

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第10期

Vol.34 No.10

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京地区大气气溶胶 PM_{2.5} 中稳定碳同位素组成研究 吴梦龙, 郭照冰, 刘凤玲, 孙德玲, 卢霞, 姜文娟 (3727)

太原市空气颗粒物中正构烷烃分布特征及来源解析 胡冬梅, 彭林, 白慧玲, 牟玲, 韩锋, 刘效峰, 冀豪栋, 张鹏九 (3733)

交通与气象因子对不同粒径大气颗粒物的影响机制研究 罗娜娜, 赵文吉, 晏星, 官兆宁, 熊秋林 (3741)

公交车燃用生物柴油的颗粒物排放特性 楼狄明, 陈峰, 胡志远, 谭丕强, 胡炜 (3749)

兰州及其周边区域大气降水 δ¹⁸O 特征及其水汽来源 陈粉丽, 张明军, 马潜, 李小飞, 王圣杰, 李菲 (3755)

天山乌鲁木齐河源 1 号冰川区气溶胶水溶性离子变化特征及来源分析 岳晓英, 李忠勤, 张明军, 周平, 樊晋 (3764)

O₃/H₂O₂ 氧化苯乙烯气体性能及机制 何觉聪, 黄倩茹, 叶杞宏, 罗雨薇, 张再利, 樊青娟, 魏在山 (3772)

马尾松针叶组织稳定硫同位素地球化学特征及来源示踪 关晖, 肖化云, 朱仁果, 郑能建, 瞿玲露 (3777)

江西省表层土壤和苔藓硫含量及硫同位素组成对比研究 李男, 肖化云, 陈永忠, 周丹, 罗笠, 吴代敏 (3782)

辽河流域非点源污染空间特征遥感解析 王雪蕾, 蔡明勇, 钟部卿, 姚延娟, 殷守敬, 吴迪 (3788)

景观带尺度高寒区水文特征时空变化规律研究 杨永刚, 胡晋飞, 肖洪浪, 邹松兵, 尹振良 (3797)

金普湾海域表层沉积物中基质结合态磷化氢的分布特征 游丽丽, 宗海波, 张淑芳, 尹国宇, 李涛, 侯立军 (3804)

崇明东滩湿地干湿交替过程脲酶活性变化初探 韩建刚, 曹雪 (3810)

FDA 水解酶分析法表征近海泥滩微生物活性 刘叶, 邹立, 刘陆, 高冬梅 (3818)

中国东北主要河流沉积物中多溴二苯醚的含量状况及生态风险分析 袁海峰, 成杭新, 赵传冬, 刘应汉, 杨柯, 李括, 彭敏, 刘飞 (3825)

深圳大鹏湾海域表层沉积物和生物体中多环芳烃残留及其风险评价 孙闰霞, 柯常亮, 谷阳光, 卢腾腾, 杜飞雁, 马胜伟, 林钦 (3832)

PMF 和 PCA/MLR 法解析上海市高架道路地表径流中多环芳烃的来源 边璐, 李田, 侯娟 (3840)

三峡库区蓄水初期大宁河重金属食物链放大特征研究 余杨, 王雨春, 周怀东, 高博, 赵高峰 (3847)

小型封闭水体环境因子与叶绿素 a 的时空分布及相关性研究 李飞鹏, 张海平, 陈玲 (3854)

太湖氮、磷自净能力的实验与模型模拟 韩涛, 翟淑华, 胡维平, 张红举, 李钦钦 (3862)

湖泊疏浚方式对内源释放影响的模拟研究 陈超, 钟继承, 范成新, 孔明, 余居华 (3872)

水体/底泥生物基城市河道富营养化水体修复试验研究 周慧华, 宋晓光, 吴革, 谢鑫源 (3879)

底泥调控剂对感潮河涌沉积物中重金属的影响 区凤荏, 孙国萍, 许玫英 (3888)

区域水化学条件对淮南采煤沉陷区水域沉积物磷吸附特征的影响研究 易齐涛, 孙鹏飞, 谢凯, 曲喜杰, 王婷婷 (3894)

4 种人工湿地填料的 f2 噬菌体吸附特性 陈迪, 郑祥, 魏源送, 杨勇 (3904)

稻壳灰对抗生素磺胺的吸附特性研究 纪菅雪, 王凤贺, 张帆, 张艳红, 王国祥, 顾中铸 (3912)

紫外辐射对腐殖酸化学稳定性影响机制研究 王文东, 周礼川, 丁真真, 王洪平, 孙学军 (3921)

基于石墨烯载体的铁基材料制备及除砷性能比较 朝木尔乐格, 冯流, 霍艳霞 (3927)

nTiO₂ 在水中的分散沉降行为研究 陈金媛, 方金凤, 魏秀珍 (3933)

微生物-铁氧化物交互作用对黄土中砷活化迁移的影响 谢芸芸, 陈天虎, 周跃飞, 谢巧勤 (3940)

两性离子在聚偏氟乙烯 (PVDF) 膜表面接枝改性的研究 周桂花, 肖峰, 肖萍, 王东升, 段晋明, 石健, 臧莉 (3945)

化粪池排口处土壤对典型农户生活污水氮素污染物的消减测算研究 周锋, 王文林, 王国祥, 马久远, 万寅婧, 唐晓燕, 梁斌, 季斌 (3954)

珠江三角洲典型集约化猪场废水污染特征及风险评价 李文英, 彭智平, 于俊红, 黄继川, 徐培智, 杨少海 (3963)

污泥堆肥草坪基质利用对草坪生长及土壤和水环境的影响 金树权, 周金波, 陈若霞, 林斌, 王德耀 (3969)

活性污泥絮体粒径分布与分形维数的影响因素 李振亮, 张代钧, 卢培利, 曾善文, 杨永浩 (3975)

不同恢复方式对硝化颗粒污泥活性的影响 郭秀丽, 高大文, 卢健聪 (3981)

生物陶粒反应器的氮自养反硝化研究 陈丹, 王弘宇, 宋敏, 杨开, 刘晨 (3986)

亚高山草甸土壤呼吸的空间异质性研究 严俊霞, 李君剑, 王洪建, 张义辉 (3992)

SiB3 模式对作物区 CO₂ 通量的模拟研究 张庚军, 卢立新, 蒋玲梅, 蒋磊, Ian Baker (4000)

缙云山土地利用方式对土壤活性有机质及其碳库管理指数的影响 徐鹏, 江长胜, 郝庆菊, 祝滔 (4009)

典型农业城市街道灰尘重金属特征及其环境风险评价: 以许昌市为例 闫慧, 陈杰, 肖军 (4017)

苏州、无锡和南通道路灰尘中的多溴联苯醚和多氯联苯 史双昕, 董亮, 李玲玲, 张辉, 李斯明, 张天野, 黄业茹 (4024)

废旧汽车拆解区土壤中多环芳烃垂向分布特性 吴彦瑜, 胡小英, 洪鸿加, 彭晓春 (4031)

铬污染土壤的稳定化处理及其长期稳定性研究 王旌, 罗启仕, 张长波, 谈亮, 李旭 (4036)

典型磺胺类抗生素在土柱中的淋溶规律研究 李曼, 陈卫平, 魏福祥, 焦文涛 (4042)

3 种金属氧化物纳米材料在不同土壤中迁移行为研究 方婧, 余博阳 (4050)

多孔介质中 NAPLs 流体毛细管指进形态及分形表征 李慧颖, 杜晓明, 杨宾, 伍斌, 徐竹, 史怡, 房吉敦, 李发生 (4058)

毛竹入侵对常绿阔叶林主要树种的化感作用研究 白尚斌, 周国模, 王懿祥, 梁倩倩, 陈娟, 程艳艳, 沈蕊 (4066)

珠江口典型水产养殖区抗生素抗性基因污染的初步研究 梁惜梅, 袁湘平, 施震 (4073)

