

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第2期

Vol.35 No.2

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国环境空气中颗粒物达标统计要求研究	王帅,丁俊男,王瑞斌,李健军,孟晓艳,杨彬,林宏 (401)
北京城区 PM _{2.5} 中致癌重金属季节变化特征及其来源分析	陶俊,张仁健,段菁春,荆俊山,朱李华,陈忠明,赵岳,曹军骥 (411)
北京地区冬春 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 污染水平时空分布及其与气象条件的关系	赵晨曦,王云琦,王玉杰,张会兰,赵冰清 (418)
北京市 PM _{2.5} 可吸入颗粒物反演及其时空分布分析	王艳慧,肖瑶 (428)
杭州市春季大气超细颗粒物粒径谱分布特征	谢小芳,孙在,杨文俊 (436)
春节期间南京市大气气溶胶粒径分布特征	王红磊,朱彬,沈利娟,刘晓慧,张泽峰,杨洋 (442)
南京市大气颗粒物中有机碳和元素碳粒径分布特征	吴梦龙,郭照冰,刘凤玲,刘杰,卢霞,姜琳琳 (451)
忻州市环境空气 PM ₁₀ 中有机碳和元素碳污染特征分析	史美鲜,彭林,刘效峰,牟玲,白慧玲,刘凤娟,杨花 (458)
广州某工业区大气中 PCDD/Fs 含量水平及其季节性变化特征	青亮,苏原,苏青,张素坤,任明忠 (464)
燃煤电厂锅炉 PM _{2.5} 排放危害度评价模型建立及案例分析	史妍婷,杜谦,高建民,边昕,王知涛,董鹤鸣,韩强,曹阳 (470)
中国南海大气降水化学特征	肖红伟,龙爱民,谢露华,肖化云,刘丛强 (475)
临安本底站酸雨长期观测特征分析	李正泉,马浩,毛裕定,冯涛 (481)
北京城区大气氮湿沉降特征研究	贺成武,任玉芬,王效科,毛宇翔 (490)
烟雾箱与数值模拟研究苯和乙苯的臭氧生成潜势	贾龙,徐永福 (495)
祁连山老虎沟 12 号冰川积雪中飞灰颗粒物的特征	董志文,秦大河,秦翔,杜志恒,陈记祖,任贾文 (504)
生活垃圾填埋场作业面恶臭散发率研究	羌宁,王红玉,赵爱华,袁文祥,邵俊,陈檬 (513)
生物滴滤塔处理苯酚气体研究	何觉聪,黄倩茹,陈洲洋,叶纪宏,罗雨薇,魏在山 (520)
国 V 柴油机燃用丁醇-柴油混合燃料颗粒粒径分布特性试验研究	楼狄明,徐宁,范文佳,张涛 (526)
翻堆频率对猪粪条堆肥过程温室气体和氨气排放的影响	赵晨阳,李洪枚,魏源送,钟佳,郑嘉嘉,韩圣慧,万合峰 (533)
CuBr ₂ 分解缓释-膜催化对零价汞的氧化性能研究	胡林刚,瞿赞,晏乃强,郭永福,谢江坤,贾金平 (541)
浙闽沿海岸域总溶解态无机锡的分布及影响因素研究	张许州,任景玲,刘宗广,樊孝鹏,刘诚刚,吴莹 (547)
基于双向算法的湖库允许纳污负荷量计算及案例	贾海峰,郭羽 (555)
北京平原区第四系地下水污染风险评价	郭高轩,李宇,许亮,李志萍,杨庆,许苗娟 (562)
不同季节辽河口营养盐的河口混合行为	张晋华,于立霞,姚庆祯,田琳 (569)
太湖南运河入湖河口沉积物氮素分布特征	马久远,王国祥,李振国,张佳,周锋,魏宏农,欧媛 (577)
亚热带地区潜流人工湿地木本植物筛选与净化潜力评价	陈永华,吴晓芙,郝君,陈明利,朱光玉 (585)
潜流人工湿地基质结构与水力特性相关性研究	白少元,宋志鑫,丁彦礼,游少鸿,何珊 (592)
凤眼莲对铜绿微囊藻生长及藻毒素与营养盐释放的影响	周庆,韩士群,严少华,宋伟,刘国峰 (597)
不同预氧化剂对长江原水氯(胺)化 DBPs 生成潜能的影响	田富箱,徐斌,荣蓉,陈英英,张天阳,朱贺振 (605)
溴化十六烷基吡啶改性沸石对水中菲的吸附作用	李佳,林建伟,詹艳慧,陈祖梅,王鹏钧 (611)
四环素光催化降解特性与选择性研究	宋晨怡,尹大强 (619)
微生物电解系统生物阴极的硫酸盐还原特性研究	符诗雨,刘广立,骆海萍,张仁铎,章莹颖 (626)
市政污水 A/DAT-IAT 系统中溶解性有机物表征与生态安全	杨赛,周启星,华涛 (633)
膜-生物反应器处理高盐废水膜面污染物特性研究	李彬,王志刚,安莹,吴志超 (643)
臭氧-曝气生物滤池组合工艺处理石化二级出水的试验研究	刘明国,吴昌永,周岳溪,高祯,王佩超,杨琦,董德 (651)
厌氧生物法处理果胶废水的研究	陈兵兵,杨春平,黎想,代传花,彭蓝艳 (657)
氧氟沙星在碳纳米管上的吸附机制研究	赵兴兴,于水利,王哲 (663)
平菇菌糠对废水中铜离子的生物吸附性能	胡晓婧,戴婷婷,顾海东,金羽,曲娟娟 (669)
基于流态化作用的吸附反应动力学和穿透特征	王君,王瑶,黄星,袁益龙,陈瑞晖,周航,周丹丹 (678)
广州城市污泥中重金属形态特征及其生态风险评价	郭鹏然,雷永乾,蔡大川,张涛,吴锐,潘佳钊 (684)
中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究	张小敏,张秀英,钟大洋,江洪 (692)
废旧电容器封存点土壤中的 PCBs 污染特征和健康风险评价	周玲莉,吴广龙,薛南冬,杨兵,李发生,丁琼,周丹丹,燕云仲,刘博,韩宝禄 (704)
深圳市表层土壤多环芳烃污染及空间分异研究	章迪,曹善平,孙建林,曾辉 (711)
洋河流域万全段重金属污染风险及控制对策	谭冰,王铁宇,朱朝云,李奇峰,徐笠,吕永龙 (719)
施用组配固化剂对盆栽土壤重金属交换态含量及在水稻中累积分布的影响	曾卉,周航,邱琼瑶,廖柏寒 (727)
螯合剂复配对实际重金属污染土壤洗脱效率影响及形态变化特征	尹雪,陈家军,吕策 (733)
<i>Pseudomonas</i> sp. QJX-1 的锰氧化特性研究	周娜娜,柏耀辉,梁金松,罗金明,刘锐平,胡承志,袁林江 (740)
$n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 对混培养菌与纯培养菌同步脱氮除硫的影响	陈子爱,陈会娟,魏本平,刘刚金,邓良伟,吴力斌 (746)
杭州市空气微生物群落碳代谢特征研究	龚婵娟,许晶,方治国,楼秀芹,欧阳志云 (753)
鼠李糖脂逆胶束体系中纤维素酶的后萃研究	赵艳鸽,袁兴中,黄华军,崔凯龙,彭馨,彭子原,曾光明 (759)
黄海常见鱼类体内汞含量的种内和种间差异研究	朱艾嘉,许战洲,柳圭泽,邓丽杰,方宏达,黄良民 (764)
3 种 PAEs 对蚯蚓的毒性作用和组织酶活性影响的研究	王艳,马泽民,吴石金 (770)
新型保水剂应用于土壤-小白菜系统的环境安全评价	李希,贺纪正,郑袁明,郑明兰 (780)
黄河三角洲翅碱蓬湿地硫化氢和羧基硫排放动态研究	李新华,郭洪海,杨丽萍,朱振林,孙晓青 (786)
农田土壤 N ₂ O 产生的关键微生物过程及减排措施	朱永官,王晓辉,杨小茹,徐会娟,贾炎 (792)
《环境科学》征订启事 (691) 《环境科学》征稿简则 (800) 信息 (489,519,591,791)	

中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究

张小敏¹, 张秀英^{1*}, 钟太洋², 江洪¹

(1. 南京大学国际地球系统科学研究所, 南京 210046; 2. 南京大学国土资源与旅游学系, 南京 210046)

摘要: 在统计有关我国农田土壤重金属相关文献数据的基础上, 探讨了我国农田土壤重金属 Pb、Cd、Cu、Zn 和 Cr 的空间富集现状。收集到有关土壤 Pb、Cd、Cu、Zn 和 Cr 含量的研究分别为 173、138、156、139、140 个。首先剔除异常值, 然后利用剩余样本进行克里金插值, 并统计各省地区重金属含量平均值。结果表明我国重金属空间分布具有明显的区域特征, 西南地区土壤重金属含量较高, 其他地区相对较低; 与分省的土壤背景值相比较, 农田土壤 Pb 和 Cd 的含量明显高于背景值。土壤 Pb 在云南省超出背景值最高, 为背景值的 1.91 倍; Cd 在辽宁省超出背景值最高, 为 23.02 倍; Zn 在云南省富集最为严重, 是背景值的 1.55 倍, Cu 最高的是广东省, 达到背景值的 2.92 倍。

关键词: 土壤重金属; 重金属富集; 空间分布; 中国农田

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)02-0692-12

Spatial Distribution and Accumulation of Heavy Metal in Arable Land Soil of China

ZHANG Xiao-min¹, ZHANG Xiu-ying¹, ZHONG Tai-yang², JIANG Hong¹

(1. International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210046, China; 2. Department of Land Resources and Tourism Sciences, Nanjing University, Nanjing 210046, China)

Abstract: Based on the domestic and foreign published papers about soil heavy metal contents, the present study explored the spatial variations of heavy metal contents in agricultural soil in China. Totally, 173 studies on soil Pb, 138 on Cd, 156 on Cu, 139 on Zn and 140 on Cr were collected. Firstly, the abnormal values were selected and removed, then the spatial distributions were obtained through Kriging method and the average values in the provinces were calculated. Results show that the spatial distributions of heavy metals have obvious regional characteristics and the southwest part of China has relatively high heavy metal concentrations in soils. Compared with the background value of soil heavy metal concentrations, nearly all of the provinces have higher Pb, Cd, Cu and Zn concentrations. Pb and Cd have the most obviously higher values than the background values. The highest difference of Pb concentration is in Yunnan Province with 1.91 times of the background, and the highest Cd difference is in Liaoning Province with 23.04 times of the background; The highest Zn enrichment is in Yunnan, with 1.55 times of the background; and the highest Cu difference with 2.92 times of the background value.

