

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第3期

Vol.34 No.3

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

BP网络框架下MODIS气溶胶光学厚度产品估算中国东部PM _{2.5}	郭建平, 吴业荣, 张小曳, 李小文(817)
北京市近地层颗粒物浓度与气溶胶光学厚度相关性分析研究	林海峰, 辛金元, 张文煜, 王跃思, 刘子锐, 陈传雷(826)
气象因素对长三角背景地区甲烷浓度的影响分析	浦静姣, 徐宏辉, 顾骏强, 马千里, 方双喜, 周凌晔(835)
密闭化填埋作业条件下的场内恶臭污染分布情况与分析	路鹏, 吴世新, 戴志锋, 张晓辉, 苏昭辉, 周小飞, 代占国, 卢旭飞, 郑斌, 沈凯, 卫潘明(842)
冬季中国东海海水中挥发性卤代烃的分布特征和海-气通量	何真, 陆小兰, 杨桂朋(849)
2000~2010年大鹏湾颗粒有机物的年变化和年际变化	李绪录, 周毅频, 夏华永(857)
渤海湾浮游植物与环境因子关系的多元分析	周然, 彭士涛, 覃雪波, 石洪华, 丁德文(864)
青藏高原淡水湖泊水化学组成特征及其演化	王鹏, 尚英男, 沈立成, 伍坤宇, 肖琼(874)
漳卫南运河流域非点源污染负荷估算及最佳管理措施优选	徐华山, 徐宗学, 刘品(882)
面向对象的湖泊污染控制智能工程设计方法	邹锐, 周璟, 刘永, 朱翔, 赵磊, 阳平坚, 郭怀成(892)
九龙江口湿地植物凋落物对沉积物有机质赋存的贡献	罗专溪, 邱昭政, 王振红, 颜昌宙(900)
修复达标土壤回填对地下水环境影响的层次化评估方法应用研究	钟茂生, 姜林, 姚珏君, 樊艳玲, 夏天翔, 李婷婷, 田美影(907)
去除地下水中硝酸盐的渗透性反应墙研究	李秀利, 杨君君, 卢晓霞, 张姝, 侯珍(914)
北京城区雨水管道沉积物污染负荷研究	李海燕, 徐波平, 徐尚玲, 崔爽(919)
城市污水处理厂及其受纳水体中5种典型PPCPs的赋存特征和生态风险	温智皓, 段艳平, 孟祥周, 陈玲(927)
城市景观娱乐水体微生物风险评价	孙傅, 沙婧, 张一帆, 刘彦华(933)
模拟曝气生物滤池去除邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯试验研究	李伟, 赵晶, 余健, 任文辉(943)
膜生物反应器处理工业废水中膜污染及膜过滤特性研究	范举红, 余素林, 张培帅, 兰亚琼, 刘锐, 陈吕军(950)
γ -Al ₂ O ₃ 负载磷钨酸催化强化电化学法处理水中酸性大红3R的研究	岳琳, 王开红, 郭建博, 杨景亮, 刘宝友, 廉静, 王涛(955)
活性炭催化过硫酸钠降解金橙G动力学	杨梅梅, 周少奇, 刘琳, 郑可(962)
ABR反应器处理碱减量印染废水的启动研究	杨波, 钟启俊, 李方, 田晴(968)
O ₃ -BAF深度处理制革废水中沿程污染物降解规律	余彬, 刘锐, 程家迪, 范举红, 李昌湖, 冉坤, 曹国华, 陈吕军(974)
规模化猪场养殖废水UASB-SFSBR-MAP处理工艺中试研究	王亮, 陈重军, 陈英旭, 吴伟祥(979)
连续流态下以城市污水培养好氧颗粒污泥及颗粒特性研究	牛姝, 段百川, 张祚薰, 刘士峰, 张家铭, 王聪, 周丹丹(986)
乙酸/丙酸作为EBPR碳源的动力学模型研究(Ⅰ)——模型的建立	张超, 陈银广(993)
乙酸/丙酸作为EBPR碳源的动力学模型研究(Ⅱ)——动力学模拟	张超, 陈银广(998)
乙酸/丙酸作为EBPR碳源的动力学模型研究(Ⅲ)——模型的应用	张超, 陈银广(1004)
三峡水库两条支流水-气界面CO ₂ 、CH ₄ 通量比较初探	李哲, 白镭, 郭劲松, 方芳, 蒋滔(1008)
不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异的影响因素	陈书涛, 刘巧辉, 胡正华, 刘艳, 任景全, 谢薇(1017)
黄土区农田和草地生态系统土壤呼吸差异及其影响因素	周小刚, 张彦军, 南雅芳, 刘庆芳, 郭胜利(1026)
层次化健康风险评估方法在苯污染场地的应用及效益评估	姜林, 钟茂生, 梁竞, 姚珏君, 夏天翔, 樊艳玲, 李敬东, 唐振强(1034)
海州湾滩涂重金属污染的历史记录	张瑞, 张帆, 刘付程, 尹福军, 丁迎军, 高金荣, 陈晶, 邵威(1044)
草海典型高原湿地表层沉积物重金属的积累、分布与污染评价	张清海, 林昌虎, 谭红, 林绍霞, 杨鸿波(1055)
大金山岛土壤重金属污染评价及相关性分析	程芳, 程金平, 桑恒春, 于金莲, 席磊, 皮帅帅(1062)
典型有色金属矿山城市小河流沉积物重金属形态分布及风险评估	李如忠, 姜艳敏, 潘成荣, 陈婧, 徐晶晶(1067)
典型有色金属矿业城市零星菜地蔬菜重金属污染及健康风险评估	李如忠, 潘成荣, 徐晶晶, 陈婧, 姜艳敏(1076)
城市表层土壤磁化率与重金属含量分布的相关性研究	陈秀端, 卢新卫, 杨光(1086)
典型热带林地土壤团聚体颗粒中重金属的分布特征及其环境意义	龚仓, 徐殿斗, 成杭新, 任雅阁, 刘志明, 刘应汉, 刘飞, 聂海峰, 郑祥, 马玲玲(1094)
生态沟渠底泥属性与磷吸附特性研究	张树楠, 贾兆月, 肖润林, 杨凤飞, 余红兵, 刘锋, 吴金水(1101)
三峡库区澎溪河底泥及消落区土壤磷的形态及吸附特性研究	孙文彬, 杜斌, 赵秀兰, 何丙辉(1107)
Triton X-100在黄土上的吸附行为及影响因素	钟金魁, 赵保卫, 朱琨, 钱小龙, 张杰西(1114)
新疆哈密地区有机氯农药大气、土壤残留特征、气-土交换及潜在生态风险	马子龙, 毛蒲萱, 丁中原, 高宏, 黄韬, 田慧, 郭强(1120)
青海省西宁市与天峻县大气中得克隆与十溴联苯醚的水平与来源	何畅, 金军, 马召辉, 王英, 扎西卓玛, 马丽花(1129)
太湖沉积物中多溴联苯醚和类二噁英多氯联苯的水平垂直分布	马召辉, 金军, 元学奎, 王英, 姜霞, 何松洁, 李明圆(1136)
典型电器工业区河涌沉积物中有机污染物特征分析	刘近, 邓代永, 许玫英, 孙国萍(1142)
柴油轿车颗粒多环芳烃的排放特性	谭丕强, 周舟, 胡志远, 楼狄明(1150)
机械炼焦过程生成飞灰中多环芳烃分布特征研究	牟玲, 彭林, 刘效峰, 白慧玲, 张建强(1156)
污泥干化床与芦苇床稳定化污泥中多环芳烃的含量比较	崔玉波, 孙红杰, 冉春秋, 李金凤, 谢瑶(1161)
固体添加剂对污泥焚烧过程中重金属迁移行为的影响	刘敬勇, 孙水裕, 陈涛(1166)
铸造废砂的环境毒性研究	张海凤, 王玉珏, 王劲磷, 黄天佑, 熊鹰(1174)
Cr ⁶⁺ 生物可利用度检测的微生物全细胞传感器CB10的构建及其响应特征	侯启会, 马安周, 庄绪亮, 庄国强(1181)
反硝化脱硫工艺中微生物群落结构及动态分析	于皓, 王爱杰, 陈川(1190)
农业废物好氧堆肥中环境因子对nirK、nirS和nosZ数量的影响	胡春晓, 陈耀宁, 张嘉超, 唐聪, 曾光明(1196)
蚯蚓体内过氧化物还原蛋白PRDX基因对土壤PAHs污染胁迫的转录响应	林康丽, 郑森林, 宋玉芳, 邱晓燕, 薛文玲(1204)
有序介孔碳载金/L-赖氨酸/纳米金修饰电极的制备及其对邻苯二酚、对苯二酚的检测响应研究	周耀渝, 汤琳, 李贞, 刘媛媛, 杨贵德, 伍梦诗, 雷晓霞, 曾光明(1211)
新建核电站风险信息沟通实证研究	贺桂珍, 吕永龙(1218)
《环境科学》征订启事(942) 《环境科学》征稿简则(992) 信息(932, 949, 1061, 1210) 专辑征稿通知(1173)	

