

# 重金属胁迫后效对玉米产量的影响

聂胜委<sup>1</sup>, 黄绍敏<sup>1</sup>, 张水清<sup>1</sup>, 张巧萍<sup>2</sup>, 郭斗斗<sup>1</sup>

(1. 河南省农业科学院 植物营养与资源环境研究所 农业部郑州潮土生态环境重点  
野外科学观测试验站 河南 郑州 450002; 2. 河南农业大学 生命科学学院 河南 郑州 450002)

**摘要:** 以不添加重金属的土壤为对照(CK), 5种重金属分别以2种梯度添加量1(Cd1、Pb1、Cr1、Hg1、As1); 2(Cd2、Pb2、Cr2、Hg2、As2)添加到土壤中, 研究在大田条件下经过小麦1季或小麦-玉米-小麦3季作物种植后, 重金属胁迫后效对玉米产量的影响。结果表明, 5种重金属处理的玉米穗轴质量、生物产量与CK持平或高于CK, 其中Hg2、Cd2、Hg1、As2处理玉米穗轴质量显著高于CK; 玉米穗轴质量、单穗籽粒质量、经济系数在同一重金属不同质量浓度间均表现为: 高质量浓度 > 低质量浓度; 经过小麦1季种植后, 重金属(Cr1除外)处理玉米籽粒产量高于CK, 其中Cd1、Pb1、Hg1处理玉米籽粒产量较高, 分别达到了8 276.7、8 059.9、7 879.5 kg/hm<sup>2</sup>, 而且Cd1、Pb1处理显著高于CK(6 675.5 kg/hm<sup>2</sup>)。

**关键词:** 重金属; 胁迫后效; 玉米; 产量效应

中图分类号: S513 文献标识码: A 文章编号: 1000-7091(2013)04-0123-07

## Later Effects of Various Heavy Metal Stress on Maize Grain Yields in Wheat-Maize Rotation Systems

NIE Sheng-wei<sup>1</sup>, HUANG Shao-min<sup>1</sup>, ZHANG Shui-qing<sup>1</sup>, ZHANG Qiao-ping<sup>2</sup>, GUO Dou-dou<sup>1</sup>

(1. Key Field Scientific Observation Station of Zhengzhou Fluvo-aquic Soils Ecology Environment, Ministry of Agriculture, Institute of Plant Nutrient and Environmental Resources, Institute of Plant Nutrient and Environmental Resources, Henan Academy of Agricultural Science, Zhengzhou 450002, China;

2. College of Life Sciences, Henan Agriculture University, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** In this article, five heavy metals were added into the soil with gradient addition amount (Cd1, Pb1, Cr1, Hg1, As1; Cd2, Pb2, Cr2, Hg2, As2), and the later effects of five heavy metals (Cd, Pb, As, Hg, Cr) stress on maize grain yields after wheat planted one season and wheat-maize-wheat planted three seasons, were analyzed. The results showed that weight of cobs and biomass under five heavy metals stress treatments were not lower than that of CK treatment; and weight of cobs under Hg2, Cd2, Hg1, As2 treatments were significantly higher than that of CK treatment. For the same heavy metal, weight of axis, weight of grain yield per plant, economical coefficient values were all higher in higher dose than lower dose. After wheat planted one season, maize grain yields under heavy metal stress treatments (except Cr1 treatment) were higher compared with that under CK treatment, maize grain yields were higher under Cd1 (8 276.7 kg/ha), Pb1 (8 059.9 kg/ha), and Hg1 (7 879.5 kg/ha) treatments, especially under Cd1, Pb1 stress significantly higher than CK (6 675.5 kg/ha) treatment.

**Key words:** Heavy metal stress; Later effects; Maize; Grain yields

重金属污染主要是通过直接或间接进入生态食物链来危害生态环境进而威胁人类的健康。农田重金属污染主要来源于采矿冶炼、污灌、农药以及化肥的不合理施用和垃圾农用等途径。当前重金属含量

超标的农产品产量与面积约占污染物超标农产品总量与总面积的80%以上, 污染土壤的重金属主要有Hg、Cd、Pb、Cr、As、Zn、Cu、Co、Ni等, 尤其以Cd、Pb、Hg、As及其复合物污染最为突出<sup>[1]</sup>。目前, 关于重

收稿日期: 2013-05-04

基金项目: 公益性行业科研专项(200903015/201203030-05); 河南省院省院合作项目(102106000034); “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD14B08)

作者简介: 聂胜委(1979-), 男, 河南汝州人, 助理研究员, 博士, 主要从事长期定位施肥、农田受损生态系统修复及循环农业等方面的研究。

通讯作者: 黄绍敏(1967-), 女, 河南夏邑人, 研究员, 博士, 主要从事土壤生态等方面的研究。

金属的研究主要集中在重金属的修复治理<sup>[2-10]</sup>、污染修复的生理机制<sup>[11]</sup>以及污染的风险评价<sup>[12-13]</sup>等方面。

