

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.10
第40卷 第10期

目次

京津冀区域重污染期间 PM_{2.5}垂直分布及输送 肖致美, 徐虹, 李鹏, 唐遵, 陈魁, 杨宁, 郑乃源, 杨文, 邓小文 (4303)

肇庆市一次典型污染天气的污染物来源解析 常树诚, 廖程浩, 曾武涛, 杨柳林, 俞绍才, 陈雪, 郑剑平 (4310)

聊城市冬季 PM_{2.5}中水溶性化合物的昼夜变化特征及来源解析 衣雅男, 侯战方, 孟静静, 燕丽, 王心培, 刘晓迪, 伏梦璇, 魏本杰 (4319)

沈阳市国三和国四排放标准不同车型柴油车 PM_{2.5}和 PM₁₀排放因子及碳组分源谱 赵雪艳, 王静, 祝胜男, 卞思思, 张宇, 王歆华, 殷宝辉, 杨文, 白志鹏 (4330)

城市生活垃圾露天焚烧排放 PM_{2.5}中重金属污染特征及其暴露健康风险 程轲, 季婉婉, 郝炜伟, 王艳, 易鹏, 支国瑞, 张佳羽, 张洋, 张诗澜 (4337)

某工业城市大气颗粒物中 PAHs 的粒径分布及人体呼吸系统暴露评估 王娟, 郭观林, 秦宁, 侯荣, 杨敏, 康艺瑾, 段小丽 (4345)

南京城市大气氨-铵的高频演化及其气粒转化机制 邵生成, 常运华, 曹芳, 林煜棋, 范美益, 谢锋, 洪一航, 章炎麟 (4355)

广州地区大气棕色碳气溶胶吸收特性 李铸杰, 谭浩波, 郑军 (4364)

郑州市春季大气挥发性有机物污染特征及源解析 张翼翔, 尹沙沙, 袁明浩, 张瑞芹, 张猛, 于世杰, 李一丹 (4372)

基于原料类型及末端治理的典型溶剂使用源 VOCs 排放系数 梁小明, 陈来国, 孙西勃, 赵伟, 卢清, 孙家仁, 陈朋龙, 叶代启 (4382)

北京市典型溶剂使用行业 VOCs 成分谱 方莉, 刘明文, 陈丹妮, 李国昊, 王迪, 邵霞, 聂磊 (4395)

民用固体燃料源的 IVOCs 排放特征及燃烧温度的影响 卢雅静, 冯艳丽, 钱哲, 韩勇, 陈颖军 (4404)

利用地面观测资料和 AIRS 卫星资料评估 MACC 再分析臭氧数据中国地区的适用性 王闰芳, 马晓丹, 赵天良, 王红磊, 丁涵, 郑小波 (4412)

镁铝水滑石衍生复合氧化物的 COS 水解性能 魏征, 张鑫, 张凤莲, 蒋国霞, 张雨萌, 周化兵, 郝郑平, 解强 (4423)

长江源区大气降水化学特征及离子来源 汪少勇, 何晓波, 吴锦奎, 丁永建, 胡召富, 王利辉, 杨贵森 (4431)

连续极端降雨对东江流域水质影响分析 车蕊, 林澍, 范中亚, 李文静, 曾凡棠, 毛本健, 石雷, 黄志伟 (4440)

基于湖泊与出入湖水水质关联性研究:以鄱阳湖为例 黄冬凌, 倪兆奎, 赵爽, 张波涛, 冯明雷, 陈宏文, 李晓秀, 王圣瑞 (4450)

金泽水库上游来水及库区水质变化时空分布特征 刘明坤, 童俊, 胡波, 朱慧峰, 白晓慧 (4461)

太湖不同介质电导率时空变化特征 王瑞, 代丹, 张弛, 邓义祥, 何成达, 于涛 (4469)

大型浅水湖泊磷模型参数不确定性及敏感性分析 施媛媛, 李一平, 程月, 程一鑫 (4478)

基于 MODIS 影像的洪泽湖水生植被覆盖时空变化特征及影响因素分析 李娜, 施坤, 张运林, 龚志军, 查勇, 张毅博 (4487)

草型湖区沉积物营养盐分布与污染评价 张杰, 汪院生, 郭西亚, 朱金格, 邓建才 (4497)

太湖草型湖区沉积物中生物易降解物质组成与分布规律 祁闯, 方家琪, 张利民, 司泽君, 黄和笑, 王卓森, 李翔, 王磊, 王国祥 (4505)

淀山湖浮游动物群落时空分布特征及其与环境因子的关系 杜彩丽, 杨丽, 赵诣, 吴晓敏, 徐慕, 王丽卿, 张玮 (4513)

岩溶区不同土地利用地下水碳同位素地球化学特征及生态意义 任坤, 潘晓东, 曾浩, 焦友军, 彭聪, 梁嘉鹏 (4523)

岩溶地下水化学对城镇化进程的时序响应 杨应增, 何守阳, 吴攀, 吴起鑫, 韩志伟, 罗维 (4532)

巴中北部岩溶山区地下水化学特征及演化分析 唐金平, 张强, 胡漾, 邵江, 何文君, 张宇 (4543)

δ-MnO₂/沸石纳米复合材料同时去除地下水中的铁锰氨氮 马文婕, 陈天虎, 陈冬, 刘海波, 程鹏, 张泽鑫, 陶琼, 张玉珠 (4553)

不同香蒲预处理方式对水平潜流人工湿地脱氮的强化效果 熊家晴, 卢学斌, 郑于聪, 王晓昌 (4562)

不同控制策略下短程硝化启动及运行工况优化 刘安迪, 赵凯亮, 刘宏, 黄利, 倪蓉, 陈永志 (4569)

启动三级 PN/A 颗粒污泥反应器处理高浓度氨氮废水 吉晓庆, 齐泽坤, 钱飞跃, 沈耀良, 王建芳 (4578)

聚丙烯环生物滴滤塔去除实际市政污水厂硫化氢性能及微生物群落分析 孙事昊, 贾沛沛, 陈凯琦, 彭永臻, 张亮 (4585)

典型工业区土壤多环芳烃污染特征及影响因素 冉宗信, 陈靖宇, 王亚婷, 邢智, 魏威, 余江 (4594)

5 种典型有机磷酸酯在水-土壤界面吸附特征及影响因素 何明靖, 杨志豪, 魏世强 (4604)

Cu²⁺ 和 Pb²⁺ 在 BS-12 两性修饰膨润土上的吸附及其交互作用 卜帅宾, 孟昭福, Sambath Yek, 张梦飞, 王腾, 任爽, 张凌恺 (4611)

滇东南峰丛洼地土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价 洪涛, 孔祥胜, 岳祥飞 (4620)

贵州罗甸北部喀斯特地区耕地土壤镉含量特征与风险评价 唐启琳, 刘秀明, 刘方, 汪花, 王世杰 (4628)

渝西地区镉轻度污染稻田安全利用技术 李娜, 贺红周, 冯爱煊, 李伟, 蒋珍茂, 魏世强 (4637)

不同作物对土壤中 Cd 的富集特征及低累积品种筛选 陈小华, 沈根祥, 白玉杰, 郭春霞, 钱晓雍, 顾海蓉, 胡双庆, 赵庆节, 王振旗, 付侃 (4647)

