

外源铁对铅污染土壤中宽叶香蒲铅积累的影响*

钟顺清¹ 徐建明^{2,3**}

(¹衡阳师范学院资源环境与旅游管理系, 湖南衡阳 421008; ²浙江大学水土资源与环境研究所, 杭州 310058; ³浙江省亚热带土壤与植物营养重点实验室, 杭州 310058)

摘要 采用温室盆栽方法, 研究添加外源铁对不同铅浓度(0、100、500 和 1000 mg · kg⁻¹) 污染土壤中宽叶香蒲铅积累的影响. 结果表明: 各铅浓度条件下, 与添加 100 mg Fe · kg⁻¹相比, 添加 500 mg Fe · kg⁻¹处理的宽叶香蒲地上部和根的铅含量均增高. 土壤铅浓度为 1000 mg · kg⁻¹时, 添加 500 mg Fe · kg⁻¹处理根的铅含量比 100 mg Fe · kg⁻¹处理增加 33.7%, 地上部铅含量增加 50.5%. 添加 500 mg Fe · kg⁻¹处理的根际土壤中可交换态铅比 100 mg Fe · kg⁻¹处理增加 77.0% ~ 114.6%. 除 500 mg · kg⁻¹铅浓度外, 各铅浓度条件下添加 500 mg Fe · kg⁻¹处理根干质量均显著低于 100 mg Fe · kg⁻¹处理. 在铅污染的湿地环境中添加适量铁可以提高铅的有效性, 促进铅积累.

关键词 铁 铅 宽叶香蒲 铅积累 湿地

文章编号 1001-9332(2013)01-0078-05 **中图分类号** Q945.78; X53 **文献标识码** A

Effects of exogenous iron on lead accumulation in *Typha latifolia* from a lead-contaminated soil. ZHONG Shun-qing¹, XU Jian-ming^{2,3} (¹Department of Resource Environment and Tourism Management, Hengyang Normal University, Hengyang 421008, Hunan, China; ²Institute of Soil and Water Resource and Environmental Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; ³Zhejiang Province Key Laboratory of Subtropic Soil and Plant Nutrition, Hangzhou 310058, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2013, 24(1): 78-82.

Abstract: A pot experiment was conducted to study the effects of adding 100 and 500 mg · kg⁻¹ of exogenous iron (Fe) on the lead (Pb) accumulation in *Typha latifolia* growing on a soil with 0, 100, 500 and 1000 mg · kg⁻¹ of Pb, respectively. In treatment 500 mg Fe · kg⁻¹, the Pb concentration in *T. latifolia* shoots and roots was higher, compared with that in treatment 100 mg Fe · kg⁻¹. When the soil Pb concentration was 1000 mg · kg⁻¹, the Pb concentration in *T. latifolia* shoots and roots in treatment 500 mg Fe · kg⁻¹ increased by 33.7% and 50.5%, respectively, compared with that in treatment 100 mg Fe · kg⁻¹. The exchangeable Pb concentration in rhizosphere soil was 77.0% - 114.6% higher in treatment 500 mg Fe · kg⁻¹ than in treatment 100 mg Fe · kg⁻¹. When the soil Pb concentration was 0, 100 and 1000 mg · kg⁻¹, the root dry mass in treatment 500 mg Fe · kg⁻¹ had a significant decrease, compared with that in treatment 100 mg Fe · kg⁻¹. It was suggested that adding appropriate amount of Fe to Pb-contaminated wetland soil could increase the availability of soil Pb and improve the Pb accumulation in plants.

Key words: Fe; Pb; *Typha latifolia*; Pb accumulation; wetland.

人工湿地具有低投资、低运行费、低维护技术和净水能力良好的特点, 已经成为处理污水的重要技术手段^[1-3]. 宽叶香蒲 (*Typha latifolia*) 对重金属具有较强的忍耐性, 因此在处理废水的人工湿地中经

常使用^[4]. 重金属主要通过沉淀、吸附、共沉淀、离子交换与土壤物质发生作用^[5]. 如何增加湿地植物对重金属的吸收, 提高湿地系统净化含重金属废水的效率一直受到广泛关注. 重金属能否被植物吸收利用取决于重金属的生物有效性和植物的耐性. 有研究表明, 铁影响湿地植物根表铁氧化物的形成^[6-8], 根表铁膜对湿地植物利用重金属起抑制或促进作用取决于根表铁膜的厚度^[7-11], 增加铁促进

* 湖南省自然科学基金项目(09JJ4021)、衡阳师范学院科学基金项目(10B70)和公益性农业科研专项(201203045-2)资助.

