

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第4期

Vol.36 No.4

**2015**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

中美空气质量指数(AQI)对比研究及启示 ..... 高庆先,刘俊蓉,李文涛,高文康(1141)

2013年1月北京市PM<sub>2.5</sub>区域来源解析 ..... 李璇,聂滕,齐珺,周震,孙雪松(1148)

2013年1月北京市一次空气重污染成因分析 ..... 程念亮,李云婷,张大伟,聂滕,邱启鸿,徐文帅(1154)

上海大气总悬浮颗粒物中金属的可溶性特征 ..... 常燕,冯冲,瞿建国,张经(1164)

厦门春季PM<sub>10</sub>中PAHs成分谱特征及其与气象要素相关性分析 ..... 张健,樊曙先,孙玉,张悦,魏锦成(1173)

硫氧同位素示踪南京北郊大气PM<sub>2.5</sub>中硫酸盐来源 ..... 魏英,郭照冰,葛鑫,祝胜男,姜文娟,石磊,陈姝(1182)

结合激光雷达分析2014年春季南京地区一次大气污染过程 ..... 包青,贺军亮,查勇,程峰,李倩楠(1187)

春季华东高山背景区域PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>2.5-10</sub>中水溶性无机离子特征 ..... 苏彬彬,张智胜,陶俊,许榕洋,纪贤鑫,刘心东,张若宇(1195)

落叶燃烧排放的颗粒物及有机碳、元素碳的研究 ..... 杨伟宗,刘刚,李久海,徐慧,吴丹(1202)

四川省秸秆露天焚烧污染物排放清单及时空分布特征 ..... 何敏,王幸锐,韩丽,冯小琼,毛雪(1208)

深圳市船舶排放清单与时空特征研究 ..... 杨静,尹佩玲,叶斯琪,王水胜,郑君瑜,区家敏(1217)

超细颗粒通过建筑狭缝的传输特性 ..... 孙在,陈秋方,蔡志良,杨文俊,汪晗(1227)

空调病房真菌气溶胶浓度及粒径分布特征 ..... 张华玲,冯鹤华,方子梁,王本栋,李丹(1234)

基于氢氧稳定同位素的黄土高原云下二次蒸发效应 ..... 靳晓刚,张明军,王圣杰,朱小凡,董蕾,任正果,陈粉丽(1241)

黄河小浪底水库水沙调控对DOC输送的影响 ..... 张永领,王明仕,董玉龙(1249)

调水调沙工程长期实施对黄河口近岸沉积物粒度分布与黏土矿物组成特征的影响 ..... 王苗苗,孙志高,卢晓宁,王伟,王传远(1256)

春季生物作用对山地岩溶池水地球化学特征的影响 ..... 于正良,杨平恒,赵瑞一,李林立,张琳,童小容,罗刚(1263)

降雨期间岩溶城镇区地下水重金属变化特征及来源解析 ..... 任坤,杨平恒,江泽利,王尊波,师阳,王凤康,李晓春(1270)

北江和珠江广州河段水体的三卤甲烷风险评价 ..... 钟惠舟,韦朝海(1277)

丰水期洪湖水水质空间变异特征及驱动力分析 ..... 李昆,王玲,李兆华,王祥荣,陈红兵,吴忠,朱鹏(1285)

三峡库区典型干-支流相互作用过程中的营养盐交换:以梅溪河为例 ..... 操满,傅家楠,周子然,邓兵,王雨春,汪福顺(1293)

营养盐输入对太湖水体中磷形态转化及藻类生长的影响 ..... 王睿喆,王沛芳,任凌霄,王超,王颖(1301)

一小型藻华池塘浮游植物群落动态及其影响因子研究 ..... 杨文,朱津永,张克鑫,万莉,陆开宏(1309)

昌黎生态监控区夏季浮游植物群落年际变化特征分析 ..... 梁晓林,杨阳,王玉良,张月明,赵志楠,韩晓庆,张鉴达,高伟明(1317)

河道曝气提升河流水质的WASP模型研究 ..... 朱文博,王洪秀,柳翠,张建,梁爽(1326)

γ辐射降解水中的盐酸环丙沙星的研究 ..... 祝胜男,郭照冰,赵永富,葛鑫,魏英,陈姝,王静(1332)

电化学氢化物发生法处理含镉废水及对镉的回收 ..... 陈京晶,张国平,李海霞,付志平,欧阳小雪,吴琼(1338)

Fe-MCM-41催化臭氧氧化间甲酚废水 ..... 孙文静,王亚曼,卫皇墨,王森,李旭宁,李敬美,孙承林,安路阳(1345)

生物阳极及其反转为生物阴极降解氯霉素 ..... 孔德勇,梁斌,云慧,王爱杰,任南琪(1352)

308 nm光作用下α-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>表面HNO<sub>3</sub>的光解 ..... 陆军,孙云东,谢晶晶,赵军,邹家骥,朱承强(1359)

L-组氨酸-赤藓红复合膜修饰电极同时检测对苯二酚、邻苯二酚 ..... 何家洪,徐强,丁武泉,李强(1365)

酞基功能型高分子生物载体(PET-AQS)制备及催化生物反硝化特性研究 ..... 许晴,侯正浩,田秀蕾,牛春梅,郭延凯,廉静,郭建博(1374)

枯草芽孢杆菌对土臭素和2-甲基异冰片的降解动力学特性 ..... 马念念,罗国芝,谭洪新,姚妙兰,王晓用(1379)

嗜咪降解菌筛选及其对焦化废水强化处理 ..... 李静,李文英(1385)

Fe<sup>3+</sup>对同步硝化反硝化过程氮元素迁移转化及N<sub>2</sub>O释放的影响 ..... 李浩,闫玉洁,谢慧君,贾文林,胡振,张建(1392)

内循环半短程亚硝化工艺运行条件与微生物群落研究 ..... 赵志瑞,焦海华,崔丙健,黄迪,曹世超,王云,刘上千,马斌,白志辉(1399)

利用处理含4-氯苯酚模拟废水的剩余污泥培养普通小球藻 ..... 王璐,陈秀荣,闫龙,何怡萱,施震东(1406)

进水渗滤液总氮和BOD<sub>5</sub>/TN对填埋场反应器反硝化和厌氧氨氧化协同脱氮的影响 ..... 杨盈盈,陈奕,李明杰,谢冰(1412)

重庆金佛山土壤中PAHs含量的海拔梯度分布及来源解析 ..... 师阳,孙玉川,梁作兵,任坤,袁道先(1417)

湖南攸县典型煤矿和工厂区水稻田土壤镉污染特征及污染途径分析 ..... 张敏,王美娥,陈卫平,牛俊杰(1425)

沟渠化对三江平原湿地铁元素沉积过程的影响 ..... 苏文辉,于晓菲,王国平,栾金花,邹元春(1431)

施用磷酸盐和沸石对土壤镉形态转化的影响 ..... 王秀丽,梁成华,马子惠,韩月(1437)

不同条件下皂苷对污染壤土中Cu、Pb的淋洗修复 ..... 邓红侠,杨亚莉,李珍,许岩,李荣华,孟昭福,杨亚提(1445)

陕北某化工企业周围污灌区土壤-作物系统重金属积累特征及评价 ..... 齐雁冰,楚万林,蒲洁,刘梦云,常庆瑞(1453)

有机无机缓释复合肥对不同土壤微生物群落结构的影响 ..... 王菲,袁婷,谷守宽,王正银(1461)

玉米对铅胁迫的响应及体内铅化学形态研究 ..... 程海宽,张彪,景鑫鑫,杨素勤,赵鹏,孙晓雪,周志云(1468)

硼钨交互作用对水稻吸收积累镉和硼的影响 ..... 向猛,黄益宗,蔡立群,保琼莉,黄永春,王小玲,乔敏,胡莹,金姝兰,李季,王斐(1474)

丛枝菌根真菌对不同含盐量湿地土壤中芦苇生长的影响 ..... 郭江源,郭伟,毕娜,付瑞英,赵文静,赵仁鑫,王立新(1481)

滨海区芦苇和香蒲耐盐碱性及除氮磷效果对比研究 ..... 陈友媛,孙萍,陈广琳,王宁宁(1489)

