Eco-Environmental Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2019
Vol.40 No.10
第40卷 第10期

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第40卷 第10期
2019年10月15日

目 次

京津冀区域重污染期间 $PM_{2.5}$ 垂直分布及输送…… 肖致美, 徐虹, 李鹏, 唐邈, 陈魁, 杨宁, 郑乃源, 杨文, 邓小文(4303)
肇庆市一次典型污染天气的污染物来源解析 …… 常树诚, 廖程浩, 曾武涛, 杨柳林, 俞绍才, 陈雪, 郑剑平(4310)
聊城市冬季 $PM_{2.5}$ 中水溶性化合物的昼夜变化特征及来源解析 …… 衣雅男, 侯战方, 孟静静, 燕丽, 王心培, 刘晓迪, 伏梦璇, 魏本杰(4319)
沈阳市国三和国四排放标准不同车型柴油车 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 排放因子及碳组分源谱 …… 赵雪艳, 王静, 祝胜男, 卞思思, 张宇, 王歆华, 殷宝辉, 杨文, 白志鹏(4330)
城市生活垃圾露天焚烧排放 $PM_{2.5}$ 中重金属污染特征及其暴露健康风险 …… 程轲, 季婉婉, 郝炜伟, 王艳, 易鹏, 支国瑞, 张佳羽, 张洋, 张诗澜(4337)
某工业城市大气颗粒物中 PAHs 的粒径分布及人体呼吸系统暴露评估 …… 王娟, 郭观林, 秦宁, 侯荣, 杨敏, 康艺瑾, 段小丽(4345)
南京城市大气氨-铵的高频演化及其气粒转化机制 …… 邵生成, 常运华, 曹芳, 林煜棋, 范美益, 谢锋, 洪一航, 章炎麟(4355)
广州地区大气棕色碳气溶胶光吸收特性 …… 李铸杰, 谭浩波, 郑军(4364)
郑州市春季大气挥发性有机物污染特征及源解析 …… 张翼翔, 尹沙沙, 袁明浩, 张瑞芹, 张猛, 于世杰, 李一丹(4372)
基于原料类型及末端治理的典型溶剂使用源 VOCs 排放系数 …… 梁小明,陈来国,孙西勃,赵伟,卢清,孙家仁,陈朋龙,叶代启(4382)
北京市典型溶剂使用行业 VOCs 成分谱 …… 方莉, 刘文文, 陈丹妮, 李国昊, 王迪, 邵霞, 聂磊(4395)
民用固体燃料源的 IVOCs 排放特征及燃烧温度的影响 …… 卢雅静, 冯艳丽, 钱哲, 韩勇, 陈颖军(4404)
利用地面观测资料和 AIRS 卫星资料评估 MACC 再分析臭氧数据中国地区的适用性 …… 王闰芳, 马晓丹, 赵天良, 王红磊, 丁涵, 郑小波(4412)
镁铝水滑石衍生复合氧化物的 COS 水解性能…… 魏征, 张鑫, 张凤莲, 蒋国霞, 张雨萌, 周化兵, 郝郑平, 解强(4423)
长江源区大气降水化学特征及离子来源 …… 汪少勇, 何晓波, 吴锦奎, 丁永建, 胡召富, 王利辉, 杨贵森(4431)
连续极端降雨对东江流域水质影响分析 …… 车蕊, 林澍, 范中亚, 李文静, 曾凡棠, 毛本健, 石雷,黄志伟(4440)
基于湖泊与出入湖水质关联性研究:以鄱阳湖为例 …… 黄冬凌, 倪兆奎, 赵爽, 张波涛, 冯明雷, 陈宏文, 李晓秀, 王圣瑞(4450)
金泽水库上游来水及库区水质变化时空分布特征 …… 刘明坤, 童俊, 胡波, 朱慧峰, 白晓慧(4461)
太湖不同介质电导率时空变化特征 …… 王瑞, 代丹, 张弛, 邓义祥, 何成达, 于涛(4469)
大型浅水湖泊磷模型参数不确定性及敏感性分析 …… 施媛媛, 李一平, 程月, 程一鑫(4478)
基于 MODIS 影像的洪泽湖水生植被覆盖时空变化特征及影响因素分析 …… 李娜, 施坤, 张运林, 龚志军, 查勇, 张毅博(4487)
草型湖区沉积物营养盐分布与污染评价 …… 张杰, 汪院生, 郭西亚, 朱金格, 邓建才(4497)
太湖草型湖区沉积物中生物易降解物质组成与分布规律 …… 祁闯, 方家琪, 张利民, 司泽君, 黄和笑, 王卓森, 李翔, 王磊, 王国祥(4505)
淀山湖浮游动物群落时空分布特征及其与环境因子的关系 …… 杜彩丽, 杨丽, 赵诣, 吴晓敏, 徐慕, 王丽卿, 张玮(4513)
岩溶区不同土地利用下地下水碳同位素地球化学特征及生态意义…… 任坤, 潘晓东, 曾洁, 焦友军, 彭聪, 梁嘉鹏(4523)
岩溶地下河水化学对城镇化进程的时序响应…… 杨应增, 何守阳, 吴攀, 吴起鑫, 韩志伟, 罗维(4532)
巴中北部岩溶山区地下水化学特征及演化分析…… 唐金平, 张强, 胡漾, 邵江, 何文君, 张宇(4543)
δ-MnO_2/沸石纳米复合材料同时去除地下水中的铁锰氨氮 …… 马文婕, 陈天虎, 陈冬, 刘海波, 程鹏, 张泽鑫, 陶琼, 张玉珠(4553)
不同香蒲预处理方式对水平潜流人工湿地脱氮的强化效果 …… 熊家晴, 卢学斌, 郑于聪, 王晓昌(4562)
不同控制策略下短程硝化启动及运行工况优化…… 刘安迪, 赵凯亮, 刘宏, 黄利, 倪蓉, 陈永志(4569)
启动三级 PN/A 颗粒污泥反应器处理高浓度氨氮废水…… 吉晓庆, 齐泽坤, 钱飞跃, 沈耀良, 王建芳(4578)
聚丙烯环生物滴滤塔去除实际市政污水厂硫化氢性能及微生物群落分析…… 孙事昊,贾体沛,陈凯琦,彭永臻,张亮(4585)
典型工业区土壤多环芳烃污染特征及影响因素…… 冉宗信, 陈靖宇, 王亚婷, 邢智, 魏威, 余江(4594)
5 种典型有机磷酸酯在水-土壤界面吸附特征及影响因素 …… 何明靖, 杨志豪, 魏世强(4604)
Cu^{2+} 和 Pb^{2+} 在 BS-12 两性修饰膨润土上的吸附及其交互作用 …… 卜帅宾, 孟昭福, Sambath Yek, 张梦飞, 王腾, 任爽, 张凌恺(4611)
滇东南峰丛洼地土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价 …… 洪涛, 孔祥胜, 岳祥飞(4620)
贵州罗甸北部喀斯特地区耕地土壤镉含量特征与风险评价 …… 唐启琳, 刘秀明, 刘方, 汪花, 王世杰(4628)
渝西地区镉轻度污染稻田安全利用技术…… 李娜, 贺红周, 冯爱煊, 李伟, 蒋珍茂, 魏世强(4637)
不同作物对土壤中 Cd 的富集特征及低累积品种筛选 …… 陈小华, 沈根祥, 白玉杰, 郭春霞, 钱晓雍, 顾海蓉, 胡双庆, 赵庆节, 王振旗, 付侃(4647)
小麦和水稻对纳米硒的吸收和转运 …… 王雅琦, 朱丽娜, 李奎, 王琪, 王康, 郭岩彬, 李花粉(4654)
微塑料对小麦生长及生理生化特性的影响 …… 廖苑辰, 娜孜依古丽·加合甫别克, 李梅, 王晓琳, 蒋丽娟(4661)
药渣生物炭基质联合麦饭石对土壤-黑麦草体系的调控与机制…… 肖亮亮, 丁园(4668)
磺胺甲噁唑污染土壤中微生物群落结构与抗生素抗性基因的分布特征 …… 张海丰, 史明明, 孙艳梅, 程首涛, 高浩泽, 王旭明(4678)
生活垃圾渗滤液处理过程中抗生素抗性基因的变化特征…… 黄福义, 周曙仡聃, 颜一军, 苏建强, 朱永官, 张娴(4685)
有机肥施用量对土壤有机碳组分和团聚体稳定性的影响 …… 邵慧芸, 李紫玥, 刘丹, 李熠凡, 鲁璐, 王旭东, 张阿凤, 王彦丽(4691)
灌水和生物炭施用对水稻土呼吸温度敏感性的影响 …… 周鹏, 祁乐, 牛海东, 王子芳, 高明(4700)
柑橘/大球盖菇套作下土壤 CO_2 排放及其效率对秸秆还田量的响应 …… 游璟, 倪九派, 黄容, 张洋, 谢德体(4708)
增温及秸秆施用对豆-麦轮作土壤微生物量碳氮及细菌群落结构的影响 …… 张婷婷, 陈书涛, 王君, 王朝辉, 胡正华(4718)
O_3 胁迫下冬小麦总初级生产力的损耗模拟 …… 徐静馨, 郑有飞, 王圣, 王立稳, 赵秀勇, 麦博儒(4725)
2000~2015 年中国地级市化肥使用量的时空变化特征 …… 潘晓东, 李品, 冯兆忠, 段昌群(4733)
《环境科学》征订启事(4394) 《环境科学》征稿简则(4449) 信息(4584, 4593, 4653)

