

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第2期

Vol.33 No.2

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于人体健康风险的水污染事件污染物安全阈值研究	郑丙辉, 罗锦洪, 付青, 秦延文, 胡林林 (337)
基于人体健康风险的水污染事件遗传性致癌物安全浓度研究	罗锦洪, 郑丙辉, 付青, 黄民生 (342)
湿地水环境健康评价方法及案例分析	李玉凤, 刘红玉, 郝敬峰, 郑因, 曹晓 (346)
北运河下游典型河网区水体中氮磷分布与富营养化评价	单保庆, 菅宇翔, 唐文忠, 张洪 (352)
漳卫南运河流域水质时空变化特征及其污染源识别	徐华山, 徐宗学, 唐芳芳, 于伟东, 程燕平 (359)
黄河三角洲浅层地下水化学特征及形成作用	安乐生, 赵全升, 叶思源, 刘贯群, 丁喜桂 (370)
沉积物扰动持续时间对悬浮物中磷形态数量分布的影响	李大鹏, 黄勇, 李勇, 潘杨 (379)
沉水植物生长期对沉积物和上覆水之间磷迁移的影响	王立志, 王国祥, 俞振飞, 周贝贝, 陈秋敏, 李振国 (385)
长寿湖表层沉积物氮磷和有机质污染特征及评价	卢少勇, 许梦爽, 金相灿, 黄国忠, 胡文 (393)
洪泽湖沉积物中营养盐和重金属的垂向分布特征研究	张文斌, 余辉 (399)
降雨对农家堆肥氮磷流失的影响及其面源污染风险分析	彭莉, 王莉玮, 杨志敏, 陈玉成, 乔俊婧, 赵中金 (407)
浅水湖泊水动力过程对藻型湖区水体生物光学特性的影响	刘笑菡, 冯龙庆, 张运林, 赵林林, 朱梦圆, 时志强, 殷燕, 丁艳青 (412)
基于半分析模型的太湖春季水体漫衰减系数 K_d (490) 估算及其遥感反演	刘忠华, 李云梅, 李瑞云, 吕恒, 檀静, 郭宇龙 (421)
基于 QAA 算法的巢湖悬浮物浓度反演研究	张红, 黄家柱, 李云梅, 徐伟凡, 刘忠华, 徐昕 (429)
好氧/厌氧潜流湿地结构工艺优化	李锋民, 单时, 李媛媛, 李扬, 王震宇 (436)
邻苯二甲酸二丁酯对短裸甲藻活性氧自由基的影响	别聪聪, 李锋民, 李媛媛, 王震宇 (442)
Rac-及 S-异丙甲草胺对 2 种微藻毒性特征影响研究	蔡卫丹, 刘惠君, 方治国 (448)
羟基自由基致死船舶压载水海洋有害生物研究	白敏冬, 张拿慧, 张芝涛, 陈操, 孟祥盈 (454)
天然菱铁矿改性及强化除砷研究	赵凯, 郭华明, 李媛, 任燕 (459)
零价铁降解 4-氯硝基苯动力学研究	廖娣劫, 杨琦, 李俊鎔 (469)
水体中氧氟沙星的光化学降解研究	邵萌, 杨桂朋, 张洪海 (476)
阿替洛尔在硝酸根溶液中的光降解研究	季跃飞, 曾超, 孟翠, 杨曦, 高士祥 (481)
吡啶在紫外光辐射下的生物降解	方苗苗, 阎宁, 张永明 (488)
蜜环菌漆酶对蒽醌类染料的脱色条件优化	朱显峰, 秦仁炳, 余晨晨, 范书军 (495)
ϵ -聚赖氨酸生产废菌体对六价铬吸附影响的研究	曹玉娟, 张杨, 夏军, 徐虹, 冯小海 (499)
丝状菌污泥致密过程的强化条件研究	李志华, 孙玮, 姬晓琴, 王晓昌 (505)
亚硝化颗粒污泥对温度变化的响应特性研究	罗远玲, 杨朝晖, 徐峥勇, 周玲君, 黄兢, 肖勇, 曾光明, 汪理科 (511)
我国典型工程机械燃油消耗量及排放清单研究	李东玲, 吴烨, 周昱, 杜让, 傅立新 (518)
北京市 PM_{10} 自动监测网络优化研究	齐玲, 赵越, 谢绍东 (525)
道路绿化带对街道峡谷内污染物扩散的影响研究	徐伟嘉, 幸鸿, 余志 (532)
Fe^{II} (EDTA) 络合协同 RDB 去除 NO 废气效能及过程分析	陈浚, 杨宣, 於建明, 蒋轶锋, 陈建孟 (539)
UV-B 辐射对亚热带森林凋落叶氮、磷元素释放的影响	宋新章, 张慧玲, 江洪, 余树全 (545)
干热河谷林地燥红土固碳特征及“新固定”碳表观稳定性	唐国勇, 李昆, 孙永玉, 张春华 (551)
九龙江河口表层水体及沉积物中甲烷的分布和环境控制因素研究	郭莹莹, 陈坚, 尹希杰, 孙治雷, 邵长伟 (558)
秋季黄河口滨岸潮滩湿地系统 CH_4 通量特征及影响因素研究	姜欢欢, 孙志高, 王玲玲, 牟晓杰, 孙万龙, 宋红丽, 孙文广 (565)
我国典型非木浆造纸二噁英排放研究	王志芳, 丁琼, 王开祥, 吴昌敏, 曲云欢, 赵晓冬 (574)
典型电器工业区河涌沉积物中的多溴联苯醚空间和垂直分布	邱孟德, 邓代永, 余乐洹, 孙国萍, 麦碧娴, 许玫英 (580)
电子废物拆解区农业土壤中多氯联苯的污染特征	王学彤, 李元成, 张媛, 缪绎, 孙阳昭, 吴明红, 盛国英, 傅家谟 (587)
北京科教园区绿地土壤中多环芳烃的残留特征与潜在风险	彭驰, 王美娥, 欧阳志云, 焦文涛, 陈卫平 (592)
上海城市样带土壤重金属空间变异特征及污染评价	柳云龙, 章立佳, 韩晓非, 庄腾飞, 施振香, 卢小遮 (599)
海河流域北部地区河流沉积物重金属的生态风险评价	尚林源, 孙然好, 王赵明, 汲玉河, 陈利顶 (606)
三峡库区消落带不同水位高程土壤重金属含量及污染评价	王业春, 雷波, 杨三明, 张晟 (612)
超声波促进好氧/缺氧污泥消化过程中细菌群落结构分析	叶运弟, 孙水裕, 郑莉, 刘宝健, 蔡明山, 许燕滨, 占星星 (618)
大庆聚驱后油藏内源微生物群落结构解析与分布特征研究	赵玲侠, 高配科, 曹美娜, 高梦黎, 李国强, 朱旭东, 马挺 (625)
不同碳源刺激对老化污染土壤中 PAHs 降解研究	尹春芹, 蒋新, 王芳, 王聪颖 (633)
应用电致化学发光分子探针技术对微小原甲藻的检测	朱霞, 甄毓, 米铁柱, 于志刚, 池振明, 路兴岚 (640)
软骨藻酸直接竞争 ELISA 方法的建立及优化	王茜, 程金平, 高利利, 董宇, 席磊 (647)
固相萃取-高效液相色谱法同时测定水体中的 10 种磺胺类抗生素	洪蕾洁, 石璐, 张亚雷, 周雪飞, 朱洪光, 林双双 (652)
五氯酚对 HeLa 细胞毒性及 DNA 损伤的研究	金帮明, 王辅明, 熊力, 张晓峰, 刘堰 (658)
建筑陶瓷碳计量与优化模型研究	彭军霞, 赵宇波, 焦丽华, 曾路, 郑为民 (665)
《环境科学》征订启事 (447)	《环境科学》征稿简则 (475)
信息	(524, 586, 605, 624)

