第 20 卷第 4 期
2000 年 7 月

生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA

Vol.20,No.4
July.,2000

小麦根际铅、镉的生态效应

林 琦[1],陈英旭[1],陈怀满[2],郑春荣[2]
(1. 浙江大学华家池校区环境保护系,杭州 310029;2. 中国科学院南京土壤研究所,南京 210008)

摘要:通过水培试验研究小麦根际铅、镉的生态效应,研究表明,培养介质由于铅、镉胁迫,介质 pH 较对照发生变化,铅处理使介质 pH 上升,而镉处理介质 pH 还是下降,只是较对照变化缓慢;铅、镉胁迫根系泌出糖类含量增高,且铅-镉交互作用对糖泌出的影响也达到了显著水平;根系形貌照相观察及电子探针能谱分析则表明,铅、镉对根系的毒害机制可能不同。

关键词:铅;镉;pH 变化;糖泌出;能谱分析

The ecological effects of Pb and Cd on the root activities of wheat

LIN Qi, CHEN Ying-Xu, CHEN Huai-Man, ZHENG Chun-Rong (*Department of Environmental Protection, Zhejiang University (Huajiachi), Hangzhou 310029, China; Institute of Soil Science, the Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*)

Abstract: Effect of Pb, Cd on wheat was studied using hydroponic experiments. The results showed that root activities, i.e. the release of proton, exudate of sugar, were related to the contents of Pb, Cd. The pH in the growth medium increased with the increasing concentration of Pb, and decreased with the increasing concentration of Cd in solution. The quantity of sugar exudate increased with Pb, Cd increase and was affected distinctively by Pb-Cd interaction. The changes in the distribution patterns of Cd and Pb were also studied using an electron probe X-ray microanalyzer. The content of Cd was lower in the stelbe than that in the cortex.

Key words: Pb; Cd; variations of pH; exudate of sugar; X-ray microanalysis
文章编号:1000-0933(2000)04-0000-00 **中图分类号**:X171 **文献标识码**:A

随着水俣病,痛痛病等环境公害的出现,人们对有毒重金属系统的行为及其循环作了大量的研究,但对植物根系产生毒害的生理机制仍不清楚。根系细胞膜直接参于根部对溶质的吸收、运输和调控,是溶质向细胞质扩散或从细胞质向细胞壁和周围溶液扩散的真正屏障,在逆境条件下,植物体内活性氧代谢系统的平衡常常被破坏,因而增加了活性氧如 O_2^-、H_2O_2、·OH、$^1O_2$ 的产生量,同时也使活性氧清除剂中 SOD、CAT、POD、VitE、GSH 等的结构破坏,活性或含量水平下降[1],体内活性氧含量增高能启动膜脂过氧化或膜脂脂化作用,从而破坏膜结构,电解质及其某些小分子有机物大量渗漏,细胞物质交换平衡破坏,造成一系列生理生化变化。同时,植株对逆境也有一定的承受能力,产生"生物反馈调节",改变根际分泌特征来适应胁迫[2]。本文研究重金属铅、镉胁迫下小麦根际 pH 变化,根系分泌糖类,以及根系形貌特征,铅、镉的分布规律等,以期反映铅、镉胁迫下根系分泌情况、细胞膜透性情况以及根系效应,为探讨铅、镉毒害机理提供一定科学依据。

1 材料与方法

1.1 培养试验

基金项目:国家自然科学基金和省自然科学基金资助项目
收稿日期:1998-04-30;修订日期:1999-04-12
作者简介:林 琦(1970~),女,温岭人,博士生。从事环境污染模拟与控制方面的研究。
万方数据

1.1.1　营养液配制　400μmol/L $CaCl_2$，750μmol/L KNO_3，100μmol/L $MgCl_2$ + 不同重金属处理(铅，镉以 Pb-Cl_2、$CdCl_2$ 形态加入)。

