DOI:10.15933/j.cnki.1004-3268.2007.05.006
河南农业科学

土壤—小麦系统中5种重金属含量的相关分析

邵　云,李春喜,李向力,姜丽娜,鲁旭阳
(河南师范大学 生命科学学院,河南 新乡 453007)

摘要:采用盆栽方法,对土壤和小麦三叶期地上部分、成熟期籽粒的Cd,Pb,As,Cu,Zn 5种重金属含量进行了相关分析,结果表明,三叶期地上部分和成熟期籽粒中5种重金属含量均随土壤重金属含量的增大而逐渐增大,其中,籽粒与土壤重金属含量之间具有极显著的二次函数回归关系,而籽粒与三叶期地上部分重金属含量之间有着极显著的直线回归关系;在土壤—小麦系统中,5种重金属在籽粒中的富集能力依次为:Zn>Cd>Cu>As>Pb。

关键词:土壤—小麦系统;重金属;相关分析
中图分类号:S511.1　　文献标识码:A　　文章编号:1004-3268(2007)05-0025-04

Correlation Analysis among the Contents of Five Heavy Metals in Soil-wheat System

SHAO Yun, LI Chun-xi, LI Xiang-li, JIANG Li-na, LU Xu-yang
(College of Life Sciences, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

Abstract: Different heavy metals have different behavior in soil-wheat system. The pot experiment of Zhengmai—9023 was carried out during 2002—2004 at Henan Normal University. The contents of Cd, Pb, As, Cu and Zn in soil, above-ground part at three-leaf stage and grains at mature stage were analyzed. The results showed that the contents of these five heavy metals in above-ground part at three-leaf stage and grains at mature stage were all raised gradually with the increasing concentration of heavy metals in soil. The statistic analysis presented a highly significant quadratic regression relation between contents of heavy metals in grains and in soil, and a highly significant liner regression relation between contents of heavy metals in grains and in above-ground part. The order of enrichment ability of the five heavy metals in grains was Zn>Cd>Cu>As>Pb.

Key words: Soil-wheat system; Heavy metals; Correlation

重金属是涉及农产品安全问题的主要污染物之一,它具有很强的蓄积性、隐蔽性、不可逆性和长期性[1]。重金属在土壤中移动性较小,主要积累在0~20cm耕作层的土壤中,同时,其性质稳定,难以降解,半衰期大多较长,所以土壤一旦遭受重金属污染就会不断积累,难以治理,进而通过食物链进行生物富集,对生物体及人体造成潜在性的危害[2]。目前,关于土壤—植物系统重金属迁移及其行为已有一些研究,但小麦籽粒重金属含量的方程拟合研究未见报道。笔者就Cd,Pb,As,Cu,Zn 5种重金属在土壤—小麦系统中的含量、富集系数变化情况进行了研究和统计分析,并建立回归方程,以期为土壤—小麦系统中土壤环境质量监测和籽粒重金属污染早期预报提供理论支撑。

1　材料和方法

1.1　试验方法

试验采用露天盆栽的方法,于2002~2004年在

收稿日期:2006-10-10
基金项目:国家"十五"重大科技专项(2001BA804A30);河南省自然科学基金项目(0411031800);河南师范大学应用科学与技术研究基金项目(2004Y02)资助
作者简介:邵　云(1973-),女,山东单县人,讲师,硕士,主要从事小麦生理生态研究工作。

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

河南师范大学小麦试验田进行，供试小麦（*Triticum aestivum L.*）品种为郑麦 9023。试验土壤类型为两合土，pH 8.0～8.5。盆栽用直径 28 cm 高 30 cm 的塑料花盆，每盆装土 10 kg（干重），每盆底施有机肥 15.9 g，磷酸二铵 2.6 g，钾肥 1.6 g，尿素 1.7 g，拔节期追施尿素 1.8 g。播种前分别将分析纯的 $CdCl_2$，$Pb(CH_3COO)_2$，$NaAsO_2$，$CuSO_4$，$ZnSO_4$ 5 种重金属盐添加到土壤中，充分混合均匀，每个处理设置 7 个梯度（表 1），5 次重复。小麦于 10 月中旬播种，每盆点播 40 粒种子，播深 5 cm，于三叶期定苗 10 株，取剔除的麦苗的地上部分；翌年 6 月初收获，取小麦籽粒及相应盆栽土壤进行分析。

