

作物对土壤中环境激素铅的吸收效应及污染防治

匡少平，张书圣

(青岛科技大学应用化学系, 山东 青岛 266042)

摘要: 采用盆栽试验方法, 研究了水稻、玉米等作物对土壤中环境激素铅的吸收效应及污染防治方法。试验结果表明, 当土壤中加入不同比例的铅时 ($0\text{—}4\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 基本没有观察到铅对水稻、玉米的毒害病症, 铅对作物的生长发育没有明显的宏观影响。但微区调查揭示, 水稻和玉米对土壤中的铅具有强烈的吸收性, 并可残留在作物的各个部位, 且吸收量随土壤中铅添加量的增加而提高; 其中根系的吸收性最强, 是秸秆、籽实的几十至几千倍, 表明作物根系为秸秆、籽实对铅的吸收提供了良好的屏障。运用根系对土壤中铅的特殊吸收性, 可以在铅污染的土壤区通过自然作物栽培, 并将作物根系从土壤中清除的方法, 来逐渐达到环境土壤修复的目的。

关键词: 环境激素; 重金属污染; 铅(Pb); 土壤; 植物效应; 环境修复

中图分类号: X53 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 – 0267(2002)06 – 0481 – 04

Phytoavailability of Crops to Environmental Hormone Pb in Soils and Its Remediation

KUANG Shao-ping, ZHANG Shu-sheng

(Department of Applied Chemistry, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China)

Abstract: Lead (Pb) as an environment hormone, acts as estrogens in animal and human bodies, and its pollution in environments can result in many procreant anomalies, such as maladjustment of incretion, weaken of procreation function and descend of genital immunity. Potted plant tests of paddies and corns indicated that these crops did not show the macro – toxic symptoms in the observed Pb – added contents ($0\text{—}4\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) to soils. However, lead in soils was easily absorbed by crops and left in different parts of plants. Statistical analyses showed that Pb contents in the crops were strongly positive correlated to the contents in the soils. In crops, Pb contents in roots were the highest, tens to thousands times higher than those of straw and seeds. It may be suggested that roots was a barrier for Pb absorption of straw and seeds. Based on this fact, Pb polluted soil can be gradually decreased by planting crops and subsequently removing the roots from the soil. This biotechnology may be used in environmental remediation, which embraces the duality of a sustainable agricultural economy and a healthy environment.

Keywords: environmental hormone; heavy metal pollution; lead (Pb); soil; crop growing effect; environmental remediation.

铅作为三种重金属 (Pb、Cd、Hg) 环境激素 (environmental hormone) 物质之一, 对人体和生物 (主要为动物) 体内的正常激素功能施加影响, 具有类似雌激素作用, 能导致包括人类在内的各种生物的生殖功能下降、生殖器官肿瘤免疫力降低, 并引起各种生理异常^[1]。粮食、蔬菜等对环境土壤、水中铅的吸收, 通过食物链进入人体, 成为人体中环境激素铅的重要来源。研究显示, 铅进入土壤后, 会产生明显的生物效应, 可导致植物特别是其根部中毒、叶色不一致变化、抽穗期和成熟期推迟、籽实畸形、植株枯萎甚至死亡、产量降低等^[2-7]; 植物的不同部分对铅吸收的

有效性不一样, 例如, 郑春荣等^[2]和 Jones et al.^[7]研究指出, 植株地上部分的铅的浓度往往高于根中铅的浓度。但我们研究发现, 即使在高铅含量 ($> 4\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的土壤中, 作物对铅发生强烈吸收后也没有导致植株出现宏观病症, 植物对铅的吸收表现出极强的隐蔽性。为了减少食物中铅对人体的潜在危害, 本文通过湖北阳新水稻和山东五莲玉米盆栽试验, 研究了作物对土壤中铅的吸收效应, 从而探讨土壤中重金属激素铅对作物的影响。

1 试验方法

作物对铅的吸收与土壤的含铅量有明显的正相关性^[2, 8], 而影响铅吸收的主要因子包括土壤有机质含量、阳离子交换能量、pH、土壤中三氧化二物含量等^[2, 6, 9]。为了试验结果的可对比性, 试验时需消除上

收稿日期: 2002 – 01 – 01; 修订日期: 2002 – 04 – 03

基金项目: 青岛化工学院高科技启动基金资助

作者简介: 匡少平 (1966—), 男, 博士, 副教授, 主要从事环境科学与环境工程的教学和研究。

述因素的影响;为此,将相同作物在相同的原始土壤中进行盆栽试验,且整个栽培条件保持稳定,以保证上述因素在同一时间上的相对一致性,所不同的是加入到土壤中重金属化合物的类型和量有所区别。

