

Cd、Pb、Cr 三元胁迫对小麦幼苗生理生化特性的影响

杜天庆¹, 杨锦忠^{2,*}, 郝建平¹, 苗果园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: 用小麦幼苗做材料, 采用溶液培养方法, 研究了 Cd、Pb、Cr 共同胁迫对小麦性状的影响。结果表明, 由于 Cd、Pb、Cr 3 种不同重金属之间互作的存在, 三元污染胁迫对叶绿素总量抑制的联合作用和降低渗透势的幅度一直大于单独作用之和; 三元污染胁迫下的气孔阻力、可溶性蛋白质含量、MDA 含量联合作用一直小于单独作用之和。联合作用随胁迫时间的增加, 从小于单独作用之和转变为大于单独作用之和的有叶与根的质膜透性; 联合作用从大于单独作用之和转变为小于单独作用之和的有 Cd、Pb、Cr 三元污染胁迫下的根系活力。对小麦幼苗 POD 同工酶的影响是: Cd、Pb、Cr 三元污染胁迫出现了与单一污染胁迫不同的新酶带, 也消失了不同的酶带。该结果可为进一步了解 Cd、Pb、Cr 污染对小麦的影响机制, 为农业生产上早期检查 Cd、Pb、Cr 对小麦幼苗生长的有害效应和丰富小麦重金属复合污染胁迫研究提供一些理论依据。

关键词: 重金属; 三元胁迫; 互作; 生理生化; 小麦幼苗

文章编号: 1000-0933(2009)08-4475-08 中图分类号: X171 文献标识码: A

Influences of multiple stress by Cd, Pb and Cr on physiological-biochemical characters of wheat seedlings

DU Tian-Qing¹, YANG Jin-Zhong^{2,*}, HAO Jian-Ping¹, MIAO Guo-Yuan¹

¹ Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China

² Qingdao Agricultural University, Qingdao, Shandong 266109, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(8): 4475 ~ 4482.

Abstract: The coexisting and independent stress effects were studied of three heavy metals of Cd, Pb and Cr on the physiological and biochemical characters of wheat seedlings. The results showed that there were five patterns of joint actions (JA) because of their interactions, comparing with the sum of independent actions (SIA) by three heavy metals. Under exposure to triplicate heavy metal stresses, JAs were always larger than SIAs for the decreases in leaf chlorophyll content and osmotic potential, whereas JAs were smaller than SIAs all the time for leaf stomatal resistance, soluble protein and MDA contents. With the prolongation of stress time, JAs in the solute leakage of roots and leaves presented dramatic changes so that the trend that JAs were smaller than SIAs in early stage was inversely changed in late stage. In contrast, changes in JAs related to SIAs showed the pattern from highness to lowness through the exposure course. POD enzymogram changes were obvious so that triplicate heavy metal stresses induced some new bands and inhibited other bands, compared to individual metal stresses. The findings will serve as a theoretical basis for stress mechanism in crop physiology, and for early monitoring harmful effects of heavy metals in wheat production and deserve to be further explored in the context of pollution ecology.

Key Words: heavy metals; multiple stresses; interaction; physiological and biochemical traits; wheat seedlings

当前由于工业污水灌溉引起的农田土壤重金属污染问题日益突出, 据研究我国 37 个主要污灌区中有明

基金项目: 山西省归国留学人员科研资助项目(96086)

收稿日期: 2008-04-20; 修订日期: 2008-12-05

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

显污染点 22 个,其中多半是积累性重金属超标,随着污灌区土壤中重金属的积累,污灌区内农产品也受到不同程度的污染^[1]。在全国煤炭之乡、能源重化工基地的山西省,土壤污染问题较其他省区更为突出,主要是汞、镉、铅、砷及铬等重金属类的污染。据山西日报 2008 年 3 月 26 日资料,太原市郊和晋东南污灌区土壤中铬、镉的含量比清水灌区高出几倍到 20 多倍,太原市耕地出现铅污染迹象的地区已达 56%,且多数地区铅污染超国家一级以上水平;粮食中镉的残留量检出率达 84.2%,铅的检出率为 75%。镉、铅、铬作为对植物产生毒害作用的主要重金属污染物,在自然环境中存在共生现象,因而容易形成复合污染。目前,多种重金属的交互作用对植物系统的影响研究报道不多,国内外有关重金属对小麦影响的研究大多数局限于某种重金属的单独污染胁迫^[2~7];其中少数有关二元污染胁迫的研究中,虽然人们已经意识到不同重金属元素之间存在交互作用,但作深入剖析的较少^[8~12];而有关三元胁迫的研究报道更少^[13],其中 Cd、Pb、Cr 三元胁迫对小麦影响的研究尚未见报道。为此,本研究以山西工业污染严重、毒性较大的 Cd、Pb、Cr 为供试重金属元素,系统分析重金属三元胁迫对小麦毒害的机理,以期为农田小麦重金属污染的监测和综合治理提供参考。

