

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

PM_{2.5}污染对我国健康负担和经济损失的影响

李勇, 廖琴, 赵秀阁, 白云, 陶燕

PM_{2.5}

• 中风

PM_{2.5}控制目标
健康经济效益

• 冠心病

• 呼吸系统疾病

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年4月

第42卷 第4期
Vol.42 No.4

目次

京津冀及周边地区秋冬季大气污染物排放变化因素解析	唐倩, 郑博, 薛文博, 张强, 雷宇, 贺克斌 (1591)
珠江三角洲大气光化学氧化剂(O_3)与 $PM_{2.5}$ 复合超标污染特征及气象影响因素	颜丰华, 陈伟华, 常鸣, 王伟文, 刘永林, 钟部卿, 毛敬英, 杨士士, 王雪梅, 刘焯芳 (1600)
广州市臭氧污染溯源:基于拉格朗日光化学轨迹模型的案例分析	裴成磊, 牟江山, 张英南, 申恒青, 陈玉茹, 黄杰生, 丁浩然, 李成柳 (1615)
运城秋冬季大气细粒子化学组成特征及来源解析	赵清, 李杏茹, 王国选, 张兰, 杨阳, 刘永桥, 孙宁宁, 黄禹, 雷文凯, 刘新罡 (1626)
降雪后24 h内大气中多环芳烃的变化规律	范慧泽, 祝富杰, 胡鹏持, 马万里 (1636)
道路扬尘中 $PM_{2.5}$ 粒度乘数的测定方法及特征	李冬, 陈建华, 张月帆, 高忠阳, 高健, 张凯, 竹双 (1642)
铸造行业挥发性有机物排放成分谱及影响	高爽, 李时蓓, 伯鑫, 李厚宇, 舒木水, 谈默, 屈加豹, 雷团团 (1649)
燃煤电厂和垃圾焚烧电厂燃烧产物中卤代多环芳烃的赋存特征和毒性风险	倪秀峰, 王儒威, 蔡飞旋, 蔡家伟 (1660)
兰州市春季微生物气溶胶浓度、粒径及细菌群落结构分布特性	赵炜, 李杰, 谢慧娜, 张莉红, 王亚娥 (1668)
大气污染排放格局优化方法及案例	李敏辉, 廖程浩, 常树诚, 张永波, 杨柳林, 曾武涛 (1679)
$PM_{2.5}$ 污染对我国健康负担和经济损失的影响	李勇, 廖琴, 赵秀阁, 白云, 陶燕 (1688)
基于多同位素的不同土地利用区域水体硝酸盐源解析	金赞芳, 胡晶, 吴爱静, 李光耀, 张文辽, 李非里 (1696)
新疆叶尔羌河流域地表水水化学特征及控制因素	张杰, 周金龙, 曾妍妍, 涂治, 纪媛媛, 孙英, 雷米 (1706)
漓江流域水体中重金属污染特征及健康风险评价	黄宏伟, 肖河, 王敦球, 席北斗, 孙晓杰, 李洁月, 李向奎 (1714)
近20年来鄱阳湖流域泛滥平原沉积物微量元素含量与污染变化	李括, 杨柯, 彭敏, 刘飞, 杨峥, 赵传冬, 成杭新 (1724)
汾河流域浅层地下水水化学和氢氧稳定同位素特征及其指示意义	刘鑫, 向伟, 司炳成 (1739)
会仙岩溶湿地地下水主要离子特征及成因分析	李军, 邹胜章, 赵一, 赵瑞科, 党志文, 潘民强, 朱丹尼, 周长松 (1750)
贵州威宁草海流域地下水水化学特征及无机碳通量估算	曹星星, 吴攀, 杨诗笛, 刘闪, 廖家豪 (1761)
辽宁典型海域表层海水中在用化学农药浓度水平与潜在生态风险	杜静, 胡超魁, 解怀君, 田甲申, 李爱, 谢晴, 吴金浩, 宋伦 (1772)
辽河流域土壤中微(中)塑料的丰度、特征及潜在来源	韩丽花, 徐笠, 李巧玲, 陆安祥, 殷敬伟, 田佳宇 (1781)
津冀辽地区典型湖库沉积物PAHs污染特征及来源解析	吴鹏, 鲁逸人, 李慧, 郑天娇子, 程云轩, 焦立新 (1791)
环太湖河流及湖体中有机磷酸酯的污染特征和风险评价	张文萍, 张振飞, 郭昌胜, 吕佳佩, 邓洋慧, 张恒, 徐建 (1801)
太湖表层水体典型抗生素时空分布和生态风险评价	丁剑楠, 刘舒娇, 邹杰明, 石溪哲, 邹华, 史红星 (1811)
淮河流域南四湖可挥发性有机物污染特征及风险评价	程云轩, 高秋生, 李捷, 李慧, 吴鹏, 焦立新 (1820)
三亚河沉积物PAHs和PCBs的分布、来源及风险评价	詹咏, 韦婷婷, 叶汇彬, 董滨, 张领军, 黄远东 (1830)
三峡库区非点源污染氮磷负荷时空变化及其来源解析	李明龙, 贾梦丹, 孙天成, 褚琳, 李朝霞 (1839)
反硝化细菌、硝酸钙和锆改性沸石联用对底泥中氮磷迁移转化的影响及硝态氮释放风险评估	辛慧敏, 李建伟, 詹艳慧 (1847)
锁磷剂联合好氧反硝化菌修复富营养化水体	李炳堂, 周志勤, Ravi Naidu, 胡智泉, 郭大滨, 陈嘉鑫 (1861)
太湖蓝藻胞内有机质的微生物降解	张巧颖, 孙伟, 杜瑛珣, 巩小丽 (1870)
青藏高原拉萨河流域附石藻类群落结构特征及其驱动因子分析	魏俊伟, 李鸿然, 汪兴中, 齐文华, 汪洋, 赵彬洁, 谭香, 张全发 (1879)
基于EEMs与UV-vis分析苏州汛期景观河道中DOM光谱特性与来源	何杰, 朱学惠, 魏彬, 李学艳, 汤如涛, 林欣, 周飞, 司壮壮 (1889)
老化前后轮胎磨损微粒与聚氯乙烯微粒对抗生素的吸附-解吸行为	范秀磊, 邹峰峰, 刘加强, 李莹, 刘强, 侯俊 (1901)
磁性铁基改性生物炭去除水中氨氮	王芳君, 桑倩倩, 邓颖, 赵元添, 杨娅, 陈永志, 马娟 (1913)
城市污水处理厂进水氨氧化菌对活性污泥系统的季节性影响	于莉芳, 汪宇, 滑思思, 李韧, 张兴秀, 惠晓飞 (1923)
基于粒径分化的厌氧氨氧化污泥性能与微生物多样性分析	王晓瞳, 杨宏 (1930)
ClO_2 消毒工艺对污水处理厂出水超级耐药基因的影响	程春燕, 李海北, 梁永兵, 师丹阳, 陈郑珊, 杨栋, 焦巧瑞, 邵一帆, 李君文, 金敏 (1939)
微塑料PES与2,4-DCP复合污染对厌氧污泥胞外聚合物与微生物群落的影响	林旭萌, 宿程远, 吴淑敏, 黄嫒, 邓雪, 林香凤, 黄尊, 魏佳林 (1946)
城镇污水处理厂污泥泥质监测及资源化风险评价	李娟, 李金香, 杨妍妍 (1956)
气候变暖对冻结期黑土碳氮循环关键过程及指标的影响	王子龙, 刘传兴, 姜秋香, 李世强, 柴迅 (1967)
沼液秸秆联用对滨海围垦田土壤重金属迁移及形态变化的影响	王伟, 周珺楠, 汤逸帆, 申建华, 韩建刚 (1979)
地块尺度城市土地质量地球化学调查方法:以雄安新区起步区为例	周亚龙, 郭志娟, 刘飞, 韩伟, 孔牧, 赵传冬, 刘爱涛, 彭敏, 王乔林, 王成文 (1989)
雄安新区农田土壤-农作物系统重金属潜在生态风险评估及其源解析	周亚龙, 杨志斌, 王乔林, 王成文, 刘飞, 宋云涛, 郭志娟 (2003)
地质背景农田土壤下不同水稻品种对Cd的累积特征及影响因素	代子雯, 方成, 孙斌, 魏志敏, 胡锋, 李辉信, 徐莉 (2016)
不同外源硒对镉污染土壤中小白菜生长及镉吸收的影响	刘杨, 齐明星, 王敏, 刘娜娜, Pornpimol Kleawsampanjai, 周菲, 翟辉, 王梦柯, 任蕊, 梁东丽 (2024)
影响不同农作物镉富集系数的土壤因素	陈洁, 王娟, 王怡雯, 姚启星, 苏德纯 (2031)
Cd胁迫下不同外源植物激素对水稻幼苗抗氧化系统及Cd吸收积累的影响	张盛楠, 黄益宗, 李颜, 保琼莉, 黄永春 (2040)
不同有机物料对水稻根表铁膜及砷镉吸收转运的影响	李开叶, 赵婷婷, 陈佳, 赵秀兰 (2047)
铜尾矿坝及其周边土壤真菌群落结构与功能多样性	陈建文, 张红, 李君剑, 刘勇 (2056)
微生物群落驱动AM真菌、生物炭及联合改良沙化土壤作用潜力	张哲超, 杨久扬, 郝百惠, 郝利君, 罗俊清, 李雪, 刁风伟, 张璟霞, 郭伟 (2066)
动物粪便施肥措施促进耐药基因在粪便-土壤-蔬菜之间的散播	张红娜, 董梦洁, 周玉法, 孙佳欣, 常美洁, 翟真真 (2080)
区域水生态文明建设绩效评价及障碍诊断模型的建立与应用	万炳彤, 鲍学英, 赵建昌, 李爱春 (2089)
《环境科学》征订启事(1738) 《环境科学》征稿简则(1790) 信息(1860, 1878, 1900)	

