ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

# ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第10期

Vol.39 No.10

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第39卷 第10期
2018年10月15日

# 目 次

# 水分管理和外源硒对水稻吸收累积铅的影响

万亚男, 刘哲, Aboubacar Younoussa Camara, 余垚, 王琪, 李花粉*
(中国农业大学资源与环境学院, 农田土壤污染防控与修复北京市重点实验室, 北京 100193)

**摘要**: 通过盆栽试验, 研究了不同水分管理和外源亚硒酸盐的添加对水稻根际铅的动态变化和水稻吸收累积铅的影响. 结果表明, 淹水显著增加了根表铁膜对铅的吸附和根系对铅的吸收, 淹水下苗期和成熟期水稻根系铅含量分别是非淹水处理时的 4.2 ~ 8.5 和 1.4 ~ 1.5 倍; 淹水降低了地上部的铅分配, 在苗期和成熟期分别降低 85.9% ~ 86.7% 和 51.8% ~ 74.0%. 加硒降低了土壤溶液、苗期水稻根系和地上部的铅含量以及成熟期水稻根表铁膜、根系和茎中的铅含量. 与对照相比, 淹水和非淹水下加硒处理使苗期水稻根系铅含量分别降低了 5.4% ~ 24.3% 和 2.7% ~ 61.7%, 使成熟期水稻根系铅含量分别降低了 56.1% ~ 64.1% 和 53.8% ~ 63.2%. 水稻籽粒中的铅含量在不同处理间无显著差异. 因此, 水分管理和外源硒的添加显著影响了水稻根系对铅的吸收, 而对水稻籽粒对铅的累积无显著影响.

**关键词**: 铅; 水稻; 水分管理; 亚硒酸盐; 吸收; 累积
**中图分类号**: X171.5 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2018)10-4759-07 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201801231

## Lead Uptake and Accumulation in Rice (*Oryza sativa* L.) with Water Management and Selenite Fertilization

WAN Ya-nan, LIU Zhe, Aboubacar Younoussa Camara, YU Yao, WANG Qi, LI Hua-fen*
(Beijing Key Laboratory of Farmland Soil Pollution Prevention and Remediation, College of Resource and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

**Abstract**: Lead (Pb) accumulation in rice grains has been identified as a potential threat to human health. Our study investigated the effects of varied rates of selenite fertilization (0, 0.5 and 1.0 mg·kg$^{-1}$) on the dynamics of Pb in soil solutions, and its uptake and translocation by rice under different water management scenarios (aerobic and flooded) in pot experiments. Plants were harvested at seedling stage and at maturity to determine the Pb contents, and soil solutions were extracted during the growing season to monitor the Pb dynamics. Results showed that flooding the soil significantly increased Pb concentrations in DCB extracts and rice roots both at seedling stage and maturity. Root Pb contents in flooded treatments were 4.2-8.5 and 1.4-1.5 times higher than those under aerobic conditions at rice seedling stage and maturity. Flooding also decreased the percentage of Pb in rice shoots. The Pb content in soil solutions, rice seedlings, rice roots and stems at maturity were significantly decreased by selenite additions. Relative to the control treatment, selenite additions decreased the rice root Pb contents by 5.4%-24.3% and 2.7%-61.7% under flooding and aerobic conditions at seedling stage, respectively; while decreased Pb in rice root by 56.1%-64.1% and 53.8%-63.2% respectively, at maturity. No significant differences existed in grain Pb levels among the treatments. Results demonstrated that water management regimes and selenite additions affected Pb uptake by rice roots significantly, but had no significant influence on Pb accumulation in rice grains.

**Key words**: lead; rice; water management; selenite; uptake; accumulation

铅(lead, Pb)是一种强毒性的重金属, 主要来自于工农业生产中废弃物的排放以及大气沉降等, 在土壤中的溶解度小, 且无法再降解, 在土壤中累积后可通过植物的富集作用进入人体, 对生命健康造成较强的威胁[1]. 随着现代社会的快速发展, 我国农田土壤铅污染的现象也在加重, 据报道, 在广东乐昌区的一个铅锌矿区, 稻田土壤的铅含量为 1 486 mg·kg$^{-1}$, 糙米的铅含量高达 4.67 mg·kg$^{-1}$[2], 超出食品安全国家标准中稻米铅限量值(0.2 mg·kg$^{-1}$, GB 2762-2017)的二十多倍. 因此, 控制水稻中铅污染的研究受到了广泛的关注.

土壤铅对植物的毒性取决于土壤中铅的生物有效性, 而有效性与土壤的理化性质有关, 如土壤质地、pH、氧化还原电位(Eh)、有机质、陪伴离子等. 有研究发现, 随着土壤 pH 的升高, 水稻籽粒中的铅含量显著升高[3]. 水分管理可以通过影响土壤的 Eh 而影响铅化物的其他阴离子基团的形成, 从而影响铅在土壤中的溶解性[4].

