

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第4期

Vol.35 No.4

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

|                                                                  |                                                  |
|------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| 2008 ~2012 年上海黑碳浓度变化特征分析 .....                                   | 王洪强, 贺千山, 陈勇航, 亢燕铭 (1215)                        |
| 乌鲁木齐市东南郊一次降雪过程的化学组成及其悬浮态颗粒形态特征 .....                             | 陆辉, 魏文寿, 崔彩霞, 何清, 王瑶 (1223)                      |
| 典型地区大气中多溴联苯醚和新型溴代阻燃剂的水平及组成分布 .....                               | 吴辉, 金军, 王英, 李明圆, 何松洁, 徐萌, 孙一鸣 (1230)             |
| 某焦化厂周边大气 PM <sub>10</sub> 重金属来源及健康风险评价 .....                     | 董婷, 李天昕, 赵秀阁, 曹素珍, 王贝贝, 马瑾, 段小丽 (1238)           |
| 基于车流和大气污染物浓度同步增量的机动车平均排放因子估算方法 .....                             | 李润奎, 赵彤, 李志鹏, 丁文军, 崔骁勇, 许群, 宋现锋 (1245)           |
| 珠江三角洲地区硫和氮沉降临界负荷研究 .....                                         | 孙成玲, 谢绍东 (1250)                                  |
| 低温等离子体-生物法处理硫化氢气体研究 .....                                        | 李华琴, 何觉聪, 陈洲洋, 黎宝仁, 黄倩茹, 张再利, 魏在山 (1256)         |
| 太子河流域莠去津的空间分布及风险评价 .....                                         | 郑磊, 张依章, 张远, 朱鲁生, 王志强 (1263)                     |
| 一种大批量测定沉积物微量间隙水样品中溶解态磷和铁含量的方法 .....                              | 王燕, 朱春刚, 许笛, 丁士明 (1271)                          |
| 外源营养盐输入后水体中营养盐浓度的时空变化 .....                                      | 傅玲, 赵凯, 王国祥, 欧媛, 范嫻, 毛丽娜, 张佳, 韩睿明 (1278)         |
| 基于物理过程的矿区地下水污染风险评价 .....                                         | 孙法圣, 程品, 张博 (1285)                               |
| 重庆典型岩溶地下水系统水文地球化学特征研究 .....                                      | 杨平恒, 卢丙清, 贺秋芳, 陈雪彬 (1290)                        |
| 重庆老龙洞地下河流域氮、磷及微生物污染调查研究 .....                                    | 蓝家程, 杨平恒, 任坤, 陈雪彬, 徐昕, 胡宁 (1297)                 |
| 苦草 ( <i>Vallisneria natans</i> ) 根系对沉积物中各形态磷的影响 .....            | 李振国, 王国祥, 张佳, 马久远, 魏宏农, 俞振飞 (1304)               |
| 循环廊道湿地中氮归趋过程模拟研究 .....                                           | 彭剑峰, 宋永会, 袁鹏, 张雪妍, 胡小明 (1311)                    |
| 不同环境因素下太湖中四环素的自然消减 .....                                         | 段伦超, 王凤贺, 纪莹雪, 张帆, 赵斌, 王国祥 (1318)                |
| 再生水中 5 种抗生素抗性菌的紫外线灭活及复活特性研究 .....                                | 黄晶晶, 汤芳, 席劲璇, 庞宇辰, 胡洪营 (1326)                    |
| 二级处理出水的 UV-TiO <sub>2</sub> 消毒及大肠杆菌和粪肠球菌光复活试验 .....              | 王西峰, 龚昕, 胡晓莲, 任伯帜 (1332)                         |
| 水中 C <sub>60</sub> 纳米颗粒的稳定性研究 .....                              | 方华, 沈冰冰, 荆洁, 陆继来, 王媛 (1337)                      |
| XDLVO 理论解析不同离子条件下海藻酸钠微滤膜污染 .....                                 | 赵应许, 纵瑞强, 高欣玉, 谢慧君, 殷永泉, 梁爽 (1343)               |
| 纳米零价铁催化过氧化氢强化修复 4-氯硝基苯污染地下水的研究 .....                             | 付融冰 (1351)                                       |
| 共存氯苯类同系物对六氯苯厌氧降解活性的影响 .....                                      | 王琪, 刘辉, 姜林, 唐军 (1358)                            |
| 硫酸盐还原生物滤池对含镉废水去除效果试验研究 .....                                     | 吴宣, 谭科艳, 胡希佳, 顾远, 杨宏 (1366)                      |
| 基于氮平衡原理对南方污水处理厂中试脱氮工艺调控策略研究 .....                                | 姜应和, 刘佩炬, 王磊, 田中凯, 刘小英 (1372)                    |
| 模拟电镀污泥阴离子浸出液对氧化亚铁硫杆菌活性的影响 .....                                  | 陈燕, 黄芳, 谢鑫源 (1377)                               |
| 电活性生物膜介导 Cu <sup>2+</sup> 生物还原的试验研究 .....                        | 刘毅, 周顺桂, 袁勇, 刘志 (1384)                           |
| 模拟废旧线路板生物浸出液中铜的回收 .....                                          | 程丹, 朱能武, 吴平霄, 邹定辉, 邢翊佳 (1391)                    |
| 填埋垃圾浸提液与地下水污染物组成差异及成因 .....                                      | 何小松, 余红, 席北斗, 崔东宇, 潘红卫, 李丹 (1399)                |
| 化学合成施氏矿物与 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 共存体系下光化学处理垃圾渗滤液的研究 ..... | 王鹤茹, 宋永伟, 徐峙辉, 崔春红, 周立祥 (1407)                   |
| 处理 BPA 模拟废水的 SBR 工况参数对污泥有机毒性的影响研究 .....                          | 杨娜, 陈秀荣, 林逢凯, 黄华, 章斐, 赵骏, 丁毅 (1414)              |
| 剩余污泥厌氧消化甲烷生成势与产甲烷菌多样性的比较研究 .....                                 | 董慧岭, 季民 (1421)                                   |
| 锰氧化菌 <i>Aminobacter</i> sp. H1 的分离鉴定及其锰氧化机制研究 .....              | 晏平, 姜理英, 陈建孟, 何智敏, 肖少丹, 蒋铁锋 (1428)               |
| 1 株铁基质自养反硝化菌的脱氮特性 .....                                          | 王弘宇, 杨开, 张倩, 季斌, 陈丹, 孙宇翀, 田俊 (1437)              |
| 碘普罗胺降解菌 <i>Pseudomonas</i> sp. I-24 共代谢降解性能研究 .....              | 徐冰洁, 高品, 薛翌, 何梦琦, 吴凡 (1443)                      |
| 利用流式细胞术研究鞘氨醇单胞菌 GY2B 降解非过程中细菌表面特性的变化 .....                       | 张梦露, 党志, 伍凤姬, 梁旭军, 郭楚玲, 卢桂宁, 杨琛 (1449)           |
| 毒性有机物 BPA 与普通小球藻的相互影响特性研究 .....                                  | 陈善佳, 陈秀荣, 闫龙, 赵建国, 章斐, 江子建 (1457)                |
| 缺镁胁迫对普通小球藻光合生理及油脂积累的影响 .....                                     | 王珊, 赵树欣, 魏长龙, 于水燕, 史吉平, 张保国 (1462)               |
| 微囊藻毒素对水稻根系生长和抗氧化系统的影响 .....                                      | 王妮敏, 邓琦, 邹华, 梁婢娟 (1468)                          |
| 东北春大豆品种东生 1 号对臭氧胁迫的响应 .....                                      | 张巍巍, 王光华, 王美玉, 刘晓冰, 冯兆忠 (1473)                   |
| 生物结皮的发育演替与微生物生物量变化 .....                                         | 吴丽, 张高科, 陈晓国, 兰书斌, 张德禄, 胡春香 (1479)               |
| 老化土壤中铅对赤子爱胜蚓生长及繁殖的影响 .....                                       | 陈丽红, 刘征涛, 方征, 王晓南, 王婉华 (1486)                    |
| 土壤重金属镉标准值差异比较研究与建议 .....                                         | 赵晓军, 陆泗进, 许人骥, 李伯苓, 吴国平, 魏复盛 (1491)              |
| 藏北可可西里地区土壤元素背景值研究 .....                                          | 柏建坤, 王建力, 李潮流, 康世昌, 陈鹏飞 (1498)                   |
| 三峡库区香溪河消落带及库岸土壤重金属迁移特征及来源分析 .....                                | 胥焘, 王飞, 郭强, 聂小倩, 黄应平, 陈俊 (1502)                  |
| 浙江海宁电镀工业园区周边土壤重金属污染特征及生态风险分析 .....                               | 厉炯慧, 翁珊, 方婧, 黄佳蕾, 陆芳华, 卢宇浩, 张洪铭 (1509)           |
| 西湖景区土壤典型重金属污染物的来源及空间分布特征 .....                                   | 张海珍, 唐宇力, 陆骏, 周虹, 徐芸茜, 陈川, 赵赞, 王美娥 (1516)        |
| 生活垃圾焚烧厂周边土壤汞污染特征及评价 .....                                        | 解惠婷, 张承中, 徐峰, 李海凤, 田振宇, 唐琛, 刘文彬 (1523)           |
| 上海滴水湖周边土壤和沉积物对磷的吸附特征 .....                                       | 诸葛祥真, 毕春娟, 陈振楼, 张焕焕, 倪玮怡 (1531)                  |
| SDBS/Na <sup>+</sup> 对红壤胶体悬液稳定性的影响 .....                         | 唐颖, 李航, 朱华玲, 田锐, 高晓丹 (1540)                      |
| 稳定化处理对矿渣中重金属迁移转化的影响研究 .....                                      | 赵述华, 陈志良, 张太平, 潘伟斌, 彭晓春, 车融, 欧英娟, 雷国建, 周鼎 (1548) |
| 藻类水体 Cd <sup>2+</sup> 毒性快速监测新方法研究 .....                          | 段静波, 刘文清, 张玉钧, 赵南京, 殷高方, 肖雪, 余晓娅, 方丽 (1555)      |
| 用于 1,3-二硝基苯快速检测的免疫传感器研究 .....                                    | 龙峰, 施汉昌, 王洪臣, 盛建武 (1561)                         |
| Mg/Al 水滑石微波共沉淀法合成及其对 BrO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 吸附性能的研究 ..... | 钟琼, 李欢 (1566)                                    |
| 污染场地修复决策支持系统的几个关键问题探讨 .....                                      | 廖晓勇, 陶欢, 阎秀兰, 赵丹, 林龙勇, 李尤 (1576)                 |
| 城市区域土壤铅含量空间变异的多尺度研究进展 .....                                      | 杨孟, 李凤英, 刁一伟, 吴丹 (1586)                          |
| 水中细菌内毒素污染特性及检测方法研究进展 .....                                       | 张灿, 刘文君, 张明露, 田芳, 杨毅, 安代志 (1597)                 |
| 六价铬细菌还原的分子机制研究进展 .....                                           | 李斗, 赵由才, 宋立岩, 尹雅洁, 王洋清, 徐中慧 (1602)               |
| 农副食品加工业高浓度废水的厌氧膜生物反应器技术 .....                                    | 魏源送, 郁达伟, 曹磊 (1613)                              |
| 《环境科学》征稿简则 (1427) 《环境科学》征订启事 (1497) 信息 (1383, 1390, 1398, 1560)  |                                                  |