不同外源硒对镉污染土壤中小白菜生长及镉吸收的影响

刘杨¹, 齐明星¹, 王敏¹, 刘娜娜¹, Pornpimol Kleawsampanjai¹, 周菲¹, 翟辉¹, 王梦柯¹, 任蕊², 梁东丽^{1,3,*}

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100; 2. 陕西省水工环地质调查中心, 西安 710068; 3. 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 杨凌 712100)

摘要: 为探究不同外源硒对镉的解毒作用的差异, 并为土壤镉污染控制与农作物安全生产提供科学依据. 采用土培盆栽试验, 对比了不同施用量(0、0.5、1.0和2.5 mg·kg⁻¹)的亚硒酸盐和硒酸盐施入天然镉污染土壤, 对小白菜生长(根长、株高、生物量和光合指标)及镉吸收、转运的影响. 结果表明, 低硒处理(≤ 1.0 mg·kg⁻¹)对镉的解毒作用优于高硒处理(2.5 mg·kg⁻¹), 亚硒酸盐对镉的解毒作用大于硒酸盐. 其中, 外源施入 ≤ 1.0 mg·kg⁻¹的亚硒酸盐和硒酸盐均提高了小白菜的SPAD值、净光合速率、气孔导度、胞间CO₂浓度及生物量和株高, 且以1.0 mg·kg⁻¹亚硒酸盐处理的效果最为显著(胞间CO₂浓度除外); 而高硒处理小白菜的各项光合指标均显著低于低硒处理(蒸腾速率除外, $P < 0.05$). 与未施硒处理(对照)相比, 各硒处理均降低了小白菜对镉的吸收. 其中, 施入1.0 mg·kg⁻¹的亚硒酸盐和硒酸盐使得小白菜地上部的镉含量较对照处理分别显著降低了40.0%和20.5% ($P < 0.05$), 但当施硒量为2.5 mg·kg⁻¹时两种外源硒均促进了镉向地上部转运, 使更多的镉累积在小白菜的地上部. 总之, 施入适量外源硒对土壤镉有一定的解毒作用, 表现为小白菜生物量的提高和镉的积累下降. 推荐施用1.0 mg·kg⁻¹的亚硒酸盐用于镉污染土壤中镉的控制及安全利用.

关键词: 镉; 污染土壤; 外源硒; 小白菜; 光合作用; 转运

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)04-2024-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.202009017

Effects of Different Exogenous Selenium Species Application on Growth and Cadmium Uptake of Pak Choi in Cadmium Contaminated Soil

LIU Yang¹, QI Ming-xing¹, WANG Min¹, LIU Na-na¹, Pornpimol Kleawsampanjai¹, ZHOU Fei¹, ZHAI Hui¹, WANG Meng-ke¹, REN Rui², LIANG Dong-li^{1,3,*}

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Shaanxi Hydrogeological Engineering Geology and Environment Geology Survey Center, Xi'an 710068, China; 3. Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling 712100, China)

Abstract: This study explored the discrepancy in the detoxification effects of different exogenous selenium (Se) species in cadmium (Cd)-contaminated soil to provide a scientific basis for the control of Cd pollution in the soil and the safe production of crops. A pot experiment was conducted to compare the effects of different concentrations (0, 0.5, 1.0, and 2.5 mg·kg⁻¹) of selenite and selenate on the growth (root length, shoot height, biomass, and photosynthetic parameters), uptake, and translocation of Cd on pak choi in Cd-contaminated soil. The results indicated that the detoxification effect of a low Se concentration (≤ 1.0 mg·kg⁻¹) treatment on Cd was better than that with a high Se concentration (2.5 mg·kg⁻¹) treatment, and the selenite treatment demonstrated a greater detoxification effect on Cd than the corresponding selenate treatment. Meanwhile, the application of low-concentration selenite and selenate both increased the SPAD value, P_n , G_s , C_i , biomass, and shoot length of the pak choi, and the 1.0 mg·kg⁻¹ selenite treatment had the most significant ($P < 0.05$) effect (except C_i). Nevertheless, the photosynthetic parameters of the pak choi under the high-concentration Se were significantly lower than those under the low Se concentration treatment (except T_r , $P < 0.05$). Compared with the treatment without Se (control), the uptake of Cd in the pak choi was reduced under different Se treatments. Compared with the control, the Cd concentration in the shoots of the pak choi treated with 1.0 mg·kg⁻¹ of selenite and selenate decreased by 40.0% and 20.5% ($P < 0.05$), respectively. In addition, the translocation of Cd from the root to the shoot was significantly reduced under the 0.5 mg·kg⁻¹ selenate treatment, while the high-concentration treatments of either exogenous Se promoted the translocation of Cd. Overall, applying the appropriate amount of exogenous Se could promote the photosynthesis and biomass of pak choi, and reduce the accumulation of Cd in pak choi. Therefore, the 1.0 mg·kg⁻¹ selenite treatment is recommended for the control and safe utilization of Cd in Cd-contaminated soil.