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

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。植株进入三叶期后,更换培养液,然后一次性进行重金属污染胁迫处理,以 10 株为取样单位进行植株生理生化指标的测定。

试验设对照(CK)、镉(Cd)、铅(Pb)、铬(Cr)和镉铅铬三元胁迫(Cd∩Pb∩Cr)5 个处理,重复 3 次。镉、铅、铬 3 种重金属离子的胁迫浓度根据等毒性原理设计^[14~16],分别为 Cd 0.3 mmol/L、Pb 0.8 mmol/L、Cr 0.25 mmol/L。

1.3 测定项目与方法

叶绿素含量测定采用丙酮-乙醇混合液提取,分光光度法^[17];MDA 含量测定采用双波长硫代巴比妥酸法^[17];可溶性蛋白质含量测定采用 Folin-酚试剂法^[17];根系活力测定采用 TTC 还原法^[17]。

质膜透性测定:标准称取样品 0.5g,用去离子水洗净,真空抽气 15min,室温放置 30min,用 DDSJ-308A 电导仪测外渗电导值,在沸水中煮 10min,冷却后测定外渗电导值。用样品煮前电导值占煮后的电导值的百分比表示。

渗透势测定:分次采集植物样品, -20℃ 速冻存储后一次性测定,消融后榨取汁液,直接采用美国生产的 VIESCOR HR-33T 露点微伏计测定并读数。

气孔阻力测定采用英国 Delta-T Devices LTD 的 AP4 气孔计进行原位直接测定。

POD 同功酶测定:取 0.1ml 各测定样本粗酶液于指形管中,加入 0.1ml 40% 的蔗糖溶液,充分震荡混匀,供同功酶分析,聚丙烯酰胺垂直板电泳^[18],电泳结果用 UVP GDS800 凝胶电泳成像扫描仪(Cambridge life science, UK)及配套软件包 Gelworks 1D 获取酶谱的有关参数。

1.4 数据的统计分析方法

交互值的计算及其分类方法采用文献^[19],用 SAS 软件和 EXCEL 软件进行数据整理、统计检验、分析与绘图,实验结果以平均值 ± 标准差($\bar{x} \pm s$)表示。

2 结果与分析

2.1 对小麦幼苗叶绿素含量的影响

叶绿素含量是植物重要的生理指标,其含量的多少决定着植物光合作用能力的大小。镉铅铬三元胁迫严重降低了小麦幼苗叶片叶绿素总量,而且其降低幅度超过了三者单独作用之和,差异达到了显著水平。其原

因在于三者之间有较明显的负互作,即第 1 类互作,这表明一种重金属对叶绿素的抑制作用由于另外两种重金属的存在而得到加强(图 1,表 1,表 2)。

2.2 对 MDA 和可溶性蛋白质的影响

镉铅铬三元胁迫使小麦幼苗叶片 MDA 含量增大,然而其幅度小于单独作用之和,造成这种差异的原因是,这 3 种重金属之间有很强烈的第 2 类互作即正互作。

镉铅铬三元胁迫使小麦幼苗叶组织中可溶性蛋白质含量下降,且在处理后的第 2 天,下降幅度就非常大,之后下降幅度大大变小。从第 4 天起,三元胁迫下可溶性蛋白质含量超过任一单一胁迫处理,显著高于单独作用之和,与对照处理之间的差异未达显著水平(图 2 和表 2)。

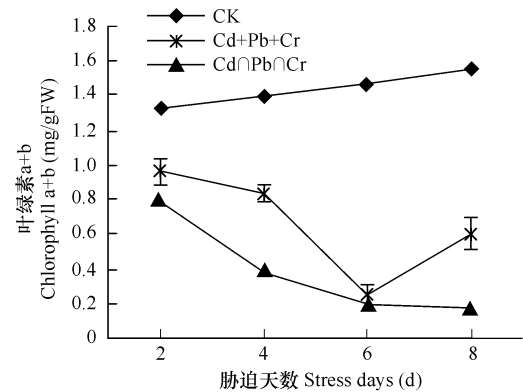


图 1 镉铅铬三元胁迫对小麦叶片叶绿素的互动动态
Fig. 1 Interactions among Cd, Pb and Cr on wheat leaf chlorophyll
∩表示联合作用, + 表示单独作用之和,下同 ∩ denotes joint action, + denotes the sum of independent actions, the same below

