

小麦不同生育时期 Cd、Cr、Pb 污染监测指标体系

杜天庆¹, 杨锦忠^{2,*}, 郝建平¹, 崔福柱¹

(1. 山西农业大学, 山西太谷 030801; 2. 青岛农业大学, 山东青岛 266109)

摘要: 以小麦为供试材料, 分别采用发芽试验、溶液培养、土柱栽培等毒理试验方法, 研究了小麦萌芽期、幼苗期及成株期受重金属污染毒害的指标体系。结果表明, ① 小麦根伸长抑制率可作为萌芽期重金属污染评价的一项生物指标; Cd、Cr、Pb 对小麦根生长的 7d 半效应浓度 (EC_{50}) 值分别为 1.39 、 0.20 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 2.75 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 据此得到 3 种重金属对小麦同一性状的毒性次序为 $\text{Cr} > \text{Cd} > \text{Pb}$; 此外各性状抑制率与胁迫浓度的关系可用双曲线模型 $y = x/(a + x/100)$ 或指数曲线模型 $y = a(1 - \exp(-bx))$ 较好模拟。② Cd、Cr、Pb 单一污染胁迫对小麦幼苗性状的毒性次序均以影响叶面积和冠部干重为主, 表明叶面积和冠部干重为幼苗期污染监测的敏感指标; 重金属对除根干重外所有性状的毒性次序: $\text{Cr} > \text{Cd} > \text{Pb}$, 该毒性次序是根据引起 50% 抑制的临界浓度即 EC_{50} 值确定的; 各性状抑制率与胁迫浓度的关系可用直线模型、或双曲线模型、或指数曲线模型较好模拟。③ 重金属单一污染胁迫造成小麦籽粒产量下降幅度是 $\text{Cd} > \text{Cr} > \text{Pb}$; 二元互作对产量影响的重要性次序为 $\text{CdCr} > \text{CdPb} > \text{CrPb}$; 在 Cd、Cr、Pb 复合污染胁迫条件下, 穗数可以作为成株期重金属污染监测的首选指标。以上指标可为农田小麦重金属污染的监测和综合治理提供一些理论依据。

关键词: 小麦; 生育时期; 重金属污染; 抑制率; 监测指标

The pollution monitoring index system of wheat at different growth stages under the stress of Cd, Cr and Pb

DU Tianqing¹, YANG Jinzhong^{2,*}, HAO Jianping¹, CUI Fuzhu¹

1 Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China

2 Qingdao Agricultural University, Qingdao, Shandong 266109, China

Abstract: With wheat as test material, a series of experiments including toxic germination tests, hydroponic and soil column culture were carried out to study the pollution monitoring system of toxic heavy metals in wheat at different growth stages. EC_{50} 's were used to order toxicity of the heavy metals. The results indicated that: ① The decrease in root elongation rate might be an effective bio-marker to estimate heavy metal pollution. The 7d EC_{50} of Cd, Cr and Pb on the root elongation were 1.39 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 0.20 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ and 2.75 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, so their toxicity ranked as $\text{Cr} > \text{Cd} > \text{Pb}$. Relations between the inhibition to each traits and heavy metals concentrations were well fitted into math models of hyperbola equation $y = x/(a + x/100)$ or exponential curve $y = a(1 - \exp(-bx))$. ② Heavy metal stress to wheat seedlings was most obvious in leaf area (LA) and top weight (TW), so LA and TW may act as sensitive indices for pollution monitoring at seedling stage. All traits except for root weight were affected by heavy metal in that order of $\text{Cr} > \text{Cd} > \text{Pb}$. Relations between inhibition rates to wheat agronomic traits and heavy metal concentrations were better showed by linear equation, hyperbola equation or exponential curve. ③ Toxicity of soil heavy metals in terms of grain yield decrease ranked as $\text{Cd} > \text{Cr} > \text{Pb}$. Interactions between any double stresses of heavy metals on grain yield followed as $\text{CdCr} > \text{CdPb} > \text{CrPb}$. The ear number was the first choice to be used for pollution monitoring at mature stage under multiple stresses. Our obtained results will provide theoretical basis for pollution monitoring and comprehensive control in farmland.

基金项目: 山西省归国留学人员科研资助项目(96086)

收稿日期: 2009-08-26; **修订日期:** 2009-11-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jzyang@qau.edu.cn

Key Words: wheat; growth stages; heavy metals pollution; inhibition rate; monitoring index

