

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第9期

Vol.34 No.9

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

利用PUF被动采样技术研究长三角城市群大气中多环芳烃的时空分布及来源 张利飞, 杨文龙, 董亮, 史双昕, 周丽, 张秀蓝, 李玲玲, 钮珊, 黄业茹 (3339)

FTIR对大气颗粒物PM_{2.5}中硝酸盐的定量分析 刘娜, 魏秀丽, 高闽光, 徐亮, 焦洋, 李胜, 童晶晶, 程巴阳 (3347)

福建茫荡山地区春季大气O₃、HONO、HCHO、H₂O₂对·OH的贡献率研究 刘昊, 王会祥 (3352)

水体类固醇雌激素污染现状研究进展 都韶婷, 金崇伟, 刘越 (3358)

嘉兴市地表水中兽用抗生素的污染现状调查 闫幸, 余卫娟, 兰亚琼, 李立, 吕升, 叶朝霞, 张永明, 刘锐, 陈吕军 (3368)

上海食用鱼中短链氯化石蜡的污染特征 姜国, 陈来国, 何秋生, 孟祥周, 封永斌, 黄玉妹, 唐才明 (3374)

水体环境内毒素活性的鲎法定量检测及影响因素研究 张灿, 刘文君, 张明露, 田芳, 孙雯, 钱令嘉, 战锐 (3381)

四环素类抗生素对淡水绿藻的毒性作用 徐冬梅, 王艳花, 饶桂维 (3386)

光照对东海典型赤潮藻生长及硝酸还原酶活性的影响 李鸿妹, 石晓勇, 丁雁雁, 唐洪杰 (3391)

围隔实验中浒苔在不同营养盐条件下的生长比较 庞秋婷, 李凤, 刘湘庆, 王江涛 (3398)

长江口及邻近海域浮游植物色素分布与群落结构特征 赖俊翔, 俞志明, 宋秀贤, 韩笑天, 曹西华, 袁涌铨 (3405)

长江中下游湖泊超微型真核藻类遗传多样性研究 李胜男, 史小丽, 谢薇薇, 龚伊, 孔繁翔 (3416)

峡谷型水源水库的氮、磷季节变化及其来源分析 黄廷林, 秦昌海, 李璇 (3423)

九龙江河流-库区系统沉积物磷特征及其生态学意义 鲁婷, 陈能汪, 陈朱虹, 王龙剑, 吴杰忠 (3430)

氮在高含沙水向人工浅水湖泊补水期间的变化规律 陈友媛, 申宇, 杨世迎 (3437)

石灰石和黄铁矿-石灰石人工湿地净化河水的研究 张菁, 李睿华, 李杰, 胡俊松, 孙茜茜 (3445)

杭州湾潮滩湿地3种优势植物碳氮磷储量特征研究 邵学新, 李文华, 吴明, 杨文英, 蒋科毅, 叶小齐 (3451)

滇池优势挺水植物茭草和芦苇降解过程中DOM释放特征研究 谢理, 杨浩, 渠晓霞, 朱元荣, 鄢元波, 张明礼, 吴丰昌 (3458)

自来水处理工艺对溶解相中全氟化合物残留的影响 张鸿, 陈清武, 王鑫璇, 柴之芳, 沈金灿, 杨波, 刘国卿 (3467)

J市饮用水氯消毒副产物分析及其健康风险评价 李晓玲, 刘锐, 兰亚琼, 余素林, 文晓刚, 陈吕军, 张永明 (3474)

水中硫酸根及溶解氧质量浓度变化对管垢金属元素释放的影响 吴永丽, 石宝友, 孙慧芳, 张枝焕, 顾军农, 王东升 (3480)

重金属捕集剂对水中微量Hg(II)的处理研究 胡运俊, 盛田田, 薛晓芹, 谭丽莎, 徐新华 (3486)

聚合氯化铁-聚(环氧氯丙烷-二甲胺)复合絮凝剂在模拟水处理中的混凝特性研究 刘新新, 杨忠莲, 高宝玉, 王燕, 岳钦艳, 李倩 (3493)

镁铝复合脱色絮凝剂的微观结构形态及絮凝机制 桑义敏, 常雪红, 车越, 谷庆宝 (3502)

钴掺杂铁酸铋活化过硫酸盐降解水中四溴双酚A的研究 欧阳磊, 丁耀彬, 朱丽华, 唐和清, 廖海星 (3507)

以海泡石为载体的双金属多相类芬顿催化剂的制备及表征 宿程远, 李伟光, 刘兴哲, 王恺尧, 王勇 (3513)

氧化还原介体调控亚硝酸盐反硝化特性研究 赵丽君, 马志远, 郭延凯, 席振华, 杜海峰, 刘晓宇, 郭建博 (3520)

缓释碳源滤池用于二级出水的深度脱氮 唐蕾, 李彭, 左剑恶, 袁琳, 李再兴 (3526)

微膨胀对好氧颗粒污泥脱氮过程中N₂O产生量的研究 陈丽丽, 高大文 (3532)

Fenton试剂与CPAM联合调理对污泥脱水效果的影响研究 马俊伟, 刘杰伟, 曹芮, 岳东北, 王洪涛 (3538)

高效厌氧氨氧化颗粒污泥的动力学特性 唐崇俭, 熊蕾, 王云燕, 郑平 (3544)

内蒙古温带草原氮沉降的观测研究 张菊, 康荣华, 赵斌, 黄永梅, 叶芝祥, 段雷 (3552)

湘中矿区不同用地类型面源Cd输出负荷的原位实验研究 刘孝利, 曾昭霞, 陈喆, 铁柏清, 陈永稳, 叶长城 (3557)

蠡湖沉积物重金属形态及稳定性研究 王书航, 王雯雯, 姜霞, 宋倩文 (3562)

密云县境内潮河流域土壤重金属分析评价 于洋, 高宏超, 马俊花, 李迎霞, 莫雁, 孔彦鸿 (3572)