江苏盐城地区水产品重金属含量与安全评价 刘洋, 付强, 高军, 徐网谷, 殷波, 曹亚乔, 秦卫华 (4081)

铜胁迫对不同基因型谷子幼苗基因组 DNA 多态性的影响 张义贤, 付亚萍, 肖志华, 张喜文, 李萍 (4090)

利用高通量测序对封存 CO₂ 泄漏情景下土壤细菌的研究 田地, 马欣, 李玉娥, 查良松, 伍洋, 邹晓霞, 刘爽 (4096)

酸性矿山水区域废矿石中真核生物多样性分析 李思远, 郝春博, 王丽华, 吕铮, 张丽娜, 刘莹, 冯传平 (4105)

十溴联苯醚降解菌的特性及功能蛋白初步分析 常晶晶, 尹华, 秦华明, 叶锦韶, 彭辉, 宋小飞 (4112)

硒对水稻吸收积累和转运锰、铁、磷和硒的影响 胡莹, 黄益宗, 黄艳超, 刘云霞, 梁建宏 (4119)

外源铁对不同番茄品种生理特性、镉积累及化学形态的影响 刘俊, 周坤, 徐卫红, 陈惠, 张明中, 江玲, 杨芸, 王崇力, 熊治庭 (4126)

电子废物排放持久性有毒污染物的控制政策分析 李力, 吕永龙, 王铁宇 (4132)

《环境科学》征稿简则 (3926) 《环境科学》征订启事 (4057) 信息 (3878, 3953, 3999, 4041)

硒对水稻吸收积累和转运锰、铁、磷和硒的影响

胡莹, 黄益宗*, 黄艳超, 刘云霞, 梁建宏

(中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

摘要: 采用土壤盆栽法研究硒对水稻吸收积累和转运锰、铁、磷和硒的影响. 结果表明, 土壤添加 Se 可导致水稻铁膜、根系、茎叶、谷壳和糙米中 Se 含量显著提高, 水稻茎叶、谷壳和糙米中 Mn 含量显著降低. 当土壤添加 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Se 和 $1.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Se 时, 水稻茎叶 Mn 含量分别比对照处理降低 32.2% 和 35.0%, 谷壳 Mn 含量分别降低 22.0% 和 42.6%, 糙米 Mn 含量分别降低 27.5% 和 28.5%. Se 对水稻各部位的 P 和 Fe(除谷壳外)含量影响不大. 土壤添加 Se 对水稻铁膜、根系、茎叶和谷壳向糙米转运 P 和 Fe 的影响均不显著, 但 Se 添加可以显著地降低水稻铁膜和根系向糙米中转运 Mn 的能力. 与对照相比, 土壤添加 $1.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Se 导致 Mn 由铁膜和根系向糙米中的转运系数分别降低 38.9% 和 37.9%. 添加 Se 对水稻铁膜、根系、茎叶、谷壳和糙米中 Mn、Fe、P 和 Se 的分配比率也产生不同程度的影响. 研究结果暗示可通过土壤添加 Se 来减少水稻对 Mn 的吸收积累和转运, 从而降低 Mn 通过食物链途径对人体健康造成危害.

关键词: 水稻; 硒; 锰; 铁膜; 土壤

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)10-4119-07

Effect of Selenium on the Uptake and Translocation of Manganese, Iron, Phosphorus and Selenium in Rice (*Oryza sativa* L.)

HU Ying, HUANG Yi-zong, HUANG Yan-chao, LIU Yun-xia, LIANG Jian-hong

(Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: A pot experiment was conducted to clarify the effect of selenium on the uptake and translocation of manganese (Mn), iron (Fe), phosphorus (P) and selenium (Se) in rice (*Oryza sativa* L.). The results showed that addition of Se led to the significant increase of Se concentration in iron plaque on the root surface, root, shoot, husk and brown rice, and significant decrease of Mn concentration in shoot, husk and brown rice. At the Se concentrations of 0.5 and $1.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ in soil, Mn concentrations in rice shoot decreased by 32.2% and 35.0% respectively, in husk 22.0% and 42.6%, in brown rice 27.5% and 28.5%, compared with the Se-free treatment. There was no significant effect of Se on the P and Fe concentrations in every parts of rice, except for Fe concentrations in husk. The translocation of P and Fe from iron plaque, root, shoot and husk to brown rice was not significantly affected by Se addition, but Mn translocation from iron plaque and root to brown rice was significantly inhibited by Se addition. Addition of $1.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Se resulted in the decrease of translocation factor from iron plaque and root to brown rice by 38.9% and 37.9%, respectively, compared with the control treatment. The distribution ratios of Mn, Fe, P and Se in iron plaque, root, shoot, husk and brown rice were also affected by Se addition. The results indicated that Mn uptake, accumulation and translocation in rice could be decreased by the addition of Se in soil, therefore, Se addition could reduce the Mn harm to human health through food chain.

Key words: rice; Se; Mn; iron plaque; soil

锰(Mn)、铁(Fe)是植物必需的微量营养元素, 在植物的生命活动, 如光合作用、呼吸作用、氮代谢中发挥着特殊的作用, 是其它元素所不可替代的. 但是这两种元素过量或缺乏将会导致植物叶绿素合成减少、光合作用受阻、活性氧累积和体内激素平衡受到破坏^[1,2]. 磷(P)是植物体内核酸、磷脂和 ATP 的重要组成成分, 作为植物体内能量转移的物质, 能够活化体内蛋白质, 调控植物体的整个代谢过程^[3]. 因此, 这些元素在植物的生长发育过程中起着至关重要的作用. 近几十年来我国由于 Mn 矿的开采和冶炼导致矿区周边土壤 Mn 含量严重超标^[4,5], 从而影响农田作物的生长发育, 食用 Mn 超标的蔬菜和粮食将严重威胁人体的健康. 曾有报道

指出, 一些 Mn 含量较高的土壤中硒(Se)含量也比较高. 王英英等^[6]对成都平原西部 6 县(市)表层 0~20 cm 农田土壤进行调查, 发现该地区土壤 Mn 和 Se 含量均分别高于这两个元素的土壤背景值水平.

Se 虽然被认为不是植物必需的营养元素, 但很多研究已证明, 它能够提高植物体抗氧化胁迫的能力^[7,8], 可通过增加硫醇及谷胱甘肽来抑制膜脂过氧化, 从而减轻砷对植物的氧化胁迫^[9]. 世界土壤

收稿日期: 2013-01-24; 修订日期: 2013-03-05

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07212-001-05)

作者简介: 胡莹(1963~), 女, 助理研究员, 主要研究方向为污染生态学, E-mail: huying@rcees.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: hyz@rcees.ac.cn

Se 含量一般在 $0.1 \sim 2.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均 $0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 我国表层土壤 Se 含量范围 $0.006 \sim 9.130 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值为 $0.29 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 土壤 Se 主要来自于成土母质, 而土壤表层 Se 主要是母质风化和植物富集的结果^[10,11]. 从世界各地土壤含 Se 状况中可以看出, Se(IV) 为土壤中主要的 Se 形态, 约占 40% 以上; 以 Se(VI) 形态存在的 Se, 总量不超过 10%^[12]. 在碱性土壤或是通气性良好的土壤条件下, Se 主要以六价形式存在, 而在酸性至中性土壤中或是在还原条件下如稻田土壤中, Se 主要以四价形式存在^[13,14]. Thangavel 等^[15] 报道, 低浓度下 Se 可缓解 Hg 对马齿苋 (*Portulaca oleracea* Linn) 的毒性影响. 当 Cd 的处理浓度为 $35.6 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, 且添加 Se 浓度小于 $12.7 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时可抑制水稻对 Cd 的吸收, 并提高了水稻的生物量^[16]. Feng 等^[17] 报道 Se 对蜈蚣草 (*Pteris vittata* L) 吸收积累 As 也有一定的拮抗作用. 但 Se 对水稻吸收 Mn、Fe 和 P 的影响研究较少^[18], 本研究通过土壤盆栽试验研究不同浓度 Se 对水稻成熟期吸收积累 Mn、Fe 和 P 的影响机制, 以期为我国农田 Mn 污染防治、提高粮食产量和品质以及保障人体健康提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 供试土壤

土壤采自湖南省株洲市新马村水稻田, 土壤经风干、研磨、过筛 2 mm 保存备用. 土壤基本理化性质: 总 Fe $23.2 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 总 Mn $160.7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 总 Se $0.218 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 总 P $601.9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, pH 值 5.8, 有机质 $4.4 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 阳离子交换量 (CEC) $4.2 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$. 分析方法见文献^[19]. 土壤中 Mn、Fe 和 Se 全量用王水-高氯酸消煮. 空白和标准物质 GBW07402 (国家标准物质中心) 的处理与样品同步进行, 以确保测定的准确度.

