

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第2期

Vol.38 No.2

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京大气颗粒物和重金属铅干沉降通量及季节变化	姚利, 刘进, 潘月鹏, 田世丽, 王振波, 韦霞, 张国忠, 周保华, 王跃思 (423)
海西城市群 PM _{2.5} 中重金属元素的污染特征及健康风险评价	陈衍婷, 杜文娇, 陈进生, 徐玲玲 (429)
峨边地区大气 PM _{2.5} 中汞形态污染及其与碳组分的关系	程娜, 钱冠磊, 段炼, 赵梦飞, 修光利 (438)
泰山夏季 PM _{2.5} 中二元羧酸类 SOA 的分子组成及来源	孟静静, 侯战方, 刘晓迪, 邢继钊 (445)
南京北郊大气 BTEX 变化特征和健康风险评估	张玉欣, 安俊琳, 王健宇, 王俊秀, 师远哲, 刘静达, 梁静舒 (453)
长株潭城市群人为源 VOCs 排放清单及其对环境的影响	尤翔宇, 罗达通, 刘湛, 苏艳蓉 (461)
南京城市交通甲烷排放特征	张雪, 胡凝, 刘寿东, 王淑敏, 高韵秋, 赵佳玉, 张圳, 胡勇博, 李旭辉, 张国君 (469)
2003~2014 年东北三省气溶胶光学厚度变化分析	张宸赫, 赵天良, 王富, 徐祥德, 苏航, 程兴宏, 谭成好 (476)
基于增强回归树的城市 PM _{2.5} 日均值变化分析: 以常州为例	葛跃, 王明新, 孙向武, 齐今笛 (485)
重庆市燃煤电厂汞排放特征及排放量	张成, 张雅惠, 王永敏, 王定勇, 徐凤, 杨熹, 何秀清 (495)
几种可能来源对广东某地空气中二噁英的影响	付建平, 韩静磊, 于晓巍, 杨艳艳, 尹文华, 冯桂贤, 张素坤, 黄锦琼, 任明忠 (502)
养鸡场空气中抗性基因和条件致病菌污染特征	高敏, 仇天雷, 秦玉成, 王旭明 (510)
百年来滇池沉积物中不同形态氮分布及埋藏特征	吴亚林, 李帅东, 江俊武, 沈胤胤, 黄昌春, 黄涛, 杨浩, 余艳红, 罗玉 (517)
岩溶地下河补给的地表溪流溶解无机碳及其稳定同位素组成的时空变化	李丽, 蒲俊兵, 李建鸿, 张陶 (527)
三峡水库大宁河支流浮游植物演变过程及其驱动因素	张佳磊, 郑丙辉, 刘德富, 王丽婧, 谭纤茹 (535)
分层型水库夏季水质对极端厄尔尼诺事件的响应	邱晓鹏, 黄廷林, 曾明正, 史建超, 曹占辉 (547)
淹水-落干与季节性温度升高耦合过程对消落带沉积物氮矿化影响	林俊杰, 刘丹, 张帅, 于志国, 何立平, 余顺慧 (555)
湖泊水体中铁(III)-草酸络合物驱动有机磷光解释放磷酸根	蒋永参, 彭云霄, 刘广龙, 周易勇, 朱端卫 (563)
高效磷吸附剂 Mg/Al-LDO 的制备及除磷机制	王卫东, 郝瑞霞, 张晓娴, 万京京, 钟丽燕 (572)
改性沸石湿地脱氮除磷效能及机制	吴鹏, 陆爽君, 徐乐中, 梁奇奇, 沈耀良 (580)
几种水陆交错带植物对底质氮磷释放的抑制作用	姚程, 胡小贞, 卢少勇, 耿荣妹 (589)
模拟三峡库区消落带优势植物根系低分子量有机酸对土壤中铅的解吸动力学	何沅洁, 刘江, 江韬, 黄京晶, 成晴, 陈宏 (600)
TiO ₂ /膨润土复合材料对 Hg ²⁺ 的吸附性能研究	唐兴萍, 周雄, 张金洋, 张成, 王定勇 (608)
氨氮及 H ₂ O ₂ 对溴酸盐和消毒副产物控制的影响	王永京, 杜旭, 金萌, 冯思捷, 杨凯, 张明露, 于建伟 (616)
配水管网细菌活性影响因素	王晓丹, 赵新华 (622)
施氏矿物的化学合成及其对含 Cr(VI) 地下水吸附修复	朱立超, 刘元元, 李伟民, 牟海燕, 王婉玉, 石德智, 王涛 (629)
臭氧-混凝耦合工艺污水深度处理特性及其机制	侯瑞, 金鑫, 金鹏康, 王晓昌 (640)
单级和多级 A/O 工艺中氮的去除效果及 N ₂ O 的产生特性	郭昌梓, 张凤燕, 刘富宇, 朱超, 裴立影 (647)
有机碳源作用下厌氧氨氧化系统的脱氮效能	管勇杰, 于德爽, 李津, 齐泮晴, 魏思佳 (654)
完全混合式曝气系统运行特性及微生物群落结构解析	王硕, 徐巧, 张光生, 李激 (665)
颗粒+絮体污泥 CANON 工艺的启动与 SRT 影响研究	孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (672)
游离氨调控对污泥高含固厌氧消化反应器性能的影响	戴晓虎, 何进, 严寒, 李宇, 丁月玲, 董滨, 戴翎翎 (679)
利用卷枝毛霉成球特性高效收获微藻	顾琼, 金文标, 陈远清, 郭仕达, 万超凡 (688)
零价铁对污泥高温厌氧消化过程中四环素抗性基因及第一类整合子的消减影响	魏欣, 薛顺利, 杨帆, 李响, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (697)
沈抚新城不同土地利用类型多环芳烃含量、来源及人体健康风险评价	王静, 刘明丽, 张士超, 鲁垠涛, 姚宏 (703)
河南某市驾校地表灰尘多环芳烃组成、来源与健康风险	陈轶楠, 马建华, 段海静, 魏林恒 (711)
外源微生物对植物根系修复十溴联苯醚污染底泥的强化作用	杨雷峰, 尹华, 彭辉, 李跃鹏 (721)
微生物修复油污土壤过程中氮素的变化及菌群生态效应	叶茜琼, 吴蔓莉, 陈凯丽, 李炜, 袁婧 (728)
沼泽红假单胞菌 PSB06 对辣椒根际微生物群落结构的影响	罗路云, 金德才, 左晖, 张卓, 谭新球, 张德咏, 卢向阳, 刘勇 (735)
再生水补水对河道底泥细菌群落组成与功能的影响	邱琰茗, 王广煊, 黄兴如, 郭逍宇 (743)
矿区不同植被复垦模式对土壤细菌群落结构的影响	贺龙, 李艳琴, 李彬春, 李君剑 (752)
稻田土壤固碳功能微生物群落结构和数量特征	刘琼, 魏晓梦, 吴小红, 袁红朝, 王久荣, 李裕元, 葛体达, 吴金水 (760)
不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响: 对土壤腐殖物质组成及性质的影响	赵世翔, 于小玲, 李忠徽, 杨艳, 张霞, 王旭东, 张阿凤 (769)
复合菌剂秸秆堆肥对土壤碳氮含量和酶活性的影响	聂文翰, 戚志萍, 冯海玮, 孙玉静, 支月娥, 张进忠, 张丹 (783)
秸秆/生物炭施用对关中地区小麦-玉米轮作系统净增温潜势影响的对比分析	成功, 陈静, 刘晶晶, 张阿凤, 王旭东, 冯浩, 赵英 (792)
1 株氨基高效降解菌的分离鉴定及降解特性	叶杰旭, 林彤晖, 骆煜昊, 陈东之, 陈建孟 (802)
1 株异养反硝化硫细菌的分离鉴定及代谢特性	谭文勃, 马晓丹, 黄聪, 陈川, 王爱杰 (809)
连续施用污泥堆肥土壤剖面中重金属积累迁移特征及对小麦吸收重金属的影响	孙娜, 商和平, 茹淑华, 苏德纯 (815)
施氮对小麦(Ⅵ)吸收、转运和分配的影响	陈玉鹏, 彭琴, 梁东丽, 宋卫卫, 雷凌明, 喻大松 (825)
长期暴露下纳米二氧化钛对典型淡水藻体砷累积与生物转化的影响	李金丽, 王振红, 严雅萌, 黄兵, 罗专溪 (832)
不同热解温度制备的玉米芯生物炭对对硝基苯酚的吸附作用	马锋锋, 赵保卫 (837)
《环境科学》征稿简则(526) 《环境科学》征订启事(720) 信息(678, 696, 844)	

