

刘瑾, 李亚男, 付婧怡. 低浓度 Pb 下水稻幼苗各部位 Pb 及营养元素的积累机制[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(5): 1130-1135.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2019.05.019

低浓度 Pb 下水稻幼苗各部位 Pb 及营养元素的积累机制

刘瑾^{1,2}, 李亚男¹, 付婧怡^{1,2}

(1. 太原理工大学环境科学与工程学院, 山西 太原 030024; 2. 广东省生态环境技术研究所, 广东省农业环境污染综合治理重点实验室, 广东 广州 510650)

摘要: 近年来水稻中 Pb 含量超标现象日益严重。为了深入了解 Pb 对水稻幼苗的毒害过程, 采用水培方法, 研究不同浓度 Pb (2.0 $\mu\text{mol/L}$, 3.5 $\mu\text{mol/L}$, 5.0 $\mu\text{mol/L}$) 和不同处理时间 (0 h, 6 h, 12 h, 24 h, 36 h, 48 h, 72 h) 下水稻幼苗各部位对 Pb 的积累速率, 以及 Pb 对水稻幼苗体内叶绿素和微量营养元素 (Cu, Zn, Mn) 含量的影响。结果表明, Pb 在根部的积累速率随处理时间的延长而减少, 而在茎、叶中的积累速率随处理时间的延长而增加。在 Pb 胁迫下, 叶片中叶绿素含量呈现“低促高抑”的特征, 即低浓度 (2.0 $\mu\text{mol/L}$) 的 Pb 促进叶绿素的合成, 高浓度 (5.0 $\mu\text{mol/L}$) 的 Pb 抑制叶绿素的合成。各微量营养元素在水稻幼苗各部位的分布情况不同, Mn, Cu, Zn 在各部位的含量顺序分别为: 叶>茎>根、根>叶>茎、茎>叶>根, 三者均和 Pb 呈拮抗关系, 含量随 Pb 处理时间的延长而减少。

关键词: Pb; 水稻幼苗; 积累; 叶绿素; 微量营养元素

中图分类号: S511 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2019)05-1130-06

Accumulation mechanism of Pb and nutrient elements in different parts of rice seedlings under low Pb concentration

LIU Jin^{1,2}, LI Ya-nan¹, FU Jing-yi^{1,2}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Guangdong Key Laboratory of Integrated Agro-environmental Pollution Control and Management, Guangdong Institute of Eco-environmental Science & Technology, Guangzhou 510650, China)

Abstract: In recent years, the phenomenon of excessive level of Pb in rice has become more and more serious. In order to explore the toxic process of Pb on rice, the hydroponic method was used to study the accumulation rate of Pb in different parts of rice seedlings and the effect of Pb on the contents of chlorophyll and micronutrients (Cu, Zn, Mn) under the different concentrations of Pb (2.0 $\mu\text{mol/L}$, 3.5 $\mu\text{mol/L}$, 5.0 $\mu\text{mol/L}$) and different treatment time (0 h, 6 h, 12 h, 24 h, 36 h, 48 h, 72 h). The results showed that the accumulation rate of Pb in roots decreased with the prolongation of treatment time, while the accumulation rate of Pb in stems and leaves increased with the prolongation of treatment time. Pb showed a promoting effect on the content of chlorophyll at low concentrations and an inhibitory effect at high concentrations.

Low concentration of Pb promoted the synthesis of chlorophyll, whereas high concentration of Pb inhibited the synthesis of chlorophyll. The distribution of micronutrients in different parts of rice seedlings was different. The contents of Mn, Cu, Zn in different parts of rice seedlings decreased in the order: leaf > stem > root, root > leaf > stem, stem > leaf > root, respectively, and they all showed an antagonistic relationship with the concentration of Pb. The contents of Mn, Cu, Zn decreased with the prolongation of

收稿日期: 2018-11-15

基金项目: 广东省科技计划项目 (2017B030314092); 山西省基础研究计划项目 (2015021119)

作者简介: 刘瑾 (1993-), 女, 山西晋中人, 硕士研究生, 主要研究方向为水稻重金属的吸收与积累。(Tel) 18718412649; (E-mail) 715708956@qq.com

通讯作者: 李亚男, (Tel) 18636658360; (E-mail) yanan88191@163.com

treatment time.

