

# 重金属胁迫对小麦生长的影响及阈值研究

聂胜委<sup>1</sup> 黄绍敏<sup>1</sup> 张水清<sup>1</sup> 郭斗斗<sup>1</sup> 张巧萍<sup>2</sup> 程秀洲<sup>3</sup>

(1. 河南省农业科学院 植物营养与资源环境研究所 国家潮土土壤肥力与肥料效益监测站 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; 3. 潢川县农业技术推广中心 河南 潢川 465150)

**摘要:** 以当前农业研究的热点领域—重金属污染为切入点,研究大田环境下 Cd、Pb、As、Hg、Cr 这 5 种重金属对郑麦 9023、小偃 22 的株高、穗长及产量等生长因子的影响。结果表明,Cd、Pb、As、Hg、Cr 胁迫对郑麦 9023 的穗长及 As、Cd、Cr 胁迫对小偃 22 的穗长均表现出抑制效应;而 Hg、Pb 胁迫对小偃 22 的穗长表现为促进效应。与对照相比 5 种重金属对小偃 22 的株高均表现为抑制作用;而 As、Hg 胁迫对郑麦 9023 的株高则表现为促进作用,Cd、Pb 胁迫则表现为“高促低抑”的特点,Cr 胁迫表现为“低促高抑”趋势。此外 5 种重金属胁迫下,只有重金属 Cr 胁迫显著降低了 2 个小麦品种的籽粒产量,而 Cd、Hg、Pb、As 胁迫则没有表现出抑制现象。通过对重金属胁迫浓度与产量的拟合分析,得出 As、Cd、Cr、Hg、Pb 这 5 种重金属对郑麦 9023 的产量阈值分别为 53.42、1.31、749.73、7.43、555.57 mg/kg,对小偃 22 的产量阈值分别为 42.58、1.80、828.18、10.30、437.01 mg/kg。表明郑麦 9023 抗 As、Pb 胁迫能力较强,而小偃 22 抗 Cd、Cr、Hg 胁迫的能力相对较强。

**关键词:** 重金属;小麦;生长因子;影响;阈值

中图分类号: S512.01 文献标识码: A 文章编号: 1000-7091(2012)06-0118-07

## Effects of Heavy Metal Stress on Growth and Grain Yield of Wheat

NIE Sheng-wei<sup>1</sup>, HUANG Shao-min<sup>1</sup>, ZHANG Shui-qing<sup>1</sup>,  
GUO Dou-dou<sup>1</sup>, ZHANG Qiao-ping<sup>2</sup>, CHENG Xiu-zhou<sup>3</sup>

(1. National Soil Fertility and Fertilizer Effects Long-term Monitoring Net Work-Zhengzhou Fluvo-aquic Station, Key Field Scientific Observation Station of Zhengzhou Fluvo-aquic Soils Ecology Environment, Ministry of Agriculture, 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; 3. Extensive Centre for Agricultural Techniques of Huangchuan County, Huangchuan 465150, China)

**Abstract:** The plant height, spike length and grain yield of wheat varieties Zhengmai 9023 and Xiaoyan 22 were analyzed under the stress of heavy metals Cd, Pb, As, Hg and Cr in field conditions. The results showed that the spike length of Zhengmai 9023 decreased under the stress of Cd, Pb, As, Hg and Cr, and the similar results in Xiaoyan 22 were also found under the stress of Cd, As and Cr. The plant height of Xiaoyan 22 reduced under the stress of Cd, Pb, As, Hg and Cr, but it increased in Zhengmai 9023 under the stress of As and Hg. The plant height increased with the higher dose of Cd and/or Pb and decreased with the lower dose of Cd and/or Pb, but showed a reverse trend under Cr stress. In addition, the grain yield of the two varieties was significantly lower under Cr stress than CK, but was higher under Cd, Pb, As and Hg stress. The yield threshold value of As, Cd, Cr, Hg and Pb was 53.42, 1.31, 749.73, 7.43, 555.57 mg/kg for Zhengmai 9023 respectively, and 42.58, 1.80, 828.18, 10.30, 437.01 mg/kg for Xiaoyan 22 respectively.

