

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第2期

Vol.36 No.2

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

霾与非霾期间汞在不同粒径颗粒物上的分布特征	朱琮宇,程金平,魏雨晴,薄丹丹,陈筱佳,江璇,王文华(373)
大气传输路径对上甸子本底站气溶胶光学特性的影响	蒲维维,石雪峰,马志强,赵秀娟,张小玲,徐晓峰(379)
近3年太原市夏季降水的化学特征研究	郭晓方,崔阳,王开扬,何秋生,王新明(388)
太原市PM _{2.5} 中有机碳和元素碳的污染特征	刘珊,彭林,温彦平,白慧玲,刘凤娟,史美鲜,李丽娟(396)
青海省西宁市和天峻县大气颗粒物中有机氯农药和类二噁英多氯联苯的水平与分布	李秋旭,何畅,马召辉,马丽花,扎西卓玛,王英,金军(402)
北京10个常绿树种颗粒物吸附能力研究	王兵,张维康,牛香,王晓燕(408)
人工湿地空气微生物群落碳源代谢特征	宋志文,王琳,徐爱玲,吴等等,夏岩(415)
春季融雪补给后巩乃斯河水物理化学性质空间分布特征研究	刘翔,郭玲鹏,张飞云,马杰,牟书勇,赵鑫,李兰海(421)
青藏高原湖泊小流域水体离子组成特征及来源分析	李鹤,李军,刘小龙,杨曦,张伟,王洁,牛颖权(430)
亚热带深水水库——龙滩水库季节性分层与富营养化特征分析	张垒,李秋华,黄国佳,欧腾,李钊,吴迪,周黔兰,高廷进(438)
长江河口水库沉积物磷形态、吸附和释放特性	金晓丹,吴昊,陈志明,宋红军,何义亮(448)
黄河口溶解无机碳时空分布特征及影响因素研究	郭兴森,吕迎春,孙志高,王传远,赵全升(457)
苕溪干流悬浮物和沉积物的磷形态分布及成因分析	陈海龙,袁旭音,王欢,李正阳,许海燕(464)
滇池表层沉积物氮污染特征及其潜在矿化能力	孟亚媛,王圣瑞,焦立新,刘文斌,肖焱波,祖维美,徐天敏,丁帅,周童(471)
城郊排水沟渠溶质传输的暂态存储影响及参数灵敏性	李如忠,钱靖,董玉红,唐文坤,杨继伟(481)
艾比湖表层沉积物重金属的来源、污染和潜在生态风险研究	张兆永,吉力力·阿不都外力,姜逢清(490)
工矿业绿洲城郊排污渠沉积物重金属的形态分布规律及风险评价	臧飞,王胜利,南忠仁,王兆炜,任业萌,王德鹏,廖琴,周婷(497)
山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评价	戴彬,吕建树,战金成,张祖陆,刘洋,周汝佳(507)
UV协同ClO ₂ 去除三氯生及其降解产物的研究	李玉瑛,何文龙,李青松,金伟伟,陈国元,李国新(516)
氯化铁絮凝-直接过滤工艺对地下水中As(V)的去除机制研究	康英,段晋明,景传勇(523)
负载纳米零价铁铜藻基活性炭的制备及其去除水中Cr(VI)的研究	曾淦宁,武晓,郑林,伍希,屠美玲,王铁杆,艾宁(530)
磁性石墨烯吸附水中Cr(VI)研究	刘伟,杨琦,李博,陈海,聂兰玉(537)
TiO ₂ @酵母复合微球固定床吸附荧光增白剂-VBL的研究	王菲,张凯强,白波,王洪伦,索有瑞(545)
MnO ₂ /CFP复合电极的制备及电吸附Pb ²⁺ 特性的研究	刘方园,胡承志,李永峰,梁乾伟(552)
吸附相反应技术制备微弱光响应的多组分掺杂TiO ₂ 催化剂	王挺,祝轶琛,孙志轩,吴礼光(559)
掺铁TiO ₂ 纳米管阵列模拟太阳光光电催化降解双酚A的研究	项国梁,喻泽斌,陈颖,徐天佐,彭振波,刘钰鑫(568)
天然矿物负载Fe/Co催化H ₂ O ₂ 氧化降解阳离子红3R	马楠,刘华波,谢鑫源(576)
臭氧微气泡处理酸性大红3R废水特性研究	张静,杜亚威,刘晓静,周玉文,刘春,杨景亮,张磊(584)
碳源类型、温度及电子受体对生物除磷的影响	韩芸,许松,董涛,王斌帆,王显耀,彭党聪(590)
低温低溶解氧EBPR系统的启动、稳定运行及工艺失效问题研究	马娟,李璐,俞小军,魏雪芬,刘娟丽(597)
O池溶解氧水平对石化废水A/O工艺污染物去除效果和污泥微生物群落的影响	丁鹏元,初里冰,张楠,王星,王建龙(604)
改善污泥脱水性能的丝状真菌的分离及其促进污泥脱水的机制初探	周雨璐,付豪逸,范先锋,王振宇,郑冠宇(612)
热碱处理对污水处理厂污泥特性的影响研究	杨世东,陈霞,刘操,肖本益(619)
不同退化程度羊草草原碳收支对模拟氮沉降变化的响应	齐玉春,彭琴,董云社,肖胜生,贾军强,郭树芳,贺云龙,闫钟清,王丽芹(625)
地表臭氧浓度升高对旱作农田N ₂ O排放的影响	吴杨周,胡正华,李岑子,陈书涛,谢燕,肖启涛(636)
亚热带次生林不同土壤呼吸组分的多年观测研究	刘义凡,陈书涛,胡正华,沈小帅,张旭(644)
川中丘陵县域土壤氮素空间分布特征及其影响因素	罗由林,李启权,王昌全,李冰,张新,冯文颖,翁倩,吴冕(652)
黄土丘陵区土地利用变化对深层土壤活性碳组分的影响	张帅,许明祥,张亚锋,王超华,陈盖(661)
汶川地震灾区不同气候区土壤微生物群落碳源代谢多样性	张广帅,林勇明,马瑞丰,邓浩俊,杜锟,吴承祯,洪伟(669)
土壤电动修复的电极空间构型优化研究	刘芳,付融冰,徐珍(678)
有机氯农药污染场地挖掘过程中污染物的分布及健康风险	张石磊,薛南冬,杨兵,李发生,陈宣宇,刘博,孟磊(686)
水稻不同生育期根际及非根际土壤砷形态迁移转化规律	杨文骏,王英杰,周航,易开心,曾敏,彭佩钦,廖柏寒(694)
植物根系体外溶液提取方法研究:以多环芳烃为例	朱满党,都江雪,乐乐,李金凤,杨青青,陆守昆,占新华(700)
垂序商陆叶细胞壁结合锰机制研究	徐向华,刘翠英,李平,郎漫,赵小艳,杨建军,官敏(706)
1株筛自柴油污染土壤的铜绿假单胞菌对萘的降解特性研究	刘文超,吴彬彬,李晓森,卢滇楠,刘永民(712)
CdSe/ZnS量子点对斑马鱼胚胎发育的毒性效应	陈幕飞,黄承志,蒲德永,郑朝依,袁开米,金星星,张耀光,金丽(719)
锯齿新米虾对Cu ²⁺ 和毒死蜱毒性的生理响应	李典宝,张玮,王丽卿,张瑞雷,季高华(727)
同步衍生超声乳化微萃取气相色谱法测定环境水样中的苯胺类化合物	田立勋,戴之希,王国栋,翁焕新(736)
热水环境中Na ⁺ 活化斜发沸石吸附钙离子除硬过程研究	张硕,王栋,陈远超,张兴文,陈贵军(744)
区域经济-污染-环境三维评价模型的构建与应用	樊新刚,米文宝,马振宁(751)
《环境科学》征订启事(401)	
《环境科学》征稿简则(437)	
信息(489,522,726,735)	

山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评价

戴彬¹, 吕建树^{1,5*}, 战金成², 张祖陆³, 刘洋^{4*}, 周汝佳¹

(1. 南京大学地理与海洋科学学院海岸与海岛开发教育部重点实验室, 南京 210023; 2. 山东省地质调查院, 济南 250013; 3. 山东师范大学人口·资源与环境学院, 济南 250014; 4. 南京大学环境学院污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京 210023; 5. 贝德福德海洋研究所, 加拿大地质调查局(大西洋), 加拿大 达特茅斯 B2Y 4A2)

