

铅在水稻中的迁移积累及其 对水稻生长发育的影响*

杨树华 曲仲湘 王焕校

(云南大学生物系)

摘 要

本文通过水稻盆栽试验, 分析了铅在水稻中的迁移积累和不同浓度的铅在各生育期对水稻生长发育的影响。主要结果如下:

水稻对铅的吸收和积累因各生育期水稻的生长特性不同而异。根、茎、叶积累铅量最多的时期为拔节期; 谷壳和糙米积累铅量最多的时期为结实期。在任何生育期施铅, 水稻各器官的铅积累浓度顺序都为根>叶>茎>谷壳>糙米。根和叶积累的铅量与施铅浓度呈正相关, 谷壳和糙米积累的铅量与施铅浓度无关。

施入的铅大部分都积累在土壤中和被吸附在根表面上。铅主要随蒸腾流通过质外体进入导管, 以晶体或沉淀的形式存于细胞间隙中或附于细胞壁上。水稻植株各器官的铅积累浓度不随施铅后植株生长天数的增加而增加。

水稻对铅的抗性较强, 但在种子萌发期和幼苗期, 较高浓度的铅仍会对植株造成一定的伤害, 在一定的浓度范围内, 水稻可通过自身的代谢调节来减轻铅对它的伤害。

近年来, 国内外在土壤铅污染对植物的影响方面作了很多研究, 其中涉及到植物吸收铅的机制, 铅在植物体内的迁移状况以及对植物光合、呼吸、酶活性等方面的影响。有关铅对水稻影响方面的研究近年来也有一些报道, 但这些研究大都以水稻的全生育期或生育前期为对象进行的, 对于不同的生育期铅在水稻各器官中的迁移积累规律以及对水稻生长发育影响的系统研究却很少见报道。

本工作旨在通过水稻盆栽, 探求不同生育期铅在水稻中的迁移积累规律和水稻受铅污染的临界期, 为探讨铅在食物链中的迁移积累和铅污染地区的水稻生产提供科学依据。

一、材 料 和 方 法

1. 供试材料

1) 供试稻种为梗稻310。土壤为红壤, 质地中壤土; 总铅量215.63毫克/公斤, 可溶性铅量2.5毫克/公斤; 速效磷54.14毫克/100克土; 速效钾140.67毫克/100克土; 含氮量19%; 盐基总量为43.71毫克当量/100克土; pH7.68。

2) 盆栽试验在简易塑料薄膜温室中进行。盆钵为25×23厘米, 每盆装土6公斤, 采用种子直播, 每盆3穴, 每穴3株, 进行长期淹水管理。

3) 试验用的铅源为分析纯硝酸铅, 污灌浓度以纯铅量计。

2. 试验设计

1) 不同生育期水稻对铅的吸收 设苗期(三叶期后、分蘖前期前)、分蘖期、拔节期、

* 本题是杨树华的硕士研究生毕业论文, 在工作中得到胡琼华、李启任、熊若丽老师的大力帮助, 在此表示衷心感谢。

抽穗期、结实期 5 个生育期组; 对照、100ppm、1,000ppm、1,500ppm、2,000ppm、3,000ppm 7 个处理浓度。对各生育期组在其生育期内按不同浓度进行两次污灌, 每次 1,000 毫升, 平时均以自来水灌溉。每个生育期组均在灌铅后两周取出全株, 分析根和地上部分的含铅量。

2) 不同生育期铅在水稻各器官中的积累 生育期组的设置, 污灌处理等级、污灌方法和管理措施均与试验 1 相同, 但各生育期组均在成熟后取出全株, 分别分析根、茎、叶、谷壳和糙米的含铅量。

3) 铅对种子萌发的影响 浓度处理同试验 1。分别用不同浓度的铅液和蒸馏水在 25℃ 恒温浸种 24 小时, 然后取不同浓度的铅液 10 毫升于培养皿中, 在 25℃ 恒温下使种子萌发, 每天加铅液 2 毫升。分别在第 3 天和第 7 天测定种子的呼吸强度和过氧化物酶同工酶, 第 7 天同时测定种子发芽率, 含铅量和淀粉酶活性。

4) 铅对幼苗生长的危害阈值及对其某些生理功能的影响 以溶液培养和盆栽两种方法同时进行。溶液培养的浓度处理同试验 1, 培养液总体积为 450 毫升。盆栽试验的各个浓度处理分别比溶液培养大 10 倍。溶液培养的植株在铅后一周取出全株, 测定植株含铅量、根系脱氢酶活性和叶片叶绿素含量。

5) pH 对幼苗根系吸收铅的影响及根表面对铅的吸附 采用溶液培养方法, 浓度处理同试验 1。设 3、5.5、9 三个 pH 等级。加铅后一周取出全株, 分析溶液、沉淀、根和叶片的含铅量。同时各处理浓度的植株均取出一份平行样, 用 1% 的 EDTA 浸泡根 24 小时, 分析根和浸泡液的含铅量。

3. 测试方法

1) 盆栽后的土壤取样深度为 0—10 厘米自然风干后, 用四分法取样。

2) 植物样品用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 法湿消化; 土壤样品用王水- HClO_4 法湿消化; 土壤可溶性铅用 2.5% 的醋酸以 1:1.5 振荡 1 小时过滤; 所有的样品均用 WFD-Y₂ 型原子吸收分光光度计测定。