**Key words:** Heavy metal; Wheat; Growing factor; Effect; Threshold value

近年来,由于采矿冶炼废水<sup>[1-2]</sup>、污灌及农药化肥<sup>[3-4]</sup>的过量施用和垃圾农用等因素导致区域农业

收稿日期: 2012-08-08

基金项目: 公益性行业科研专项(200903015); 河南农科院人才基金, 河南省院省院合作项目(102106000034; 092106000011)

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,副研究员,博士,主要从事土壤生态等研究。

环境污染加剧,尤其造成重金属的土壤污染。据统计,1980 年全国工业“三废”污染农田面积 266.7 万  $\text{hm}^2$ ,到 1992 年达 1 000 万  $\text{hm}^2$ <sup>[5]</sup>;当前我国重金属污染土地已经接近 2 000 万  $\text{hm}^2$ ,约占耕地面积的 1/5<sup>[6]</sup>;每年仅重金属污染造成的直接经济损失就超过 300 亿元。而且在一些重金属污染严重地区的癌症发病率和死亡率明显高于无污染地区<sup>[7]</sup>,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以 Cd、Pb、As、Hg 等及其复合物污染较为突出<sup>[8]</sup>。当前重金属的研究主要侧重于污染的治理修复<sup>[9-18]</sup>,而重金属胁迫对小麦生长的影响,相关研究表明,重金属 Cd<sup>[19-21]</sup>、Pb<sup>[22]</sup>、As<sup>[23-27]</sup>、Hg<sup>[28]</sup>、Cr<sup>[29-30]</sup> 胁迫在浓度较低时对小麦的生长有一定促进作用,在高浓度下则抑制种子的发芽势、发芽率、芽以及根的生长。前人就重金属胁迫或污染对小麦影响的研究主要集中在种子萌发、幼苗生长以及酶和光合系统等方面,而对小麦生长因子以及产量的影响则少有报道,且前人的研究大多在水培、盆栽的条件下进行,这与大田土壤真实环境条件差异较大。因此,在大田条件下对 Cd、Pb、As、Hg、Cr 这 5 种重金属在不同浓度胁迫下对小麦生长因子及土壤阈值进行了研究,以期开展重金属污染条件下食品安全、重金属污染修复、环境保护等提供借鉴。

## 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℃, > 10℃ 积温约 5 169℃。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 1 450 mm,年日照时间约 2 400 h。土壤类型为潮土,pH 值 8.3,土壤有机质(SOM) 10.2 g/kg,土壤碱解氮(Alkali-hydrolysable Nitrogen) 50.79 mg/kg,有效磷(Olsen-P) 8.66 mg/kg,有效钾(K) 94.5 mg/kg。

### 1.2 试验设计

试验的 5 种重金属分别为 Cd、Pb、Cr、Hg、As。以不添加重金属的土壤为对照(CK),5 种重金属的添加剂量见表 1,各分设土壤背景值的 0 倍(CK)、1 倍(Cd1、Pb1、Cr1、Hg1、As1)、2 倍(Cd2、Pb2、Cr2、Hg2、As2) 3 个浓度梯度。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;最后回填到相应的小区内,压实后老化 30 d 左右,以保证重金属与土壤的充分融合,各个小区之间用 50 cm 高 PVC 塑料板分隔。

试验选用的小麦品种为郑麦 9023、小偃 22,均为弱春性品种。2010 年 10 月 15 日播种,人工开沟点播,行距 20 cm,郑麦 9023、小偃 22 播量均为 135  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ;氮肥为尿素[CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>],施纯氮 165  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ,底肥、追肥各占 1/2;磷肥为磷酸二氢钙[Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>],施磷肥(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) 75  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ;钾肥为硫酸钾(K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>),施钾肥(K<sub>2</sub>O) 75  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ,磷、钾肥做底肥一次施入。2011 年 6 月 10 日收获,各个小区实收测产、考种;小麦生育期内各个小区田间管理一致。

表 1 不同浓度设置水平下各处理重金属添加剂量

Tab. 1 Applied dose levels of different heavy metals

重金属 Heavy metal	添加 倍数(0) Times	添加量 /(mg/kg) Heavy metal	添加倍数(1) Times	添加量 /(mg/kg) Heavy metal	添加倍数(2) Times	添加量 /(mg/kg) Heavy metal	土壤背景Ⅱ 级标准/(mg/kg) Soil background (Ⅱ)
As [Na <sub>3</sub> AsO <sub>4</sub> (V)]	0	0	0.75	18.75	1.50	37.50	25.00
Cd (CdSO <sub>4</sub> · 5H <sub>2</sub> O)	0	0	1.00	0.60	2.00	1.20	0.60
Hg (HgCl <sub>2</sub> )	0	0	1.00	1.00	2.00	2.00	1.00
Cr [CrCl <sub>3</sub> (Ⅲ)]	0	0	0.75	187.50	1.00	250.00	250.00
Pb (PbNO <sub>3</sub> )	0	0	0.50	175.00	1.00	350.00	350.00

