

# 水稻根系结构对铅吸收及转运的影响

冉旭, 侯娜娜, 杨新稳, 魏金峰, 向乔, 覃永华\*

(中南民族大学 a. 生命科学学院; b. 国家民委生物技术重点实验室; c. 武陵山区特色资源植物种质保护与利用湖北省重点实验室, 武汉 430074)

**摘要** 为探究不同根系结构对铅吸收和转运的差异,以6个根系发达程度不同的水稻品种为材料,通过MS培养基以及水培方式,研究了铅在水稻植株苗期和成株期各组织器官中的分布以及对水稻生长发育的影响.结果表明:在MS培养基上,铅浓度为0.1 mmol/L时对水稻根系欠发达品种23、117和330地上部分生长有显著抑制作用,对根系较发达品种346和根系发达品种402地上部分生长有显著促进作用;铅浓度为0.2 mmol/L时对6个水稻品种根的生长均有促进作用,对根系不发达品种117和根系发达品种402地上部分生长有显著促进作用.在MS培养基和水培方式铅处理下,铅在根系发达品种的各组织中的积累更高,但在籽粒中没有差异,同时累积呈现根>茎>叶>籽粒的趋势.因此,根系不发达品种023和117对铅的吸收与富集能力较差,植株对铅的耐受性较强;根系发达品种342和402有较高的铅吸收与富集能力,植株对铅的耐受性较差.研究为重金属铅低累积水稻品种的筛选和植物中铅吸收及转运机制研究提供了一定的理论基础.

**关键词** 水稻; 重金属; 耐受性; 铅

中图分类号 Q945.45 文献标志码 A 文章编号 1672-4321(2025)05-0633-06

doi:10.20056/j.cnki.ZNMDZK.20250701

## Analysis of the effect of rice root development on lead enrichment level

RAN Xu, HOU Nana, YANG Xinwen, WEI Jinfeng, XIANG Qiao, QIN Yonghua\*

(South-Central Minzu University, a. College of Life Sciences; b. Key Laboratory for Biotechnology of National Ethnic Affairs Commission; c. Hubei Province Key Laboratory for the Plant Germplasm Conservation and Utilization of Wuling Mountainous Area, Wuhan 430074, China)

**Abstract** To explore the differences in Pb uptake and transport across various root structures, the distribution of Pb in various tissues and organs of rice plants during the seedling and mature stages, as well as its effects on rice growth and development, were investigated in MS medium and hydroponic methods, using six rice varieties with varying degrees of root development. The results showed that, on MS medium, 0.1 mmol/L Pb concentration significantly inhibited the shoot growth of underdeveloped root varieties 23, 117 and 330, while it significantly promoted the shoot growth of moderately developed root variety 346 and well-developed root variety 402. 0.2 mmol/L Pb concentration promoted root growth in all six rice varieties and significantly enhanced partial above-ground growth of undeveloped root variety 117 and well-developed root variety 402. Pb content measurements revealed that under Pb treatment in MS medium and hydroponic culture, the content of lead in tissues of varieties with developed root system is higher, but there is no difference in seeds. Additionally, Pb accumulation in various tissues and organs showed the trend of root>stem>leaf>seed. The results indicated that underdeveloped root varieties 023 and 117 had lower Pb uptake and enrichment capacity, and the plants exhibited stronger tolerant to Pb. Conversely, well-developed root varieties 342 and 402 had higher Pb uptake and enrichment capacity, and the plants exhibited lower tolerant to Pb. The research provided a theoretical basis for the screening of rice varieties with low accumulation of heavy metal Pb and the study of the mechanism of Pb uptake and transport in plants.