摘要: 选取山东省典型工业城市——莱芜市钢城区为研究区域, 系统采集了 106 个表层土壤样品, 测定了 As、Cd、Co、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 等 9 种重金属的含量, 分别利用多元统计和地统计方法分析了重金属的来源和空间分布特征, 最后对土壤重金属的潜在生态风险进行了评价。结果表明: ①研究区 9 种重金属元素的平均含量均超过了山东省土壤背景值, 其中 Cd、Hg、Pb 和 Zn 的平均值分别是背景值的 2.42、4.69、1.74 和 1.54 倍, 在表层土壤中存在明显的富集。②Cd、Pb 和 Zn 主要来源于工业“三废”、交通排放以及农药化肥的施用; Co、Cr 和 Ni 为自然源因子, 受到成土母质的控制; As 和 Hg 来源于煤炭燃烧和钢铁冶炼, Cu 受自然与人为因素共同影响。③研究区总体上处于中等与高生态风险的临界水平, 其中 Hg 为高生态风险水平, Cd 为中等生态风险水平, 其他元素则均为低生态风险。

关键词: 土壤重金属; 潜在生态风险; 多元统计; 普通克里格; 典型工业城市

中图分类号: X131; X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)02-0507-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.02.018

Assessment of Sources, Spatial Distribution and Ecological Risk of Heavy Metals in Soils in a Typical Industry-based City of Shandong Province, Eastern China

DAI Bin¹, LÜ Jian-shu^{1,5*}, ZHAN Jin-cheng², ZHANG Zu-lu³, LIU Yang^{4*}, ZHOU Ru-jia¹

(1. The Key Laboratory of Coast and Island Development, Ministry of Education, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. Shandong Institute of Geological Survey, Jinan 250013, China; 3. College of Population, Resource and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250014, China; 4. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 5. Geological Survey of Canada (Atlantic), Bedford Institute of Oceanography, Dartmouth B2Y 4A2, Canada)

Abstract: A total of 106 samples were collected from surface soils in Gangcheng District, Laiwu city (a Typical industry-based city of Shandong Province, Eastern China), and the contents of 9 heavy metals including As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb and Zn were determined. Multivariate analysis and geostatistics were applied to examine the sources and spatial distributions of heavy metals in soils; and the assessment on ecological risk of heavy metals was carried out using Hakanson's method. The average concentrations of 9 heavy metals were higher than the background values of Shandong Province; in particular, the mean contents of Cd, Hg, Pb and Zn were 2.42, 4.69, 1.74 and 1.54 times of their respective background values, which indicated there were obvious accumulations of these heavy metals in surface soils. The results from multivariate analysis suggested that all the 9 heavy metals could be classified as 3 Principal Components (PCs). Cd, Pb and Zn, having high loads in PC1, were dominated by industrial, agricultural and traffic sources. PC2 including Co, Cr and Ni came from natural sources, and were controlled by parent materials. As and Hg with high loads in PC3, were originated from coal combustion and smelting. Cu had some loads on different PCs, and was affected by both natural and human sources. Assessment on ecological risk indicated that the study area suffered from a critical level between high and moderate risks. Hg was at the high ecological risk level, and Cd was at the moderate ecological risk level, while other metals had low ecological risk level.

Key words: soil heavy metals; potential ecological risk; multivariate analysis; ordinary kriging; typical industry-based city

土壤作为陆地生态系统的重要组成部分, 能够供应植物生长所必须的水分和养分, 既是重金属的归宿, 又是重金属向大气、生物和水体传播的媒介。重金属具有持久性和累积性^[1,2], 可以抑制植物与微生物的生命活动, 并经过食物链不断累积, 最终通过摄食进入人体, 进而威胁人类健康^[3]。当前, 土壤

收稿日期: 2014-05-04; 修订日期: 2014-10-14

基金项目: 国家建设高水平大学公派研究生项目(201306190053); 莱芜市生姜生产区地球化学环境研究项目; 国家自然科学基金项目(41206092, 41101079); 南京大学优秀博士研究生创新能力提升计划项目(2014001B008); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CXLX13-051)

作者简介: 戴彬(1990~), 男, 硕士, 主要研究方向为海岸海洋科学, E-mail: daibinnju@126.com

* 通讯联系人, E-mail: lvjianshu@126.com; liuyang0531py@126.com

重金属污染已经成为了世界性的严重问题,引起了社会和学术界的巨大关注^[4]. 因此,研究土壤中重金属来源并进行风险评价,可为土壤环境质量评价和管理提供依据.

土壤中重金属含量主要受成土母质及人类活动影响^[4~6]. 成土母质是影响土壤重金属含量的内在因素,例如基性岩与超基性岩发育的土壤中的 Cr 和 Ni 含量远远高于其他母质发育的土壤^[6]. 随着经济社会的不断发展,人类活动已经造成了土壤中重金属的明显富集,往往超过自然来源对重金属含量的贡献^[7~12]; 重金属的人为源主要包括煤炭燃烧、汽车尾气、工业“三废”、采矿活动以及农药化肥的施用^[1]. 多元统计分析(相关分析、主成分分析)作为辨识土壤中的重金属来源的经典方法^[1],已经得到了广泛的应用^[13~16]. 地统计方法将变异函数和克里格插值估计相结合^[4],模拟土壤中重金属的空间结构和变异^[17~19],可以直观地展示重金属含量的空间分布^[20~22],在此基础上可以进一步追溯造成土壤重金属高值热点区的原因^[15]. 将多元统计分析和地统计方法结合是辨识重金属人为、自然来源以及空间分布的有力工具^[15,23]. 土壤重金属的潜在生态风险评价是土壤环境评价的重要组成部分^[9,10,24,25]. 瑞典环境科学家 Hakanson^[26]于 1980 年提出了沉积物重金属潜在生态危害指数评价方法;通过引入毒性响应系数,将重金属生态环境风险与毒理学联系起来,可以直观地展示重金属对生态环境的胁迫程度;现在此方法已经扩展到土壤^[10]、街尘^[24]等介质的重金属污染评价.

莱芜市是山东省典型的工业城市,其下辖的钢城区则是莱芜市钢铁和煤炭企业的主要聚集地,素有“钢铁煤都”之称;众多的钢铁、煤炭企业为钢城区经济发展做出了重要贡献,但对其生态环境也造成一定的压力. 本研究选取莱芜市钢城区为研究区,对其土壤进行系统的采样和重金属元素测试,利用多元统计方法判别土壤重金属的来源,并利用地统计方法实现土壤重金属空间分布的可视化表达,最后对土壤重金属的潜在生态风险进行了评价,以期为研究区的土壤环境风险预警、管理和修复提供参考.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

莱芜市钢城区位于山东省中部,东临沂源县,南接新泰市(图 1),总面积约 339 km². 研究区地质构造受鲁中纬向构造及鲁西旋转构造的控制,地貌类

型以山地丘陵为主. 研究区属暖温带季风性湿润气候,四季分明;年平均气温 16~18℃,降水量约 700 mm. 研究区矿产资源丰富,内有山东省著名钢铁企业——莱钢集团和众多煤矿,是山东省重要的钢铁、煤炭生产基地.