玉米是我国三大主栽作物之一,播种面积最大,既是粮食作物同时也是饲料和能源作物;在国民经济建设和保障粮食安全等方面占有重要的地位。目前,关于重金属胁迫对玉米影响的研究多集中在初次胁迫上。在盆栽方面,研究发现在土壤环境质量二级标准上限值处,复合重金属 Cd、Pb、Cu、Zn、As 均极显著抑制玉米的苗长和根长,当超过土壤环境质量三级标准后根长被完全抑制<sup>[14]</sup>。当 Cd<sup>2+</sup> 质量浓度小于 2.0 mg/L 时,其对玉米(永玉 3 号、早鲜甜)种子的萌发有一定的抑制作用;当质量浓度在 2.0~20.0 mg/L 时,可以促进玉米种子的萌发,提高其发芽势和发芽率<sup>[15]</sup>。但李国良<sup>[16]</sup>却发现,当 Cd<sup>2+</sup> 质量浓度为 5~15 mg/L 时可以促进玉米种子的萌发,提高玉米的发芽势和发芽率,促进玉米芽和幼根的生长;当 Cd<sup>2+</sup> 质量浓度大于 50 mg/L 时,则明显抑制种子萌发和幼苗生长。李晔等<sup>[17]</sup>则认为,低质量浓度(<5 mg/L) Cd<sup>2+</sup> 胁迫对玉米种子萌发表现出一定的刺激作用,较高质量浓度(>5 mg/L) 在某种程度上则表现出明显的抑制作用,当 Cd<sup>2+</sup> 质量浓度大于 5 mg/L 时,对不同玉米种子萌发均有明显的抑制效应。此外,经重金属 Cd 胁迫后,玉米的株高、干质量降低,土壤细菌、真菌数量减少<sup>[18]</sup>,玉米籽粒蛋白质、脂肪含量变化均呈先升高后降低趋势,淀粉含量则与此相反<sup>[19]</sup>。关于重金属 Cr 胁迫对玉米影响的研究发现,随着 Cr<sup>3+</sup> 质量浓度的增加和胁迫时间的延长,玉米种子、幼苗受毒害作用加重,株高、根长、叶片叶绿素合成、鲜质量和干质量明显受到抑制<sup>[20]</sup>;随着 Cr<sup>6+</sup> 胁迫程度的加深,幼苗根部和上胚轴的脯氨酸含量明显增加,幼苗根和上胚轴的质膜透性、丙二醛(MDA)含量以及上胚轴的过氧化物酶(POD)活性显著增加,而上胚轴的超氧化物歧化酶(SOD)、根部的 POD 活性则显著下降<sup>[21]</sup>。关于重金属 Pb 胁迫对玉米影响的研究发现,所有质量浓度的 Pb 都表现出对玉米发育的抑制作用<sup>[18-19,22]</sup>,Pb 主要通过破坏根尖细胞超微结构来抑制植物根系对养分的吸收<sup>[23]</sup>,随着 Pb 质量浓度的增加,玉米叶片中叶绿素含量降低、光合速率下降、光合作用减弱<sup>[24-25]</sup>,玉米幼苗叶绿素、可溶性糖、根系活力及硝酸还原酶活性均降低<sup>[26]</sup>。另外,玉米根系导水率(Lpr)在 Hg<sup>2+</sup>、Zn<sup>2+</sup>、Cu<sup>2+</sup> 胁迫后明显降低,其中 Cu<sup>2+</sup>、Zn<sup>2+</sup> 对 Lpr 的抑制效应分别为同质量浓度 Hg<sup>2+</sup> 的 62.9%、24.3%<sup>[27]</sup>。玉米对不

同重金属均有积累能力,但对不同种类重金属的积累数量差异较大<sup>[28]</sup>。玉米能富集土壤中的 Pb 和 Cd,吸收 Pb、Cd 的能力表现为:根部>秸秆>叶部>果实<sup>[29]</sup>。秦欢等<sup>[30]</sup>研究发现,大叶井口边草与玉米间作(云瑞 6、8、88 号)显著提高大叶井口边草地上部和根部对 As、Cd 的吸收,显著降低地上部对 Pb 的吸收,而地下部对 Pb 的吸收却有明显增加;与单作相比,间作能显著提高玉米各器官重金属含量。