3) 铅在水稻组织中的存在部位同硫化物染色后做徒手切片观察, 在细胞中的存在部位用电子显微镜观察。

4) 种子呼吸强度用瓦氏呼吸计测定; 根系脱氢酶活性的测定用红四氮唑法; 淀粉酶的测定用 DNA 法; 同功酶的测定用吴少伯 (1979) 的方法。

5) 不同生育期水稻各器官含铅量的差异用双因素方差分析统计比较。

二、结果分析

1. 水稻在不同生育期对铅的吸收

不同生育期水稻各部位吸铅量的差异见表 1。

从表 1 中可见:

1) 不同生育期水稻各部位的吸铅量差异程度不同。苗期根吸收的铅量显著高于其他生育期, 而在分蘖期、拔节期和抽穗期之间根吸铅量的差异却并不显著; 水稻生长较快的分蘖期和拔节期之间以及生长较为稳定的抽穗期和结实期之间地上部分吸铅量的差异都不显著。

2) 在各个生育期, 根和地上部分的吸铅量都与施铅浓度呈极显著或显著的正相关, 这

表 1 不同生育期水稻吸收的铅量 (毫克/公斤)
table 1 lead content absorbed in rice in each development stage (mg/kg)

施铅量 (ppm)	根					地上部分				
	苗期	分蘖期	拔节期	抽穗期	结实期	苗期	分蘖期	拔节期	抽穗期	结实期
0	139	85	110	95	65	125	15	35	28	18
100	559	356	327	550	132	241	99	42	44	19
500	2,285	1,055	1,162	614	394	668	208	151	49	76
1,000	2,931	1,784	2,806	1,500	1,179	668	150	187	62	82
1,500	3,643	2,071	3,238	2,009	1,591	727	185	214	103	84
2,000	3,110	4,528	3,054	2,541	1,926	1,213	302	259	76	104
3,000	8,513	3,240	4,473	2,866	2,773	4,025	451	368	301	128
平均值	3,293	1,874	1,634	1,444	987	1,095	187	162	94	71
差数比较		1,419**	1,658**	1,849**	2,306**		904**	933**	1,001**	1,024**
			240	430	887*			25	93**	117**
				190	647**				67**	91*
					457					23
相关系数 (r)	0.90**	0.87*	0.95*	0.93**	0.90**	0.88**	0.93**	0.98**	0.87*	0.88**

** $p < 0.01$ * $p < 0.05$

种相关在拔节期尤其突出 ($r = 0.95^{**}$ $r = 0.98^{**}$) 在各个生育期, 根的吸铅量都大于地上部分的吸铅量, 地上部分的吸铅量仅为根吸铅量的6.5—33.3%。

3) 根和地上部分吸收的铅量都随着生育期的后延而下降, 下降规律如图 1。

根和地上部分吸收的铅量随着生育期的后延而下降, 与干重的增加有一定的关系。根吸铅量与干重的关系基本呈负相关 ($y = 2749.83 - 93.07x$, $r = -0.76^{*}$); 地上部分吸铅量与干重的关系呈指数关数 ($y = 89.37e^{-x}$, $r = 0.79^{*}$)。

2. 不同生育期铅在水稻各器官中的积累

不同生育期施铅, 成熟时取样, 铅在水稻各器官中的积累浓度有很大的差异 (表 2)

从表 2 中可见, 在不同的生育期施铅, 铅在水稻各器官中的积累浓度顺序都为根 > 叶 > 茎 > 谷壳 > 糙米, 但不同器官的铅积累浓度与施铅量的相关关系则不同。根的铅积累浓度与施铅浓度之间在任何生育期都呈显著或极显著的正相关, 而叶的铅积累浓度则随着生育期的后延相关性逐渐增强; 茎的铅积累浓度在拔节期与施铅量呈正相关, 而其他生育期在施铅浓

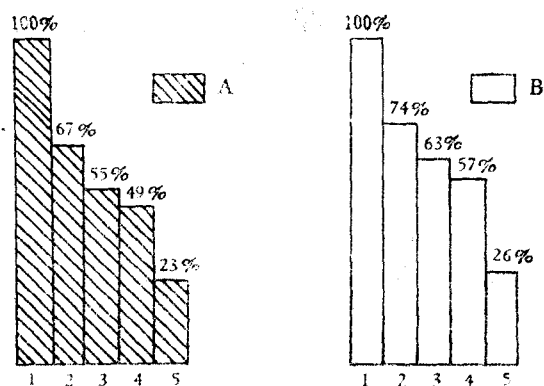


图 1 水稻不同生育期吸铅量的下降规律

A. 根, B. 地上部分; 1. 苗期; 2. 分蘖期; 3. 拔节期; 4. 抽穗期; 5. 结实期。

fig 1 the reducing tendency of lead content absorbed by rice in each development stage
A, root, B, all organs above ground,
1, seedling stage 2, tillering stage, 3, joining stage, 4, ear sprouting stage, 5, bearing stage.

