

土壤 Pb Cd 污染的植物效应(I)

——Pb 污染对水稻生长和 Pb 含量的影响

郑春荣¹, 孙兆海¹, 周东美¹, 刘凤枝², 陈怀满^{1,3}

(1. 中国科学院南京土壤研究所, 江苏 南京 210008; 2. 农业部环境监测总站, 天津 300191;
3. 钟山学院环境工程系, 江苏 南京 210049)

摘 要:采用盆栽试验方法,研究了 3 种不同类型的人为污染土,即草甸棕壤(辽宁)、红壤(湖北)、灰色石灰土(广西)中不同 Pb 的含量(添加量为 0,125,250,500,1 000,2 000 mgPb · kg⁻¹, Pb(OAc)₂ · 3H₂O)对水稻生长和吸收 Pb 的影响。结果表明,除了湖北红壤中 2 000 mgPb · kg⁻¹ 处理使稻草干物重与对照相比减产约 20% 外,其余处理对稻草和稻谷产量均无明显影响。水稻吸收的 Pb 与土壤中的添加 Pb、总量 Pb(实测值)和 DTPA 可提取 Pb 含量之间均有着极显著的相关性,并由此计算了 Pb 的表观临界含量,其中湖北土对 Pb 的污染十分敏感(表观临界含量为 79 mgPb · kg⁻¹)。

关键词:铅; 重金属; 水稻; 土壤污染临界值

中图分类号:X131.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2004)03-0417-05

Plant Response to Soil Lead and Cadmium Pollution(I).

Effects of Soil Lead Pollution on Wetland Rice Growth and Its Uptake of Lead

ZHENG Chun-rong¹, SUN Zhao-hai¹, ZHOU Dong-mei¹, LIU Feng-zhi², CHEN Huai-man^{1,3}

(1. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Environmental Monitoring Center of Agricultural Ministry, Tianjin 300191, China; 3. Department of Environmental Engineering, Zhong Shan College, Nanjing, 210049, China)

Abstract: Soil lead potentially threatened to human health, so understanding dose-response relationship of soil lead concentration with wetland rice (*Oryza sativa* L.) uptake of lead was very crucial to prevent lead pollution in food chain. The effects of different lead concentration in meadow brown earth (Liaoning), red earth (Hubei) and gray limestone soil (Guangxi) on wetland rice growth and its uptake of lead were investigated. The results showed that all treatments did not significantly change the biomass of wetland rice except the treatment of 2 000 mg · kg⁻¹ lead in red earth, with 20% biomass reduction. Very significant correlations between brown rice lead concentration with the spiked soil lead concentration, total soil lead concentration and DTPA extracted soil lead concentration were established. Apparent critical soil lead concentration was 79 mg · kg⁻¹ in red earth, which suggested that red earth was very sensitive to lead pollution.

Keywords: lead; heavy metals; wetland rice; critical value of soil pollution

铅(Pb)曾在人类文明史上发挥过十分重要的作用。人们对铅环境影响的关注可追溯到 19 世纪 20 年代^[1,2]。随着时间的推移,人们对铅毒害的认识不断地加深,现在已引起了普遍重视。铅毒的临界表现包括贫血、便秘、腹痛、呕吐、脑损伤和生育障碍等,幼儿对

铅污染比成年人更为敏感。19 世纪 70 年代前,成人血 Pb 的最高允许含量为 80 μgPb · 100 mL⁻¹;1960—1965 年间儿童血 Pb 的限量为 50~60 μgPb · 100 mL⁻¹;到了 1970 年,成人可接受的血 Pb 上限降为 40 μgPb · 100 mL⁻¹;1978 年美国公共疾病防治中心(CDC)推荐的可接受血 Pb 上限为 30 μgPb · 100 mL⁻¹。1991 年,依据当时对智商和心理研究的结果,发现儿童在相当低的血 Pb 时就可能出现脑损伤,因而 CDC 所推荐的儿童血 Pb 的上限变更为 10 μgPb ·