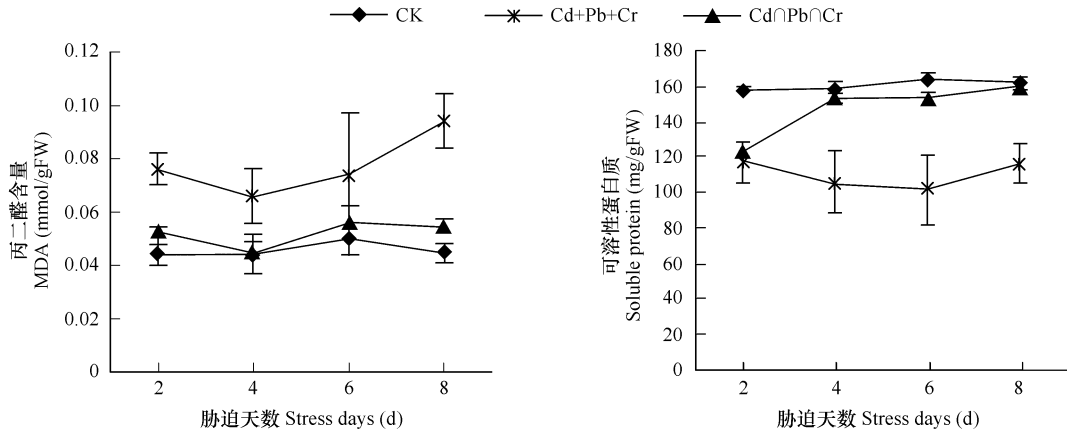


图 2 镉铅铬三元胁迫对小麦叶片 MDA、可溶性蛋白的互动动态
Fig. 2 Interactions among Cd, Pb and Cr on MDA and soluble protein in wheat leaf

表 1 镉铅铬三元胁迫对小麦幼苗叶绿素含量的互作值
Table 1 Interactions among Cd, Pb and Cr on wheat leaf chlorophyll contents

胁迫天数 Stress days (d)	叶绿素 a Chlorophyll a (mg/g)	叶绿素 b Chlorophyll b (mg/g)	叶绿素 a + b Chlorophyll a + b (mg/g)	叶绿素 a:b chlorophyll a:b
2	-0.11	-0.07	-0.16	0.15
4	-0.34	-0.1	-0.45	-0.48
6	-0.09	0.03	-0.04	-0.56
8	-0.24	-0.2	-0.43	-0.12

2.3 对幼苗气孔阻力、渗透势、相对电导率、根系活力的影响

2.3.1 对小麦幼苗气孔阻力、渗透势的影响

气孔阻力是反映气体交换能力的重要参数,镉铅铬三元胁迫时,三者之间有强烈的第 2 类互作,其中一种重金属对小麦幼苗气孔阻力的增大作用幅度,将会因为另外两种重金属的存在而遭到削弱,产生了联合作用远远小于单独作用之和的结果。镉铅铬单一或复合胁迫引起叶组织渗透势降低,随着胁迫时间的延长降幅剧增,胁迫条件下,联合作用与单独作用之和的差异达显著水平(图 3)。渗透调节是水分胁迫条件下作物适应