在大田方面,研究发现在正常条件下种植经受较长时期重金属污染而适应的玉米种群,其平均相对生长率较低、生活史缩短、植株矮化、产量下降<sup>[31]</sup>;不同玉米品种及同一品种对磷肥中 Pb、As 吸收累积程度差异显著<sup>[32]</sup>。郭晓方等<sup>[33]</sup>通过对 8 个玉米品种的籽粒和茎叶中重金属(Cd、Pb、Zn、Cu)含量进行聚类分析,将 8 个玉米品种划分为低累积类型(灵丹 20、正丹 958、高优 1 号)、中累积类型(鑫玉 6 号、丰田 1 号、超甜 38、华宝 1 号)和高累积类型(粤糯 1 号) 3 类。玉米对土壤中重金属的平均富集系数大小顺序为: Ni > Pb > Zn > Cr > Cu,地上部重金属含量大于根部<sup>[34]</sup>。Cd、Pb、Zn 在玉米植株不同器官中的含量大小均为:叶>根>茎>籽粒,而 Cu 则为:根>叶>茎>籽粒,其中 Cd 在玉米根、茎和叶中的富集系数最大,Cu 次之,Pb 最小;Zn 在玉米籽粒中的富集系数最大<sup>[35]</sup>。此外,玉米生长 100 d 内土壤中不同重金属(Cu、Cd、Pb、Zn、Cr)的形态变化差异显著,植物吸收主要影响根际土壤交换态铜、碳酸盐态铜和锌的变化,对 Cd 和 Pb 形态变化影响不大<sup>[36]</sup>。另有研究认为,在土壤重金属含量(Cu、Zn、Ni、Pb、Cd、Cr、Hg、As)符合土壤环境质量标准的前提下,玉米籽粒能够达到食用标准;土壤中 Pb、Cd、Hg 含量与玉米中 Pb、Cd、Hg 含量相关性不显著( $P > 0.05$ ),Ni、Cr、As 含量相关性显著( $P < 0.05$ ),Cu、Zn 含量相关性极显著( $P < 0.01$ )<sup>[37]</sup>。

综上所述,前人就重金属胁迫对玉米影响方面的研究多集中在初次胁迫上,而有关次生胁迫及后效对玉米影响的研究则鲜有报道。因此,本研究以重金属 Cd、Pb、As、Hg、Cr 污染的受损农田为材料,研究重金属胁迫后效对 2010-2012 年小麦-玉米轮作系统中玉米产量及经济系数的影响,为重金属污染条件下的土壤修复、环境保护及食品安全等提供借鉴。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验地概况

试验地位于黄淮海平原农业部郑州潮土生态环

境重点野外科学观测试验站(34°47'N, 113°40'E)内,气候类型为暖温带季风气候,年平均气温14.4℃,大于10℃积温约5169℃。7月最热,平均27.3℃;1月最冷,平均0.2℃;年平均降雨量645 mm,无霜期224 d,年平均蒸发量1450 mm,年日照时间约2400 h。土壤类型为潮土,pH值8.3,土壤有机质10.2 g/kg,土壤碱解氮50.79 mg/kg,有效磷8.66 mg/kg,有效钾94.5 mg/kg。

## 1.2 试验设计

本研究选取Cd、Pb、Cr、Hg、As 5种重金属。以不添加重金属的土壤为对照(CK),5种重金属的添加量分别设置2个梯度:1(Cd1、Pb1、Cr1、Hg1、As1)和2(Cd2、Pb2、Cr2、Hg2、As2),添加量=土壤背景Ⅱ级标准×添加系数(表1)。试验小区面积为1.5 m×1.5 m,每个处理重复3次,共计33个小区,完全随机排列。重金属添加前,先将每个小区耕层20 cm的土壤全部取出,晾干、磨匀;然后按照设定的标准浓度加水稀释重金属溶液至一定量,以能够

充分与小区土拌匀为原则,使重金属溶液与土壤充分混合、拌匀;最后再回填相应的小区内,压实后老化30 d左右,以保证重金属与土壤的充分融合,各小区之间用高为50 cm的PVC塑料板分隔。

2010-2012年2年间在重金属污染的土壤中种植的作物顺序为:小麦(2010-10-2011-06)-玉米(2011-06-2011-09)-小麦(2011-10-2012-06)-玉米(2012-06-2012-09),试验选用的玉米品种为郑单958(2011年,第2季)、浚单20(2012年,第4季)。玉米均在当年6月中旬播种,人工开沟点播,宽窄行距分别为80,40 cm,种植密度为62000株/hm<sup>2</sup>。氮肥为尿素,施纯N 187.5 kg/hm<sup>2</sup>;磷肥为磷酸二氢钙,施用量41 kg/hm<sup>2</sup>;钾肥为硫酸钾,施用量78 kg/hm<sup>2</sup>;60%氮肥与磷、钾肥做基肥一次施入,剩余40%氮肥在喇叭口期作为追肥施入。玉米均在当年9月中下旬收获,各小区实收测产、考种;各小区田间管理一致。

表1 不同重金属各处理水平添加量

Tab.1 Applied dose levels of different heavy metals

重金属 Heavy metal	添加系数1 Coefficient	添加量 Dose	添加系数2 Coefficient	添加量 Dose	土壤背景Ⅱ级标准 Soil background Ⅱ
As [Na <sub>3</sub> AsO <sub>4</sub> (V)]	0.75	18.75	1.50	37.50	25.00
Cd (CdSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O)	1.00	0.60	2.00	1.20	0.60
Hg (HgCl <sub>2</sub> )	1.00	1.00	2.00	2.00	1.00
Cr [CrCl <sub>3</sub> (Ⅲ)]	0.75	187.50	1.00	250.00	250.00
Pb (PbNO <sub>3</sub> )	0.50	175.00	1.00	350.00	350.00