Key words: Pb; rice seedling; accumulation; chlorophyll; micronutrient

Pb(铅)不是植物生长的必需元素,却是一种环境污染物^[1-4]。在所有重金属中,Pb 是仅次于 As 的第二大有害污染物。根据新的欧洲 REACH 法规,Pb 被列为“值得关注的化学物质”^[5]。植物积累 Pb 主要是通过根部的吸收^[6-7],进入根部的 Pb 主要积累在外壁和表皮中,只有少量的 Pb 通过维管组织被运送到地上部分,因此,大多数研究结果表明 Pb 在植物中的积累量呈现出根>茎>叶>籽粒的规律^[8-10]。

水稻作为中国第一大粮食作物,在生长早期阶段极易受到 Pb 的污染^[11]。水稻被 Pb 污染后,其正常的新陈代谢、形态生理特征、作物生长及产量都会受到严重的影响,表现为植株矮小、细胞结构和离子稳态受到破坏、叶绿素生物合成减少以及产生过量的活性氧自由基(ROS)等^[12-16]。之前的研究大多集中在 Pb 胁迫下,水稻对 Pb 的吸收和积累情况、Pb 在水稻各部位的分布情况和 Pb 对水稻生长及生理生化指标的影响等^[11, 17-19],针对短期 Pb 胁迫下水稻幼苗各部位 Pb 积累速率的报道较少。因此,本试验研究了与被动运输有关的水稻幼苗根、茎、叶 3 个部位对 Pb 的积累速率,以及叶绿素和微量营养元素(Mn、Cu、Zn)随处理时间的变化情况,深入了解水稻幼苗对 Pb 胁迫的响应机制。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试水稻品种黄华占,由华南农业大学生命科学院提供。测试仪器:电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)、紫外-可见分光光度计、石墨消解仪(ProD48)。试剂:硝酸铅(分析纯)、盐酸、磷酸、硝酸和高氯酸(优级纯)、乙醇(99.7%)、Na-EDTA。

1.2 试验设计

1.2.1 水稻的培养与处理 将精心挑选的水稻种子用 0.5% NaClO 表面灭菌 20 min,冲洗干净后用 7%的 H₂O₂ 避光浸泡 10 min,然后用超纯水清洗 8~10 次并用超纯水浸泡 20 h,期间更换 1 次超纯水。随后将种子均匀铺洒在湿润的滤纸上避光萌发,期间要保证滤纸湿润且种子不被水淹没。待种子发芽后更换 1/4 营养液培养 3 d 后再更换 1/2 营养液培养 3 d。选择大小均匀的幼苗转移至含有 6 L 完全

营养液的黑色聚乙烯盆中。营养液采用 Kimura B 配方(表 1)。全营养液下培养 25 d 后进行 Pb 胁迫处理,Pb 浓度为:2.0 μmol/L、3.5 μmol/L、5.0 μmol/L Pb(NO₃)₂。用 1.0 mol/L KOH 调节营养液 pH 值至 5.5 左右,每 3 d 更换 1 次营养液。幼苗种植于人工气候室中[光照 12 h,温度 28 ℃(白天)/25 ℃(夜间),相对湿度 60%]。

表 1 水稻常规营养液配方

Table 1 Formula of the nutrition solution of rice

化合物	浓度 (μmol/L)	化合物	浓度 (μmol/L)
(NH ₄) ₂ SO ₄	370.0	ZnSO ₄ · 7H ₂ O	1.0
MgSO ₄ · 7H ₂ O	550.0	CuSO ₄ · 5H ₂ O	1.0
K ₂ SO ₄	90.0	MnSO ₄ · H ₂ O	5.0
KNO ₃	180.0	H ₃ BO ₃	10.0
Ca(NO ₃) ₂ · 4H ₂ O	370.0	Na ₂ MoO ₄ · 2H ₂ O	0.5
KH ₂ PO ₄	180.0	NaCl	100.0
Fe(u)-EDTA	50.0	CoSO ₄ · 7H ₂ O	0.2

