

# 不同种类重金属胁迫对两种小麦产量及构成因素的影响

聂胜委<sup>1,2</sup>, 黄绍敏<sup>1,2\*</sup>, 张水清<sup>1,2</sup>, 郭斗斗<sup>1,2</sup>, 张巧萍<sup>2</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, 郑州 450002; 2.河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所, 郑州 450002)

**摘要:**以当前农业研究的热点领域——重金属污染为切入点,研究了大田 Cd、Pb、As、Hg、Cr 5 种重金属胁迫对小麦(郑麦 9023、小偃 22)籽粒产量及构成因素的影响。结果表明重金属胁迫下,Cd、Pb、As、Hg、Cr 重金属对产量三要素中单位面积群体穗数的影响最大,其次为穗粒数,对千粒重的影响最小;单位面积群体穗数对重金属 Cr、Pb 最为敏感,在旱田偏碱性的土壤上,Cr、Pb 胁迫对小麦单位面积的群体穗数影响的临界含量分别约为  $187.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $175 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。对两个小麦品种的籽粒产量影响不同,郑麦 9023 籽粒产量依次为  $\text{Cr2} < \text{Cr1} < \text{CK} < \text{Cd2} < \text{Hg1} < \text{As2} < \text{As1} < \text{Hg2} < \text{Pb1} < \text{Cd1} < \text{Pb2}$ ; 小偃 22 籽粒产量依次为  $\text{Cr2} < \text{Cr1} < \text{CK} < \text{Hg1} < \text{As2} < \text{Hg2} < \text{Cd1} < \text{Cd2} < \text{Pb2} < \text{As1} < \text{Pb1}$ 。重金属 Cr 对小麦的产量表现为抑制效应,Cd、Hg、Pb、As 对小麦产量的影响表现为增产效应;不同种类重金属胁迫对小麦产量影响作用依次为  $\text{Hg} < \text{Cd} < \text{As} < \text{Pb} < \text{Cr}$ 。

**关键词:**重金属胁迫;小麦;产量;影响

中图分类号:X503.231 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2012)03-0455-09

## Effects of Varieties Heavy Metals Stress on Wheat Grain Yields of Two Genotypes and the Main Ingredients

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

(1.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.Institute of Plant Nutrient and Environmental Resources, Henan Academy of Agricultural Science, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** In this article, effects of 5 heavy metals (Cd, Pb, As, Hg, Cr) stress on wheat (Zhengmai9023, Xiaoyan22) yields and ingredient in farmlands were analyzed. The results showed that 5 heavy metals greatly influenced on spikes per hectare, then followed kernels per spikes and weight of 1 000 kernels; and spikes per hectare was sensitive to Cr and Pb, which the critical values of Cr and Pb to spikes per hectare were  $187.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $175 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , respectively, in glebe and alkaline soils. Furthermore, the grain yields of two wheat genotypes were also affected by Cd, Pb, As, Hg, and Cr compared with CK treatment; and the grain yield order of Zhengmai9023, Xiaoyan22 under 5 heavy metals stress were  $\text{Cr2} < \text{Cr1} < \text{CK} < \text{Cd2} < \text{Hg1} < \text{As2} < \text{As1} < \text{Hg2} < \text{Pb1} < \text{Cd1} < \text{Pb2}$  and  $\text{Cr2} < \text{Cr1} < \text{CK} < \text{Hg1} < \text{As2} < \text{Hg2} < \text{Cd1} < \text{Cd2} < \text{Pb2} < \text{As1} < \text{Pb1}$ , respectively. In addition, the results also indicated that the increasing trends of wheat under Cd, Pb, As, and Hg stress, and the decreasing trends of wheat under Cr stress. Finally, the order of 5 heavy metals effects on wheat is  $\text{Hg} < \text{Cd} < \text{As} < \text{Pb} < \text{Cr}$ .

**Keywords:** heavy mental stress; wheat; yields; effects

长期以来,我国农业生产上由于过分追求产量和高投入、高产出,在粮食丰收的同时也带来了不容

忽视的污染问题。由于冶炼废水<sup>[1-2]</sup>、污灌以及农药化肥<sup>[3-4]</sup>的过量施用和垃圾农用等人为因素导致我国区域农业环境恶化十分严重,尤其是重金属污染方面。据统计,1980 年全国工业“三废”污染农田面积 266.7 万  $\text{hm}^2$ ,1988 年增加到 666.7 万  $\text{hm}^2$ ,到 1992 年遭受不同程度污染的农田面积达 1 000 万  $\text{hm}^2$ <sup>[5]</sup>;目前,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。在一些重金属污染严重的地区,癌

收稿日期:2011-08-02

基金项目:中国科学院-河南省现代农业高产高效示范工程项目(CH2011);国家科技基础条件平台建设项目(SF2009-5);2009/2010 河南省-中国科学院省院合作项目(102106000034/092106000011)

作者简介:聂胜委(1979—),男,河南汝州人,博士,助理研究员,主要从事长期定位施肥、农田生态系统修复及循环农业等方面的研究。E-mail: nsw2007@cau.edu.cn

\* 通讯作者:黄绍敏

症发病率和死亡率明显高于无污染地区<sup>[7]</sup>。研究表明,农田重金属污染(Cd、As、Pb、Cr、Hg等)主要是由垃圾施用、农田污灌、施用有机肥、降水、施用农药和除草剂以及大气沉降等原因引起<sup>[8]</sup>。其中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,尤其是Cd、Pb、Hg、As及其复合物污染最为突出<sup>[9]</sup>。当前有关重金属的研究主要集中在重金属的修复治理<sup>[10-17]</sup>、污染修复的生理机制<sup>[18]</sup>以及污染的风险评价<sup>[19]</sup>等方面。