施氮对小麦硒(VI)吸收、转运和分配的影响

陈玉鹏^{1,3}, 彭琴¹, 梁东丽^{1,2*}, 宋卫卫¹, 雷凌明¹, 喻大松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; 3. 山西农业大学城乡建设学院, 太谷 030801)

摘要: 为揭示施氮对小麦硒吸收、转运和分配的影响, 通过合理施氮提高小麦硒的利用效率提供理论参考, 本研究通过盆栽试验, 设置 Se1 (0.74 mg·kg⁻¹) 和 Se2 (2.60 mg·kg⁻¹) 两个硒酸盐处理; 每个硒水平又设为 N1 (100 mg·kg⁻¹) 和 N2 (200 mg·kg⁻¹) 两个氮水平, 分别测定了小麦拔节期和成熟期各器官生物量及硒含量。结果表明, 升高氮水平使 Se1 和 Se2 处理小麦籽粒产量分别提高了 13.2% 和 24.0%。与氮素施用量无关, 升高外源硒水平能显著提高小麦各器官中硒含量 ($P < 0.01$), 且以 N1 处理时效果更显著; Se1 处理升高氮水平对小麦硒吸收的促进作用大于 Se2 处理, Se1 和 Se2 处理升高氮水平使得小麦籽粒硒含量分别提高了 22.6% 和 12.1%。各器官中硒总量占植株硒总量的百分比的大小顺序与富集系数相同, 依次为茎叶 > 籽粒 > 颖壳 > 根, 升高氮水平促进了小麦根部对硒的吸收和富集, 以及营养生长阶段硒向地上部的运移, 并使 Se1 和 Se2 处理小麦籽粒中的硒总量占植株硒总量的百分比分别提高了 11.1% ($P < 0.05$) 和 25.9% ($P < 0.05$)。因此, 施用氮肥可以调控硒的有效性, 缺硒地区合理升高氮水平提高了小麦产量及硒含量, 而在富硒或硒中毒地区合理施氮肥可缓解硒对小麦的毒害作用。

关键词: 氮; 硒; 小麦; 吸收; 转运; 分配

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)02-0825-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201607194

Effects of Nitrogen Application on Selenium Uptake, Translocation and Distribution in Winter Wheat

CHEN Yu-peng^{1,3}, PENG Qin¹, LIANG Dong-li^{1,2*}, SONG Wei-wei¹, LEI Ling-ming¹, YU Da-song¹

(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; 3. College of Urban and Rural Construction, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China)

Abstract: In order to better understand the effects of nitrogen application on accumulation, translocation and distribution of selenium in winter wheat and to provide theoretical reference for reasonable nitrogen application and increasing selenium content of grains. A pot experiment was carried out under greenhouse conditions with Se1 (0.74 mg·kg⁻¹) or Se2 (2.60 mg·kg⁻¹) levels of selenium, and each Se treatment was supplied with N1 (100 mg·kg⁻¹) or N2 (200 mg·kg⁻¹) levels of nitrogen, respectively. Selenium concentrations and biomass amounts of different parts of wheat were determined at jointing and maturity stage. The results showed that grain yield increased with increasing nitrogen levels by 13.2% and 24.0% in Se1 and Se2 treatment, respectively. Regardless of N rate, Se concentration of wheat increased with raising Se amended rate ($P < 0.01$). Increasing nitrogen application could promote Se uptake of root and thus increase the selenium concentration of wheat grains and leaves, which was greater in Se1 treatment than in Se2 treatments. Se concentrations in wheat grain increased by 22.6% and 12.1% with the increasing N application rate in low and high Se treatment, respectively. The distribution ratios of Se in each organ ranked the same as BCFs, following the order of leaf > grain > glume > root. Increasing N fertilization increased the distribution ratio of Se in grains by 11.1% and 25.9% in low and high selenate treatments, respectively. High nitrogen fertilization could promote uptake and translocation of Se in wheat under low Se conditions, and improve Se use efficiency as well in the agricultural production.

Key words: nitrogen; selenium; wheat; accumulation; transportation; distribution

硒是人和动物必需的微量元素之一, 有抗癌、保护心脏、防止克山病、大骨节病、延缓衰老等作用, 其每日摄入的硒在 40 ~ 400 $\mu\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$ 之间为宜, 不足或过量均会引发多种疾病^[1, 2]。据统计, 全球有 5 ~ 10 亿人存在缺硒状况^[3], 我国 72% 的县市存在不同程度缺硒^[4], 饮食是人和动物摄入硒的主要途径, 植物硒因其有较高的生物利用率和生物活性而成为主要硒源。小麦是我国北方地区的主食, 其

籽粒中硒主要以有机态的形式存在^[5], 更容易被人体和动物吸收, 因此提高小麦硒含量是满足人和动物对硒需求安全有效的的重要途径^[6]。植物硒含量不仅取决于土壤总硒含量, 更与硒的形态及价态有关,

收稿日期: 2016-07-27; 修订日期: 2016-09-21

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41171379, 41571454)

作者简介: 陈玉鹏 (1989 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤环境化学, E-mail: yupengchen1105@163.com

* 通信作者, E-mail: dongliang2005@yahoo.com

亚硒酸盐容易被土壤吸附而降低其有效性,而硒酸盐的移动性较大,易被植物吸收利用^[7],在植物体内大量累积,对植物产生毒害作用^[8],因此如何在生产实践中以硒酸盐形式安全有效的进行补硒成为该领域的难点。