表 2 不同生育期水稻各器官的铅积累浓度 (毫克/公斤)
table 2 lead concentration accumulated in various organs of in each development stage (mg/kg)

器官	生育期	施铅量 (ppm)						相关系数 (r)	对照含 铅量	平均含 铅量	积累百 分率(%)	方差分析	
		100	500	1,000	1,500	2,000	3,000					方差源	F
根	苗期	190	734	1,835	1,545	2,369	3,433	0.87*	93.00	1,521.69	100	A ¹⁾	4.29**
	分蘖期	419	978	1,691	2,301	3,868	4,339	0.98**				B ¹⁾	17.53**
	拔节期	244	1,136	2,166	2,257	2,681	5,076	0.93**					
	抽穗期	197	868	975	1,287	2,993	2,820	0.89**				A×B	1.11
	结实期	132	394	1,179	1,591	926	2,773	0.89**					
叶	苗期	14	12	22	23	15	36	0.75	23.00	40.72	2.70	A	5.42**
	分蘖期	21	21	18	68	72	39	0.67				B	5.49**
	拔节期	48	40	42	42	91	132	0.86*					
	抽穗期	25	35	49	40	64	69	0.92**				A×B	0.89
	结实期	18	25	41	48	87	93	0.97**					
茎	苗期	27	13	24	15	15	32	0.11	12.00	20.28	1.30	A	17.64**
	分蘖期	0	0	0	17	18	36	0.95**				B	5.22**
	拔节期	28	35	40	38	46	63	0.80*					
	抽穗期	0	18	18	20	41	33	0.82*				A×B	1.15
	结实期	10	12	10	9	15	20	0.85*					
谷壳	苗期	4.86	2.94	3.43	3.78	4.63	2.11	-0.48	3.26	3.44	0.23	A	9.86*
	分蘖期	2.94	3.47	2.20	2.74	2.11	2.20	-0.67				B	0.82
	拔节期	3.43	3.66	2.92	2.61	3.28	3.16	-0.08					
	抽穗期	3.78	4.23	3.03	3.12	2.54	3.02	-0.43				A×B	0.36
	结实期	4.63	4.07	4.49	4.07	4.68	4.24	0.19					
糙米	苗期	4.74	3.37	3.49	3.18	3.00	3.17	0.51	2.86	3.05	0.20	A	22.35**
	分蘖期	2.48	2.78	2.74	2.68	2.32	2.29	-0.72				B	1.22
	拔节期	2.77	2.46	3.72	3.40	2.90	3.46	0.11					
	抽穗期	2.64	2.54	2.71	2.57	2.97	2.85	0.71				A×B	1.25
	结实期	4.34	3.17	3.29	3.77	3.61	3.80	0.02					

1) A为生育期的影响; B为施铅量的影响

度为 2,000 ppm 以下时基本与施铅浓度无关; 谷壳和糙米的铅积累浓度在任何生育期都与施铅浓度无关。方差分析进一步证明, 施不同浓度的铅对水稻各器官积累铅的影响顺序为根>叶>茎, 对谷壳和糙米的影响不显著。

在不同的生育期, 水稻各器官的铅积累浓度差异极为显著。把各器官在不同生育期的铅积累浓度的差数比较综合为图 2 则可以看出: 根、茎、叶的铅积累浓度都以拔节期为最高, 而

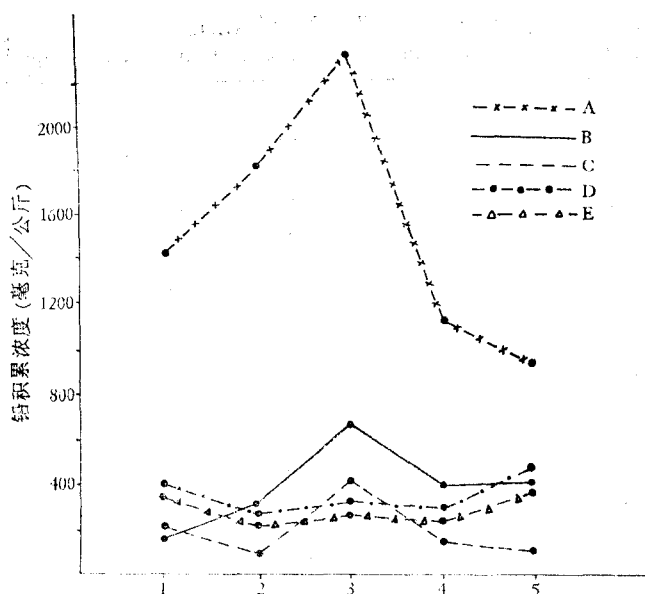


图2 不同生育期水稻各器官对铅的积累

茎叶的铅积累浓度为1/10, 谷壳和糙米的铅积累浓度为1/100。

1. 苗期, 2. 分蘖期, 3. 拔节期, 4. 抽穗期, 5. 结实期。 A. 根, B. 叶, C. 茎, D. 谷壳, E. 糙米。
 fig.2 lead accumulated on various organs of rice in each development stage
 the concentration in stem and leaf are tenth, the concentration in shell and grain are hundredth.
 1. seedling stage, 2. tillering stage, 3. joining stage, 4. ear sprouting stage, 5. bearing stage. A. root, B. leaf, C. stem, D. shell, E. grain.