Key words: heavy metal; heavy metal accumulation; spatial distribution; Chinese arable land

土壤是地球生态系统重要的组成部分, 土壤生物化学含量影响着地表生物的生长, 尤其是各种化学物质含量的超标不但影响植物正常生长, 而且通过食物链等途径进入人体及其他动物体内富集, 影响人体健康。自进入工业社会后, 工业发展以及城市化进程深入等方面都加重了土壤中重金属的累积, 造成土壤重金属污染, 并且污染面积逐年扩大。据农业部进行的调查, 我国农田土壤在 140 万 hm^2 污水灌溉区, 遭受重金属污染的土地面积占污灌区面积的 64.8%; 每年因重金属污染减产的粮食 1 000 多万 t, 被重金属污染的粮食每年达到 1 200 万 t, 合计损失至少 200 亿元^[1]。农田重金属的富集达到一定程度不仅降低农作物的产量和质量, 并且严重威胁生态系统和人类的安全^[2, 3]。人为源是其主要的土壤重金属污染来源, 主要包括施肥, 动物粪便

和生物固体应用, 污水灌溉, 大气沉降等^[4~6]。

国内外在土壤重金属方面已经做了大量研究, 针对城市土壤、菜园土壤、果园土壤以及矿区周边农田土壤的重金属的含量、对农作物的影响以及空间分布等进行研究。我国农田土壤重金属研究, 大都是选取某些典型区域, 选取样点采集土壤和植被样本通过化学分析等确定重金属含量并进行相关分析^[7~140], 但是对中国农田土壤中重金属含量的整体分析目前还鲜见报道。

在总结前人研究的基础上, 本研究从空间分析的角度出发, 收集全国农田土壤重金属含量数

收稿日期: 2013-06-16; 修订日期: 2013-08-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271190)

作者简介: 张小敏(1989~), 女, 硕士, 主要研究方向为大气环境遥感, E-mail: zxm08ygy@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zhangxy@nju.edu.cn

据^[7~140]。利用克里金插值获得全国农田土壤 Pb、Cd 等重金属的空间分布,探讨了我国农田土壤重金属的富集程度,并分析其主要来源。

1 材料与方法

1.1 数据收集和整理

从公开发表的文献中,收集了 2000 ~ 2013 年全国农作物土壤重金属含量数据,部分数据来源于中国土壤数据库(<http://www.soil.csdb.cn/>)。共收集到有关土壤 Pb 含量的研究 173 个,Cd 研究 138 个,Cu 研究 156 个,Zn 研究 139 个和 Cr 研究 140 个。分布如图 1 所示。

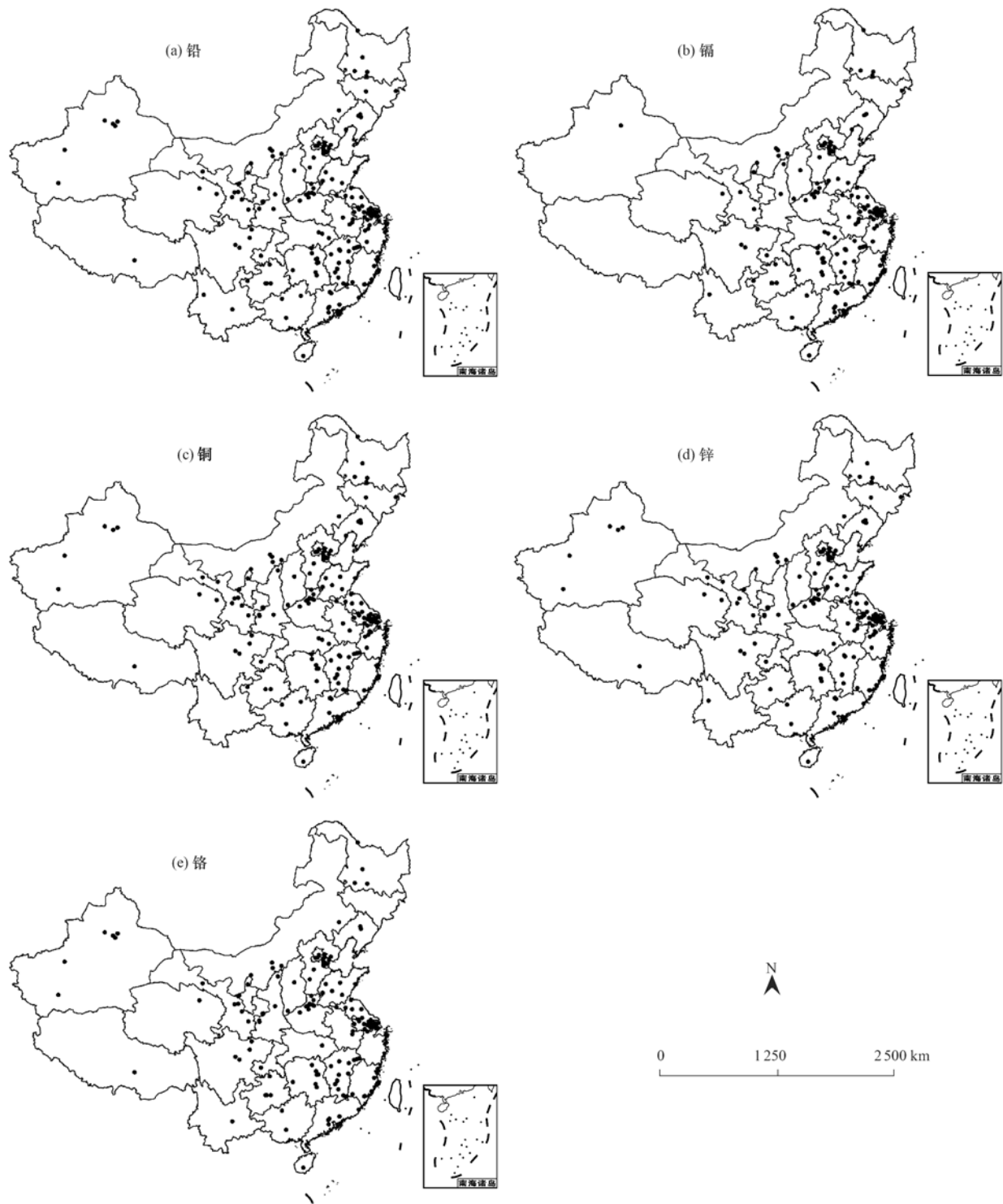


图 1 收集到的全国土壤重金属样本

Fig. 1 Spatial distribution of collected soil heavy metal samples

将每个研究中重金属的平均值作为该点位的值,然后人工剔除异常样本. 把样本数据中重金属含量明显超出其附近值的样本剔除,因为这些样本可能受矿区等因素影响而导致高值.

1.2 研究方法

确定需要插值的样本数据,进行地统计学分析后应用克里金方法空间插值. 克里金插值法,又称为空间自协方差最佳插值法,是空间插值的一种最优内插法. 它是根据样本空间位置不同,样本间相关程度的不同,对每个样本赋予不同的权,进行滑动加权平均.

假设 $x_1, \dots, x_n$ 为区域上的一系列观测点, $z(x_1), \dots, z(x_n)$ 为相应的观测值. 区域化变量在 x_0 处的值 $z^*(x_0)$ 可采用一个线性组合来估计:

$$z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i)$$

式中, λ_i 为第 i 个样本的权值.

克里金插值得到中国区域重金属的空间分布,分省统计农田土壤重金属含量平均值,并与背景值作对比,将高出背景值的量与背景值作比,得到各重金属超出背景值的倍率,以此分析中国农田土壤重金属富集程度.

2 结果与分析

2.1 半方差分析

将预处理的土壤重金属含量数据及其坐标数据导入地统计学软件进行半方差分析,模拟出土壤重金属含量半方差方程,计算 Kriging 插值最优模型参数(表 1). 结果显示土壤 Cd、Cu、Pb 和 Zn 含量严重偏离正态分布,采用取对数方法进行标准化处理; Cr 采用原始数据. 在各向同性的情况下运用指数模型插值有较大的相关系数及较小的方差. 根据模拟的半方差模型参数进行克里金插值(图 2),得到重金属土壤含量的空间分布.

表 1 土壤重金属的半方差模型模拟参数

Table 1 Semi-variogram model parameters of soil heavy metal

参数	铅(Pb)	镉(Cd)	铜(Cu)	锌(Zn)	铬(Cr)
模型	指数模型	指数模型	指数模型	指数模型	指数模型
块金(C_0)	0.3	0.591	0.248	0.392	293
基台($C_0 + C$)	0.805	2.273	0.915	1.219	728.1
变程(A, m)	1 501 000	328 000	1 481 000	5 165 000	374 000
方差(SS)	0.148	1.41	0.356	0.0491	—
相关系数(r^2)	0.519	0.616	0.445	0.692	0.566
$C/(C_0 + C)$	0.457	0.587	0.574	0.513	0.426

2.2 农田土壤重金属的空间分布

将收集的全国土壤样本重金属含量点位数据,经过 Kriging 插值得到全国范围农田土壤重金属的空间分布图(图 3). 土壤 Pb 含量在空间分布上西南部出现高值,在西藏东部以及云南、四川地区,广东西北与湖南交界以及辽宁环渤海土壤 Pb 含量较高,其他区域变化不明显,且分布比较均匀;西北部新疆地区含量较少. 相对于 Pb, Cd 的空间分布则出现多个高值区域,西部 Cd 含量平均较大;在中国南部地区 Cd 出现多个高值区,说明在有些区域可能存在重点污染源. Cu 在全国的分布中出现连片的高值区域,尤其在四川和云南北部,广东省和湖南交界有较大范围 Cu 的高值区,而在华北的河北南部,山西、山东和河南 Cu 的土壤含量较低;另外在甘肃中部、安徽南部与湖北交界和辽宁环渤海有较小范围的土壤重金属 Cu 的高值区. 土壤 Zn 的含量在中国区域与 Pb 有着相似的空间分布,在西南部出现高值,广东西北与湖南交界含量较高,其他地区土壤

Zn 含量变化平缓,中国西北部与北部地区(内蒙古东北部和黑龙江、吉林大部)含量较低. 由 Cr 的空间分布来看, Cr 在中国区域的含量空间分布比较复杂,由云南向东北方向直到江苏地区出现连续高值,在环黄渤海地区尤其京津唐地区出现次高值区.