城市表层土壤磁化率与重金属含量分布的相关性研究

陈秀端^{1,2}, 卢新卫^{1*}, 杨光¹

(1. 陕西师范大学旅游与环境学院, 西安 710062; 2. 陕西学前师范学院环境与资源管理系, 西安 710061)

摘要: 以西安城市表层土壤为对象, 测定表层土壤样品的磁化率和 Co、Cr、Cu、Pb、Sn、Sr、Ba 的含量, 探讨表层土壤 Co、Cr、Cu、Pb、Sn、Sr、Ba 含量与磁化率的空间分布规律及二者的相关性。研究表明, 西安城市表层土壤重金属含量与磁化率均具有中等程度的变异水平, 所测 7 种重金属元素的平均含量均高于西安市主要土壤类型——褐土表层土壤背景值; 土壤中 Co、Cr、Cu、Pb、Sn、Sr、Ba 的含量均与低频磁化率(χ_{LF})呈显著正相关, 而与频率磁化率(χ_{FD})呈显著负相关; 土壤低频磁化率的空间分布与重金属 Pb、Cu 的变化趋势相似, 频率磁化率则与 Co、Cr、Ba 等元素的空间变化趋势相反。污染评价结果显示, 西安市土壤重金属处于中度污染, 污染负荷指数的空间变化与磁化率指标高度相关。因此土壤磁化率可作为研究城市土壤重金属污染的辅助手段。

关键词: 表层土壤; 重金属; 空间分布; 磁化率; 城市

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)03-1086-08

Correlativity Study of the Distribution of Soil Magnetic Susceptibility and the Heavy Metal Contents in Xi'an City

CHEN Xiu-duan^{1,2}, LU Xin-wei¹, YANG Guang¹

(1. School of Tourism and Environment, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China; 2. Department of Environment and Resource Management, Shaanxi Xueqian Normal University, Xi'an 710061, China)

Abstract: The magnetic susceptibility and the concentrations of Co, Cr, Cu, Pb, Sn, Sr and Ba in topsoil samples from Xi'an City were measured to study their spatial distribution and their correlation in this study. The results show that the concentrations of all measured heavy metals are higher than their background values in Cinnamon topsoil, which is the main soil type of Xi'an City. The heavy metals concentrations and the magnetic susceptibility of the studied samples display moderate variance. Co, Cr, Cu, Pb, Sn, Sr and Ba are significantly positively correlated with low-frequency magnetic susceptibility, while are significantly negatively correlated with frequency susceptibility. The spatial distribution of low-frequency magnetic susceptibility is identical with the concentrations of Pb and Cu. However, the spatial variation of frequency magnetic susceptibility is different from the concentrations of Co, Cr and Ba. The pollution assessment results show that the heavy metal pollution in topsoil of Xi'an City is moderate. The spatial contribution of the pollution load index was significantly correlated with the magnetic susceptibility of topsoil in Xi'an City. Therefore, soil magnetic susceptibility can be used as an effective monitoring means for heavy metal pollution in urban soil.

Key words: topsoil; heavy metal; spatial distribution; magnetic susceptibility; Xi'an City

城市土壤是城市生态环境的重要组成部分, 其质量变化关系到城市生态系统的安全及城市居民健康^[1,2]。随着城市化进程的不断推进, 城市中频繁的人类活动使城市土壤遭受强烈的人为干扰, 导致城市土壤质量下降, 重金属污染日益严峻。

土壤磁化率可以反映土壤发育程度、气候、植被和生态环境等信息。利用土壤磁性特征揭示土壤重金属污染已成为土壤环境研究的重要方向之一。国内外学者针对土壤磁化率与土壤重金属污染的关系开展了大量的相关研究^[3~13]。Bechwith 等^[11]研究表明, 城市地区及高速公路附近土壤磁化率与土壤中 Fe、Pb、Zn、Cu 含量之间存在线性关系。卢瑛等^[12]研究表明, 南京市城区土壤与非城区土壤的磁化率存在显著差异, 且土壤磁化率与 Cu、Zn、Pb 含

量具有极显著正相关关系。李晓庆等^[13]对上海市宝山区土壤磁性特征和重金属含量的研究显示, 工业区土壤磁化率与土壤中 Cu、Zn、Pb、Cd、Cr、Mn、Fe 的含量存在极显著正相关关系。城市中的各种人类活动, 如化石燃料燃烧、钢铁冶炼、水泥制造、交通运输车辆尾气以及刹车制动等都会产生球状磁性微粒沉降到土壤表层, 导致土壤磁性显著增强; 同时不同人类活动产生的磁性颗粒不同, 与其伴生的金属元素也不相同^[14,15]。

收稿日期: 2012-05-24; 修订日期: 2012-07-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271510); 中央高校基本科研业务费专项(2010ZYGX014, GK200901008); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-05-0861)

作者简介: 陈秀端(1980~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为区域环境安全, E-mail: x_mary60@126.com

* 通讯联系人, E-mail: luxinwei@snnu.edu.cn

西安是我国西部地区的重要城市,是新欧亚大陆桥上的枢纽城市,联系我国西北、西南和华北地区. 近年来,西安城市发展迅速,城市化水平迅速提升,城市土壤环境压力较大. 本研究组^[16~17]曾分析了西安城市路边土壤磁化率与重金属 As、Co、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb 和 Zn 的关系,探讨了西安市二环内表层土壤重金属的空间分布特征,而有关整个市区土壤磁化率与城市土壤重金属污染的研究未见报道. 本研究以西安整个市区表层土壤为对象,在重金属含量及磁化率测定的基础上,利用地统计方法和 GIS 空间分析技术探讨土壤磁化率与重金属含量的空间变化及其关系,以期为西安市土壤重金属污染监测提供简捷、有效的科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

西安市位于关中平原中部(108°50'E~109°2'E 和 34°11'N~34°21'N),北临渭河,南依秦岭. 2011

年城市人口规模 846.78 万,建成区面积 375 km²,属于暖温带半湿润大陆性季风气候,年均气温 13~15℃,年均降水量约 500~700 mm,主导风向冬季以西北风为主,夏季以东南风、东风为主. 土壤类型主要是褐土、黄褐土. 西安是我国东西、南北联系的重要交通枢纽,交通运输发达,也是我国重要的高新技术产业及装备制造业基地. 2011 年的公共交通运营车辆 5 379 辆,城区出租车运营车辆 10 672 辆.

1.2 样品采集与处理分析

土壤样品采集点的布设采用 3S 技术,野外工作开展之前先利用 GIS 软件将研究区分成 1 120 × 1 120 m 的格网,每个格网中心确定为理论采样点,记录采样点的理论坐标;然后利用 Google Earth 遥感图像确定采样点的具体位置. 实际采样时,根据所记录的采样点信息定位采样点,同时根据周边实际情况调整采样点位置,并利用 GPS 记录实际采样点坐标;最后利用 Arcgis 软件生成采样点示意图(图 1).

