新品种培育重大专项课题(2009ZX08009-129B); 国家自然科学基金资助项目(30971857)

作者简介: 李虹颖(1981—), 女, 满族, 吉林松原人, 博士研究生, 主要研究方向为植物营养学。

①通信作者 E-mail: yhsu@issas.ac.cn

decreasing trend, Fe content appears the trend of firstly increasing and then decreasing; contents of P and Cu in root generally appear the continuously decreasing trend, while those in above-ground part appear the trend of firstly increasing and then decreasing. Generally, increasing range of Cd content in root, stem and leaf of *A. hypochondriacus* seedling under K-Cd double treatment condition is lower than that under Cd single treatment condition, and the transfer coefficient of Cd also reduces. It is concluded that Cd treatment with higher concentration has a certain inhibitory effect on growth and accumulation of nutrient elements in *A. hypochondriacus* seedling, while adding K can reduce the accumulation and transfer ability of *A. hypochondriacus* to Cd, and lightens the injury degree of Cd stress. Therefore, it is suggested that appropriate K fertilizer should be fertilized when using *A. hypochondriacus* to remediate Cd contaminated environment.

**Key words:** *Amaranthus hypochondriacus* Linn.; K-Cd double treatment; growth; Cd transfer coefficient; macroelement; microelement

镉(Cd)是重金属污染中毒性最强的元素之一。近年来,由于用含Cd肥料施肥、用含Cd污水灌溉以及含Cd矿开采等活动的发生,Cd进入周围环境导致农田土壤环境质量不断下降,植物受Cd毒害的现象时有发生<sup>[1-2]</sup>。而体内积累过量的Cd对植物的光合作用以及碳、氮代谢和水分平衡等生理活动均能产生不良影响,进而影响植物的生长发育<sup>[3]</sup>。

孙光闻等<sup>[4]</sup>的研究结果表明:随土壤中Cd浓度的提高,小白菜(*Brassica chinensis* Linn.)地上部的Cd含量和Cd积累量均持续增加,且Cd积累量对小白菜地上部的K、Ca、Mg、Fe、Cu、Zn和Mn等元素含量有较大影响。而随外源Cd浓度的提高,油菜(*Brassica napus* Linn.)根系中的Fe浓度呈现出先升高后降低的变化趋势,Mn浓度则呈现出先降低后升高的变化趋势,Zn浓度总体上呈现出显著降低的趋势<sup>[5]</sup>。李景梅等<sup>[6]</sup>认为: Cd胁迫可影响菠菜(*Spinacia oleracea* Linn.)对Ca、Mg、Fe和Mn等营养元素的吸收及分配;陈平等<sup>[7]</sup>则认为:高浓度Cd处理可导致水稻(*Oryza sativa* Linn.)幼苗叶片中Ca、Mg、Fe、Zn和Mn含量显著减少。袁祖丽等<sup>[8]</sup>的研究结果表明:随营养液中Cd浓度的提高,烟草(*Nicotiana tabacum* Linn.)腺毛分泌物中Si、K、Al、Ca、Mg和Fe含量不断增加,且叶片中P、Ca、Mg、Fe、Cu、Zn和Al含量也持续增加。上述这些研究者的研究结果均说明: Cd胁迫可导致植物不同器官(部位)元素含量的改变。

植物修复是指利用绿色植物吸收清除环境中的污染物。用于重金属污染环境修复的植物应具备生物量大、根系较大、有较强的吸收及积累重金属的能力且积累的重金属主要分布在地上部等特征<sup>[9]</sup>。籽粒苋(*Amaranthus hypochondriacus* Linn.)为苋科(*Amaranthaceae*)苋属(*Amaranthus* Linn.)1年生优质

牧草,株高可达2 m以上,其生物量较大、分布区域广泛、体内各种营养元素含量均较高,尤其是K含量是一般作物的几倍甚至几十倍<sup>[10]</sup>,为富K植物;另外,籽粒苋也是1种Cd超积累植物,可用于Cd污染环境的修复<sup>[11]</sup>。作者的前期研究结果表明<sup>[12]</sup>:随Cd浓度的提高,籽粒苋植株中不同元素的含量均有变化,其中,Cd、P、Ca、Mg、Zn、Fe、Mn和Cu含量变化较显著,Ca的迁移系数呈上升趋势,Mg、Zn、Fe和Cu的迁移系数均呈下降趋势。

