

干旱区污灌农田作物系统重金属 Cd Pb 生态行为研究

南忠仁^{1,2}, 程国栋¹

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000;
2. 兰州大学地理科学系, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 通过对干旱区污灌农田主要农作物体中重金属 Cd、Pb 生态行为的调查研究得出: ①不同作物对所选元素吸收累积的顺序为: 玉米> 小麦; 不同元素在作物体内迁移能力为: Cd> Pb。②作物不同部位元素累积态势为: 根> 茎> 籽, 这一态势不受土壤环境各元素含量高低的影响。③同一元素在不同剂量区作物体内吸收累积程度的差别显著。

关键词: 干旱区; 小麦; 玉米; 镉铅行为

中图分类号: X132 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 – 0267(2001)04 – 0210 – 04

Behaviors of Heavy Metals (Cd and Pb) in Crops Grown in Land of Arid Regions Irrigated by Wastewater

NAN Zhong-ren^{1,2}, CHENG Guo-dong¹

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou, 730000 China; 2. Department of Geography, Lanzhou University, Lanzhou, 730000 China)

Abstract: Behaviors of selected heavy metals (Cd and Pb) in crops grown in land irrigated by wastewater were assessed through a field investigation of the toxic metals in arid zone. The following findings were obtained: ①. The absorption sequence of the selected heavy metals in different crops was corn (*Zea mays* L.) > spring wheat (*Triticum aestivum* L.), and the transfer ability of element Cd was found to be more than that of element Pb; ②. The accumulation order of the toxic metals in different parts of selected crops was: root> stem> grain; ③. There was a significant difference in accumulation magnitude for a same element in crops grown in the land with different trace metal content.

Keywords: arid zone; spring wheat; corn; behaviors of Cd and Pb

关于单个元素及复合污染对作物生态效应的实验研究颇多, 这对理解某个元素的作物生理生态行为是十分必要的。但自然界中重金属污染的发生多为伴生性或综合性, 它们的作物生态效应更为复杂, 因此大田条件下重金属的生态行为研究已引起人们的高度重视^[1-5]。本文根据污灌农田土壤作物系统中有毒重金属元素 Cd、Pb 含量的调查研究, 探讨干旱区大田条件下重金属物质在作物体中的行为特征。

1 材料与方法

白银市中心区是我国重要的有色金属冶炼与加工工业基地之一。该区总土地面积为 5.01 万 hm², 总

收稿日期: 2000 – 09 – 01

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(49731010)和甘肃省环保科技项目(98 – 8)

作者简介: 南忠仁(1962—), 男, 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所副教授, 博士, 主要从事干旱区土壤生态环境保护与开发利用研究。

耕地面积 1.07 万 hm², 有效灌溉面积 0.47 万 hm²。长期以来, 因干旱缺水, 市区农业生产中程度不同地有利用城市污水灌溉的历史。污水中主要污染物为 Cd、Pb、Cu、Zn 等重金属物质(表 1)。为探讨重金属物质

表 1 白银市区农田灌溉用水主要污染物含量(mg · L⁻¹, 1997)*

Table 1 Contents of major pollutants in wastewater for irrigation on farmland in Baiyin City (mg · L⁻¹, 1997)

水源类型	Cd	Pb	Zn	Cu	Ni	pH
季节性河流(污水)						
东大沟	3.447	6.862	15.290	4.083	0.723	2.75
西大沟	0.192	0.993	1.289	0.684	0.007	7.49
黄河水(三断面)						
青城桥	0.004 8	0.071	0.181	0.028		8.11
靖远桥	0.006 7	0.089	0.259	0.018		8.11
五佛寺	0.007 3	0.091	0.224	0.019		8.03
水质标准						
农灌	0.005	0.5	2.0	1.0	<0.05	*

* 白银市环境保护局环境监测站 1997 年年报。* * 为渔业水质标准(GB11607 – 89)。

进入大田后在主要农作物系统中的生态行为特征,研究中按照网格法(2 km×2 km)在全区的东大沟污灌区、西大沟清污混灌区和黄河水灌区均匀布点,作物成熟期同时同点随机采集土壤与作物样品。