1.2 供试水稻

水稻 (*Oryza sativa* L.) 品种为嘉花 1 号由嘉兴市农业科学院提供. 首先将水稻种子用 30% 的 H_2O_2 消毒 10 min, 再用去离子水清洗 2~3 次后播种到湿润的珍珠岩中, 培养 3 周后选取生长一致的水稻苗移栽到装有 1/3 强度营养液的 PVC 管 (直径 7.5 cm; 高 14 cm) 中, 每盆种植 1 株水稻苗, 培养 2 周, 每周换一次营养液. 营养液配方^[20]: $5.0 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ NH}_4\text{NO}_3$, $2.0 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ K}_2\text{SO}_4$, $4.0 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2$, $1.5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $1.3 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ KH}_2\text{PO}_4$, $50.0 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ Fe(II)}$ -

ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA), $10.0 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ H}_3\text{BO}_3$, $1.0 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $1.0 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $5.0 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ MnSO}_4\cdot \text{H}_2\text{O}$, $0.5 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ Na}_2\text{MoO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $0.2 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ CoSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$. 用 $0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ KOH}$ 或 HCl 将 pH 调至 5.5.

1.3 试验处理

水稻移栽前, 按每 kg 土 200 mg N 的尿素、133 mg K_2O 的 K_2SO_4 及 150 mg P 的 CaHPO_4 施用底肥. 同时设计 3 个不同的 Se 处理: 不添加 Se (用 Se0 表示)、 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Se (用 Se0.5 表示) 和 $1.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Se (用 Se1 表示), 以 Na_2SeO_3 的形式加入, 并按每盆 4 kg 土装盆、淹水老化平衡 4 周. 每盆移栽 2 株水稻苗, 每个处理 4 次重复. 水稻生长条件: $28^\circ\text{C}/14 \text{ h}$ 光照和 $20^\circ\text{C}/10 \text{ h}$ 黑暗, 光照强度为 $260 \sim 350 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$, 相对湿度为 60%~70%. 在整个试验期间, 盆内土壤始终保持淹水状态. 水稻培养至成熟期后收获.

1.4 样品的采集、制备与分析

根表铁氧化物的 DCB (dithionite-citrate-bicarbonate) 浸提与测定: 水稻收获时, 首先将水稻根系用自来水洗净, 吸干水分后从基部将根剪下, 放到 100 mL 的烧杯中, 置入 $0.03 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 柠檬酸三钠 ($\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 和 $0.125 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 碳酸氢钠 (NaHCO_3) 30 mL 的混合溶液中 10 min, 再放入 1 g 保险粉 ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$), 混合均匀后, 在室温下 ($20 \sim 25^\circ\text{C}$) 继续浸泡 1 h, 然后将浸提液转入 100 mL 容量瓶中, 并用去离子水冲洗根系 3 次后定容至 100 mL, 浸提液过滤后用 ICP-OES (Optima 2000 DV, Perkin Elmer, USA) 测定其中的 Mn、Fe 和 P 浓度, ICP-MS (7500a, Agilent Technologies, USA) 测定 Se 浓度.

样品分析与测定: 经 DCB 浸提后的根系、水稻茎叶和籽粒在 70°C 烘箱中烘干至衡重, 并称其干重. 然后将水稻茎叶及根系分别磨碎, 籽粒脱壳并磨碎, 称取 0.25 g 左右的样品放入 100 mL 的聚四氟乙烯消解罐中, 加入 5 mL 优级纯的浓硝酸后, 放入微波加速反应系统中 (MARS5, CEM Microwave Technology Ltd. USA) 进行消解. 具体消解程序: 首先加热至 120°C , 保持 5 min, 然后将温度升至 160°C , 保持 15 min. 同时加入标准物质 (GBW07605 国家标准物质中心) 对整个消化过程和分析测试过程进行质量控制. 消化好的样品用高纯水定容至 25 mL, 过滤后用 ICP-OES (Optima 2000 DV, Perkin

Elmer, USA)测定其中的 Fe、Mn 和 P 浓度, ICP-MS (7500a, Agilent Technologies, USA)测定 Se 浓度。

1.5 数据分析

水稻根表铁膜、根系、茎叶和谷壳向籽粒转移 Mn、Fe、P 和 Se 的能力用转运系数 (translocation factor, TF) 表示。

$$TF_x = c_{\text{seed-}y} / c_{x-y}$$

式中, x 分别代表铁膜 (DCB)、根系 (root)、茎叶 (shoot) 和谷壳 (husk), y 分别代表 Mn、Fe、P 和 Se, TF_x 分别表示 DCB、根系、茎叶和谷壳向籽粒转移 Mn、Fe、P 和 Se 的系数, $c_{\text{seed-}y}$ 表示糙米中 Mn、Fe、P 和 Se 的浓度, c_{x-y} 分别表示 DCB、根系、茎叶和谷壳中 Mn、Fe、P 和 Se 的浓度。

植物对 Mn 和 Fe 的富集能力用富集系数 (bio-accumulating factor, BAF) 表示。

$$BAF_m = c_{m-n} / c_{\text{soil-}n}$$

式中, m 分别代表铁锰膜、根系、茎叶、谷壳和籽粒, n 分别代表 Mn 和 Fe, BAF_m 分别表示铁锰膜、根系、茎叶、谷壳和籽粒 Mn 和 Fe 的富集系数, c_{m-n} 分别表示铁锰膜、根系、茎叶和籽粒的 Mn 和 Fe 浓度, $c_{\text{soil-}n}$ 表示土壤的 Mn 和 Fe 浓度。

使用统计软件 SPSS 11.5 对试验数据进行方差分析和多重比较。

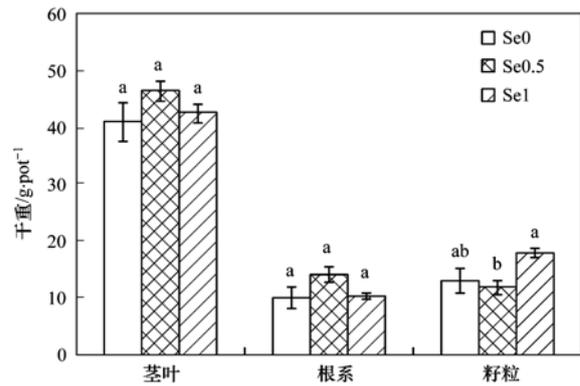
2 结果与分析

2.1 不同浓度 Se 对水稻根系、茎叶和籽粒生物量的影响

不同 Se 水平处理对水稻根系、茎叶和籽粒干重的影响见图 1。从中可以看出, 尽管土壤添加 0.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Se 导致水稻茎叶和根系的干量比不加 Se 的对照有所增加, 但是差异不显著。同样, 土壤添加 1.0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Se 时籽粒干重与对照相比差异也不显著, 但却显著高于 0.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Se 处理时的籽粒干重。总之, 土壤添加 0.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 1.0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Se 对水稻茎叶、根系和籽粒的干重影响与对照相比均不显著。