1.2.2 取样方法 按以下时间点进行取样:0 h、6 h、12 h、24 h、36 h、48 h、72 h,每个处理设 3 个平行样,每个平行样随机取 5 株大小均匀的植株。用 0.1 μmol/L Na-EDTA 浸泡水稻根部 30 min,去除水稻根系表面吸附的 Pb,之后用去离子水冲洗干净,然后用吸水纸擦干根部的水分^[20]。取部分叶片用于叶绿素含量的测定,剩下的样品储存于-80 ℃冰箱中用于后续的分析。

1.3 测定方法

1.3.1 叶绿素含量的测定 取 0.1 g 新鲜叶片,在 10 ml 99.7%的乙醇溶液中浸泡直到叶片颜色褪去,取上清液在 645 nm 和 663 nm 波长下,用紫外-可见分光光度计测定吸光度值 D₆₄₅、D₆₆₃,通过以下公式计算叶绿素含量^[21]:

$$C_a = \frac{(12.3D_{663} - 0.86D_{645})V}{d \times 1\,000 \times W}$$
$$C_b = \frac{(19.3D_{645} - 3.6D_{663})V}{d \times 1\,000 \times W}$$

式中:C_a、C_b分别为叶绿素 a 和叶绿素 b 的含量(mg/g,FW);V 为萃取液体积(ml);d 为光路长度(cm);W 为叶片质量(g,FW);D₆₄₅、D₆₆₃为吸光度

值;总叶绿素含量 = $C_a + C_b$ 。

1.3.2 Pb及Cu、Mn、Zn含量的测定 取0.3 g研磨至匀浆的鲜样(根、茎、叶)于消化杯中,并加入 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ (体积比87:13)混合液10 ml,盖上盖子后置于通风橱中过夜。用石墨消解仪消解冷却后,加5 ml 5% HNO_3 并定容至25 ml。采用ICP-OES测定样品中Pb以及微量营养元素Cu、Mn、Zn的含量。

1.4 数据分析

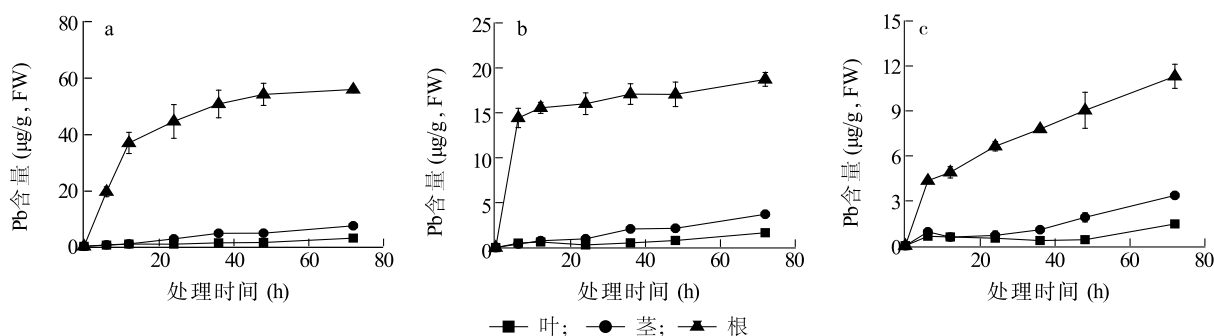
所有数据采用单因素方差分析(ANOVA),绘图

软件为OriginPro(版本:8.0,OriginLab公司提供)。

2 结果与分析

2.1 水稻幼苗各部位Pb的积累速率

图1表示在Pb浓度分别为2.0 $\mu\text{mol/L}$ 、3.5 $\mu\text{mol/L}$ 、5.0 $\mu\text{mol/L}$ 时,水稻幼苗各部位在不同处理时间下对Pb的积累情况。在不同的Pb浓度处理下水稻幼苗各部位对Pb的积累量顺序是:根>茎>叶,说明Pb主要富集在水稻根部,水稻对Pb的积累随处理浓度的增加而增加。



a: Pb浓度为5.0 $\mu\text{mol/L}$; b: Pb浓度为3.5 $\mu\text{mol/L}$; c: Pb浓度为2.0 $\mu\text{mol/L}$ 。