**Keywords** rice; heavy metals; tolerance; lead

收稿日期 2024-07-31

\*通信作者 覃永华(1979-),男,副教授,博士,研究方向:水稻逆境分子生物学, E-mail: qinyonghua@mail.scuec.edu.cn

基金项目 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(CZY23002);中南民族大学校级科研重点机构平台项目(PTZ24021)

铅的毒性较大,对植物的生长、形态及其光合作用都会产生不利影响,植物主要通过两种途径吸收铅,分别是叶片吸收大气中以气溶胶存在的铅<sup>[1]</sup>和根系对土壤中铅的吸收与转运<sup>[2]</sup>. 根系吸收是水稻累积铅的主要方式,铅可以通过重金属转运蛋白,离子通道和质子泵等途径进入到植物中<sup>[3]</sup>. 从根系吸附的铅向植物地上部分运输主要通过两种方式:铅从木质部薄壁细胞转载到导管和通过根部渗透压与蒸腾流在导管中运输<sup>[4]</sup>. 铅被植物根吸收后能借助非共质体穿过细胞壁和根部细胞间隙向根内部转运,内皮层组织中凯氏带能作为物理屏障阻挡铅和其他非必需元素的进一步运输,只有少量的铅能从根部向地上部分运输并在植株茎叶中累积,大部分的铅累积在植株的根部. 铅在植物根的不同部位含量也有差别,根尖细胞新生细胞的细胞壁较薄,对铅的吸收能力较强,根尖铅含量最高且沿着分生区到成熟区铅含量递减.

水稻不同器官铅含量也是不同的,根>茎>叶>籽粒<sup>[3]</sup>. 低浓度的铅能促进水稻的生长,对植物有刺激作用;而高浓度的铅则会抑制水稻植株的生长,产生重金属毒害效应<sup>[5]</sup>. 铅离子在水稻籽粒中累积,当人食用含铅的大米后,铅会对人体健康产生较大的危害,例如对人体心血管系统,中枢神经系统及生殖系统造成损伤,并且有一定的致癌性<sup>[6]</sup>. 近些年来我国制定了相应的土壤重金属环境标准,《无公害食品—大米》标准(NY5115-2002)规定谷粒中铅(Pb)的浓度上限为0.2 mg/Kg<sup>[7]</sup>. 研究表明,不同品种或基因型的作物对铅的吸收能力不同<sup>[8]</sup>. 水稻可以通过根系与土壤直接接触并高效吸收土壤中的营养物质,根系的发达程度影响重金属在水稻中的富集,根系越发达的品种对重金属的吸收能力越强<sup>[9]</sup>. 因此,本研究选取根系发达程度不同的水稻品种,通过不同程度铅处理,分析这些品种吸收和富集铅的特征,鉴定铅耐受品种,为低铅累积品种的选育提供参考.

## 1 材料与方 法

### 1.1 实验材料

所用水稻品种种子来自于中南民族大学武陵山区特色资源植物种质保护与利用湖北省重点实验室,选取以下6份根系发达程度不同的水稻种质资源<sup>[10]</sup>参与实验与分析(表1).

表1 水稻编号与品种名称

Tab. 1 Numbering and variety names of rice		
根系发达程度	编号	品种名称
根系不发达	023	柳晚3号
	117	PR 116
根系较发达	346	肥东塘稻
	330	Yenfangghu
根系发达	342	中413
	402	齐头白谷

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 水稻无菌发芽

将种子去颖壳,用75%乙醇和0.9%次氯酸钠溶液消毒,无菌水清洗,将种子平铺于带滤纸的灭菌培养皿中,吹干,后胚芽朝上接种到MS生根培养基上,28℃光照培养3 d.

#### 1.2.2 不同浓度铅对水稻幼苗生长影响

按照1.2.1方法操作无菌发芽种子,选取生长一致的幼芽分别接种于含有0、0.1、0.2 mmol/L Pb的生根培养基中室温光照下培养8 d,测量统计其根长、苗长、鲜重、干重、铅含量等性状,并拍照记录其生长情况.

#### 1.2.3 重金属处理水稻结实率统计

将1.2.2实验剩余正常生根培养基生长的幼苗转为水培培养,参考《国际水稻研究所水稻营养液配方》,1周换一次水.水稻生长至四叶期后开始铅胁迫处理,铅:  $Pb(NO_3)_2$ 的水培浓度为0.1 mmol/L.待水稻种子成熟后,按品种剪下穗子拍照记录并统计其结实率.