1.1 水稻盆栽试验

在湖北省阳新县城附近闲置田间采取水稻土壤(黄棕壤,A 层),将土样风干、压碎,剔除根系,用粗筛过筛(孔径大小为 1 mm×1 mm)。分别按 1 g·kg⁻¹ 的比例添加尿素和钾肥(KCl),混合均匀。然后每次定量称取 6kg 土壤移入 8kg 容量的陶瓷盆中,再分别添加 PbCl₂ 和 Pb(NO₃)₂,其添加的铅含量依次为 0、500、1 000、1 500、…、3 500、4 000 mg·kg⁻¹,充分搅拌后,搁置 10 d,重新搅拌后淹水,3 d 后插秧,每盆 4 穴,每穴 2 株。每个处理重复 3 次。将陶瓷盆放置于塑料槽水浴中,以保证试验过程中温度的相对一致性。试验始终保持在淹水条件下,直到水稻完全成熟。然后采集水稻根系、稻草和稻谷;部分稻谷经碾作加工,收集稻米。将以上样品在清水中洗净、烘干(75℃左右),粉碎至 200 目以下。

1.2 玉米盆栽试验

与水稻盆栽试验类似,不同之处在于:①土壤取自山东五莲县城附近梯田土壤(黄棕色,A 层);②土壤中含有一些碎石,需剔除;③土壤加铅后每盆直接点播已发芽的玉米 2 株(*Zea mays*,鲁玉一号);④玉米生长期间,每隔 8 d 每盆加入 400 g 蒸馏水(直接浇灌在植株箴下及附近);⑤只采集根系、秸秆和籽实样品,并将样品洗净、烘干,粉碎至 200 目以下。

原始土壤中 Pb 含量和各生物样品中 Pb 含量测定采用 ICP-AES 法,分析时采用内插标样进行质量监控。Pb 的平均偏差为 6.78%;重复样品的测定精度均优于 95%。

2 结果与讨论

在整个盆栽试验过程中,在所添加的铅浓度区间内,基本没有观察到铅对水稻、玉米的毒害病症(如植株枯萎、叶色不一致变化、抽穗期和成熟期推迟、籽实畸形等等),不同铅浓度下各盆栽作物产量也基本一致,说明铅对水稻、玉米等作物的生长发育没有明显的宏观影响。

水稻、玉米对土壤中铅的吸收情况见表 1。总体来说湿性作物水稻较早性作物玉米对土壤中的铅更易吸收和残留。

2.1 水稻对铅的吸收效应

表 1 不同铅化合物及含量对作物吸收铅的影响

Table 1 Pb concentration in crops grown on different soils								
加入的化合物	加入 Pb 含量	湖北阳新水稻盆栽试验				山东五莲玉米		
		根系	稻草	稻谷	米粒	根系	秸秆	玉米
原始土	0(36.1)	24.2	13.6	2.7	0.08	11.2	4.0	0.20
PbCl ₂	500	227.0	23.9	3.8	0.21	111	11.0	0.44
	1 000	656.0	40.6	5.9	0.38	256	17.9	0.68
	1 500	1 380.0	51.0	7.6	0.54	413	22.3	1.09
	2 000	1 880.0	58.8	8.9	0.72	578	27.9	1.41
	2 500	2 898.0	69.4	10.7	0.95	992	34.0	1.77
Pb(NO ₃) ₂	3 000	4 012.0	74.9	11.4	1.12	1 255	41.1	2.27
	3 500	4 997.0	80.6	12.1	1.28	1 987	42.7	2.32
	4 000	5 803.0	81.3	12.4	1.29	2 698	42.9	2.34
	500	338	27.4	3.9	0.26	66	16.7	0.41
	1 000	781	42.1	6.2	0.50	114	25.1	0.67
	1 500	1 649	54.7	8.0	0.84	161	33.8	1.22
	2 000	2 787	67.4	9.4	1.21	213	41.3	1.60
	2 500	3 120	81.2	12.6	1.77	372	49.0	1.99
	3 000	3 864	97.7	19.0	2.54	569	59.2	2.41
	3 500	4 600	116.2	23.9	3.69	885	64.4	2.93
	4 000	5 328	138.8	32.4	4.74	1 043	68.6	3.47

