ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第4期

Vol.38 No.4

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

双奖期刊

环境科学
(HUANJING KEXUE) ENVIRONMENTAL SCIENCE
第38卷 第4期
2017年4月15日

目 次

西宁近郊大气氮干湿沉降研究 …… 许稳,金鑫,罗少辉,冯兆忠,张霖, 潘月鹏,刘学军(1279)
兰州春夏季 PM_{10} 碳组分昼夜变化特征与来源分析 …… 马丽,余晔,王博,赵素平,李刚(1289)
海南三亚大气颗粒物中水溶性无机离子浓度及其粒径分布特征 …… 王璐,刘子锐,温天雪,苗红妍,王跃思(1298)
2015年北京城区大气 $PM_{2.5}$ 中 NH_4^+、NO_3^-、SO_4^{2-} 及前体气体的污染特征 …… 丁萌萌,周健楠,刘保献,王焱,张博韬,石爱军,杨懂艳,常淼(1307)
北京市某垃圾焚烧厂周边大气二噁英污染特征及暴露风险 …… 齐丽,任玥,刘爱民,黄业茹,赵震,王江,李泓(1317)
北京和保定地区大气细颗粒物中可培养细菌的种群特征 …… 胡亚东,马安周,吕鹏翼,张扬,庄国强(1327)
基于实时交通数据的南京市主次干道机动车排放特征分析 …… 李笑语,吴琳,邹超,张意,毛洪钧,荆博宇(1340)
过渡金属掺杂对镧锡烧绿石催化碳烟燃烧性能的影响 …… 李曦峰,孙宇琦,王仲鹏,牟宗刚,崔兆杰(1348)
南水北调中线北京段水质状况分析 …… 徐华山,赵磊,孙昊苏,任玉芬,丁涛,常帅,王海东,李淼,果钊(1357)
三峡前置库汉丰湖试运行年水文水质变化特征 …… 杨兵,何丙辉,王德宝(1366)
基于偏最小二乘模型的河流水质对土地利用的响应 …… 李琳琳,张依章,唐常源,郑磊,孟伟,卢少勇,敦宇(1376)
抚仙湖夏季热分层时期水温及水质分布特征 …… 王琳杰,余辉,牛勇,牛远,张有林,刘倩, 吉正元(1384)
千岛湖溶解氧与浮游植物垂向分层特征及其影响因素 …… 俞焰,刘德富,杨正健,张佳磊,徐雅倩,刘晋高,严广寒(1393)
高通量测序技术研究辽河真核浮游藻类的群落结构特征 …… 王靖淇,王书平,张远,林佳宁,高欣,臧小苗,赵茜(1403)
三门湾近海有机污染对浮游细菌群落的影响 …… 戴文芳,郭永豪,郁维娜,熊金波(1414)
沉积物-水界面氮的源解析和硝化反硝化 …… 金赞芳,龚嘉临,施伊丽,金漫彤,李非里(1423)
广州南沙红树林湿地水体和沉积物中有机氯农药的残留特征 …… 丁洋,黄焕芳,李绘,罗杰,郑煌,孙焰,杨丹,张原,祁士华(1431)
太湖西岸河网沉积物中重金属污染特征及风险评价 …… 边博,周燕,张琴(1442)
锁磷剂对杭州西湖底泥磷释放的控制效果 …… 朱广伟,李静,朱梦圆,龚志军,许海,杨桂军,张运林,秦伯强(1451)
超滤处理东江水不可逆膜污染物的识别和活性炭对其吸附去除 …… 杨海燕,王灿,鄢忠森,李冬平,赵焱,瞿芳术,梁恒,徐叶琴,李圭白(1460)
UV/SPS 降解水中三氯生的效能及动力学 …… 李青松,李学艳,姚宁波,骆靖宇,李国新,陈国元,高乃云(1467)
真空紫外-亚硫酸盐法降解 PFOS 影响因素 …… 韩慧丽,王宏杰,董文艺(1477)
g-C_3N_4 协同光催化还原 Cr(Ⅵ)及氧化磺基水杨酸 …… 李莉莉,陈翠柏,兰华春,刘菲,安晓强(1483)
锆改性硅藻土吸附水中磷的研究 …… 范艺, 王哲, 赵连勤, 吴德意(1490)
3种常规消毒方法对磺胺类抗性基因削减效果的比较 …… 郑吉,周振超,陈芳,陈涛,魏媛媛,韩玥,陈红(1497)
典型生活污水处理工艺对雌激素效应的去除 …… 张秋亚,马晓妍,王晓昌,游猛(1506)
SRT 对酵母-SBR 处理油脂废水稳定性的影响 …… 吕文洲,张树林,乔宇祥,刘英(1513)
分散染料 neocron black(NB)的生物降解特性 …… 杨波,丁凤友,徐辉,李方,田晴,马春燕(1520)
多聚磷酸盐激酶基因在污水生物除磷中的功能 …… 南亚萍,周国标,袁林江(1529)
生物膜短程硝化系统的恢复及其转化为 CANON 工艺的过程 …… 付昆明,周厚田,苏雪莹,王会芳(1536)
厌氧氨氧化反应器脱氮性能及细菌群落多样性分析 …… 曹雁,王桐屿,秦玉洁,韩彬,任君怡(1544)
内环境调节层对厌氧生物反应器填埋场中氮转化的影响 …… 何正坤,宋博宇,朱南文,董军(1551)
矿化垃圾中Fe(Ⅲ)还原耦合 CH_4 厌氧去除特性 …… 王立立,何婷,龙焰,刘常宝(1558)
应用铅锶同位素示踪研究泉州某林地垂直剖面土壤中重金属污染及来源解析 …… 孙境蔚,于瑞莲,胡恭任,苏光明,王晓明(1566)
畜禽粪便有机肥中重金属在土壤剖面中积累迁移特征及生物有效性差异 …… 何梦媛,董同喜,茹淑华,苏德纯(1576)
山东省农田土壤多环芳烃的污染特征及源解析 …… 葛蔚,程琪琪,柴超,曾路生,吴娟,陈清华,朱祥伟,马东(1587)
江汉平原典型土壤环境中有机磷农药的分布特征及影响因素 …… 王建伟,张彩香,潘真真,廖小平,刘媛,吕幽,汤蜜(1597)
基于生物有效性的农田土壤磷素组分特征及其影响因素分析 …… 蔡观,胡亚军,王婷婷,袁红朝,王久荣,李巧云,葛体达,吴金水(1606)
秸秆还田对外源氮在土壤中转化及其微生物响应的影响 …… 陈珊,丁咸庆,祝贞科,王娟,彭佩钦,葛体达,吴金水(1613)
生物炭输入对城郊农业区农田地表反照率及土壤呼吸的影响 …… 张阳阳,胡学玉,邹娟,张迪,陈威,王向前,陈窈君,刘扬(1622)
淹水水稻土消耗 N_2O 能力及机制 …… 王玲,邢肖毅,秦红灵,刘毅,魏文学(1633)
不同污水处理工艺非二氧化碳温室气体的释放 …… 李惠娟,彭党聪,刘文博,姚倩,卓杨(1640)
施用不同污泥堆肥品对土壤温室气体排放的影响 …… 杨雨洽,易建婷,张成,陈宏,木志坚(1647)
不同镉水平下纳米沸石对土壤 pH、CEC 及 Cd 形态的影响 …… 迟荪琳,徐卫红,熊仕娟,王卫中,秦余丽,赵婉伊,张春来,李彦华,李桃,张进忠,熊治庭,王正银,谢德体(1654)
不同作物对外源硒动态吸收、转运的差异及其机制 …… 彭琴,李哲,梁东丽,王梦柯,郭璐(1667)
褪黑素对水稻幼芽镍胁迫的缓解作用 …… 刘仕翔,黄益宗,罗泽娇,黄永春,蒋航(1675)
不同形态磺胺类药物在根-土界面的空间分布及毒性评价 …… 金彩霞,司晓薇,王万峰,王春峰,王子英,张琴文,王婉(1683)
三峡库区消落带沉积物对鱼体富集汞的影响 …… 孙松, 李楚娴, 张成, 王永敏, 王定勇(1689)
重庆市居民头发重金属富集特征及相关性分析 …… 何明靖,李琦,王登祥,赵佳渊,杨婷(1697)
16S rRNA高通量测序研究集雨窖水中微生物群落结构及多样性 …… 杨浩,张国珍,杨晓妮,武福平,赵炜,张洪伟,张翔(1704)
石墨烯掺杂聚苯胺阳极提高微生物燃料电池性能 …… 黄力华,李秀芬,任月萍,王新华(1717)
美国污染场地清理的风险评估简介及政策制定 …… 容跃(1726)
《环境科学》征稿简则(1505) 《环境科学》征订启事(1682) 信息(1339, 1459, 1612)