2.2 不同浓度 Se 对水稻吸收积累 Mn、Fe、P 和 Se 的影响

表 1 为不同浓度 Se 对水稻根表铁膜、根系、茎叶、谷壳和糙米 Mn、Fe、P 和 Se 含量的影响, 经统计分析可知, 不同浓度 Se 处理对水稻根表铁膜、根系、茎叶和糙米中 Fe 的积累均无显著影响, 但在土壤 Se 浓度为 1.0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时, 谷壳中 Fe 含量与对照相比显著减少 ($P < 0.05$), 减少幅度达 30.4%。土



不同小写字母表示不同 Se 处理 $P < 0.05$ 水平差异显著

图 1 不同 Se 处理下水稻根系、茎叶和籽粒的生物量

Fig. 1 Biomass of root, shoot and grain of rice under different Se concentration

壤添加不同浓度 Se 对水稻铁膜、根系、茎叶、谷壳和糙米吸收积累 P 均没有显著影响。添加 Se 对水稻根表铁膜和根系 Mn 含量没有显著影响, 但对茎叶、谷壳和糙米中 Mn 含量影响显著 ($P < 0.05$), 随着 Se 浓度的增加, 水稻茎叶、谷壳和糙米中 Mn 含量呈减少趋势。土壤 Se 浓度为 0.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 1.0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时水稻茎叶 Mn 含量分别比对照处理降低 32.2% 和 35.0%, 谷壳 Mn 含量分别降低 22.0% 和 42.6%, 糙米 Mn 含量分别降低 27.5% 和 28.5%。

随着土壤 Se 浓度的增加, 水稻根表铁膜、根系、茎叶、谷壳和籽粒中的 Se 含量均呈现显著增加的趋势。土壤添加 1.0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Se 时, 水稻铁膜、根系、茎叶、谷壳和籽粒 Se 含量分别比对照处理提高 0.59、1.76、2.05、2.31 和 3.31 倍。

2.3 不同浓度 Se 对水稻转运和富集 Mn、Fe、P 和 Se 的影响

不同浓度 Se 处理下, 水稻由铁膜、根系、茎叶和谷壳向糙米转运 Fe、Mn、P 和 Se 的情况见表 2。统计分析表明, 不同浓度 Se 对水稻从铁膜、根系、茎叶和谷壳向糙米转运 Fe 和 P 的影响均不显著, 但对 Mn 的转运影响较大。水稻由铁膜和根系向糙米中转运 Mn 的能力随着 Se 处理浓度的增加而逐渐减弱。与不加 Se 的对照相比, 添加 1.0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Se 后, 由铁膜 (TF_{DCB}) 和根系 (TF_{root}) 向糙米中转运 Mn 的系数分别降低 38.9% 和 37.9%, 而 Se 对水稻由茎叶向糙米中转运 Mn 的能力没有影响, 但 1.0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Se 却显著地提高了谷壳向糙米中转运 Mn 的能力, 大约提高 22.9%。随着土壤 Se 浓度的增加, 水稻由铁膜、根系、茎叶和谷壳向糙米转运 Se 的能力均不断提高。与对照相比, 土壤添加 1.0

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Se 后, Se 由铁膜、根系、茎叶和谷壳向糙米中的转运系数分别提高 188.2%、54.0%、40.0% 和 31.1%。

水稻各部位向籽粒转运 Fe 的能力表现为: 谷壳

> 茎叶 > 根系 > 铁膜; 转运 Mn 的能力为: 根系 > 铁膜 > 茎叶、谷壳; 转运 P 的能力为: 铁膜 > 根系 > 谷壳 > 茎叶; 转运 Se 的能力为: 谷壳 > 根系 > 茎叶 > 铁膜。

表 1 Se 对水稻各部位 Mn、Fe、P 和 Se 含量的影响¹⁾/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 1 Effect of Se on concentrations of Mn, Fe, P and Se in iron plaque, root, shoot, husk and brown rice/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

部位	处理	Mn	Fe	P	Se
铁膜	Se0	45.74 ± 7.66a	45 868 ± 7 116a	445.1 ± 54.4a	1.65 ± 0.05b
	Se0.5	37.89 ± 5.70a	40 940 ± 3 550a	346.4 ± 8.75a	2.28 ± 0.36ab
	Se1	49.53 ± 3.77a	51 573 ± 3 574a	401.2 ± 19.6a	2.62 ± 0.21a
根系	Se0	16.15 ± 2.30a	1 564 ± 307a	672.8 ± 23.1a	0.59 ± 0.05b
	Se0.5	17.67 ± 1.95a	1 737 ± 275a	715.6 ± 33.6a	1.25 ± 0.16ab
	Se1	17.95 ± 1.01a	2 251 ± 56.3a	700.6 ± 13.3a	1.63 ± 0.07a
茎叶	Se0	1 167 ± 140a	471.0 ± 37.2a	3 272 ± 88.1a	0.65 ± 0.04c
	Se0.5	790.7 ± 74.8b	470.1 ± 42.3a	3 356 ± 91.6a	1.50 ± 0.15b
	Se1	758.6 ± 75.9b	490.9 ± 7.31a	3 535 ± 120a	1.98 ± 0.05a
谷壳	Se0	1 368 ± 122a	136.3 ± 4.07a	1 160 ± 46.8a	0.32 ± 0.01c
	Se0.5	1 067 ± 142ab	116.2 ± 15.1ab	1 190 ± 130a	0.68 ± 0.05b
	Se1	785.7 ± 63.8b	94.90 ± 10.5b	1 227 ± 80.6a	1.06 ± 0.05a
糙米	Se0	47.34 ± 2.64a	62.37 ± 5.43a	3 496 ± 233a	0.29 ± 0.03c
	Se0.5	34.31 ± 2.39b	51.30 ± 1.67a	3 337 ± 141a	0.67 ± 0.03b
	Se1	33.85 ± 2.93b	54.45 ± 9.53a	3 428 ± 75.0a	1.25 ± 0.07a

1) 不同小写字母表示不同 Se 处理 $P < 0.05$ 水平差异显著, 下同

表 2 水稻由铁膜、根系、茎叶和谷壳向糙米转运 Mn、Fe、P 和 Se 的系数

Table 2 Translocation factor of Mn, Fe, P and Se from iron plaque, root, shoot and husk to brown rice

转运系数	处理	Mn	Fe	P	Se
TF_{DCB}	Se0	1.13 ± 0.21a	0.00 ± 0.00a	8.31 ± 1.41a	0.17 ± 0.01c
	Se0.5	0.97 ± 0.16ab	0.00 ± 0.00a	9.62 ± 0.18a	0.32 ± 0.05b
	Se1	0.69 ± 0.05b	0.00 ± 0.00a	8.61 ± 0.50a	0.49 ± 0.04a
TF_{root}	Se0	3.11 ± 0.45a	0.04 ± 0.01a	5.22 ± 0.44a	0.50 ± 0.06b
	Se0.5	2.08 ± 0.41ab	0.03 ± 0.00a	4.71 ± 0.34a	0.56 ± 0.06b
	Se1	1.93 ± 0.29b	0.02 ± 0.00a	4.90 ± 0.08a	0.77 ± 0.04a
TF_{shoot}	Se0	0.04 ± 0.00a	0.14 ± 0.02a	1.07 ± 0.07a	0.45 ± 0.04b
	Se0.5	0.04 ± 0.00a	0.11 ± 0.01a	0.99 ± 0.03a	0.46 ± 0.04b
	Se1	0.04 ± 0.00a	0.11 ± 0.02a	0.97 ± 0.03a	0.63 ± 0.02a
TF_{husk}	Se0	0.03 ± 0.00b	0.46 ± 0.05a	3.04 ± 0.29a	0.90 ± 0.06b
	Se0.5	0.03 ± 0.00b	0.46 ± 0.05a	2.87 ± 0.19a	0.98 ± 0.03b
	Se1	0.04 ± 0.00a	0.45 ± 0.03a	2.82 ± 0.17a	1.18 ± 0.04a