近些年来, 有研究发现, 硒(selenium, Se)元素能够与多种重金属(如镉、砷、汞等)产生拮抗效

**收稿日期**: 2018-01-25; **修订日期**: 2018-04-03
**基金项目**: 国家自然科学基金项目(41471271)
**作者简介**: 万亚男(1992 ~ ), 女, 博士, 主要研究方向为重金属环境污染化学, E-mail:2549354538@qq.com
* 通信作者, E-mail: lihuafen@cau.edu.cn

应，减轻其对植物的毒害作用，降低植物的重金属积累[5~7]. Hu 等[8]的研究发现，外源硒的添加可以降低水稻的铅含量. 硒是人和动物必需的微量营养元素之一，在人体的抗氧化系统，生殖系统，免疫系统等发挥了重要作用[9]. 在土壤中，植物对硒的吸收也受土壤的理化性质等影响，Li 等[10]的研究发现，土壤添加亚硒酸钠后，淹水下水稻籽粒及秸秆中硒含量低于非淹水.

因此，为了进一步探讨硒对铅的调控作用，本试验模拟土壤条件下硒对水稻吸收转运铅的影响，并设置了全生育期淹水和湿润灌溉两个水分管理模式，观察整个生长周期中土壤溶液中铅的动态变化以及水稻对铅的积累，旨在为降低水稻铅污染措施的实施提供理论依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 植物培养

供试植物：水稻（*Oryza sativa* L.），品种为淮两优 608，为籼型两系杂交水稻.

供试土壤：采自湖南省湘潭市某乡镇的稻田表层（0 ~20 cm），土壤基本理化性质为：pH 7.3，有机质：28.1 $g\cdot kg^{-1}$，总氮：2.4 $g\cdot kg^{-1}$，速效磷：15.8 $mg\cdot kg^{-1}$，速效钾：115.3 $mg\cdot kg^{-1}$；总铅：300.9 $mg\cdot kg^{-1}$，总硒：0.3 $mg\cdot kg^{-1}$. 按照 Tessier 等[11]连续分级提取方法获得土壤铅的各形态含量，可交换态：0.9 $mg\cdot kg^{-1}$，碳酸盐结合态：60.7 $mg\cdot kg^{-1}$，铁锰氧化物结合态：94.4 $mg\cdot kg^{-1}$，有机结合态：28.6 $mg\cdot kg^{-1}$，残渣态：116.3 $mg\cdot kg^{-1}$.

土壤风干后过 5 目的筛，装入 20（直径）cm × 20（高）cm 的塑料花盆（每盆装土 2.5 kg）中，施入浓度分别为 175、30 和 75.5 $mg\cdot kg^{-1}$的氮肥、磷肥和钾肥为基肥. 然后将亚硒酸盐（$Na_2SeO_3$）以溶液的形式充分混入土壤中，添加浓度（以硒计）为 0、0.5 和 1.0 $mg\cdot kg^{-1}$，分别表示为 CK、Se0.5 和 Se1.0. 每个处理 3 个重复. 设置了两种不同的水分管理模式：非淹水（每天补充去离子水使土壤持水量保持 70%）和淹水（每天补充去离子水使水面保持在土面以上 1 ~2 cm）. 装盆时，每盆土埋入 1 支土壤溶液取样器（Rhizon MOM 10 cm length，2.5 mm OD，Rhizosphere Research Products，Wageningen，The Netherlands）. 最后用保鲜膜将盆盖住，平衡一周后播种.

种子发芽前先用 30% $H_2O_2$ 消毒 15 min，洗净后在饱和 $CaSO_4$ 中浸泡过夜. 待种子吸涨后，置于去离子水中漂浮的网格上，使种子半浸入水. 种子发芽后，挑选生长一致的幼苗移栽至花盆中，每盆 4 株水稻.

培养地点：中国农业大学西校区资环温室. 温度：25℃ ±3℃/20℃ ±3℃（白天/黑夜）；光照强度：240 ~350 $\mu mol\cdot(m^2\cdot s)^{-1}$（14 h）；相对湿度：60% ~70%.

### 1.2 取样与测定

水稻生长 35 d 和 150 d 后，分别取苗期样（每盆取 2 株）和成熟期样（剩下的 2 株）. 洗净后，苗期样将根系和地上部分开，成熟期样将根、茎、叶、颖壳、糙米分开. 用 DCB 浸提根表铁膜，步骤如下[12]：将根系放入 150 mL 烧杯中，加入 60 mL 含有 0.03 $mol\cdot L^{-1}$柠檬酸三钠（$Na_3C_6H_5O_7$）和 0.125 $mol\cdot L^{-1}$ 碳酸氢钠（$NaHCO_3$）的混合提取液（现用现配）浸没整个根系，并加入 1.2 g 连二亚硫酸钠（$Na_2S_2O_4$），在室温下静置. 60 min 后，将提取液转移至 100 mL 容量瓶，用去离子水冲洗根系组织并定容至 100 mL，过 0.45 μm 滤膜. 浸提后的根系和地上部都用去离子水洗净，75℃下烘干 48 h，记录干重，磨碎. 定量称取待测样品，用 $HNO_3$ 消煮（MARS-5 微波消解仪），定容，过滤.

在水稻移苗后第 2、9、24、38、82、148 d，通过土壤溶液提取器提取 20 mL 土壤溶液. 每次取完后，立即将土壤溶液分为 2 份，一份用于测定 pH、Eh 值，另一份取 5 mL 土壤提取液，用 10% 的 $HNO_3$ 稀释至 10 mL，用于铅含量的测定.