# 城市区域土壤铅含量空间变异的多尺度研究进展

杨孟<sup>1</sup>, 李凤英<sup>1</sup>, 刁一伟<sup>2</sup>, 吴丹<sup>1</sup>

(1. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 江苏省大气环境监测与污染控制高新技术研究重点实验室, 南京 210044; 2. 南京信息工程大学大气物理学院, 南京 210044)

**摘要:** 我国城市土壤仍存在 Pb 的严重富集, 准确地评价土壤 Pb 污染水平和范围是进行科学的土壤 Pb 污染风险评估和管理的基础。城市土壤 Pb 含量的空间变异性强且结构复杂, 现有的大多数研究在单一空间尺度上开展, 不足以全面揭示空间结构特征, 不利于促进更加科学的风险评估和管理。因此, 探寻一种能够全面揭示城市土壤 Pb 含量的空间结构信息的方法尤为重要。为了实现这一目的, 本文首先分析了造成城市土壤 Pb 含量高空间变异性的主要因素: 污染源的多样性、污染过程的层次性, 以及城市景观的异质性。在此基础上归纳出城市土壤 Pb 含量的空间变异特征——由 3 个空间层次嵌套而成的等级结构。在此概念性的空间结构之上提出一个基于地统计学理论、以线性混合效应模型为核心的方法框架, 可以将城市土壤 Pb 含量的空间结构划分为 3 个层次: 全局趋势、具有空间自相关的随机变异以及异常高值点。最后, 提出完善城市土壤 Pb 含量空间变异多尺度研究的重点是: 探讨更加高效的抽样策略; 确定特征尺度。

**关键词:** 重金属; 大气沉降; 地统计; 空间自相关; 多尺度

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)04-1586-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.04.055

## A Review of Multi-Scale Studies on Spatial Variation of the Lead (Pb) Concentration in Urban Soils

YANG Meng<sup>1</sup>, LI Feng-ying<sup>1</sup>, DIAO Yi-wei<sup>2</sup>, WU Dan<sup>1</sup>

(1. Jiangsu Key Laboratory of Atmospheric Environment Monitoring and Pollution Control, School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** The accumulation of Pb in urban soils is still apparent in China, and scientific assessment and management of risks from Pb-contaminated soils is necessarily based on contamination levels and extent evaluated accurately. Lead concentration in urban soils has a strong spatial variation and complex spatial structures. Carried out in a single spatial scale, most current investigations cannot comprehensively reveal characteristics of spatial structures, and did not promote more scientific assessment and management of risk. Exploring a new method which can help identify the overall spatial structures is needed. To achieve this aim, this paper firstly investigated the factors linked to the spatial variability of Pb concentration in urban soils, and three major factors were identified: various pollution sources, hierarchical pollution processes and heterogeneous urban landscape. These factors were form a nested hierarchical spatial structure with three spatial levels. Based on the conceptual spatial structure, we proposed a method framework guided by geostatistical theory and focused on linear mixed model (LMM). This proposed framework can divide the nested hierarchical spatial structures of Pb concentration in urban soils into three levels: global trend, random variation with spatial autocorrelation, and outliers. Two recommendations were given to promote the multiple-scale investigation in spatial variation of soil Pb contamination in urban area including: finding more efficient sampling strategy and determining the characteristic scale.

**Key words:** heavy metal; atmospheric deposition; geostatistics; spatial autocorrelation; multi-scale

铅(Pb)是我国《重金属污染综合防治“十二五”规划》的 5 种优先控制污染物之一, 通过吸入和摄入对成人的神经系统、肾脏和血压造成不利影响<sup>[1]</sup>, 对儿童的认知能力造成难以逆转的损害<sup>[2]</sup>。虽然我国已于 2000 年实施汽油无铅化, 但城市土壤中仍存在 Pb 的严重富集, 城市土壤 Pb 污染形势仍然十分严峻<sup>[3~7]</sup>, 存在较高的健康风险<sup>[4, 8]</sup>。科学地评估城市土壤 Pb 污染风险以及制定风险削减管理措施的一个重要基础是确定土壤 Pb 污染的水平 and 范围<sup>[9, 10]</sup>, 特别是识别土壤 Pb 含量的高值点<sup>[11]</sup>。

城市区域内同一时间不同地点的土壤 Pb 含量不是均一的, 而是存在差异性, 即空间变异性。开展城市土壤 Pb 污染的空间变异研究、揭示其空间结构特征, 是准确评估污染水平和范围的基础<sup>[12]</sup>, 对

收稿日期: 2013-08-04; 修订日期: 2013-10-23

基金项目: 南京信息工程大学科研启动基金项目(S8112067001); 国家自然科学基金青年科学基金项目(41301581); 江苏省高校自然科学研究项目(12KJB610004); 江苏高校优势学科建设工程项目

作者简介: 杨孟(1981~), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为环境规划与管理以及景观格局与过程, E-mail: yingjyangmeng@gmail.com

风险管理、污染控制和城市规划都具有重要意义. 研究已经表明城市土壤 Pb 含量的空间变异性高且空间结构复杂<sup>[9]</sup>. 这些特点决定: 仅仅知道大尺度上土壤 Pb 含量的空间变化趋势有可能遗漏小尺度上的变异信息, 特别是遗漏具有较高环境风险的污染高值点. 城市土壤 Pb 含量空间变异的复杂性使得准确评价污染的范围和程度具有一定的难度<sup>[13]</sup>, 单一尺度上的研究并不足以揭示城市土壤 Pb 含量空间结构信息<sup>[14]</sup>. 近年来, 我国对土壤重金属污染空间变异的多尺度特征开展了一些定量的研究工作, 例如, Huo 等<sup>[15]</sup>对北京地区农业土壤的研究表明多尺度的嵌套结构模型能够更加有效地揭示重金属的空间结构特征. Zhao 等<sup>[14]</sup>和 Lv 等<sup>[16]</sup>研究了我国城乡过渡带以及城市地区土壤重金属的空间变异在多个空间尺度上的影响因素. 然而, 这些研究未能将城市土壤 Pb 含量的空间变异划分到不同的空间尺度水平上, 特别是对小尺度上土壤 Pb 含量的空间变异特征了解不够. 这些不足对风险识别和削减极为不利<sup>[17]</sup>.

为了探寻一种能够从多个空间尺度上全面准确地揭示城市土壤 Pb 含量空间结构信息的方法, 本文综述了影响城市土壤 Pb 含量空间变异的主要因素, 归纳了城市土壤 Pb 含量空间变异的特征, 最终提出一种能够识别城市土壤 Pb 含量多尺度的空间变异的方法框架.

## 1 影响城市土壤 Pb 含量空间变异的因素

### 1.1 城市土壤 Pb 污染源的多样性和污染过程的层次性

城市土壤 Pb 污染源包括人为源和自然源, 并以人为源为主, 我国的主要人为源有交通、工业、燃料燃烧和废弃物处理<sup>[3~5, 18]</sup>. 虽然我国已禁用含铅汽油, 但由于含铅汽油导致的土壤 Pb 累积效应仍将长期存在, 柴油中仍然含铅, 以及存在轮胎和刹车磨损以及道路扬尘等其他途径的交通排放<sup>[19]</sup>, 交通仍是我国城市 Pb 污染的主要来源<sup>[5, 20, 21]</sup>. 土壤 Pb 污染的自然源受到土壤母质和成土过程的影响, 在城市区域的实际操作过程中可近似为区域自然背景值的中值或均值<sup>[22]</sup>. 这是因为: 城市土壤母质来源复杂、发生层次混乱<sup>[23]</sup>, 要得到城市土壤 Pb 自然源的空间分布十分困难; 自然源导致的空间变异与人为源相比较小, 可以假设为常数<sup>[22]</sup>.

根据污染过程是否经由大气扩散, 可以将城市土壤 Pb 的人为污染过程分为点源污染过程和扩散

污染过程(diffuse pollution process)<sup>[22]</sup>. 由于各个污染源的强度和排放方式不同, 其影响范围(空间尺度)不同<sup>[24]</sup>, 点源和扩散污染过程的差异使得这两种污染过程形成的污染物空间分布呈现出不同的特征<sup>[22]</sup>. 点源污染过程指污染源直接向土壤排放含 Pb 污染物的过程, 对土壤 Pb 含量的空间尺度较小<sup>[22]</sup>. 在城市区域, 一些早年建成的房屋使用的含 Pb 涂料脱落到土壤中<sup>[17]</sup>、废弃物的处理和堆放点<sup>[9, 22]</sup>都会直接向土壤排放含 Pb 污染物, 形成局部的土壤 Pb 污染高值点. 扩散污染过程指家庭燃煤、交通、冶炼等污染源向大气排放的含 Pb 污染物, 通过大气沉降过程间接地造成土壤 Pb 污染<sup>[22]</sup>. 我国大气颗粒物中存在 Pb 元素的区域性明显富<sup>[25]</sup>, Pb 以颗粒物干沉降去除机制为<sup>[26]</sup>, 是城市土壤 Pb 污染的主要途径<sup>[9, 27]</sup>. 大气中 Pb 元素的峰值浓度位于 0.45 ~ 1  $\mu\text{m}$  的亚微米级颗粒物上<sup>[28, 29]</sup>. 由于亚微米级颗粒物在大气中的滞留时间长、传输距离远<sup>[30]</sup>, 与点源污染过程不同, 扩散污染过程影响的空间尺度较大. 徐祥德等<sup>[31]</sup>指出: 100 m 以下的低层受近距离污染源影响为主, 城市上空约 300 m 的高层大气污染以大尺度远距离传输为主. 因此, 大气颗粒物 Pb 沉降反映了城市上空大气颗粒物的背景特征以及城市人类活动与低空大气环流相互叠加作用的共同影响.