谷壳和糙米的铅积累浓度则以结实期相对较高。

3. 铅在土壤-水稻系统内的迁移及某些影响因素

土壤对铅有强烈的积累和吸附作用, 在施铅量为 500ppm 以下时, 可溶性铅量均不超过土壤总铅量的 5%; 施铅量达到 2,000ppm 以上, 可溶性铅量所占的比例可超过 15%。土壤可溶性铅量和土壤总铅量与施铅后植株生长的天数都呈极显著的正相关 ($r=0.93^{**}$ $r=0.97^{**}$)。根吸收和积累的铅量与土壤总铅量和可溶性铅量都密切相关, 相关系数 r 基本在 0.9 以上 (表 3)。

水稻根积累的铅量占植株总铅量的 95% 以上, 其中 90% 以上都被吸附在根表面上。pH 的变化会影响根系对铅的吸收和吸附, 增加 pH 值可使铅离子大量沉淀, 减少水稻根系对铅的吸收 (表 4)。

随着施铅后植株生长天数的增加, 根和地上部分的铅积累浓度与积累时间的关系并不相同。多元逐步回归的结果表明, 不管用任何浓度的铅灌溉, 地上部分的铅积累浓度均与施铅后植株生长天数无关, 即:

施铅浓度 (ppm)	回归方程式	复相关系数 (R)
100	$y = 73.35 + 0.18x_1 - 2.18x_3$	0.82 ^{**}
500	$y = 415.89 - 8.22x_3$	0.73 ^{**}
1,500	$y = 82.01 + 0.1x_1 - 4.65x_3$	0.86 ^{**}
2,000	$y = 727.28 - 14.09x_3$	0.72 ^{**}

$$3,000 \quad y = 90.02 + 0.37x_1 - 25.59x_3 \quad 0.87^{**}$$

表 3 土壤总铅量和可溶性铅量与根含铅量的相关关系*

table 3 correlation relationship of total lead content and dissoluble lead content in soil with root lead content

生育期及测定项目			施 铅 量 (ppm)							相关系数 (r)
			0	100	500	1,000	1,500	2,000	3,000	
苗 期	I	A	262	376	495	1,007	1,118	1,060	2,214	0.95**
		B	3.75	5.0	5.0	25.5	51.3	75.0	95.0	0.92**
		C	1.43	1.32	1.00	2.5	4.45	7.00	4.30	
	II	A	222	407	2,055	3,096	2,452	5,101	8,234	0.89**
		B	5.0	15.0	221.5	575.0	515.0	772.5	2,208.8	0.89**
		C	2.25	3.70	10.75	18.60	21.00	15.10	24.85	
拔 节 期	I	A	260	376	970	1,745	1,880	2,010	1,889	0.97**
		B	1.35	6.6	32.9	122.3	151.20	130.0	120.0	0.95**
		C	0.50	1.75	3.25	5.95	8.05	6.45	6.30	
	II	A	227	709	2,301	3,565	6,785	8,596	8,993	0.93**
		B	5.0	22.5	150.5	396.3	1,357.5	1,962.5	2,750.0	0.90**
		C	2.20	3.10	6.55	10.35	18.35	23.05	30.25	
结 实 期		A	245	593	2,511	3,392	4,377	4,446	7,805	0.97**
		B	5.0	17.5	270.0	468.8	795.0	925.0	2,162.5	0.96**
		C	2.00	2.90	10.10	13.45	18.20	20.00	26.60	

* I. 施铅后两周取样; II. 成熟时取样。A. 总铅量 (mg/kg); B. 可溶性铅量 (mg/kg); C. 可溶性铅所占的百分率 (%)。

表 4 根表面对铅的吸附及pH值对根吸收铅的影响

table 4 lead content adhered on root surface and effect of pH on lead uptake by roots

项 目		pH 的 影 响			根 表 面 吸 附 的 铅		
		根含铅量 (mg/kg)	溶液含铅量 (mg/l)	沉淀的铅量 (mg)	未浸泡的根 (mg/kg)	浸泡过的根 (mg/kg)	浸出铅的百分率 (%)
施 铅 量 (ppm)	pH						
0	5.5	163.29	41.25	0	163.29	58.11	64.5
	9	144.69	35.00	62.5			
500	5.5	5,673.73	5.84	21.87	5,673.73	315.03	94.5
	9	6,199.07	2.10	33.75			
1,000	5.5	15,859.65	10.62	28.00	15,859.65	230.37	98.5
	9	14,196.09	2.40	60.50			
2,000	5.5	16,803.54	40.37	30.87	16,803.54	635.66	97.2
	9	10,502.84	5.98	157.50			
3,000	5.5	22,257.30	58.61	44.25	22,257.30	1,753.85	89.6
	9	10,735.46	12.51	265.00			

式中 y = 地上部分的铅积累浓度; x_1 = 根的铅积累浓度; x_2 = 施铅后植株生长天数; x_3 = 地上部分干重。

根的铅积累浓度随着施铅后植株生长天数的增加有一定的增加。在根生长较快的分蘖期

和拔节期, 根干重的增加倍数与根铅积累浓度的增加几乎相等(表5)。这种现象表明: 根的铅积累浓度的增加与根干重和表面吸收面积的增加有关。

表 5 不同生育期根总铅量的增加情况
table 5 total lead content increased by root in each development stage