用 ICP-MS（Agilent ICP-MS 7500ce，Agilent Technologies，Santa Clara，CA，USA）测定 DCB 浸提液，消解液以及土壤溶液中的铅含量. 测定过程中采用生物成分分析标准物质大葱（GBW10049 GSB-27）和空白样品进行质量控制. 回收率为 85% ~105%.

### 1.3 数据处理

本试验数据为 3 次重复的平均值和标准误差，使用 Excel 进行数据处理，并采用 SAS 软件进行方差分析（多重比较采用 Duncan 法），图采用 Sigmaplot 12.5 绘制.

## 2 结果与分析

### 2.1 水分管理和外源硒对土壤溶液铅含量的影响

在水稻整个生长周期，水分管理对土壤溶液中的铅含量无显著影响（除了第 3 次取样时，非淹水下土壤溶液的铅含量显著大于淹水下）. 外源硒的

添加降低了土壤溶液中的铅含量，且在前两次时显著降低($P<0.05$)．水稻移栽9 d(第二次取样)时，与对照相比，非淹水和淹水下添加硒分别使土壤溶液中的铅含量降低了58.3% ~61.4%和44.3% ~46.8%[图1(a)]．土壤溶液的pH范围为6.7 ~7.6，淹水略微降低了土壤溶液的pH值[图1(b)]．从水稻分蘖期开始，对土壤溶液的Eh值进行监测，发现淹水下土壤溶液的Eh值显著大于非淹水，且两者之间的差异随培养时间的增大而减小[图1(c)]．加硒处理对土壤溶液的pH和Eh值均未显著影响．

## 2.2　水分管理和外源硒对苗期水稻铅含量的影响

不同水分管理对苗期水稻根表铁膜和根系的铅含量均有显著影响，且加硒处理显著影响了水稻体内的铅含量($P<0.05$)．水稻根表铁膜和根系的铅含量在淹水时分别为非淹水时的4.0 ~6.2和4.2 ~8.5倍．非淹水时，外源硒的添加使根系和地上部的铅含量分别降低了2.7% ~61.7%和8.5% ~43.9%；在淹水时分别降低了5.4% ~24.3%和24.1% ~24.3%(图2)．

## 2.3　水分管理和外源硒对成熟期水稻铅含量的影响

水分管理对成熟期水稻根、茎、叶中的铅含量有显著影响，加硒处理显著影响了水稻铁膜、根和茎的铅含量，且水分管理和加硒处理之间的相互作用显著影响了水稻铁膜和茎对铅的积累($P<0.05$)．非淹水时水稻茎、叶中铅含量分别为淹水时的1.4 ~2.7和2.4 ~7.9倍．然而根系和铁膜中的铅含量却为淹水时大于非淹水，淹水时分别是非淹水的1.4 ~1.5和2.2 ~2.4倍．与对照相比，加硒显著降低了水稻根表铁膜、根系和茎中的铅含量，在非淹水时分别降低了45.9% ~65.8%、53.8% ~63.2%和56.3% ~67.7%，在淹水时分别降低了21.7% ~54.6%、56.1% ~64.1%和37.7% ~52.5%．籽粒和颖壳的铅含量在不同水分处理和不同硒处理间均无显著差异．非淹水时水稻各部位的铅含量为根系 > 根表铁膜 > 叶 > 茎 > 颖壳 > 籽粒，淹水时铅含量为根表铁膜 > 根系 > 叶 > 茎 > 颖壳 > 籽粒(图3)．

## 2.4　水分管理和外源硒对水稻铅分配的影响

苗期和成熟期水稻各部位的铅分配如图4所示．水分管理显著影响了铅在苗期水稻根系和地上部的分配，非淹水时，水稻地上部铅分配比为11.7% ~16.9%，显著小于根系和铁膜的铅分配($P<0.001$)．淹水使地上部的铅分配降低了85.9% ~