总体来看,在中国的西南部地区,包括云南、四川,各种土壤重金属含量普遍较高,其他重金属土壤含量较高的地区为广东省北部与湖南交界和环渤海地区,再之在湖北、安徽等地土壤重金属含量偏高. 中国区域土壤 Pb 和 Zn 含量在空间分布上相似.

2.3 全国分省重金属平均含量分布及其与各省背景值比较分析

对全国土壤重金属空间分布图进行分省统计,获得各省农田土壤重金属含量的平均值,同时查阅文献[141]得到我国各省、自治区、直辖市(重庆市背景值数据来源于文献[142])土壤重金属元素背景值作对比,见表 2,并将农田土壤重金属含量的平均值与各省土壤重金属含量背景值作差,得到超出

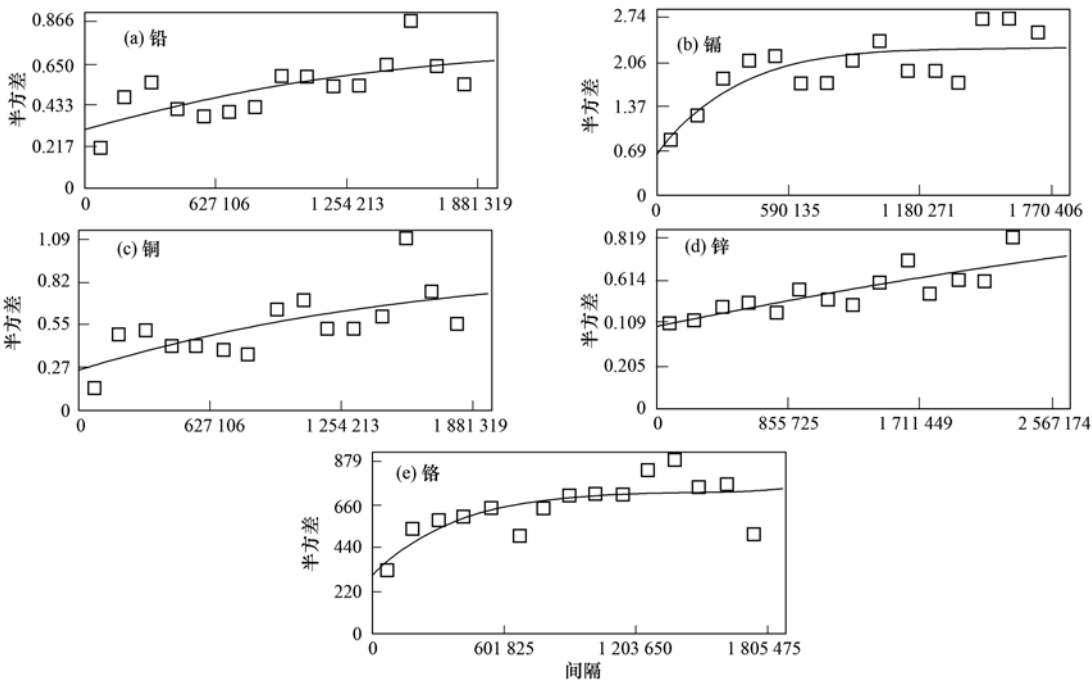


图 2 土壤重金属含量半方差函数

Fig. 2 Semi-variogram diagram of heavy metal concentrations in soils

表 2 各省行政区土壤重金属含量背景值¹⁾/mg·kg⁻¹

Table 2 Soil heavy metal background values in administrative area of different provinces/mg·kg⁻¹

行政区	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn
北京市	0.074	68.10	23.60	25.40	102.60
上海市	0.138	70.20	27.20	25.00	81.30
天津市	0.090	84.20	28.80	21.00	79.30
重庆市	0.133	76.14	23.83	25.48	75.83
黑龙江省	0.086	58.60	20.00	24.20	70.70
云南省	0.218	65.20	46.30	40.60	89.70
吉林省	0.099	46.70	17.10	28.80	80.40
四川省	0.079	79.00	31.10	30.90	86.50
安徽省	0.097	66.50	20.40	26.60	62.00
山东省	0.084	66.00	24.00	25.80	63.50
山西省	0.128	61.80	26.90	15.80	75.50
广东省	0.056	50.50	17.00	36.00	47.30
江苏省	0.126	77.80	22.30	26.20	62.60
江西省	0.108	45.90	20.30	32.30	69.40
河北省	0.094	68.30	21.80	21.50	78.40
河南省	0.074	63.80	19.70	19.60	60.10
浙江省	0.070	52.90	17.60	23.70	70.60
湖北省	0.172	86.00	30.70	26.70	83.60
湖南省	0.126	71.40	27.30	29.70	94.40
甘肃省	0.116	70.20	24.10	18.80	68.50
福建省	0.074	14.00	22.80	41.30	86.10
贵州省	0.659	95.90	32.00	35.20	99.50
辽宁省	0.108	57.90	19.80	21.40	63.50
陕西省	0.094	62.50	21.40	21.40	69.40
青海省	0.137	70.10	22.20	20.90	80.30
宁夏回族自治区	0.112	60.00	22.10	20.90	58.80
内蒙古自治区	0.053	41.40	14.10	17.20	59.10
新疆维吾尔自治区	0.120	49.30	26.70	19.40	68.80
西藏自治区	0.081	76.60	21.90	29.10	74.00
广西壮族自治区	0.267	82.10	27.80	24.00	75.60

1) 由于资料限制,不含台湾省、香港、澳门和海南省土壤背景值;重庆市土壤背景值来源于文献[142];所统计背景值为 A 层土壤重金属元素含量

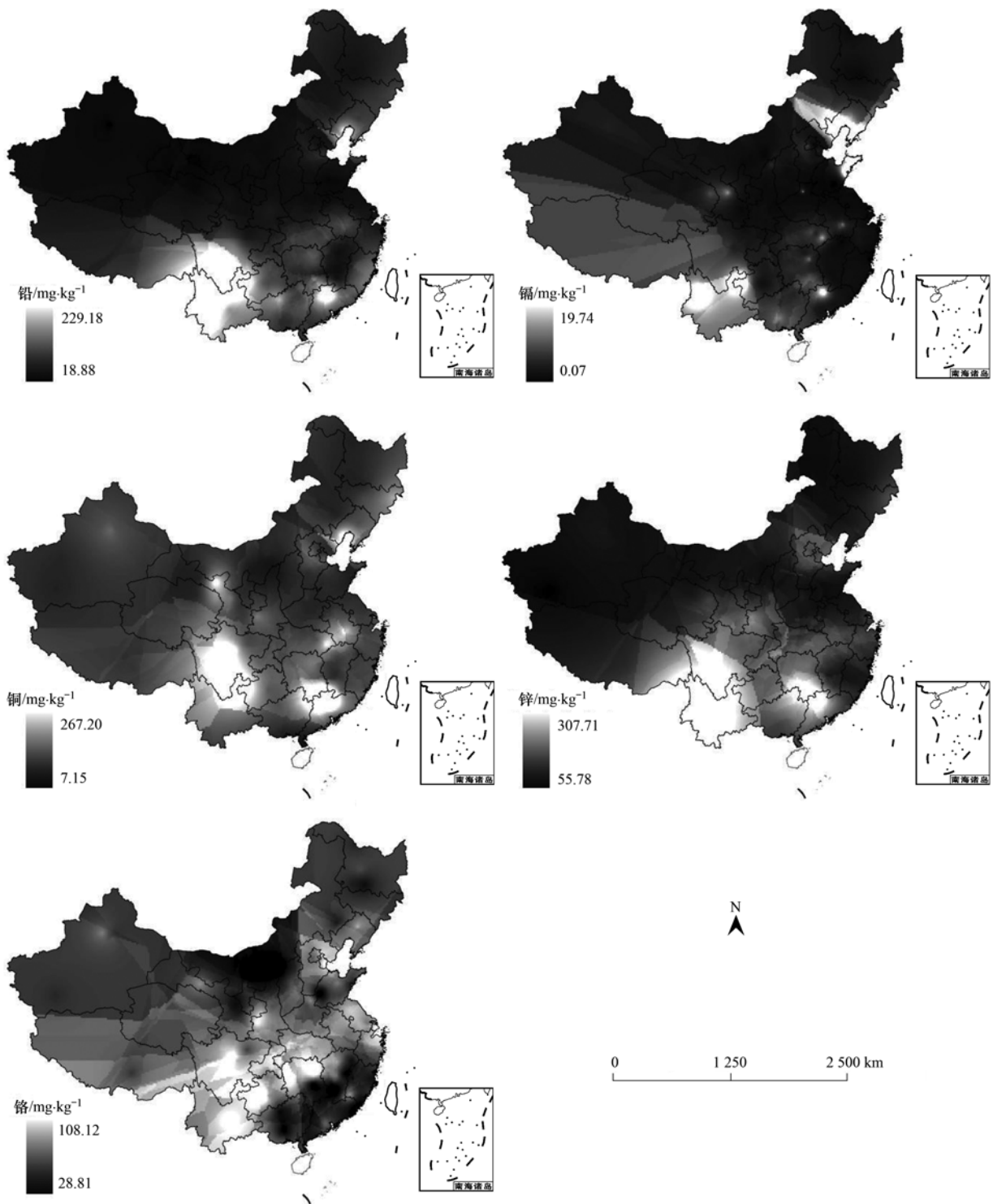


图3 土壤重金属含量的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of heavy metal concentration in soils

背景值重金属含量分布,图4所示.