氮是作物生长必需的大量元素,氮肥的投入会引起一系列土壤理化性质的变化,如根系吸收铵态氮后,根际土壤环境的 pH 值降低,而吸收硝态氮肥后,pH 值升高^[9,10],土壤硒形态及植物硒的有效性土壤理化性质密切相关^[11,12]。此外,氮素是参与植物蛋白质、核酸及植物激素合成的主要元素,其可通过蛋白质的合成影响硒在植物中的运移,Govasmark 等^[13]发现,营养生长阶段补施氮肥能促进茎叶中蛋白质含量,为硒向籽粒中的转运提供更多载体。氮素在影响蛋白质等合成的同时,也会影响作物对其他营养元素的吸收^[14,15],如氮硫交互能影响大麦中硫的富集、转运和分配^[16,17],而硒与硫为同族元素,硒酸盐被认为是通过根系表面硫酸盐通道进入植物体内^[18],因此,施用氮肥可能会影响植物硒的吸收和转运。近年来,围绕硫肥和磷肥对植物吸收硒的影响研究较多^[19~21],有关施氮对硒在植物体内吸收转运的影响尚未见报道,因此本研究通过探究施入氮素对小麦硒酸盐吸收、转运和分配的影响,以期合理施氮来提高小麦中硒酸盐的利用率,及在硒中毒区为降低其毒害作用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验在温室中进行,供试土壤采自西北农林科技大学南校区试验田(0~20 cm),自然风干,研磨后过 5 mm 筛备用。土壤的基本理化性状为:pH7.75,CEC 23.34 cmol·kg⁻¹,有机质 16.33 g·kg⁻¹,全氮 1.113 g·kg⁻¹,全硒 0.13 mg·kg⁻¹。冬小麦品种为小偃 22,由西北农林科技大学种子分公司提供。外源硒和氮分别为硒酸钠和尿素,均为分析纯试剂。

1.2 试验设计

参考相关研究及实际生产中氮和硒的施用水平^[8,22,23],氮设农业生产中正常施氮水平 N1(100 mg·kg⁻¹)和较高施氮水平 N2(200 mg·kg⁻¹)这 2 个处理;每个氮水平又设硒较低水平 Se1(0.74 mg·kg⁻¹)和硒毒害水平 Se2(2.60 mg·kg⁻¹)这 2 个处理,共 4 个处理,每个处理重复 6(3 个重复×2 次采样)次,共 24 盆,每盆装土 2.5 kg,各处理按照含

量将尿素和硒酸钠溶液均匀喷入土壤,保持土壤含水量为田间持水量的 70%,充分混匀后,平衡两周。2011 年 10 月 26 日播种,每盆播种 15 粒,小麦出苗后定苗 8 株,在小麦生长过程中每 3 d 称重浇水,使土壤含水量保持为田间持水量的 70%。

分别在 2012 年 3 月 24 日(拔节期)和 2012 年 6 月 2 日(成熟期)采集 2 次土壤和植株样品。土样经自然风干、磨碎过 100 目筛;植物样在拔节期分为根和叶,成熟期分为根、叶、籽粒和颖壳,用蒸馏水冲洗干净,在 60℃ 下烘干至恒重,称量各器官生物量,并用粉碎机磨碎后用于分析测定。

1.3 测定方法及质量控制

土壤理化性状采用常规方法测定^[24]。植物和土壤样品分别用 10 mL 体积比为(4:1)和(3:2)的 HNO₃-HClO₄ 混酸消解,消解液经 6 mol·L⁻¹ 浓盐酸还原后用氢化物发生-原子荧光光谱法(北京吉天 AFS-930 双道原子荧光光度计)分别测定植物总硒和土壤总硒^[25]。同时用石灰土壤(GBW 07404)和圆白菜样(GBW 10014)作为质量控制样品,质量控制样品石灰土实测硒含量为(0.55±0.12) mg·kg⁻¹,标准值为(0.63±0.18) mg·kg⁻¹;圆白菜实测硒含量为(0.20±0.06) mg·kg⁻¹,标准值为(0.20±0.03) mg·kg⁻¹。

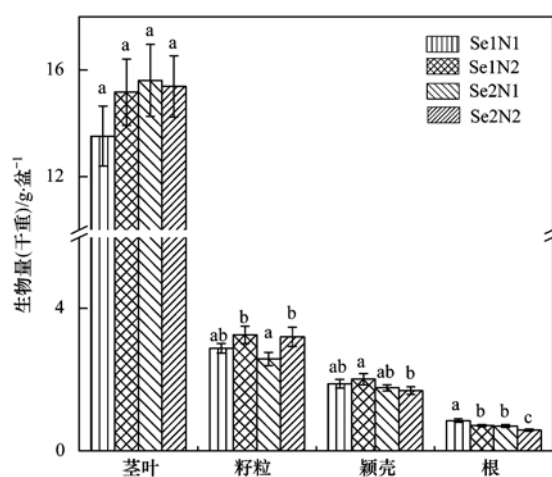
1.4 数据统计与分析

使用 Excel 2010 和 Origin 8.5 进行图表的制作,数据用 SPSS 18.0 进行分析处理。

2 结果与分析

2.1 氮硒交互作用对小麦生物量的影响

氮硒交互作用对小麦成熟期各部位生物量的影响见图 1。N1 和 N2 处理下,Se2 水平较 Se1 水平茎叶干重分别提高了 15.4% 和 1.5%,而使籽粒、颖壳、根干重分别下降了 10.4%、5.9%、18.3% ($P < 0.05$) 和 1.8%、15.9% ($P < 0.05$)、18.3% ($P < 0.05$),Se2 水平根系生长及穗(含籽粒和颖壳)生物量的累积较 Se1 水平受到显著抑制。Se1N2 处理较 Se1N1 处理籽粒、颖壳、茎叶干重分别升高 13.2%、6.9%、12.1%,均未达到显著水平,而根干重却显著下降 16.0%;Se2N2 处理较 Se2N1 处理小麦籽粒干重显著升高 24.0%,而颖壳、茎叶和根干重分别下降了 4.5%、1.4% 和 15.9% ($P < 0.05$)。综上所述,相同硒处理升高氮水平,导致地下生物量下降,在 Se1 时提高小麦地上各部分生物量,而 Se2 时仅能提高籽粒生物量。



图中小写字母表示处理间差异性比较结果, 不同的字母表示在 5% 水平下差异显著, 下同

图 1 氮硒交互作用对成熟期小麦各部位生物量的影响

Fig. 1 Effects of N and Se combined fertilization on wheat biomass in maturity stage