项 目 生 育 期	施铅后两周取样		成熟时取样		取 样 相 差 天 数 (天)	总 铅 量 增 加 倍 数 (倍)	干 重 增 加 倍 数 (倍)
	总 铅 量 (mg/kg)	干 重 (g)	总 铅 量 (mg/kg)	干 重 (g)			
苗 期	4,765.85	0.08	27,546.69	18.28	149	5.78	228.50
分 蘖 期	1,884.71	0.87	35,023.31	16.39	123	18.58	19.29
拔 节 期	2,024.08	9.58	34,548.92	15.78	80	1.71	1.65

地上部分铅积累浓度与施铅后植株生长天数无关, 与铅在植物体内的存在部位和状态有一定的关系。观察水稻根、叶和叶鞘的徒手切片发现: 植株内的铅主要固定在维管束的导管附近, 其他部位则很少见。电镜切片的观察结果进一步表明: 铅在细胞中大都以沉淀或结晶的形式附于细胞壁上或存于细胞间隙中, 在细胞质中也有极少部分, 但它们呈很微小的粉末状。这些沉淀或结晶形式的铅很难随着时间的延长而向上运输。

综上所述, 铅在土壤-水稻系统内的迁移积累可用图3表示。

4. 铅对水稻生长发育的影响

在水稻的种子萌发期和幼苗期, 高浓度的铅对其生长有一定的影响, 在其他生育期影响不显著。

1) 对种子萌发的影响 铅对种子的发芽势和发芽率影响不大。铅主要抑制萌发种子的生长, 对根生长的抑制尤其突出。在萌发的第7天, 100ppm 铅浓度处理的种子幼根长度仅为对照组的18.6%, 500ppm 组的为对照组的2.5%, 而且无根毛和支根。1,000ppm以上浓度处理的, 根基本不生长。铅处理浓度与萌发种子幼芽的长度呈极显著的负相关, 与种子的含铅量呈极显著的正相关。2,000和3,000ppm 浓度处理的种子幼芽生长弯曲, 顶端具有黑点。

铅抑制水稻幼芽的生长, 主要是抑制真叶生长。第7天对照组和3,000ppm 处理组种子幼芽的连续切片观察结果发现, 在幼芽的纵切面, 3,000 处理组幼芽的真叶细胞很小, 而且密集在一起, 看不清细胞的结构, 生长弯曲, 但对照组幼芽的真叶细胞则较为清晰, 生长正常(表6)。

铅对萌发种子生长的抑制与其生理活动受抑密切相关。在种子萌发的第3天和第7天种子的呼吸强度与铅处理浓度呈极显著的负相关, 但铅对呼吸作用的抑制可随着萌发天数的增

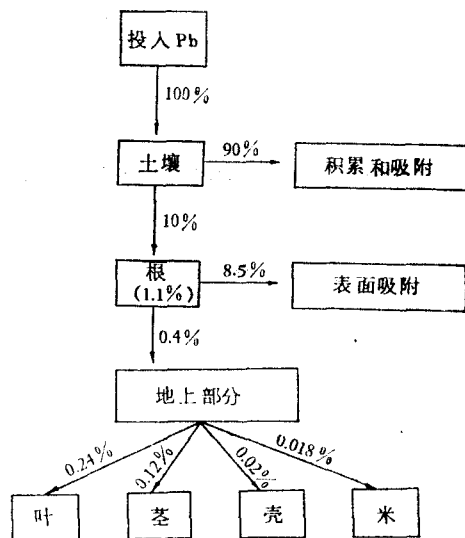


图 3 铅在土壤-水稻系统内的迁移积累概况
fig. 3 the migration and accumulation of lead in soil-rice system

表 6 铅对种子萌发的影响¹⁾
table 6 effect of lead on seed germination

测定项目		施 铅 量 (ppm)							相关系数 (r)
		0	100	500	1,000	1,500	2,000	3,000	
用蒸馏水浸种	发芽势 (%)	99.3	99.3	97.6	97.6	97.6	97.3	97.3	
	发芽率 (%)	99.0	99.6	97.6	97.6	97.6	97.3	97.3	
用铅液浸种	发芽势 (%)	99.0	99.0	100.0	99.6	99.0	100.0	98.6	
	发芽率 (%)	99.3	99.3	99.6	98.6	98.0	99.6	98.3	
鲜重 (g)		24.5	17.2	14.6	13.5	12.2	12.1	11.0	-0.75*
干重 (g)		5.5	5.8	5.9	6.1	6.2	6.3	6.4	0.92**
根长 (cm)		7.26±0.60	1.35±0.11	0.17±0.04					
芽长 (cm)		4.34±0.63	3.87±0.32	3.32±0.38	2.69±0.50	2.15±0.22	1.97±0.32	1.11±0.25	-0.98**
种子含铅量 (mg/kg)		128.58	1,091.13	4,013.69	6,350.91	7,337.79	8,056.86	9,771.97	0.93**
胚芽鞘特征	厚 (mm)	0.171						0.278	
	长 (mm)	5.671						4.708	
	细胞个数	162						158	
	细胞层数	8						8	
	细胞长度 (mm)	0.035						0.030	
真叶特征	第一叶厚 (mm)	0.193						0.107	
	第二叶厚 (mm)	0.107						0.086	
	第三叶厚 (mm)	0.064						0.043	