不同作物对外源硒动态吸收、转运的差异及其机制

彭琴[1],李哲[1],梁东丽[1,2*],王梦柯[1],郭璐[1]
(1. 西北农林科技大学资源环境学院,杨凌 712100;2. 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室,杨凌 712100)

摘要: 查明作物硒吸收、转运随生育期的动态变化,有助于更好地了解硒在土壤-植物系统中的迁移进而对其有效性进行调控. 本文采用盆栽试验,研究了 6 种不同作物在 8 周生长期内对外源硒酸盐和亚硒酸盐的动态吸收和转运差异及可能机制. 结果表明,作物对硒酸盐和亚硒酸盐的动态吸收规律显著不同. 硒酸盐处理作物地上部和根部硒含量从种植 3 周后持续下降;而亚硒酸盐处理作物根部硒含量随生长逐步上升,地上部硒含量随生长呈先上升后平稳或下降的趋势. 两种硒处理在整个作物生长期内都有硒的累积,但植物体内 80% 的硒源于前 6 周的吸收. 6 种作物相比,硒酸盐处理芥菜地上部和根部硒含量最高,小麦地上部次之,亚硒酸盐处理,胡萝卜地上部硒含量最高,地下硒含量最小,而相同硒处理菜薹、紫甘蓝和绿菜花地上部和根部硒含量相近. 绿菜花、紫甘蓝、菜薹、芥菜和小麦对硒酸盐的转运明显高于亚硒酸盐,胡萝卜对两种硒的转运能力相当. 生物稀释作用影响作物硒含量的动态变化,尤以硒酸盐处理最为明显,供试植物硒含量与其干重呈显著负相关,但生物量改变引起的稀释作用并不能解释其对两种价态硒截然相反的吸收规律. 进一步分析发现,硒酸盐处理 6 种作物硒累积量与作物生长期土壤有效硒改变量呈显著正相关($P < 0.05$),但亚硒酸盐处理却未发现此结果;6 种作物硒累积量仅占亚硒酸盐处理土壤有效硒的 0.5% ~18.1%,而硒酸盐处理除胡萝卜外 5 种作物硒累积总量为土壤有效硒量的 1.1 ~4.5 倍,由此可见,作物对外源硒酸盐和亚硒酸盐动态吸收的差异是作物硒吸收和转运能力、土壤供硒能力及生物稀释综合作用的结果,在作物硒的强化中应该综合考虑.

关键词:硒酸盐;亚硒酸盐;动态吸收;转运;有效硒
中图分类号: X171 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2017)04-1667-08 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201607205

Dynamic Differences of Uptake and Translocation of Exogenous Selenium by Different Crops and Its Mechanism

PENG Qin[1], LI Zhe[1], LIANG Dong-li[1,2*], WANG Meng-ke[1], GUO Lu[1]
(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling 712100, China)

Abstract: The study aimed to find out the dynamic changes of selenium (Se) uptake with crops growing and to provide better understanding on the translocation of Se in soil-plant system. Pot experiments and laboratory analysis were carried out, in which 6 crops were planted for eight weeks in the soils treated with selenite and selenate. The results showed that there was a significant difference in the plant dynamic uptake pattern for selenite and selenate. Se concentration in shoots and roots of all tested plants continuously declined with growth since the third week after planting for selenate treatment; while Se concentration in roots of plants gradually increased with the growth, and that for shoots firstly increased and then leveled off or decreased for selenite treatment. Crops could accumulate Se throughout the whole growing period, while 80% of the Se in plants was uptaken in the first 6 weeks. Among the 6 tested plants, the Se concentration in the shoots and roots of mustard was the highest, followed by the shoots of wheat for selenate treatment. The Se concentration in shoots of carrot was the highest, while that in roots was the lowest for selenite treatment. For the same Se treatment, the Se concentrations in both roots and shoots of broccoli, purple cabbage and flowering Chinese cabbage were similar. Broccoli, purple cabbage, flowering Chinese cabbage, mustard and wheat had higher translocation ability to transport selenate than selenite from roots to shoots, whereas carrot had the same ability for translocating selenite and selenate. Biological dilution affected the dynamic changes of the Se content in crops, especially for selenate treatment, and a significant negative correlation between Se concentration of plants and their biomass further verified this. However, the changes of biomass of plants with growing period couldn't explain the total inverse dynamic uptake pattern for selenite and selenate. A significant positive correlation was observed between Se accumulations amount in six crops with available Se changes in soil during the corresponding growing period for selenate treatment, while no such correlation was found for selenite treatment. Se accumulation in crops grown on selenite-treated soil accounted for 0.5%-18.1% of soil available Se, whereas that in selenate treatment was 1.1-4.5 times of soil available Se except for carrot. In conclusion, the dynamic changes of Se uptake with crop growth were the comprehensive results of the absorption and transport capacity of crops, Se availability in soil and biological dilution. It should be considered as a whole in the selenium biofortification.

Key words: selenate; selenite; dynamic uptake; translocation; available selenium

收稿日期: 2016-07-28; **修订日期**: 2016-11-17
基金项目: 国家自然科学基金项目(41171379,41571454)
作者简介: 彭琴(1992 ~),女,硕士研究生,主要研究方向为土壤环境化学,E-mail:qinpeng2015@nwsuaf.edu.cn
* 通信作者,E-mail:dlliang@nwsuaf.edu.cn

硒在地壳中的分布不均,全球有 40 多个国家硒资源匮乏,近 10 亿人缺硒[1]. 中国 72% 的耕地处于低硒水平,其中 30% 严重缺硒[2]. 植物硒是人体饮食补硒的重要来源,生物强化可以改善低硒地区农作物的硒含量[3]. 但是人体硒缺乏、富足和中毒之间的间距很窄[4],搞清作物对硒的动态吸收和转运机制对生物强化补硒十分必要.

现有研究多关注成熟期植物硒含量并以此进行土壤硒的生物有效性评价,但植物不同生育期和不同器官对硒的吸收动态变异很大[5]. 有关植物对硒动态吸收的研究结果较少且不尽相同,陈金[6]的研究发现大豆植株硒含量在生育早期高于后期,而唐巧玉等[7]却发现大豆植物硒含量随苗期、花期、结荚期和成熟期逐渐增大,他们均发现植株硒累积总量与干物质累积基本同步,即随生长逐渐增大. 笔者前期研究发现小白菜对硒酸盐和亚硒酸盐的吸收动态截然相反,硒酸盐处理小白菜硒含量在生长初期显著大于后期,且随生长持续下降;而亚硒酸盐处理的小白菜硒含量随生长呈上升趋势,且这种差异与植物自身的生物稀释作用和土壤供硒水平有关[8],但 Zhang 等[9]却发现亚硒酸盐处理水稻从分蘖期到成熟期作物地上部和根部的硒含量均显著下降,并认为此与根系的衰老降低了植物硒吸收能力有关. 很显然,生物稀释作用及植物对硒的吸收转运能力与植物各器官硒含量动态变化密切相关. 此外,作物根系与土壤硒的相互作用及土壤微生物活动的影响,会引起土壤有效硒库处于动态平衡进而影响植物对硒的吸收效率[10~12],且土壤供硒能力比植物吸收硒的能力对植物体硒含量影响更大[13]. 因此,将植物硒吸收、转运能力及作物生长过程中土壤有效硒供给水平结合起来研究,有助于揭示植物硒含量动态变化的机制.

