

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第9期

Vol.37 No.9

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

1960~2013年我国霾污染的时空变化	符传博,唐家翔,丹利,何媛 (3237)
太原大气颗粒物中水溶性无机离子质量浓度及粒径分布特征	王璐,温天雪,苗红妍,高文康,王跃思 (3249)
石家庄秋季一次典型霾污染过程水溶性离子粒径分布特征	刘景云,刘子锐,温天雪,魏俊龙,黄小娟,乔宝文,王莉莉,杨洋,徐仲均,王跃思 (3258)
南京北郊大气颗粒物的粒径分布及其影响因素分析	吴丹,曹双,汤莉莉,夏俊荣,陆建刚,刘刚,杨孟,李凤英,盖鑫磊 (3268)
南京北郊黑碳气溶胶污染特征及影响因素分析	肖思晗,于兴娜,朱彬,何稼祺 (3280)
上海崇明地区大气分形态汞污染特征	李舒,高伟,王书肖,张磊,李智坚,王龙,郝吉明 (3290)
三峡库区典型农田系统大气汞浓度及不同自然界面释汞通量	王永敏,赵铮,孙涛,王娅,薛金平,张成,王定勇 (3300)
长白山背景站大气 VOCs 浓度变化特征及来源分析	吴方堃,孙杰,余晔,唐贵谦,王跃思 (3308)
铅冶炼厂无组织排放源不同颗粒物中铅含量特征	刘大钧,汪家权 (3315)
祁连山东段降水的水化学特征及离子来源研究	贾文雄,李宗省 (3322)
三峡库区(重庆—宜昌段)沉积物中钒的污染特征及生态风险评价	郭威,殷淑华,徐建新,徐东昱,高丽,郝红,高博 (3333)
太湖不同富营养化水域磷的分布特征及其环境影响因素	车霏霏,王大鹏,甄卓,颜昌宙,王灶生 (3340)
太湖表层沉积物中 PPCPs 的时空分布特征及潜在风险	张盼伟,周怀东,赵高峰,李昆,刘巧娜,任敏,赵丹丹,李东佼 (3348)
岩溶地下河系统中有机氯的分布特征与来源分析	张媚,孙玉川,谢正兰,余琴,徐昕 (3356)
西南典型岩溶地下河系统水文地球化学特征对比:以重庆市青木关、老龙洞为例	詹兆君,陈峰,杨平恒,任娟,张海月,刘黛薇,蓝家程,张宇 (3365)
不同水源补给情形的溪流沟渠沉积物磷形态及释放风险分析	李如忠,秦如彬,黄青飞,耿若楠 (3375)
滇池柱状沉积物磷形态垂向变化及对释放的贡献	李乐,王圣瑞,焦立新,余佑金,丁帅,王跃杰 (3384)
荧光光谱结合平行因子分析研究夏季周村水库溶解性有机物的分布与来源	黄廷林,方开凯,张春华,周石磊,曾明正,刘飞,夏超,丛海兵 (3394)
富营养化水体中黑水团的吸收及反射特性分析	张思敏,李云梅,王桥,朱利,王旭东,温爽 (3402)
基于微生物生物完整性指数的地下水生态系统健康评价:以包钢稀土尾矿库周边地下水生态系统为例	安新丽,陈廷廷,赵晗,张又弛,侯艳伟,蔡超 (3413)
于桥水库水源地水体沉积物重金属空间分异与景观格局的关系	王祖伟,王伟玮,侯迎迎,包姗姗,王子璐,王倩倩 (3423)
人工湿地构型对水产养殖废水含氮污染物和抗生素去除影响	刘佳,易乃康,熊永娇,黄翔峰 (3430)
共生细菌对盐生小球藻富集和转化硝酸盐的影响	许平平,刘聪,王亚,郑燕恒,张春华,葛滢 (3438)
模拟水体硝态氮对黄菖蒲生长及其氮吸收的影响	王兵,温奋翔,肖波 (3447)
对羟基联苯在黄河兰州段底泥上的吸附行为	周琦,蒋煜峰,孙航,慕仲峰,张振国,展惠英 (3453)
多级 A/O 工艺强化处理城市污水的效果研究	尹子华,盛晓琳,刘锐,陈吕军,张永明 (3460)
某微污染水源自来水管网的纳滤深度处理效果研究	吴玉超,陈吕军,兰亚琼,刘锐 (3466)
Fe ⁰ -PRB 去除Cr(VI)反应动力学及影响机制	卢欣,李森,唐翠梅,辛佳,林朋飞,刘翔 (3473)
EDTA-nSiO ₂ 纳米颗粒对 Cd ²⁺ 的吸附	蒋顺成,秦睿,李满林,李荣华,张增强,Amjad Ali,梁文 (3480)
硝酸-PPy/AQDS 联合处理改善阳极性能的分析表征	沈伟航,朱能武,尹富华,吴平霄,张彦鸿 (3488)
人工合成水铁矿对含磷废水的吸附性能	崔蒙蒙,王殿升,黄天寅,刘锋 (3498)
生物沸石人工湿地处理分散养猪冲洗水性能	牟锐,沈志强,周岳溪,陈学民,伏小勇,谭蕾蕾,瞿畏 (3508)
甘油基混合培养物合成 PHA 及其与 OUR 的关系	刘东,张小婷,张代钧,曾善文,卢培利 (3518)
光催化体系中噻虫胺降解动力学及机制	胡倩,阳海,石妮,胡乐天,易兵 (3524)
宁夏干旱地区工业区对农田土壤重金属累积的影响	王美娥,彭驰,陈卫平 (3532)
北方某大型钢铁企业表层土壤中多环芳烃污染特征与健康风险评价	董捷,黄莹,李永霞,张厚勇,高甫威 (3540)
红壤剖面重金属分布特征及对有机碳响应	贾广梅,马玲玲,徐殿斗,成杭新,周国华,杨国胜,罗敏,路雨楠,刘志明 (3547)
外源锌刺激下水稻对土壤镉的累积效应	辜娇峰,杨文骏,周航,张平,彭佩钦,廖柏寒 (3554)
改性生物炭材料对稻田原状和外源镉污染土钝化效应	杨兰,李冰,王昌全,刘倾城,张庆沛,肖瑞,李一丁 (3562)
生物淋滤联合类 Fenton 反应去除污染土壤中重金属的效果	周普雄,严颀,余震,王跃强,朱艺,周顺桂 (3575)
长期石油污染对盐碱化土壤中微生物群落分子生态网络的影响	赵慧慧,肖娴,裴孟,赵远,梁玉婷 (3582)
应用 PLFA 法分析氮沉降对缙云山马尾松林土壤微生物群落结构的影响	曾清苹,何丙辉 (3590)
三江平原不同退化阶段小叶章湿地土壤真菌群落结构组成变化	隋心,张荣涛,许楠,刘赢男,柴春荣,王继丰,付晓玲,钟海秀,倪红伟 (3598)
外源氮、硫添加对闽江河口湿地 CH ₄ 、CO ₂ 排放的短期影响	胡敏杰,任鹏,黄佳芳,仝川 (3606)
模拟条件下侵蚀-沉积部位土壤 CO ₂ 通量变化及其影响因素	杜兰兰,王志齐,王蕊,李如剑,吴得峰,赵慢,孙棋棋,高鑫,郭胜利 (3616)
太原晋祠地区果园土壤呼吸的年际变化及其温度敏感性	严俊霞,郝忠,荆雪镨,李洪建 (3625)
生物炭对壤土土壤温室气体及土壤理化性质的影响	王月玲,耿增超,王强,尚杰,曹胜磊,周凤,李鑫,刘福义,张萍 (3634)
氮沉降对臭氧胁迫下青杨光合特性和生物量的影响	辛月,尚博,陈兴玲,冯兆忠 (3642)
冠层辐射温度对冬小麦生态系统碳通量的影响	李洪建,杨艳,严俊霞 (3650)
堆肥过程水溶性有机物组成和结构演化研究	李丹,何小松,席北斗,高如泰,张慧,黄彩红,党秋玲 (3660)
酸碱改性活性炭及其对甲苯吸附的影响	刘寒冰,杨兵,薛南冬 (3670)
《环境科学》征订启事 (3517) 《环境科学》征稿简则 (3561) 信息 (3289,3321,3422)	