1) 用铅液浸种的试验只统计发芽势和发芽率。发芽势和发芽率为300粒种子的平均数; 根长和芽长为10粒种子的平均数; 干重和鲜重为300粒种子的总重; 胚芽鞘和真叶特征以幼芽纵切面基部为准。

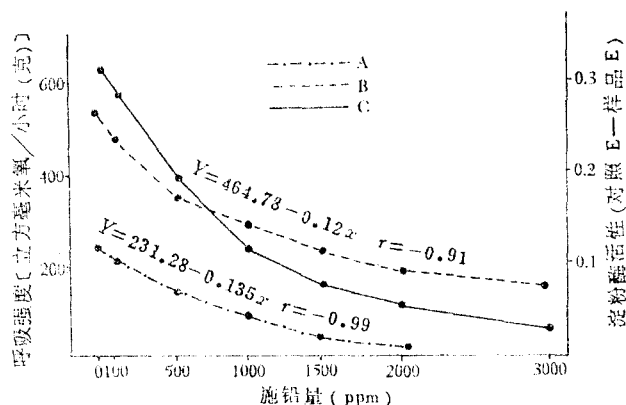


图 4 铅对种子呼吸强度及淀粉酶活性的影响

A. 第3天呼吸强度; B. 第7天呼吸强度; C. 第7天淀粉酶活性。

fig. 4 effect of lead on respiratory intensity and amylase activity of germinating seed
A. respiratory intensity on third-day, B. respiratory intensity on seventh-day, C. activity of amylase on seventh-day.

加而下降(图4)。在萌发的第7天,随着铅处理浓度的升高,淀粉酶活性也下降。

铅对种子萌发时的过氧化物酶同功酶也有一定的影响。在种子萌发的第3天,随着铅处

理浓度的升高, 过氧化物酶同工酶谱带的颜色变浅, 带变窄。特别是 R_f 值为 0.38、0.42、0.62 的几条酶带, 基本上只有一点痕迹存在 (图 5)。第 7 天的情况相反, 1,000ppm 以上浓度处理的种子, 酶带的颜色较对照的深, 带宽, 而且显色时间短, 特别是 R_f 为 0.37、0.56 和 0.61 的几条酶带更为突出 (图 6)。

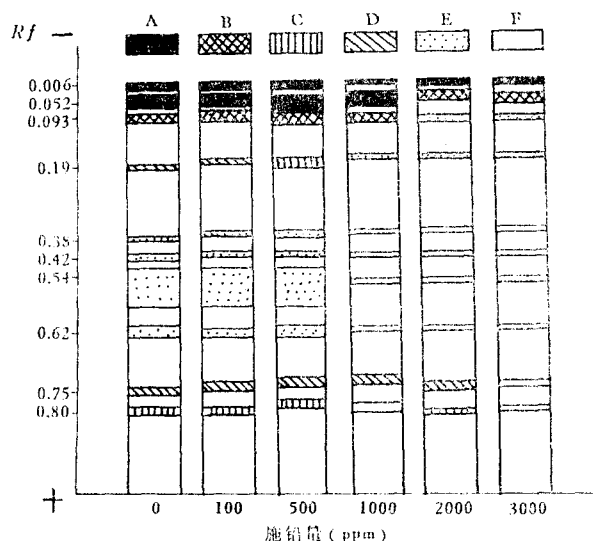


图 5 第 3 天萌发种子的过氧化物同工酶谱带
A. 最强, B. 强, C. 较强, D. 较弱, E. 弱, F. 痕迹。
fig. 5 band of peroxidase isoenzyme on third-day
germinating seed
A. strongest, B. strong, C. stronger, D. weaker,
E. weak, F. trace.

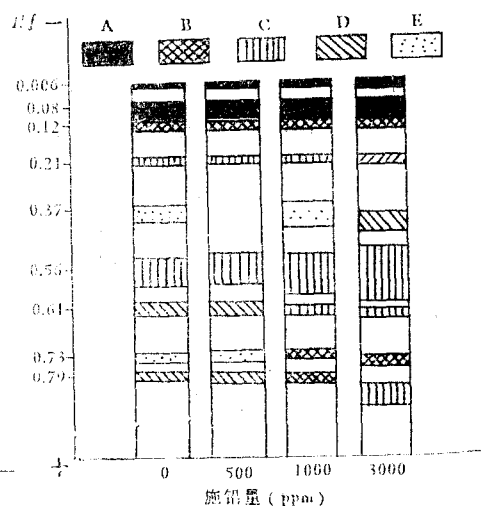


图 6 第 7 天萌发种子的过氧化物同工酶谱带
A. 最强, B. 强, C. 较强, D. 较弱, E. 弱。
fig. 6 band of peroxidase isoenzyme on seventh-
day germinating seed
A. strongest, B. strong, C. stronger,
D. weaker, E. weak