重金属污染因其化学行为和生态效应的复杂性以及对人类健康和社会可持续发展危害的严重性,已成为关注的焦点^[1-2]。迄今,对土壤重金属污染的研究,主要集中在土壤重金属的环境质量评价及其生物有效性等方面,尚未获得一种理想的评价土壤重金属污染的指标^[3]。利用高等植物的生长状况监测土壤污染程度,是从生态学角度衡量土壤健康质量的重要方法之一^[4-5]。小麦作为世界上第一大粮食作物,是人类最主要的食物来源,在全球粮食贸易中占有十分重要的地位。目前有关重金属对小麦生长发育的影响及危害机制已有报道^[6-11],对小麦种子发芽、幼苗形态和生理生化指标的影响研究较多^[4,12-18],但从利用小麦生长状况对土壤污染进行监测的角度还未见报道。本文拟以小麦为研究对象,从萌芽期、幼苗期及成株期系统研究镉、铬、铅污染胁迫下的指标体系,阐明小麦不同生育时期对重金属胁迫的敏感器官以及出现受害症状时的大概浓度,作为土壤重金属污染的指标;研究各性状抑制率与胁迫浓度的关系模型,为预测不同胁迫浓度对小麦各性状的抑制程度,从而及早地进行防治和采取相应的措施提供参考;研究重金属污染与籽粒产量的剂量—效应关系,以为小麦生产中重金属安全控制技术体系 and 安全性评价技术体系的建立提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试冬小麦品种为 95-120,由山西农业大学小麦研究室供种,适合在山西中南部等地种植。

1.2 材料培养与试验设计

1.2.1 发芽毒理试验

供试重金属元素为镉、铬和铅,镉和铅以醋酸盐的形态加入,铬以重铬酸钠的形态加入。镉、铬和铅 3 种重金属各设 14 个浓度(表 1),并设无重金属胁迫为对照,重复 3 次,在室温条件下进行。精选均匀一致的饱满种子,用 0.1% HgCl₂ 消毒 10min,自来水多次漂洗,最后用蒸馏水洗净后备用。每个培养皿置放 20 粒种子,加 10mL 配制好的处理液进行浸种处理。

7d 后取样,首先测定种子根长度、芽长、芽鲜重和根鲜重,然后将胁迫条件下生物各性状的数据统一以抑制率表示,解决了性状不同造成的量纲不一致的问题。抑制率% = (1 - 处理值/对照值) × 100%。

1.2.2 幼苗溶液培养试验

种子消毒后在沙床上育苗,苗高达 5cm 时选取生长一致的植株,小心去掉胚乳,移植至容积为 1000mL 的塑料盆中,用 Hoagland 完全培养液进行培养,每盆 50 株小麦,植株用泡沫塑料板固定,每天定时用气泵通气,根据需要补充蒸馏水维持盆内液面高度。植株进入 3 叶期后,更换培养液,然后一次性进行重金属

污染胁迫处理。重复 3 次,以 10 株为取样单位测定植株农艺性状。重金属单一污染胁迫的溶液培养试验,镉、铬、铅等 3 种重金属分别设置 6 个浓度(表 2),并设无重金属胁迫作为对照。

1.2.3 田间土柱试验

以黄土母质的褐土土柱栽培冬小麦,以镉(CdCl₂)、铬(K₂Cr₂O₇)、铅(PbOAc)为试验因子,各设 5 个不同的浓度(Cd:1.0mg/kg、2.5mg/kg、4.0mg/kg、5.5mg/kg、7.0mg/kg;Cr:5mg/kg、20mg/kg、35mg/kg、50mg/kg、

表 1 镉、铬、铅单一胁迫发芽试验方案

Table 1 Germination test scheme for stresses of Cd, Cr and Pb alone

编号 No	Cd/ (mmol·L ⁻¹)	编号 No	Cr/ (mmol·L ⁻¹)	编号 No	Pb/ (mmol·L ⁻¹)
Cd1	0.15	Cr1	0.25	Pb1	0.50
Cd2	0.30	Cr2	0.50	Pb2	1.00
Cd3	0.45	Cr3	0.75	Pb3	1.50
Cd4	0.60	Cr4	1.00	Pb4	2.00
Cd5	0.75	Cr5	1.25	Pb5	2.50
Cd6	0.90	Cr6	1.50	Pb6	3.00
Cd7	1.05	Cr7	1.75	Pb7	3.50
Cd8	1.20	Cr8	2.00	Pb8	4.00
Cd9	1.35	Cr9	2.25	Pb9	4.50
Cd10	1.50	Cr10	2.50	Pb10	5.00
Cd11	1.65	Cr11	2.75	Pb11	5.50
Cd12	1.80	Cr12	3.00	Pb12	6.00
Cd13	1.95	Cr13	3.25	Pb13	6.50
Cd14	2.10	Cr14	3.50	Pb14	7.00

65mg/kg; Pb: 50mg/kg、175mg/kg、300mg/kg、425mg/kg、550mg/kg), 采用 $U_{15}(5^{3-4})$ 三因子回归均匀设计, 另加二元复合污染胁迫及对照共 19 个处理组合(表 3)。重复 3 次, 采用随机区组排列。将各种元素依次按设计浓度的蒸馏水溶液分次单独均匀地掺入取自耕作层(0—20cm)的土壤中, 并用氯化钾平衡各处理的钾养分, 再装填入已埋入大田的 $\varphi = 25\text{cm}$, $l = 60\text{cm}$ 的陶瓷管的顶部 0—20cm。每柱留苗 20 株小麦。