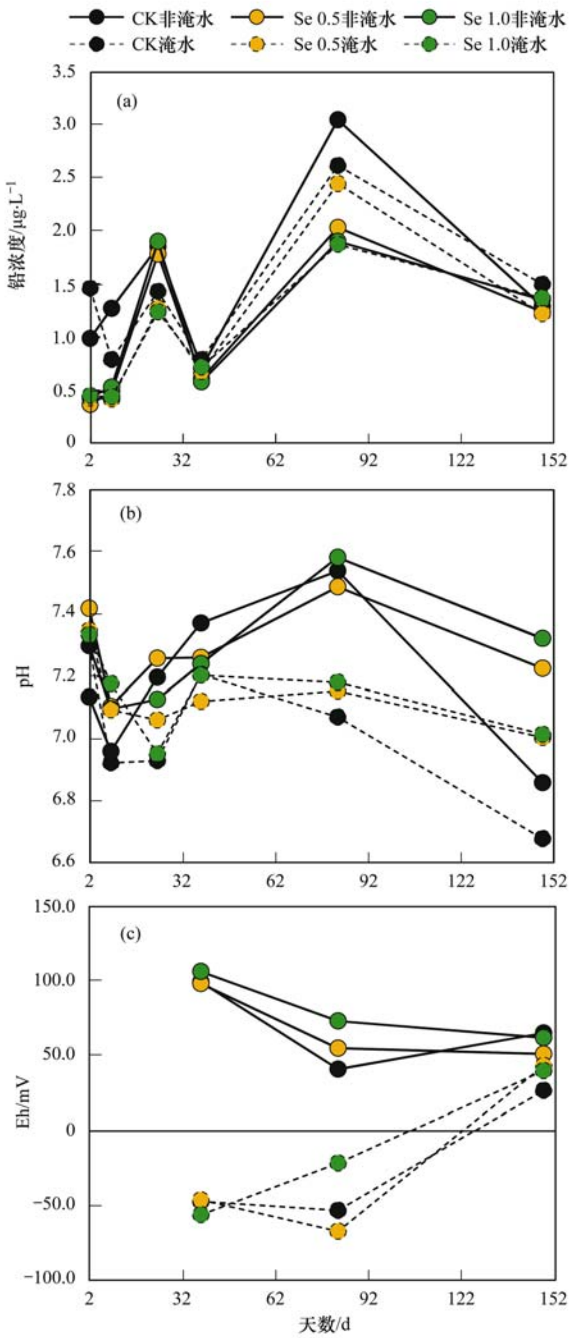
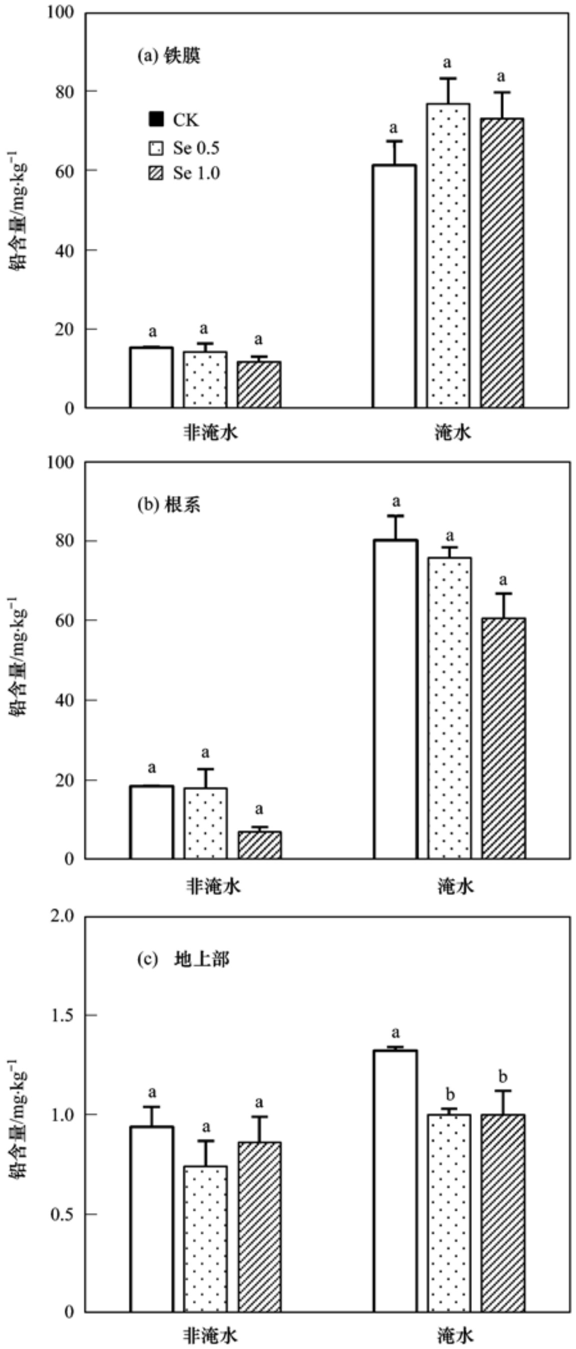



**图1　水分管理和外源硒对土壤溶液中铅含量以及土壤溶液pH和Eh的影响**

Fig. 1　Effect of water management and selenite addition on the Pb concentration in soil solutions and the soil solution pH and Eh

86.7%($P<0.001$)，使根系铅分配比增加了10.7% ~53.0%($P<0.001$)，对铁膜中的铅分配无显著影响．加硒显著增加了铁膜中的铅分配，在非淹水和淹水时分别增加了3.2% ~22.7%和16.8% ~19.3%($P<0.01$)，降低了根系的铅分配比($P<0.05$)[图4(a)]．

对于成熟期的水稻，淹水也使铅在地上部和根系的分配比分别降低了23.0% ~64.4%和26.0%




数据表示均值 + 标准误差($n=3$),
图中不同字母表示不同硒处理差异显著($P<0.05$)

**图 2 水分管理和外源硒对苗期水稻根表铁膜、根系及地上部铅含量的影响**

Fig. 2 Effect of water management and selenite addition on the Pb content in iron plaque on rice root surfaces, rice roots and shoots at the seedling stage

~27.7% ($P<0.01$), 而使铁膜的铅分配分别增加了 109.8% ~119.2% ($P<0.001$). 加硒增加了地上部的铅分配, 降低了根系的铅分配, 在非淹水和淹水时分别使地上部铅分配比增加了 75.2% ~95.4%和226.5% ~322.5% ($P<0.01$), 使根系的分配比降低了 22.8% ~26.1% 和 32.7% ~37.7% ($P<0.001$) [图 4(b)].