图1 Pb在水稻幼苗各部位的分布

Fig.1 Distribution of Pb in different parts of rice seedlings

图2表示Pb浓度分别为2.0 $\mu\text{mol/L}$ 、3.5 $\mu\text{mol/L}$ 、5.0 $\mu\text{mol/L}$ 时,水稻幼苗同一部位对Pb的积累情况。由图2可知,Pb处理过程中,水稻茎、叶

中Pb的积累呈现出增加的趋势,而根中Pb的积累逐渐趋于平稳,表明水稻根系积累的Pb含量达到一定值后,其增加量无显著变化。

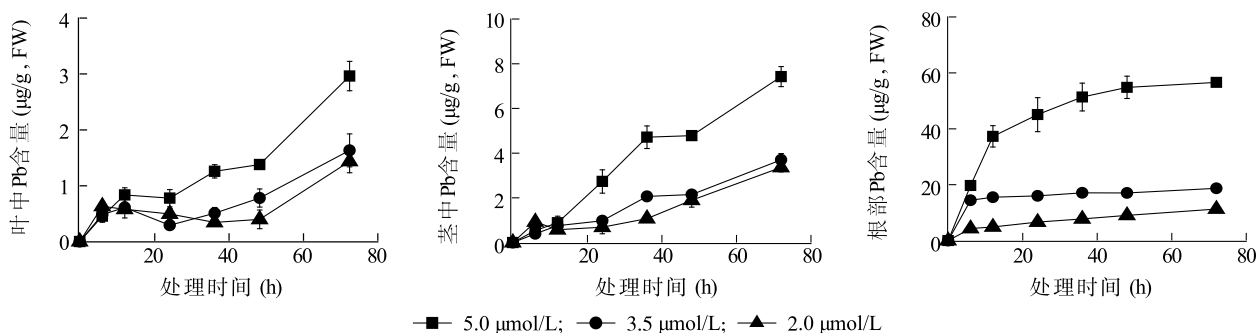


图2 水稻幼苗各部位对Pb的积累

Fig.2 Accumulation of Pb in different parts of rice seedlings

按1 d的增长量计算得到水稻幼苗根、茎、叶对Pb的积累速率。如表2所示,水稻茎、叶中Pb的积累速率随处理时间的延长而增加,而根中Pb的积累速率随处理时间的延长而降低。在3.5 $\mu\text{mol/L}$ Pb处理下,第1 d根部Pb的积累速率为第2 d、第3 d的15倍、10倍左右,而茎第3 d的积累速率为第1

d、第2 d的1.6倍、1.3倍左右,叶第3 d的积累速率为第1 d、第2 d的2.9倍、1.7倍左右,在2.0 $\mu\text{mol/L}$ 、5.0 $\mu\text{mol/L}$ Pb处理下也有类似的结果,这说明在3 d的Pb胁迫下,水稻幼苗根部对Pb的积累主要集中在第1 d,而茎、叶对Pb的积累主要集中在第3 d。

表 2 水稻幼苗各部位 Pb 的积累速率

Table 2 Accumulation rate of Pb in different parts of rice seedlings

处理时间 (d)	Pb 在水稻幼苗各部位的积累速率 [$\mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{d})$]								
	5.0 $\mu\text{mol/L}$ Pb 胁迫			3.5 $\mu\text{mol/L}$ Pb 胁迫			2.0 $\mu\text{mol/L}$ Pb 胁迫		
	叶	茎	根	叶	茎	根	叶	茎	根
1	0.785	2.734	45.068	0.296	0.973	16.009	0.500	0.687	6.641
2	0.608	2.049	9.756	0.493	1.174	1.038	-0.099	1.207	2.398
3	1.598	2.641	1.759	0.860	1.555	1.667	1.049	1.464	2.272

正值表示 Pb 积累量增加,负值表示 Pb 积累量减少。

2.2 水稻幼苗中 Pb 的转移机制

根是将 Pb 从外界吸收进入植物的主要部位, Pb 在植物体内的活性很低,大多都被固定在根部^[22]。通常用转移系数(TF)来表示植物将重金属从地下部分转移到地上部分的能力^[20]。