不同植物对土壤硒的吸收和累积不尽相同[14],土壤中不同形态硒对植物硒吸收和转运亦有显著影响[15]. 研究已经证实十字花科、百合科和豆科作物比菊科、禾本科和伞形科植物富硒能力强[16,17]. 硒酸钠处理的土壤中菠菜、花椰菜、萝卜、洋葱和土豆等 11 种蔬菜均能快速地吸收硒且向地上部转运,但不同作物间差异明显,以萝卜的可食用部分硒累积量最高,而洋葱的球茎硒含量却最低[14]. 卷心菜、花椰菜、唐莴苣和羽衣甘蓝这 4 种蔬菜在土壤中吸收硒酸盐的能力显著高于亚硒酸盐,以花椰菜的地上茎部硒含量最高[18]. Pezzarossa 等[19]的研究也表明硒酸盐处理的土壤种植的番茄的硒累积量是同等施加量亚硒酸盐处理的 14 倍. 再加上硒从植物根部向地上部的转运还受营养状态、生育期等因素的影响,因此,对现有的土壤-植物体系中硒吸收和转运结果的综述也无法得出可靠的对比结果[15]. 目前,不同作物对亚硒酸盐和硒酸盐动态吸收及转运的差异的研究尚未见系统报道. 因此,本研究选择非聚硒的根菜类胡萝卜(伞形科),粮食类作物小麦(禾本科);富硒的十字花科花菜类植物菜薹和绿菜花,叶菜类的芥菜和紫甘蓝作为试验材料,探讨不同作物对土壤外源硒酸盐和亚硒酸盐吸收及转运的动态规律,旨在更好地为缺硒地区进行生物强化提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤为陕西关中地区典型农耕塿土,以多点取样法采集自西北农林科技大学南校区试验田的 0 ~ 20 cm 土壤,土样自然风干,研磨后过 5 mm 筛备用. 土壤的基本理化性质参照鲍士旦的方法[20]测定,结果为:pH 7.75,阳离子交换量(CEC)23.34 $cmol \cdot kg^{-1}$,黏粒含量为 39.50%,碳酸钙为 55.00 $g \cdot kg^{-1}$,有机质 16.33 $g \cdot kg^{-1}$,全氮 1.11 $g \cdot kg^{-1}$,土壤总硒量 0.077 $mg \cdot kg^{-1}$. 供试作物分别为:胡萝卜、菜薹、紫甘蓝、绿菜花、芥菜和小麦,均由西北农林科技大学种子公司提供.

1.2 试验设计

将过 5 mm 筛的 2.5 kg 土装入内径 18 cm,深度 15 cm 的塑料盆中,硒源为亚硒酸钠和硒酸钠,按照笔者前期的研究结果设置一个水平(以 Se/土计):2.5 $mg \cdot kg^{-1}$[21],将各处理的硒配成溶液均匀喷入土壤,每种价态硒处理的土壤种植各种供试作物各 18 盆. 每盆施入 N 0.375 g(尿素)和 KH_2PO_4 0.145 g 作为基肥. 保持土壤含水量为田间持水量的 70%,平衡两周后播种. 选取大小和饱满度一致的种子进行直播,每盆种 20 粒,10 d 后间苗,在作物生长过程中每隔 2 d 称重浇水,使土壤含水量保持为田间持水量的 70%,分别在播种后第 3、4、5、6、7、8 周硒酸盐和亚硒酸盐处理各取 3 盆收获,共收获植物和采集土壤样品 6 次.

1.3 样品采集与指标测定

将收获后的植物样依次用自来水、蒸馏水洗涤 3 次,吸水纸吸干水分,分为地上部和根分开装于纸袋中,90℃ 杀青 30 min,60℃ 烘干至恒重,称重,研磨后存于自封袋密封待用. 植物样用 4∶1(体积比)

HNO_3-$HClO_4$ 混酸进行消解，土壤有效态硒用 0.1 mol·L^{-1} KH_2PO_4 提取. 硒用氢化物发生-原子荧光光谱法测定(北京吉天 AFS-930 双道原子荧光光谱仪). 测定过程中用圆白菜(GBW10014)作为质量控制样品，标准值为(0.20 ±0.03) mg·kg^{-1}，实测值为(0.19 ±0.02) mg·kg^{-1}.

1.4 数据处理

用 SPSS 20.0 软件和 Origin 8.5 软件对数据进行计算和统计分析. 硒从植物根部向地上部的转运能力用转运系数 TF 值表示，计算公式为：

$$TF = \frac{\text{地上部硒含量}}{\text{根部硒含量}}$$

此外，为了更准确地表达植物对土壤硒的绝对吸收量，本研究定义植物硒累积量的公式为：

$$\text{硒累积量} = \text{植物硒含量} \times \text{干重}$$

2　结果与分析

2.1 不同作物对亚硒酸盐和硒酸盐的吸收和转运的差异

从整体来看，不同价态外源硒处理 6 种作物地上部和根部硒含量随生育期动态变化趋势明显不同(图 1). 亚硒酸盐处理的 6 种作物地上部硒含量均在生长的前 6 周逐渐增大，此后绿菜花、紫甘蓝和菜薹硒含量趋于平缓，而胡萝卜、小麦和芥菜地上部硒含量逐渐下降[图 1(a)]；6 种作物中以胡萝卜地上部硒含量最高，最大值达 24.7 mg·kg^{-1}，芥菜次之，紫甘蓝和绿菜花最低(在 10 mg·kg^{-1}左右)；与地上部硒含量不同，供试作物根部硒含量均随作物生长期延长呈上升趋势，紫甘蓝的根部硒含量在前 7 周快速增大，在第 8 周逐渐平稳，绿菜花和菜薹则在第 7 和第 8 周显著增大，其余 3 种作物根部硒含量增长缓慢，胡萝卜的根硒含量变化最小[图 1(c)]. 硒酸盐处理，除小麦根部硒含量随生长下降不明显以外，其余 5 种供试作物地上部和根部硒含量均随其生长显著下降[图 1(b)和 1(d)]；芥菜的地上部和根部硒含量显著高于其他作物，分别是硒吸收能力最弱的胡萝卜的 2.4 ~ 3.4 倍和 2.9 ~ 3.8 倍. 从图 1 还可以看出，亚硒酸盐处理各种作物地上部硒含量与根部相当，但硒酸盐处理作物地上部硒含量显著高于根部.

供试作物体对亚硒酸盐和硒酸盐从根部向地上部转运的动态变化的结果见表 1.