1.1.2　试验处理　供试小麦品种为郑州 8329，种子经消毒，于培养箱中催芽，播入尼龙网上(200ml 左右溶液的小杯)培养，重复 4 个，培养时间 12d。除去胚乳，用水洗麦苗根，置 20℃恒温箱 24h，于去离子水中收集根系分泌物。10ml/5 株，测其总糖含量。

1.2　化学分析

1.2.1　pH　采用 DMP-2 数字 pH 计测定。

1.2.2　总糖测定　采用硫酸苯酚法[3,4]。

1.2.3　植株测定　用 HNO_3-$HClO_4$ 消化，原子吸收光谱法测 Pb、Cd 含量。

1.3　能谱分析样品制备

小麦经消毒，于培养箱中催芽，插入尼龙网上(200ml 左右溶液的小杯)培养，培养液配制如上，重金属处理浓度为：Pb 0 + Cd 0，Pb 10mg/L，Cd 2mg/L，Pb 10mg/L + Cd 2mg/L。待作物生长 20 d 后，用双面刀片先取下离根尖 2 ~ 3cm 的根段，将根段在 5% 的琼脂中(约 35℃)，迅速浸一下后插入样品座的小孔中，用双面刀片切一横段后，置于铜柱上，迅速倒入液氮，待温度达到平衡后，将铜柱块置于高真空镀膜仪中抽高真空，至真空度大于 10^{-4}mm 汞柱。经喷镀碳膜后，在扫描电子显微镜下观察铅、镉的能谱。分析电压 20KV，电流 1.5×10^{-10}A。待分析完毕后，刮掉碳膜，再喷镀金膜，在扫描电子显微镜下观察根系形貌，照相记录。分析电压 12KV。

2　结果与讨论

2.1　介质 pH 变化

将小麦催芽、播种，分别于培养时间的第 0、4、6、8、10 天测培养介质 PH 值，从图 1 可以看出，正常植株溶液的 pH 先迅速下降，而后马上开始回升，Cd 处理介质 pH 则缓慢下降，而后回升，浓度越高，变化越缓慢，Pb 处理则一开始就使溶液 pH 有所上升(图 2)。但变化幅度很小，基本是在 pH 6 左右波动。看来重金属 Pb、Cd 在介质中都有延缓或减轻根际酸化的作用。但两者的机制可能有所不同。关于 Cd 的研究表明，Cd 对根系透根电位和 H^+ 分泌有抑制作用[5]，在培养液中 50μM 的 Cd^{2+} 能抑制质子泵 60%[6]。本实验结果认为，根系分泌质子的速度变慢(图 1)。Cd1mg/L 在第 6 天，Cd2mg/L 在第 10 天以后介质 pH 降到最低(对照在第 4 天就达最低)。而 Pb 处理表观看来 pH 是上升的，这样有利于 Pb^{2+} 呈羟基铅化合物而沉淀，进而使作物免于吸收过量 Pb 而产生中毒。Pb、Cd 共存时，由于添加 Pb 过大，致使 pH 变化总趋势与 Cd 处理截然不同，而接近 Pb 单独处理，只是当 Cd 共存时，pH 达最高值稍滞后。