逆境的主要机制之一,在镉铅铬胁迫条件下出现这种渗透调节作用,表明水分的吸收与运输遇到严重障碍,叶组织渗透势降低是对缺水的适应性调节。

表 2 镉铅铬三元胁迫对小麦幼苗生理指标的影响

Table 2 Effects of Cd, Pb and Cr on physiological characters of wheat seedlings

处理 Treatment		胁迫时间 Stress time(d)			
		2d	4d	6d	8d
叶绿素 a + b	CK	1.319 ± 0.0247 a	1.396 ± 0.0067 a	1.463 ± 0.0405 a	1.557 ± 0.0315 a
Chlorophylla + b	Cd	1.281 ± 0.0264 a	1.404 ± 0.0195 a	1.304 ± 0.0013 b	1.450 ± 0.0742 b
(mg/gFW)	Pb	1.133 ± 0.0116 b	0.906 ± 0.0460 c	0.757 ± 0.0420 d	1.059 ± 0.0755 d
	Cr	1.197 ± 0.0301 b	1.302 ± 0.0331 b	1.112 ± 0.0189 c	1.217 ± 0.0087 c
	Cd + Pb + Cr	0.959 ± 0.0789 c	0.836 ± 0.0422 d	0.243 ± 0.0725 e	0.607 ± 0.0914 e
	Cd ∩ Pb ∩ Cr	0.799 ± 0.0239 d	0.386 ± 0.0157 e	0.203 ± 0.0177 e	0.177 ± 0.0224 f
丙二醛 MDA	CK	0.044 ± 0.0040 c	0.044 ± 0.0075 b	0.050 ± 0.0061 b	0.045 ± 0.0035 c
(m mol/gFW)	Cd	0.056 ± 0.0020 b	0.052 ± 0.0020 b	0.054 ± 0.0026 ab	0.063 ± 0.0010 b
	Pb	0.054 ± 0.0020 b	0.051 ± 0.0036 b	0.057 ± 0.0089 ab	0.059 ± 0.0040 b
	Cr	0.054 ± 0.0020 b	0.051 ± 0.0040 b	0.063 ± 0.0053 ab	0.062 ± 0.0089 b
	Cd + Pb + Cr	0.076 ± 0.0060 a	0.066 ± 0.0101 a	0.074 ± 0.0229 a	0.094 ± 0.0101 a
	Cd ∩ Pb ∩ Cr	0.052 ± 0.0020 b	0.045 ± 0.0036 b	0.056 ± 0.0061 ab	0.054 ± 0.0035 bc
可溶性蛋白质	CK	157.320 ± 2.9687 a	158.290 ± 4.5401 a	164.530 ± 3.1217 a	161.460 ± 3.1040 a
Soluble protein	Cd	149.340 ± 5.6131 ab	147.560 ± 5.1220 abc	150.420 ± 7.2789 abc	147.350 ± 3.2007 b
(mg/gFW)	Pb	138.610 ± 2.0183 b	135.390 ± 4.3595 c	135.700 ± 0.7854 c	148.890 ± 5.2177 b
	Cr	144.130 ± 2.6933 b	139.530 ± 1.0300 bc	144.900 ± 3.5200 bc	143.210 ± 2.7531 b
	Cd + Pb + Cr	117.440 ± 11.4880 c	105.900 ± 17.3128 d	101.960 ± 19.9238 d	116.530 ± 11.2290 c
	Cd ∩ Pb ∩ Cr	122.050 ± 6.7251 c	153.640 ± 2.8079 ab	153.030 ± 4.0288 ab	159.470 ± 1.0237 a
根系活力	CK	1226.415 ± 23.4151 a	1305.376 ± 197.9108 b	1685.086 ± 203.4574 b	2541.424 ± 166.2476 a
Root vigor	Cd	1186.756 ± 98.8447 a	1740.670 ± 90.8675 a	2428.571 ± 371.4286 a	2540.323 ± 36.3687 a
(μg/h·gFW)	Pb	348.113 ± 109.2100 c	446.928 ± 41.2707 cd	806.842 ± 66.8421 c	1329.320 ± 168.4550 b
	Cr	1030.097 ± 18.1258 b	779.304 ± 53.1064 c	467.423 ± 24.5673 c	481.706 ± 24.8517 c
	Cd + Pb + Cr	112.136 ± 55.8397 d	356.149 ± 40.6979 d	332.664 ± 86.1589 c	-731.499 ± 272.7937 e
	Cd ∩ Pb ∩ Cr	179.469 ± 39.2815 d	176.136 ± 51.1364 d	159.224 ± 38.8155 c	134.757 ± 78.5768 d
叶相对电导率	CK	12.101 ± 0.1011 d	13.816 ± 3.0197 b	14.379 ± 0.8333 c	12.833 ± 1.1785 d
Leaf solute leakage	Cd	14.742 ± 3.3138 cd	13.957 ± 2.5411 b	18.064 ± 1.8333 abc	13.833 ± 2.5927 d
(%)	Pb	13.551 ± 0.5063 cd	16.171 ± 2.4123 ab	17.990 ± 0.9295 abc	23.430 ± 1.3145 bc
	Cr	16.441 ± 2.9509 bc	16.647 ± 1.1673 ab	16.053 ± 2.1402 bc	19.110 ± 3.0266 cd
	Cd + Pb + Cr	20.532 ± 0.8575 a	19.141 ± 7.2048 ab	23.349 ± 2.9030 ab	30.706 ± 4.1054 b
	Cd ∩ Pb ∩ Cr	18.314 ± 0.9047 ab	22.522 ± 6.3891 a	25.880 ± 4.5469 a	46.808 ± 5.5687 a
根相对电导率	CK	13.771 ± 1.5039 c	9.302 ± 0.9947 d	9.920 ± 1.8865 b	9.265 ± 1.7905 b
Root solute leakage	Cd	13.480 ± 1.5326 c	10.361 ± 1.3473 d	12.591 ± 2.4705 b	10.171 ± 0.8082 b
(%)	Pb	20.081 ± 0.6516 ab	21.344 ± 2.3700 bc	13.018 ± 8.7107 b	9.920 ± 0.4119 b
	Cr	17.558 ± 1.2240 b	16.473 ± 5.7599 cd	10.889 ± 1.0184 b	11.830 ± 0.5278 b
	Cd + Pb + Cr	23.577 ± 2.1500 a	29.573 ± 2.2921 ab	16.658 ± 4.1208 b	13.390 ± 3.2236 b
	Cd ∩ Pb ∩ Cr	20.766 ± 3.6801 ab	36.202 ± 10.3159 a	40.385 ± 12.161 a	39.075 ± 11.9482 a