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第 40 卷 第 10 期 2019 年 10 月
Vol. 40, No. 10 Oct., 2019

小麦和水稻对纳米硒的吸收和转运

王雅琦, 朱丽娜, 李奎, 王琪, 王康, 郭岩彬, 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: 通过水培试验, 研究了不同粒径纳米硒(SeNPs)和不同 pH 条件对小麦(*Triticum aestivum* L.)及水稻(*Oryza sativa* L.)吸收、转运硒的影响. 结果表明, 小麦和水稻对不同粒径(50、100 和 150 nm)SeNPs 的吸收规律不同. 24 h 和 72 h 处理下, 小麦根系对 3 种粒径 SeNPs 的吸收无显著差异, 但其地上部中的硒含量(以干重计, 下同)在 50 nm SeNPs 处理下达到最高, 分别为(1.89 ± 0.47) μg·g^{-1}和(5.18 ± 1.51) μg·g^{-1}. 硒在小麦体内的转运系数也在 50 nm SeNPs 处理 24 h 时显著高于其他粒径 SeNPs 处理 2.38 倍($P < 0.05$). 对于水稻而言, 50 nm SeNPs 处理 24 h 时根系中的硒含量分别比 100 nm 和 150 nm SeNPs 处理增加了 11.18% 和 41.81%, 但在 72 h 时 3 种粒径 SeNPs 处理间根系对硒的吸收无显著差异. 同时, 硒在水稻中的地上部含量和转运系数也在 50 nm SeNPs 处理达到了最大值. 另外, pH 条件也会影响植物对硒的吸收和转运. SeNPs 处理 24 h 时, 小麦根系在 pH 为 6 时对硒的吸收量最大, 并高于亚硒酸盐处理 89.47%, 但在 pH 为 4 时小麦对硒的转运能力最强. 水稻在 pH 较低时(pH 为 3.5 和 5.5), 对 SeNPs 的吸收量显著低于亚硒酸盐, 且 SeNPs 在 pH 为 3.5 时更易转运. 以上结果表明水稻和小麦均可以吸收 SeNPs, 并且在 pH 较低的环境下 SeNPs 粒径越小越容易在植物体内转运.

关键词: 小麦; 水稻; 纳米硒; 吸收; 转运
中图分类号: X171.5 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2019)10-4654-07 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201904048

Absorption and Transportation of Selenium Nanoparticles in Wheat and Rice

WANG Ya-qi, ZHU Li-na, LI Kui, WANG Qi, WANG Kang, GUO Yan-bin, LI Hua-fen*
(Beijing Key Laboratory of Farmland Soil Pollution Prevention and Remediation, College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: Hydroponics experiments were carried out to study the effects of different sizes of selenium nanoparticles (SeNPs) and different pH on the absorption and transportation of Se by wheat (*Triticum aestivum* L.) and rice (*Oryza sativa* L.). The results showed that SeNPs with different sizes (50, 100, and 150 nm) had various characteristics with respect to absorption and translocation in wheat and rice. There was no significant difference in the uptake of SeNPs with different sizes by wheat roots after 24 h and 72 h; however, the highest Se content in wheat shoots was (1.89 ± 0.47) μg·g^{-1} dry weight (DW) and (5.18 ± 1.51) μg·g^{-1} DW under the 50 nm SeNPs treatment after 24 h and 72 h, respectively. Moreover, the transfer factor for Se in wheat under the 50 nm SeNPs treatment was 2.38 times higher than that of the 100 nm and 150 nm treatments. The Se content of rice roots treated for 24 h with the 50 nm SeNPs increased by 11.18% and 41.81% compared to those treated with the 100 nm and 150 nm SeNPs, respectively. There were, however, no significant differences in Se content between all of the SeNPs treatments after 72 h. The Se content of rice shoots and the Se transfer factor both reached the maximum when 50 nm SeNPs were applied. In addition, Se absorption by plants was also affected by pH. Specifically, the amount of Se absorbed by wheat roots treated with SeNPs was the greatest at a pH of 6 after 24 h, which was 89.47% higher than wheat treated with selenite. Furthermore, the highest Se transfer factor occurred at a pH of 4 in wheat. The uptake of SeNPs in rice was markedly lower than that of selenite at low pH values (pH = 3.5 and 5.5) and SeNPs was more readily transported at a pH of 3.5. These results demonstrate that SeNPs could be taken up by wheat and rice and that it could be transferred more easily as small particle size (50 nm) than the larger ones (100 nm and 150 nm) at low pH values (pH 3.5).

Key words: wheat; rice; selenium nanoparticles; absorption; translocation

硒是维持人体和动物健康的必需微量营养元素. 全国营养调查发现, 我国 366 个县的 1.05 亿人口因缺硒而出现了人体免疫力下降等健康问题[1], 严重缺硒时还会引发癌症、大骨节病、克山病等[2~4]. 通过饮食摄入硒是人体补硒的一个重要途径[5, 6]. 有研究发现, 植物性硒源的吸收利用率及安全性均高于动物性硒源[7]. 然而我国土壤缺硒严重, 可被植物吸收的硒含量很少, 因此人们通过向土壤中施加硒肥来提高农作物可食部位的硒含量, 进而达到人体补硒的目的[8].

硒在土壤环境中的存在形态主要有硒酸盐、亚硒酸盐、有机硒、元素态硒和硒化物[9]. 硒的形态不同, 植物对其的吸收利用率也不同, 因此植物根系对不同形态硒的吸收转化和向可食部位转运的能力直接决定了植物的富硒效果[10, 11]. 目前, 无机硒肥的应用十分广泛, 但不论是向土壤中基施[12]还是采用叶面喷施[13], 植物对硒的利用率都比较低. 这就亟需寻找一种植物可高效利用的新型硒肥, 以

收稿日期: 2019-04-04; **修订日期**: 2019-05-16
基金项目: 国家自然科学基金项目(41471271); 公益性行业(农业)科研专项(201303106)
作者简介: 王雅琦(1995~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境污染与修复, E-mail:884314659@qq.com
* 通信作者, E-mail:lihuafen@cau.edu.cn

推进富硒农产品的开发.

纳米硒(SeNPs)是一种新型纳米材料，在医学上作为抗氧化剂、抗癌药物等已经得到了广泛应用[14~16]. 已有研究表明，SeNPs 比无机硒或有机硒更能被生物有效利用[17~19]，且表现出低毒性[20]. Gao 等[21]认为 SeNPs 也可用于制造硒肥来提高作物中的硒含量. 目前，硒肥的研究主要集中在亚硒酸盐和硒酸盐，植物对 SeNPs 的吸收机制尚不清楚[22]. 基于此，本文利用水培试验，研究小麦和水稻两种植物对不同粒径 SeNPs 和在不同 pH 条件下对硒的吸收与转运情况，通过探究植物吸收 SeNPs 的主要机制，以期为富硒农产品的开发和对人体进行科学有效地补硒提供理论依据.