$TF = \text{地上部分重金属含量} / \text{根系重金属含量}$ (1)

Pb 处理浓度分别为 2.0 $\mu\text{mol/L}$ 、3.5 $\mu\text{mol/L}$ 、5.0 $\mu\text{mol/L}$ 时,不同处理时间下水稻幼苗中 Pb 的转移系数存在差异(表 3)。水稻幼苗体内 Pb 的转移系数随处理时间的延长而增加。尤其是在 Pb 浓度为 3.5 $\mu\text{mol/L}$ 胁迫 72 h(第 3 d)时,水稻幼苗 Pb 的转移系数高达处理 6 h 时的 4.7 倍。说明从根部转移到地上部分的 Pb 含量随处理时间的延长而增加,也说明水稻茎、叶中 Pb 的积累速率随处理时间的延长而增加。

表 3 水稻幼苗中 Pb 的转移系数

Table 3 The transfer coefficient of Pb in rice seedlings

Pb 处理 浓度 ($\mu\text{mol/L}$)	不同处理时间下 Pb 的转移系数					
	6 h	12 h	24 h	36 h	48 h	72 h
5.0	0.051	0.046	0.077	0.116	0.113	0.184
3.5	0.061	0.088	0.079	0.151	0.172	0.286
2.0	0.360	0.237	0.179	0.182	0.254	0.425

2.3 Pb 胁迫对水稻幼苗叶绿素含量的影响

叶绿素是水稻进行光合作用的基本物质,过量的 Pb 可抑制叶绿素的合成,从而影响水稻正常的生长和代谢。如表 4 所示,5.0 $\mu\text{mol/L}$ Pb 胁迫时,叶片中叶绿素含量随处理时间的延长而逐渐减少,胁迫 3 d 后,叶绿素含量减少了约 20%; 3.5 $\mu\text{mol/L}$ Pb 胁迫时,随着处理时间延长,水稻叶片中叶绿素含量先减少后增加;2.0 $\mu\text{mol/L}$ Pb 胁迫时,叶片中叶绿素含量随处理时间的增加而增加,胁迫 3 d 后,

叶绿素含量增加了约 8.5%。说明 Pb 对叶绿素的影响具有双重性,表现为“低促高抑”的特征,即低浓度 Pb 会促进叶绿素的合成,而高浓度 Pb 则会抑制叶绿素的合成。

表 4 Pb 胁迫下水稻幼苗叶绿素含量

Table 4 Chlorophyll content in rice seedlings under Pb stress

处理时间 (h)	叶绿素含量 (mg/g,FW)		
	5.0 $\mu\text{mol/L}$ Pb 胁迫	3.5 $\mu\text{mol/L}$ Pb 胁迫	2.0 $\mu\text{mol/L}$ Pb 胁迫
0	6.283±0.423	6.382±0.351	6.058±0.261
6	6.160±0.522	6.301±1.031	6.361±0.281
12	5.945±0.158	5.729±0.122	6.469±0.228
24	5.902±0.277	5.792±0.404	6.579±0.254
36	5.695±0.308	6.358±0.065	6.572±0.216
48	5.793±0.779	6.029±0.164	6.653±0.020
72	5.028±0.140	6.531±0.182	6.626±0.564

2.4 Pb 胁迫对水稻幼苗微量营养元素吸收的影响

Cu、Mn、Zn 均是水稻生长发育所必需的微量营养元素,缺少这些元素会对水稻的生长和代谢产生影响。本试验选取了对叶绿素含量影响比较小的 Pb 浓度,即 3.5 $\mu\text{mol/L}$,测定了该浓度下水稻幼苗根、茎、叶中 Cu、Mn、Zn 的含量,如图 3 所示,这 3 种微量营养元素在水稻幼苗各部位的分配规律存在差异。Mn 在各部位中含量顺序为:叶>茎>根,未加 Pb 处理时叶中 Mn 的含量分别是茎、根中 Mn 含量的 2.3 倍、26.6 倍;Cu 在各部位中含量顺序为:根>叶>茎,未加 Pb 处理时根中 Cu 的含量分别是叶、茎中 Cu 含量的 4.9 倍、10.0 倍;Zn 在各部位中含量顺序为:茎>叶>根,未加 Pb 处理时茎中 Zn 的含量分别是叶、根中 Zn 含量的 1.0 倍、2.5 倍。从图 3 中可以看出随着 Pb 胁迫时间的延长,Mn、Cu、Zn 的含