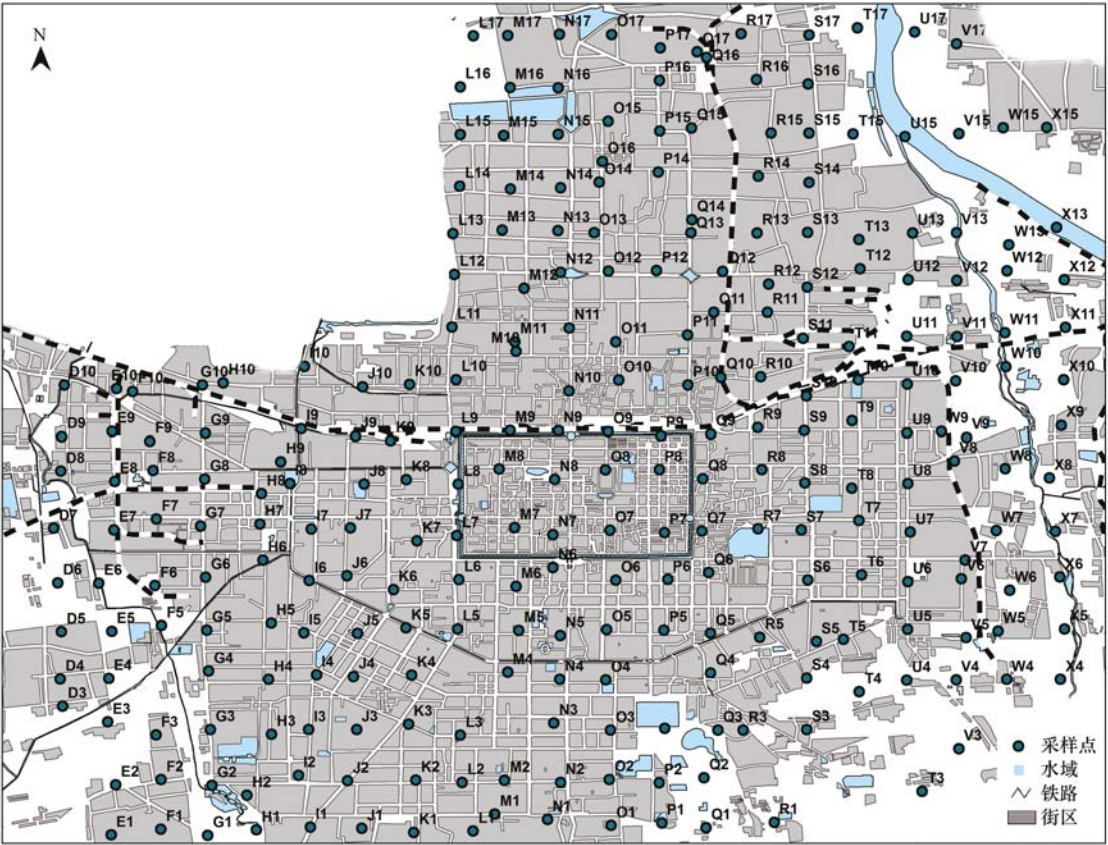


图 1 采样点示意

Fig. 1 Sketch map of soil sampling sites in the studied area

采样过程中采用混合法采集城市表层(0~20 cm)土壤样品 264 个,每个样品重约 1.5 kg. 土壤样品带回实验室后自然风干,去除小石子、草根等外

源物质,然后压碎,过 20 目筛. 称取土样 10.00 g,利用磁化率仪分别测定土壤样品的低频磁化率(χ_{LF})和低频磁化率(χ_{HF}),并计算得到频率磁化率

(χ_{FD})。三者的关系为: $\chi_{FD}(\%) = (\chi_{LF} - \chi_{HF}) / \chi_{LF} \times 100\%$ 。由于低频磁化率与高频磁化率一般高度相关,因此研究中主要采用低频磁化率(χ_{LF})和频率磁化率(χ_{FD})分析西安市表层土壤样品的磁化率与重金属含量的关系。

同时,每个样品经缩分约取 20 g 用振动磨研磨,使其粒径小于 200 目,压片。然后利用 X-荧光光谱仪(XRF)测定土壤样品中重金属元素 Co、Cr、Cu、Pb、Sn、Sr、Ba 的含量^[18],测定过程中采用标准样品(GSD-12, GSS1)和重复样进行质量控制,标准样品的测定误差范围分别是 2.27% ~ 5.71% 和 0.10% ~ 5.97%,误差均小于 10%,标准样和重复样的测定结果的标准差小于 5%,结果可信。

1.3 地统计分析方法

地统计是利用已知采样点的信息对未知点进行估计的一种方法^[19]。半方差函数是其主要手段,研究中借助于 GIS 软件对西安城市表层土壤磁化率和重金属元素含量的空间特征进行结构分析,拟合理论模型,计算重要参数块金值 C_0 、基台值 $C + C_0$ 、变程 R 以及块金系数 $C_0 / (C + C_0)$,以揭示研究要素的空间变异程度,确定地统计分析适用的理论模型。一般块金系数 $C_0 / (C + C_0) < 0.25$ 表明变量空间相关程度较强,0.25 ~ 0.7 为中等程度空间相关,>0.75 表示属于空间弱相关^[20,21]。

变程 R 是变异函数达到稳定基台值所对应的距离,反映研究要素在空间上的平均变异尺度, R 值越大说明该变量均一性越强, R 越小则均一性越弱。

克里金插值是利用已知采样点信息和半方差函数的结构性对区域内未采样点进行最优无偏估计的插值方法,常用的方法有普通克里金法、协同克里金法、泛克里金法、对数正态克里金法和析取克里金法。研究中利用 Arcgis 软件基于上述拟合的理论模型,对研究区土壤样品磁化率和元素 Co、Cr、Cu、Pb、Sn、Sr、Ba 含量进行克里金插值分析,绘制其空间分布图。

1.4 污染负荷指数评价法

污染负荷指数(pollution load index, PLI)法是 Tomlinson 等^[22]在重金属污染水平分级研究中提出的一种评价方法。该方法可避免污染指数加合关系对评价结果的影响,可较好地评价重金属的人为污染,在土壤重金属污染评价中被广泛采用^[22~24]。污染负荷指数的计算公式为:

$$CF_i = c_i / c_n$$

$$PLI = \sqrt[n]{CF_1 \times CF_2 \times \dots \times CF_n}$$

式中, CF_i 为第 i 种元素的污染因子, c_i 表示第 i 种元素的测定浓度值, c_n 表示相对应的元素的背景,研究中采用西安主要土壤类型——褐土表层土壤的背景值^[25]。单因子评价与综合指数评价的分级标准为: $CF \leq 1$ 为无污染, $1 < CF \leq 2$ 为轻度污染, $2 < CF \leq 3$ 为中度污染, $CF \geq 3$ 为重度污染^[26]; $PLI \leq 1$ 为无污染, $1 < PLI \leq 2$ 为中度污染, $2 < PLI \leq 3$ 为重度污染, $PLI \geq 3$ 为极强高度污染^[27]。

2 结果与讨论

2.1 土壤磁化率与重金属含量

研究区域土壤重金属含量及低频磁化率(χ_{LF})、频率磁化率(χ_{FD})的描述性统计结果见表 1。从中可见,西安市表层土壤中 Co、Cr、Cu、Pb、Sn、Sr、Ba 的平均含量分别为 19.95、85.11、39.03、43.53、5.03、251.88 和 580.78 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,分别为西安市主要土壤类型——褐土表层土壤背景值的 1.47、1.31、1.61、2.04、2.19、1.48、1.18 倍。除 Co 和 Sn 的标准差和方差值较小外,其余 5 种元素的标准差和方差均较大,说明样品中元素含量波动较大。变异系数的大小可以解释土壤重金属元素的空间变异程度,西安市表层土壤中元素 Co、Cr、Cu、Pb、Sn、Sr、Ba 含量的变异系数介于 10% ~ 100% 之间或大于 100%,属于中等或强变异程度^[28],说明土壤中这些元素在空间上具有较大的离散程度,其含量变化受成土因素及人类活动双重影响。