### 1.2 城市景观的异质性

城市景观与郊区的最大区别在于下垫面的不同. 城市边界层下部的结构与一般平坦下垫面不同, 在靠近地面的底部存在一个称为城市冠层(urban canopy)的层次<sup>[32]</sup>. 下垫面特征的重要性在于, 它是除大气条件和颗粒物属性外, 影响大气颗粒物干沉降速度的另一个重要因素<sup>[33]</sup>. 城市景观在垂直和水平方向上的复杂性形成三维湍流和局地环流, 增加了能量和物质交换的复杂性<sup>[34]</sup>, 对大气污染物输送与扩散产生强烈影响<sup>[35, 36]</sup>. 因此, 城市冠层的结构强烈影响大气颗粒物的输送和沉降, 又由于干沉降是城市土壤 Pb 污染的主要途径, 下垫面特征对城市土壤 Pb 污染的空间变异产生重要影响.

当前, 复杂下垫面上大气沉降空间分布的估计仍存在较大的不确定性<sup>[37]</sup>, 城市大气颗粒物 Pb 沉降的空间分布尚不明确, 定量分析城市景观结构对大气颗粒物 Pb 沉降的影响比较困难. 大气颗粒物沉降采样耗时长, 观测研究通常选择较少的代表性样点<sup>[25]</sup>, 城市下垫面的复杂性决定了这种方法并不能完全反映大气颗粒物 Pb 沉降的空间分布. 另外, 现

阶段我国也不具备通过大气模式模拟城市地区大气颗粒物 Pb 沉降的条件. 这一方面是由于我国尚未就 Pb 排放建立完整的清单<sup>[38]</sup>. 另一方面, 大气重金属沉降模拟仍存在较大不确定性<sup>[39]</sup>, 城市下垫面的复杂性进一步增加了模拟的难度<sup>[33]</sup>. 随着城市下垫面复杂性的增加, 单一尺度下的大气污染问题研究不能满足城市发展的需求, 城市区域多尺度的大气环境研究通常在 3 个尺度开展<sup>[35]</sup>: 城市尺度(水平范围数十至数百公里, 粒度 0.5 ~ 1 km); 城市小区尺度(水平范围数公里, 粒度 10 ~ 50 m); 建筑物尺度(水平范围数十至数百米, 粒度 2 ~ 5 m). 这对城市区域大气颗粒物重金属沉降的空间分布研究具有借鉴意义.

与大气颗粒物 Pb 沉降相比, 定量研究城市景观对土壤 Pb 污染的影响比较容易实现. 土地利用类型(或城市功能区类型)作为最重要的一种景观要素, 常用于研究城市的景观特征与土壤 Pb 污染水平的关系. 有研究发现城市不同的土地利用方式对土壤重金属含量有一定影响<sup>[40, 41]</sup>. 土壤 Pb 含量在城乡变化的垂直方向上可能具有较强的结构性, 存在与“城-郊-乡”格局相似的空间趋势<sup>[42, 43]</sup>. 这种空间格局主要受到该方向上交通干线分布的控制, 是交通污染源影响的结果<sup>[44]</sup>, 与“城-郊-乡”格局并没有直接关系. 多数研究者认为城市不同土地利用类型与土壤 Pb 污染水平关系并不显著, 城市尺度上的土地利用特征不应用于表征城市景观结构与土壤 Pb 污染的关系<sup>[17, 45]</sup>. 这种观点主要基于两点理由. 第一, 土地利用类型并不能表征该类型内部景观要素的空间分布特征, 而这些详细特征对城市土壤 Pb 污染的空间分布具有重要影响<sup>[17]</sup>. 第二, 大尺度的大气颗粒物重金属沉降会掩盖土地利用方式造成的土壤重金属含量的差异<sup>[46]</sup>.

位于城市区域内的 Pb 污染源也是城市景观的一个组成部分, 其与 Pb 污染水平的空间关系也是一个研究的重点. 受到污染源多样性以及复杂下垫面的影响下, 污染源与 Pb 污染水平的空间关系十分复杂, 并不是“距离污染源越近、Pb 污染水平越高”的简单线性关系, 而是受占主导地位的污染源的影响. 这点在对道路交通源、垃圾焚烧厂以及冶炼厂的研究中都得到证实<sup>[19, 46 ~ 48]</sup>. 以道路交通源为例, 如果道路交通源对土壤 Pb 污染的贡献占主导地位, 则距离道路越近、Pb 污染水平越高<sup>[17, 49]</sup>, 还受到道路规模和交通流量的影响<sup>[50, 51]</sup>; 否则交通污染扩散、沉降导致的 Pb 污染水平可能与道路距离无关<sup>[19]</sup>.

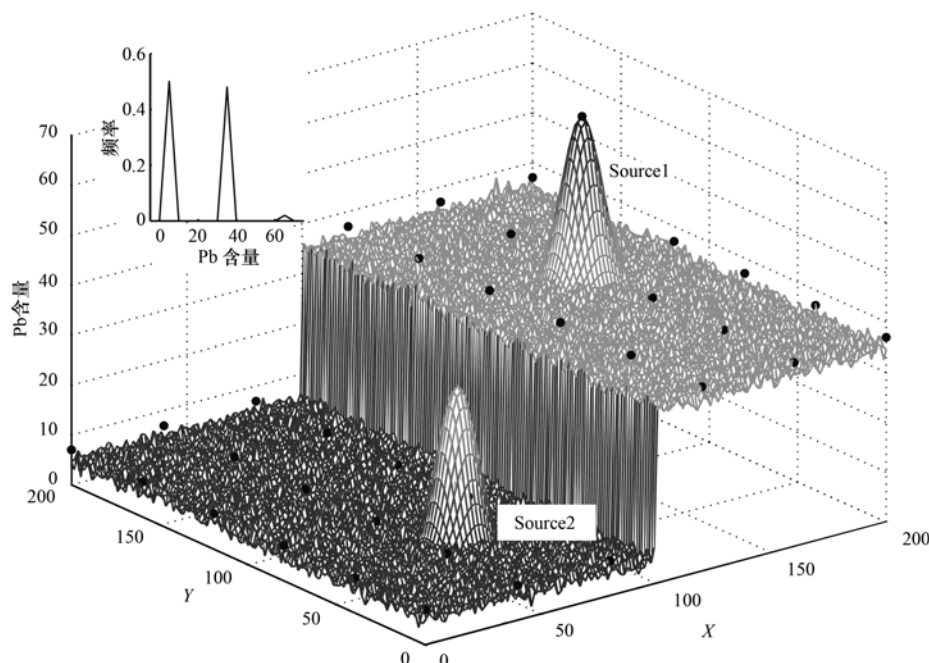
## 2 城市土壤 Pb 含量的空间变异特征

污染源的多样性以及城市下垫面的复杂性决定了城市区域土壤 Pb 含量的空间变异具有异质性. 异质性指空间变异不是完全随机的, 各点的属性并非完全独立于邻近的点而呈现出一定的空间结构, 地统计学通常将异质性称为空间自相关<sup>[52]</sup>.

由于城市区域土壤 Pb 污染通常来自多个污染源、各个污染源影响的空间尺度不同, 自然背景与人类活动排放的叠加形成了嵌套等级结构(nested hierarchical structure)<sup>[22]</sup>. 图 1 是对城市区域土壤 Pb 含量嵌套等级结构的一种简化和假设, 由 3 个层次的空间结构特征嵌套而成. ① 沿 X 轴方向的阶梯状的空间趋势. 空间趋势是区域内平均值的空间分布<sup>[24]</sup>, 是确定性的空间变异; 受到大气污染物远距离输送、土壤母质和地形等大尺度的污染过程或环境要素影响形成<sup>[53, 54]</sup>. ② 2 个随机分布的圆锥形突起, 由小尺度的污染过程形成, 例如点源污染过程或影响范围较小的扩散污染过程<sup>[17]</sup>. ③ 整个区域均存在的小尺度上的随机变异, 表现为 1 km × 1 km 的栅格单元之间 Pb 含量的随机变异部分. 这种小尺度的随机变异也有可能具有空间自相关, 也就是既有随机性又有确定性<sup>[24]</sup>.

城市土壤 Pb 含量的空间分布兼具确定性和随机性的特点<sup>[22]</sup>. 城市土壤 Pb 含量主要受到自然成土过程、人类活动排放以及大气颗粒物沉降这 3 个重要过程的控制, 每个过程都有其物理原因、遵循物理规律、具有确定性的原理, 从这个角度来看, 城市土壤 Pb 含量的空间分布必须具有确定性. 但是由于多个过程的相互相互作用, 非线性混合在一起形成一个十分复杂的现象, 在人们的知识水平或数据不充足时对这种复杂现象难以完全理解, 其就表现为一种随机或无规律的现象<sup>[55]</sup>. 例如, 受到城市复杂下垫面上的影响, 对城市大气颗粒物 Pb 沉降特征的理解仍存在的较大不确定性.

由于异质性依赖于尺度<sup>[56]</sup>, 土壤 Pb 含量的异质性在不同的尺度具有差别<sup>[15, 57, 58]</sup>. 在实际操作中, 假设为了获得图 1 区域中土壤 Pb 含量的空间变异信息, 采用网格抽样策略设置 40 km × 40 km 的网格, 采样点的位置为图 1 中的黑色实心点. 大尺度污染过程能够影响到所有的采样点, 以上的抽样策略得到的数据可以表现出大尺度污染过程形成的阶梯状的全局趋势. 但是, 小尺度的污染过程(图 1 中的污染源 1 和 2)影响的范围较小, 有 1 个采样点恰好



改编自文献[24], 阶梯状的空间趋势为全局趋势, 是由大尺度的污染过程造成的空间结构; 2 个突起表示小尺度污染过程形成的空间结构; 最小尺度上(1 km×1 km)的栅格取值表示随机变异; 黑色实心点表示采用网格抽样(40 km×40 km 网格)选择的抽样点; 左上角的小图为抽样点 Pb 含量的频率分布

图 1 简化和假设的城市土壤 Pb 含量的空间分布示意

Fig. 1 Representation of the simplified and hypothetical distribution of Pb concentration in urban soils

落在污染源 1 造成的峰值浓度点, 采样结果表明该点为异常高值点(outliers)或称为热点(hotspots), 污染源 2 的信息在这一抽样策略下则被完全的遗漏. 这说明污染过程的影响尺度与抽样尺度之间存在真实的相互作用, 小尺度上的空间变异和结构信息可能由于采样尺度的增加而减弱甚至丢失<sup>[24]</sup>. 本文的采样尺度指采样粒度(grid), 而不是幅度(extent).