2.2 氮硒交互作用对小麦硒含量的影响

小麦各器官中硒含量与土壤中硒和氮的浓度有密切关系(图 2)。从图 2 可以看出: 在拔节期, 茎叶、根中硒含量在 Se1 和 Se2 处理随氮水平升高分别显著提高了 16.6%、12.3% 和 15.2%、27.4%, 这说明升高氮水平可促进小麦在营养生长阶段对硒的吸收。在成熟期, 小麦不同器官中硒含量大小依次为茎叶 > 籽粒 > 颖壳 > 根。N1Se2 处理茎叶、根、籽粒和颖壳中硒浓度分别是 N1Se1 处理的 12.4、11.1、9.23 和 12.5 倍; N2Se2 处理分别是 N2Se1 处理的 11.2、10.6、8.44 和 12.3 倍, 差异均达显著水平($P < 0.01$)。

从图 2(b) 可以看出, 相同硒处理下, 小麦茎叶、籽粒、根中硒含量在 Se1 和 Se2 处理随氮水平升高

分别显著升高了 22.6%、22.6%、12.4% 和 7.4%、12.1%、7.2%, 其增加量在 Se1 处理均大于 Se2 处理(除颖壳硒含量在 Se1 和 Se2 处理分别下降了 5.0% 和 6.0%, 未达显著差异)。综上所述, 与氮素施用量无关, 增加外源硒能极显著提高小麦中的硒含量($P < 0.01$); 相同硒水平下, 升高施氮水平能提高小麦茎叶、籽粒和根对硒的吸收, 且 Se1 处理的增加量大于 Se2 处理。

2.3 氮对小麦硒富集和转运的影响

由表 1 可知, 小麦各器官的 BCF_{Se} 值差异较大, 在 24.17 ~ 318.50 之间, 同一处理小麦各器官中的 BCF_{Se} 值大小顺序依次为茎叶 > 籽粒 > 颖壳 ≥ 根, 这表明小麦对硒酸盐有较高的富集能力, 且主要富集于地上部。相同硒处理小麦各器官 BCF_{Se} 值均随氮水平的升高而升高, 其中成熟期茎叶、籽粒、根的 BCF_{Se} 值在 Se1 和 Se2 处理分别显著升高了 33.3%、33.3%、22.2% 和 25.0%、27.0%、21.5%, 而颖壳的 BCF_{Se} 值随氮浓度升高未达到显著变化水平。这说明增加氮水平对硒在小麦各器官中(除颖壳外)的富集均有协同促进作用。

本研究以各器官之间硒的转运系数(TF)来分析氮对小麦硒转运的影响, 其中 $TF_{叶/根} = C_{叶}/C_{根}$, $TF_{籽粒/叶} = C_{籽粒}/C_{叶}$, 式中, C 指各器官中硒的含量。由表 1 可以看出, 根的 BCF_{Se} 值大于 1, $TF_{叶/根}$ 在 1.79 ~ 3.61 之间, TF 值随硒水平的升高而升高, 而 $TF_{籽粒/叶}$ 在 0.57 ~ 0.76 之间, TF 值随硒水平的升高反而下降。表明硒酸盐易被小麦根部吸收并向茎叶转运, 却不易从茎叶进入籽粒中。相同硒处理小麦各器官之间的 TF_{Se} 值随氮浓度升高均无明显变化, 说明升高氮水平对硒酸盐在小麦各器官中的转运无显著影响。

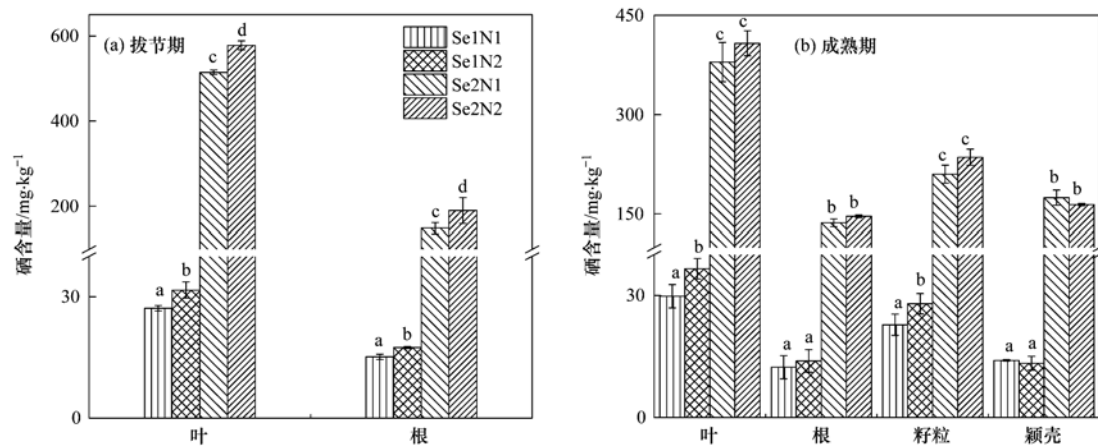


图 2 氮硒交互作用对小麦各部位硒浓度的影响

Fig. 2 Effects of N and Se combined fertilization on wheat Se concentrations

表 1 氮对小麦硒富集和转运的影响

Table 1 Effects of N fertilization on bioconcentration factors and translocation factor of Se in winter wheat

时期	处理	BCF _{Se}				TF _{Se}	
		茎叶	籽粒	颖壳	根	TF _{叶/根}	TF _{籽粒/叶}
拔节期	Se1 N1	43.38 ± 3.24a ¹⁾	— ²⁾	—	24.17 ± 1.96a	1.79 ± 0.09a	—
	N2	60.99 ± 5.62b	—	—	30.63 ± 2.61b	1.99 ± 0.16a	—
	Se2 N1	207.12 ± 15.56c	—	—	60.04 ± 4.27c	3.45 ± 0.27b	—
	N2	233.73 ± 21.69d	—	—	64.80 ± 5.72c	3.61 ± 0.31b	—
成熟期	Se1 N1	59.56 ± 5.61a	45.54 ± 4.18a	28.02 ± 3.41a	24.70 ± 1.48a	2.41 ± 0.38a	0.76 ± 0.15a
	N2	79.39 ± 7.14b	60.70 ± 6.50b	28.93 ± 3.77a	30.17 ± 1.43b	2.63 ± 0.27ab	0.76 ± 0.08a
	Se2 N1	254.79 ± 15.9c	144.90 ± 9.58c	120.43 ± 8.16b	94.30 ± 8.29c	2.70 ± 0.40ab	0.57 ± 0.16b
	N2	318.50 ± 20.9d	184.05 ± 10.2d	128.20 ± 14.4b	114.52 ± 10.4d	2.78 ± 0.33b	0.58 ± 0.05b