表 **1** 5 种重金属浓度处理设置 （mg/kg）

Cd		Pd		As		Cu		Zn	
添加值	实测值	添加值	实测值	添加值	实测值	添加值	实测值	添加值	实测值
0	0.562	0	32.547	0	7.688	0	84.838	0	130.712
0.15	0.688	150	298.015	5	11.319	25	112.839	80	282.141
0.30	0.826	300	418.020	15	18.305	50	138.068	160	344.232
0.45	1.130	500	629.112	30	34.202	75	142.531	240	440.692
0.60	1.576	1000	1102.036	50	49.961	100	180.591	320	502.355
0.75	1.676	2000	2392.565	75	72.065	125	207.210	400	545.659
0.90	1.825	4000	6129.055	100	77.700	150	243.795	480	607.068

1.2 测试方法

植物样品依次用自来水、蒸馏水、去离子水冲洗干净，于 60～80 ℃烘至恒重，粉碎，过 0.40 mm 孔径筛，采用 $HNO_3-H_2O_2-HClO_4$ 酸消解法消解；土壤样品充分混合后自然风干，粉碎，过 0.15 mm 孔径筛，采用王水－$HClO_4$ 消解法消解。消解后的溶液用原子吸收分光光度仪（日本 HITACHI 公司生产，Z－5000 型）测定样品中 Cd，Pb，Cu，Zn 的含量[3]，用电感耦合等离子体原子发射光谱仪（美国 TJA 公司生产，IRIS Advantage 型）测定样品中 As 的含量[4]。

试验结果应用 Excel 和 SPSS 统计软件进行分析。

2 结果与分析

2.1 土壤、小麦三叶期地上部分、成熟期籽粒中 5 种重金属含量变化及其相关分析

表 2 结果表明，随着土壤中 Cd，Pb，As，Cu，Zn

表 **2** 土壤、小麦三叶期地上部分、成熟期籽粒中 **5** 种重金属含量及籽粒富集系数 （mg/kg）

重金属元素	取样部位	不同浓度梯度重金属含量						
Cd	土壤	0.562	0.688	0.826	1.130	1.576	1.676	1.825
	三叶期地上部分	1.362	1.737	2.140	2.343	3.364	3.674	4.107
	籽粒	0.119	0.192	0.259	0.400	0.482	0.658	0.728
	籽粒富集系数（%）	21.121	27.896	31.284	35.367	30.615	39.277	39.887
Pb	土壤	32.547	298.015	418.020	629.112	1102.036	2392.565	6129.055
	三叶期地上部分	1.225	4.361	5.771	10.444	15.489	19.861	28.271
	籽粒	0.021	0.189	0.261	0.481	0.845	1.416	2.312
	籽粒富集系数（%）	0.065	0.063	0.062	0.076	0.077	0.059	0.038
As	土壤	7.688	11.319	18.305	34.202	49.961	72.065	77.700
	三叶期地上部分	3.072	3.719	6.652	12.482	19.477	25.706	34.689
	籽粒	0.217	0.269	0.461	0.721	1.105	1.110	1.395
	籽粒富集系数（%）	2.822	2.376	2.518	2.108	2.212	1.540	1.795
Cu	土壤	84.838	112.839	138.068	142.531	180.591	207.210	243.795
	三叶期地上部分	9.691	11.134	12.600	12.948	15.181	16.309	17.335
	籽粒	5.650	5.773	5.961	6.208	6.824	7.351	8.432
	籽粒富集系数（%）	6.659	5.116	4.317	4.355	3.779	3.547	3.458
Zn	土壤	130.712	282.141	344.232	440.692	502.355	545.659	607.068
	三叶期地上部分	108.308	148.964	261.563	339.147	339.204	382.752	421.279
	籽粒	79.094	115.279	122.504	159.585	199.624	204.574	236.646
	籽粒富集系数（%）	60.510	40.859	35.588	36.212	39.738	37.491	38.982

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

含量(实测值)的逐渐增大,小麦三叶期地上部分和成熟期籽粒中相应重金属含量均呈现逐渐增大的趋势。经 Pearson 相关分析可知(表 3),土壤(实测值)、三叶期地上部分、成熟期籽粒3个指标间的 Cd,Pb,As,Cu,Zn 含量均具有极显著的正相关关系,相关系数都在 0.9 以上。