为进一步了解Cd胁迫条件下籽粒苋生长及其体内各种营养元素含量的变化及迁移规律,作者对籽粒苋幼苗进行水培实验,对不同浓度K-Cd双重处理条件下籽粒苋幼苗不同部位的干质量以及Cd、K、P、Ca、Zn、Fe、Mn和Cu含量的积累及变化规律进行了分析,以期利用籽粒苋进行Cd污染环境的高效修复提供基础数据。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料

供试籽粒苋品种‘R104’的种子购于山东瑞星农业科技有限公司。

### 1.2 方法

1.2.1 种子萌发及幼苗培养 籽粒苋种子经质量体积分数3% NaClO溶液消毒5 min,用双蒸水清洗若干次;将种子浸泡在蒸馏水中(部分露出水面),于23℃、黑暗条件下培养3 d;挑选生长均匀、健壮的幼苗移栽于装有改良1/2 Hoagland营养液的周转箱中预培养2周,然后移栽至装有改良Hoagland营养液的周转箱中,置于MLR-352H植物培养箱(日本SANYO公司生产)内进行培养;培养条件如下:昼夜培养温度

分别为 30 ℃ 和 25 ℃, 光照时间 14 h · d<sup>-1</sup>, 光照度 4 000 lx, 空气相对湿度为 70%。改良 Hoagland 培养液 (pH 5.8) 含 1.5 mmol · L<sup>-1</sup> KNO<sub>3</sub>、3.5 mmol · L<sup>-1</sup> NaNO<sub>3</sub>、5 mmol · L<sup>-1</sup> Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> · 4H<sub>2</sub>O、2 mmol · L<sup>-1</sup> MgSO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O、1 mmol · L<sup>-1</sup> NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>、1 mmol · L<sup>-1</sup> KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>、2 mg · L<sup>-1</sup> Fe-EDTA、2.86 mg · L<sup>-1</sup> H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>、1.81 mg · L<sup>-1</sup> MnCl<sub>2</sub> · 4H<sub>2</sub>O、0.051 mg · L<sup>-1</sup> CuSO<sub>4</sub>、0.22 mg · L<sup>-1</sup> ZnSO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O、0.09 mg · L<sup>-1</sup> H<sub>3</sub>MoO<sub>4</sub> · H<sub>2</sub>O 和 0.12 mg · L<sup>-1</sup> Na<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub> · 2H<sub>2</sub>O。周转箱容积 4 L, 其上加盖长 22 cm、宽 18 cm 的硬脂塑料盖; 每个塑料盖上有 10 个直径 2 cm 的圆孔, 每个孔内用海绵固定栽植 2 株幼苗。

**1.2.2 K-Cd 处理方法** 幼苗在改良 Hoagland 培养液中培养 21 d 后进行胁迫处理。处理方法为: 分别将一定体积的 CdCl<sub>2</sub> 和 KCl 母液 (CdCl<sub>2</sub> 和 KCl 母液浓度分别为 5 和 2.5 mol · L<sup>-1</sup>) 直接加入营养液中, 使营养液中的 Cd 浓度分别达到 0、5、25 和 45 μmol · L<sup>-1</sup>, K 浓度分别达到 0.0、2.5 和 20.0 mmol · L<sup>-1</sup> (不包括营养液中的 K), 共 12 个处理组合; 每个处理 20 株苗, 各 3 次重复, 共使用 720 株幼苗。于上述培养条件下继续培养 7 d, 每天更换 1 次含有相应浓度 CdCl<sub>2</sub> 和 KCl 的营养液。

**1.2.3 样品采集和预处理** 幼苗在 K-Cd 双重处理条件下培养 7 d 后, 采集各处理的全部植株; 将根系用蒸馏水冲洗干净, 于 20 mmol · L<sup>-1</sup> EDTA-Na<sub>2</sub> 溶液中浸泡 30 min, 以去除根系表面的金属离子, 用蒸馏水冲洗干净后吸干表面水分; 将每一单株分为根、茎和叶 3 部分, 于 105 ℃ 条件下杀青 30 min, 并置于 80 ℃ 烘箱中干燥至恒质量, 冷却至室温后称量单株幼苗根、茎和叶的干质量, 并计算根冠比。

将同一处理组幼苗的茎、叶和根分别混合, 用 FW-80 高速粉碎机 (上海新诺仪器设备有限公司生产) 重复粉碎 3 次, 过 100 目筛, 所得茎、叶和根样品粉末用于 Cd 含量分析。将茎、叶样品粉末均匀混合, 即为地上部分样品粉末, 分别将地上部分和根的样品粉末用于 K、P、Ca、Zn、Fe、Mn 和 Cu 含量的测定。