水稻根表铁膜、根系、茎叶、谷壳和糙米对 Mn 和 Fe 的富集系数反映了水稻植株各器官对 Mn 和 Fe 富集能力的强弱, 以及 Mn 和 Fe 在土壤-植物系统中迁移的难易程度。表 3 数据显示, 土壤添加 Se 对水稻根表铁膜、根系、茎叶和糙米富集 Fe 的能力没有显著影响, 但其对谷壳中 Fe 的富集系数影响较大, 即添加 $1.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Se 导致谷壳 Fe 富集系数显著降低 ($P < 0.05$)。Se 对水稻根表铁膜和根系富集 Mn 没有显著影响, 但对茎叶、谷壳和糙米 Mn 富集

能力影响显著, 导致茎叶、谷壳和糙米中 Mn 富集系数显著降低 ($P < 0.05$)。Fe 在水稻不同部位的富集系数表现为: 铁膜 > 根系 > 茎叶 > 谷壳 > 糙米; Mn 在水稻不同部位的富集系数为: 谷壳 > 茎叶 > 铁膜、糙米 > 根系。

2.4 不同浓度 Se 对 Mn、Fe、P 和 Se 在水稻不同部位分配比率的影响

图 2 为 Mn、Fe、P 和 Se 在水稻各部位的分配比率。由图 2(a) 可知, Se 在水稻各部位的分配比率

表 3 水稻根表铁膜、根系、茎叶、谷壳和糙米中 Mn 和 Fe 的富集系数

Table 3 Bio-accumulation factor of Fe and Mn in iron plaque, root, shoot, husk and brown rice

富集系数	处理	DCB	根系	茎叶	谷壳	糙米
BAF_{Fe}	Se0	$2.07 \pm 0.32a$	$0.07 \pm 0.01a$	$0.02 \pm 0.00a$	$0.006 \pm 0.00a$	$0.003 \pm 0.00a$
	Se0.5	$1.85 \pm 0.16a$	$0.08 \pm 0.01a$	$0.02 \pm 0.00a$	$0.005 \pm 0.00ab$	$0.002 \pm 0.00a$
	Se1	$2.32 \pm 0.16a$	$0.10 \pm 0.00a$	$0.02 \pm 0.00a$	$0.004 \pm 0.00b$	$0.002 \pm 0.00a$
BAF_{Mn}	Se0	$0.28 \pm 0.05a$	$0.10 \pm 0.01a$	$7.26 \pm 0.77a$	$8.52 \pm 0.76a$	$0.29 \pm 0.02a$
	Se0.5	$0.24 \pm 0.04a$	$0.11 \pm 0.01a$	$4.92 \pm 0.47b$	$6.64 \pm 0.88ab$	$0.21 \pm 0.01b$
	Se1	$0.31 \pm 0.02a$	$0.11 \pm 0.01a$	$4.72 \pm 0.47b$	$4.89 \pm 0.40b$	$0.21 \pm 0.02b$

表现为:铁膜>茎叶>根系>谷壳、籽粒. 而且随着土壤 Se 浓度的增加,Se 在铁膜中的分配比率呈逐渐减少,而在根系、茎叶、谷壳和糙米中的分配比率呈逐渐增加的趋势. 不同 Se 处理对 P 在水稻各部位的分配比率无明显影响[图 2(b)],P 在水稻各部位的分配比率为:糙米、茎叶>谷壳>根系>铁膜. Fe 在水稻各部位的分配比率为:铁膜>茎叶>谷壳>根系>糙米,Fe 主要分布在铁膜中[图 2(c)],铁膜 Fe 约占总 Fe 含量的 94.5%~95.3%,而糙米中 Fe 的比率仅占 9.8%~14.0%. 添加 Se 对 Fe 在铁膜、茎叶和

糙米中的分配比率影响不显著,但 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 Se 处理显著提高了 Fe 在根系中的分配比率,与对照相比根系 Fe 比率增加了 29.4%. 土壤添加 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 Se 处理导致谷壳 Fe 比率比对照处理降低 40.0%. Mn 在水稻各部位的分配比率表现为:谷壳>茎叶>铁膜、糙米>根系[图 2(d)]. 土壤添加 Se 对 Mn 在糙米、谷壳和茎叶中的分配影响不显著,但是土壤添加 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 Se 处理显著提高了 Mn 在铁膜和根系中的分配比率,与对照相比分别提高了 71.3% 和 73.8%.

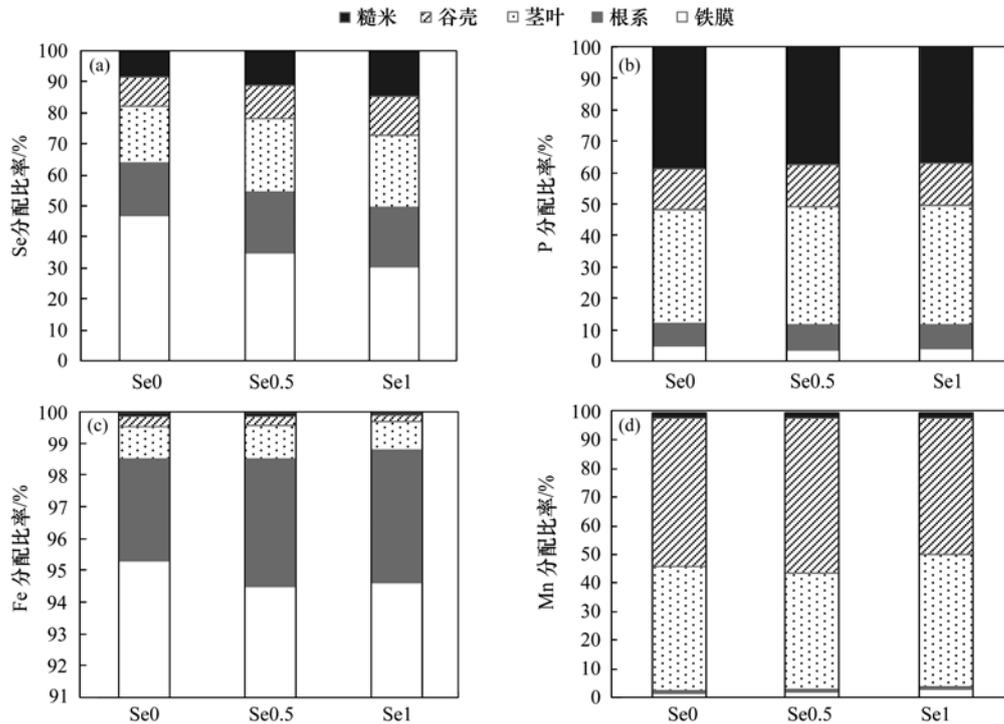


图 2 Mn、Fe、P 和 Se 在水稻各部位的分配比率

Fig. 2 Distribution ratios of Mn, Fe, P and Se in different parts of rice

3 讨论

土壤添加 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Se 对水稻茎叶、根系和籽粒的干重影响与对照相比均不显著,说明在本试验条件下添加 Se 对水稻生物量影响

不大,这与其他研究者的结果有差异,这种差异可能是由于本试验所采用的水稻品种、施 Se 量不同造成的. 吴秀峰等^[18]发现营养液中添加 $0.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Se,使水稻幼苗苗高、叶片干重、苗鲜重下降. Liu 等^[21]研究显示,适宜的 Se 量可以促进水稻的生长,

过量的 Se 会造成水稻植株生物量的降低,特别是对水稻根系的影响较大. Zhang 等^[22]研究表明,Se 对不同基因型水稻品种生物量影响的差异较大.