绿菜花、紫甘蓝、菜薹和小麦在亚硒酸盐和硒酸盐处理中的转运系数(TF 值)随生育期的延长均呈下降趋势，胡萝卜和芥菜在亚硒酸盐处理中 TF 随生育期逐渐下降，而在硒酸盐处理中却随作物生长呈上升的趋势. 6 种作物相比，以胡萝卜对亚硒酸盐的转运系数在生长的各个时期均显著最高，且其对亚硒酸盐转运系数(2.82 ±0.42)与硒酸盐的(3.13 ±0.54)相当；小麦对硒酸盐转运能力最强，

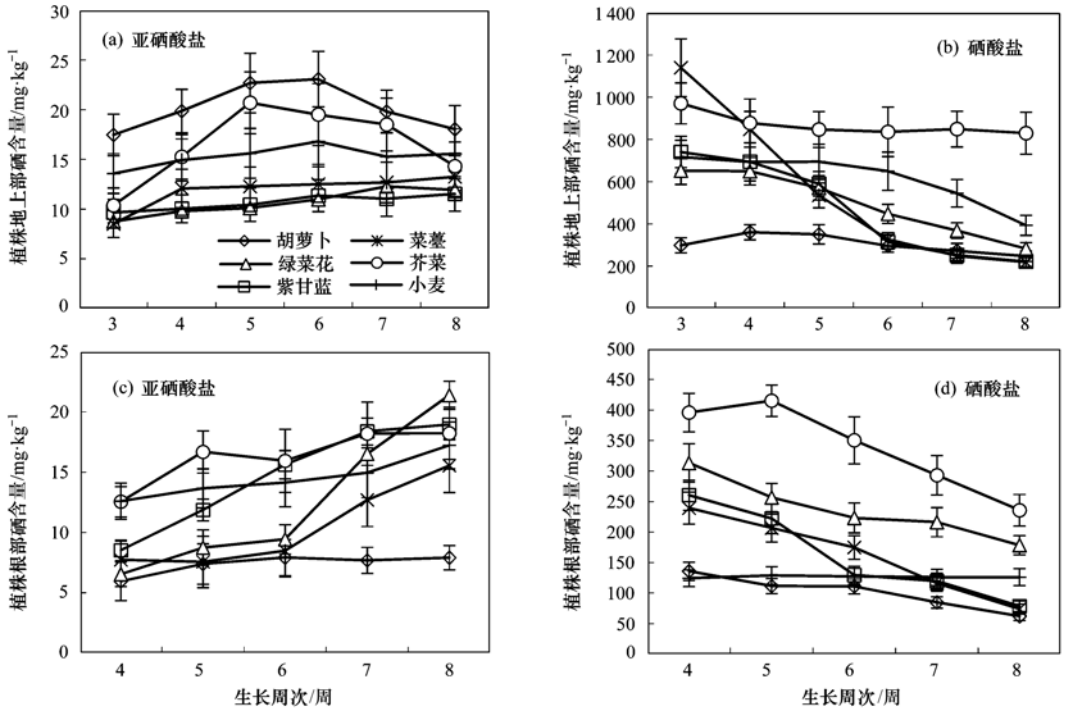


图 1　不同作物生长过程中植株硒含量动态变化

Fig. 1　Dynamic changes of Se concentrations of different crops during the whole growth period

平均是亚硒酸盐处理的 4.7 倍,供试作物(胡萝卜除外)对硒酸盐的转运能力均明显高于亚硒酸盐处理. 由此可见,作物对硒的吸收和转运能力与作物种类和外源硒的种类有关(图 1 和表 1).

表 1 不同作物生长过程中硒转运系数 TF 值的变化[1)]

Table 1 Changes of translocation factor (TF) of Se for different crops during the whole growth period

作物种类	亚硒酸盐处理					硒酸盐处理				
	4[2)]	5	6	7	8	4	5	6	7	8
胡萝卜	3.33a	3.07a	2.91a	2.51a	2.28a	2.65bc	3.14b	2.67b	3.21ab	3.97a
绿菜花	1.49b	1.16b	1.16bc	0.74bc	0.56c	2.07c	2.22bc	2.01c	1.70d	1.58d
紫甘蓝	1.18b	0.88b	0.73c	0.60c	0.61c	2.67bc	2.65bc	2.43bc	2.11b	2.01c
菜薹	1.56b	1.62b	1.47b	1.00b	0.85b	3.54ab	2.59bc	1.87c	2.14cd	1.96cd
芥菜	1.22b	1.24b	1.22bc	1.02b	0.79b	2.22c	2.04c	2.39bc	2.90bc	3.52b
小麦	1.19b	1.14b	1.19bc	1.02b	0.90b	5.57a	5.38a	5.11a	4.33a	3.12b

1)同一列不同字母表示 TF 值差异性显著($P<0.05$);2)表示生长周次

2.2 不同作物对亚硒酸盐和硒酸盐累积的动态差异

图 2 给出了 6 种作物不同生育期硒累积量的动态变化情况. 从中可知,亚硒酸盐和硒酸盐处理的 6 种供试作物在生长期内都能从土壤中吸收和累积硒,但作物体内 80% 的硒的累积源于前 6 周,作物对硒酸盐的累积能力远远高于同时期亚硒酸盐处理. 6 种作物中以胡萝卜对两种形态外源硒的吸收能力均最小,其余 5 种作物对亚硒酸盐的累积量相近;而对于硒酸盐处理,虽然芥菜中硒含量最高[图 1(b)和 1(d)],但是其累积量却不及菜薹、绿菜花、紫甘蓝、小麦[图 2(b)]. 不同作物硒含量和累积量的差异相比,充分说明生物量稀释效应对植物硒含量、尤其是对作物生育期硒含量的动态变化[9]的影响不容忽视.

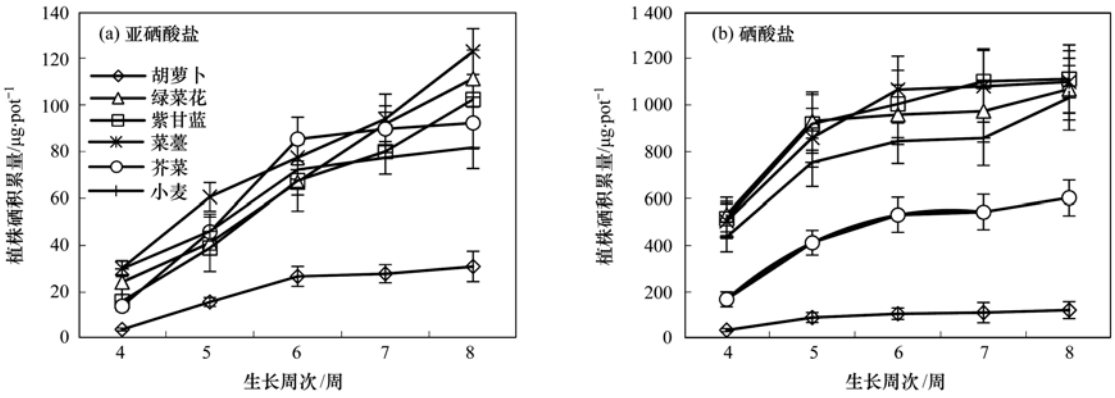


图 2 不同作物生长过程中硒累积量的动态变化

Fig. 2 Dynamic changes of Se accumulation by different crops during the whole growth period

作物不同生长期硒含量与植物干重的相关分析见表 2. 从中可见,硒酸盐处理,除小麦根部和芥菜地上部外,其余作物地上部和根部硒含量均显著地受生物量稀释作用的影响,这与 Keskinen 等[22]发现的施加外源硒酸盐的土壤,在 10 周内小麦叶片中的硒绝对量增大,但由于生物稀释作用硒含量却降低的结果相一致. 与此不同,亚硒酸盐处理的各作物地上部受生物量的稀释作用不明显,根部硒含量与植物干重呈正相关,绿菜花、紫甘蓝、菜薹和小麦甚至达到显著水平. 这种差异源于植物吸收亚硒酸盐后快速在根部还原为有机硒且储存于此,从而减缓硒向地上部迁移[23]. 因此,对于亚硒酸盐处理,虽然根系生物量随生长也在增大,但生物量的稀释效应对根部硒含量的影响相对较小.