宁夏干旱地区工业区对农田土壤重金属累积的影响

王美娥, 彭驰, 陈卫平*

(中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)

摘要: 随着我国东部沿海地区产业向中西部地区转移, 曾经被冠以“净土”的西北干旱地区受到了工业排放污染的威胁. 本文以宁夏某县枸杞种植地为研究对象, 采用 GIS 技术, 以工业区为中心, 结合当地主导风向, 沿着黄河进行带状布点采样, 分析工业区的建立对农田土壤重金属 Zn、Cr、Ni、Mn、Co、Cu、Cd、Pb 污染的影响. 结果表明, 研究区农田土壤重金属累积程度较轻, 只有少数样点发生人为 Zn 和 Cd 累积; 工业区土壤中除了 Ni 元素以外, 其它 7 种元素都有累积, 其中 Cd 元素浓度达到污染水平的样点占总样点数三分之一. 空间分布格局分析结果表明, 枸杞地土壤中 Cd、Zn、Cu、Mn 和 Pb 等 5 种元素的分布与工业区位置有较强的相关性. 从土壤重金属含量的角度来看, 研究区的工业区影响还未造成枸杞地土壤重金属污染, 并且由于该区域土壤的 pH 值普遍较高 (平均 pH 值为 8.54), 因此, 可以认为目前还不存在农田土壤重金属污染问题. 但是工业区对农田土壤中重金属累积趋势的影响较为明显. 此外, 工业区对灌溉水中重金属元素的浓度也有一定影响.

关键词: 西北干旱区; 工业排放; 枸杞; 土壤重金属污染; 空间格局

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)09-3532-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2016.09.035

Impacts of Industrial Zone in Arid Area in Ningxia Province on the Accumulation of Heavy Metals in Agricultural Soils

WANG Mei-e, PENG Chi, CHEN Wei-ping*

(State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: With the transferring of the industry from the east coastal regions of China to the mid and west regions, those places once called “Clean Earth” in the arid north-west region are facing the contamination risks by industrial emission. In order to study the impacts of the industrial zone on the accumulation of heavy metals Zn, Cr, Ni, Mn, Co, Cu, Cd, Pb in agricultural soils, we collected the agricultural soil samples in a county in Ningxia province using GIS technology. Samples were collected in a belt way along the yellow river and expanding from the industrial zone as the center according to the main local wind direction. It was suggested that the accumulation of heavy metals in studied agricultural soils was slight. High accumulation of Zn and Cd only occurred in several sites. However, the accumulation of heavy metals in industrial zone was more apparent. Except for Ni, the rest 7 elements had obvious accumulation. One third of the sites had Cd concentration at contamination level. The spatial analysis revealed that the distributions of Cd, Zn, Cu, Mn, and Pb were closely related to the location of industrial zone. Industrial zone had not caused the contamination of heavy metals in agricultural soils yet. Due to the high pH value (average pH value of 8.54), no soil contamination issue was found at present. However, the impacts of industrial zone on the accumulation of heavy metals in agricultural soils were apparent. The input pathway of heavy metals into agricultural soils was mainly dust deposition. The industrial zone also increased the heavy metal concentrations in irrigation water to some extent.

Key words: arid area in north-west region; industrial emission; wolfberry; soil heavy metal contamination; spatial distribution

2010 年前后对宁夏及银川盆地土壤重金属调查结果发现, 除了 Cd 平均含量略高以外, 其它重金属元素如 Pb、As、Cu、Zn、Cr 等含量都与土壤背景值相仿, 研究者们冠以宁夏地区为“净土”^[1-5]. 2010 年 9 月国务院正式印发了《国务院关于中西部地区承接产业转移的指导意见》, 促进我国东部沿海地区产业向中西部地区转移, 同时也引发了东部高污染企业向西部转移, 使西部环境问题面临新的挑战^[2]. 对西北干旱内陆承接东部高污染企业集中区的环境污染研究也成了当前国内环境科学研究和管理领域的热点.

工业污染是城市发展过程中的主要环境问题, 工业“三废”排放使水体和土壤受到了不同程度污染. 工业区土壤中重金属元素 Cd、Pb、Cu、Zn、Cr、Ni 等浓度远远超过非工业区对照土壤, 并能够在水和蔬菜中累积, 从而进入食物链而影响人群健康^[6-9]. 多年土壤普查结果表明, 我国农业用地土壤重金属污染状况较轻, 土壤环境质量总体较好, 但

收稿日期: 2016-03-22; 修订日期: 2016-04-27

基金项目: 城市与区域生态国家重点实验室自主项目 (SKLURE2013-1-04)

作者简介: 王美娥 (1975 ~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为土壤污染生态风险评价, E-mail: mewang@rcees.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: wpchen@rcees.ac.cn

是农业用地土壤重金属累积趋势明显,其中工矿区周围农业用地为重金属超标的高风险区域^[10~16]. 西部干旱地区少雨多风沙的气候特征导致工业区对土壤的重金属污染主要通过烟尘扩散途径. 樊新刚等^[17]对宁夏石嘴山工业区土壤污染分布的研究结果发现,主导风向是土壤重金属含量空间格局形成的主要因素,工业园区内土壤重金属的空间格局呈明显岛状分布,主要由局地地形、企业分布、烟尘沉降形成. 大气沉降是工业区污染源的主要污染途径,许多研究表明,大气干湿沉降样品的重金属含量明显高于土壤表层的背景值^[18, 19].

土壤重金属污染物识别、来源分析以及污染程度评估是土壤污染物调查分析的重要内容. 地质累积系数法(index of geoaccumulation, I_{geo})是 20 世纪 60 年代由 Muller^[20]提出用于评价沉积物污染水平的一种方法,当前被广泛应用于评价土壤重金属累积状况,该方法的关键是选择恰当的地质背景值为参考值,通过与参考值相比来确定土壤重金属污染物累积程度. 此外,多元分析和 GIS 技术被广泛用于土壤污染物识别与来源分析^[19, 21~27].

本文以宁夏某典型枸杞种植县为研究对象,研究区拥有“中国枸杞之乡”美誉,具有 600 多年的人工栽培枸杞历史,早在公元 1501 年,该地所产的枸杞就被列为贡品上贡朝廷. 当地枸杞种植面积达 20 多万亩,围绕枸杞种植、加工、销售形成了当地的支柱产业,枸杞年总产值超过 30 余亿元. 通过对枸杞种植地土壤的采样分析,结合工业区土壤与灌溉水相应重金属含量调查,分析工业区对枸杞种植地土壤环境质量的影响,以期为当地农产品生产安全及经济发展规划提供基础数据.