收稿日期: 2003-09-22

基金项目:科技部社会公益研究专项资金资助(2001DIA10022)

作者简介:郑春荣(1943—),女,副研,主要从事土壤环境化学和分析化学研究。

联系人:陈怀满,E-mail: hmchen@issas.ac.cn

100 mL⁻¹。在过去 50 a 间,儿童可接受的血 Pb 上限由 60 μgPb · 100 mL⁻¹ 降为 10 μgPb · 100 mL⁻¹[3], 可见公众对 Pb 的危害已十分重视。

人体中的 Pb 有多种来源, 其中由谷类食物和饮水中吸取的 Pb 约占吸取总量的 35% [4]。由于食品生产与土壤有着十分密切的关系, 因而土壤 - 植物系统中 Pb 的行为和植物效应一直为人们所重视。有关土壤 - 植物系统中的 Pb 行为的研究曾进行过较为详细的讨论[5~8]。然而, 由于土壤 - 植物系统的复杂性, 对特定地区、特定土壤中 Pb 的行为及其生物效应的研究一直是土壤和环境工作者所关注的内容, 本文报道了 3 个不同地区人工污染土壤中 Pb 在土壤 - 水稻体系中的行为及临界含量的探讨。

1 材料与方法

供试土壤采自辽宁沈阳(草甸棕壤, 沈阳市农业

环保站提供, 简称辽宁土)、湖北大冶(红壤, 湖北省农业环保站提供, 简称湖北土)和广西河池(灰色石灰土, 河池市农业环保站提供, 简称广西土), 土壤基本性质见表 1。水稻盆栽试验采用容量为 6 kg 的塑料盆、内衬聚乙烯塑料袋进行, 每盆装土 5 kg, 添加的 N 和 P 肥料为 0.2 g · kg⁻¹ 土 (尿素 0.4 g · kg⁻¹ 土; KH₂PO₄ 0.88 g · kg⁻¹ 土), 以 Pb(OAc)₂ · 3H₂O 用于 Pb 污染的处理, 处理浓度为 0, 125, 250, 500, 1 000, 2 000 mg · kg⁻¹。先将土壤与肥料(水溶液)混和, 一周后与铅(醋酸铅水溶液)混匀、淹水, 淹水 25 d 后插秧, 每盆 3 穴, 每穴 2 株, 每个处理重复 3 次。水稻品种为 86 优 8 号(粳稻, *Oryza sativa* L., 南京农业科学院提供), 生长期 160 d, 整个生长期以自来水浇灌, 且保持渍水状态。水稻生长期间, 根据生长情况追肥 2 次(尿素和 KH₂ PO₄ 各 0.3 g · kg⁻¹), 收获时将根、茎和稻谷分别在 70 ℃ 左右烘干, 粉碎。

表 1 供试土壤的理化性质

Table 1 The physical and chemical characteristics of tested soils

项目	采土地点			项目	采土地点		
	辽宁	湖北	广西		辽宁	湖北	广西
pH	7. 81	4. 69	7. 11	Fe ₂ O ₃ /g · kg ⁻¹	42. 7	60. 6	24. 2
OM/g · kg ⁻¹	23. 6	14. 9	36. 7	MnO/g · kg ⁻¹	0. 61	0. 98	0. 27
CEC/cmol · kg ⁻¹	22. 6	12. 8	9. 50	K ₂ O/g · kg ⁻¹	25. 5	18. 2	4. 1
全 N/g · kg ⁻¹	1. 27	0. 96	2. 34	Na ₂ O/g · kg ⁻¹	18. 2	1. 57	0. 30
全 P/mg · kg ⁻¹	463	486	700	CaO/g · kg ⁻¹	14. 5	1. 00	6. 55
全 K/g · kg ⁻¹	21. 2	15. 1	3. 38	MgO/g · kg ⁻¹	13. 2	7. 78	2. 83
NH ₄ - N/mg · 100 g ⁻¹ 土	1. 04	0. 84	1. 25	Zn/mg · kg ⁻¹	68. 8	81. 6	201
速效 P/mg · kg ⁻¹	12. 7	8. 26	21. 7	Cu/mg · kg ⁻¹	23. 8	28. 9	33. 7
速效 K/mg · kg ⁻¹	86. 9	126	65. 0	Pb/mg · kg ⁻¹	35. 2	32. 8	91. 1
Al ₂ O ₃ /g · kg ⁻¹	132	148	59. 2	Cd/mg · kg ⁻¹	0. 26	0. 051	1. 37