上海城市样带土壤重金属空间变异特征及污染评价

柳云龙¹, 章立佳¹, 韩晓非², 庄腾飞¹, 施振香¹, 卢小遮¹

(1. 上海师范大学地理系, 上海 200234; 2. 上海闵行区环境保护局, 上海 201100)

摘要: 为揭示城市化、工业化等人为活动对土壤环境质量的影响, 选择能反映上海城郊乡梯度差异的城市样带, 采用地统计学方法对表层土壤样品 Cu、Zn、Pb、Cr、Mn 共 5 种重金属的空间变异结构和分布格局进行了分析, 并利用单因子指数法和内梅罗综合指数法评价了土壤重金属的污染程度. 结果表明: 土壤样品 Cu、Pb、Zn、Cr、Mn 这 5 种重金属平均含量分别为 27.80、28.86、99.36、87.72、556.97 mg·kg⁻¹. 表层土壤 Cu、Cr、Mn、Pb、Zn 均属中等变异, Mn、Cr 呈正态分布, Cu、Pb、Zn 呈对数正态分布; 半方差函数模型拟合结果显示 Cu、Pb、Zn、Cr 符合线状模型, Mn 符合指数模型. 通过泛克里格插值得到城市样带表层土壤重金属含量空间分布图, 发现 Cu 呈条带状, Cr、Mn 呈岛状, Pb、Zn 呈条带和岛状分布相结合的特点. 土壤污染评价结果说明土壤 Cr、Zn、Pb 污染相对严重. 土壤 Cr、Zn、Pb、Mn 和 Cu 之间呈显著相关, 土壤重金属之间表现为复合污染. 土壤重金属污染城郊乡梯度差异明显, 工业化、城市化与城市土壤重金属空间分布密切相关.

关键词: 城市样带; 土壤重金属; 地统计学; 空间变异; 污染评价

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)02-0599-07

Spatial Variability and Evaluation of Soil Heavy Metal Contamination in the Urban-transect of Shanghai

LIU Yun-long¹, ZHANG Li-jia¹, HAN Xiao-fei², ZHUANG Teng-fei¹, SHI Zhen-xiang¹, LU Xiao-zhe¹

(1. Geography Department, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China; 2. Minhang Environment Protection Bureau, Shanghai 201100, China)

Abstract: Soil heavy metal concentrations along the typical urban-transect in Shanghai were analyzed to indicate the effect of urbanization and industrialization on soil environment quality. Spatial variation structure and distribution of 5 heavy metals (Cu, Cr, Mn, Pb and Zn) in the top soil of urban-transect were analyzed. The single pollution index and the composite pollution index were used to evaluate the soil heavy metal pollution. The results showed that the average concentrations of the Cu, Pb, Zn, Cr, Mn were 27.80, 28.86, 99.36, 87.72, 556.97 mg·kg⁻¹, respectively. Cu, Cr, Mn, Pb and Zn were medium in variability, Mn was distributed lognormally, while Cu, Cr, Pb and Zn were distributed normally. The results of semivariance analysis showed that Mn was fit for the exponential model, Cr, Pb, Cu and Zn were fit for the linear model. The spatial distribution maps of heavy metal content of the topsoil in this city-transect were produced by means of the universal kriging interpolation. Cu was spatially distributed in ribbon, Cr and Mn were distributed in island, while the spatial distribution of Pb and Zn showed the mixed characteristic of ribbon and island. With the result of soil pollution evaluation, it showed that the pollution of Cr, Zn and Pb was relatively severe. Cr, Zn, Pb, Mn and Cu were significantly correlated, and heavy metal co-contamination existed in soil. Difference of soil heavy metals pollution along "Urban-suburban-rural" was obvious, the special variation of heavy metal concentrations in the soil closely related to the degree of industrialization and urbanization of the city.

Key words: urban transect; soil heavy metals; geostatistics; spatial variability; pollution assessment

城市化发展和城市人口的高度集中带来了用地紧张、交通拥挤、环境污染等问题, 也对城市土壤环境产生了深刻影响. 与自然土壤相比, 城市土壤受人类活动强烈影响, 城市土壤重金属来源、积累、分布和运移的主要因素更加复杂^[1~8]. 城市重金属污染主要涉及 Cu、Zn、Pb、Hg, 城市土壤重金属元素已有不同程度积累, 并通过大气、水体或食物链直接或间接地影响人体健康^[9,10]. 城市重金属污染有独特而复杂的空间分布特征, 总体来说城市土壤重金属含量高于郊区及农田土壤的含量^[1~3, 10~11]. 城市土壤会出现某些重金属元素严重富集的“岛屿现象”, 在

不同功能区甚至同一功能区差异明显^[12~18]. 不同土地利用状况、频繁的人类干扰、距离污染源远近, 进而使得不同城市重金属的来源、含量不同, 同一城市土壤重金属含量也存在显著的空间差异^[18~22]. 利用 GIS、地统计学方法不仅能分析城市土壤重金属污染的空间分布特征, 也有助于了解重金属分布与土地

收稿日期: 2011-03-22; 修订日期: 2011-07-10

基金项目: 上海师范大学重点培育学科项目 (DZL801); 闵行区自然科学研究项目 (2009MHZ014); 上海市教育委员会科研创新项目 (09YZ175); 上海师范大学校级项目 (SK200729); 上海市教委重点学科建设项目 (J50402)

作者简介: 柳云龙 (1971~), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为城市生态与环境, E-mail: liu_zju@126.com

利用、交通道路、功能区分布的空间关系,寻找可能污染源和开展污染扩散的研究^[23,24]. 本研究在地统计学方法和 GIS 技术支持下,选择包含城-郊-乡梯度差异的上海城市样带为研究区域,以城郊结合部为重点,分析该样带中土壤 Zn、Cu、Pb、Cr、Mn 这 5 种土壤重金属元素的空间分布特征,并通过内梅罗综合污染指数对土壤重金属污染状况进行评价,分析城市化过程对土壤环境质量的影响,旨在了解城市土壤重金属污染状况,为城市土地资源的持续利用和科学管理提供科学依据.