有关重金属胁迫对小麦的影响,相关研究认为重金属Cd<sup>[20-22]</sup>、Pb<sup>[23]</sup>、As<sup>[24-28]</sup>、Hg<sup>[29]</sup>、Cr<sup>[30-31]</sup>胁迫在较低浓度时对小麦的生长有一定促进作用,在高浓度下抑制种子的发芽势、发芽率、芽以及根的生长。在重金属Cd胁迫下,破坏小麦的光系统(PS II)<sup>[32]</sup>、抑制生长以及硝酸还原酶等相关酶类活性<sup>[33-34]</sup>。Hg胁迫使细胞的质膜透性增大、生长受阻,光合速率降低、根系活力降低以及脯氨酸和MDA含量升高<sup>[29]</sup>。Pb胁迫抑制小麦株高<sup>[35]</sup>、破坏幼苗膜系统、减少次生根数、降低根系活力以及SOD和POD活性<sup>[28]</sup>。As主要是毒害小麦根系生长,造成植株体光合作用气孔性限制和非气孔性限制,最终影响小麦的生长和发育<sup>[25]</sup>;在高浓度As胁迫下,小麦籽粒 $\alpha$ -淀粉酶活性和幼苗叶片叶绿素含量逐渐下降,叶片MDA含量、脯氨酸含量则有不同程度的升高;小麦叶片下表皮单位面积上的表皮毛数量增多,气孔密度增加,同时气孔开度变小<sup>[24]</sup>。

前人就重金属胁迫对小麦影响的研究,主要集中在对种子萌发、幼苗生长以及植株体内酶类、光合系统的影响等方面,而对小麦产量以及构成因素的研究则少有报道,且前人的研究大多在水培、盆栽的实验室条件下,这与大田实际土壤环境条件差异较大,因而在大田条件下研究Cd、Pb、As、Hg、Cr 5种重金属不

同浓度胁迫对小麦产量以及构成因素的影响,就显得非常有实际意义,将为开展重金属污染条件下的食品安全、污染修复等相关研究提供借鉴和帮助。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验地位于黄淮海平原腹地河南省农业科学院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),气候类型为暖温带季风气候,四季分明,7月最热,平均27.3℃;1月最冷,平均0.2℃,年平均气温14.4℃,>10℃积温约5 169℃。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 8.56,土壤有机质(SOM)7.0 g·kg<sup>-1</sup>,土壤碱解氮(Alkali-hydrolysable Nitrogen)70.6 mg·kg<sup>-1</sup>,有效磷(Olsen-P)12.0 mg·kg<sup>-1</sup>,有效钾(K)123.2 mg·kg<sup>-1</sup>。

### 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0、1、2三个浓度梯度。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;最后在回填相应的小区内,压实后老化30 d左右,以保证重金属与土壤的充分融合。

试验选用的小麦品种为郑麦9023(西农881×陕213)、小偃22[(小偃6号×775-1)×小偃107],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 kg·hm<sup>-2</sup>;氮肥为尿素[CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>],施纯氮165 kg·hm<sup>-2</sup>,底

表1 不同重金属水平下各处理添加剂量浓度设置

Table 1 Applied dose levels of different heavy metals

重金属 Heavy metals	添加倍数(0)	重金属添加剂量/ mg·kg <sup>-1</sup>	添加倍数(1)	重金属添加剂量/ mg·kg <sup>-1</sup>	添加倍数(2)	重金属添加剂量/ mg·kg <sup>-1</sup>	土壤背景Ⅱ级标准/ mg·kg <sup>-1</sup>
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[GB 5-18-1996,土壤环境质量标准]。

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

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 kg·hm<sup>-2</sup>;钾肥为硫酸钾(K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>),施钾肥(K<sub>2</sub>O)75 kg·hm<sup>-2</sup>,磷、钾肥作底肥一次施入。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。

### 1.3 指标的测定及分析方法

在小麦的成熟期,各个小区实收计算地上部生物量、根干重、单位面积群体数和产量;穗粒数、千粒重等指标采用 1.5 m 单行连续取 20 株测定<sup>[36-37]</sup>。文中数据用 Excel 2003、DPS 7.5 等数据处理软件进行整理、方差分析和相关性分析。