粒径/mm	各级颗粒组成(%)			
	辽宁	湖北	广西	
粗砂	2 ~ 0. 2	2. 0	0. 4	12. 0
细砂	0. 2 ~ 0. 02	49. 3	20. 6	29. 3
粉砂	0. 02 ~ 0. 002	21. 8	36. 6	45. 9
黏粒	<0. 002	26. 9	42. 4	12. 8
质地	壤质黏土		壤质黏土	粉(砂)质壤土
矿物成分	蛭石、高岭石为主伴有蒙脱石、水云母和少量的石英		石英和结晶较差的水云母、高岭石为主含有少量的蛭石	高岭石、蛭石、石英伴有少量的蒙脱石

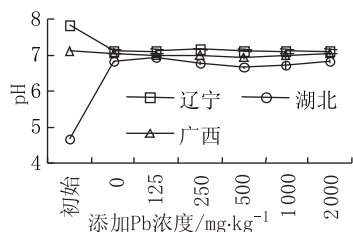


图 1 土壤淹水 4 个月后的 pH 变化

Figure 1 Changes of pH at 4 months after soil flooded

由于在渍水后嫌气细菌的呼吸而使 CO_2 累积:



从而造成 pH 的降低^[10]。由于经一定时间渍水后的 pH 差异较少,因而在比较植物效应时,中、后期 pH 的影响较小。供试土壤的养分状况表明,三种土壤的肥力状况良好,属中、高等水平;但广西土壤的 Zn、Pb 和 Cd 的含量较高,分别超过全国土壤背景相应元素的 2.7、3.5 和 14.1 倍,表明所采广西土壤已有相当污染。

2.2 Pb 污染对水稻生长的影响

在同一种土壤中,不同浓度 Pb 处理对植物生长的影响在前期略有差异,但随着生长期的延长,表现差异愈来愈不明显。从株高、产量看(图 2~图 3),辽宁和广西土壤的各处理之间并无显著差异;而在湖北土壤中,2 000 $\text{mgPb} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理者与对照相比其稻草干物重减少了约 20%,但在稻谷产量上却无明显差异,表明了在处理浓度范围内 Pb 对植物的毒害不甚明显。图 3 和图 4 表明,在一些处理中稻草和谷粒的产量较对照为高,这一现象并非源于 Pb 自身的有

益影响,而可能是由于 Pb 的处理促使了其他条件的变化,例如一些养分元素有效性的增加^[2]。这种现象增加了 Pb 污染的隐蔽性和潜在危害性,因为从植物产量来看难以判断其污染状况。

3 种土壤中生长的水稻地上部干物重有着明显的差异,以湖北土的生物量最高($136 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$),辽宁土次之($107 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$),广西土最小($88 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$)。湖北和辽宁土中的水稻一直生长良好,但广西土在水稻移栽后一个月稻叶普遍泛黄,出现了类似于缺氮的症状。由土壤的原有肥力和施加的肥料来看,此时不可能出现氮素的缺乏;而从包括对照在内均出现了相同的症状来看,亦可排除 Pb 毒害的影响,因而可以认为植株泛黄现象是由于该土原有 Zn 含量较高($201 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)而引起 Zn 的毒害所致。Zn 毒害症状是新叶的失绿和生长受阻^[11],这一状况在追施磷肥后一周左右便得以缓解并逐渐趋于正常生长,表明磷素肥料是 Zn 毒的有效减缓剂。