量均减少。在 Pb 胁迫 3 d 后,叶中 Mn 的含量减少了 45.6%,根中 Cu 的含量减少了 43.3%,茎中 Zn

的含量减少了 33.3%,说明 Pb 与这 3 种微量营养元素呈拮抗关系。

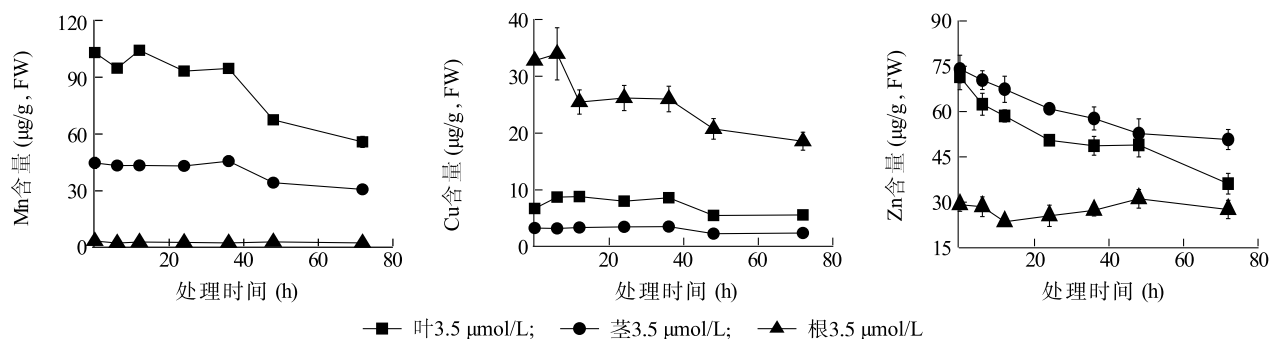


图 3 水稻幼苗各部位营养元素含量

Fig.3 Uptake of nutrient elements in different parts of rice seedlings

3 讨论

根作为最先接触 Pb 的部位,对 Pb 的吸收和积累起到很大的阻碍作用^[12]。Pb 首先通过主动运输和被动运输 2 种机制进入植物根系,进入根系的 Pb 被多糖等功能组分固定在细胞壁中,在通过表皮、皮层薄壁组织和内皮层后 Pb 含量急剧降低,故只有少量的 Pb 可通过维管组织被转运到地上部分^[23],且植物中的 Pb 绝大部分结合于细胞壁或储存于液泡中,导致组织中的 Pb 以活性和移动性较低的形态存在^[24],难以向地上部分转运,到达地上部分的 Pb 最终与光合产物结合并积累到籽粒等部位^[25-26]。本研究结果表明,水稻幼苗各部位对 Pb 的积累顺序是:根>茎>叶,这与莫争等^[27]的研究结果一致。本研究中,根部对 Pb 的积累主要集中在第 1 d,最终根部 Pb 含量趋于平衡,而茎、叶对 Pb 的积累主要集中在第 3 d。

光合作用是受 Pb 影响最敏感的过程之一,Pb 胁迫会减少叶绿素的合成,造成叶绿体结构改变,对光系统产生抑制作用等^[28]。本研究结果表明,Pb 对叶绿素的影响具有双重性,即高浓度的 Pb(5.0 μmol/L)会抑制叶绿素的合成,而低浓度的 Pb(2.0 μmol/L)会促进叶绿素的合成。这与 Jayasri 等^[29]的研究结果相似,他们对小浮萍进行研究,发现 1 mg/L 的 Pb 对叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素的合成起到促进作用。微量营养元素虽然在水稻体内含量很少,但是其缺少或者是过剩都会影响水稻的正常生长和发育^[30]。水稻对这些微量营养元素的吸收除了受自身基因型的影响之外,很大程度上会受