** 通讯作者. E-mail: jmxu@zju.edu.cn

2012-06-25 收稿, 2012-11-04 接受.

了植物体内铁的积累,从而增强了湿地植物对重金属的耐性^[5,10].但是在重金属污染的湿地环境中,外源铁对重金属形态和植物积累重金属产生怎样的影响鲜见报道.为此,本文采用温室盆栽试验研究了不同铅浓度污染下添加外源铁对宽叶香蒲铅积累的影响,以期为提高矿山废水和城市污水处理的人工湿地净化效率提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验于2008年4—5月在浙江大学华家池校区大棚温室内进行.供试土壤采自浙江省嘉兴双桥村已撂荒的青紫泥水稻土,采样深度0~30 cm,土样经过自然风干磨碎后过2 mm筛备用.土壤有机质 $36.2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,pH 5.61(土:水=1:2.5),阳离子交换量(CEC) $21.47\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$,总磷 $1.03\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,总氮 $2.32\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全铁 $29.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全铅 $45.58\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.土壤质地为粉质粘壤土,其中,砂粒9.2%,粉粒57.3%,粘粒33.5%.供试宽叶香蒲幼苗购置于杭州天景水生植物园.

1.2 试验设计

试验设4个铅浓度处理:0、100、500、1000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,以 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 溶液的形式添加到土壤中,混合均匀,保持40%~60%的田间持水量,于温室内培养2周.设2个铁浓度处理:100和500 $\text{mg}\text{ Fe}\cdot\text{kg}^{-1}$,以 $\text{FeSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 固体形式与土壤混合均匀.向土壤中添加尿素 $0.2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、磷酸二氢钙 $0.2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和氯化钾 $0.3\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 作底肥.

2008年4月24日,在温室中,利用孔径300目的根袋移栽宽叶香蒲幼苗,在装有Hoagland溶液的塑料桶中培养2周.采用2.5 L塑料桶,每桶装土壤1.5 kg,采用根袋装处理土壤0.5 kg,根袋大小 $10\text{ cm}\times 15\text{ cm}$.将移入宽叶香蒲幼苗和处理土壤的根袋植入塑料桶中央,保持根袋土壤与桶中土壤高度一致,然后淹水培养,每桶1株,每处理3个重复,共24桶.4周后将植株与根袋一同取出,用自来水将根冲洗干净,再用蒸馏水淋洗3次.将植株分成地上部和根,取部分根样进行根表铁膜提取,其余植株根和地上部分于 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 下杀青15 min,在 $70\text{ }^\circ\text{C}$ 下烘干,粉碎后过1 mm筛,备用.

1.3 测定项目与方法

1.3.1 根表吸附铅含量的测定 采用DCB法^[12]提取根表吸附铅.将根剪成1 cm小段,称根质量1.0 g放入250 mL三角瓶中,依次加入 $0.3\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 柠檬

酸钠40 mL、 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 碳酸氢钠5 mL、3 g连二亚硫酸钠,摇匀后在室温($25\text{ }^\circ\text{C}$)下振荡3 h,然后将根取出并用蒸馏水淋洗3次,将淋洗液和提取液转入100 mL容量瓶中定容.采用火焰原子分光光度计(novAA 300,德国)测定铅含量.

1.3.2 植株地上部和根的消解 采用浓硝酸-微波消解法^[13]消解植株地上部和根.称取0.50 g样品于消解管中,加入10 mL优级纯硝酸,采用预设的三步升温,在 $185\text{ }^\circ\text{C}$ 下消煮20 min.消煮后,将消化液转移到100 mL容量瓶中定容,摇匀,过滤备用.植株消解液中的铅含量利用火焰原子分光光度计(novAA 300,德国)测定.