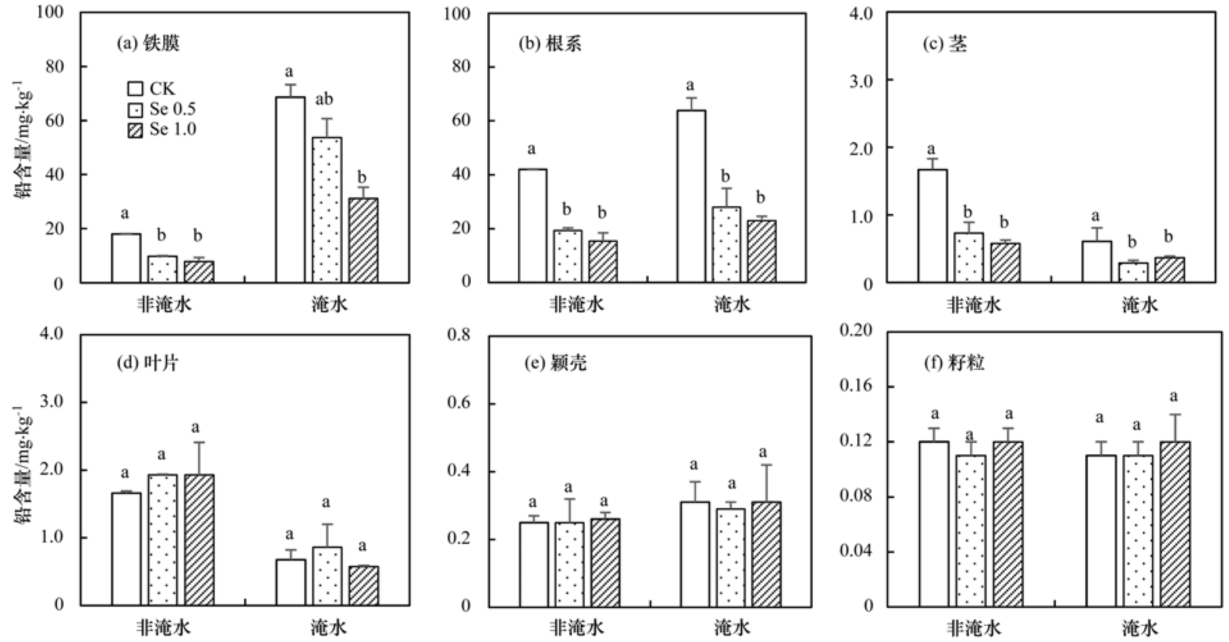
与苗期相似, 成熟期水稻中的铅分配也为地上部小于根系或根表铁膜, 而籽粒中铅仅占植物总铅量的 0.9% ~3.2%. 非淹水下成熟期水稻铅各部位的铅分配比为根系 > 根表铁膜 > 叶 > 茎 > 籽粒 ≈ 颖壳, 淹水下为根表铁膜 > 根系 > 叶 > 茎 ≈ 籽粒 ≈ 颖壳[图 4(b)].

## 3 讨论

本研究发现, 淹水对土壤溶液中的铅含量无显著影响, 增加了根表铁膜和根系的铅含量. 有研究表明, 酸性条件下, 淹水使土壤中铁锰氧化物等还原而消耗大量质子, 导致土壤 pH 上升, 土壤固相表面的负电荷增加, 因而对铅离子的吸附能力增强, 使土壤中的可交换态铅含量降低[13]. 而本试验中, 淹水使土壤 pH 略微下降, 这可能是由于碱性土淹水后大量碳酸盐溶解, 土壤中的 $P_{CO_2}$ 上升导致[14]. pH 较低时, 土壤中的难溶态金属如碳酸盐结合态、氢氧结合态等的溶解性升高, 从而增加了金属的有效性[15, 16]. 淹水导致土壤 Eh 降低, 一方面可使土壤中氧化性Fe(Ⅲ)、Mn(Ⅲ/VI)、$NO_3^-$、$SO_4^{2-}$ 等发生还原作用生成 $Fe^{2+}$、$Mn^{2+}$、$NO_2^-$、$S^{2-}$ 等[17], 减少易溶或微溶性复合物 $PbSO_4$、$Pb(NO_3)_2$ 的形成[18], 而形成难溶的 PbS 沉淀[4]; 而 $Fe^{2+}$ 可通过沉淀-氧化作用形成溶解度低的无定型氧化铁[19], 增加了对铅的吸附, 从而降低了土壤中铅的有效性. 另一方面, 淹水后铁锰氧化物的还原溶解也可以将吸附的铅离子重新释放出来[20]. 本试验土壤中有 31.4% 的铅以铁锰氧化物结合态(94.4 mg·kg$^{-1}$)的形式存在. 因此, 淹水对铅有效性的影响是这几个过程共同作用的结果.

此外, 淹水导致水稻根系表面的铁膜增加(在苗期和成熟期分别增加 49.3% ~59.3% 和 7.9% ~29.7%), 此铁膜既可以作为铅的隔离层而减少根系的吸收[21], 又可以作为重金属源而促进植物对铅的吸收[22]. Zhou 等[23]的研究发现, 铁膜的增加降低了水稻根系对镉的吸收, 却增加了对铅的吸收, Ye 等[24]对香蒲的研究也发现了这一规律. 铁膜对铅的吸附能力极强[25], 水稻中的铅主要富集在根表的铁膜及根系中, 较难向地上部转运[26, 27]. 淹水后铁膜增多, 对铅的吸附增大, 因此地上部的分配显著减少.