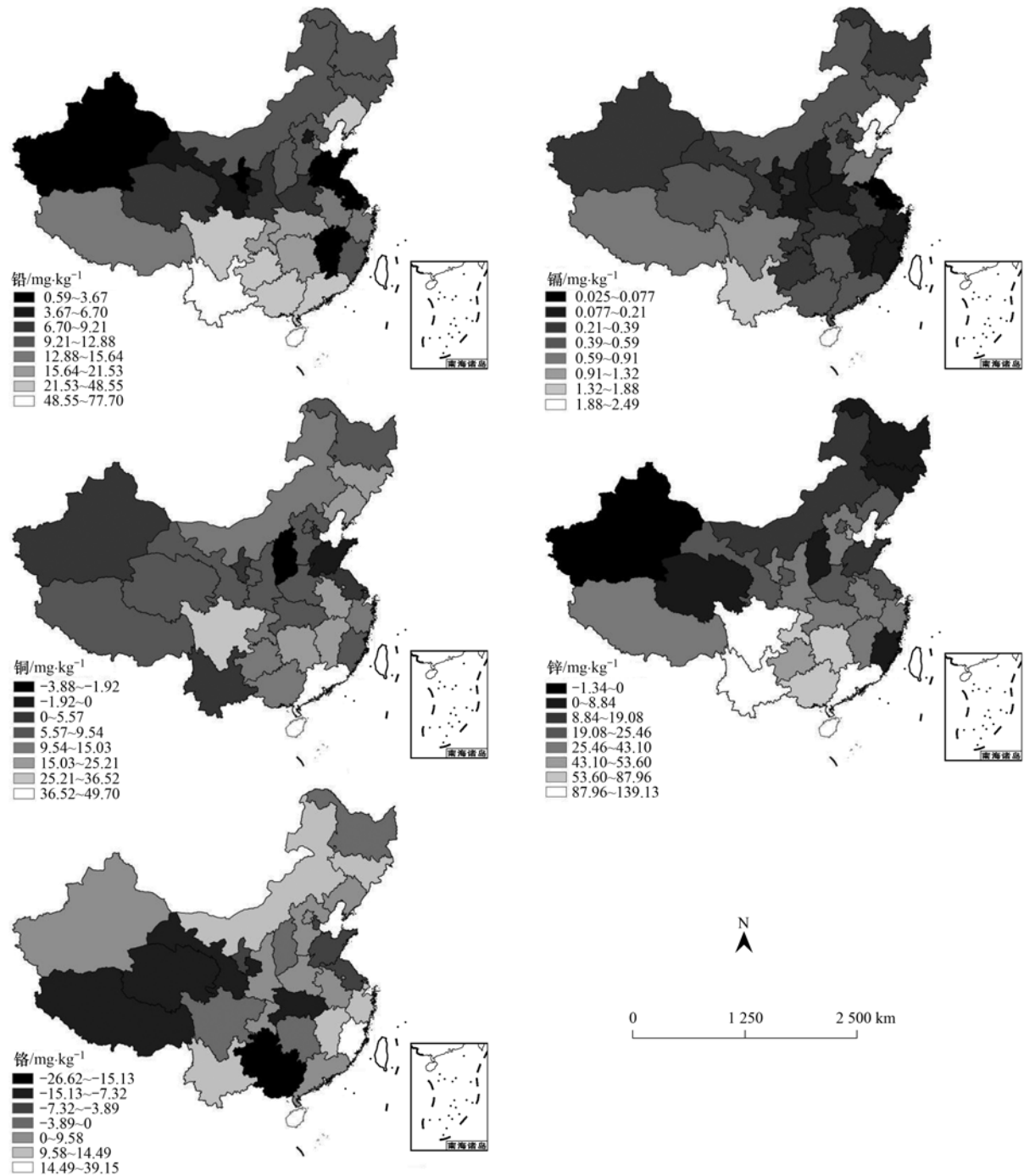
各省份平均土壤重金属含量显示,云南省和四川省各种重金属的含量均最高,除Cr和Cd外其他重金属在中国南部土壤含量均较高. Cu在中国北部的辽宁省也存在高分布,除个别省份外,土壤Cr

和Cd含量在中国其他区域均较高分布. 各农田土壤重金属含量最高的省份分别是:云南省Pb 118.29 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 辽宁省Cd 2.59 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 广东省Cu 66.70 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 云南省Zn 228.82 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 上海市Cr 79.78 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

从背景值看,云南省、四川省、贵州省、福建省和广东省均是 Pb 的高分布区,与插值统计的结果相同,表明土壤成土母质对高土壤重金属 Pb 含量起着重要作用。各省农田土壤 Pb、Zn 和 Cr 含量与各省背景值在空间分布上基本相同,但土壤 Pb、Zn 值明显普遍偏高。同样,Cd 在中国西南部和西北部分布较高,内蒙古、山东和辽宁偏高外,其他区域与背景

值高值分布基本相同。土壤 Cu 含量在西南部背景值和插值结果均有高值分布,且土壤 Cu 的背景值在中国西部区域较高,而在插值结果显示分省土壤 Cu 均值含量次高值则分布在中国东部区域,表明土壤 Cu 的空间分布在某种程度上受到人为活动的干扰。

图 4 插值结果分省平均值与各省背景值的差值分布,除土壤 Cr 外其他 4 种重金属的插值结果均



不包含海南省、台湾省、香港和澳门

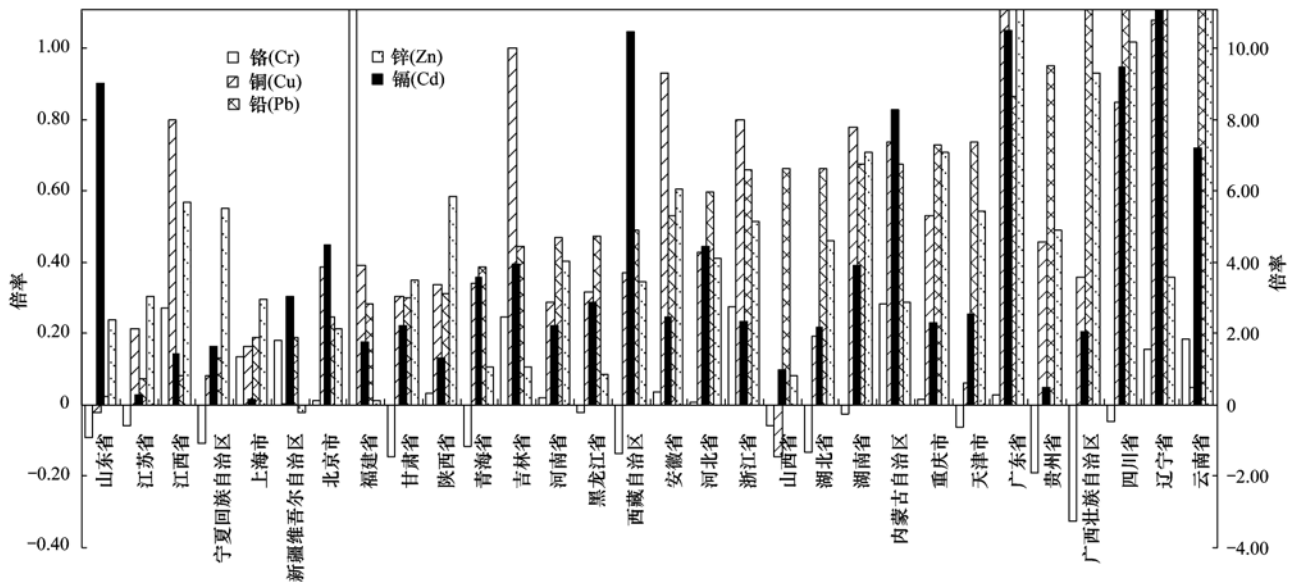
图 4 土壤各重金属含量与背景值之间的差值

Fig. 4 Difference between soil heavy metal contents and background value in 30 provinces

明显高于背景值,说明中国农田土壤均遭受到不同程度不同重金属的富集. 其中 Pb 和 Cd 在全国范围内均高于各省土壤重金属含量背景值,说明 Pb 和 Cr 在全国范围普遍存在人为引入的重金属富集. 图 5 表示各省份重金属平均含量超过背景值部分与背景值的比率. 其中广西、四川、辽宁和云南 Pb 超出背景值比较高,其超出背景值部分分别达到了背景值的 1.33, 1.42, 1.59 和 1.91 倍;而 Cd 含量则超出背景值更高,除上海、江苏、贵州和山西,其他省份 Cd 含量超出背景值部分均达到了背景值的 1 倍以上,其中西藏、广西达到 10 倍以上,辽宁达到 23.02 倍. 土壤 Cu 含量除山西、山东, Zn 除西藏外,全国其他区域均高于背景值. 吉林、辽宁和广

东 Cu 超出背景值部分均达到背景值的 1 倍以上,广东达到 2.92 倍, Zn 在四川、云南和广东超出背景值部分均达到背景值 1 倍以上,广东超出 2.22 倍. Cr 在全国区域基本不超标,只有福建省土壤 Cr 平均值超出背景值 2.80 倍.

我国西南部地区 Pb 的富集更为严重,而 Cd 在全国均有一定的富集,但南部地区较为明显,其中 Pb 最高超出背景值 $77.69 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,超出云南省背景值 1.91 倍, Cd 最高超出背景值 $2.49 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,超出辽宁省背景值 23.02 倍. 农田土壤 Zn 在中国南部污染严重,最高超出背景值 $139.12 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,超出云南省背景值 1.55 倍, Cu 最高超出 $49.70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,超出广东省背景值 2.92 倍.



镉参照右侧坐标轴,其他重金属参照左侧坐标轴

图 5 分省各重金属超出背景值的倍率

Fig. 5 Ratio of excessive heavy metal to background values in different provinces

3 讨论

以上全国土壤重金属的分布现状,我国农田土壤重金属含量空间分异特征明显, Pb、Cd、Cu 和 Zn 的含量均明显高于背景值,表明不同程度地受到人为活动干扰.

各地区成土母质的差异,背景值的不同是造成我国土壤重金属含量在空间上分布差异的初始原因. 同时由于经济的区域发展差异以及不同地区发展模式及产业类型造成土壤重金属含量在空间上后期累积程度不同,从而导致土壤重金属含量在空间上分布差异.