#### 1.2.4 含水量检测

植物组织含水量(占鲜重) =  $(W_f - W_d) / W_f \times 100$ , 式中  $W_f$ : 组织鲜重;  $W_d$ : 组织干重.

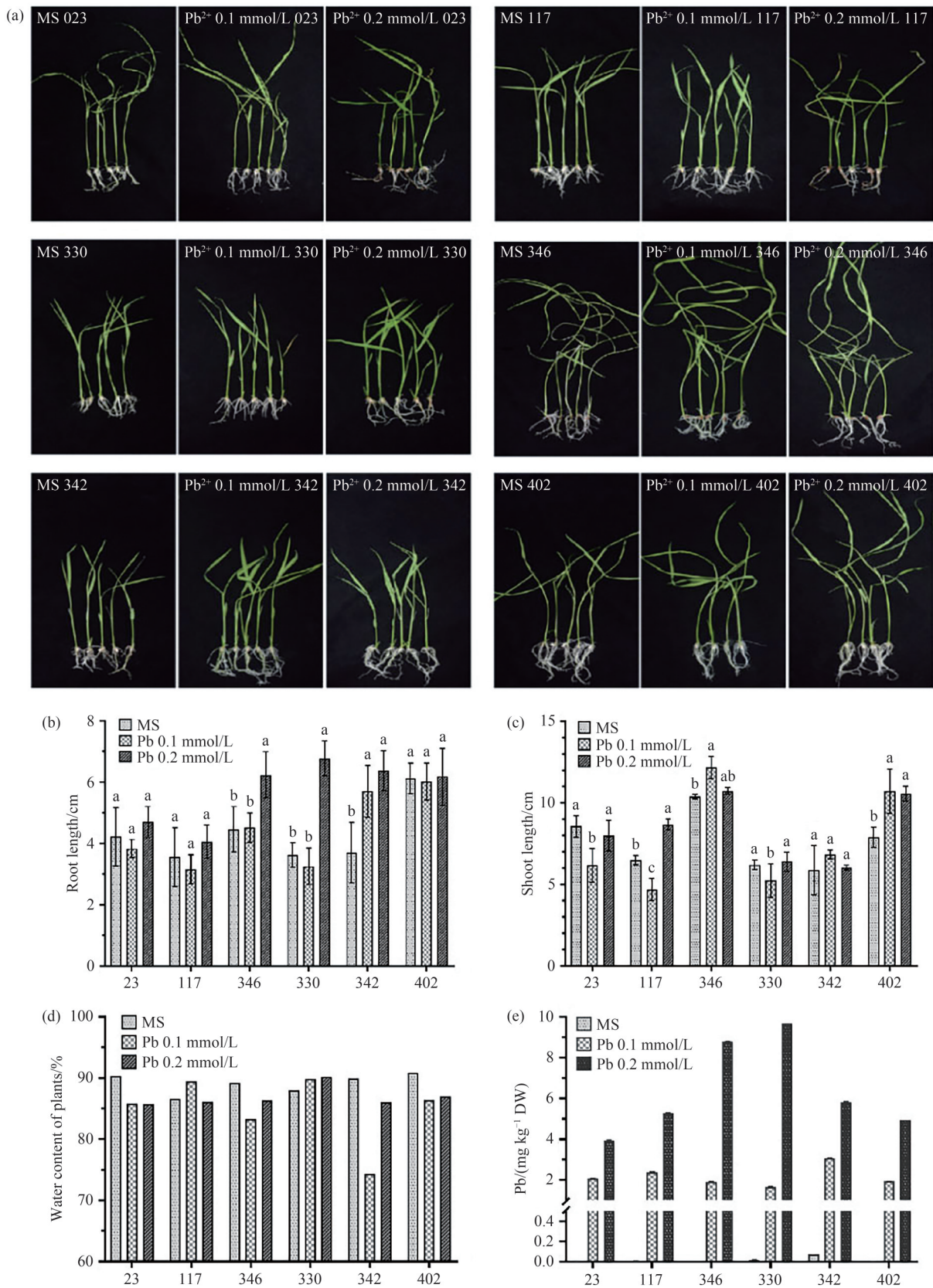
#### 1.2.5 水稻体内重金属含量测量

取样,烘干,粉碎成粉末,称取0.1 g样品至50 mL离心管中,加入20 mL 1 mol/L  $HNO_3$ ,室温220 r/min振荡3 h,随后用0.22  $\mu m$ 滤头过滤样品于新的样品管中,用1 mol/L  $HNO_3$ 稀释至合适浓度.原子吸收光度法(原子吸收光谱仪ICE 3500)测定样品铅含量.