1.3 数据的统计分析方法

根据小麦对重金属污染的反应特点, 将小麦性状抑制率(y)和污染浓度(x)的关系通过曲线拟合, 从 R 值的大小及生成的图形本身进行比较建立最佳数学模型; 用 SAS 软件和 EXCEL 软件进行数据整理、统计分析与绘图。

2 结果与分析

2.1 萌芽期不同性状对镉、铬、铅单一胁迫响应的比较

图 1 和表 4 表明, 镉胁迫条件下, 小麦的芽长、根长、芽鲜重、根鲜重受抑制程度与胁迫浓度之间的关系基本符合双曲线模型 $y = x/(a + x/100)$ 。此模型中, 常数 100 表示最大抑制率, 参数 a 可用来计算抑制率等于 50% 时的胁迫浓度, 即 EC_{50} 值: $EC_{50} = 100a$ 。小麦萌芽期各性状镉胁迫的敏感性顺序为根长 > 根鲜重 > 芽长 > 芽鲜重。

在铬胁迫条件下, 小麦除芽鲜重符合双曲线模型外, 其它 3 个性状都符合指数曲线模型: $y = a(1 - \exp(-bx))$, 式中参数 a 表示理论最大抑制率, b 是大于零的常数。小麦萌芽期各性状因铬胁迫造成的抑制程度的大小顺序为根长 > 芽长 > 根鲜重 > 芽鲜重。

在铅胁迫条件下, 小麦的芽长、根长、芽鲜重与根鲜重的受抑程度与胁迫浓度的数量关系都符合双曲线模型。小麦萌芽期各性状因铅胁迫而导致的抑制作用的大小顺序为根长 > 芽长 > 芽鲜重 > 根鲜重。

某种重金属的 EC_{50} 值越小, 表明其毒性越强。以 EC_{50} 值为标准, 比较不同重金属对作物的毒性发现, 对于芽长、芽鲜重、根鲜重、根长等 4 个性状而言: $Cr > Cd > Pb$ 。而且, 不同重金属元素之间毒性程度也有较大差异。以 Cr 的 EC_{50} 值为基础, 计算其它两种重金属 EC_{50} 与它的比值就可以反映出这种差异(表 5)。如对小麥的根长的毒性而言, $Cr: Cd: Pb = 1: 6.95: 13.75$, 这说明当产生 50% 的抑制效果时, 镉的胁迫浓度是铬的胁迫浓度的 6.95 倍, 铅的胁迫浓度是铬的 13.75 倍, 是镉的 2 倍。

2.2 幼苗期不同性状对镉、铬、铅单一胁迫反应的比较

将各性状数值统一转换为抑制率, 然后拟合效应-剂量曲线方程, 并由此计算镉胁迫下的 EC_{50} 值于表 6, 可知 EC_{50} 值的大小次序为冠干重 = 叶面积 < 根干重 < 株高, 这表明各性状对镉胁迫的敏感性大小次序为冠

表 2 镉铬铅单一污染胁迫溶液培养方案

Table 2 Hydroponic culture experiment scheme of single stress of Cd, Cr and Pb

编号 No.	Cd/ (mmol·L ⁻¹)	编号 No.	Cr/ (mmol·L ⁻¹)	编号 No.	Pb/ (mmol·L ⁻¹)
Cd1	0.05	Cr1	0.1	Pb1	0.25
Cd2	0.10	Cr2	0.3	Pb2	0.50
Cd3	0.30	Cr3	0.5	Pb3	1.00
Cd4	0.50	Cr4	1.0	Pb4	2.00
Cd5	1.00	Cr5	2.0	Pb5	4.00
Cd6	2.00	Cr6	4.0	Pb6	8.00

表 3 镉铬铅复合污染胁迫小麦土柱试验二次回归设计方案

Table 3 Regression design scheme of combined stress of Cd, Cr and Pb for soil column experiments of wheat

No.	Cd /(mg/kg)	Cr(VI) /(mg/kg)	Pb /(mg/kg)
1	1.0	35	175
2	1.0	65	300
3	1.0	20	425
4	2.5	65	50
5	2.5	20	175
6	2.5	50	300
7	4.0	20	550
8	4.0	50	50
9	4.0	5	175
10	5.5	50	425
11	5.5	5	550
12	5.5	35	50
13	7.0	5	300
14	7.0	35	425
15	7.0	65	550
16	0.0	35	300
17	4.0	35	0
18	4.0	0	300
19	0.0	0	0