3 城市土壤 Pb 含量的多尺度空间变异识别

城市土壤 Pb 含量空间分布兼具随机性和确定性特征, 不满足传统统计学样本独立性和随机性的基本假设, 适宜采用地统计学的区域化变量理论<sup>[59]</sup>. 本文在前人研究的基础上, 基于地统计学理论, 概括出识别城市区域多尺度土壤 Pb 含量空间变异的方法框架(图 2): 土壤样本采集和 Pb 含量实测; 土壤 Pb 含量的空间结构特征分析; 构建线性混合效应模型(linear mixed model, LMM)进行空间变异的识别, 可以得到高分辨率的城市土壤 Pb 含量空间分布图.

3.1 城市土壤采样和 Pb 含量实测

如前所述, 城市土壤 Pb 含量的异质性在不同的尺度具有较大的差别, 污染过程影响的尺度与抽样

尺度之间存在真实的相互作用. 采样尺度过大会导致小尺度空间变异信息的丧失<sup>[24]</sup>, 采样尺度过小则花费过高、效率过低, 采样尺度的确定是城市土壤 Pb 含量空间变异研究的一个关键性问题. 除了采样尺度之外, 样本量和样本布局都会影响到空间分布的识别, 特别是在样本量较小的时候影响更为明显<sup>[60]</sup>. 因此, 设计合理的采样策略是城市土壤 Pb 含量空间变异研究的关键.

城市土壤 Pb 含量空间变异研究主要采用 3 种采样策略: 随机抽样、系统抽样或分层抽样. 系统抽样通常采用网格方式进行空间划分, 也有研究采用样带方式<sup>[44]</sup>. 分层抽样通常按照不同类型的城市功能区或土地利用类型(通常划分为工业区、商业区、生活区和休闲区等)进行分层(表 1). 已有相关研究采样尺度不一, 样点最小间距从 60 m~5 km 不等, 部分研究半方差函数的块基比>0.75, 说明以随机变异为主(表 1). 更有甚者, 由于采样尺度过大导致半方差函数为纯块金效应, 采样所获取的土壤 Pb 含量的空间变异表现为完全的随机变异, 未能反映出空间结构信息<sup>[43]</sup>. 这种情况的出现一方面反映了在人为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过大而未能有效地反映其空间结

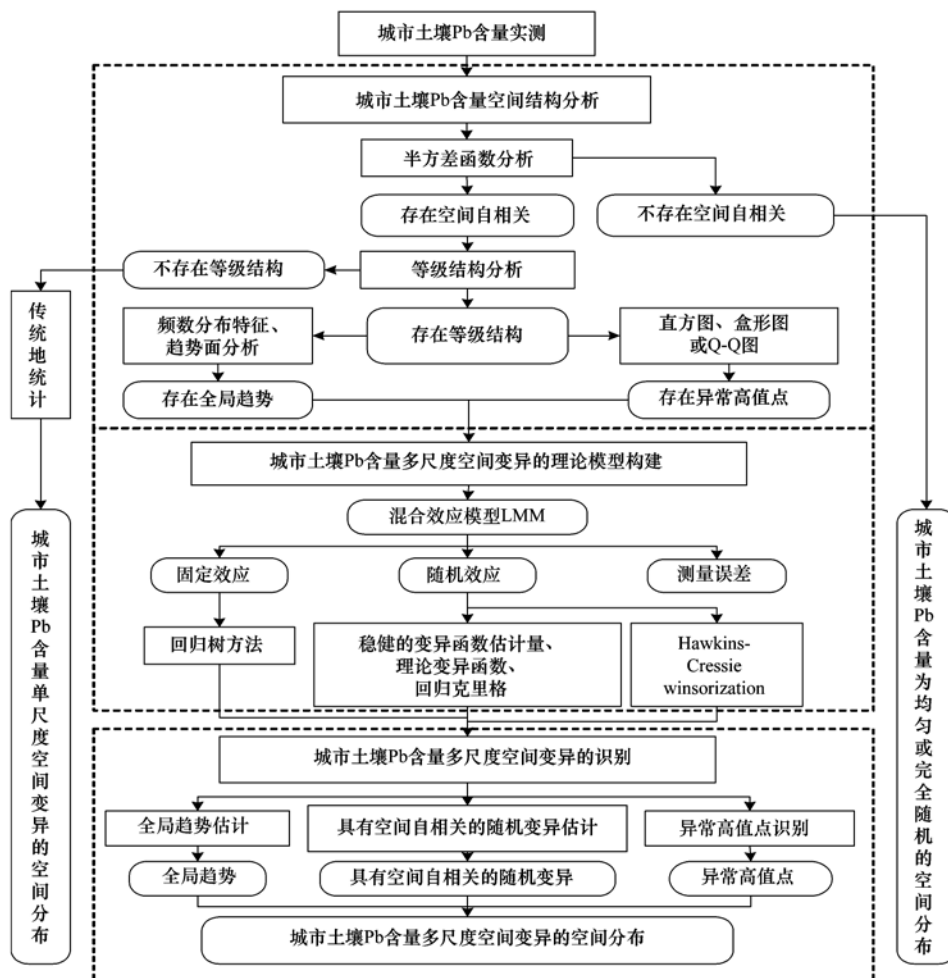


图2 识别城市土壤 Pb 含量多尺度空间变异的方法框架

Fig. 2 A method framework to identify multi-scale spatial variation of Pb contamination in urban soils

构, 需要提高采样点密度<sup>[58]</sup>. 可见确定合理的采样尺度十分关键.

区域内主要污染源的影响范围可以为采样尺度的确定提供重要参考. 可以根据研究目的和重点关注的污染过程, 选择小于污染过程影响范围的尺度作为采样尺度, 其依据就是“不同的污染源影响的空间范围不同”. 例如, 道路交通源对土壤重金属污染的影响范围较小, 通常在道路两侧几米到几十米之间<sup>[13, 49, 72]</sup>. 换言之, 如果某一地区以道路交通为主要污染源, 道路两侧土壤 Pb 含量存在空间自相关的范围(变程)也就是在几十米的范围之内, 采样尺度只有小于这个尺度才能全面地反映土壤 Pb 含量的空间结构特征, 这一点在上海市的研究中得到了证实. 柳云龙等<sup>[43]</sup>在上海市徐汇、闵行和奉贤这 3 个区的研究均采用相似的采样尺度(1.6~2 km 之间), 但是得出的块基比却相差悬殊(表 1): 奉贤区的块基比表明存在较强的空间自相关; 闵行的块基比为 1, 不存在空间自

相关. 造成这种差异的原因是两个区的污染源不同形成了不同的空间变异结构, 闵行区作为上海市重要的对外交通枢纽, 交通道路密集, 以道路交通源为主导, 大于 1 km 的采样间隔显然不能反映出交通源造成的空间结构信息. 而奉贤区为郊区, 受到的人为活动干扰较小, 土壤 Pb 空间分布可能主要受到自然因素的影响, 变程很大(30.95 km), 1.6~2 km 的采样间距能够很好地反映出空间结构信息.

### 3.2 城市土壤 Pb 含量的空间结构分析

科学合理的空间插值必须建立在对变量的空间结构充分了解的基础上, 否则插值得出的空间分布图可能毫无意义<sup>[24]</sup>. 对未知点的土壤 Pb 含量进行空间局部估计之前, 先对土壤 Pb 含量的空间分布进行结构分析, 在此基础上才能建立变异函数的最优理论模型<sup>[59]</sup>. 对城市土壤 Pb 含量的空间分布进行结构分析主要包括: 确定是否存在空间自相关、等级结构、全局趋势以及异常高值<sup>[24]</sup>.

表 1 不同城市土壤 Pb 含量研究采用的抽样方法以及揭示的空间结构特征

Table 1 Sampling method adopted and spatial structures revealed by studies on Pb concentration in soils of different cities

| 研究区            | 研究区面积<br>/km <sup>2</sup> | 抽样方法  |               |       | 空间结构特征 |       |                 | 文献           |
|----------------|---------------------------|-------|---------------|-------|--------|-------|-----------------|--------------|
|                |                           | 抽样策略  | 样点最小<br>间距/km | 样点数   | 变异系数   | 块基比   | 变程/km           |              |
| 南京城市边缘带化工园区    | 20                        | 系统抽样  | 0.15          | 54    | 0.251  | 0.256 | 21              | [61]         |
| 上海外环高速内        | 723                       | 随机抽样  | 1             | 273   | 0.072  | 0.682 | — <sup>1)</sup> | [20]         |
| 厦门市翔安区(农业区)    | 134                       | 系统抽样  | 0.5           | 152   | 0.704  | 0.285 | 43              | [62]         |
| 宜兴市城乡交错区       | 15                        | 系统抽样  | 0.3           | 24    | 1.373  | 0.898 | 3.2             | [44]         |
| 慈溪市            | 1 074                     | 系统抽样  | 2             | 268.5 | 0.340  | 0.227 | 24              | [57]         |
| 慈溪市周巷镇         | 75.4                      | 系统抽样  | 1             | 75    | 0.180  | 0.641 | 2               | [57]         |
| 丽水             | 9                         | 分层抽样  | 0.5           | 126   | 0.348  | 0.5   | 7.19            | [63]         |
| 长沙             | 11 819                    | 随机抽样  | 5             | —     | 0.778  | 0.315 | 14.65           | [64]         |
| 宜宾市城区          | 100                       | 代表性样点 | 0.4           | 63    | 0.632  | 0.287 | 0.13            | [65]         |
| 徐汇、闵行、奉贤区      | 1 112.84                  | 系统抽样  | 2             | 260   | 0.568  | 1     | —               | [43, 58, 66] |
| 徐汇区            | 54.76                     | 系统抽样  | 1.58          | 22    | 0.262  | 0.5   | 2.92            | [43, 58, 66] |
| 闵行区            | 370.75                    | 系统抽样  | 1.61          | 133   | 0.622  | 1     | —               | [43, 58, 66] |
| 奉贤区            | 687.39                    | 系统抽样  | 2             | 105   | 0.341  | 0.201 | 30.95           | [43, 58, 66] |
| 上海师范大学徐汇校区     | 0.35                      | 系统抽样  | 0.06          | 100   | 0.379  | 0.5   | 0.032           | [43, 58, 66] |
| 伊朗 Isfahan     | 700                       | 分层抽样  | 1             | 158   | 0.404  | 0.742 | —               | [41]         |
| 永康市            | 1 049                     | 随机抽样  | 0.5           | 173   | 0.600  | 0.228 | —               | [67]         |
| 土耳其 Iskenderun | 70                        | 分层抽样  | 0.5           | 102   | 2.244  | 0.105 | 18.6            | [68]         |
| 意大利 Calabria   | 92                        | 随机抽样  | 0.5           | 149   | 1.335  | 0.37  | 1.84            | [69]         |
| 沈阳铁西工业区        | 39                        | 系统抽样  | 1             | 93    | 1.279  | 0.863 | 1.48            | [70]         |
| 西安             | 375                       | 系统抽样  | 1.12          | —     | 0.853  | 0.57  | 14.19           | [71]         |

1) “—”表示文章中没有相关数据

变量存在空间自相关是对其进行局部估计的前提条件<sup>[24]</sup>.如果土壤属性不存在空间自相关,在该采样尺度下即为均匀或完全随机的空间分布,不适宜进行空间局部插值,可以采用均值或中值作为土壤属性空间分布的估计<sup>[52]</sup>.我国城市土壤 Pb 含量通常具有空间自相关,但仍有必要采用定量或定性方法对其进行确认.地统计分析采用半方差函数描述土壤属性的空间变异,利用半方差函数的变程、块金值和基台值可以分析判断是随机还是确定性因素对空间变异的形成起主要作用<sup>[52, 73]</sup>.