## 2 实验结果与分析

### 2.1 不同品种水稻苗期铅耐受性分析

选出6个根系发达程度不同的水稻品种在MS培养基上无菌发芽,3 d后选取生长一致的水稻幼芽分别接种到含有0、0.1和0.2 mmol/L Pb的MS培养基上生长8 d(图1),6个品种水稻苗期的生长情况如图1(a)所示. 随后统计其根长、苗长、鲜重比和植物



根据最小显著性差异检验,处理间不同小写字母在  $P < 0.05$  处具有统计学意义。

(a)不同品种水稻重金属铅处理后生长图;(b)不同浓度铅处理后水稻根长统计;(c)不同浓度铅处理后水稻苗长统计;

(d)不同浓度铅处理后水稻鲜重比测量;(e)不同浓度铅处理后水稻体内铅含量检测

图1 不同品种水稻苗期铅耐受分析

Fig. 1 Analysis of lead tolerance in seedling stage of different rice varieties

体内铅含量(图 1(b)-1(e)). 结果表明,相对于正常生长条件,根不发达品种 023 和 117 的根长与苗长均在 0.1 mmol/L Pb 和 0.2 mmol/L Pb 处理后无显著变化;铅对根较发达品种 346 和 330 的根生长均有显著促进作用,346 的苗长在 0.1 mmol/L Pb 处理下增加,而 330 的苗长在 0.1 mmol/L Pb 处理时变短;根发达品种 342 和 402 受不同浓度铅处理后生长状况也呈现不同趋势,不同浓度的铅处理对品种 342 根的生长均有显著促进作用;而 342 的苗长在 0.1 mmol/L Pb 处理下变长,在 0.2 mmol/L Pb 处理时变化不显著,而品种 402 在铅处理下根长几乎没有变化,苗长明显增加.

植物组织含水量(占鲜重比)是水稻体内水分含量状况的重要指标,能直接反映植物的生长状况. 结果表明(图 1(d)),根不发达品种与根较发达品种在铅处理情况下的生长受抑制程度较低;根发达品种在铅处理后鲜重比均有不同程度下降,表明在铅处理下根发达程度越高的品种生长受到抑制程度越大.

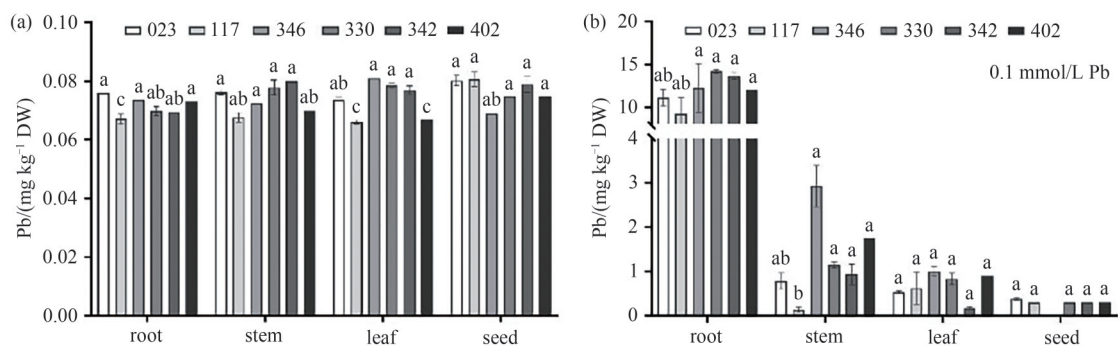
从图 1(e)可以看出,根发达程度有差异的水稻在受不同浓度铅处理后,对铅的富集程度有明显差异. 相对于正常生长条件的水稻,0.1 mmol/L Pb 处理后各品种水稻体内铅含量均明显升高,根系发达程度不同的各水稻品种铅含量无明显差异;然而 0.2 mmol/L Pb 处理后,植株体内的铅含量呈现根系较发达品种>根系发达品种>根系不发达品种. 水稻对铅的富集水平与其对铅的吸收,转运和外排能力相关,

所以根系发达程度相似的水稻品种可能对铅的富集能力也有差异.