2.3 Pb 污染对水稻吸收 Pb 的影响

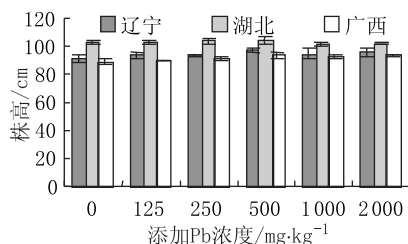


图 2 Pb 处理对水稻株高的影响

Figure 2 Effect of Pb on the plant height of wetland rice

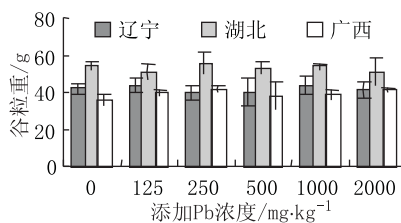
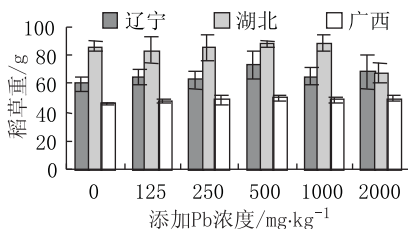


图 3 Pb 处理对稻草和稻谷产量的影响

Figure 3 Effect of Pb on straw and grain yield of wetland rice

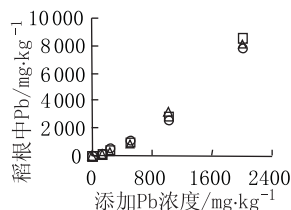
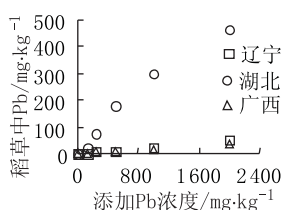
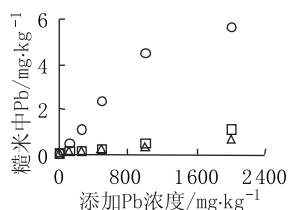


图 4 Pb 处理对水稻吸收 Pb 的影响

Figure 4 Effect of Pb on the uptake of Pb by wetland rice

Pb 处理对水稻吸收 Pb 有着明显的影响,一般说来均随着浓度的增大而增加,植株各部位 Pb 的分配为根> 稻草> 糙米,生长于湖北土中的稻草 Pb 和糙米 Pb 含量最高(图 4)。方差分析表明,水稻根 Pb、稻草 Pb 和糙米 Pb 的吸收在辽宁与广西土壤之间没有差异性(*P* 分别为 0. 405, 0. 060, 0. 069),在辽宁与湖北土之间有极显著的差异性(均为 *P* <0. 001); 稻草

Pb、糙米 Pb 在广西与湖北土壤之间也有极显著的差异性,而根 Pb 呈显著差异(*P* =0. 024)。由表 2 可见,水稻糙米、稻草和根吸收的 Pb 占土壤总 Pb 量的百分数为 0. 000 2% ~0. 004%, 0. 01% ~0. 55% 和 0. 03% ~0. 34% , 表明 Pb 在土壤-植物系统中的移动性较差。

水稻对 Pb 的吸收与土壤中添加的 Pb、实测 Pb

表 2 水稻各部位吸收 Pb 占土壤 Pb 总量的百分数(%)

Table 2 Percentages of Pb in different parts of wetland rice in total amount of Pb in soils (%)