表 3 土壤、三叶期地上部分、成熟期籽粒 5 种重金属含量相关分析

重金属元素	取样部位	土壤	三叶期地上部分	籽粒
Cd	土壤	1		
	三叶期地上部分	0.991**	1	
	籽粒	0.980**	0.981**	1
Pb	土壤	1		
	三叶期地上部分	0.917**	1	
	籽粒	0.968**	0.984**	1
As	土壤	1		
	三叶期地上部分	0.986**	1	
	籽粒	0.973**	0.976**	1
Cu	土壤	1		
	三叶期地上部分	0.993**	1	
	籽粒	0.970**	0.941**	1
Zn	土壤	1		
	三叶期地上部分	0.975**	1	
	籽粒	0.982**	0.945**	1

注:** 表示在 0.01 水平上达到显著。下同

2.2 小麦籽粒富集系数变化

富集系数(又称吸收系数)即植株某器官的重金属含量占土壤相应重金属含量(实测值)的百分比[5]。从表 2 的结果还可以看出,不同重金属处理下籽粒富集系数的变化趋势并不一致。Cd 处理下小麦籽粒的富集系数随着土壤中 Cd 含量的增大而升高,而 As,Cu 和 Zn 处理下籽粒的富集系数随土壤含量的增加而降低,Pb 则表现为先升高后下降。并且小麦籽粒富集系数在 5 种重金属元素间也存在很大差异,Cd 的富集系数为 21.121%~39.887%,Pd 的富集系数为 0.038%~0.077%,As 为 1.540%~2.822%,Cu 为 3.458%~6.659%,Zn 为35.588%~60.510%。总之,小麦籽粒富集系数从大到小依次为:Zn>Cd>Cu>As>Pb。

2.3 成熟期籽粒中 5 种重金属含量的回归分析

经回归分析和曲线拟合,将成熟期籽粒与土壤(实测值)、三叶期地上部分相应 Cd,Pb,As,Cu,Zn 含量的回归方程列于表 4 中。由表 4 可以看出,籽粒中 5 种重金属含量依土壤相应重金属含量的方程符合二次函数关系,相关系数均在 0.98 以上;而依三叶期地上部分相应重金属含量的方程符合一元线性回归关系,相关系数均在 0.94 以上。经检验,所有方程都达到极显著水平,说明籽粒与土壤中重金属含量之间存在极显著的二次函数回归关系,而与三叶期地上部分重金属含量之间存在极显著的直线回归关系。

表 4 成熟期籽粒中 5 种重金属含量的回归方程

重金属元素	籽粒(y)依土壤重金属含量(x)的回归方程	r	籽粒(y)依三叶期地上部分重金属含量(x)的回归方程	r
Cd	$y=-0.0455+0.2950x+0.0626x^2$	0.9808**	$y=-0.1791+0.2185x$	0.9808**
Pb	$y=-0.0056+0.0008x-6.0E-08x^2$	0.9985**	$y=-0.2351+0.0840x$	0.9839**
As	$y=0.0049+0.0267x-0.0001x^2$	0.9829**	$y=0.1899+0.0374x$	0.9757**
Cu	$y=5.9913-0.0119x+9.0E-05x^2$	0.9980**	$y=1.9630+0.3409x$	0.9407**
Zn	$y=65.6355+0.0534x+0.0004x^2$	0.9945**	$y=30.0566+0.4532x$	0.9450**

注:** 表示在 0.01 水平上达到显著

3 讨论

3.1 建立回归方程,对小麦籽粒重金属污染情况进行早期预报

本试验结果显示,成熟期小麦籽粒中 Cd,Pb,As,Cu,Zn 的含量随土壤中重金属含量的增大而增大,并与土壤实测值呈极显著的二次函数关系。即当重金属污染程度较低时,小麦籽粒重金属含量随土壤重金属含量的升高而上升,上升速度先快后慢;当重金属污染浓度超过一定阈值时,小麦植株(特别是根)受重金属伤害较重,正常生理活性受到抑制,进而影响重金属由土壤向植株的迁移,籽粒中重金属含量反而会有下降。另外,籽粒中重金属含量与三叶期地上部分相应重金属含量呈极显著的直线回归关系,说明成熟期籽粒重金属含量的变化和幼苗期地上部分的含量变化是一致的。