1) 每一列不同小写字母表示处理间差异性比较结果,不同的字母表示在 5% 水平下差异显著; 2) “—”表示文章中无相应数据

2.4 氮对小麦体内硒分配的影响

各个器官中硒吸收量是生物量与硒含量的综合

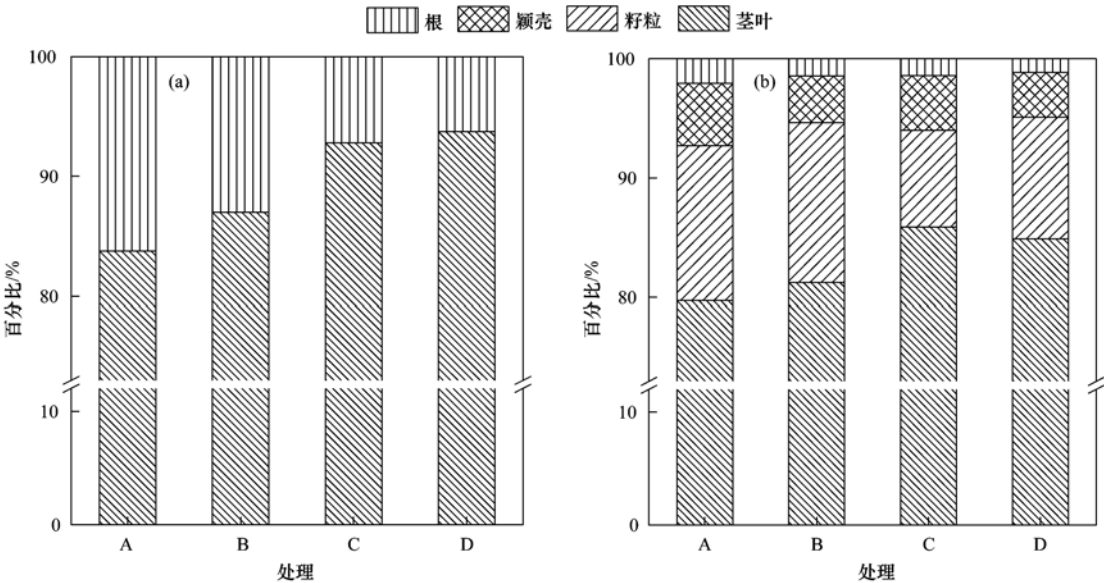
体现,其占植株总硒的百分比(质量分数,下同)可反映出硒在小麦各器官中的分配情况.

小麦器官中硒吸收量百分比 = $\frac{\text{小麦器官中硒含量} \times \text{对应器官生物量}}{\sum \text{小麦器官中硒含量} \times \text{对应器官生物量}} \times 100\%$

如图 3 所示,地上部硒吸收量百分比随小麦生长均呈增长趋势,拔节期地上部硒吸收量百分比在 83.8% ~ 93.7% 之间,成熟期增加至 97.9% ~ 98.9%,各器官中硒吸收量百分比的大小顺序与富集系数相同,依次为茎叶 > 籽粒 > 颖壳 > 根,分配在小麦茎叶及穗(籽粒与颖壳之和)中硒的比例分别为 79.7% ~ 85.9% 和 12.7% ~ 18.2%,说明地上部硒吸收量百分比随生长因硒不断向地上部运移而升高.

相同氮处理下升高硒水平,茎叶中硒吸收量百

分比($P < 0.05$)升高,穗(籽粒与颖壳之和)中硒吸收量百分比下降,根中硒吸收量百分比在拔节期下降,在成熟期无显著变化. 相同硒处理升高氮水平,拔节期小麦茎叶中硒吸收量百分比升高,在 Se1 处理时升高幅度大于 Se2 处理,根部却恰好相反;在成熟期,随氮水平升高,籽粒中硒吸收量百分比显著升高($P < 0.05$),颖壳中硒吸收量百分比下降,茎叶中硒的比例随氮水平的升高在 Se1 处理时升高,Se2 处理时下降. 这说明增加氮或硒水平在营养生长阶段均可促进硒分配在地上部;升高氮水平在生殖生



(a)拔节期; (b)成熟期; 大写字母 A、B、C、D 分别表示处理 Se1N1、Se1N2、Se2N1、Se2N2

图 3 氮对小麦硒分配的影响

Fig. 3 Effects of N fertilization on Se distribution of wheat

长阶段提高硒在籽粒中的分配,减少硒在颖壳中的分配。

3 讨论

适量增氮能促进植物生长^[15, 26],而本研究发现,升高氮水平在 Se1 处理提高了小麦地上各部生物量,而在 Se2 处理仅使籽粒生物量增加。付冬冬等发现,外源硒酸盐浓度大于 $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时会对小麦产生毒害作用,籽粒产量随硒浓度的升高而下降^[8],与其相似,本研究发现 Se2 ($2.60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 处理对小麦生长产生毒害,表现为籽粒、颖壳和根干重的减少。在 Se2 处理升高氮水平使小麦籽粒的增产效果大于 Se1 处理,这与升高氮水平增加了作物营养及缓解硒毒害有关,祝小捷等也发现,高硫土壤中升高氮水平小麦产量增加大于低硫处理^[29], SeO_4^{2-} 与 SO_4^{2-} 化学性质相似,也可得出相似的推论。

缺硒人群主要分布在土壤硒含量较低的地区,外源施硒能有效提高植物体中的硒含量,有研究指出,当外源硒浓度由 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 提升到 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,小麦各器官中的硒含量升高 $4.9 \sim 12.8$ 倍^[8],而本研究中 Se2 处理 ($2.60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 小麦各器官中硒含量是 Se1 处理 ($0.74 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的 $9.15 \sim 12.5$ 倍(图 2),且正常施氮水平小麦各器官中硒含量的增加量均高于较高施氮水平,这与高浓度硒对作物的毒害作用有关。

McBride^[30] 发现,土壤中硝态氮与硒酸盐共存时会与其产生竞争吸附,抑制根部对硒酸盐的吸收,而本研究发现增加施氮量促进了硒在小麦根部的吸收和富集,Premarathna 等^[31] 也认为,尿素与硒酸盐配施能促进水稻对硒酸盐的吸收。原因有以下几点:首先,施入土壤中的氮肥主要以硝酸根离子形式存在,其与阴离子在土壤颗粒表面的竞争吸附作用,会导致土壤溶液中硒酸根浓度增加,提高了植物对 SeO_4^{2-} 吸收的效率^[32, 33]。其次,增施尿素可以改善植物生长,促进根系对磷、硫等矿物质元素的吸收^[34],同时提高植物根部对硒的吸收。第三,土壤中硒酸盐与尿素共存时,会在土壤颗粒表面反应形成硒脲,提高根对硒的吸收^[32]。最后,提高氮水平会增加根系分泌物,从而增加根际微生物数量,De Souza 等^[35] 发现印度芥菜根分泌物能增加植物根对硒的吸收。

籽粒是小麦的可食部位,其硒水平的提高可有效满足缺硒地区人体对硒的需求,Govasmark 等^[13]

发现,升高氮水平能提高籽粒蛋白含量,从而提高籽粒硒含量,与其相似,本研究中升高氮水平显著提高了籽粒硒含量及硒吸收量百分比。小麦籽粒中硒的主要来源是营养生长阶段其它器官中累积的硒在生殖生长阶段再分配,故氮素可以从营养阶段硒的累积和生殖生长阶段硒的转运这两个过程产生影响:首先,在拔节期(营养生长阶段代表),升高氮水平能促进蛋白质合成及其向地上部的转运^[36],硒酸盐进入小麦体内后先被还原转化为硒代半胱氨酸和硒代蛋氨酸等有机硒形态^[37],伴随蛋白质向地上部累积,使地上部硒的分配比例随氮水平的升高显著升高。其次,在成熟期(花期后的代表时期),累积在茎叶中的硒伴随营养物质再分配进入籽粒,升高氮水平对小麦中硒的转移能力无显著影响,却提高了籽粒产量,最终提高了籽粒中硒吸收量及其百分比。综上可知,升高氮水平在营养生长阶段促进了植物对硒的吸收及向地上部的累积,有助于提高籽粒中硒含量。