土壤样品是垂直采取耕作层 0—20 cm 的土体;作物样品是采取成熟期的整株作物体,分为根、茎、籽三部分。土壤样品过 100 目尼龙筛处理后,用 HCl + HNO₃ + HClO₄ + HF 置微波炉消化,作物样品经洁净烘干(<80℃温度)处理后,用 H₂SO₄ + HNO₃ + HClO₄ 置微波炉消化,ICP 等离子光谱仪测定作物和土壤样品重金属元素 Cd、Pb 的含量^[7]。

2 结果与讨论

研究区土壤环境重金属含量(Cd、Pb)调查结果统计特征值见表 2。

表 2 研究区土壤环境 Cd、Pb 含量统计特征值(DW,mg·kg ⁻¹)								
Table 2 Statistical values of Cd and Pb in soils studied (in DW,mg·kg ⁻¹)								
地点	元素	算术均值	中位数	标准差	最小值	最大值	偏度	峰度
全区 (n=47)	Cd	3.16	0.45	5.08	0.14	19.32	1.71	1.82
	Pb	84.11	28.10	104.12	14.96	413.36	1.51	1.21
东大沟 (n=13)	Cd	10.36	9.12	4.42	2.76	19.32	0.27	-0.31
	Pb	239.71	210.00	69.74	145.11	413.36	1.11	1.37
西大沟 (n=18)	Cd	0.58	0.56	0.28	0.18	1.18	0.75	-0.02
	Pb	27.48	27.61	5.74	17.21	38.30	-0.05	-0.58

土壤作物系统中多元素重金属迁移是一个极其复杂的过程,其迁移机理受作物种类、元素组合、相对浓度、比例关系以及环境因素的综合影响。为探讨大田条件下多元素在作物体中的复合迁移与累积机制,研究中将东大沟污灌区作为高剂量区,把西大沟清污混灌区作为低剂量区。高、低剂量区作物体不同部位重金属含量分析结果见表 3、4。

为说明元素在作物体内的迁移趋势,利用吸收系数来说明重金属元素在作物体内的行为过程。所谓吸收系数是指作物体部位某一元素的浓度与土壤中

表 3 高剂量区作物体中重金属浓度的算术均值(DW,mg·kg ⁻¹)				
Table 3 Mean concentrations of heavy metals in crops grown in heavily polluted soil (in DW,mg·kg ⁻¹)				
作物	部位	Cd	Pb	
春小麦	籽粒	0.613	1.292	
	茎秆	1.907	1.925	
	根系	6.917	28.411	
玉米	籽粒	0.581	2.290	
	茎秆	5.060	23.642	
	根系	8.420	98.629	

表 4 低剂量区作物体中重金属浓度的算术均值(DW,mg·kg ⁻¹)			
Table 4 Mean concentrations of heavy metals in crops grown in slightly polluted soil (in DW,mg·kg ⁻¹)			
作物	部位	Cd	Pb
春小麦	籽粒	0.042	0.138
	茎秆	0.104	0.413
	根系	0.499	2.392
玉米	籽粒	0.054	0.267
	茎秆	0.235	3.296
	根系	0.442	15.141

该元素浓度之比。它可代表土壤作物系统中元素迁移的难易程度。

元素 *i* 的吸收系数(*AC_i*)表示式如下:
$$AC_i = C_i / S_i$$

式中:*C_i*——作物体部位 *i* 元素的含量,mg·kg⁻¹
S_i——土壤耕作层 *i* 元素的含量,mg·kg⁻¹。

由研究元素在干旱区大田条件下主要作物体不同部位的吸收累积系数(图 1、2)分析可知:

Cd、Pb 元素在主要农作物体不同部位的吸收累积趋势基本一致,累积量由大到小依次为:根>茎>籽。这可能是由作物内在的生理功能所决定。它说明无论是在高剂量区,还是在低剂量区,重金属主要累