小麦和水稻对纳米硒的吸收和转运 王雅琦, 朱丽娜, 李奎, 王琪, 王康, 郭岩彬, 李花粉 (4654)

微塑料对小麦生长及生理生化特性的影响 廖苑辰, 娜孜依古丽·加合甫别克, 李梅, 王晓琳, 蒋丽娟 (4661)

药渣生物炭基质联合麦饭石对土壤-黑麦草体系的调控与机制 肖亮亮, 丁园 (4668)

磺胺甲噁唑污染土壤中微生物群落结构与抗生素抗性基因的分布特征 张海丰, 史明明, 孙艳梅, 程首涛, 高浩泽, 王旭明 (4678)

生活垃圾渗滤液处理过程中抗生素抗性基因的变化特征 黄福义, 周曙屹聃, 颜一军, 苏建强, 朱永官, 张炯 (4685)

有机肥施用量对土壤有机碳组分和团聚体稳定性的影响 邵慧芸, 李紫玥, 刘丹, 李熠凡, 鲁璐, 王旭东, 张阿凤, 王彦丽 (4691)

灌水和生物炭施用对水稻土呼吸温度敏感性的影响 周鹏, 祁乐, 牛海东, 王子芳, 高明 (4700)

柑橘/大蒜盖套作下土壤 CO₂ 排放及其效率对秸秆还田量的响应 游璟, 倪九派, 黄容, 张洋, 谢德体 (4708)

增温及秸秆施用对豆-麦轮作土壤微生物量碳氮及细菌群落结构的影响 张婷婷, 陈书涛, 王君, 王朝辉, 胡正华 (4718)

O₃ 胁迫下冬小麦总初级生产力的损耗模拟 徐静馨, 郑有飞, 王圣, 王立稳, 赵秀勇, 麦博儒 (4725)

2000~2015 年中国地级市化肥使用量的时空变化特征 潘晓东, 李品, 冯兆忠, 段昌群 (4733)

《环境科学》征订启事 (4394) 《环境科学》征稿简则 (4449) 信息 (4584, 4593, 4653)

不同作物对土壤中 Cd 的富集特征及低累积品种筛选

陈小华, 沈根祥*, 白玉杰, 郭春霞, 钱晓雍, 顾海蓉, 胡双庆, 赵庆节, 王振旗, 付侃

(上海市环境科学研究院, 上海 200233)

摘要: 为探究镉(Cd)污染土壤中农作物的食用安全性, 以上海市常见农作物(青椒、黄瓜、豇豆、菠菜、花菜、西红柿、水稻和小麦)为实验材料, 采用温室盆栽土培实验方法研究了不同土壤 Cd 含量梯级(0.23、0.6、1.2、1.8、2.4 和 3.0 mg·kg⁻¹) 下不同作物生物量变化以及可食部分 Cd 富集特征, 建立不同种类作物与土壤 Cd 含量相关关系, 探讨不同作物对应的土壤 Cd 安全限量值, 筛选 Cd 低累积作物品种。结果表明: ① 随着土壤中 Cd 含量增加, 作物地上生物量表现为先增加后减少, 青椒耐受性最强, 西红柿、菠菜耐受性最差。② 不同作物可食部位 Cd 的富集系数由大到小依次为小麦 > 菠菜 > 水稻 > 青椒 > 花菜 > 西红柿 > 黄瓜 > 豇豆。③ 作物可食部分 Cd 含量与土壤中 Cd 含量都呈显著正相关($P < 0.05$), 相关系数大小依次为菠菜 > 小麦 > 西红柿 > 黄瓜 > 青椒 > 水稻 > 花菜 > 豇豆。④ 不同作物对应的土壤 Cd 安全限量值大小依次为: 豇豆 > 黄瓜 > 花菜 > 青椒 > 西红柿 > 水稻 > 菠菜 > 小麦。依据作物对土壤中 Cd 的耐受性、富集能力及食用安全限量值, 筛选出黄瓜、豇豆、花菜为 Cd 低累积品种。

关键词: Cd; 富集; 土壤; 农作物; 低累积品种

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)10-4647-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.201811059

Accumulation of Cd in Different Crops and Screening of Low-Cd Accumulation Cultivars

CHEN Xiao-hua, SHEN Gen-xiang*, BAI Yu-jie, GUO Chun-xia, QIAN Xiao-yong, GU Hai-rong, HU Shuang-qing, ZHAO Qing-jie, WANG Zhen-qi, FU Kan

(Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China)

Abstract: Pot-culture experiments were carried out in Shanghai to screen crop varieties with low bioaccumulation properties with respect to cadmium (Cd). Eight common crops, such as green pepper, cucumber, cowpea, spinach, cauliflower, tomatoes, rice, and wheat, were planted in contaminated soil with different Cd concentrations of 0.23, 0.6, 1.2, 1.8, 2.4, and 3.0 mg·kg⁻¹ to investigate the effects on biomass, Cd accumulation characteristics, and edible risk safety. The results indicated that: ① With the increase in soil Cd content, the aboveground biomass of crops increased firstly and then decreased. The different crop types had different tolerance to Cd, with green pepper showed the strongest tolerance and spinach and tomato showed the least tolerance. ② The bioaccumulation factor of Cd in the edible parts of eight crops ranged in order of wheat > spinach > rice > green pepper > cauliflower > tomato > cucumber > cowpea. ③ Total Cd content in soil was significantly correlated with Cd content in the crops ($P < 0.05$), and the order of the correlation coefficients was spinach > wheat > tomato > cucumber > green pepper > rice > cauliflower > cowpea. ④ The risk threshold value of Cd in soil based on the edible safety of different crops ranged in order of cowpea > cucumber > cauliflower > green pepper > tomato > rice > spinach > wheat. Cucumber, cowpea, and cauliflower were selected as the low-Cd-accumulating varieties according to their tolerance to soil Cd, bioaccumulation capacity, and edible risk threshold values.

Key words: Cd; accumulation; soil; crops; low-accumulation cultivars

随着人们生活水平的逐渐提高, 农产品质量安全成为近些年各方持续关注的热点话题。文献[1]显示, 中国耕地 Cd 污染物点位超标率已经达到 7.0%。Cd 污染除了具备重金属污染的一般特点(隐蔽性、不可逆性和长期性)外, 还具有移动性强、毒性高和难降解等自身特点, 被视为重金属中最具有危害性的一种污染元素, Cd 易被植物吸收, 并通过食物链, 危害动物和人体健康, 对农业生产布局 and 食品卫生安全造成严重影响^[2-6]。近些年我国一些地区开展的矿区土地复垦和低效建设用地(含工业用地)减量化复垦等土地整治活动, 可能进一步加剧 Cd 等重金属污染对农产品的威胁。土壤中 Cd 污染成为决定上海复垦土地潜在生态风险的

主要因素, 平均潜在生态风险指数达到最大^[7]。因此, 控制和治理土壤 Cd 污染, 对当地农产品质量安全显得尤为重要。

农作物作为农田土壤重金属进入人体的重要途径与介质, 实践证明, 选择合适的农作物、采用新的种植模式等可有效控制重金属通过食物链转移到人体, 是轻中度重金属污染土壤持续进行作物安全生产的有效途径^[8]。国家最新颁布的《土壤污染防