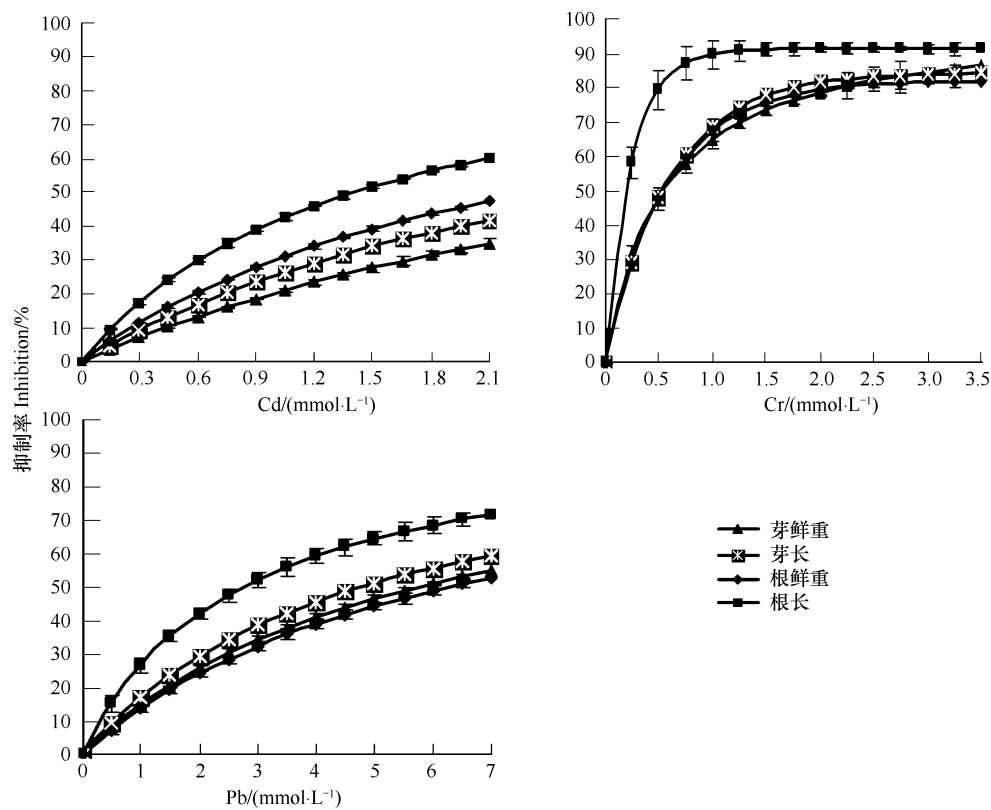


图1 镉、铬、铅胁迫对萌芽期各性状的抑制作用
Fig.1 Inhibitions of Cd,Cr and Pb to seedling traits of wheat

表4 种子萌芽期性状对镉、铬、铅胁迫的反应类型及特征
Table 4 The responses of seedlings to Cd,Cr and Pb stress

性状 Trait		模型 Model	<i>a</i>	<i>R</i>	EC ₅₀ / (mmol·L ⁻¹)	
镉 Cd	芽鲜重 Bud fresh weight	$y = x/(a + x/100)$	0.039	0.9715 **	3.9	
	芽长 Bud length	$y = x/(a + x/100)$	0.0289	0.9595 **	2.89	
	根鲜重 Root fresh weight	$y = x/(a + x/100)$	0.0231	0.9441 **	2.31	
	根长 Root length	$y = x/(a + x/100)$	0.0139	0.9836 **	1.39	
性状 Trait		模型 Model	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i>	EC ₅₀ / (mmol·L ⁻¹)
铬 Cr	芽鲜重 Bud fresh weight	$y = x/(a + x/100)$	0.0055		0.9884 **	0.55
	芽长 Bud length	$y = a(1 - \exp(-bx))$	84.3271	1.6831	0.9951 **	0.53
	根鲜重 Root fresh weight	$y = a(1 - \exp(-bx))$	81.9402	1.7314	0.9307 **	0.54
	根长 Root length	$y = a(1 - \exp(-bx))$	91.2183	4.0695	0.9980 **	0.2
性状 Trait		模型 Model	<i>a</i>	<i>R</i>	EC ₅₀ / (mmol·L ⁻¹)	
铅 Pb	芽鲜重 Bud fresh weight	$y = x/(a + x/100)$	0.057	0.9640 **		5.7
	芽长 Bud length	$y = x/(a + x/100)$	0.0476	0.9670 **		4.76
	根鲜重 Root fresh weight	$y = x/(a + x/100)$	0.0624	0.9271 **		6.24
	根长 Root length	$y = x/(a + x/100)$	0.0275	0.9818 **		2.75

表5 小麦不同性状的铬、镉、铅 EC₅₀ 值的比例关系
Table 5 Comparison among EC₅₀s of Cr, Cd and Pb for wheat germinating

性状 Trait	Cr	:	Cd	:	Pb
芽鲜重 Bud fresh weight	1	:	7.09	:	10.36
芽长 Bud length	1	:	5.45	:	8.98
根鲜重 Root fresh weight	1	:	4.28	:	11.56
根长 Root length	1	:	6.95	:	13.75

干重 = 叶面积 > 根干重 > 株高。

在铬胁迫条件下,株高、叶面积、冠干重和根干重的抑制率与胁迫浓度的数量关系见表 6。根据模型计算各性状的 EC_{50} 值,从小到大依次为冠干重 < 叶面积 < 根干重 = 株高。由此可见,各性状对铬胁迫的敏感性大小次序为冠干重 > 叶面积 > 根干重 = 株高。