**1.2.4 元素含量测定** 参照文献 [13] 的方法对样品粉末进行消化。用于 K 含量测定的样品用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 法消化; 用于 P、Ca、Mn、Fe、Zn 和 Cu 含量测定的样品用 HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub>-HCl 法消化; 用于 Cd 含量测定的样品用 HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 法消化。采用等离子发

射光谱仪测定各元素含量, 并计算 Cd 迁移系数 (地上部分的平均 Cd 含量与根系 Cd 含量之比)。

### 1.3 数据分析

采用 SPSS 16.0 统计分析软件对实验数据进行方差分析, 并按照下列公式计算根冠比以及 Cd 迁移系数。根冠比 = 根系干质量 / (茎干质量 + 叶干质量); Cd 迁移系数 = [(茎的 Cd 含量 + 叶的 Cd 含量) / 2] / 根的 Cd 含量。

## 2 结果和分析

### 2.1 K-Cd 双重处理对籽粒苋幼苗不同部位干质量的影响

经不同浓度 K-Cd 双重处理后籽粒苋幼苗根、茎和叶的干质量及其根冠比见表 1。

由表 1 可见: 在 Cd 浓度相同的条件下, 随 K 浓度的提高 (0.0、2.5 和 20.0 mmol · L<sup>-1</sup>), 籽粒苋幼苗根、茎和叶的干质量均呈逐渐增加的趋势; 其中, 在 20.0 mmol · L<sup>-1</sup> K 处理条件下幼苗根、茎和叶干质量的增加幅度均高于 2.5 mmol · L<sup>-1</sup> K 处理组。在 K 浓度相同的条件下, 随 Cd 浓度的提高 (0、5、25 和 45 μmol · L<sup>-1</sup>), 籽粒苋幼苗茎和叶的干质量逐渐降低; 而除 5 μmol · L<sup>-1</sup> Cd 处理组外, 根的干质量也呈降低的趋势; 在 45 μmol · L<sup>-1</sup> Cd 单一处理条件下 (K 浓度 0.0 mmol · L<sup>-1</sup>), 籽粒苋根、茎和叶的干质量均最低。综合分析结果显示: 在 0.0、2.5 和 20.0 mmol · L<sup>-1</sup> K 处理条件下, 各处理组籽粒苋根干质量的最大降幅分别为 18.7%、16.6% 和 14.2%, 茎干质量的最大降幅分别为 30.2%、25.4% 和 22.4%, 叶干质量的最大降幅分别为 30.1%、25.6% 和 22.1%。说明 Cd 处理可导致籽粒苋生物量的降低, 而添加 K 可减轻这一现象, 且具有浓度效应。

由表 1 还可见: 在不同浓度 K-Cd 双重处理条件下籽粒苋的根冠比变化较小, 各处理组间差异不显著; 总体上看, 在 K 浓度相同的条件下, Cd 处理浓度为 5 μmol · L<sup>-1</sup>, 籽粒苋幼苗的根冠比均最大。

### 2.2 K-Cd 双重处理对籽粒苋幼苗不同部位 Cd 含量及 Cd 迁移系数的影响

经不同浓度 K-Cd 双重处理后籽粒苋幼苗根、茎和叶中的 Cd 含量及 Cd 迁移系数见表 2。

由表 2 可见: 在 Cd 浓度相同的条件下, 随 K 浓度的提高, 籽粒苋幼苗根、茎和叶中的 Cd 含量均呈逐渐

表 1 不同浓度 K-Cd 双重处理对籽粒苋幼苗各部位干质量和根冠比的影响 ( $\bar{X}\pm SD$ )<sup>1)</sup>  
 Table 1 Effects of K-Cd double treatment with different concentrations on dry weights of different parts and root-shoot ratio of *Amaranthus hypochondriacus* Linn. seedling ( $\bar{X}\pm SD$ )<sup>1)</sup>