不同温度下的土壤微生物呼吸及其与水溶性有机碳和转化酶的关系 ..... 吴静,陈书涛,胡正华,张旭(1497)

工业VOCs经济手段和工程技术减排对比性分析 ..... 王宇飞,刘昌新,程杰,郝郑平,王铮(1507)

《环境科学》征订启事(1216) 《环境科学》征稿简则(1248) 信息(1163,1194,1248,1424)

# 陕北某化工企业周围污灌区土壤-作物系统重金属积累特征及评价

齐雁冰<sup>1,2</sup>, 楚万林<sup>1</sup>, 蒲洁<sup>1</sup>, 刘梦云<sup>1,2</sup>, 常庆瑞<sup>1,2</sup>

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100; 2. 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 杨凌 712100)

**摘要:** 对陕西北部某化工企业污灌区土壤-作物系统的重金属积累状况及空间分布进行了深入研究。结果表明, 污水排放导致了周围农田土壤中 Cd 和 Cu 的聚集, 其中 Cd 的积累量超过国家土壤环境二级标准; 土壤 Cu、Zn 和 Pb 的单因子污染指数均小于 1, Cd 的单因子污染指数为 1.21, 属轻度污染, 4 种重金属综合污染指数为 0.74, 属警戒线等级。在剖面上, 所有重金属元素均表现出明显的表聚现象, 主要聚集在土壤表层 0~10 cm 范围内, 在空间分布上, 污水排放企业污灌区土壤和作物重金属 Cu、Zn 和 Cd 的强烈聚集区出现在企业排污口附近 100 m 范围内, 而 Pb 集中在 200 m 范围内, 并随着距企业距离的增加重金属含量呈降低趋势。在企业污水灌溉的影响下, 玉米籽粒中 Cu、Pb 和 Cd 的平均含量分别为 4.74、0.129 和 0.036 mg·kg<sup>-1</sup>, 明显高于对照区, 其中 Pb 达到 5.7% 的超标率。玉米籽粒中重金属单因子污染指数均小于 1, 大小为 Pb > Cu > Zn > Cd, 综合污染指数为 0.53, 属安全清洁等级; 4 种重金属元素中, 除 Cd 在作物中与土壤中有有效态和全量之间均呈现极显著的正相关关系外, 其余元素作物中和土壤中含量相关性均未达到显著水平。因此, 该化工企业周围, 尽管由于污灌引起重金属在土壤中的累积, 但由于在农作物中的积累有限, 暂时未对人体健康造成威胁, 但由于交通及烟尘引起的 Pb 的超标应引起重视。

**关键词:** 化工企业; 重金属; 作物; 空间变异; 污灌

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)04-1453-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.04.044

## Accumulation Characteristics and Evaluation of Heavy Metals in Soil-Crop System Affected by Wastewater Irrigation Around a Chemical Factory in Shenmu County

QI Yan-bing<sup>1,2</sup>, CHU Wan-lin<sup>1</sup>, PU Jie<sup>1</sup>, LIU Meng-yun<sup>1,2</sup>, CHANG Qing-rui<sup>1,2</sup>

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling 712100, China)

**Abstract:** Soil heavy metals Cu, Pb, Zn, and Cd, are regarded as “chemical time bombs” because of their propensity for accumulation in the soil and uptake by crops. This ultimately causes human toxicity in both the short and long term, making farmland ecosystems dangerous to health. In this paper, accumulation and spatial variability of Cu, Zn, Pb and Cd in soil-crop system affected by wastewater irrigation around a chemical factory in northern Shaanxi province were analyzed. Results showed that wastewater irrigation around the chemical factory induced significant accumulation in soils compared with control areas. The average concentrations of available Cu and total Cu were 4.32 mg·kg<sup>-1</sup> and 38.4 mg·kg<sup>-1</sup>, which were twice and 1.35 times higher than those of the control area, respectively. Soil Zn and Pb were slightly accumulated. Whereas soil Cd was significantly accumulated and was higher than the critical level of soil environmental quality (II), the available and total Cd concentrations were 0.248 mg·kg<sup>-1</sup> and 1.21 mg·kg<sup>-1</sup>, which were 10 and 6.1 times higher than those of the control areas. No significant correlations were found between available and total heavy metals except between available Cd and total Cd. All the heavy metals were mainly accumulated in the top layer (0-10 cm). Spatially, soils and plants high in heavy metal concentration were distributed within the radius of about 100 m from the waste water outlet for Cu, Zn and Cd and about 200 m for Pb, and decreased exponentially with the distance from the factory. Affected by wastewater irrigation, contents of Cu, Pb and Cd in maize were 4.74, 0.129 and 0.036 mg·kg<sup>-1</sup> which were slightly higher than those in the control area. The content of Zn was similar to that in the control area. Affected by the vehicle exhaust, the over standard rate of Pb was 5.7% in maize. All the heavy metals did not show significant correlation between soil and crop, except Cd. The square correlation coefficients were 0.83 and 0.75 between soil available and total Cd with maize. Therefore, the chemical factory contributed to the accumulation of heavy metals in the soil around it, but the contribution to the crop was limited, and thus temporarily caused no threat to human health. The reason for the lower accumulation was the high soil pH and low soil organic matter content. But more attentions should be paid to the higher accumulation of Pb in the maize caused by the vehicle and dust.

**Key words:** chemical factory; heavy metal; crops; spatial variance; wastewater irrigation

收稿日期: 2014-09-30; 修订日期: 2014-12-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(31100516); 中央高校基本科研业务费专项(QN2011075); 国家高技术研究发展计划(863)项目(2013AA102401)

作者简介: 齐雁冰(1976~), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为荒漠化植被恢复的土壤质量评价, E-mail: ybqi@nwsuaf.edu.cn

土壤中的一些重金属元素如 Cu、Zn、Pb、Cd 等在根系的吸收和输送作用下被输送到农作物的各个器官组织中进行再分配<sup>[1]</sup>,再通过食物链进入人体,对人体健康构成威胁<sup>[2]</sup>。随着我国经济的迅速发展,企业通过“三废”排放到土壤中的重金属污染物也呈迅速增加的趋势,特别是污灌造成的土壤-农作物系统重金属元素的积累成为人们关注的焦点之一,因此全面了解并系统掌握污灌对土壤-农作物系统中重金属的积累特征、空间分布格局以及相互关系,可以为因地制宜及合理的规划农业生产布局、制定农业生态环境的保护提供理论和实践基础<sup>[3]</sup>。

工业生产所排放的“三废”通过如污灌等农业生产行为对周围农田土壤及农作物产生影响,污灌区土壤及农作物重金属的积累是国内外学者重点研究的领域<sup>[4]</sup>。目前国内外学者在污灌对土壤-农作物系统重金属分布与积累的研究主要集中在污灌区周围重金属积累状况与评价<sup>[5~7]</sup>、污灌企业周围重金属积累范围<sup>[8,9]</sup>及土壤-农作物系统重金属积累量相关性三个方面<sup>[10~13]</sup>。这些研究对于揭示工业污灌对土壤-农作物系统重金属积累及迁移规律具有重要的促进作用。然而,重金属在土壤及农作物中的迁移与转化是个非常复杂的过程,目前的研究往往集中在南方水田区域、老工业区,而对于西北半干旱地区新兴的工业基地企业污灌区对土壤-农作物系统重金属积累及相互关系的研究报道尚少。

陕北近年来能源矿产的开发,带动大量以煤炭为燃料或原料的化工企业的建设,这些化工企业经过简单处理后排放的废水直接进入河流,农户则通过这些河水进行灌溉,这些污灌行为对当地土壤及农作物中重金属积累状况及程度是政府及农户关心的问题之一,因此本研究选择位于陕西省神木县锦界工业园区某化工厂周围通过污灌进行生产的农田,在其上小间距的土壤、作物的密集采样,通过土壤-农作物系统全面采样分析,一方面掌握化工企业周围污灌造成的土壤-作物系统中重金属的聚集及其空间分异,另一方面探究重金属在土壤-作物系统中的相关性。