表 6 水培幼苗主要性状第 15 天抑制率与镉、铬、铅胁迫浓度的数学模型

Table 6 Models of traits inhibitions by Cd, Cr and pb on day 15 post the metal stress

性状 Trait		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i>	模型 Model	EC ₅₀ / (mmol·L ⁻¹)		
镉 Cd	株高 Plant height	2.4377	29.0052	0.9888 **	$y = a + bx$	1.64		
	叶面积 Leaf area	0.0061		0.9952 **	$y = x/(a + x/100)$	0.61		
	冠干重 Top dry weight	81.0692	1.5822	0.9799 **	$y = a(1 - \exp(- bx))$	0.61		
	根干重 Root dry weight	-3.1729	50.4444	0.9789 **	$y = a + bx$	1.05		
性状 Trait		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>R</i>	模型 Model	EC ₅₀ / (mmol·L ⁻¹)
铬 Cr	株高 Plant height	37.8002	1.6750			0.9985 **	$y = a(1 - \exp(- bx))$	1.52
	叶面积 Leaf area	0.0025				0.8479 *	$y = x/(a + x/100)$	0.25
	冠干重 Top dry weight	0.0054	0.7548	112.2890	0.3154	0.9992 **	$y = (ab + cxd)/(b + xd)$	0.20
	根干重 Root dry weight	0.0152				0.9100 **	$y = x/(a + x/100)$	1.52
性状 Trait		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i>	模型 Model	EC ₅₀ / (mmol·L ⁻¹)		
铅 Pb	株高 Plant height	102.4943	0.2836	0.9759 **	$y = a(1 - \exp(- bx))$	2.38		
	叶面积 Leaf area	0.0129		0.9469 **	$y = x/(a + x/100)$	1.29		
	冠干重 Top dry weight	0.0132		0.9416 **	$y = x/(a + x/100)$	1.32		
	根干重 Root dry weight	-4.4274	26.7600	0.9878 **	$y = a + bx$	2.03		

铅胁迫抑制了株高、叶面积、冠干重和根干重,用抑制率表示抑制作用的大小,并分别拟合其与胁迫浓度的数学模型(表 6)。尽管所有性状均表现出胁迫浓度越高,抑制越严重的共同规律,但各性状的数学模型不同,表明其抑制特点不同,引起 50% 抑制的临界浓度即 EC_{50} 值也不同。该值越小,说明越敏感。据此得知各性状对铅胁迫的敏感性次序为叶面积 > 冠干重 > 根干重 > 株高。

以 EC_{50} 值为标准,比较不同重金属对小麦幼苗的毒性发现,对于根干重、冠干重、叶面积和株高等 4 个性状而言,镉、铬、铅 3 种重金属元素的毒性次序因性状而异(表 6)。对根干重的毒性次序为: Cd > Cr > Pb; 对后三者的毒性次序相同,为 Cr > Cd > Pb。总之,铅的毒性最小,铬对叶面积和冠干重的毒性是镉的 2—3 倍,在株高和根干重上两者相差不大。

2.3 成株期小麦籽粒产量与镉、铬、铅胁迫的关系

籽粒产量是小麦栽培的主要目标,能够反映重金属复合胁迫条件下土壤的生产力大小。分别以 x_1 、 x_2 、 x_3 表示土壤中镉、铬、铅胁迫浓度, y 表示籽粒产量,经回归分析得到它们之间的数学模型为:

$$y = 56.3009 - 1.6843x_1 - 0.0968x_2 + 0.0146x_3 + 0.0297x_1x_2 + 0.0024x_1x_3 - 0.0006x_2x_3 - 0.0445x_{12} - 0.0006x_{22} - 0.0001x_{32} \quad (R = 0.9643, P < 0.01; y: g/column, x_1 - x_3: mg/kg)$$

根据前述数学模型,用降维法分别分析各种重金属的单独作用,得如下方程:

$$y = 56.3009 - 1.6843x_1 - 0.0445x_{12}$$

$$y = 56.3009 - 0.0968x_2 - 0.0006x_{22}$$

$$y = 56.3009 + 0.0146x_3 - 0.0001x_{32}$$

由于全部 3 种重金属均以 mg/kg 作为浓度单位,故可以利用以上方程绘制剂量-效应曲线图(图 2)。

由图可以推知:镉、铬、铅等 3 种重金属均降低了小麦的籽粒产量,而且表现为胁迫浓度越大,作用强度越大的规律。曲线下降的速率反映了它们的毒性大小,按其作用大小排序为镉 > 铬 > 铅。说明镉和铬是影响产量的主要因素,而铅的影响较小。即籽粒产量没有表现出明显受铅的影响。

