

土壤和叶面铅污染对铅在水稻体内的分布和积累的影响^①

李晓明, 殷云龙*, 黄玉洁, 徐和宝

(江苏省中国科学院植物研究所, 南京 210014)

摘要: 分别采用土壤添加和叶面喷施 $\text{Pb}(\text{OAC})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 的方式, 进行了黄棕壤盆栽水稻Pb污染试验。结果发现: 当土壤添加的Pb量为2000 mg/kg时, 水稻地上部分干重与对照相比下降显著, 产量无显著变化。叶面Pb污染对水稻地上部分干重和产量均无显著影响。无论是土壤Pb污染还是叶面Pb污染, 随着外源Pb污染浓度的增高, 水稻植株各部分Pb含量也相应增高, 其大小顺序在土壤污染时依次是根>叶>茎>籽粒, 叶面污染时是叶片>根>茎>籽粒; 不管是土壤Pb污染还是叶面Pb污染, 水稻叶片的Pb含量与籽粒Pb含量之间的相关性显著。通过计算得出了水稻籽粒Pb含量与外源Pb污染浓度之间的相关性拟合曲线, 从而进一步计算得出黄棕壤总Pb含量毒性临界值是95.7 mg/kg, 叶面污染溶液Pb的毒性临界值在实验条件(喷施9次, 每次200 ml)下为46.2 mg/L。

关键词: 铅; 水稻; 毒性临界值; 叶面污染; 土壤污染

中图分类号: X53; X513

公路两侧土壤和农作物的Pb污染是一个倍受关注的环境问题^[1-10]。汽车尾气中的Pb可通过沉降于土壤和经由大气沉降于植物表面两种途径被植物吸收^[8]。目前, 关于Pb经由土壤对农作物可食部分产生影响的研究报道较多, 但多集中为对公路两侧土壤及农作物污染状况的大田调查^[1-10], 定量浓度梯度的水稻土壤Pb污染的盆栽研究则比较少^[11,14,28-29], 关于水稻的气源性Pb污染研究则罕见报道。因此, 本文在同一黄棕壤基质上, 通过采用盆栽试验条件下的土壤加Pb和叶面喷施Pb来模拟土壤Pb污染和气源性Pb污染, 探讨这两种污染途径下, 水稻对Pb的吸收、累积和转移规律, 为Pb污染地区水稻的食品安全卫生标准的制定提供依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

供试土壤为南京市中山植物园北园的地表40 cm内黄棕壤土, pH值为5.9, 土壤Pb本底含量为18.34 mg/kg (黄棕壤的土壤Pb背景值(A层)的范围是11.1~234.0 mg/kg, 中位值是26.6 mg/kg (数据引自中国环境监测总站, 1990年))^[11], 去除明显杂质后, 风干, 混匀, 过1 cm × 1 cm筛。Pb污染物为 $\text{Pb}(\text{OAC})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 。

供试水稻为武运粳7号(9746), 供试盆栽容器为直径29.5 cm、高25 cm的塑料桶。试验场地为通风玻璃房。

1.2 盆栽试验设计

土壤外源Pb试验设计: 按照土壤加Pb浓度设8个处理水平, 分别为0、10、50、100、300、500、1000、2000 mg/kg, 每个水平6个重复。每盆栽风干土10 kg, 根据加Pb浓度计算 $\text{Pb}(\text{OAC})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 的重量, 将风干土、 $\text{Pb}(\text{OAC})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 和20 g复合肥混匀。基质装盆后, 注水至饱和, 放置两周后移栽水稻秧苗。

叶面外源Pb试验设计: 按照喷施的Pb浓度设5个处理水平, 分别为0、10、50、200、1000 mg/L, 每个水平6个重复, 每盆栽风干土10 kg, 将风干土和20 g复合肥混匀后装盆。基质装盆后, 注水至饱和, 放置两周后移栽水稻秧苗。

