

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第5期

Vol.34 No.5

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于过氧化物的消毒技术研究进展	习海玲, 赵三平, 周文 (1645)
环境损害评估: 国际制度及对中国的启示	张红振, 曹东, 於方, 王金南, 齐霖, 贾倩, 张天柱, 骆永明 (1653)
不同国家基于健康风险的土壤环境基准比较研究与启示	徐猛, 颜增光, 贺萌萌, 张超艳, 侯红, 李发生 (1667)
蚯蚓堆肥及蝇蛆生物转化技术在有机废弃物处理应用中的研究进展	张志剑, 刘萌, 朱军 (1679)
基于生态分区的我国湖泊营养盐控制目标研究	刁晓君, 席北斗, 何连生, 邓祥征, 吴锋, 王鹏腾 (1687)
我国东北地区地表水酸化现状	徐光仪, 康荣华, 罗遥, 段雷 (1695)
西安市对渭河水质的影响分析	于婕, 李怀恩 (1700)
极端干旱水文年(2011年)夏季珠江口溶解氧的分布特征及影响因素研究	叶丰, 黄小平, 施震, 刘庆霞 (1707)
应用相平衡分配法建立湘江衡阳段沉积物重金属质量基准	韩超南, 秦延文, 郑丙辉, 张雷, 曹伟 (1715)
长江口海域底栖生态环境质量评价——AMBI和M-AMBI法	蔡文倩, 孟伟, 刘录三, 朱延忠, 周娟 (1725)
温州城市降雨径流中 BOD ₅ 和 COD 污染特征及其初始冲刷效应	王骏, 毕春娟, 陈振楼, 周栋 (1735)
影响悬浮颗粒物吸收系数测量的相关因素研究	余小龙, 沈芳, 张晋芳 (1745)
香溪河库湾春季 pCO ₂ 与浮游植物生物量的关系	袁希功, 黄文敏, 毕永红, 胡征宇, 赵玮, 朱孔贤 (1754)
紊流脉动强度对藻类生长及水环境的影响研究	雷雨, 龙天渝, 伞磊, 安强, 黄宁秋 (1761)
高铁酸钾对水中藻类及其次生臭味污染物二甲基三硫醚同步去除研究	马晓雁, 张泽华, 王红宇, 胡仕斐, 李青松 (1767)
纳米 Fe ₃ O ₄ -H ₂ O ₂ 非均相 Fenton 反应催化氧化邻苯二酚	何洁, 杨晓芳, 张伟军, 王东升 (1773)
水中茶普生的紫外光降解机制及其产物毒性研究	马杜娟, 刘国光, 吕文英, 姚锐, 周丽华, 谢成屏 (1782)
酸活化赤泥催化臭氧氧化降解水中硝基苯的效能研究	康雅凝, 李华楠, 徐冰冰, 齐飞, 赵伦 (1790)
镉污染应急处置含镉絮体稳定性实验研究	柳玉荣, 魏清伟, 杨仁斌, 许振成, 曾东 (1797)
基于光学在线监测及形态学研究的絮凝体强度分析方法	金鹏康, 冯永宁, 王宝宝, 王晓昌 (1802)
不同电子供体下三氯苯酚的还原脱氯机制研究	万金泉, 胡梦蝶, 马邕文, 黄明智 (1808)
壳聚糖季铵盐磁性颗粒的制备及其对甲基橙的吸附效果	张璐璐, 胡筱敏, 英诗颖, 王芳 (1815)
城市污水二级出水超滤膜污染与膜特性的研究	孟晓荣, 张海珍, 王磊, 王旭东, 赵亮 (1822)
倒置 A ² /O- MBR 处理城市污水的中试研究	张健君, 邹高龙, 杨淑芳, 丁星, 王莉, 毛乾庄, 杨丹 (1828)
不同电子供体的硫自养反硝化脱氮实验研究	袁莹, 周伟丽, 王晖, 何圣兵 (1835)
短程同步硝化反硝化过程的脱氮与 N ₂ O 释放特性	梁小玲, 李平, 吴锦华, 王向德 (1845)
基于固相萃取的水中多种有毒有害有机污染物富集方法优化	张明全, 李锋民, 吴乾元, 胡洪营 (1851)
多环麝香污染胁迫对蚯蚓特异性蛋白基因表达的影响	陈春, 刘潇威, 郑顺安, 周启星, 李松 (1857)
浙江省制药行业典型挥发性有机物臭氧产生潜力分析及健康风险评价	徐志荣, 王浙明, 许明珠, 何华飞 (1864)
苯系物光催化开环降解产物低级醛类的健康效应	赵伟荣, 廖求文, 杨亚楠, 戴九松 (1871)
四川妇女血清中多溴联苯醚的浓度水平与组成特征	邵敏, 陈永亨, 李晓宇 (1877)
咪唑类离子液体毒性的 QSAR/QSPR 研究	赵继红, 赵永升, 张宏忠, 张香平 (1882)
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	樊新刚, 米文宝, 马振宁, 王婷玉 (1887)
内蒙古包头白云鄂博矿区及尾矿区周围土壤稀土污染现状和分布特征	郭伟, 付瑞英, 赵仁鑫, 赵文静, 郭江源, 张君 (1895)
福建省重点城市路面尘负荷及化学组成研究	郑桢, 杨冰玉, 吴水平, 王新红, 陈晓秋 (1901)
重金属污染场地电阻率法探测数值模拟及应用研究	王玉玲, 能昌信, 王彦文, 董路 (1908)
丛枝菌根真菌对稀土尾矿中大豆生长和稀土元素吸收的影响	郭伟, 赵仁鑫, 赵文静, 付瑞英, 郭江源, 张君 (1915)
海洋细菌 N3 对几种赤潮藻的溶藻效应	史荣君, 黄洪辉, 齐占会, 胡维安, 田梓杨, 戴明 (1922)
1株分离自煤矿废水的铁硫氧化细菌 LY01 的鉴定及其氧化特性研究	刘玉娇, 杨新萍, 王世梅, 梁银 (1930)
1株苯并[a]芘高效降解菌的筛选与降解特性	蔡瀚, 尹华, 叶锦韶, 常晶晶, 彭辉, 张娜, 何宝燕 (1937)
2,2',4,4'-四溴联苯醚的好氧微生物降解	张姝, Giulio Franco, 李晓豹, 卢晓霞, 侯珍, 杨君君 (1945)
养猪废水培养微生物絮凝剂产生菌群 B-737 及发酵特性	裴瑞林, 信欣, 张雪乔, 周迎芹, 姚力, 羊依金 (1951)
1997~2011年北京市空气中酸性物质与降水组分变化趋势的相关性分析	陈圆圆, 田贺忠, 杨懂艳, 邹本东, 鹿海峰, 林安国 (1958)
黄山降水酸度及电导率特征分析	石春娥, 邓学良, 吴必文, 洪杰, 张苏, 杨元建 (1964)
夏季黄山不同高度大气气溶胶水溶性离子特征分析	文彬, 银燕, 秦彦硕, 陈魁 (1973)
广州秋季灰霾污染过程大气颗粒物有机酸的污染特征	谭吉华, 赵金平, 段菁春, 马永亮, 贺克斌, 杨复沫 (1982)
福建省三大城市冬季 PM _{2.5} 中有机碳和元素碳的污染特征	陈衍婷, 陈进生, 胡恭任, 徐玲玲, 尹丽倩, 张福旺 (1988)
上海市含碳大气颗粒物的粒径分布	袁宁, 刘卫, 赵修良, 王广华, 姚剑, 曾友石, 刘遂庆 (1995)
上海市浦东城区二次气溶胶生成的估算	崔虎雄, 吴迺名, 段玉森, 伏晴艳, 张懿华, 王东方, 王茜 (2003)
沙尘暴期间上海市大气颗粒物元素地球化学特征及其物源示踪意义	钱鹏, 郑祥民, 周立旻 (2010)
厦门秋季近郊地面 CO ₂ 浓度变化特征研究	李燕丽, 穆超, 邓君俊, 赵淑惠, 杜可 (2018)
GC-MS 和 GC-ECD 同时在线观测本底大气中的 HCFC-142b	郭立峰, 姚波, 周凌晔, 李培昌, 许林 (2025)
城市居家环境空气真菌群落结构特征研究	方治国, 欧阳志云, 刘芃, 孙力, 王小勇 (2031)
城市污水处理厂挥发性芳香烃的气味指纹及定量评价研究	郭薇, 王伯光, 唐小东, 刘舒乐, 何洁, 张春林 (2038)
内河多点分散码头大气污染叠加影响特征	刘建昌, 李兴华, 徐洪磊, 程金香, 王忠岱, 肖杨 (2044)
义马煤中铅的热稳定性及转化行为研究	刘瑞卿, 王钧伟 (2051)
基于能源消费情景模拟的北京市主要大气污染物和温室气体协同减排研究	谢元博, 李巍 (2057)
《环境科学》征订启事(1652) 《环境科学》征稿简则(1789) 信息(1807, 1821, 1881, 1987) 专辑征稿通知(1863)	