注:括号中的数字代表原始土壤铅平均含量;表中各样品铅含量为 3 次重复处理的平均值,单位为 mg·kg⁻¹。

从表 1 可以看出,土壤中不论加入何种铅化合物,随着铅含量的增加,水稻根系、稻草、稻谷和稻米中铅含量都明显升高。水稻对铅的吸收表现出明显的分异性(图 1),铅主要残留在其根系中,其铅含量是稻草中的 10—70 倍、稻谷中的 60—500 倍、稻米中的 1 000—4 500 倍。这一特征揭示,水稻根系可以作为一种屏障或过滤器,来阻止铅进一步向其秸秆和籽实中迁移,从而减少其毒害效应。其次,从水稻根系、稻草到籽实(稻谷、稻米),其铅含量是依次大幅度降低的,这说明除根系外,稻草也是阻碍铅进入籽实的二次重要屏障。另外,稻米中的铅含量很低,与之相比,稻谷中的铅含量相对较高,是稻米的 8—10 倍。由于稻米是稻谷碾去表面一层谷壳(即糠)后获得的,因此可以断言,稻谷中的铅约 90% 以上聚集在谷壳中。再者,因根系、稻草和谷壳主要由植物纤维等组成,而稻米的主要成分是淀粉,根据上述铅含量变化特征,可以认为,在水稻的生长过程中,植物纤维对土壤中重金属元素铅具有很强的吸收过滤作用,而淀粉对铅的吸收功能极为微弱。

不过,不同铅化合物对水稻铅吸收的影响存在一定差异,例如,无论用何种铅化合物处理,水稻根系中铅含量均持续增加,但增加的幅度不一致,当土壤中铅添加量 <3 000 mg·kg⁻¹ 时,用 Pb(NO₃)₂ 处理的水稻根系铅含量要比用 PbCl₂ 处理的偏高,但当铅添加

量 $\geq 3\,000\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 这种差比关系恰好相反 (表 1)。其次, 用 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 处理的水稻, 其稻草、稻谷和稻米的铅含量比用 PbCl_2 处理的要明显偏高, 特别是当土壤中铅添加量 $> 3\,000\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 这一特征更为显著。再者, 当土壤中加入的铅化合物为 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 时, 随着铅添加量的增加, 水稻各组成部分中铅含量保持稳定增长; 但当土壤中加入 PbCl_2 , 且铅添加量 $> 3\,000\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 水稻根系中铅含量继续增长, 而稻草、稻谷和稻米中的铅含量只有极微弱的升高, 或者说几乎没有发生改变。由此揭示, 在 PbCl_2 处理的土壤中, 除根系外, 水稻的其他生长部位对铅的吸收可以逐渐达到饱和。以上特征显示, 土壤中阴离子类型对作物铅的吸收效应具有一定影响。

2.2 玉米对铅的吸收效应

山东省五莲县玉米的盆栽试验表明, 它与水稻对铅的吸收有许多相似之处, 但也存在一些差异。其特点是:

(1) 当土壤中加入铅化合物时 (不论是 PbCl_2 还是 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$), 玉米根系、秸秆和籽实中铅含量均随着土壤中铅添加量的增加而增加。玉米对铅的吸收同样具有明显的分异特征 (图 1), 根系中铅的含量最高, 是秸秆的 4—60 倍、是籽实的 200—2 000 倍。这说明作物根系对秸秆、籽实吸收铅所起的屏障作用具有普遍

性。从玉米根系—秸秆—籽实中铅含量依次大幅度降低, 同样指示作物纤维对铅的强烈吸收和过滤效应。

(2) 不同铅化合物对玉米吸收铅的影响存在一些差异。例如, 用 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 处理的玉米, 其秸秆和籽实中铅含量较 PbCl_2 处理的偏高, 但相差程度较水稻中的偏低 (表 1)。根系中铅的变异则与水稻中的相反, 即用 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 处理的玉米根系反而比 PbCl_2 处理的偏低, 特别是土壤中铅添加量高时更是如此, 最大可相差 1.5 倍以上。

(3) 不论用 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 还是 PbCl_2 处理, 玉米根系中铅含量均稳定增长。但秸秆和籽实对铅的吸收存在差异, 当用 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 处理时, 它们中的铅含量继续升高; 而采用 PbCl_2 处理时, 当土壤中添加的铅含量达到 $3\,000\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 秸秆和籽实中铅含量增加缓慢, 且当铅添加量为 $3\,500\text{—}4\,000\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 秸秆和籽实中铅含量几乎不变, 这一特征与水稻盆栽试验结果基本一致。由此揭示, 当在土壤中添加高含量的 PbCl_2 时, 除根系外, 作物的秸秆、籽实对铅的吸收很可能存在一个饱和上限。由于在观察的土壤铅浓度区间内 (为土壤的原始铅含量 + 添加的铅含量; 水稻土壤铅区间 = $24.2\text{—}4\,024.2\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 玉米土壤铅区间 = $11.2\text{—}4\,011.2\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 没有发现 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 处理的吸收饱和和效应, 而自然界各类土壤 (A 层) 铅背景含量