表 2 作物不同生育期硒含量与生物量的相关分析[1)]

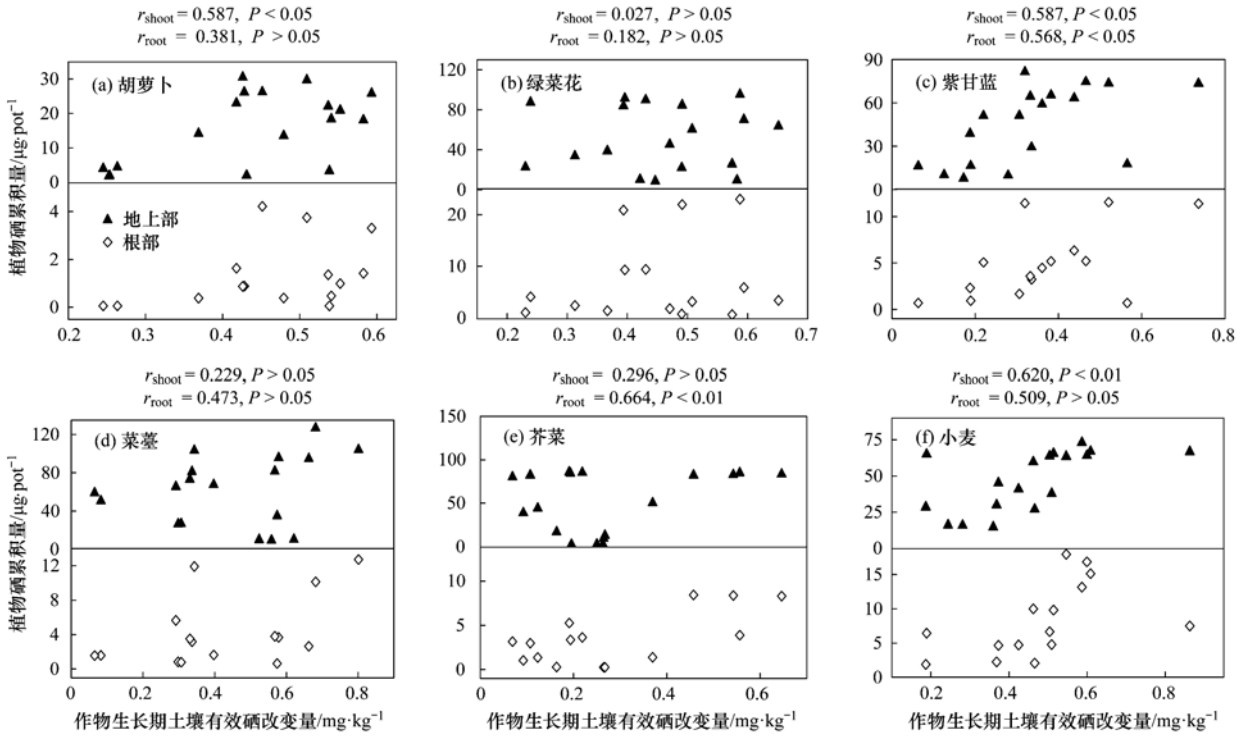
Table 2 Correlation between Se concentrations of crops and their biomass at different growing stages

作物	亚硒酸盐处理		硒酸盐处理	
	地上部	根部	地上部	根部
胡萝卜	−0.151	0.047	−0.551*	−0.849**
绿菜花	0.557*	0.903**	−0.841**	−0.760**
紫甘蓝	−0.392	0.754**	−0.910**	−0.901**
菜薹	0.208	0.652**	−0.904**	−0.736**
芥菜	−0.041	0.374	−0.231	−0.748**
小麦	0.149	0.765**	−0.803**	−0.003

1)$n=15$,* 表示在 5% 水平显著($P<0.05$),** 表示在 1% 水平显著($P<0.01$)

2.3　土壤有效硒与植物硒累积量的关系

为了查明土壤有效硒供给能力对植物硒吸收的影响，本研究探讨了供试作物不同部位各时期硒累积量与相应的土壤有效硒改变量（平衡时期减去植物收获时的土壤有效硒）的关系，结果见图 3（亚硒酸盐处理）和图 4（硒酸盐处理）.



r_{shoot} 表示地上部，r_{root} 表示根部，下同

图 3　亚硒酸盐处理不同生育期植物硒累积量与土壤有效硒改变量的关系

Fig. 3　Relationship between Se accumulation amount of crops and the changes of available Se concentrations in selenite-treated soil during plant growing period

由图 3 和图 4 的横坐标可以看出，土壤有效硒供给水平受施入土壤中硒的形态影响差异很大. 亚硒酸盐处理的土壤有效硒供给水平高出硒酸盐 3.6 ~ 5.0 倍，但是其与各作物体内硒含量的相关程度并不及硒酸盐处理高. 硒酸盐处理的土壤有效硒与 6 种作物硒吸收的相关性均达到显著（P < 0.05）或极显著（P < 0.01）水平. 亚硒酸盐处理胡萝卜、绿菜花、紫甘蓝、菜薹、芥菜和小麦吸收的硒占土壤有效硒的质量分数分别为 0.5% ~ 2.4%、2.5% ~ 9.1%、5.2% ~ 8.5%、3.3% ~ 9.7%、2.5% ~ 18.1% 和 4.1% ~ 8.0%；而硒酸盐处理，除了富硒能力最弱的胡萝卜硒吸收占土壤有效硒 34.6% ~ 69.6% 外，其余 5 种作物累积的硒总量超过土壤有效硒 1.1 ~ 4.5 倍. 这是因为土壤有效硒含量是一个动态值，当土壤中的有效硒被植物大量吸收利用后，其浓度下降，为了保持平衡，原本与土壤固相结合的部分不稳态硒会释放出来补充供给植物吸收.

3　讨论

本研究供试的 6 种作物对硒酸盐和亚硒酸盐的吸收和转运能力随作物生长的动态变化差异很大，这源于两种形态外源硒在土壤介质中为植物供硒能力的差异. 亚硒酸盐进入土壤后易被碳酸盐、铁锰氧化物或铝氧化物结合固定，主要以可交换态及碳酸盐结合态硒形式存在（数据未给出），难以被植物大量直接吸收利用[24~26]；硒酸盐施入土壤培养两周后仍以有效性较高的可溶态六价硒为主[8]，其在土壤中的移动性和有效性高，反映在作物吸收累积硒酸盐的能力是亚硒酸盐的近 10 倍（图 2）. 伴随着作物生长，土壤供硒能力不是亚硒酸盐处理植物硒吸收的主控因素，与此不同，硒酸盐处理可溶态硒随作物生长被大量吸收后导致土壤有效硒含量显著下降[27]，使得所有供试作物硒含量均随之显著下降（图 1），植物硒累积量在第 6 周后逐渐趋于平稳（图 2），而后由于生物稀释的作用导致植物硒含量持续