收稿日期: 2018-11-08; 修订日期: 2019-05-22

基金项目: 上海市科委重大科技攻关项目(17DZ1202003); 上海市环保重大科研项目(2016-08)

作者简介: 陈小华(1978~), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为水土环境生态修复技术, E-mail: shoutfar@aliyun.com

* 通信作者, E-mail: shengx@saes.sh.cn

治法》(2019年1月1日起施行)^[9]和《土壤污染防治行动计划》(2016年5月28日起实施)^[10]均要求对农用地实施分类管理,制定并实施受污染耕地安全利用方案,采取农艺调控和替代种植等措施,降低农产品超标风险.从20世纪90年代起,美国、加拿大和澳大利亚等国开始了重金属低累积作物筛选研究^[11].随后,国内一些学者针对土壤不同重金属污染研究筛选了一些低累积作物品种^[12~17].有研究表明,不同的农作物品种具有各自的生态适栽区域,这导致了許多筛选研究结果具有很强的区域性^[18].目前有关不同种类作物对污染成分复杂的低效建设用地减量化复垦土地中重金属累积特性的研究鲜见报道.本研究针对上海市低效建设用地减量化复垦土地的实际污染特征,选择人们日常餐桌上8种不同类型作物为研究对象,开展Cd低累积型作物品种筛选研究,以期实现轻中度Cd污染土地的安全利用,对保障当地农产品质量安全具有重要意义.

1 材料与方法

1.1 实验材料

选取上海市某低效工业场地(曾作为金属加工)减量化复垦后的表土,土壤类型为本地典型的粉砂质粘壤土.为尽量减少实验误差和控制工作量,原土壤经风干、捣碎后,借用简易工程铁丝筛网(孔径4mm左右)过筛,作为原有基质特征不变的供试土样.测定了供试土壤的理化性质(表1)和重金属初始含量(表2),其中Cd含量为 $0.23 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.供试作物品种选用上海本地餐桌常见的8种不同类型作物,青椒(*Capsicum annuum* L.)、黄瓜(*Cucumis sativus* L.)、豇豆(*Vigna unguiculata*)、菠菜(*Spinacia oleracea* L.)、花菜(*Brassica oleracea* L. var. *botrytis* L.)、西红柿(*Lycopersicon esculentum* Mill.)、水稻(*Oryza glaberrima*)和小麦(*Triticum aestivum* L.).本实验于2017~2018年在上海市青浦现代农业园自动化大棚内进行.

表1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of the soil samples

项目	pH	阳离子交换量 /cmol·kg ⁻¹	有机质 /g·kg ⁻¹	速效钾 /mg·kg ⁻¹	速效磷 /mg·kg ⁻¹	水解性氮 /mg·L ⁻¹
参数值	5.7 ± 0.37	14 ± 1.01	31.9 ± 5.64	734.2 ± 308	253.4 ± 75.3	868.5 ± 96.7

表2 供试土壤重金属平均含量¹⁾

Table 2 Heavy metal concentrations in the soil samples

分析指标	铜	铬	镍	锰	铅	镉	砷	汞
含量/mg·kg ⁻¹	121	191	126	550	42	0.23	9.69	0.10

1) 数据为3个样本的算术平均值

1.2 实验设计

每种作物盆栽实验设5个梯度,同时设空白对照共6个处理,每个处理设3个平行,共计144盆.以分析纯试剂CdCl₂·5H₂O配制盐溶液加入到供试土中模拟Cd污染土,含量梯度的设置依据我国“十一五”期间土壤环境调查中的Cd含量范围和《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)中土壤Cd风险管制值.不同梯度盆栽土壤中Cd全量分别为0.23、0.6、1.2、1.8、2.4和3.0 mg·kg⁻¹,Cd有效态量为0.13、0.29、0.74、1.05、1.30和1.43 mg·kg⁻¹,对应的盆栽实验编号依次为Cd-ck、Cd-1、Cd-2、Cd-3、Cd-4和Cd-5.根据实验设计称取相应质量CdCl₂·5H₂O,分几份放入烧杯中,向烧杯中加入去离子水配成母液,保证每个烧杯中CdCl₂·5H₂O完全溶解.将预先风干处理好的实验所需土量分开并在室温中平摊,把每个烧杯中的母液洒到土壤当中,边喷洒

边搅拌以保证母液与土壤充分均匀混合,混合后的土壤放置在室温中稳定2周然后装入预先准备好的塑料盆进行后续盆栽土培实验,塑料盆直径30 cm,高25 cm,每盆装供试土壤5 kg,盆底加盆托防露土.每个盆栽施用等量的复合肥(N-P₂O₅-K₂O, 28%-6%-6%,总养分≥40%),按日常施肥强度100 kg·亩⁻¹折算,每个盆栽共施用复合肥18 g,其中6克作基肥,12克作追肥.不同作物的种植时间是按照各自的物候条件要求来安排,青椒、黄瓜、豇豆和西红柿在春夏季种植,菠菜和花菜是在秋季种植,小麦是在初冬种植,这些作物均放置在恒温恒湿、自动补光的蔬菜大棚中进行.水稻是在初夏栽植,盆栽放置在稻田里,水稻在自然光照条件下生长.所有作物均在成熟之后,采摘可食部分并称重确定生物量.

1.3 样品采集与分析方法

土壤指标测定:四分法取土样风干、研磨和过

筛. 土壤 pH 值、有机质、CEC、N、P 和 K 等均参照文献[19]的方法进行测定. 土壤 Cd 总量按照 GB/T 17141-1997 推荐方法测定, 采用盐酸-硝酸-氢氟酸-高氯酸全消解法和石墨炉原子吸收分光光度计(PE, AA900H, USA)测定^[20]. 土壤有效态 Cd 含量按照 HJ 804-2016 推荐方法测定, 采用 DTPA 浸提法和电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, Agilent 7900, USA)测定^[21].

作物可食部分 Cd 含量测定: 按照 GB/T 5009.268-2016 推荐的方法测定^[22]. 采集盆栽作物样品可食部分, 用自来水冲洗干净, 再以去离子水冲洗, 用滤纸吸去表面水份后用食品加工器粉碎, 制成待测样放入塑料瓶中冷冻保存, 采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, Agilent 7900, USA)测定作物可食部分 Cd 含量.

1.4 低累积品种筛选方法

低累积作物品种筛选遵循以下 3 种方式.

(1) 关注对 Cd 具有较高耐受性的作物. 在高含量 Cd 的土中能正常生长且生物量无明显下降的品种优先作为低累积品种.

(2) 计算农作物可食部分对土壤 Cd 的富集系数(bioaccumulation factor, BAF):

$$BAF = M_{\text{作物}} / M_{\text{土壤}}$$

式中, BAF 表示富集系数, $M_{\text{作物}}$ 表示作物体内的重金属含量, $M_{\text{土壤}}$ 表示土壤中的重金属含量. 优先选择富集系数 < 0.1 的农作物作为 Cd 低累积品种.

(3) 构建各农作物可食部位的 Cd 含量与土壤 Cd 含量之间的定量关系, 并基于可食部位的 Cd 安全限量值, 推算土壤中 Cd 的安全阈值. 土壤 Cd 安全阈值越大的农作物优先作为 Cd 低累积品种.