秧苗定植: 在通风玻璃房内, 采用白瓷盘进行种子发芽, 待芽苗生长至5~6 cm时, 按照每盆24株定植。

叶面Pb污染: 在水稻拔节期到抽穗期之前, 每隔5天于早上9点对叶片喷施200 ml不同Pb浓度的 $\text{Pb}(\text{OAC})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 溶液, 共喷施9次, 为了避免向叶子喷施Pb溶液时造成对土壤的污染, 喷施时, 将盆体侧放, 两面均匀高度雾化喷施, 待叶子上溶液基本干时, 再将盆体扶正。

①基金项目: 江苏省自然科学基金重点项目(BK2006711-2)资助。

* 通讯作者(xhh3027@jlonline.com)

作者简介: 李晓明(1982—), 女, 陕西大荔人, 硕士研究生, 主要从事植物资源与生态环境研究。E-mail: xiaoming06@gmail.com

生长管理：整个生育期，对盆栽水稻严格定量灌水。在病虫害出现初期，及时喷施速灭威、敌百虫控制稻飞虱和螟虫等病虫害。

1.3 土壤和植物样品采集与分析

土壤样品的制备和分析：以四分法取样，风干，碾磨，过100目筛，经HCl-KClO₄ (4:1)混合消化，TAS990石墨炉原子吸收分光光度计测定土壤本底Pb含量。

在水稻收获期采集植株样品。土壤Pb污染选择0、100、1000 mg/kg组，叶面Pb污染选择0、50、1000 mg/L组，采集根、茎、叶、籽粒，用于Pb在水稻体内的积累和转移研究；其他组则只采集叶片和籽粒，用于叶片和籽粒中Pb含量的相关性分析，分部位装入信封内，依次用表面活性剂清洗10 s，自来水冲洗3遍，再用去离子水冲洗3遍，100℃杀青10 min，80℃烘干48 h，称重，粉碎，装入封口袋，HCl-KClO₄ (4:1)混合消化，最后用TAS990石墨炉原子吸收分光光度计测定各部位Pb含量。

1.4 数据处理

采用SPSS13.0进行数据相关性和差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 外源Pb污染对水稻地上部分干重和籽粒产量的影响

Pb进入植物体内后，会通过改变细胞膜透性^[12]等，引起植物生理生化过程的紊乱^[13-16]，间接地影响植物的生长发育^[17]。本试验就土壤Pb污染和叶面Pb污染对水稻地上部分干重、产量的影响进行了测定和分析，结果见表1、表2。

表1 土壤Pb污染对水稻地上部分干重及籽粒产量的影响

Table 1 Effects of lead pollution in paddy soil on aboveground dry weight and yield of rice

Pb 浓度 (mg/kg)	地上部干重		籽粒重	
	干重 (g/盆)	相对值 (%)	干重 (g/盆)	相对值 (%)
0	81.3 ± 5.1	100	16.4 ± 0.9	100
10	72.1 ± 8.7	88.7	16.7 ± 0.6	101.8
50	89.3 ± 6.5	110.0	17.0 ± 0.4	103.7
100	78.4 ± 11.8	96.6	15.2 ± 0.8	92.7
300	68.4 ± 9.3	84.1	15.7 ± 0.9	95.7
500	71.2 ± 4.3	87.6	15.3 ± 0.5	93.3
1000	72.6 ± 7.8	89.3	15.4 ± 2.7	93.9
2000	63.9 ± 4.7**	78.6	14.6 ± 1.4	89.0

注：** 为在p<0.01水平差异显著。

表2 叶面Pb污染对水稻地上部分干重及籽粒产量的影响

Table 2 Effects of lead pollution on leaf to aboveground dry weight and yield of rice