土壤重金属含量的增加主要是由于人为活动的

影响造成的,如重工业或者矿区的开发等都会使大量的重金属流入表层土壤,导致该区域土壤中重金属含量剧增. 另外有研究表明,据估计在农用土壤每年的 Cu、Zn 和 Cd 总含量中农业活动造成的比重分别为 79.6%、56% 和 63%;而对于 Pb 和 Cr 则来自于与工业过程有关的大气沉降,比重分别为 85% 和 43%^[6]. 例如, Cd 的分布在几个地区出现高值点,说明人类活动的影响严重,四川、湖南、湖北、江苏和广东等地均出现 Cd 分布高值点,致使这几个省的 Cd 的平均含量增高. 辽宁地区自改革以来一直是我国的重工业基地和钢铁产量大省,所受重工业的影响是其土壤重金属污染的主要原因. 在我国西南地区出现土壤重金属的高值分布,不仅由于

其原始较高背景值分布,同时西南地区,如四川盆地、云贵地区和两广地区,更是由于重工业发展和人类活动等造成土壤重金属的富集。

土壤所含的重金属可以通过多种途径进入水体,还可以以扬尘为载体在全球范围内传播。所以针对我国土壤的重金属污染状况,人们应该采取多种措施,综合防止和治理土壤的重金属污染。首先,防止重金属富集的加剧,在重金属富集严重的区域,应向多产业方向发展,取缔具有重金属严重污染能力的工厂,发展服务业等其他无或较低重金属污染的产业。同时应用高新科技技术减少重金属流入土壤等环境,将废液废渣中的重金属进行收集再利用。其次,提高人们对重金属污染的认识,完善我国土壤环境质量标准体系,健全法律法规,从各个方面将重金属污染的防治工作做到位。

本研究主要采用查阅文献数据,采集到有限的农田土壤样本重金属数据,通过分析插值得到中国地区农田土壤重金属的空间分布。其中在中国东部地区由于研究比较多,所以样本点较多且集中,而在中国西部地区由于相关的研究较少,样本点数据也较少。这在某种程度上给结果造成一定的影响,如西藏地区,样本点稀少,在插值分析时受到西南云贵和四川的重金属高值分布的影响,使其土壤重金属含量整体偏高。在查阅的文献研究中,多是将农田土壤受到重金属污染明显的地区作为研究区,所以在本研究中所得到的结果不可避免地会偏高。

4 结论

通过对 5 种重金属的插值空间分布分析,我国土壤重金属含量较高,且各区域重金属含量分布存在较大差异。重金属背景值在区域上的差异是造成地区重金属含量差异的初始原因,人类活动引入的土壤重金属是重金属富集的主要原因。中国区域农田土壤 Pb、Cd、Cu 和 Zn 的含量均有不同程度的富集。通过与背景值的比较,Cd 的富集最为严重,其次是 Pb,超标现象在全国普遍存在。Pb 和 Zn 的富集在云南省达到最高,均是超出其背景值最高的省份,但是 Zn 超出背景值倍数最高的是广东省。Cd 超出背景值最高的是辽宁省,同时是 Cd 超出背景值倍数最高的省份。广东省 Cu 的富集最严重,是 Cu 含量超其背景值最高的省份。总体上看,中国西南部地区土壤重金属富集值较高,其次是两广和辽宁地区。各区域土壤重金属的富集程度与类型受到当地农业活动和工业发展等的影响,如重金属含量

高的省份地区,东北的辽宁,西南的四川、云贵地区等重金属的污染受到重工业的影响严重。

参考文献:

- [1] 高翔云, 汤志云, 李建和, 等. 国内土壤环境污染现状与防治措施[J]. 江苏环境科技, 2006, **19**(2): 52-55.
- [2] Chen H M, Zheng C R. Heavy metal pollution in soils in China: status and countermeasures [J]. AMBIO, 1999, **28**(2): 130-134.
- [3] Raghunath R, Tripathi R M, Kumar A V, *et al.* Assessment of Pb, Cd, Cu, and Zn exposures of 6-10-year-old children in Mumbai [J]. Environment Research, 1999, **80**(3): 215-221.
- [4] Jiao W, Chen W, Chang A C, *et al.* Environmental risks of trace elements associated with long-term phosphate fertilizers applications: a review [J]. Environmental Pollution, 2012, **168**: 44-53.
- [5] Liaghati T, Preda M, Cox M. Heavy metal distribution and controlling factors within coastal plain sediments, bells creek catchment, southeast Queensland, Australia [J]. Environment International, 2004, **29**(7): 935-948.
- [6] Luo L, Ma Y B, Zhang S Z, *et al.* An inventory of trace element inputs to agricultural soils in China [J]. Journal of Environmental Management, 2009, **90**(8): 2524-2530.
- [7] 刘玉燕, 刘浩峰. 上海、乌鲁木齐与昌吉三市城市土壤重金属富集特征比较研究[J]. 干旱环境监测, 2010, **24**(3): 138-142.
- [8] 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.
- [9] 陈圆圆, 孙小静, 王军, 等. 上海宝山区农业用地土壤重金属空间分异规律及分布特征研究[J]. 环境化学, 2010, **29**(2): 215-219.
- [10] 巫和昕, 胡雪峰, 张国莹, 等. 上海市宝山区土壤重金属含量及其分异特征[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2004, **10**(4): 400-405.
- [11] 史贵涛, 陈振楼, 张翠, 等. 上海市饮用水源地周边环境中的重金属[J]. 环境科学, 2008, **29**(7): 1797-1805.
- [12] 席晋峰, 俞杏珍, 周立祥, 等. 不同地区城郊用地土壤重金属含量特征的比较[J]. 土壤, 2011, **43**(5): 769-775.
- [13] 刘姣, 曹靖, 南忠仁, 等. 白银市郊区重金属复合污染对土壤酶活性的影响[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2010, **46**(5): 39-43.
- [14] 赵海军, 刘苹, 万书波, 等. 临沂市花生产地土壤环境质量分析与评价[J]. 江西农业学报, 2011, **23**(6): 122-125.
- [15] 易治伍, 王灵, 钱翌, 等. 乌鲁木齐市农田土壤重金属含量及评价[J]. 干旱区资源与环境, 2009, **23**(2): 150-154.
- [16] 周鸿斌, 角媛梅, 史正涛, 等. 云南珠江沿岸农田土壤磁测分析与重金属污染评价[J]. 农业环境科学学报, 2008, **27**(4): 1586-1591.
- [17] 代平, 安瞳昕, 吴伯志, 等. 云南通海蔬菜区土壤和蔬菜中重金属及农药残留分析[J]. 安徽农业科学, 2012, **40**(1): 161-163.
- [18] 王鹏, 赵志忠, 王军广, 等. 五指山茶园表层土壤重金属污

- 染危害评价[J]. 安徽农业科学, 2011, **39**(13): 8025-8027.
- [19] 张丽华, 郑承松, 张君诚, 等. 三明市铅锌矿污染土壤的重金属含量及其形态分布研究[J]. 三明学院学报, 2008, **25**(2): 184-187.
- [20] 罗永清, 陈银萍, 陶玲, 等. 兰州市农田土壤重金属污染评价与研究[J]. 甘肃农业大学学报, 2011, **46**(1): 98-104.
- [21] 陶玲, 任珺, 乔国栋. 兰州市蔬菜基地土壤重金属含量及评价[J]. 土壤通报, 2010, **41**(6): 1479-1483.
- [22] 孙锐, 舒帆, 孙卫玲, 等. 典型铅锌矿区水稻土重金属污染特征及其与土壤性质的关系[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2012, **48**(1): 139-146.
- [23] 王喜宽, 张青, 刘晨, 等. 内蒙古临河市城市土壤环境地球化学特征[J]. 现代地质, 2008, **22**(6): 948-953.
- [24] 黄绍文, 金继运, 和爱玲, 等. 农田不同利用方式下土壤重金属区域分异与评价[J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(增刊): 540-548.
- [25] 肖再亮, 兰石, 田犀, 等. 利州区农产品基地土壤重金属污染评价[J]. 四川环境, 2010, **29**(3): 131-135.
- [26] 陆安祥, 孙江, 王纪华, 等. 北京农田土壤重金属年际变化及其特征分析[J]. 中国农业科学, 2011, **44**(18): 3778-3789.
- [27] 胡克林, 张凤荣, 吕貽忠, 等. 北京市大兴区土壤重金属含量的空间分布特征[J]. 环境科学学报, 2004, **24**(3): 463-468.
- [28] 韩平, 王纪华, 陆安祥, 等. 北京顺义区土壤重金属分布与环境质量评价[J]. 农业环境科学学报, 2012, **31**(1): 106-112.
- [29] 孙瑞波, 盛下放, 李娅, 等. 南京栖霞重金属污染区植物富集重金属效应及其根际微生物特性分析[J]. 土壤学报, 2011, **48**(5): 1013-1020.
- [30] 王海涛, 王庆九, 崔志强, 等. 南通城郊土壤重金属背景值和元素间相关性分析[J]. 安徽农业科学, 2011, **39**(23): 14062-14064.
- [31] 陈富荣, 陈永宁, 贾十军, 等. 合肥市土壤重金属元素异常及其生态效应[J]. 岩矿测试, 2007, **26**(4): 275-280.
- [32] 梁烜赫, 曹铁华, 张磊, 等. 吉林省农田重金属含量及其在作物中的累积[J]. 吉林农业科学, 2011, **36**(6): 59-62.
- [33] 黄鑫, 柴社立, 张青伟, 等. 吉林省西部土壤中重金属的形态及其潜在生态影响评价[J]. 科学技术与工程, 2010, **10**(7): 1717-1722.
- [34] 叶华香, 张思冲, 辛蕊, 等. 哈尔滨市郊菜地土壤重金属及土壤理化性质[J]. 中国农学通报, 2011, **27**(2): 162-166.
- [35] 秦松, 王正银, 刘明亮. 喀斯特边远农区正安县植烟土壤重金属含量及其特征[J]. 水土保持学报, 2007, **21**(1): 72-75.
- [36] 马建华, 李灿, 陈云增. 土地利用与经济增长对城市土壤重金属污染的影响——以开封市为例[J]. 土壤学报, 2011, **48**(4): 743-750.
- [37] 李晓燕, 曹益金, 齐乐, 等. 城市功能对贵阳市城区土壤重金属分布的影响[J]. 地球与环境, 2010, **38**(4): 421-427.
- [38] 姜芝萍, 杨俊衡. 城市重点污染区土壤重金属污染评价标准探讨——以衡阳市某区为例[J]. 安全与环境工程, 2010, **17**(1): 57-60.
- [39] 刘琼峰, 李明德, 吴海勇, 等. 城郊农田土壤 Pb、Cd 的空间变异与评价研究——以长沙市为例[J]. 长江流域资源与环境, 2012, **21**(2): 195-203.
- [40] 李保杰, 顾和和, 纪亚洲. 基于地统计的矿业城市土壤重金属污染研究——以徐州市为例[J]. 江苏农业科学, 2011, **39**(3): 524-526.
- [41] 刘静, 黄标, 孙维侠, 等. 基于污染损失率法的土壤重金属污染评价及经济损失估算[J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(6): 1087-1093.
- [42] 孙清斌, 尹春芹, 邓金锋, 等. 大冶矿区周边农田土壤和油菜重金属污染特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, **31**(1): 85-91.
- [43] 赵淑苹, 陈立新. 大庆地区不同土地利用类型土壤重金属分析及生态危害评价[J]. 水土保持学报, 2011, **25**(5): 195-199.
- [44] 陈学民, 朱阳春, 伏小勇. 天水苹果园土壤重金属富集状况评价及来源分析[J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(5): 893-898.
- [45] 李雪梅, 王祖伟, 邓小文. 天津郊区菜田土壤重金属污染环境评价[J]. 天津师范大学学报(自然科学版), 2005, **25**(1): 69-72.
- [46] 刘勇, 岳玲玲, 李晋昌. 太原市土壤重金属污染及其潜在生态风险评价[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(6): 1285-1293.
- [47] 翁添富, 汪珊, 张侃, 等. 孝感市孝南区土壤重金属污染的初步研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(增刊): 39-42.
- [48] 王利军, 卢新卫, 荆淇, 等. 宝鸡长青镇铅锌冶炼厂周边土壤重金属污染研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, **31**(2): 325-330.
- [49] 刘庆, 臧宏伟, 史衍玺. 小尺度农田土壤重金属污染评价与空间分布——以鲁西北阳谷县为例[J]. 土壤通报, 2009, **40**(3): 673-678.
- [50] 宋启道, 方佳, 王富华, 等. 广东省主要蔬菜产地土壤中重金属含量调查与评价[J]. 环境污染与防治, 2008, **30**(5): 91-93.
- [51] 柴世伟, 温琰茂, 张云霓, 等. 广州郊区农业土壤重金属含量与土壤性质的关系[J]. 农村生态环境, 2004, **20**(2): 55-58.
- [52] 袁顺全, 赵烨, 刘殿成. 弥河流域农用地健康研究[J]. 农业工程学报, 2008, **24**(S1): 20-23.
- [53] 袁顺全, 赵烨, 李强, 等. 弥河流域农用地土壤重金属含量特征及其影响因素[J]. 安徽农业科学, 2008, **36**(10): 4237-4238.
- [54] 李里, 陈斌强. 怀化市菜地土壤及蔬菜重金属污染状况调查与评价[J]. 农产品加工·学刊, 2011, (11): 133-135.
- [55] 刘文婷, 王子波, 陈满荣. 扬州城区道路两侧土壤重金属污染检测与评价[J]. 扬州大学学报(自然科学版), 2011, **14**(4): 78-82.
- [56] 李飞, 王晓钰, 汤富强. 新乡市近郊农田土壤重金属的生态风险评价[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2011, **39**(5): 84-87.
- [57] 郭丹, 朱维琴, 林娟. 杭州市主要地区农田土壤重金属污染评价及关联特征研究[J]. 杭州师范大学学报(自然科学