前面的数学模型还表明,镉和铬的交互项系数为正值,表明镉和铬之间具有拮抗作用,彼此削弱了对方的部分毒性;镉和铅两者的交互项系数同样为正值,说明镉和铅之间具有拮抗作用,土壤中一种重金属元素的存在,使另一种重金属元素的毒性有所降低。铬和铅的交互项系数为负值,说明铬和铅之间彼此加强了对方的毒性,浓度越高,减产程度越大。两种重金属之间交互大小可以根据交互项系数的绝对值确定,即: $CdCr > CdPb > CrPb$ 。

小麦群体籽粒产量是由总穗数、每穗粒数和粒重构成的。在镉铬铅复合胁迫条件下,籽粒产量与其构成因素之间关系如何?这对于深入认识重金属胁迫对籽粒产量的影响机制非常重要。

相关分析结果(表7)表明,籽粒产量与3个产量构成因素之间均呈显著或极显著的正相关关系。这说明产量高的群体不仅穗数多,而且穗粒数多,粒重高。由于3个产量构成因素处于相互制约相互促进的共同变化之中,任何一个因素对产量的作用都受到其它两个因素的影响,所以相关系数并不能说明不同因素对产量作用的相对重要性。故进一步采用了通径分析深入研究它们的关系(表8)。

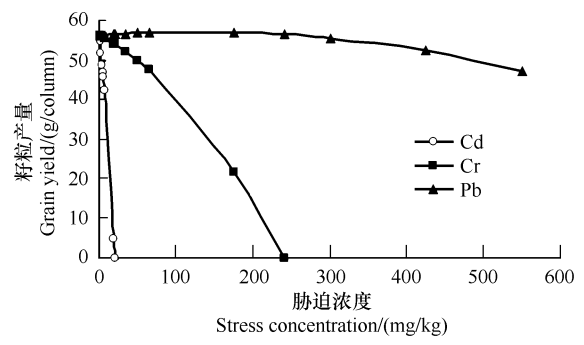


图2 镉铬铅单一胁迫对小麦产量的影响
Fig. 2 Effects of stresses by Cd,Cr and Pb alone on yield of wheat

表7 小麦籽粒产量与其构成因素的简单相关分析

Table 7 Simple correlation analysis of wheat grain yield to its components

相关系数 Correlation	穗粒数 Eea grain number	粒重 Grain weight	产量 Yield
穗数 Ear number	0.0962	0.5420 *	0.7596 **
穗粒数 Eea grain number		0.5525 *	0.5528 *
粒重 Grain weight			0.7240 **

表8 小麦籽粒产量与其构成因素的通径分析

Table 8 Path analysis of wheat grain yield and its components

作用 Contribution	穗数→产量 Ear number→yield	穗粒数→产量 Grain number→yield	粒重→产量 Grain weight→yield	相关系数 Correlation
穗数 Eea number	0.637 **	0.039	0.084	0.760
穗粒数 Grain number	0.061	0.406 **	0.085	0.553
粒重 Grain weight	0.345	0.225	0.154	0.724

* * 0.01 水平上显著, * 0.05 水平上显著

3个产量构成因素与产量的直接通径系数分别为:穗数0.637、穗粒数0.406、粒重0.154,穗数和穗粒数均达到极显著水平。直接通径系数能够反映一个因素对产量的直接作用大小,故3个因素对产量的直接作用大小次序为:穗数>穗粒数>粒重,而且所有作用都是正向作用。这表明,镉、铬、铅复合胁迫对籽粒产量的影响是通过全面抑制穗数、穗粒数和粒重实现的,而且对穗数的影响最明显,对粒重的影响最弱,对穗粒数的影响居中。

3 讨论

镉、铬、铅单一污染胁迫对萌芽的毒性次序:镉为根长>根鲜重>芽长>芽鲜重;铬为根长>芽长>根鲜重>芽鲜重;铅为根长>芽长>芽鲜重>根鲜重。萌芽期小麦根比芽对重金属单一污染胁迫更敏感(图1,表4)。其生理机制可能是胁迫引起呼吸代谢下降,造成种子萌发过程中蛋白酶、脂肪酶、淀粉酶、胚乳转氨酶的活性降低^[19-20],这些酶是萌发过程两个不同代谢阶段(贮藏物质的酶促水解及作用水解后的化合物而进行的新组织建成)中的关键酶,它们的活性降低,同时,呼吸作用下降导致提供的能量减少,必然造成萌发受阻。由于萌发时胚根的伸长早于胚芽的伸长,无胁迫时胚根的生长速率比胚芽快些,而且,与胚芽不同,胚根伸出

后直接与有毒的重金属接触,且重金属在根系明显富集,同时,此时芽生长所需的营养物质与能量并不是直接来自根系而来自胚乳,所以,萌芽期根长对重金属污染胁迫比芽长更敏感。小麦的种子根长度可以作为监测镉、铬、铅等重金属离子单一胁迫对种子萌发毒性的理想形态指标。以 EC_{50} 值为标准,比较不同重金属对小麦萌芽的毒性发现,对于芽长、芽鲜重、根鲜重、根长等 4 个性状而言: $Cr > Cd > Pb$, 铬毒性是镉的 4.28—7.09 倍,铅的 8.98—13.75 倍(表 5)。