到外界环境的影响。Mn 在植物光合作用中起重要的作用,不仅可以维持叶绿素的稳定,还参与了光合作用中水的裂解放氧过程^[30-31]。Zn 能促进光合作用,是多种酶的组成成分。研究表明,过量的 Zn 会抑制植物的生长,只有当含量低于 300 mg/kg 时才能保证植物正常的新陈代谢^[32-33]。本研究结果表明,Mn 在各部位的含量顺序为:叶>茎>根,这与前人的研究结果一致^[34-35],但 Cu、Zn 在各部位的含量顺序与陶秀珍等^[34]、高盼^[35]的研究结果存在差异,这可能是由于水稻各部位对微量营养元素的积累量与水稻的生长阶段有关,本试验研究的是水稻苗期,而茎、叶中重金属积累量在水稻分蘖期最大,故 Cu、Zn 在水稻幼苗各部位的含量还没有达到稳定。在 Pb 胁迫处理下,3 种微量营养元素的含量均随 Pb 浓度的增加而减少,说明水稻对 Cu、Mn、Zn 和对 Pb 的吸收存在竞争关系。

参考文献:

- [1] 张娜,杨双,童非,等. 铅污染对不同生境芦苇体内抗氧化酶系统的影响[J]. 江苏农业学报, 2018, 34(2): 333-339.
- [2] 谢团辉. 不同蔬菜品种土壤 Pb 临界值研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2012.
- [3] 程龙,杨可明,王晓峰,等. 铅胁迫下玉米污染程度的 ED-SCAtan 快速判别方法[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(12): 238-241.
- [4] 杨牧青,康宏宇,刘源,等. 云南会泽某铅锌冶炼厂周边土壤重金属污染特征与评价[J]. 山东农业科学, 2017, 49(4): 72-77.
- [5] POURRUT B, SHAHID M, DUMAT C, et al. Lead uptake, toxicity, and detoxification in plants[J]. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology, 2011, 213: 113-136.