1　材料与方法

1.1　SeNPs 的制备

根据 Lin 等[23]的方法，利用亚硒酸钠(Na_2SeO_3)和硫代硫酸钠($Na_2S_2O_3$)化学反应合成 SeNPs. 通过在不同离心力下分离和浓缩，得到不同粒径(50、100 和 150 nm)的 SeNPs，悬浮于去离子水中于 4℃保存备用.

1.2　植物培养

试验地点是中国农业大学西校区资环温室，植物生长在 25℃/14 h 光照和 20℃/10 h 黑暗条件下、相对湿度为 60% ~ 70%、光照强度为 240 ~ 350 μmol·$(m^2·s)^{-1}$. 种子发芽前先浮选去掉瘪粒，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，移至装有蛭石的育苗盘中发芽. 当叶子完全展开时，挑选大小一致的幼苗洗净并移至营养液培养.

供试小麦(*Triticum aestivum* L.)品种为农大 211，采用 1/5 Hoagland 培养液培养，组分包括：1.0 mmol·L^{-1} KNO_3、1.0 mmol·L^{-1} $Ca(NO_3)_2·4H_2O$、0.5 mmol·L^{-1} $MgSO_4·7H_2O$、0.1 mmol·L^{-1} KH_2PO_4、1.0 μmol·L^{-1} $MnSO_4·H_2O$、3 μmol·L^{-1} H_3BO_3、1 μmol·L^{-1} $(NH_4)_6Mo_7O_{24}·5H_2O$、1 μmol·L^{-1} $ZnSO_4·7H_2O$、0.2 μmol·L^{-1} $CuSO_4·5H_2O$、60 μmol·L^{-1} Fe(Ⅲ)-EDTA，用 MES(2 mmol·L^{-1})缓冲液保持营养液的 pH 值在 6.0 左右(1 mmol·L^{-1} KOH 和 HCl 调节 pH)，营养液每 3 ~ 4 d 换一次.

供试水稻(*Oryza sativa* L.)品种为准两优 608，采用 1/2 Kimura 培养液培养，组分包括：0.091 mmol·L^{-1} KNO_3、0.183 mmol·L^{-1} $Ca(NO_3)_2·4H_2O$、0.1 mmol·L^{-1} KH_2PO_4、0.274 mmol·L^{-1} $MgSO_4·7H_2O$、0.183 mmol·L^{-1} $(NH_4)_2SO_4$、1 μmol·L^{-1} $MnSO_4·H_2O$、3 μmol·L^{-1} H_3BO_3、1 μmol·L^{-1} $(NH_4)_6Mo_7O_{24}·5H_2O$、1 μmol·L^{-1} $ZnSO_4·7H_2O$、0.2 μmol·L^{-1} $CuSO_4·5H_2O$、60 μmol·L^{-1} Fe(Ⅲ)-EDTA，用 MES(2 mmol·L^{-1})缓冲液保持营养液的 pH 值在 5.5 左右(1 mmol·L^{-1} KOH 和 HCl 调节 pH)，营养液每 3 ~ 4 d 换一次.

1.3　试验设置

1.3.1　植物对不同粒径 SeNPs 的吸收和转运

植物幼苗在营养液中培养 4 周后，挑选大小一致的幼苗，分别转移至含有 50、100 和 150 nm SeNPs(5 μmol·L^{-1})营养液的 2.5 L 塑料盆中进行处理. 小麦和水稻处理液的 pH 用浓度为 2 mmol·L^{-1}的 MES 缓冲液分别保持为 6.0 和 5.5. 每盆放置 4 株植物，每个处理设 3 个重复，分别在处理 24 h 和 72 h 后收获.

1.3.2　pH 值对植物吸收转运硒的影响

植物幼苗收获后，转移到含 SeNPs(5 μmol·L^{-1}，50 nm)营养液的 2.5 L 塑料盆中进行处理，并设置同浓度的亚硒酸盐为对照. 用浓度为 2 mmol·L^{-1}的 MES 缓冲液分别将小麦处理液的 pH 保持为 4、6 和 8，水稻处理液的 pH 保持为 3.5、5.5 和 7.5. 每盆放置 4 株植物，每个处理设 3 个重复，分别在处理 24 h 和 72 h 后收获.

1.4　样品硒含量的测定

将收获后的植物用去离子水冲洗根部，并置于 200 mL 预冷的 $CaSO_4$(1 mmol·L^{-1})溶液中浸泡 15 min，然后植株用去离子水清洗 3 次，吸水纸拭干后分离其根部和地上部，记录鲜重. 在烘箱中于 105℃杀青 30 min 后在 75℃烘干至恒重. 样品称重后用磨样机粉碎，置于信封袋中保存待测.

称取 0.250 0 ~ 0.251 0 g干燥植物样品于消煮管中，加入 8 mL 硝酸(优级纯)冷消化过夜. 次日微波消解(MARS-5，CEM，美国)，消解结束后冷却定容至 50 mL 容量瓶中，并过滤到 15 mL 离心管中保存待测.

吸取 4 mL 消解液于 15 mL 离心管中，加入 1 mL 6 mmol·L^{-1} 盐酸(优级纯)，经 100℃水浴 2 h，将六价硒还原为四价硒后，使用原子荧光光度计(AFS-8220，北京吉天，中国)测定溶液中的硒含量. 样品消解、测定过程中以生物成分分析标准物质 GBW10049(GSB-27)含硒为(0.069 ± 0.009) mg·kg^{-1}的大葱和空白样品进行质量控制. 使用的

硒标准贮备液(100 mg·L^{-1})购于国家环保总局标准样品研究所.

1.5 数据处理

植物根系中硒的总量、地上部中硒的总量、植株中硒的总量、硒的转运系数(TF)以及硒在地上部所占的质量分数($Se_{地上部}$,%)的计算(根系、地上部的生物量以干重计)采用公式(1)~(5):

根系中硒的总量(μg) =
根系中硒含量(μg·g^{-1}) × 根系生物量(g) (1)

地上部中硒的总量(μg) =
地上部硒含量(μg·g^{-1}) × 地上部生物量(g) (2)

植株中硒的总量(μg) =
根系中硒的总量 + 地上部中硒的总量 (3)

$$转运系数(TF) = \frac{地上部中硒含量(\mu g\cdot g^{-1})}{根系中硒含量(\mu g\cdot g^{-1})} \quad (4)$$

$$地上部硒的分配(Se_{地上部},\%) = \frac{地上部中硒的总量(\mu g)}{植株中硒的总量(\mu g)} \times 100 \quad (5)$$

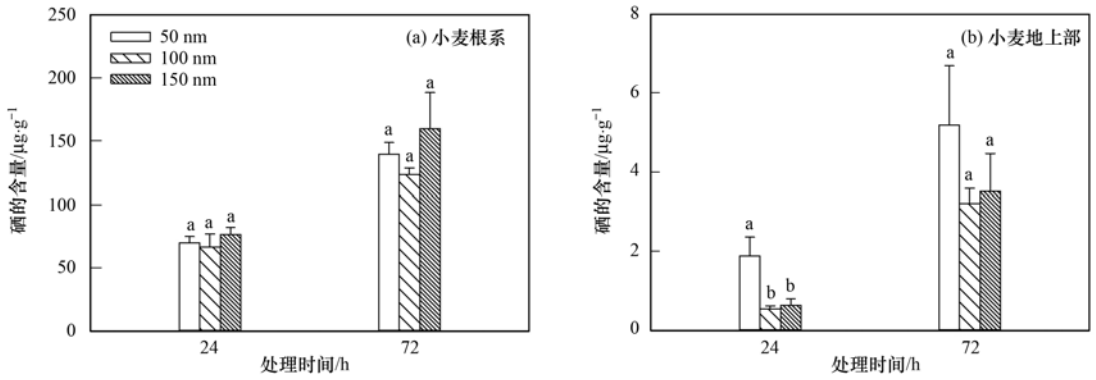
采用Excel进行数据处理,试验数据表示为3次重复的平均值 ± 标准误差. 使用 SAS 9.3 进行方差分析(多重比较采用 Duncan 法),图采用 Sigmaplot 12.5 绘制.