K 浓度/ $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ Conc. of K	Cd 浓度/ $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Conc. of Cd	不同部位干质量/g Dry weight of different parts			根冠比 Root-shoot ratio
		根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	
0.0	0	1.6±0.1cde	4.3±0.5bcde	6.3±0.7bcde	0.15±0.05a
0.0	5	1.7±0.2bcd	3.6±0.4efg	5.3±0.6efg	0.19±0.05a
0.0	25	1.4±0.2de	3.3±0.4fg	4.9±0.5fg	0.17±0.05a
0.0	45	1.3±0.1e	3.0±0.3g	4.4±0.5g	0.17±0.05a
2.5	0	1.8±0.2bc	5.1±0.6b	7.4±0.8b	0.14±0.05a
2.5	5	2.1±0.2ab	4.2±0.5bcde	6.3±0.7bcde	0.19±0.05a
2.5	25	1.6±0.2cde	4.1±0.4efg	5.8±0.6def	0.16±0.05a
2.5	45	1.5±0.2cde	3.8±0.4def	5.5±0.5efg	0.16±0.05a
20.0	0	2.1±0.2ab	5.8±0.6a	8.6±0.9a	0.16±0.05a
20.0	5	2.4±0.3a	4.9±0.5bc	7.3±0.8bc	0.19±0.05a
20.0	25	1.9±0.2bc	4.6±0.5bcd	6.8±0.7bcd	0.16±0.05a
20.0	45	1.8±0.2bcd	4.5±0.4cdef	6.7±0.7cdef	0.16±0.05a

<sup>1)</sup> 同列中不同的小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ ) Different small letters in the same column indicate the significant difference ( $P<0.05$ ).

表 2 不同浓度 K-Cd 双重处理对籽粒苋幼苗各部位 Cd 含量及 Cd 迁移系数的影响 ( $\bar{X}\pm SD$ )<sup>1)</sup>  
 Table 2 Effects of K-Cd double treatment with different concentrations on Cd content in different parts of *Amaranthus hypochondriacus* Linn. seedling and Cd transfer coefficient ( $\bar{X}\pm SD$ )<sup>1)</sup>

K 浓度/ $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ Conc. of K	Cd 浓度/ $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Conc. of Cd	不同部位 Cd 含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Cd content in different parts			Cd 迁移系数 Cd transfer coefficient
		根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	
0.0	0	0.0±0.0g	0.0±0.0f	0.0±0.0f	0.0±0.0e
0.0	5	53.2±11.1def	95.3±20.0cd	96.8±20.3de	1.8±0.2a
0.0	25	160.5±33.7ab	172.3±36.1b	200.5±42.1b	1.2±0.1cd
0.0	45	173.7±36.4a	271.6±37.3a	272.2±57.1a	1.6±0.2b
2.5	0	0.0±0.0g	0.0±0.0f	0.0±0.0f	0.0±0.0e
2.5	5	45.4±9.5f	56.7±11.9de	69.2±14.5e	1.4±0.1c
2.5	25	130.2±27.3bc	133.8±28.0bc	153.7±32.2bc	1.1±0.1d
2.5	45	144.5±30.3abc	152.2±31.9b	191.1±40.1b	1.2±0.1cd
20.0	0	0.0±0.0g	0.0±0.0f	0.0±0.0f	0.0±0.0e
20.0	5	33.7±7.1fg	29.3±6.1ef	47.8±10.0ef	1.1±0.1d
20.0	25	87.8±18.2de	102.8±27.5cd	125.6±26.3cd	1.3±0.1cd
20.0	45	112.2±23.5cd	131.1±21.8bc	158.5±33.3bc	1.3±0.1cd

<sup>1)</sup> 同列中不同的小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ ) Different small letters in the same column indicate the significant difference ( $P<0.05$ ).

下降的趋势;且在添加  $20.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{K}$  的条件下,籽粒苋根、茎和叶中 Cd 含量的下降幅度均高于  $2.5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{K}$  处理组。在 K 浓度相同的条件下,随 Cd 浓度的提高,籽粒苋根、茎和叶中的 Cd 含量均不断增加。总体上看,在 K-Cd 双重处理条件下籽粒苋幼苗根、茎和叶中 Cd 含量的增幅均小于 Cd 单一处理,说明添加 K 可减弱籽粒苋幼苗对 Cd 的积累和迁移能力。

由表 2 还可见:与 Cd 单一处理相比,添加 K 均能不同程度降低 Cd 的迁移系数。其中,在  $5\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{Cd}$  处理条件下,随 K 浓度的提高,籽粒苋幼苗的 Cd

迁移系数逐渐减小,且各处理组间差异显著。

## 2.3 K-Cd 双重处理对籽粒苋幼苗不同部位元素含量的影响

### 2.3.1 对大量元素含量的影响

经不同浓度 K-Cd 双重处理后籽粒苋幼苗根及地上部分大量元素 (K、P 和 Ca) 含量的变化见表 3。

由表 3 可见:在 Cd 浓度相同的条件下,随 K 浓度的提高,籽粒苋根和地上部分的 K 含量显著增加;而在 K 浓度相同的条件下,随 Cd 浓度的提高,籽粒苋根和地上部分的 K 含量则呈逐渐降低的趋势。