本试验结果表明, 土壤淹水对水稻根表铁膜和




数据表示均值 + 标准误差( $n = 3$ ), 图中不同字母表示不同硒处理差异显著( $P < 0.05$ )

**图 3　水分管理和外源硒对成熟期水稻根表铁膜、根系、茎、叶、颖壳和籽粒中铅含量的影响**

Fig. 3　Effect of water management and selenite addition on the Pb content in iron plaque on rice root surfaces, rice roots, stems, leaves, husks and grains at maturity

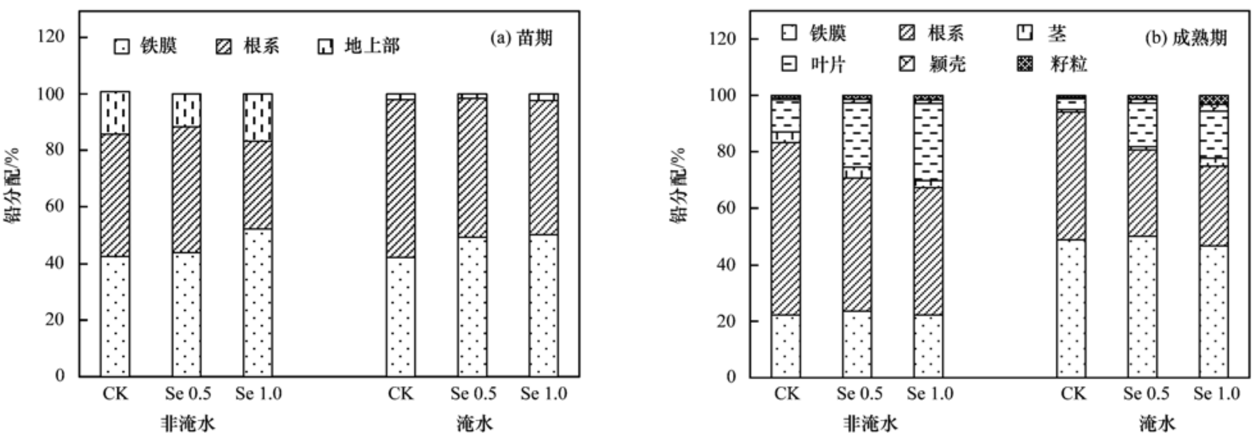



**图 4　水分管理和外源硒对铅在水稻苗期和成熟期各部位所占比例的影响**

Fig. 4　Effect of water management and Se treatments on the percentages of Pb in different components of rice at the seedling stage and at maturity

根系铅含量的增加效果为苗期 > 成熟期；且淹水增加了苗期水稻地上部的铅含量，却降低了成熟期水稻茎、叶中的铅含量. 根表铁膜的形成量随着生育期的延长而减少，对铅的吸附能力也在减弱[28]，因此作为“铅源”对根系吸收铅的促进作用也在减弱. 胡莹等研究也发现，分蘖期时，水稻根表铁膜的增加促进了根系对铅的吸收和累积，在孕穗期促进了根系的吸收而抑制了向茎、叶的转运[29]. 方志萍等[30]发现成熟期水稻籽粒中的铅含量与根表铁膜的数量呈显著负相关. 因此，淹水对水稻铅吸收转运的影响在不同生育期的影响不全一致.

外源硒的添加，显著降低了苗期水稻对铅的积累，且降低了成熟期水稻根表铁膜、根系和茎中铅含量. 有人提出，$SeO_3^{2-}$ 可与 $Cd^{2+}$ 或 $Pb^{2+}$ 形成 $CdSeO_3$ 或 $PbSeO_3$ 复合物[31]，降低土壤溶液中 $Cd^{2+}$ 或 $Pb^{2+}$ 的有效性. 且根际的 $SeO_3^{2-}$ 发生还原作用转化为 $Se^{2-}$，从而与重金属离子形成难溶的复合物如 Cd-Se、Hg-Se，抑制根系对铅的吸收[32,33]. 本试验中，加硒后土壤溶液中的铅含量低于对照，可能就是形成了 $PbSeO_3$ 或者 Pb-Se 沉淀. 铅由根系表皮吸收后，通过共质体和质外体途径进入维管柱并向地上部运输[1]. 有研究发现，加硒可以促进

水稻根系内皮层凯氏带的形成[34]，可能因此阻断了皮层与维管柱之间的质外体运输途径，减少了铅进入维管柱. 铅离子进入根系细胞后，可与植物螯合肽($PC_S$)发生络合而后存储在液泡中，而减少对细胞器的伤害. 加硒可促进 $PC_S$ 合成前体 GSH 的形成[7, 35]，因此，硒也可能通过增强 $PC_S$ 与铅的络合作用减少铅的毒性和植物对铅的吸收.