## 2.2 不同类型水稻品种铅累积特点

将生长至四叶期的水稻置于含有 0.1 mmol/L Pb 的水培营养液中继续培养,到抽穗期时取样,测根、茎、叶与成熟期谷粒中铅的含量. 在正常生长条件下,各品种中根、茎、叶与成熟期谷粒中均只有微量铅富集,且不同水稻品种、不同器官之间铅含量无显著差异(图 2(a)). 在 0.1 mmol/L Pb 水培条件下,不同水稻品种对铅的富集能力有明显差异. 根系不发达品种 023、117 在根部和茎叶铅的累积量要显著低于根系较发达品种 346、330 和根系发达品种 342、402,但在谷粒各个品种之间铅累积量几乎没有差异. 从图 2(b)可以看出,品种 346 和 402 根部的铅累积量低于品种 330 和 342,然而铅在品种 346 和 402 茎的累积量却高于品种 330 和 342,在叶片又趋于一致. 在低浓度铅处理后,水稻各器官对铅的富集能力呈现根部>茎叶>谷粒. 水稻的根部有凯氏带作为第一道物理屏障阻挡铅从根向地上部分转运,所以在根部吸收的铅只有少量能向茎叶及其谷粒运输,大部分的铅主要在根部富集.

由图 2(b)可以看出,不同根系发达程度品种的谷粒中铅含量较低且无显著差异,茎叶可以作为第二道屏障,使得向地上部分运输的铅大部分被茎叶吸收累积,最终只有极少量的铅能运输到谷粒. 成熟期根系较发达品种 346 在铅处理后其茎、叶的铅累积量均高于其他品种,且几乎不结实.



根据最小显著性差异检验,处理间不同小写字母在  $P < 0.05$  处具有统计学意义.  
(a) 正常生长条件下水稻各器官中铅含量; (b) 0.1 mmol/L Pb 处理下水稻各器官中铅含量

图 2 成熟期水稻不同器官中铅含量分析

Fig. 2 Analysis of lead content in different organs of rice at mature stage

## 2.3 铅对水稻结实影响

选取根系不发达且铅富集水平较低的品种 117、根系较发达且铅富集水平较高的品种 346 和根系发达且铅富集水平较高的品种 342 的稻穗统计结实率(图 3). 结果表明,相比于正常生长的水稻,根系不

发达品种 117 在铅处理后结实率下降并不显著,稻谷脱粒也不明显;根系发达品种 342 在铅处理后其结实率显著降低,且稻穗有明显的脱粒现象. 根系不发达品种 117 与根系发达品种 342 在正常生长条件下结实率无明显差异,但经过 0.1 mmol/L Pb 处理

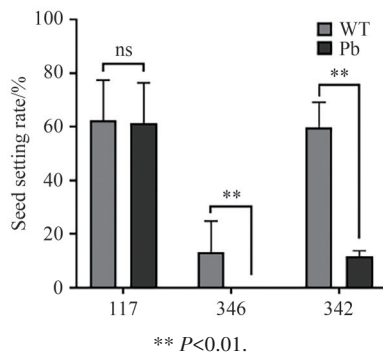


图3 铅处理水稻结实率统计

Fig. 3 Statistics of seed setting rate of rice treated with lead

后,根系发达品种342的结实率远低于根系不发达品种117,且稻穗脱粒现象更严重.根系较发达品种346在正常情况下结实率较低,稻谷脱粒明显,在铅处理后几乎无结实.说明根系不发达品种相对于根系发达品种可能有较高的铅耐受性.根系发达的水稻品种相对于根系不发达水稻品种在相同的生长条件下能富集更多的铅,当铅在植物体内累积到一定程度便会对植株产生负反馈从而影响植物的生长与结实.