1 材料与方法

1.1 样品采集

由于研究区域的工业区主要分布在黄河北岸,因此,采样点布置按照以黄河为中心的条带分布为主,分别距离黄河 1、3、9、15 和 21 km 的条带分布,其中 1 km 条带分别为距离黄河北岸与南岸 1 km,共布置 6 条样带,每条样带按照间隔 1 km 布置样点,但是由于实际枸杞种植地块的分布,各个样带所能布置的样点不一致. 结合不同经营模式(散户和公司集中),样点分布如图 1 所示. 公司集中经营基地采集样点为 94 个,散户样点为 50 个,共采集 144 个枸杞地土壤样品,每个土壤样品对应一个枸杞鲜果混合样品;同时根据灌溉水网络,按照灌溉

水片区采集水样 13 个. 散户样品较为分散,而公司集中经营的枸杞种植基地由于连接成片,有些区域样点分布较为密集,如鸣沙镇、恩和镇以及大战场乡等地区的公司基地较为集中;但是沿着黄河两岸,公司和散户穿插分布,在远离工业区的喊叫水乡和徐涛乡作为对照样点,由于这两个乡枸杞种植面积较小,因此只能分别采集到 1 个样点的混合样品.

工业区采样点如图 1 所示,根据工业区带状道路分布特征,样点布置沿着道路成带状分布,每条采样带样点之间距离为 2 km,共采集工业区土壤样点共为 50 个.

每个样点按照 2 m × 2 m 矩形 5 点混合法采集土壤样品.

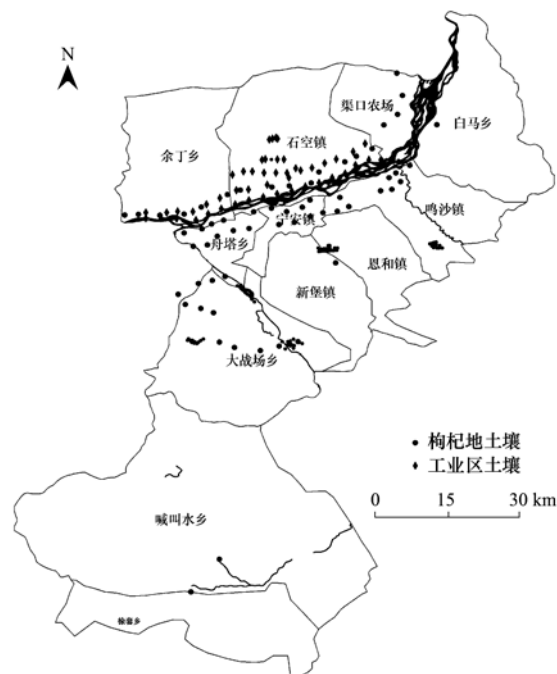


图 1 采样点分布示意

Fig. 1 Sampling map

1.2 样品化学分析

土壤样品在室内风干后,除去土样中石子和动植物残体等异物,用木棒碾压,碎土混匀后过 2 mm 尼龙筛. 再取其中一部分过 2 mm 筛的土壤继续用玛瑙研钵研磨,通过 100 目尼龙筛混匀后备用.

1.2.1 土壤 pH 的测定

土壤悬浊液的配制. 用分析天平(精确到小数点后 2 位)称取过 2 mm 筛的风干土壤 4.00 g,放入 50 mL 聚乙烯离心管中,用 50 mL 注射器加入 10 mL 无 CO₂ 蒸馏水,用玻璃棒剧烈搅拌 1 ~ 2 min,静置 30 min 后用 SevenEasy pH 仪(Mettler Toledo, GmbH)测定.

1.2.2 土壤、灌溉水重金属元素的提取测定

土壤重金属分析:采用四酸法电热板加热法消解.称取通过100目筛的土壤样品0.25 g于聚四氟乙烯坩锅中,用少量超纯水润湿加入10 mL HCl 放置过夜.分别加入3 mL HF、3 mL HNO₃、1 mL HClO₄,放置电热板上消解至大量白烟冒出,蒸至近干,重复加入HNO₃和氢氟酸1~2次,直至样品呈晶体状时地转移至50 mL比色管中定容.用注射器吸取5 mL比色管中已定容溶液,加滤膜过滤至新的50 mL比色管中,定容后转移至10 mL离心管中冷藏待测.

水样分析采用微波消解,ICP-MS测定,质量控

制采用空白加标法.

用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-AES)测定Zn、Cr、Ni、Mn、Co的含量,测定Cu、Cd和Pb采用ICP-MS.每批样设置3个空白对照、10%样品的重复和3个标准物质,其中标准物质使用国家土壤标准物质GSS-5进行质量控制.

1.3 地质累积指数计算

地质累积指数计算公式如下:

$$I_{geo} = \log_2(C_n/1.5B_n) \tag{1}$$

式中, C_n 为土壤重金属含量, B_n 为地质背景值,1.5为修正系数.根据地质累积系数的土壤污染程度分级如表1所示.

表1 地质累积指数(I_{geo})分级

Table 1 Grading of geoaccumulation index (I_{geo})

项目	无污染	轻微污染	轻度污染	中度污染	重度污染	严重污染	极严重污染
I_{geo}	≤ 0	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	≥ 5

1.4 数据分析

采样点分布图以及重金属含量的空间格局采用ArcGIS 10.0软件,其中空间格局采用普通克里金插值法.其它统计分析如因子分析、方差分析采用SPSS 18.0.

2 结果与分析

2.1 统计分析与比较

对研究区枸杞地和工业区土壤的重金属元素分析结果如表2所示,首先,对于枸杞地土壤来说,Ni、

表2 枸杞地、工业区土壤重金属浓度与宁夏土壤元素背景值比较¹⁾

Table 2 Comparison of concentrations of heavy metals between soils of melar field and industry and the background values in Ningxia

重金属	项目	<i>n</i>	Min	25%	50%	75%	Max	Mean	SD
Cr	枸杞地	147	41.6	51.7	55.3	61.7	115	56.9	8.48
	工业区	49	48.4	58.6	62.8	66.4	325	70.5	40.7
	背景值	29	35.0	52.8	59.9	63.2	72.1	60.0	6.06
Zn	枸杞地	147	30.4	49.0	58.8	70.6	289	67.1	33.0
	工业区	49	51.7	66.8	79.3	109	692	111	103
	背景值	29	19.3	40.5	56.3	69.6	99.7	58.8	17.3
Ni	枸杞地	147	18.9	25.2	27.4	29.9	55.2	27.8	4.03
	工业区	49	25.5	28.7	30.8	32.8	36.3	30.7	2.74
	背景值	29	21.1	29.5	38.3	41.3	42.8	36.6	5.64
Mn	枸杞地	147	301	462	513	563	770	517	76.4
	工业区	49	348	539	602	725	1 299	636	172
	背景值	29	207	400	533	637	875	524	164
Cd	枸杞地	143	0.035	0.087	0.128	0.186	0.422	0.148	0.081
	工业区	49	0.081	0.156	0.203	0.366	3.41	0.364	0.514
	背景值	29	0.046	0.069	0.108	0.145	0.254	0.112	0.047
Pb	枸杞地	147	9.68	25.4	13.2	15.0	16.5	15.1	2.58
	工业区	49	11.8	19.2	21.9	29.6	328	34.3	47.7
	背景值	29	13.9	16.3	19.1	24.1	29.8	20.6	4.41
Cu	枸杞地	147	11.7	16.3	18.7	21.2	49.7	19.5	5.22
	工业区	49	14.3	16.8	18.5	20.6	88.6	21.6	11.3
	背景值	29	8.0	17.0	21.5	28.6	34.1	22.1	7.10
Co	枸杞地	147	9.31	13.2	14.1	15.4	20.1	14.3	1.83
	工业区	49	10.6	15.2	16.0	17.1	41.2	16.9	4.41
	背景值	29	5.8	11.0	12.6	14.1	19.2	12.6	2.26