注:重金属添加剂量=(0,1,2 分别对应数值)×土壤背景Ⅱ级标准(GB15618-1995 土壤环境质量标准)。

Notes: Dose of heavy metal = (values of 0, 1, and 2) × soil background levels (Ⅱ)。

### 1.3 测定及分析方法

在小麦成熟期,株高、穗长、单穗籽粒质量、籽粒颖壳质量、以及根冠比等指标采用 1.5 m 单行连续

取 20 株测定<sup>[32-33]</sup>;小区实收计算产量。文中数据用 Excel 2003, DPS 7.5 等软件进行整理、方差分析和拟合分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同重金属胁迫对成熟期小麦株高、穗长的影响

重金属胁迫下对小麦穗长的影响,与 CK 相比,重金属 Pb 在 2 种添加量下均抑制郑麦 9023 穗的生长,其他重金属则随添加量的高低对穗长的影响不尽相同,穗长大小依次为: Cd1 > Hg2 > Cr1 > As2 > CK > Pb1 > Pb2 > As1 > Cd2 > Hg1 > Cr2。同样,重

金属 Cd、As、Cr 在 2 种添加量均抑制小偃 22 的穗长,Pb 胁迫则没有表现出抑制特性,穗长大小依次为: Pb2 > Hg2 > Pb1 > CK > Cd1 > As1 > Hg1 > As2 > Cd2 > Cr1 > Cr2(表 2)。此外,同一重金属胁迫对不同的基因型小麦穗长的影响效应存在差异,As、Cd、Cr 胁迫对郑麦 9023、小偃 22 的穗长均表现出抑制效应;Hg、Pb 处理对 9023 表现为抑制效应,对小偃 22 表现为一定的促进作用(表 3)。

表 2 不同重金属胁迫对小麦穗长和株高的影响

Tab. 2 Effects of varieties heavy metals on wheat spikes length and plant heights

处理 treatment	株高/cm Plant height		穗长/cm Length of spike	
	郑麦 9023 Zhengmai 9023	小偃 22 Xiaoyan 22	郑麦 9023 Zhengmai 9023	小偃 22 Xiaoyan 22
As1	58.2aA	64.5abAB	7.9abA	6.4abAB
As2	59.6aA	66.1aA	8.3aA	6.4abAB
Cd1	56.6aAB	63.8abAB	8.5aA	6.5abAB
Cd2	59.1aA	64.1abAB	7.8abA	6.3bAB
Cr1	60.1aA	59.5bcAB	8.4aA	6.2bAB
Cr2	48.1bB	55.9cB	7.5bA	6.1bB
Hg1	58.8aA	65.0abA	7.8abA	6.4abAB
Hg2	59.7aA	64.2abAB	8.4aA	6.5abAB
Pb1	57.3aAB	65.1abA	8.1abA	6.5abAB
Pb2	58.8aA	65.6abA	8.0abA	6.7aA
CK	57.7aA	67.7aA	8.2abA	6.5abAB

注:表中同列字母大、小写分别代表  $P \leq 0.05$   $P \leq 0.01$  的显著水平。表 3~5 图 1 同。

Notes: uppercase and lowercase letters means significant levels at  $P \leq 0.05$  and  $P \leq 0.01$  respectively. The same as Tab. 3~5, Fig. 1.

金属胁迫对小麦株高的影响,与对照相比,重金属 Pb1、Cd1、Cr2 抑制了郑麦 9023 的株高,而其他处理则不存在抑制现象,株高大小依次为: Cr1 > Hg2 > As2 > Cd2 > Hg1 > Pb2 > As1 > CK > Pb1 > Cd1 > Cr2(表 2)。总的来看,As、Hg 处理对郑麦 9023 的株高则表现为促进作用,Cd、Pb 处理在低浓度条件下表现为抑制作用,高浓度条件下表现出促进作用,5 种重金属的影响作用大小依次为: Cr > Hg > As > Pb > Cd(表 3)。此外,5 种重金属的胁迫均抑制了小偃 22

的株高,其中,As2 处理抑制效果最小,其次为 Pb2 处理,Cr2 处理抑制效果最大;重金属胁迫下小偃 22 的株高大小依次为: CK > As2 > Pb2 > Pb1 > Hg1 > As1 > Hg2 > Cd2 > Cd1 > Cr1 > Cr2(表 2)。Cd、Pb、As、Hg、Cr 胁迫对小偃 22 的株高均表现为抑制作用,重金属 Cr 处理与对照相比达到显著( $P < 0.05$ )或极显著( $P < 0.01$ )水平;5 种重金属对小偃 22 株高的抑制效应的大小依次为: Cr > Cd > Hg > As  $\geq$  Pb(表 3)。