Pb 浓度 (mg/kg)	地上部干重		籽粒重	
	干重 (g/盆)	相对值 (%)	干重 (g/盆)	相对值 (%)
0	81.3 ± 5.1	100	16.4 ± 0.9	100
10	76.2 ± 7.8	93.8	16.7 ± 0.7	101.8
50	81.5 ± 15.4	100.3	15.2 ± 1.2	92.7
200	71.3 ± 10.4	87.8	15.9 ± 0.8	97.0
1000	73.0 ± 4.8	89.9	16.0 ± 1.2	97.6

2.1.1 土壤加Pb对水稻地上部分干重和籽粒产量的影响

由表1可以看出，当土壤加Pb量为50 mg/kg时，水稻地上部分干重、产量会略有增长，随着Pb污染量的继续增加，水稻地上部分干重、产量与对照相比均下降，当土壤添加的Pb量为2000 mg/kg时，地上部分干重与对照相比显著下降 (p<0.01)，减少21.4%。

2.1.2 叶面Pb污染对水稻地上部分干重和籽粒产量的影响

由表2可见叶面Pb污染时，水稻地上部分干重在叶面污染溶液浓度为50 mg/L时与对照相比略有增长，随着Pb污染浓度的继续增加，则表现为下降的趋势。水稻产量则在叶面Pb污染溶液浓度为10 mg/kg时与对照相比略有增长，随着Pb污染浓度的继续增加，则表现为下降的趋势。

2.2 外源Pb污染下水稻植株各器官的Pb含量变化

如表3所示，随着土壤Pb添加浓度的增高，水稻各部分的Pb含量都相应增高，差异显著 (p<0.05)。水稻各部分Pb含量大小顺序是根>叶>茎>籽粒。水稻地上部分Pb的浓度远低于根，表现为一定的浓度梯度。这一规律和既有的研究结果是一致的^[18]。

如表4所示，当叶面Pb污染时，随着污染浓度的增高，茎、叶、籽粒中Pb含量与对照相比达到了显著差异水平 (p<0.05)。其Pb含量大小顺序是叶片>根>茎>籽粒。

综合分析土壤Pb污染和叶面Pb污染水稻各器官的Pb积累规律发现，Pb在进入水稻植株后的迁移性都不是很高，土壤污染的根和叶面污染中的茎都分别对Pb向上和向下迁移和运输起到了很大的屏障作用。这一现象可能的解释就是和Pb以可溶的状态进入植物的比值很少、Pb的细胞壁沉积、Pb在植物细胞中的液泡区域化分布以及Pb进入植物体中形成螯合物有关^[19-27]。

表 3 不同土壤 Pb 污染浓度下水稻植株的 Pb 含量 (mg/kg)

Table 3 Pb concentrations in rice organs under different added Pb pollution levels in soil

Pb 浓度 (mg/kg)	根	茎	叶片	籽粒
0	9.21 ± 0.76 c	2.52 ± 0.28 b	3.98 ± 1.77 c	0.25 ± 0.01 c
100	306.09 ± 202.07 b	7.87 ± 1.64 b	21.06 ± 15.35 b	0.67 ± 0.11b
1000	2778.07 ± 363.45 a	50.50 ± 21.44 a	69.19 ± 4.90 a	1.20 ± 0.11 a

注: 同列中不同字母表示在 $p < 0.05$ 水平上有显著差异, 下表同。

表 4 不同叶面 Pb 污染浓度下水稻植株的 Pb 含量 (mg/kg)

Table 4 Pb concentrations in rice organs under different added Pb pollution levels on leaf

Pb 浓度 (mg/L)	根	茎	叶片	籽粒
0	9.21 ± 0.76 b	2.52 ± 0.28 b	3.98 ± 1.77 b	0.25 ± 0.01 b
50	41.46 ± 17.22 b	4.10 ± 0.71 b	335.08 ± 55.99 b	0.49 ± 0.05 b
1000	362.86 ± 93.64 a	47.05 ± 13.92 a	4886.37 ± 1720.08 a	4.04 ± 1.88 a