## 1 材料与方法

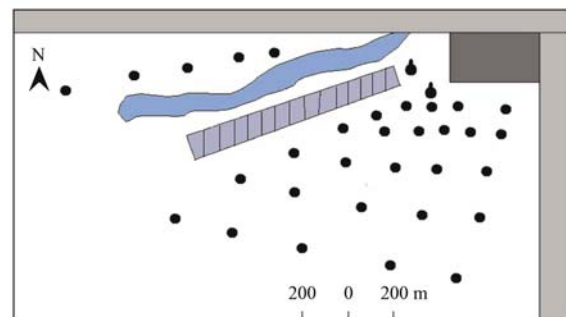
### 1.1 研究区概况

研究区为陕西省神木县锦界工业园区某化工企业周围的污灌区,地处该工业园区西部,地貌类型为毛乌素沙地与黄土高原接壤的风沙灌区。属半干旱大陆性季风气候,年平均降水量 350 mm,年平均温

度 8.8℃,无霜期 130 d。该化工厂始建于 2004 年,主要从事片碱(氢氧化钠、烧碱、火碱、固碱)的生产,在将天然碱粉进行粉碎、溶解、澄清及冷凝过程中,重金属进入水中,并以污水的形式排放。该企业海拔 825 m,厂区面积约 0.1 km<sup>2</sup>,厂区周围耕地土壤类型为黄绵土,质地为轻壤。农作物种植秋季以玉米为主。该企业位于十字路口西南角,企业西边和南边均为农田(图 1),该企业产生的废水经过废水池进行简单处理,通过管道排放到企业外的河沟里,农户直接抽取河水进行灌溉,玉米生长季农户共灌溉 2 次,因此主要通过污灌影响土壤-作物系统。

### 1.2 样品采集与处理

土壤和作物样品的采集均在 2011 年 10 月玉米进入收获期时进行。样品采集时,按照距离企业由近至远,采样间距也由小到大的方式采集土壤样品。在每个样点的 20 m<sup>2</sup> 范围内,采集 5~6 处耕层土壤,混合均匀再缩分至 1~2 kg,共采集表层土壤样品 35 份。土壤样品在室内自然风干,木棒捣碎过 10 目筛,进行土壤重金属有效态测定;过 100 目筛进行土壤重金属全量的测定。同时,在企业的排污口附近采集土壤剖面样品,在耕层 0~20 cm,按间隔为 4 cm 采集,在 20 cm 以下按照每隔 20 cm 采集。在远离企业约 3 km 的相对清洁区,采集了表层样品做对照。玉米样品的采集与土壤采样点对应,采样时亦在 20 m<sup>2</sup> 范围内多处采集籽粒约 500 g,同时在远离企业约 3 km 的相对清洁区采集玉米样品做对照,共采集玉米籽粒样品 35 份。籽粒样品经去离子水洗净后,在室内自然风干,磨碎过 60 目筛,供分析之用。



图例  
● 土壤(玉米)采样点    公路    居民点  
● 剖面采样点    河流    企业

图 1 化工企业渠灌区环境及样点分布示意

Fig. 1 Natural environment around the chemical factory and distribution of the sampling sites

### 1.3 样品分析与数据处理

土壤 pH 采用 pH 计 (PHS-3C, 上海仪电) 测定 (土水比 = 1: 2.5), 有机质含量测定用重铬酸钾-氧化外加热法<sup>[14]</sup>; 土壤有效态 Cu、Zn、Pb、Cd 测定采用 DTPA 浸提, ICP 测定; 土壤全量 Cu、Zn、Pb、Cd 采用反王水 (HNO<sub>3</sub>/HCl = 3/1) 消煮<sup>[15]</sup>, Cu、Zn 用火焰原子吸收法 (WFX-110B, 北京瑞利) 测定, Pb、Cd 用石墨炉 (AA2630, 北京瑞利) 原子吸收法测定. 植物样品中的重金属用 HNO<sub>3</sub> 消煮, Pb、Cd 石墨炉原子吸收法测定, Cu 和 Zn 用火焰原子吸收法测定. 数据处理均在 SPSS 19.0 中进行.

### 1.4 重金属污染评价方法

本研究采用单因子指数法和内梅罗指数综合评价相结合的方法评价土壤和玉米籽粒中重金属的污染状况<sup>[16, 17]</sup>. 单因子指数法是对某种重金属的污染程度进行评价, 其计算公式为:

$$P_i = C_i/S_i \quad (1)$$

表 1 土壤及玉米籽粒中重金属污染污染指数分级标准<sup>[17, 18]</sup>

Table 1 Classification of pollution indices of heavy metals in soil and corn

| 级别 | 单因子污染指数       | 污染等级 | 综合污染指数                   | 污染等级         |
|----|---------------|------|--------------------------|--------------|
| 1  | $P_i < 1$     | 清洁   | $P_{\text{综}} < 0.7$     | 安全, 清洁       |
| 2  | $1 < P_i < 2$ | 轻污染  | $0.7 < P_{\text{综}} < 1$ | 警戒线, 尚清洁     |
| 3  | $2 < P_i < 3$ | 中污染  | $1 < P_{\text{综}} < 2$   | 轻度污染, 开始受污染  |
| 4  | $P_i > 3$     | 重污染  | $2 < P_{\text{综}} < 3$   | 中度污染, 受到重度污染 |
| 5  |               |      | $P_{\text{综}} > 3$       | 重污染, 受到严重污染  |

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤重金属统计

由表 2 可以看出, 该污灌区土壤 pH 和有机质平均值分别为 8.42 和 11.04 g·kg<sup>-1</sup>, 与对照区相比较具有一定的提高. 自然状态下土壤中重金属元素主要来源于成土母质, 成土过程决定土壤重金属的含量, 而在工矿企业周围环境中, 由于污灌等人为活

式中,  $P_i$  为污染物  $i$  的单项污染指数;  $C_i$  为污染物  $i$  的测定值;  $S_i$  为污染物  $i$  的评价标准, 本研究采用土壤环境质量 II 级标准 (GB 15618-1995)<sup>[16]</sup> 和农业部制定的 NY861-2004 标准<sup>[17]</sup>. 根据单因子指数值的大小来判断某种重金属的污染程度, 指数值越大, 污染也越严重 (表 1).

内梅罗综合指数法是在单项污染指数法评价的基础上, 采用兼顾单元素污染指数平均值和最大值的内梅罗综合污染指数法进行评价, 其计算公式为:

$$P_{\text{综}} = \sqrt{\frac{(C_i/S_i)_{\text{max}}^2 + (C_i/S_i)_{\text{ave}}^2}{2}} \quad (2)$$

式中,  $(C_i/S_i)_{\text{max}}^2$  为最大单项污染指数;  $(C_i/S_i)_{\text{ave}}^2$  为单项污染指数的平均值,  $P_{\text{综}}$  为综合污染指数, 数值越大, 表示污染越严重. 这种方法的计算结果不仅考虑了各种污染物的平均污染水平, 也反映了污染最严重的污染物给环境造成的危害.

动, 大量的重金属元素被带入环境之中. 该化工企业污灌区土壤中出现明显的重金属积累, 无论是全量还是有效态重金属含量均高于对照区 (表 2), 其中 Cd 积累最明显, 全量已经超出国家土壤环境质量二级标准<sup>[16]</sup>. 土壤中有效 Cu 平均含量达到了 4.32 mg·kg<sup>-1</sup>, 是对照区有效 Cu 的 2 倍; 土壤全 Cu 含量是 38.4 mg·kg<sup>-1</sup>, 是对照区 Cu 含量的 1.35 倍. 土壤有效 Zn 和全 Zn 及有效 Pb 和全 Pb 含量仅

表 2 化工企业污灌区土壤重金属含量<sup>1)</sup>

Table 2 Concentration of heavy metals in soil around the chemical factory

| 项目                        | 平均值   | 标准差  | 变异系数 | 对照区   | 二级标准 (pH > 7.5) | 相关性  | 有效性/% |
|---------------------------|-------|------|------|-------|-----------------|------|-------|
| pH                        | 8.42  | 0.53 | 24   | 8.26  | —               | —    | —     |
| SOM/g·kg <sup>-1</sup>    | 11.04 | 2.34 | 37   | 9.63  | —               | —    | —     |
| 有效 Cu/mg·kg <sup>-1</sup> | 4.32  | 1    | 21   | 2.15  | —               | 0.63 | 11.2  |
| 全 Cu/mg·kg <sup>-1</sup>  | 38.4  | 3.1  | 11   | 28.5  | 100             | —    | —     |
| 有效 Zn/mg·kg <sup>-1</sup> | 0.912 | 0.37 | 47   | 0.673 | —               | 0.54 | 1.3   |
| 全 Zn/mg·kg <sup>-1</sup>  | 68.7  | 4.32 | 5    | 53.8  | 300             | —    | —     |
| 有效 Pb/mg·kg <sup>-1</sup> | 1.82  | 0.31 | 25   | 1.43  | —               | 0.48 | 6.6   |
| 全 Pb/mg·kg <sup>-1</sup>  | 27.6  | 5.1  | 18   | 26.6  | 350             | —    | —     |
| 有效 Cd/mg·kg <sup>-1</sup> | 0.248 | 0.29 | 104  | 0.024 | —               | 0.86 | 20.5  |
| 全 Cd/mg·kg <sup>-1</sup>  | 1.21  | 1.01 | 84   | 0.197 | 1               | —    | —     |