## 1.3 测定及分析方法

在成熟期,各小区连续收获3株进行穗轴质量、单穗籽粒质量及生物产量的测定<sup>[38-39]</sup>;小区实收计算产量。数据用Excel 2003、SPSS等软件进行整理和统计分析。

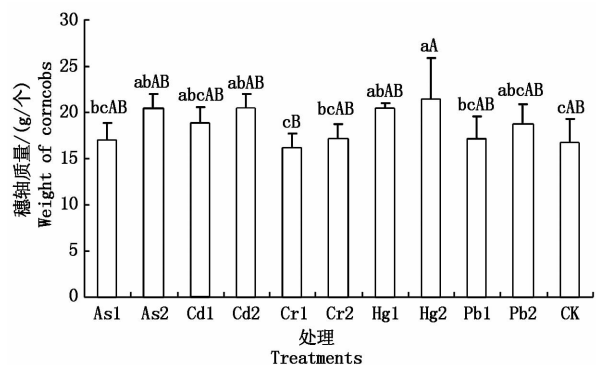
## 2 结果与分析

### 2.1 重金属胁迫后效对玉米穗轴质量及单穗籽粒质量的影响

由图1可知,重金属污染的土壤经过小麦-玉米-小麦3季作物种植后,玉米的穗轴质量以Hg2、Cd2、Hg1、As2处理较大,分别达到21.5,20.5,20.5,20.5 g/穗,而Pb1、As2、Cr1、Cr2处理较低,分别为17.2,17.0,16.0,17.2 g/穗。重金属处理的玉米穗轴质量均高于CK,其中Hg2、Cd2、Hg1、As2处理显著高于CK。同一重金属不同质量浓度间穗轴质量表现为:高质量浓度>低质量浓度,但差异不显著。

由图2可以看出,在种植的第2季,重金属Pb1

(163.8 g/穗)、Cd1(153.8 g/穗)、Cr2(143.4 g/穗)、Hg2(142.9 g/穗)处理单穗籽粒质量较高,Cd2(134.6 g/穗)、As2(131.2 g/穗)、Pb2(129.3 g/穗)、Cr1(128.0 g/穗)处理较低;所有重金属处理单穗籽粒质量均高于CK,但是各处理间差异不显著(图2-A)。



不同小、大写字母分别代表在 $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 水平差异显著。图2、3、表2同。

The different small letters and capital letters mean significant levels at  $P < 0.05$  and  $P < 0.01$  respectively.

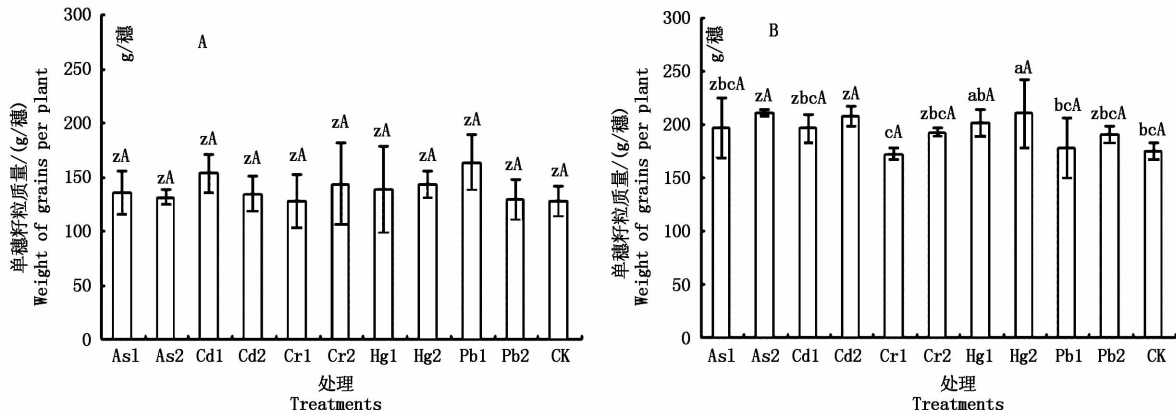
The same as Fig. 2, 3, Tab. 2.