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

樊新刚^{1,2}, 米文宝^{3*}, 马振宁³, 王婷玉³

(1. 宁夏大学农学院, 银川 750021; 2. 宁夏大学科学技术处, 银川 750021; 3. 宁夏大学资源环境学院, 银川 750021)

摘要: 为研究西北地区工业区土壤重金属空间分布及时间变化的区域特征, 以宁夏石嘴山河滨工业园区西北端面积为 1.74 hm² 的区域为研究区, 采集表层土壤样品 96 个, 利用原子吸收分光光度计测定 Cu、Zn、Pb、Cr、Cd 含量, SPSS 16.0 软件做描述性统计和相关分析, 资料对比法结合 Google earth 卫星地图分析含量的时空格局变化对应性。在 GS + 3.0 软件理论拟合基础上, 利用 ArcGIS 9.0 软件进行克里格插值, 分析空间分布特征及可能的污染源。结果表明, Zn、Cu、Cr、Pb、Cd 的平均含量分别为 100.29、352.86、77.56、50.52、4.06 mg·kg⁻¹, 均高于宁夏土壤背景值。Zn、Cr、Pb 为非污染, Cu、Cd 属轻度污染和重度污染。Zn、Cu、Cr、Pb、Cd 含量较 1985 年该地区水平增加明显, 均从西北向东南增加并局部呈岛状空间分布。土壤中 Cu、Cr、Zn、Pb、Cd 的含量变化与 2009 年后该园区企业数量迅速增加及周边另一内蒙古高耗能工业园区的工业燃煤烟尘排放密切相关, 空间格局主要由主导的西北强风控制、影响范围大, 局地地形和企业分布格局是岛状分布的主要因素。

关键词: 工业园区; 表层土壤; 重金属污染; 时空特征; 石嘴山

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)05-1887-08

Spatial and Temporal Characteristics of Heavy Metal Concentration of Surface Soil in Hebin Industrial Park in Shizuishan Northwest China

FAN Xin-gang^{1,2}, MI Wen-bao³, MA Zhen-ning³, WANG Ting-yu³

(1. College of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Department of Science and Technology, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 3. College of Resources and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: Concentrations of Zn, Cu, Cr, Pb and Cd in 96 topsoil samples collected from the northern Hebin Industrial Park were measured by the atomic absorption detector (AAD). Spatial variability was identified by geostatistical analysis with the aid of GS + 3.0 and ArcGIS 9.0. Temporal variability of five heavy metals was contrasted to the concentration in 1985 of the Ningxia second soil census. Google earth maps in years of 2003, 2004, 2009 and 2011 have been analyzed to find the variation of the geographical distribution of factories in study Area. Result showed that mean concentrations of Zn, Cu, Cr, Pb and Cd were 100.29, 352.86, 77.56, 50.52, 4.06 mg·kg⁻¹, respectively, and were all higher than the background values. Using the second level of environmental quality standard for soils of China as the criterion, Zn, Cr, Pb were not risk, Cu, Cd were mild contamination and serious contamination. Spatial distribution of the concentration of the five heavy metals varies with prevailing wind direction, from the northwest to southeast, increasing gradually. Meanwhile, there were several hotspots. Google earth map analysis showed that in the northeast and southeast part appeared a large number of factories after 2009, which should be the main sources of the five heavy metals in soils. In the low-lying southwest part, although there was no factory, soils still have been polluted heavily because of another adjacent industrial area in Inner Mongolia Autonomous Region and the smoke dust was blocked by the Helan Mountain along its west. Conclusions: ①The number of the enterprise increased and trans-boundary pollution led to the high heavy metal concentration in surface soil of study area; ②In northwest China, because of the strong wind, smoke dusts spread very long and distribution range was extensive, and low terrain area and enterprise distribution pattern lead to the island distribution.

Key words: industrial park; surface soil; heavy metal pollution; spatial and temporal characteristics; Shizuishan

土壤重金属污染具有显著的潜伏性、不可逆性和累积性及难去除性, 通过食物链积累、吸入扬尘、皮肤接触等途径毒害人类健康, 诱发癌症等致命疾病, 是国内外关注的研究热点^[1]。城市土壤主要重金属(如 Cd、Cu、Pb、Zn)含量与工业化程度密切相关^[2]。工业区集约化生产排放大量“三废”, 使重金属元素在土壤中局部富集, 与大气、水体、生物交互作用, 易引发环境危机, 是城市土壤污染的重要

来源之一。国内外对工业区周边土壤重金属污染进行了持续研究, 得出了如“岛状分布”、随距离辐射降低、单方向递减等空间格局规律, 以及排放积累

收稿日期: 2012-07-16; 修订日期: 2012-11-12

基金项目: 宁夏自然科学基金项目(NZ1016); 国家自然科学基金项目(41161020)

作者简介: 樊新刚(1978~), 男, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为区域生态环境, E-mail: fanxg@nxu.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: miwbao@nxu.edu.cn

量相关性和废弃“棕地”长期残留性等时间变化的结果^[3~8]。其中,多数研究以静态现状分析为主,由于土壤重金属具有显著的累积性,空间格局很大程度上由现在和过去的工业活动造成,要明确分布成因和来源应调查土壤污染历史^[9,10]。因此,应用含量测定、历史资料和多时段卫星图像对应分析方法,将空间格局与动态时间变化分析相结合,应更准确地揭示土壤重金属污染的分布规律和来源。

目前,我国土壤重金属污染的研究主要集中在辽中南、长三角和珠三角等东部湿润地区。对西北干旱内陆承接东部高污染企业集中区的研究仍处于起步阶段,引入的高耗能、高污染企业都严重威胁着西北干旱地区的脆弱生态环境,亟需引起重视^[11]。重金属空间格局差异的影响因素可能是交通运输、工业布局、污染物排放强度、空气运动、植被覆盖特征等^[3,12]。交通运输、工业布局、污染物排放强度是空间格局形成的共性因素,而西北地区植被覆盖率低,主导风向明显且风力强,降水量小,使重金属累积及空间格局与东部地区应存在差异。分析西北工业区土壤重金属空间及时间变化的区域特征,明确驱动因素,不仅可为当地政府和环保部门加强工业区的环境管理和治理提供依据,而且对我国土壤重金属污染的地区差异研究具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 河滨工业园区概况