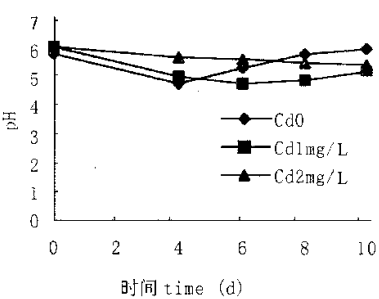


图 1　镉胁迫下小麦根外介质 pH 的变化

Fig.1　Effect of Cd on the variance of pH in hydroponic medium of wheat

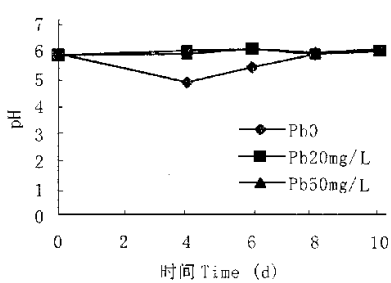


图 2　铅胁迫下小麦根外介质 pH 的变化

Fig.2　Effect of Pb on the variance of pH in hydroponic medium of wheat

2.2　糖类分泌情况

由图 3 可知，铅、镉处理均导致根系糖的泌出量增加，浓度越高，糖的泌出量越多，对此数据进行方差分析，铅、镉对根系糖的泌出量影响都达到极显著，F 值 Pb > Cd($F_{pb} = 212.92$，$F_{cd} = 23.894$，$p < 0.01$，$n = 16$)，铅与镉的交互作用达显著($F_{pb\text{-}cd} = 5.681$，$p < 0.05$，$n = 16$)。不同浓度间的检验结果如表 1。

万方数据

2.3 根系形貌照相观察

照片1是重金属铅、镉胁迫下小麦根系生长情况，从中可以看出，铅、镉都抑制根系的生长。4mg/L Pb处理，根系生长虽受抑制(表现在根长)，但根尖处受害症状并不明显，当Pb达10mg/L时，不仅根系严重抑制生长，且根尖膨大，呈黄色。镉处理(1,2mg/L)则根系受害均很严重，具体也表现在根长短，根尖膨大，呈黄色。此外，铅与镉的交互作用也有所体现，铅4mg/L时，镉处理加剧根受害症状，而铅达10mg/L时，镉处理由于铅的高度抑制几乎没有多大差别，镉处理溶液则随铅浓度的增大，根系抑制作用加强。

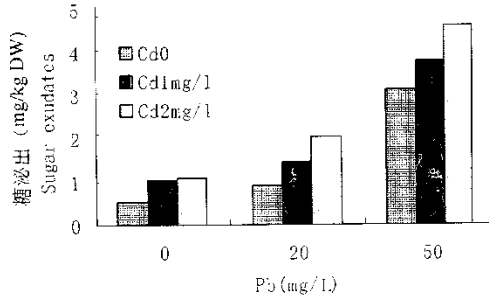


图3 铅、镉胁迫下小麦根系分泌糖类状况

Fig.3 Exudate of sugar after inoculation of wheat roots with Pb and Cd

图5(a)是Pb在小麦根内的分布情况，其规律与Cd的分布规律差异极大，中柱与皮层Pb的分配明显不同，皮层远远高于中柱，约为中柱含Pb量的3倍。植物体内铅的这种分配规律，正好解释该元素在植物体内的累积情况。当小麦受铅、镉共同胁迫时，由于Cd的存在，根内Pb的分配规律与单元素存在时也有较大的差异(图5(b))，Pb的百分含量以外皮层为最高，但中柱和内皮层的含Pb量较单元素时高，表皮含Pb量较单元素时低。从而可以得出这样的结论：当Cd共同作用时，促进Pb从小麦植株的表皮进入内部组织。使内外层含Pb差异减少。

2.4 根系扫描电镜观察

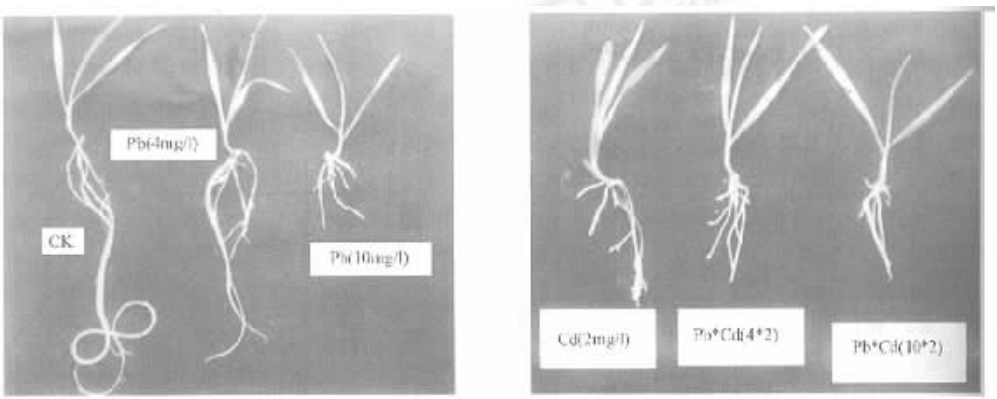
图4(a)是Cd在小麦根系内的分布情况，各层内Cd的含量差异不大。但植物受Pb，Cd共同胁迫处理后，根系内Cd的含量分布却发生了显著的变化(图4(b))。与单元素Cd处理植株相比，中柱Cd浓度升高，皮层则降低，中柱与皮层间差异显著，中柱>皮层。显然，Cd元素在根内的分布，受共存元素Pb的影响非常明显。由于Cd容易被小麦所吸收，而Pb较难。在内层根系内Cd所占百分数含量高于Pb，而在外层，由于Pb的富集，致使该层以Pb的含量为多。