2.3 外源 Pb 污染部位中的 Pb 向籽粒中的转移

由表 5、表 6 可以看出, 在试验范围内, 土壤 Pb 污染时, 污染部位根中 Pb 含量增值与籽粒中 Pb 含量增值的平均比例为 2916.27:1, 叶面 Pb 污染时, 污染部位叶中 Pb 含量的增值与籽粒中 Pb 含量的增值的平

均比例为 1287.00:1, 也就是说要使籽粒中的 Pb 含量增加 1 mg, 土壤 Pb 污染时, 根中的 Pb 含量平均要增加 2916.27 mg, 而叶面 Pb 污染时, 叶子中 Pb 含量平均要增加 1287.00 mg。即叶片中的 Pb 更容易向籽粒中转移积累。

表 5 不同土壤 Pb 污染浓度下 Pb 向籽粒中转移的比例

Table 5 Transition ratios of exogenous Pb pollution from root to seed under different added Pb pollution levels in soil

添加 Pb 的增量 (mg/kg)	根含 Pb 增量	籽粒含 Pb 增量	根含 Pb 增量/籽粒含 Pb 增量
0 ~ 100	9.21 ~ 306.09	0.20 ~ 0.67	705.47
100 ~ 1000	306.09 ~ 778.07	0.67 ~ 1.20	4676.31
0 ~ 1000	9.21 ~ 778.07	0.20 ~ 1.20	2916.27

表 6 不同叶面 Pb 污染浓度下 Pb 向籽粒中转移的比例

Table 6 Transition ratios of exogenous Pb pollution from root to seed under different added Pb pollution levels on leaf

添加 Pb 的增量 (mg/L)	叶含 Pb 增量	籽粒含 Pb 增量	叶含 Pb 增量/籽粒含 Pb 增量
0 ~ 50	3.98 ~ 335.08	0.25 ~ 0.49	1402.94
50 ~ 1000	335.08 ~ 4886.37	0.49 ~ 4.04	1279.32
0 ~ 1000	3.98 ~ 4886.37	0.25 ~ 4.04	1287.00

2.4 外源 Pb 污染浓度与水稻叶片和籽粒中 Pb 含量的相关性

Pb 经过根或者叶面的吸收后, 都会进入水稻植株体内, 在水稻的植株体内形成一定的积累^[8], 通过对叶片、籽粒 Pb 含量与 Pb 添加浓度之间进行相关性分析, 发现随着土壤中添加 Pb 量的增加, 水稻叶片和籽粒中的 Pb 含量相应增加; 同样随着叶面喷施 Pb 溶液浓度的增加, 水稻叶片和籽粒中的 Pb 含量也随之增加。

对水稻籽粒 Pb 含量与外源 Pb 污染浓度进行一元线性回归分析, 发现土壤 Pb 污染时, 水稻叶片和籽粒中 Pb 含量与土壤中添加 Pb 量显著正相关, 相关系数分别

为 0.732^{**} ($p < 0.01$, $n = 8$), 0.926^{***} ($p < 0.001$, $n = 8$); 水稻叶片和籽粒中 Pb 含量与土壤总 Pb 也显著正相关, 相关系数分别为 0.732^{***}, 0.926^{***}。叶面 Pb 污染时, 水稻叶片和籽粒中 Pb 含量与叶面喷施 Pb 浓度显著正相关, 相关系数分别为 0.993^{***} ($p < 0.001$, $n = 5$), 0.998^{***} ($p < 0.001$; $n = 5$)。

为了精确估测土壤 Pb 污染和叶面 Pb 污染对水稻叶片和籽粒 Pb 含量的影响, 进一步对土壤总 Pb 和叶面 Pb 与籽粒 Pb 进行曲线拟合 (表 7、表 8), 计算出在土壤本底 Pb 含量为 18.34 mg/kg 的情况下, 以籽粒