图1 不同重金属胁迫后效对玉米穗轴质量的影响

Fig. 1 Later effects of heavy metals on weight of corn cobs

在种植的第 4 季, 重金属 As<sub>2</sub>、Hg<sub>2</sub>、Cd<sub>2</sub> 处理玉米单穗籽粒质量较大, 分别为 211.0、210.2、208.0 g/穗, 显著大于 Pb<sub>1</sub> (177.7 g/穗) 和 Cr<sub>1</sub> (172.3 g/穗) 处

理; 单穗籽粒质量在同一重金属的不同质量浓度间均表现为: 高质量浓度 > 低质量浓度, 但是差异不显著(图 2-B)。



A、B 分别为小麦-玉米-小麦-玉米种植周期中的第 2、4 季。图 3 同。  
A and B means the second and the fourth season of maize during wheat-maize-wheat-maize growing period respectively. The same as Fig. 3.

图 2 不同重金属胁迫后效对单穗籽粒质量的影响

Fig. 2 Later effects of heavy metals on weight of grains per plant

2.2 重金属胁迫后效对玉米籽粒产量及生物产量的影响

经过 1 季小麦种植后, 不同重金属胁迫后效对玉米籽粒有一定的影响。由表 2 可以看出, 几乎所有重金属 (Cr<sub>1</sub> 除外) 处理玉米籽粒产量均高于 CK, Cd<sub>1</sub>、Pb<sub>1</sub>、Hg<sub>1</sub> 处理较高, 分别达到了 8 276.7, 8 059.9, 7 879.5 kg/hm<sup>2</sup>, 而 Cd<sub>2</sub>、As<sub>1</sub>、Cr<sub>1</sub> 处理较低, 仅分别为 7 130.4, 7 032.6, 6 457.7 kg/hm<sup>2</sup>。其中 Cd<sub>1</sub>、Pb<sub>1</sub> 处理分别比 CK (6 675.5 kg/hm<sup>2</sup>) 高 1 601.2, 1 384.4 kg/hm<sup>2</sup>, 达到显著水平。同一重金属不同质量浓度间籽粒产量差异不显著。

经过小麦-玉米-小麦 3 季种植后, 第 4 季玉米的籽粒产量以 As<sub>1</sub>、Hg<sub>2</sub>、Pb<sub>1</sub> 处理较高, 分别达到 11 745.1, 11 527.2, 11 494.6 kg/hm<sup>2</sup>, 而 Cd<sub>2</sub>、Pb<sub>2</sub>、

Cr<sub>2</sub> 处理较低, 分别为 10 926.9, 10 912.1, 10 672.0 kg/hm<sup>2</sup>; 同一重金属处理低质量浓度籽粒产量均大于高质量浓度处理。

由表 2 可以看出, 不同重金属胁迫后效对玉米生物产量的影响与籽粒较为相近。经过 1 季小麦种植后, 重金属 Cd<sub>1</sub>、Hg<sub>1</sub>、Pb<sub>1</sub> 处理玉米生物产量较高, 而重金属 Cd<sub>2</sub>、As<sub>1</sub>、Cr<sub>1</sub> 处理相对较低, 其中 Cd<sub>1</sub>、Hg<sub>1</sub>、Pb<sub>1</sub> 处理分别比 Cr<sub>1</sub> 处理高 3 266.9, 2 910.2, 2 731.3 kg/hm<sup>2</sup>, 达到显著水平; 此外, 仅有 Cd<sub>1</sub> 处理生物产量显著高于 CK, 其他处理与 CK 差异均未达到显著水平。经过小麦-玉米-小麦 3 季种植后, 重金属 Hg<sub>2</sub>、Hg<sub>1</sub>、As<sub>1</sub>、Cd<sub>1</sub> 处理玉米生物产量较高, 除 Cr<sub>2</sub> 处理外, 其他重金属处理玉米生物产量均高于 CK。

表 2 不同重金属胁迫后效对玉米籽粒及生物产量的影响

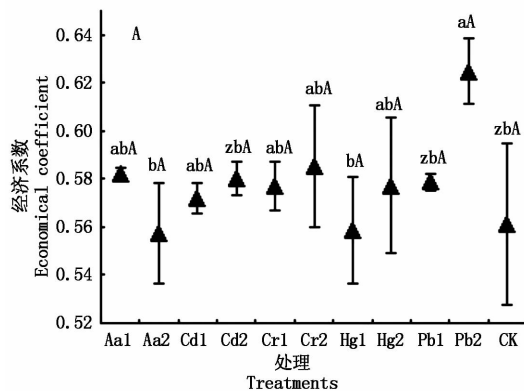
Tab. 2 Later effects of heavy metals on maize grain yields and biomass production

kg/hm<sup>2</sup>

处理 Treatments	2011		2012	
	籽粒产量 Grain yields	生物产量 Biomass production	籽粒产量 Grain yields	生物产量 Biomass production
As1	7 032.6bcdAB	12 079.3abcA	11 745.1aA	17 822.0aA
As2	7 505.7abcdAB	13 484.1abcA	11 054.4aA	17 718.1aA
Cd1	8 276.7aA	14 464.4aA	11 439.8aA	17 810.1aA
Cd2	7 130.4abcdAB	12 297.6abcA	10 926.9aA	17 590.7aA
Cr1	6 457.8dB	11 197.5cA	11 067.8aA	16 340.0aA
Cr2	7 398.2abcdAB	12 608.9abcA	10 672.0aA	16 001.1aA
Hg1	7 879.5abcAB	14 107.7abA	11 527.2aA	17 888.8aA
Hg2	7 494.5abcdAB	12 977.5abcA	11 472.4aA	18 211.8aA
Pb1	8 059.9abAB	13 928.8abA	11 494.6aA	17 278.1aA
Pb2	7 498.1abcdAB	12 326.9abcA	10 912.1aA	16 951.1aA
CK	6 675.5cdAB	11 952.0bcA	11 063.3aA	16 023.2aA