1)背景值引用文献[28]

Mn、Pb、Cu 这 4 种元素的平均值和标准差都小于 1985 年宁夏地区背景值,Co 元素的平均值大于背景值,但是标准差比背景值小;而 Zn 和 Cd 这二种元素的平均值与标准差都大于背景值,Cr 的平均值小于背景值,标准差大于背景值;除了 Mn 和 Pb 元素以外,枸杞地土壤的其余元素的最大值都大于背景值的最大值,尤其是 Zn 元素的最大值约为背景值的 3 倍.

其次,工业区土壤除了 Ni 元素以外,其余重金属元素 Cr、Zn、Mn、Cd、Pb、Cu 和 Co 元素的最大值、平均值以及标准差都大于背景值,尤其是 Zn、Cd 这两种元素的所有统计分布值都超过了背景值,其中 Zn 的最大值为 $692\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 超过了背景值最大值 $99.7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的 6 倍,平均值为 $111\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 约为背景值的 2 倍;Cd 的最大值为 $3.41\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 超过了背景值最大值 $0.254\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的 10 倍,平均值是背景值的约为 3 倍. 尽管工业区土壤的 Pb 元素含量的各个统计分布值与背景值相仿,但是最大值为 $328\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,约为背景值 $29.8\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的 10 倍. 与枸杞地土壤相比,工业区土壤中的所有重金属元素的浓度都大于枸杞地土壤.

樊新刚等^[17]对宁夏石嘴山工业园区表层土壤的调查结果发现,由于 2009 年以后企业数量迅速增加及附近内蒙古另一高耗能工业园区的污染排放,园区表层土壤中 Cu、Zn、Pb、Cr、Cd 含量较 1985 年背景值有明显增加,其中 Cu 和 Cd 分别为背景值的 19.1 倍和 41.7 倍. 刘凤莲等^[1]对宁夏农村地区土壤 Cd 和 Pb 的调查结果发现,农村地区土壤 Cd 和 Pb 平均值分别为 $0.187\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $20.76\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 本次调查的结果表明,枸杞地土壤平均 Cd 和 Pb 含量均低于农村平均水平,分别为 $0.148\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $15.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,而工业区土壤中的 Cd 和 Pb 含量尽管比石嘴山工业区土壤低,但是农村平均水平的 2 倍多,分别为 $0.364\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $34.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

样本数据是否符合正态分布是评价土壤中重金属含量是否存在人为干扰的其中一个依据之一,当数据成非正态分布时,说明存在人为干扰. 采用偏度与峰度的计算及检验,偏度与峰度越接近 0,正态分布特征约明显,而 K-S 检验为 $P\geq 0.05$ 时,样本数据来自正态分布,当 $P<0.05$ 时,样本数据来自非正态分布. 如表 3 所示,枸杞地土壤中重金属 Zn、Cd 和 Cu 元素的 K-S 检验结果为显著,即非正态分布;而在工业区土壤中,Cr、Zn、Cd、Pb、Cu 和 Co

共 6 种重金属都成非正态分布.

以上结果表明,枸杞地土壤重金属累积特征与工业区土壤有很大差异,工业区土壤具有人为干扰累积的重金属种类较多,累积程度明显比枸杞地土壤高,Cd 和 Zn 元素的累积在枸杞地土壤和工业区土壤中都较其它元素明显.

表 3 枸杞地与工业区土壤重金属元素含量的偏度与峰度及正态性检验

Table 3 Skewness and Kurtosis and the normal test for the concentrations of heavy metals in Melar field and industry soils				
重金属	位置	偏度	峰度	<i>P</i> (K-S)
Cr	枸杞地	2.49	14.6	0.211
	工业区	5.60	33.7	0.000**
Zn	枸杞地	3.32	15.3	0.000**
	工业区	4.28	21.8	0.000**
Ni	枸杞地	2.24	13.6	0.221
	工业区	-0.036	-0.723	0.960
Mn	枸杞地	0.203	0.618	0.973
	工业区	1.68	4.61	0.066
Cd	枸杞地	1.16	1.11	0.008**
	工业区	4.85	27.5	0.000**
Pb	枸杞地	0.743	1.36	0.284
	工业区	5.31	31.2	0.000**
Cu	枸杞地	2.43	10.3	0.009**
	工业区	4.66	26.1	0.000**
Co	枸杞地	0.260	0.833	0.793
	工业区	4.10	0.668	0.000**

2.2 因子分析

基于元素之间相关关系的因子分析通常用来解释不同元素的同源性. 如表 4 所示,枸杞地土壤的 8 种重金属元素可以分为 2 组:第一组为 Cr、Zn、Ni、Mn、Co; 第二组为 Cd、Pb、Cu,同一组的元素相关性较强. 根据与背景值比较结果和正态分布分析结果,枸杞地土壤中除了 Zn 和 Cd 的累积的人为干扰特征较为明显以外,其它元素的累积人为干扰特征

表 4 枸杞地土壤重金属元素浓度旋转后因子载荷¹⁾

Table 4 Factor analysis for concentrations of heavy metals in soils in Melar field		
重金属	1	2
Cr	0.896	-0.046
Zn	0.638	0.311
Ni	0.962	0.070
Mn	0.725	0.551
Cd	0.052	0.788
Pb	0.428	0.803
Cu	0.067	0.845
Co	0.914	0.286
特征值	4.54	1.62
方差/%	56.7	20.2

1)表中黑体字表示元素属于同一因子

都较弱,尤其 Pb 元素,不仅与背景值相比累积不明显,其元素含量分布也符合正态分布. 并且枸杞地土壤 Cd 元素平均含量比宁夏农村的平均水平低,因此,可以认为枸杞地土壤重金属人为原因累积程度较轻,因子分析的结果大部分与土壤的成土母质有关.

表 5 为工业区土壤重金属元素的因子分析结果. 与枸杞地土壤重金属元素类似,工业区土壤重金属元素也可以分为 2 组:第一组为 Zn、Cd、Pb、Cu、Co; 第二组为 Cr、Ni、Mn. 但是,除了 Pb、Cd、Cu 仍然在同一组以外,元素的分组特征与枸杞地土壤不同. 根据与背景值比较结果与正态分布分析结果,工业区土壤中的重金属元素除了 Ni 和 Mn 元素的人为累积特征较弱以外,其它 6 种元素的人为累积特征都很明显. 此外,由于 Cr 和 Ni 具有很强同源性,两者之间的相关性较强,因此一般都属于同一组. 因此,与枸杞地土壤相比,工业区土壤中的重金属元素的因子分析结果与背景值比较和正态分析结果较为一致,可以认为,元素工业区土壤中 Zn、Cd、

Pb、Cu、Co 来源于人为排放,而 Cr、Ni、Mn 主要来源与成土母质有关.