1) \* \* 表示在  $P < 0.01$  水平上的差异显著; 有效性指有效态占全量的百分比

略高于对照区,且远低于土壤环境二级标准;土壤 Cd 是 4 种元素中积累最为明显的,有效态和全量 Cd 含量分别为  $0.248 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $1.21 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,分别达到了对照区 Cd 含量的 10 和 6.1 倍,也是 4 种重金属元素中变异系数最高的,表明 Cd 受污灌的影响最为明显,且含量已经明显高出土壤环境二级标准。

相关性分析表明,Cu、Zn、Pb 和 Cd 在土壤中的有效态与全量之间的相关系数以 Cd 为最高,并达到显著相关关系( $r$  为 0.86,  $P < 0.01$ ),其余 3 种元素相关性均未达到显著水平。4 种重金属元素有

效性(有效态占总量的百分比)差异明显,最高的为 Cd 达 20.5%,最低的为 Zn 仅为 1.3%。

## 2.2 土壤重金属污染评价

由表 3 可以看出,该污灌区土壤重金属 Cu、Zn 和 Pb 的单因子污染指数均小于 1,平均值分别为 0.38、0.23 和 0.08,属清洁等级,变异系数也均在 0.1 左右。重金属 Cd 的单因子污染指数为 1.21,变异系数达 69%,属轻度污染。综合指数结果显示该污灌区重金属污染的综合指数为 0.74,变异系数为 39.00%,根据评价标准此土壤处于警戒线等级,尚清洁,以 Cd 为主要贡献因子。

表 3 土壤重金属污染指数

Table 3 Pollution indices of heavy metals in soils

| 项目      |    | 平均值  | 分布范围          | 标准差   | 变异系数 |
|---------|----|------|---------------|-------|------|
| 单因子污染指数 | Cu | 0.38 | 0.31 ~ 0.44   | 0.04  | 0.11 |
|         | Zn | 0.23 | 0.19 ~ 0.26   | 0.03  | 0.12 |
|         | Pb | 0.08 | 0.074 ~ 0.085 | 0.007 | 0.09 |
|         | Cd | 1.21 | 0.53 ~ 2.02   | 0.84  | 0.69 |
| 综合指数    |    | 0.74 | 0.41 ~ 0.87   | 0.21  | 0.39 |

## 2.3 土壤重金属在剖面及空间上的分布

土壤剖面上,4 种重金属具有一致的分布趋势,均表现出表聚现象(图 2),以积累最为明显的 Cd 为例,主要聚集在 0 ~ 10 cm 土层中,在 0 ~ 10 cm 内迅速降低,在土壤 10 cm 以下已经基本达到稳定。重金属在剖面上的分布模式受到土壤性质、元素种类及气候的影响<sup>[9, 19]</sup>。通常情况下,重金属由外界进入土壤后由于土壤黏土矿物的吸附作用而积累在几厘米厚的表层内而很难再向下迁移<sup>[20, 21]</sup>。在南方降水量较多的地区污灌造成重金属的向下迁移一般达到 20 cm 以上,有些区域稻田可以达到 80 cm,一方面南方由于土壤发育强烈,成熟度较高,土壤表层黏粒和有机质含量较高,重金属元素易被吸附在地表土壤中<sup>[22]</sup>,另一方面降雨量大,加上翻耕,有利于重金属元素的下移。一般研究认为外源 Cd 在土壤剖面具有很强的迁移能力,如夏增禄等<sup>[23]</sup>对具有 20 多年污水灌溉历史的小麦地进行调查,发现 Cd 的迁移深度可达 40 cm, Cd 在稻田的迁移深度可达 85 cm,远远高于 Cu、Pb。高永华等<sup>[9]</sup>对陕西省某试剂厂周围土壤研究表明:污灌导致土壤中 Cd 主要分布在 0 ~ 50 cm 深度处。也有许多土柱模拟实验也发现,重金属 Cd 有较强的迁移能力<sup>[24]</sup>。在研究区 Cd 及其它元素均表聚在 0 ~ 10 cm 范围内,可能的原因是研究区地处黄土丘陵沟壑区与毛乌素沙地的接壤区,降水量小,蒸发量大,不利于水分的向下

扩散。

由图 3 可以看出,企业周围的有效 Pb 和全 Pb 随着到企业排污口距离的增加而逐渐降低,在距离企业排污口约 200 m 之外,土壤中的 Pb 含量基本保持不变,即该企业的污水对土壤 Pb 含量的影响范围约 200 m,而对于 Cd,在距离企业排污口约 100 m 范围内,土壤中的 Cd 随着距离企业的距离而迅速降低,在 100 m 以外土壤中的 Cd 含量基本保持不变,企业污水对土壤 Cd 含量的影响范围约为 100 m。Cu、Zn(图略)与 Cd 的分布有一致的趋势。这与众多学者的研究结果一致<sup>[6, 7]</sup>。

## 2.4 农作物重金属含量统计

与对照区相比较,该化工企业污灌区玉米籽粒的 Cu、Pb 和 Cd 含量略高于对照区(表 4),玉米籽粒中 Cu、Pb 和 Cd 的平均含量分别为 4.74、0.129 和  $0.036 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,分别是对照区 Cu、Pb 和 Cd 含量的 1.2、1.2 和 2.4 倍(表 4),Zn 与对照区相比较没有明显差异。和国家食品卫生标准相比,玉米籽粒中 Cu、Zn 和 Cd 均未超标,而 Pb 则有 2 个样点超标,超标率为 5.7%。

该污灌区农田土壤中有效态和全量 Pb 的含量均不高且未超过国家二级质量标准,但农作物籽粒中却出现超标现象,这种现象在安徽蚌埠<sup>[7]</sup>、江苏某地震带<sup>[17]</sup>均有发现,其原因可能是由于外源性 Pb 的进入,如大气飘尘中 Pb 的点源污染造成的。