西北干旱区黄河沿岸典型工业带表土磁性特征及其环境意义 许淑婧, 张英, 余晔, 王博, 夏敦胜 (3578)

复合稳定剂对砷污染土壤的稳定研究 王浩, 潘利祥, 张翔宇, 李萌, 宋宝华 (3587)

湖南下水湾铅锌尾矿库优势植物重金属含量及富集特征 何东, 邱波, 彭尽晖, 彭亮, 胡凌霄, 胡瑶 (3595)

安太堡露天矿复垦地不同人工植被恢复下的土壤酶活性和肥力比较 王翔, 李晋川, 岳建英, 周小梅, 郭春燕, 卢宁, 王宇宏, 杨生权 (3601)

三苯基锡的微生物降解及其对降解菌的影响 叶锦韶, 田云, 尹华, 彭辉, 黄捷, 麻榆佳 (3607)

二氯甲烷降解菌 *Methylobacterium rhodesianum* H13 的分离鉴定及降解特性研究 刘洪霞, 朱润晔, 欧阳杜娟, 庄庆丰, 陈东之, 陈建孟 (3613)

引物选择对污泥微生物多样性分析的影响 徐爱玲, 吴等等, 宋志文, 任杰, 夏岩, 董珊珊, 刘梦 (3620)

钙铝类水滑石衍生复合氧化物的SO₂储存性能研究 曹琳, 王海滨, 解强 (3627)

基于转运站满负荷的北京市新东西城区生活垃圾物流优化方案研究 袁京, 李国学, 张红玉, 罗一鸣 (3633)

重金属污染土壤治理与生态修复论坛会议论文

多证据分析技术在场地重金属污染评价中的应用研究 姜林, 钟茂生, 朱笑盈, 姚珏君, 夏天翔, 刘辉 (3641)

我国城市不同功能区地表灰尘重金属分布及来源 李晓燕, 刘艳青 (3648)

黄河下游滩区开封段土壤重金属分布特征及其潜在风险评价 张鹏岩, 秦明周, 闫江虹, 胡长慧, 赵亚平 (3654)

青岛北站规划区原场地表层土壤重金属污染研究 朱磊, 贾永刚, 潘玉英 (3663)

某铅蓄电池厂土壤中铅的含量分布特征及生态风险 郑立保, 陈卫平, 焦文涛, 黄锦楼, 魏福祥 (3669)

某铅冶炼厂对周边土壤质量和人体健康的影响 周小勇, 雷梅, 杨军, 周广东, 郭广慧, 陈同斌, 万小铭, 梁琪, 乔鹏伟 (3675)

某铅蓄电池厂表土不同粒径中铅分布规律研究 岳希, 孙体昌, 黄锦楼 (3679)

原位生物稳定固化技术在铬污染场地治理中的应用研究 张建荣, 李娟, 许伟 (3684)

淋洗剂对多金属污染尾矿土壤的修复效应及技术研究 朱光旭, 郭庆军, 杨俊兴, 张晗芝, 魏荣菲, 王春雨, Marc Peters (3690)

铅蓄电池厂污染土壤中重金属铅的清洗及形态变化分析 任贝, 黄锦楼, 苗明升 (3697)

超声波辅助化学萃取对某工业场地铅污染土壤修复效果研究 王鑫杰, 黄锦楼, 刘志强, 岳希 (3704)

摩擦清洗修复铅污染土壤的参数优化及清洗效率评价 杨雯, 黄锦楼, 彭会清, 李思拓 (3709)

土壤重金属钝化修复剂生物炭对镉的吸附特性研究 郭文娟, 梁学峰, 林大松, 徐应明, 王林, 孙约兵, 秦旭 (3716)

无机稳定剂对重金属污染土壤的化学稳定修复研究 曹梦华, 祝玺, 刘黄诚, 王琳玲, 陈静 (3722)

《环境科学》征稿简则(3404) 《环境科学》征订启事(3444) 信息(3492, 3551, 3696, 3715)

多证据分析技术在场址重金属污染评价中的应用研究

姜林^{1,2,3}, 钟茂生^{1,2,3}, 朱笑盈^{1,2,3}, 姚珏君^{1,2,3}, 夏天翔^{1,2,3}, 刘辉^{1,2,3}

(1. 北京市环境保护科学研究院, 北京 100037; 2. 国家城市环境污染控制工程技术研究中心, 北京 100037; 3. 污染场地风险模拟与修复北京市重点实验室, 北京 100037)

摘要: 采用多证据分析技术, 综合重金属浓度相对累积频率分布规律及其在场址中的空间分布规律, 推导了案例场址土壤中 As、Cr⁶⁺ 背景浓度上限。其中, 场址 1 土壤中 As、Cr⁶⁺ 背景浓度上限分别为 29.8 mg·kg⁻¹、76.1 mg·kg⁻¹, 均远高于文献报道的北京地区土壤背景浓度。场址 2 土壤中 As、Cr⁶⁺ 背景浓度上限分别为 10.6 mg·kg⁻¹、33 mg·kg⁻¹, 略高于文献报道浓度。以推导的背景值作为评估标准, 案例场址均存在不同程度污染, 与场址历史生产活动中的排污特性分析结果及元素相关性分析结果相符。其中, 场址 1 中 As、Cr⁶⁺ 的超标率分别为 3.8%、6.0%, 场址 2 中仅 As 超标, 超标率为 5.2%, 但均远低于以文献报道的背景浓度作为评估标准确定的超标率 77.7%、96.7% 及 41.9%。因此, 具体重金属污染场址评估项目中, 应避免因直接以文献报道的区域背景浓度作为标准进行评估而使结论缺乏客观性, 并导致后续修复过程中投入过多不必要的修复资金。

关键词: 多证据分析; 重金属; 污染场址; 污染评价; 应用研究

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)09-3641-07

Application of Multiple Lines of Evidence Analysis Technology in the Assessment of Sites Contaminated by Heavy Metals