4 结论

(1) 升高氮水平可缓解高硒对小麦的抑制,并在较低硒水平和高硒水平,分别使籽粒产量提高了 13.2% 和 24.0% 。

(2) 与氮素无关,增加外源硒能极显著提高小麦中的硒含量($P < 0.01$),且较低硒水平时升高氮水平对小麦硒吸收的促进作用大于高硒水平;升高氮水平,使小麦籽粒硒含量在较低硒水平和高硒水平时分别提高了 22.6% 和 12.1% 。

(3) 升高氮水平促进了小麦根部硒的吸收和富集,并在营养生长阶段提高硒在地上部的累积。升高氮水平,使低硒和高硒中籽粒硒占植株总硒的比例分别提高了 11.1% ($P < 0.05$) 和 25.9% ($P < 0.05$)。

参考文献:

- [1] Semnani S, Roshandel G, Zendehbad A, *et al.* Soils selenium level and esophageal cancer: an ecological study in a high risk area for esophageal cancer[J]. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 2010, **24**(3): 174-177.
- [2] Sager M. Selenium in agriculture, food, and nutrition[J]. *Pure and Applied Chemistry*, 2006, **78**(1): 111-133.
- [3] Combs G F Jr. Selenium in global food systems[J]. *British Journal of Nutrition*, 2001, **85**(5): 517-547.
- [4] 中国环境保护局. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [5] 孙文静. 春小麦锌硒吸收规律及其富集技术的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2006.
- Sun W J. Study of Zinc, Selenium absorption regularity of spring

- wheat and their enrichment technology [D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2006.
- [6] Lyons G, Ortiz-Monasterio I, Stangoulis J, *et al.* Selenium concentration in wheat grain: is there sufficient genotypic variation to use in breeding? [J]. *Plant and Soil*, 2005, **269**(1-2): 369-380.
- [7] Su C M, Suarez D L. Selenate and selenite sorption on iron oxides an infrared and electrophoretic study [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, **64**(1): 101-111.
- [8] 付冬冬. 不同外源硒对冬小麦硒吸收、分配和转运的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011.
- Fu D D. Effects of different concentration of exogenous selenite and selenate on selenium uptake, distribution and translocation of winter wheat [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2011.
- [9] 张福锁. 植物根引起的根际 pH 值改变的原因及效应 [J]. *土壤通报*, 1993, **24**(1): 43-45.
- [10] 付婷婷, 黄永东, 黄永川, 等. 氮肥形态及用量对日本毛茛菜吸收 Pb 调节作用的研究 [J]. *西南农业学报*, 2014, **27**(1): 183-187.
- Fu T T, Huang Y D, Huang Y C, *et al.* Study on regulation of different nitrogen form and application to *Picris japonica* Thunb. Pb accumulation [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2014, **27**(1): 183-187.
- [11] 王松山, 梁东丽, 魏威, 等. 基于路径分析的土壤性质与硒形态的关系 [J]. *土壤学报*, 2011, **48**(4): 823-830.
- Wang S S, Liang D L, Wei W, *et al.* Relationship between soil physico-chemical properties and selenium species based on path analysis [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, **48**(4): 823-830.
- [12] Dhillon K S, Dhillon S K. Distribution and management of seleniferous soils [J]. *Advances in Agronomy*, 2003, **79**: 119-184.
- [13] Govasmark E, Singh B R, MacLeod J A, *et al.* Selenium concentration in spring wheat and leaching water as influenced by application times of selenium and nitrogen [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2008, **31**(2): 193-203.
- [14] 杜世州, 曹承富, 张耀兰, 等. 氮素运筹对淮北地区超高产小麦养分吸收利用的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, **17**(1): 9-15.
- Du S Z, Cao C F, Zhang Y L, *et al.* Effects of nitrogen application on nitrogen absorption, utilization in super-high-yielding wheat in Huaibei region [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, **17**(1): 9-15.
- [15] 冯金凤, 赵广才, 张保军, 等. 氮肥追施比例对冬小麦产量和蛋白质组分及生理指标的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, **19**(4): 824-831.
- Feng J F, Zhao G C, Zhang B J, *et al.* Effect of topdressing nitrogen ratio on yield, protein components and physiological characteristics of winter wheat [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, **19**(4): 824-831.
- [16] Eriksen J, Mortensen J V. Effects of timing of sulphur application on yield, S-uptake and quality of barley [J]. *Plant and Soil*, 2002, **242**(2): 283-289.
- [17] 孔灵君, 徐坤, 何平, 等. 氮硫互作对大葱氮、磷、钾、硫吸收分配特性的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, **20**(1): 172-178.
- Kong L J, Xu K, He P, *et al.* Influence of interaction between nitrogen and sulfur on N, P, K and S absorption and distribution of Chinese spring onion [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, **20**(1): 172-178.
- [18] Lee S, Woodard H J, Doolittle J J. Effect of phosphate and sulfate fertilizers on selenium uptake by wheat (*Triticum aestivum*) [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2011, **57**(5): 696-704.
- [19] Renkema H, Koopmans A, Kersbergen L, *et al.* The effect of transpiration on selenium uptake and mobility in durum wheat and spring canola [J]. *Plant and Soil*, 2012, **354**(1-2): 239-250.
- [20] Harris J, Schneberg K A, Pilon-Smits E A H. Sulfur-selenium-molybdenum interactions distinguish selenium hyperaccumulator *Stanleya pinnata* from non-hyperaccumulator *Brassica juncea* (Brassicaceae) [J]. *Planta*, 2014, **239**(2): 479-491.
- [21] 赵文龙, 胡斌, 王嘉薇, 等. 磷与四价硒的共存对小白菜磷、硒吸收及转运的影响 [J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(7): 2020-2026.
- Zhao W L, Hu B, Wang J W, *et al.* Combined effects of phosphate and selenite on the uptake and translocation of phosphorus and selenium in pakchoi [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, **33**(7): 2020-2026.
- [22] Pilon-Smits E A H, Quinn C F, Tapken W, *et al.* Physiological functions of beneficial elements [J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2009, **12**(3): 267-274.
- [23] 马冬云, 郭天财, 王晨阳, 等. 施氮量对冬小麦灌浆期光合产物积累、转运及分配的影响 [J]. *作物学报*, 2008, **34**(6): 1027-1033.
- Ma D Y, Guo T C, Wang C Y, *et al.* Effects of nitrogen application rates on accumulation, translocation, and partitioning of photosynthate in winter wheat at grain filling stage [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, **34**(6): 1027-1033.
- [24] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis (3rd ed.) [M]. Beijing: Chain Agriculture Press, 2000.
- [25] 瞿建国, 徐伯兴, 龚书椿. 氢化物发生-无色散原子荧光光度法测定土壤中有效态硒和总硒 [J]. *土壤通报*, 1998, **29**(1): 47-48, 41.
- Zhai J G, Xu B X, Gong S C. Hydride-no dispersion atomic fluorescence spectrophotometry determination of selenium and effective state total selenium in soil [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1998, **29**(1): 47-48, 41.
- [26] 郭九信, 冯绪猛, 胡香玉, 等. 氮肥用量及钾肥施用对稻麦周年产量及效益的影响 [J]. *作物学报*, 2013, **39**(12): 2262-2271.
- Guo J X, Feng X M, Hu X Y, *et al.* Effects of nitrogen and potassium fertilizers application on annual yield and economic effect in rotation of rice and wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, **39**(12): 2262-2271.
- [27] Eissenstat D M. On the relationship between specific root length and the rate of root proliferation: a field study using citrus rootstocks [J]. *New Phytologist*, 1991, **118**(1): 63-68.
- [28] 曲秋玲, 王国梁, 刘国彬, 等. 施氮对白羊草细根形态和生长的影响 [J]. *水土保持通报*, 2012, **32**(2): 74-79.
- Qu Q L, Wang G L, Liu G D, *et al.* Effect of N addition on root morphological characteristics and growth of *Bothriochloa ischaemum* [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2012, **32**(2): 74-79.