添加 Pb /mg·盆 ⁻¹	辽宁				湖北				广西			
	根	稻草	糙米	总量	根	稻草	糙米	总量	根	稻草	糙米	总量
0	0. 03	0. 06	0. 001	0. 09	0. 11	0. 02	0. 003	0. 14	0. 04	0. 006	0. 000 7	0. 04
625	0. 10	0. 03	0. 001	0. 12	0. 11	0. 23	0. 003	0. 34	0. 05	0. 01	0. 000 6	0. 06
1 250	0. 09	0. 02	0. 000 6	0. 12	0. 17	0. 43	0. 004	0. 60	0. 06	0. 01	0. 000 4	0. 07
2 500	0. 15	0. 02	0. 000 4	0. 17	0. 17	0. 55	0. 004	0. 72	0. 09	0. 01	0. 000 2	0. 10
5 000	0. 19	0. 03	0. 000 4	0. 22	0. 25	0. 49	0. 004	0. 74	0. 23	0. 01	0. 000 2	0. 24
10 000	0. 29	0. 03	0. 000 4	0. 32	0. 34	0. 28	0. 003	0. 62	0. 34	0. 02	0. 000 2	0. 36

(Pb 的总量)和 DTPA 可提取 Pb 量之间的关系如表 3 所示。由表可见,水稻各部位所吸收的 Pb 与土壤中的 Pb 有极显著相关性。由此以国家卫生标准粮食铅含量 <0. 4 mg·kg⁻¹ 而计算、以水稻为指示植物的土壤表观临界含量列于表 4, 由表 4 可见湖北土对 Pb 的污染十分敏感,其表观临界含量为 79 mgPb·kg⁻¹,该

值比有关文献所报道的^[12]土壤 Pb 临界含量的值低,表明在确定土壤临界值和制定标准时,需要综合考虑多方面的因素。

3 小结

本文研究了三种不同性质的土壤中不同程度的

表 3 水稻吸收 Pb 与土壤中 Pb 含量的相关性(*r* 值)

Table 3 Correlation coefficients between uptake of Pb by wetland rice and Pb concentration in soils(*r*)

土壤	项目	添加 Pb	实测 Pb	DTPA 提取 Pb	提取%	米 Pb	稻草 Pb
辽宁	DTPA 提取 Pb	0. 992* *	0. 991* *	1			
湖北	提取%	0. 635* *	0. 612* *	0. 644* *	1		
广西	米 Pb	0. 536* *	0. 490* *	0. 463* *	0. 373* *	1	
(<i>n</i> = 54)	稻草 Pb	0. 521* *	0. 477* *	0. 440* *	0. 329*	0. 991* *	1
	根 Pb	0. 982* *	0. 975* *	0. 976* *	0. 544* *	0. 480* *	0. 474* *
辽宁	DTPA 提取 Pb	0. 999* *	0. 999* *	1			
(<i>n</i> = 18)	提取%	0. 688* *	0. 687* *	0. 679* *	1		
	米 Pb	0. 906* *	0. 914* *	0. 910* *	0. 582*	1	
	稻草 Pb	0. 939* *	0. 944* *	0. 945* *	0. 579*	0. 987* *	1
	根 Pb	0. 979* *	0. 977* *	0. 980* *	0. 582*	0. 866* *	0. 912* *
湖北	DTPA 提取 Pb	0. 993* *	0. 993* *	1			
(<i>n</i> = 18)	提取%	0. 527*	0. 522*	0. 570*	1		
	米 Pb	0. 943* *	0. 939* *	0. 966* *	0. 673* *	1	
	稻草 Pb	0. 968* *	0. 964* *	0. 978* *	0. 630* *	0. 989* *	1
	根 Pb	0. 982* *	0. 984* *	0. 958* *	0. 396	0. 877* *	0. 922* *
广西	DTPA 提取 Pb	0. 998* *	0. 998* *	1			
(<i>n</i> = 18)	提取%	0. 957* *	0. 955* *	0. 950* *	1		
	米 Pb	0. 930* *	0. 930* *	0. 927* *	0. 866* *	1	
	稻草 Pb	0. 966* *	0. 968* *	0. 966* *	0. 875* *	0. 957* *	1
	根 Pb	0. 986* *	0. 986* *	0. 994* *	0. 921* *	0. 923* *	0. 968* *