75% 的样品中 Co 含量低于 21.8 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,在土壤背景值^[25] (13.6 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 2 倍范围内,所有样品含量均在背景值的 3 倍范围内。75% 土壤样品中 Cr 含量在褐土土壤背景值(64.8 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的 1.3 倍范围内,最大值为背景值的 6.6 倍。个别样品中 Cu 的含量低于土壤背景值(24.3 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),75% 的土壤样品中 Cu 元素的含量低于 39.55 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,在背景值的 1.6 倍范围内。对于元素 Pb,仅有个别样品中 Pb 的含量低于土壤背景值(21.3 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),68% 的样品中 Pb 含量处于背景值的 2 倍范围内,22% 的样品中元素 Pb 的含量在背景值的 2 ~ 3 倍范围内。25% 的土壤样品中 Sn 的含量低于背景值(2.3 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),75% 的土壤样品中 Sn 的含量低于背景值的 3 倍。所有样品中 Sr 的含量高于土壤背景值(170 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),在背景值的 2.5 倍范围内。25% 的土壤样品中 Ba 的含量低于土壤环境背景值(493 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的 1.07 倍内,所有样品的含量都不超过背景值的 3.08 倍。

表 1 西安城市表层土壤重金属含量与磁化率描述性统计分析

Table 1 Descriptive statistics of heavy metals contents and magnetic susceptibility in topsoil in Xi'an City									
项目	$\chi_{LF} \times 10^{-8}$ / $m^3 \cdot kg^{-1}$	χ_{FD} /%	Co / $mg \cdot kg^{-1}$	Cr / $mg \cdot kg^{-1}$	Cu / $mg \cdot kg^{-1}$	Pb / $mg \cdot kg^{-1}$	Sn / $mg \cdot kg^{-1}$	Sr / $mg \cdot kg^{-1}$	Ba / $mg \cdot kg^{-1}$
平均值	154.45	6.52	19.95	85.11	39.03	43.53	5.03	251.88	580.78
最小值	64.10	0.76	14.50	62.70	21.20	19.80	0.10	177.10	480.60
最大值	531.90	10.37	38.90	429.60	792.00	506.50	28.80	415.20	1 861.50
标准差	54.96	1.92	3.40	26.88	48.48	37.12	4.32	32.77	109.25
方差	3 020.16	3.67	11.57	722.75	2 350.57	1 377.98	18.68	1 073.92	11 935.13
偏度	2.54	-0.84	1.33	9.11	14.42	8.46	2.12	0.91	6.94
峰度	10.99	0.61	3.45	106.67	223.42	95.48	6.85	2.41	73.21
变异系数%	35.58	29.38	17.05	31.59	124.22	85.29	85.92	13.01	18.81
25% 百分位数	120.18	5.43	17.40	75.90	28.30	29.33	2.13	227.83	528.53
75% 百分位数	170.28	7.92	21.80	85.88	39.55	46.13	6.75	272.70	603.60
表层褐土背景值			13.6	64.8	24.3	21.3	2.3	170	493
变换方式 K-S	对数 0.10	箱式 0.25	对数 0.16		箱式 0.77	箱式 0.39	箱式 0.68	对数 0.76	

土壤磁化率可以近似地指示土壤样品中亚铁磁性矿物的含量,低频磁化率(χ_{LF})通常高于高频磁化率(χ_{HF}),频率磁化率(χ_{FD})主要指示土壤样品中所含的细磁性颗粒物的浓度^[27]。实验结果显示,西安市表层土壤的低频磁化率(χ_{LF})的变化范围为 $64.1 \times 10^{-8} \sim 531.90 \times 10^{-8} m^3 \cdot kg^{-1}$,其平均值分别为 $154.45 \times 10^{-8} m^3 \cdot kg^{-1}$ 。频率磁化率(χ_{FD})为 0.76%~10.37%,平均值为 6.52%,指示样品中磁性矿物颗粒大小变化较大,频率磁化率的偏度为 -0.84,表明其属于左偏型,K-S 检验表明其属于正态分布。 χ_{LF} 、 χ_{FD} 的变异系数分别为 35.58%、29.38%,属于

中等程度的空间变异。

2.2 土壤重金属含量与磁化率的空间分布

K-S 检验结果表明,低频磁化率(χ_{LF})、Co 和 Sr 含量经过对数转换后属于正态分布,频率磁化率(χ_{FD})以及 Pb、Cu、Sn 的含量经 Box-cox 变换后属于正态分布,检验的显著水平见表 1。这 7 个变量经变换后,数据满足地统计分析对数据正态分布的要求。元素 Cr 和 Ba 的含量变换后仍不满足正态分布的条件。利用 Arcgis 软件在各项同向性条件下对 χ_{LF} 、 χ_{FD} 和 Pb、Co、Cu、Sn、Ba、Cr、Sr 含量的半方差函数理论模型进行拟合,结果见表 2。

表 2 半方差函数理论模型及相关参数
Table 2 Semivariogram theoretical models and related parameters

项目	块金值 C_0	基台值 $C + C_0$	变程 R/km	块金系数	理论模型
Pb	5.11E-5	8.93E-5	14.19	0.57	半球
Co	0.02	0.03	16.43	0.73	指数
Cu	4.25E-7	1.02E-6	14.84	0.42	半球
Sn	1.95	2.02	7.09	0.97	高斯
Sr	8.15E-3	1.80E-2	20.39	0.45	指数
Cr	0.81	0.99	20.39	0.82	指数
Ba	0.74	1.00	19.51	0.74	半球
χ_{LF}	0.07	0.09	14.05	0.78	指数
χ_{FD}	13.85	19.98	20.39	0.69	高斯

由表 2 可以看出,Pb、Cu 和 Ba 的半方差函数理论模型符合半球模型,Co、Sr、Cr 和 χ_{LF} 符合指数模型,Sn 和 χ_{FD} 则符合高斯模型。研究区土壤样品中低频磁化率(χ_{LF})、元素 Sn、Cr 的块金系数分别为 0.78、0.97、0.82,表明这 3 个变量空间自相关性较弱,人类活动对其变化影响较大;而频率磁化率(χ_{FD})、重金属 Pb、Co、Cu、Sr、Ba 含量的块金系数分别为 0.69、0.57、0.73、0.42、0.45、0.74,均属于中等程度的空间相关,其空间分布是受结构性因素和随机性因素共同作用的结果。城

市中的工业生产、生活、交通等活动均削弱了磁化率和重金属元素 Pb、Co、Cu、Sr、Cr、Sn、Ba 的空间相关性。

使用 Arcgis 软件下的地统计分析模块,根据上述半方差函数模型的拟合结果对低频磁化率(χ_{LF})、频率磁化率(χ_{FD})和重金属 Pb、Co、Cu、Sr、Sn 含量进行普通克里金插值,插值分布结果见图 2。由于重金属元素 Cr 和 Ba 含量不符合正态分布的地统计要求,插值时采用析取克里金插值(Disjunctive Kriging)法进行插值,插值结果见图 2。