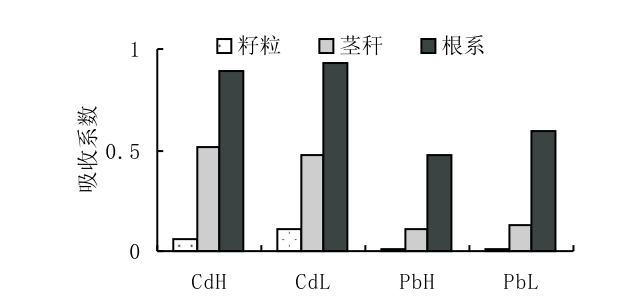


图 1 不同剂量区玉米体中元素吸收累积趋势比较分析(H—高剂量区;L—低剂量区)
Figure 1 Comparison of accumulation trends of heavy metals by corn grown on various polluted soils

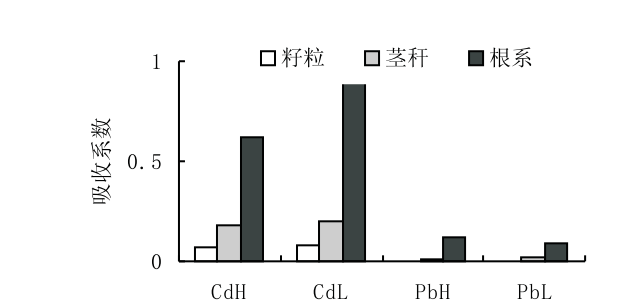


图 2 不同剂量区小麦体中元素吸收累积趋势比较分析(H—高剂量区;L—低剂量区)
Figure 2 Comparison of accumulation trends of heavy metals by wheat grown on various polluted soils

积于农作物的根部，这一累积趋势不受土壤环境中各元素剂量高低的影响。张秀梅^[2]在大田调查研究中得出小麦和玉米对 Pb 的累积具有与这次调查结果相一致的趋势。李述刚^[8] (1998) 在阜康荒漠生态站人工控制下单元素盆栽试验中，发现 Cd、Pb 在冬小麦根茎籽的吸收比例为：根> 茎叶> 籽；但田间小区多元素复合污染试验中发现，冬小麦体中的吸收累积顺序为：Cd：根> 茎叶> 籽（根：茎：籽为 24：3：1）；Pb：根> 籽> 茎叶（根：茎：籽为 48：0.7：1）。尽管田间小区试验得出 Cd、Pb 元素根茎籽的吸收比例值与本研究所得的迁移顺序基本一致，但在强弱上也有差别。即大田条件下作物体内重金属 Cd、Pb 迁移累积程度明显高于田间小区试验所得结果。这可能既受元素本身性质的影响，也受土壤生态环境的影响。这也说明人工控制下重金属元素（Cd、Pb）的迁移规律，不能反映大田条件下重金属的迁移规律。因此，在制订区域重金属土壤环境质量标准及环境管理制度时，应充分地考虑这一现实情况。

同一元素在不同剂量区作物体内的吸收累积比例的差别显著。高剂量区吸收比例系数较小，低剂量区的吸收比例系数较大（表 5、6）。但从绝对吸收累积量看，仍是高剂量区累积多，低剂量区累积少（表 3、4）。说明作物对重金属元素的吸收，因受生理功能的

表 5 高剂量区作物体重金属吸收累积系数分析
Table 5 Accumulation factors of heavy metals by crops grown on heavily polluted soil

作物	部位	Cd	Pb
春小麦	籽粒	0.067	0.005
	茎秆	0.177	0.008
	根系	0.621	0.117
	根：茎：籽	9：3：1	23：2：1
玉米	籽粒	0.059	0.011
	茎秆	0.511	0.113
	根系	0.893	0.476
	根：茎：籽	15：9：1	42：10：1

表 6 低剂量区作物体重金属吸收累积系数分析
Table 6 Accumulation factors of heavy metals by crops grown on slightly polluted soil

作物	部位	Cd	Pb
春小麦	籽粒	0.077	0.005
	茎秆	0.197	0.017
	根系	0.982	0.094
	根：茎：籽	13：3：1	19：3：1
玉米	籽粒	0.113	0.011
	茎秆	0.477	0.132
	根系	0.928	0.593
	根：茎：籽	8：4：1	54：12：1