1 研究区概况

研究区域是上海中心城区向城郊外延的区域,包括徐汇、闵行、奉贤 3 个行政区,地处北纬 30.805°~31.252°,东经 121.242°~121.795°,平均海拔 4 m,总面积 1 112.99 km²,总人口约为 291.25 万人. 本区域地处长江三角洲平原东端,成土母质起源于湖泊沉积、河流沉积、江海沉积物,有明显腐殖质层、埋藏炭泥或腐泥层,中性或酸性. 该区域属于亚热带季风气候,年平均气温约 17.4℃,夏季平均气温可以达到 27~28.5℃,冬季平均气温可达到 4.7~6℃. 年降水量达到 956~1 263 mm. 研究区域内,徐汇区属于城市化地区,定位是现代商贸区、高级居住区,科技密集区,文教优势区. 闵行区位于城郊结合部,区内有莘庄工业区、4 个区级工业区和 13 个镇级工业园区,工业企业 3 400 多家,涉及电子通讯、电气机械、新材料、化学制品、服装纺织、金属压延制品、食品等行业,重点发展新能源、新材料等新兴产业. 奉贤位于上海外围,目前主要为农田用地,建设目标是发展机电一体化、物流机械、滨海旅游和精细化工四大产业,重点建设上海综合工业开发区、上海滨海国际机械城和上海海湾旅游区.

2 样品采集与分析

2.1 土壤样品采集

根据样带内各行政区有关文字资料以及最新行政区划图,确定本研究采样的大致目标范围,综合考虑研究区域内地形分布、土地利用与覆盖、土壤类型及城市功能区分布(工业区、居民区、城市绿地、交通用地)等因素,在研究区域的数字底图上,通过网格布点确定采样点的基本分布和取样数,使取样点分布相对均匀. 实际取样时,根据各行政区面积并考虑城市土壤性质变异和城郊结合部的复杂性,对采样点数量和空间分布进行适度调整,随机取样. 每一

个样点以 10 m 为半径采集 5 个点,混匀样品,采样点 GPS 精确定位,土壤采样深度为 0~20 cm,共采集土壤样品 260 个. 采样时间为 2009 年 3 月,采样点分布如图 1.

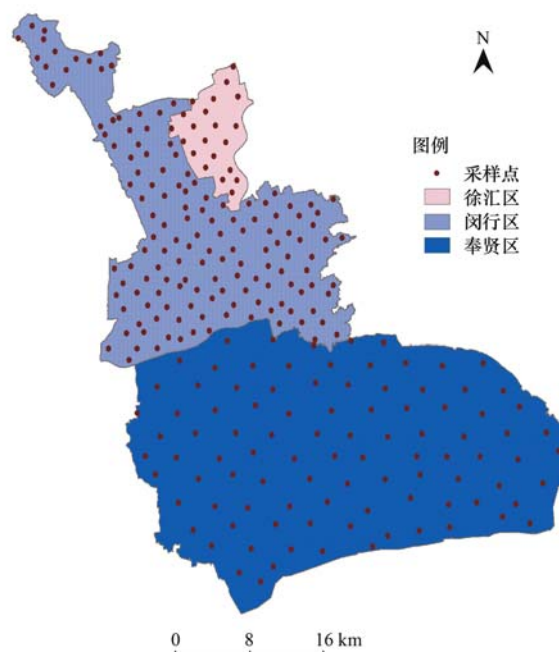


图 1 土壤采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of soil sampling sites

2.2 样品处理与分析方法

2.2.1 样品处理与分析

土壤样品在野外剔除较大固体颗粒物,放入聚乙烯塑料密封袋,避免样品之间接触污染. 土壤样品自然风干,剔除样品中植物根系、有机残渣以及可见侵入体,用木质工具碾碎研磨,过孔径为 1 mm 尼龙筛,密封保存. 取上述经处理过的样品约 200 g,用玛瑙研钵研磨,过 100 目筛,将样品放入样品袋,利用美国 Innov 公司的 AS-4000 土壤重金属测量仪测定土壤全量 Cr、Zn、Cu、Pb、Mn,该仪器采用 X 射线光源、多光束过滤技术,照射被分析样品,激发使样品中所含元素的内层电子获得能量跃迁,同时次外层电子向内层跃迁,并释放出试样中分析元素的特征 X 射线(称为 X 荧光),再用探测器接收. 参考内置标准,通过对光谱进行对比分析完成金属元素含量的比较分析. XRF 分析仪的主要技术性能指标:检测光源强度为 10~40 kV,可检测标准元素包括铅、铬、汞、镉、钛、锑、锰、铁、镍、铜、锌、锡、银、硒、钼、砷、钴等,探测器工作温度范围为 -10~50℃,检出限为 1~20 mg·kg⁻¹. 每个样品测量时间为 3 min,重复测 3 次,分析其变异系数,认为变异系数在 20%

以内的数据是足够精确的. 土壤重金属的平均值、变异系数、正态分布检验等描述性统计分析采用 SPSS 10.0 软件计算. 变异函数拟合及相关参数确定、克里格插值采用 ESRI 的 ArcGIS 9.2 地统计模块分析.

2.2.2 土壤污染评价方法

土壤污染评价标准以上海市土壤环境背景值为参照标准. 土壤污染评价方法采用目前国内外普遍采用的单因子指数法和内梅罗综合指数法. 单因子指数法适用于单一因子污染特定区域的评价, 内梅罗综合指数法能够全面、综合地反映土壤的污染程度.