河滨工业园区位于宁夏石嘴山市惠农区北部,以黄河为界,与内蒙古乌海市海南区邻接,东西宽约 1~6 km,南北长约 41 km,面积 120 km²,地势西南高、东北低,海拔高度 1 155~1 223 m。气候干燥多风,年降水量 180~190 mm、蒸发量 1 700~2 500 mm,年大风(瞬间风速达到或大于 17 m·s⁻¹)天气数 42 d;属荒漠草原景观,土壤主要为灰漠土,质地偏沙偏碱;1992 年创建,截至 2011 年,有煤、电、钢材、碳化硅、硅铁、电石、水泥、PVC 树脂、活性炭等高耗能、高污染企业 300 多家,三废排放量大,在国家重点监控的“宁蒙交界区高污染”区范围之内。

1.2 样品采集与测定

选择河滨工业园区上风向西北,范围为 1.74 hm² 的区域作为研究区,最北点经纬度坐标为 (39°19'30"N, 106°44'30"E)、最南点经纬度坐标为 (39°17'0"N, 106°44'30"E)、最东点经纬度坐标为

(39°18'15"N, 106°43'25"E)、最西点经纬度坐标为 (39°18'15"N, 106°45'40"E)。区内企业分布密集紧凑,阻挡物和道路数量较多,使网格采样变形。按照道路分布方向,保持 100 m 距离道路,采用同心圆状,分别在正东、东南、正南、西南、正西、西北、正北、东北 8 个方向,以 200 m 为步长(个别样品受地物影响,步长有一定变动),各向以 2.4 km 为总长,用 GPS 定位,共选择 96 个样点。在每一采样点的表层土壤(0~20 cm)用梅花形,采 5 个样组成 1 个混合样品,四分法得到分析样品约 2 kg,共采集到 96 个混合样品(图 1)。样品经自然风干,挑除石砾和植物残体,研磨过 100 目筛。利用上海分析仪器厂生产的 AA320 原子吸收分光光度计测定土壤样品中 Zn、Cu、Cr、Pb、Cd 含量,测定过程采用标准样品(GSS-1)和重复样质量控制。

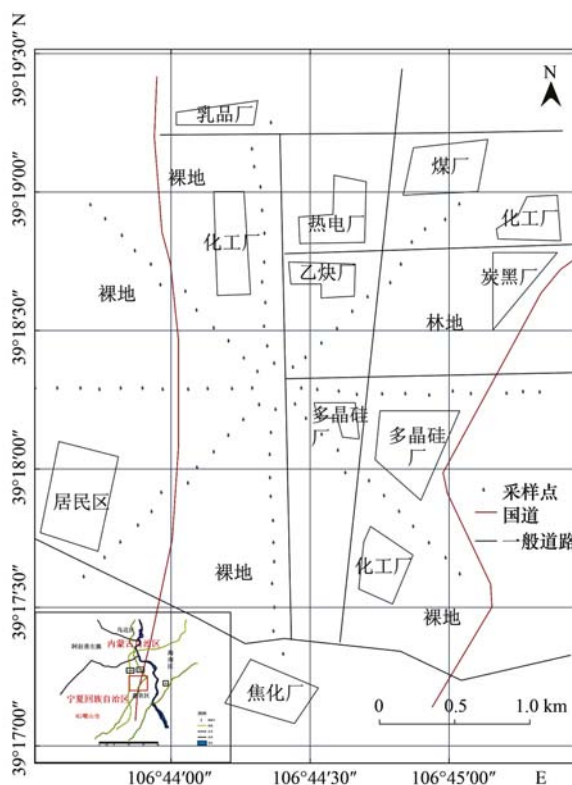


图 1 研究区位置及土壤采样点示意

Fig. 1 Location of the study area and soil sampling sites

1.3 研究方法

1.3.1 实验数据处理

采用格拉布斯准则处理特异值^[2](取检出水平 0.025,置信概率 $\rho = 0.99$,临界值为 3.38),剔除了 Zn 的 1 个最大值和 Cr 的 2 个最大值,然后使用各自剩余数据最大值代替。使用 SPSS 16.0 软件进行描述性统计和相关分析。

1.3.2 污染程度评价

采用目前国内外普遍使用的单因子指数法和内梅罗(Nemerow)复合污染指数法评价。单因子指数法适用于单一因子污染特定区域的评价,内梅罗复合污染指数法能够全面综合地反映土壤的污染程度。

单因子指数法:

$$P_i = C_i/S_i$$

内梅罗复合污染指数法:

$$P = \sqrt{(P_{\max})^2 + (P_{\text{avg}})^2}$$

式中, P_i 为土壤重金属元素 i 的环境质量指数; C_i 为元素 i 的实测含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); S_i 为元素 i 的评价标准 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。目前,我国环境规范没有专门针对工业用地的土壤环境质量标准,现有国家土壤环境质量标准(GB 15618-1995)仅适用于农业用地,但由于其标准分级中的二级标准值内涵为“保障农业生产,维护人体健康的土壤限制值”,与工业用地土壤重金属污染评价“保障人体健康”的主旨相一致且研究区土壤偏碱性,因此,取 pH 值 > 7.5 的二级标准值作为评价标准(表 3); P 为土壤重金属元素的内梅罗复合污染指数; $P_{\max}$ 为参与评价的重金属元素中的单因子指数最大值, P_{avg} 是其平均值。

一般将污染程度作如下划分^[13]: $P_i \leq 1.00$ 为非污染、 $1.00 < P_i \leq 2.00$ 为轻度污染、 $2.00 < P_i \leq 3.00$ 为中度污染、 $P_i > 3.00$ 为重度污染; $P \leq 0.70$ 为安全、 $0.70 < P \leq 1.00$ 为尚清洁(警戒线)、 $1.00 < P \leq 2.00$ 为轻度污染、 $2.00 < P \leq 3.00$ 为中度污染、 $P > 3.00$ 为重度污染。

1.3.3 时间变化分析

国内外多将土壤分为表层和次表层或多层,采样对比分析重金属积累^[14]。但次表层及深层土壤与母质层较接近,重金属元素来源的人为贡献程度判断较为困难,时间节点无法准确判定,影响了分析准确性。加之土层采样点包含信息量有限,仅能代表采样点沉积情况,对底层元素空间格局分析存在较大难度,除非进行大量采样,但费时费力、价格昂贵,并受采样区地质情况及历史气候等自然条件影响^[15]。鉴于此,采用资料对比法,以提高分析准确性和可比性。1985 年王吉智^[16]在宁夏第二次土壤普查中,对落石滩火车站 0~20 cm 的表层土壤进行了采样分析。落石滩火车站 ($39^\circ 22' 21'' \text{N}$, $106^\circ 46' 31'' \text{E}$) 地处河滨工业园区东北端,直线距离研究区

最北采样点 ($39^\circ 19' 30'' \text{N}$, $106^\circ 44' 30'' \text{E}$) 约 6 km,二者土壤均属贺兰山与内蒙阿拉善灰漠土带^[17],有效土层厚度 30~60 cm,无明显有机质层(含量平均为 0.5% 左右),表皮有较厚的片状结皮,质地为砾质,偏沙偏碱, pH 值为 8.6~9.0,母质均为沙岩、砾岩及石英岩残积,重金属元素含量环境背景值相同。因此,采用该研究结果具有可比性。之后,采用实地调查和多时段 Google earth 卫星地图对照的辅助手段,从研究区企业分布数量和方位的变化,直观地判断其重金属污染空间格局、来源和含量变化时间节点的对应性。