土壤属性的空间变异通常存在等级结构,只在一个尺度上进行空间变异的评估并不能全面揭示污染的空间结构<sup>[15, 74]</sup>.因此,一旦确定城市土壤 Pb 污染空间分布存在空间变异,就需要判断其是否为等级结构,这是正确构建变异函数理论模型的基础.通过污染物含量的频数分布特征可以定性判断重金属元素是否来自不同的样本总体<sup>[44]</sup>,作为定性判断等级结构的依据.

确定土壤重金属存在等级结构之后,首先需要分析数据是否存在趋势,因为存在趋势的数据不满足地统计学的均值平稳假设<sup>[59]</sup>.可以从数据的频数分布特征来判断,趋势的存在使得数据呈现偏态分布和厚尾<sup>[24, 75]</sup>.还可借助地理信息系统软件进行趋

势面分析<sup>[76]</sup>.或者通过地统计学的各项异性分析找出具有较强结构性的方向,确定为空间趋势的大致走向<sup>[44]</sup>.如果存在全局趋势,可以采用对趋势稳健的变异函数模型<sup>[53]</sup>,或者将趋势从总变异中分离出来<sup>[24]</sup>.

然后,需要分析数据是否存在异常高值点,识别出异常值并对其进行处理.采样尺度过大时,小尺度上的土壤 Pb 污染过程形成的空间结构特征可能无法全面展现,而仅表现为异常高值点<sup>[17, 22]</sup>,如图 1 中污染源 1 的情况.异常高值的存在使得城市土壤 Pb 含量数据呈现正偏态分布(表 1),不满足传统地统计方法正态分布的假设.首先必须识别出异常值,空间数据异常值的识别方法很多,包括图形法、空间数据分析以及克里格法等<sup>[11, 77]</sup>.可以采用简单直观的图形法,例如,直方图、盒形图(box-plot)和 Q-Q 图(quantile-quantile plot)判断是否存在异常高值点;还可采用局部 Moran's I 指数以及地理加权回归(geographically weighted regression, GWR)等空间数据分析法进行土壤属性异常值的识别<sup>[11, 77, 78]</sup>.而克里格法对异常值的识别是通过留一交叉验证(leave-one-out cross-validation)实现,也就是分别移除每个采样点的观测值,再通过克里格法估计该采样点的值,利用估计值与观测值的差异程度来识别

异常值<sup>[77, 79, 80]</sup>. Zhang 等<sup>[77]</sup>比较了直方图、盒形图、局部 Moran's I 指数、GWR 以及克里格法对城市土壤 Pb 污染异常值的识别结果,发现 5 种方法的识别结果基本一致.

识别出异常值后,进行完全剔除或者 winsorizing 处理可以消除异常值的影响.传统地统计方法通常利用 Matheron 矩估计量计算实际的变异函数,该估计量对异常值十分敏感<sup>[81, 82]</sup>,在数据为(近似)正态分布时统计效率最高<sup>[22, 24]</sup>.如果使用传统的 Matheron 矩估计量就必须先消除异常值的影响,通常的做法是完全剔除异常值之后将数据变换到(近似)正态分布<sup>[12, 22]</sup>.由于异常高值点不但包含小尺度污染过程的信息,而且叠加了大尺度污染过程的信息<sup>[22]</sup>;完全剔除可能将大尺度过程引起的变异错误地归类到小尺度过程中而被一并剔除,从而导致有用信息的丢失<sup>[80]</sup>.更好的做法是 Hawkins 等<sup>[83]</sup>早年间提出的一种 winsorization 方法:首先通过克里格方法进行异常值的识别;然后对异常值进行 winsorizing 处理,实现小尺度污染过程信息的去除以及大尺度污染过程信息的保留. Hawkins 等<sup>[83]</sup>的异常值判别标准是,克里格估计值的中值与观测值的差异程度大于估计标准误的  $c$  倍( $1.5 < c < 2.5$ );然后采用估计值以及  $c$  倍的估计标准误对异常值进行 winsorizing<sup>[80]</sup>. Marchant 等<sup>[80]</sup>将这种方法应用到线性混合效应模型(linear mixed model, LMM)中,取得了较好的效果.

### 3.3 城市土壤 Pb 含量多尺度空间变异的理论模型构建和识别

通过线性混合效应模型 LMM 确定变量的空间分布也称为回归克里格(regression-kriging, RK)<sup>[82]</sup>. Marchant 等<sup>[80]</sup>提出的 LMM 将土壤污染的空间变异视为固定效应、随机效应和误差之和:

$$z = M\beta + Zu + \varepsilon \quad (1)$$

式中, $z$ 是在  $n_s$  个样点处获得的  $n$  个土壤样本 Pb 含量实测值所组成的向量, $n_s \leq n$ ;  $M$  为固定效应的设计矩阵, $\beta$  为固定效应的系数向量;  $Z$  为随机效应的设计矩阵, $u$  为随机效应的系数向量;  $\varepsilon$  为测量误差.固定效应是城市土壤 Pb 含量空间变异的确定性部分,对应图 1 中大尺度的全局趋势. LMM 将固定效应  $M\beta$  表示为若干个自变量的线性组合:如果自变量为空间位置,这样的全局趋势称为空间趋势<sup>[75]</sup>;如果自变量为土壤母质、地形和土地利用等辅助数据,地统计学将这样的全局趋势称为外部漂移(external drift)<sup>[53]</sup>.随机效应对应城市土壤 Pb 含

量具有空间自相关的随机变异部分,通常采用地统计学的区域化变量理论,将区域内各个点处的随机效应假设为随机函数在该点的一个实现(观测值),并假设该随机函数的均值 0,协方差矩阵为  $V$ <sup>[22, 53, 80, 84]</sup>.测量误差  $\varepsilon$  假设为均值为 0、方差为  $\sigma^2$  的随机函数的一个独立实现,只有当  $n > n_s$  时,才能将  $\varepsilon$  从随机效应的块金变异中区分出来<sup>[22]</sup>.

空间变异的理论模型构建完成之后,开始对模型参数进行估计.在 LMM 的固定效应估计方面,主要有线性回归方法以及回归树方法.线性回归方法通常使用空间位置、土壤母质、地形以及土地利用等作为自变量<sup>[53, 75]</sup>.例如, Marchant 等<sup>[80]</sup>选择土壤母质作为线性回归方程的自变量,采用不同母质类型的中值作为固定效应,取得了较好的结果.然而, Lacarce 等<sup>[85]</sup>指出线性回归需要基于专家知识选择固定效应的自变量,自变量选择过多会造成结果难以解释,反之则可能仅仅反映出较小部分的固定效应.因此,他们提出通过回归树方法估计固定效应,从而克服线性回归的以上不足.并在回归树的类型选择上放弃常用方法,选择可以避免过度拟合和变量选择偏差的条件分割树(conditional partitioning tree)<sup>[85]</sup>.

在 LMM 的随机效应估计方面,由于城市土壤 Pb 含量空间分布存在异常高值点和全局趋势,需要采用对异常高值点和全局趋势稳健的地统计方法.首先,利用变异函数的估计量计算离散步长(lag)的实际变异函数.地统计中有多个对异常值稳健的变异函数估计量,例如, Cressies-Hawkins、Dowd 以及 Genton 估计量等<sup>[82]</sup>.然后,选择并利用理论变异函数对离散的实际值进行拟合.通常可以采用两种方法比较并筛选出最优的理论变异函数:分析和比较理论模型的拟合优劣参数以及模型参数<sup>[59, 82]</sup>;通过交叉验证、对采用不同变异函数估计量得到的理论模型进行比较<sup>[81]</sup>.在理论变异函数的拟合方法上,对于存在空间趋势的情况,残差最大似然估计(residual maximum likelihood, REML)<sup>[53]</sup>是随机效应的最优线性无偏估计.但是, REML 方法仅适用于观测数据较少( $< 200$ )的情况,且与次优的回归克里格相比,其对结果的改善不大<sup>[86]</sup>,可认为回归克里格是一种对空间趋势稳健的估计方法.选择最优的理论变异函数,利用回归克里格法即可完成 LMM 的随机效应估计,得到城市土壤 Pb 含量具有空间自相关变异的随机变异部分.

最终得到不同空间尺度上城市土壤 Pb 含量的

空间变异,按照从小到大的尺度为:异常高值点;具有空间自相关的随机变异;全局趋势.根据式(1)将固定效应、随机效应和测量误差相加,即可生成全面揭示空间变异特征的城市土壤 Pb 含量的空间分布图.

#### 4 问题与展望

土壤特性的空间变异性是尺度的函数,不同尺度下的自相关程度相差很大.城市土壤 Pb 含量空间变异特征的揭示也需要基于合理的采样尺度,制定合理的空间抽样策略是一个关键问题.空间抽样与传统抽样的最大区别在于空间抽样的调查对象具有地理空间坐标,空间抽样可以采用基于设计的抽样方法(传统方法),以及基于模型的抽样方法(地统计方法)<sup>[87]</sup>.地统计方法是土壤属性空间抽样研究中的一种常用方法,姜成晟等<sup>[88]</sup>详细介绍了如何应用地统计方法提高空间抽样的效率.现有的城市土壤 Pb 含量的空间变异研究在抽样上多采用简单随机抽样、网格抽样或分层抽样方式,抽样效率不高.简单随机抽样没有考虑总体的空间结构规律<sup>[88]</sup>,对于土壤 Pb 含量这种存在复杂空间变异特征的变量效率较低<sup>[60]</sup>.网格抽样费时费力、同样效率低下.事实上,传统抽样方式中也有较为高效率的方法.例如,Chu 等<sup>[60]</sup>采用条件拉丁超立方体抽样(Conditioned Latin Hypercube Sampling)进行台湾中部地区多种重金属污染的长期监测,结果表明这种抽样方式具有较高的效率.探讨更加高效的空间抽样策略是城市土壤 Pb 含量空间变异的研究的一个重点.