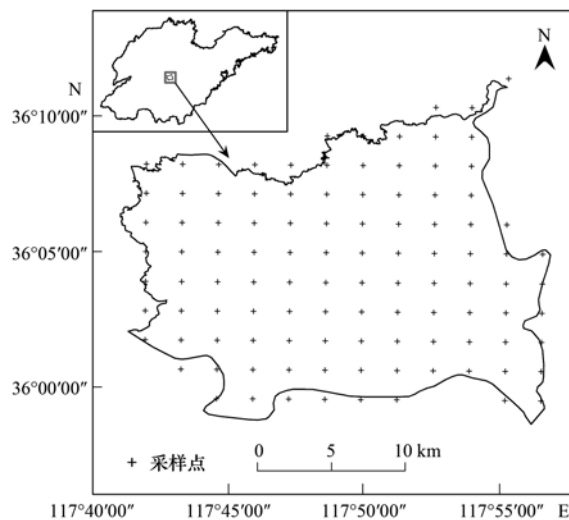


图 1 研究区及采样点位置示意

Fig. 1 Location of the study area with sampling sites

1.2 样品采样与测试

本研究按照 2 km × 2 km 的规则网格进行采样点的布设^[1],共 106 个采样点,其中耕地 55 个、林地 20 个、草地 21 个、建设用地 10 个. 在采样点周围利用多点采样方式,垂直采集 0~20 cm 的表层土壤,等量混合后,装入干净布袋,样品原始重量大于 1 kg^[1];土壤样品经过室温自然风干、敲碎、过 20 目(0.84 mm)尼龙筛去除杂物等初步处理后,用玛瑙无污染样品制备机具将样品研磨至粒径小于 100 目(0.25 mm)备用. 土壤样品经过消煮后,对 As、Cd、Co、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 的含量进行分析测试;其中 As、Hg 采用原子荧光光谱方法测定, Cd、Pb 采用石墨炉原子吸收分光光度法测定,其余元素则采用火焰原子吸收分光光度法. 分析测试所用试剂均为优级纯,分析方法的准确度和精密度采用国家一级土壤标准物质(GBW 系列)进行检验,并按比例随机检查和异常点检查进行严格的样品质量监控,测试结果符合监控要求^[1].

1.3 数据处理与分析

1.3.1 多元统计和地统计分析

对数据进行均值、中值、范围、标准差、变异系数、峰度和偏度等描述性统计,然后采用相关分析、主成分分析等多元统计方法对重金属来源进行解析^[15]. 以上统计分析均利用 Spss 19.0 软件进

行. 变异函数拟合和普通克里格插值分别利用 GS + 7.0 和 ArcGIS 9.3 地统计模块进行^[1].

1.3.2 潜在生态风险评价

潜在生态危害指数法是 Hakanson^[26] 从沉积学角度,根据重金属性质及环境行为特点,建立的一套的评价重金属潜在生态危害的方法. 单个重金属潜在生态风险因子 E_r^i 的计算公式如下:

$$E_r^i = T_r^i \times \frac{C^i}{C_n^i} \tag{1}$$

式中, C^i 为重金属含量; C_n^i 为参考值,本研究采用山东省土壤元素背景值^[27]; T_r^i 为某重金属的毒性响应系数,反映重金属的毒性水平及土壤对重金属污染的敏感性. 参考相关研究^[1,26],Hg、Cd、As、Co、Cu、Pb、Ni、Cr 和 Zn 的毒性响应系数分别为 40、30、10、5、5、5、5、2 和 1.

重金属的综合潜在生态危害指数 RI 可以表示为各个重金属的 E_r^i 之和:

$$RI = \sum_{i=1}^m E_r^i \tag{2}$$

2 结果与讨论

2.1 土壤重金属含量的描述性统计

由表 1 可以看出,研究区土壤 As、Cd、Co、

Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 含量的平均值分别为 9.5、0.17、14.5、77.7、30.6、0.075、35.3、42.8 和 94.1 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 除 Co 没有国家标准的参考值之外,其他重金属元素平均值均未超过国家二级标准^[28],但是最大值均已超过国家二级标准值. 研究区 9 种元素的平均值均超过山东省土壤背景值; 特别地,Cd、Hg、Pb 和 Zn 的平均含量分别是 0.17、0.075、42.8 和 94.1 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,分别是背景值的 2.42、4.69、1.74、1.54 倍,这 4 种元素在表层土壤中存在明显的富集. 变异系数 (coefficient of variation, CV) 可以表征数据的离散程度,可以比较不同量纲的数据^[1,4]; Wilding^[29] 将变异系数分为高度变异 ($\text{CV} > 0.36$)、中等变异 ($0.16 < \text{CV} < 0.36$) 和低度变异 ($\text{CV} < 0.16$). Co、Cu 和 Ni 的变异系数分别为 21.83%、30.29% 和 32.02%,属于中等变异; As、Cd、Cr、Hg、Pb 和 Zn 则为高度变异. Cd 和 Hg 变异系数大于其他元素,这与吕建树等^[1]对日照的研究结果类似,说明 Cd 和 Hg 存在由于人为影响产生的特异值. 偏度依照大小排序依次为, $\text{Hg} > \text{Zn} > \text{Cd} > \text{Pb} > \text{As} > \text{Cr} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Co}$,其中 Hg、Cd、Pb 和 Zn 的偏度较高,这 4 种元素可能受人类活动影响而产生较大的正偏度^[5].

表 1 研究区土壤重金属描述性统计结果/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 1 Descriptive statistics of heavy metals in soils of the study area/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

重金属	范围	平均值	中值	标准差	偏度	峰度	变异系数/%	山东省背景值 ^[27]	国家二级标准 ^[28]
As	2.6~69.1	9.5	9.1	6.69	6.83	60.49	70.2	8.9	30
Cd	0.08~1.88	0.17	0.15	0.17	9.29	92.11	101.7	0.07	0.3
Co	4.5~24.0	14.5	14.5	3.17	-0.11	1.14	21.8	12.6	—
Cr	14.6~244.1	77.7	74.6	30.47	2.22	9.58	39.2	64.3	200
Cu	8.1~75.7	30.6	29.5	9.27	1.61	5.87	30.3	22.3	100
Hg	0.008~4.579	0.075	0.027	0.44	10.25	105.29	589.4	0.016	0.5
Ni	6.8~87.9	35.3	35.3	11.31	1.44	5.99	32.0	24.4	50
Pb	22.8~391.0	42.8	33.4	39.72	6.92	57.45	92.9	24.5	300
Zn	49.5~994.6	94.1	83.9	90.69	9.51	94.97	96.4	60.9	250

2.2 相关分析

重金属元素之间的相关性分析有助于重金属来源的辨识^[1,30]. 由表 2 可以看出,重金属元素 Cd-Pb、Cd-Zn 和 Pb-Zn 两两之间相关系数分别为 0.881、0.978 和 0.906,并且通过了 0.01 水平的显著性检验; 一般来说,Cd、Pb 和 Zn 之间的高相关性指示了人类活动的影响^[1,4,15]. Co-Cr、Co-Ni、Cr-Ni 之间的相关系数分别为 0.621、0.662、0.925,也通过了 0.01 水平的检验,说明 Co、Cr 和 Ni 元素两两之间关联性较强. Fe_2O_3 、MgO 和 CaO 是成土过程

中母岩风化形成的重要产物^[2],通常自然来源的元素与这些元素有较强的相关性^[6,15,31]. Co、Cr、Ni 与 Fe_2O_3 (R 为 0.805、0.414、0.445)、MgO (R 为 0.745、0.752、0.741) 及 CaO (R 为 0.609、0.302、0.260) 的相关性较高,并通过 0.01 水平的检验,这说明 Co、Cr 和 Ni 为自然来源. As 和 Hg 的相关系数为 0.880,并通过了 0.01 水平的检验,说明 As 和 Hg 可能受到人类活动的影响. Cu 与 Fe_2O_3 、MgO、CaO 的相关系数为 0.646、0.396、0.367,Cu 与 As 的相关系数为 0.407,说明 Cu 可能属于混合来源.

表 2 研究区土壤重金属两两之间的相关系数¹⁾
Table 2 Correlation coefficient of heavy metals in soils

	As	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
As	1								
Cd	0.182	1							
Co	0.246 *	0.183	1						
Cr	0.022	0.020	0.621 **	1					
Cu	0.407 **	0.244 *	0.621 **	0.364 **	1				
Hg	0.880 **	0.052	0.077	0.023	0.148	1			
Ni	0.089	0.028	0.662 **	0.925 **	0.346 **	0.037	1		
Pb	0.181	0.881 **	0.102	0.009	0.291 **	0.019	-0.001	1	
Zn	0.159	0.978 **	0.163	0.045	0.255 **	0.056	0.045	0.906 **	1
Fe ₂ O ₃	0.268 **	0.193 *	0.805 **	0.414 **	0.646 **	0.097	0.445 **	0.207 *	0.211 *
MgO	0.273 **	0.076	0.745 **	0.752 **	0.396 **	0.252 **	0.741 **	-0.018	0.084
CaO	0.224 *	0.205 *	0.609 **	0.302 **	0.367 **	0.14	0.260 **	0.031	0.139

1) * * 表示相关系数在 0.01 水平上显著, * 表示相关系数在 0.05 水平上显著

2.3 主成分分析

土壤重金属主要来源于成土母质与人类活动,通过主成分分析可以有效判别重金属元素的污染来源^[1,13,15].表3为主成分分析的结果,前3个主成分累计贡献率达85.3%,基本可以代表数据所包含的信息.