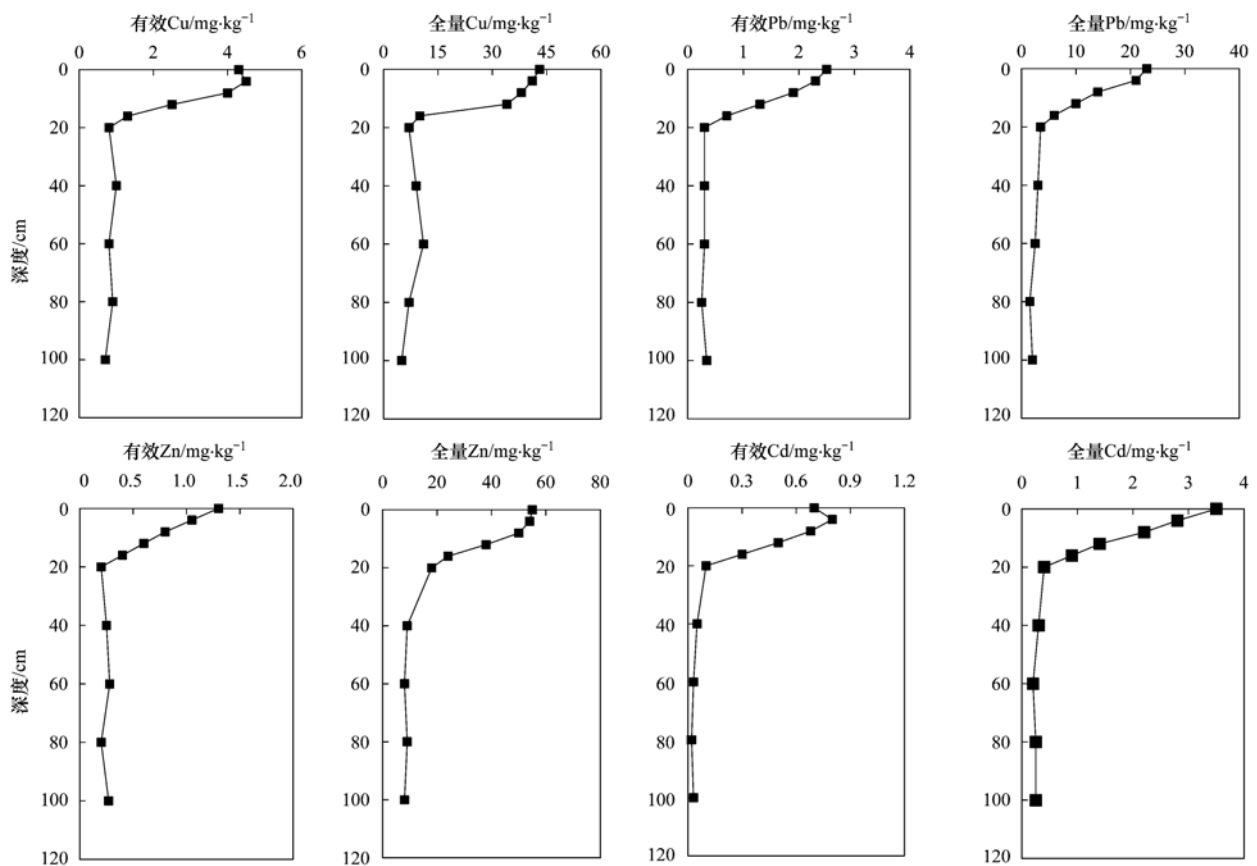


图2 重金属在土壤剖面上的分布

Fig. 2 Distribution of heavy metals in soil profiles

Pb 在土壤中的有效态含量虽然不低,但能够迁移转化进入作物籽粒的几率却很小,籽粒中的累积量与土壤中有效态含量间的关系并不明显<sup>[26]</sup>. 有研究者认为至少有 20% 的汽车尾气排放的 Pb 可扩散至 50 km 以外<sup>[27]</sup>,而本研究所选择的化工企业位于神

木县的交通要道路边,其使位于两条公路的交叉位置,来回过往拉煤及客货运车辆较多,有利于汽车尾气及轮胎磨损中气体的排放<sup>[27]</sup>. Pb 累积的另一个原因可能是该企业以煤炭为燃料,烟囱排放的烟尘在附近有所沉积造成的<sup>[28]</sup>.

表4 企业周围玉米中重金属含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Table 4 Heavy metal concentrations in maize around the chemical factory/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 

| 项目 | 分布范围          | 平均值   | 标准差   | 对照区   | 国家标准 | 超标率/% |
|----|---------------|-------|-------|-------|------|-------|
| Cu | 3.78 ~ 6.83   | 4.74  | 0.76  | 4.01  | 10   | 0     |
| Zn | 12.61 ~ 20.43 | 17.45 | 5.37  | 17.81 | 50   | 0     |
| Pb | 0.072 ~ 0.281 | 0.129 | 0.036 | 0.105 | 0.2  | 5.7   |
| Cd | 0.024 ~ 0.176 | 0.036 | 0.149 | 0.015 | 0.2  | 0     |

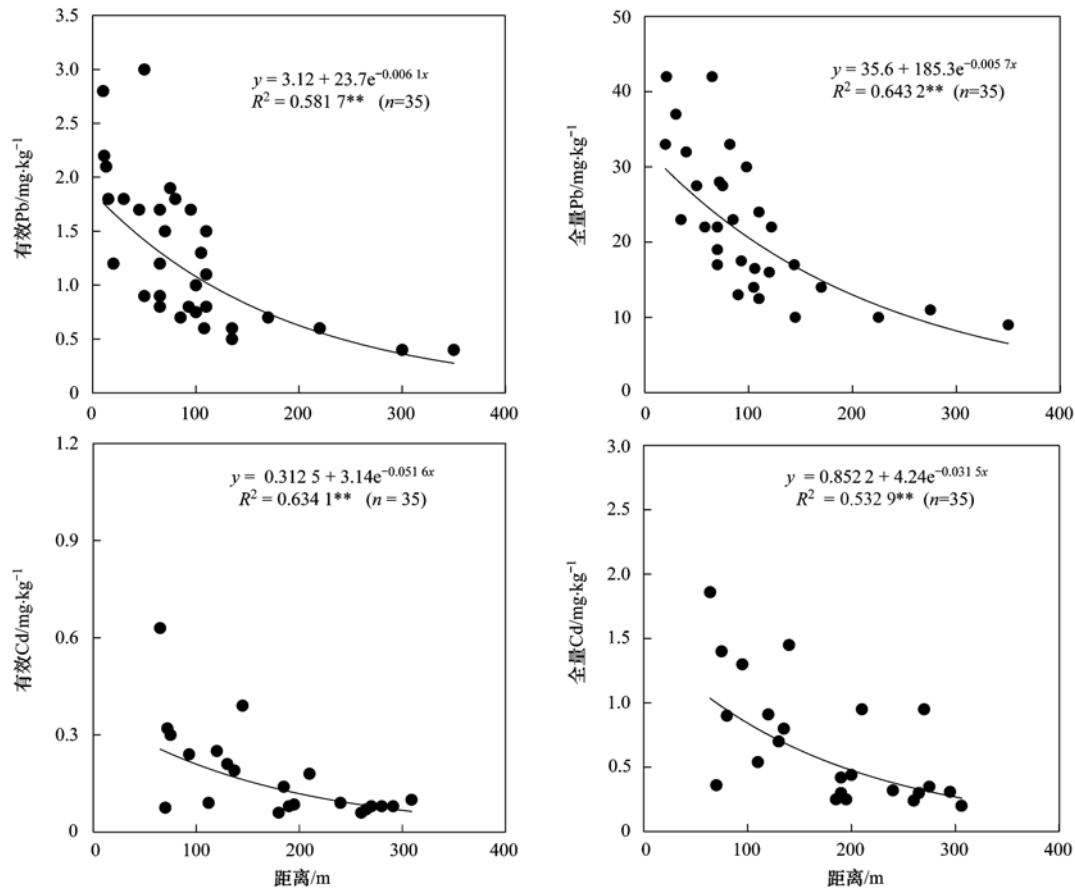
## 2.5 作物重金属污染评价

从单因子污染指数来看,Cu、Zn 和 Cd 的平均值及最大、最小值均小于 1,表明该污灌区玉米籽粒未受到 Cu、Zn 和 Cd 的污染,Pb 的平均值为 0.65,是 4 种重金属总指数最高的,虽然平均值未超过 1,但其中有 2 个样点的污染指数超过了 1,表明该污灌区玉米受到 Pb 污染的风险较大. 玉米综合污染指数平均值为 0.53,分布范围为 0.31 ~ 0.68,均为

超过 0.7,属安全清洁等级(表 5).