镉、铬、铅 3 种重金属元素对水培小麦幼苗根干重的毒性次序为: $Cd > Cr > Pb$, 镉毒性略大于铬,相当于铅毒性的 2 倍;对冠干重、叶面积和株高的毒性次序相同,均为 $Cr > Cd > Pb$, 铬毒性是镉的 1.08—3.05 倍,是铅毒性的 1.57—6.60 倍。镉、铬、铅单一污染胁迫对小麦幼苗性状的毒性次序:镉为冠部干重 = 叶面积 > 根干重 > 株高;铬为冠部干重 > 叶面积 > 根干重 > 株高;铅为叶面积 > 冠部干重 > 根干重 > 株高。苗期植株冠部生长比根部更易受到镉、铬、铅污染胁迫的抑制。叶面积可以作为幼苗期的形态监测指标(表 6)。值得指出,本研究是以 50% 抑制率所对应的重金属元素摩尔浓度比较不同重金属元素毒性大小的,但有些研究却使用质量浓度^[21]。由于毒性重金属离子在植株体内发生反应是以离子形式进行的,所以使用摩尔浓度更合理一些。

土壤中镉、铬、铅单一污染胁迫均降低了小麦的籽粒产量,按其作用大小排序为镉 > 铬 > 铅(图 2)。二元互作对产量影响的重要性次序为镉铬 > 镉铅 > 铬铅,以第 2 类互作为主,表现为拮抗作用。在镉、铬、铅复合污染胁迫条件下,小麦籽粒产量与构成因素的直接通径系数分别为:穗数 0.637、穗粒数 0.406、粒重 0.154,其中穗数、穗粒数达极显著水平(表 8),穗数可以作为成株期重金属污染监测的首选指标。

以上结果表明:小麦不同器官由于其所处部位、生长发育所在生育期等的差异,对重金属胁迫的敏感性存在显著差异。另外,小麦叶片的叶绿素含量、组织渗透势和电导率都可以作为土壤重金属污染生理监测的首选指标^[22]。

References:

- [1] Wang H B, Shu W S, Lan C Y. Ecology for heavy metal pollution: recent advances and future prospects. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(3): 596-605.
- [2] Wei C Y, Chen T B. Hyper accumulators and phytoremediation of heavy metal contaminated soil: a review of studies in china and abroad. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(7): 1196-1203.
- [3] Wang H K. Advances of metal pollution study in soils. *Environmental Chemistry*, 1991, 10(5): 35-42.
- [4] Song Y F, Zhou Q X, Xu H X, Ren L P, Gong P. Eco-toxicology of heavy metals on the inhibition of seed germination and root elongation of wheat in soils. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(4): 459-462.
- [5] Song Y F, Xu H X, Ren L P, Song X Y, Gong P. Inhibition and eco-toxicology of heavy metals pollution on vegetable growth in soils. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(1): 13-15.
- [6] Athar R, Ahmad M. Heavy metal toxicity: effect on plant growth and metal uptake by wheat, and on free living azotobacter. *Water Air and Soil Pollution*, 2002, 138(7): 165-180.
- [7] Cai B S, Cao L K. Effect of cadmium on growth and the tolerance among wheat genotype. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry: Natural Science Edition*, 2003, 31(1): 62-66.
- [8] Ji S J, Wang J W, Huang L P, Lü M, Wang Y H, Li B, Cui J H, Wang S C. Study on influence of cadmium on growth of triticum aestivum and forecast of contamination to wheat. *Grain Processing*, 2008, 33(1): 51-53.
- [9] Wang M E, Zhou Q X. Effects of Cd and Cu on physiological and biochemical processes of wheat (*Triticum aestivum*) seedlings and their toxic mechanisms. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(12): 2033-2038.
- [10] Lin K F, Xu X Q, Zheng L, Xiang Y L, Li Z H, Jiang D B. Eco-toxicological effects of selenium on inhibition of seed germination and root elongation of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(5): 885-889.
- [11] Dong T, Wang L, Yang X J. Eco-toxic effect study of cyanide on seed germination and seedling growth wheat. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(5): 1919-1924.
- [12] Talanova V V, Titov A F, Boeva N P. Effect of increasing concentrations of heavy metals on the growth of barley and wheat seedlings. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2001, 48(1): 119-123.