表1 不同浓度的显著性检验(小麦)

Table 1 Significant test among various concentration

Pb(mg/l)	0	20	50
	a	b	c
Cd(mg/l)	0	1	2
	a	b	b

* 横排间同一字母表示不显著 A significant difference among treatments is indicated by different letters on the same line.



照片1 重金属铅、镉胁迫下小麦根系生长情况

Pic.1 Growth of wheat stressed by Pb and Cd

万方数据

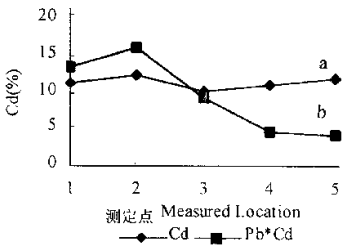


图 4　镉在小麦根系内的分布情况

Fig.4　Distribution of Cd in wheat roots

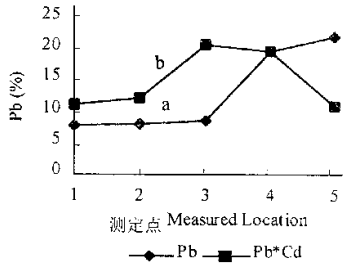


图 5　铅在小麦根系内的分布情况

Fig.5　Distribution of Pb in wheat roots

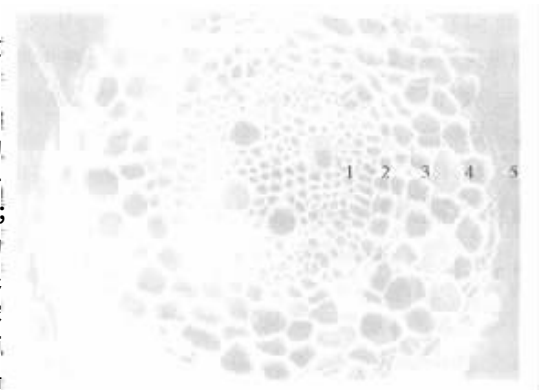
2.5　植物效应

表 2 是铅、镉处理麦苗的烘干重，当铅、镉单元素存在时，随培养液中铅、镉浓度的增加，植株干重有所下降。20、50mg/L Pb 处理，麦苗的烘干重分别为对照的 39.7%，36.3%；1，2mg/L Cd 处理，麦苗的烘干重分别为对照的 61.4%，50.7%。即本实验条件下，铅处理的毒害程度大于镉处理，因而上述得出的结论：介质 pH 变化铅有异于镉；铅对根系分泌糖类的影响大于镉，是否与铅、镉对小麦的不同毒害程度有关，还有待于进一步研究。铅、镉复合处理时，随加入铅浓度增加，麦苗烘干重下降，然而同一铅浓度，随镉的加入，麦苗烘干重增加，且随着镉浓度的增加而增加，即镉共存，促进铅进入内部组织，因此，认为镉对铅毒害能力的影响可能缘于其分室效应。

表 2　铅、镉对麦苗干重的影响(g/20 株)