同列数据具不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著 The different small letters within the same row indicated significant difference at the probability level of 0.05

2.3.2 对小麦根系活力、幼苗相对电导率的影响

镉铅铬三元胁迫造成小麦幼苗根系活力下降,这 3 种重金属之间的互作方式出现了比较复杂的变化。镉铅铬三元胁迫增大了小麦幼苗叶片与根系的相对电导率,而且表现出胁迫持续时间越长,相对电导率增大越

强的趋势。这 3 种重金属之间的互作由第 2 天的较弱的负互作, 转变为从第 4 天开始之后的不断增强的第 1 类负互作, 强化了它们的胁迫效应(图 4)。

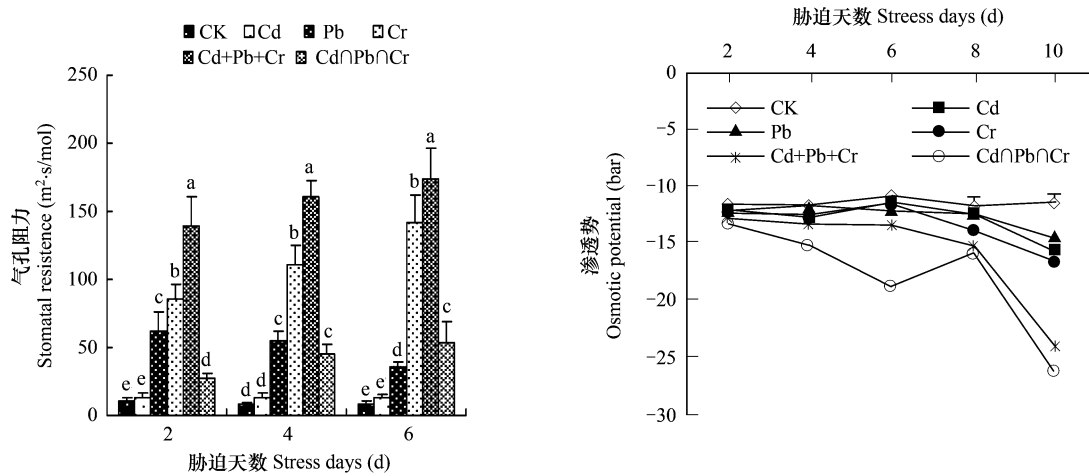


图 3 镉铅铬三元胁迫对小麦叶片气孔阻力、渗透势的互动动态

Fig. 3 Interactions among Cd, Pb and Cr on stomatal resistance and osmotic potential in wheat leaf