1.5 作物可食部位 Cd 安全限量值的取值方法

(1) 《食品安全国家标准 食品中污染物限量(GB 2762-2017)》针对农产品可食部分 Cd 限量值的规定如下: 青椒、黄瓜和西红柿可食部分 Cd 限量值为 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 豇豆可食部分 Cd 限量值为 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 菠菜、花菜、水稻和小麦可食部分 Cd 限量值均为 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

(2) 靶标危害指数法(tangethazard quotients, THQ)^[23,24], 推算作物可食部分 Cd 限量值($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). 具体计算公式为:

$$THQ = \frac{C \times EF \times ED \times IR}{BW \times AT \times RfD \times 1000}$$

式中, C 为作物中污染物的平均含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); EF 为暴露频率($365 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$); ED 为暴露年数(70a); IR 为我国每日作物摄入量(成人摄入量按 $335 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$, 儿童摄入量按 $232 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$); BW 为我国

人体的平均体重(成人体重按 60 kg 计, 儿童体重按 33 kg 计); AT 为平均暴露时间(365 d 与暴露年数的乘积)^[25]. RfD 为经口摄入参考剂量(reference dose), 主要参考美国环境保护署(EPA)综合风险信息系统(IRIS)及其他来源针对主要污染指标的参考剂量 Cd 为 $0.001 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ ^[26].

当 THQ 值 ≤ 1 , 表明人体对目标区生长的蔬菜消费基本不产生健康风险; THQ 值 > 1 时, 可引起人体健康风险. 因此, 设置 THQ = 1 时所推算出的 C 值即为作物可食部分中 Cd 的人体健康安全临界值($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$).

1.6 数据分析

本研究数据处理与差异分析采用 Excel 2003 和 SPSS 12.0, 作图采用 Origin 9.0.

2 结果与讨论

2.1 不同种类作物对 Cd 污染耐受性

作物成熟后采摘青椒、黄瓜、豇豆、菠菜、花菜和西红柿可食部分称其生物量, 生物量变化是作物对重金属胁迫响应的最直观综合体现. 分析土壤中不同含量 Cd 对作物生物量的影响, 结果显示(图 1), 随着土壤中 Cd 含量的增加, 青椒生物量增加, 黄瓜、豇豆、菠菜、花菜和西红柿生物量先增加后减少, 在一定含量范围内, 土壤中 Cd 不仅不会抑制作物生长, 反而会促进作物生长, 但一旦超过某个限值作物的生长就会表现出明显的抑制作用, 这可能是不同种类作物对重金属的耐性存在明显差异所致^[27]. 在土壤重金属含量范围内, 促进青椒生物量的增加没有达到青椒生长的抑制含量, 青椒没有表现出明显中毒症状, 当土壤中 Cd 含量为 $2.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 黄瓜、豇豆、菠菜、花菜生物量达到最大, 土壤中 Cd 含量为 $1.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 西红柿生物

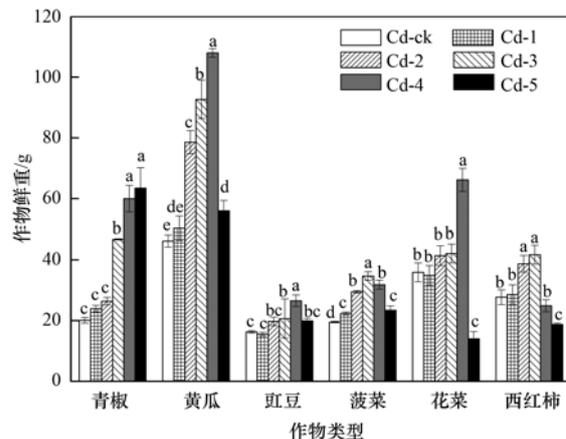


图 1 不同 Cd 处理组的各类作物可食部分鲜重
Fig. 1 Fresh weight of the edible parts of crops under different Cd treatments

量达到最大. 当土壤中 Cd 含量为 $3.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时, 黄瓜、豇豆、菠菜、花菜和西红柿生物量减少甚至低于对照组生物量, 作物显现中毒症状. 黄瓜、豇豆叶片失水、失绿萎缩, 菠菜叶片失水, 失绿, 叶片由黄色逐渐至灰白色, 叶柄收缩, 变软. 花菜菜心变小, 周围叶片失水、失绿, 西红柿出现白斑生物量减少, 叶片萎缩失绿. 土壤中低含量 Cd 对作物生长有积极的“刺激作用”, 可促进植物体内的过氧化氢酶、过氧化物酶和酸性磷酸酶等的活性, 促进了植物的生长^[28]. 低含量 Cd 胁迫还可提高或加速根系的某些生理生化反应, 从而促进了植株的生长, 但当 Cd 含量超过某一阈值时, 则会使作物生长受到明显的抑制, 表现出生长迟缓、植株矮小、

产量下降甚至死亡等症状^[29].

2.2 不同作物可食部分对土壤中 Cd 的富集特征

作物成熟后采摘作物可食部分, 经预处理测定作物可食部分中 Cd 含量(表 3). 随着土壤中 Cd 含量的增加种作物可食部分 Cd 含量表现出显著差异. 青椒 $0.063 \sim 0.296 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、黄瓜 $0.003 \sim 0.040 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、豇豆 $0.005 \sim 0.050 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、菠菜 $0.106 \sim 0.847 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、花菜 $0.008 \sim 0.157 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、西红柿 $0.028 \sim 0.144 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、水稻 $0.023 \sim 0.890 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和小麦 $0.242 \sim 3.175 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 随着土壤中 Cd 含量的增加, 作物可食部分 Cd 含量显著增加 ($P < 0.01$), 表现出农作物对 Cd 的强吸收能力.

表 3 不同含量 Cd 处理土壤作物可食部分 Cd 含量¹⁾/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 3 Cd concentrations in the edible parts of different crops under different Cd treatments/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

作物种类	Cd-ck	Cd-1	Cd-2	Cd-3	Cd-4	Cd-5
青椒	0.063 ± 0.004^e	0.078 ± 0.007^d	0.178 ± 0.003^e	0.241 ± 0.008^b	0.244 ± 0.070^b	0.296 ± 0.030^a
黄瓜	0.003 ± 0.001^e	0.008 ± 0.001^d	0.015 ± 0.003^e	0.020 ± 0.003^b	0.023 ± 0.002^b	0.040 ± 0.003^a
豇豆	0.005 ± 0.001^e	0.009 ± 0.001^d	0.010 ± 0.001^d	0.013 ± 0.004^e	0.024 ± 0.001^b	0.050 ± 0.001^a
菠菜	0.106 ± 0.027^e	0.373 ± 0.033^d	0.523 ± 0.040^e	0.636 ± 0.040^b	0.838 ± 0.029^a	0.847 ± 0.011^a
花菜	0.008 ± 0.001^e	0.017 ± 0.013^d	0.046 ± 0.014^e	0.101 ± 0.045^b	0.128 ± 0.021^b	0.157 ± 0.006^a
西红柿	0.028 ± 0.001^d	0.032 ± 0.002^d	0.066 ± 0.013^e	0.078 ± 0.025^b	0.082 ± 0.001^b	0.144 ± 0.0026^a
水稻	0.023 ± 0.001^e	0.062 ± 0.004^d	0.383 ± 0.070^e	0.652 ± 0.030^b	0.660 ± 0.090^b	0.890 ± 0.090^a
小麦	0.242 ± 0.040^e	0.278 ± 0.020^e	1.830 ± 0.120^d	2.153 ± 0.280^e	2.945 ± 0.940^b	3.175 ± 0.590^a