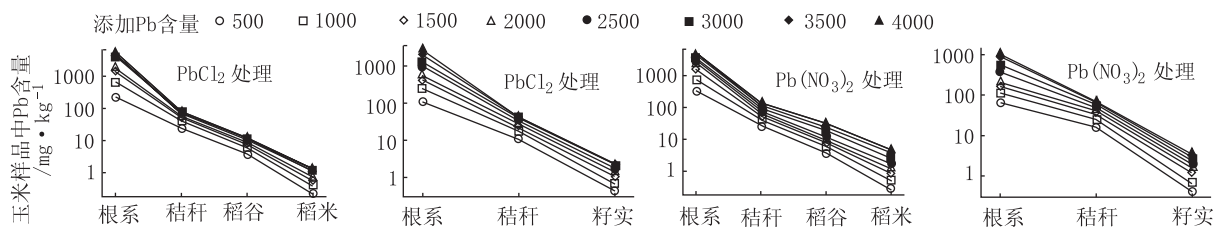


图 1 作物对土壤中 Pb 吸收的变异特征

Figure 1 Variation of Pb contents in different parts of corns

在 $0.7\text{—}1\,143\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 范围内^[10], 因此, 在自然耕作中, 基本上不会由于土壤中 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 浓度的过高而使作物秸秆、籽实中铅含量达到饱和。

3 农业土壤铅污染防治

目前, 我国整个南部地区粮食以稻米为主, 而玉米则是中国北部地区口粮的重要来源之一。但从上述研究可以看出, 水稻和玉米对土壤中的铅具有强烈的吸收性, 并可残留在作物的各个部位 (包括籽实); 而且, 它们对 Pb 的吸收表现出极大的隐蔽性, 即使吸收了大量的重金属铅, 植株仍然保持正常的生长发育,

这为我们及时发现、防治土壤—植物体系中铅污染增加了难度。

3.1 从土壤中清除吸收铅的作物根系

通过上述盆栽试验指出, 由于在土壤—植物体系中铅污染的隐蔽性, 因此应加强对铅凭借食物链进入人体并危害人类健康的调查; 继而在污染区寻求土壤环境修复技术, 来减少土壤—植物体系中铅对人体的危害。研究表明, 作物植株残体 (根系、秸秆) 还田可以培肥改土, 节水保墒, 提高产量^{[11]、[12]}, 但也给土壤铅污染的治理带来了困难。我们认为, 在铅污染土壤区, 由于植株残体 (特别是根系) 中残留有大量的铅, 因此不

宜实施残体还田; 相反, 应利用植物残体特别是根系对铅的强烈吸收性来达到生物除铅的目的, 即在铅污染的土壤区域内, 通过自然作物栽培, 将吸收了大量铅的作物残体(特别是根系)从土壤中清除处理, 反复多轮, 即可逐渐达到改良环境土壤的目的。表 2 列出了盆栽试验(土壤用 PbCl_2 处理)水稻和玉米根系的植物有效性 F (为根系吸收的铅总量占土壤中铅总量的百分率)和模拟计算获得的清除作物根系后的土壤铅含量 $C_{\text{Pb}}(\text{soil})$ 。显然, 随着土壤中铅含量的增加, 土壤中重金属铅的植物(根系)有效性也增加。以水稻栽培为例, 当土壤铅含量为 $4\,036.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时, 水稻根系对土壤中铅的吸收率达 4.77% ; 经一次栽培并剔除根系后, 土壤中铅含量可从 $4\,036.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 降低至 $3\,843.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

表 2 土壤重金属铅的植物(根系)有效性 $F(\%)$ 及清除根系后土壤铅模拟浓度 $C_{\text{Pb}}(\text{soil})(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$

Table 2 Heavy metal (Pb) phytoavailability $F(\%)$ and calculated Pb content $C_{\text{Pb}}(\text{soil})$ after removing roots in soils treated by PbCl_2