表 7 叶片、籽粒中 Pb 含量和土壤添加 Pb 浓度之间的相关方程

Table 7 Correlation equations of Pb concentrations of leaf and seed and added Pb concentration in soil

Y (mg/kg)	X (mg/kg)	相关方程	R ²
叶片 Pb 含量	土壤添加 Pb 量	$Y = 2.840 + 0.227X - 2.282 \times 10^{-4}X^2 + 6.801 \times 10^{-8}X^3$	0.999 ^{***}
籽粒 Pb 含量	土壤添加 Pb 量	$Y = 0.340 + 0.002X - 2.00 \times 10^{-6}X^2 + 6.310 \times 10^{-10}X^3$	0.985 ^{***}
叶片 Pb 含量	土壤总 Pb 量	$Y = -1.391 + 0.235X - 2.320 \times 10^{-4}X^2 + 6.801 \times 10^{-8}X^3$	0.999 ^{***}
籽粒 Pb 含量	土壤总 Pb 量	$Y = 0.299 + 2.291 \times 10^{-3}X - 2.040 \times 10^{-6}X^2 + 6.309 \times 10^{-10}X^3$	0.985 ^{***}

注: ** 为 $p < 0.01$, *** 为 $p < 0.001$, 下表同。

表 8 叶片、籽粒中 Pb 含量和叶面喷施 Pb 浓度之间的相关方程

Table 8 Correlation equations of Pb concentrations of leaf and seed and added Pb concentration on leaf

Y (mg/kg)	X (mg/L)	相关方程	R ²
叶片 Pb 含量	叶面喷施 Pb 浓度	$Y = 16.479 + 7.038X - 2.200 \times 10^{-6}X^2$	1.0 ^{***}
籽粒 Pb 含量	叶面喷施 Pb 浓度	$Y = 0.331 + 0.004X + 4.950 \times 10^{-11}X^3$	0.998 ^{**}

中Pb毒性临界含量为 0.5 mg/kg(GB14935-94)^[28]计算,向土壤中施加的Pb毒性临界值为 77.3 mg/kg,土壤中总Pb毒性临界值为 95.7 mg/kg。向水稻叶面施加的Pb溶液毒性临界值为 46.2 mg/L。

2.5 水稻叶片和籽粒中 Pb 含量的相关性

随着外源Pb污染浓度的增加,水稻植株各器官中的Pb含量也相应增加(表 3、表 4),因此采用SPSS分析软件建立了水稻籽粒与叶片之间的一元方程,其中,土壤污染时,籽粒中Pb含量(Y)与叶片中Pb含量(X)之间的相关方程为 $Y = 0.0147X + 0.2307$, R² 值为 0.8912^{**}; 叶面污染时籽粒中Pb含量(Y)与叶片中Pb含量(X)之间的相关方程为 $Y = 0.0008X + 0.2249$, R² 值为 0.9912^{**}(图 1)。不管是土壤Pb污染和叶面Pb污染,叶片中Pb含量与籽粒中Pb含量的相

关系数都极显著($p < 0.001$),因此通过叶片 Pb 含量的测定来检测土壤 Pb 污染和大气 Pb 污染及其向可食部分的转移是可行的。

3 水稻土壤 Pb 的毒性临界值讨论

前人关于水稻土壤Pb的毒性临界值的研究已有很多报道^[8,11,28-29]。郑春荣和陈怀满^[11]通过向“南京 3714”水稻土壤中投加Pb(OAc)₂的盆栽试验得出了黄棕壤Pb的食用临界含量为 480 mg/kg;康立娟等^[29]通过研究水稻“吉农大 2 号”在砂壤土中(pH值 6.7)的Pb积累规律,得出的糙米Pb累积量(Y)与土壤中总Pb量(X)之间的相关方程 $Y = 0.3924 + 0.00252X$, $r = 0.9754$,以食品卫生安全标准为 0.5 mg/kg计算,则土壤总Pb的毒性临界值 42.7 mg/kg;宋玉芝^[30]在江