- [13] Gao D X, Liu H F, Liu H S, Xiong X X, Li Z F. Effects of Hg on seed germination, seedling development and physiological and biochemical characteristics of wheat. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24 (supplement): 13-16.
- [14] Li Z F, Liu H F, Xiong X X, Liu H S. Effect of cadmium on seed germination, seedling development and physiological and biochemical characteristics of wheat. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24 (supplement): 17-20.
- [15] Lu X W, He J. Effect of heavy metals Cu and Zn on seed germination and biomass of wheat. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, 36(35): 15346-15348.
- [16] Wang Y M, Zhang Y X, Chai T Y, Jiao X D. Effects of heavy metals on seed germination and young bud growth of wheat and rye. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(3): 802-804.
- [17] Wang J T, Liu H L, Wu W Y, Huang X F, Hao Z Y. Experimental study on effects of hexavalent chromium on crop seed germination under solution culture. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(6): 222-225.
- [18] Liu X L, Zhang S Z. Intraspecific differences in effects of co-contamination of cadmium and arsenate on early seedling growth and metal uptake by wheat. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, 19(10): 1221-1227.
- [19] Li Q F, Ma C C. The effect of mercury on seed vigor and germination metabolism of wheat. *Acta Botanica Boreale-Occidentalia Sinica*, 1997, 17(4): 537-541.
- [20] Ma C C, Hong F S. Preliminary explanation of the mechanism about effects of mercury on wheat seed germination and seedling growth. *Acta Phytocologica Sinica*, 1998, 22(4): 373-378.
- [21] Lin C Y. Toxicity comparative study of Cu, Cd and Zn on land plant. *Agro-environmental Protection*, 1996, 15(6): 266-267.
- [22] Du T Q, Yang J Z, Hao J P, Miao G Y. Influences of multiple stress by Cd, Pb and Cr on physiological-biochemical characters of wheat seedlings. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(8): 4475-4482.

参考文献:

- [1] 王宏斌, 束文圣, 蓝崇钰. 重金属污染生态学研究现状与展望. *生态学报*, 2005, 25(3): 596-605.
- [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. *生态学报*, 2001, 21(7): 1196-1203.
- [3] 王宏康. 土壤中金属污染的研究进展. *环境化学*, 1991, 10(5): 35-42.
- [4] 宋玉芳, 周启星, 许华夏, 任丽萍, 龚平. 重金属对土壤中小麦种子发芽与根伸长抑制的生态毒性. *应用生态学报*, 2002, 13(4): 459-462.
- [5] 宋玉芳, 许华夏, 任丽萍, 宋雪英, 龚平. 土壤重金属污染对蔬菜生长的抑制作用及其生态毒性. *农业环境科学学报*, 2003, 22(1): 13-15.
- [7] 蔡保松, 曹林奎. 镉对小麦生长发育的影响及其基因型间差异. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2003, 31(1): 62-66.
- [8] 纪淑娟, 王俊伟, 黄莉萍, 吕美, 王颜红, 李波, 崔杰华, 王世成. 重金属镉胁迫对小麦生长的影响及小麦镉污染预测的研究. *粮食加工*, 2008, 33(1): 51-53.
- [9] 王美娥, 周启星. 重金属 Cd、Cu 对小麦 (*Triticum aestivum*) 幼苗生理生化过程的影响及其毒性机理研究. *环境科学学报*, 2006, 26(12): 2033-2038.
- [10] 林匡飞, 徐小清, 郑利, 项雅玲, 李志红, 姜达炳. Se 对小麦种子发芽与根伸长抑制的生态毒理效应. *农业环境科学学报*, 2004, 23(5): 885-889.
- [11] 董涛, 王兰, 杨雪娇. 氰对小麦种子萌发和幼苗生长生态毒理效应的研究. *农业环境科学学报*, 2008, 27(5): 1919-1924.
- [13] 高大翔, 刘惠芬, 刘卉生, 熊肖霞, 李子芳. 汞胁迫对小麦种子萌发、幼苗生长及生理生化特性的影响. *农业环境科学学报*, 2005, 24(增刊): 13-16.
- [14] 李子芳, 刘惠芬, 熊肖霞, 刘卉生. 镉胁迫对小麦种子萌发幼苗生长及生理生化特性的影响. *农业环境科学学报*, 2005, 24(增刊): 17-20.
- [15] 鲁先文, 何俊. 重金属 Cu 和 Zn 对小麦种子萌发和生物量的影响. *安徽农业科学*, 2008, 36(35): 15346-15348.
- [16] 王彦梅, 张玉秀, 柴团耀, 焦向东. 重金属对小麦和黑麦种子萌发及幼苗生长的影响. *中国生态农业学报*, 2008, 16(3): 802-804.
- [17] 王军涛, 刘洪禄, 吴文勇, 黄兴法, 郝仲勇. 水培条件下重金属 Cr(VI) 对作物种子萌发影响的试验研究. *农业工程学报*, 2008, 24(6): 222-225.
- [19] 李清芳, 马成仓. 汞对小麦种子活力和萌发代谢的影响. *西北植物学报*, 1997, 17(4): 537-541.
- [20] 马成仓, 洪法水. 汞对小麦种子萌发和幼苗生长作用机制初探. *植物生态学报*, 1998, 22(4): 373-378.
- [21] 林春野. 重金属 Cu Cd Zn 的陆生植物毒性比较研究. *农业环境保护*, 1996, 15(6): 266-267.
- [22] 杜天庆, 杨锦忠, 郝建平, 苗果园. Cd、Pb、Cr 三元胁迫对小麦幼苗生理生化特性的影响. *生态学报*, 2009, 29(8): 4475-4482.