2.3 地质累积系数

由于所有枸杞地土壤调查样点元素的平均地质累积系数都小于 0,即无污染水平,因此,只分析元素最大累积系数的情况. 如表 6 所示,Zn 和 Cd 的最大累积系数大于 1,分别为 1.78 和 1.38; Co、Cr、Cu 的最大累积系数大于 0 但是小于 1,分别为 0.090、0.359 和 0.623; 其它元素的最大累积系数都小于 0,即无污染. 进一步分析 Zn 和 Cd 元素累积系数大于 1 的样点数发现,Zn 的地质累积系数大于 1,即具有轻度污染的样点为 3 个,而 Cd 为 6 个,分别只占样品总数的 2% 和 4% 左右 (表 6). 与枸杞地土壤相比,尽管工业区土壤元素中只有 Zn 和 Cd 的平均地质累积系数大于 0 而小于 1,其它元素都小于 0,但是最大地质累积系数大于 1 的元素较多,Cd 元素最大为 4.40,达到了严重污染水平; 其次为 Pb 和 Zn,分别为 3.52 和 3.04,达到了重度污染水平; Co、Cr 和 Cu 元素的最大地质累积系数都大于 1,分别为 1.12、1.85 和 1.46,达到了轻度污染水平; 尽管工业区中有 Mn 冶炼厂,Mn 元素的最大地质累积系数为 0.700,即只达到轻微累积程度; Ni 元素的最大地质累积系数小于 1. 进一步对地质累积系数大于 1 的样点数量进行统计,结果发现,Co、Cr、Cu 这 3 种元素的地质累积系数大于 1 的样点都只有一个,Zn 和 Pb 元素大于 1 的样点数分别为 6 个和 5 个; 而 Cd 大于 1 的样点数最多,达到 16 个,占总样点数的三分之一.

以上结果表明,枸杞地土壤重金属污染物累积程度较轻,相对枸杞地土壤,工业区土壤中重金属累积程度较高,其中 Cd 和 Zn 元素在枸杞地和工业区土壤中累积程度较其它元素高.

表 5 工业区土壤重金属元素因子分析结果¹⁾

Table 5 Factor analysis for concentrations of heavy metals in soils in industrial zone

重金属	1	2
Cr	-0.048	0.819
Zn	0.947	0.089
Ni	0.123	0.649
Mn	0.559	0.630
Cd	0.970	0.045
Pb	0.973	0.055
Cu	0.959	0.171
Co	0.904	0.345
特征值	4.85	1.65
方差/%	60.6	20.6

1) 表中黑体字表示元素属于同一因子

表 6 枸杞地及工业区土壤重金属元素最大地质累积系数

Table 6 Maximum geoaccumulation index in soils in Medlar field and industrial zone

项目	Co	Cr	Zn	Ni	Mn	Cd	Pb	Cu
枸杞地土壤	0.090	0.359	1.78	-0.057	-0.053	1.38	-0.176	0.623
≥ 1 样点数	/	/	3	/	/	6	/	/
工业区土壤	1.12	1.85	3.04	-0.661	0.700	4.40	3.52	1.46
≥ 1 样点数	1	1	6	/	/	16	5	1

2.4 枸杞地土壤重金属元素含量的空间分布格局

对枸杞地土壤的 8 种重金属进行空间分布研究,如图 2 所示. 枸杞地土壤重金属元素 Cd、Zn、Cu、Mn、和 Pb 的空间分布都显示了北部比南部高的趋势,即越接近工业区,土壤中的元素含量越高

(图 2). 尤其在 Cd 元素的空间分布中可以看出高含量 Cd 的区域集中分布在黄河两岸,即工业区周围,而南部距离黄河 3 km 以外含量明显较低. Zn 元素的分布除了工业区周围以外,西部边缘自北向南,以及东部边缘一部分也较高. Zn 元素累积与城

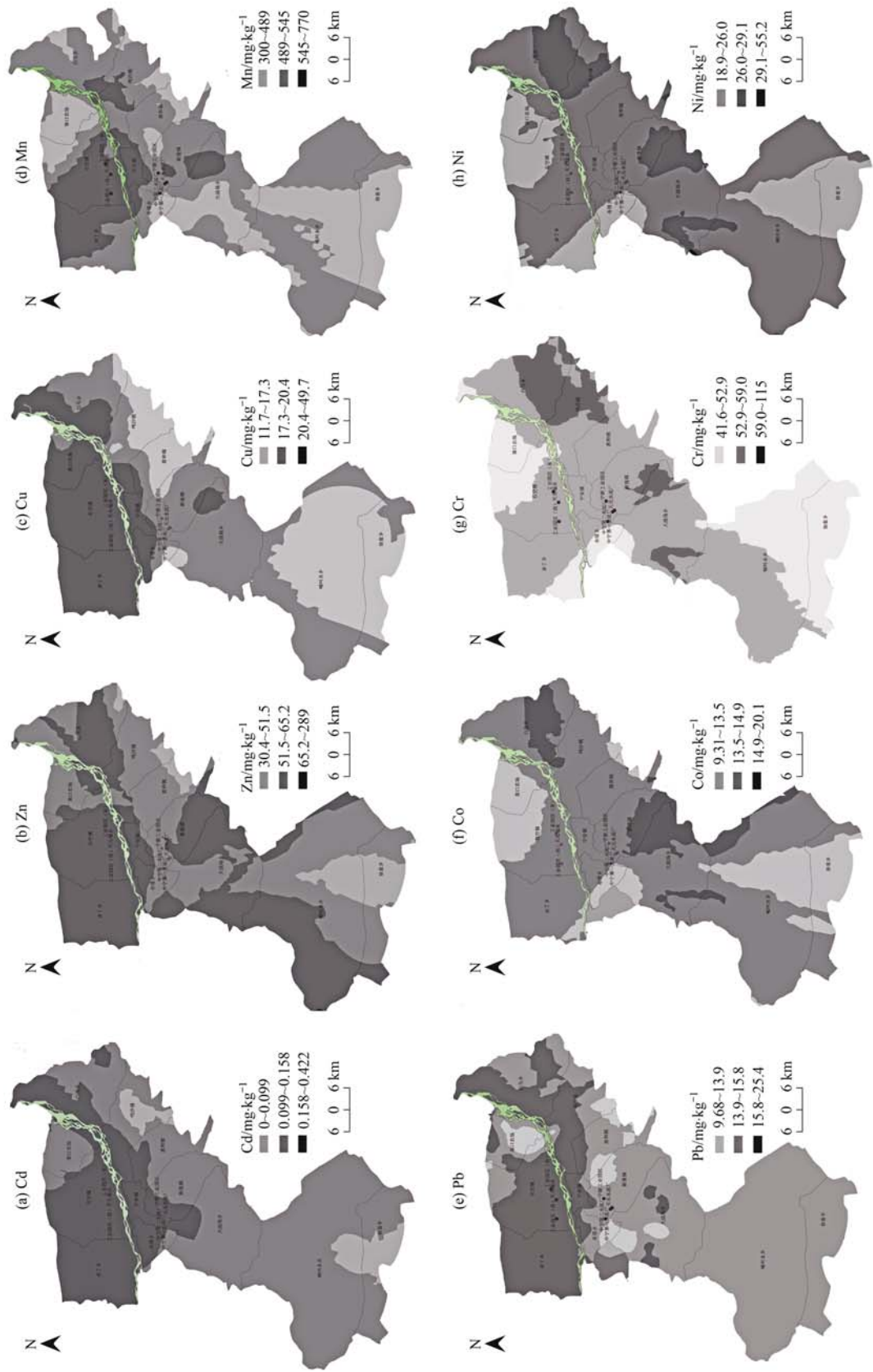


图2 枸杞地土壤重金属的空间分布示意
Fig. 2 Spatial distribution of heavy metals in melon field

市发展最为密切,其中交通排放对 Zn 元素在土壤中的累积贡献较大. 较高含量 Cu、Mn 和 Pb 的分布区域几乎集中在工业区小范围之内.