抽样问题的复杂性根本上源于城市土壤 Pb 含量空间变异的多尺度特征.由于单一尺度下难以深入分析土壤特性的空间变异结构特征,应当将土壤 Pb 含量空间变异的多尺度研究视为一个核心问题,其要点是确定土壤 Pb 含量空间变异的特征尺度.特征尺度是一定区域内能够表征土壤 Pb 含量空间变异性的最佳粒度(最小可辨识空间单元)或者最适宜的幅度(空间上的持续范围)<sup>[56]</sup>.一旦确定了特征尺度,就可以确定最适宜的采样单元的大小或者样点间隔距离,以及采样的空间范围.总之,多尺度特征研究是城市土壤 Pb 含量空间变异研究需要解决的一个主要问题,该问题的解决有利于全面揭示城市土壤 Pb 含量的空间结构信息.

#### 5 结论

(1)城市土壤 Pb 污染存的高空间变异性是受

到多种污染源和污染过程影响的结果.大气颗粒物干沉降是城市土壤 Pb 污染的主要途径,城市冠层结构强烈地影响大气颗粒物的输送和沉降,从而进一步地增加了城市土壤 Pb 含量空间变异的复杂性.在以上因素的共同作用下,城市土壤 Pb 污染的空间变异表现为嵌套等级结构.空间变异性与尺度密切相关,要全面揭示城市土壤 Pb 污染的空间结构信息,必须开展多尺度研究.本文提出了一个基于地统计学、以混合效应模型为核心的方法框架,可以帮助进行城市土壤 Pb 含量空间变异的多尺度研究,将其划分为 3 个尺度的空间变异:全局趋势、具有空间自相关的随机变异以及异常高值点.

(2)我国现有的相关研究对城市土壤 Pb 含量城市土壤 Pb 污染的多尺度特征重视不够,主要表现在对采样尺度的选择过于随意.忽视空间抽样策略的直接后果是:样点间隔过大而无法揭示任何的空间结构信息.以后的研究在抽样设计上应该更加严谨,特别要加强空间抽样策略的研究以制定高效的抽样方式.抽样问题的复杂性根本上还是源于空间变异的多尺度特征.因此,加强城市土壤 Pb 含量的多尺度研究,特别是对特征尺度的研究就显得尤为重要.

#### 参考文献:

- [1] Needleman H. Lead poisoning[J]. Annual Review of Medicine, 2004, **55**(1): 209-222.
- [2] Godwin H A. The biological chemistry of lead[J]. Current Opinion in Chemical Biology, 2001, **5**(2): 223-227.
- [3] Chen H F, Hu Y A. Lead (Pb) isotopic fingerprinting and its applications in lead pollution studies in China: a review[J]. Environmental Pollution, 2010, **158**(5): 1134-1146.
- [4] Wei B, 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.
- [5] Luo X S, Yu S, Zhu Y G, et al. Trace metal contamination in urban soils of China[J]. Science of the Total Environment, 2012, **421-422**: 17-30.
- [6] Xu H M, Cao J J, Ho K F, et al. Lead concentrations in fine particulate matter after the phasing out of leaded gasoline in Xi'an, China[J]. Atmospheric Environment, 2012, **46**: 217-224.
- [7] He B, Yuan Z J, Shi J B, et al. Research progress of heavy metal pollution in China: sources, analytical methods, status, and toxicity[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, **58**(2): 134-140.
- [8] Hrubá F, Strömberg U, Cernác M, et al. Blood cadmium, mercury, and lead in children: an international comparison of cities in six European countries, and China, Ecuador, and Morocco[J]. Environment International, 2012, **41**: 29-34.

- [9] Charlesworth S, De Miguel E, Ordón A. A review of the distribution of particulate trace elements in urban terrestrial environments and its application to considerations of risk [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2011, **33**(2): 103-123.
- [10] Wang M E, Bai Y Y, Chen W P, *et al.* A GIS technology based potential eco-risk assessment of metals in urban soils in Beijing, China[J]. *Environmental Pollution*, 2012, **161**: 235-243.
- [11] 史文娇, 岳天祥, 石晓丽, 等. 高风险重金属污染土壤识别研究方法综述[J]. *土壤*, 2012, **44**(2): 197-202.
- [12] Saby N P A, Marchant B P, Lark R M, *et al.* Robust geostatistical prediction of trace elements across France [J]. *Geoderma*, 2011, **162**(3-4): 301-311.
- [13] Yesilonis I D, Pouyat R V, Neerchal N K. Spatial distribution of metals in soils in Baltimore, Maryland: role of native parent material, proximity to major roads, housing age and screening guidelines[J]. *Environmental Pollution*, 2008, **156**(3): 723-731.
- [14] Zhao Y C, Wang Z G, Sun W X, *et al.* Spatial interrelations and multi-scale sources of soil heavy metal variability in a typical urban-rural transition area in Yangtze River Delta region of China [J]. *Geoderma*, 2010, **156**(3): 216-227.
- [15] Huo X N, Li H, Sun D F, *et al.* Multi-scale spatial structure of heavy metals in agricultural soils in Beijing[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, **164**: 605-616.
- [16] Lv J, Liu Y, Zhang Z, *et al.* Factorial kriging and stepwise regression approach to identify environmental factors influencing spatial multi-scale variability of heavy metals in soils[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, **261**: 387-397.
- [17] Schwarz K, Pickett S T, Lathrop R G, *et al.* The effects of the urban built environment on the spatial distribution of lead in residential soils[J]. *Environmental Pollution*, 2012, **163**: 32-39.
- [18] Li X P, Feng L N. Multivariate and geostatistical analyzes of metals in urban soil of Weinan industrial areas, Northwest of China[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **47**: 58-65.
- [19] Carvajal B, Aboal J R, Fernández J A, *et al.* Influence of roads and inhabited areas on metal concentrations in terrestrial mosses [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(28): 3432-3441.
- [20] Shi G T, Chen Z L, Xu S Y, *et al.* Potentially toxic metal contamination of urban soils and roadside dust in Shanghai, China[J]. *Environmental Pollution*, 2008, **156**(2): 251-260.
- [21] Sun Y, Zhou Q, Xie X. Spatial, sources and risk assessment of heavy metal contamination of urban soils in typical regions of Shenyang, China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **174**(1-3): 455-462.
- [22] Marchant B P, Tye A M, Rawlins B G. The assessment of point-source and diffuse soil metal pollution using robust geostatistical methods: a case study in Swansea (Wales, UK)[J]. *European Journal of Soil Science*, 2011, **62**(3): 346-358.
- [23] 吴新民, 潘根兴, 姜海洋, 等. 南京城市土壤的特性与重金属污染的研究[J]. *生态环境*, 2003, **12**(1): 19-23.
- [24] Aboal J R, Real C, Fernández J A, *et al.* Mapping the results of extensive surveys: the case of atmospheric biomonitoring and terrestrial mosses[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **356**(1-3): 256-274.
- [25] 潘月鹏, 王跃思, 杨勇杰, 等. 区域大气颗粒物干沉降采集及金属元素分析方法[J]. *环境科学*, 2010, **31**(3): 553-559.
- [26] Azimi S, Ludwig A, Thévenot D R, *et al.* Trace metal determination in total atmospheric deposition in rural and urban areas[J]. *Science of the Total Environment*, 2003, **308**(1-3): 247-256.
- [27] Oka G A. An assessment of trace metals in the soil, vegetation and atmospheric deposition of urban areas in Vancouver [D]. Vancouver: University of British Columbia, 2012. 17-20.
- [28] 徐宏辉, 王跃思, 温天雪, 等. 北京市大气气溶胶中金属元素的粒径分布和垂直分布[J]. *环境化学*, 2007, **26**(5): 675-679.
- [29] 杨勇杰, 王跃思, 徐宏辉, 等. 泰山顶大气气溶胶中金属元素的特征分析[J]. *分析测试学报*, 2008, **27**(4): 390-395.
- [30] Roupsard P, Amielh M, Maro D, *et al.* Measurement in a wind tunnel of dry deposition velocities of submicron aerosol with associated turbulence onto rough and smooth urban surfaces[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2013, **55**(6): 12-24.
- [31] 徐祥德, 周秀骥, 施晓晖. 城市群大气污染源影响的空间结构及尺度特征[J]. *中国科学*, 2005, **35**(S1): 1-19.
- [32] 胡非, 李昕, 陈红岩, 等. 城市冠层中湍流运动的统计特征[J]. *气候与环境研究*, 1999, **4**(3): 252-258.
- [33] Hussein T, Smolik J, Kerminen V M, *et al.* Modeling dry deposition of aerosol particles onto rough surfaces [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2012, **46**: 44-59.
- [34] 张惠远, 饶胜, 迟妍妍, 等. 城市景观格局的大气环境效应研究进展[J]. *地球科学进展*, 2006, **21**(10): 1025-1032.
- [35] 北京城市规划建设与气象条件及大气污染关系研究课题组. 城市规划与大气环境[M]. 北京: 气象出版社, 2004. 19-104.
- [36] 张宁, 蒋维楣. 建筑物对大气污染物扩散影响的大涡模拟[J]. *大气科学*, 2006, **30**(2): 212-220.
- [37] Weathers K C, Simkin S M, Lovett G M, *et al.* Empirical modeling of atmospheric deposition in mountainous landscapes [J]. *Ecological Applications*, 2006, **16**(4): 1590-1607.
- [38] 雷梅, 陈同斌, 郑袁明, 等. 中国重金属污染: 来源与成因分析技术需求[A]. 见: 2011 污染场地修复产业国际论坛暨重庆市环境科学学会第九届学术年会论文集[C]. 2011. 245-253.
- [39] Zhang L, Blanchard P, Johnson D, *et al.* Assessment of modeled mercury dry deposition over the Great Lakes region [J]. *Environmental Pollution*, 2012, **161**: 272-283.
- [40] 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.
- [41] Dankoub Z, Ayoubi S, Khademi H, *et al.* Spatial distribution of magnetic properties and selected heavy metals in calcareous soils