1.3.4 空间格局分析

在地理空间,相邻近的属性值包含地理背景信息,具有相似性^[18]。经典统计方法的前提假设是数据间独立、随机,但空间数据的邻近相似性,影响了该方法使用的准确性。地统计学是研究空间数据结构 and 格局,兼顾随机性和空间相关性,并进行最优无偏内插估计和模拟的常用方法^[19]。变异函数是地统计分析的主要工具。变异函数在零点处的值称为块金值(C_0),表示随机变异;基台值($C_0 + C$)则表示系统内的总变异,是结构性变异和随机性变异之和。块金值与基台值的比值称为块金效应,它反映了空间变异影响因素中区域因素(自然因素)和非区域因素(人为因素)的作用,是表达环境因子的空间自相关程度的重要指标。块金值/基台值 < 0.25 时,变量具有很强的空间自相关性; $0.25 < \text{块金值/基台值} < 0.75$ 时,变量为中等程度空间自相关;块金值/基台值 > 0.75 时,变量的空间自相关性很弱。有效变程反映了空间自相关性范围,决定系数反映了拟合精度。据此,采用 GS + 3.0 软件进行变异函数拟合,应用 ArcGIS 9.0 软件进行普通克里格(Ordinary Kriging)法最优内插,绘制 Zn、Cu、Cr、Pb、Cd 含量和内梅罗复合污染指数空间分布图,进行空间格局和重金属来源分析。

2 结果与分析

2.1 重金属的含量

Zn、Cu、Cr、Pb、Cd 的含量平均值分别为宁夏土壤环境背景值^[20]的 1.70、15.97、1.29、2.45、36.91 倍(表 1)。全部 96 个采样点中,Zn、Cu、Cr、Pb、Cd 的样本超标率均超过 60.00%,平均为 90.64%,Cu、Pb、Cd 的样本超标率全部为 100.00%。其中,Cu、Cr、Cd 的变异系数(反映了采样总体中各样点之间的平均变异程度)均在

40.00%以上,为中等变异和中等相关(表2),表明Cu、Cr、Cd采样点的含量值波动幅度较大、连续性变化差,空间分异较大,与自然土壤重金属元素呈连续分布特征的差异明显,外界因素输入的可能性大;

Zn、Pb变异系数较小,均在30.00%以下并为强相关性,空间分异不显著,受外界影响比较一致,可能具有同源性。总之,土壤总体表现为以Cu、Cd为主的多种重金属富集。

表1 研究区土壤重金属含量描述性统计¹⁾

元素	平均值 /mg·kg ⁻¹	标准差	变异系数 /%	偏度	峰度	K-S 检验		宁夏土壤环境背景值 /mg·kg ⁻¹	超标率 ¹⁾ /%
						Asymp. Sig (2-tailed)	对数转换		
Zn	100.29	27.20	27.12	0.04	0.11	0.20	—	58.80	91.72
Cu	352.86	174.24	49.38	0.34	-0.83	0.14	—	22.10	100.00
Cr	77.56	42.33	54.57	1.03	0.68	0.00	0.20	60.00	61.54
Pb	50.52	15.40	30.49	0.84	0.74	0.01	0.20	20.60	100.00
Cd	4.06	2.09	51.46	0.72	-0.21	0.02	0.20	0.11	100.00

1)以宁夏土壤环境背景值为标准值

表2 研究区土壤重金属元素含量相关系数¹⁾

Table 2 Pearson's correlations matrix for soil heavy metal concentrations in the study area					
	Zn	Cu	Cr	Pb	Cd
Zn					
Cu	0.464**				
Cr	0.343**	0.503**			
Pb	0.651**	0.423**	0.163		
Cd	0.422**	0.533**	0.438**	0.395**	

1) **表示显著相关(P<0.01)

2.2 重金属的污染程度

单因子污染指数 P_i 值排序为Cd>Cu>Zn>Cr>Pb(表3),Zn、Cr、Pb均低于1为非污染状态,Cu为轻度污染,Cd为重度污染。部分采样点含量严重超标,Cd的最大值达到9.03,Cu的也达到了3.65,存在明显的局部聚集和点源污染现象。内梅罗复合污染指数 P 值为3.04>3,表明研究区整体属重度污染。根据内梅罗复合污染指数计算公式强调污染元素最大值的特点,Cd是内梅罗复合污染指数 P 值偏大的主要原因。

表3 研究区土壤重金属污染程度评价

Table 3 Assessment for soil heavy metal pollution level in the study area								
国家二级标准 /mg·kg ⁻¹	污染指数	范围	平均值±平均误差	污染程度	单因子污染指数平均值方向分布			
					西北	东北	东南	西南
300	P_{Zn}	0.13~0.56	0.33±0.01	非污染	0.23	0.30	0.44	0.37
200	P_{Cu}	0.34~3.65	1.76±0.09	轻度污染	0.85	1.21	2.74	1.50
250	P_{Cr}	0.08~0.79	0.31±0.02	非污染	0.25	0.20	0.45	0.23
350	P_{Pb}	0.06~0.28	0.14±0.01	非污染	0.11	0.12	0.21	0.14
1	P_{Cd}	0.99~9.03	4.06±0.21	重度污染	2.46	2.98	7.22	3.49
—	P	0.95~6.79	3.46±0.15	重度污染	3.87	4.26	6.66	4.51

2.3 重金属含量的时间变化

对比1985年宁夏第二次土壤普查中该地的重金属环境背景值和最大值^[16](表4),Zn平均值增加了44.72%,最大值增加了57.55%;Cu平均值增

加了19.76倍,最大值增加了20.55倍;Cr平均值增加了35.83%;Pb平均值增加了3.43倍;Cd平均值增加了39.60倍,最大值增加了49.17倍。Cu、Cd含量平均增加达29.68倍,检出的最大值增幅也

表4 研究区土壤重金属含量的时间变化¹⁾

年份	Zn/mg·kg ⁻¹	Cu/mg·kg ⁻¹	Cr/mg·kg ⁻¹	Pb/mg·kg ⁻¹	Cd/mg·kg ⁻¹
1985年*	69.30	17.00	57.10	11.40	0.10
1985年**	107.00	33.90	—	—	0.18
2011年*	100.29	352.86	77.56	50.52	4.06
2011年**	168.58	730.62	198.27	99.87	9.03

1) *为平均值,**为最大值,—为未检出

达到了 34.86 倍。因此,研究区土壤经过 20 多年工业生产排放,重金属积累迅速,形成了以 Cd、Cu 为主,Zn、Cr、Pb 次之的格局,环境安全风险大。

2.4 重金属分布的空间格局

2.4.1 数据拟合

地统计变异函数要求数据符合正态分布或近似正态分布,否则可能存在比例效应,使实际变异函数值畸变,估计精度降低,导致某些结构特征不明显^[21]。从表 1 中的峰度和偏度及 K-S 检验看,Zn、Cu 含量符合正态分布,Cr、Pb、Cd 为偏态分布且经对数转换后均符合正态分布。拟合结果(表 5):除 Zn 的决定系数 R^2 略低于 0.80 外,Cu、Cr、Pb、Cd 均在 0.80 以上,拟合效果较好,可以使用拟合模型解释数据空间分布规律。

Zn、Cu、Cd 的块金值/基台值均大于 0.75,空间自相关弱,为随机变异。随机变异一般由与土壤

形成无关的外界因素(如工农业生产)造成,系统变异由土壤形成因素(如母质、地形、植被等)相互作用形成^[19]。污染场地的土壤污染物在人为影响下常常有着较大的变异性 and 较高的偏斜度及高峰值的出现^[22]。研究区属工业区污染场地,生产活动密集,污染物排放量大且集中,使 Zn、Cu、Cd 的含量空间分布随机变异性增强。Zn、Cu、Cd 均符合球状模型,与前文分析吻合,进一步证明其“局部聚集、点源污染明显”的空间特征;Cr、Pb 的块金值/基台值在 0.25 ~ 0.75 之间,为中等空间相关,系统变异适度。但由于样本超标率高、含量较宁夏土壤环境背景值增幅大,不能认为是由土壤自然过程形成。Cr、Pb 的有效变程在 4 800 m 左右,Cr 为指数模型、含量随距离增加辐散^[23],表明 Cr、Pb 应由污染物缓慢沉降或工业低架源排放所致^[1,12]。