在 K 浓度相同的条件下,随 Cd 浓度的提高,籽粒

苋根中的 P 含量大体呈不断下降的趋势;而地上部分 P 含量则呈先增加后降低的趋势,其中,添加 5 和 25  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}\text{Cd}$ ,地上部分的 P 含量均高于 0  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}\text{Cd}$  处理组,而添加 45  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}\text{Cd}$ ,地上部分的 P 含量则低于 0  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}\text{Cd}$  处理组。在 0 和 5  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}\text{Cd}$  处理条件下,随 K 浓度的提高,籽粒苋根和地上部分的 P 含量均逐渐降低;而在 25 和 45  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}\text{Cd}$  处理条件下,随 K 添加量的提高,根中 P 含量逐渐提高,但地上部分 P 含量则有不同的变化趋势,添加 2.5 和 20.0  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}\text{K}$  均导致地上部分 P 含量降低,且以 2.5  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}\text{K}$  处理组为最低。

在 Cd 浓度相同的条件下,添加不同浓度 K,籽粒苋根和地上部分的 Ca 含量无明显变化;而在 K 浓度相同的条件下,根和地上部分的 Ca 含量则随 Cd 添加量的提高基本呈下降趋势。

2.3.2 对微量元素含量的影响 经不同浓度 K-Cd 双重处理后籽粒苋幼苗根及地上部分微量元素 (Zn、Fe、Mn 和 Cu) 含量的变化见表 4。

由表 4 可见,在 K 浓度相同的条件下,随 Cd 添加量的提高,籽粒苋根和地上部分的 Zn 和 Mn 含量基本呈下降趋势;Fe 含量均呈先增加后降低的变化趋势;根中 Cu 含量随 Cd 浓度的提高大体呈持续降低的趋

表 3 不同浓度 K-Cd 双重处理对籽粒苋幼苗根和地上部分大量元素含量的影响 ( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

Table 3 Effects of K-Cd double treatment with different concentrations on content of macroelements in root and above-ground part of *Amaranthus hypochondriacus* Linn. seedling ( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

K 浓度/ mmol · L <sup>-1</sup> Conc. of K	Cd 浓度/ $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Conc. of Cd	根中各元素含量/g · kg <sup>-1</sup> Content of different elements in root			地上部分各元素含量/g · kg <sup>-1</sup> Content of different elements in above-ground part		
		K	P	Ca	K	P	Ca
0.0	0	35.9±4.8ef	19.2±2.5a	12.6±1.8a	113.1±12.7efg	14.8±1.6bcd	38.2±4.3ab
0.0	5	34.7±4.5f	18.1±2.4ab	9.2±1.3bcd	99.9±11.2fgh	18.6±2.1a	36.2±4.0abc
0.0	25	32.1±4.3f	12.9±1.7edef	8.1±1.1bcde	95.7±10.8gh	16.5±1.8ab	35.0±3.9abcd
0.0	45	28.9±3.8f	9.9±1.3f	6.6±0.9e	81.3±9.1h	13.6±1.4cd	26.4±2.9ef
2.5	0	53.2±7.1d	18.9±2.5ab	9.8±1.4b	157.8±17.8cd	13.1±1.5cd	34.1±3.8abcd
2.5	5	50.8±6.8d	16.5±2.1abc	9.6±1.3bc	140.7±15.8de	16.5±1.8abc	40.9±4.5a
2.5	25	48.7±6.5de	13.9±1.8ede	7.9±1.1bcde	134.6±15.2de	13.9±1.6bcd	28.4±3.2bcde
2.5	45	47.6±6.3de	10.9±1.4ef	7.3±1.0cde	127.7±14.4def	11.7±1.3d	22.1±2.4f
20.0	0	98.9±13.2a	18.1±2.4ab	7.8±1.1bcde	225.1±25.4a	13.1±1.4cd	31.4±3.5bcde
20.0	5	75.2±10.0b	15.2±2.0bcd	8.7±1.1bcde	193.4±21.8b	16.1±1.8abc	31.2±3.5cde
20.0	25	68.3±9.1bc	15.9±2.1abc	8.4±1.2bcde	172.3±19.4bc	15.8±1.7abc	32.4±3.6def
20.0	45	59.5±7.9cd	12.2±1.6def	7.1±1.0de	151.8±17.0cd	12.1±1.3d	24.2±2.7f

<sup>1)</sup> 同列中不同的小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different small letters in the same column indicate the significant difference ( $P < 0.05$ ).