## 2 结果与分析

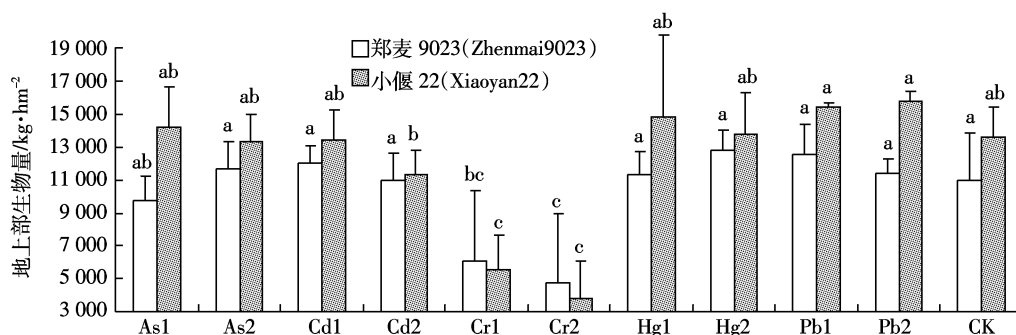
### 2.1 不同重金属浓度对小麦总生物量的影响

由图 1 可以看出,不同重金属以及同一重金属不同浓度处理对两个小麦品种的地上部生物量影响不同。郑麦 9023 与对照相比,重金属 Cr 处理显著( $P \leq 0.05$ )降低了地上部的生物量,而且高浓度(Cr2)时的抑制作用更为明显;重金属 Cd、Hg、Pb 处理则能不同程度地增加地上部生物量,其中 Cd、Hg 胁迫分别在高浓度时的促进效应大于低浓度,而 Pb 胁迫条件下则相反,随着浓度的升高促进效应反而降低;As 处理在低浓度时起抑制作用,高浓度时表现为促进作用。小偃 22 与对照相比,重金属 Cr、Cd 处理降低了地上部生物量,其中 Cr 处理达到显著( $P \leq 0.05$ )水平,而且 Cr、Cd 胁迫分别在高浓度时的抑制效应大于低浓度;重金属 Hg、Pb 胁迫均增加了地上部生物量,但是 Hg 处理随着浓度的增加促进效应逐渐减小,而 Pb 处理则相反;As 处理在低浓度下起促进作用,高浓度下表现为抑制作用。

### 2.2 不同重金属浓度对小麦籽粒产量及产量三要素的影响

由表 2 可以看出,不同重金属胁迫对小麦籽粒产量以及产量三要素均产生了一定的影响。从产量上看,Cr 处理的两个小麦品种籽粒产量与对照相比显著( $P \leq 0.05$ )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( $P \leq 0.05$ )高于对照,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(表 2)。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 的籽粒产量大小为 Cr2<Cr1<CK<Hg1<As2<Hg2<Cd1<Cd2<Pb2<As1<Pb1。

小麦产量主要由单位面积群体穗数、穗粒数、千粒重 3 个要素决定;重金属胁迫下,小麦产量构成的 3 要素也受到不同程度的影响。由表 2 可以看出,两个小麦品种的单位面积群体穗数受到的影响最大,与对照相比,Cr、Pb 胁迫达到了显著( $P \leq 0.05$ )或极显著( $P \leq 0.01$ )的差异水平;而穗粒数(Cr1 处理除外)、千粒重受到的影响较小,重金属各处理与对照相比差异不明显。重金属对产量三要素影响大小依次为单位面积群体数>穗粒数>千粒重。重金属的化学特性不同,在大田条件下对小麦产量效应的影响大小也不尽相同。由表 3 可以看出,5 种不同化学特性的重金属胁迫对小麦产量的影响有一定的差异,其中 Cr 对小麦的产量表现为抑制效应,Cd、Hg、Pb、As 对小麦产量的影响表现为增产效应。不同种类重金属处理下小麦的产量大小依次为 Cr<Hg<Cd<As<Pb,不同种类重金属胁迫对小麦产量的影响依次为 Hg<Cd<As<



图中字母小、大写分别代表  $P \leq 0.05$ ,  $P \leq 0.01$  的显著水平,下同

Uppercase and lowercase letters means significant levels at  $P \leq 0.05$  and  $P \leq 0.01$ , respectively

表 2 不同种类重金属胁迫下小麦产量及对产量三要素的影响  
Table 2 Effect of 5 varieties heavy metals on wheat productivity and the main gradients

处理 Treatments	产量/kg·hm <sup>-2</sup> Grain yields		单位面积群体数/万穗·hm <sup>-2</sup> Spikes/Hectare		穗粒数/粒·穗 <sup>-1</sup> Kernels/Spikes		千粒重/g 1 000 kernels weight	
	郑麦 9023 Zhengmai9023	小偃 22 Xiaoyan22	郑麦 9023 Zhengmai9023	小偃 22 Xiaoyan22	郑麦 9023 Zhengmai9023	小偃 22 Xiaoyan22	郑麦 9023 Zhengmai9023	小偃 22 Xiaoyan22
As1	6 131.9abA	8 226.3aA	435.3abAB	479.6aAB	27.3bB	37.1abA	52.3aA	46.0aA
As2	6 065.3abA	7 448.1aAB	411.8abcAB	410.6abABC	30.1bAB	37.9abA	49.0aA	48.0aA
Cd1	6 612.2aA	7 692.7aAB	440.7abAB	467.11aAB	28.9bB	36.8abA	51.8aA	45.0aA
Cd2	5 714.1abA	7 692.7aAB	394.8bcAB	477.97aAB	27.2bB	35.8bA	53.6aA	45.1aA
Cr1	3 935.3cBC	5 633.9bcBC	217.3dD	322.6bcBC	35.8aA	40.3abA	53.3aA	44.2aA
Cr2	3 566.2cC	4 642.3cC	250.3dCD	256.3cC	28.0bB	41.8aA	51.3aA	44.7aA
Hg1	5 914.1abA	7 283.6abAB	396.7abcAB	397.9abABC	27.6bB	40.9abA	54.1aA	46.4aA
Hg2	6 327.6abA	7 608.3aAB	413.2abcAB	452.3aAB	30.9bAB	38.0abA	49.6aA	44.6aA
Pb1	6 545.5abA	8 466.5aA	475.8aA	511.3aA	27.4bB	35.2bA	50.6aA	47.2aA
Pb2	6 643.3aA	7 932.9aAB	440.5abAB	442.4abAB	28.9bB	39.9abA	52.2aA	44.9aA
CK	5 313.8bAB	6 870.1abABC	346.1cBC	410.6abABC	30.4bAB	37.4abA	51.0aA	45.0aA

注:表中字母小、大写分别代表  $P\leq 0.05$ 、 $P\leq 0.01$  的显著水平。  
Notes: uppercase and lowercase letters means significant levels at  $P\leq 0.05$  and  $P\leq 0.01$ , respectively.