比较图 5 和图 6 则可以看出: 高浓度的铅液处理的水稻种子, 在第 3 天由于受铅的抑制而仅出现痕迹的几条酶带, 在第 7 天的酶带中都恢复得较好。这种现象的出现, 可能与种子对不良环境的适应和本身的代谢调节有关。

2) 对水稻幼苗生长的影响 铅主要影响水稻幼苗根系的生长, 根的鲜重、干重、根长、根体积都随着施铅浓度的升高而降低 (表 7)。

铅对水稻幼苗茎叶生长的影响, 要在施铅量很大时才有明显症状。施铅量在 15,000ppm

表 7 铅对幼苗生长的影响
table 7 effect of lead on growth of seedling

施 铅 量 (ppm)	鲜 重 (g)		干 重 (g)		根 体 积 (ml)	根 长 (cm)	株 高 (cm)	根系脱氢 酶相对活 性 (%)	叶 绿 素 含 量 (mg/g)		
	根	茎和叶	根	茎和叶					叶绿素a	叶绿素b	总 量
0	0.69	0.78	0.070	0.19	2.24	14.30	21.55	100.0	1.78	1.84	3.62
100	0.57	0.72	0.062	0.17	1.65	13.30	22.15	44.0	1.71	2.02	3.73
500	0.38	0.63	0.053	0.11	1.17	10.50	20.53	38.7	1.69	1.81	3.50
1,000	0.38	0.76	0.061	0.12	1.62	11.13	21.76	9.6	1.60	1.27	2.87
1,500	0.37	0.85	0.049	0.14	1.29	10.50	22.38				
2,000	0.33	0.92	0.048	0.15	1.50	10.10	22.40	5.6	1.54	1.27	2.81
3,000	0.27	0.77	0.039	0.12	1.26	9.80	20.84	4.0	1.35	1.08	2.43

1) 重量以 3 株总重计, 叶绿素含量为水培植株的测定数值。

以下, 植株茎叶生长正常; 施铅量在15,000ppm以上, 施铅后的第3天出现叶色褪绿和叶尖枯卷的现象, 随后植株外部叶片边缘曲卷, 以致整片叶子逐渐枯萎。施铅后一个星期, 2,000ppm处理的植株死亡率达51%, 30,000ppm处理的植株死亡率达82%。受害植株的根为黄色, 无弹性无新生根, 根含铅量高达54,086.54毫克/公斤,

在营养液中生长的水稻幼苗, 加铅后的第3天也出现类似的症状。

水稻幼苗明显受害, 与大量的铅液进入植株内有关。把受害的幼苗放到用 H_2S 饱和的固定液中, 可见到叶脉周围有大量的棕色条纹。

受害不严重的水稻幼苗, 在不继续供给铅源的情况下, 受害症状可随生长天数的增加而消失。

铅影响水稻幼苗的生长, 与根系脱氢酶的活性有一定的关系。在水培幼苗出现明显受害症状时, 随着铅处理浓度的升高, 根系脱氢酶活性下降, 叶绿素含量也随之下降, 叶绿素b比叶绿素a下降得更为显著(见表7)。

高浓度的铅对植株的有效分蘖也有一定的影响, 幼苗期用3,000ppm浓度处理的水稻植株, 有效分蘖比对照低16%。

试验中使用的铅源为 $Pb(NO_3)_2$, 由于 NO_3^- 的作用, 对水稻受害症状的观察可能会有一定的影响。

三、讨 论

1. 水稻对铅的吸收因不同生育期和植株各部位的生长习性不同而异: 在不同的生育期施铅, 到成熟时, 植株各器官中积累的铅量取决于施铅后某一较短时期内各器官所吸收的铅量, 与施铅后植株生长天数基本无关。

拔节期是水稻植株新陈代谢最为旺盛的时期, 叶面蒸腾占全生育期的25—30%, 这个时期施铅, 根和地上部分吸收的铅量较其他生育期多, 与施铅量的相关也较其它生育期显著; 结实期水稻的生长中心是籽粒, 在这个时期施铅, 谷壳和糙米积累的铅量比其他生育期相对较多; 植株抽穗以后, 蒸腾强度下降, 地上部分吸收的铅量就显著地小于拔节期和分蘖期。由此可见, 水稻对铅的吸收与植株本身的蒸腾强度密切相关, 水稻植株内的铅大部分随蒸腾流进入, 通过导管向上运输。

铅离子进入植物体后, 很容易与植株内的硫蛋白以及其他高分子化合物相结合而被固定, 这种形式的铅很难再被溶解和运输。在水稻的生长过程中, 虽然由于根系的生长能分泌某种物质使土壤中极少量的难溶铅转化为可溶铅但随着根表面吸收面积的增加, 这些可溶性铅大多数只能被吸附在根表面上, 被植株吸收并向上运输的铅量极少。因此, 在水稻生长的不同生育期施铅, 根、茎、叶积累铅量最多的时期为拔节期, 谷壳和糙米积累铅量最多的时期为结实期。