表 5 研究区土壤重金属含量的变异函数理论模型

Table 5 Theoretical models of semi-variogram for soil heavy metal concentration level in the study area

元素	理论模型	块金值 (C_0)	基台值 ($C_0 + C$)	有效变程 /m	块金值/基台值 $C_0/(C_0 + C)$	决定系数 (R^2)
Zn	球状模型	0.13	1.23	3 230.00	0.90	0.79
Cu	球状模型	0.09	2.08	6 770.00	0.96	0.94
Cr	指数模型	0.61	1.22	5 370.00	0.50	0.81
Pb	球状模型	0.04	0.09	2 400.00	0.56	0.96
Cd	球状模型	0.24	2.15	8 250.00	0.89	0.99
P	球状模型	0.08	2.16	7 090.00	0.96	0.99

Cu、Cd 的有效变程分别超出 4 800 m 的采样范围 41.04%、71.88%,表明 Cu、Cd 污染范围较广,以 200 m 为步长及 4 800 m 的采样总范围不足以反映 Cu、Cd 变异情况。采样步长越小包含的土壤形成因素信息越多,越长会逐步将土壤形成以外的气候、工业和交通布局等因素纳入。由于研究区企业密布、交通布局既定,对重金属元素空间分布范围影响有限。因此,气候因素中的西北主导风向强度大、污染物散布范围较广是有效变程大的主因。

2.4.2 空间分析

虽然 Zn、Cu、Cd 的随机性较大,但空间变量连续插值可直观地查看其分布特征^[24]。克里格插值结果(图 2):Zn、Cu、Cr、Pb、Cd、P 复合指数的空间分布均呈现较明显的岛状分布格局,总体上由西北向东南增高。单因子指数平均值空间分布也具有同样结果(表 3):南部 > 北部,东南 > 西南 > 东北 > 西北,表明西北风是该区土壤重金属空间分布格局形成的主导因素。

Zn、Pb、Cr 分布具有明显的地理相似性,均在

西南居民区以北出现了高值区,但居民区西邻贺兰山,且与西北风主导风向垂直,附近并无生产企业,含量应较低,但实际结果仅次于东南部。实地调查该居民区海拔为 1 206 m,向北至西北方向最远采样点的海拔为 1 159 m,中间无林带和建筑物阻挡,均为裸地,地势逐渐降低,形成了一个局部低洼区。同时,在居民区正北方向直线距离 35 km 处,有内蒙古自治区另一高耗能工业区,主要以火力发电、焦化、化工、铁合金为主。由于在大气污染物沉降中,山体形态是仅次于主导风向的重要制约因素^[25],该低洼区向西紧靠贺兰山,风受山体阻挡减速,使污染物缓慢下沉,增加了沉降量。因此,其 Zn、Pb、Cr 的异常高值与 2009 年以后该区企业数量迅速增加及附近内蒙古另一高耗能工业园区生产密切相关。这与英国环境食品和农村事务部的“英国重金属含量评估报告”中报道的“土壤重金属含量主要由本地源和周边更大污染源决定”的结论一致^[26]。

2.5 重金属含量的时空对应性

对比研究区卫星地图(图 3),结合实地调查,

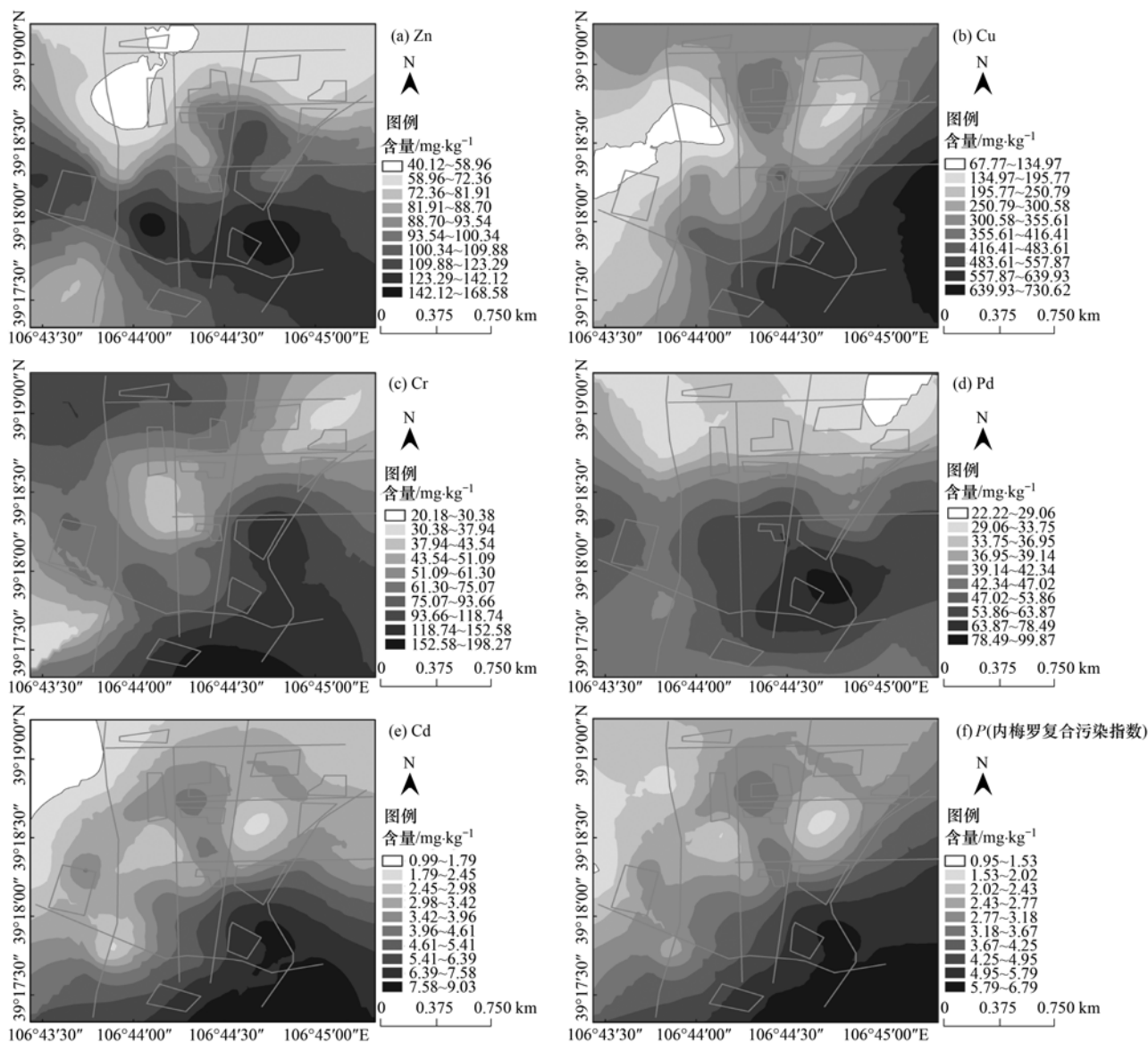


图2 土壤重金属含量空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of soils heavy metal in the study area

2003 年 10 月,研究区东南部有点状化工厂和焦化厂、西南部有 1 处居民区,西部、西北部为农田,其他大部分区域均为未利用裸地和林带。2004 年 10 月,东北端有 1 处化工厂。2009 年 10 月至今,整个东部出现了企业个数增加、密度加大的情况,尤其在东北部外围密集形成了焦化、化工、电力等企业,东南部及外围也出现了成片企业。据此对比污染程度评价结果,目前研究区东南部及外围企业密集、污染程度重,具有对应性;西南部居民区含量较高的原因前文空间分析部分已做分析,此处不再赘述;东北部企业分布数量较大,与污染程度具有对应性;西北部污染程度最轻、企业数量少,对应性强。总之,2009 年应是研究区 Zn、Cu、Cr、Pb、