### 3 讨论

#### 3.1 铅对不同类型品种水稻影响

不同水稻品种的外部形态与内部结构各异,故其吸收与排斥铅的生理机制也有较大差异.根系吸收是水稻累积铅的主要方式,土壤中的铅吸附在水稻根部后能借助非共质体穿过细胞壁和根部细胞间隙向根内部转运<sup>[7,11]</sup>.有研究表明,铅对水稻有双重效应,低浓度的金属铅对植物生长有一定促进作用,所以铅也是农药中的重要成分.植株在铅的促进下生理代谢活动加快,这也加速了植株对重金属铅的吸收,当植株体内重金属累积过多时,水稻受到铅的毒害效应从而生长发育受到抑制<sup>[12]</sup>.使用不同浓度铅处理各水稻品种后发现,在相同的生长条件下,根系更发达品种346、342和402的地上部分在0.1 mmol/L Pb处理下生长明显更快,而根系较不发达品种023、117与330的地上部分生长受到一定程度的抑制;然而在0.2 mmol/L Pb处理后,根系更发达的品种比起0.1 mmol/L Pb条件下地上部分生长的明显受到抑制,而根系不发达的品种在0.2 mmol/L Pb条件下生长明显受到促进.在长期的进化与繁殖过程中植物形成了一系列的耐受机制,对于重金属的耐受可以分为外部排斥和内部耐受两大类<sup>[13]</sup>.根系除了可以吸收

金属离子外,还具有毒害金属离子的外排作用,在根部累积的铅与多糖组成胶状物质后能被植物根冠细胞及成熟区根毛通过囊泡运输的方式向外分泌<sup>[14]</sup>.根系发达的品种拥有更多不定根与根毛,这使得它们同时拥有了更好的吸收与外排能力.在0.1 mmol/L Pb处理下,根系发达品种体内铅含量略高于根系不发达品种,但差异并不显著;而在0.2 mmol/L Pb处理下,植株体内的铅含量呈现根系较发达品种>根系发达品种>根系不发达品种.这可能是因为低浓度铅可以促进植物生长,而当体内铅浓度累积到一定程度时,便会响应一系列的铅排斥与铅耐受机制,根系发达品种外排效率更高,所以此时根系较发达品种体内铅含量略高于根系发达品种.

#### 3.2 不同类型品种水稻铅累积特征

不同水稻品种间对于铅的吸收与累积存在巨大差异,铅对植物的毒害效应也会因为铅浓度、植物品种和植物生长阶段的不同而有较大的差别.植物通过根际吸收累积的铅要转移到地上部分需要经过一系列的生理生化过程,例如根细胞吸收与扩散土壤中活化的金属离子、金属铅通过非共质体的形式在根系组织之间转运、金属铅穿过皮层并在内皮层累积、内皮层凯氏带阻挡金属铅从根部向地上部分进一步运输、少量金属铅可以从木质部薄壁细胞装载到导管并通过木质部导管向地上部分运输、金属铅从木质部卸载后跨膜进入叶肉细胞<sup>[15]</sup>.金属铅在向上运输的过程中,受到各器官的拦截与富集,使得最终籽粒中铅的含量极微<sup>[10]</sup>.有研究报告,金属铅在向上运输过程中大部分被茎部的维管束输导组织固定并累积,只有少量的金属铅随着蒸腾流在叶片表皮累积<sup>[16]</sup>.本研究中,正常生长条件下,各品种根、茎、叶与成熟期谷粒中均只有微量铅富集,且不同品种、不同器官之间铅含量无显著差异,而在低浓度铅处理后,水稻各器官对铅的富集能力呈现根部>茎叶>谷粒.根系发达程度不同的水稻品种各器官重金属含量差异主要呈现在根部与茎叶,并且越向上差异越不明显,各品种籽粒的铅含量几乎没有差异,且根系发达的水稻品种较根系不发达品种在根部和茎叶铅含量更高.水稻的根系发达程度差异影响了水稻各器官对铅的富集水平,但各品种籽粒中的铅含量并无明显差异.铅在植株各器官累积会产生毒性效应使水稻的生长受到抑制,其中最直观的影响便是水稻结实率下降.经过Pb处理后,根系发达品种的结实率远低于根系不发达品种,且稻穗出现严重的脱粒现象.根系发达的水稻品种相对