1.3.3 土壤铅含量的测定 采用Tessier连续分级法^[14]提取土壤样品中各形态的铅:水溶态铅(土:水=1:15)、交换态铅($1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{MgCl}_2$ 溶液,pH=7.0)、碳酸盐态铅($1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{NaAc}$,pH=5.0)、铁锰氧化物结合态铅($0.04\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{NH}_4\text{OH}\cdot\text{HCl}$)、有机结合态铅和残渣态铅($0.021\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{HNO}_3+30\%\text{ H}_2\text{O}_2$).利用火焰原子分光光度计(novAA 300,德国)测定铅含量.

1.4 数据处理

采用DPS软件进行数据统计分析和作图,采用双因素方差分析(two-way ANOVA)和Duncan新复极差法进行方差分析和差异显著性检验($\alpha=0.05$).图和表中数据为平均值 \pm 标准误.

2 结果与分析

2.1 外源铁对宽叶香蒲生长的影响

由表1可以看出,在 $100\text{ mg}\text{ Fe}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理下,铅浓度 $\leq 100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时宽叶香蒲的根干质量随铅浓度的增加而增大,但差异不显著,当铅浓度达到 $500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,根干质量显著下降;在 $500\text{ mg}\text{ Fe}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理下,铅浓度 $\leq 500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,根干质量略有降低但差异不显著,当铅浓度达到 $1000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,根干质量显著下降.除 $500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 铅处理外,各铅浓度处理下 $500\text{ mg}\text{ Fe}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理根干质量均显著低于 $100\text{ mg}\text{ Fe}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理.方差分析表明,铁($F=15.33$, $P<0.01$)和铅($F=21.40$, $P<0.01$)对宽叶香蒲根干质量的影响均达到显著水平,铁与铅的交互作用对根干质量的影响也达到显著水平($F=5.66$, $P<0.01$).

在 $100\text{ mg}\text{ Fe}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理下,宽叶香蒲的地上部干质量随铅浓度的增加呈先增大后减小的趋势,以 $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 铅处理地上部干质量最大;在 500

表 1 不同处理下宽叶香蒲地上部和根的干质量
Table 1 Dry mass of shoots and roots of *Typha latifolia* under different treatments (g · plant⁻¹)

部位 Part	铁浓度 Fe concentration (mg · kg ⁻¹)	铅浓度 Pb concentration (mg · kg ⁻¹)			
		0	100	500	1000
根	100	1. 85±0. 11Aa	2. 15±0. 40Aa	1. 20±0. 07Ab	1. 32±0. 18Ab
Root	500	1. 41±0. 08Ba	1. 40±0. 23Ba	1. 34±0. 09Aa	0. 94±0. 07Bb
地上部	100	13. 57±3. 14Ab	21. 60±1. 25Aa	18. 39±1. 79Aab	15. 40±0. 62Ab
Shoot	500	17. 00±2. 26Aa	17. 10±2. 27Aa	18. 25±4. 52Aa	13. 28±3. 64Aa

不同大写字母表示不同铁浓度处理间差异显著,不同小写字母表示不同铅浓度处理间差异显著 ($P<0.05$) Different capital letters meant significant difference among different Fe concentration treatments, and different small letters meant significant difference among different Pb concentration treatments at 0.05 level. 下同 The same below.

表 2 不同处理下宽叶香蒲根表吸附铅含量
Table 2 Pb concentration on the roots of *Typha latifolia* under different treatments (mg · kg⁻¹)

铁浓度 Fe concentration (mg · kg ⁻¹)	铅浓度 Pb concentration (mg · kg ⁻¹)			
	0	100	500	1000
100	0. 36±0. 04Ac	0. 76±0. 07Abc	1. 09±0. 05Ab	1. 87±0. 18Aa
500	0. 58±0. 05Ac	1. 28±0. 23Ab	1. 43±0. 32Aab	1. 95±0. 43Aa

mg Fe · kg⁻¹处理下,地上部干质量在 4 个铅浓度处理间差异不显著. 方差分析表明,铅和铁对宽叶香蒲地上部干质量的影响均不显著,而铅与铁的交互作用对地上部干质量的影响达到显著水平 ($F=4.31$, $P<0.05$).