表 3 不同种类重金属胁迫下小麦产量的对比(kg·hm<sup>-2</sup>)  
Table 3 Wheat grain yields under varieties heavy metal stress(kg·hm<sup>-2</sup>)

重金属 Heavy metal	郑麦 9023 Zhengmai9023	增/减(+/-)	小偃 22 Xiaoyan22	增/减(+/-)	平均产量 Average yields	增/减(+/-)
As	6 098.6	784.8	7 837.3	967.2	6 967.9	876.0
Cd	6 163.1	849.3	7 692.7	822.6	6 927.9	836.0
Cr	3 750.8	-1 563.0	5 138.1	-1 732.0	4 444.4	-1 647.5
Hg	6 120.8	807.0	7 445.9	575.8	6 783.4	691.5
Pb	6 594.4	1 280.6	8 199.7	1 329.6	7 397.0	1 305.1
CK	5 313.8	0	6 870.1	0	6 091.9	0

Pb<Cr。两个小麦品种对不同重金属的敏感程度也有所差异,与郑麦 9023 相比,小偃 22 对重金属 Pb、Cr、As 的反应更为敏感,对重金属 Cd、Hg 的反应较为迟钝(表 3)。

单位面积群体穗数对重金属 Cr、Pb 胁迫的反应比较敏感,与对照相比,土壤中 Cr[CrCl<sub>3</sub>(Ⅲ)]含量达到 187.5 mg·kg<sup>-1</sup> 时,能够极显著( $P\leq 0.01$ )降低郑麦 9023 的单位面积群体穗数;小偃 22 的抗铬胁迫能力稍强一点,当 Cr(CrCl<sub>3</sub>)含量达到 250 mg·kg<sup>-1</sup> 时,才达到显著( $P\leq 0.05$ )水平(表 1,表 2)。当土壤中 Pb(PbNO<sub>3</sub>)含量为 175 mg·kg<sup>-1</sup> 时,与对照相比,Pb 胁迫能够极显著( $P\leq 0.01$ )增加郑麦 9023 的单位面积群体数;在此含量下以及含量增大 1 倍[土壤中 Pb(PbNO<sub>3</sub>)含量达到 350 mg·kg<sup>-1</sup>]时,虽然也能提高小偃 22 的单位面积群体数,但均没有达到显著水平。当土壤中 Cd(CdSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O)含量在 0.60 mg·kg<sup>-1</sup> 水平时,与对照相

比,能够显著( $P\leq 0.05$ )增加郑麦 9023 的单位面积群体数,当含量增大到 1.20 mg·kg<sup>-1</sup> 水平时,虽表现出一定的增加效应,但是与对照并没有显著差异。同样当土壤中 As(Na<sub>3</sub>AsO<sub>4</sub>)含量在 18.75 mg·kg<sup>-1</sup> 水平时,与对照相比,能够显著( $P\leq 0.05$ )增加郑麦 9023 的单位面积群体数,当含量增大到 37.50 mg·kg<sup>-1</sup> 水平时,单位面积群体数与对照相比已无显著差异。在本研究条件下,Hg 胁迫对郑麦 9023 以及 Cd、As、Hg 胁迫对小偃 22 虽能增加单位面积群体数,但是与相应的对照比较,均没有达到显著水平。

本研究的结论是在土壤 pH $\geq 7.5$  的土壤背景值Ⅱ水平下确定的,因此对旱地偏碱性的土壤 Cr 的含量为 187.5 mg·kg<sup>-1</sup> 时,已经对小麦的单位面积群体数产生了较强的抑制作用;当土壤 Pb(PbNO<sub>3</sub>)含量为 175 mg·kg<sup>-1</sup> 时,对小麦的单位面积群体穗数的增加效应最大。同样,对小麦的单位面积群体穗数的增



加效应中,土壤中 Cd( $\text{CdSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ )含量临界水平应在  $0.60 \sim 1.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  之间,土壤中 As( $\text{Na}_3\text{AsO}_4$ )在  $18.75 \sim 37.50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  之间。

### 2.3 不同重金属浓度对地下部根干重的影响

不同重金属处理对地下部根干重的影响,与对照相比,重金属 Cr 明显抑制( $P \leq 0.05$ )郑麦 9023 地下部根的生长,随着浓度的升高抑制作用加强;而 Cd、Pb、As、Hg 重金属胁迫则能够促进地下部根的生长,各处理在低浓度时的促进作用均大于在高浓度时的促进作用(图 2)。各处理地下部根干重大小依次为  $\text{Cr}_2 < \text{Cr}_1 < \text{CK} < \text{Cd}_2 < \text{Pb}_2 < \text{Cd}_1 < \text{Hg}_2 < \text{Hg}_1 < \text{Pb}_1 < \text{As}_2 < \text{As}_1$ 。各处理对小偃 22 地下部根的生长几乎均表现为抑制作用(Hg1 除外),其中 Cr、Cd、As 处理均在高浓度时的抑制作用大于低浓度时的抑制作用,而 Pb 处理则相反;重金属 Hg 处理在高浓度时表现为抑制作用,在低浓度时表现为促进作用。各处理地下部根干重大小依次为  $\text{Cr}_2 < \text{Cr}_1 < \text{Cd}_2 < \text{Cd}_1 < \text{As}_2 < \text{Hg}_2 < \text{Pb}_1 < \text{As}_1 < \text{Pb}_2 < \text{CK} < \text{Hg}_1$ 。