影响而有一定的限量。因为有毒元素在土壤溶液中浓度过高时，当其进入作物根系后，会对根毛表皮细胞产生毒害作用，导致根系元素吸收功能下降，最终影响作物的生长、发育。

由重金属元素在小麦、玉米根茎籽三部分的吸收系数比值，分析其在作物体内迁移能力，知非必需元素吸收累积的趋势是：Cd>>Pb。因为 Cd 是作物易于吸收且易于在作物体内累积的元素之一，它与 Cd 的生物化学性质有关。Cd 对蛋白质及其它有机化合物中的巯基有较强的亲合力，对蛋白质中其它侧链也有亲合力。因此在农作物体内常与蛋白质相结合形成有机金属络合物，其活性和迁移能力较强。在研究区中，小麦籽粒 Cd 的吸收系数值 0.067—0.077，茎秆的值 0.177—0.197，根系的值 0.621—0.982。根茎籽吸收系数的比例为 11：3：1。玉米籽粒中 Cd 的吸收系数值 0.059—0.113，茎秆的值 0.511—0.477，根系的值 0.893—0.928。根茎籽吸收系数的比例为 11：6：1。

非必需元素 Pb 的作物吸收累积能力最弱。这是因为进入根毛中的 Pb，易以焦磷酸盐、正磷酸盐或果胶酸吸附的形态存在。这些形态的 Pb 的活性较低，易于累积在根部，较少向地上部分迁移。在研究区中，小麦籽粒 Pb 的吸收系数值 0.005，茎秆的值 0.008—0.017，根系的值 0.094—0.117，根茎籽吸收系数的比例为 21：3：1。玉米籽粒中 Pb 的吸收系数值 0.011，茎秆的值 0.113—0.132，根系的值 0.476—0.593。根茎籽吸收系数的比例为 48：11：1。

由元素共存时重金属物质在春小麦与玉米体中的吸收累积分析看，作物对重金属元素的吸收能力排序为：玉米> 春小麦。由作物不同部位吸收累积分析看，玉米根系对重金属元素的吸收能力强，且易向茎秆迁移，但向籽粒迁移的相对量则较小。另外，玉米对 Cd 吸收累积相对强的原因，可能是与玉米根系水溶性有机分泌物对 Cd 的结合能力较强，而其难扩散性分泌物（主要在根尖表面）对 Cd 的络合能力则比 Cu、Pb 弱，络合量较低。当 Pb、Cu、Cd 共存时，难溶性分泌物（粘胶）中吸附位会被 Cu、Pb 所占据，原来吸附的 Cd 被置换出来为作物所吸收。这样，Cd“抑制”了 Pb 的吸收，而 Pb“促进”了 Cd 的吸收，使 Cd 成为极易被玉米吸收的一个元素^[6]。但单元素盆栽试验^[9]比较玉米和小麦 Cd 的吸收能力时，得出春小麦根籽 Cd 含量高于玉米含量的结论。这可能是单元素效应与多元素共存影响效应之差别所致。

3 结论

3.1 不同作物对所选元素吸收累积的顺序为：玉米>小麦。大田条件下研究元素在农作物体内迁移能力排序为：Cd> Pb。这一结论与田间小区试验所得迁移顺序基本相同，但也有强弱之区别。即大田条件下作物体内重金属元素 Cd、Pb 的迁移能力明显高于田间小区的试验结果。说明人工控制下获得的有害元素 Cd、Pb 在作物体内的迁移规律，不能完全反映大田环境中的实际迁移状况。

3.2 研究元素在干旱区主要农作物不同部位吸收累积态势为：根> 茎> 籽。并且，这一态势不受土壤环境各元素含量高低的影响。因此，在收获时最好将作物的根系拔除，统一妥善处理，达到降低土壤重金属含量，保护生态环境之目的。

3.3 同一元素在不同剂量区作物体内的吸收累积程度差别显著。在高剂量区，农作物元素吸收累积系数小，但绝对吸收累积量大；低剂量区，则相反。因此，在一定程度上，随着土壤环境重金属含量愈大，作物根系重金属吸收累积量也将增大。

参考文献：

[1] Miner G S, Gutierrez R, and King L D. Soil factors affecting plant concentrations of cadmium, copper, and zinc on sludge – amended

soils[J]. *J Environ Qual*, 1997, **26**: 989 – 994.