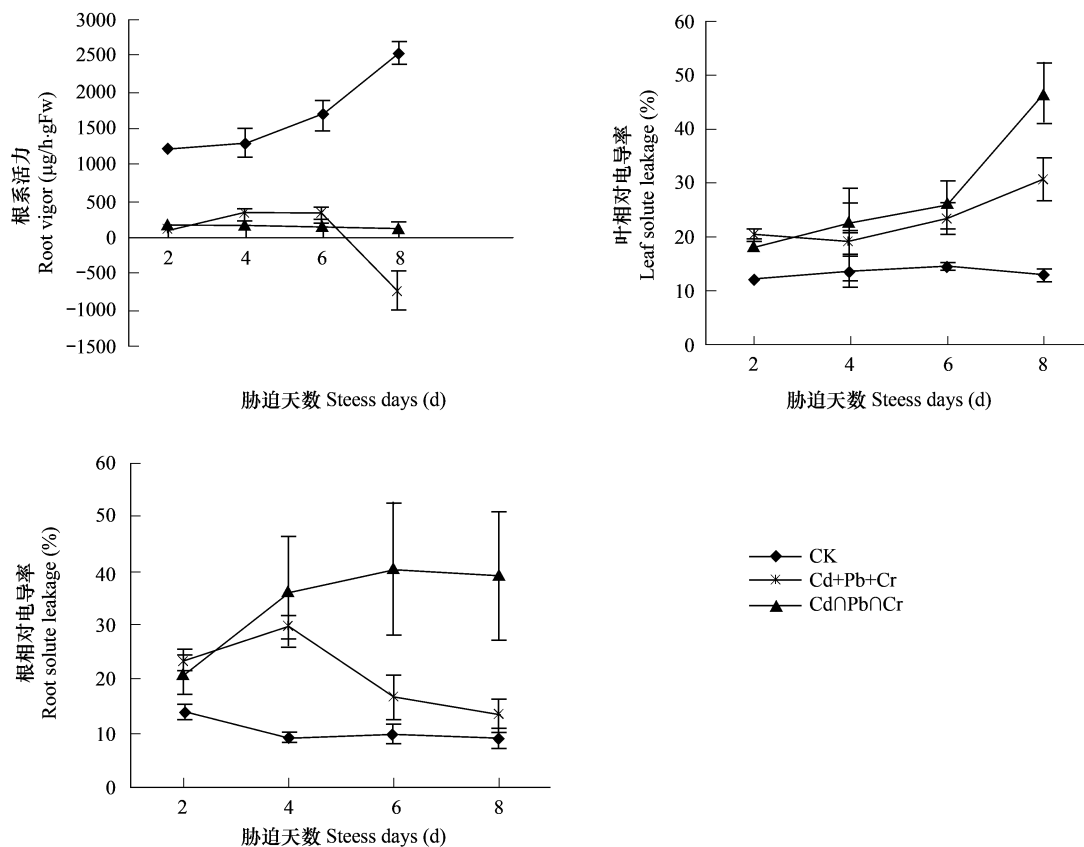


图 4 镉铅铬三元胁迫对小麦根系活力、叶片与根系电导率的互动动态

Fig. 4 Interactions among Cd, Pb and Cr on root vigor, leaf and root solute leakage in wheat

2.4 小麦幼苗 POD 同工酶谱的变化

镉铅铬三元胁迫条件下, 小麦幼苗叶片 POD 同工酶谱与对照相比, 新增了一条 G 带和一条 H 带, 该带在其它任何单元胁迫时均未出现。三元胁迫还引起 C 带、E 带的消失(表 3)。

表3 镉铅铬三元胁迫对小麦叶片 POD 同工酶谱的影响

Table 3 Effects of Cd, Pb and Cr on wheat leaf POD isoenzyme spectrum

处理 Treatment	酶带 Bands							
	A	B	C	D	E	F	G	H
CK	0.09	X	0.26	0.32	0.37	0.45	X	X
Cd	0.08	0.15	0.27	0.31	Y	0.44	X	X
Pb	0.10	X	Y	0.33	0.38	0.48	X	X
Cr	0.10	X	0.28	0.33	0.38	0.47	X	X
Cd∩Pb∩Cr	0.08	X	Y	0.31	Y	0.46	0.50	0.60

X 表示该酶带不存在, Y 表示该酶带消失 X denotes that the band of enzymogram was nonexistent, Y denotes that the band of enzymogram disappeared

3 讨论

叶绿素是植物进行光合作用的主要色素,其含量的高低直接影响植物正常的光合作用甚至新陈代谢。叶绿素含量的变化,既可反映植物叶片光合作用功能的强弱,也可用以表征逆境胁迫下植物组织、器官的衰老状况^[11]。从本实验研究结果来看,铅对小麦的影响和伤害作用明显大于镉和铬,镉铅铬复合胁迫与单一胁迫一样,降低了小麦幼苗叶绿素总量,这3种重金属的互作以负值为主,与单独作用方向相同,属于第1类互作。说明镉铅铬共存,彼此增强了对方的抑制作用,即互相以协同方式发生影响,加剧了叶绿素总量的降低,最终出现了联合作用大于单独作用之和的结局。

丙二醛含量高低和细胞质膜透性变化是反映细胞膜脂过氧化作用强弱和质膜破坏程度的重要指标^[20]。本试验条件下,镉铅铬复合胁迫叶片中MDA含量低于相应浓度单一处理,显著低于三者单独作用之和,且与对照处理之间差异不显著。说明3种重金属元素之间表现为拮抗作用,在一定程度上缓解了单一元素对叶片的氧化胁迫作用。植物组织外渗液电导率的变化,在一定程度上反映了植物组织受害后的生理变化,与植物的伤害程度和抗性强弱有密切关系^[21],本实验结果显示镉铅铬复合胁迫细胞膜系统伤害的程度超过了单独作用之和。

蛋白质作为生命活动的体现者,它的含量、特征以及变化是由植物发育进程所决定的,植物对胁迫反应的结果,必然会在蛋白质含量和组成上有所体现。本文结果表明,3种重金属之间在作用于幼苗可溶性蛋白方面存在正互作,尤其在第4天以后更加突出,这种正互作抵消了相当部分抑制作用。

镉铅铬胁迫导致叶片气孔阻力增大和渗透势下降。气孔阻力增加,表明胁迫程度增加,造成二氧化碳进入细胞的阻力增大,势必对光合作用产生不良影响,其中Cr的胁迫程度最大。渗透势的绝对值越大,说明渗透胁迫越严重。镉铅铬三元胁迫降低了小麦幼苗叶片的渗透势,降低幅度大于它们单独作用的和,这是由于三者之间有较大的负互作的缘故,互作方向与各自单独作用的方向相同,因此,一种重金属的作用因其它两种重金属的存在而得到加强(图3)。