JIANG Lin^{1,2,3}, ZHONG Mao-sheng^{1,2,3}, ZHU Xiao-ying^{1,2,3}, YAO Jue-jun^{1,2,3}, XIA Tian-xiang^{1,2,3}, LIU Hui^{1,2,3}

(1. Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037, China; 2. National Engineering Research Centre for Urban Environmental Pollution Control, Beijing 100037, China; 3. Beijing Key Laboratory for Risk Modeling and Remediation of Contaminated Sites, Beijing 100037, China)

Abstract: A multiple lines of evidence analysis technology was applied to assess whether sites were contaminated by heavy metals (HMs). Firstly, the baseline upper limit concentration for As and Cr⁶⁺ were derived for the two investigated sites based on the analysis of the relative cumulative probability plots of the two metals and their spatial distribution in the soil. The results indicated that the baseline upper limit concentrations for As and Cr⁶⁺ at site 1 were 29.8 mg·kg⁻¹ and 76.1 mg·kg⁻¹, respectively, which were much higher than those reported for the local area by others. But at site 2, the baseline upper limit concentrations for As and Cr⁶⁺ were 10.6 mg·kg⁻¹ and 33 mg·kg⁻¹, respectively, which were only a little higher than the reported values. Taken the derived baseline concentrations as the assessment criteria, both sites were contaminated by the heavy metals to some degree, which is consistent with the site historical activities review results and element correlation analysis results. At site 1, the As concentration in 3.8% samples exceeded the derived baseline concentration, while the Cr⁶⁺ concentration in 6.0% samples exceeded the baseline concentration. At site 2, only the concentration of As in 5.2% samples exceeded the derived baseline value. All the above exceeding rates were much lower than those based on the reported baseline values, which were 77.7% and 96.7% for As and Cr⁶⁺ at site 1, respectively and 41.9% for As at site 2. The difference indicates that for a specific site, the baseline concentrations for heavy metals reported in literatures should not be directly applied as the criteria to assess whether the site is contaminated or not, which may cause the results to lose the objectivity and leading to the misallocation of lots of rare resource to remediate soil that maybe not contaminated.

Key words: multi-evidence analysis; heavy metal; contaminated site; contamination assessment; application study

目前,北京、上海、重庆及大连等城市都已开展了大规模的城市改造,大批污染企业将逐步搬迁,在城市中心遗留了大量严重污染却又是珍贵资源的土地^[1]。其中,重金属污染场址占有一定比例。与农业等非居住用地重金属污染土壤不同,城市化改造过程中遗留的大部分重金属污染场址将变更为居住或商业用地。因此,对这类重金属污染场址,将样品重金属检测值与现有土壤环境质量标准^[2]进行

比较,以判断场址是否污染以及污染是否会对未来场址使用者健康造成不可接受危害的评价方法显然已经不适用。目前,人体健康风险评估技术已广泛

收稿日期: 2012-08-10; 修订日期: 2012-10-21

基金项目: 北京市科委重大项目(D08040900360804); 环境保护公益性行业科研专项(201009032)

作者简介: 姜林(1964~),男,博士,研究员,主要研究方向为污染场地调查评估与修复及固体废物污染控制与管理, E-mail: jl-iep@vip.163.com

用于类似重金属工业污染场地的评估^[3-8],其结果能为场地的后续风险管理及修复提供更客观、科学的依据.该方法主要沿用美国国家科学院提出的风险评估思路,主要包括污染识别、暴露评估、毒性评估与风险表征这4个步骤.其中,污染识别的目的在于通过场地历史生产活动资料调查、确认采样等活动,初步判断并筛选场地土壤中关注污染物(即需要进一步根据场地及暴露人群特征进行风险评估的污染物),避免在后续评价阶段投入过多不必要的资源对非关注污染物进行深入评估^[9,10].

风险识别阶段污染物的筛选标准,往往采用依据风险评估模型计算的可接受风险水平下土壤中最大允许浓度.但是,这一计算值并未考虑土壤中重金属的背景浓度,直接应用这一模型计算值往往会高估场地土壤重金属污染程度,并进而可能导致场地过度修复,浪费不必要的资金.例如,直接采用模型计算砷在居住用地情形下的最高允许浓度为 $0.33 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,远低于陈同斌等^[11]报道的北京市土壤砷背景值 $7.09 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 及魏复盛等^[12]报道的我国土壤砷背景浓度 $9.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.针对这种情况,非常有必要综合场地历史生产活动过程中原料使用及排污情况、特定场地背景值等因素对场地是否存在重金属污染进行判断,以便筛选出场地土壤中真正存在污染的重金属.本研究将以北京某化工厂为例,详细介绍多证据分析技术在场地重金属污染评价中的具体应用,以期为国内同类场地的评价提供参考和借鉴.

1 多证据分析技术

在环境领域,为解决一些非常复杂的问题,往往需要做出一些合理但却存在一定不确定性的假设条件以使复杂问题的求解变得相对简单,所需投入的资源相对较少.但是,由于问题求解过程中所做的假设具有一定的不确定性,导致该问题的最终求解结果也往往具有一定的不确定性.因此,为使结果不确定性降低,以此做出的决策更为客观、科学,人们往往同时从其他角度对该问题进行进一步分析,以获取更多的证据证实该结论的可靠性.针对同一问题从不同角度对其进行分析并获取相应的初步结论,最后在此基础上对该问题做出相对更为可靠的最终判断,这种技术在场地污染评估领域多被称之为多证据分析技术.

在重金属场地污染评估方面,由于土壤中重金属具有一定的背景浓度,且该背景浓度往往是依据

该地区大尺度范围内广泛采样后对结果进行统计分析所获取.一般是将样品的平均值或95%分位数浓度作为该区域某种重金属的背景浓度.由于重金属背景浓度在空间地域上的差异,将某一具体污染场地样品检测结果与这一背景值进行比较往往会做出该场地是否污染以及污染程度的错误判断.同时,有些重金属基于可接受健康风险计算的筛选浓度往往过低,甚至低于其报道的背景浓度,在这种情况下也无法应用健康风险筛选值进行判断.至于现有的土壤环境质量标准,由于用地性质的差异,也无法直接应用.因此,针对特定的重金属污染场地,层次化地开展多证据分析,以判断场地土壤中某种重金属是否污染,对制定客观科学的场地污染管理措施十分必要.