Key words: cadmium; contaminated soil; exogenous selenium; pak choi; photosynthesis; translocation

镉是环境中毒性较强的重金属元素之一, 具有易移动和难降解等特点^[1]. 据统计, 我国农田镉污染土壤面积超过28万hm², 镉含量超标的农产品每年高达150万t^[2,3]. 镉被植物根系吸收后会破坏植物体内的营养平衡, 降低与叶绿素合成相关的酶的

收稿日期: 2020-09-02; 修订日期: 2020-09-24

基金项目: 陕西省地质调查院公益性地质调查项目(20180307); 国家自然科学基金项目(41571454)

作者简介: 刘杨(1995~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤环境化学, E-mail: hideyyy@nwsuaf.edu.cn

* 通信作者, E-mail: dliang@nwsuaf.edu.cn

活性,破坏叶绿体的结构,使叶绿素含量降低^[4,5],进而导致光合速率下降,最终抑制植物生长^[6]。此外,镉还会降低植物对水分的吸收,导致气孔导度降低, CO_2 的固定过程受阻,净光合速率也随之下降,进而导致作物产量与品质的下降^[7,8]。而农产品中镉的残留和富集则会通过食物链危及人体健康^[9]。因此,土壤镉污染防治是目前亟待解决的重要的土壤环境问题之一。

硒是人体和动物必需的微量营养元素^[10,11]。适量的硒可以通过调节活性氧代谢,从而减轻重金属胁迫对植物产生的氧化应激反应^[12,13]。硒还可以通过调节光合系统和修复受损细胞来减轻重金属的毒性^[14]。Sun 等^[15]的研究发现,施入硒能够减缓镉对黄瓜光合作用的抑制,提高植物的净光合速率。Zhang 等^[16]的研究却发现,当施硒量 $> 50 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ 反而降低了镉污染土壤中水稻的净光合速率、蒸腾速率和胞间 CO_2 浓度。由此可见,外源硒对植物镉胁迫下光合作用的影响不尽相同,有必要进一步查明镉胁迫下植物对不同含量外源硒的响应。

土壤中的亚硒酸盐和硒酸盐是植物吸收硒的主要形式^[17]。且适量的两种硒均能降低植物对镉的积累,但现有的研究结果多为单一施入硒酸盐或亚硒酸盐^[7,18],对不同种类外源硒对植物镉的解毒作用尚未见系统报道。小白菜常被用作重金属污染相关研究的指示作物,且作为十字花科植物具有较强的富硒能力,也常被用于富硒蔬菜的研究^[19]。因此,本文采用盆栽试验,以天然镉污染土壤为供试土壤,小白菜为研究对象,探究不同外源硒对镉胁迫下小白菜生长和光合作用及对镉吸收和转运的影响,通过寻求适宜的缓解镉毒害的外源硒种类及施硒量,以期土壤镉污染控制与农作物安全生产提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤为西安某区的镉污染土壤(0 ~ 20 cm)。土壤自然风干,过 5 mm 筛供盆栽试验使用,并过 0.1、0.25 和 1 mm 筛用于土壤理化性质的测定。测定结果为: pH 8.14; 阳离子交换量 $13.88 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$; 碳酸钙 $27.99 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 电导率 $115 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$; 有机质 $15.83 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 无定型铁 $0.92 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 游离态铁 $0.92 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。土壤总镉为 $5.36 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,总硒为 $0.37 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

小白菜种子由西北农林科技大学种子公司提供。外源硒为亚硒酸钠(Na_2SeO_3)和硒酸钠(Na_2SeO_4),均购自天津化学试剂厂。

1.2 试验设计

本研究采用盆栽试验,将供试土壤装入塑料花盆(直径 23 cm、高 16.5 cm,每盆装土 5 kg),然后将亚硒酸钠或硒酸钠以溶液的形式均匀喷入土壤中。两种外源硒的施用量为 0、0.5、1 和 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[20],共 7 个处理,每个处理重复 3 次,共 21 盆。外源硒施入土壤后平衡 21 d^[21],期间保持土壤水分含量为田间持水量的 70%。

平衡结束后,每盆施入氮肥($150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)和磷肥($80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),并浇水至 100% 田间持水量后播种,种植前小白菜种子用 0.5% 次氯酸钠溶液浸泡 10 min 后用去离子水清洗 3 次。每盆播种 15 粒。作物出苗 7 d 后间苗,10 d 后定苗 5 株。小白菜生长期,保持土壤湿度为田间持水量的 70%,并于播种后的第 35 d 收获。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 小白菜根长、株高和生物量

收获后的小白菜用自来水、蒸馏水洗涤 3 次,吸水纸吸干水分,分为地上部和地下部。并测量其根长和株高。后将其于 95°C 下杀青 30 min, 50°C 烘至恒重并称重,烘干的样品用球磨机研磨后密封储存备用。

1.3.2 小白菜 SPAD 值及光合指标

作物收获前,于 08:30 ~ 11:30 使用 SPAD-502 叶绿素仪测定叶绿素 (SPAD),用便携式光合速率测定仪 (LI-6400XT, 美国) 测定同一叶位 (第三片展开叶) 叶片的光合参数,包括:净光合速率 (P_n)、气孔导度 (G_s)、胞间 CO_2 浓度 (C_i) 和蒸腾速率 (T_r)。

1.3.3 小白菜镉含量

将烘干后的样品用 4:1 (体积比) 的 HNO_3 - HClO_4 混酸进行消解,待消解完全后定容并过滤,使用电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS, 美国) 测定上清液镉含量。

1.3.4 土壤理化性质及镉和硒含量

土壤基本理化性质根据鲍士旦^[22]的方法测定,土壤总镉测定根据 GB/T 17141-1997 测定,土壤总硒含量根据 Peng 等^[23]的方法测定。

1.4 质量控制

为保证测定结果的准确性,在测定植物镉含量时,每批次试验均分别设置 3 个空白及重复。测定过程中使用小麦 (GBW10011) 作为质量控制样品,镉标准值为 $(18 \pm 4) \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,实测值为 $(20 \pm 3) \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.5 数据统计分析

使用转运系数 (TF) 反映小白菜根部吸收镉后转运到地上部的能力,计算公式 (1) 如下:

$$TF = Cd_{Shoot}/Cd_{Root} \quad (1)$$

式中, Cd_{Root} 和 Cd_{Shoot} 分别指小白菜地下部和地上部镉含量($mg \cdot kg^{-1}$).

采用 Excel 2013 进行数据处理及图表绘制, SPSS 22.0 进行统计分析, 单因素方差分析 (one-way ANOVA) 探究硒对各指标影响的差异显著性.

2 结果与分析

2.1 不同外源硒对镉污染土壤小白菜生长的影响

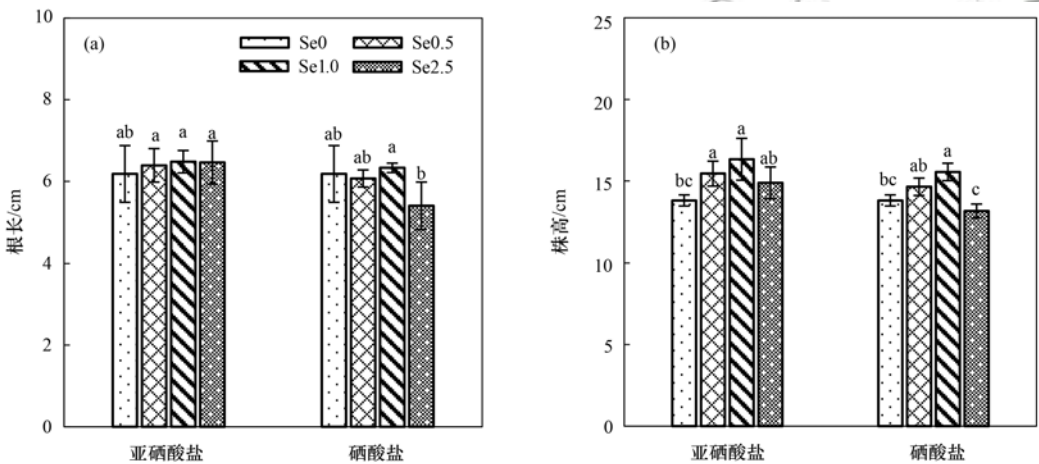
2.1.1 对根长和株高的影响

如图 1 所示, 与对照相比, 外源施硒对小白菜的根长均无显著影响 ($P > 0.05$), 但低硒处理 ($\leq 1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 却不同程度地增加了小白菜的株高. 且施硒量为 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时的促进作用最为显著, 亚硒酸盐和硒酸盐处理分别较对照提高了 18.3% 和

12.7%, 而高硒处理 ($2.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 则对其无显著影响 ($P > 0.05$). 由此可见, 镉胁迫下低硒处理促进了小白菜地上部的生长, 且亚硒酸盐的促进作用大于硒酸盐.