单因子指数法:

$$P_i = c_i/S_i$$

内梅罗综合指数法:

$$P_{\text{综}} = \sqrt{\frac{(\text{Max } c_i/S_i)^2 + \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{c_i}{S_i}\right)^2}{2}}$$

式中, P_i 为土壤中污染物 i 的环境质量指数; c_i 为污染物 i 的实测浓度 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); S_i 为污染物 i 的评价标准 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 采用上海市土壤重金属环境背景值^[25]; $P_{\text{综}}$ 为土壤中重金属元素的综合污染指数; n 为参与评价的重金属的种类总数. 根据 P 值

变幅, 结合作物受害程度和污染物积累状况划分土壤质量分级. $P_i \leq 1$ 为非污染, $1 < P_i \leq 2$ 为轻度污染, $2 < P_i \leq 3$ 为中度污染, $P_i \geq 3$ 为重度污染. $P_{\text{综}} \leq 0.7$ 为安全, $0.7 < P_{\text{综}} \leq 1$ 为警戒线, $1 < P_{\text{综}} \leq 2$ 为轻度污染, $2 < P_{\text{综}} \leq 3$ 为中度污染, $P_{\text{综}} \geq 3$ 为重度污染.

3 结果与分析

3.1 土壤重金属污染的总体特征

土壤表层样品重金属含量测定结果如表 1 所示. 土壤样品 Cu、Pb、Zn、Cr、Mn 这 5 种重金属平均含量分别为 27.80、28.86、99.36、87.72、556.97 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 变异系数(CV)反映了总体样本中各采样点平均变异程度. 表 1 数据显示, 5 种重金属平均变异程度由大到小依次为 Pb、Cu、Zn、Mn、Cr. Cu、Pb、Zn 的变异系数较大, 均大于 0.3, 其中 Pb 的变异系数达到了 0.57, 说明土壤中 Pb、Cu、Zn 受外界干扰比较显著, 空间分异较大, 这种分异很大程度上归结为交通、工业、商业等城市建设用地以及污染等强烈人为活动影响. 而土壤 Cr、Mn 的变异系数较小, 分别为 0.14、0.18, 说明这 2 种元素受外界影响比较一致, 空间分异相对不显著, 反映这 2 种元素在研究区域内的来源可能具有同源性.

表 1 土壤重金属含量的描述性统计分析

Table 1 Description statistics of soil heavy metal concentrations

重金属元素	算术平均值 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	标准差 (Std. Var)	最大值 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	最小值 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	变异系数 (CV)	偏度	峰度	K-S 检验	
								Asymp. Sig. (2-tailed)	对数转换 (2-tailed)
Cu	27.80	10.69	86.67	15.67	0.38	3.02	11.97	0.00	0.12
Cr	87.72	12.42	137.33	54.67	0.14	0.44	3.56	0.48	—
Pb	28.86	16.38	168.33	13.00	0.57	5.19	12.36	0.00	0.08
Mn	556.97	98.94	830.00	296.33	0.18	0.04	2.51	0.44	—
Zn	99.36	30.81	249.67	56.00	0.31	1.85	4.38	0.00	0.23

3.2 土壤重金属污染空间变异结构分析

描述性统计分析只能说明重金属含量变化的全貌, 不能定量刻画其结构性、相关性和独立性. 而地统计学方法能很好地描述重金属含量的空间变异结构, 最大限度保留空间变异信息. 半方差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. K-S 检验表明, Mn、Cr 呈正态分布, Cu、Pb、Zn 不符合正态性, 表现为尖峰、正偏性, 对数转换后呈现正态分布. 采用普通克里格法进行地质统计分析时, 允许数据分布存在一定的偏态性. 利用半变异函数计算公式, 算出分别用不同模型拟合, 得到模型的相关参数值, 选取离差平方和与标准误差最小, 决

定系数最大的模型^[2,19]. 土壤不同重金属污染元素的半方差函数理论模型及其相关参数见表 2. 土壤 Mn 的块金系数为 35%, 有明显的空间自相关, 表明 Mn 主要受内在因子(气候、地形、土壤类型等)的控制, 人为活动的影响较小. 而 Cu、Pb、Cr、Zn 的块金系数分别为 100%、100%、85.2%、93.4%, 空间相关性弱, 以随机变异为主, 主要受外在因子(随机因素如管理措施、城镇建设、污染等人为活动)的影响, 反映了在人类活动强烈影响和干扰下城市土壤性质空间变异的复杂性. 由表 2 可知, 从土壤重金属半方差函数拟合模型来看, 土壤 Mn 符合指数模型, 土壤 Cr 符合线性模型, 其决定系数分别为 0.968、

0.467,较好反映了土壤 Mn、Cr 的空间变异结构特征.而土壤 Cu、Pb 的半方差拟合模型均为线性模型,表现为纯块金形式,土壤 Zn 符合线性模型,但其决定系数仅为 0.063,土壤各样点之间表现出较强的独立性和随机性,这既反映了在人类活动强烈影响和干扰下城市土壤性质空间变异的复杂性,同时

也说明该采样密度未能有效反映土壤 Cu、Pb、Zn 的空间变异结构,对城市土壤重金属空间分布和污染评估产生影响,需要通过提高采样点密度、进行更小尺度的详细研究来反映城市土壤重金属的空间变异结构.对城市土壤空间变异性的分析有助于提高城市土壤样品采集的代表性和合理性.

表 2 土壤重金属半方差函数理论模型及其相关参数

Table 2 Theoretical models and parameters of semivariance of soil heavy metals

重金属元素	理论模型	块金值 (C_0)	基台值 ($C_0 + C$)	块金系数 [$C_0 / (C_0 + C_1)$]/%	残差	决定系数
Cu	线性模型	111.8	111.8	100	1.52E+03	0.276
Pb	线性模型	277.2	277.2	100	2.89E+04	0.685
Zn	线性模型	882.5	944.7	93.4	7.51E+04	0.063
Cr	线性模型	139.64	163.97	85.2	8.84E+02	0.467
Mn	指数模型	5 930	16 930	35	1.53E+06	0.968