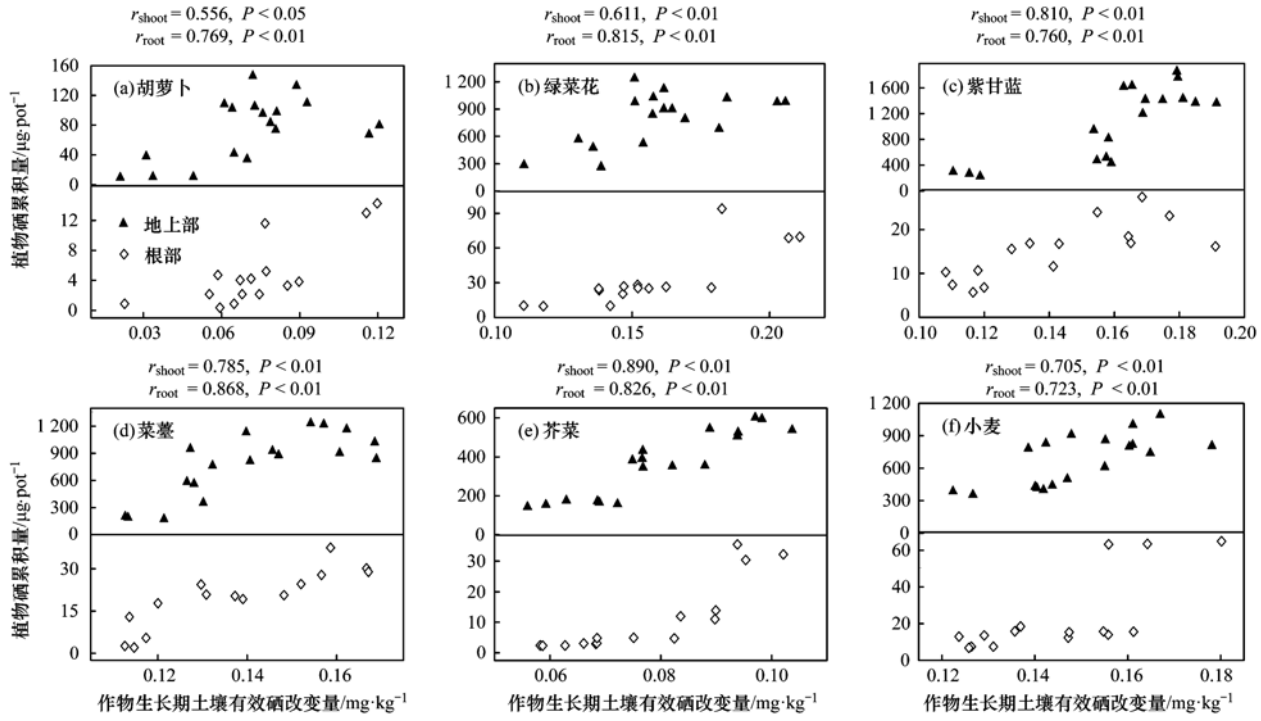


图 4 硒酸盐处理不同生育期植物硒累积量与土壤有效硒改变量的关系

Fig. 4 Relationship between Se accumulation amount of crops and the changes of available Se concentrations in selenate-treated soil during plant growing period

下降(图 1 和表 2),说明土壤供硒能力是控制硒酸盐处理植物硒吸收动态变化的重要因素,这与已有的小白菜、茶叶、黑麦草、小麦和青稞硒含量均与土壤有效硒呈显著正相关研究结果相一致[21,28,29].

外源硒形态影响着土壤-植物体系中硒的转运,这是由植物对不同形态硒的吸收代谢机制差异所致[23]. 很显然,在本研究中 6 种供试作物对硒酸盐的转运效率均高于亚硒酸盐(胡萝卜除外),这与大多数研究的结果相一致[14,30,31]. 有研究表明植物根系对硒酸盐的吸收主要是通过硫酸盐转运子完成的,由于植物对六价硒的代谢需先将其还原为四价硒,而这一步骤为整个硒代谢过程的限速步骤,因此在硒酸盐处理中,根系吸收的六价硒大多直接沿木质部向地上运输,反映出较高的转运系数和地上部硒含量[32~34];而植物对亚硒酸盐的吸收主要依赖磷酸盐转运子[35],其被植物根吸收后主要在根部转化为大分子有机态硒(如硒代甲硫氨酸),一部分向地上部转运,一部分在根部积累[22,36,37]. 本研究发现硒酸盐处理植物根硒含量随生长而下降,亚硒酸盐处理则相反,也是与植物对二者的转运能力差异密不可分的.

值得注意的是,不同作物对硒的吸收和转运能力也不尽相同. 本研究供试的 6 种作物,以芥菜对硒酸盐的吸收能力最强,但由于其生物量小(数据未呈现),其总硒累积量不及同为十字花科的菜薹、紫甘蓝、绿菜花(图 2). 小麦虽然是非聚硒作物,但其地上部硒含量仅次于芥菜,根部硒含量也与菜薹、紫甘蓝和绿菜花相近,但因为本研究只是苗期试验,无法完全反映小麦硒吸收和转运的实际. 6 种作物相比,以胡萝卜对亚硒酸盐和硒酸盐的吸收能力最弱,但其转运系数显著高于其他作物(2.1 ~ 4.1 倍),并且在生长期内均大于 2,说明胡萝卜将更多的硒累积在地上部分(图 1). 究其原因,可能是根形态差异引起的,因为胡萝卜是根菜类植物,有研究发现根菜类作物甜菜叶片对硒的积累性远高于根部,平均达 3.2 倍[38,39],有关根形态对硒吸收转运的影响及其机制还需要进一步研究.

4 结论

(1)供试 6 种作物对亚硒酸盐和硒酸盐的动态吸收变化差异显著. 尽管硒积累总量随生长均持续上升,但亚硒酸盐处理作物硒含量呈先升后降或趋于平缓,而硒酸盐处理作物硒含量随生长显著下降.

(2)6 种作物硒含量相比,硒酸盐处理以芥菜地上部和根部最高,小麦地上部次之;亚硒酸盐处理,以胡萝卜地上部硒含量最高,其根部硒含量最低;相同硒处理的菜薹、紫甘蓝和绿菜花地上部和根部硒含量相近.

(3)胡萝卜对两种价态硒的转运能力相当,其余5种作物对硒酸盐的吸收和转运远远大于亚硒酸盐.

(4)作物硒吸收的动态变化是作物硒吸收转运能力、生物稀释效应及土壤供硒能力的综合作用的结果,在生产富硒作物以及硒污染地区的植物修复中应综合考虑.

参考文献：

[1] Thomson C D. Assessment of requirements for selenium and adequacy of selenium status: a review[J]. European Journal of Clinical Nutrition, 2004, **58**(3): 391-402.

[2] Chen Q X, Shi W M, Wang X C. Selenium speciation and distribution characteristics in the rhizosphere soil of rice (*Oryza sativa* L.) seedlings[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2010, **41**(12): 1411-1425.

[3] Kieliszek M, Błazejak S. Selenium: significance, and outlook for supplementation[J]. Nutrition, 2013, **29**(5): 713-718.

[4] Pickering I J, Wright C, Bubner B, *et al*. Chemical form and distribution of selenium and sulfur in the selenium hyperaccumulator *Astragalus bisulcatus*[J]. Plant Physiology, 2003, **131**(3): 1460-1467.

[5] Galeas M L, Zhang L H, Freeman J L, *et al*. Seasonal fluctuations of selenium and sulfur accumulation in selenium hyperaccumulators and related nonaccumulators[J]. New Phytologist, 2007, **173**(3): 517-525.

[6] 陈金. 土壤-大豆系统中硒的动态生物有效性研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2003. 22-29.
Chen J. The dynamics of bioavailability of Se in soil-soybean system[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2003. 22-29.

[7] 唐巧玉, 吴永尧, 周毅峰, 等. 大豆对硒的富集动态的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, **11**(3): 424-426.
Tang Q Y, Wu Y Y, Zhou Y F, *et al*. Research on the dynamics of accumulation of Se in soybean[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005, **11**(3): 424-426.

[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] Zhang M, Tang S H, Huang X, *et al*. Selenium uptake, dynamic changes in selenium content and its influence on photosynthesis and chlorophyll fluorescence in rice (*Oryza sativa* L.)[J]. Environmental and Experimental Botany, 2014, **107**: 39-45.

[10] White P J, Bowen H P, Fritz M, *et al*. Interactions between selenium and sulphur nutrition in *Arabidopsis thaliana*[J]. Journal of Experimental Botany, 2004, **55**(404): 1927-1937.

[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] Temmerman L D, Waegeneers N, Thiry C, *et al*. Selenium content of Belgian cultivated soils and its uptake by field crops and vegetables[J]. Science of the Total Environment, 2014, **468-469**: 77-82.