2.1.2 对生物量的影响

施硒对小白菜生物量的影响如图 2 所示. 与对照相比, 除 $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 亚硒酸盐处理使小白菜地下部生物量显著提高了 13% ($P < 0.05$), 其他处理对地下部生物量均无显著影响 ($P > 0.05$). 对小白菜地上部生物量而言, 除 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的硒酸盐处理对其无显著影响外 ($P > 0.05$), 其他处理的小白菜地上部生物量均有不同程度地提高, 且以 $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的亚硒酸盐处理促进作用最显著 ($P < 0.05$). 此外, 当施硒量相同时, 硒酸盐处理的小白菜地上部和地下部生物量低于相同的亚硒酸盐处理.



图例表示不同的施硒量 ($mg \cdot kg^{-1}$), 下同

图 1 镉污染土壤施硒对小白菜根长和株高的影响

Fig. 1 Effects of Se application on root length and shoot height of pak choi in Cd contaminated soil

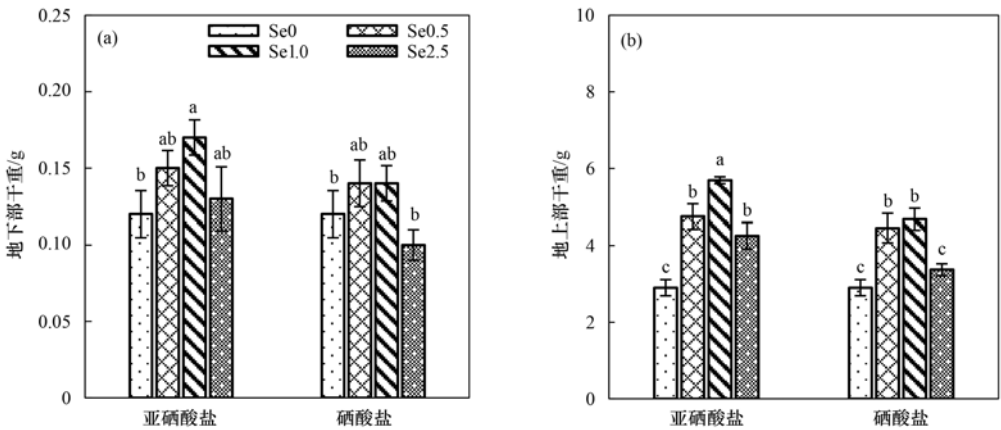


图 2 镉污染土壤施硒对小白菜生物量的影响

Fig. 2 Effects of Se application on biomass of pak choi in Cd contaminated soil

2.2 不同外源硒对镉污染土壤中小白菜光合指标的影响

施硒对小白菜光合作用的影响如表 1 所示. 与

对照相比, 无论亚硒酸盐处理还是硒酸盐处理, 小白菜的 SPAD 值随施硒量的增加均呈先增加后逐渐下降的规律. 此外, 低硒处理较对照显著提高了小白菜

的 SPAD 值,且亚硒酸盐处理对 SPAD 值增加 (30.4%~32.9%, $P<0.05$) 显著高于硒酸盐处理 (7.7%~15.4%, $P<0.05$). 但高硒处理对小白菜的 SPAD 值均无显著影响 ($P>0.05$). 随着亚硒酸盐和硒酸盐施用量的增加,小白菜的净光合速率、气孔导度和胞间 CO_2 浓度均呈先增加后降低的趋势,且施硒量为 $1.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时提高效果最为显著 (胞间 CO_2 浓度除外, $P<0.05$). 亚硒酸盐处理小

白菜叶片的净光合速率、气孔导度和胞间 CO_2 浓度与对照相比分别提高了 39.2%、121% 和 17.8%,而硒酸盐处理分别提高了 25.2%、67.5% 和 22.3%. 此外,叶片的蒸腾速率随亚硒酸盐施用量的升高而增加,且在施硒量为 $2.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时达到最高 (与未施硒相比升高了 31.8%); 与亚硒酸盐处理相反,硒酸盐处理小白菜叶片的蒸腾速率随施硒量的升高逐渐下降.

表 1 镉污染土壤施硒对小白菜 SPAD 值及叶片光合指标的影响¹⁾

Table 1 Effects of Se application on SPAD value and leaf photosynthetic parameters of pak choi in Cd contaminated soil						
处理	SPAD 值	净光合速率 (以 CO_2 计)	气孔导度 (以 H_2O 计)	胞间 CO_2 浓度 (以 CO_2 计)	蒸腾速率 (以 H_2O 计)	
		$/\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$	$/\text{mmol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$	$/\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$	$/\text{mmol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$	
亚硒酸盐	Se0	35.40±0.90d	4.92±0.16c	141.93±7.99d	322.14±17.18b	1.51±0.07b
	Se0.5	47.05±1.65a	5.60±0.21bc	172.56±3.82c	374.81±5.97a	1.75±0.20ab
	Se1.0	46.15±1.55a	6.85±0.69a	313.61±4.48a	379.08±17.86a	1.97±0.06a
	Se2.5	32.95±0.55d	4.81±0.34c	100.16±2.52e	231.35±22.11c	1.99±0.10a
硒酸盐	Se0	35.40±0.90d	4.92±0.16c	141.93±7.99d	322.14±17.18b	1.51±0.07b
	Se0.5	38.14±1.78c	5.13±0.48bc	145.08±4.93d	387.41±5.84a	1.54±0.05b
	Se1.0	40.87±1.70b	6.16±0.24a	237.70±9.07b	394.04±1.00a	1.21±0.13c
	Se2.5	33.80±0.90d	3.03±0.12d	90.72±1.76e	317.26±2.46b	0.75±0.09d

1) 数据为 3 个重复的平均值,所有处理之间的差异性比较结果用小写字母表示 ($P<0.05$),不同小写字母表示差异性显著

2.3 外源硒对镉污染土壤中小白菜镉吸收、转运的影响

施硒对小白菜地上、地下镉含量的影响如图 3 所示,小白菜地上部镉含量高于地下部. 与对照相比,施加亚硒酸盐显著降低了小白菜地下部和地上部的镉含量 ($P<0.05$). 其中,小白菜地下部镉含量随亚硒酸盐施用量的升高呈显著下降趋势 ($P<0.05$),并在亚硒酸盐为 $2.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时最低,较对照处理下降了 57%. 而小白菜地上部的镉含量随亚硒酸盐施入水平呈先降低,在 $1.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时达到最低而后升高的趋势. 与此不同,硒酸盐处理小白菜地上部镉含量在 $0.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理时达最低,而后随硒酸盐施用量的增加地上部镉含量呈上升趋势.

由以上可知,在镉胁迫下施用适量的亚硒酸盐和硒酸盐均可以降低小白菜对镉的吸收,且 $1.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的亚硒酸盐更能降低镉在小白菜地上部的积累.

TF 值用来评价植物将镉离子从地下部向地上部转移和富集的能力. TF 值越大,转运能力越强. 由图 3(c) 可知,对于亚硒酸盐,低硒处理对小白菜的 TF 值无显著影响 ($P>0.05$),但高硒处理显著提高了小白菜的 TF 值. 与此不同,施用 $0.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的硒酸盐显著降低了小白菜的 TF 值,而施用 1.0 和 $2.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的硒酸盐却显著提高了小白菜的 TF 值 ($P<0.05$). 由此可见,亚硒酸盐和硒酸盐对小白菜转运镉的影响存在差异.