3.3 土壤重金属的空间分布格局

克里金插值法是一种无偏、最优插值方法,但普通克里金插值法要求区域化变量满足二阶平稳假设,但实际应用中这一假设往往无法满足,即存在漂移现象.考虑到城市土壤重金属受人为因素的影响有较强的空间变异性,可能存在区域异常问题.在非平稳条件下,泛克里金插值法可较好地估计和拟合城市土壤重金属的强变异和异常状况.以拟合的半方差函数模型(指数和线状模型)为计算模型,采用泛克里格法进行最优内插,绘制了所研究的城郊乡梯度样带内土壤重金属空间分布格局图,结果见图 2 所示.研究区域内 Cu 的空间分布特征呈条带状,由北向南递减,徐汇区和闵行区北部出现较高的峰值区,奉贤区表现为低值区,土壤 Cu 含量总体表现为由中心城区向郊区递减的梯度变化.土壤 Cu 主要来自于金属电镀、轴承及制动部件的磨损、杀菌剂和杀虫剂里的金属,闵行区北部峰值区与闵北工业区机械电子、汽车轮胎和零部件的生产有关.土壤 Cr 的分布则表现为岛状区域分布,总体上看高值区都位于城郊接合部(闵行区),以此为中心向四周辐射状递减.这种岛状分布特征与处于城郊接合部的闵行区工业分布有关,密集分布的工业企业废弃物的排放,可能是造成 Cr 含量较高的主要原因.土壤

Mn 的分布也表现为岛状分布,高值区位于城郊接合部,土壤 Mn 的背景含量比较高,从其空间变异结构来看,主要是受结构性因素的影响,如土壤母质、地形等因素.土壤 Pb、Zn 的空间分布体现出条带状分布和岛状分布相结合的特点,总体上由徐汇、闵行到奉贤其含量递减,体现出城郊乡的梯度差异,反映了城市化对土壤重金属含量分布的影响.但在城郊接合部,闵行区出现了部分高值区,呈现岛状分布,峰值区主要位于闵行区北部、徐汇区以及闵行区中南部.这种分布与闵行闵北工业区和莘庄工业园区的分布以及交通密度、城市化过程有关.

空间插值的总体精度是利用交叉检验法来进行评价,交叉检验法先假定每一个采样点的含量值未知,利用周围样点的值来估算,然后计算估计值与实际测定值的误差,根据误差统计结果评估插值方法的优劣.常用的误差统计指标有平均误差、均方根误差、平均标准误差、标准化平均误差、标准化均方根误差.如果越符合以下标准,其插值精度越高.判别标准为:平均误差的绝对值最接近于 0;标准化平均误差的绝对值最接近于 0;平均标准误差与均方根误差最接近;标准化均方根误差最接近于 1.由表 3 可知,综合来看,土壤 Mn 更符合以上标准,其空间插值精度最高,而空间相关性弱的 Cu、Pb、Cr、Zn 空

表 3 不同重金属插值误差的比较

Table 3 The comparison of interpolating error with different soil heavy metals

重金属	平均误差	均方根误差	平均标准误差	标准化平均误差	标准化均方根误差
Cu	-0.102 3	10.09	10.89	-0.009 5	0.927 6
Cr	0.167 7	12.05	12.02	0.013 6	1.004 0
Mn	-0.009 0	84.18	84.62	-0.000 002 2	0.992 7
Pb	0.096 4	15.3	16.86	0.005 6	0.909 5
Zn	0.001 4	27.79	29.82	-0.000 062	0.933 0

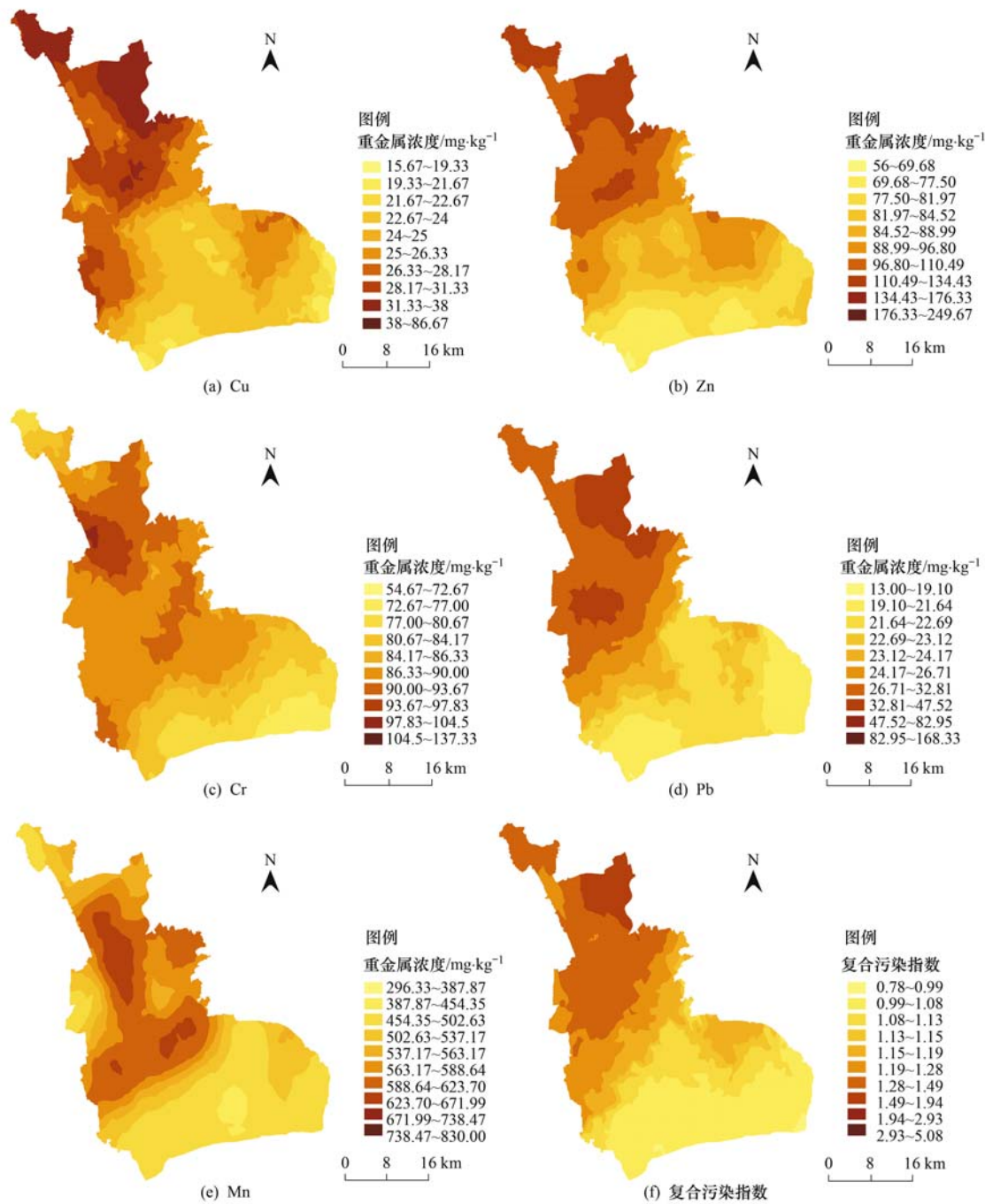


图2 土壤重金属含量与复合污染指数空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of soil heavy metal contents and the composite pollution index

间插值精度较低.