添加 Se 可降低水稻茎叶、谷壳和糙米中的 Mn 含量. Se 对 Mn 胁迫的拮抗原因为^[16,23]:①Se 与 Mn 竞争细胞的代谢活性位点;②清除植物体内的氧自由基;③直接抑制植物对 Mn 的吸收;④恢复细胞膜的完整性. 本研究结果表明,Se 可影响水稻对 Mn、Fe 和 P 的吸收、转运和富集,但是对不同元素的影响效果不一样. 许多研究者也曾经报道 Se 对植物吸收积累 Mn、Fe、P 和 K 等元素的影响. 吴秀峰等^[18]采用溶液培养法进行研究,发现 Se 处理可提高水稻幼苗叶片的 P 含量,低浓度 Se ($0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 显著提高水稻叶片的 Fe 和 Mn 含量,而高浓度 Se ($1.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 却显著地降低水稻幼苗叶片的 Fe 和 Mn 含量. Filek 等^[24]在 MS 培养基中添加 $100 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $200 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Na_2SeO_4 表明,不同浓度 Se 对两个小麦品种根系 P 含量影响不大,但对两个品种小麦地上部 P 含量的影响有差异;添加 Se 导致小麦根系 Fe 含量有所增加,但对地上部 Fe 含量没有影响;Se 对小麦根系和地上部 Mn 含量均有一定影响,但两个小麦品种差异较大. Wu 等^[25]的报道指出,添加 Se 可导致白叶草 (*Trifolium repens* L.) 和高羊茅 (*Festuca arundinacea* Schreb.) 中 P 含量降低,白叶草中 Fe 含量提高,而高羊茅中 Fe 含量没有变化. Dhillon 等^[26]在对水稻、小麦等作物的研究中发现,Se 对作物吸收积累 Fe、Mn 等元素没有显著影响,但是作物成熟期籽粒中的 P 与 Se 之间存在着显著的正相关关系 ($P < 0.05$). Zeng 等^[27]研究发现,糙米中的 P、K、Mg 和 Mn 含量差异主要是由遗传因素控制的,而 Ca、Fe、Zn 和 Cu 的含量则由遗传和环境因子共同控制. 本研究结果表明,土壤添加 Se 对水稻铁膜、根系、茎叶、谷壳和糙米中的 P 和 Fe (除谷壳外) 含量影响不大. 因此,Se 对水稻吸收、转运和富集 Mn、Fe 和 P 的影响与不同植物种类、同类植物不同品种、生长介质中不同元素含量和土壤理化性质、酸碱度、氧化还原状态等有关.

添加 Se 导致水稻根表铁膜、根系、茎叶、谷壳和籽粒中的 Se 含量均呈现显著增加的趋势. 随着土壤中 Se 浓度的增加,水稻根表铁膜 Se 含量从 $1.65 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (对照处理) 增加到 $2.28 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Se0.5 处理) 和 $2.62 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Se1 处理). Zhou 等^[28]报道水稻根表铁膜对 Se 具有较强的吸附能

力. 另有报道指出,不管是溶液培养还是土壤盆栽试验,不同基因型水稻根系和茎叶吸收积累 Se 均随着 Se 处理浓度及时间的增加而显著增加^[21,22].

本研究中 Fe 在水稻不同部位的富集系数表现为:铁膜 > 根系 > 茎叶 > 谷壳 > 糙米,而刘志彦等^[29]报道水稻各部位 Fe 的富集系数为:根系 > 稻草 > 稻米 > 谷壳,与笔者的结果有一些差异,这可能与水稻品种不同有关. Mn 在水稻不同部位的富集系数为:谷壳 > 茎叶 > 铁膜、糙米 > 根系. 铁膜富集 Fe 的能力大于富集 Mn 的能力,以往的研究也显示,水稻和香蒲根表铁膜量明显高于锰膜量^[30,31]. 本研究结果还得出水稻根系、茎叶、谷壳和糙米富集 Fe 的能力均小于富集 Mn 的能力 (表 3),这可能是由于土壤 Mn 的氧化还原电位比 Fe 高,在水稻根际的 Fe^{2+} 较 Mn^{2+} 容易被氧化,所以进入水稻根际区的 Fe^{2+} 更多地被氧化在根系表面或根质外体,而 Mn^{2+} 则较多地被吸收和转运到水稻地上部. 添加 Se 可影响 Mn、Fe、P 和 Se 在水稻不同部位的分配比率. P 主要分布在糙米和茎叶中,Fe、Se 主要分布在铁膜中,Mn 主要分布在谷壳和茎叶中. 刘志彦等^[29]的研究表明,杂交稻、常规稻和糯稻铁膜中 Fe 含量分别为根系中 Fe 含量的 2.4 倍、8.7 倍和 14.3 倍,说明铁膜中的 Fe 含量远远高于根系中的 Fe 含量,这与本研究结果相一致.

4 结论

(1) 土壤添加 Se 对水稻根系、茎叶和籽粒干重变化没有显著影响.

(2) 土壤添加 Se 对水稻铁膜、根系、茎叶、谷壳和糙米中的 P 和 Fe (除谷壳外) 含量影响不大,但是水稻各部位 Se 含量显著提高,水稻茎叶、谷壳和糙米中 Mn 含量显著降低.

(3) 添加 Se 对水稻铁膜、根系、茎叶和谷壳向糙米转运 Fe 和 P 的影响均不显著,而高浓度的 Se ($1.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 显著提高 Se 由铁膜、根系、茎叶和谷壳向糙米中的转运系数,Se 添加可以降低铁膜和根系向糙米中转运 Mn 的能力.

(4) P 主要富集在水稻的糙米和茎叶中,Fe、Se 主要富集在铁膜中,Mn 主要富集在谷壳和茎叶中. 添加 Se 对水稻不同部位分配 Mn、Fe、P 和 Se 有一定的影响.

参考文献:

- [1] 章艺, 史锋, 刘鹏, 等. 土壤中的铁及植物铁胁迫研究进展 [J]. 浙江农业学报, 2004, 16(2): 110-114.