然而，加硒或水分管理均未影响籽粒中的铅含量. 植物主要通过叶片和根系吸收铅，而影响糙米中铅含量的介质排序为：大气铅 > 水铅 > 土壤铅[4]，叶片的吸附与吸收对植物累积铅的贡献比植物经根系吸收转运大得多. 而植物根系从土壤中吸收的铅大部分被局限于根系组织[1]. 因此，在水稻生长后期，可能水稻通过叶片对籽粒中铅积累的影响大于土壤中的硒产生的影响. 铅的移动性很小，本试验中，籽粒中的铅仅占植物总铅的 0.9% ~ 3.2%. 因此硒与铅在水稻根际及根表的作用可能还未影响到籽粒对铅的积累. 亚硒酸盐的添加显著促进了水稻籽粒对硒的积累，淹水下添加 0.5 $mg\cdot kg^{-1}$硒使籽粒硒含量达到 0.28 $mg\cdot kg^{-1}$，可以满足富硒水稻(0.15 ~ 0.30 $mg\cdot kg^{-1}$，DB61/T556-2012)生产的要求. 然而添加 1.0 $mg\cdot kg^{-1}$硒时，尤其非淹水条件下，使硒含量高于这个范围(>1.0 $mg\cdot kg^{-1}$). 过量的硒对人体也有毒害作用，因此在选择硒调控铅污染时，选择适合的浓度很重要，这需要进一步地探讨.

## 4 结论

(1)铅胁迫下，土壤淹水增加了水稻根表铁膜和根系的铅含量，且在苗期的增加效果更明显；增加了苗期水稻地上部的铅含量，却降低了成熟期水稻茎、叶中的铅含量.

(2)外源硒的添加，显著降低了苗期水稻根系和地上部对铅的积累，且降低了成熟期水稻根表铁膜、根系和茎中铅含量；而对成熟期水稻籽粒中的铅含量无显著影响.

**参考文献：**

[1] 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.
Duan D C, Yu M G, Shi J Y. Research advances in uptake, translocation, accumulation and detoxification of Pb in plants [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, **25**(1): 287-296.

[2] Yang Q W, Shu W S, Qiu J W, *et al*. Lead in paddy soils and rice plants and its potential health risk around Lechang Lead/Zinc Mine, Guangdong, China[J]. Environment International, 2004, **30**(7): 883-889.

[3] Zeng F R, Ali S, Zhang H T, *et al*. The influence of pH and organic matter content in paddy soil on heavy metal availability and their uptake by rice plants[J]. Environmental Pollution, 2011 **159**(1): 84-91.

[4] 粟银，袁兴中，曾光明，等. 土壤-植物系统中铅的迁移转化影响因素研究进展[J]. 安徽农业科学，2008，**36**(16)：6953-6955.
Su Y, Yuan X Z, Zeng G M, *et al*. Study on influence factors of transport and transformation of Pb in soil-plant system[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, **36**(16): 6953-6955.

[5] 熊仕娟，刘俊，徐卫红，等. 外源硒对黄瓜抗性、镉积累及镉化学形态的影响[J]. 环境科学，2015，**36**(1)：286-294.
Xiong S J, Liu J, Xu W H, *et al*. Effect of exogenous selenium on accumulation and chemical forms of cadmium in cucumber (*Cucumis satiuus* L.)[J]. Environmental Science, 2015, **36**(1): 286-294.

[6] Zhang H, Feng X B, Zhu J M, *et al*. Selenium in soil inhibits mercury uptake and translocation in rice (*Oryza sativa* L.)[J]. Environmental Science & Technology, 2012, **46**(18): 10040-10046.

[7] Malik J A, Goel S, Kaur N, *et al*. Selenium antagonises the toxic effects of arsenic on mungbean (*Phaseolus aureus* Roxb.) plants by restricting its uptake and enhancing the antioxidative and detoxification mechanisms [J]. Environmental and Experimental Botany, 2012, **77**: 242-248.

[8] Hu Y, Norton G J, Duan G L, *et al*. Effect of selenium fertilization on the accumulation of cadmium and lead in rice plants[J]. Plant and Soil, 2014, **384**(1-2): 131-140.

[9] Brown K M, Arthur J R. Selenium, selenoproteins and human health: a review[J]. Public Health Nutrition, 2001, **4**(2): 593-599.

[10] Li H F, Lombi E, Stroud J L, *et al*. Selenium speciation in soil and rice: Influence of water management and Se fertilization[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010, **58**(22): 11837-11843.

[11] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J]. Analytical Chemistry, 1979, **51**(7): 844-851.

[12] Taylor G J, Crowder A A. Use of the DCB technique for extraction of hydrous iron oxides from roots of wetland plants[J]. American Journal of Botany, 1983, **70**(8): 1254-1257.

[13] 郑顺安，郑向群，张铁亮，等. 水分条件对紫色土中铅形态转化的影响[J]. 环境化学，2011，**30**(12)：2080-2085.
Zheng S A, Zheng X Q, Zhang T L, *et al*. Effect of moisture regime on the fractionation of lead in purple soil [J]. Environmental Chemistry, 2011, **30**(12): 2080-2085.

[14] Sahrawat K L. Fertility and organic matter in submerged rice soils [J]. Current Science, 2005, **88**(5): 735-739.

[15] 赵庆圆，李小明，杨麒，等. 磷酸盐、腐殖酸与粉煤灰联合钝化处理模拟铅镉污染土壤[J]. 环境科学，2018，**39**(1)：389-398.
Zhao Q Y, Li X M, Yang L, *et al*. Passivation of simulated Pb- and Cd-contaminated soil by applying combined treatment of phosphate, humic acid, and fly ash[J]. Environmental Science,

2018, **39**(1): 389-398.