3.4 土壤重金属污染状况

对所有土壤样品重金属分析数据取平均值并通过单因子污染指数进行评价,计算结果表明,除土壤 Cu 污染指数略小于 1 外,其他元素均大于 1,其中以土壤 Cr、Zn、Pb 污染相对严重,污染指数分别为 1.17、1.15、1.13. 测定样本中土壤 Cr 和 Mn 的最

大值为背景值的 2 倍不到,而土壤 Cu、Zn、Pb 的最大值分别为背景值的 3.03、2.9、6.6 倍,说明这些元素特别是 Pb 在空间分布上具有强烈的变异性. 以当地元素背景值作为评价标准,在所有 260 个样点重金属元素分析数据中,土壤 Cu 有 27.3% 的样点超标外,而土壤 Cr、Zn、Pb 和 Mn 样点超标率均在 45% 以上,其中土壤 Cr 的超标率达到 86.2%. 相关

分析表明,土壤 Cr、Zn、Pb、Mn 和 Cu 之间均具有显著的相关性,表明土壤重金属之间表现为复合污染或者具有同源性,多数土壤样品被 2 种以上重金属元素污染(表 4)。采用内梅罗指数计算研究区内土壤重金属综合污染指数,并利用 ArcGIS 软件采用泛克里格法进行插值生成综合污染指数面状分布图(图 2)。计算结果表明,研究区内复合污染指数 $P_{\text{综}}$ 在 0.79~4.68 之间,260 个样点中 81.54% 的样点综合污染指数在 1~2 之间,属于轻度污染。3.46% 的样点综合污染指数 >2,属于中度以上污染。图 2 表明土壤重金属污染有明显的空间分异特征,污染程度从重到轻总体表现为:徐汇区、闵行区、奉贤区,污染相对严重的地区主要位于徐汇城区和闵行的工业开发园区,城市交通、人类活动以及工厂废弃物的排放等是影响土壤重金属污染分布的主要因素。

表 4 土壤重金属的相关分析¹⁾

	Cr	Mn	Pb	Cu	Zn
Cr	1.000	0.417 **	0.153 *	0.278 **	0.345 **
Mn	—	1.000	0.165 **	0.152 *	0.192 **
Pb	—	—	1.000	0.434 **	0.521 **
Cu	—	—	—	1.000	0.753 **
Zn	—	—	—	—	1.000

1) ** 表示显著相关($P < 0.01$), * 表示显著相关($P < 0.05$)

4 结论

(1)研究样带内 5 种土壤重金属元素含量的统计结果表明,Cu、Cr、Mn、Pb、Zn 均属中等变异性,5 种重金属的平均变异程度由大到小的顺序为 Pb、Cu、Zn、Mn、Cr,其中 Pb 变异系数最大,为 0.57。Mn、Cr 呈正态分布,Cu、Pb、Zn 呈对数正态分布。

(2)半方差函数模型拟合结果表明,Mn 符合指数模型,Cu、Pb、Zn、Cr 符合线状模型,其中土壤 Cu、Pb 表现为纯块金形式。5 种重金属元素在一定范围内均存在空间相关性,其中 Mn 有明显的空间自相关,Cu、Cr、Pb、Zn 空间相关性弱,说明 Cu、Cr、Pb、Zn 以随机变异为主,受人类活动的影响和干扰大。

(3)采用泛克里格最优内插法得到了上海城市样带表层土壤重金属含量空间分布图。Cu 的空间分布特征呈条带状,由中心城区向郊区递减。Cr、Mn 的分布呈岛状区域分布,由中心向四周辐射状递减。Pb、Zn 空间分布呈条带状和岛状分布相结合的特点。

(4)土壤污染状况分析表明,土壤 Cr、Zn、Pb 污染相对严重,Cr、Zn、Pb 和 Mn 样点超标率均在 45%

以上,其中 Cr 的超标率达到 86.2%。土壤 Cr、Zn、Pb、Mn 和 Cu 之间均具有极显著的相关性,土壤重金属之间表现为复合污染或者具有同源性。土壤重金属污染程度总体上体现城郊乡的梯度差异,同时也反映了工业区分布、城市交通、废弃物排放等对城市土壤重金属分布影响的复杂性。

参考文献:

- [1] 汪权方,陈百明,李家永,等. 城市土壤研究进展与中国城市土壤生态保护研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(4): 142-145.
- [2] 张金屯, Pouyat R. “城-郊-乡”生态样带森林土壤重金属变化格局[J]. 中国环境科学, 1997, 17(5): 410-413.
- [3] 张金屯, Pickett STA. 城市化对森林植被、土壤和景观的影响[J]. 生态学报, 1999, 19(5): 654-658.
- [4] 李晓燕, 陈同斌, 雷梅, 等. 不同土地利用方式下北京城区土壤的重金属累积特征[J]. 环境科学学报, 2010, 30(11): 2285-2293.
- [5] 李玉和. 城市土壤形成特点肥力评价及利用与管理[J]. 中国园林, 1997, 13(3): 20-23.
- [6] 康玲芬, 李锋瑞, 张爱胜, 等. 交通污染对城市土壤和植物的影响[J]. 环境科学, 2006, 27(3): 556-560.
- [7] Hu X F, Wu H X, Hu X, et al. Impact of urbanization on Shanghai's soil environmental quality[J]. Pedosphere, 2004, 14(2): 151-158.
- [8] Li X P, Huang C C. Environment impact of heavy metals on urban soil in the vicinity of industrial area of Baoji city, P. R. China[J]. Environmental Geology, 2007, 52(8): 1631-1637.
- [9] 吴新民, 李恋卿, 潘根兴, 等. 南京市不同功能城区土壤中重金属 Cu、Zn、Pb 和 Cd 的污染特征[J]. 环境科学, 2003, 24(3): 105-111.
- [10] 张甘霖, 赵玉国, 杨金玲, 等. 城市土壤环境问题及其研究进展[J]. 土壤学报, 2006, 44(5): 925-933.
- [11] 杨元根, Peterson E, Campbell C. 城市土壤中重金属元素的积累及其微生物效应[J]. 环境科学, 2001, 22(3): 44-48.
- [12] Wang X S, Qin Y, Chen Y K. Heavy metals in urban roadside soils, part 1: effect of particle size fractions on heavy metals partitioning[J]. Environmental Geology, 2006, 50(7): 1061-1066.
- [13] 康玲芬, 李锋瑞, 化伟, 等. 不同土地利用方式对城市土壤质量的影响[J]. 生态科学, 2006, 25(1): 59-63.
- [14] Keydoszius R J, Cox S K Jr, Haque M B, et al. Historical land use and soil analysis guiding corridor landscape design[J]. Urban Ecosystems, 2007, 10(1): 53-72.
- [15] Ruby M V, Schoof R, Brattin W, et al. Advances in evaluating the oral bioavailability of inorganics in soil for use in human health risk assessment[J]. Environmental Science and Technology, 1999, 33(21): 3697-3705.
- [16] Jim C Y. Soil characteristics and management in an urban park in Hong Kong[J]. Environmental Management, 1998, 22(5): 683-695.
- [17] Ruiz-Cortés E, Reinoso R, Díaz-Barrientos E, et al.