主成分1(principle component 1, PC1)的方差贡献率为37.5%,Cd、Pb和Zn的因子载荷分别达到了0.972、0.953和0.978(表3),这些元素的平均值均明显超过了各自的土壤背景值(表1),Cd、Pb和Zn的最大值更是分别达到了山东省土壤背景值的26.9、16.0和16.3倍,因此这些元素主要受人类活动的影响.尽管Cd、Pb和Zn在同一主成分,但可能受到不同人为源的影响^[1,4,15].钢城区是山东省重要的钢铁生产基地,钢铁冶炼的“三废”排放是土壤中Cd、Pb和Zn这3种元素的重要来源^[4].Cd常常作为磷矿石中的杂质而存在于磷肥中,通过磷肥的施用而进入到土壤中,因而是化肥施用的标志元素^[15];我国磷矿中Cd平均含量为0.98 mg·kg⁻¹,磷肥中Cd的平均含量为0.6 mg·kg⁻¹^[32].Lv等^[15]和Chen等^[31]的研究发现,土壤中Cd、Cu和Zn的含量与总磷的含量呈一定程度的相关关系,并认为化肥与农药的施用是Cd、Cu和Zn来源.Cu和Zn常作为禽畜饲料的添加剂,用来防治其疾病和促进生长^[33,34],但添加的Cu和Zn并不能完全得到利用,95%以上的Cu和Zn随粪便排出体内^[35],因此施用动物粪便等有机肥可以明显增加土壤中Cu和Zn的含量^[15].姜萍等^[34]的研究发现成年猪的粪便中Cu和Zn的含量分别分别为679 mg·kg⁻¹和1 570 mg·kg⁻¹,仔猪粪便中的Cu和Zn含量更是分

别达到为892 mg·kg⁻¹和3 200 mg·kg⁻¹.煤炭燃烧和汽车尾气排放是土壤中Pb的重要来源^[1,15,36].研究区有多个热电厂,煤炭燃烧产生的粉煤灰中含有大量的Pb^[4];陆晓华等^[37]的研究表明粉煤灰中的Pb含量可达为139.4 mg·kg⁻¹;尽管发电厂都有除尘设备,但仍然有一定比例的粉煤灰逃逸,对周围区域的土壤造成威胁^[15].四乙基铅常常加入汽油中作为抗爆剂,尽管我国2000年已经全面禁用含铅汽油,但汽车尾气排放对土壤中Pb累积的影响仍存在于土壤中^[4,38].Zn是汽车轮胎硬度添加剂,汽车轮胎磨损会产生含锌粉尘^[4].Lv等^[4]的研究表明Cd、Pb和Zn被分在同一主成分,在地方尺度(Local scale)上受到人类活动的影响;Cai等^[39]的研究表明Cd、Pb和Zn在第一主成分有较大载荷,为人为源元素.因此,PC1代表了工业排放、农业和交通污染源等人为来源.

主成分2(PC2)解释了总方差的27.8%,Co、Cr和Ni在PC2的载荷较高,分别为0.846、0.919和0.926(表3).Co、Cr和Ni的变异系数均较低,且与代表土壤性质的Fe₂O₃、MgO和CaO等呈明显的正相关关系,可认为Co、Cr和Ni为自然来源^[6,15].虽然研究区Co、Cr和Ni的平均含量均超过山东省土壤背景(表1),应该是受到研究区石灰岩和河流冲洪积物较高背景值的影响;根据王关玉等^[40]对山东省土壤元素含量与成土母质之间关系的研究,山东省石灰岩和河流冲洪积物母质的土壤的Co、Cr和Ni含量明显高于全省水平.一般来说,Cr和Ni是我国城市土壤污染程度最低的重金属^[6,15,41];Cai等^[39]对广东惠州、Sun等^[41]对吉林德惠以及Lv等^[6]对山东五莲的研究均发现土壤中Cr和Ni未受

到明显的人类活动影响; Facchinelli 等^[13]对意大利西北部地区的研究和吕建树等^[1]对日照的研究均发现 Co、Cr 和 Ni 这 3 种元素被分在一个主成分, 并且来源于成土母质. 因此, PC2 代表了自然来源, 受到成土母质的控制.

主成分 3(PC3) 的方差贡献率为 20.0%, As 和 Hg 的因子载荷分别为 0.966 和 0.947(表 3). As 和 Hg 的平均值均高于背景值, 最大值分别为山东省土壤背景值的 7.8 和 286.2 倍; 并且 As 和 Hg 与 Fe₂O₃、MgO 和 CaO 的相关性较低, 说明 As 和 Hg 为人为来源的元素. 煤炭燃烧和钢铁冶炼是 As 和 Hg 的主要来源^[4,42,43], 研究区内有多个钢铁厂、电厂和焦化厂, 是造成土壤中 As 和 Hg 积累的重要因素. 据统计我国火电厂动力煤燃烧每年向大气排放的 As 约为 195.0 t 左右^[44]; 蒋靖坤等^[45]基于两组数据建立了我国燃煤汞排放清单, 其计算结果表明我国燃煤汞排放量分别为 161.6 t 和 219.5 t. 特别地, Hg 是生态危害较大、主要来自于人为源的元素^[4], 人类排放的 Hg 占到全球排放总量的 60%~80%^[46]; Hg 在大气中是一种很稳定的元素, 一定气压条件下可以在大气中存在 0.5~2.0 a^[4], 主要通过大气干沉降和湿沉降进入土壤中^[15]. 因此, PC3 代表了钢铁冶炼和煤炭燃烧等工业活动.

当同一种元素在不同的主成分上均有相当的载荷时, 可认为具备两种主成分的来源^[1]; Cu 在多个主成分上均有相当的载荷(表 3), 被认为受到自然地质背景和人类活动的共同控制^[15]. 土壤中 Cu 的人为来源主要为钢铁冶炼^[1,47,48]以及化肥农药的施用^[15,49,50].

2.4 变异函数理论模型拟合

普通克里格插值要求数据符合正态分布; Kolmogorov-Smirnov(K-S) 检验是分析数据是否符合

表 3 研究区土壤重金属元素因子载荷			
Table 3 Factors matrix of heavy metals in soils in the study area			
重金属	PC1	PC2	PC3
As	0.125	0.116	0.966
Cd	0.972	0.057	0.055
Co	0.121	0.846	0.144
Cr	-0.045	0.919	-0.074
Cu	0.277	0.592	0.332
Hg	-0.027	0.003	0.947
Ni	-0.048	0.926	-0.034
Pb	0.953	0.030	0.048
Zn	0.978	0.068	0.043
方差贡献率/%	37.5	27.8	20.0
累计方差贡献率/%	37.5	65.3	85.3

正态分布的有力工具^[51]. K-S 检验表明 Cr、Co 和 Ni 符合对数分布, 可直接进行克里格插值^[51]; 对 As、Cd、Cu、Hg、Pb 和 Zn 进行对数变化后均符合正态分布, 然后进行变异函数拟合和插值. 变异函数理论模型主要包括指数、高斯、球状和线性等模型^[1,4,17], 主要参数包括块金常数(C_0)、基台值(C_0+C)、变程(range)、决定系数(R^2)和残差(RSS)等. 块金常数和基台值的比值($C_0/(C_0+C)$)代表参数的空间自相关性, 可以反映自然和人为因素的作用; 若 $C_0/(C_0+C) < 0.25$, 表明变量的空间变异以结构性变异为主, 变量具有强烈的空间相关性; 当 $0.25 \leq C_0/(C_0+C) < 0.75$ 时, 变量为中等程度空间相关; 而 $C_0/(C_0+C) \geq 0.75$ 时, 以随机变量为主, 变量的空间相关性则很弱^[1]. 决定系数(R^2)表示理论模型的拟合精度^[15].