- 版), 2009, **8**(2): 138-143.
- [58] 刘扬林, 蒋新元. 株洲市白马乡土壤和农作物重金属污染评价[J]. 土壤, 2004, **36**(5): 551-556.
- [59] 黄敏, 杨海舟, 余萃, 等. 武汉市土壤重金属积累特征及其污染评价[J]. 水土保持学报, 2010, **24**(4): 135-139.
- [60] 郭岩, 杨国义, 董巧香, 等. 汕头市典型区域土壤重金属污染特征及评价[J]. 环境科学, 2007, **28**(5): 1067-1074.
- [61] 廖启林, 华明, 金洋, 等. 江苏省土壤重金属分布特征与污染源初步研究[J]. 中国地质, 2009, **36**(5): 1163-1174.
- [62] 余进祥, 刘娅菲, 尧娟. 江西省水稻优势产区重金属污染及累积规律[J]. 江西农业学报, 2008, **20**(12): 57-60.
- [63] 张丽红, 徐慧珍, 于青春, 等. 河北清苑县及周边农田土壤及农作物中重金属污染状况与分析评价[J]. 农业环境科学学报, 2010, **29**(11): 2139-2146.
- [64] 王元仲, 李冬梅, 高云凤. 河北省优势小麦产区土壤重金属污染水平调查研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, **24**(增刊): 192-195.
- [65] 张忠信, 汤丰收, 张新友, 等. 河南省花生产区土壤重金属含量分析[J]. 河南农业科学, 2011, **40**(12): 91-92.
- [66] 林晓峰, 胡恭任, 于瑞莲, 等. 泉州市主要工业区土壤重金属健康风险评价[J]. 有色金属, 2011, **63**(2): 297-301.
- [67] 李瑞平, 郝英华, 李光德, 等. 泰安市农田土壤重金属污染特征及来源解析[J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(10): 2012-2017.
- [68] 郑国璋, 岳乐平. 洛川苹果园地土壤重金属污染调查与评价[J]. 土壤通报, 2008, **39**(2): 402-405.
- [69] 周惜时, 秦普丰, 李学初, 等. 洞庭湖平原区耕地环境质量初步评价[J]. 环境科学与技术, 2007, **30**(6): 55-56.
- [70] 李永进, 汤玉喜, 唐洁, 等. 洞庭湖滩地重金属分布及其生态风险评价[J]. 中南林业科技大学学报(自然科学版), 2011, **31**(2): 55-59.
- [71] 王月容, 卢琦, 周金星, 等. 洞庭湖退田还湖区不同土地利用方式下土壤重金属分布特征[J]. 华中农业大学学报, 2011, **30**(6): 734-739.
- [72] 朱维晃, 杨元根, 毕华, 等. 海南土壤中 Zn、Pb、Cu、Cd 四种重金属含量及其生物有效性的研究[J]. 矿物学报, 2004, **24**(3): 239-244.
- [73] 李晨晨, 赵广孺, 赵志忠, 等. 海南岛东西部砖红壤中重金属元素含量空间分布特征及其相关性研究[J]. 安徽农业科学, 2011, **39**(2): 1085-1088.
- [74] 王鹏, 赵志忠, 王军广, 等. 海南岛砖红壤重金属污染特征及其风险评价[J]. 江苏农业科学, 2011, **39**(5): 461-463.
- [75] 王鹏, 赵志忠, 王军广, 等. 海南岛西南干旱区土壤中重金属元素的空间分布特征[J]. 江苏农业科学, 2011, **39**(6): 558-560.
- [76] 王红娟, 龚自明, 高士伟, 等. 湖北省典型茶园土壤重金属污染状况及评价[J]. 中国茶叶, 2009, **31**(2): 30-31.
- [77] 陈江, 张海燕, 何小峰, 等. 湖州市土壤重金属元素分布及潜在生态风险评价[J]. 土壤, 2010, **42**(4): 595-599.
- [78] 孙宏飞, 李永华, 姬艳芳, 等. 湘西汞矿区土壤中重金属的空间分布特征及其生态环境意义[J]. 环境科学, 2009, **30**(4): 1159-1165.
- [79] 程远杰, 丁永生, 宿鹏浩, 等. 滨海地区土壤重金属 Cr、Cu、Pb 和 Zn 的状况[J]. 上海海事大学学报, 2011, **32**(2): 83-86.
- [80] 杨杰, 陈江华, 曹仕明, 等. 环神农架地区植烟土壤重金属评价及其富集特征[J]. 中国烟草学报, 2009, **15**(1): 31-34.
- [81] 崔晓峰, 李淑仪, 丁效东, 等. 珠江三角洲地区典型菜地土壤与蔬菜重金属分布特征研究[J]. 生态环境学报, 2012, **21**(1): 130-135.
- [82] 李裕, 张强, 勾昕, 等. 甘肃中部灌溉与雨养农业土壤中的重金属污染与来源[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2011, **47**(6): 56-61.
- [83] 崔邢涛, 栾文楼, 郭海全, 等. 石家庄城市土壤重金属污染及潜在生态危害评价[J]. 现代地质, 2011, **25**(1): 169-175.
- [84] 刘安娜, 葛本伟. 石河子市表层土壤重金属元素富集与功能区差异研究[J]. 安徽农业科学, 2011, **39**(32): 19818-19821.
- [85] 王丽, 王力, 和文祥, 等. 神木煤矿区土壤重金属污染特征研究[J]. 生态环境学报, 2011, **20**(8): 1343-1347.
- [86] 许静, 陈永快, 邹晖. 福建省不同区域土壤、蔬菜重金属污染现状分析[J]. 福建农业学报, 2011, **26**(4): 646-651.
- [87] 阎伍玖. 芜湖市城市郊区土壤重金属污染的初步研究[J]. 环境科学学报, 1999, **19**(3): 339-341.
- [88] 沈建伟, 徐加宽, 刘建国, 等. 苏州市农田土壤重金属污染状况研究[J]. 环境科学与技术, 2010, **33**(12F): 87-89.
- [89] 郑娜, 王起超, 刘景双, 等. 葫芦岛市土壤、蔬菜重金属污染空间变化规律[J]. 环境科学, 2009, **30**(7): 2071-2076.
- [90] 贾锐鱼, 杨索, 林有红. 西安市南、北郊土壤重金属含量及对小青菜影响对比[J]. 安徽农业科学, 2011, **39**(20): 12164-12165.
- [91] 邵学新, 吴明, 蒋科毅. 西溪湿地土壤重金属分布特征及其生态风险评价[J]. 湿地科学, 2007, **5**(3): 253-259.
- [92] 魏婷婷, 张龙冲, 朵海瑞, 等. 豫北地区土壤重金属污染现状与潜在生态风险分析[J]. 河南农业大学学报, 2010, **44**(4): 471-475.
- [93] 刘凯. 贵定县茶园土壤中重金属元素含量及污染评价[J]. 贵州农业科学, 2012, **40**(1): 101-103.
- [94] 张一修, 王济, 张浩. 贵阳城区土壤重金属的空间分布特征及污染评价[J]. 贵州师范大学学报: 自然科学版, 2011, **29**(4): 20-25.
- [95] 杨磊, 万红友. 郑州市城郊菜地土壤重金属环境质量评价[J]. 河南农业科学, 2011, **40**(12): 84-87.
- [96] 杨克燕, 熊伟, 罗阳, 等. 都江堰市城区周边农田土壤重金属污染状况分析与评价[J]. 中国环境监测, 2011, **27**(5): 10-16.
- [97] 王再岚, 何江, 刘玉虹, 等. 鄂尔多斯地区公路两侧土壤重金属污染特征[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2006, **30**(2): 15-19.
- [98] 徐畅, 高明, 谢德体, 等. 重庆市植烟土壤重金属含量特征及污染评价[J]. 水土保持学报, 2009, **23**(4): 141-145.
- [99] 张运强, 毛德玲. 金华富硒区菜地土壤重金属污染程度模糊综合评判[J]. 湖南农业科学, 2012, **42**(1): 47-49.