### 2.4 不同重金属处理对小麦产量构成因素的相关性分析

不同重金属处理影响到小麦地上部生物量、单位面积群体数、千粒重等指标,最终对籽粒的产量也起到了较大的影响,说明在重金属胁迫下对小麦产量各构成因素之间的相关性产生了一定的影响。

由表 4 可以看出,对照处理小麦各个性状之间的相关性较强,产量与根干重( $r=0.80, P<0.05$ )、穗粒数( $r=0.83, P<0.05$ )、单位面积群体数( $r=0.84, P<0.05$ )、地上部生物量与根干重( $r=0.85, P<0.05$ )、单位面积群体穗数( $r=0.82, P<0.05$ )、根干重与单位面积群体穗数( $r=0.88, P<0.01$ )等均表现出较强的正相关关系;而千粒重与地上部生物量( $r=-0.81, P<0.05$ )、根干重( $r=-0.80, P<0.05$ )、穗粒数( $r=-0.76, P<0.05$ )、产量

( $r=-0.95, P<0.01$ )、单位面积群体穗数( $r=-0.88, P<0.01$ )均表现为较强的负相关关系。

Cr 胁迫下,仅有地上部生物量与根干重( $r=0.94, P<0.01$ ),产量与单位面积群体数( $r=0.91, P<0.01$ )之间表现出极显著的正相关性,其他产量构成因子之间则没有明显的相关性。As 胁迫下,产量与穗粒数( $r=0.80, P<0.01$ )、单位面积群体数( $r=0.68, P<0.05$ )以及穗粒数与地上部生物量( $r=0.62, P<0.05$ )之间表现为显著的正相关性;而千粒重与穗粒数则表现为极显著( $r=-0.71, P<0.01$ )的负相关性。Cd 胁迫下,产量与穗粒数( $r=0.85, P<0.01$ )、单位面积群体穗数( $r=0.79, P<0.01$ ),地上部生物量与根干重( $r=0.59, P<0.05$ )之间表现出正的相关性,而千粒重与穗粒数( $r=-0.79, P<0.01$ )、产量( $r=-0.67, P<0.05$ )、单位面积群体数( $r=-0.71, P<0.01$ )之间表现出负的相关性。Hg 胁迫下,地上部生物量与根干重( $r=0.87, P<0.01$ )、穗粒数( $r=0.66, P<0.05$ ),单位面积群体穗数与产量( $r=0.80, P<0.01$ )之间表现为较强的正相关性,而千粒重与穗粒数( $r=-0.80, P<0.01$ )、产量( $r=-0.71, P<0.01$ )之间存在极显著的负相关性。Pb 胁迫下,产量与地上部生物量( $r=0.70, P<0.01$ )、穗粒数( $r=0.76, P<0.01$ )、单位面积群体穗数( $r=0.58, P<0.01$ ),小麦群体中地上部生物量与根干重( $r=0.81, P<0.01$ )、穗粒数( $r=0.76, P<0.01$ ),穗粒数与根干重( $r=0.66, P<0.05$ )之间表现出较强的正相关性;而千粒重与地上部生物量( $r=-0.58, P<0.05$ )、根干重( $r=-0.55, P<0.05$ )、穗粒数( $r=-0.82, P<0.01$ )、产量( $r=-0.70, P<0.01$ )之间则表现为显著的负相关性(表 4)。与对照相比,重金属 Cd、Pb、As、Hg 胁迫能够有效降低产量各因子之间的负相关性,提高群体对产量的贡献;而重金属 Cr 胁迫则降低了产量相关因子的相关性,进而降低了籽粒的产量。

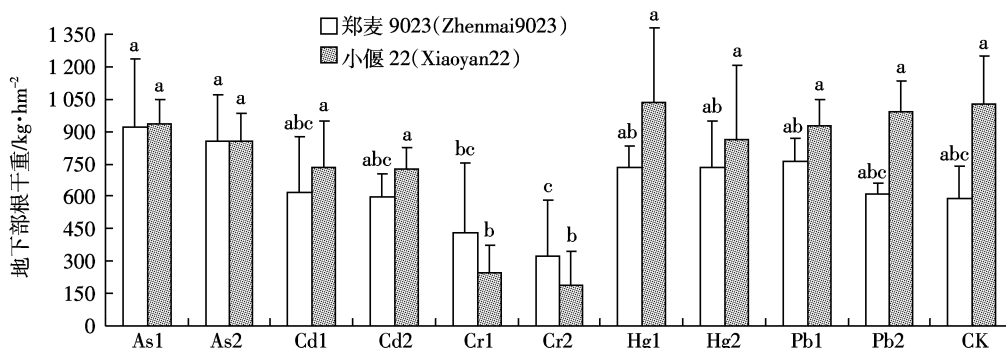


图 2 不同重金属浓度对地下部根干重的影响  
Figure 2 Effects of varieties heavy metals on root dry weight

表 4 不同重金属胁迫下小麦主要产量构成指标的相关性分析

Table 4 Coefficient analysis of wheat yield gradients under varieties heavy metal stress