表 4 不同浓度 K-Cd 双重处理对籽粒苋幼苗根和地上部分微量元素含量的影响 ( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

Table 4 Effects of K-Cd double treatment with different concentrations on content of microelements in root and above-ground part of *Amaranthus hypochondriacus* Linn. seedling ( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

K 浓度/ mmol · L <sup>-1</sup> Conc. of K	Cd 浓度/ $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Conc. of Cd	根中各元素含量/mg · kg <sup>-1</sup> Content of different elements in root			
		Zn	Fe	Mn	Cu
0.0	0	56.6±6.3efg	7.4±0.8bcd	19.1±2.1ab	9.4±1.0a
0.0	5	49.9±5.6fgh	9.3±1.0a	18.1±2.0abc	7.9±0.8abc
0.0	25	47.9±5.4gh	8.4±0.9ab	17.5±1.9abcd	8.1±0.9abc
0.0	45	40.7±4.5h	6.5±0.7cd	13.2±1.4ef	5.7±0.6d
2.5	0	78.9±8.9cd	6.6±0.7cd	17.1±1.9abcd	8.6±0.9ab
2.5	5	70.4±7.9de	8.9±0.9abc	20.8±2.2a	7.5±0.8bc
2.5	25	67.3±7.2de	6.9±0.7bcd	14.2±1.6def	7.3±0.8bcd
2.5	45	63.9±7.6def	5.8±0.6d	11.1±1.2f	6.8±0.7cd
20.0	0	112.5±12.7a	6.5±0.7cd	15.7±1.7bcde	7.6±0.8bc
20.0	5	96.7±10.9b	8.1±0.9abc	15.5±1.7cde	7.4±0.7bc
20.0	25	86.0±9.7bc	7.9±0.8abc	16.2±1.8bcde	7.1±0.8bcd
20.0	45	75.5±8.5cd	6.1±0.6d	12.1±1.3f	6.45±0.7cd

续表 4 Table 4 (Continued)

K 浓度/ $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ Conc. of K	Cd 浓度/ $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Conc. of Cd	地上部分各元素含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Content of different elements in above-ground part			
		Zn	Fe	Mn	Cu
0.0	0	51.0±6.8ab	74.7±10.0 de	74.3±9.9bc	41.7±5.5ab
0.0	5	44.9±6.0bc	97.3±13.0bc	61.2±8.2cde	42.2±5.6ab
0.0	25	52.6±7.0ab	134.7±18.0a	50.4±6.7ef	41.4±5.5ab
0.0	45	30.9±4.1d	45.6±6.1f	42.9±5.7f	26.2±3.5c
2.5	0	52.7±7.0ab	65.5±8.7ef	71.0±9.5cd	40.4±5.4ab
2.5	5	51.9±6.9ab	78.5±10.5cde	63.6±8.5cde	39.8±5.3ab
2.5	25	50.2±6.7ab	113.8±15.2b	55.9±7.3def	40.5±5.4ab
2.5	45	37.2±4.9cd	59.7±7.9ef	48.7±6.5ef	28.7±3.8c
20.0	0	60.2±8.1a	63.0±8.4ef	94.6±12.6a	39.1±5.2ab
20.0	5	57.4±7.6ab	76.8±10.2de	88.0±11.7ab	42.9±5.7a
20.0	25	56.3±7.5ab	91.1±12.2cd	74.2±9.9bc	41.3±5.5ab
20.0	45	45.4±6.0bc	59.5±7.9ef	67.7±9.1cd	32.5±4.3bc

<sup>1)</sup> 同列中不同的小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different small letters in the same column indicate the significant difference ( $P < 0.05$ ).

势,而地上部分 Cu 含量则随 Cd 浓度的提高呈现先增加后降低的趋势。

在 Cd 浓度相同的条件下,随 K 浓度的提高,根和地上部分的 Zn 含量均有所提高;根和地上部分的 Fe 含量随 K 浓度的提高多呈持续降低的趋势;根中 Mn 含量无明显变化规律,而地上部分 Mn 含量基本上随 K 浓度的提高而增加;根中的 Cu 含量基本上随 K 浓度的提高而降低,而地上部分的 Cu 含量则无明显的变化规律。