表 3 不同重金属胁迫对小麦株高、穗长的效应

Tab. 3 Total effects of varieties heavy metal stress on height of wheat and length of wheat' spikes

处理 Treatment	株高/cm Plant height				穗长/cm Length of spike			
	郑麦 9023 Zhengmai 9023	增减 Increase /decrease	小偃 22 Xiaoyan 22	增减 Increase /decrease	郑麦 9023 Zhengmai 9023	增减 Increase /decrease	小偃 22 Xiaoyan 22	增减 Increase /decrease
As	58.9aA	1.2	65.3aA	-2.4	8.1aA	-0.1	6.4abAB	-0.1
Cd	57.8aA	0.1	63.9aA	-3.8	8.1aA	-0.1	6.4abAB	-0.1
Cr	54.1aA	-3.6	57.7bB	-8.2	8.0aA	-0.2	6.2bB	-0.3
Hg	59.3aA	1.6	64.6aA	-3.1	8.1aA	-0.1	6.5aAB	0.0
Pb	58.0aA	0.3	65.4aA	-2.3	8.1aA	-0.1	6.6aA	0.1
CK	57.7aA	0.0	67.7aA	-0.0	8.2aA	0.0	6.5aAB	0.0

### 2.2 不同重金属胁迫下对小麦成熟期颖壳质量、单穗籽粒质量的影响

在重金属胁迫下,小麦颖壳的生长受到了较大

影响。从表 4 可以看出,与对照 CK 相比,重金属 Cr 胁迫能显著( $P < 0.05$ )降低郑麦 9023 的颖壳质量,其他重金属胁迫对颖壳生长的影响则与其浓度有较

大关系,颖壳质量大小依次为:  $Hg2 > Pb1 > As2 > Cd1 > Pb2 > CK > Hg1 > Cd2 > As1 > Cr1 > Cr2$ ; 5 种重金属对郑麦 9023 籽粒颖壳质量的影响效应大小也有所不同, Cr 的影响效应最大, Cd 的影响效应最小, 影响效应大小依次为:  $Cd < Pb < As < Hg < Cr$  (表 5)。对于小偃 22 来说, 与 CK 相比, 重金属 As、Cd、Cr 胁迫均抑制颖壳的生长, 其中, Cr 处理的颖壳质

量显著 ( $P < 0.05$ ) 低于其他处理, 而 Pb、Hg 的浓度不同对生长的影响也不同, 颖壳质量大小依次为:  $Pb2 > Hg1 > CK > Pb1 > Cd1 > Hg2 > As2 > Cd2 > As1 > Cr1 > Cr2$ 。5 种重金属对小偃 22 籽粒颖壳质量的影响效应最大的是 Cr, 其次是 As, 5 种重金属的影响效应大小依次为:  $Pb < Hg < Cd < As < Cr$  (表 5)。

表 4 不同重金属胁迫对小麦颖壳质量、单穗籽粒质量的影响

Tab. 4 Effect of 5 varieties heavy metals on weight of wheat glumes and the spikes respectively

处理 Treatment	颖壳质量/(kg/hm <sup>2</sup> ) Weight of glumes		单穗籽粒质量/g Weight of per spike	
	郑麦 9023 Zhengmai 9023	小偃 22 Xiaoyan 22	郑麦 9023 Zhengmai 9023	小偃 22 Xiaoyan 22
As1	961.3abABC	864.3abABC	1.41bB	1.70abA
As2	1 123.0aAB	1 031.2aAB	1.48bB	1.82abA
Cd1	1 121.8aAB	1 072.7aAB	1.50bB	1.65abA
Cd2	1 088.3aAB	907.7abABC	1.45bB	1.61bA
Cr1	629.6bcBC	523.2bcBC	1.91aA	1.78abA
Cr2	492.5cC	309.3cC	1.44bB	1.85abA
Hg1	1 108.5aAB	1 212.0aA	1.49bB	1.89aA
Hg2	1 282.7aA	1 070.6aAB	1.53bB	1.69abA
Pb1	1 221.1aA	1 102.2aAB	1.38bB	1.66abA
Pb2	1 114.7aAB	1 275.2aA	1.514bB	1.79abA
CK	1 113.0aAB	1 181.9aA	1.55bAB	1.68abA