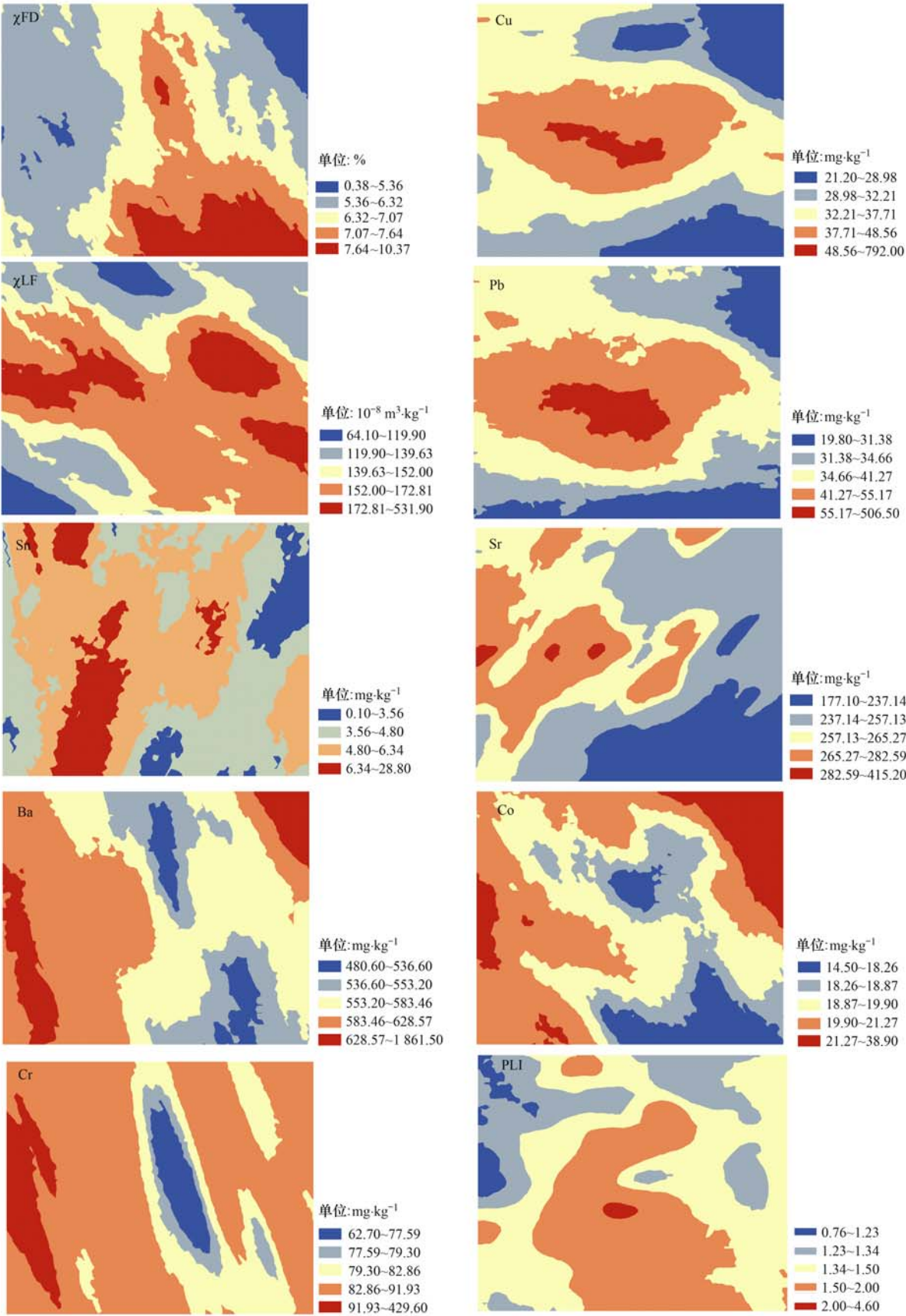


图 2 西安城市表层土壤中重金属含量与磁化率的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of magnetic susceptibility and heavy metals contents in topsoil of Xi'an City

由图 2 可以看出,西安市表层土壤的低频磁化率(χ_{LF})在空间分布上基本为自城市中部向北向南逐渐降低,在城市中部东西方向形成高值带,城市西部工业区、东二环与北二环交界的交通密集的物流区、西安火车站附近和东郊东方机械厂附近等区域的 χ_{LF} 值较高;而低值区主要分布在城市西南方向的高新技术产业开发区的西南延伸区域——长安区. 频率磁化率(χ_{FD})的空间分布在城市中部南北方向形成高值带,西部和东部地区较低;城市表层土壤中频率磁化率值较高的地区位于东南方向的曲江新区和北郊大明宫遗址公园.

西安市表层土壤中重金属元素 Pb 和 Cu 含量的空间分布呈现较为一致的特征,高值区主要分布在西安城墙内的老城区及向西的工业区和向南的人口密集区. 研究表明^[12]城市表层土壤中的 Pb 和 Cu 的累积主要来源于城市交通活动和人类生活废弃物,汽油和燃油添加剂在汽车运行中产生的颗粒物通过大气进入土壤累积而导致其中的 Pb 和 Cu 含量增高. 西安市老城区是历史悠久的人口居住区,交通路网密度大,人口稠密,人类活动对城市的土壤环境质量影响较大. 而城市东南部的国家级文化产业示范园区曲江新区和东北部的浐灞新区的表层土壤中 Pb 和 Cu 的累积则由于现代人类活动历史较短含量较少.

西安市表层土壤中元素 Co、Cr、Ba 含量的空间分布具有一定的相似性. 表层土壤中 Co 的含量的空间分布在城市西部和东部地区较高,而城市东南部的曲江新区和北部的大明宫遗址公园附近土壤中 Co 的含量较低,低于表层土壤背景值的 1.7 倍,主要是由于该区域工业活动较少,近年来交通活动才开始频繁,产生的影响时间不长,因此土壤中 Co 的污染相对较轻. 西安市表层土壤中元素 Cr 的含量表现为西部最高,东部次之,而中部呈南北向低值区的趋势,西边是西安市传统的老工业区,工业活动密集且历史悠久,工业活动对该区域土壤环境中 Cr 的累积影响较大. 西安市城市表层土壤中元素 Co 和 Cr 的空间分布具有一定的相似性. 重金属元素 Ba 在西安市的空间分布表现为西部和东北部较高

而东部地区较低的趋势,其中东南部的曲江新区、兴庆公园附近以及北郊未央路东西两侧的区域中土壤重金属元素 Ba 的含量均低于表层土壤背景值的 1.1 倍. Ba 被广泛用于柴油机及其它内燃机的清洁剂、氧化腐蚀剂和抑制黑烟添加剂,Ba 也被作为交通污染源的标识元素^[29],曲江区和北郊未央路属于西安市发展较晚的地区,人口居住密度较低,因而土壤中 Ba 含量较低.

重金属元素 Sr 的变化趋势与其他变量不同,基本呈现西高东低的变化趋势,高于表层土壤背景值的 1.7 倍的区域主要分布在城墙西北星火立交西北西安西站附近、西二环大兴立交南侧西安强力洗涤实业公司附近、西三环与阿房路之间的区域;而曲江新区和东郊十里铺浐河附近的土壤中元素 Sr 的含量较低,均在表层土壤背景值的 1.4 倍以下. Sr 的来源比较复杂,可能来源于交通污染、工业活动的三废等,并且可以在土壤中久存,半衰期较长^[30],西安市表层土壤中的 Sr 含量的高值区也分布在交通相对密集和工业活动时间较长的地区.

综上所述,西安市表层土壤中重金属元素 Pb 和 Cu 的空间分布与低频磁化率(χ_{LF})和高频磁化率(χ_{HF})的空间分布具有一定的相似性,而元素 Co、Cr、Ba 的空间分布则与频率磁化率有相反的变化趋势,因此城市表层土壤中重金属元素与磁化率在空间分布上具有相关性,说明土壤样品的磁化率可以在一定程度上反映本区域土壤重金属的污染程度.

2.3 土壤重金属含量与磁化率的相关关系

土壤频率磁化率可以粗略解释土壤样品中超顺磁颗粒的比例,与其相关的重金属元素主要来自于土壤的风化过程与成壤作用. 土壤频率磁化率和重金属呈负相关或相关性较差的元素主要来自于人为因素的输入,呈现显著正相关的元素主要来自于土壤母质^[31]. 利用 SPSS 13.0 分析 7 种重金属元素与低频磁化率(χ_{LF})和频率磁化率(χ_{FD})的皮尔逊相关系数,分析结果见表 3.