2 结果与分析

2.1 植物对不同粒径 SeNPs 的吸收和转运

2.1.1 小麦和水稻对不同粒径 SeNPs 的吸收

由图 1 可知,小麦根部和地上部中的硒含量随粒径的变化呈现不同的趋势. 小麦根部硒含量在 150 nm SeNPs 处理下最高. 当处理时间为 24 h 和 72 h 时,150 nm SeNPs 处理与 50 nm 和 100 nm 处理相比,小麦根系中硒含量分别增加了 10.00%、16.03% 和 14.21%、29.42%,但差异不显著. 然而,小麦地上部硒含量在 50 nm SeNPs 处理下达到最大值,处理 24 h 时,与 100 nm 和 150 nm 处理相比,硒含量分别显著增加了 2.50 倍和 1.95 倍($P < 0.05$);处理 72 h 时,50 nm SeNPs 处理下的地上部硒含量分别比 100 nm 和 150 nm 处理增加了 61.37% 和 47.16%,但差异不显著.



不同字母表示处理间差异显著, $P < 0.05$, 下同

图 1 不同时间不同粒径 SeNPs 处理的小麦根系和地上部的硒含量

Fig. 1 Se content in wheat roots and shoots treated with differently sized SeNPs for different amounts of time

图 2 是水稻幼苗经过不同粒径 SeNPs 处理24 h 和 72 h 后对硒的吸收情况. 结果表明,当处理时间为 24 h 时,根系中的硒含量随 SeNPs 粒径的增大而逐渐减少,50 nm SeNPs 处理下根系中的硒含量比

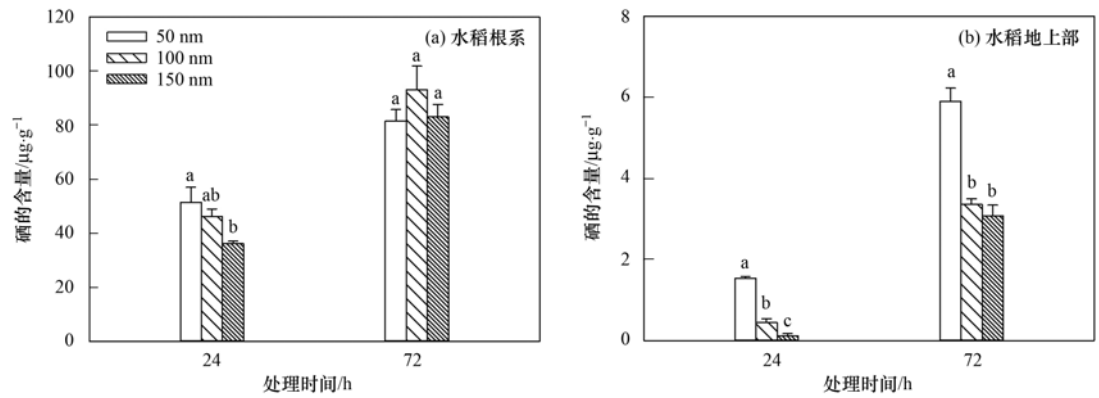


图 2 不同时间不同粒径 SeNPs 处理的水稻根系和地上部的硒含量

Fig. 2 Se content in rice roots and shoots treated with differently sized SeNPs for different amounts of time

100 nm 和 150 nm SeNPs 处理分别增加了 11.18% 和 41.81%；同样，50 nm SeNPs 处理下水稻地上部的硒含量分别显著高于 100 nm 和 150 nm SeNPs 处理 2.42 倍和 11.83 倍（$P<0.05$）. 当处理时间为 72 h 时，随着 SeNPs 的粒径从 50 nm 增加到 150 nm，根系中的硒含量呈现先增加后减少的趋势，但差异并不显著；而地上部的硒含量随粒径的增大呈现逐渐减少的趋势，50 nm SeNPs 处理下地上部的硒含量显著高于 100 nm 和 150 nm 处理 75.30% 和 91.86%（$P<0.05$）.

2.1.2　小麦、水稻对不同粒径 SeNPs 的转运

如表 1 所示，不同粒径 SeNPs 处理下，硒在小麦和水稻幼苗体内的转运系数以及地上部分配比均随处理时间的增加而呈现增大的趋势. 当处理时间为 24 h 时，小麦幼苗在 50 nm SeNPs 处理下硒的转运系数均显著高于 100 nm 和 150 nm 处理 2.38 倍（$P<0.05$），且该处理下小麦根系吸收的硒被转运到地上部的比例最大，约占 6.00%，显著高于其他两种处理（$P<0.05$）. 水稻幼苗体内的硒转运规律与小麦幼苗基本一致，随着 SeNPs 粒径的增加，硒的转运系数和地上部硒的分配比均呈现逐渐减小的趋势.

表 1　不同粒径 SeNPs 在不同时间对小麦和水稻幼苗转运硒的影响[1)]

Table 1　Effects of differently sized SeNPs on Se transport in wheat and rice seedlings after different periods of time

植物种类	时间/h	粒径/nm	TF	$Se_{地上部}$/%
小麦	24	50	0.027 ± 0.006a	6.00 ± 1.05a
		100	0.008 ± 0.001b	2.02 ± 0.27b
		150	0.008 ± 0.001b	1.82 ± 0.32b
	72	50	0.036 ± 0.009a	7.97 ± 1.55a
		100	0.026 ± 0.003a	6.15 ± 0.90a
		150	0.023 ± 0.007a	5.29 ± 1.68a
水稻	24	50	0.031 ± 0.003a	8.64 ± 0.73a
		100	0.010 ± 0.002b	2.53 ± 0.45b
		150	0.003 ± 0.002b	0.91 ± 0.46b
	72	50	0.073 ± 0.005a	14.83 ± 0.75a
		100	0.037 ± 0.003b	7.52 ± 0.21b
		150	0.038 ± 0.005b	8.46 ± 0.82b

1)同一植物中，同列不同小写字母表示不同处理下硒转运情况之间差异显著（$P<0.05$），下同

当处理时间为 72 h 时，随着 SeNPs 粒径的增加，小麦体内硒的转运系数和地上部硒的分配比均逐渐减小，50 nm SeNPs 处理高于 100 nm 和 150 nm 处理，但差异均不显著；然而在水稻体内，则呈现先减小后增加的趋势，并且 50 nm SeNPs 处理下硒的转移系数和地上部分配比均显著高于 100 nm 和 150 nm 处理（$P<0.05$）.

2.2　pH 值对植物吸收转运硒的影响

2.2.1　pH 值对小麦、水稻吸收硒的影响

图 3 是不同时间处理下，pH 对小麦根系吸收硒的影响情况. 结果表明，当处理时间为 24 h 时，随着 pH 值的增大，小麦根系对 SeNPs 的吸收量呈现先增大后减小的趋势，而亚硒酸盐处理下，硒的吸收量呈现逐渐减小的趋势. 此外，在各 pH 处理下，SeNPs 在小麦根系中的吸收量均高于亚硒酸盐，其中，当 pH 为 6 时，二者差异显著. 当处理时间为 72 h 时，小麦对 SeNPs 和亚硒酸盐的吸收量均随 pH 的增加而减小，并且亚硒酸盐的吸收量始终高于 SeNPs，但差异均不显著.