重金属污染场地的多证据分析主要包括以下4个方面:①场地历史生产活动调查与分析.因为某一具体场地土壤是否受到污染,与在该场地曾从事过的生产活动密切相关.如果现有资料显示至今未曾在该场地从事过任何使用及排放重金属的生产活动,同时现场勘查也并未发现重金属污染痕迹,则可初步判断该场地受重金属污染的可能性较小.此时,评估人员应同相关利益方进行沟通,商议是否有必要进行进一步确认采样分析.如果不能收集完整的场地生产活动变更资料,往往在此基础上会进行确认采样分析;②样品检测结果正态分布检验.一般认为,自然条件下土壤中重金属浓度呈正态或对数正态分布^[13].对特定场地样品重金属检测浓度进行正态分布检验时,其浓度相对累积频率分布图近似表现为一条连续的直线.如果浓度累积频率分布图中有大量点偏离该直线的高浓度异常点,表明监测数据可能来自两个不同的数据源,场地土壤可能受到重金属污染^[13,14].但是,也可能是由于地质成型过程导致场地局部重金属背景浓度较高,需要结合这些高浓度异常点在厂区土壤中的空间分布以判断这部分高浓度异常点是因人为污染所致还是场地的天然高背景值所致;③与特定场地背景浓度的比较.由于受人为活动影响,评估过程中往往很难直接获取特定场地重金属背景浓度,因此,可采用地球化学统计方法,以特定场地样品分析结果为样本,推导该场地重金属的背景浓度,并将分析结果与推导值进行比较,以判断场地土壤是否受到污染. Bauer 等^[15]提出的浓度相对累积频率分析方法认为污染土壤中元素浓度的相对累积频率分布曲线可能有两个拐点,值较低的点可能代表了元素背景浓度

的下限,值较高的点可能代表了背景浓度的上限(人类活动影响部分的下限)。超过背景值上限部分的点可能与人类活动有关,也可能无关^[16]。因此,可首先根据特定场地的监测数据,采用这一地球化学统计方法,同时结合重金属在场址土壤中的空间分布,推导出该场地重金属背景浓度分布范围,并将检测结果与该推导值进行比较,以判断是否存在重金属污染。

④相关性分析。一般认为,自然条件下土壤中重金属背景浓度具有较好的相关性,当场址土壤被某些重金属污染时,这些重金属与场址土壤中其他未受污染的重金属浓度间相关性被破坏。当具体场址土壤中某一重金属浓度与场址其他重金属浓度相关性均较差时,一般认为场址土壤已受该种重金属污染。

2 案例应用

2.1 案例概况

本研究将选择 2 个工业污染场址进行多证据分析技术的应用介绍。其中,场址 1 为北京某化工厂,位于北京市东四环广渠路附近,占地面积 33.9 万 m²。该场址 1950 年以前主要是农田与荒地,未曾从事过任何工业生产活动。1950 年建厂生产试剂,当时生产工艺十分落后。为满足城市建设的需求,该化工厂于 2004 年前后停止生产并逐步搬迁。场址 2 为北京某焦化厂,该厂位于北京市东五环垡头地区,占地面积 136 万 m²。自 1953 年建厂以来,一直主要以煤为原料从事炼焦活动。

2.2 评估结果

2.2.1 历史生产活动调查与分析

对研究场址 1 历史用地资料分析可知,该场址在 3 个不同时期曾从事过不同的生产活动。其中,1950 年以前,主要是农田与荒地,这一时期的生产活动未曾记载使用过含重金属的化学原料及排放含重金属的有毒有害物质。1950 年至 20 世纪 80 年代末期,在该场址建设了北京某有机化工厂,砷盐及铬盐是其主要产品之一。同时,厂区历史资料显示,1973 年前,该厂生产过程中产生的各种废弃物未经任何处理便直接排入周围环境,试剂分厂排放口 Cr⁶⁺ 排放量为 42 kg·a⁻¹。因此,根据场址 1 历史生产活动资料分析可知,厂区土壤极有可能被 As 及 Cr⁶⁺ 等重金属污染,必须对厂区土壤进行采样分析,以进一步判断厂区土壤是否确实受到以上重金属污染。

对研究场址 2 历史用地的资料分析得知,该厂

区存在一个占地面积较大的煤堆场。在降雨的作用下,煤中的重金属可能被淋溶进入土壤进而对其造成污染。同时,炼焦过程中,煤中的重金属在高温焦炉中将转化为气态,之后通过干湿沉降进入土壤并进而对其造成污染。因此,基于以上分析,推测焦化厂土壤也可能受 As、Cr⁶⁺ 等重金属污染。

2.2.2 检测结果正态性检验与分布规律分析

为进一步确认该场址土壤是否被重金属污染,对两个研究场址进行采样分析。其中场址 1 采集土壤样品 184 个,场址 2 采集土壤样品 159 个,样品检测浓度的统计数据如表 1 所示。

表 1 样品浓度统计数据¹⁾/mg·kg⁻¹

污染物	场址 1		场址 2	
	As	Cr ⁶⁺	As	Cr ⁶⁺
最大值	102	196.6	47.5	33
最小值	2.4	23.4	2.5	11.9
平均值	12.9	56.8	7.7	21.2
标准偏差	11.3	23.4	5.3	3.9
变异系数	0.9	0.4	0.7	0.2
文献报道背景值 ^[11]	7.81	31.1	—	—