表 4 供试土壤 Pb 的表观临界含量* (mg · kg⁻¹)

Table 4 Apparent critical lead concentrations of tested soils (mg · kg⁻¹)

项目	土壤	相关方程	A	b	r	n	表观临界含量
添加 Pb	辽宁	$Y = a + bx$	0.057	0.000 5	0.908	18	652
	湖北	$Y = a + bx$	0.047	0.004	0.996	15	79
	广西	$Y = a + bx$	0.115	0.000 3	0.930	18	1 045
实测 Pb	辽宁	$Y = a + bx$	0.037	0.000 5	0.916	18	732
	湖北	$Y = a + bx$	- 0.094	0.004	0.995	15	118
	广西	$Y = a + bx$	0.094	0.000 2	0.930	18	1 367
DTPA Pb	辽宁	$Y = a + bx$	0.062	0.001	0.912	18	298
	湖北	$Y = a + bx$	0.106	0.010	0.995	15	29
	广西	$Y = a + bx$	0.118	0.001	0.927	18	496

注：* 根据 Pb 的粮食卫生标准 0.4 mg · kg⁻¹ 计算。

Pb 污染对水稻生长和吸收 Pb 的影响, 并根据食品卫生标准计算了土壤 Pb 的表观临界含量。结果表明, 以添加量(外源污染)、总量(实测值)或 DTPA 可提取量所标示的土壤表观临界含量在不同土壤之间均有较大的差别, 其顺序为广西土> 辽宁土> 湖北土。由于土壤临界含量是制定土壤负载容量的重要依据, 本研究结果虽为完善试验的土壤类型和采样区的临界指标确定提供了补充, 但在敏感指标的选择、复合污染等方面仍有许多工作要做。

参考文献:

[1] Oliver M A. Soil and human health: a review[J]. *Europ J Soil Sci*, 1997, 48: 573 – 592.

[2] Koeppel D E. Lead: Understanding the minimal toxicity of lead in plants [A]. In: Lepp N W, ed. *Effect of Heavy Metal Pollution on Plants* [C]. London and New Jersey: App Sci pub, 1981. 55 – 75.

[3] Davies B E. Health and lead – contaminated soils: the need for a global audit? [A]. In: Iskandar I K and Adriano D C eds. *Remediation of Soils Contaminated with Metals* [C]. Science Reviews, Northwood, 1997.

153 – 169.

[4] WHO. *Trace Elements in Human Nutrition and Health*, World Heath Organization, Geneva. 1996.

[5] 许嘉琳, 杨居荣. 陆地生态系统中的重金属[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1995.

[6] 郑春荣, 陈怀满. 铅[A]. 见: 陈怀满, 等. 土壤 – 植物系统中的重金属污染[C]. 北京: 科学出版社, 1996. 210 – 252.

[7] 谢正苗. 土壤环境中的铅及其化学平衡[A]. 见: 何振立, 周启星, 谢正苗. 污染及有益元素的土壤化学平衡[C]. 北京: 中国环境科学出版社, 1998. 276 – 303.

[8] 陈怀满, 等. 土壤中化学物质的行为与环境质量[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 123 – 130.

[9] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978.

[10] Ponnampерuma F N. The chemistry of submerged soils[J]. *Adv Agron*, 1972, 24: 29 – 96.

[11] 林玉锁, 韩凤祥. 锌[A]. 见: 陈怀满, 等. 土壤 – 植物系统中的重金属污染[C]. 北京: 科学出版社, 1996. 253 – 293.

[12] 夏增禄. 中国土壤环境容量[M]. 北京: 地震出版社, 1992. 172 – 181.