- Concentrations of potentially toxic metals in urban soils of Seville; relationship with different land uses [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2005, **27**(5-6): 465-474.
- [18] 师荣光, 赵玉杰, 周启星, 等. 苏北优势农业区土壤砷含量空间变异性研究 [J]. *农业工程学报*, 2008, **24**(1): 80-84.
- [19] 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.
- [20] 贾华清, 章明奎. 杭州市城市土壤重金属的积累和释放潜力及其空间分异 [J]. *浙江大学学报 (农业与生命科学版)*, 2007, **3**(6): 677-684.
- [21] Marache A, Breyse D, Piette C, *et al.* Geotechnical modeling at the city scale using statistical and geostatistical tools; The Pessac case (France) [J]. *Engineering Geology*, 2009, **107**(3-4): 67-76.
- [22] Cannon W F, Horton J D. Soil geochemical signature of urbanization and industrialization - Chicago, Illinois, USA [J]. *Applied Geochemistry*, 2009, **24**(8): 1590-1601.
- [23] Davis H T, Aelion C M, McDermott S, *et al.* Identifying natural and anthropogenic sources of metals in urban and rural soils using GIS-based data, PCA, and spatial interpolation [J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(8-9): 2378-2385.
- [24] Yang P G, Mao R Z, Shao H B, *et al.* The spatial variability of heavy metal distribution in the suburban farmland of Taihang Piedmont Plain, China. C. R [J]. *Comptes Rendus Biologies*, 2009, **332**(6): 558-566.
- [25] 王云. 上海市土壤环境背景值 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992.

《环境科学》编辑部关于启用编辑信息管理系统公告

《环境科学》编辑部已经开通本刊网站并启用编辑信息管理系统(网站地址: <http://www.hjcx.ac.cn>)。该系统能实现在线投稿、在线审稿、期刊浏览检索等功能, 欢迎广大作者、读者和审稿专家使用。目前我刊所有来稿都通过网站编辑信息管理系统进行。作者使用编辑信息管理系统投稿时请先进行注册, 注册完毕后以作者身份登录, 按照页面上给出的提示投稿即可。如果您在使用过程中有问题, 请及时与我刊编辑部联系。