1) 文献报道的背景值为整个北京市土壤背景值的平均浓度

由表 1 可知,本研究两个场址土壤中 As 均存在最大值远超过文献报道的背景值上限浓度,但是仅场址 1 土壤中 Cr⁶⁺ 的最大浓度远超过报道的背景上限浓度。由于文献报道的背景值范围是在整个北京区域范围内进行采样分析统计所得,考虑到土壤中重金属背景浓度的空间差异性,无法就此做出研究场址是否受到以上两种重金属污染。为确保评估结论更可靠,本研究对两个场址中 As 和 Cr⁶⁺ 的检测浓度进行了正态分布检验。同时,综合这两种重金属在场址土壤中的空间分布,对研究场址土壤中这两种重金属背景浓度进行了推导。场址重金属浓度的相对累积频率及空间分布如图 1 及图 2 所示。

从图 1 及图 2 可以看出,场址 1 土壤中 As 和 Cr⁶⁺ 浓度的相对累积频率曲线中均明显有部分样点浓度偏离该曲线图中的直线段。其中,As 相对累积频率曲线的拐点出现在 29.8 mg·kg⁻¹处, Cr⁶⁺ 相对累积频率曲线的拐点出现在 76.1 mg·kg⁻¹处。场址 2 土壤中 As 的浓度相对累积频率曲线也出现同样现象,其拐点出现在 10.6 mg·kg⁻¹处,但 Cr⁶⁺ 浓度的相对累积频率曲线近似表现为一条连续的直线。一般认为,自然条件下,土壤中重金属的背景浓度为正态分布,其浓度的相对累积频率曲线近似为一条连续的直线。当样品浓度相对累积频率分布图中出

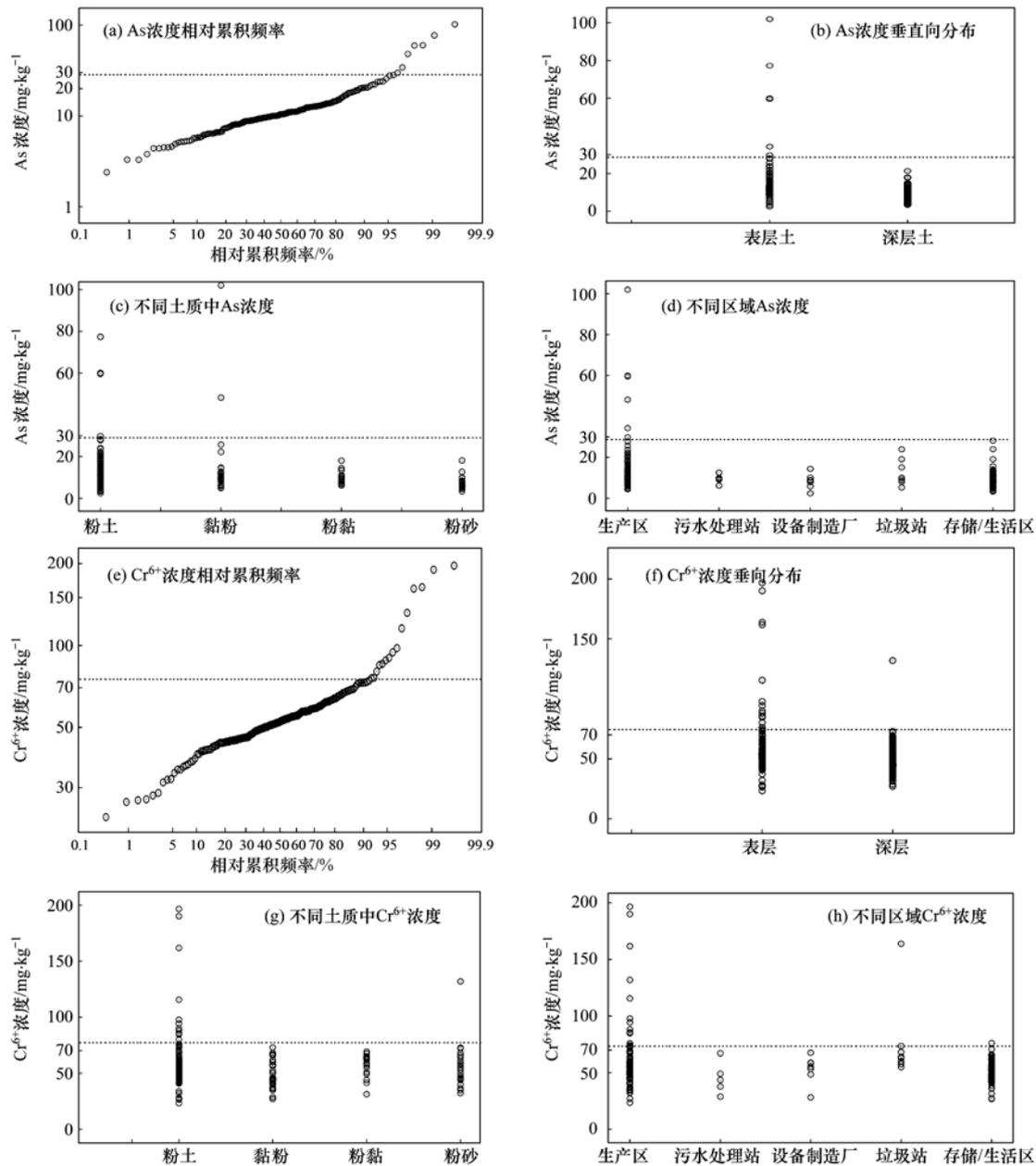


图1 场地1 相对累积频率及空间分布

Fig. 1 Relative cumulative probability and spatial distribution plot for site 1

现较多偏离该直线段的高值样点时,可能存在以下两个原因^[13]:①地质形成过程中导致重金属在场地部分区域土壤中背景浓度偏高,其值将可能偏离相对浓度累积频率曲线的直线段;②这部分监测数据来自两个不同的样本群,其中浓度较高的样本群可能为人为源,表明场地局部土壤可能受到相应重金属污染.因此,通过对图1及图2中两个场地As、Cr⁶⁺浓度的相对累积频率图分析可知,场地1局部土壤可能受到As、Cr⁶⁺污染,场地2局部土壤可能受到As污染,但可能不存在Cr⁶⁺污染.为使判断更准确,需进一步分析这两种重金属在场地土壤中的

空间分布.