小麦的单穗籽粒质量直接影响到最终的产量, 与 CK 相比, 郑麦 9023 在重金属 Cr1 胁迫下的单穗籽粒质量最大, 达到 1.91 g/穗, Pb1 处理的单穗籽粒质量最小, 为 1.38 g/穗; 各处理的单穗籽粒质量大小依次为:  $Cr1 > CK > Hg2 > Pb2 > Cd1 > Hg1 > As2 > Cd2 > Cr2 > As1 > Pb1$  (表 4)。不同重金属对郑麦 9023 单穗籽粒质量的效应大小也不相同, 从表 5 可以看出, Cr 的影响效应最大, Hg 的最小, 5 种重

金属的影响效应大小依次为:  $Cr > Pb > As > Cd > Hg$ 。同样, 小偃 22 在重金属 Hg1 胁迫下的单穗籽粒质量最大, 为 1.90 g/穗, 其次为 Cr2, Cd2 处理的值最小, 小偃 22 各处理的小麦单穗籽粒质量大小依次为:  $Hg1 > Cr2 > As2 > Pb2 > Cr1 > As1 > Hg2 > CK > Pb1 > Cd1 > Cd2$ ; 5 种重金属的影响效应大小依次为:  $Cr > Hg > Cd > As > Pb$  (表 5)。

表 5 不同重金属胁迫对小麦颖壳质量、单穗籽粒质量的效应

Tab. 5 Total effects of varieties heavy metal stress on weight of glumes and the spikes

处理 Treatment	颖壳质量/(kg/hm <sup>2</sup> ) Weight of glumes				单穗籽粒质量/g Weight of per spike			
	郑麦 9023 Zhengmai 9023	增减 Increase /decrease	小偃 22 Xiaoyan 22	增减 Increase /decrease	郑麦 9023 Zhengmai 9023	增减 Increase /decrease	小偃 22 Xiaoyan 22	增减 Increase /decrease
As	1 042.2aA	-70.8	947.7aA	-234.2	1.45bA	-0.05	1.76aA	0.06
Cd	1 105.0aA	-8.0	990.2aA	-191.7	1.47abA	-0.03	1.63aA	-0.07
Cr	561.0bB	-552.0	416.3bB	-765.6	1.68aA	0.18	1.82aA	0.12
Hg	1 195.6aA	82.6	1 141.3aA	-40.6	1.51abA	0.01	1.79aA	0.09
Pb	1 167.9aA	54.9	1 188.7aA	6.8	1.44bA	-0.06	1.73aA	0.03
CK	1 113.0aA	0.0	1 181.9aA	0.0	1.55abA	0.00	1.68aA	0.00

### 2.3 不同重金属胁迫对小麦产量影响及阈值分析

从图 1 可以看出, 不同重金属胁迫, 对小麦籽粒产量产生了一定的影响。从产量上看, 重金属 Cr 处理的 2 个小麦品种籽粒产量与 CK 相比显著 ( $P < 0.05$ ) 降低, 均表现为高浓度 Cr 处理的抑制作用大于低浓度 Cr 处理; Cd、Hg、Pb、As 处理的小麦籽粒产量均高于对照, 其中 Cd1、Pb2 处理的郑麦 9023

小麦籽粒产量显著 ( $P < 0.05$ ) 高于 CK, 而 Cd、Hg、Pb、As 处理的小偃 22 小麦籽粒产量则没有达到显著水平。各处理郑麦 9023 的籽粒产量大小依次为:  $Cr2 < Cr1 < CK < Cd2 < Hg1 < As2 < As1 < Hg2 < Pb1 < Cd1 < Pb2$ ; 各处理小偃 22 的籽粒产量大小依次为:  $Cr2 < Cr1 < CK < Hg1 < As2 < Hg2 < Cd1 < Cd2 < Pb2 < As1 < Pb1$ 。