Cd 含量显著增加的重要时间节点,其后的工业生产活动应是东南部、东北部含量明显增加的主要来源。

2.6 重金属元素来源

在工业发达地区,大气沉降对土壤系统中重金属累积贡献率在各种外源输入因子中排在首位^[25]。由于研究区内及附近另一内蒙古工业园区以火力发电厂、铁合金厂、钢铁冶炼厂、煤场、焦炭厂、化工厂等企业为主,属典型烟煤混合型工业区,且采样范围内无明显垃圾堆放、废水排放。因此,土壤重金属元素应主要来源于燃煤烟尘。

粉煤灰含有自然界中大部分化学元素^[27],工业混合区的 Cu、Zn、Pb、Cr 在土壤表层有明显富集特

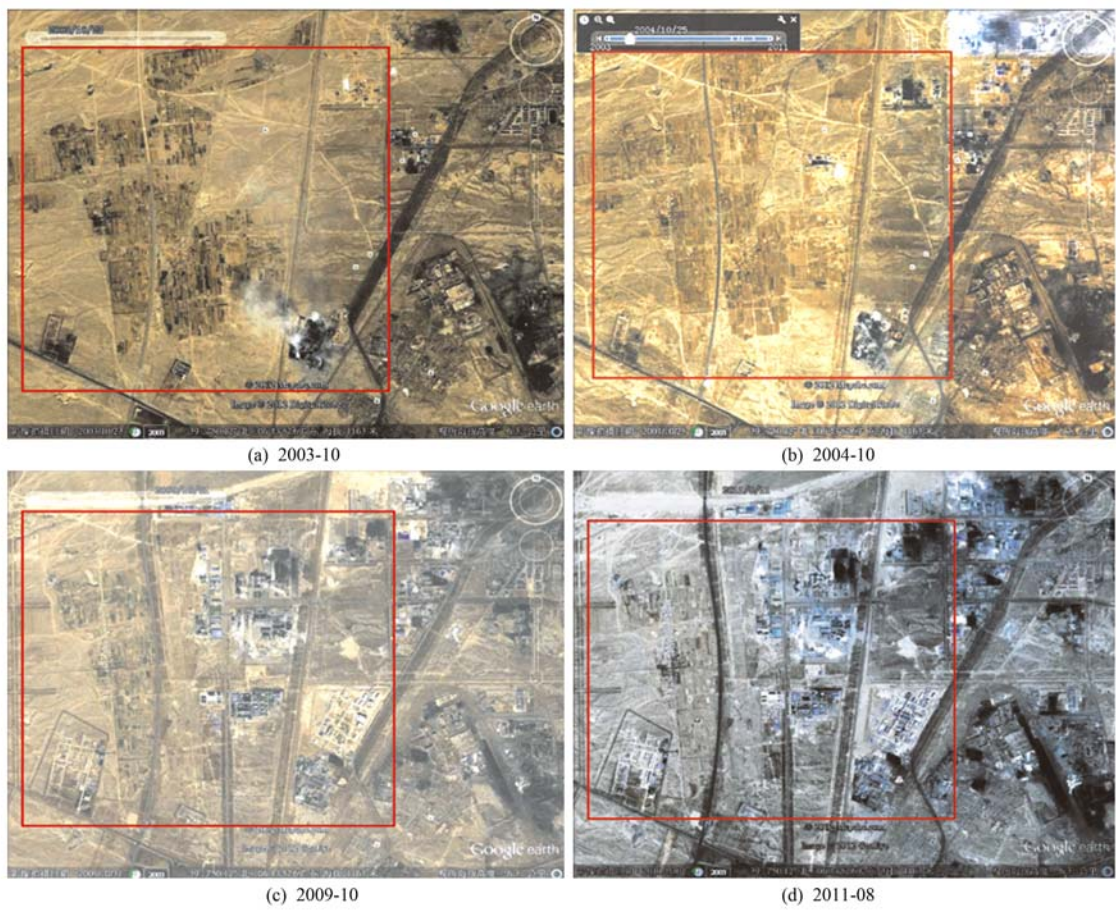


图3 研究区及周边企业分布时间变化卫星图

Fig. 3 Google earth maps for time variation of factories in and outside the study area

征^[28],发电厂周边 Cu、Zn 易聚集^[29],铁合金厂周边土壤 Cd 含量明显高于其它元素^[30],交通运输也是 Cu、Zn、Pb 的重要来源. 据 2008 年全国第一次污染源普查数据^[31],河滨工业园区的发电、焦煤、铁合金、水泥等 7 家国控重点企业,处理后排放烟尘平均为 $840.71\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ 、粉尘平均为 $2\,190.72\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$,按 300 家企业计算,年排放分别可达 $25.22\times 10^4\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $65.75\times 10^4\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$;按 41 km^2 的面积计算,该园区地表土壤最高每年分别要接受烟气颗粒 $6.15\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 和粉尘 $16.03\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$. 因此,Cu、Zn、Pb、Cr、Cd 总体上应由该园区燃煤烟气粉尘造成,其中,Cu、Cd 污染应来源于火力发电厂和铁合金厂,Zn、Pb 还应源于交通运输的机件磨损和汽车尾气.

3 讨论

规则网格采样的克里格插值精确性要高于不规则采样^[19]. 在密布工业区,土地利用强度高,企业间距小,网格采样布局无法达到规则分布要求,增加

了数据误差. 同心圆状采样在一定程度上保留了规则采样的要求,提高了精度.

由于西北地区风向强度大,使污染物扩散范围广,以 200 m 步长、4 800 m 的总体范围采样无法完全覆盖重金属元素空间变异的全部信息,增加了变异函数拟合结果的随机性,建议同类研究扩大采样范围.

资料对比法分析重金属累积直观有效,以往研究均选择同一研究区或范围作为基本原则^[32],但受多种因素制约,往往不能获得严格的同一位置资料,对结论准确性有影响,应对西北地区土壤重金属热点区域进行长期监测,以便得出更为精确的结论并发现其时空变化规律.

4 结论

(1)研究区表层土壤的 Cd、Cu、Zn、Pb、Cr 含量均高于宁夏土壤背景值,较 1985 年检测含量有明显积累,形成了以 Cd、Cu 为主,Zn、Pb、Cr 次之的污染特征,与河滨工业园区 20 多年的运行关系密切.

(2)燃煤烟尘是研究区表层土壤重金属元素的主要来源,在主导西北风强力散布下,影响范围较广,形成了内蒙古另一工业区与河滨工业园区的跨界叠加污染。

(3)研究区表层土壤的 Cd、Cu、Zn、Pb、Cr 含量由西北向东南逐渐升高,与企业数量的空间分布特征具有对应性;局部有明显岛状分布,是地形低洼和山体阻挡降尘、企业分布格局等因素共同作用的结果。

致谢:感谢宁夏大学资源环境学院王幼奇博士,西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地李学斌博士、陈林硕士等在采样和实验方面提供的帮助,在此一并致谢!