Table 2　Effect of Cd and Pb on the dry weight of wheat seedling(g/20plant)

Cd	Pb		
	0	20	50
0	0.692	0.275	0.251
1	0.425	0.287	0.253
2	0.351	0.303	0.285



照片 2　图 4、5 测定对应点

Pic.2　Profile of measured location in Fig.4,5

表 3 是小麦对铅、镉的吸收情况，从中也可看出，两元素的共存使植株的吸收能力发生变化，当 Cd 同为 1mg/L 处理时，对应 Pb20，50mg/L 处理，植株体内含镉量分别为 65.8，36.1mg/kg。当 Cd 同为 2mg/L 处理时，对应 Pb20，50mg/L 处理，植株体内含镉量分别为 115.2，66.6mg/kg。即铅复合存在，镉的吸入随铅增加而减少；而镉复合处理对植株吸收的影响则表现得较为复杂。20mg/L Pb 处理时，对应 0，1，2mg/L Cd 处理，植株体内含铅量分别为 3526，7018，5718mg/kg，即较之单元素，铅、镉复合处理使植株吸收铅能力增加，这可能与镉促使铅在植株体内迁移有关(能谱分析结果)。然而，随镉浓度增加，植株体内含铅量减少，这说明了植株对铅的吸收除了存在协同作用外，还可能存在两元素的竞争吸收过程，当 Pb 50mg/L 处理时，对应 0，1，2mg/L Cd 处理，植株体内含铅量分别为 10498，9718，9432mg/kg，即随镉浓度增加，植株吸收铅能力下降，原因可能由于过高的铅浓度，使根系生长严重受抑制，生理代谢过程受到影响，镉对铅的协同输送因此而减弱。

万方数据

表3 培养液中镉、铅浓度与麦苗镉、铅含量之间的关系(mg/kg)

Table 3 Relation between Cd,Pb concentration in solution and Cd,Pb content of wheat seedling

Cd	Pb(mg/L) 0		20		50	
	含铅量 Pb content	含镉量 Cd content	含铅量 Pb content	含镉量 Cd content	含铅量 Pb content	含镉量 Cd content
0	17.8	1.1	3526	0.3	10498	0.9
1	23.6	110	7018	65.8	9718	36.1
2	21.9	152	5718	115.2	9432	66.6

3 结论

(1)小麦培养介质由于铅、镉胁迫,介质 pH 发生变化。总的看来,都有减轻根际酸化作用,但两者的表观现象不同,铅处理使介质 pH 上升,而镉处理介质 pH 还是下降,只是较对照变化缓慢。

(2)根系分泌物糖泌出的测定表明,较高浓度的铅、镉处理,可能导致根系质膜的完整性和选择性受损,透性增大。

(3)镉在根系各层内的分布较均一,铅在各层内的分布差异很大,皮层远大于中柱。同时铅、镉复合处理对铅、镉在根系内的分布产生显著影响。镉有利于铅向内层迁移,铅使内外层镉差异增大。

参考文献

[1] 陈新平,张福锁.养分胁迫引起自由基对植物细胞伤害的机理.土壤学进展,1994,**22**(6):4~19.

[2] 陈能场,童庆宣.根际环境在环境科学中的地位.生态学杂志,1994,**13**(3):217~219.

[3] Dubis M,Gilles K,Hamilton J,*et al*. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Anal Chem*,1956,**28**:350~356.

[4] 浙江农业大学编.基础生物化学实验.杭州:浙江农业大学出版社,1990.

[5] Kennedy C D and Gonsalves F A N. The action of divalent Zn,Cd,Hg,Cu and Pb on the transroot potential and H^+ efflux of excised roots. *J. Exp. Bot.*,1987,**38**:800~817.

[6] Tu S I. Characterization of the effects of divalent cations on the coupled activities of the H^+-ATP_{ase} in Tonoplast Vesicles. *Plant physiol*,1987,**90**:1636~1643.

万方数据