由变异函数理论模型拟合的结果(表 4)可知, As、Cd、Co、Cr 和 Cu 的变异函数理论模型均符合指数模型, Hg 和 Pb 符合球状模型, 而 Ni 和 Zn 符合高斯模型. 各变量的有效变程介于 5 720~53 300 m 之间. 除 Cd、Zn 之外, 所有元素的决定系数均大于 0.562, 而 RSS 均较小, 说明理论模型的选取基本符

表 4 土壤重金属含量的变异函数理论模型及相关参数							
Table 4 Models and the relevant parameters for semivariograms fitting of heavy metals in soils							
重金属	模型	块金值	基台值	块金值/基台值	变程/m	决定系数	残差
As	Exponential	0.090	0.257	0.350	18 375	0.964	0.000 4
Cd	Exponential	0.121	0.243	0.498	51 100	0.321	0.003
Co	Exponential	0.033	0.172	0.192	51 100	0.865	0.000 2
Cr	Exponential	0.097	0.409	0.237	44 210	0.960	0.001 5
Cu	Exponential	0.069	0.138	0.500	53 300	0.562	0.001
Hg	Spherical	0.326	0.682	0.479	18 375	0.749	0.467
Ni	Gaussian	0.085	0.438	0.194	43 150	0.948	1.78E-04
Pb	Spherical	0.061	0.179	0.341	5 720	0.632	0.023 3
Zn	Gaussian	0.098	0.198	0.495	51 100	0.433	5.66E-03

合要求. PC2(Cr、Co 和 Ni)的块金值/基台值均小于 0.25,这些元素的空间变异以土壤母质、地形等结构性变异为主^[1]; Cd、Pb、Zn、As、Hg 和 Cu 的块金值/基台值介于 0.25~0.75 之间,具有中等的空间相关性,可能受到随机因素的影响^[15].

2.5 重金属含量空间分布特征

在变异函数拟合的基础上,对研究区土壤重金属含量进行普通克里格插值(图 2). 研究区土壤 As 和 Hg 含量呈现西北-东南向条带状分布[图 2(a)、2(f)]; 高值区域与潘西煤矿及西岗煤矿所在的区域基本一致; 特别地,莱钢集团同处该区域,其周围

还分布着如特殊钢材厂、机械制造厂、粉末冶金公司等工业企业; 钢铁冶炼、煤矸石堆放和工业排放导致了该重金属含量高值区. Cd、Pb、Cu 和 Zn 在研究区总体上呈中部向四周呈同心圆状含量递减[图 2(b)、2(e)、2(f)、2(h)和 2(i)],高值区域与工业企业位置也基本吻合; 此外,多条公路穿过高值区域,其中就有京沪高速莱芜段,工业“三废”和汽车尾气排放造成了 Cd、Pb、Cu 和 Zn 的高值区. Co、Cr 和 Ni 的空间分布与工业企业等污染源的位置没有直接对应关系,一般来说,可以认为主要受土壤母质的控制^[15].

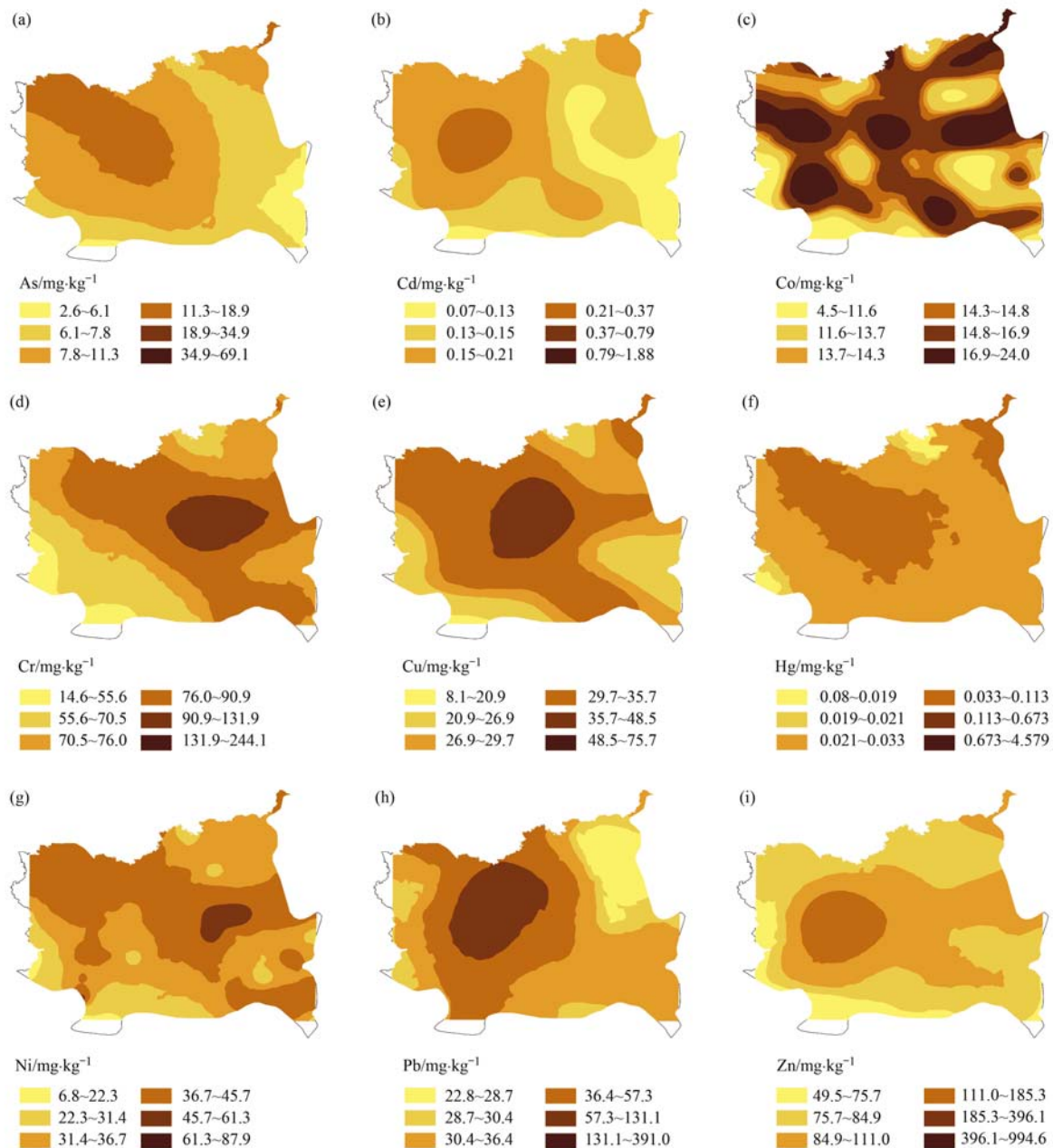


图 2 研究区重金属含量空间分布

Fig. 2 Spatial distributions of heavy metal contents in soils

2.6 重金属潜在生态风险评价

参照前人相关研究的潜在生态风险分级标准^[10,26,51],将重金属单项和综合潜在生态风险进行分级,如表 5 所示. 图 3 为研究区潜在生态风险评价结果,图 4 为综合生态风险指数的分布图. As、Cd、Co、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 的潜在生态风险因子的平均值分别为 10.70、73.25、5.76、2.42、6.86、187.69、7.23、8.73 和 1.55,由高到低依次为 Hg>Cd>As>Pb>Ni>Cu>Co>Cr>Zn; Hg 整体上处于高生态风险水平,Cd 处于中等生态风险水平,其余重金属元素均处于轻微生态风险水平. 研究区综合潜在生态风险指数 RI 的平均值为 304.19,介于 67.49~11 666.44 之间(图 4),说明研究区整体上处于中等与高生态风险的临界水平(表 5);其中,仅有 2 个样点处于极高生态风险水平,占总样点数的 1.9%;5 个样点处于高生态风险水平,