- [6] STEFANOWICZ A M, STANEK M, WOCH M W, et al. The accumulation of elements in plants growing spontaneously on small heaps left by the historical Zn-Pb ore mining[J]. *Environmental Science & Pollution Research*, 2016, 23(7): 6524-6534.
- [7] 朱守晶, 史文娟, 揭雨成. 不同苎麻品种对土壤中镉、铅富集的差异[J]. *江苏农业学报*, 2018, 34(2): 320-326.
- [8] LIU J, LI K, XU J, et al. Lead toxicity, uptake, and translocation in different rice cultivars[J]. *Plant Science*, 2003, 165(4): 793-802.
- [9] FATEMITALAB R, ZARE M, KARDAR S. Assessment of cadmium, zinc and lead contamination in leaf and root of four various species[J]. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 2016, 13(5): 1-6.
- [10] 童建华, 田 梅, 陈小飞, 等. 铅胁迫对水稻中铅和矿质元素含量的影响[J]. *湖南农业科学*, 2009(7): 60-63.
- [11] KHAN F, HUSSAIN S, TANVEER M, et al. Coordinated effects of lead toxicity and nutrient deprivation on growth, oxidative status, and elemental composition of primed and non-primed rice seedlings[J]. *Environmental Science & Pollution Research International*, 2018, 25(21): 1-10.
- [12] ASHRAF U, KANU A S, MO Z, et al. Lead toxicity in rice: effects, mechanisms, and mitigation strategies--a mini review[J]. *Environmental Science & Pollution Research*, 2015, 22(23): 18318-18332.
- [13] ASHRAF U, HUSSAIN S, ANJUM S A, et al. Alterations in growth, oxidative damage, and metal uptake of five aromatic rice cultivars under lead toxicity[J]. *Plant Physiology & Biochemistry*, 2017, 115: 461-471.
- [14] ASHRAF U, TANG X. Yield and quality responses, plant metabolism and metal distribution pattern in aromatic rice under Lead (Pb) toxicity[J]. *Chemosphere*, 2017, 176: 141-155.
- [15] THAKUR S, SINGH L, ZULARISAM A W, et al. Lead induced oxidative stress and alteration in the activities of antioxidative enzymes in rice shoots[J]. *Biologia Plantarum*, 2017, 61(3): 595-598.
- [16] CHEN Q, ZHANG X, LIU Y, et al. Hemin-mediated alleviation of zinc, lead and chromium toxicity is associated with elevated photosynthesis, antioxidative capacity; suppressed metal uptake and oxidative stress in rice seedlings[J]. *Plant Growth Regulation*, 2016, 81(2): 1-12.
- [17] LEE K J, FENG Y Y, CHOI D H, et al. Lead accumulation and distribution in different rice cultivars[J]. *Journal of Crop Science & Biotechnology*, 2016, 19(4): 323-328.
- [18] 邹继颖, 刘 辉. Cr^{6+} 、 Pb^{2+} 污染对水稻幼苗生长发育的影响[J]. *河南农业科学*, 2014, 43(2): 31-34.
- [19] LAI Y C, SYU C H, WANG P J, et al. Field experiment for determining lead accumulation in rice grains of different genotypes and correlation with iron oxides deposited on rhizosphere soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 610/611: 845-853.
- [20] 陈永华, 张富运, 吴晓芙, 等. 改良剂对 4 种木本植物的铅锌耐性、亚细胞分布和化学形态的影响[J]. *环境科学*, 2015, 36(10): 3852-3859.
- [21] LI X, BU N, LI Y, et al. Growth, photosynthesis and antioxidant responses of endophyte infected and non-infected rice under lead stress conditions[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 213/214: 55-61.
- [22] 李晓林. 铅、铬对茶树生长的影响及其在茶树体内的吸收累积特性研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2008.
- [23] 宋丽娜. 铅胁迫对水稻生理生长的影响及水稻对铅的吸收累积特征研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [24] 刘建国, 李坤权, 张祖建, 等. 水稻不同品种对铅吸收、分配的差异及机理[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(2): 291-294.
- [25] 朱海江. 水稻对重金属铅的吸收累积特征及其农艺调控研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [26] PIECHALAK A, TOMASZEWSKA B, BARALKIEWICZ D, et al. Accumulation and detoxification of lead ions in legumes[J]. *Phytochemistry*, 2002, 60(2): 153-162.
- [27] 莫 争, 王春霞, 陈 琴, 等. 重金属 Cu、Pb、Zn、Cr、Cd 在水稻植株中的富集和分布[J]. *环境化学*, 2002, 21(2): 110-116.
- [28] PATRA M, BHOWMIK N, BANDOPADHYAY B, et al. Comparison of mercury, Lead and arsenic with respect to genotoxic effects on plant systems and the development of genetic tolerance[J]. *Environmental & Experimental Botany*, 2004, 52(3): 199-223.
- [29] JAYASRI M A, SUTHINDHIRAN K. Effect of zinc and lead on the physiological and biochemical properties of aquatic plant *Lemna minor*: its potential role in phytoremediation[J]. *Applied Water Science*, 2017, 7(3): 1-7.
- [30] 饶玉春, 郑婷婷, 马伯军, 等. 微量元素铁、锰、铜对水稻生长的影响及缺失防治[J]. *中国稻米*, 2012, 18(4): 31-35.
- [31] 张郑伟, 路运才. 锰素对水稻幼苗生长及生理效应的影响[J]. *中国农学通报*, 2015, 31(18): 30-33.
- [32] 徐巡军, 钱卫飞, 黄春祥, 等. 水稻锌肥应用效果研究[J]. *现代农业科技*, 2016(23): 13-15.
- [33] AZOOZ M M, YOUSSEF M M, ALOMAIR M A. Comparative evaluation of zinc and lead and their synergistic effects on growth and some physiological responses of Hassawi Okra (*Hibiscus esculentus*) seedlings[J]. *American Journal of Plant Physiology*, 2011, 6(6): 269-282.
- [34] 陶秀珍, 唐常源, 吴 攀, 等. 贵州煤矿区成熟期水稻中重金属的分布特征及风险评价[J]. *生态环境学报*, 2017, 26(7): 1216-1220.
- [35] 高 盼. 下层土肥力对水稻生长特性及产量影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015.

(责任编辑:陈海霞)