重金属 Heavy metal	相关系数 Coefficient( <i>r</i> )	DB	RW	SP	YH	TW	NS
As	DB	1					
	RW	0.37	1				
	SP	0.62*	0.23	1			
	YH	0.55	0.24	0.80**	1		
	TW	-0.35	-0.11	-0.71**	-0.45	1	
	NS	0.13	0.05	0.18	0.68*	-0.20	1
Cd	DB	1					
	RW	0.59*	1				
	SP	0.39	0.37	1			
	YH	0.46	0.44	0.85**	1		
	TW	-0.25	-0.11	-0.79**	-0.67*	1	
	NS	0.30	0.19	0.50	0.79**	-0.71**	1
Cr	DB	1					
	RW	0.94**	1				
	SP	-0.25	-0.37	1			
	YH	0.52	0.28	0.10	1		
	TW	0.22	0.50	-0.44	-0.55	1	
	NS	0.50	0.30	-0.26	0.91**	-0.50	1
Hg	DB	1					
	RW	0.87**	1				
	SP	0.66*	0.49	1			
	YH	-0.05	-0.14	0.35	1		
	TW	-0.46	-0.27	-0.80**	-0.71**	1	
	NS	-0.37	-0.37	-0.27	0.80**	-0.28	1
Pb	DB	1					
	RW	0.81**	1				
	SP	0.76**	0.66*	1			
	YH	0.70**	0.47	0.76**	1		
	TW	-0.58*	-0.55*	-0.82**	-0.70**	1	
	NS	0.15	-0.02	-0.01	0.58*	-0.34	1
CK	DB	1					
	RW	0.85*	1				
	SP	0.36	0.47	1			
	YH	0.65	0.80*	0.83*	1		
	TW	-0.81*	-0.80*	-0.76*	-0.95**	1	
	NS	0.82*	0.88**	0.42	0.84*	-0.88**	1

注: \*、\*\* 分别代表  $P<0.05$ 、 $P<0.01$  的显著水平; DB、RW、SP、YH、TW、NS 分别代表地上部生物量、根干重、穗粒数、产量、千粒重、单位面积群体穗数。

Note: \* and \*\* asterisk means significant levels at  $P\leq 0.05$  and  $P\leq 0.01$ , respectively. DB, RW, SP, YH, TW, NS indicates the upper biomass, dry weight of root, kernels/ spikes, grain yields, 1 000 kernels weight, and spikes per hectare, respectively.

3 讨论

研究表明, 重金属 Cd<sup>[2-21]</sup>、Pb<sup>[23]</sup>、As<sup>[24-28]</sup>、Hg<sup>[29]</sup>来看, 5 种重金属几乎均表现出在低浓度时产量效应小、高浓度时产量效应大的特点; 除重金属 Cr 处理的

作用, 而在高浓度下能够抑制种子的发芽势、发芽率以及芽和根的生长。本研究从重金属胁迫的产量效应

产量降低、单位面积群体减少外,其他重金属 Cd、Pb、As、Hg 处理均表现为增产效应,单位面积群体数增加。这与前人在水培、盆栽条件下的研究结论有所差异,单位面积群体数增加、产量提高说明群体从幼苗、拔节、灌浆到成熟各个阶段,Cd、Pb、As、Hg 4 种重金属对小麦的生长表现为促进作用。

籽粒中干物质积累既离不开叶片的光合作用,同时与地下部根系对矿质养分的吸收以及在植株体内的运输密切相连。Cd、Pb、As、Hg 胁迫下单位面积群体数增加、籽粒产量的增加说明重金属胁迫对叶片的光合作用、根系吸收能力以及植株体内运输组织等器官的功能影响较小,最终导致产量的增加。而前人研究认为,在 Cd 毒下小麦叶片光系统(PS II)明显受损<sup>[32]</sup>;植株的生长、叶绿素合成及硝酸还原酶活性受到抑制<sup>[33]</sup>。Cd<sup>2+</sup>胁迫使植株体内 O<sub>2</sub><sup>-</sup>·、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 和 MDA 含量增加,且生育前期的增长量明显大于后期<sup>[34]</sup>。高 Hg 浓度胁迫下,幼苗叶片内的叶绿素含量、根系活力显著下降,叶片净光合速率和单株生物量显著降低,植株生长受到极大抑制<sup>[29]</sup>。而 Pb 对小麦的株高有一定的抑制作用<sup>[31]</sup>,在 Pb 胁迫下小麦均表现出株高下降,次生根数减少,总根质量下降,总根长缩短,根系活力和吸收面积降低<sup>[28]</sup>。在高浓度 As 胁迫下,小麦籽粒 α-淀粉酶活性和幼苗叶片叶绿素含量逐渐下降<sup>[24]</sup>,而且 As 主要是毒害小麦根系生长,造成植株体光合作用的气孔性限制和非气孔性限制出现,最终影响小麦的生长和发育<sup>[25]</sup>。本研究与前人上述研究结论的差异,可能是由于大田土壤条件与水培、盆栽条件的环境差异较大引起的。水培、盆栽条件下,作物生长的环境自身调节能力较小,土壤微生物、酶类以及作物根系分泌物对环境重金属抗胁迫调节能力极大降低,在高浓度胁迫下容易引起胁迫反应,如芽、根生长受抑制、光合系统破坏、质膜透性破坏等,而在低浓度下的胁迫反应则较小,说明重金属胁迫没有超过环境的自身调节水平,所以调节能力较差。

研究报道铅锌重金属复合污染对土壤微生物数量有较大的影响,随着重金属污染程度的加剧,土壤微生物的总数下降,重金属含量与细菌数量、放线菌数量、真菌数量呈较强的负相关<sup>[38]</sup>;小麦植株中 Cr 含量较多的部位为根,而籽粒中含量较低<sup>[39]</sup>,小麦吸收 Pb 主要集中于根部,而且主要分布在根部的细胞壁与残渣态;从形态来看,主要集中在活性较低的醋酸态、盐酸态和氯化钠态<sup>[40]</sup>。这进一步印证了大田土壤环境与水培、盆栽等小环境抗胁迫能力的差异。由本