1) 数据为平均值 \pm 标准偏差, $n = 3$

作物对重金属吸收能力通过富集系数(BAF)量化表现^[30,31]. 除了豇豆和黄瓜的可食部分对 Cd 富集系数没有显著差异以外, 其他不同作物可食部分之间均表现出显著差异(图 2). 作物对 Cd 富集系数平均值从大到小依次排序为: 小麦(1.250) > 菠菜(0.330) > 水稻(0.245) > 青椒(0.113) > 西红柿(0.058) > 花菜(0.044) > 黄瓜(0.011) > 豇豆(0.010). 富集系数小于 0.1 的品种有豇豆、黄瓜、花菜和西红柿. 与其他研究结果基本类似^[32,33], 叶菜类污染指数和富集能力大于果菜类, 谷物类作物对土壤中 Cd 富集能力强^[34]. 农作物对重金属累积的品种差异主要来自农作物根系分泌物对根际土壤重金属活化能力存在品种差异^[35]. 低累积品种根系分泌有机物以及 H^+ 较少, 被土壤中重金属的活化能力较弱. 此外, 低累积品种钙离子通道功能可能不活跃, 吸收重金属的能力亦较低^[36].

2.3 基于作物食用安全土壤中 Cd 安全限量值

采用回归分析的方法建立作物可食部分 Cd 含量(y)与土壤中 Cd 含量(x)的线性回归方程, 明确作物可食部分 Cd 含量与土壤 Cd 含量之间的关系(表 4). 各类作物中可食部分 Cd 含量与土壤中 Cd

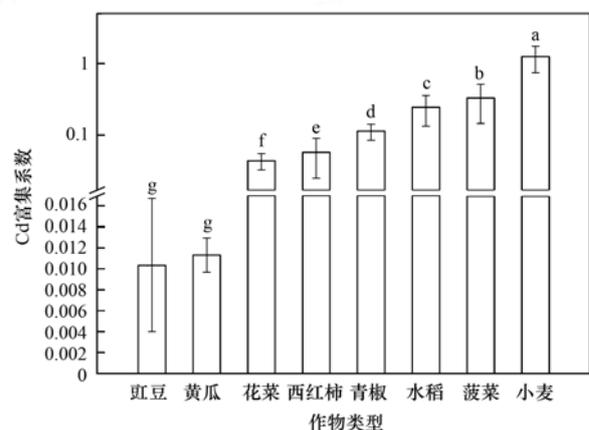


图 2 不同作物可食部分的 Cd 富集系数平均值

Fig. 2 Average BAF values of Cd in the edible parts of different crops

含量均呈显著相关 ($P < 0.05$) 或极显著相关 ($P < 0.01$). 相关系数从大到小依次为菠菜(0.981) > 小麦(0.965) > 西红柿(0.949) > 黄瓜(0.938) > 青椒(0.937) > 水稻(0.847) > 花菜(0.781) > 豇豆(0.7744), 拟合方程斜率大小依次为小麦(1.297) > 菠菜(0.800) > 水稻(0.3223) > 青椒(0.0866) > 花菜(0.039) > 西红柿(0.029) > 豇豆(0.0138) > 黄瓜(0.0119), 说明谷类作物和叶菜类作物对 Cd

富集能力最强。

依据“土壤-农产品”污染物含量的回归方程,以《食品安全国家标准食品中污染物限量(GB 2762-2017)》和基于靶标危害指数(THQ)取值方法计算的新鲜作物污染物限量值为依据,分别计算 Cd 污染土壤中种植不同作物的安全限量值。各农作物对应的土壤 Cd 安全限量值分别为:豇豆 7.46

mg·kg⁻¹、黄瓜 4.2 mg·kg⁻¹、花菜 3.60 mg·kg⁻¹、青椒 1.04 mg·kg⁻¹、西红柿 1.03 mg·kg⁻¹、水稻 0.59 mg·kg⁻¹、小麦 0.21 mg·kg⁻¹ 和菠菜 0.20 mg·kg⁻¹。豇豆对应的土壤 Cd 安全限量值最高,其次为黄瓜和花菜,反映出这 3 种作物的 Cd 低累积特征,对土壤 Cd 安全限量值要求相对宽松,可作为 Cd 的低累积品种。

表 4 不同作物食用安全对应土壤 Cd 限量值/mg·kg⁻¹

Table 4 Relationship between soil Cd contents and Cd contents in crops, and soil threshold values/mg·kg⁻¹

作物类型	回归方程(x 为土壤中 Cd 含量, y 为作物中 Cd 含量)	作物限量值/mg·kg ⁻¹		土壤阈值/mg·kg ⁻¹	
		国标法	THQ (成人/儿童)	国标法	THQ 法
青椒	$y = 0.0866x + 0.05$ $R^2 = 0.937, P < 0.01, n = 18$	0.05	0.18/0.14	—	1.50/1.04
黄瓜	$y = 0.0119x - 7 \times 10^{-5}$ $R^2 = 0.938, P < 0.01, n = 18$	0.05	0.18/0.14	4.2	15.1/11.8
豇豆	$y = 0.0138x - 0.003$ $R^2 = 0.774, P < 0.05, n = 18$	0.1	0.18/0.14	7.46	13.3/10.4
菠菜	$y = 0.800x - 0.019$ $R^2 = 0.981, P < 0.01, n = 18$	0.2	0.18/0.14	0.27	0.25/0.20
花菜	$y = 0.0391x - 0.0006$ $R^2 = 0.781, P < 0.05, n = 18$	0.2	0.18/0.14	5.13	4.62/3.60
西红柿	$y = 0.029x + 0.020$ $R^2 = 0.949, P < 0.01, n = 18$	0.05	0.18/0.14	1.03	5.51/4.14
水稻	$y = 0.3223x - 0.0509$ $R^2 = 0.847, P < 0.05, n = 15$	0.2	0.18/0.14	0.78	0.72/0.59
小麦	$y = 1.297x - 0.134$ $R^2 = 0.965, P < 0.01, n = 18$	0.2	0.18/0.14	0.26	0.24/0.21

3 结论

(1) 8 种作物对重金属 Cd 的耐受性表现出明显的种类间差异。青椒对 Cd 抗性最强,果实鲜重随土壤中 Cd 含量上升而增加,其他作物的生物量表现出先增加后减少趋势。西红柿、菠菜对 Cd 抗性最差,当土壤中 Cd 含量大于 1.8 mg·kg⁻¹ 时,西红柿、菠菜生长明显受到抑制。

(2) 8 种农作物可食部分对 Cd 富集能力存在种间差异。富集系数平均值从大到小依次排序为:小麦(1.250) > 菠菜(0.330) > 水稻(0.245) > 青椒(0.113) > 西红柿(0.058) > 花菜(0.044) > 黄瓜(0.011) > 豇豆(0.010)。叶菜类(菠菜)和谷物类作物对土壤中 Cd 富集能力明显强于瓜果类作物。