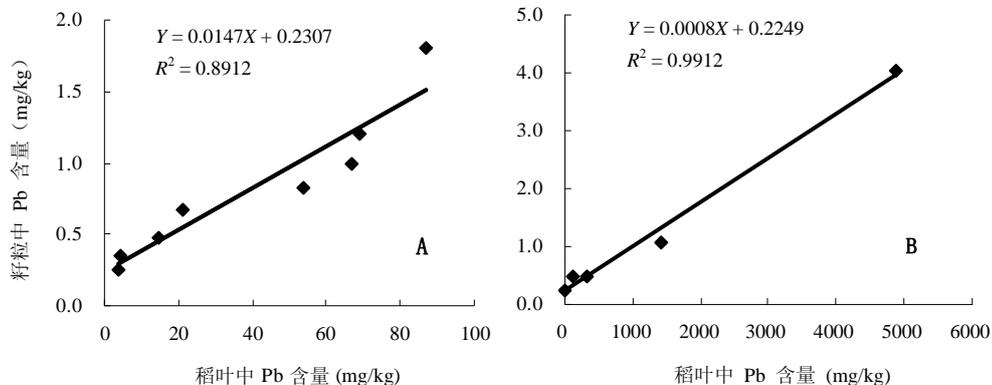


图 1 土壤 Pb 污染 (A) 与叶面 Pb 污染 (B) 稻叶 Pb 含量与籽粒 Pb 含量的相关性

Fig. 1 Correlation between Pb concentrations in leaf and seed under Pb pollutions in soil and on leaf

苏省农业科学院以“两优培九”为试验材料, 通过向土壤中添加 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 污染水稻, 建立了曲线方程 $Y = -0.00000021X^2 + 0.00191X + 0.097$ ($R^2 = 0.9915$), 以食品卫生安全标准为 0.5 mg/kg 计算, 土壤 Pb 的毒性临界值 211.5 mg/kg 。陈建安等^[8]在对福建 319 国道龙岩市新罗区路段两侧的土壤和农作物 Pb 含量的分析, 得出稻米对 Pb 的浓缩比(将某种农作物可食部分的含 Pb 量除以相对应的根周土含 Pb 量)为 0.006 , 则可以计算出土壤 Pb 临界值为 83.33 mg/kg 。以上研究结果存在较大差异, 究其原因, 可能是由于各个试验条件差异较大而造成的, 土壤条件、实验材料品种、污染试剂相伴阴离子等^[11,18,31]都会对毒性临界值产生较大影响, 如: 郑春荣和陈怀满^[11]试验所用水稻“南京 3714”为籼稻, 本试验所用水稻品种“武运粳 7 号”为粳稻, 粳稻的生长周期要比籼稻长, 吸收、积累时间长, 对应的土壤临界值就要比籼稻的低, 所以各地区、各水稻品种的土壤 Pb 的毒性临界值要具体而定。

4 结论

(1) 当外源添加的 Pb 量较低时(土壤 Pb 污染量 $< 50 \text{ mg/kg}$, 叶面 Pb 污染溶液浓度 $< 50 \text{ mg/L}$), 水稻地上部分干重和产量略有增长, 当外源添加的 Pb 量继续增加时, 水稻地上部分干重和产量均会较对照下降, 当土壤添加的 Pb 量为 2000 mg/kg 时, 地上部分干重与对照相比显著下降。叶面 Pb 污染对水稻的地上部分干重和产量没有产生显著影响。

(2) 不管土壤 Pb 污染还是叶面 Pb 污染, 随着污染量的增加, 水稻各部分 Pb 含量都显著增加。其 Pb 含量大小顺序在土壤污染时为根 $>$ 叶 $>$ 茎 $>$ 籽粒, 叶面污染为叶片 $>$ 根 $>$ 茎 $>$ 籽粒。