通常认为,除地下储罐区域外,场地表层土壤更易受到重金属污染.因此,当某一具体场地表层土壤中重金属浓度明显高于深层土壤对应重金属浓度时,该场地表层土壤有可能受到相应重金属污染^[13].以0~2 m作为表层土壤、2 m以下作为深层土壤研究了所选场地土壤中As、Cr⁶⁺浓度的纵向分布,其结果如图1(b)、1(f)及图2(b)、2(f)所示.从中可看出,场地1表层土壤中As、Cr⁶⁺的浓度均高于深层土壤对应重金属浓度.场地2表层土壤中As浓度也高于深层土壤中As的浓度,但是Cr⁶⁺

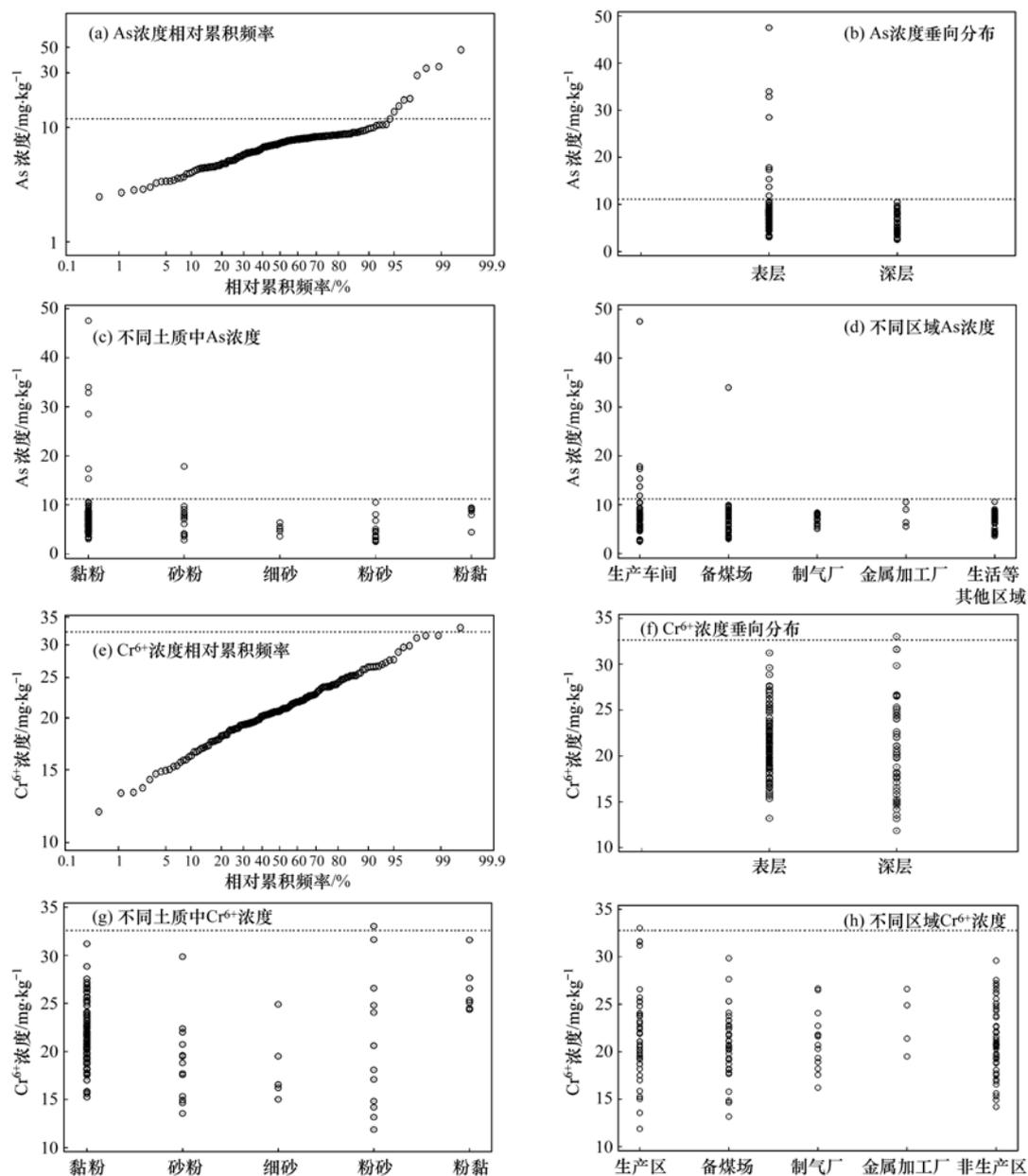


图2 场地2 相对累积频率及空间分布

Fig. 2 Relative cumulative probability and spatial distribution plot for site 2

的差异性不明显. 进一步对研究场地表层与深层土壤重金属浓度进行差异性检验表明, 场地1 表层土壤 As 平均值的 95% 置信区间为 $13.1 \sim 18.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 明显高于深层土壤平均值的 95% 置信区间 $8.1 \sim 9.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($P < 0.01$). Cr^{6+} 表层土壤平均值的 95% 置信区间为 $55.2 \sim 66.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 明显高于深层土壤平均值的 95% 置信区间 $48.3 \sim 53.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($P < 0.01$). 场地2 表层土壤 As 平均值 95% 置信区间 $7.4 \sim 9.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 明显高于深层土壤平均值的 95% 置信区间 $5.4 \sim 6.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($P < 0.01$). 但是, 场地2 土壤表层 Cr^{6+} 平均值 95% 置

信区间为 $20.7 \sim 22 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 与深层土壤 Cr^{6+} 平均值的 95% 置信区间 $19.2 \sim 22.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 无明显差异 ($P = 0.49$). 因此, 从研究场地 As、 Cr^{6+} 在表层与深层土壤中浓度分布可初步判断, 场地1 土壤中 As、 Cr^{6+} 以及场地2 土壤中 As 浓度相对累积频率曲线图中偏离直线段的高值样本群可能来自人为源, 样品所在区域可能受到污染. 同时, 场地2 表层与深层土壤中 Cr^{6+} 浓度分布不存在显著差异, 这在一定程度上也可支持前文根据其浓度相对累积频率曲线表现为一条连续直线而推断场地2 不存在 Cr^{6+} 污染这一结论.