参考文献:

- [1] Carr R, Zhang C S, Moles N, *et al.* Identification and mapping of heavy metal pollution in soils of a sports ground in Galway City, Ireland, using a portable XRF analyser and GIS [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2008, **30**(1): 45-52.
- [2] 陈秀端, 卢新卫, 赵彩凤, 等. 西安市二环内表层土壤重金属空间分布特征[J]. *地理学报*, 2011, **66**(9): 1281-1288.
- [3] Morton-Bermea O, Hernández-álvarez E, Lozano R, *et al.* Spatial distribution of heavy metals in top soils around the industrial facilities of Cromatos de México, Tultitlan Mexico[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2010, **85**(5): 520-524.
- [4] 倪刘建, 张甘霖, 杨金玲, 等. 钢铁工业区降尘对周边土壤的影响[J]. *土壤学报*, 2007, **44**(4): 637-642.
- [5] 王宏镔, 束文圣, 蓝崇钰. 重金属污染生态学研究现状与展望[J]. *生态学报*, 2005, **25**(3): 596-605.
- [6] Li Y, Ye T H, Wang D J, *et al.* Determination of free heavy metal ion concentrations in soils around a cadmium rich zinc deposit[J]. *Geochemical Journal*, 2007, **41**(4): 235-240.
- [7] Zhai M Z, Totolo O, Modisi M P, *et al.* Heavy metal distribution in soils near Palapye, Botswana: an evaluation of the environmental impact of coal mining and combustion on soils in a semi-arid region[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2009, **31**(6): 759-777.
- [8] 廖晓勇, 崇忠义, 阎秀兰, 等. 城市工业污染场地: 中国环境修复领域的新课题[J]. *环境科学*, 2012, **32**(3): 784-794.
- [9] Pouyat R V, McDonnell M J. Heavy metal accumulations in forest soils along an urban-rural gradient in southeastern New York, USA[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1991, **58**(1): 57-58.
- [10] Ordóñez A, Loredó J, De Miguel E, *et al.* Distribution of heavy metals in the street dusts and soils of an industrial city in northern Spain [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2003, **44**(2): 160-170.
- [11] 周蒙蒙, 潘志华, 陈东东, 等. 半干旱地区不同植被生态体系对土壤重金属含量的影响[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, **30**(10): 2789-2792.
- [12] 刘玉燕, 刘敏. 乌鲁木齐城市土壤性质及污染研究[J]. *干旱区研究*, 2007, **24**(1): 66-69.
- [13] 陈怀满. 环境土壤学[M]. 北京: 科学出版社, 2005. 522-523.
- [14] 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.
- [15] Olmos M A, Birch G F. A novel method using sedimentary metals and gis for measuring anthropogenic change in coastal lake environments [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2010, **17**(2): 270-287.
- [16] 王吉智. 宁夏土壤[M]. 银川: 宁夏人民出版社, 1988. 400-401.
- [17] 宁夏回族自治区发展和改革委员会. 宁夏回族自治区资源环境地图集[M]. 北京: 中国地图出版社, 2006. 30-31.
- [18] 罗伯特·海宁. 空间数据分析理论与实践[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003. 24-25.
- [19] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999. 1-3.
- [20] 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. 339-386.
- [21] 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.
- [22] 吴春发, 吴嘉平, 骆永明, 等. 冶炼厂周边土壤重金属污染范围的界定与不确定性分析[J]. *土壤学报*, 2009, **46**(6): 1007-1012.
- [23] 石宁宁, 丁艳锋, 赵秀峰, 等. 某农药工业园区周边土壤重金属含量与风险评价[J]. *应用生态学报*, 2010, **21**(7): 1835-1843.
- [24] 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.
- [25] Zechmeister H G, Riss A, Hanus-Illy A. Biomonitoring of atmospheric heavy metal deposition by Mosses in the vicinity of industrial sites[J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2004, **49**(1-3): 461-477.
- [26] Vincent K, Passant N. Assessment of heavy metal concentrations in the United Kingdom [R]. London: The Department for Environment, Food and Rural Affairs, 2006. 31-32.
- [27] 张清敏, 胡国臣, 王忠, 等. 粉煤灰中重金属 Pb/Cd 的有效态研究[J]. *农业环境保护*, 2000, **19**(6): 350-351.
- [28] 马溪平, 李法云, 肖鹏飞, 等. 典型工业区周围土壤重金属污染评价及空间分布[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2007, **39**(2): 326-329.
- [29] 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.
- [30] 蔡艳荣, 黄宏志. 锦州铁合金厂周围土壤金属污染状况调查分析[J]. *科学技术与工程*, 2010, **10**(3): 831-834.
- [31] 宁夏回族自治区第一次全国污染源普查工作办公室. 关于下发污染源普查国控及省控重点企业抽(监)测结果的函[EB/OL]. <http://www.nxep.gov.cn/ReadNews.asp?NewsID=8595>.
- [32] 王俊坚, 赵宏伟, 钟秀萍, 等. 垃圾焚烧厂周边土壤重金属浓度水平及空间分布[J]. *环境科学*, 2011, **32**(1): 289-304.