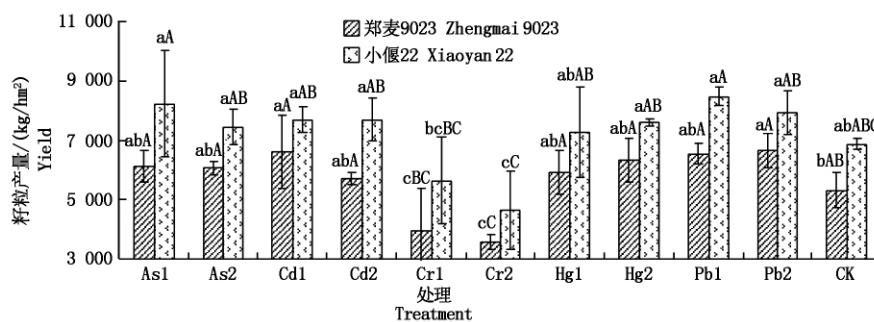


图 1 不同重金属胁迫对小麦籽粒产量的影响

Fig. 1 Effect of 5 varieties heavy metals on wheat grain yields

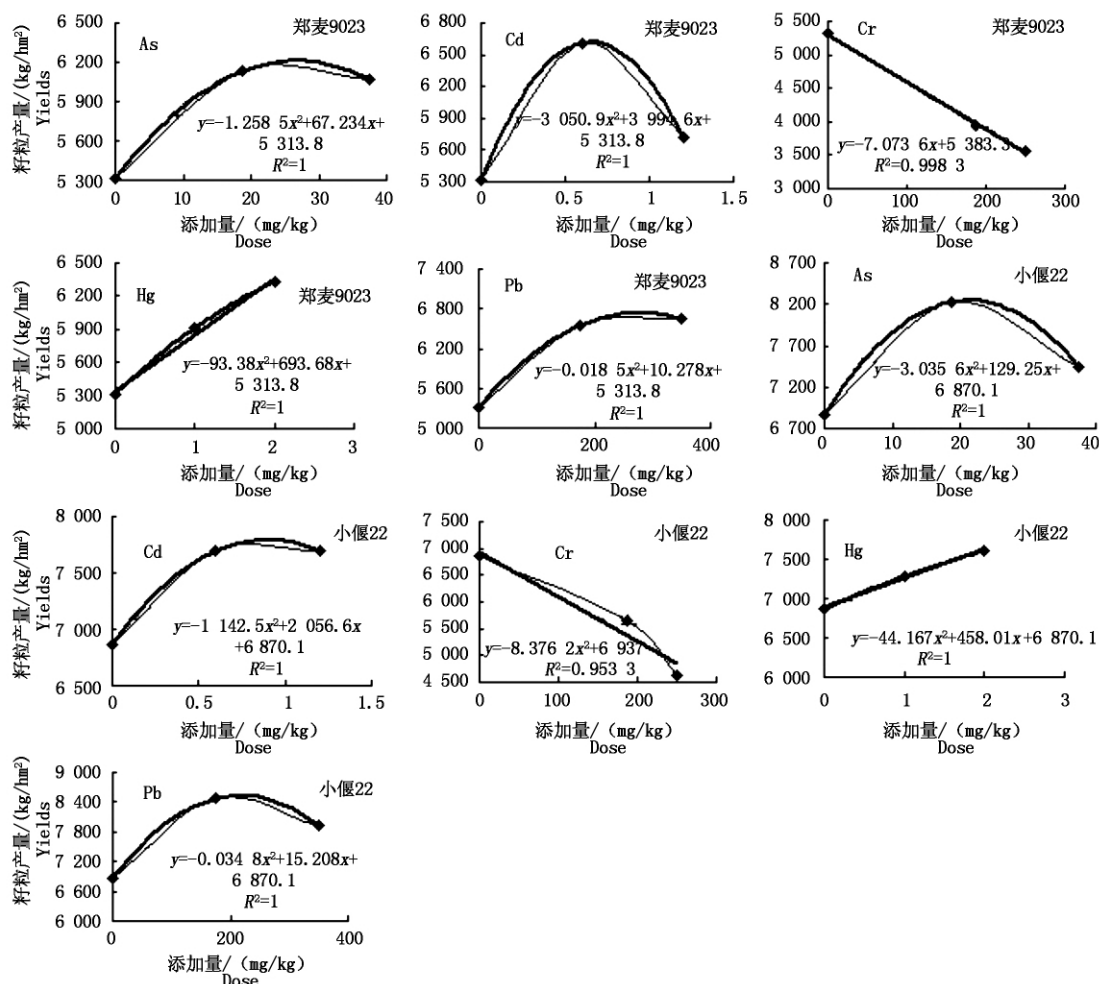


图 2 不同重金属浓度与小麦产量的拟合

Fig. 2 The relationship between heavy metals and grain yields

表 6 不同重金属胁迫对 2 种小麦产量影响的阈值分析

Tab. 6 The threshold value of two genotype under various heavy mental mg/kg

处理 Treatment	郑麦 9023 Zhengmai 9023	小偃 22 Xiaoyan 22	备注 Notes
As	≥53.42	≥42.58	抑制产量
Cd	≥1.31	≥1.80	抑制产量
Cr	≥749.73	≥828.18	没有收成
Hg	≥7.43	≥10.30	抑制产量
Pb	≥555.57	≥437.01	抑制产量

对 5 种重金属胁迫下的小麦产量与土壤重金属含量进行拟合分析,在本研究的土壤重金属浓度下,重金属 Cr 与郑麦 9023、小偃 22 的产量均呈直线线性关系;重金属 Cd、Hg、Pb、As 与小麦产量则呈二次线性关系(图 2)。说明 2 种小麦产量受 Cr 影响较大,而受 Cd、Hg、Pb、As 的影响则相对较小。