### 2.3 重金属胁迫后效对玉米经济系数的影响

由图 3-A 可以看出, 经过小麦 1 季种植后, 不同重金属胁迫后效对第 2 季玉米植株光合产物的运转效率产生了一定的影响, Pb2 (0.624 9)、Cr2 (0.585 3)、As1 (0.582 1)、Cd2 (0.580 1)、Pb1 (0.578 7)、Hg2 (0.577 1)、Cr1 (0.576 9)、Cd1 (0.572 2) 处理经济系数较高, 而 Hg1 (0.5585)、As2 (0.5575) 处理较低, 其中 Pb2 处理经济系数显著高于 Hg1、As2 处



理。重金属处理间经济系数差异均不显著。

由图 3-B 可以看出, 经过小麦-玉米-小麦 3 季种植后, 所有重金属处理的玉米经济系数均低于 CK (0.690 7)。其中 Hg1 (0.644 5)、Pb2 (0.643 0)、Cd1 (0.642 1) 处理显著低于 CK (0.690 7), Hg2 (0.630 3)、As2 (0.623 2)、Cd2 (0.621 4) 处理极显著低于 CK。同一重金属不同质量浓度间没有显著差异。

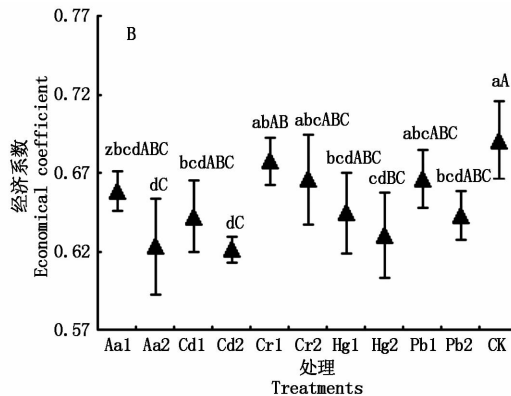


图 3 不同重金属胁迫后效对玉米经济系数的影响

Fig. 3 Later effect of heavy metals on maize's economic coefficient

## 3 结论与讨论

关于重金属胁迫对玉米影响的研究已有较多报道。盆栽条件下, 多数研究认为重金属胁迫下首先玉米苗和根的生长受到抑制<sup>[14-17]</sup>、叶绿素合成受到抑制和酶活性下降<sup>[20-26]</sup>、细胞质膜受到破坏<sup>[19]</sup>, 进而造成株高和干质量降低<sup>[18-20]</sup>、籽粒蛋白质及脂肪含量下降<sup>[19]</sup>。但是也有研究认为金属在一定质量浓度范围内, 对植物生长有促进作用<sup>[15-17]</sup>。本研究发现重金属污染的土壤经过 1 季或 3 季作物种植后, 能够增加玉米穗轴及单穗籽粒质量、提高产量和生物产量; 随着种植季的增加, 玉米的经济系数在同一重金属处理内也相应地增加, 但是与 CK 相比则下降。本研究的第一季小麦在 5 种重金属胁迫下, 只有 Cr 胁迫显著降低了小麦籽粒产量, 而 Cd、Hg、Pb、As 胁迫则没有降低产量<sup>[40-41]</sup>; 在种植的第 2-4 季重金属对玉米籽粒产量均未表现出抑制作用, 说明大田重金属胁迫后效对玉米籽粒产量影响较小。由于玉米对不同重金属均有积累能力<sup>[28-29]</sup>, 但是积累能力存在高、中、低 3 种类型<sup>[33]</sup>, 大田重金属胁迫的玉米种群相对生长率较低、生活史缩短、植株矮化、产量下降<sup>[31]</sup>。这与本研究的结论存在一定的差异, 可能与大田条件下次生胁迫作用已经被上季作物吸收而减弱有关。此外, 有研究认为土壤重金属含量在符合土壤环境质量标准的前提下, 生产的玉米籽粒重金属含量符合粮食重金属限量要求, 达到

食用标准<sup>[37]</sup>。本研究的结论表明, 在重金属污染的土壤上均能获得较高玉米籽粒产量和生物产量, 这对于利用玉米来修复受重金属污染的农田以及开发利用富集植物提取有价值的重金属元素有重要的启示意义; 但这并不能保证这种条件下生产的粮食可以达到食用标准, 能否食用还需要进一步的研究。