[13] Chilimba A D C, Young S D, Black C R, *et al*. Agronomic biofortification of maize with selenium (Se) in Malawi[J]. Field Crops Research, 2012, **125**: 118-128.

[14] Dhillon K S, Dhillon S K. Accumulation and distribution of selenium in some vegetable crops grown in selenate-Se treated clay loam soil[J]. Frontiers of Agriculture in China, 2009, **3**(4): 366-373.

[15] Bitterli C, Bañuelos G S, Schulin R. Use of transfer factors to characterize uptake of selenium by plants[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2010, **107**(2): 206-216.

[16] Brown T A, Shrift A. Selenium: toxicity and tolerance in higher plants[J]. Biological Reviews, 1982, **57**(1): 59-84.

[17] Fleming G A. Selenium in Irish soils and plants[J]. Soil Science, 1962, **94**(1): 28-35.

[18] Banuelos G S, Meek D W. Selenium accumulation in selected vegetables[J]. Journal of Plant Nutrition, 1989, **12**(10): 1255-1272.

[19] Pezzarossa B, Petruzzelli G, Petacco F, *et al*. Absorption of selenium by *Lactuca sativa* as affected by carboxymethylcellulose[J]. Chemosphere, 2007, **67**(2): 322-329.

[20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.

[21] 段曼莉. 4 种蔬菜对不同价态外源硒吸收、转运和生物有效性差异的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011. 24-27.
Duan M L. The differences of selenium uptake, translocation and bioavailibility of four vegetables when selenium applied as selenite and selenate[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2011. 24-27.

[22] Keskinen R, Turakainen M, Hartikainen H. Plant availability of soil selenate additions and selenium distribution within wheat and ryegrass[J]. Plant and Soil, 2010, **333**(1-2): 301-313.

[23] 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.

[24] Fujita M, Ike M, Hashimoto R, *et al*. Characterizing kinetics of transport and transformation of selenium in water-sediment microcosm free from selenium contamination using a simple mathematical model[J]. Chemosphere, 2005, **58**(6): 705-714.

[25] Li Z, Man N, Wang S S, *et al*. Selenite adsorption and desorption in main Chinese soils with their characteristics and physicochemical properties[J]. Journal of Soils and Sediments, 2015, **15**(5): 1150-1158.

[26] Peng Q, Guo L, Ali F, *et al*. Influence of Pak Choi plant cultivation on Se distribution, speciation and bioavailability in soil[J]. Plant and Soil, 2016, **403**(1-2): 331-342.

[27] Li J, Liang D L, Qin S Y, *et al*. Effects of selenite and selenate application on growth and shoot selenium accumulation of pak choi (*Brassica chinensis* L.) during successive planting conditions[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, **22**(14): 11076-11086.

[28] Zhao C Y, Ren J H, Xue C Z, *et al*. Study on the relationship between soil selenium and plant selenium uptake[J]. Plant and Soil, 2005, **277**(1-2): 197-206.

[29] Wang J, Li H R, Li Y H, *et al*. Speciation, distribution, and bioavailability of soil selenium in the Tibetan Plateau Kashin-Beck disease area-a case study in Songpan County, Sichuan Province, China[J]. Biological Trace Element Research, 2013, **156**(1-3): 367-375.

[30] Cartes P, Gianfreda L, Mora M L. Uptake of selenium and its antioxidant activity in ryegrass when applied as selenate and selenite forms[J]. Plant and Soil, 2005, **276**(1-2): 359-367.

[31] Zayed A, Lytle C M, Terry N. Accumulation and volatilization of different chemical species of selenium by plants[J]. Planta, 1998, **206**(2): 284-292.

[32] 李春霞, 曹慧. 植物硒的营养特点及吸收转化机理研究进展[J]. 农业科学研究, 2006, **27**(4): 72-76.
Li C X, Cao H. The research overview of the nutrition characteristics, absorption and transformation of the plant selenium[J]. Journal of Agricultural Sciences, 2006, **27**(4): 72-76.

[33] White P J. Selenium accumulation by plants[J]. Annals of Botany, 2016, **117**(2): 217-235.

[34] Thavarajah D, Thavarajah P, Vial E, *et al*. Will selenium increase lentil (*Lens culinaris* Medik) yield and seed quality?[J]. Frontiers in Plant Science, 2015, **6**: 356.

[35] 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.

[36] de Souza M P, Pilon-Smits E A H, Lytle C M, *et al*. Rate-limiting steps in selenium assimilation and volatilization by Indian mustard[J]. Plant Physiology, 1998, **117**(4): 1487-1494.

[37] White P J, Broadley M R. Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets-iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine[J]. New Phytologist, 2009, **182**(1): 49-84.

[38] 魏廷珍. 青海省平安县富硒区几类蔬菜硒吸收及转化研究[D]. 西宁: 青海大学, 2014. 26-29.
Wei T Z. Study on selenium absorption and transformation of several vegetables in Ping'an Se-rich region of Qinghai Province[D]. Xi'ning: Qinghai University, 2014. 26-29.

[39] Wan H F, Mikkelsen R L, Page A L. Selenium uptake by some agricultural crops from central California soils[J]. Journal of Environmental Quality, 1988, **17**(2): 269-272.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 38 No. 4

Apr. 15, 2017

CONTENTS

Dry and Bulk Nitrogen Deposition in Suburbs of Xining City ····· XU Wen, JIN Xin, LUO Shao-hui, *et al.* (1279)

Day-Night Variation and Source Apportionment of Carbonaceous Aerosols in PM_{10} During Spring and Summer of Lanzhou ····· MA Li, YU Ye, WANG Bo, *et al.* (1289)

Characteristics of the Size Distribution of Water Soluble Inorganic Ions in Sanya, Hainan ····· WANG Lu, LIU Zi-rui, WEN Tian-xue, *et al.* (1298)

Pollution Characteristics of NH_4^+, NO_3^-, SO_4^{2-} in $PM_{2.5}$ and Their Precursor Gases During 2015 in an Urban Area of Beijing ····· DING Meng-meng, ZHOU Jian-nan, LIU Bao-xian, *et al.* (1307)

Pollution Characteristics of PCDD/Fs in Ambient Air and Exposure Risk Assessment Around a Municipal Solid Waste Incinerator in Beijing ····· QI Li, REN Yue, LIU Ai-min, *et al.* (1317)

Community Characteristics of Cultivable Bacteria in Fine Particles ($PM_{2.5}$) of Beijing and Baoding ····· HU Ya-dong, MA An-zhou, LÜ Peng-yi, *et al.* (1327)

Emission Characteristics of Vehicle Exhaust in Artery and Collector Roads in Nanjing Based on Real-time Traffic Data ····· LI Xiao-yu, WU Lin, ZOU Chao, *et al.* (1340)

Catalytic Combustion of Soot Particulates over Rare Earth Pyrochlore Oxides Doped with Transition Metals ····· LI Xi-feng, SUN Yu-qi, WANG Zhong-peng, *et al.* (1348)

Water Quality Analysis of Beijing Segment of South-to-North Water Diversion Middle Route Project ····· XU Hua-shan, ZHAO Lei, SUN Hao-su, *et al.* (1357)

Hanfeng Pre-reservoir Commissioning Time Variation Feature of the Hydrology and Water Quality in Three Gorges Reservoir ····· YANG Bing, HE Bing-hui, WANG De-bao (1366)

Modeling of Water Quality Response to Land-use Patterns in Taizi River Basin Based on Partial Least Squares ····· LI Lin-lin, ZHANG Yi-zhang, TANG Chang-yuan, *et al.* (1376)

Distribution Characteristics of Water Temperature and Water Quality of Fuxian Lake During Thermal Stratification Period in Summer ····· WANG Lin-jie, YU Hui, NIU Yong, *et al.* (1384)