- [100] 胡小娜, 南忠仁, 刘晓文, 等. 金昌城市居民区土壤重金属分布特征研究[J]. 干旱区资源与环境, 2011, **25**(1): 180-184.
- [101] 晋王强, 南忠仁, 刘晓文, 等. 金昌市郊农田土壤 Cu, Zn, Ni 形态分布特征与生物有效性评价[J]. 环境化学, 2010, **29**(2): 220-225.
- [102] 陈沛云, 冯秀娟. 钨尾矿农田重金属空间分布特征研究[J]. 安徽农业科学, 2011, **39**(23): 14039-14040.
- [103] 惠勇, 张凤美, 王友保, 等. 铜陵市凤凰山尾矿区重金属污染研究[J]. 安徽农业科学, 2011, **39**(23): 14268-14269.
- [104] 贺婧, 钟艳霞. 银川市不同耕种年限设施蔬菜土壤重金属含量变化研究[J]. 北京农业(下旬刊), 2011, (30): 136-137.
- [105] 郑娜, 王起超, 郑冬梅. 锌冶炼厂周围重金属在土壤-蔬菜系统中的迁移特征[J]. 环境科学, 2007, **28**(6): 1349-1354.
- [106] 杨忠平, 卢文喜, 刘新荣, 等. 长春市城区表层土壤重金属污染来源解析[J]. 城市环境与城市生态, 2009, **22**(5): 29-33.
- [107] 马成玲, 王火焰, 周健民, 等. 长江三角洲典型县级市农田土壤重金属污染状况调查与评价[J]. 农业环境科学学报, 2006, **25**(3): 751-755.
- [108] 钟晓兰, 周生路, 李江涛, 等. 长江三角洲地区土壤重金属污染的空间变异特征——以江苏省太仓市为例[J]. 土壤学报, 2007, **44**(1): 33-40.
- [109] 夏浩东, 息朝庄, 戴塔根, 等. 长沙市公园土壤重金属调查与评价[J]. 广东微量元素科学, 2009, **16**(10): 44-49.
- [110] 许光, 章巧秋, 姬丙艳, 等. 青海民和—海石湾一带土壤重金属异常生态效应评价[J]. 现代地质, 2011, **25**(5): 1007-1012.
- [111] 陈同斌, 黄铭洪. 香港土壤中的重金属含量及其污染现状[J]. 地理学报, 1997, **52**(3): 228-236.
- [112] 刘云霞, 庞奖励, 丁敏, 等. 黄土高原长期苹果园地土壤重金属分布和评价[J]. 中国农业气象, 2010, **31**(1): 32-36.
- [113] 孙晶, 郝文博, 朱明霞, 等. 黑河市张地营子乡土壤重金属污染综合评价[J]. 安徽农业科学, 2010, **38**(29): 16308-16309, 16342.
- [114] 魏丹, 迟凤琴, 史文娇, 等. 黑龙江南部黑土区土壤重金属空间分异规律研究[J]. 农业系统科学与综合研究, 2007, **23**(1): 65-68.
- [115] 金成俊, 金明姬, 元灿熙, 等. 龙井市近郊农田土壤重金属污染评价[J]. 安徽农业科学, 2011, **39**(33): 20433-20434.
- [116] 陈秀端. 中国城市土壤重金属空间分布与污染研究[J]. 环境科学与技术, 2011, **32**(12H): 60-65.
- [117] Wei B G, Yang L S. A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China [J]. Microchemical Journal, 2010, **94**(2): 99-107.
- [118] Xu D C, Zhou P, Zhan J, *et al.* Assessment of trace metal bioavailability in garden soils and health risks via consumption of vegetables in the vicinity of Tongling mining area, China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2013, **90**(4): 103-111.
- [119] Dou Y G, Li J, Zhao J T, *et al.* Distribution, enrichment and source of heavy metals in surface sediments of the eastern Beibu Bay, South China Sea [J]. Marine Pollution Bulletin, 2013, **67**(1-2): 137-145.
- [120] Bi X Y, Feng X B, Yang Y G, *et al.* Environmental contamination of heavy metals from zinc smelting areas in Hezhang County, western Guizhou, China [J]. Environment International, 2006, **32**(7): 883-890.
- [121] Zhuang P, McBride M B, Xia H P, *et al.* Health risk from heavy metals via consumption of food crops in the vicinity of Dabaoshan mine, South China [J]. Science of the Total Environment, 2009, **407**(5): 1551-1561.
- [122] Khan S, Cao Q, Zheng Y M, *et al.* Health risks of heavy metals in contaminated soils and food crops irrigated with wastewater in Beijing, China [J]. Environmental Pollution, 2008, **152**(3): 686-692.
- [123] Wang X L, Sato T, Xing B S, *et al.* Health risks of heavy metals to the general public in Tianjin, China via consumption of vegetables and fish [J]. Science of the Total Environment, 2005, **350**(1-3): 28-37.
- [124] Li M S, Luo Y P, Su Z Y. Heavy metal concentrations in soils and plant accumulation in a restored manganese mine land in Guangxi, South China [J]. Environmental Pollution, 2007, **147**(1): 168-175.
- [125] Li Y, Gou X, Wang G, *et al.* Heavy metal contamination and source in arid agricultural soil in central Gansu Province, China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2008, **20**(5): 607-612.
- [126] Cheng S P. Heavy metal pollution in China: Origin, pattern and control [J]. Environment Science and Pollution Research, 2003, **10**(3): 192-198.
- [127] Chen T, Liu X M, Li X, *et al.* Heavy metal sources identification and sampling uncertainty analysis in a field-scale vegetable soil of Hangzhou, China [J]. Environmental Pollution, 2009, **157**(3): 1003-1010.
- [128] Hao X Z, Zhou D M, Huang D Q, *et al.* Heavy metal transfer from soil to vegetable in Southern Jiangsu Province, China [J]. Pedosphere, 2009, **19**(3): 305-311.
- [129] Zhang X Y, Lin F F, Mike T F Wong, *et al.* Identification of soil heavy metal sources from anthropogenic activities and pollution assessment of Fuyang County, China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, **154**(1-4): 439-449.
- [130] Liu W H, Zhao J Z, Quyang Z Y, *et al.* Impacts of sewage irrigation on heavy metal distribution and contamination in Beijing, China [J]. Environment International, 2005, **31**(6): 805-812.
- [131] Wang Q Y, Zhou D M, Cang L, *et al.* Indication of soil heavy metal pollution with earthworms and soil microbial biomass carbon in the vicinity of an abandoned copper mine in Eastern Nanjing, China [J]. European Journal of Soil Biology, 2009,

- 45**(3): 229-234.
- [132] Hu J L, Wu F Y, Wu S C, *et al.* Phytoavailability and phytovariety codetermine the bioaccumulation risk of heavy metal from soils, focusing on Cd-contaminated vegetable farms around the Pearl River Delta, China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2013, **91**(5): 18-24.
- [133] Zhu Z M, Li Z G, Bi X Y, *et al.* Response of magnetic properties to heavy metal pollution in dust from three industrial cities in China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, **246**(2): 189-198.
- [134] Li P J, Wang X, Allison G, *et al.* Risk assessment of heavy metals in soil previously irrigated with industrial wastewater in Shenyang, China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **19**(1): 516-521.
- [135] Shen G Q, Lu Y T, Wang M N, *et al.* Status and fuzzy comprehensive assessment of combined heavy metal and organochlorine pesticide pollution in the Taihu Lake region of China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2005, **76**(4): 355-362.
- [136] Niu L L, Yang F X, Xu C, *et al.* Status of metal accumulation in farmland soils across China: From distribution to risk assessment [J]. *Environmental Pollution*, 2013, **176**: 55-62.
- [137] Huang S S, Liao Q L, Hua M, *et al.* Survey of heavy metal pollution and assessment of agricultural soil in Yangzhong district, Jiangsu Province, China [J]. *Chemosphere*, 2007, **67**(11): 2148-2155.
- [138] 刘元生, 何腾兵, 罗海波, 等. 贵阳市乌当区耕地土壤重金属污染现状及其评价[J]. *重庆环境科学*, 2003, **25**(10): 42-45, 93.
- [139] 张勇. 沈阳郊区土壤及农产品重金属污染的现状评价[J]. *土壤通报*, 2001, **32**(4): 182-186.
- [140] 陈同斌, 黄铭洪, 黄焕忠, 等. 香港土壤中的重金属含量及其污染现状[J]. *地理学报*, 1997, **52**(3): 38-46.
- [141] 国家环境保护局, 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 331-379.
- [142] 赵丽娟. 重庆都市经济圈土壤八种重金属元素的背景值特征和分布规律[D]. 成都: 成都理工大学, 2008.