研究结果表明, 在大田条件下, 重金属 Hg、Cd、As、Pb、Cr 胁迫经过小麦 1 季或小麦-玉米-小麦 3 季作物种植后, 玉米穗轴质量、玉米生物产量与 CK 持平或高于 CK, 其中 Hg2、Cd2、Hg1、As2 处理的玉米穗轴质量显著高于 CK; 玉米穗轴质量、单穗籽粒质量、经济系数在同一重金属的不同质量浓度间均为: 高质量浓度 > 低质量浓度, 但是差异不显著; 所有处理间的玉米生物产量差异均不显著。经过小麦-玉米-小麦 3 季种植后, 所有重金属处理的玉米经济系数均低于 CK, Hg1、Pb2、Cd1 处理显著低于 CK (0.690 7), Hg2、As2、Cd2 处理极显著低于 CK。

经过小麦 1 季种植后, 重金属 (Cr1 除外) 处理的玉米籽粒产量均高于 CK, Cd1、Pb1、Hg1 处理较高, 分别达到 8 276.7, 8 59.9, 7 879.5 kg/hm<sup>2</sup>, 而 Cd2、As1、Cr1 处理较低, 分别仅为 7 130.4, 7 032.6, 6 457.7 kg/hm<sup>2</sup>, 重金属 Cd1、Pb1 处理分别比 CK (6 675.5 kg/hm<sup>2</sup>) 高 1 601.2, 1 384.4 kg/hm<sup>2</sup>, 达到显著水平。经过小麦-玉米-小麦 3 季种植后, 第 4 季的玉米籽粒产量以 As1、Hg2、Pb1 处理较高, 分别达到 11 745.1, 11 527.2, 11 494.6 kg/hm<sup>2</sup>, 而 Cd2、

Pb<sub>2</sub>、Cr<sub>2</sub> 处理相对较低,分别为 10 926.9,10 912.1,10 672.0 kg/hm<sup>2</sup>;同一重金属处理低质量浓度玉米籽粒产量大于高质量浓度;重金属处理玉米籽粒产量与 CK 均未达到显著差异。

此外,由于本研究是在大田条件下进行的,研究的风险以及研究受到外界自然环境等因素的影响较大,所得的研究结论也有待于进一步研究和验证。

参考文献:

[1] 孙波,周生路,赵其国.基于空间变异分析的土壤重金属复合污染研究[J].农业环境科学学报,2003,22(2):248-251.

[2] Abdolkarim C,Mitra N,Hossein L Y. Phytoremediation of heavy-metal-polluted soils: Screening for new accumulator plants in Angouran mine (Iran) and evaluation of removal ability [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2009,72(5):1349-1353.

[3] Liphadzi M S,Kirkham M B. Availability and plant uptake of heavy metals in EDTA-assisted phytoremediation of soil and composted biosolids [J]. South African Journal of Botany 2006,72(3):391-397.

[4] Li G L,Zhao Z S,Liu J Y *et al.* Effective heavy metal removal from aqueous systems by thiol functionalized magnetic mesoporous silica [J]. Journal of Hazardous Materials 2011,192(1):277-283.

[5] Julien L, Magali C, Christophe D. Heavy metals uptake by sonicated activated sludge: Relation with floc surface properties [J]. Journal of Hazardous Materials 2009,162(2-3):652-660.

[6] Yang X E,Feng Y,He Z L *et al.* Molecular mechanisms of heavy metal hyper accumulation and phytoremediation [J]. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 2005,18(4):339-353.

[7] Wei B G,Yang L S. A review of heavy metal contaminations in urban soils,urban road dusts and agricultural soils from China [J]. Microchemical Journal 2010,94(2):99-107.

[8] Chen W M,Wu C H,Euan K J *et al.* Metal biosorption capability of *Cupriavidus taiwanensis* and its effects on heavy metal removal by nodulated *Mimosa pudica* [J]. Journal of Hazardous Materials 2008,151(2-3):364-371.

[9] Kwon J S,Yun S T, Lee J H *et al.* Removal of divalent heavy metals (Cd,Cu,Pb, and Zn) and arsenic(III) from aqueous solutions using scoria: Kinetics and equilibria of sorption [J]. Journal of Hazardous Materials 2010,174(1-3):307-313.

[10] 张胜,胡炳义,陈龙.重金属及有机物污染土壤的植物修复机制[J].河南农业科学,2006(7):10-14.

[11] Dai J,Becquer T,Rouiller J H *et al.* Influence of heavy metals on C and N mineralization and microbial biomass in Zn-Pb-Cu- and Cd-contaminated soils [J]. Applied Soil Ecology 2004,25(2):99-109.

[12] Khan S,Cao Q,Zheng Y M *et al.* Health risks of heavy metals in contaminated soils and food crops irrigated with wastewater in Beijing,China [J]. Environmental Pollution 2008,152(3):686-692.