(3) 基于农产品食用安全要求,推导出种植 8 种作物对应的土壤中 Cd 安全限量值大小依次为:豇豆(7.46 mg·kg⁻¹) > 黄瓜(4.2 mg·kg⁻¹) > 花菜(3.60 mg·kg⁻¹) > 青椒(1.04 mg·kg⁻¹) > 西红柿(1.03 mg·kg⁻¹) > 水稻(0.59 mg·kg⁻¹) > 小麦(0.21 mg·kg⁻¹) > 菠菜(0.20 mg·kg⁻¹)。

(4) 综合考虑不同农作物对土壤中 Cd 的耐受性、富集能力以及食用安全限量值,筛选出黄瓜、豇豆、花菜为 Cd 低累积作物,适宜在上海地区轻

中度 Cd 污染复垦土地中实施替代种植。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国环境保护部, 中华人民共和国国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[EB/OL]. http://www.gov.cn/footer/2014-04/17/content_2661768.htm, 2014-04-17.
- [2] 杜丽娜, 余若祯, 王海燕, 等. 重金属镉污染及其毒性研究进展[J]. 环境与健康杂志, 2013, 30(2): 167-174.
- [3] Silvera S A N, Rohan T E. Trace elements and cancer risk: a review of the epidemiologic evidence [J]. Cancer Causes & Control, 2007, 18(1): 7-27.
- [4] Rafiq M T, Aziz R, Yang X E, et al. Cadmium phytoavailability to rice (*Oryza sativa* L.) grown in representative Chinese soils. A model to improve soil environmental quality guidelines for food safety[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2014, 103: 101-107.
- [5] Vinceti M, Venturelli M, Sighinolfi C, et al. Case-control study of toenail cadmium and prostate cancer risk in Italy[J]. Science of the Total Environment, 2007, 373(1): 77-81.
- [6] 张晓娜, 朴春兰, 董友魁, 等. 大豆根系应答重金属 Cd 胁迫的转录组分析[J]. 应用生态学报, 2017, 28(5): 1633-1641.
Zhang X N, Piao C L, Dong Y K, et al. Transcriptome analysis of response to heavy metal Cd stress in soybean root[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(5): 1633-1641.
- [7] 吴健, 王敏, 张辉鹏, 等. 复垦工业场地土壤和周边河道沉积物重金属污染及潜在生态风险[J]. 环境科学, 2018, 39(12): 5620-5627.
Wu J, Wang M, Zhang H P, et al. Heavy metal pollution and potential ecological risk of soil from reclaimed industrial sites and

- surrounding river sediments[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(12): 5620-5627.
- [8] 沈欣, 朱奇宏, 朱捍华, 等. 农艺调控措施对水稻镉积累的影响及其机理研究[J]. *农业环境科学学报*, 2015, **34**(8): 1449-1454.
Shen X, Zhu Q H, Zhu H H, *et al.* Effects of agronomic measures on accumulation of Cd in rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, **34**(8): 1499-1454.
- [9] 中国法制出版社. 中华人民共和国土壤污染防治法(含草案说明)[M]. 北京: 中国法制出版社, 2018. 19.
- [10] 王国庆, 林玉锁. 结合《土壤污染防治行动计划》探讨中国土壤环境监管制度与标准值体系建设[J]. *中国环境管理*, 2016, **8**(5): 39-43.
Wang G Q, Lin Y S. A preliminary study on development of soil environmental management and environmental standards system in china in accordance with the SPPCAP[J]. *Chinese Journal of Environmental Management*, 2016, **8**(5): 39-43.
- [11] Li Y M, Chaney R L, Schneiter A A, *et al.* Genotype variation in kernel cadmium concentration in sunflower germplasm under varying soil conditions[J]. *Crop Science*, 1995, **35**(1): 137-141.
- [12] 蔡秋玲, 林大松, 王果, 等. 不同类型水稻镉富集与转运能力的差异分析[J]. *农业环境科学学报*, 2016, **35**(6): 1028-1033.
Cai Q L, Lin D S, Wang G, *et al.* Differences in cadmium accumulation and transfer capacity among different types of rice cultivars[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, **35**(6): 1028-1033.
- [13] 杜彩艳, 张乃明, 雷宝坤, 等. 不同玉米(*Zea mays*)品种对镉锌积累与转运的差异研究[J]. *农业环境科学学报*, 2017, **36**(1): 16-23.
Du C Y, Zhang N M, Lei B K, *et al.* Differences of cadmium and zinc accumulation and translocation in different varieties of *Zea mays*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, **36**(1): 16-23.
- [14] Xin J L, Huang B F, Liu A Q, *et al.* Identification of hot pepper cultivars containing low Cd levels after growing on contaminated soil: uptake and redistribution to the edible plant parts[J]. *Plant and Soil*, 2013, **373**(1-2): 415-425.
- [15] Shi G R, Su G Q, Lu Z W, *et al.* Relationship between biomass, seed components and seed Cd concentration in various peanut (*Arachis hypogaea* L.) cultivars grown on Cd-contaminated soils[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, **110**: 174-181.
- [16] Xin J L, Dai H W, Huang B F. Assessing the roles of roots and shoots in the accumulation of cadmium in two sweet potato cultivars using split-root and reciprocal grafting systems [J]. *Plant and Soil*, 2017, **412**(1-2): 413-424.
- [17] Dai Z Y, Shu W S, Liao B, *et al.* Intraspecific variation in cadmium tolerance and accumulation of a high-biomass tropical tree *Averrhoa carambola* L.: Implication for phytoextraction[J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2011, **13**(6): 1723-1729.
- [18] 肖蓉, 聂园军, 曹秋芬, 等. 中、轻度重金属污染农田的特征及治理[J]. *中国农学通报*, 2017, **34**(33): 101-106.
Xiao R, Nie Y J, Cao Q F, *et al.* Farmland contaminated by moderate and mild heavy metal pollution: characteristics and abatement strategies[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, **34**(33): 101-106.
- [19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. 205-226.
- [20] GB/T 17141-1997, 土壤质量 铅、镉的测定石墨炉原子吸收分光光度法[S].
- [21] HJ 804-2016, 土壤 8 种有效态元素的测定 二乙炔三胺五乙酸浸提-电感耦合等离子体发射光谱法[S].
- [22] GB 5009.268-2016, 食品安全国家标准 食品中多元素的测定[S].
- [23] Zeng G M, Liang J, Guo S L, *et al.* Spatial analysis of human health risk associated with ingesting manganese in Huangxing Town, Middle China[J]. *Chemosphere*, 2009, **77**(3): 368-375.
- [24] Khan M U, Malik R N, Muhammad S. Human health risk from heavy metal via food crops consumption with wastewater irrigation practices in Pakistan[J]. *Chemosphere*, 2013, **93**(10): 2230-2238.
- [25] 郑娜, 王起超, 郑冬梅. 基于THQ的锌冶炼厂周围人群食用蔬菜的健康风险分析[J]. *环境科学学报*, 2007, **27**(4): 672-678.
Zheng N, Wang Q C, Zheng D M. Health risk assessment of heavy metals to residents by consuming vegetable irrigated around zinc smelting plant based THQ [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, **27**(4): 672-678.
- [26] USEPA (US Environmental Protection Agency). Integrated Risk Information System: Manganese (CASRN 7439-96-5). [EB/OL]. https://cfpub.epa.gov/ncea/iris/iris_documents/documents/subst/0373_summary.pdf, 2008-06-08.
- [27] 杨居荣, 贺建群, 黄翌, 等. 农作物 Cd 耐性的种内和种间差异 II. 种内差[J]. *应用生态学报*, 1995, **6**(S1): 132-136.
Yang J R, He J Q, Huang Y, *et al.* Inter and intraspecific differences of crops cadmium tolerance II. Intraspecific difference[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1995, **6**(S1): 132-136.
- [28] 赵勇, 李红娟, 孙治强. 土壤、蔬菜 Cd 污染相关性分析与土壤污染阈值研究[J]. *农业工程学报*, 2006, **22**(7): 149-153.
Zhao Y, Li H J, Sun Z Q. Correlation analysis of Cd pollution in vegetables and soils and the soil pollution threshold [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, **22**(7): 149-153.
- [29] 宗良纲, 孙静克, 沈倩宇, 等. Cd、Pb 污染对几种叶类蔬菜生长的影响及其毒害症状[J]. *生态毒理学报*, 2007, **2**(1): 63-68.
Zong L G, Sun J K, Shen Q Y, *et al.* Impacts of cadmium and lead pollution in soil on leaf vegetables growth and toxic-symptoms[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2007, **2**(1): 63-68.
- [30] Zu Y Q, Li Y, Schwartz C, *et al.* Accumulation of Pb, Cd, Cu and Zn in plants and hyperaccumulator choice in Lanping lead-zinc mine area, China[J]. *Environment International*, 2004, **30**(4): 567-576.
- [31] Salt D E, Blaylock M, Kumar N P B A, *et al.* Phytoremediation: a novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants[J]. *Bio/Technology*, 1995, **13**(5): 468-474.
- [32] 杨晖, 梁巧玲, 赵鹏, 等. 7 种蔬菜型作物重金属积累效应及间作鸡眼草对其重金属吸收的影响[J]. *水土保持学报*, 2012, **26**(6): 209-214.
Yang H, Liang Q L, Zhao P, *et al.* The cumulative effect on heavy metal of seven kinds of vegetable crops and effects on heavy metal absorption of intercropping *Kummerowia striata* [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, **26**(6): 209-214.
- [33] 贾超华, 颜新培, 龚昕, 等. 镉超标耕地蔬菜重金属污染调