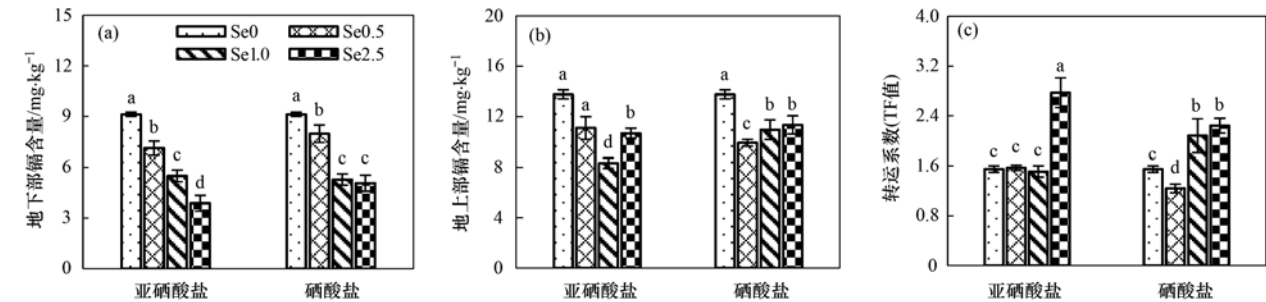


图 3 镉污染土壤施硒对小白菜镉吸收及转运的影响

Fig. 3 Effects of Se application on the uptake and translocation of pak choi in Cd contaminated soil

3 讨论

3.1 施硒对镉污染土壤中小白菜镉的解毒作用

本研究发现,外源施硒显著降低了小白菜根系

对镉的吸收[图 3(a)],且地下部镉含量与施硒量呈极显著负相关($P<0.01$,表 2),表明外源硒与土壤镉的相互作用降低了植物根系对镉的吸收. Zhang 等^[24]通过对玉米的研究也认为,土壤中的硒和镉能

够形成难以被植物吸收的 Cd-Se 复合物,进而抑制植物对镉的吸收. 本研究还发现,施入 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 硒酸盐显著降低了小白菜镉的 TF 值[图 3(c)],说明适量的外源硒可以通过抑制镉向地上部转运进而降低镉在可食部位的积累. Wan 等^[25]在碱性土壤中施入外源硒后发现镉在水稻地上部的积累降低. 这是由于镉被根系吸收后,通过质外体途径进入维管柱并向地上部运输^[26],而硒可以促进水稻根系内皮凯氏带的形成,阻断皮层与维管柱之间的质外体运输途径,进而减少了镉进入维管柱^[25].

生物量的变化通常是衡量植物对外界胁迫的耐性或者抗性的重要指标之一^[27]. 适量外源硒能缓解重金属对植物的毒害作用,提高重金属胁迫下作物的生物量^[28,29]. 本研究发现,无论亚硒酸盐还是硒酸盐,低硒处理不同程度地提高了小白菜地上部生物量和株高(图 1 和图 2),与 Wan 等^[30]的研究结果相一致,低硒处理小白菜地上部镉含量较对照显著下降了 $18\% \sim 40\%$ [图 3(b)]. 主要原因有以下两点:一方面,适量的硒可以降低植物体内活性氧的积累,改善营养平衡从而促进植物的生长^[12];另一方面,硒可以通过降低小白菜对镉的吸收,减轻镉产生的氧化胁迫,使镉胁迫导致的小白菜叶片的净光合速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度的下降得到缓解(表 1),并促进小白菜的生长.

植物的光合作用对重金属非常敏感,低含量的镉就能抑制水稻、玉米等植物的光合作用,使植物的生长受阻,生物量降低^[31,32]. Cd^{2+} 可以通过 Ca^{2+} 、

Mg^{2+} 、 Zn^{2+} 等离子的通道进入细胞或阻滞细胞通道,同时干扰其各项功能. 此外,镉还能抑制原叶绿素脂还原酶的活性,干扰叶片中叶绿素的合成^[33]. 本研究中,亚硒酸盐和硒酸盐施用量 $\leq 1.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时分别使小白菜的 SPAD 值提高了 $30.4\% \sim 32.9\%$ 和 $7.7\% \sim 15.5\%$ (表 1). 这可能是由于外源施硒后小白菜地上部的镉含量下降,减少了 Cd^{2+} 对 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Zn^{2+} 等离子的替代作用^[34,35]. 此外,本研究发现亚硒酸盐或硒酸盐 $\leq 1.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时能不同程度提高植物的净光合速率、气孔导度和胞间 CO_2 浓度(表 1),且小白菜的净光合速率、气孔导度和胞间 CO_2 浓度与叶片的镉含量呈负相关(表 2),这与 Gao 等^[7]的研究结果一致,即镉可以抑制植物的光合作用,而施硒后这种抑制作用得到缓解. 究其原因主要有以下两点:第一,适量的硒可以防止叶绿素降解并在一定程度上抵消镉的破坏效应^[6]. 本研究中发现适量的硒能够提高小白菜叶片硒含量(数据未给出)及 SPAD 值(表 1),且小白菜的 SPAD 值与净光合速率、气孔导度和胞间 CO_2 浓度呈显著正相关关系($P < 0.05$, 表 2),也进一步证明了硒可以通过提高叶绿素的含量而促进光合作用. 第二,硒能诱导光合作用相关蛋白的积累,这些蛋白可以介导电子转移,作为光受体或在叶绿体中的蛋白质生物合成中起作用,从而使镉胁迫下光合作用得到改善^[15],本研究中低硒处理小白菜叶片的净光合速率、气孔导度和胞间 CO_2 浓度均显著高于对照($P < 0.05$, 表 1)也印证了这一点.

表 2 小白菜的生长生理指标与施硒量和镉含量间的相关关系¹⁾

Table 2 Correlation between the growth physiological indices and selenium application rate and cadmium concentration of pak choi

指标	施硒量	SPAD 值	净光合速率	气孔导度	胞间 CO_2 浓度	蒸腾速率
亚硒酸盐	SPAD 值	0.40	1.00	0.58 *	0.74 **	0.87 **
	Cd_{Root}	-0.94 **	0.10	-0.12	-0.04	0.44
	Cd_{Shoot}	-0.48	-0.52	-0.57	-0.68 *	-0.22
硒酸盐	SPAD 值	-0.35	1.00	0.85 **	0.86 **	0.84 **
	Cd_{Root}	-0.83 **	-0.15	0.21	-0.15	-0.11
	Cd_{Shoot}	-0.34	-0.47	-0.10	-0.15	-0.63 *

1) * 表示在 95% 水平显著相关, ** 表示在 99% 水平显著相关; Cd_{Root} 为地下部镉含量, Cd_{Shoot} 为地上部镉含量

3.2 不同外源硒对镉的解毒作用的差异

虽然外源硒能够提高小白菜产量,并降低其地上部镉含量,但本研究中高硒处理的地上部的生物量和株高均低于低硒处理. 这是由于过量的硒非特异性地取代组织蛋白中的硫并形成硒代蛋氨酸和硒代半胱氨酸,干扰机体内正常的蛋白功能从而对植物造成毒性,并产生氧化应激作用造成的^[36,37]. 此外,过量的硒会损伤光合细胞器,与土壤中镉产生协同毒害作用^[28],对小白菜的光合作用产生抑制(表

1),进而导致小白菜生物量下降. Chang 等^[38]的研究发现,施用 $8.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的亚硒酸盐对水稻各部位镉含量降低程度显著大于 $1.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 而郭锋等^[39]的研究发现,在土壤镉含量为 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,添加 $< 2.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的亚硒酸盐后菠菜叶片的镉含量随施硒量的增加而降低,而当施硒量 $> 2.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时菠菜叶片镉含量却升高. 因此,在一定的施硒范围内,硒镉之间存在拮抗作用,且这个施硒范围因土壤条件、植物品种不同而异^[40].