表4为镉铅铬三元污染胁迫条件下小麦幼苗不同性状的抑制率,最大值最小值指全部处理的抑制率之最大和最小值。抑制率越高,说明性状对胁迫越敏感,最大与最小值的差异越小,说明一致性越好。依据作物生理特性在镉铅铬三元污染胁迫条件下的动态反应敏感性与一致性,认为根系活力、可溶性蛋白质含量、叶片的叶绿素含量、MDA、组织渗透势、组织电导率和气孔阻力都可以作为有毒重金属离子复合污染胁迫对小麦伤害的生理监测指标。结合与重金属单一污染胁迫的单独作用之和进行比较的结果,上述指标中叶绿素含量、组织渗透势和组织电导率对复合污染胁迫更为敏感,应是复合污染胁迫监测的首选指标。

本研究发现,镉铅铬复合污染胁迫时POD同工酶的消长变化不同于镉铅铬单一污染胁迫暗示着它们的伤害机理不同。在生理性状上这3种重金属之间的相互作用十分复杂,表现出同差型、正反型、零差型和同等型的变化^[19],并且随胁迫时间而发生改变,其原因有待于进一步研究。镉铅铬共存状态对小麦毒害的协同、促进和加和作用,在生态环境科学研究中不容忽视。

表 4 镉铅铬三元污染胁迫条件下小麦幼苗不同性状的抑制率

Table 4 Inhibitions of multiple stresses by Cd, Pb and Cr on some growth traits of wheat seedlings

性状 Trait	最小值 Minimum	最大值 Maximum	最大值-最小值 Maximum- Minimum	平均值 Average
气孔阻力 Stomatal resistance	-597.42%	-336.06%	261.36%	-492.92%
根系电导率 Root solute leakage	-126.77%	-30.50%	96.27%	-85.65%
叶片电导率 Leaf solute leakage	-101.00%	-25.39%	75.61%	-48.06%
叶片渗透势 Leaf osmotic potential	-60.74%	-5.09%	55.65%	-23.22%
MDA 含量 MDA content	-32.22%	-13.07%	19.15%	-20.75%
可溶性蛋白质含量 Soluble Protein content	7.27%	11.94%	4.67%	9.87%
叶绿素总量 Chlorophyll content	16.41%	42.31%	25.90%	31.12%
根系活力 Root vigor	39.81%	55.87%	16.06%	45.61%

负抑制率表示增加了某性状观察值的绝对值 Negative values of inhibitions indicate that absolute values of observations on a trait are increased because of multiple stresses by Cd and Pb and Cr

References:

- [1] Chen M X, D ilibar SUL TAN, Wan J D. Research progress on heavy metal pollution in sewage irrigation. Agricultural Research in the Arid Areas, 2006, 24(2): 200 — 204.
- [2] Zhang L H, Li P J, Li X M, Meng X L, Xu C B. Effects of cadmium stress on the growth and physiological characteristics of wheat seedlings. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24 (4): 458 — 460.
- [3] Chen J, Gao Y J. Progress in Studies on Cadmium Toxicity to Psysiology and Ecology Effect of Wheat. Research of Soil and Water Conservation, 2006, 13; (6) 218 — 221.
- [4] Yang J R, Jiang W R. Reseach of Tolerance mechanism of Cd pollution. Agro-environmental Protection, 1996, 15(3): 97 — 101.
- [5] Li F Y. The influences of Pd lead on wheat seedlings some physiological characteristics. Henan Science, 2001, 19(2) 209 — 211.
- [6] Jalil A, Selles F, Clarke J M. Effect of cadmium on growth and the uptake of cadmium and other elements by durum wheat. J Plant Nutr, 1994, 17 (11): 1839 — 1858.
- [7] Ranieri A, Castagan A, Scebba F. Oxidative stress and phytochelatin characterization in bread wheat exposed to cadmium excess. Plant Physiology and Biochemistry, 2005, 43; 45 — 54.
- [8] Chen S H, Sun T H, Zhou Q X. Effects of combined pollution of heavy metals on root vitality of wheat seeds. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(4): 577 — 580.
- [9] LI C X, LU X Y, Shao Y, *et al.* Effect of As-Zn combined pollution on growth and physiological and biochemical reations of wheat seedling. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25(1): 43 — 48.
- [10] Wang Y B, Liu D Y. Effectof Cu and As and their combination pollution on eco-physiological index of wheat. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(5): 773 — 776.
- [11] Li Z Z, Wu J, Tang Y, *et al.* Effect of Pb, Zn and their interaction on the chlorophyll content and an tioxidant enzyme systems of *Houttuynia cordata* Thunb. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(12): 5441 — 5446.
- [12] 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(2): 2033 — 2038.
- [13] Zhu H X, Chen X M, Ge C L. Effect of combined heavy metals pollution on the growth of wheat. Ecology and Environment, 2006, 15(3): 543 — 546.
- [14] Yang J Z, Hao J P, Feng L R. The research of Cd, Cr and Pb stress to germination of plant- the application of biplot in eco-toxicological test analysis. Journal of Pingdingshan Teachers College, 2004, 19(5): 1 — 4.
- [15] Yang J Z, Feng L R. The single effect of Cd, Cr and Pb pollution to germination of wheat and maize. Acta Agriculturae Boreali-Sinica (supplement), 2002, 17, 52 — 56.
- [16] Xiong W W, Wu S H, Xu Y T, *et al.* The joint toxicity effects of cadmium, chromium and lead on luminescent bacteria. Ecology and Environment, 2007, 16(4): 1085 — 1087.
- [17] Zou Q. Plant physiology experimental tutorial. Beijing: Chinese Agricultural Press, 2000.
- [18] Cao Y Y, Zhao H. Protective roles of brassinolide in rice seedlings under heat stress. Chinese J Rice Sci, 2007, 21(5) 525 — 529.