2.2 外源铁对宽叶香蒲根表铅吸附的影响

由表 2 可以看出,随土壤铅浓度的增加,植株根表吸附的铅含量在 100 和 500 mg Fe · kg⁻¹处理下均呈逐渐上升的趋势. 500 mg Fe · kg⁻¹处理下,植株根表吸附的铅含量高于 100 mg Fe · kg⁻¹处理,表明高剂量的铁有助于铅吸附于植株根表. 铅 ($F=40.93$, $P<0.01$)对植株根表铅含量的影响达到显著水平,但是铁、铁与铅的交互作用对根表铅含量的影响不显著.

2.3 外源铁对宽叶香蒲吸收积累铅的影响

由图 1 可以看出,各处理中宽叶香蒲根铅含量为 68.4 ~ 1497.3 mg · kg⁻¹. 随着土壤铅浓度的增加,在 100 和 500 mg Fe · kg⁻¹处理下根铅含量均呈逐渐增加的趋势. 土壤铅浓度为 1000 mg · kg⁻¹时,500 mg Fe · kg⁻¹处理下根铅含量比 100 mg Fe · kg⁻¹处理增大 33.7%. 铁对根铅含量的影响不显著,而铅 ($F=42.10$, $P<0.01$)、铅与铁的交互作用 ($F=10.13$, $P<0.01$)对根铅含量的影响均达到显著水平.

各处理中宽叶香蒲地上部铅含量为 29.6 ~ 105.2 mg · kg⁻¹. 随着土壤铅浓度的增加,100 和 500 mg Fe · kg⁻¹处理下地上部铅含量均呈先上升后下

降的趋势. 土壤铅浓度为 1000 mg · kg⁻¹时,500 mg Fe · kg⁻¹处理下地上部铅含量比 100 mg Fe · kg⁻¹处理增大 50.5%. 铅 ($F=22.11$, $P<0.01$)对植株地上部铅含量的影响达到显著水平,但铁、铁与铅的交互作用对地上部铅含量的影响均不显著.

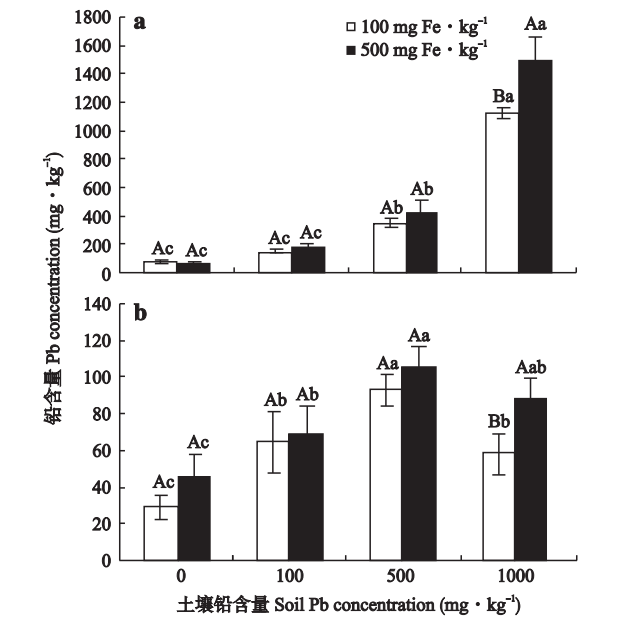


图 1 不同处理下宽叶香蒲根(a)和地上部(b)的铅含量
Fig.1 Pb concentration in the roots (a) and shoots (b) of *Typha latifolia* under different treatments.
不同大写字母表示不同铁浓度处理间差异显著,不同小写字母表示不同铅浓度处理间差异显著 ($P<0.05$) Different capital letters meant significant difference among different Fe concentration treatments, and different small letters meant significant difference among different Pb concentration treatments at 0.05 level.