在本研究中,高硒处理的亚硒酸盐和硒酸盐处理较对照处理小白菜镉的 TF 值显著增加[图 3(c)]. 由于植物体内存在积累和区隔化机制可以将根系吸收的重金属多数转运到地上部分然后对其进行解毒作用^[41]. 对于亚硒酸盐,为维持植物体内代谢物质的平衡,迫使镉向地上部转移分配促进植物本身的积累和区隔化机制进行解毒作用^[42]. 而硒酸盐本身就具有较强的向地上部分转运的能力^[20],因此可能带动镉向地上部分转运,但该机制还需进一步试验.

值得注意的是,当施硒量为 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,亚硒酸盐处理对小白菜生长、净光合速率的改善效果均优于相同处理的硒酸盐(图 1、图 2 和表 1),且亚硒酸盐对小白菜镉吸收的抑制作用大于硒酸盐(图 3),造成这一差异的原因有二:一是硒酸盐在土壤中移动性较大,而亚硒酸盐则更容易被土壤中的碳酸盐、铁锰氧化物、有机质等吸附^[23],从而使亚硒酸盐更多地残留在土壤中,更容易与镉形成难以被植物吸收的 Cd-Se 复合物. 二是亚硒酸盐和硒酸盐进入植物细胞后,硒酸盐的形态基本不发生改变,而亚硒酸盐则在根部被快速转化为硒代蛋氨酸、硒代半胱氨酸等有机硒^[43]. 镉进一步取代有机硒中的硒,形成镉的有机化合物,从而降低镉的毒性^[9]. 因此,在利用外源硒缓解镉对植物的毒害作用时要选取适宜的施用量和添加形态.

4 结论

(1)低硒处理($\leq 1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)能缓解镉对小白菜光合作用的胁迫,促进镉污染土壤中小白菜的生长,提高生物量.

(2)施硒可以降低小白菜各部位的镉含量,小白菜地上部的镉随施硒量的增加呈先降低后升高趋势,地下部则呈降低趋势,且亚硒酸盐的作用更强.

(3)推荐施用 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的亚硒酸盐来降低镉污染地区小白菜镉吸收或缓解镉对小白菜的毒性.

参考文献:

- [1] Treesubuntorn C, Dhurakit P, Khaksar G, et al. Effect of microorganisms on reducing cadmium uptake and toxicity in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, **25**(26): 25690-25701.
- [2] 彭鸥,李丹阳,刘寿涛,等. 镉胁迫对水稻生长发育的影响及伤流液与稻米镉含量的相关性研究[J]. 生态与农村环境学报, 2019, **35**(1): 76-82.
- Peng O, Li D Y, Liu S T, et al. Effects of cadmium stress on rice growth and correlation between bleeding sap and cadmium content in rice[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, **35**(1): 76-82.
- [3] 刘霄霏,李惠英,陈良,等. 外源硒对镉胁迫下黑麦草生长

和生理的影响[J]. 草地学报, 2020, **28**(1): 72-79.

- Liu X F, Li H Y, Chen L, et al. Effects of exogenous selenium on growth and physiology of ryegrass under cadmium stress[J]. Acta Agrestia Sinica, 2020, **28**(1): 72-79.
- [4] Qian H F, Li J J, Pan X J, et al. Photoperiod and temperature influence cadmium's effects on photosynthesis-related gene transcription in *Chlorella vulgaris* [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2010, **73**(6): 1202-1206.
- [5] Souza V L, De Almeida A A F, Lima S G C, et al. Morphophysiological responses and programmed cell death induced by cadmium in *Genipa americana* L. (Rubiaceae) [J]. Biometals, 2011, **24**(1): 59-71.
- [6] Liu W X, Shang S H, Feng X, et al. Modulation of exogenous selenium in cadmium-induced changes in antioxidative metabolism, cadmium uptake, and photosynthetic performance in the 2 tobacco genotypes differing in cadmium tolerance [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2015, **34**(1): 92-99.
- [7] Gao M, Zhou J, Liu H L, et al. Foliar spraying with silicon and selenium reduces cadmium uptake and mitigates cadmium toxicity in rice[J]. Science of the Total Environment, 2018, **631-632**: 1100-1108.
- [8] Wang Y, Jiang X, Li K, et al. Photosynthetic responses of *Oryza sativa* L. seedlings to cadmium stress: physiological, biochemical and ultrastructural analyses [J]. Biology of Metals, 2014, **27**(2): 389-401.
- [9] Ismael M A, Elyamine A M, Moussa M G, et al. Cadmium in plants: uptake, toxicity, and its interactions with selenium fertilizers[J]. Metallomics, 2019, **11**(2): 255-277.
- [10] Zhai H, Xue M Y, Du Z K, et al. Leaching behaviors and chemical fraction distribution of exogenous selenium in three agricultural soils through simulated rainfall [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, **173**: 393-400.
- [11] Zhou F, Yang W X, Wang M K, et al. Effects of selenium application on Se content and speciation in *Lentinula edodes* [J]. Food Chemistry, 2018, **265**: 182-188.
- [12] Lin L, Zhou W H, Dai H X, et al. Selenium reduces cadmium uptake and mitigates cadmium toxicity in rice [J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, **235-236**: 343-351.
- [13] Wu Z C, Wang F H, Liu S, et al. Comparative responses to silicon and selenium in relation to cadmium uptake, compartmentation in roots, and xylem transport in flowering Chinese cabbage (*Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* var. *utilis*) under cadmium stress [J]. Environmental and Experimental Botany, 2016, **131**: 173-180.
- [14] Feng R W, Wei C Y, Tu S X. The roles of selenium in protecting plants against abiotic stresses [J]. Environmental and Experimental Botany, 2013, **87**: 58-68.
- [15] Sun H Y, Wang X Y, Wang Y A, et al. Alleviation of cadmium toxicity in cucumber (*Cucumis sativus*) seedlings by the application of selenium [J]. Spanish Journal of Agricultural Research, 2016, **14**(4), doi: 10.5424/sjar/2016144-10008.
- [16] Zhang L H, Hu B, Li W, et al. OsPT2, a phosphate transporter, is involved in the active uptake of selenite in rice [J]. New Phytologist, 2014, **201**(4): 1183-1191.
- [17] Natasha, Shahid M, Niazi N K, et al. A critical review of selenium biogeochemical behavior in soil-plant system with an inference to human health [J]. Environmental Pollution, 2018, **234**: 915-934.
- [18] Sun H Y, Dai H X, Wang X Y, et al. Physiological and proteomic analysis of selenium-mediated tolerance to Cd stress in