由于土壤中固定重金属的主要成分包括黏粒矿物以及土壤有机质^[17~21],自然条件下细颗粒土壤(如黏土、粉黏等)中因含有较多以上成分,其重金属含量往往高于砂土等粗颗粒土壤^[13].但是,重金属等污染物也更易富集在这类土壤中.当场地细颗粒含量较低的土壤组份中重金属含量高于细颗粒含量较高土壤组份时,该场地可能存在重金属污染^[13].对两个研究场地不同土壤组份中重金属分布规律[图 1(c)、1(g)以及图 2(c)、2(g)]进行分析发现,场地 1 中 As 浓度较高的样点主要集中在粉土及黏粉土层中,高于场地粉黏土中 As 的含量,Cr⁶⁺ 较高浓度的样点主要集中在粉土层,也高于场地黏粉及粉黏土中的 Cr⁶⁺ 含量.进一步分析粉土及黏粉在场地 1 中的分布发现,这两种土质主要集中在场地 1 的表层.因此,综合前文对场地 1 土壤中 As、Cr⁶⁺ 浓度在土壤中垂向分布分析结论,可推断场地 1 中 As、Cr⁶⁺ 浓度相对累积频率中偏离直线段的高值样本为人为源,该场地表层局部土壤受 As、Cr⁶⁺ 污染.场地 2 中 As 出现同样现象.但是,分析 Cr⁶⁺ 在场地 2 不同土质中的分布发现,各种土质中 Cr⁶⁺ 的浓度无明显差异,对应的浓度相对累积频率为连续的直线[图 2(e)],表明该场地不存在 Cr⁶⁺ 污染.

除了分析重金属浓度在场区土壤纵向及不同土质中的分布外,还可分析重金属在场区不同功能区域的分布.如果重金属高浓度样点主要集中在场区的局部区域(如生产区域),在一定程度上也能说明该区域土壤受重金属污染^[13].按不同功能区对两个研究场地土壤中重金属浓度分布规律[图 1(d)、1(h)及图 2(d)、2(h)]进行分析发现,场地 1 中 As、Cr⁶⁺ 以及场地 2 中的 As 浓度较高的样点主要分布在场区的生产区域,而 Cr⁶⁺ 在场地 2 不同功能区的分布差异性不明显.这表明受人为活动影响,场地 1 生产区域部分土壤已受到 As、Cr⁶⁺ 污染,场地 2 生产区域部分土壤也受到 As 污染.进一步分析这两个场地历史生产活动得知,在场地 1 中曾生产过砷盐和铬盐,很有可能因当时缺乏较为有效的环境污染防治措施,导致生产过程中产生的含 As 及 Cr⁶⁺ 的废物进入土壤而造成污染.场地 2 虽未从事砷盐生产,但是资料表明,该厂早期可能采用当时较为常用的砷碱法脱除煤气中的硫化氢^[22],这一过程中很可能有含砷废物因管理不当进入土壤而导致其污染.因此,综合研究场地 As、Cr⁶⁺ 浓度较高样品在厂区不同功能区域的分布以及厂区历史生产活动

资料分析,也可初步推断场地 1 土壤中 As、Cr⁶⁺ 以及场地 2 土壤中 As 浓度相对累积频率中偏离直线段的高值样本来自人为源,场区生产区表层土壤受到污染.

2.2.3 场地重金属背景浓度推导与比较

综合 As、Cr⁶⁺ 在研究场地土壤中浓度相对累积频率分布图及空间分布规律分析结果可推断,场地 1 土壤中 As、Cr⁶⁺ 以及场地 2 土壤中 As 相对累积频率分布曲线中偏离直线段的高值样点主要受人为活动影响,这些样点所在区域土壤受到相应重金属污染.因此,As、Cr⁶⁺ 浓度相对累积频率曲线图中高浓度区间的拐点或断点所对应的浓度为该场地土壤重金属背景值的上限浓度^[13].其中,场地 1 土壤 As、Cr⁶⁺ 的背景上限浓度分别为 29.8 mg·kg⁻¹、76.1 mg·kg⁻¹,场地 2 土壤中 As 的背景上限浓度为 10.6 mg·kg⁻¹.由于场地 2 中 Cr⁶⁺ 不存在污染,其浓度相对累积频率曲线中的最大值可作为该场地 Cr⁶⁺ 背景浓度的上限值,即 33 mg·kg⁻¹.

比较发现,采用以上方法推导的这两个场地中 As、Cr⁶⁺ 的背景上限浓度相差较大.而且,场地 1 中推导的 As、Cr⁶⁺ 背景浓度上限值均高于文献[11]报道的背景浓度,但是场地 2 推导的 As、Cr⁶⁺ 背景浓度与报道值接近.主要原因可能是不同场地的地质差异所造成,这也在一定程度上证明重金属场地污染评价过程中直接套用文献报道的背景浓度进行评价可能做出不够客观的评估结论.

将研究场地样品检测浓度与推导的特定场地重金属背景浓度进行比较,可了解场地重金属大致的污染程度,其样品超标率统计如表 2 所示.