(3) 土壤污染时, 水稻叶片和籽粒中的 Pb 含量和土壤中添加 Pb 量以及土壤中总 Pb 量均呈显著正相关; 叶面污染时, 水稻叶片和籽粒中的 Pb 含量和叶面污染溶液的浓度也呈显著正相关。

(4) 不管土壤 Pb 污染还是叶面 Pb 污染, 水稻叶片的 Pb 含量与籽粒之间相关性显著。

(5) 根据国标规定粮食中的 Pb 含量安全阈值为 0.5 mg/kg , 计算得出针对水稻的黄棕壤土壤中总 Pb 含量毒性临界值是 95.7 mg/kg 。叶面 Pb 污染溶液在试验条件(喷施 9 次, 每次 200 ml)下的毒性临界值则为 46.2 mg/L 。

(6) 通过水稻叶片与籽粒中 Pb 含量的相关性分析认为, 气源性 Pb 可以通过叶片的吸收向籽粒转移,

从而影响籽粒中的 Pb 含量。

参考文献:

- [1] 李波, 林玉锁, 张孝飞, 徐亦钢, 俞飞. 沪宁高速公路两侧土壤和小麦重金属污染状况. 农村生态环境, 2005, 21(3): 50-53, 70
- [2] 李湘洲. 机动车尾气对土壤铅累积的影响及分布格局. 中南林学院学报, 2001, 21(4): 36-39
- [3] 索有瑞, 黄立新. 西宁地区公路两侧土壤和植物中铅含量及其评价. 环境科学, 1996, 17(2): 74-76
- [4] 李湘洲. 公路系统沿线作物铅累积状况的研究. 中南林学院学报, 2002, 22(1): 40-42
- [5] 郑路, 常江. 合肥市菜园蔬菜和土壤的铅污染调查. 环境污染与防治, 1989(5): 35-37
- [6] 刘玉萃, 李保华, 吴明作. 大气-土壤-小麦生态系统中铅的分布和迁移规律研究. 生态学报, 1997, 17(4): 418-425
- [7] 石元值, 马立峰, 韩文炎, 阮建云. 汽车尾气对茶园土壤和茶叶中铅、铜、镉元素含量的影响. 茶叶, 2001, 27(4): 21-24
- [8] 陈建安, 林健, 兰天水, 张小平, 邱卿如, 张志超, 杜志闲, 陈益林, 张琦. 公路边农作物铅污染水平与相关因素研究. 海峡预防医学杂志, 2002, 8(2): 15-19
- [9] 曹立新. 公路边土壤和水稻中铅的分布、累积及临界含量. 环境科学, 1996, 16(6): 66-68
- [10] 陈维新. 沈阳东郊沈抚顺公路两侧土壤铅含量分布规律的初步研究. 农业环境保护, 1990, 9(20): 10-13
- [11] 陈怀满, 陈能场, 陈英旭, 李勤光, 郑春荣, 文启孝, 邢光熹. 土壤-植物系统中的重金属污染. 北京: 科学出版社, 1996: 210-250, 344
- [12] 任安芝, 高玉葆, 刘爽. 铬、镉、铅胁迫对青菜叶片几种生理生化指标的影响. 应用与环境生物学报, 2000, 6(2): 112-116
- [13] 杨丹慧. 重金属对高等植物光合膜结构和功能的影响. 植物学通报, 1991, 8(3): 26-29
- [14] 周鸿, 曲仲湘, 王焕校. 铅对几种农作物的影响及迁移累积初探. 环境科学学报, 1983, 3(3): 222-233
- [15] Van Assche F, Clijster H. Effects of metal on enzyme activity in plants. Plant Cell Environ., 1990, 13: 195-206
- [16] 张义贤. 重金属对大麦 (*Hordeum vulgare*) 毒性的研究. 环境科学学报, 1997, 17(2): 199-205
- [17] Koeppel DE. Lead: Understanding the minimal toxic of lead in plants // Lepp NW. Effect of Heavy Metal Pollution on Plants. London, New Jersey: App. Sci. Pub., 1981: 55-57
- [18] Kuang SP, Song F. Bioavailability of crops to environmental hormone Pb in soils and its remediation. Chin. J. Geochem., 2008, 27: 41-45