- [2] 严炜, 刘国道, 田江. 锰有效性对大豆锰、铁和磷吸收及其分布的影响[J]. 植物生理学通讯, 2010, **46**(9): 923-927.
- [3] 王萍, 陈爱群, 余玲, 等. 植物磷转运蛋白基因及其表达调控的研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, **12**(4): 584-591.
- [4] 张慧智, 刘云国, 黄宝荣, 等. 锰矿尾渣污染土壤上植物受重金属污染状况调查[J]. 生态学杂志, 2004, **23**(1): 111-113.
- [5] 赖燕平, 李明顺, 杨胜香, 等. 广西八一锰矿区土壤和主要农作物重金属含量的研究[J]. 矿产与地质, 2006, **20**(6): 651-655.
- [6] 王英英, 钱蜀, 邓星亮. 成都平原西部农业土壤中金属元素分布特征研究[J]. 三峡环境与生态, 2012, **34**(5): 11-14, 18.
- [7] Seppänen M, Turkainen M, Hartikainen H. Selenium effects on oxidative stress in potato [J]. Plant Science, 2003, **165**(2): 311-319.
- [8] Xue T L, Hartikainen H, Piironen V. Antioxidative and growth-promoting effect of selenium on senescing lettuce [J]. Plant and Soil, 2001, **237**(1): 55-61.
- [9] Srivastava M, Ma L Q, Rathinasabapathi B, et al. Effects of selenium on arsenic uptake in arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* L [J]. Bioresource Technology, 2009, **100**(3): 1115-1121.
- [10] 陈铭, 谭见安, 王五一. 环境硒与健康关系研究中的土壤化学与植物营养学[J]. 土壤学进展, 1994, **22**(4): 1-10.
- [11] 赵中秋, 郑海雷, 张春光, 等. 土壤硒及其与植物硒营养的关系[J]. 生态学杂志, 2003, **22**(1): 22-25.
- [12] 张艳玲, 潘根兴, 李正文, 等. 土壤-植物系统中硒的迁移转化及低硒地区食物链中硒的调节[J]. 土壤与环境, 2002, **11**(4): 388-391.
- [13] Elrashidi M A, Adriano D C, Workman S M, et al. Chemical-equilibria of selenium in soils-a theoretical development [J]. Soil Science, 1987, **144**(2): 141-152.
- [14] Zhu Y G, Pilon-Smits E A H, Zhao F J, et al. Selenium in higher plants: Understanding mechanisms for biofortification and phytoremediation [J]. Trends in Plant Science, 2009, **14**(8): 436-442.
- [15] Thangavel P, Sulthana A S, Subburam V. Interactive effects of selenium and mercury on the restoration potential of leaves of the medicinal plant, *Portulaca oleracea* Linn [J]. Science of the Total Environment, 1999, **243-244**: 1-8.
- [16] Feng R W, Wei C Y, Tu S X, et al. A dual role of se on Cd toxicity: evidences from the uptake of Cd and some essential elements and the growth responses in paddy rice [J]. Biological Trace Element Research, 2013, **151**(1): 113-121.
- [17] Feng R W, Wei C Y, Tu S X, et al. Interactive effects of selenium and arsenic on their uptake by *Pteris vittata* L. under hydroponic conditions [J]. Environmental and Experimental Botany, 2009, **65**(2-3): 363-368.
- [18] 吴秀峰, 陈平. 硒对水稻幼苗生长和生理特性的影响[J]. 农业与技术, 2004, **24**(5): 76-79.
- [19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [20] Liu W J, Zhu Y G, Smith F A, et al. Do iron plaque and genotypes affect arsenate uptake and translocation by rice seedlings (*Oryza sativa* L.) grown in solution culture? [J]. Journal of Experimental Botany, 2004, **55**(403): 1707-1713.
- [21] Liu Q, Wang D J, Jiang X J, et al. Effects of the interactions between selenium and phosphorus on the growth and selenium accumulation in rice (*Oryza sativa*) [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2004, **26**(2): 325-330.
- [22] Zhang L H, Shi W M, Wang X C, et al. Genotypic differences in selenium accumulation in rice seedlings at early growth stage and analysis of dominant factors influencing selenium content in rice seeds [J]. Journal of Plant Nutrition, 2006, **29**(9): 1601-1618.
- [23] Muñoz A H S, Wrobel K, Corona J F G, et al. The protective effect of selenium inorganic forms against cadmium and silver toxicity in mycelia of *Pleurotus ostreatus* [J]. Mycological Research, 2007, **111**(5): 626-632.
- [24] Filek M, Zembala M, Kornaś A, et al. The uptake and translocation of macro-and microelements in rape and wheat seedlings as affected by selenium supply level [J]. Plant and Soil, 2010, **336**(1-2): 303-312.
- [25] Wu L, Huang Z Z. Selenium assimilation and nutrient element uptake in white clover and tall fescue under the influence of sulphate concentration and selenium tolerance of the plants [J]. Journal of Experimental Botany, 1992, **43**(4): 549-555.
- [26] Dhillon S K, Dhillon K S. Phytoremediation of selenium-contaminated soils: the efficiency of different cropping systems [J]. Soil Use and Management, 2009, **25**(4): 441-453.
- [27] Zeng Y W, Zhang H L, Wang L X, et al. Genotypic variation in element concentrations in brown rice from Yunnan landraces in China [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2010, **32**(3): 165-177.
- [28] Zhou X B, Shi W M, Zhang L H. Iron plaque outside roots affects selenite uptake by rice seedlings (*Oryza sativa* L.) grown in solution culture [J]. Plant and Soil, 2007, **290**(1-2): 17-28.
- [29] 刘志彦, 田耀武, 陈桂珠. 复合污染重金属在水稻不同部位的积累转运[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2010, **49**(2): 138-144.
- [30] Liu W J, Zhu Y G, Smith F A. Effects of iron and manganese plaques on arsenic uptake by rice seedlings (*Oryza sativa* L.) grown in solution culture supplied with arsenate and arsenite [J]. Plant and Soil, 2005, **277**(1-2): 127-138.
- [31] Ye Z H, Cheung K C, Wong M H. Copper uptake in *Typha latifolia* as affected by iron and manganese plaque on the root surface [J]. Canadian Journal of Botany, 2001, **79**(3): 314-320.