### 3 讨论和结论

一般来说,Cd 对植物的毒害作用主要表现为生物量降低、生育期延迟及品质降低等<sup>[3]</sup>。本研究结果表明:在 K 浓度相同的条件下,添加  $5 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Cd,籽粒苋幼苗根的干质量有一定增加;而添加 25 和  $45 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Cd,根、茎和叶的干质量均有所降低。在 Cd 浓度相同的条件下,添加  $20.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  K,幼苗根、茎和叶干质量的增长幅度均高于  $2.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  K 处理组。说明添加低浓度( $5 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ )Cd 对籽粒苋根系生长有一定促进作用,但对茎和叶生长有一定抑制作用;而添加较高浓度(25 和  $45 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ )Cd 对籽粒苋根、茎和叶的生长均有抑制作用,但 K 的存在可以在一定程度上减轻 Cd 对籽粒苋生长的抑制作用,并因此影响籽粒苋对 Cd 胁迫的耐受能力。

研究表明:随着 Cd 浓度的提高,籽粒苋根和地上部分的 K 含量均降低;Cd 添加量越高,不同部位 K 含量的降低幅度越大;但在添加  $20.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  K

的条件下,5、25 和  $45 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Cd 处理组籽粒苋幼苗的 K 转运系数(地上部分与根中 K 含量之比)均高于  $0 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Cd 处理组,说明在 Cd 胁迫条件下添加高浓度 K 能够增强籽粒苋对 K 的转运能力。推测其原因有以下 2 个方面:①籽粒苋对 K 的转运能力比较弱,Cd 的存在对籽粒苋体内 K 转运能力的提高具有明显的刺激作用;②在 K 浓度较高的条件下,籽粒苋根系中 K 的积累量较高,为籽粒苋体内 K 高效转运的启动提供了有利条件。随 K 添加量的提高,籽粒苋幼苗根、茎和叶中的 Cd 含量均降低,说明 K 对籽粒苋幼苗体内 Cd 的积累有一定的抑制作用。沈丽波等<sup>[14]</sup>认为:提高 K 肥施用量可以增加伴矿景天(*Sedum plumbizincicola* X. H. Guo et S. B. Zhou)对 Cd 的积累量;而 Ghnaya 等<sup>[15]</sup>对白羽扇豆(*Lupinus albus* Linn.)、欧洲赤松(*Pinus sylvestris* Linn.)和部分盐生植物的研究表明: Cd 能够明显抑制这些植物对 K 的转运能力。不同研究者的研究结果有一定的差异,与研究对象的不同或处理方法的差异有一定的相关性,个中的原因有待进一步探讨。

Ca 是植物生长发育必需的营养元素之一,也是构成植物细胞壁的重要元素之一,对维持细胞膜的稳定性有一定作用<sup>[16]</sup>;Ca 作为信号物质<sup>[17]</sup>参与植物体内许多生理生化过程的调节<sup>[18-19]</sup>,对植物的生长发育具有重要的意义。在 K-Cd 双重处理条件下籽粒苋根和地上部分的 Ca 含量均随 Cd 浓度的提高而降低,但 K 添加量的增加对籽粒苋幼苗体内 Ca 含量的变化无明显作用,说明 Cd 处理对籽粒苋体内 Ca 的积累有一定的抑制作用。

微量元素具有专一性强、需要量少的特点,是植物生长发育过程中必不可少的一类营养元素,对植物的生理活动、生长发育以及植物体内多种化学成分的形成和积累具有一定的作用<sup>[20]</sup>。有研究者认为: Cd 可引起植物体内微量元素代谢失调,继而抑制植物生长<sup>[21]</sup>。本研究结果表明: Cd 处理对籽粒苋幼苗根和地上部分 Zn 和 Mn 的积累以及根中 Cu 积累有抑制作用;而在 Cd 浓度较低条件下对 Fe 的积累以及地上部分 Cu 的积累有一定的促进作用,但在 Cd 浓度较高的条件下对 Fe 的积累以及地上部分 Cu 的积累有明显的抑制作用。表明 Cd 处理对籽粒苋体内 Zn、Fe、Mn 和 Cu 的积累有均有一定的影响;而添加不同浓度 K 则对籽粒苋幼苗体内 Zn、Fe、Mn 和 Cu 的积累有不同的效应,其中对 Zn 的积累有明显的促进作用。