邮政地址: 北京市海淀区双清路 18 号《环境科学》编辑部

邮 编: 100085

电 话: 010-62941102, 010-62849343

传 真: 010-62849343

E-mail: hjcx@rcees.ac.cn

网 址: www.hjcx.ac.cn

CONTENTS

Safety Value of Contaminant in Water Pollution Accident Based on Human Health Risk	ZHENG Bing-hui, LUO Jin-hong, FU Qing, <i>et al.</i> (337)
Safety Concentration of Genotoxic Carcinogens in Water Pollution Accident Based on Human Health Risk	LUO Jin-hong, ZHENG Bing-hui, FU Qing, <i>et al.</i> (342)
A Quantitative Method and Case Analysis for Assessing Water Health	LI Yu-feng, LIU Hong-yu, HAO Jing-feng, <i>et al.</i> (346)
Temporal and Spatial Variation of Nitrogen and Phosphorus and Eutrophication Assessment in Downstream River Network Areas of North Canal River Watershed ...	SHAN Bao-qing, JIAN Yu-xiang, TANG Wen-zhong, <i>et al.</i> (352)
Spatiotemporal Variation Analysis and Identification of Water Pollution Sources in the Zhangweinan River Basin	XU Hua-shan, XU Zong-xue, TANG Fang-fang, <i>et al.</i> (359)
Hydrochemical Characteristics and Formation Mechanism of Shallow Groundwater in the Yellow River Delta	AN Le-sheng, ZHAO Quan-sheng, YE Si-yuan, <i>et al.</i> (370)
Impacts of Sediment Disturbance Time on the Distribution of Phosphorus Forms in Suspended Solids	LI Da-peng, HUANG Yong, LI Yong, <i>et al.</i> (379)
Influence of Submerged Macrophytes on Phosphorus Transference Between Sediment and Overlying Water in the Growth Period	WANG Li-zhi, WANG Guo-xiang, YU Zhen-fei, <i>et al.</i> (385)
Pollution Characteristics and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Surface Sediments of Lake Changshouhu in Chongqing, China	LU Shao-yong, XU Meng-shuang, JIN Xiang-can, <i>et al.</i> (393)
Vertical Distribution Characteristics of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of Lake Hongze	ZHANG Wen-bin, YU Hui (399)
Effects of Rainfall on Nitrogen and Phosphorus Loss from Courtyard Compost and Its Risk of Nonpoint Source Pollution	PENG Li, WANG Li-wei, YANG Zhi-min, <i>et al.</i> (407)
Effects of Hydrodynamic Process on Bio-optical Properties in Algal-Dominated Lake Region of Shallow Lake	LIU Xiao-han, FENG Long-qing, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (412)
Estimation and Remote Sensing Inversion of Diffuse Attenuation Coefficient $K_d(490)$ in Lake Taihu in Spring Based on Semi-analytical Model	LIU Zhong-hua, LI Yun-mei, LI Rui-yun, <i>et al.</i> (421)
Monitoring the Total Suspended Matter of Lake Chaohu Based on Quasi-Analytical Algorithm	ZHANG Hong, HUANG Jia-zhu, LI Yun-mei, <i>et al.</i> (429)
Optimization of Aerobic/Anaerobic Subsurface Flow Constructed Wetlands	LI Feng-min, SHAN Shi, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> (436)
Effects of Allelochemical Dibutyl Phthalate on <i>Gymnodinium breve</i> Reactive Oxygen Species	BIE Cong-cong, LI Feng-min, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> (442)
Toxicity Effects of <i>Rac</i> - and <i>S</i> -Metolachlor on Two Algae	CAI Wei-dan, LIU Hui-jun, FANG Zhi-guo (448)
Studies for Killing the Oceanic Harmful Organisms in Ship's Ballast Water Using Hydroxyl Radicals	BAI Min-dong, ZHANG Na-hui, ZHANG Zhi-tao, <i>et al.</i> (454)
Modification of Natural Siderite and Enhanced Adsorption of Arsenic	ZHAO Kai, GUO Hua-ming, LI Yuan, <i>et al.</i> (459)
Kinetic Study of 4-Chloronitrobenzene Degradation by Zero-Valent Iron	LIAO Di-jie, YANG Qi, LEE Chun-chi (469)
Photochemical Degradation of Ofloxacin in Aqueous Solution	SHAO Meng, YANG Gui-peng, ZHANG Hong-hai (476)
Photodegradation of Atenolol in Aqueous Nitrate Solution	JI Yue-fei, ZENG Chao, MENG Cui, <i>et al.</i> (481)
Biodegradation of Pyridine Under UV Irradiation	FANG Miao-miao, YAN Ning, ZHANG Yong-ming (488)
Optimization on Decoloration Conditions of Anthraquinone Dyes by Laccase from <i>Amillariella mellea</i>	ZHU Xian-feng, QIN Ren-bing, YU Chen-chen, <i>et al.</i> (495)
Biosorption of Chromium(VI) by Waste Biomass of ϵ -Poly-L-lysine Fermentation	CAO Yu-juan, ZHANG Yang, XIA Jun, <i>et al.</i> (499)
Investigation on Enhanced Conditions for the Densification of Filamentous Sludge	LI Zhi-hua, SUN Wei, JI Xiao-qin, <i>et al.</i> (505)
Effect of Temperature on the Response Characteristics of Shortcut Nitrification Granular Sludge	LUO Yuan-ling, YANG Zhao-hui, XU Zheng-yong, <i>et al.</i> (511)
Fuel Consumption and Emission Inventory of Typical Construction Equipments in China	LI Dong-ling, WU Ye, ZHOU Yu, <i>et al.</i> (518)
Optimization of PM ₁₀ Monitoring Network in Beijing	QI Ling, ZHAO Yue, XIE Shao-dong (525)
Effect of Greenbelt on Pollutant Dispersion in Street Canyon	XU Wei-jia, XING Hong, YU Zhi (532)
Investigation of Effect and Process of Nitric Oxide Removal in Rotating Drum Biofilter Coupled with Absorption by Fe ^{II} (EDTA)	CHEN Jun, YANG Xuan, YU Jian-ming, <i>et al.</i> (539)
Effect of UV-B Radiation on Release of Nitrogen and Phosphorus from Leaf Litter in Subtropical Region in China	SONG Xin-zhang, ZHANG Hui-ling, JIANG Hong, <i>et al.</i> (545)
Characteristics of Carbon Sequestration and Apparent Stability of New Sequestered Carbon in Forested Torrid Red Soil at Dry-Hot Valley	TANG Guo-yong, LI Kun, SUN Yong-yu, <i>et al.</i> (551)
Spatial Distribution of Methane in Surface Water and Sediment of Jiulongjiang Estuary and the Effect Environment factors of It	GUO Ying-ying, CHEN Jian, YIN Xi-jie, <i>et al.</i> (558)
Methane Fluxes and Controlling Factors in the Intertidal Zone of the Yellow River Estuary in Autumn	JIANG Huan-huan, SUN Zhi-gao, WANG Ling-ling, <i>et al.</i> (565)
Study on Dioxin Emission for Typical Non-Wood Pulp Making in China	WANG Zhi-fang, DING Qiong, WANG Kai-xiang, <i>et al.</i> (574)
Horizontal and Vertical Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in River Sediment from a Typical Electrical Equipment Industrial Area	QIU Meng-de, DENG Dai-yong, YU Le-huan, <i>et al.</i> (580)
Characteristics of Polychlorinated Biphenyls in Soils from an Electronic Waste Recycling Area	WANG Xue-tong, LI Yuan-cheng, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (587)
Characterization and Potential Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Green Space Soils of Educational Areas in Beijing	PENG Chi, WANG Mei-e, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (592)
Spatial Variability and Evaluation of Soil Heavy Metal Contamination in the Urban-transect of Shanghai	LIU Yun-long, ZHANG Li-jia, HAN Xiao-fei, <i>et al.</i> (599)
Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Sediments of Rivers in Northern Area of Haihe River Basin, China	SHANG Lin-yuan, SUN Ran-hao, WANG Zhao-ming, <i>et al.</i> (606)
Concentrations and Pollution Assessment of Soil Heavy Metals at Different Water-level Altitudes in the Draw-down Areas of the Three Gorges Reservoir	WANG Ye-chun, LEI Bo, YANG San-ming, <i>et al.</i> (612)
Analysis of Community Structure on Sludge Aerobic/anoxic Digestion After Ultrasonic Pretreatment	YE Yun-di, SUN Shui-yu, ZHENG Li, <i>et al.</i> (618)
Research on Population Structure and Distribution Characteristic of Indigenous Microorganism in Post-polymer-Flooding Oil Reservoir	ZHAO Ling-xia, GAO Pei-ke, CAO Mei-na, <i>et al.</i> (625)
Study on Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) with Different Additional Carbon Sources in Aged Contaminated Soil	YIN Chun-qin, JIANG Xin, WANG Fang, <i>et al.</i> (633)
Detection of <i>Prorocentrum minimum</i> (Pavillard) Schiller with the Electrochemiluminescence-Molecular Probe	ZHU Xia, ZHEN Yu, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (640)
Development of Direct Competitive Enzyme-Linked Immunosorbent Assay for the Determination of Domoic Acid	WANG Qian, CHENG Jin-ping, GAO Li-li, <i>et al.</i> (647)
Simultaneous Determination of 10 Sulfonamide Antibiotics in Water by Solid-phase Extraction and High Performance Liquid Chromatography	HONG Lei-jie, SHI Lu, ZHANG Ya-lei, <i>et al.</i> (652)
Effects of Pentachlorophenol on DNA Damage and Cytotoxicity of HeLa Cells	JIN Bang-ming, WANG Fu-ming, XIONG Li, <i>et al.</i> (658)
Modeling of Carbon Dioxide Measurement and Optimization on Building Ceramic Industry	PENG Jun-xia, ZHAO Yu-bo, JIAO Li-hua, <i>et al.</i> (665)

《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)

2012年2月15日 33卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 2 Feb. 15, 2012

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: 70.00 元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人