表 3 不同处理下宽叶香蒲根际土壤中铅形态的变化
Table 3 Changes of Pb speciation in rhizosphere soil of *Typha latifolia* under different treatments (mg · kg⁻¹)

铅浓度 Pb concentration (mg · kg ⁻¹)	铁浓度 Fe concentration (mg · kg ⁻¹)	水溶态铅 Water soluble Pb	可交换态铅 Exchangeable Pb	碳酸盐结合态铅 Carbonate- bound Pb	铁锰氧化物 结合态铅 Fe-Mn oxide- bound Pb	有机质-硫化物 结合态铅 Organic matter and sulfide bound Pb	残渣态铅 Residual Pb
0	100	0.75±0.21Ab	1.03±0.53Ac	4.82±0.28Ad	5.50±0.28Ad	3.45±0.16Ad	18.40±1.48Ac
	500	0.80±0.26Ac	2.21±0.50Ac	3.67±0.21Ad	4.71±0.46Ad	3.43±0.72Ad	14.83±1.57Ac
100	100	1.53±0.19Ab	8.50±1.83Abc	29.92±3.26Ac	24.10±2.46Ac	14.59±0.93Ac	27.57±2.17Ac
	500	1.80±0.25Abc	16.39±1.95Ac	26.37±2.82Ac	20.51±1.96Ac	12.07±0.63Ac	25.44±3.99Ac
500	100	3.58±0.53Aa	40.08±6.64Ab	120.10±9.27Ab	90.83±16.68Ab	48.63±9.79Ab	72.69±5.61Ab
	500	3.34±0.51Ab	76.75±2.33Ab	99.64±6.98Bb	75.32±4.42Bb	41.68±1.76Ab	73.33±7.77Ab
1000	100	4.46±1.44Aa	150.17±9.00Ba	200.57±9.82Aa	161.62±8.03Aa	86.15±7.47Aa	106.89±8.50Aa
	500	6.03±2.37Aa	265.80±7.44Aa	175.36±8.54Ba	110.51±8.79Ba	57.85±0.93Ba	88.52±10.48Ba

在 0、100、500 mg · kg⁻¹ 铅处理下,各铁浓度处理的宽叶香蒲根铅含量是地上部的 1.5 ~ 3.9 倍,在 1000 mg · kg⁻¹ 铅处理下,根铅含量是地上部的 17.0 ~ 19.2 倍。

2.4 外源铁对宽叶香蒲根际土壤中铅形态的影响

由表 3 可以看出,各铅浓度处理下,500 mg Fe · kg⁻¹处理根际土壤中可交换态 Pb 含量比 100 mg Fe · kg⁻¹处理增大 77.0% ~ 114.6%,而碳酸盐结合态铅、铁锰氧化物结合态铅和有机质-硫化物结合态铅含量均比 100 mg Fe · kg⁻¹处理降低。虽然铁对根际土壤中不同形态铅的影响差异不显著,但是铁与铅的交互作用对可交换态铅 ($F=10.14, P<0.01$)、碳酸盐结合态铅 ($F=9.12, P<0.01$)、铁锰氧化物结合态铅 ($F=11.04, P<0.01$) 和有机质-硫化物结合态铅 ($F=12.67, P<0.01$) 的影响均达到显著水平。

3 讨 论

Ye 等^[11] 通过水培试验发现,当溶液中铅 [Pb(NO₃)₂]浓度为 10 ~ 20 mg · kg⁻¹时,宽叶香蒲植株没有发生中毒症状,生长未受到抑制。有研究表明,宽叶香蒲对铅、镍、铜、锌、镉等重金属具有较强的忍耐性^[15]。宽叶香蒲等湿地植物根表可以形成铁氧化物沉淀,从而减少对亚铁的吸收,降低其对植株的毒害^[13,16-17]。本研究中,添加 500 mg Fe · kg⁻¹处理下,不同浓度铅污染土壤中宽叶香蒲地上部干质量差异不显著,说明宽叶香蒲对铅和铁具有较强的忍耐性。

在土壤铅浓度为 0、100 和 500 mg · kg⁻¹时,500 mg Fe · kg⁻¹处理下宽叶香蒲植株地上部和根的铅含量均高于 100 mg Fe · kg⁻¹处理,当土壤铅浓度为