研究表明,在置信水平为 0.01 水平下,低频磁化率(χ_{LF})与 Co、Cr、Cu、Pb、Sn、Sr、Ba 两两之间的相

表 3 西安城市表层土壤重金属含量与磁化率的相关系数¹⁾

Table 3 Pearson's correlation coefficient of magnetic susceptibility and heavy metal concentration in topsoil of Xi'an City										
	χ_{LF}	χ_{FD}	Co	Cr	Cu	Pb	Ba	Sn	Sr	PLI
χ_{LF}	1.00	-0.48**	0.31**	0.34**	0.18**	0.42**	0.37**	0.21**	0.42**	0.52**
χ_{FD}		1.00	-0.55**	-0.33**	-0.18**	-0.29**	-0.47**	-0.14*	-0.59**	-0.43**

1) ** 在 0.01 水平(双侧)上显著相关; * 在 0.05 水平(双侧)上显著相关

关系数均较高,呈显著正相关;而频率磁化率(χ_{FD})与重金属 Co、Cr、Cu、Pb、Sr、Ba 的含量在 0.01 水平下呈显著负相关,Sn 含量则在 0.05 水平下与 χ_{FD} 呈显著负相关. 由于这 7 种重金属元素均与频率磁化率呈显著负相关,表明西安市表层土壤中这 7 种重金属元素的含量变化均与西安市的各种人为活动有关. 城市中化石燃料的燃烧、钢铁、水泥等工业生产以及交通的发展都会产生大量磁性小颗粒,进入城市表层土壤造成城市表层土壤磁化率升高^[31].

依据污染负荷指数的公式计算得到 7 种重金属

元素的污染因子,计算结果表明西安市表层土壤中 Pb 的污染为中度污染($CF = 2.04$),其余 6 种元素的污染累积程度由高到低分别为: $Sn > Cu > Sr > Co > Cr > Ba$,均为轻度污染,其污染因子分别为 1.76、1.61、1.48、1.47、1.31、1.18. 选择污染较严重的几种元素(Cu、Pb、Sn),重点分析其与磁化率的相关性,为避免极值对于分析结果的影响,研究中采用三倍标准差法^[32]剔除异常值,然后利用 Excel 做出几种重金属元素含量与相应磁化率的线性相关性关系图,如图 3.

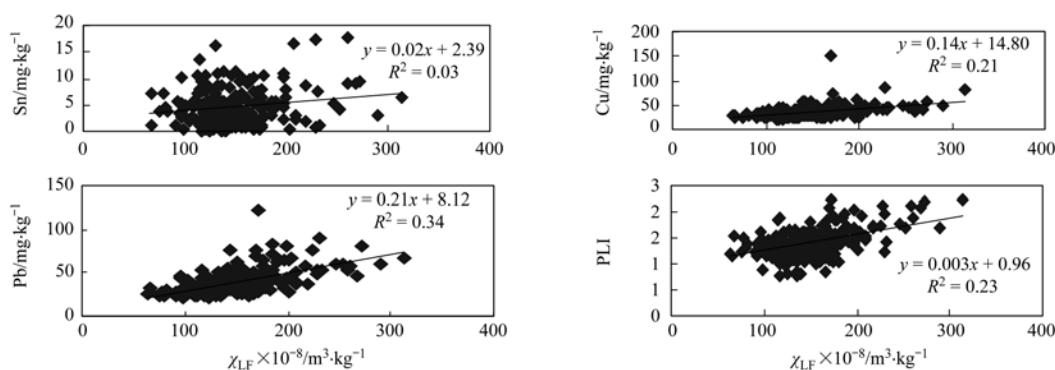


图 3 西安市城市表层土壤中重金属元素含量、PLI 与磁化率的线性相关

Fig. 3 Linear correlative map of magnetic susceptibility and heavy metals contents, PLI in topsoil of Xi'an City

2.4 土壤重金属污染的空间变化

根据前述公式计算 264 个采样点的污染负荷指数(PLI),并利用 SPSS 软件对 PLI 与低频磁化率(χ_{LF})、频率磁化率(χ_{FD})做相关分析,结果如表 3、图 4.

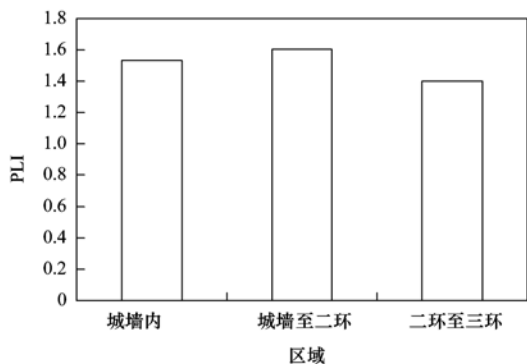


图 4 西安市土壤重金属污染负荷指数的空间变化

Fig. 4 Spatial distribution of pollution load index in topsoil of Xi'an City

可知,污染负荷指数 PLI 与 χ_{LF} 的相关系数为 0.52,在置信水平 0.01 下呈显著正相关,而与 χ_{FD} 则在置信 0.01 水平下呈显著负相关,相关系数为 -0.43. 重金属污染负荷指数 PLI 的空间变化见图 2、图 4. 西安市表层土壤中 7 种重金属元素的污染

负荷指数为 1.46,属于中度污染. 城墙内的 PLI 为 1.53,城墙至二环内为 1.60,二环至三环为 1.40,城墙至二环内土壤重金属的污染负荷指数相对较高,主要是由于西安城墙内为西安市的保护区域,几乎没有工业企业分布,二环至三环间属于西安市的新兴发展区域,城墙至二环内则属于西安市发展比较成熟的区域,工业企业分布较多,交通密集. 西安市表层土壤重金属污染在强度以上($PLI > 2$)的区域主要分布在西安市城墙西北区域和城墙东门附近,大多数区域属于中度污染. 西安市土壤重金属污染负荷指数的空间分布与 χ_{LF} 有相似的变化趋势,西部工业区的污染较重, χ_{LF} 值也较高,而 PLI 的高值区与 χ_{FD} 的低值区具有相近的分布特征,因此借助磁化率对区域进行普查,确定重金属污染异常区域,再进一步详查重金属污染状况是可行的研究方法.

3 结论

(1) 西安市表层土壤中 Co、Cr、Cu、Pb、Sn、Sr、Ba 的含量高于西安市主要土壤类型——褐土的表层土壤背景值,且具有较强的空间离散程度.

(2) 研究区表层土壤磁化率异常区与重金属元素异常区有较强的相关性,低频磁化率(χ_{LF})与 Pb、

Cu 分布具有较强的相似性,Co、Cr、Ba 的空间分布与频率磁化率有相反的变化趋势.磁化率和重金属元素含量的异常均受成土母质和人类活动的双重影响.

(3)Co、Cr、Cu、Pb、Sn、Sr、Ba 与低频磁化率(χ_{LF})均呈显著正相关,与频率磁化率(χ_{FD})呈显著负相关.

(4)磁化率可反映土壤重金属元素的污染程度.在区域土壤环境监测中,可以利用简单易行的磁化率进行前期普查,然后有重点地选择异常区进行详查.