## 2.6 土壤与作物中重金属含量的相关性

土壤与作物重金属含量的相关性因重金属种类及重金属形态而有明显差异. 在 4 种重金属元素中,Cd 在作物中与土壤中有效态和全量之间均呈现极显著的正相关关系,相关系数  $R^2$  分别为 0.39 和 0.41(图 4),其余元素作物中和土壤中含量相关性均未达到显著水平. 通常研究认为,农作物中重金



\* \* 和 \* 分别为  $P < 0.01$  和  $P < 0.05$  水平上的相关显著性

图3 重金属含量与距离化工企业距离的相关性

Fig. 3 Correlation between concentration of heavy metals and distance from the chemical factory

表5 玉米重金属污染指数

Table 5 Pollution indices of heavy metals in corn

| 项目      |    | 平均值  | 分布范围        | 标准差  | 变异系数 |
|---------|----|------|-------------|------|------|
| 单因子污染指数 | Cu | 0.47 | 0.38 ~ 0.64 | 0.08 | 0.17 |
|         | Zn | 0.35 | 0.26 ~ 0.42 | 0.08 | 0.23 |
|         | Pb | 0.65 | 0.36 ~ 1.43 | 0.29 | 0.45 |
|         | Cd | 0.18 | 0.12 ~ 0.88 | 0.75 | 4.17 |
| 综合指数    |    | 0.53 | 0.31 ~ 0.68 | 0.18 | 0.34 |

属的积累与土壤中有效性重金属含量的关系更为密切,但本分析结果显示,Cu、Zn和Pb的积累与土壤中DTPA提取的有效性重金属含量关系不显著,这也和很多学者的研究结果一致<sup>[29,30]</sup>.由此表明重金属在土壤-作物系统中的迁移是一个极其复杂的过程,农作物重金属含量除与土壤重金属含量有关系外,还受到如土壤类型、土壤pH和有机质诸多因素的影响<sup>[31,32]</sup>.土壤类型的影响主要体现为土壤组成和质地的不同,研究区土壤类型为黄绵土,其质地相对较粗,因此吸附重金属的能力也相对较低.pH值影响重金属元素形态之间的转化,一般情况下可

浸提态重金属含量与pH成反比<sup>[33,34]</sup>,因此pH越高,重金属对农作物的生物有效性越低,农作物越不易吸收.土壤有机质影响重金属元素的吸附、络合性能,进而影响重金属在土壤中的移动性及其生物有效性<sup>[35,36]</sup>.有机质含量越低,越不利于重金属元素在农作物中的积累<sup>[37]</sup>.研究区所处的风蚀水蚀交错区黄绵土土壤碳酸钙含量高,pH较高,一般在8.2以上,土壤有机质含量较低,一般低于 $12\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,因而不利于作物对重金属的积累,对粮食安全不易产生威胁,这点从玉米中除Pb外重金属含量均未超标也能看出.



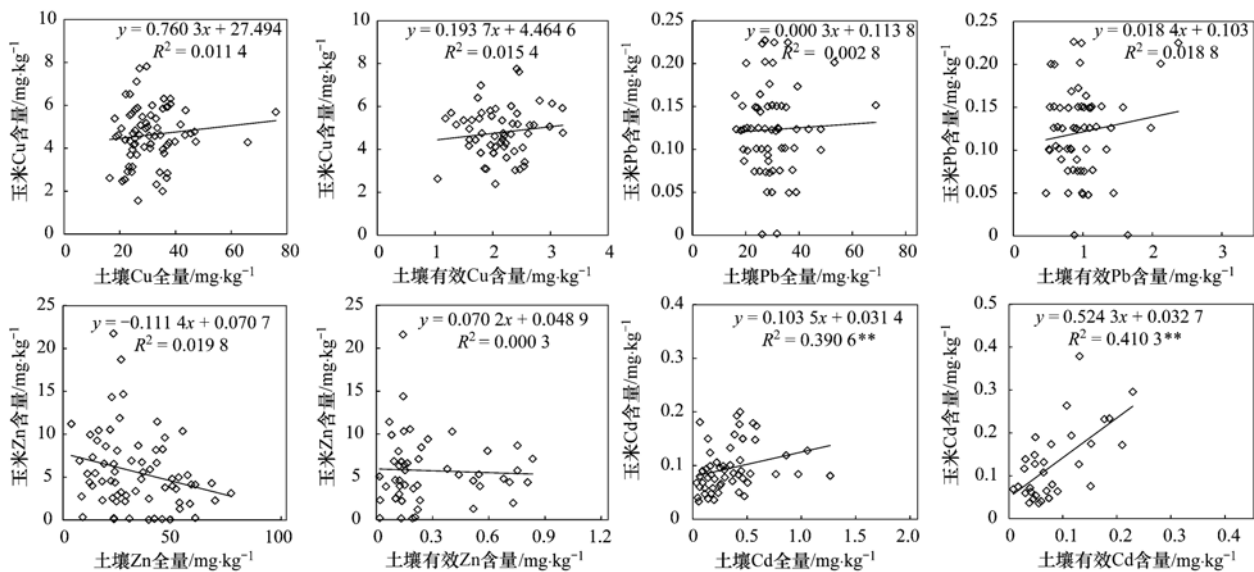


图4 企业周围土壤与作物中重金属含量的相关性

Fig. 4 Correlation between concentration of heavy metals in soil and maize around the chemical factory

### 3 结论

以废水排放为主的某化工企业通过污灌对周围土壤和农作物中重金属分布产生了明显的影响。化工企业污灌区土壤和作物中重金属明显聚集,但影响的范围有限,随着距离和剖面深度的增加土壤中重金属含量明显降低。玉米籽粒中重金属虽然有一定积累,但Cu、Zn和Cd的积累量并未超标,而Pb则受到交通及烟尘等因素的影响出现个别样点的超标,应引起注意。土壤-作物中重金属含量之间的相关性表明,除Cd外,受到土壤质地、pH及有机质等因素的影响,农作物中重金属元素含量与土壤中重金属含量之间并未有明显的相关关系。因此,在某化工企业周围,尽管由于污灌引起重金属在土壤中的累积,但由于在农作物中的积累有限,农作物质量尚安全。

#### 参考文献:

- [1] 关共凑, 徐颂, 黄金国. 重金属在土壤-水稻体系中的分布、变化及迁移规律分析[J]. 生态环境, 2006, **15**(2): 315-318.
- [2] Li Z W, Li L Q, Pan G X, et al. Bioavailability of Cd in a soil-rice system in China; soil type versus genotype effects[J]. Plant and Soil, 2005, **271**(1-2): 165-173.
- [3] 严连香, 黄标, 邵学新, 等. 不同工业企业周围土壤-作物系统重金属Pb、Cd的空间变异及其迁移规律[J]. 土壤学报, 2009, **46**(1): 52-62.
- [4] Rogival D, Scheirs J, Blust R. Transfer and accumulation of metals in a soil-diet-wood mouse food chain along a metal pollution gradient[J]. Environmental Pollution, 2007, **145**(2): 516-528.
- [5] Lee G G, Chon H T, Jung M C. Heavy metal contamination in the vicinity of the Daduk Au-Ag-Pb-Zn mine in Korea [J]. Applied Geochemistry, 2001, **16**(11-12): 1377-1386.
- [6] 陈涛, 常庆瑞, 刘京, 等. 长期污灌农田土壤重金属污染及潜在环境风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2012, **31**(11): 2152-2159.
- [7] 杨晶, 赵云利, 甄泉, 等. 某污灌区土壤与蔬菜重金属污染状况及健康风险评价[J]. 生态与农村环境学报, 2014, **30**(2): 234-238.
- [8] Fakayode S O, Onianwa P C. Heavy metal contamination of soil, and bioaccumulation in Guinea grass (*Panicum maximum*) around Ikeja Industrial Estate, Lagos, Nigeria [J]. Environmental Geology, 2002, **43**(1-2): 145-150.
- [9] 高永华, 王金, 赵莉, 等. 污灌区土壤-植物系统中重金属分布与迁移转化特征研究[J]. 河北农业大学学报, 2006, **29**(5): 52-56.
- [10] 郭永强, 黄春长, 庞奖励, 等. 汉江上游现代洪水滞留沉积物重金属元素特征[J]. 环境科学研究, 2013, **26**(10): 1079-1087.
- [11] 谢建治, 张书廷, 赵新华, 等. 潮褐土镉锌复合污染对小白菜生长的影响[J]. 天津大学学报, 2005, **38**(5): 426-431.
- [12] 杜心, 朱永官, 刘文菊, 等. 汞、砷复合污染对水稻生长及吸收汞、砷的影响[J]. 生态毒理学报, 2006, **1**(2): 160-164.
- [13] 杨军, 陈同斌, 郑袁明, 等. 北京市凉风灌区小麦重金属含量的动态变化及健康风险分析[J]. 环境科学学报, 2005, **25**(12): 1661-1668.
- [14] 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.
- [15] 中国环境监测总站. 土壤元素的近代分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992.