- cucumber (*Cucumis sativus* L.) [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, **133**: 114-126.
- [19] 杜振宇, 史衍玺, 王清华. 蔬菜对硒的吸收及适宜补硒食用量[J]. *生态环境*, 2004, **13**(2): 230-231, 267.
- Du Z Y, Shi Y X, Wang Q H. Selenium uptake by vegetables and recommendation of edible amounts for selenium supplement [J]. *Ecology and Environment*, 2004, **13**(2): 230-231, 267.
- [20] 付冬冬, 段曼莉, 梁东丽, 等. 不同价态外源硒对小白菜生长及养分吸收的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, **17**(2): 358-365.
- Fu D D, Duan M L, Liang D L, *et al.* Effects of selenite and selenate on growth and nutrient absorption of pakchoi [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, **17**(2): 358-365.
- [21] Li J, Peng Q, Liang D L, *et al.* Effects of aging on the fraction distribution and bioavailability of selenium in three different soils [J]. *Chemosphere*, 2016, **144**: 2351-2359.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [23] Peng Q, Wang M K, Cui Z W, *et al.* Assessment of bioavailability of selenium in different plant-soil systems by diffusive gradients in thin-films (DGT) [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **225**: 637-643.
- [24] Zhang Z Z, Yuan L X, Qi S H, *et al.* The threshold effect between the soil bioavailable molar Se: Cd ratio and the accumulation of Cd in corn (*Zea mays* L.) from natural Se-Cd rich soils [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **688**: 1228-1235.
- [25] Wan Y N, Camara A Y, Yu Y, *et al.* Cadmium dynamics in soil pore water and uptake by rice: influences of soil-applied selenite with different water managements [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **240**: 523-533.
- [26] Lux A, Martinka M, Vaculík M, *et al.* Root responses to cadmium in the rhizosphere: a review [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2011, **62**(1): 21-37.
- [27] Rizwan M, Ali S, Rehman M Z U, *et al.* A critical review on the effects of zinc at toxic levels of cadmium in plants [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(7): 6279-6289.
- [28] Filek M, Keskinen R, Hartikainen H, *et al.* The protective role of selenium in rape seedlings subjected to cadmium stress [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2008, **165**(8): 833-844.
- [29] Huang B F, Xin J L, Dai H W, *et al.* Effects of interaction between cadmium (Cd) and selenium (Se) on grain yield and Cd and Se accumulation in a hybrid rice (*Oryza sativa*) System [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2017, **65**(43): 9537-9546.
- [30] Wan Y A, Yu Y, Wang Q, *et al.* Cadmium uptake dynamics and translocation in rice seedling: influence of different forms of selenium [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, **133**: 127-134.
- [31] Ekmekçi Y, Tanyolaç D, Ayhan B. Effects of cadmium on antioxidant enzyme and photosynthetic activities in leaves of two maize cultivars [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2008, **165**(6): 600-611.
- [32] Ying R R, Qiu R L, Tang Y T, *et al.* Cadmium tolerance of carbon assimilation enzymes and chloroplast in Zn/Cd hyperaccumulator *Picris divaricata* [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2010, **167**(2): 81-87.
- [33] 苏玲, 章永松, 林咸永, 等. 维管植物的镉毒和耐性机制 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2000, **6**(1): 106-112.
- Su L, Zhang Y S, Lin X Y, *et al.* Cadmium toxicity and tolerance in vascular plants [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2000, **6**(1): 106-112.
- [34] Noctor G, Veljovic-Jovanovic S, Driscoll S, *et al.* Drought and oxidative load in the leaves of C₃ plants: a predominant role for photorespiration? [J]. *Annals of Botany*, 2002, **89**(7): 841-850.
- [35] Sharma P, Jha A B, Dubey R S, *et al.* Reactive oxygen species, oxidative damage, and antioxidative defense mechanism in plants under stressful conditions [J]. *Journal of Botany*, 2012, **2012**, doi: 10.1155/2012/217037.
- [36] van Hoewyk D. A tale of two toxicities: malformed selenoproteins and oxidative stress both contribute to selenium stress in plants [J]. *Annals of Botany*, 2013, **112**(6): 965-972.
- [37] 覃思跃, 赵文龙, 李俊, 等. 硒与硫单一及交互作用对小白菜生长及硒生物有效性的影响 [J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(4): 1500-1507.
- Qin S Y, Zhao W L, Li J, *et al.* Single and combined effects of sulfate and selenate on growth and selenium bioavailability of pak choi [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(4): 1500-1507.
- [38] Chang H, Zhou X B, Wang W H, *et al.* Effects of selenium application in soil on formation of iron plaque outside roots and cadmium uptake by rice plants [J]. *Advanced Materials Research*, 2013, **750-752**: 1573-1576.
- [39] 郭锋, 樊文华, 冯两蕊, 等. 硒对镉胁迫下菠菜生理特性、元素含量及镉吸收转运的影响 [J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(2): 524-531.
- Guo F, Fan W H, Feng L R, *et al.* Effects of selenium (Se) on the physiological characteristics, element contents, uptake and transportation of Cd in spinach under Cd stress [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(2): 524-531.
- [40] 万亚男. 硒对水稻吸收、转运及累积镉的影响机制 [D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
- Wan Y N. Mechanisms of selenium influencing cadmium uptake, translocation and accumulation in rice [D]. Beijing: China Agricultural University, 2018.
- [41] 李影, 王友保. 4 种蕨类草本植物对 Cu 的吸收和耐性研究 [J]. *草业学报*, 2010, **19**(3): 191-197.
- Li Y, Wang Y B. Research on Cu uptake and tolerance of four pteridophyta plants [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2010, **19**(3): 191-197.
- [42] 胡斌, 王丹, 王松山, 等. 铜、硒复合污染对小白菜生长及金属吸收和转运的影响 [J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(9): 2033-2041.
- Hu B, Wang D, Wang S S, *et al.* Uptake and transport of exogenous Cu and Se in pak choi and their effects on growth [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, **31**(9): 2033-2041.
- [43] 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.