CONTENTS

Stable Carbon Isotopic Composition in PM _{2.5} in Nanjing Region	WU Meng-long, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (3727)
Distribution and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes in Atmospheric Particle in Taiyuan, China	HU Dong-mei, PENG Lin, BAI Hui-ling, <i>et al.</i> (3733)
Study on Influence of Traffic and Meteorological Factors on Inhalable Particle Matters of Different Size	LUO Na-na, ZHAO Wen-ji, YAN Xing, <i>et al.</i> (3741)
Particle Emission Characteristics of Diesel Bus Fueled with Bio-diesel	LOU Di-ming, CHEN Feng, HU Zhi-yuan, <i>et al.</i> (3749)
Characteristics of δ ¹⁸ O in Precipitation and Water Vapor Sources in Lanzhou City and Its Surrounding Area	CHEN Fen-li, ZHANG Ming-jun, MA Qian, <i>et al.</i> (3755)
Characteristics and Sources of Soluble Ions in Aerosols from Glacier No. 1 at the Headwater of Urumqi River, Tianshan Mountains, China	YUE Xiao-ying, LI Zhong-qin, ZHANG Ming-jun, <i>et al.</i> (3764)
Mechanism and Performance of Styrene Oxidation by O ₃ /H ₂ O ₂	HE Jue-cong, HUANG Qian-ru, YE Qi-hong, <i>et al.</i> (3772)
Sulfur Isotopic Signatures in Leaves of <i>Pinus massoniana</i> Lamb. and Source Apportionment	GUAN Hui, XIAO Hua-yun, ZHU Ren-guo, <i>et al.</i> (3777)
Comparisons of Sulfur Contents and Isotopes Between Mosses and Surface Soils in Jiangxi Province	LI Nan, XIAO Hua-yun, CHEN Yong-zhong, <i>et al.</i> (3782)
Research on Spatial Characteristic of Non-point Source Pollution in Liaohe River Basin	WANG Xue-lei, CAI Ming-yong, ZHONG Bu-qing, <i>et al.</i> (3788)
Spatial and Temporal Variations of Hydrological Characteristic on the Landscape Zone Scale in Alpine Cold Region	YANG Yong-gang, HU Jin-fei, XIAO Hong-lang, <i>et al.</i> (3797)
Distribution of Matrix-Bound Phosphine in Surface Sediments of Jinpu Bay	YOU Li-li, ZONG Hai-bo, ZHANG Shu-fang, <i>et al.</i> (3804)
Effects of Drying-Rewetting Alternation on Urease Activity in Chongming East Intertidal Flat; Results of a Simulation Study	HAN Jian-gang, CAO Xue (3810)
Characterization of Microbial Activities in Marine Mudflat Sediment Using FDA Hydrolase Analysis	LIU Ye, ZOU Li, LIU Lu, <i>et al.</i> (3818)
Analysis of Ecological Risk and the Content Situation of Polybrominated Diphenyl Ethers in Sediments from Northeast China River Basin	NIE Hai-feng, CHENG Hang-xin, ZHAO Chuan-dong, <i>et al.</i> (3825)
Residues and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Sediments and Marine Organisms from Dapeng Bay, Shenzhen	SUN Run-xia, KE Chang-liang, GU Yang-guang, <i>et al.</i> (3832)
Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Using Two Mathematical Models for Runoff of the Shanghai Elevated Inner Highway, China	BIAN Lu, LI Tian, HOU Juan (3840)
Biomagnification of Heavy Metals in the Aquatic Food Chain in Daning River of the Three Gorges Reservoir During Initial Impoundment	YU Yang, WANG Yu-chun, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (3847)
Temporal and Spatial Distribution of Environmental Factors and Chlorophyll-a and Their Correlation Analysis in a Small Enclosed Lake	LI Fei-peng, ZHANG Hai-ping, CHEN Ling (3854)
Experiment and Model Simulation of Self-Purification Capacity of Nitrogen and Phosphorus in Lake Taihu	HAN Tao, ZHAI Shu-hua, HU Wei-ping, <i>et al.</i> (3862)
Simulation Research on the Release of Internal Nutrients Affected by Different Dredging Methods in Lake	CHEN Chao, ZHONG Ji-cheng, FAN Cheng-xin, <i>et al.</i> (3872)
Research of Urban Eutrophic Water Repair by Water/Sediment Biological Bases	ZHOU Hui-hua, SONG Xiao-guang, WU Ge, <i>et al.</i> (3879)
Effects of Regulatory Agent on the Heavy Metal Stability in Tidal Sediments	OU Feng-zhuang, SUN Guo-ping, XU Mei-ying (3888)
Impact of Regional Water Chemistry on the Phosphorus Isothermal Adsorption of the Sediments in Three Subsidence Waters of the Huainan Mine Areas	YI Qi-tao, SUN Peng-fei, XIE Kai, <i>et al.</i> (3894)
Adsorption Characteristics of f2 Bacteriophages by Four Substrates in Constructed Wetland	CHEN Di, ZHENG Xiang, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3904)
Adsorption Characteristics of the Antibiotic Sulfanilamide onto Rice Husk Ash	Ji Ying-xue, WANG Feng-he, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (3912)
Study on the Stability Variation Mechanism of Humic Acid Water Solution After Radiated by the UV Light	WANG Wen-dong, ZHOU Li-chuan, DING Zhen-zhen, <i>et al.</i> (3921)
Comparison of As Removal Performance by Graphene/Iron-Based Material	Chaomuerlege, FENG Liu, HUO Yan-xia (3927)
Studies on the Dispersion and Deposition Behavior of Nano-TiO ₂ in Aquatic System	CHEN Jun-yuan, FANG Jin-feng, WEI Xiu-zhen (3933)
Effect of the Interaction of Microorganisms and Iron Oxides on Arsenic Releasing into Groundwater in Chinese Loess	XIE Yun-yun, CHEN Tian-hu, ZHOU Yue-fei, <i>et al.</i> (3940)
Surface Modification of Polyvinylidene Fluoride (PVDF) Membrane by Using the Zwitterionic Substance	ZHOU Gui-hua, XIAO Feng, XIAO Ping, <i>et al.</i> (3945)
Estimate the Abatement Rate of Septic Tank Sewage Outfall Soil on Nitrogen Pollutants of Typical Farmer Household Sewage	ZHOU Feng, WANG Wen-lin, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (3954)
Wastewater Pollution Characteristics from Typical Intensive Pig Farms in the Pearl River Delta and Its Ecological Risk Assessment	LI Wen-ying, PENG Zhi-ping, YU Jun-hong, <i>et al.</i> (3963)
Effects of Sludge Compost Used as Lawn Medium on Lawn Growth and Soil and Water Environment	JIN Shu-quan, ZHOU Jin-bo, CHEN Ruo-xia, <i>et al.</i> (3969)
Influencing Factors of Floc Size Distribution and Fractal Dimension of Activated Sludge	LI Zhen-liang, ZHANG Dai-jun, LU Pei-li, <i>et al.</i> (3975)
Influence of Different Recovery Methods on the Activity of Nitrification Granular Sludge	GUO Xiu-li, GAO Da-wen, LU Jian-cong (3981)
Study on Hydrogen Autotrophic Denitrification of Bio-ceramic Reactor	CHEN Dan, WANG Hong-yu, SONG Min, <i>et al.</i> (3986)
Studies on Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Subalpine Meadow	YAN Jun-xia, LI Jun-jian, LI Hong-jian, <i>et al.</i> (3992)
Modeling of CO ₂ Fluxes at Cropland by Using SIB3 Model	ZHANG Geng-jun, LU Li-xin, JIANG Ling-mei, <i>et al.</i> (4000)
Effects of the Different Land Use on Soil Labile Organic Matter and Carbon Management Index in Junyun Mountain	XU Peng, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (4009)
Heavy Metal Content in Street Dust and Environmental Risk Assessment of Agricultural City: A Case Study of Xuchang City	YAN Hui, CHEN Jie, XIAO Jun (4017)
Polybrominated Diphenyl Ethers and Polychlorinated Biphenyls in Road Dust from Suzhou, Wuxi and Nantong	SHI Shuang-xin, DONG Liang, LI Ling-ling, <i>et al.</i> (4024)
Vertical Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Abandoned Vehicles Dismantling Area Soil	WU Yan-yu, HU Xiao-ying, HONG Hong-jia, <i>et al.</i> (4031)
Stabilization and Long-term Effect of Chromium Contaminated Soil	WANG Jing, LUO Qi-shi, ZHANG Chang-bo, <i>et al.</i> (4036)
Leaching Characteristics of Sulfadiazine and Sulfamethoxazole in Soil Column	LI Man, CHEN Wei-ping, WEI Fu-xiang, <i>et al.</i> (4042)
Transport Behaviors of Metal Oxide Nanomaterials in Various Soils	FANG Jing, YU Bo-yang (4050)
Fractal Characteristics of Capillary Finger Flow for NAPLs Infiltrated in Porous Media	LI Hui-ying, DU Xiao-ming, YANG Bin, <i>et al.</i> (4058)
Allelopathic Potential of <i>Phyllostachys edulis</i> on Two Dominant Tree Species of Evergreen Broad-leaved Forest in Its Invasive Process	BAI Shang-bin, ZHOU Guo-mo, WANG Yi-xiang, <i>et al.</i> (4066)
Preliminary Studies on the Occurrence of Antibiotic Resistance Genes in Typical Aquaculture Area of the Pearl River Estuary	LIANG Xi-mei, NIE Xiang-ping, SHI Zhen (4073)
Concentrations and Safety Evaluation of Heavy Metals in Aquatic Products of Yancheng, Jiangsu Province	LIU Yang, FU Qiang, GAO Jun, <i>et al.</i> (4081)
Effects of Cu ²⁺ Stress on DNA Polymorphism of Genome in Foxtail Millet of Different Genotypes	ZHANG Yi-xian, FU Ya-ping, XIAO Zhi-hua, <i>et al.</i> (4090)
Research on Soil Bacteria Under the Impact of Sealed CO ₂ Leakage by High-throughput Sequencing Technology	TIAN Di, MA Xin, LI Yu-e, <i>et al.</i> (4096)
Microeukaryotic Biodiversity in the Waste Ore Samples Surrounding an Acid Mine Drainage Lake	LI Si-yuan, HAO Chun-bo, WANG Li-hua, <i>et al.</i> (4105)
Characteristics and Functional Protein Analysis of an Effective Decabromodiphenyl Ether-Degrading Strain	CHANG Jing-jing, YIN Hua, QIN Hua-ming, <i>et al.</i> (4112)
Effect of Selenium on the Uptake and Translocation of Manganese, Iron, Phosphorus and Selenium in Rice (<i>Oryza sativa</i> L.)	HU Ying, HUANG Yi-zong, HUANG Yan-chao, <i>et al.</i> (4119)
Effect of Exogenous Iron on Accumulation and Chemical Forms of Cadmium, and Physiological Characterization in Different Varieties of Tomato	LIU Jun, ZHOU Kun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4126)
Analysis of Control Policy for Persistent Toxic Substances from Electronic Wastes in China	LI Li, LÜ Yong-long, WANG Tie-yu (4132)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年10月15日 34卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 10 Oct. 15, 2013

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行