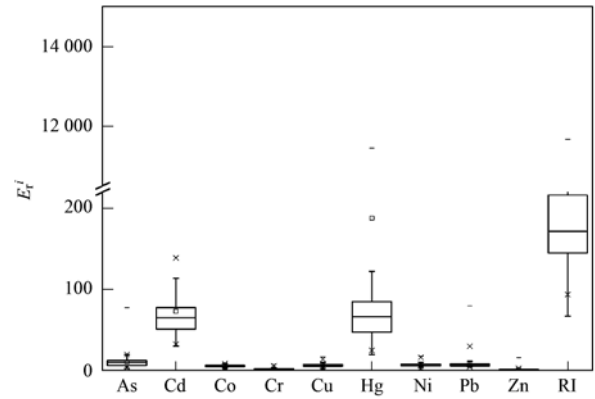


图 3 重金属潜在生态风险结果

Fig. 3 Results of potential ecological risk of heavy metals

占总数的 4.7%;63% 的样点(68 个)处于中等生态风险水平;28.4% 的样点(31 个)存在轻微生态风险(RI<150). 从图 4 可以看出,研究区重金属综合生态风险指数的高值区域集中在研究区中部,并呈

表 5 重金属潜在生态风险分级

Table 5 Grading standards of potential ecological risk of heavy metals in soils			
单项生态风险因子 (E_i)		综合生态风险指数 (RI)	
等级	得分	等级	得分
低生态风险	<40	低生态风险	<150
中等生态风险	40~80	中等生态风险	150~300
较高生态风险	80~160	高生态风险	300~600
高生态风险	160~320	极高生态风险	>600
极高生态风险	>320		

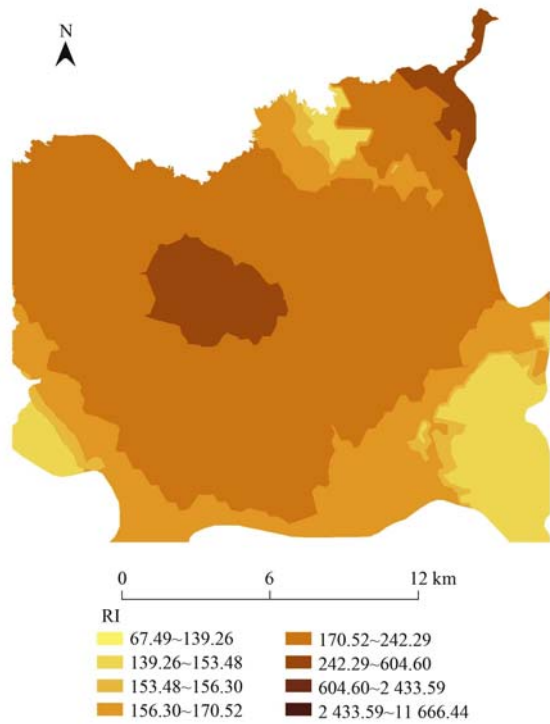


图 4 研究区土壤重金属综合潜在生态风险指数分布

Fig. 4 Spatial distribution of potential ecological risk index of heavy metals in soils

同心圆状向四周递减,与主要污染元素含量空间分布特征相同. 在研究区东北部出现一块异常高值区域,主要是由于该处有样点的 Hg 积累水平极高,含量达到了 $4.579\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,为背景值近 300 倍,可见该区域内存在 Hg 元素点源污染,应该引起警惕.

3 结论

- (1) 研究区 9 种土壤重金属平均值均高于山东省土壤背景值,均未超过国家二级标准(Co 没有可比值),存在了一定程度的重金属积累.
- (2) 研究区土壤重金属来源可分为 3 类: Cd、Pb 和 Zn 主要受工农业及交通等人类活动影响, Co、Cr 和 Ni 主要来源于成土母质, As 和 Hg 来源于钢铁冶炼和煤炭燃烧, 而 Cu 受自然与人为因素共同控制.
- (3) As、Cd、Hg、Cu、Pb 和 Zn 的含量高值区域与工业企业的位置相一致, 而 Co、Cr 和 Ni 的空间分布与工业企业的分布无关.
- (4) 研究区整体上处于中度与高生态风险的临界水平. Hg 处于高生态风险水平, 应列为当地优先

控制污染元素; Cd 处于中等生态风险水平, 其他元素则为轻微生态风险。研究区内部及东北部极小部分地区是风险易发的区域, 应引起警惕。

参考文献:

- [1] 吕建树, 张祖陆, 刘洋, 等. 日照市土壤重金属来源解析及环境风险评价[J]. 地理学报, 2012, **67**(7): 971-984.
- [2] Alloway B J. Heavy metals in soils[M]. London: Chapman and Hall, 1995.
- [3] Kabata-Pendias A, Pendias H. Trace elements in soils and plants [M]. (3rd ed.). London: CSC Press, 2001.
- [4] Lv J S, Liu Y, Zhang Z L, *et al.* Factorial kriging and stepwise regression approach to identify environmental factors influencing spatial multi-scale variability of heavy metals in soils[J]. Journal of Hazardous Materials, 2013, **261**: 387-397.
- [5] Rodríguez Martín J A, Ramos-Miras J J, Boluda R, *et al.* Spatial relations of heavy metals in arable and greenhouse soils of a Mediterranean environment region (Spain) [J]. Geoderma, 2013, **200-201**: 180-188.
- [6] Lv J S, Liu Y, Zhang Z L, *et al.* Multivariate geostatistical analyses of heavy metals in soils: Spatial multi-scale variations in Wulian, Eastern China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2014, **107**: 140-147.
- [7] Chen T B, Zheng Y M, Lei M, *et al.* Assessment of heavy metal pollution in surface soils of urban parks in Beijing, China [J]. Chemosphere, 2005, **60**(4): 542-551.
- [8] 钟晓兰, 周生路, 李江涛, 等. 经济快速发展区土壤重金属累积评价[J]. 环境科学, 2010, **31**(6): 1608-1616.
- [9] 刘春早, 黄益宗, 雷鸣, 等. 湘江流域土壤重金属污染及其生态环境风险评价[J]. 环境科学, 2012, **33**(1): 260-265.
- [10] 郭平, 谢忠雷, 李军, 等. 长春市土壤重金属污染特征及其潜在生态风险评价[J]. 地理科学, 2005, **25**(1): 108-112.
- [11] 柳云龙, 章立佳, 韩晓非, 等. 上海城市样带土壤重金属空间变异特征及污染评价[J]. 环境科学, 2012, **33**(2): 599-605.
- [12] 于洋, 高宏超, 马俊花, 等. 密云县境内潮河流域土壤重金属分析评价[J]. 环境科学, 2012, **34**(9): 3572-3577.
- [13] Facchinelli A, Saechi E, Mallen L. Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils[J]. Environmental Pollution, 2001, **114**(3): 313-324.
- [14] Borůvka L, Vacek O, Jehlička J. Principal component analysis as a tool to indicate the origin of potentially toxic elements in soils [J]. Geoderma, 2005, **128**(3-4): 289-300.
- [15] Lv J S, Liu Y, Zhang Z L, *et al.* Identifying the origins and spatial distributions of heavy metals in soils of Ju country (Eastern China) using multivariate and geostatistical approach [J]. Journal of Soils and Sediments, doi: 10.1007/s11368-014-0937-x.
- [16] Zhang C S, Fay D, McGrath D, *et al.* Statistical analyses of geochemical variables in soils of Ireland [J]. Geoderma, 2008, **146**(1-2): 378-390.
- [17] Goovaerts P. Geostatistics for natural resources evaluation [M]. New York: Oxford University Press, 1997.
- [18] Wackernagel H. Multivariate geostatistics [M]. Berlin: Springer Verlag, 2003.
- [19] Alary C, Demougeot-Renard H. Factorial kriging analysis as a tool for explaining the complex spatial distribution of metals in sediments [J]. Environmental Science and Technology, 2010, **44**(2): 593-599.
- [20] Nanos N, Rodríguez Martín J A. Multiscale analysis of heavy metal contents in soils: spatial variability in the Duero river basin (Spain) [J]. Geoderma, 2012, **189-190**: 554-562.
- [21] 张海珍, 唐宇力, 陆骏, 等. 西湖景区土壤典型重金属污染物的来源及空间分布特征[J]. 环境科学, 2014, **35**(4): 1516-1522.
- [22] 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.
- [23] Lu A X, Wang J H, Qin X Y, *et al.* Multivariate and geostatistical analyses of the spatial distribution and origin of heavy metals in the agricultural soils in Shunyi, Beijing, China [J]. Science of the Total Environment, 2012, **425**: 66-74.
- [24] 闫慧, 陈杰, 肖军. 典型农业城市街道灰尘重金属特征及其环境风险评价: 以许昌市为例[J]. 环境科学, 2012, **34**(10): 4017-4023.
- [25] 敖亮, 雷波, 王业春, 等. 三峡库区典型农村型消落带沉积物风险评价与重金属来源解析[J]. 环境科学, 2014, **35**(1): 179-185.
- [26] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [27] 国家环境保护局. 中国土壤元素背景值 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [28] GB 15618-1995. 土壤环境质量标准 [S].
- [29] Wilding L P. Spatial variability: its documentation, accommodation and implication to soil surveys [A]. In: Nielsen D R, Bouma J (Eds.). Soil spatial variability [M]. Wageningen: PUDOC publishers. 1985. 166-194.
- [30] 蔡立梅, 马瑾, 周永章, 等. 东莞市农田土壤和蔬菜重金属的含量特征分析[J]. 地理学报, 2008, **63**(9): 994-1003.
- [31] Chen T, Liu X M, Zhu M Z, *et al.* Identification of trace element sources and associated risk assessment in vegetable soils of the urban-rural transitional area of Hangzhou, China [J]. Environmental Pollution, 2008, **151**(1): 67-78.
- [32] 鲁如坤, 时正元, 熊礼明. 我国磷矿磷肥中镉的含量及其对生态环境影响的评价[J]. 土壤学报, 1992, **29**(2): 150-157.
- [33] 朱亦君, 郑袁明, 贺纪正, 等. 猪粪中铜对东北黑土的污染风险评价[J]. 应用生态学报, 2008, **19**(12): 2751-2756.
- [34] 姜萍, 金盛杨, 郝秀珍, 等. 重金属在猪饲料-粪便-土壤-蔬菜中的分布特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, **29**(5): 942-947.
- [35] 闫秋良, 刘福柱. 通过营养调控缓解畜禽生产对环境的污染[J]. 家禽生态, 2003, **23**(3): 68-70.
- [36] Chen T B, Wong J W C, Zhou H Y, *et al.* Assessment of trace