图 4 是不同时间处理下，pH 对水稻根系吸收硒的影响. 结果表明，当处理时间为 24 h 时，随着 pH 值的增大，水稻根系对 SeNPs 的吸收量呈现先增大后减小的趋势，而亚硒酸盐的吸收量呈现逐渐减少的趋势. 同时，在各 pH 处理下，水稻根系对亚硒酸盐的吸收量均高于 SeNPs. 其中，当 pH 为 3.5 和 5.5 时，亚硒酸盐的吸收量显著高于 SeNPs 1.42 倍和 0.53 倍（$P<0.05$），而 pH 为 7.5 时，水稻对两者的吸收量无显著差异. 当处理时间为 72 h 时，水稻对两种形态硒的吸收量均随 pH 的增加呈现先增大后减小的趋势. 其中，pH 为 3.5 和 5.5 时，亚硒酸盐在水稻体内的吸收量显著高于 SeNPs 1.19 倍和 0.75 倍（$P<0.05$），而 pH 为 7.5 时，二者无显著差异.

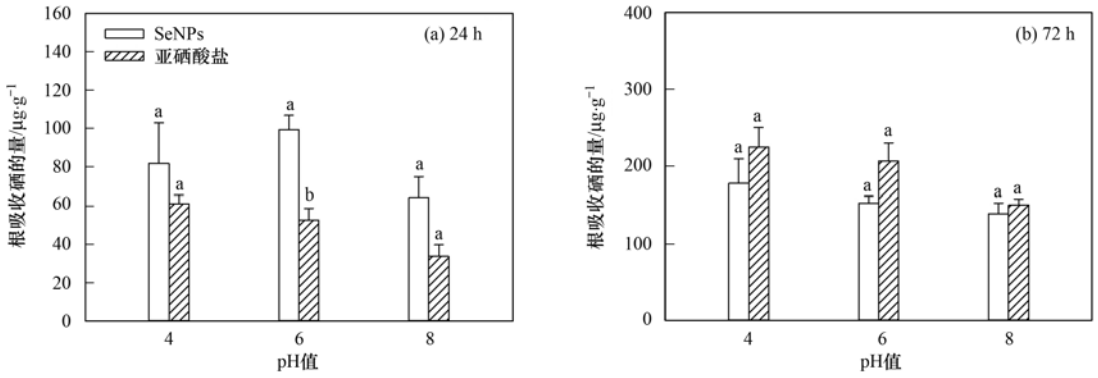


图 3　不同 pH 条件和处理时间小麦根部对不同形态硒的吸收速率

Fig. 3　Uptake rate of Se by different species in wheat roots under different pH conditions after different periods of time

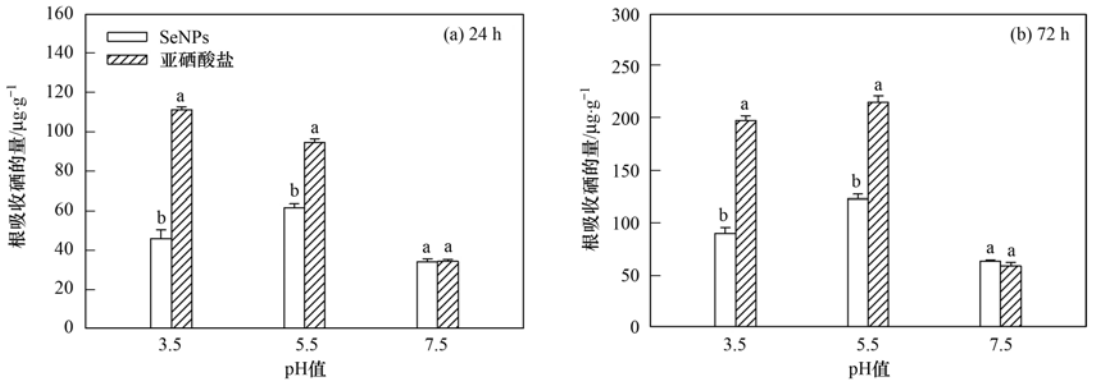


图 4 不同 pH 条件和处理时间水稻根部对不同形态硒的吸收速率

Fig. 4 Uptake rate of Se with different species in rice roots under different pH conditions after different periods of time

2.2.2 pH 值对小麦、水稻转运硒的影响

小麦和水稻幼苗在不同时间和 pH 处理下，对硒的转运情况如表 2 所示. 结果表明，当添加 SeNPs 和亚硒酸盐处理时，硒在小麦体内的转运系数及地上部分配比在相同 pH 条件下均随处理时间的增加而呈现增大的趋势. 当处理时间为 24 h 时，SeNPs 处理下，小麦幼苗对硒的转运系数在 pH 为 4 时取得最大值，比 pH 为 8 时显著增加了 87.50%（$P<0.05$）；而亚硒酸盐处理下，硒在小麦体内的转运系数随 pH 值的增大而增大. 但是无论硒以何种形态添加，不同 pH 条件对硒在小麦地上部的分配比均无显著影响. 当处理时间为72 h 时，两种形态硒处理下，硒在小麦体内的转运系数及其地上部的分配比均随 pH 值的增大而增大，但无显著差异.

对于水稻而言，相同 pH 条件下添加 SeNPs 和亚硒酸盐处理，硒在其体内的转运系数随处理时间的增加而逐渐减小，但硒在水稻地上部中的分配比却随时间而增大. SeNPs 在 24 h 和 72 h 处理下，水稻对硒的转运系数和其地上部分配比均在 pH 为 3.5 时取得最大值. 而亚硒酸盐在 24 h 处理下，与其他 pH 条件相比，pH 为 5.5 时水稻对硒的转运效果最佳. 但用亚硒酸盐处理水稻 72 h 时，pH 对硒在植株体内的转运系数无显著影响，然而硒的地上部分配比在 pH 为 3.5 时取得最大值，且显著高于 pH 为 7.5 处理（$P<0.05$）.

表 2 不同 pH 条件和处理时间对小麦和水稻幼苗转运硒的影响[1)]

Table 2 Effects of pH on Se transport in wheat and rice seedlings after different periods of time

植物种类	硒形态	时间/h	pH 值	TF	$Se_{地上部}$/%
小麦	SeNPs	24	4	0.030 ± 0.003a	6.68 ± 0.85a
			6	0.022 ± 0.006ab	4.52 ± 1.32a
			8	0.016 ± 0.004b	3.88 ± 0.97a
		72	4	0.042 ± 0.005a	8.76 ± 1.23a
			6	0.051 ± 0.004a	10.20 ± 0.82a
			8	0.054 ± 0.009a	11.97 ± 2.25a
	亚硒酸盐	24	4	0.020 ± 0.002b	4.54 ± 0.26a
			6	0.025 ± 0.003ab	5.32 ± 0.35a
			8	0.035 ± 0.006a	7.34 ± 1.29a
		72	4	0.042 ± 0.002a	8.37 ± 0.40a
			6	0.047 ± 0.010a	9.29 ± 1.31a
			8	0.064 ± 0.010a	12.16 ± 1.73a
水稻	SeNPs	24	3.5	0.048 ± 0.003a	12.61 ± 0.91a
			5.5	0.021 ± 0.004b	5.83 ± 1.06b
			7.5	0.014 ± 0.005b	3.73 ± 1.18b
		72	3.5	0.025 ± 0.002a	15.09 ± 0.93a
			5.5	0.011 ± 0.002b	12.67 ± 1.41ab
			7.5	0.008 ± 0.002b	8.73 ± 2.19b
	亚硒酸盐	24	3.5	0.037 ± 0.009ab	9.79 ± 2.24ab
			5.5	0.050 ± 0.005a	12.92 ± 1.12a
			7.5	0.017 ± 0.006b	4.99 ± 1.58b
		72	3.5	0.024 ± 0.005a	24.63 ± 1.31a
			5.5	0.025 ± 0.004a	23.31 ± 0.91ab
			7.5	0.011 ± 0.003a	19.34 ± 1.22b

3 讨论

3.1 植物对不同粒径 SeNPs 的吸收和转运

本试验结果表明，3 种粒径（50、100 和 150 nm）的 SeNPs 均能被小麦和水稻的根系吸收，并且可以被转运至地上部. 当处理时间为 24 h 时，小麦根系在不同粒径 SeNPs 处理下的硒含量之间无显著差异. 然而，水稻经 24 h 处理后，50 nm SeNPs 处理下根系吸收的硒含量最多，且显著高于 150 nm SeNPs 处理（$P<0.05$），这可能是因为不同种植物对 SeNPs 的吸收特性有所差异. 当处理时间为 72 h 时，小麦和水稻根系对 3 种粒径 SeNPs 的吸收均无显著性差异，可能是由于此时两种植物根系对硒的吸收趋于稳定状态. 因此，在小麦和水稻体内，SeNPs 粒径的不同对硒的吸收无显著影响.