- [29] 祝小捷, 朱云集, 郭天财, 等. 不同氮素水平下施硫对高产小麦碳氮运转和产量的影响[J]. 西北植物学报, 2007, **27**(9): 1820-1825.
- Zhu X J, Zhu Y J, Guo T C, *et al.* Effects of sulfur application on carbon and nitrogen transport and grain yield of high yield wheat cultivars in different nitrogen fertilizer levels[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2007, **27**(9): 1820-1825.
- [30] McBride M B. Environmental chemistry of soils[M]. Oxford: Oxford University Press, 1994.
- [31] Premarathna L, McLaughlin M J, Kirby J K, *et al.* Selenate-enriched urea granules are a highly effective fertilizer for selenium biofortification of paddy rice grain[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012, **60**(23): 6037-6044.
- [32] Kirkby E A, Mengel K. Ionic balance in different tissues of the tomato plant in relation to nitrate, urea, or ammonium nutrition[J]. *Plant Physiology*, 1967, **42**(1): 6-14.
- [33] Thien S J, McFee W W. Influence of nitrogen on phosphorus absorption and translocation in *Zea mays* [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1970, **34**(1): 87-90.
- [34] 谢瑞芝, 董树亭, 胡昌浩, 等. 氮硫互作对玉米籽粒营养品质的影响[J]. 中国农业科学, 2003, **36**(3): 263-268.
- Xie R Z, Dong S T, Hu C H, *et al.* Influence of nitrogen and sulfur interaction on grain quality of maize [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, **36**(3): 263-268.
- [35] De Souza M P, Chu D, Zhao M, *et al.* Rhizosphere bacteria enhance selenium accumulation and volatilization by Indian mustard[J]. *Plant Physiology*, 1999, **119**(2): 565-574.
- [36] Tischner R. Nitrate uptake and reduction in higher and lower plants[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2000, **23**(10): 1005-1024.
- [37] Läubli A. Selenium in plants: uptake, functions, and environmental toxicity[J]. *Botanica Acta*, 1993, **106**(6): 455-468.