Vertical Stratification Characteristics of Dissolved Oxygen and Phytoplankton in Thousand-Island Lake and Their Influencing Factors ····· YU Yan, LIU De-fu, YANG Zheng-jian, *et al.* (1393)

Community Structure Characteristics of Eukaryotic Planktonic Algae in Liaohe River Through High-throughput Sequencing ····· WANG Jing-qi, WANG Shu-ping, ZHANG Yuan, *et al.* (1403)

Effects of Coastal Organic Pollution on Bacterioplankton Community in Sanmen Bay ····· DAI Wen-fang, GUO Yong-hao, YU Wei-na, *et al.* (1414)

Nitrate Source Identification and Nitrification-denitrification at the Sediment-water Interface ····· JIN Zan-fang, GONG Jia-lin, SHI Yi-li, *et al.* (1423)

Residues of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Water and Sediments from Nansha Mangrove Wetland ····· DING Yang, HUANG Huan-fang, LI Hui, *et al.* (1431)

Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals from River Network Sediment in Western Area of Taihu Lake ····· BIAN Bo, ZHOU Yan, ZHANG Qin (1442)

Efficacy of Phoslock® on the Reduction of Sediment Phosphorus Release in West Lake, Hangzhou, China ····· ZHU Guang-wei, LI Jing, ZHU Meng-yuan, *et al.* (1451)

Identification and PAC Adsorption of Foulants Responsible for Irreversible Fouling During Ultrafiltration of Dongjiang River Water ····· YANG Hai-yan, WANG Can, YAN Zhong-sen, *et al.* (1460)

Efficiency and Kinetics of Triclosan Degradation in Aqueous Solution by UV/Sodium Persulfate ····· LI Qing-song, LI Xue-yan, YAO Ning-bo, *et al.* (1467)

Influencing Factors on the Degradation of PFOS Through VUV-SO_3^{2-} ····· HAN Hui-li, WANG Hong-jie, DONG Wen-yi (1477)

Simultaneous Photocatalytic Reduction of Cr(Ⅵ) and Oxidation of SSA by Carbon Nitride ····· LI Li-li, CHEN Cui-bai, LAN Hua-chun, *et al.* (1483)

Modification of Diatomite by Zirconium and Its Performance in Phosphate Removal from Water ····· FAN Yi, WANG Zhe, ZHAO Lian-qin, *et al.* (1490)

Reducing Effect of Three Disinfection Technologies for Sulfonamides Resistance Genes ····· ZHENG Ji, ZHOU Zhen-chao, CHEN Fang, *et al.* (1497)

Removal of Estrogenic Effect by Typical Domestic Wastewater Treatment Processes ····· ZHANG Qiu-ya, MA Xiao-yan, WANG Xiao-chang, *et al.* (1506)

Effect of SRT on Stability of Yeast-SBR in Treating Oil-containing Wastewater ····· LÜ Wen-zhou, ZHANG Shu-lin, QIAO Yu-xiang, *et al.* (1513)

Degradation of the Disperse Dye Neocron Black(NB) by Biological Treatment ····· YANG Bo, DING Feng-you, XU Hui, *et al.* (1520)

Function of Polyphosphate Kinase Gene in Biological Phosphate Removal During the Wastewater Treatment Process ····· NAN Ya-ping, ZHOU Guo-biao, YUAN Lin-jiang (1529)

Short-cut Nitrification Recovery and Its Transformation into CANON Process in a Biofilm Reactor ····· FU Kun-ming, ZHOU Hou-tian, SU Xue-ying, *et al.* (1536)

Nitrogen Removal Characteristics and Diversity of Microbial Community in ANAMMOX Reactor ····· CAO Yan, WANG Tong-yu, QIN Yu-jie, *et al.* (1544)

Effect of Environment Adjustment Layers on Nitrogen Transformation in Anaerobic Bioreactor Landfills ····· HE Zheng-kun, SONG Bo-yu, ZHU Nan-wen, *et al.* (1551)

Characteristics of Anaerobic Methane Removal Coupled to Fe(Ⅲ) Reduction in Aged Refuse ····· WANG Li-li, HE Ting, LONG Yan, *et al.* (1558)

Assessment of Heavy Metal Pollution and Tracing Sources by Pb & Sr Isotope in the Soil Profile of Woodland in Quanzhou ····· SUN Jing-wei, YU Rui-lian, HU Gong-ren, *et al.* (1566)

Accumulation and Migration Characteristics in Soil Profiles and Bioavailability of Heavy Metals from Livestock Manure ····· HE Meng-yuan, DONG Tong-xi, RU Shu-hua, *et al.* (1576)

Pollution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Agricultural Soils from Shandong ····· GE Wei, CHENG Qi-qi, CHAI Chao, *et al.* (1587)

Distribution Characteristics and Influencing Factors of Organophosphorus Pesticides in Typical Soil Environment of Jianghan Plain ····· WANG Jian-wei, ZHANG Cai-xiang, PAN Zhen-zhen, *et al.* (1597)

Characteristics and Influencing Factors of Biologically-based Phosphorus Fractions in the Farmland Soil ····· CAI Guan, HU Ya-jun, WANG Ting-ting, *et al.* (1606)

Effect of Straw Application on the Dynamics of Exogenous Nitrogen and Microbial Activity in Paddy Soil ····· CHEN Shan, DING Xian-qing, ZHU Zhen-ke, *et al.* (1613)

Effects of Biochar on Surface Albedo and Soil Respiration in Suburban Agricultural Soil ····· ZHANG Yang-yang, HU Xue-yu, ZOU Juan, *et al.* (1622)

N_2O Consumption Ability of Submerged Paddy Soil and the Regulatory Mechanism ····· WANG Ling, XING Xiao-yi, QIN Hong-ling, *et al.* (1633)

Non-CO_2 Greenhouse Gas Release from Different Biological Wastewater Treatment Processes ····· LI Hui-juan, PENG Dang-cong, LIU Wen-bo, *et al.* (1640)

Effect of Application of Sewage Sludge Composts on Greenhouse Gas Emissions in Soil ····· YANG Yu-han, YI Jian-ting, ZHANG Cheng, *et al.* (1647)

Effect of Nano Zeolites on pH, CEC in Soil and Cd Fractions in Plant and Soil at Different Cadmium Levels ····· CHI Sun-lin, XU Wei-hong, XIONG Shi-juan, *et al.* (1654)

Dynamic Differences of Uptake and Translocation of Exogenous Selenium by Different Crops and Its Mechanism ····· PENG Qin, LI Zhe, LIANG Dong-li, *et al.* (1667)

Alleviation Effects of Exogenous Melatonin on Ni Toxicity in Rice Seedings ····· LIU Shi-xiang, HUANG Yi-zong, LUO Ze-jiao, *et al.* (1675)

Forms Distribution and Ecotoxicity of Three Forms of Sulfonamides in Root-Soil Interface of Maize ····· JIN Cai-xia, SI Xiao-wei, WANG Wan-feng, *et al.* (1683)

Effect of Sediments on Bioaccumulation of Mercury in Fish Body in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area ··· SUN Song, LI Chu-xian, ZHANG Cheng, *et al.* (1689)

Bioaccumulation and Correlation of Heavy Metals in Human Hairs From Urban and Rural Areas of Chongqing ····· HE Ming-jing, LI Qi, WANG Deng-xiang, *et al.* (1697)

Microbial Community Structure and Diversity in Cellar Water by 16S rRNA High-throughput Sequencing ····· YANG Hao, ZHANG Guo-zhen, YANG Xiao-ni, *et al.* (1704)

Performance Improvement of Microbial Fuel Cell with Polyaniline Dopped Graphene Anode ····· HUANG Li-hua, LI Xiu-fen, REN Yue-ping, *et al.* (1717)

Brief Introduction of Pollution Sites Remediation and Risk Assessment and Its Policy Making in United States ····· RONG Yue (1726)