- 查与健康风险评价[J]. 中国农学通报, 2016, **32**(5): 106-112.
- Jia C H, Yan X P, Gong X, *et al.* Heavy-metal pollution investigation and health risk assessment for vegetables in cadmium exceeded cultivated land [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, **32**(5): 106-112.
- [34] 陈勇. 水稻、小麦籽实与土壤 Cd 含量关系研究及安全利用评价——以 X 镇为例[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017.
- Chen Y. The study on soil rice and wheat seeds in Cd the relationship between dose effect and safe use evaluation in southern XX town as an example[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2017.
- [35] He B Y, Ling L, Zhang L Y, *et al.* Cultivar-specific differences in heavy metal (Cd, Cr, Cu, Pb, and Zn) concentrations in water spinach (*Ipomoea aquatica* 'Forsk') grown on metal-contaminated soil [J]. Plant and Soil, 2015, **386**(1-2): 251-262.
- [36] 陈惠君, 谭玲, 李取生, 等. Cr/Pb 低累积菜心品种筛选及其根际机理研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, **35**(7): 1249-1256.
- Chen H J, Tan L, Li Q S, *et al.* Screening and preliminary rhizosphere mechanisms of low Cr/Pb accumulation cultivars of Chinese flowering cabbages (*Brassica parachinensis* L.) [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, **35**(7): 1249-1256.

《环境科学》多项引证指标名列前茅

2018 年 11 月 1 日, 中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上公布了 2017 年度中国科技论文统计结果. 统计结果显示《环境科学》2017 年度总被引频次 11 228, 影响因子 1.958, 多项引证指标位居环境科学技术及资源科学技术类科技期刊前列.