[13] 李海华,张杰,申灿杰.郑州市近郊土壤和蔬菜中重金属污染状况调查与评价[J].河南农业科学,2007(1):90-92.

[14] 孙健,铁柏清,钱湛,杨余维,等.复合重金属胁迫对玉米和高粱成苗过程的影响[J].山地农业生物学报,2005,24(6):514-521.

[15] 刘文胜,周婵,郭盘江,等.镉对玉米种子萌发及胚生长的影响[J].湖北农业科学,2010,49(4):842-844.

[16] 李国良.重金属镉污染对玉米种子萌发及幼苗生长的影响[J].国土与自然资源研究,2006(2):91-92.

[17] 李晔,李玉双,孙丽娜,等.重金属Cd胁迫对不同玉米品种生理生化指标的影响[J].安徽农业科学,2011,39(5):2627-2628,2657.

[18] 李勇,黄占斌,王文萍,等.重金属Pb、镉对玉米生长及土壤微生物的影响[J].农业环境科学学报,2009,28(11):2241-2245.

[19] 曹莹,黄瑞冬,蒋文春,等.重金属Pb和镉对玉米品质的影响[J].沈阳农业大学学报,2005,36(2):218-220.

[20] 巢丽仪,秦华明,陈结清,等.重金属铬胁迫对玉米幼苗生长的影响[J].种子,2008,27(3):28-31.

[21] 王启明.重金属Cr<sup>6+</sup>胁迫对玉米幼苗生理生化特性的影响[J].河南农业科学,2006(8):37-40.

[22] 苗明升,朱圆圆,曹明霞,等.重金属Pb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.

[23] 顾红,李建东,高永刚,等.石灰抑制重金属Pb影响玉米根系效应的研究[J].玉米科学,2006,14(5):101-103.

[24] 高永刚,顾红,董杰,等.石灰对重金属Pb影响玉米生理生化作用的抑制效应研究[J].玉米科学,2007,15(S1):94-96.

[25] 郑春霞,王文全,骆建敏,等.重金属Pb<sup>2+</sup>对玉米苗生长的影响[J].光谱学与光谱分析,2005,25(8):1361-1365.

[26] 古红梅,胡述龙,王红星.重金属Pb对玉米种子萌发及幼苗生长的影响[J].广东农业科学,2011(1):36-38.

[27] 孔祥瑞,曲东,周莉娜.硫营养对重金属胁迫下玉米和小麦根系导水率的影响[J].西北植物学报,2007,27(11):2257-2262.

[28] 赵新华,马伟芳,孙井梅,等.玉米修复河道疏浚底泥

- 重金属-有机复合污染的根际效应[J]. 农业环境科学学报 2006 25(1): 100-106.
- [29] 王崇臣, 王鹏, 黄忠臣. 盆栽玉米和大豆对铅、镉的富集作用研究[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(24): 10383, 10386.
- [30] 秦欢, 何忠俊, 熊俊芬, 等. 间作对不同品种玉米和大叶井口边草吸收积累重金属的影响[J]. 农业环境科学学报 2012 31(7): 1281-1288.
- [31] 张太平, 段昌群, 胡斌, 等. 玉米在重金属污染条件下的生态分化与品种退化[J]. 应用生态学报, 1999, 10(6): 743-747.
- [32] 周永锋, 刘兴成, 周艳琳. 肥料中重金属含量及其对干旱灌溉农区玉米吸收累积的影响[J]. 农业环境科学学报 2006 25(增刊): 503-506.
- [33] 郭晓方, 卫泽斌, 丘锦荣, 等. 玉米对重金属累积与转运的品种间差异[J]. 生态与农村环境学报 2010 26(4): 367-371.
- [34] 陈燕, 刘晚苟, 郑小林, 等. 玉米植株对重金属的富集与分布[J]. 玉米科学 2006 14(6): 93-95.
- [35] 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]. 中国农学通报 2006 22(4): 244-247.
- [36] 陈有, 黄艺, 曹军, 等. 玉米根际土壤中不同重金属的形态变化[J]. 土壤学报 2003 40(3): 367-373.
- [37] 王宇, 李业东, 曹国军, 等. 长春地区土壤中重金属含量及其在玉米子粒中的积累规律[J]. 玉米科学, 2008 16(2): 80-82, 87.
- [38] 山东省农业科学院玉米研究所. 玉米生理[M]. 北京: 中国农业出版社, 1987: 50-62.
- [39] 王树安. 作物栽培学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1994: 89-96.
- [40] 聂胜委, 黄绍敏, 张水清, 等. 不同种类重金属胁迫对两种小麦产量及构成因素的影响[J]. 农业环境科学学报 2012 31(3): 455-463.
- [41] 聂胜委, 黄绍敏, 张水清, 等. 重金属胁迫对小麦生长的影响及阈值研究[J]. 华北农学报 2012 27(6): 192-198.