- [16] GB 15618-1995, 土壤环境质量标准[S].
- [17] 陈京都, 戴其根, 许学宏, 等. 江苏省典型区农田土壤及小麦中重金属含量与评价[J]. 生态学报, 2012, **32**(11): 3487-3496.
- [18] 付红波, 李取生, 骆承程, 等. 珠三角滩涂围垦农田土壤和农作物重金属污染[J]. 农业环境科学学报, 2009, **28**(6): 1142-1146.
- [19] 吴文勇, 尹世洋, 刘洪禄, 等. 污灌区土壤重金属空间结构与分布特征[J]. 农业工程学报, 2013, **29**(4): 165-173.
- [20] 崔龙鹏, 白建峰, 史永红, 等. 采矿活动对煤矿区土壤中重金属污染研究[J]. 土壤学报, 2004, **41**(6): 896-904.
- [21] 张甘霖, 卢瑛, 龚子同, 等. 南京城市土壤某些元素的富集特征及其对浅层地下水的影响[J]. 第四纪研究, 2003, **23**(4): 446-455.
- [22] 李达, 周生路, 吴绍华, 等. 经济发达地区县域尺度土壤重金属污染区划[J]. 农业工程学报, 2011, **27**(10): 282-286.
- [23] 夏增禄, 李森照. 我国污水灌溉的分布特征及其成因[J]. 地理研究, 1985, **4**(3): 40-46.
- [24] 杨军, 郑袁明, 陈同斌, 等. 中水灌溉下重金属在土壤中的垂直迁移及其对地下水的污染风险[J]. 地理研究, 2006, **25**(3): 449-456.
- [25] GB 2715-2005, 粮食卫生标准[S].
- [26] 李丽光, 何兴元, 曹志强, 等. 土壤-作物系统中铅的研究进展[J]. 生态学杂志, 2004, **23**(1): 78-82.
- [27] 程旺大, 姚海根, 吴伟, 等. 土壤-水稻体系中的重金属污染及其控制[J]. 中国农业科技导报, 2005, **7**(4): 51-54.
- [28] 张小敏, 张秀英, 钟太洋, 等. 中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(2): 692-703.
- [29] 严莎, 凌其聪, 严森, 等. 城市工业区周边土壤-水稻系统中重金属的迁移累积特征[J]. 环境化学, 2008, **27**(2): 226-230.
- [30] 姜理英, 杨肖娥, 叶海波, 等. 炼铜厂对周边土壤和作物体内重金属含量及其空间分布的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2002, **28**(6): 689-693.
- [31] 顾继光, 林秋奇, 胡韧, 等. 矿区重金属在土壤-作物系统迁移行为的研究——以辽宁省青城子铅锌矿为例[J]. 农业环境科学学报, 2005, **24**(2): 634-637.
- [32] 马建华, 马诗院, 陈云增. 河南某污灌区土壤-作物-人发系统重金属迁移与积累[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(6): 1517-1526.
- [33] 宋成军, 张玉华, 刘东生, 等. 污灌区作物根与秸秆不同处置的重金属健康风险评价[J]. 农业工程学报, 2010, **26**(7): 295-301.
- [34] Moreno-Jiménez E, Gamarra R, Carpena-Ruiz R O, *et al.* Mercury bioaccumulation and phytotoxicity in two wild plant species of Almadén area[J]. Chemosphere, 2006, **63**(11): 1969-1973.
- [35] 齐雁冰, 黄标, 杨玉峰, 等. 苏州市不同区域水稻籽粒重金属积累特征与健康风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2010, **29**(4): 659-665.
- [36] 李晋昌, 张红, 石伟. 汾水水库周边土壤重金属含量与空间分布[J]. 环境科学, 2013, **34**(1): 116-120.
- [37] 李如忠, 徐晶晶, 姜艳敏, 等. 铜陵市惠溪河滨岸带土壤重金属形态分布及风险评估[J]. 环境科学研究, 2013, **26**(1): 88-96.