此外，50 nm SeNPs 处理下，硒在小麦和水稻体内更易从植物根系转运至地上部. 50 nm SeNPs 处理硒的转运系数在 24 h 和 72 h 处理下，均高于

100 nm 和 150 nm 处理，并且各粒径硒的转运系数均随处理时间的增加而增大. 与本试验结果不同的是，Hu 等[24]用 40、140 和 240 nm 的 SeNPs 分别处理小麦(鲁原 502)60 min，发现 40 nm SeNPs 更易被小麦根系吸收，且与另外两种处理差异显著($P < 0.05$)，这可能是因为处理时间或供试小麦品种的不同，导致小麦对不同粒径硒的吸收有所差异. 同时，其试验结果表明，24 h 处理下 SeNPs 的转运系数高于 72 h 处理，但差异不显著. 但是，本研究与文献[24]都发现，在所有处理下，硒在小麦体内的转运系数均小于 0.1. 这说明大部分的硒被小麦吸收后会累积在根部，向地上部转运的极少. 另一方面，植物对硒的转运特性也受硒形态的影响[25]. 有研究表明，硒酸盐被植物根系吸收后，可以保持原有的形态转移到地上部，且转移的比例和速率较高[26, 27]. 而植物对亚硒酸盐的转运能力较低，主要是由于其极易在植物根部被转化成有机硒等其他形态，从而直接累积在根部，不易向地上转移[27, 28].

3.2　pH 值对植物吸收转运硒的影响

本研究结果发现，不同 pH 条件会影响硒在植物体内的吸收和转运. 有研究表明，土壤 pH 及氧化还原电位(Eh)是影响硒形态和植物有效性的主要因素[29]. 在酸性土壤中或还原条件下($7.5 < pe + pH < 15$)，亚硒酸盐是硒的主要存在形态；在碱性和氧化条件下($pe + pH > 15$)，硒酸盐是主要存在形态；而元素态硒仅存在于低氧化还原条件下($pe + pH < 7.5$)，在土壤中含量极少[30, 31]. 并且，SeNPs 和亚硒酸盐在不同 pH 条件下的存在形态也可能有所不同. 当处理时间为 24 h 时，SeNPs 处理下小麦和水稻根系对硒的吸收量随 pH 的增加呈现先增大后减小的趋势[图 3(a)和图 4(a)]，而硒的转运系数却随 pH 的增加而减小(表 2)，这可能是因为 SeNPs 在植物的最适生长 pH 下更易被吸收，但在低 pH 条件更易被转运. 亚硒酸盐处理植物 24 h 时，小麦和水稻吸收硒的量随 pH 的增加而逐渐减少[图 3(a)和图 4(a)]，该规律与王琪[32]和张联合等[33]的试验结果一致. 不同 pH 条件下，亚硒酸盐的存在形态不同[33]，其在低 pH 处理下可能更易被植物吸收. 然而亚硒酸盐在两种植物中的转运情况却不相同，小麦在 pH 为 8 时更易转运硒，水稻在 pH 为 5.5 时对硒的转运能力更强. 这可能是因为亚硒酸盐处理下，硒在高 pH 环境更易被植物转运，但水稻转运硒的能力受营养液 pH 的影响更大. 当处理时间为 72 h 时，添加 SeNPs 和亚硒酸盐处理，pH 对硒在小麦体内的转运情况无显著影响，但是水稻在较低 pH 环境下更易转运硒，这可能是由于不同种类作物对硒的转运速率也不同[11].

此外，小麦的试验结果表明，根系在 24 h 处理下对 SeNPs 的吸收量高于亚硒酸盐，然而 72 h 时，亚硒酸盐的吸收量反而高于 SeNPs. 这可能是由于 SeNPs 被小麦根系吸收后会在植物体内转化为亚硒酸盐、硒酸盐等其他形态的硒[24]. 同时，水稻的试验结果表明，当 pH 为 3.5 和 5.5 时，亚硒酸盐处理下水稻对硒的吸收量均显著高于 SeNPs 处理($P < 0.05$)，这说明水稻作为淹水作物，其吸收亚硒酸盐的能力要强于 SeNPs. 而当 pH 为 7.5 时，水稻对两种形态硒的吸收无显著差异，可能是因为 pH 对水稻吸收硒能力的影响远大于其对亚硒酸盐和 SeNPs 生物有效性的影响.

4　结论

(1)小麦和水稻均可以吸收 SeNPs，但其主要累积在植物根部. 此外，SeNPs 粒径越小越易从植物根部转运至地上部.

(2)SeNPs 一般在植物的最适生长 pH 条件下易被吸收，在 pH 较低时更易被转运；亚硒酸盐在 pH 较低的环境下易被植物吸收，pH 较高时易被转运.

参考文献：

[1] Wang J, Li H R, Yang L S, *et al*. Distribution and translocation of selenium from soil to highland barley in the Tibetan Plateau Kashin-Beck disease area[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2017, **39**(1): 221-229.

[2] Ávila F W, Yang Y, Faquin V, *et al*. Impact of selenium supply on *Se*-methylselenocysteine and glucosinolate accumulation in selenium-biofortified Brassica sprouts[J]. Food Chemistry, 2014, **165**: 578-586.

[3] Fairweather-Tait S J, Bao Y P, Broadley M R, *et al*. Selenium in human health and disease[J]. Antioxidants & Redox Signaling, 2011, **14**(7): 1337-1383.

[4] Rayman M P. The importance of selenium to human health[J]. The Lancet, 2000, **356**(9225): 233-241.

[5] 姚远溪，顾艳耿，吕蒙，等. 富硒蔬菜和谷物与人体健康分析[J]. 农产品加工，2018，(12)：80-82，85.
Yao Y X, Gu Y G, Lv M, *et al*. Analysed on the relationship between selenium-rich vegetables, selenium-rich grains and human health[J]. Farm Products Processing, 2018, (12): 80-82, 85.

[6] Broadley M R, White P J, Bryson R J, *et al*. Biofortification of UK food crops with selenium[J]. Proceedings of the Nutrition Society, 2006, **65**(2): 169-181.

[7] 张驰，吴永尧，彭振坤. 植物硒的研究进展[J]. 湖北民族学院学报(自然科学版)，2002，**20**(3)：58-62.
Zhang C, Wu Y Y, Peng Z K. Progress in the research of selenium in plants[J]. Journal of Hubei Institute for Nationalities (Natural Science Edition), 2002, **20**(3): 58-62.

[8] 郭璐，满楠，梁东丽，等. 小白菜对外源硒酸盐和亚硒酸盐动态吸收的差异及其机制研究[J]. 环境科学，2013，**34**(8)：3272-3279.

Guo L, Man N, Liang D L, *et al*. Differences of selenium uptake pattern of Pakchoi and the possible mechanism when amended with selenate and selenite[J]. Environmental Science, 2013, **34**(8): 3272-3279.

[9] Fernández-Martínez A, Charlet L. Selenium environmental cycling and bioavailability: A structural chemist point of view [J]. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 2009, **8**(1): 81-110.

[10] Slekovec M, Goessler W. Accumulation of selenium in natural plants and selenium supplemented vegetable and selenium speciation by HPLC-ICPMS [J]. Chemical Speciation & Bioavailability, 2005, **17**(2): 63-73.

[11] 陈思杨, 江荣风, 李花粉. 苗期小麦和水稻对硒酸盐/亚硒酸盐的吸收及转运机制[J]. 环境科学, 2011, **32**(1): 284-289.
Chen S Y, Jiang R F, Li H F. Uptake and translocation of selenate or selenite by wheat and rice seedlings [J]. Environmental Science, 2011, **32**(1): 284-289.