综上所述,较低浓度( $5 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) Cd 处理对籽粒苋幼苗根的生长有一定的促进作用,而较高浓度( $25$  和  $45 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) Cd 处理则对籽粒苋幼苗根、茎和叶的生长有一定的抑制作用;添加 K 可以减缓 Cd 对籽粒苋生长的抑制作用,其中添加较高浓度( $20.0 \text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) K 这一减缓作用优于添加较低浓度( $2.5 \text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) K。在 Cd 胁迫条件下添加 K 能够减缓籽粒苋对 Cd 的积累和转运; Cd 处理对籽粒苋根和地上部分的 K、Ca、Zn 和 Mn 积累以及根中 P 和 Cu 积累均有抑制作用,对地上部分 P、Fe 和 Cu 积累以及根中 Fe 积累表现出较低浓度条件下促进、较高浓度条件下抑制的趋势。而添加一定浓度 K 则可以减缓 Cd 对籽粒苋生长及部分元素积累的抑制作用。据此建议在使用籽粒苋进行 Cd 污染的植物修复时可以添加适量的 K 肥。

#### 参考文献:

- [1] 刘俊, 廖柏寒, 周航, 等. 镉胁迫对大豆花荚期生理生态的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18(1): 176-182.
- [2] 吴晓丽, 罗玉明, 徐迎春, 等. 镉胁迫对狭叶香蒲某些生理指标的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2007, 16(1): 74-76.
- [3] GOUIA H, GHORBAL M H, MEYER C. Effects of cadmium on activity of nitrate reductase and on other enzymes of the nitrate assimilation pathway in bean [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2000, 38(7): 629-638.
- [4] 孙光闻, 朱祝军, 方学智. 镉污染土壤对小白菜生长及镉和养分含量的影响[J]. 华北农学报, 2011, 26(S1): 60-63.
- [5] 张树杰, 李玲, 张春雷, 等. Cd 对油菜幼苗生长及微量元素含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(5): 836-842.
- [6] 李景梅, 葛建镛, 冯耀勇, 等. 不同镉水平对菠菜生长及营养成分含量的影响[J]. 长春理工大学学报: 自然科学版, 2007, 30(4): 72-75.
- [7] 陈平, 吴秀峰, 张伟锋, 等. 硒对镉胁迫下水稻幼苗叶片元素含量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(3): 114-117.
- [8] 袁祖丽, 马新明, 韩锦峰, 等. 镉污染对烟草叶片超微结构及部分元素含量的影响[J]. 生态学报, 2005, 25(11): 2919-2927.
- [9] BROOKS R R, SHAW S, MARFIL A A. The chemical form and physiological function of nickel in some Iberian *Alyssum* species [J]. *Physiologia Plantarum*, 1981, 51(2): 167-170.
- [10] 李廷轩, 马国瑞, 张锡洲. 富钾基因型籽粒苋主要根系分泌物及其对土壤矿物态钾的活化作用[J]. 应用生态学报, 2006, 17(3): 368-372.
- [11] 李凝玉, 卢煊萍, 李志安, 等. 籽粒苋对土壤中镉的耐性和积累特征[J]. 应用与环境生物学报, 2010, 16(1): 28-32.
- [12] 李虹颖, 苏彦华. 镉对籽粒苋耐性生理及营养元素吸收积累的影响[J]. 生态环境学报, 2012, 21(12): 308-313.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 257-373.
- [14] 沈丽波, 吴龙华, 韩晓日, 等. 养分调控对超积累植物伴矿景天生长及锌镉吸收性的影响[J]. 土壤, 2011, 43(2): 221-225.
- [15] GHNAYA T, NOUAIRI I, SLAMA I, et al. Cadmium effects on growth and mineral nutrition of two halophytes: *Sesuvium portulacastrum* and *Mesembryanthemum crystallinum* [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2005, 162(10): 1133-1140.
- [16] 陈培琴, 郁松林, 詹妍妮, 等. 植物在高温胁迫下的生理研究进展[J]. 中国农学通报, 2006, 22(5): 223-227.
- [17] 孙大业, 郭艳林, 马力耕. 细胞信号转导[M]. 3版. 北京: 科学出版社, 2001: 23-66.
- [18] 谭伟, 李庆亮, 罗音, 等. 外源  $\text{CaCl}_2$  预处理对高温胁迫烟草叶片光合作用的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(11): 3871-3879.
- [19] 李天来, 李森, 孙周平. 钙和水杨酸对亚高温胁迫下番茄叶片保护酶活性的调控作用[J]. 应用生态学报, 2009, 20(3): 586-590.
- [20] DONG J, WU F B, ZHANG G P. Influence of cadmium on antioxidant capacity and four microelement concentrations in tomato seedlings (*Lycopersicon esculentum*) [J]. *Chemosphere*, 2006, 64(10): 1659-1666.
- [21] ZHANG S J, HU F, LI H X, et al. Influence of earthworm mucus and amino acids on tomato seedling growth and cadmium accumulation [J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157(10): 2737-2742.

(责任编辑: 佟金凤, 惠红)