于根系不发达水稻品种在相同的生长条件下能富集更多的铅,当铅在植物体内累积到一定程度便会对植株产生负反馈从而影响植物的生长与结实。

综上,水稻根系发达程度的差异能直接影响水稻对铅的富集水平,根系不发达品种对铅耐受更强,本研究为重金属耐受水稻品种的筛选与培育工作提供了有价值的研究基础。

#### 参 考 文 献

- [1] UZU G, SOBANSKA S, SARRET G, et al. Foliar lead uptake by lettuce exposed to atmospheric fallouts [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44 (3) : 1036-1042.
- [2] PUNAMIYA P, DATTA R, SARKAR D, et al. Symbiotic role of *Glomus mosseae* in phytoextraction of lead in vetiver grass [*Chrysopogon zizanioides* (L.) [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 177(1-3): 465-474.
- [3] ASHRAF U, KANU A S, DENG Q, et al. Lead (Pb) toxicity; physio-biochemical mechanisms, grain yield, quality, and Pb distribution proportions in scented rice [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: 259.
- [4] VERBRUGGEN N, HERMANS C, SCHAT H. Molecular mechanisms of metal hyperaccumulation in plants [J]. *The New Phytologist*, 2009, 181(4): 759-776.
- [5] 童建华, 梁艳萍, 刘素纯, 等. 水稻铅污染研究进展 [J]. *亚热带植物科学*, 2009, 38(2): 74-78.
- [6] WIERZBICKA M. Comparison of lead tolerance in *Allium cepa* with other plant species [J]. *Environmental Pollution*, 1999, 104(1): 41-52.
- [7] SEREGIN I V, IVANOV V B. Physiological aspects of cadmium and lead toxic effects on higher plants [J]. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2001, 48(4): 523-544.
- [8] LIN Y, GUO Y, LIU J. Differences among wetland plants species in lead accumulation and distribution from lead-polluted wastewater in constructed wetlands [J]. *International Journal of Ecology*, 2020, 9(2): 186-193.
- [9] 蒋彬, 张慧萍. 水稻精米中铅镉砷含量基因型差异的研究 [J]. *云南师范大学学报(自然科学版)*, 2002, 22(3): 37-40.
- [10] 陈志德, 仲维功, 杨杰, 等. 低铅污染条件下不同类型水稻品种对铅的响应 [J]. *江苏农业学报*, 2007, 23(4): 261-266.
- [11] 覃永华, 徐宵黎, 侯娜娜, 等. 水稻根系发达程度对镉富集水平的影响分析 [J]. *中南民族大学学报(自然科学版)*, 2022, 41(5): 521-526.
- [12] PATRA J, LENKA M, PANDA B B. Tolerance and co-tolerance of the grass *Chloris barbata* Sw. to mercury, cadmium and zinc [J]. *New Phytologist*, 1994, 128(1): 165-171.
- [13] LI X, LI C, CHEN Z, et al. High-resolution mass spectrometry-based non-targeted metabolomics reveals toxicity of naphthalene on tall fescue and intrinsic molecular mechanisms [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2024, 271: 115975.
- [14] BADRI D V, VIVANCO J M. Regulation and function of root exudates [J]. *Plant, Cell & Environment*, 2009, 32(6): 666-681.
- [15] 段德超, 于明革, 施积炎. 植物对铅的吸收、转运、累积和解毒机制研究进展 [J]. *应用生态学报*, 2014, 25(1): 287-296.
- [16] TIAN S, LU L, YANG X, et al. Spatial imaging and speciation of lead in the accumulator plant *Sedum alfredii* by microscopically focused synchrotron X-ray investigation [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(15): 5920-5926.

(责编&校对 姚春娜)