- metal distribution and contamination in surface soils of Hong Kong[J]. *Environmental Pollution*, 1997, **96**(1): 61-68.
- [37] 陆晓华, 曾汉才, 欧阳中华, 等. 燃煤电厂排放细微灰粒中痕量元素的分布与富集规律[J]. *环境化学*, 1995, **14**(6): 489-493.
- [38] Chen X D, Lu X W, Yang G. Sources identification of heavy metals in urban topsoil from inside the Xi'an Second Ringroad, NW China using multivariate statistical methods [J]. *Catena*, 2012, **98**: 73-78.
- [39] Cai L M, Xu Z C, Ren M Z, *et al.* Source identification of eight hazardous heavy metals in agricultural soils of Huizhou, Guangdong Province, China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2012, **78**: 2-8.
- [40] 王关玉, 潘懋, 刘锡大, 等. 山东省土壤中元素含量与母质的关系[J]. *北京大学学报 (自然科学版)*, 1992, **28**(4): 475-485.
- [41] Sun C Y, Liu J S, Wang Y, *et al.* Multivariate and geostatistical analyses of the spatial distribution and sources of heavy metals in agricultural soil in Dehui, Northeast China [J]. *Chemosphere*, 2013, **92**(5): 517-523.
- [42] Li Y, Wang Y B, Gou X, *et al.* Risk assessment of heavy metals in soils and vegetables around non-ferrous metals mining and smelting sites, Baiyin, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2006, **18**(6): 1124-1134.
- [43] 郭伟, 赵仁鑫, 张君, 等. 内蒙古包头铁矿区土壤重金属污染特征及其评价[J]. *环境科学*, 2011, **32**(10): 3099-3105.
- [44] 雒昆利, 张新民, 陈昌和, 等. 我国燃煤电厂砷的大气排放量初步估算[J]. *科学通报*, 2004, **49**(19): 2014-2019.
- [45] 蒋靖坤, 郝吉明, 吴烨, 等. 中国燃煤汞排放清单的初步建立[J]. *环境科学*, 2005, **26**(2): 34-39.
- [46] Liu R H, Wang Q C, Lu X G, *et al.* Distribution and speciation of mercury in the peat bog of Xiaoxing'an Mountain, Northeastern China[J]. *Environmental Pollution*, 2003, **124**(1): 39-46.
- [47] Franco-Uría A, López-Mateo C, Roca E, *et al.* Source identification of heavy metals in pastureland by multivariate analysis in NW Spain [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **165**(1-3): 1008-1015.
- [48] Micó C, Recatalá L, Peris A, *et al.* Assessing heavy metal sources in agricultural soils of an European Mediterranean area by multivariate analysis [J]. *Chemosphere*, 2006, **65**(5): 863-872.
- [49] Rodríguez Martín J A, Arias M L, Corbí J M G. Heavy metals contents in agricultural topsoils in the Ebro basin (Spain). Application of the multivariate geochemical methods to study spatial variations[J]. *Environmental Pollution*, 2006, **144**(3): 1001-1012.
- [50] Shomar B H. Trace elements in major solid-pesticides used in the Gaza Strip[J]. *Chemosphere*, 2006, **65**(5): 898-905.
- [51] Lv J S, Zhang Z L, Li S, *et al.* Assessing spatial distribution, sources, and potential ecological risk of heavy metals in surface sediments of the Nansi Lake, Eastern China [J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2014, **299**(3): 1671-1681.