根据建立的小麦籽粒重金属含量与土壤或三叶期地上部分重金属含量的回归方程,即可在种植前采集土壤样品或在三叶期采集幼苗地上部分测定其

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

重金属含量,由方程来预测成熟后小麦籽粒中重金属污染程度,以实现重金属污染监测和早期预报的目的。以 As 为例,如果土壤中 As 含量为 25 mg/kg(土壤环境质量标准二级标准[7]),代入公式 $y = 0.0049 + 0.0267x - 0.0001x^2$ 计算,预测成熟期籽粒 As 含量为 0.61 mg/kg,与我国食品卫生标准[8]中规定的粮食中 As 的最高限量 0.7 mg/kg 相近;如果三叶期地上部分 As 含量为 25 mg/kg,代入公式 $y = 0.1899 + 0.0374x$ 计算,预测成熟期籽粒中 As 含量为 1.12 mg/kg,结果超标。但本试验所得回归方程只是由盆栽试验所得,是否符合小麦生产实践还有待于进一步的田间试验验证。

3.2 不同重金属在土壤—小麦系统中迁移和富集行为不同

富集系数是一个能够表征土壤—植物系统中不同重金属迁移能力大小的指标。Cd 胁迫下小麦籽粒富集系数随土壤中重金属含量的增大而增大,而 Pb, As, Cu, Zn 的富集系数都随土壤重金属含量增大而减小,可以推测重金属在小麦籽粒中的富集是有一定限量的。如本试验设置的 Cd 的含量可能还未达到其在小麦籽粒中富集的阈值,所以富集系数呈上升趋势;但 Pb, As, Cu 和 Zn 设置的含量范围可能已经比较接近各自的阈值,所以其富集系数随含量的增加而不断降低。同时从富集能力排序上来看,这 5 种重金属元素从土壤向小麦迁移,再由植株的根转运到籽粒,在籽粒中富集的难易程度依次为:Zn> Cd> Cu> As> Pb,即 Zn, Cd 较易在小麦籽粒中富集,Pb, As 则不易迁移,较难富集于小麦籽粒中,Cu 表现居中。这一结果与吴燕玉、王新等人[9,10]的研究结论基本一致,但与徐红宁、莫争等人[11,12]的试验结果存在一些差异,可能是单一、复合重金属污染条件下,元素之间的交互作用及对生态系统的毒性效应不同所致[13,14]。

参考文献:

[1] 陈怀满. 土壤— 植物系统中的重金属污染[M]. 北京:科学出版社, 1996: 1—2.

[2] 李海华, 刘建武, 李树人, 等. 土壤— 植物系统中重金属污染及作物富集研究进展[J]. 河南农业大学学报, 2000, 34(1): 30—34.

[3] 杨惠芬, 明元, 沈文. 食品卫生理化检验标准手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 1998: 101— 132.

[4] 林维宣, 王玉萍, 张华一. 电感耦合等离子体质谱法(ICP— MS)测定甜菜颗粒粕中的砷含量[J]. 中国甜菜糖业, 2000(4): 19— 20.

[5] 吴燕玉, 王新, 梁仁禄, 等. 重金属复合污染对土壤— 植物系统的生态效应Ⅱ. 对作物、苜蓿、树木吸收元素的影响[J]. 应用生态学报, 1997, 8(5): 545— 552.

[6] 于振文. 作物栽培学各论(北方本)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003: 27.

[7] GB15618— 1995, 土壤环境质量标准[S].

[8] GB4810— 94, 食品卫生标准[S].

[9] 吴燕玉, 王新, 梁仁禄, 等. Cd, Pb, Cu, Zn, As 复合污染在农田生态系统的迁移动态研究[J]. 环境科学学报, 1998, 18(4): 407— 414.

[10] 王新, 梁仁禄. 土壤— 水稻系统中重金属复合污染物交互作用及生态效应的研究[J]. 生态学杂志, 2000, 19(4): 38— 42.

[11] 徐红宁, 许嘉琳. 土壤环境中重金属复合污染对小麦的影响[J]. 中国环境科学, 1993, 13(5): 367— 371.

[12] 莫争, 王春霞, 陈琴, 等. 重金属 Cu, Pb, Zn, Cr, Cd 在水稻植株中的富集和分布[J]. 环境化学, 2002, 21(2): 110— 116.

[13] Bastan T, Tabatabaim A. Effect of cropping systems on absorption of metals by soils Ⅲ competition absorption[J]. Soil Science, 1992, 153(4): 331— 335.

[14] Wallacea, Abou-Zamzam A M. Low levels but excesses, of five different trace elements, single and in combination, on interactions in bush beans grown in solution culture[J]. Soil Science, 1989, 147(6): 439— 441.

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net