[12] Haug A, Graham R D, Christophersen O A, *et al*. How to use the world's scarce selenium resources efficiently to increase the selenium concentration in food[J]. Microbial Ecology in Health and Disease, 2007, **19**(4): 209-228.

[13] Ros G H, Van Rotterdam A M D, Bussink D W, *et al*. Selenium fertilization strategies for bio-fortification of food: An agro-ecosystem approach[J]. Plant and Soil, 2016, **404**(1-2): 99-112.

[14] Hariharan H, Al-Dhabi N A, Karuppiah P, *et al*. Microbial synthesis of selinium nanocomposite using *Saccharomyces cerevisiae* and its antimicrobial activity against pathogens causing nosocomial infection[J]. Chalcogenide Letters, 2012, **9**(12): 509-515.

[15] Forootanfar H, Adeli-Sardou M, Nikkhoo M, *et al*. Antioxidant and cytotoxic effect of biologically synthesized selenium nanoparticles in comparison to selenium dioxide[J]. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 2014, **28**(1): 75-79.

[16] Yang F, Tang Q M, Zhong X Y, *et al*. Surface decoration by *Spirulina* polysaccharide enhances the cellular uptake and anticancer efficacy of selenium nanoparticles[J]. International Journal of Nanomedicine, 2012, **7**: 835-844.

[17] Benko I, Nagy G, Tanczos B, *et al*. Subacute toxicity of nano-selenium compared to other selenium species in mice [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2012, **31**(12): 2812-2820.

[18] Hu C H, Li Y L, Xiong L, *et al*. Comparative effects of nano elemental selenium and sodium selenite on selenium retention in broiler chickens [J]. Animal Feed Science and Technology, 2012, **177**(3-4): 204-210.

[19] Shi L G, Xun W J, Yue W B, *et al*. Effect of sodium selenite, Se-yeast and nano-elemental selenium on growth performance, Se concentration and antioxidant status in growing male goats[J]. Small Ruminant Research, 2011, **96**(1): 49-52.

[20] Wang H L, Zhang J S, Yu H Q. Elemental selenium at nano size possesses lower toxicity without compromising the fundamental effect on selenoenzymes: Comparison with selenomethionine in mice[J]. Free Radical Biology and Medicine, 2007, **42**(10): 1524-1533.

[21] Gao X Y, Zhang J S, Zhang L D. Hollow sphere selenium nanoparticles: Their in-vitro anti hydroxyl radical effect [J]. Advanced Materials, 2002, **14**(4): 290-293.

[22] Li K E, Chang Z Y, Shen C X, *et al*. Toxicity of nanomaterials to plants[A]. In: Siddiqui M H, Al-Whaibi M H, Mohammad F (Eds.). Nanotechnology and Plant Sciences Nanoparticles and Their Impact on Plants[M]. Switzerland: Springer International Publishing, 2015. 101-123.

[23] Lin Z H, Wang C R C. Evidence on the size-dependent absorption spectral evolution of selenium nanoparticles [J]. Materials Chemistry and Physics, 2005, **92**(2-3): 591-594.

[24] Hu T, Li H F, Li J X, *et al*. Absorption and bio-transformation of selenium nanoparticles by wheat seedlings (*Triticum aestivum* L.)[J]. Frontiers in Plant Science, 2018, **9**: 1-10.

[25] 王晓芳, 陈思杨, 罗章, 等. 植物对硒的吸收转运和形态转化机制[J]. 农业资源与环境学报, 2014, **31**(6): 539-544.
Wang X F, Chen S Y, Luo Z, *et al*. Mechanisms of selenium uptake, translocation and chemical speciation transformation in plants[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2014, **31**(6): 539-544.

[26] Huang Q Q, Wang Q, Wan Y N, *et al*. Application of X-ray absorption near edge spectroscopy to the study of the effect of sulphur on selenium uptake and assimilation in wheat seedlings [J]. Biologia Plantarum, 2017, **61**(4): 726-732.

[27] Li H F, Mcgrath S P, Zhao F J. Selenium uptake, translocation and speciation in wheat supplied with selenate or selenite[J]. New Phytologist, 2008, **178**(1): 92-102.

[28] Jiang Y, Zeng Z H, Bu Y, *et al*. Effects of selenium fertilizer on grain yield, Se uptake and distribution in common buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) [J]. Plant, Soil and Environment, 2016, **61**(8): 371-377.

[29] 周越, 吴文良, 孟凡乔, 等. 土壤中硒含量、形态及有效性分析[J]. 农业资源与环境学报, 2014, **31**(6): 527-532.
Zhou Y, Wu W L, Meng F Q, *et al*. Review on the content, specification of selenium and its availability in soils[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2014, **31**(6): 527-532.

[30] 沈燕春, 周俊. 土壤硒的赋存状态与迁移转化[J]. 安徽地质, 2011, **21**(3): 186-191.
Shen Y C, Zhou J. Occurrence, migration and transformation of selenium in soil[J]. Geology of Anhui, 2011, **21**(3): 186-191.

[31] Barker A V, Pilbeam D J. Handbook of plant nutrition (2nd ed.)[M]. Boca Raton, FL: CRC Press, 2015.

[32] 王琪. 水稻和小麦对有机硒的吸收、转运及形态转化机制[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
Wang Q. Mechanisms of organic selenium uptake, translocation and speciation transformation in rice and wheat[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017.

[33] 张联合, 李友军, 苗艳芳, 等. pH 对水稻离体根系吸收亚硒酸盐生理机制的影响[J]. 土壤学报, 2010, **47**(3): 523-528.
Zhang L H, Li Y J, Miao Y F, *et al*. Effects of pH on the physiological mechanism of selenite uptake by excised roots of rice seedlings[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, **47**(3): 523-528.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 40 No. 10

Oct. 15, 2019

CONTENTS

Vertical Distribution and Transport of $PM_{2.5}$ During Heavy Pollution Events in the Jing-Jin-Ji Region ····· XIAO Zhi-mei, XU Hong, LI Peng, *et al.* (4303)

Source Apportionment of Air Pollutants for a Typical Pollution Event in Zhaoqing ····· CHANG Shu-cheng, LIAO Cheng-hao, ZENG Wu-tao, *et al.* (4310)

Diurnal Variations and Source Analysis of Water-soluble Compounds in $PM_{2.5}$ During the Winter in Liaocheng City ····· YI Ya-nan, HOU Zhan-fang, MENG Jing-jing, *et al.* (4319)

Emission Characteristics of Exhaust PM and Its Carbonaceous Components from China Ⅲ to China Ⅳ Diesel Vehicles in Shenyang ··· ZHAO Xue-yan, WANG Jing, ZHU Sheng-nan, *et al.* (4330)

Characteristics of Heavy Metal Pollutants of $PM_{2.5}$ from Open Burning of Municipal Solid Waste (MSW) and the Associated Exposure Health Risks ····· CHENG Ke, JI Wan-wan, HAO Wei-wei, *et al.* (4337)

Size Distribution Characteristics and Inhalation Exposure of Particle-Bound PAHs in an Industrial City ····· WANG Juan, GUO Guan-lin, QIN Ning, *et al.* (4345)

High-frequency Evolution of Urban Atmospheric Ammonia and Ammonium and Its Gas-to-Particle Conversion Mechanism in Nanjing City ····· SHAO Sheng-cheng, CHANG Yun-hua, CAO Fang, *et al.* (4355)

Optical Absorption Properties of Brown Carbon Aerosols in Guangzhou ····· LI Zhu-jie, TAN Hao-bo, ZHENG Jun (4364)

Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Spring in Zhengzhou ····· ZHANG Yi-xiang, YIN Sha-sha, YUAN Ming-hao, *et al.* (4372)

Raw Materials and End Treatment-based Emission Factors for Volatile Organic Compounds (VOCs) from Typical Solvent Use Sources ····· LIANG Xiao-ming, CHEN Lai-guo, SUN Xi-bo, *et al.* (4382)