[16] Sun L N, Chen S, Chao L, *et al*. Effects of flooding on changes in Eh, pH and speciation of cadmium and lead in contaminated soil [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2007, **79**(5): 514-518.

[17] de Livera J, McLaughlin M J, Hettiarachchi G M, *et al*. Cadmium solubility in paddy soils: Effects of soil oxidation, metal sulfides and competitive ions[J]. Science of the Total Environment, 2011, **409**(8): 1489-1497.

[18] Sebastian A, Prasad M N V. Cadmium minimization in rice. A review[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2013, **34**(1): 155-173.

[19] Tack F M G, Van Ranst E, Lievens C, *et al*. Soil solution Cd, Cu and Zn concentrations as affected by short-time drying or wetting: The role of hydrous oxides of Fe and Mn [J]. Geoderma, 2006, **137**(1-2): 83-89.

[20] Davranche M, Bollinger J C. A desorption-dissolution model for metal release from polluted soil under reductive conditions[J]. Journal of Environmental Quality, 2000, **30**(5): 1581-1586.

[21] Li F L, Yang C M, Syu C H, *et al*. Combined effect of rice genotypes and soil characteristics on iron plaque formation related to Pb uptake by rice in paddy soils[J]. Journal of Soils and Sediments, 2016, **16**(1): 150-158.

[22] Zhong S Q, Shi J C, Xu J M. Influence of iron plaque on accumulation of lead by yellow flag (*Iris pseudacorus* L.) grown in artificial Pb-contaminated soil [J]. Journal of Soils and Sediments, 2010, **10**(5): 964-970.

[23] Zhou H, Zeng M, Zhou X, *et al*. Heavy metal translocation and accumulation in iron plaques and plant tissues for 32 hybrid rice (*Oryza sativa* L.) cultivars[J]. Plant and Soil, 2015, **386**(1-2): 317-329.

[24] Ye Z H, Baker A J M, Wong M H, *et al*. Zinc, lead and cadmium accumulation and tolerance in *Typha latifolia* as affected by iron plaque on the root surface[J]. Aquatic Botany, 1998, **61**(1): 55-67.

[25] Zheng R L, Cai C, Liang J H, *et al*. The effects of biochars from rice residue on the formation of iron plaque and the accumulation of Cd, Zn, Pb, As in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings[J]. Chemosphere, 2012, **89**(7): 856-862.

[26] 高超, 李军, 韩颖, 等. 不同磷肥对水稻铅积累的影响及其机理[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(1): 288-293.
Gao C, Li J, Han Y, *et al*. Effects of different types of phosphate fertilizers on lead accumulation in rice [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, **35**(1): 288-293.

[27] Liu J G, Ma X M, Wang M X, *et al*. Genotypic differences among rice cultivars in lead accumulation and translocation and the relation with grain Pb levels [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2013, **90**: 35-40.

[28] Shuman L M. Adsorption of Zn by Fe and Al hydrous oxides as influenced by aging and pH[J]. Soil Science Society of America Journal, 1977, **41**(4): 703-706.

[29] 胡莹, 黄益宗, 黄艳超, 等. 根表铁膜对水稻铅吸收转运的影响[J]. 生态毒理学报, 2014, **9**(1): 35-41.
Hu Y, Huang Y Z, Huang Y C, *et al*. Influence of iron plaque on Pb uptake and translocation by rice (*Oryza sativa* L.)[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2014, **9**(1): 35-41.

[30] 方至萍, 廖敏, 张楠, 等. 施用海泡石对铅、镉在土壤-水稻系统中迁移与再分配的影响[J]. 环境科学, 2017, **38**(7): 3028-3035.
Fang Z P, Liao M, Zhang N, *et al*. Effect of sepiolite application on the migration and redistribution of Pb and Cd in soil rice system in soil with Pb and Cd combined contamination [J]. Environmental Science, 2017, **38**(7): 3028-3035.

[31] Badiello R, Feroci G, Fini A. Interaction between trace elements: selenium and cadmium ions [J]. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 1996, **10**(3): 156-162.

[32] Shanker K, Mishra S, Srivastava S, *et al*. Effect of selenite and selenate on plant uptake of cadmium by kidney bean (*Phaseolus mungo*) with reference to Cd-Se interaction [J]. Chemical Speciation & Bioavailability, 1995, **7**(3): 97-100.

[33] Plant J A, Kinniburgh D G, Smedley P L, *et al*. Arsenic and selenium[J]. Treatise on Geochemistry, 2006, **9**: 17-66.

[34] Wang X, Tam N F Y, Fu S, *et al*. Selenium addition alters mercury uptake, bioavailability in the rhizosphere and root anatomy of rice (*Oryza sativa*) [J]. Annals of Botany, 2014, **114**(2): 271-278.

[35] Tang H, Liu Y G, Gong X M, *et al*. Effects of selenium and silicon on enhancing antioxidative capacity in ramie (*Boehmeria nivea* (L.) Gaud.) under cadmium stress[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22(13): 9999-10008.

# HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly) Vol. 39 No. 10 Oct. 15, 2018


## CONTENTS