CONTENTS

Size Distribution Characteristics of Particulate Mercury on Haze and Non-haze Days	ZHU Qiong-yu, CHENG Jin-ping, WEI Yu-qing, <i>et al.</i> (373)
Impact of Atmospheric Pollutants Transport Pathways on Aerosol Optical Properties at Shangdianzi Background Station	PU Wei-wei, SHI Xue-feng, MA Zhi-qiang, <i>et al.</i> (379)
Chemical Characteristics of 3-year Atmospheric Precipitation in Summer, Taiyuan	GUO Xiao-fang, CUI Yang, WANG Kai-yang, <i>et al.</i> (388)
Pollution Characteristics of Organic and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Taiyuan	LIU Shan, PENG Lin, WEN Yan-ping, <i>et al.</i> (396)
Levels and Distribution of Organochlorine Pesticides and Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls in Atmospheric Particulates in Xining and Tianjun, Qinghai Province, China	LI Qiu-xu, HE Chang, MA Zhao-hui, <i>et al.</i> (402)
Particulate Matter Adsorption Capacity of 10 Evergreen Species in Beijing	WANG Bing, ZHANG Wei-kang, NIU Xiang, <i>et al.</i> (408)
Carbon Sources Metabolic Characteristics of Airborne Microbial Communities in Constructed Wetlands	SONG Zhi-wen, WANG Lin, XU Ai-ling, <i>et al.</i> (415)
Spatial Distribution Characteristics of the Physical and Chemical Properties of Water in the Kunes River After the Supply of Snowmelt During Spring	LIU Xiang, GUO Ling-peng, ZHANG Fei-yun, <i>et al.</i> (421)
Composition Characteristics and Source Analysis of Major Ions in Four Small Lake-watersheds on the Tibetan Plateau, China	LI He, LI Jun, LIU Xiao-long, <i>et al.</i> (430)
Seasonal Stratification and Eutrophication Characteristics of a Deep Reservoir, Longtan Reservoir in Subtropical Area of China	ZHANG Lei, LI Qiu-hua, HUANG Guo-jia, <i>et al.</i> (438)
Phosphorus Fractions, Sorption Characteristics and Its Release in the Sediments of Yangtze Estuary Reservoir, China	JIN Xiao-dan, WU Hao, CHEN Zhi-ming, <i>et al.</i> (448)
Spatial-Temporal Distributions of Dissolved Inorganic Carbon and Its Affecting Factors in the Yellow River Estuary	GUO Xing-sen, LÜ Ying-chun, SUN Zhi-gao, <i>et al.</i> (457)
Distributions of Phosphorus Fractions in Suspended Sediments and Surface Sediments of Tiaoxi Mainstreams and Cause Analysis	CHEN Hai-long, YUAN Xu-yin, WANG Huan, <i>et al.</i> (464)
Characteristics of Nitrogen Pollution and the Potential Mineralization in Surface Sediments of Dianchi Lake	MENG Ya-yuan, WANG Sheng-rui, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (471)
Influence of Transient Storage on Solute Transport and the Parameter Sensitivity Analysis in a Suburban Drainage Ditch	LI Ru-zhong, QIAN Jing, DONG Yu-hong, <i>et al.</i> (481)
Sources, Pollution Statue and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Surface Sediments of Aibi Lake, Northwest China	ZHANG Zhao-yong, Jilili Abuduwaili, JIANG Feng-qing (490)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments in Suburban Outfall of Industrial Oasis Region	ZANG Fei, WANG Sheng-li, NAN Zhong-ren, <i>et al.</i> (497)
Assessment of Sources, Spatial Distribution and Ecological Risk of Heavy Metals in Soils in a Typical Industry-based City of Shandong Province, Eastern China	DAI Bin, LÜ Jian-shu, ZHAN Jin-cheng, <i>et al.</i> (507)
Removal of Triclosan with the Method of UV/ClO ₂ and Its Degradation Products	LI Yu-ying, HE Wen-long, LI Qing-song, <i>et al.</i> (516)
Mechanism of Groundwater As(V) Removal with Ferric Flocculation and Direct Filtration	KANG Ying, DUAN Jin-ming, JING Chuan-yong (523)
Preparation of Nano Zero-valent Iron/ <i>Sargassum horneri</i> Based Activated Carbon for Removal of Cr(VI) from Aqueous Solution	ZENG Gan-ming, WU Xiao, ZHENG Lin, <i>et al.</i> (530)
Adsorption of Cr(VI) on Magnetic Graphene from Aqueous Solution	LIU Wei, YANG Qi, LI Bo, <i>et al.</i> (537)
Adsorption of the TiO ₂ @Yeast Composite Microspheres for Adsorbing Fluorescent Whitening Agent-VBL in Fixed Bed	WU Fei, ZHANG Kai-qiang, BAI Bo, <i>et al.</i> (545)
Preparation and Pb ²⁺ Electrosorption Characteristics of MnO ₂ /CFP Composite Electrode	LIU Fang-yuan, HU Cheng-zhi, LI Yong-feng, <i>et al.</i> (552)
Preparation of Weak Light Driven TiO ₂ Multi Composite Photocatalysts via Adsorption Phase Synthesis	WANG Ting, ZHU Yi-chen, SUN Zhi-xuan, <i>et al.</i> (559)
Photoelectrocatalytic Degradation of Bisphenol A in Water by Fe Doped-TiO ₂ Nanotube Arrays Under Simulated Solar Light Irradiation	XIANG Guo-liang, YU Ze-bin, CHEN Ying, <i>et al.</i> (568)
Oxidation of Cationic Red 3R in Water with H ₂ O ₂ Catalyzed by Mineral Loaded with Fe/Co	MA Nan, LIU Hua-bo, XIE Xin-yuan (576)
Characteristics of Acid Red 3R Wastewater Treatment by Ozone Microbubbles	ZHANG Jing, DU Ya-wei, LIU Xiao-jing, <i>et al.</i> (584)
Effects of Carbon Sources, Temperature and Electron Acceptors on Biological Phosphorus Removal	HAN Yun, XU Song, DONG Tao, <i>et al.</i> (590)
Startup, Stable Operation and Process Failure of EBPR System Under the Low Temperature and Low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, LI Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (597)
Effects of Dissolved Oxygen in the Oxidative Parts of A/O Reactor on Degradation of Organic Pollutants and Analysis of Microbial Community for Treating Petrochemical Wastewater	DING Peng-yuan, CHU Li-bing, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (604)
Isolation of Filamentous Fungi Capable of Enhancing Sludge Dewaterability and Study of Mechanisms Responsible for the Sludge Dewaterability Enhancement	ZHOU Yu-jun, FU Hao-yi, FAN Xian-feng, <i>et al.</i> (612)
Impacts of Alkaline Thermal Treatment on Characteristics of Sludge from Sewage Treatment Plant	YANG Shi-dong, CHEN Xia, LIU Cao, <i>et al.</i> (619)
Responses of Ecosystem Carbon Budget to Increasing Nitrogen Deposition in Differently Degraded <i>Leymus chinensis</i> Steppes in Inner Mongolia, China	QI Yu-chun, PENG Qin, DONG Yun-she, <i>et al.</i> (625)
Impacts of Elevated Ozone Concentration on N ₂ O Emission from Arid Farmland	WU Yang-zhou, HU Zheng-hua, LI Cen-zi, <i>et al.</i> (636)
Multi-Year Measurement of Soil Respiration Components in a Subtropical Secondary Forest	LIU Yi-fan, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (644)
Spatial Variability of Soil Nitrogen and Related Affecting Factors at a County Scale in Hilly Area of Mid-Sichuan Basin	LUO You-lin, LI Qi-quan, WANG Chang-quan, <i>et al.</i> (652)
Effects of Land Use Change on Soil Active Organic Carbon in Deep Soils in Hilly Loess Plateau Region of Northwest China	ZHANG Shuai, XU Ming-xiang, ZHANG Ya-feng, <i>et al.</i> (661)
Carbon Source Metabolic Diversity of Soil Microbial Community Under Different Climate Types in the Area Affected by Wenchuan Earthquake	ZHANG Guang-shuai, LIN Yong-ming, MA Rui-feng, <i>et al.</i> (669)
Optimization of Electrode Configuration in Soil Electrokinetic Remediation	LIU Fang, FU Rong-bing, XU Zhen (678)
Distribution and Health Risk of HCHs and DDTs in a Contaminated Site with Excavation	ZHANG Shi-lei, XUE Nan-dong, YANG Bing, <i>et al.</i> (686)
Transformation and Mobility of Arsenic in the Rhizosphere and Non-Rhizosphere Soils at Different Growth Stages of Rice	YANG Wen-tao, WANG Ying-jie, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (694)
Extraction of Plant Root Apoplast Solution; A Case Study with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons	ZHU Man-dang, DU Jiang-xue, YUE Le, <i>et al.</i> (700)
Mechanism of Manganese Binding to Leaf Cell Wall of <i>Phytolacca americana</i> L.	XU Xiang-hua, LIU Cui-ying, LI Ping, <i>et al.</i> (706)
Degradation Characteristics of Naphthalene with a <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Strain Isolated from Soil Contaminated by Diesel	LIU Wen-chao, WU Bin-bin, LI Xiao-sen, <i>et al.</i> (712)
Toxic Effects of CdSe/ZnS QDs to Zebrafish Embryos	CHEN Mu-fei, HUANG Cheng-zhi, PU De-yong, <i>et al.</i> (719)
Physiological Response of <i>Neocaridina denticulata</i> to the Toxicity of Cu ²⁺ and Chlorpyrifos	LI Dian-bao, ZHANG Wei, WANG Li-qing, <i>et al.</i> (727)
Determination of Anilines in Environmental Water Samples by Simultaneous Derivatization and Ultrasound Assisted Emulsification Microextraction Combined with Gas Chromatography-Flame Ionization Detectors	TIAN Li-xun, DAI Zhi-xi, WANG Guo-dong, <i>et al.</i> (736)
Adsorption of Calcium Ion from Aqueous Solution Using Na ⁺ -Conditioned Clinoptilolite for Hot-Water Softening	ZHANG Shuo, WANG Dong, CHEN Yuan-chao, <i>et al.</i> (744)
Construction and Application of Economy-Pollution-Environment Three-Dimensional Evaluation Model for District	FAN Xin-gang, MI Wen-bao, MA Zhen-qing (751)

《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2月15日 第36卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 2 Feb. 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) 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	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
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	中国国际图书贸易总公司 (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