研究的主要结论可以推断出大田环境对重金属胁迫下环境的抗胁迫能力极大地增强,大田土壤环境中微生物种类和数量、根系分泌物的种类和数量、酶的种类和数量是水培条件、盆栽条件无法相比的,这就造成了在微型小环境下研究结论的局限性和片面性。重金属胁迫在低浓度促进生长与高浓度抑制生长正好反映出研究环境大、小的重要性。

#### 4 结 论

研究表明,重金属 Cd、Pb、As、Hg、Cr 对产量三要素中单位面积群体穗数的影响最大,其次为穗粒数,对千粒重的影响最小。Cd、Pb、As、Hg、Cr 不同浓度下郑麦 9023 的籽粒产量依次为 Cr2<Cr1<CK<Cd2<Hg1<As2<As1<Hg2<Pb1<Cd1<Pb2;小偃 22 的籽粒产量依次为 Cr2<Cr1<CK<Hg1<As2<Hg2<Cd1<Cd2<Pb2<As1<Pb1。重金属 Cr 对小麦的产量表现为抑制效应,Cd、Hg、Pb、As 对小麦产量的影响表现为增产效应。不同种类重金属处理下小麦产量的大小依次为 Cr<Hg<Cd<As<Pb,不同种类重金属胁迫对小麦产量的影响依次为 Hg<Cd<As<Pb<Cr。同时两个小麦品种对不同重金属的敏感程度也有所差异,与郑麦9023相比,小偃 22 对重金属 Pb、Cr、As 的反应更为敏感些,对重金属 Cd、Hg 的反应则相反。

研究表明,重金属 Cr 胁迫能显著( $P \leq 0.05$ )降低郑麦 9023 地上部的生物量,而且高浓度(Cr2)时的抑制作用更为明显;重金属 Cd、Hg、Pb 处理则能不同程度的增加地上部生物量;As 处理在低浓度时起抑制作用,高浓度时表现为促进作用。重金属 Cr、Cd 胁迫能降低小偃 22 地上部生物量,其中 Cr 处理达到显著( $P \leq 0.05$ )水平;重金属 Hg、Pb 胁迫均增加了地上部生物量;As 处理在低浓度下起促进作用,高浓度下表现为抑制作用。同时,重金属 Cr 明显抑制( $P \leq 0.05$ )郑麦 9023 地下部根的生长,随着浓度的升高抑制作用加强;而 Cd、Pb、As、Hg 胁迫则能够促进地下部根的生长。Cr、Cd、Pb、As、Hg 胁迫对小偃 22 地下部根的生长几乎均表现为抑制作用(Hg1 除外),其中 Hg 处理在高浓度时表现为抑制作用,在低浓度时表现为促进作用。

研究表明,重金属 Cd、Pb、As、Hg 胁迫能够有效降低产量各因子之间的负相关性,提高群体对产量的贡献;而重金属 Cr 胁迫则降低了产量相关因子的相关性,进而降低了籽粒的产量。在本研究条件下,旱田偏碱性的土壤上 Cr、Pb 胁迫对小麦单位面积的群体

穗数影响的临界含量分别约为 187.5、175  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; 土壤中 Cd、As 胁迫的临界含量分别在 0.60~1.20  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和 18.75~37.50  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间(由于本研究未考虑大气沉降等因素,实际的临界含量值应有所偏大)。

#### 参考文献:

- LEI Liang-qi, SONG Ci-an, XIE Xiang-li, 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.
- WU Yao-guo, XU You-ning, ZHANG Jiang-hua, 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.
- NIE S W, GAO W S, CHEN Y Q, et al. Review of current status and research approaches for nitrogen pollution in farmlands [J]. *Agricultural Sciences in China*, 2009, 8(7):843-849.
- 聂胜委, 陈源泉, 高旺盛, 等. 玉米与不同植物间作对环境的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(10):2204-2210.
- NIE Sheng-wei, CHEN Yuan-quan, GAO Wang-sheng, et al. Environmental impacts of maize intercropping with different cover crops [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(10):2204-2210.
- 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.
- ZHANG Cong, XIA Li-jiang. Bioremediation on pollutant soil [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2000: 1-2.
- 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.
- WEI Chao-yang, CHEN Tong-bin. Hyper-accumulators and phyto-remediation of heavy metal contaminated soil: A review of studies in China and abroad[J]. *Acta Ecological Sinica*, 2001, 21(7):1197-1203.
- 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]. 生态学报, 2005, 24(4):458-460.
- ZHANG Li-hong, LI Pei-jun, LI Xue-mei, et al. Effect of cadmium stress on the growth and physiological characteristics of wheat seedlings [J]. *Chinese Journal of Ecological*, 2005, 24(4):458-460.
- 胡永定. 荆马河区土壤重金属污染的成因分析[J]. 江苏环境科技, 1994(1):9-12.
- HU Yong-ding. The reasons of heavy metal pollution in soil in Jingmahe region [J]. *Journal of Jiangsu Environment, Science and Technology*, 1994(1):9-12.
- 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.
- SUN Bo, ZHOU Sheng-lu, ZHAO Qi-guo. Combined Pollution of heavy metal in soil based on spatial variation analysis [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(2):248-251.
- Abdolkarim Chehregani, Mitra Noori, Hossein Lari Yazdi. 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.
- 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.
- LI Guo-liang, ZHAO Zong-shan, LIU Ji-yan, 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.
- Julien Laurent, Magali Casellas, Christophe Dagot. Heavy metals uptake by sonicated activated sludge: Relation with floc surface properties [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 162(2-3):652-660.
- YANG Xiao-e, FENG Ying, HE Zhen-li, 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.
- WEI Bing-gan, YANG Lin-sheng. 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.
- CHEN Wen-ming, WU Chi-hui, EUAN K James, 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.
- KWON Jang-Soon, YUN Seong-Taek, LEE Jong-Hwa, 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.
- DAI Jun, Becquer Thierry, Rouiller 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.
- 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.
- 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.
- HE Jun-yu, REN Yan-fang, WANG Yang-yang, et al. Response to cadmium stress at seed germination and seedling growth of different wheat varieties [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2009, 29(6):1048-1054.
- 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.
- WANG Li-yan, ZHENG Shi-ying. Effect of cadmium, lead and their combined pollution on seed germination of wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2009, 29(1):146-148.
- 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: 中国农业大学硕士学位论文, 2009.
- LIU Hai-jun. Effects of cadmium contamination on the activity of soil enzyme and the growth of wheat and maize [D]. Beijing: China Agricultural University, thesis, 2009.
- 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.
- LIU Liang-cai. Effect of Pb on the germination and seedling growth of wheat seeds [J]. *Journal of Welfang University*, 2007, 7(4):87-89.