- as affected by land use in the Isfahan region, Central Iran[J]. *Pedosphere*, 2012, **22**(1): 33-47.
- [42] Lee C S, Li X D, Shi W Z, *et al.* Metal contamination in urban, suburban, and country park soils of Hong Kong: a study based on GIS and multivariate statistics [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **356**(1-3): 45-61.
- [43] 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.
- [44] 吴绍华, 周生路, 杨得志, 等. 宜兴市近郊土壤重金属来源与空间分布研究[J]. *科学通报*, 2008, **53**(S1): 162-170.
- [45] Pouyat R V, Yesilonis I D, Russell-Anelli J, *et al.* Soil chemical and physical properties that differentiate urban land-use and cover types[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, **71**(3): 1010-1019.
- [46] 赵彦锋, 史学正, 于东升, 等. 工业型城乡交错区农业土壤 Cu、Zn、Pb 和 Cd 的空间分布及影响因素研究[J]. *土壤学报*, 2007, **43**(2): 227-234.
- [47] Rimmer D L, Vizard C G, Pless-Mulloli T, *et al.* Metal contamination of urban soils in the vicinity of a municipal waste incinerator: one source among many[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **6**(1-3): 207-216.
- [48] 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): 298-304.
- [49] Guney M, Onay T T, Coptu N K. Impact of overland traffic on heavy metal levels in highway dust and soils of Istanbul, Turkey [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, **164**(1-4): 101-110.
- [50] Chen X, Xia X, Zhao Y, *et al.* Heavy metal concentrations in roadside soils and correlation with urban traffic in Beijing, China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **181**(1-3): 640-646.
- [51] Peng C, Ouyang Z Y, Wang M E, *et al.* Assessing the combined risks of PAHs and metals in urban soils by urbanization indicators [J]. *Environmental Pollution*, 2013, **178**: 426-432.
- [52] Ettema C H, Wardle D A. Spatial soil ecology[J]. *Trends in Ecology and Evolution*, 2002, **17**(4): 177-183.
- [53] Lark R M, Cullis B R, Welham S J. On spatial prediction of soil properties in the presence of a spatial trend: the empirical best linear unbiased predictor (E-BLUP) with REML[J]. *European Journal of Soil Science*, 2006, **57**(6): 787-799.
- [54] Boquete M T, Fernández J A, Aboal J R, *et al.* Spatial structure of trace elements in extensive biomonitoring surveys with terrestrial mosses[J]. *Science of the Total Environment*, 2009, **408**(1): 153-162.
- [55] Webster R. Is soil variation random? [J]. *Geoderma*, 2000, **97**(3-4): 149-163.
- [56] 邬建国. 景观生态学: 格局、过程、尺度与等级[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000. 13-14.
- [57] 刘庆, 孙景宽, 陈印平, 等. 不同采样尺度下土壤重金属的空间变异特征[J]. *土壤通报*, 2009, **40**(6): 1406-1410.
- [58] 章立佳. 上海城市土壤重金属空间变异结构和分布特征[D]. 上海: 上海师范大学, 2011. 20-56.
- [59] 王政权. 地统计学及其在生态学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999. 35-98.
- [60] Chu H J, Lin Y P, Jang C S, *et al.* Delineating the hazard zone of multiple soil pollutants by multivariate indicator kriging and conditioned Latin hypercube sampling [J]. *Geoderma*, 2010, **158**(3-4): 242-251.
- [61] 郑海龙, 陈杰, 邓文靖, 等. 南京城市边缘带化工园区土壤重金属污染评价[J]. *环境科学学报*, 2005, **25**(9): 1182-1188.
- [62] 邱海源. 厦门市翔安区土壤重金属分布: 形态及生态效应研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2008. 30-70.
- [63] 王虹艳. 丽水市城市土壤中重金属和磷的空间分布: 磁学监测和污染风险评价[D]. 杭州: 浙江大学, 2010. 21-33.
- [64] Chen J Q, Wang Z X, Wu X, *et al.* Source and hazard identification of heavy metals in soils of Changsha based on TIN model and direct exposure method [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, **21**(3): 642-651.
- [65] 郭广慧, 张航程, 彭颖. 基于 GIS 的宜宾城市土壤 Pb 含量空间分布特征及污染评价[J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(1): 164-171.
- [66] 庄腾飞. 上海市城市边缘区土壤重金属多尺度空间分布特征及污染评价[D]. 上海: 上海师范大学, 2012. 11-58.
- [67] 段慧敏. 永康市城市土壤重金属污染研究[D]. 金华: 浙江师范大学, 2012. 16-32.
- [68] Ağca N, Özdel E. Assessment of spatial distribution and possible sources of heavy metals in the soils of Sariseki-Dörtöl District in Hatay Province (Turkey) [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, doi: 10.1007/s12665-013-2507-8.
- [69] Guagliardi I, Buttafuoco G, Cicchella D, *et al.* A multivariate approach for anomaly separation of potentially toxic trace elements in urban and peri-urban soils: an application in a southern Italy area[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2013, **13**(1): 117-128.
- [70] Li X Y, Liu L J, Wang Y G, *et al.* Heavy metal contamination of urban soil in an old industrial city (Shenyang) in Northeast China[J]. *Geoderma*, 2013, **192**(1-3): 50-58.
- [71] 陈秀端, 卢新卫, 杨光. 城市表层土壤磁化率与重金属含量分布的相关性研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(3): 1086-1093.
- [72] Dao L G, Morrison L, Zhang H X, *et al.* Influences of traffic on Pb, Cu and Zn concentrations in roadside soils of an urban park in Dublin, Ireland[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2013, doi: 10.1007/s10653-013-9553-8.
- [73] 孙英君, 王劲松, 柏延臣, 等. 地统计学方法进展研究[J]. *地球科学进展*, 2004, **19**(2): 265-274.
- [74] 杨奇勇, 杨劲松, 刘广明. 土壤速效养分空间变异的尺度效应[J]. *应用生态学报*, 2011, **22**(2): 431-436.
- [75] Rawlins B G, Lark R M, Webster R, *et al.* The use of soil survey data to determine the magnitude and extent of historic