- [19] 杨居荣, 鲍子平, 张素芹. 镉、铅在植物细胞内的分布及其可溶性结合形态. 中国环境科学, 1993, 13(4): 263-268
- [20] Nishizono H. The role of the root cell wall in the heavy metal tolerance of *Athyrium yokoscense*. *Plant Soil*, 1987, 101: 15-20
- [21] Verkleij JAC, Schat H. Mechanisms of metal tolerance in higher plants // Show J. *Evolutionary Aspects of Heavy Metal Tolerance in Plant*. Boca Raton: CRC Press, F1, 1990: 179-193
- [22] 江行玉, 赵可夫. 铅污染下芦苇体内铅的分布和铅胁迫相关蛋白. 植物生理与分子生物学学报, 2002, 28(3): 169-174
- [23] Tomsett AB, Thurman DA. Molecular biology of metal tolerance of plants. *Plant Cell Environ.*, 1988, 11: 383-394
- [24] 许嘉琳, 鲍子平, 杨居荣, 刘虹. 铅、镉和铜在水稻中的化学形态. 应用生态学报, 1991, 2(3): 244-248
- [25] 张玉秀, 柴团耀, Burkard G. 植物对重金属的抗性机制研究进展. 植物学报, 1999, 41(5): 453-457
- [26] Cobbett CS. Phytochelatins and their roles in heavy metal detoxification. *Plant Physiol.*, 2000, 123: 825-832
- [27] 王剑虹, 麻密. 植物修复的生物学机制. 植物学通报, 2000, 17(6): 504-510
- [28] 杨惠芬, 李明元, 沈文. 食品卫生理化检验标准手册. 北京: 中国标准出版社, 1998: 101-104
- [29] 康立娟, 赵成爱, 李呐. 铅在砂壤水稻土/水稻体系中污染效应及累积规律的研究. 吉林农业大学学报, 2000, 22(2): 68-70
- [30] 宋玉芝. 土壤铅污染对水稻生长影响的研究. 南京气象学院学报, 2005, 28(4): 536-542
- [31] 陈怀满, 郑春荣. 影响铅的土壤环境容量的因素. 土壤, 1994, 26(4): 189-195

Effects of Lead Pollution in Soil and on Leaf on Distribution and Accumulation of Lead in Rice

LI Xiao-ming, YIN Yun-long, HUANG Yu-jie, XU He-bao

(*Institute of Botany, Jiangsu Province and Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210014, China*)

Abstract: A Pb pollution pot experiment was conducted by adding $Pb(OAc)_2 \cdot 3H_2O$ in a yellowbrown soils and spraying it to rice leaf. The results showed that: when the added Pb was 2000 mg/kg, the aboveground dry weight of rice decreased significantly, but the yield of rice didn't change significantly. Leaf Pb pollution had no significant effect on the aboveground dry weight and yield of rice. Pb concentration in every organ of rice increased significantly as Pb concentration increased, Pb accumulation order in rice organs was root > leaf > stalk > seed in soil pollution and leaf > root > stalk > seed in leaf pollution. Pb concentration in the leaf was significantly correlated with Pb concentration in the seed. A curve was established for fitting Pb concentration in the seed and added Pb concentration, and according to the curve, the toxicity threshold value of Pb total concentration is 95.7 mg/kg in the yellowbrown soil and the added Pb threshold value is 46.2 mg/L on the rice leaf under the experimental condition, i.e., 9 spraying time and 200 ml per time.

Key words: Lead (Pb), Paddy, Toxicity threshold value, Leaf pollution, Soil pollution