Co、Cr、Ni 这 3 种元素通常与成土母质相关,相对于其它 5 种元素,这 3 种元素的空间分布与工业区位置相关性较弱.

因此,尽管统计分析以及地质累积系数计算结果表明只有 Cd 与 Zn 元素在个别样点存在轻度污染,其它元素的累积较不明显,但是从空间分布图上可以看出,工业区对土壤重金属元素的累积具有一定的贡献,尤其对于 5 种与工业排放较为密切的元素,如 Cd、Zn、Cu、Mn 和 Pb 与工业区的空间位置存在较强的相关性.

2.5 枸杞地灌溉水中重金属含量分析

灌溉水是重金属输入农业用地土壤的一个重要途径. 对研究区灌溉水中重金属元素的浓度分析如表 7 所示. 农业用地灌溉水主要重金属元素的水质标准为: Cd $10\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, Cr $100\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, Pb $200\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, Cu $1\,000\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, Zn $2\,000\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 因此,所采集的灌溉水没有超过相应的重金属污染标准. 然而,各种重金属元素浓度的标准差都较大,因此,可以认为不同样点的灌溉水重金属浓度差异较大. 对灌溉水中的 8 种重金属总量进行空间分布分析(图 3),结果发现:重金属总量浓度较高的样点有黄河北岸工业区附近的余丁乡和石空镇以及黄河南岸大战场乡. 北岸共采集了 4 个样点的灌溉水,除了渠口农场样点的灌溉水来自地下水以外,其它 3 个

样点的水样都为地表水,并且与工业区有关;而南岸大战场乡的灌溉水为中水,因此这些样点的重金属总量相对较高. 进一步分析发现,灌溉水重金属含量与土壤重金属浓度之间相关性并不显著(数据未显示). 因此,可以认为工业区对地表水中的重金属浓度有一定贡献,但是至今为止不是重金属输入农业用地土壤的主要途径.

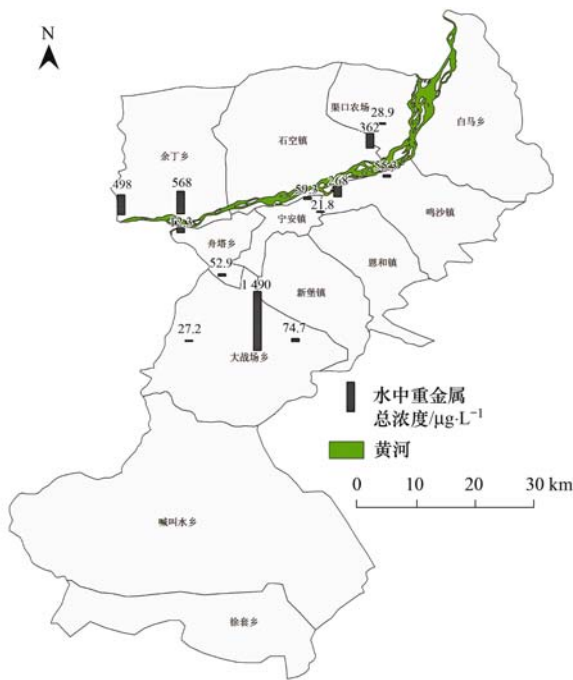


图 3 灌溉水中重金属 Cd、Zn、Cu、Mn、Pb、Co、Cr、Ni 总量的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of the total heavy metal concentrations of Cd, Zn, Cu, Mn, Pb, Co, Cr, Ni in irrigation water

表 7 灌溉水中重金属浓度的统计学分布 ($n=13$)/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 7 Statistics of concentrations of heavy metals in irrigation water ($n=13$)/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

重金属	Min	25%	50%	75%	Max	Mean	SD
Cr	0.450	1.40	2.06	10.7	26.7	6.41	7.82
Mn	4.73	19.5	48.8	342	1269	221	350
Co	0.180	0.421	0.734	5.43	18.0	3.34	5.05
Ni	0.830	1.83	3.29	13.1	39.6	8.43	10.9
Cu	1.02	3.78	7.92	13.5	29.8	9.85	7.92
Zn	5.38	9.47	16.8	34.4	78.5	23.9	20.4
Cd	0.002	0.012	0.043	0.160	0.500	0.104	0.136
Pb	0.240	0.529	1.58	9.64	28.1	5.73	8.00

3 结论

(1)枸杞地土壤中重金属元素 Zn 和 Cd 元素有一定程度累积,少数样点达到轻度污染水平;其它重金属元素如 Cr、Ni、Mn、Pb、Cu、Co 等元素没有发现明显累积.

(2)工业区土壤重金属分布特征与枸杞地不

同,除了 Ni 元素以外,其余重金属元素 Cr、Zn、Mn、Cd、Pb、Cu 和 Co 元素都有一定程度的累积,其中 Cd 元素的累积最为明显,土壤 Cd 含量达到污染水平的样点占总样点数三分之一.

(3)空间分析结果发现 Cd、Zn、Cu、Mn、和 Pb 等 5 种元素的分布与工业区位置有较强的相关性.

(4)工业区的分布对灌溉水中重金属浓度有一

定影响,但是枸杞地土壤重金属含量与灌溉水相关重金属浓度之间没有明显相关性。

(5)从土壤重金属含量的角度来看,研究区的工业区还未造成农业用土地土壤重金属污染,并且由于该区域土壤的 pH 值普遍较高(平均 pH 值为 8.54),因此可以认为目前还不存在农业用地土壤重金属污染问题,工业区布局对农业用地土壤中重金属累积趋势的影响较为明显,因此,有必要今后结合降尘中重金属含量的分析,进行工业区对农业用地土壤重金属累积趋势的预测。

参考文献:

- [1] 刘凤莲, 吴惠忠, 许秉忠. 宁夏部分农村土壤镉和铅含量调查[J]. 环境与健康杂志, 2013, **30**(9): 843.
- [2] 李晓慧, 王洪海, 高宇. 银川盆地土壤重金属元素的含量及污染状况分析[J]. 科技信息, 2012, (36): 535-536.
- [3] 王秀梅. 银川市典型村庄土壤重金属污染调查与评价[J]. 农业科学研究, 2013, **34**(4): 81-83.
- [4] 王平, 董亚萍, 王玲. 银川市郊蔬菜种植基地土壤重金属污染状况调查与评价[J]. 科技咨询, 2008, (5): 149, 151.
- [5] 王幼奇, 白一茹, 王建宇. 引黄灌区不同尺度农田土壤重金属空间分布及污染评价: 以银川市兴庆区为例[J]. 环境科学, 2014, **35**(7): 2714-2720.
- [6] Ahmad J U, Goni M A. Heavy metal contamination in water, soil, and vegetables of the industrial areas in Dhaka, Bangladesh [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2010, **166**(1-4): 347-357.
- [7] Yaylalı Abanuz G. Heavy metal contamination of surface soil around Gebze industrial area, Turkey [J]. Microchemical Journal, 2011, **99**(1): 82-92.
- [8] Li X P, Huang C C. Environment impact of heavy metals on urban soil in the vicinity of industrial area of Baoji city, P. R. China[J]. Environmental Geology, 2007, **52**(8): 1631-1637.
- [9] Nicholson F A, Smith S R, Alloway B J, et al. An inventory of heavy metals inputs to agricultural soils in England and Wales [J]. Science of the Total Environment, 2003, **311**(1-3): 205-219.
- [10] 曾希柏, 徐建明, 黄巧云, 等. 中国农田重金属问题的若干思考[J]. 土壤学报, 2013, **50**(1): 186-194.
- [11] 付亚宁, 范秀华, 邹璐, 等. 电厂周围土壤重金属空间分布与风险评价研究[J]. 中国环境监测, 2011, **27**(6): 5-8.
- [12] Loska K, Wiechuła D, Korus I. Metal contamination of farming soils affected by industry[J]. Environment International, 2004, **30**(2): 159-165.
- [13] Cao H C, Luan Z Q, Wang J D, et al. Potential ecological risk of cadmium, lead and arsenic in agricultural black soil in Jilin Province, China [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2009, **23**(1): 57-64.
- [14] 陈华勇, 欧阳建平, 马振东. 大冶有色冶炼厂附近农田镉污染的现状与治理对策[J]. 土壤, 2003, **35**(1): 76-79, 82.
- [15] Liu J, Zhang X H, Tran H, et al. Heavy metal contamination and risk assessment in water, paddy soil, and rice around an electroplating plant [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2011, **18**(9): 1623-1632.
- [16] Hu Y A, Liu X P, Bai J M, et al. Assessing heavy metal pollution in the surface soils of a region that had undergone three decades of intense industrialization and urbanization [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013, **20**(9): 6150-6159.
- [17] 樊新刚, 米文宝, 马振宁, 等. 宁夏石嘴山河滨工业园区表层土壤重金属污染的时空特征[A]. 见: 中国自然资源学会 2012 年学术年会论文集[C]. 广州: 中国自然资源学会, 2013.
- [18] 吴玺虹, 戴塔根, 方建武, 等. 长沙、株洲、湘潭三市土壤中重金属元素的来源[J]. 地质通报, 2007, **26**(11): 1453-1458.
- [19] Hernandez L, Probst A, Probst J L, et al. Heavy metal distribution in some French forest soils: evidence for atmospheric contamination[J]. Science of the Total Environment, 2003, **312**(1-3): 195-219.
- [20] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. Geojournal, 1969, **2**(3): 108-118.
- [21] Chen H Y, Teng Y G, Lu S J, et al. Contamination features and health risk of soil heavy metals in China[J]. Science of the Total Environment, 2015, **512-513**: 143-153.
- [22] Ji Y Q, Feng Y C, Wu J H, et al. Using geoaccumulation index to study source profiles of soil dust in China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2008, **20**(5): 571-578.
- [23] Shafie N A, Aris A Z, Haris H. Geoaccumulation and distribution of heavy metals in the urban river sediment [J]. International Journal of Sediment Research, 2014, **29**(3): 368-377.
- [24] Wei Z Y, Wang D F, Zhou H P, et al. Assessment of soil heavy metal pollution with principal component analysis and geoaccumulation index [J]. Procedia Environmental Sciences, 2011, **10**: 1946-1952.
- [25] Luo W, Wang T Y, Lu Y L, et al. Landscape ecology of the Guanting Reservoir, Beijing, China: multivariate and geostatistical analyses of metals in soils [J]. Environmental Pollution, 2007, **146**(2): 567-576.
- [26] Wang M E, Markert B, Chen W P, et al. Identification of heavy metal pollutants using multivariate analysis and effects of land uses on their accumulation in urban soils in Beijing, China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2012, **184**(10): 5889-5897.
- [27] Zhang C S. Using multivariate analyses and GIS to identify pollutants and their spatial patterns in urban soils in Galway, Ireland[J]. Environmental Pollution, 2006, **142**(3): 501-511.
- [28] 魏复盛, 陈静生, 吴燕玉, 等. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 330-445.