同时利用线性方程进行求解,得出 2 种小麦的产量受重金属胁迫的阈值(表 6),由表 6 可以看出,不同基因型小麦品种的抗胁迫能力存在一定差异,

郑麦 9023 抗 As、Pb 胁迫能力较强,小偃 22 抗 Cd、Cr、Hg 胁迫的能力相对较强。

### 3 结论与讨论

前人研究认为,重金属 Cd<sup>[19-21]</sup>、Pb<sup>[22]</sup>、As<sup>[23-27]</sup>、Hg<sup>[28]</sup>、Cr<sup>[29-30]</sup> 胁迫在较低浓度时对小麦的生长有一定的促进作用,而在高浓度下能够抑制种子的发芽势、发芽率和芽以及根的生长;Cd、Pb、As、Hg、Cr 重金属对产量三要素的影响最大的是单位面积群体数,其次为穗粒数,对千粒质量的影响最小;单位面积群体穗数对重金属 Cr、Pb 最为敏感<sup>[31]</sup>。本研究条件下,As、Cd、Cr、Hg、Pb 胁迫对郑麦 9023、小偃 22 的穗长、株高、颖壳质量影响差异较大;如 As、Cd、Cr、Hg、Pb 胁迫对郑麦 9023 穗长表现为抑制效应;As、Cd、Cr 胁迫对小偃 22 的穗长表现为抑制效应,Hg、Pb 胁迫则表现为促进效应等。这些结论与前人的研究不完全一致,一方面可能与本研究设置的浓度有关;另一方面试验研究的水培、盆栽条件与大田之间的环境差异较大。与大田环境相比,水培、盆栽土壤缓冲能力和抗胁迫能力较小;而大田土壤条件则有较高的土壤库容、土壤微生物活性,对重金属胁迫的抵抗能力较强。小麦的生长是否受到抑制与重金属的种类、小麦品种等有很大关系,而且小麦基因型不同,对重金属的抗胁迫能力也存在较大的差异,特别表现在产量的差异上;说明在重金属污染土壤的修复过程中,可以筛选利用可胁迫能力强、吸收累积能力高的作物品种进行污染修复。同时也应注意重金属对人体的高危害性,合理处理富集作物。此外,本研究得出的土壤重金属产量阈值参照标准不同,As、Cd、Hg、Pb 的阈值是限制达到相应品种对照产量时土壤的含量值,当土壤重金属含量达到这一含量水平时,就会造成减产;而 Cr 则是作物没有收获产量时的土壤含量值。

本研究结果表明,在大田条件下,重金属对小麦生长因子的影响因小麦的品种和重金属种类及浓度的不同而不同,As、Cd、Cr、Hg、Pb 胁迫对郑麦 9023 穗长表现为抑制效应;As、Cd、Cr 胁迫对小偃 22 的穗长表现为抑制效应,Hg、Pb 胁迫则没有表现出抑制效应。As、Cd、Cr、Hg、Pb 胁迫对小偃 22 的株高均表现为抑制作用,抑制效应的大小依次为:Cr > Cd > Hg > As ≥ Pb。As、Hg 胁迫对郑麦 9023 的株高则表现为促进作用,Cd、Pb 胁迫则表现为“高促低抑”的特点,而 Cr 胁迫表现为“低促高抑”趋势。同时,Cr 胁迫对郑麦 9023 颖壳质量的影响效应最大,Cd 最小;对小偃 22 籽粒颖壳质量的影响效应最大

的是 Cr,其次是 As;重金属 Pb 对小麦籽粒颖壳质量表现为促进效应;而 Cd、Cr、As 胁迫,则表现为抑制效应。研究表明,As、Cd、Cr、Hg、Pb 5 种重金属胁迫下,只有重金属 Cr 胁迫显著( $P < 0.05$ )降低了 2 个小麦品种的籽粒产量,而 Cd、Hg、Pb、As 胁迫则没有表现出抑制现象。通过对重金属胁迫浓度与产量的拟合分析,得出 As、Cd、Cr、Hg、Pb 5 种重金属对郑麦 9023 的产量阈值分别为 53.42,1.31,749.73,7.43,555.57 mg/kg,小偃 22 的产量阈值分别为 42.58,1.80,828.18,10.30,437.01 mg/kg。表明郑麦 9023 抗 As、Pb 胁迫能力较强,而小偃 22 抗 Cd、Cr、Hg 胁迫的能力相对较强。