加入 Pb 含量 ^① / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	湖北阳新水稻盆栽试验		山东五莲玉米盆栽试验	
	$F/\%$	$C_{\text{Pb}}(\text{soil})$	$F/\%$	$C_{\text{Pb}}(\text{soil})$
0	0.00	36.1 ^②	0.00	25.8 ^②
500	1.26	529.3	0.79	521.6
1 000	2.03	1 015.0	0.99	1 015.6
1 500	2.94	1 490.9	1.10	1 509.1
2 000	3.04	1 974.2	1.17	2 002.2
2 500	3.78	2 440.3	1.62	2 484.9
3 000	4.38	2 903.2	1.71	2 973.9
3 500	4.69	3 370.3	2.33	3 443.5
4 000	4.77	3 843.5	2.78	3 913.9

注: ①加入的铅化合物为 PbCl_2 ; ②土壤原始铅含量; 根系吸收铅总量 = 根系铅含量 $\times$ 根系干重 - 空白对照处理作物根系铅总量。

3.2 增施石灰或碳酸盐

另外, 盆栽试验表明, 土壤中 NO_3^- 含量的增加有利于作物对铅的吸收, 这主要与 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 易溶于水使铅形成活性铅有关; 若在该类土壤中加入石灰或碳酸盐, 使土壤处于碱性条件下, 可导致铅生成难以被作物吸收的沉淀物(在碱性条件下, 氢氧化铅的溶度积为 4.2×10^{-15} ; 碳酸铅的溶度积为 1.5×10^{-13}), 从而降低作物对铅的吸收效应, 减少铅在粮食中的残留量, 达到间接修复环境的目的。

4 结语

(1) 土壤中环境激素铅不会对玉米、水稻等作物

产生明显的宏观毒害效应, 但可直接被作物吸收, 残留在作物的各个部位, 其含量随着土壤中铅含量的增加而提高, 并可通过食物链进入人体, 危害人类健康, 因此土壤中铅对人类的危害具有潜在性和隐蔽性。

(2) 作物对土壤中铅的吸收具有强烈的分异特征, 其中根系对铅的吸收性最强, 是秸秆、籽实的几十至上千倍, 表明作物根系为秸秆、籽实对铅的吸收提供了良好的屏障。

(3) 阴离子对植物铅吸收有一定影响, 土壤中易溶阴离子的存在, 有利于作物对铅的吸收; 另外, 在相同的铅含量水平下, 湿性作物(水稻)较旱性作物(玉米)更易吸收和残留铅。

(4) 运用根系等对土壤中铅的特殊吸收性, 可以在受重金属铅污染的土壤中通过作物栽培, 使作物根系大量吸收土壤中的铅后, 将其从土壤中清除, 以此逐渐达到改良环境土壤的目的。

参考文献:

[1] 匡少平, 徐仲, 张书圣. 农村土壤环境激素污染与防治[J]. 环境工程, 2002, **20**(supl): (in press).

[2] 郑春荣, 陈怀满. 铅[A]. 见: 陈怀满, 等. 土壤-植物系统中重金属污染[C]. 北京: 科学出版社, 1996. 210-250.

[3] 杨元根, Paterson E, Campbell C. 城市土壤中重金属元素的积累及其微生物效应[J]. 环境科学, 2001, **22**(3): 44-48.

[4] 孟昭福, 张增强, 薛澄泽, 等. 用幼苗法指示污泥和土壤中重金属的植物有效性[J]. 环境化学, 2001, **20**(2): 129-137.

[5] Grakovskii V G, Frid A S, Timokhin P A. Evaluation of soil pollution by heavy metals and arsenic in Chelyabinsk Oblast[J]. Eurasian Soil Science, 1997, **30**(1): 74-81.

[6] Terelak H, Stuczynski T, Piotrowska M. Heavy metals in agricultural soils in Poland[J]. Polish Journal of Soil Science, 1997, **30**(2): 35-42.

[7] Jones L H P, Jarvis S C, Cowling D W. Lead uptake from soils by Perennial ryegrass and its relation to the supply of an essential element (sulphur)[J]. Plant and Soil, 1993, **38**: 605-619.

[8] Singh B R. Soil pollution and contamination. In: Lal R, Blum-Winfried E H, Valentin C, eds. Advances in soil science. Boca Raton: CRC, 1998. 279-299.

[9] Boekhold A E, Meeussen J C L. Relevance of soil-pH in view of risk assessment of soil pollution[J]. Soil & Environment, 1993, (1): 55-58.

[10] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.

[11] 叶常明, 郑和辉, 王杏君, 等. 作物植株残体还田土壤对除草剂的截留作用[J]. 环境科学学报, 2001, **21**(3): 354-357.

[12] Dormaar J F, Carefoot J-M. Effect of straw management and nitrogen fertilizer on selected soil properties as potential soil quality indicators of an irrigated dark brown Chernozemic soil[J]. Canadian Journal of Soil Science, 1998, **78**(3): 511-517.