- metal deposition related to atmospheric smelter emissions across Humberside, UK[J]. *Environmental Pollution*, 2006, **143**(3): 416-426.
- [76] Johnston K, Ver Hoef J M, Krivoruchko K, *et al.* Using ArcGIS geostatistical analyst [M]. Redlands: Esri Press, 2001. 103-105.
- [77] Zhang C S, Tang Y, Luo L, *et al.* Outlier identification and visualization for Pb concentrations in urban soils and its implications for identification of potential contaminated land[J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(11): 3083-3090.
- [78] 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.
- [79] Meklit T, Van Meirvenne M, Verstraete S, *et al.* Combining marginal and spatial outliers identification to optimize the mapping of the regional geochemical baseline concentration of soil heavy metals[J]. *Geoderma*, 2009, **148**(3-4): 413-420.
- [80] Marchant B P, Saby N P A, Lark R M, *et al.* Robust analysis of soil properties at the national scale: cadmium content of French soils[J]. *European Journal of Soil Science*, 2010, **61**(1): 144-152.
- [81] Lark R M. A comparison of some robust estimators of the variogram for use in soil survey[J]. *European Journal of Soil Science*, 2000, **51**(1): 137-157.
- [82] Webster R, Oliver M A. *Geostatistics for environmental scientists* [M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2007. 115-199.
- [83] Hawkins D M, Cressie N. Robust kriging—A proposal[J]. *Mathematical Geology*, 1984, **16**(1): 3-18.
- [84] Marchant B P, Saby N P A, Jolivet C C, *et al.* Spatial prediction of soil properties with copulas[J]. *Geoderma*, 2011, **162**(3-4): 327-334.
- [85] Lacarce E, Saby N P A, Martin M P, *et al.* Mapping soil Pb stocks and availability in mainland France combining regression trees with robust geostatistics[J]. *Geoderma*, 2012, **170**: 359-368.
- [86] Minasny B, McBratney A. Spatial prediction of soil properties using EBLUP with the Matérn covariance function [J]. *Geoderma*, 2007, **140**(4): 324-336.
- [87] Brus D J, Grijter J J. Random sampling or geostatistical modelling? Choosing between design-based and model-based sampling strategies for soil (with discussion) [J]. *Geoderma*, 1997, **80**(1-2): 1-44.
- [88] 姜成晟, 王劲峰, 曹志冬. 地理空间抽样理论研究综述[J]. *地理学报*, 2009, **64**(3): 369-380.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                  |                                                                     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Analysis of Characteristics of Black Carbon Concentration in Shanghai from 2008 to 2012 .....                                                                                    | WANG Hong-qiang, HE Qian-shan, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i> (1215) |
| Chemical Characteristics and Insoluble Particulates' Surface Morphology of a Snowfall Process in the Southeastern Suburb of Urumqi .....                                         | LU Hui, WEI Wen-shou, CUI Cai-xia, <i>et al.</i> (1223)             |
| Comparative Study of the Level and Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers and New Brominated Flame Retardants in the Atmosphere of Typical Urban .....                   | WU Hui, JIN Jun, WANG Ying, <i>et al.</i> (1230)                    |
| Source and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Ambient Air PM <sub>10</sub> from One Coking Plant .....                                                                    | DONG Ting, LI Tian-xin, ZHAO Xiu-ge, <i>et al.</i> (1238)           |
| Estimation of Average Traffic Emission Factor Based on Synchronized Incremental Traffic Flow and Air Pollutant Concentration .....                                               | LI Run-kui, ZHAO Tong, LI Zhi-peng, <i>et al.</i> (1245)            |
| Study on Critical Loads of Sulfur and Nitrogen in the Pearl River Delta .....                                                                                                    | SUN Cheng-ling, XIE Shao-dong (1250)                                |
| Hydrogen Sulfide Removal by the Combination of Non-Thermal Plasma and Biological Process .....                                                                                   | LI Hua-qin, HE Jue-cong, CHEN Zhou-yang, <i>et al.</i> (1256)       |
| Spatial Distribution and Risk Assessment of Atrazine in Taizi River Basin, China .....                                                                                           | ZHENG Lei, ZHANG Yi-zhang, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (1263)         |
| Development of a Method for Measuring Dissolved Reactive Phosphorus (DRP) and Dissolved Ferrous Iron in Large Batch in Pore Water Samples of Sediments with Micro-volumes .....  | WANG Yan, ZHU Chun-gang, XU Di, <i>et al.</i> (1271)                |
| Temporal and Spatial Variation of Water Nutrient Level After Exogenous Nutrient Input .....                                                                                      | FU Ling, ZHAO Kai, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (1278)             |
| Physical Process Based Risk Assessment of Groundwater Pollution in the Mining Area .....                                                                                         | SUN Fa-sheng, CHENG Pin, ZHANG Bo (1285)                            |
| Hydrogeochemical Characteristics of a Typical Karst Groundwater System in Chongqing .....                                                                                        | YANG Ping-heng, LU Bing-qing, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (1290)     |
| Investigation of Nitrogen, Phosphorus and Microbial Contamination in Laolongdong Underground River System of Chongqing .....                                                     | LAN Jia-cheng, YANG Ping-heng, REN Kun, <i>et al.</i> (1297)        |
| Effects on Phosphorus Fraction Distribution in Sediment by Roots of <i>Vallisneria natans</i> .....                                                                              | LI Zhen-guo, WANG Guo-xiang, ZHANG Jia, <i>et al.</i> (1304)        |
| Modeling Nitrogen Transformation in a Novel Circular-Flow Corridor Wetland .....                                                                                                 | PENG Jian-feng, SONG Yong-hui, YUAN Peng, <i>et al.</i> (1311)      |
| Natural Attenuation of Tetracycline in the Water of Taihu Lake Under Different Environmental Conditions .....                                                                    | DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, JI Ying-xue, <i>et al.</i> (1318)      |
| Inactivation and Reactivation of Antibiotic-Resistant Bacteria During and After UV Disinfection in Reclaimed Water .....                                                         | HUANG Jing-jing, TANG Fang, XI Jin-ying, <i>et al.</i> (1326)       |
| Photoreactivation of <i>Escherichia coli</i> and <i>Enterococcus faecalis</i> in the Secondary Effluent Disinfected by UV-TiO <sub>2</sub> .....                                 | WANG Xi-feng, GONG Xin, HU Xiao-lian, <i>et al.</i> (1332)          |
| Stability of C <sub>60</sub> Nanoparticles in Aquatic Systems .....                                                                                                              | FANG Hua, SHEN Bing-bing, JING Jie, <i>et al.</i> (1337)            |
| Fouling Behavior of Sodium Alginate During Microfiltration at Various Ionic Compositions; XDLVO Approach .....                                                                   | ZHAO Ying-xu, ZONG Rui-qiang, GAO Xin-yu, <i>et al.</i> (1343)      |
| Enhanced Remediation of 4-Chloronitrobenzene Contaminated Groundwater with Nanoscale Zero-valence Iron (nZVI) Catalyzed Hydrogen Peroxide (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ) ..... | FU Rong-bing (1351)                                                 |
| Effect of the Coexistence of Chlorobenzene Homologue on Anaerobic Degradation of Hexachlorobenzene .....                                                                         | WANG Qi, LIU Hui, JIANG Lin, <i>et al.</i> (1358)                   |
| Research on Removal Efficiency of Cd(II)-bearing Wastewater by Sulfate-reducing Biological Filter .....                                                                          | WU Xuan, TAN Ke-yan, HU Xi-jia, <i>et al.</i> (1366)                |
| Control Strategies of Nitrogen Removal Process in a Pilot Test of the Southern WWTP Based on the Nitrogen Balance .....                                                          | JIANG Ying-he, LIU Pei-ju, WANG Lei, <i>et al.</i> (1372)           |
| Effect of Simulated Inorganic Anion Leaching Solution of Electroplating Sludge on the Bioactivity of <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> .....                                 | CHEN Yan, HUANG Fang, XIE Xin-yuan (1377)                           |
| Microbial Reduction of Cu <sup>2+</sup> Mediated by Electroactive Biofilms .....                                                                                                 | LIU Yi, ZHOU Shun-gui, YUAN Yong, <i>et al.</i> (1384)              |
| Copper Recovery from Artificial Bioleaching Lixivium of Waste Printed Circuit Boards .....                                                                                       | CHENG Dan, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i> (1391)          |
| Difference of Contaminant Composition Between Landfill Leachates and Groundwater and Its Reasons .....                                                                           | HE Xiao-song, YU Hong, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (1399)             |
| Photochemical Degradation of Landfill Leachate Facilitated by Combined Schwertmannite and H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....                                                    | WANG He-ru, SONG Yong-wei, XU Zhi-hui, <i>et al.</i> (1407)         |
| Effects of Operating Parameters on Organic Toxicity of Sludge Treating Synthetic Bisphenol A Wastewater .....                                                                    | YANG Na, CHEN Xiu-rong, LIN Feng-kai, <i>et al.</i> (1414)          |
| Comparative Study on Biological Methane Potential and Methanogen Biodiversity in the Anaerobic Digestion of Excess Sludge .....                                                  | DONG Hui-yu, JI Min (1421)                                          |
| Isolation and Identification of Mn Oxidizing Bacterium <i>Aminobacter</i> sp. H1 and Its Oxidation Mechanism .....                                                               | YAN Ping, JIANG Li-ying, CHEN Jian-meng, <i>et al.</i> (1428)       |
| Nitrate Removal by a Strain of Nitrate-Dependent Fe(II)-Oxidizing Bacteria .....                                                                                                 | WANG Hong-yu, YANG Kai, ZHANG Qian, <i>et al.</i> (1437)            |
| Study on the Iopromide-Degrading Characteristics of Strain <i>Pseudomonas</i> sp. I-24 via Co-Metabolism .....                                                                   | XU Bing-jie, GAO Pin, XUE Gang, <i>et al.</i> (1443)                |
| Using Flow Cytometry to Explore the Changes of <i>Sphingomonas</i> sp. GY2B Bacterial Surface Characteristics in the Process of Degrading Phenanthrene .....                     | ZHANG Meng-lu, DANG Zhi, WU Feng-ji, <i>et al.</i> (1449)           |
| Research on Characteristic of Interrelationship Between Toxic Organic Compound BPA and <i>Chlorella vulgaris</i> .....                                                           | CHEN Shan-jia, CHEN Xiu-rong, YAN Long, <i>et al.</i> (1457)        |
| Effect of Magnesium Deficiency on Photosynthetic Physiology and Triacylglyceride (TAG) Accumulation of <i>Chlorella vulgaris</i> .....                                           | WANG Shan, ZHAO Shu-xin, WEI Chang-long, <i>et al.</i> (1462)       |
| Effects of Microcystins on Growth and Antioxidant System of Rice Roots .....                                                                                                     | WANG Wei-min, DENG Yu, ZOU Hua, <i>et al.</i> (1468)                |
| Responses of Soybean Cultivar Dongsheng-1 to Different O <sub>3</sub> Concentrations in Northeast China .....                                                                    | ZHANG Wei-wei, WANG Guang-hua, WANG Mei-yu, <i>et al.</i> (1473)    |
| Development and Succession of Biological Soil Crusts and the Changes of Microbial Biomasses .....                                                                                | WU Li, ZHANG Gao-ke, CHEN Xiao-guo, <i>et al.</i> (1479)            |
| Effects of Lead on the Growth and Reproduction of <i>Eisenia fetida</i> with Aged Soils .....                                                                                    | CHEN Li-hong, LIU Zheng-tao, FANG Zheng, <i>et al.</i> (1486)       |
| Soil Heavy Metal Cadmium Standard Limit and Range of Background Value Research .....                                                                                             | ZHAO Xiao-jun, LI Si-jin, XU Ren-ji, <i>et al.</i> (1491)           |
| Study on Soil Element Background Values of the Hoh Xil Area in North Tibet .....                                                                                                 | BAI Jian-kun, WANG Jian-li, LI Chao-liu, <i>et al.</i> (1498)       |
| Transfer Characteristic and Source Identification of Soil Heavy Metals from Water-Level-Fluctuating Zone Along Xiangxi River, Three-Gorges Reservoir Area .....                  | XU Tao, WANG Fei, GUO Qiang, <i>et al.</i> (1502)                   |
| Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological Risk Analysis for Soil Around Haining Electroplating Industrial Park .....                                                  | LI Jiong-hui, WENG Shan, FANG Jing, <i>et al.</i> (1509)            |
| Sources and Spatial Distribution of Typical Heavy Metal Pollutants in Soils in Xihu Scenic Area .....                                                                            | ZHANG Hai-zhen, TANG Yu-li, LU Jun, <i>et al.</i> (1516)            |
| Distribution and Assessment of Mercury in the Ambient Soil of a Municipal Solid Waste Incinerator .....                                                                          | XIE Hui-ting, ZHANG Cheng-zhong, XU Feng, <i>et al.</i> (1523)      |
| Phosphorus Adsorption Characteristics of Soils and Sediments Surrounding Dishui Lake in Shanghai .....                                                                           | ZHUGE Xiang-zhen, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (1531) |
| Impact of SDBS/Na <sup>+</sup> on Red Soil Colloidal Stability .....                                                                                                             | TANG Ying, LI Hang, ZHU Hua-ling, <i>et al.</i> (1540)              |
| Effects of Stabilization Treatment on Migration and Transformation of Heavy Metals in Mineral Waste Residues .....                                                               | ZHAO Shu-hua, CHEN Zhi-liang, ZHANG Tai-ping, <i>et al.</i> (1548)  |
| Study on a New Method of Fast Monitoring Toxicity of Cd <sup>2+</sup> by Algal in Water .....                                                                                    | DUAN Jing-bo, LIU Wen-qing, ZHANG Yu-jun, <i>et al.</i> (1555)      |
| Immunosensor for Rapid Detection of 1,3-Dinitrobenzene .....                                                                                                                     | LONG Feng, SHI Han-chang, WANG Hong-chen, <i>et al.</i> (1561)      |
| Mg/Al Layered Double Hydroxides Prepared by Microwave-Assisted Co-Precipitation Method for the Removal of Bromate .....                                                          | ZHONG Qiong, LI Huan (1566)                                         |
| Discussion on Several Key Points of Decision Support System for Remediation of Contaminated Sites .....                                                                          | LIAO Xiao-yong, TAO Huan, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (1576)         |
| A Review of Multi-Scale Studies on Spatial Variation of the Lead (Pb) Concentration in Urban Soils .....                                                                         | YANG Meng, LI Feng-ying, DIAO Yi-wei, <i>et al.</i> (1586)          |
| Review on Characteristics and Detecting Assay of Bacterial Endotoxin Contamination in Water Environment .....                                                                    | ZHANG Can, LIU Wen-jun, ZHANG Ming-lu, <i>et al.</i> (1597)         |
| Advances in Molecular Mechanism of Bacterial Reduction of Hexavalent Chromium .....                                                                                              | LI Dou, ZHAO You-cai, SONG Li-yan, <i>et al.</i> (1602)             |
| Anaerobic Membrane Bioreactors for Treating Agricultural and Food Processing Wastewater at High Strength .....                                                                   | WEI Yuan-song, YU Da-wei, CAO Lei (1613)                            |

# 《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4月15日 35卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 4 Apr. 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)<br>北京市环境保护科学研究院<br>清华大学环境学院                                                                                                                               | Co-Sponsored     | by | Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection<br>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<br>北京市2871信箱(海淀区双清路<br>18号, 邮政编码:100085)<br>电话:010-62941102, 010-62849343<br>传真:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn | Edited           | by | The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE )<br>P. O. Box 2871, Beijing 100085, China<br>Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn |
| 出 版     | 科 学 出 版 社<br>北京东黄城根北街16号<br>邮政编码:100717                                                                                                                             | Published        | by | Science Press<br>16 Donghuangchenggen North Street,<br>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<br>电话:010-64017032<br>E-mail: journal@ mail. sciencep. com                                                                                                | Distributed      | by | Science Press<br>Tel:010-64017032<br>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<br>(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