此外,由于本研究结论是在大田条件下进行,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] Lei L Q, Song C A, Xie X L, *et al.* Acid mine drainage and heavy metal contamination in groundwater of metal sulfide mine at arid territory (BS mine, Western Australia) [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China 2011, 20(8): 1488–1493.
- [2] Wu Y G, Xu Y P, Zhang J H, *et al.* Evaluation of ecological risk and primary empirical research on heavy metals in polluted soil over Xiaolinling gold mining region, Shaanxi, China [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China 2011, 20(4): 688–694.
- [3] 邢维芹, 冉永亮, 梁爽, 等. 施肥对土壤重金属的影响研究进展 [J]. 河南农业科学 2010(5): 129–133.
- [4] 何轶飞, 沈阿林. 施用污泥对小青菜产量及重金属镉、铬积累的影响 [J]. 河南农业科学 2009(10): 86–90.
- [5] 张从, 夏立江. 污染土壤生物修复技术 [M]. 北京: 中国环境科学出版社 2000: 1–2.
- [6] 韦朝阳, 陈同斌. 重金属超富集植物及植物修复技术研究进展 [J]. 生态学报 2001, 21(7): 1197–1203.
- [7] 张利红, 李培军, 李雪梅, 等. 镉胁迫对小麦幼苗生长及生理特性的影响 [J]. 生态学杂志 2005, 24(4): 458–460.
- [8] 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.
- [9] Abdolkarime M 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Laurent J L ,Casellas M G ,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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Chen W M ,Wu C H ,Euank James *et al.* Metal biosorption capability of *Cupriavidus Taiwanese's* and its effects on heavy metal removal by nodulated *Mimosa pudica* [J]. Journal of Hazardous Materials 2008 ,151( 2 – 3) : 364 – 371.
- [16] Kwon J S ,Yue 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.
- [17] Dai J ,Becque Thierry ,Rouillier James Henri *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.
- [18] 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.
- [19] 何俊瑜 ,任艳芳 ,王阳阳 ,等. 不同品种小麦种子萌发和幼苗生长对镉胁迫的响应 [J]. 麦类作物学报 , 2009 ,29( 6) : 1048 – 1054.
- [20] 王丽燕 ,郑世英. 镉、铅及其复合污染对小麦种子萌发的影响 [J]. 麦类作物学报 ,2009 ,29( 1) : 146 – 148.
- [21] 刘海军. 镉污染对小麦玉米生长及土壤酶活性的影响研究 [D]. 北京: 中国农业大学 ,2009.
- [22] 杜连彩. 铅处理对小麦种子萌发和幼苗生长的影响 [J]. 潍坊学院学报 2007 ,7( 4) : 87 – 89.
- [23] 邵 云 ,姜丽娜 ,李万昌 ,等. 砷、铅胁迫对小麦幼苗毒害效应及叶片下表皮扫描电镜观察 [J]. 西北农业学报 2009 ,18( 1) : 133 – 138.
- [24] 刘全吉 ,孙学成 ,胡承孝 ,等. 砷对小麦生长和光合作用特性的影响 [J]. 生态学报 ,2009 ,29( 2) : 854 – 859.
- [25] 李春喜 ,邵 云 ,李丹丹 ,等. 砷胁迫对小麦萌发过程中戊聚糖含量和木聚糖酶活性的影响 [J]. 麦类作物学报 2006 ,26( 6) : 108 – 114.
- [26] 王红旗 ,王 帅 ,宁少尉 ,等. 土壤铅 – 苯并[a]芘复合污染对小麦种子生长的影响研究 [J]. 环境科学 , 2011 ,32( 3) : 886 – 895.
- [27] 乔莎莎 ,张永清 ,杨丽雯 ,等. 有机肥对铅胁迫下小麦生长的影响 [J]. 应用生态学报 2011 ,22( 4) : 1094 – 1100.
- [28] 高大翔 ,刘惠芬 ,刘卉生 ,等. 汞胁迫对小麦种子萌发、幼苗生长及生理生化特性的影响 [J]. 农业环境科学学报 2005 ,24( S1) : 13 – 16.
- [29] 周 成. 铬( VI) 对小麦和玉米生长的影响 [J]. 滁州学院学报 2008 ,10( 3) : 87 – 89.
- [30] 张黛静 ,姜丽娜 ,邵 云 ,等. 铬胁迫下不同品种小麦萌发和内源激素的变化 [J]. 应用与环境生物学报 , 2009 ,15( 5) : 602 – 605.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 王树安. 作物栽培学 [M]. 北京: 中国农业出版社 , 1994: 89 – 96.