参考文献:

- [1] 钱翌,张玮,冉德超.青岛城市土壤重金属的形态分布及影响因素分析[J].环境化学,2011,30(3):652-657.
- [2] 黄勇,郭庆荣,任海,等.城市土壤重金属污染研究综述[J].热带地理,2005,25(1):14-18.
- [3] 王芳,魏芳.石家庄裕华路西段道路尘与表土重金属污染[J].环境科学与管理,2009,34(10):131-134.
- [4] 余涛,杨忠芳,岑静,等.磁化率对土壤重金属污染的指示性研究——以沈阳新城子区为例[J].现代地质,2008,22(6):1034-1040.
- [5] 陈秀玲,李志忠,靳建辉,等.福州城市土壤 pH 值、有机质和磁化率特征研究[J].水土保持通报,2011,31(5):176-181.
- [6] 郭军玲,张春梅,卢升高.城市污染土壤中磁性物质对重金属的富集作用[J].土壤通报,2009,40(6):1421-1425.
- [7] 郑妍,张世红.北京市区尘土与表土的磁学性质及其环境意义[J].科学通报,2007,52(20):2399-2406.
- [8] 张果,胡雪峰,吴小红,等.上海城市土壤磁化率的垂向分布特征及环境指示意义[J].土壤学报,2011,48(2):429-434.
- [9] 陈秀玲,李志忠,姜修洋,等.福州盆地不同土地利用方式下土壤磁化率特征[J].福建师范大学学报(自然科学版),2012,24(3):87-93.
- [10] 朱艳明,郭小蕾,周力平.北京地区表土磁性特征及其环境意义[J].科学通报,2010,55(17):1717-1725.
- [11] Bechwith P R, Ellis J B, Revitt D M. Heavy metal and magnetic relationships for urban source sediments[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 1986, 42(1-2): 67-75.
- [12] 卢瑛,龚子同,张甘霖.城市土壤磁化率特征及其环境意义[J].华南农业大学学报,2001,22(4):26-28.
- [13] 李晓庆,胡雪峰,孙为民,等.城市土壤污染的磁学监测研究[J].土壤,2006,38(1):66-74.
- [14] 王博,夏敦胜,余晔,等.环境磁学在监测城市河流沉积物污染中的应用[J].环境科学学报,2011,31(9):1979-1991.
- [15] 王博,赵爽,夏敦胜,等.兰州市城区河道表层沉积物重金属污染及磁学参数相关关系研究[J].环境科学,2011,32(5):1430-1440.
- [16] 陈景辉,卢新卫.西安城市路边土壤磁化率特征及其环境意义[J].陕西师范大学学报(自然科学版),2011,39(5):76-82.
- [17] 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.
- [18] Lu X, Wang L, Li L Y, et al. Multivariate statistical analysis of heavy metals in street dust of Baoji, NW China[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 173(1-3): 744-749.
- [19] 王宏,吕殿青,刘庆,等.经济快速发展城郊区土壤重金属空间分布及潜在生态危害评价——以慈溪市横河镇为例[J].热带地理,2011,31(6):559-564.
- [20] 王利东,李朝奎,李吟.基于地统计学模型的惠州市土壤重金属污染评价[J].矿业工程研究,2011,26(1):65-70.
- [21] 李勇,周永章,张澄博,等.基于局部 Moran's I 和 GIS 的珠江三角洲肝癌高发区蔬菜土壤中 Ni、Cr 的空间热点分析[J].环境科学,2010,31(6):1617-1623.
- [22] Angulo E. The Tomlinson pollution load index applied to heavy metal 'Mussel-Watch' data: a useful index to assess coastal pollution[J]. Science of the Total Environment, 1996, 187(1): 19-56.
- [23] Chan L S, Ng S L, Davis A M, et al. Magnetic properties and heavy-metal contents of contaminated seabed sediments of Penny's bay, Hong Kong[J]. Marine Pollution Bulletin, 2001, 42(7): 569-583.
- [24] Canbay M, Aydin A, Kurtulus C. Magnetic susceptibility and heavy-metal contamination in topsoils along the Izmit Gulf coastal area and IZAYTAS (Turkey) [J]. Journal of Applied Geophysics, 2010, 70(1): 46-57.
- [25] 中国环境监测总站.中国土壤元素背景值[M].北京:中国科学出版社,1990.94-115.
- [26] 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.
- [27] 汤洁,天琴,李海毅,等.哈尔滨市表土重金属地球化学基线的确定及污染程度评价[J].生态环境学报,2010,19(10):2408-2413.
- [28] 王绍强,周成虎,李克让,等.中国土壤有机碳库及空间分布特征分析[J].地理学报,2000,55(5):533-544.
- [29] 王学松,秦勇.徐州城市表层土壤中重金属元素的富集特征与来源识别[J].中国矿业大学学报,2006,35(1):84-88.
- [30] 李增福,朱继业,王腊春.合肥市城市土壤重金属元素含量及空间分布特征[J].城市环境与城市生态,2009,22(3):24-27.
- [31] 王学松.城市表层土壤重金属富集淋滤特征与磁学响应[M].北京:中国环境科学出版社,2009.212-258.
- [32] 鲍士旦.土壤农化分析[M].(第三版).北京:中国农业出版社,2011.443-480.