- [24] 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.  
SHAO Yun, JIANG Li-na, LI Wan-chang, et al. Toxic effects of As and Pb to wheat seedling and scanning electron-microscopic observation on nether epidermis of leaves[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2009,18(1):133-138.
- [25] 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.  
LIU Quan-ji, SUN Xue-cheng, HU Cheng-xiao, et al. Growth and photosynthesis characteristics of wheat (*Triticum aestivum* L.) under arsenic stress condition[J]. *Acta Ecological Sinica*, 2009, 29(2):854-859.
- [26] 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.  
LI Chun-xi, SHAO Yun, LI Dan-dan, et al. Effect of As stress on pentosan content and xylanase activity during seed germination of wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2006, 26(6):108-114.
- [27] 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.  
WANG Hong-qi, WANG Shuai, NING Shao-wei, et al. Effects of combined pollution of lead and benzo[a] pyrene on seed growth of wheat in soils[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(3):886-895.
- [28] 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.  
QIAO Sha-sha, ZHANG Yong-qing, YANG Li-wen, et al. Effects of organic manure on wheat growth under lead stress[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(4): 1094-1100.
- [29] 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(1):13-16.  
GAO Da-xiang, LIU Hui-fen, LIU Hui-sheng, et al. Effects of Hg on seed germination, seedling development and physiological and biochemical characteristics of wheat[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005,24:13-16.
- [30] 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.  
ZHOU Cheng. Effects of Cr stress on wheat and maize growth[J]. *Journal of Chuzhou University*, 2008, 10(3):87-89.
- [31] 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.  
ZHANG Dai-jing, JIANG Li-na, SHAO Yun, et al. Variations in germination and endogenous hormone contents of wheat cultivars under Cr stress[J]. *Chinese Journal of Applied Environmental Biology*, 2009, 15(5): 602-605.
- [32] 慈敦伟,姜东,戴廷波,等. 镉毒害对小麦幼苗光合及叶绿素荧光特性的影响[J]. 麦类作物学报,2005,25(5):88-91.  
CI Dun-wei, JIANG Dong, DAI Ting-bo, et al. Effect of Cd toxicity on photosynthesis and chlorophyll fluorescence of wheat seedling[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2005, 25(5):88-91.
- [33] 王云,陈尧,钱亚如,等. 镉胁迫对不同品种小麦幼苗生长和生理特性的影响[J]. 生态学杂志,2008,27(5):767-770.  
WANG Yun, CHEN Yao, QIAN Ya-ru, et al. Effects of cadmium stress on the seedlings growth and physiological characteristics of different wheat cultivars[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(5):767-770.
- [34] 黎晓红,兰利琼,吴巧玉,等. 镉胁迫对小麦不同生育期活性氧代谢的影响[J]. 四川大学学报, 2007, 44(2):420-424.  
LI Xiao-hong, LAN Li-qiong, WU Qiao-yu, et al. Effects of cadmium stress on reactive oxygen metabolism in wheat at different developmental stages[J]. *Journal of Sichuan University*, 2007,44(2):420-424.
- [35] 杨生龙,康建宏,吴宏亮. 铅胁迫对小麦生长发育的影响[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(36):20576-20578.  
YANG Sheng-long, KANG Jian-hong, WU Hong-liang. The impact of lead stress on growth and development of two varieties of wheat[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(36): 20576-20578.
- [36] 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.  
Institute of Maize, Academy of Shandong Agricultural Sciences. Physiological characteristics of Maize[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1987: 50-62.
- [37] 王树安. 作物栽培学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1994: 89-96.  
WANG Shu-an. Crop cultivation[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1994:89-96.
- [38] 李小林,颜森,张小平,等. 铅锌矿区重金属污染对微生物数量及放线菌群落结构的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(3): 468-475.  
LI Xiao-lin, YAN Sen, ZHANG Xiao-ping, et al. Response of microbe quantity and actinomycetes community of heavy metal contaminated soils in lead-zinc mine[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011 30(3): 468-475.
- [39] 张黛静,邵云,柴宝玲,等. 小麦植株对重金属铬吸收累积的研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(2): 311-315.  
ZHANG Dai-jing, SHAO Yun, CHAI Bao-ling, et al. Uptake and accumulation of chromium in wheat[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(2):311-315.
- [40] 孙贤斌,李玉成,王宁. 铅在小麦和玉米中活性形态和分布的比较研究[J]. 农业环境科学学报, 2005,24(4):666-669.  
SUN Xian-bin, LI Yu-cheng, WANG Ning. Comparisons on active chemical form and distribution of lead in wheat and corn[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(4):666-669.