Source Profiles of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Typical Solvent-based Industries in Beijing ····· FANG Li, LIU Wen-wen, CHEN Dan-ni, *et al.* (4395)

Emission Characteristics of IVOCs from the Combustion of Residential Solid Fuels and the Impact of Burning Temperature ····· LU Ya-jing, FENG Yan-li, QIAN Zhe, *et al.* (4404)

Evaluation of MACC Reanalysis Ozone Data over China Using Ground-based and AIRS Satellite Observations ····· WANG Run-fang, MA Xiao-dan, ZHAO Tian-liang, *et al.* (4412)

Hydrolysis of COS over MgAl Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites ····· WEI Zheng, ZHANG Xin, ZHANG Feng-lian, *et al.* (4423)

Chemical Characteristics and Ionic Sources of Precipitation in the Source Region of the Yangtze River ····· WANG Shao-yong, HE Xiao-bo, WU Jing-kui, *et al.* (4431)

Effects of Continuous Extreme Rainfall on Water Quality of the Dongjiang River Basin ····· CHE Rui, LIN Shu, FAN Zhong-ya, *et al.* (4440)

Correlation Analysis of Water Quality Between Lake Inflow and Outflow: A Case Study of Poyang Lake ····· HUANG Dong-ling, NI Zhao-kui, ZHAO Shuang, *et al.* (4450)

Spatio-temporal Distribution Characteristics of the Water Quality in the Jinze Reservoir and Its Inflow ····· LIU Ming-kun, TONG Jun, HU Bo, *et al.* (4461)

Temporal and Spatial Variations in the Conductivity in Different Media in Taihu Lake, China ····· WANG Rui, DAI Dan, ZHANG Chi, *et al.* (4469)

Uncertainty and Sensitivity Analysis of Phosphorus Model Parameters in Large Shallow Lakes ····· SHI Yuan-yuan, LI Yi-ping, CHENG Yue, *et al.* (4478)

Spatio-temporal Variations in Aquatic Vegetation Cover and the Potential Influencing Factors in Lake Hongze Based on MODIS Images ····· LI Na, SHI Kun, ZHANG Yun-lin, *et al.* (4487)

Distribution and Pollution Assessment of Nutrients in the Surface Sediments of a Macrophyte-Dominated Zone in Lake Taihu ····· ZHANG Jie, WANG Yuan-sheng, GUO Xi-ya, *et al.* (4497)

Composition and Distribution of Biodegradable Compounds in the Macrophyte Dominated Zone of Lake Taihu ····· QI Chuang, FANG Jia-qi, ZHANG Li-min, *et al.* (4505)

Temporal and Spatial Variation of Zooplankton Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors in Dianshan Lake, Shanghai ··· DU Cai-li, YANG Li, ZHAO Yi, *et al.* (4513)

Geochemical Characteristics and Ecological Significance of Carbon Isotopes in Groundwater Under the Influence of Different Land Use Types in Karst Areas ····· REN Kun, PAN Xiao-dong, ZENG Jie, *et al.* (4523)

Temporal Response of Subterranean Karst Stream Hydrochemistry to Urbanization ····· YANG Ying-zeng, HE Shou-yang, WU Pan, *et al.* (4532)

Hydrochemical Characteristics of Karst Groundwater in the Mountains of Northern Bazhong City, China ····· TANG Jin-ping, ZHANG Qiang, HU Yang, *et al.* (4543)

Removal of Fe(Ⅱ), Mn(Ⅱ), and NH_4^+-N by Using δ-MnO_2 Coated Zeolite ····· MA Wen-jie, CHEN Tian-hu, CHEN Dong, *et al.* (4553)

Strengthening Effect of Different Cattail Pretreatment Methods on the Denitrification of Horizontal Subsurface Flow in a Constructed Wetland ····· XIONG Jia-qing, LU Xue-bin, ZHENG Yu-cong, *et al.* (4562)

Short-cut Nitrification Start-up and Optimization of Operating Conditions Under Different Control Strategies ····· LIU An-di, ZHAO Kai-liang, LIU Hong, *et al.* (4569)

Start-up of a Three-stage PN/A Granular Sludge Reactor for Treating Wastewater with High Concentrations of Ammonia ····· JI Xiao-qing, QI Ze-kun, QIAN Fei-yue, *et al.* (4578)

Removal of Hydrogen Sulfide Produced in a Municipal WWTP Using a Biotrickling Filter with Polypropylene Rings as the Packing Material and Microbial Community Analysis ····· SUN Shi-hao, JIA Ti-pei, CHEN Kai-qi, *et al.* (4585)

Characteristics and Influencing Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Typical Industrial Areas of Chengdu ····· RAN Zong-xin, CHEN Jin-yu, WANG Ya-ting, *et al.* (4594)

Absorption Characterization and the Identification of Factors Influencing Five Organophosphate Esters in Water-Soil System ····· HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, WEI Shi-qiang (4604)

Adsorption and Interaction of Cu^{2+} and Pb^{2+} on BS-12 Amphoteric Modified Bentonites ····· BU Shuai-bin, MENG Zhao-fu, Sambath Yek, *et al.* (4611)

Concentration Characteristics, Source Analysis, and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in a Peak-cluster Depression Area, Southeast of Yunnan Province ····· HONG Tao, KONG Xiang-sheng, YUE Xiang-fei (4620)

Cd Accumulation and Risk Assessment for Arable Soils in the Karst Region of Northern Luodian, Guizhou ····· TANG Qi-lin, LIU Xiu-ming, LIU Fang, *et al.* (4628)

Safe Utilization of Paddy Soils Lightly Polluted with Cadmium in Western Chongqing ····· LI Na, HE Hong-zhou, FENG Ai-xuan, *et al.* (4637)

Accumulation of Cd in Different Crops and Screening of Low-Cd Accumulation Cultivars ····· CHEN Xiao-hua, SHEN Gen-xiang, BAI Yu-jie, *et al.* (4647)

Absorption and Transportation of Selenium Nanoparticles in Wheat and Rice ····· WANG Ya-qi, ZHU Li-na, LI Kui, *et al.* (4654)

Effects of Microplastics on the Growth, Physiology, and Biochemical Characteristics of Wheat (*Triticum aestivum*) ····· LIAO Yuan-chen, Nazygul·Jahitbek, LI Mei, *et al.* (4661)

Regulation and Mechanism of a Dregs Biochar Matrix Combined with Maifanite on a Soil-Ryegrass System ····· XIAO Liang-liang, DING Yuan (4668)

Microbial Community Structure and the Distribution of Antibiotic Resistance Genes in Soil Contaminated by Sulfamethoxazole ····· ZHANG Hai-feng, SHI Ming-ming, SUN Yan-mei, *et al.* (4678)

Dynamics of Antibiotic Resistance Genes During the Municipal Solid Waste Leachate Treatment ····· HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, YAN Yi-jun, *et al.* (4685)

Effects of Manure Application Rates on the Soil Carbon Fractions and Aggregate Stability ····· SHAO Hui-yun, LI Zi-yue, LIU Dan, *et al.* (4691)

Effects of Irrigation and Biochar Application on the Respiratory Temperature Sensitivity of Paddy Soil ····· ZHOU Peng, QI Le, NIU Hai-dong, *et al.* (4700)

Response of Soil CO_2 Emissions to Straw-returning in Citrus/Mushroom Intercropping Systems ····· YOU Jing, NI Jiu-pai, HUANG Rong, *et al.* (4708)

Effects of Warming and Straw Application on Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen and Bacterial Community Structure ····· ZHANG Ting-ting, CHEN Shu-tao, WANG Jun, *et al.* (4718)

Simulated Ozone Damage on Gross Primary Productivity (GPP) in a Winter Wheat Field ····· XU Jing-xin, ZHENG You-fei, WANG Sheng, *et al.* (4725)

Spatial and Temporal Variations in Fertilizer Use Across Prefecture-level Cities in China from 2000 to 2015 ····· PAN Xiao-dong, LI Pin, FENG Zhao-zhong, *et al.* (4733)