CONTENTS

Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Seasonal Variations of Particulate Matter and Lead in Urban Beijing	YAO Li, LIU Jin, PAN Yue-peng, <i>et al.</i> (423)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in PM _{2.5} and Their Human Health Risks Among the Coastal City Group Along Western Taiwan Straits Region, China	CHEN Yan-ting, DU Wen-jiao, CHEN Jin-sheng, <i>et al.</i> (429)
Correlation of Speciated Mercury with Carbonaceous Components in Atmospheric PM _{2.5} in Shengsi Region	CHENG Na, QIAN Guan-lei, DUAN Lian, <i>et al.</i> (438)
Compositions and Sources of Summertime Dicarboxylic Acids and Related SOA in PM _{2.5} from Mt. Taishan	MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, LIU Xiao-di, <i>et al.</i> (445)
Variation Characteristics and Health Risk Assessment of BTEX in the Atmosphere of Northern Suburb of Nanjing	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, WANG Jian-yu, <i>et al.</i> (453)
Inventory and Environmental Impact of VOCs Emission from Anthropogenic Source in Chang-Zhu-Tan Region	YOU Xiang-yu, LUO Da-tong, LIU Zhan, <i>et al.</i> (461)
Characteristics of Methane Emission from Urban Traffic in Nanjing	ZHANG Xue, HU Ning, LIU Shou-dong, <i>et al.</i> (469)
Variations in Aerosol Optical Depth over Three Northeastern Provinces of China, in 2003-2014	ZHANG Chen-he, ZHAO Tian-liang, WANG Fu, <i>et al.</i> (476)
Variation Analysis of Daily PM _{2.5} Concentrations Based on Boosted Regression Tree: A Case Study in Changzhou	GE Yue, WANG Ming-xin, SUN Xiang-wu, <i>et al.</i> (485)
Characteristics of Mercury Emissions from Coal-fired Power Plants in Chongqing	ZHANG Cheng, ZHANG Ya-hui, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (495)
Possible Sources of PCDD/Fs in Atmosphere of a Certain District in Guangdong	FU Jian-ping, HAN Jing-lei, YU Xiao-wei, <i>et al.</i> (502)
Sources and Pollution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes and Conditional Pathogenic Bacteria in Concentrated Poultry Feeding Operations	GAO Min, QIU Tian-lei, QIN Yu-cheng, <i>et al.</i> (510)
Distribution and Burial Characteristics of Nitrogen Forms in Sediment of Dianchi Lake During Last Century	WU Ya-lin, LI Shuai-dong, JIANG Jun-wu, <i>et al.</i> (517)
Temporal and Spatial Variations of Dissolved Inorganic Carbon and Its Stable Isotopic Composition in the Surface Stream of Karst Groundwater Recharge	LI Li, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (527)
Succession Pattern of Phytoplankton of Daning River in the Three Gorges Reservoir and Its Driving Factors	ZHANG Jia-lei, ZHENG Bing-hui, LIU De-fu, <i>et al.</i> (535)
Response of the Water Quality of a Stratified Reservoir to an Extreme El Niño Event During Summer	QIU Xiao-peng, HUANG Ting-lin, ZENG Ming-zheng, <i>et al.</i> (547)
Effect of Coupling Process of Wetting-Drying Cycles and Seasonal Temperature Increasing on Sediment Nitrogen Minerization in the Water Level Fluctuating Zone	LIN Jun-jie, LIU Dan, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (555)
Photo-induced Phosphate Release from Organic Phosphorus Decomposition Driven by Fe(III)-oxalate Complex in Lake Water	JIANG Yong-can, PENG Yun-xiao, LIU Guang-long, <i>et al.</i> (563)
Preparation and Phosphorus Removal Mechanism of Highly Efficient Phosphorus Adsorbent Mg/Al-LDO	WANG Wei-dong, HAO Rui-xia, ZHANG Xiao-xian, <i>et al.</i> (572)
Efficiency and Mechanism of Nitrogen and Phosphorus Removal in Modified Zeolite Wetland	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Le-zhong, <i>et al.</i> (580)
Repression of Nitrogen and Phosphorus Release from Lakeshore Sediment by Five Littoral-zone Plants	YAO Cheng, HU Xiao-zhen, LU Shao-yong, <i>et al.</i> (589)
Simulated Desorption Kinetics of Lead by the Dominant Plant Roots Released Low Molecular Weight Organic Acids from the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	HE Yuan-jie, LIU Jiang, JIANG Tao, <i>et al.</i> (600)
Experimental Research of Hg ²⁺ Removal by TiO ₂ /Bentonite Composite	TANG Xing-ping, ZHOU Xiong, ZHANG Jin-yang, <i>et al.</i> (608)
Impact of Ammonia and H ₂ O ₂ on Bromate and Disinfection By-products Control	WANG Yong-jing, DU Xu, JIN Meng, <i>et al.</i> (616)
Influencing Factors of Bacterial Activity in Water Distribution Networks	WANG Xiao-dan, ZHAO Xin-hua, <i>et al.</i> (622)
Adsorptive Remediation of Cr(VI) Contaminated Groundwater with Chemically Synthesized Schwertmannite	ZHU Li-chao, LIU Yuan-yuan, LI Wei-min, <i>et al.</i> (629)
Characteristics and Mechanism of Hybrid Ozonation-Coagulation Process in Wastewater Reclamation	HOU Rui, JIN Xin, JIN Peng-kang, <i>et al.</i> (640)
Nitrogen Removal Effect and Conversion Characteristics of Nitrous Oxide in Single-stage and Multi-stage A/O Processes	GUO Chang-zi, ZHANG Feng-yan, LIU Fu-yu, <i>et al.</i> (647)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX with Different Organic Carbon Sources	GUAN Yong-jie, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (654)
Operational Performance and Microbial Community Structure in a Completely Mixed Aeration System	WANG Shuo, XU Qiao, ZHANG Guang-sheng, <i>et al.</i> (665)
Start-up of Combined Floc-granule CANON Process and the Effects of SRT on Reactor Performance	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> (672)
Effects of Free Ammonia Regulation on the Performance of High Solid Anaerobic Digesters with Dewatered Sludge	DAI Xiao-hu, HE Jin, YAN Han, <i>et al.</i> (679)
Highly Efficient Bioflocculation of Microalgae Using <i>Mucor circinelloides</i>	GU Qiong, JIN Wen-biao, CHEN Yuan-qing, <i>et al.</i> (688)
Effect of Zero Valent Iron on the Decline of Tetracycline Resistance Genes and Class 1 Integrons During Thermophilic Anaerobic Digestion of Sludge	WEI Xin, XUE Shun-li, YANG Fan, <i>et al.</i> (697)
Concentration, Sources and Ecological Risks of PAHs of Different Land Use Types in Shenfu New City	WANG Jing, LIU Ming-li, ZHANG Shi-chao, <i>et al.</i> (703)
Compositions, Sources and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Dusts from Driving-schools in a City of Henan Province, China	CHEN Yi-nan, MA Jian-hua, DUAN Hai-jing, <i>et al.</i> (711)
Remediation of Decabromodiphenyl Ether Contaminated Sediment Through Plant Roots Enhanced by Exogenous Microbes	YANG Lei-feng, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (721)
Impacts of Bioremediation on Microbial Communities and Different Forms of Nitrogen in Petroleum Contaminated Soil	YE Xi-qiong, WU Man-li, CHEN Kai-li, <i>et al.</i> (728)
Effects of <i>Rhodopseudomonas palustris</i> PSB06 on Pepper Rhizosphere Microbial Community Structure	LUO Lu-yun, JIN De-cai, ZUO Hui, <i>et al.</i> (735)
Effect of Reclaimed Water on Bacterial Community Composition and Function in Urban River Sediment	DI Yan-ming, WANG Guang-xuan, HUANG Xing-ru, <i>et al.</i> (743)
Effects of Different Vegetation Types and Reclamation Years on Soil Bacterial Community Structure in Reclaimed Mine Areas	HE Long, LI Yan-qin, LI Bin-chun, <i>et al.</i> (752)
Characteristic of Abundances and Diversity of Carbon Dioxide Fixation Microbes in Paddy Soils	LIU Qiong, WEI Xiao-meng, WU Xiao-hong, <i>et al.</i> (760)
Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components: Influence on the Composition and Properties of Humic Substances	ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, <i>et al.</i> (769)
Straw Composts with Composite Inoculants and Their Effects on Soil Carbon and Nitrogen Contents and Enzyme Activity	NIE Wen-han, QI Zhi-ping, FENG Hai-wei, <i>et al.</i> (783)
Comparative Analysis on Effect of Wheat Straw and Its Biochar Amendment on Net Global Warming Potential Under Wheat-Maize Rotation Ecosystem in the Guanzhong Plain	CHENG Gong, CHEN Jing, LIU Jing-jing, <i>et al.</i> (792)
Isolation and Identification of a Chlorobenzene-degrading Bacterium and Its Degradation Characteristics	YE Jie-xu, LIN Tong-hui, LUO Yu-hao, <i>et al.</i> (802)
Isolation, Identification and Metabolic Characteristics of a Heterotrophic Denitrifying Sulfur Bacterial Strain	TAN Wen-bo, MA Xiao-dan, HUANG Cong, <i>et al.</i> (809)
Effects of Continuous Application of Sewage Sludge Compost on Heavy Metals Accumulation and Mobility Characteristics in Soil Profile and on Heavy Metals Uptake of Wheat	SUN Na, SHANG He-ping, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (815)
Effects of Nitrogen Application on Selenium Uptake, Translocation and Distribution in Winter Wheat	CHEN Yu-peng, PENG Qin, LIANG Dong-li, <i>et al.</i> (825)
Accumulation and Biotransformation in Typical Freshwater Algae Species Influenced by Titanium Dioxide Nanoparticles Under Long-term Exposure	LI Jin-li, WANG Zhen-hong, YAN Ya-meng, <i>et al.</i> (832)
Sorption of <i>p</i> -Nitrophenol by Biochars of Corn cob Prepared at Different Pyrolysis Temperatures	MA Feng-feng, ZHAO Bao-wei, <i>et al.</i> (837)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 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)

2017年2月15日 第38卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 38 No. 2 Feb. 15, 2017

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	北京宝昌彩色印刷有限公司	Printed	by	Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd.
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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: 140.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人

ISSN 0250-3301



9 770250 330172