CONTENTS

Estimation of PM _{2.5} over Eastern China from MODIS Aerosol Optical Depth Using the Back Propagation Neural Network	GUO Jian-ping, WU Ye-rong, ZHANG Xiao-ye, <i>et al.</i> (817)
Comparison of Atmospheric Particulate Matter and Aerosol Optical Depth in Beijing City	LIN Hai-feng, XIN Jin-yuan, ZHANG Wen-yu, <i>et al.</i> (826)
Impacts of Meteorological Factors on Atmospheric Methane Mole Fractions in the Background Area of Yangtze River Delta	PU Jing-jiao, XU Hong-hui, GU Jun-qiang, <i>et al.</i> (835)
Dispersion and Analysis of Odor Pollution in Landfill Area Under the Enclosed Operation Condition	LU Peng, WU Shi-xing, DAI Zhi-feng, <i>et al.</i> (842)
Distribution Characteristics and Sea-Air Fluxes of Volatile Halocarbons in the East China Sea in Winter	HE Zhen, LU Xiao-lan, YANG Gui-peng (849)
Intra- and Inter-annual Variabilities of Particulate Organic Matter in the Mirs Bay from 2000 to 2010	LI Xu-lu, ZHOU Yi-pin, XIA Hua-yong (857)
Phytoplankton Assemblages and Their Relation to Environmental Factors by Multivariate Statistic Analysis in Bohai Bay	ZHOU Ran, PENG Shi-tao, QIN Xue-bo, <i>et al.</i> (864)
Characteristics and Evolution of Hydrochemical Compositions of Freshwater Lake in Tibetan Plateau	WANG Peng, SHANG Ying-nan, SHEN Li-cheng, <i>et al.</i> (874)
Estimation of Nonpoint Source Pollutant Loads and Optimization of the Best Management Practices (BMPs) in the Zhangweinan River Basin	XU Hua-shan, XU Zong-xue, LIU Pin (882)
An Object-Oriented Intelligent Engineering Design Approach for Lake Pollution Control	ZOU Rui, ZHOU Jing, LIU Yong, <i>et al.</i> (892)
Contribution of Plant Litters to Sediments Organic Matter in Jiulong River Estuary Wetland	LUO Zhuan-xi, QIU Zhao-zheng, WANG Zhen-hong, <i>et al.</i> (900)
Application of Tiered Approach to Assess the Impact of Backfilling Remediated Soil on Groundwater	ZHONG Mao-sheng, JIANG Lin, YAO Jue-jun, <i>et al.</i> (907)
Removal of Nitrate from Groundwater Using Permeable Reactive Barrier	LI Xiu-li, YANG Jun-jun, LU Xiao-xia, <i>et al.</i> (914)
Research on Pollution Load of Sediments in Storm Sewer in Beijing District	LI Hai-yan, XU Bo-ping, XU Shang-ling, <i>et al.</i> (919)
Occurrence and Risk Assessment of Five Selected PPCPs in Municipal Wastewater Treatment Plant and the Receiving Water	WEN Zhi-hao, DUAN Yan-ping, MENG Xiang-zhou, <i>et al.</i> (927)
Microbial Risk Assessment of Urban Water Bodies for Aesthetical and Recreational Uses	SUN Fu, SHA Jing, ZHANG Yi-fan, <i>et al.</i> (933)
Study on Removal of Di-(2-Ethylhexyl) Phthalate by Using of Small-Scale Biological Aerated Filter	LI Wei, ZHAO Jing, YU Jian, <i>et al.</i> (943)
Mechanism of Membrane Fouling and Filtration Characteristics in a Membrane Bioreactor for Industrial Wastewater Treatment	FAN Ju-hong, YU Su-lin, ZHANG Pei-shuai, <i>et al.</i> (950)
Enhanced Electro-Chemical Oxidation of Acid Red 3R Solution with Phosphotungstic Acid Supported on γ -Al ₂ O ₃	YUE Lin, WANG Kai-hong, GUO Jian-bo, <i>et al.</i> (955)
Degradation Kinetics of Activated Carbon Catalyzed Persulfate Oxidation Orange G	YANG Mei-mei, ZHOU Shao-qi, LIU Dan, <i>et al.</i> (962)
Study on the Start-up of the Anaerobic Baffled Reactor for Treating Alkali-dewighting and Dyeing-printing Wastewater	YANG Bo, ZHONG Qi-jun, LI Fang, <i>et al.</i> (968)
Study on the Pollutants Removal Performance Along the Advanced Treatment in Tannery Wastewater by O ₃ -BAF	YU Bin, LIU Rui, CHENG Jia-di, <i>et al.</i> (974)
Effect of Pilot UASB-SFSBR-MAP Process for the Large Scale Swine Wastewater Treatment	WANG Liang, CHEN Chong-jun, CHEN Ying-xu, <i>et al.</i> (979)
Cultivation of Aerobic Granular Sludge with Municipal Wastewater and Studies on Its Characteristics Under the Continuous Flow	NIU Shu, DUAN Bai-chuan, ZHANG Zuo-li, <i>et al.</i> (986)
Kinetic Model of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Mixed Acetic and Propionic Acids as Carbon Sources (I) : Model Constitution	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang (993)
Kinetic Model of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Mixed Acetic and Propionic Acids as Carbon Sources (II) : Process Simulation	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang (998)
Kinetic Model of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Mixed Acetic and Propionic Acids as Carbon Sources (III) : Model Application	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang (1004)
Comparative Study on Water-air CO ₂ , CH ₄ Flux in Two Tributaries in the Three Gorges Reservoir, China	LI Zhe, BAI Lei, GUO Jin-song, <i>et al.</i> (1008)
Factors Influencing the Spatial Variability in Soil Respiration Under Different Land Use Regimes	CHEN Shu-tao, LIU Qiao-hui, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1017)
Differences in Soil Respiration Between Cropland and Grassland Ecosystems and Factors Influencing Soil Respiration on the Loess Plateau	ZHOU Xiao-gang, ZHANG Yan-jun, NAN Ya-fang, <i>et al.</i> (1026)
Application and Benefit Evaluation of Tiered Health Risk Assessment Approach on Site Contaminated by Benzene	JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, LIANG Jin, <i>et al.</i> (1034)
History of Heavy Metal Pollution from Tidal Flat in Haizhou Bay	ZHANG Rui, ZHANG Fan, LIU Fu-cheng, <i>et al.</i> (1044)
Accumulation, Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Surface Sediment of Caohai Plateau Wetland, Guizhou Province	ZHANG Qing-hai, LIN Chang-hu, TAN Hong, <i>et al.</i> (1055)
Assessment and Correlation Analysis of Heavy Metals Pollution in Soil of Dajinshan Island	CHENG Fang, CHENG Jin-ping, SANG Heng-chun, <i>et al.</i> (1062)
Fraction Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Stream Sediments from a Typical Nonferrous Metals Mining City	LI Ru-zhong, JIANG Yan-min, PAN Cheng-rong, <i>et al.</i> (1067)
Contamination and Health Risk for Heavy Metals via Consumption of Vegetables Grown in Fragmentary Vegetable Plots from a Typical Nonferrous Metals Mine City	LI Ru-zhong, PAN Cheng-rong, XU Jing-jing, <i>et al.</i> (1076)
Correlativity Study of the Distribution of Soil Magnetic Susceptibility and the Heavy Metal Contents in Xi'an City	CHEN Xiu-duan, LU Xin-wei, YANG Guang (1086)
Distribution Characteristics and Environmental Significance of Heavy Metals in Soil Particle Size Fractions from Tropical Forests in China	GONG Cang, XU Dian-dou, CHENG Hang-xin, <i>et al.</i> (1094)
Study on Phosphorus Adsorption Characteristic of Sediments in an Ecological Ditch	ZHANG Shu-nan, JIA Zhao-yue, XIAO Run-lin, <i>et al.</i> (1101)
Fractions and Adsorption Characteristics of Phosphorus on Sediments and Soils in Water Level Fluctuating Zone of the Pengxi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir	SUN Wen-bin, DU Bin, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i> (1107)
Sorption Behavior of Triton X-100 on Loess and Affecting Factors	ZHONG Jin-kui, ZHAO Bao-wei, ZHU Kun, <i>et al.</i> (1114)
Residual Levels in Air, Soil and Soil-Air Exchange of Organochlorine Pesticides in Hami Region of Xinjiang and Its Potential Ecological Risk	MA Zi-long, MAO Xiao-xuan, DING Zhong-yuan, <i>et al.</i> (1120)
Levels and Sources of Decabromodiphenyl Ether and Dechlorane Plus in Xining and Tianjun, Qinghai Province, China	HE Chang, JIN Jun, MA Zhao-hui, <i>et al.</i> (1129)
Vertical Distribution of PBDEs and DL-PCBs in Sediments of Taihu Lake	MA Zhao-hui, JIN Jun, QI Xue-kui, <i>et al.</i> (1136)
Characteristics of Organic Pollutants in the Sediments from a Typical Electronics Industrial Zone	LIU Jin, DENG Dai-yong, XU Mei-ying, <i>et al.</i> (1142)
Emission Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Exhaust Particles from a Diesel Car	TAN Pi-qiang, ZHOU Zhou, HU Zhi-yuan, <i>et al.</i> (1150)
Characterization of PAHs in Fly Ashes from Coke Production	MU Ling, PENG Lin, LIU Xiao-feng, <i>et al.</i> (1156)
Comparison of PAHs Distribution in Stabilized Sludge by Sludge Drying Bed and Reed Bed	CUI Yu-bo, SUN Hong-jie, RAN Chun-qiu, <i>et al.</i> (1161)
Effects of Adsorbents on Partitioning and Fixation of Heavy Metals in the Incineration Process of Sewage Sludge	LIU Jing-yong, SUN Shui-yu, CHEN Tao (1166)
Environmental Toxicity of Waste Foundry Sand	ZHANG Hai-feng, WANG Yu-jue, WANG Jin-lin, <i>et al.</i> (1174)
Construction and Properties of a Microbial Whole-cell Sensor CB10 for the Bioavailability Detection of Cr ⁶⁺	HOU Qi-hui, MA An-zhou, ZHUANG Xu-liang, <i>et al.</i> (1181)
Structure and Dynamics of Microbial Community in the Denitrifying Sulfide Removal Process	YU Hao, WANG Ai-jie, CHEN Chuan (1190)
Effects of Physico-chemical Parameters on the Abundance of the Denitrification-associated Genes <i>nirK</i> , <i>nirS</i> and <i>nosZ</i> During Agricultural Waste Composting	HU Chun-xiao, CHEN Yao-ning, ZHANG Jia-chao, <i>et al.</i> (1196)
Impact of PAHs on the Expression of PRDX in Earthworm (<i>Eisenia fetida</i>)	LIN Kang-li, ZHENG Sen-lin, SONG Yu-fang, <i>et al.</i> (1204)
Preparation of OMC-Au/L-Lysine/Au Modified Glassy Carbon Electrode and the Study on Its Detection Response to Hydroquinone and Catechol	ZHOU Yao-yu, TANG Lin, LI Zhen, <i>et al.</i> (1211)
Risk Communication in Construction of New Nuclear Power Plant	HE Gui-zhen, LÜ Yong-long (1218)

《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3月15日 34卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 3 Mar. 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

国内外公开发行人