1000 mg · kg⁻¹时,处理间差异达到显著水平,这表明在铅污染土壤中加入一定量的铁有利于铅在宽叶香蒲中积累,特别是在较高铅浓度污染下效果更明显。宽叶香蒲对铅的积累水平取决于土壤中铅的生物有效性。土壤 pH、有机质、碳酸盐、磷酸盐和铁氧化物含量对铅的有效性具有明显影响^[18]。外源铁主要通过 2 个途径影响铅的有效性:其一,外源铁在根际界面利用植物根系的泌氧或者根系分泌氧化性物质以及根际微生物的作用发生氧化作用^[19-20],亚铁的氧化作用产生质子,增加了根际土壤的酸度,从而提高根际铅的有效性^[21-22]。本研究中,各处理根际土壤 pH 在 4.09 ~ 5.21,500 mg Fe · kg⁻¹处理根际土壤 pH 比 100 mg Fe · kg⁻¹处理低 0.6。500 mg Fe · kg⁻¹处理的水溶态和交换态铅含量均高于 100 mg Fe · kg⁻¹处理,而碳酸盐结合态铅、铁锰氧化物结合态铅和有机质硫化物结合态铅含量低于 100 mg Fe · kg⁻¹处理(表 4),说明根际土壤 pH 的降低有利于铅从碳酸盐结合态和铁锰结合态向水溶态和交换态转化。Blaylock 等^[23]研究发现,当土壤 pH>7.5 时,铅的溶解度降低,当土壤 pH<5.5 时,铅的溶解度增加,有利于植物对铅的吸收。王新和周启星^[24]研究也发现,当土壤 pH 降低,土壤中固定的铅尤其是 PbCO₃容易释放出来,土壤中水溶态铅含量增加,可溶态和交换态金属离子增加。其二,铁的加入增加了根际土壤铁的有效性,有助于根表铁氧化物胶膜的形成^[11,17,25]。根际区的铅吸附到根表,从而降低根际区铅含量,形成铅浓度梯度差,使非根际土中的铅向根际迁移,因此根际区成为铅库,而非根际区成为铅源^[21]。铅在根表与铁氧化物结合形态是否有利于铅向根表的迁移还有待进一步研究。