CONTENTS

Temporal and Spatial Variation of Haze Pollution over China from 1960 to 2013	FU Chuan-bo, TANG Jia-xiang, DAN Li, <i>et al.</i> (3237)
Concentrations and Size Distributions of Water-soluble Inorganic Ions in Aerosol Particles in Taiyuan, Shanxi	WANG Lu, WEN Tian-xue, MIAO Hong-yan, <i>et al.</i> (3249)
Characteristics of the Size Distribution of Water Soluble Inorganic Ions During a Typical Haze Pollution in the Autumn in Shijiazhuang	LIU Jing-yun, LIU Zi-rui, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (3258)
Variation of Size Distribution and the Influencing Factors of Aerosol in Northern Suburbs of Nanjing	WU Dan, CAO Shuang, TANG Li-li, <i>et al.</i> (3268)
Characteristics of Black Carbon Aerosol and Influencing Factors in Northern Suburbs of Nanjing	XIAO Si-han, YU Xing-na, ZHU Bin, <i>et al.</i> (3280)
Characteristics of Speciated Atmospheric Mercury in Chongming Island, Shanghai	LI Shu, GAO Wei, WANG Shu-xiao, <i>et al.</i> (3290)
Total Gaseous Mercury and Mercury Emission from Natural Surface at One Typical Agricultural Region in Three Gorges Reservoir	WANG Yong-min, ZHAO Zheng, SUN Tao, <i>et al.</i> (3300)
Variation Characteristics and Sources Analysis of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Changbai Mountain Station	WU Fang-kun, SUN Jie, YU Ye, <i>et al.</i> (3308)
Characterization of Particle Size Distributions of the No-organized Lead Emission for a Lead and Zinc Smelter	LIU Da-jun, WANG Jia-quan (3315)
Hydrochemical Characteristics and Sources of Ions in Precipitation at the East Qilian Mountains	JIA Wen-xiong, LI Zong-xing (3322)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Vanadium in Sediments of the Three Gorges Reservoir (Chongqing-Yichang Section)	GUO Wei, YIN Shu-hua, XU Jian-xin, <i>et al.</i> (3333)
Distributions of Arsenic Species in Different Eutrophic Waters of Lake Taihu and Their Relations to Environmental Factors	CHE Fei-fei, WANG Da-peng, ZHEN Zhuo, <i>et al.</i> (3340)
Spatial, Temporal Distribution Characteristics and Potential Risk of PPCPs in Surface Sediments from Taihu Lake	ZHANG Pan-wei, ZHOU Huai-dong, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (3348)
Distribution Characteristics and Source Identification of Organochlorine Pesticides in the Karst Groundwater System	ZHANG Mei, SUN Yu-chuan, XIE Zheng-lan, <i>et al.</i> (3356)
Comparison on the Hydrogeochemical Characteristics of Typical Karst Groundwater System in Southwest China, a Case of Qingmuguan and Laolongdong in Chongqing	ZHAN Zhao-jun, CHEN Feng, YANG Ping-heng, <i>et al.</i> (3365)
Fractions and Release Risk of Phosphorus in Surface Sediments of Three Headwater Streams with Different Styles of Water Supply	LI Ru-zhong, QIN Ru-bin, HUANG Qing-fei, <i>et al.</i> (3375)
Vertical Variation of Phosphorus Forms in Lake Dianchi and Contribution to Release	LI Le, WANG Sheng-rui, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (3384)
Analysis of Distribution Characteristics and Source of Dissolved Organic Matter from Zhoucun Reservoir in Summer Based on Fluorescence Spectroscopy and PARAFAC	HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, ZHANG Chun-hua, <i>et al.</i> (3394)
Absorption and Reflection Characteristics of Black Water Blooms in the Eutrophic Water	ZHANG Si-min, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (3402)
Assessment of Ecosystem Health of Baogang Tailings Groundwater Based on Microbiome Index of Biotic Integrity (M-IBI)	AN Xin-li, CHEN Ting-ting, ZHAO Han, <i>et al.</i> (3413)
Relationship Between Landscape Pattern and Spatial Variation of Heavy Metals in Aquatic Sediments in Headwaters Area of Yuqiao Reservoir	WANG Zu-wei, WANG Yi-wei, HOU Ying-ying, <i>et al.</i> (3423)
Effect of Constructed Wetland Configuration on the Removal of Nitrogen Pollutants and Antibiotics in Aquaculture Wastewater	LIU Jia, YI Nai-kang, XIONG Yong-jiao, <i>et al.</i> (3430)
Effects of a Symbiotic Bacterium on the Accumulation and Transformation of Arsenate by <i>Chlorella salina</i>	XU Ping-ping, LIU Cong, WANG Ya, <i>et al.</i> (3438)
Effects of Nitrate in Water on the Growth of <i>Iris pseudacorus</i> L. and Its Adsorption Capacity of Nitrogen in a Simulated Experiment	WANG Bing, WEN Fen-xiang, XIAO Bo (3447)
Adsorption Behavior of <i>p</i> -hydroxy Biphenyl onto Sediment of the Yellow River in Lanzhou	ZHOU Qi, JIANG Yu-feng, SUN Hang, <i>et al.</i> (3453)
Enhanced Pollutants Removal in a Municipal Wastewater Treatment Plant with Multistage A/O Process	YIN Zi-hua, SHENG Xiao-lin, LIU Rui, <i>et al.</i> (3460)
Performance of Nanofiltration for Improving the Drinking Water Quality in a Water Supply Plant with Micropolluted Water Resource	WU Yu-chao, CHEN Li-jun, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3466)
Reaction Kinetics and Impacting Mechanism of Cr(VI) Removal in Fe ⁰ -PRB Systems	LU Xin, LI Miao, TANG Cui-mei, <i>et al.</i> (3473)
Adsorption Cd ²⁺ from Solution by EDTA-modified Silicate Nanoparticles	JIANG Shun-cheng, QIN Rui, LI Man-lin, <i>et al.</i> (3480)
Analysis and Characterization of Multi-modified Anodes via Nitric Acid and PPY/AQDS in Microbial Fuel Cells	SHEN Wei-hang, ZHU Neng-wu, YIN Fu-hua, <i>et al.</i> (3488)
Adsorption Characteristics of Phosphorus Wastewater on the Synthetic Ferrihydrite	CUI Meng-meng, WANG Dian-sheng, HUANG Tian-yan, <i>et al.</i> (3498)
Performance of Bio-zeolite Constructed Wetland in Dispersed Swine Wastewater Treatment	MOU Rui, SHEN Zhi-qiang, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (3508)
Polyhydroxyalkanoate (PHA) Synthesis by Glycerol-based Mixed Culture and Its Relation with Oxygen Uptake Rate (OUR)	LIU Dong, ZHANG Xiao-ting, ZHANG Dai-jun, <i>et al.</i> (3518)
Kinetics and Mechanistic Investigation of the Photocatalytic Degradation of Clothianidin	HU Qian, YANG Hai, SHI Ni, <i>et al.</i> (3524)
Impacts of Industrial Zone in Arid Area in Ningxia Province on the Accumulation of Heavy Metals in Agricultural Soils	WANG Mei-e, PENG Chi, CHEN Wei-ping (3532)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Soils of a Large Steel enterprise in the North of China	DONG Jie, HUANG Ying, LI Yong-xia, <i>et al.</i> (3540)
Vertical Distribution of Heavy Metals and Its Response to Organic Carbon in Red Soil Profile	JIA Guang-mei, MA Ling-ling, XU Dian-dou, <i>et al.</i> (3547)
Provoking Effects of Exogenous Zn on Cadmium Accumulation in Rice	GU Jiao-feng, YANG Wen-tao, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3554)
Effect of Modified Biochars on Soil Cadmium Stabilization in Paddy Soil Suffered from Original or Exogenous Contamination	YANG Lan, LI Bing, WANG Chang-quan, <i>et al.</i> (3562)
Performance of Bioleaching Combined with Fenton-like Reaction in Heavy Metals Removal from Contaminated Soil	ZHOU Pu-xiong, YAN Xie, YU Zhen, <i>et al.</i> (3575)
Effect of Long-term Oil Contamination on the Microbial Molecular Ecological Networks in Saline-alkali soils	ZHAO Hui-hui, XIAO Xian, PEI Meng, <i>et al.</i> (3582)
Effect of Nitrogen Deposition on Soil Microbial Community Structure Determined with the PLFA Method Under the Masson Pine Forest from Mt. Jinyun, Chongqing	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui (3590)
Fungal Community Structure of Different Degeneration <i>Deyeuxia angustifolia</i> Wetlands in Sanjiang Plain	SUI Xin, ZHANG Rong-tao, XU Nan, <i>et al.</i> (3598)
Short-term Effects of Nitrogen and Sulfate Addition on CH ₄ and CO ₂ Emissions in the Tidal Marsh of Min River Estuary	HU Min-jie, REN Peng, HUANG Jia-fang, <i>et al.</i> (3606)
Variation of Soil CO ₂ Flux and Environmental Factors Across Erosion-Deposition Sites Under Simulation Experiment	DU Lan-lan, WANG Zhi-qi, WANG Rui, <i>et al.</i> (3616)
Interannual Variations of Soil Respiration and Its Temperature Sensitivity in an Orchard in Jinci Region of Taiyuan City	YAN Jun-xia, HAO Zhong, JING Xue-kai, <i>et al.</i> (3625)
Influence of Biochar on Greenhouse Gases Emissions and Physico-chemical Properties of Loess Soil	WANG Yue-ling, GENG Zeng-chao, WANG Qiang, <i>et al.</i> (3634)
Effects of Elevated Ozone and Nitrogen Deposition on Photosynthetic Characteristics and biomass of <i>Populus cathayana</i>	XIN Yue, SHANG Bo, CHEN Xing-ling, <i>et al.</i> (3642)
Effects of Canopy Temperature on Carbon Dioxide Exchange of Winter Wheat in Taiyuan Basin	LI Hong-jian, YANG Yan, YAN Jun-xia (3650)
Composition and Evolution Characteristics of Dissolved Organic Matter During Composting Process	LI Dan, HE Xiao-song, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (3660)
Effects of Acidic and Basic Modification on Activated Carbon for Adsorption of Toluene	LIU Han-bing, YANG Bing, XUE Nan-dong (3670)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年9月15日 第37卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 9 Sep. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行