## CONTENTS

|  |  |        |
|--|--|--------|
| Comparative Analysis and Inspiration of Air Quality Index Between China and America .....  | GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, LI Wen-tao, <i>et al.</i>       | (1141) |
| Regional Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> in Beijing in January 2013 .....  | LI Xuan, NIE Teng, QI Jun, <i>et al.</i>                     | (1148) |
| Formation Mechanism of a Serious Pollution Event in January 2013 in Beijing .....  | CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i>   | (1154) |
| Soluble of Metals within TSP in Shanghai .....   | CHANG Yan, FENG Chong, QU Jian-guo, <i>et al.</i>            | (1164) |
| Analysis of Component Spectral Characteristics of PM <sub>10</sub> -Bound PAHs and the Influence of Weather Conditions During Spring in Xiamen .....   | ZHANG Jian, FAN Shu-xian, SUN Yu, <i>et al.</i>              | (1173) |
| Tracing Sources of Sulfate Aerosol in Nanjing Northern Suburb Using Sulfur and Oxygen Isotopes .....   | WEI Ying, GUO Zhao-bing, GE Xin, <i>et al.</i>               | (1182) |
| Analysis of an Air Pollution Process Using LiDAR in Nanjing, Spring of 2014 .....  | BAO Qing, HE Jun-liang, ZHA Yong, <i>et al.</i>              | (1187) |
| Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in PM <sub>2.5</sub> and PM <sub>2.5-10</sub> in Mountain Background Region of East China in Spring .....                                    | SU Bin-bin, ZHANG Zhi-sheng, TAO Jun, <i>et al.</i>          | (1195) |
| Emission of Particulate Matter, Organic and Elemental Carbon from Burning of Fallen Leaves .....   | YANG Wei-zong, LIU Gang, LI Jiu-hai, <i>et al.</i>           | (1202) |
| Emission Inventory of Crop Residues Field Burning and Its Temporal and Spatial Distribution in Sichuan Province .....  | HE Min, WANG Xing-rui, HAN Li, <i>et al.</i>                 | (1208) |
| Marine Emission Inventory and Its Temporal and Spatial Characteristics in the City of Shenzhen .....   | YANG Jing, YIN Pei-ling, YE Si-qi, <i>et al.</i>             | (1217) |
| Characteristic of Ultrafine Particles Transferring Through Building Envelopes .....  | SUN Zai, CHEN Qiu-fang, CAI Zhi-liang, <i>et al.</i>         | (1227) |
| Airborne Fungal Aerosol Concentration and Distribution Characteristics in Air-Conditioned Wards .....  | ZHANG Hua-ling, FENG He-hua, FANG Zi-liang, <i>et al.</i>    | (1234) |
| Effect of Below-cloud Secondary Evaporation in Precipitations over the Loess Plateau Based on the Stable Isotopes of Hydrogen and Oxygen .....   | JIN Xiao-gang, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i> | (1241) |
| Effect of the Runoff-sediment Control of the Xiaolangdi Reservoir on DOC Transport .....   | ZHANG Yong-ling, WANG Ming-shi, DONG Yu-long                 | (1249) |
| Effects of Long-term Implementation of the Flow-Sediment Regulation Scheme on Grain and Clay Compositions of Inshore Sediments in the Yellow River Estuary .....                             | WANG Miao-miao, SUN Zhi-gao, LU Xiao-ning, <i>et al.</i>     | (1256) |
| Influences of Biological Processes on Geochemical Characteristics: An Example of a Mountain Karst Pool in Spring Season .....  | YU Zheng-liang, YANG Ping-heng, ZHAO Rui-yi, <i>et al.</i>   | (1263) |
| Variation Characteristics and Sources of Heavy Metals in an Urban Karst Groundwater System during Rainfall Event .....   | REN Kun, YANG Ping-heng, JIANG Ze-li, <i>et al.</i>          | (1270) |
| Risk Assessment of Trihalomethane Production Using the Beijiang River and the Pearl River, Guangzhou as Drinking Water Sources .....   | ZHONG Hui-zhou, WEI Chao-hai                                 | (1277) |
| Spatial Variability Characteristics of Water Quality and Its Driving Forces in Honghu Lake During High Water-level Period .....  | LI Kun, WANG Ling, LI Zhao-hua, <i>et al.</i>                | (1285) |
| Nutrient Exchange Between Meixi River and Yangtze River Due to the Typical Interaction Process of the Three Gorges Reservoir and Its Tributary .....   | CAO Man, FU Jia-nan, ZHOU Zi-ran, <i>et al.</i>              | (1293) |
| Effects of Nutrient Inputs on Changes of Phosphorus Forms and Phytoplankton Growth in Taihu Lake .....   | WANG Rui-zhe, WANG Pei-fang, REN Ling-xiao, <i>et al.</i>    | (1301) |
| Community Dynamics of Phytoplankton and Related Affecting Factors in a Eutrophicated Small Pond .....  | YANG Wen, ZHU Jin-yong, ZHANG Ke-xin, <i>et al.</i>          | (1309) |
| Yearly Changes of Phytoplankton Community in the Ecology-monitoring Area of Changli, Hebei in Summer .....   | LIANG Xiao-lin, YANG Yang, WANG Yu-liang, <i>et al.</i>      | (1317) |
| Improvement of River Water Quality by Aeration: WASP Model Study .....   | ZHU Wen-bo, WANG Hong-xiu, LIU Cui, <i>et al.</i>            | (1326) |
| Radiolytic Decomposition of Ciprofloxacin Hydrochloride in Aqueous Solution Using $\gamma$ Irradiation .....   | ZHU Sheng-nan, GUO Zhao-bing, ZHAO Yong-fu, <i>et al.</i>    | (1332) |
| Removal of Antimony in Wastewater by Electrochemical Hydride Generation and the Recovery of Antimony .....   | CHEN Jing-jing, ZHANG Guo-ping, LI Hai-xia, <i>et al.</i>    | (1338) |
| Degradation of <i>m</i> -Cresol with Fe-MCM-41 in Catalytic Ozonation .....  | SUN Wen-jing, WANG Ya-min, WEI Huang-zhao, <i>et al.</i>     | (1345) |
| Bioanode and Inversion of Bioanode to Biocathode for the Degradation of Antibiotic Chloramphenicol .....   | KONG De-yong, LIANG Bin, YUN Hui, <i>et al.</i>              | (1352) |
| Photolysis of Gaseous HNO <sub>3</sub> on the $\alpha$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Films Under 308 nm UV Light .....   | LU Jun, SUN Yun-dong, XIE Jing-jing, <i>et al.</i>           | (1359) |
| Simultaneous Determination of Hydroquinone and Catechol Based on L-Histidine-Erythrosine Composite Film Modified Glassy Carbon Electrode .....   | HE Jia-hong, XU Qiang, DING Wu-quan, <i>et al.</i>           | (1365) |
| Preparation and Characterization of Quinone Functional Polymer Biocarrier (PET-AQS) for Bionitrification Catalysis .....   | XU Qing, HOU Zheng-hao, TIAN Xiu-lei, <i>et al.</i>          | (1374) |
| Kinetic Characteristics of Degradation of Geosmin and 2-Methylisoborneol by <i>Bacillus subtilis</i> .....   | MA Nian-nian, LUO Guo-zhi, TAN Hong-xin, <i>et al.</i>       | (1379) |
| Screening of a Highly Efficient Quinoline-degrading Strain and Its Enhanced Biotreatment on Coking Waste Water .....   | LI Jing, LI Wen-ying   | (1385) |
| Effect of Ferric Iron on Nitrogen Immigration and Transformation and Nitrous Oxide Emission During Simultaneous Nitrification Denitrification Process .....                                  | LI Hao, YAN Yu-jie, XIE Hui-jun, <i>et al.</i>               | (1392) |
| Running Condition and Bacterial Community Associated with the Partial Nitritation System .....   | ZHAO Zhi-rui, JIAO Hai-hua, CUI Bing-jian, <i>et al.</i>     | (1399) |
| Using Excess Activated Sludge Treated 4-Chlorophenol Contained Waste Water to Cultivate <i>Chlorella vulgaris</i> .....  | WANG Lu, CHEN Xiu-rong, YAN Long, <i>et al.</i>              | (1406) |
| Effects of Total Nitrogen and BOD <sub>5</sub> /TN on Anaerobic Ammonium Oxidation-Denitrification Synergistic Interaction of Mature Landfill Leachate in Aged Refuse Bioreactor .....       | YANG Ying-ying, CHEN Yi, LI Ming-jie, <i>et al.</i>          | (1412) |
| Altitudinal Gradient Distribution and Source Analysis of PAHs Content of Topsoil in Jinfo Mountain, Chongqing .....  | SHI Yang, SUN Yu-chuan, LIANG Zuo-bing, <i>et al.</i>        | (1417) |
| Characteristics and Inputs of Cd Contamination in Paddy Soils in Typical Mining and Industrial Areas in Youxian County, Hunan Province .....   | ZHANG Min, WANG Mei-e, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>          | (1425) |
| Effects of Canalization on the Iron Deposition in Sanjiang Plain .....   | SU Wen-hui, YU Xiao-fei, WANG Guo-ping, <i>et al.</i>        | (1431) |
| Effects of Phosphate and Zeolite on the Transformation of Cd Speciation in Soil .....  | WANG Xiu-li, LIANG Cheng-hua, MA Zi-hui, <i>et al.</i>       | (1437) |
| Leaching Remediation of Copper and Lead Contaminated Lou Soil by Saponin Under Different Conditions .....  | DENG Hong-xia, YANG Ya-li, LI Zhen, <i>et al.</i>            | (1445) |
| Accumulation Characteristics and Evaluation of Heavy Metals in Soil-Crop System Affected by Wastewater Irrigation Around a Chemical Factory in Shenmu County .....                           | QI Yan-bing, CHU Wan-lin, PU Jie, <i>et al.</i>              | (1453) |
| Effects of Organic and Inorganic Slow-Release Compound Fertilizer on Different Soils Microbial Community Structure .....   | WANG Fei, YUAN Ting, GU Shou-kuan, <i>et al.</i>             | (1461) |
| Response of Maize to Lead Stress and Relevant Chemical Forms of Lead .....   | CHENG Hai-kuan, ZHANG Biao, JING Xin-xin, <i>et al.</i>      | (1468) |
| Effect of Boron-antimony Interaction on the Uptake and Accumulation of Antimony and Boron by Rice Seedling .....   | XIANG Meng, HUANG Yi-zong, CAI Li-qun, <i>et al.</i>         | (1474) |
| Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth of Reeds in Wetland Soils with Different Salt Content .....  | GUO Jiang-yuan, GUO Wei, BI Na, <i>et al.</i>                | (1481) |
| A Contrastive Study on Salt-alkaline Resistance and Removal Efficiency of Nitrogen and Phosphorus by <i>Phragmites australis</i> and <i>Typha angustifolia</i> in Coastal Estuary Area ..... | CHEN You-yuan, SUN Ping, CHEN Guang-lin, <i>et al.</i>       | (1489) |
| Soil Microbial Respiration Under Different Soil Temperature Conditions and Its Relationship to Soil Dissolved Organic Carbon and Invertase .....   | WU Jing, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i>           | (1497) |
| Comparison Analysis of Economic and Engineering Control of Industrial VOCs .....   | WANG Yu-fei, LIU Chang-xin, CHENG Jie, <i>et al.</i>         | (1507) |

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

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 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明  
欧阳自远 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)

2015年4月15日 第36卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 4 Apr. 15, 2015

|         |  |                  |    |   |
|---------|--|------------------|----|---|
| 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)<br>北京市环境保护科学研究院<br>清华大学环境学院  | Co-Sponsored     | by | Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection<br>School of Environment, Tsinghua University  |
| 主 编     | 欧阳自远   | Editor-in -Chief |    | OUYANG Zi-yuan  |
| 编 辑     | 《环境科学》编辑委员会<br>北京市2871信箱(海淀区双清路<br>18号, 邮政编码:100085)<br>电话:010-62941102, 010-62849343<br>传真:010-62849343<br>E-mail: hjkx@rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn | Edited           | by | The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE)<br>P. O. Box 2871, Beijing 100085, China<br>Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343<br>E-mail: hjkx@rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn |
| 出 版     | 科 学 出 版 社<br>北京东黄城根北街16号<br>邮政编码:100717  | Published        | by | Science Press<br>16 Donghuangchenggen North Street,<br>Beijing 100717, China  |
| 印 刷 装 订 | 北京北林印刷厂  | Printed          | by | Beijing Bei Lin Printing House  |
| 发 行     | 科 学 出 版 社<br>电话:010-64017032<br>E-mail: journal@ mail. sciencep. com   | Distributed      | by | Science Press<br>Tel:010-64017032<br>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   | 中国国际图书贸易总公司<br>(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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行