参考文献

[1] Cheng SP, Grossea WG, Karrenbrock F. Efficiency of

- constructed wetlands in decontamination of water polluted by heavy metals. *Ecological Engineering*, 2002, **18**: 317–325
- [2] Wang S-H (王世和). Theory and Technique of Sewage Treatment by Constructed Wetland. Beijing: Science Press, 2007 (in Chinese)
- [3] Ji G-D (籍国东), Sun T-H (孙铁珩), Li S (李顺). Constructed wetland and its application for industrial wastewater treatment. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2002, **13**(2): 224–228 (in Chinese)
- [4] Sasmaza A, Obekb E, Hasar H. The accumulation of heavy metals in *Typha latifolia* L. grown in a stream carrying secondary effluent. *Ecological Engineering*, 2008, **33**: 278–284
- [5] Sheoran AS, Sheoran V. Heavy metal removal mechanism of acid mine drainage in wetlands: A critical review. *Minerals Engineering*, 2006, **19**: 105–116
- [6] Liu H-J (刘侯俊), Hu X-B (胡向白), Zhang J-L (张俊伶), *et al.* Physiological indices for evaluating iron toxicity tolerance of rice (*Oryza sativa* L.). *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18**(2): 425–430 (in Chinese)
- [7] Liu Y-J (刘艳菊), Zhu Y-G (朱永官), Ding H (丁辉), *et al.* The effect of root surface iron plaque on Pb uptake by rice (*Oryza sativa* L.) roots. *Environmental Chemistry* (环境化学), 2007, **26**(3): 327–330 (in Chinese)
- [8] Otte ML, Rozema J, Koster L, *et al.* Iron plaque on roots of *Aster tripolium* L. interaction with zinc uptake. *New Phytologist*, 1989, **111**: 309–317
- [9] Shi K (史 锟), Zhang F-S (张福锁), Liu X-J (刘学军), *et al.* Effect of different cultivation practices on Fe and Cd content in iron plaque outside rice root and Cd content in rice root. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2003, **14**(8): 1273–1277 (in Chinese)
- [10] Batty LC, Baker AJM, Wheeler BD, *et al.* The effect of pH and plaque on the uptake of Cu and Mn in *Phragmites australis* (Cav.) Trin ex. Steudel. *Annals of Botany*, 2000, **86**: 647–653
- [11] Ye ZH, Cheung KC, Wong MH. Copper uptake in *Typha latifolia* as affected by iron and manganese plaque on the root surface. *Canadian Journal of Botany*, 2001, **79**: 314–320
- [12] Taylor GJ, Crowder AA. Use of the DCB technique for extraction of hydrous iron oxides from roots of wetland plants. *American Journal of Botany*, 1983, **70**: 1254–1257
- [13] Tessier A, Campbell PGC, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical Chemistry*, 1979, **51**: 844–851
- [14] Ye ZH, Baker AJM, Wong MH, *et al.* Zinc, lead and cadmium tolerance, uptake and accumulation by *Typha latifolia* L. *New Phytologist*, 1997, **136**: 469–480
- [15] Snowden RED, Wheeler BD. Chemical changes in selected wetland plants species with increasing Fe supply, with specific reference to root precipitates and Fe tolerance. *New Phytologist*, 1995, **131**: 503–520
- [16] Zhong S-Q (钟顺清), Xu J-M (徐建明). Effect of iron plaque on utilization of phosphorus by broad-leaf cattail (*Typha latifolia* L.) in a lead-contaminated soil. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2009, **15**(6): 1419–1424 (in Chinese)
- [17] Zhou J-L (周建林), Tang J-J (唐建军). Physiological indices for evaluating iron toxicity tolerance of rice (*Oryza sativa* L.). *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2001, **12**(1): 224–228 (in Chinese)
- [18] Chen S-B (陈世宝), Zhu Y-G (朱永官), Ma Y-B (马义兵). Effects of phosphate amendments on Pb extractability and movement of phosphorus in contaminated soil. *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报), 2006, **26**(7): 1140–1144 (in Chinese)
- [19] Blute NK, Brabander DJ, Hemond HF, *et al.* Arsenic sequestration by ferric iron plaque on cattail roots. *Environmental Science & Technology*, 2004, **38**: 6074–6077
- [20] Weiss JV, Rentz JA, Plaia T, *et al.* Characterization of neutrophilic Fe(II)-oxidizing bacteria isolated from the rhizosphere of wetland plants and description of *Ferritrophicum radicola* gen. nov. sp. nov., and *Sideroxydans paludicola* sp. nov. *Geomicrobiology Journal*, 2007, **24**: 559–570
- [21] Otte ML, Matthews DJ, Jacob DL, *et al.* Biogeochemistry of metals in the rhizosphere of wetland plants: An explanation for ‘Innate’ metal tolerance// Wong MH, ed. Wetlands Ecosystem in Asia: Function and Management. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2004: 87–94
- [22] Zhang CH, Ge Y, Yao H, *et al.* Iron oxidation-reduction and its impacts on cadmium bioavailability in paddy soils: A review. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2012, **6**: 509–517
- [23] Blaylock MJ, Salt DE, Dushenkov S, *et al.* Enhanced accumulation of Pb in Indian mustard by soil applied chelating agents. *Environmental Science & Technology*, 1997, **31**: 860–865
- [24] Wang X (王 新), Zhou Q-X (周启星). Distribution of forms for cadmium, lead copper and zinc in soils and its influences by modifier. *Journal of Agro-environment Science* (农业环境科学学报), 2003, **22**(5): 541–545 (in Chinese)
- [25] Hansel CM, Fendorf S, Sutton S, *et al.* Characterization of Fe plaque and associated metals on the roots of mine-waste impacted aquatic plants. *Environmental Science & Technology*, 2001, **35**: 3863–3868

作者简介 钟顺清,男,1973年生,博士,副教授。主要从事湿地土壤环境研究。E-mail: shunqingzhong@163.com

责任编辑 孙 菊