CONTENTS

Contributors to Air Pollutant Emission Changes in Autumn and Winter in Beijing-Tianjin-Hebei and Surrounding Areas	TANG Qian, ZHENG Bo, XUE Wen-bo, <i>et al.</i> (1591)
Characteristics and Meteorological Factors of Complex Nonattainment Pollution of Atmospheric Photochemical Oxidant (O_x) and $PM_{2.5}$ in the Pearl River Delta Region, China	YAN Feng-hua, CHEN Wei-hua, CHANG Ming, <i>et al.</i> (1600)
Source Apportionment of Ozone Pollution in Guangzhou; Case Study with the Application of Lagrangian Photochemical Trajectory Model	PEI Cheng-lei, MU Jiang-shan, ZHANG Ying-nan, <i>et al.</i> (1615)
Chemical Composition and Source Analysis of $PM_{2.5}$ in Yuncheng, Shanxi Province in Autumn and Winter	ZHAO Qing, LI Xing-ru, WANG Guo-xuan, <i>et al.</i> (1626)
Temporal Trend of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmosphere Within 24 Hours After Snowfall	FAN Hui-ze, ZHU Fu-jie, HU Peng-tuan, <i>et al.</i> (1636)
Determination Method and Characteristics of Particle Size Multiplier of $PM_{2.5}$ in Road Dust	LI Dong, CHEN Jian-hua, ZHANG Yue-fan, <i>et al.</i> (1642)
Source Profiles and Impact of VOCs Based on Production Processes in Foundry Industries	GAO Shuang, LI Shi-bei, BO Xin, <i>et al.</i> (1649)
Emission Characteristics and Toxicity Effects of Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Coal-Fired and Waste Incineration Power Plants	NI Xiu-feng, WANG Ru-wei, CAI Fei-xuan, <i>et al.</i> (1660)
Concentration and Particle Size Distribution Characteristics of Microbial Aerosol and Bacterial Community Structure During Spring in Lanzhou City, China	ZHAO Wei, LI Jie, XIE Hui-na, <i>et al.</i> (1668)
Optimization Method and Case Study of Air Pollution Emission Spatial Pattern	LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, CHANG Shu-cheng, <i>et al.</i> (1679)
Influence of $PM_{2.5}$ Pollution on Health Burden and Economic Loss in China	LI Yong, LIAO Qin, ZHAO Xiu-ge, <i>et al.</i> (1688)
Identify the Nitrate Sources in Different Land Use Areas Based on Multiple Isotopes	JIN Zan-fang, HU Jing, WU Ai-jing, <i>et al.</i> (1696)
Hydrochemical Characteristic and Their Controlling Factors in the Yarkant River Basin of Xinjiang	ZHANG Jie, ZHOU Jin-long, ZENG Yan-yan, <i>et al.</i> (1706)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Water of Lijiang River Basin	HUANG Hong-wei, XIAO He, WANG Dun-qiu, <i>et al.</i> (1714)
Changes in Concentrations and Pollution Levels of Trace Elements of Floodplain Sediments of Poyang Lake Basin in Recent Twenty Years	LI Kuo, YANG Ke, PENG Min, <i>et al.</i> (1724)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics in the Shallow Groundwater of the Fenhe River Basin and Indicative Significance	LIU Xin, XIANG Wei, SI Bing-cheng (1739)
Major Ionic Characteristics and Factors of Karst Groundwater at Huixian Karst Wetland, China	LI Jun, ZOU Sheng-zhang, ZHAO Yi, <i>et al.</i> (1750)
Hydrochemistry Characteristics and Estimation of the Dissolved Inorganic Carbon Flux in the Caohai Lake Wetland Catchment of Guizhou Province	CAO Xing-xing, WU Pan, YANG Shi-di, <i>et al.</i> (1761)
Concentration Levels and Potential Ecological Risks of Current Use Pesticides in the Surface Seawater of Typical Liaoning Sea Areas	DU Jing, HU Chao-kui, XIE Huai-jun, <i>et al.</i> (1772)
Levels, Characteristics, and Potential Source of Micro(meso)plastic Pollution of Soil in Liaohe River Basin	HAN Li-hua, XU Li, LI Qiao-ling, <i>et al.</i> (1781)
PAHs Pollution Characteristics and Source Analysis of Typical Lake and Reservoir Sediments in Jin-Ji-Liao Area	WU Peng, LU Yi-ren, LI Hui, <i>et al.</i> (1791)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Organophosphate Esters in Rivers and Water Body Around Taihu Lake	ZHANG Wen-ping, ZHANG Zhen-fei, GUO Chang-sheng, <i>et al.</i> (1801)
Spatiotemporal Distributions and Ecological Risk Assessments of Typical Antibiotics in Surface Water of Taihu Lake	DING Jian-nan, LIU Shu-jiao, ZOU Jie-ming, <i>et al.</i> (1811)
Characteristics of Volatile Organic Compounds Pollution and Risk Assessment of Nansi Lake in Huaihe River Basin	CHENG Yun-xuan, GAO Qiu-sheng, LI Jie, <i>et al.</i> (1820)
Distribution, Source, and Ecological Risk Evaluation of the PAHs and PCBs in the Sediments from Sanya River	ZHAN Yong, WEI Ting-ting, YE Hui-bin, <i>et al.</i> (1830)
Spatiotemporal Change and Source Apportionment of Non-point Source Nitrogen and Phosphorus Pollution Loads in the Three Gorges Reservoir Area	LI Ming-long, JIA Meng-dan, SUN Tian-cheng, <i>et al.</i> (1839)
Effect of the Combined Use of Denitrifying Bacteria, Calcium Nitrate, and Zirconium-Modified Zeolite on the Mobilization of Nitrogen and Phosphorus in Sediments and Evaluation of Its Nitrate-Nitrogen Releasing Risk	XIN Hui-min, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui (1847)
Combined Remediation of Eutrophic Water by Phoslock® and Aerobic Denitrifying Bacteria	LI Bing-tang, ZHOU Zhi-qin, Ravi Naidu, <i>et al.</i> (1861)
Biodegradation of Algae-derived Organic Matter (I-DOM) from Lake Taihu	ZHANG Qiao-ying, SUN Wei, DU Ying-xun, <i>et al.</i> (1870)
Structure Characteristics and Driving Variables of Epilithic Algae Community in Lhasa River Basin of Qinghai-Tibet Plateau	WEI Jun-wei, LI Hong-ran, WANG Xing-zhong, <i>et al.</i> (1879)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter from Landscape River During Flood Season in Suzhou Based on EEMs and UV-vis	HE Jie, ZHU Xue-hui, WEI Bin, <i>et al.</i> (1889)
Adsorption and Desorption Behaviors of Antibiotics on TWP and PVC Particles Before and After Aging	FAN Xiu-lei, ZOU Ye-feng, LIU Jia-qiang, <i>et al.</i> (1901)
Synthesis of Magnetic Iron Modifying Biochar for Ammonia Nitrogen Removal from Water	WANG Fang-jun, SANG Qian-qian, DENG Ying, <i>et al.</i> (1913)
Seasonal Effects of Influent Ammonia Oxidizing Bacteria of Municipal Wastewater Treatment Plants on Activated Sludge System	YU Li-fang, WANG Yu, HUA Si-si, <i>et al.</i> (1923)
Analysis of Performance and Microbial Diversity of ANAMMOX Sludge Based on Particle Size Differentiation	WANG Xiao-tong, YANG Hong (1930)
Effects of Chlorine Dioxide Disinfection on the Profile of the Super Antibiotic Resistance Genes in a Wastewater Treatment Plant	CHENG Chun-yan, LI Hai-bei, LIANG Yong-bing, <i>et al.</i> (1939)
Effects of PES and 2,4-DCP on the Extracellular Polymeric Substances and Microbial Community of Anaerobic Granular Sludge	LIN Xu-meng, SU Cheng-yuan, WU Shu-min, <i>et al.</i> (1946)
Characteristics of Sludge and Associated Risk Assessment of Urban Sewage Treatment Plants	LI Juan, LI Jin-xiang, YANG Yan-yan (1956)
Effects of Climate Warming on the Key Process and Index of Black Soil Carbon and Nitrogen Cycle During Freezing Period	WANG Zi-long, LIU Chuan-xing, JIANG Qiu-xiang, <i>et al.</i> (1967)
Effects of Combined Application of Biogas Slurry and Straw on the Migration and Fractions of Soil Heavy Metals in Rice-wheat Rotation System in Coastal Reclamation Areas	WANG Wei, ZHOU Jun-nan, TANG Yi-fan, <i>et al.</i> (1979)
Geochemical Survey Method of Land Quality in Land Parcel Scale City: A Case Study of the Initial Area of the Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, GUO Zhi-juan, LIU Fei, <i>et al.</i> (1989)
Potential Ecological Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Soil-crop System in Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, YANG Zhi-bin, WANG Qiao-lin, <i>et al.</i> (2003)
Cadmium Accumulation Characteristics and Impacting Factors of Different Rice Varieties Under Paddy Soils with High Geological Backgrounds	DAI Zi-wen, FANG Cheng, SUN Bin, <i>et al.</i> (2016)
Effects of Different Exogenous Selenium Species Application on Growth and Cadmium Uptake of Pak Choi in Cadmium Contaminated Soil	LIU Yang, QI Ming-xing, WANG Min, <i>et al.</i> (2024)
Influencing Factors of Cadmium Bioaccumulation Factor in Crops	CHEN Jie, WANG Juan, WANG Yi-wen, <i>et al.</i> (2031)
Effects of Different Exogenous Plant Hormones on the Antioxidant System and Cd Absorption and Accumulation of Rice Seedlings Under Cd Stress	ZHANG Sheng-nan, HUANG Yi-zong, LI Yan, <i>et al.</i> (2040)
Effects of Different Organic Materials on Absorption and Translocation of Arsenic and Cadmium in Rice	LI Kai-ye, ZHAO Ting-ting, CHEN Jia, <i>et al.</i> (2047)
Soil Fungal Community Structure and Functional Diversity in a Copper Tailing Dam and Its Surrounding Areas	CHEN Jian-wen, ZHANG Hong, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (2056)
Potential of Arbuscular Mycorrhizal Fungi, Biochar, and Combined Amendment on Sandy Soil Improvement Driven by Microbial Community	ZHANG Zhe-chao, YANG Jiu-yang, HAO Bai-hui, <i>et al.</i> (2066)
Animal Manure Fertilization Promotes Antibiotic Resistance Gene Dissemination Among Manure, Soil, and Vegetables	ZHANG Hong-na, DONG Meng-jie, ZHOU Yu-fa, <i>et al.</i> (2080)
Establishment and Application of Performance Evaluation and Obstacle Diagnosis Model for Regional Water Ecological Civilization Construction	WAN Bing-tong, BAO Xue-ying, ZHAO Jian-chang, <i>et al.</i> (2089)