CONTENTS

Vertical Distribution and Transport of PM _{2.5} During Heavy Pollution Events in the Jing-Jin-Ji Region	XIAO Zhi-mei, XU Hong, LI Peng, <i>et al.</i> (4303)
Source Apportionment of Air Pollutants for a Typical Pollution Event in Zhaoqing	CHANG Shu-cheng, LIAO Cheng-hao, ZENG Wu-tao, <i>et al.</i> (4310)
Diurnal Variations and Source Analysis of Water-soluble Compounds in PM _{2.5} During the Winter in Liaocheng City	YI Ya-nan, HOU Zhan-fang, MENG Jing-jing, <i>et al.</i> (4319)
Emission Characteristics of Exhaust PM and Its Carbonaceous Components from China III to China IV Diesel Vehicles in Shenyang	ZHAO Xue-yan, WANG Jing, ZHU Sheng-nan, <i>et al.</i> (4330)
Characteristics of Heavy Metal Pollutants of PM _{2.5} from Open Burning of Municipal Solid Waste (MSW) and the Associated Exposure Health Risks	CHENG Ke, JI Wan-wan, HAO Wei-wei, <i>et al.</i> (4337)
Size Distribution Characteristics and Inhalation Exposure of Particle-Bound PAHs in an Industrial City	WANG Juan, GUO Guan-lin, QIN Ning, <i>et al.</i> (4345)
High-frequency Evolution of Urban Atmospheric Ammonia and Ammonium and Its Gas-to-Particle Conversion Mechanism in Nanjing City	SHAO Sheng-cheng, CHANG Yun-hua, CAO Fang, <i>et al.</i> (4355)
Optical Absorption Properties of Brown Carbon Aerosols in Guangzhou	LI Zhu-jie, TAN Hao-bo, ZHENG Jun (4364)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Spring in Zhengzhou	ZHANG Yi-xiang, YIN Sha-sha, YUAN Ming-hao, <i>et al.</i> (4372)
Raw Materials and End Treatment-based Emission Factors for Volatile Organic Compounds (VOCs) from Typical Solvent Use Sources	LIANG Xiao-ming, CHEN Lai-guo, SUN Xi-bo, <i>et al.</i> (4382)
Source Profiles of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Typical Solvent-based Industries in Beijing	FANG Li, LIU Wen-wen, CHEN Dan-ni, <i>et al.</i> (4395)
Emission Characteristics of IVOCs from the Combustion of Residential Solid Fuels and the Impact of Burning Temperature	LU Ya-jing, FENG Yan-li, QIAN Zhe, <i>et al.</i> (4404)
Evaluation of MACC Reanalysis Ozone Data over China Using Ground-based and AIRS Satellite Observations	WANG Run-fang, MA Xiao-dan, ZHAO Tian-liang, <i>et al.</i> (4412)
Hydrolysis of COS over MgAl Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites	WEI Zheng, ZHANG Xin, ZHANG Feng-lian, <i>et al.</i> (4423)
Chemical Characteristics and Ionic Sources of Precipitation in the Source Region of the Yangtze River	WANG Shao-yong, HE Xiao-bo, WU Jing-kui, <i>et al.</i> (4431)
Effects of Continuous Extreme Rainfall on Water Quality of the Dongjiang River Basin	CHE Rui, LIN Shu, FAN Zhong-ya, <i>et al.</i> (4440)
Correlation Analysis of Water Quality Between Lake Inflow and Outflow: A Case Study of Poyang Lake	HUANG Dong-ling, NI Zhao-kui, ZHAO Shuang, <i>et al.</i> (4450)
Spatio-temporal Distribution Characteristics of the Water Quality in the Jinze Reservoir and Its Inflow	LIU Ming-kun, TONG Jun, HU Bo, <i>et al.</i> (4461)
Temporal and Spatial Variations in the Conductivity in Different Media in Taihu Lake, China	WANG Rui, DAI Dan, ZHANG Chi, <i>et al.</i> (4469)
Uncertainty and Sensitivity Analysis of Phosphorus Model Parameters in Large Shallow Lakes	SHI Yuan-yuan, LI Yi-ping, CHENG Yue, <i>et al.</i> (4478)
Spatio-temporal Variations in Aquatic Vegetation Cover and the Potential Influencing Factors in Lake Hongze Based on MODIS Images	LI Na, SHI Kun, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (4487)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrients in the Surface Sediments of a Macrophyte-Dominated Zone in Lake Taihu	ZHANG Jie, WANG Yuan-sheng, GUO Xi-ya, <i>et al.</i> (4497)
Composition and Distribution of Biodegradable Compounds in the Macrophyte Dominated Zone of Lake Taihu	QI Chuang, FANG Jia-qi, ZHANG Li-min, <i>et al.</i> (4505)
Temporal and Spatial Variation of Zooplankton Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors in Dianshan Lake, Shanghai	DU Cai-li, YANG Li, ZHAO Yi, <i>et al.</i> (4513)
Geochemical Characteristics and Ecological Significance of Carbon Isotopes in Groundwater Under the Influence of Different Land Use Types in Karst Areas	REN Kun, PAN Xiao-dong, ZENG Jie, <i>et al.</i> (4523)
Temporal Response of Subterranean Karst Stream Hydrochemistry to Urbanization	YANG Ying-zeng, HE Shou-yang, WU Pan, <i>et al.</i> (4532)
Hydrochemical Characteristics of Karst Groundwater in the Mountains of Northern Bazhong City, China	TANG Jin-ping, ZHANG Qiang, HU Yang, <i>et al.</i> (4543)
Removal of Fe(II), Mn(II), and NH ₄ ⁺ -N by Using δ-MnO ₂ Coated Zeolite	MA Wen-jie, CHEN Tian-hu, CHEN Dong, <i>et al.</i> (4553)
Strengthening Effect of Different Cattail Pretreatment Methods on the Denitrification of Horizontal Subsurface Flow in a Constructed Wetland	XIONG Jia-qing, LU Xue-bin, ZHENG Yu-cong, <i>et al.</i> (4562)
Short-cut Nitrification Start-up and Optimization of Operating Conditions Under Different Control Strategies	LIU An-di, ZHAO Kai-liang, LIU Hong, <i>et al.</i> (4569)
Start-up of a Three-stage PVA Granular Sludge Reactor for Treating Wastewater with High Concentrations of Ammonia	Ji Xiao-qing, Qi Ze-kun, Qian Fei-yue, <i>et al.</i> (4578)
Removal of Hydrogen Sulfide Produced in a Municipal WWTP Using a Biotrickling Filter with Polypropylene Rings as the Packing Material and Microbial Community Analysis	SUN Shi-hao, JIA Ti-pei, CHEN Kai-qi, <i>et al.</i> (4585)
Characteristics and Influencing Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Typical Industrial Areas of Chengdu	RAN Zong-xin, CHEN Jin-yu, WANG Ya-ting, <i>et al.</i> (4594)
Absorption Characterization and the Identification of Factors Influencing Five Organophosphate Esters in Water-Soil System	HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, WEI Shi-qiang (4604)
Adsorption and Interaction of Cu ²⁺ and Pb ²⁺ on BS-12 Amphoteric Modified Bentonites	BU Shuai-bin, MENG Zhao-fu, Sambath Yek, <i>et al.</i> (4611)
Concentration Characteristics, Source Analysis, and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in a Peak-cluster Depression Area, Southeast of Yunnan Province	HONG Tao, KONG Xiang-sheng, YUE Xiang-fei (4620)
Cd Accumulation and Risk Assessment for Arable Soils in the Karst Region of Northern Luodian, Guizhou	TANG Qi-lin, LIU Xiu-ming, LIU Fang, <i>et al.</i> (4628)
Safe Utilization of Paddy Soils Lightly Polluted with Cadmium in Western Chongqing	LI Na, HE Hong-zhou, FENG Ai-xuan, <i>et al.</i> (4637)
Accumulation of Cd in Different Crops and Screening of Low-Cd Accumulation Cultivars	CHEN Xiao-hua, SHEN Gen-xiang, BAI Yu-jie, <i>et al.</i> (4647)
Absorption and Transportation of Selenium Nanoparticles in Wheat and Rice	WANG Ya-qi, ZHU Li-na, LI Kui, <i>et al.</i> (4654)
Effects of Microplastics on the Growth, Physiology, and Biochemical Characteristics of Wheat (<i>Triticum aestivum</i>)	LIAO Yuan-chen, Nazgul-Jahitbek, LI Mei, <i>et al.</i> (4661)
Regulation and Mechanism of a Dregs Biochar Matrix Combined with Maifanite on a Soil-Ryegrass System	XIAO Liang-liang, DING Yuan (4668)
Microbial Community Structure and the Distribution of Antibiotic Resistance Genes in Soil Contaminated by Sulfamethoxazole	ZHANG Hai-feng, SHI Ming-ming, SUN Yan-mei, <i>et al.</i> (4678)
Dynamics of Antibiotic Resistance Genes During the Municipal Solid Waste Leachate Treatment	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, YAN Yi-jun, <i>et al.</i> (4685)
Effects of Manure Application Rates on the Soil Carbon Fractions and Aggregate Stability	SHAO Hui-yun, LI Zi-yue, LIU Dan, <i>et al.</i> (4691)
Effects of Irrigation and Biochar Application on the Respiratory Temperature Sensitivity of Paddy Soil	ZHOU Peng, QI Le, NIU Hai-dong, <i>et al.</i> (4700)
Response of Soil CO ₂ Emissions to Straw-returning in Citrus/Mushroom Intercropping Systems	YOU Jing, NI Jiu-pai, HUANG Rong, <i>et al.</i> (4708)
Effects of Warming and Straw Application on Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen and Bacterial Community Structure	ZHANG Ting-ting, CHEN Shu-tao, WANG Jun, <i>et al.</i> (4718)
Simulated Ozone Damage on Gross Primary Productivity (GPP) in a Winter Wheat Field	XU Jing-xin, ZHENG You-fei, WANG Sheng, <i>et al.</i> (4725)
Spatial and Temporal Variations in Fertilizer Use Across Prefecture-level Cities in China from 2000 to 2015	PAN Xiao-dong, LI Pin, FENG Zhao-zhong, <i>et al.</i> (4733)