在土壤-水稻系统中, 由于施入的铅绝大部分很快被固定在土壤中和被吸附在根表面上, 只有极少部分的铅能够被吸收。进入植物体内的铅在其运输过程中不断与蛋白质, 多糖类等高分子化合物相结合而附于细胞壁上, 随着运输距离的增加, 到达植株上部的铅量逐渐减少, 这是导致水稻根、茎、壳、米积累的铅量依次递减的主要原因。但在根与茎、叶和

茎、叶与壳、米之间的铅积累浓度差异很大除上述原因外,可能还有某种生理因素,这方面的工作有待于今后进一步探讨。

2. 水稻对铅的抗性较强,但在种子萌发期和幼苗期,较高浓度的铅仍会对水稻的生长发育造成一定的危害,因此,水稻的种子萌发期和幼苗期为水稻对铅毒害较为敏感的时期。

水稻对铅的抗性较强,其主要原因与铅在土壤-水稻系统内的迁移积累状况有关。由于进入植物体内的铅总量较少而且与生长天数无关,说明植株内的总铅量是相对固定的。水稻种子从萌发到成熟,干重的增加非常迅速,特别是分蘖以后,植株干重的增加与种子萌发期和幼苗期相比可增加几十倍到几百倍。干重越大,单位重量的铅积累浓度就越小,对植株的危害也相应较小。

从电镜切片的观察结果来看,水稻植株内的铅大多以沉淀或结晶的形式附于细胞壁上和细胞间隙中。据Car、Malone等人报道,铅在植物体内的这种存在形式和部位对植物的正常代谢影响并不很严重。这可能也是水稻抗铅性较强的原因之一。

在种子萌发期和幼苗期施入大量的铅会造成植株受害或死亡,其原因之一是铅对呼吸作用的抑制,这一点在种子萌发期已有试验证明,在幼苗期则可用根系脱氢酶活性的测定来间接说明。由于铅抑制了呼吸作用,使呼吸强度降低、贮藏物质的分解和生长物质的合成受阻,导致水稻植株生长不良,继而影响其他生理功能,最后造成死亡。

在不继续供给铅源的情况下,即使是在种子萌发期和幼苗期,水稻也可以通过自身的代谢调节来减轻铅对它的伤害。种子萌发期过氧化物同功酶的激活是这种代谢调节的表现之一。很可能是铅使过氧化物同功酶激活并与其他呼吸途径相偶,使受抑的呼吸作用有所恢复,保证了种子在不良条件下维持基本的呼吸代谢而得以生存。在其他生育期,水稻究竟通过何种代谢途径来减轻铅对它的伤害还需要作进一步的探讨。

值得一提的是种子萌发期根和幼芽的生长以及幼苗期分蘖芽的生长都是以异养方式进行的,而铅除对上述生长具抑制作用外,对其他生长均无影响。在铅对器官生长的抑制作用与器官生长的营养方式之间究竟存在着何种联系是一个很值得探讨的问题。

参 考 文 献

- 吴少伯 1979 植物组织内蛋白酶及同功酶—聚丙烯酰胺盘状电泳。植物生理学通讯(1): 30—33。
曹洪法 1981 陆地生态系统中的重金属污染。环境科学(2): 61—64。
重庆市环境保护监测站、西南农学院土化系 1980 重庆地区紫色水稻土污染问题研究。重庆环境保护(6): 13—17。
Arvik, J. and H. Zimdahl 1974 The influence of temperature pH, and metabolic inhibitors on uptake of lead by plant root. *J. Environ. Qual.* 3: 374—376。
Broyer, T. C., C. M. Johnson and R. E. Paull 1972 Some aspects of lead in plant nutrition. *Plant and Soil*. 36: 301—313。
Car, Malone, D. E., Koeppe and Raymond J. Miller 1974 Localization of lead accumulated by corn plant. *Plant Physiol.* 53: 388—394。
Nriagu (ed) 1987 *The Biogeochemistry of lead in the environment*. Elsevier/North-Holland Biomedical Press, pp. 356—374。

THE MIGRATION AND ACCUMULATION OF LEAD IN RICE AND ITS INFLUENCE ON THE GROWTH AND DEVELOPMENT OF RICE

Yang Shuhua Qu Zhongxiang Wang Huanxiao

(Department of Biology, Yunnan University)

In this paper, the migration and accumulation of lead in rice and the lead in different concentrations influencing on the growth and development of rice in each period of duration have been analysed and discussed by pot culture. The results may summarized as follow;

With the various characters of rice in each period of duration stage, the lead absorbed and accumulated in rice is different. In joining stage, the roots, stems and leaves accumulate the lead most. While the shells and grains do the same in the bearing stage. However, applying lead to rice in any period of duration, the concentration of lead accumulated in various organs of rice is roots>leaves>stems>shells>grains. The lead accumulated in roots and leaves are positively correlated with the concentration of applied lead, but it's not the same to shells and grains.

Most of the applied lead is found in soil and also on the surface of roots. Lead enter mainly into vessel of plant body through apoplast with transpiration current. They stay in the intercellular spaces or adhere to the wall of cells in the form of crystals or precipitation. The lead accumulated by organs of rice did not increase with the days after it applied.

Tolerance of rice to lead is very strong. In seed germination stage and seedling stage, however, rice will be injured by a higher lead concentration. Within certain limit of lead concentration, rice itself can reduce injury from lead by metabolism.