- [19] Yang J Z, Hao J P. The classification method of interaction in combined pollution system. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2002, 10(4): 131 – 133.
- [20] Wang X, Guo P Y, Yuan X Y, *et al.* Effect of 2,4-D on the antioxidative enzyme activities and lipid peroxidation in Opium Poppy (*Papaver somniferum* L.). *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(3): 1098 – 1103.
- [21] Zhou S B, Wang C J, Yang H J, *et al.* Stress responses and bioaccumulation of heavy metals by *Zizania latifolia* and *Acorus calamus*. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(1): 281 – 287.

参考文献:

- [1] 陈牧霞, 地里拜尔·苏力坦, 王吉德. 污水灌溉重金属污染研究进展. *干旱地区农业研究*, 2006, 24(2): 200 ~ 204.
- [2] 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. *生态学杂志*, 2005, 24(4): 458 ~ 460.
- [3] 程杰, 高压军. 镉毒害对小麦生理生态效应的研究进展. *水土保持研究*, 2006, 13(6): 218 ~ 221.
- [4] 杨居荣, 蒋婉茹. 小麦耐受 Cd 胁迫的生理生化机理探索. *农业环境保护*, 1996, 15(3): 97 ~ 101.
- [5] 李方远. 铅对小麦幼苗某些生理特性的影响. *河南科学*, 2001, 19(2): 209 ~ 211.
- [8] 陈素华, 孙铁珩, 周启星. 重金属复合污染对小麦种子根活力的影响. *应用生态学报*, 2003, 14(4): 577 ~ 580.
- [9] 李春喜, 鲁旭阳, 邵云, 等. As、Zn 复合污染对小麦幼苗生长及生理生化反应的影响. *农业环境科学学报*, 2006, 25(1): 43 ~ 48.
- [10] 王友保, 刘登义. Cu、As 及其复合污染对小麦生理生态指标的影响. *应用生态学报*, 2001, 12(5): 773 ~ 776.
- [11] 李铮铮, 伍钧, 唐亚, 等. 铅、锌及其交互作用对鱼腥草叶绿素含量及抗氧化酶系统的影响. *生态学报*, 2007, 27(12): 5441 ~ 5446.
- [12] 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.
- [13] 朱红霞, 陈效民, 葛才林. 重金属复合污染对小麦幼苗生长的影响. *生态环境*, 2006, 15(3): 543 ~ 546.
- [14] 杨锦忠, 郝建平, 冯两蕊. 镉铬铅胁迫对植物萌芽影响的研究-双标图分析在生态毒理试验研究中的应用. *平顶山师专学报*, 2004, 19(5): 1 ~ 4.
- [15] 杨锦忠, 冯两蕊. 镉、铬、铅污染对小麦、玉米萌芽的单独作用. *华北农学报* (增), 2002, 17, 52 ~ 56.
- [16] 熊蔚蔚, 吴淑杭, 徐亚同, 等. 等毒性配比法研究镉、铬和铅对淡水发光细菌的联合毒性. *生态环境* 2007, 16(4): 1085 ~ 1087.
- [17] 邹琦. *植物生理学实验指导*. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [18] 曹云英, 赵华. 高温胁迫下油菜素内酯对水稻幼苗的保护作用. *中国水稻科学*, 2007, 21(5): 525 ~ 529.
- [19] 杨锦忠, 郝建平. 复合污染系统中交互作用分类方法研究. *中国生态农业学报*, 2002, 10(4): 131 ~ 133.
- [20] 王鑫, 郭平毅, 原向阳, 等. 2,4-D 丁酯对黑藻保护酶活性及脂质过氧化作用的影响. *生态学报*, 2008, 28(3): 1098 ~ 1103.
- [21] 周守标, 王春景, 杨海军, 等. 菰和菖蒲对重金属的胁迫反应及其富集能力. *生态学报*, 2007, 27(1): 281 ~ 287.