[2] 张秀梅,唐以剑,章 申. 白洋淀地区土壤作物系统中污染物含量与变化规律研究[J]. *地理科学进展*,1997,**16**(2):62 – 69.

[3] Brun L A, Maillet J, Richarte J, Hermann P, Remy J C, Relationships between extractable copper, soil properties and copper uptake by wild plants in vineyard soils[J]. *Environmental Pollution*, 1998, **102**: 151 – 161.

[4] Andreu V, and Gimeno – Garcia E. Evolution of heavy metals in marsh areas under rice faring[J]. *Environmental Pollution*, 1999, **104**: 271 – 282.

[5] 郭翠花,王爱英. 太原市耕作土壤和作物中 Cd 的污染分析[J]. *农业环境保护*,2000,**19**(1):41 – 42,55.

[6] 陈怀满,等. 土壤—植物系统中的重金属污染[M]. 北京: 科学出版社,1996. 317 – 329.

[7] Nan Z R, Zhao C Y, Li J J, Chen F H, and Liu Y. Field survey of Cd and Pb contents in spring wheat (*Triticum aestivum* L.) grain grown in Baiyin city, Gansu province, P. R. China[J]. *Bull Environ Contam Toxicol*, 1999, **63**: 546 – 552.

[8] 李述刚,程心俊,王周琼. 荒漠绿洲农业生态系统[M]. 北京: 气象出版社,1998. 93 – 107.

[9] 北师大环境科学研究所,等. 灰钙土土壤环境容量研究(“七五”国家科技攻关环保项目报告书)[R], 1990. 22 – 24.

参加本研究工作的还有：吴 沂、高有林、赵传燕、叶 鹏、成秀玲、曾贤稷等同志。

《农业环境保护》2002 年征订启事

《农业环境保护》是由农业部主管、中国农业生态环境保护协会主办的全国性学术期刊。是中国科学引文数据库核心期刊，列于被引频次最高的中国科技期刊 500 名之内并入编《中国学术期刊（光盘版）》。本刊主要刊登农业生态环境保护领域的科研新成果、新理论、防治污染、保护生态的新技术，农业环境管理的新经验。包括研究报告与简报、专论与综述、实用技术与国内外动态信息等。读者对象为从事农、林、牧、乡镇企业、环保、卫生、城建等工作或专业的科技人员、院校师生、管理干部等。

《农业环境保护》为双月刊，大 16 开，96 页，每本定价 12.00 元，全年定价 72.00 元。国内外公开发行，全国各地邮局征订，邮发代号 6 – 64。如读者在当地邮局漏订，可通过邮局汇款至本刊编辑部补订。此外，编辑部存有 2000 年以前的各卷合订本（1999 年以前每本 50 元，2000 年每本 80 元），欢迎选购。

编辑部地址：300191 天津市南开区复康路 31 号 电话：(022)23674336 传真：(022)23367139
电子信箱： caep@public.tpt.tj.cn

《长江蔬菜》2002 年征订启事

《长江蔬菜》是全国优秀科技期刊、全国发行量最大的蔬菜专业期刊。本刊面向蔬菜全产业链，发布最急需、最实用的科技成果；研究最真实、最可信的市场预测；剖析最迫切、最棘手的行业难题。栏目设“本期主题”、“科技与工作”、“分析与预测”、“信息集萃”四大版块，涵盖新优品种、栽培技术、病虫害防治、产销研究、经验交流、土壤肥料、选种育种、设施园艺、学术园地、蔬菜种子信息等小栏目，内容丰富、信息量大，科学实用、可操作性强。

《长江蔬菜》为月刊，大 16 开本，64 页。邮发代号 38 – 129，每册定价 3.80 元，全年定价 45.60 元；全国各地邮局均可订阅，也可汇款到本社邮购。

地址：湖北省武汉市万松园路 15 号 邮编：430022
电话：(027)85751511 85762415