CONTENTS

Advances in Peroxide-Based Decontaminating Technologies	XI Hai-ling, ZHAO San-ping, ZHOU Wen (1645)
Environmental Damage Assessment; International Regulations and Revelation to China	ZHANG Hong-zhen, CAO Dong, YU Fang, <i>et al.</i> (1653)
Human Health Risk-Based Environmental Criteria for Soil: A Comparative Study Between Countries and Implication for China	XU Meng, YAN Zeng-guang, HE Meng-meng, <i>et al.</i> (1667)
Organic Waste Treatment by Earthworm Vermicomposting and Larvae Bioconversion: Review and Perspective	ZHANG Zhi-jian, LIU Meng, ZHU Jun (1679)
Strategies of Nutrients Control in Lakes Based on Ecoregions of Lakes in China	DIAO Xiao-jun, XI Bei-dou, HE Lian-sheng, <i>et al.</i> (1687)
Current Status of Surface Water Acidification in Northeast China	XU Guang-yi, KANG Rong-hua, LUO Yao, <i>et al.</i> (1695)
Impact Analysis of Xi'an to the Water Quality of Weihe River	YU Jie, LI Huai-en (1700)
Distribution Characteristics of Dissolved Oxygen and Its Affecting Factors in the Pearl River Estuary During the Summer of the Extremely Drought Hydrological Year 2011	YE Feng, HUANG Xiao-ping, SHI Zhen, <i>et al.</i> (1707)
Application of Equilibrium Partitioning Approach to Establish Sediment Quality Criteria for Heavy Metals in Hengyang Section of Xiangjiang River	HAN Chao-nan, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (1715)
Assessing the Benthic Ecological Status in Yangtze River Estuary Using AMBI and M-AMBI	CAI Wen-qian, MENG Wei, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (1725)
Pollution Load and the First Flush Effect of BOD ₅ and COD in Urban Runoff of Wenzhou City	WANG Jun, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (1735)
Influencing Factors in Measuring Absorption Coefficient of Suspended Particulate Matters	YU Xiao-long, SHEN Fang, ZHANG Jin-fang (1745)
Relationship Between pCO ₂ and Algal Biomass in Xiangxi Bay in Spring	YUAN Xi-gong, HUANG Wen-min, BI Yong-hong, <i>et al.</i> (1754)
Effects of Turbulent Fluctuation Intensity on the Growth of Algae and Water Environment	LEI Yu, LONG Tian-yu, SAN Lei, <i>et al.</i> (1761)
Simultaneous Removal of Algae and Its Odorous Metabolite Dimethyl Trisulfide in Water by Potassium Ferrate	MA Xiao-yan, ZHANG Ze-hua, WANG Hong-yu, <i>et al.</i> (1767)
Catalyzed Oxidation of Catechol by the Heterogeneous Fenton-like Reaction of Nano-Fe ₃ O ₄ -H ₂ O ₂ System	HE Jie, YANG Xiao-fang, ZHANG Wei-jun, <i>et al.</i> (1773)
Photodegradation of Naproxen in Aqueous Systems by UV Irradiation: Mechanism and Toxicity of Photolysis Products	MA Du-juan, LIU Guo-guang, LÜ Wen-ying, <i>et al.</i> (1782)
Catalytic Ozonation of Nitrobenzene in Water by Acidification-activated Red Mud	KANG Ya-ning, LI Hua-nan, XU Bing-bing, <i>et al.</i> (1790)
Experimental Studies on Stability of Floes from Cadmium Pollution Emergency Treatment	LIU Wang-rong, GUO Qing-wei, YANG Ren-bin, <i>et al.</i> (1797)
Evaluation of Floc Strength Based on Morphological Analysis and Optical Online Monitoring	JIN Peng-kang, FENG Yong-ning, WANG Bao-bao, <i>et al.</i> (1802)
Mechanism of Reductive Dechlorination of Trichlorophenol with Different Electron Donors	WAN Jin-quan, HU Meng-die, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (1808)
Preparation of Magnetic Quaternary Chitosan Salt and Its Adsorption of Methyl Orange from Water	ZHANG Cong-lu, HU Xiao-min, YING Shi-ying, <i>et al.</i> (1815)
Membrane Fouling by Secondary Effluent of Urban Sewage and the Membrane Properties	MENG Xiao-rong, ZHANG Hai-zhen, WANG Lei, <i>et al.</i> (1822)
Treatment of Municipal Wastewater Using the Combined Reversed A ² /O-MBR Process	ZHANG Jian-jun, ZOU Gao-long, YANG Shu-fang, <i>et al.</i> (1828)
Study on Sulfur-based Autotrophic Denitrification with Different Electron Donors	YUAN Ying, ZHOU Wei-li, WANG Hui, <i>et al.</i> (1835)
Nitrogen Removal and N ₂ O Emission Characteristics During the Shortcut Simultaneous Nitrification and Denitrification Process	LIANG Xiao-ling, LI Ping, WU Jin-hua, <i>et al.</i> (1845)
Optimization of Solid-Phase Extraction for Enrichment of Toxic Organic Compounds in Water Samples	ZHANG Ming-quan, LI Feng-min, WU Qian-yuan, <i>et al.</i> (1851)
Polycyclic Musks Exposure Affects Gene Expression of Specific Proteins in Earthworm <i>Eisenia fetida</i>	CHEN Chun, LIU Xiao-wei, ZHENG Shun-an, <i>et al.</i> (1857)
Health Risk Assessment and Ozone Formation Potentials of Volatile Organic Compounds from Pharmaceutical Industry in Zhejiang Province	XU Zhi-rong, WANG Zhe-ming, XU Ming-zhu, <i>et al.</i> (1864)
Health Effect of Volatile Aldehyde Compounds in Photocatalytic Oxidation of Aromatics Compounds	ZHAO Wei-rong, LIAO Qiu-wen, YANG Ya-nan, <i>et al.</i> (1871)
Compositions and Distribution Characteristics of Polybrominated Diphenyl Ethers in Serum of Women from Sichuan Province	SHAO Min, CHEN Yong-heng, LI Xiao-yu (1877)
QSAR/QSPR for Predicting the Toxicity of Imidazolium Ionic Liquids	ZHAO Ji-hong, ZHAO Yong-sheng, ZHANG Hong-zhong, <i>et al.</i> (1882)
Spatial and Temporal Characteristics of Heavy Metal Concentration of Surface Soil in Hebin Industrial Park in Shizuishan Northwest China	FAN Xin-gang, MI Wen-bao, MA Zhen-ning, <i>et al.</i> (1887)
Distribution Characteristic and Current Situation of Soil Rare Earth Contamination in the Bayan Obo Mining Area and Baotou Tailing Reservoir in Inner Mongolia	GUO Wei, FU Rui-ying, ZHAO Ren-xin, <i>et al.</i> (1895)
Road Dust Loading and Chemical Composition at Major Cities in Fujian Province	ZHENG An, YANG Bing-yu, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (1901)
Numerical Simulation and Application of Electrical Resistivity Survey in Heavy Metal Contaminated Sites	WANG Yu-ling, NAI Chang-xin, WANG Yan-wen, <i>et al.</i> (1908)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Rare Earth Elements Uptake of Soybean Grown in Rare Earth Mine Tailings	GUO Wei, ZHAO Ren-xin, ZHAO Wen-jing, <i>et al.</i> (1915)
Algicidal Activity Against Red-tide Algae by Marine Bacterial Strain N3 Isolated from a HABs Area, Southern China	SHI Rong-jun, HUANG Hong-hui, QI Zhan-hui, <i>et al.</i> (1922)
Isolation, Identification and Oxidizing Characterization of an Iron-Sulfur Oxidizing Bacterium LY01 from Acid Mine Drainage	LIU Yu-jiao, YANG Xin-ping, WANG Shi-mei, <i>et al.</i> (1930)
Isolation of an Effective Benzo[a]pyrene Degrading Strain and Its Degradation Characteristics	CAI Han, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1937)
Aerobic Microbial Degradation of 2,2',4,4'-Tetrabrominated Diphenyl Ether	ZHANG Shu, Franco Giulio, LI Xiao-bao, <i>et al.</i> (1945)
Piggery Wastewater Cultivating Biofloculant-Producing Flora B-737 and the Fermentation Characteristics	PEI Rui-lin, XIN Xin, ZHANG Xue-qiao, <i>et al.</i> (1951)
Correlation Between Acidic Materials and Acid Deposition in Beijing During 1997-2011	CHEN Yuan-yuan, TIAN He-zhong, YANG Dong-yan, <i>et al.</i> (1958)
Characteristics of Precipitation pH and Conductivity at Mt. Huang	SHI Chun-e, DENG Xue-liang, WU Bi-wen, <i>et al.</i> (1964)
Chemical Characteristics of Water-Soluble Components of Aerosol Particles at Different Altitudes of the Mount Huang in the Summer	WEN Bin, YIN Yan, QING Yan-shuo, <i>et al.</i> (1973)
Pollution Characteristics of Organic Acids in Atmospheric Particles During Haze Periods in Autumn in Guangzhou	TAN Ji-hua, ZHAO Jing-ping, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (1982)
Characterization of Organic Carbon (OC) and Elemental Carbon (EC) in PM _{2.5} During the Winter in Three Major Cities in Fujian Province, China	CHEN Yan-ting, CHEN Jin-sheng, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1988)
Size Distribution of Carbonaceous Particulate Matter in Atmosphere of Shanghai, China	YUAN Ning, LIU Wei, ZHAO Xiu-liang, <i>et al.</i> (1995)
Secondary Aerosol Formation Through Photochemical Reactions Estimated by Using Air Quality Monitoring Data in the Downtown of Pudong, Shanghai	CUI Hu-xiong, WU Ya-ming, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (2003)
Geochemical Characteristics and Sources of Atmospheric Particulates in Shanghai During Dust Storm Event	QIAN Peng, ZHENG Xiang-min, ZHOU Li-min (2010)
Near Surface Atmospheric CO ₂ Variations in Autumn at Suburban Xiamen, China	LI Yan-li, MU Chao, DENG Jun-jun, <i>et al.</i> (2018)
<i>In-situ</i> Measurement of Background Atmospheric HCFC-142b Using GC-MS and GC-ECD Method	GUO Li-feng, YAO Bo, ZHOU Ling-xi, <i>et al.</i> (2025)
Airborne Fungal Community Composition in Indoor Environments in Beijing	FANG Zhi-guo, OUYANG Zhi-yun, LIU Peng, <i>et al.</i> (2031)
Study on Quantification Assessment and Odor Fingerprint of Volatile Aromatic Hydrocarbons from Sewage Treatment Plant	GUO Wei, WANG Bo-guang, TANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (2038)
Superposition Impact Character of Air Pollution from Decentralization Docks in a Freshwater Port	LIU Jian-chang, LI Xing-hua, XU Hong-lei, <i>et al.</i> (2044)
Thermal Stability and Transformation Behaviors of Pb in Yima Coal	LIU Rui-qing, WANG Jun-wei (2051)
Synergistic Emission Reduction of Chief Air Pollutants and Greenhouse Gases Based on Scenario Simulations of Energy Consumptions in Beijing	XIE Yuan-bo, LI Wei (2057)

《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)

2013年5月15日 34卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 5 May 15, 2013

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