CONTENTS

Form of the Particulate Matter Ambient Air Standards in China	WANG Shuai, DING Jun-nan, WANG Rui-bin, <i>et al.</i> (401)
Seasonal Variation of Carcinogenic Heavy Metals in PM _{2.5} and Source Analysis in Beijing	TAO Jun, ZHANG Ren-jian, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (411)
Temporal and Spatial Distribution of PM _{2.5} and PM ₁₀ Pollution Status and the Correlation of Particulate Matters and Meteorological Factors During Winter and Spring in Beijing	ZHAO Chen-xi, WANG Yun-qi, WANG Yu-jie, <i>et al.</i> (418)
Inversion and Spatial-Temporal Distribution Analysis on PM _{5.0} Inhalable Particulate in Beijing	WANG Yan-hui, XIAO Yao (428)
Characterization of Ultrafine Particle Size Distribution in the Urban Atmosphere of Hangzhou in Spring	XIE Xiao-fang, SUN Zai, YANG Wen-jun (436)
Size Distributions of Aerosol During the Spring Festival in Nanjing	WANG Hong-lei, ZHU Bin, SHEN Li-juan, <i>et al.</i> (442)
Size Distributions of Organic Carbon and Elemental Carbon in Nanjing Aerosol Particles	WU Meng-long, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (451)
Characterization of Organic and Elemental Carbon in PM ₁₀ in Xinzhou City	SHI Mei-xian, PENG Lin, LIU Xiao-feng, <i>et al.</i> (458)
Seasonal Variation of Concentrations and Distribution Characteristics of PCDD/Fs in Atmosphere of an Industrial Area, Guangzhou	QING Xian, SU Yuan, SU Qing, <i>et al.</i> (464)
Hazard Evaluation Modeling of Particulate Matters Emitted by Coal-Fired Boilers and Case Analysis	SHI Yan-ting, DU Qian, GAO Jian-min, <i>et al.</i> (470)
Chemical Characteristics of Precipitation in South China Sea	XIAO Hong-wei, LONG Ai-min, XIE Lu-hua, <i>et al.</i> (475)
Analysis of Acid Rain Characteristics of Lin'an Regional Background Station Using Long-term Observation Data	LI Zheng-quan, MA Hao, MAO Yu-ding, <i>et al.</i> (481)
Characteristics of Atmospheric Nitrogen Wet Deposition in Beijing Urban Area	HE Cheng-wu, REN Yu-fen, WANG Xiao-ke, <i>et al.</i> (490)
Studies of Ozone Formation Potentials for Benzene and Ethylbenzene Using a Smog Chamber and Model Simulation	JIA Long, XU Yong-fu (495)
Characteristics of Fly Ash Particles Deposition in the Snowpack of Laohugou Glacier No. 12 in Western Qilian Mountains, China	DONG Zhi-wen, QIN Da-he, QIN Xiang, <i>et al.</i> (504)
Odor Emission Rate of Municipal Solid Waste from Landfill Working Area	QIANG Ning, WANG Hong-yu, ZHAO Ai-hua, <i>et al.</i> (513)
Gaseous Phenol Removal in a Bio-Trickling Filter	HE Jue-cong, HUANG Qian-ru, CHEN Zhou-yang, <i>et al.</i> (520)
Particulate Distribution Characteristics of Chinese Phrase V Diesel Engine Based on Butanol-Diesel Blends	LOU Di-ming, XU Ning, FAN Wen-jia, <i>et al.</i> (526)
Effects of Turning Frequency on Emission of Greenhouse Gas and Ammonia During Swine Manure Windrow Composting	ZHAO Chen-yang, LI Hong-mei, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (533)
Oxidation of Mercury by CuBr ₂ Decomposition Under Controlled-Release Membrane Catalysis Condition	HU Lin-gang, QU Zan, YAN Nai-qiang, <i>et al.</i> (541)
Distributions and Influencing Factors of Total Dissolved Inorganic Antimony in the Coastal Area of Zhejiang and Fujian	ZHANG Xu-zhou, REN Jing-ling, LIU Zong-guang, <i>et al.</i> (547)
Calculation of Allowable Pollution Loads for Lake and Reservoir Based on Bi-direction Algorithm and Its Case Study	JIA Hai-feng, GUO Yu (555)
Risk Assessment of Quaternary Groundwater Contamination in Beijing Plain	GUO Gao-xuan, LI Yu, XU Liang, <i>et al.</i> (562)
Mixing Behavior of Nutrients in Different Seasons at Liaohe Estuary	ZHANG Jin-hua, YU Li-xia, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (569)
Distribution of Nitrogen in the Sediment of Taige South River Estuary	MA Jiu-yuan, WANG Guo-xiang, LI Zhen-guo, <i>et al.</i> (577)
Selection and Purification Potential Evaluation of Woody Plant in Vertical Flow Constructed Wetlands in the Subtropical Area	CHEN Yong-hua, WU Xiao-fu, HAO Jun, <i>et al.</i> (585)
Correlation of Substrate Structure and Hydraulic Characteristics in Subsurface Flow Constructed Wetlands	BAI Shao-yuan, SONG Zhi-xin, DING Yan-li, <i>et al.</i> (592)
Impacts of <i>Eichhornia crassipes</i> (Mart.) Solms Stress on the Growth Characteristics, Microcystins and Nutrients Release of <i>Microcystis aeruginosa</i>	ZHOU Qing, HAN Shi-qun, YAN Shao-hua, <i>et al.</i> (597)
Effects of Different Pre-oxidants on DBPs Formation Potential by Chlorination and Chloramination of Yangtze River Raw Water	TIAN Fu-xiang, XU Bin, RONG Rong, <i>et al.</i> (605)
Adsorption of Phenanthrene from Aqueous Solution on Cetylpyridinium Bromide (CPB)-Modified Zeolite	LI Jia, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (611)
Characteristics and Selectivity of Photocatalytic-Degradation of Tetracycline Hydrochloride	SONG Chen-yi, YIN Da-qiang (619)
Characterization of Biocatalysed Sulfate Reduction in a Cathode of Microbial Electrolysis System	FU Shi-yu, LIU Guang-li, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (626)
Characteristics of Dissolved Organic Matter in A/DAT-IAT System for Municipal Wastewater Treatment Based on Ecological Safety	YANG Sai, ZHOU Qi-xing, HUA Tao (633)
Membrane Surface Fouling Properties in MBRs for High-Salinity Wastewater Treatment	LI Bin, WANG Zhi-wei, AN Ying, <i>et al.</i> (643)
Treatment of Petrochemical Secondary Effluent by Ozone-biological Aerated Filter	LIU Ming-guo, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (651)
Treatment of Pectin Wastewater by Anaerobic Biological Process	CHEN Bing-bing, YANG Chun-ping, LI Xiang, <i>et al.</i> (657)
Sorption Mechanism of Ofloxacin by Carbon Nanotubes	ZHAO Xing-xing, YU Shui-li, WANG Zhe (663)
Biosorption Characteristics of Cu ²⁺ by Spent Substrate of <i>Pleurotus</i> Oyster	HU Xiao-jing, ZANG Ting-ting, GU Hai-dong, <i>et al.</i> (669)
Adsorption Dynamics and Breakthrough Characteristics Based on the Fluidization Condition	WANG Jun, WANG Yao, HUANG Xing, <i>et al.</i> (678)
Characteristics of Speciation and Evaluation of Ecological Risk of Heavy Metals in Sewage Sludge of Guangzhou	GUO Peng-ran, LEI Yong-qian, CAI Da-chuan, <i>et al.</i> (684)
Spatial Distribution and Accumulation of Heavy Metal in Arable Land Soil of China	ZHANG Xiao-min, ZHANG Xiu-ying, ZHONG Tai-yang, <i>et al.</i> (692)
Pollution Patterns and Health Risk Assessment for Polychlorinated Biphenyls in Soils from a Capacitor Storage Site	ZHOU Ling-li, WU Guang-long, XUE Nan-dong, <i>et al.</i> (704)
Occurrence and Spatial Differentiation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Shenzhen, China	ZHANG Di, CAO Shan-ping, SUN Jian-lin, <i>et al.</i> (711)
Risk Assessment and Countermeasures of Heavy Metals Pollution in Wanquan Segment of Yanghe River	TAN Bing, WANG Tie-yu, ZHU Zhao-yun, <i>et al.</i> (719)
Effects of Group Matching Curing Agent on Exchangeable Pb, Cd, Zn Contents in the Potted Soils and their Accumulation in Rice Plants	ZENG Hui, ZHOU Hang, QIU Qiong-yao, <i>et al.</i> (727)
Impact of Compound Chelants on Removal of Heavy Metals and Characteristics of Morphologic Change in Soil from Heavy Metals Contaminated Sites	YIN Xue, CHEN Jia-jun, LÜ Ce (733)
Characterization of Manganese Oxidation by <i>Pseudomonas</i> sp. QJX-1	ZHOU Na-na, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (740)
Effects of the Ratio of NO ₃ ⁻ -N to NO ₂ ⁻ -N on the Removal of Sulfide and Nitrogen by Mixed Culture and Pure Culture	CHEN Zi-ai, CHEN Hui-juan, WEI Ben-ping, <i>et al.</i> (746)
Carbon Metabolic Characteristics of Airborne Microbes in Hangzhou	GONG Chan-juan, XU Jing, FANG Zhi-guo, <i>et al.</i> (753)
Study on the Backward Extraction of Cellulase in Rhammopolipid Reverse Micelles	ZHAO Yan-ge, YUAN Xing-zhong, HUANG Hua-jun, <i>et al.</i> (759)
Inner- and Inter-Species Differences of Mercury Concentration in Common Fishes from the Yellow Sea	ZHU Ai-jia, XU Zhan-zhou, LIU Gui-ze, <i>et al.</i> (764)
Study on the Effect of Enzymatic Activity and Acute Toxicity of Three PAEs on <i>Eisenia foetida</i>	WANG Yan, MA Ze-min, WU Shi-jin (770)
Environmental Safety Assessment on the New Super Absorbent Polymers Applied into a Soil-Chinese Cabbage System	LI Xi, HE Ji-zheng, ZHENG Yuan-ming, <i>et al.</i> (780)
Study on Dynamics of Hydrogen Sulfide and Carbonyl Sulfide Emission Fluxes from <i>Suaeda salsa</i> Marsh in the Yellow River Estuary	LI Xin-hua, GUO Hong-hai, YANG Li-ping, <i>et al.</i> (786)
Key Microbial Processes in Nitrous Oxide Emissions of Agricultural Soil and Mitigation Strategies	ZHU Yong-guan, WANG Xiao-hui, YANG Xiao-ru, <i>et al.</i> (792)

《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)

2014年2月15日 35卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 2 Feb. 15, 2014

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行