表 2 样品超标率统计¹⁾/%

Table 2 Percentile of samples exceeding the baseline concentration /%

污染物	场地 1		场地 2	
	As	Cr ⁶⁺	As	Cr ⁶⁺
超标率 1	77.7	96.7	41.9	—
超标率 2	3.8	6.0	5.2	—

1) 超标率 1 为样品检测结果超过文献报道的背景浓度平均值,超标率 2 表示超过本场地推导的最大背景浓度;“—”表示不存在超标样品

由表 2 可知,若直接套用文献报道的北京市土壤背景值浓度,将高估场地 1 中 As、Cr⁶⁺ 以及场地 2 中 As 的污染程度,使得污染评估结果不够客观,并可能导致在场地污染治理过程中投入过多不必要的修复资金.

2.2.4 元素相关性分析

一般认为,自然状态下土壤成岩过程中沉积的

重金属彼此间具有较好的相关性^[13],表明这些重金属来自于同一个源(因此也被称为同源性)。当土壤受到重金属污染时,外源重金属与土壤中未受污染的重金属之间相关性变差。而且,由于排放特性不同,同是人为排放的重金属,在土壤中的相关性也往往较差。因此,在重金属场地污染评价过程中,可分析特定场地土壤中重金属间的相关性以间接判断场地土壤是否受重金属污染。Pearson 相关性检验表明,研究场地 1 土壤中 As、Cr⁶⁺ 不存在显著相关($P=0.19$)。同时,研究场地 2 中 As 与未受污染的 Cr⁶⁺ 也缺乏显著相关($P=0.1$)。因此,从元素相关性分析结果也可在一定程度上推断场地 1 局部土壤已受 As、Cr⁶⁺ 污染,而场地 2 仅局部土壤受 As 污染。

3 结论

(1)研究场地 1 土壤中 As、Cr⁶⁺ 以及研究场地 2 土壤中 As 浓度相对累积频率曲线图中均有部分偏离直线段的高值样本,综合这部分样本在厂区的空间分布以及元素相关性分析结果,可推断其主要受厂区生产活动影响,样本所在区域受到污染。而且,场地 2 土壤中 Cr⁶⁺ 的浓度相对累积频率曲线表现为一条连续的直线,说明该场地未受 Cr⁶⁺ 污染。

(2)基于场地实测样本推导的 As、Cr⁶⁺ 背景浓度上限值相差较大,场地 1 中推导的 As、Cr⁶⁺ 背景浓度上限均高于文献报道值。而且,直接套用文献报道的背景浓度对研究场地污染程度的评价结果要重于基于特定场地背景值所评估的污染程度。因此,通常情况下不能将文献报道的背景值直接用于具体场地重金属污染评估,以避免评估结果不够客观。

参考文献:

- [1] 赵沁娜. 城市土地置换过程中土壤污染研究进展评述[J]. 土壤, 2009, **41**(3): 350-355.
- [2] 国家环境保护局. 土壤环境质量标准(GB 15618-1995) [S]. 北京: 国家技术监督局, 1995.
- [3] 施烈焰, 曹云者, 张景来, 等. RBCA 和 CLEA 模型在某重金属污染场地环境风险评价中的应用比较[J]. 环境科学研究, 2009, **22**(2): 241-247.
- [4] 田素军, 李志博. 重金属污染场地调查与健康风险评估一个案研究[J]. 安全与环境工程, 2007, **17**(3): 32-35.
- [5] Ryu H, Chung J S, Nam T, *et al.* Incorporation of heavy metals bioavailability into risk characterization [J]. Clean-Soil, Air, Water, 2010, **38**(9): 812-815.
- [6] Lee S W, Lee B T, Kim J Y, *et al.* Human risk assessment for heavy metals and as contamination in the abandoned metal mine areas, Korea [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2006, **119**(1-3): 233-244.
- [7] Lai H Y, Hseu Z Y, Chen T C, *et al.* Health risk-based assessment and management of heavy metals contaminated soil sites in Taiwan [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2010, **7**(10): 3595-3614.
- [8] Vendas D F, Costa C N, Brito M G. Risk assessment for redevelopment of contaminated land at an old industrial site[J]. WSEAS Transactions on Environment and Development, 2008, **2**(4): 150-160.
- [9] USEPA. Risk assessment guidance for superfund: human health evaluation manual[C]. EPA/540/1-89/002, 1989.
- [10] 姜林, 李立新, 王军玲, 等. 场地环境评价导则(DB11/T 656-2009)[S]. 北京: 北京市质量技术监督局, 2009.
- [11] 陈同斌, 郑袁明, 陈煌, 等. 北京市土壤重金属含量背景值的系统研究[J]. 环境科学, 2004, **25**(1): 117-122.
- [12] 魏复盛, 陈静生, 吴燕玉, 等. 中国土壤环境背景值研究[J]. 环境科学, 1991, **12**(4): 12-20.
- [13] John F, Shahrokh R, Chris Z, *et al.* Guidance for environmental background analysis volume I: soil [C]. Hueneme: Naval Facilities Engineering Service Center, 2002.
- [14] 王学松, 秦勇. 利用对数正态分布图解析徐州城市土壤中重金属元素来源和确定地球化学背景值[J]. 地球化学, 2007, **36**(1): 98-102.
- [15] Bauer I, Bor J. Lithogene, geonene and anthropogene Schwermetallgehalte von Lobboden an den Beispielen Von Cu, Zn, Ni, Pb, Hg and Cd[J]. Mainzer Geowiss Mitt, 1995, **24**(1): 47-70.
- [16] Matschullat J, Ottenstein R, Reimann C. Geochemical background-can we calculate it [J]. Environmental Geology, 2000, **39**(9): 990-1000.
- [17] Bibak A. Copper retention by Danish Spodosols in relation to contents of organic matter and aluminum, iron, and manganese oxides[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 1997, **28**(11-12): 939-948.
- [18] Cheshire M V, Mcphail D B, Berrow M L. Organic matter-copper complexes in soils treated with sewage sludge[J]. Science of the Total Environment, 1994, **152**(1): 63-72.
- [19] Besnard E, Chenu C, Robert M. Influence of organic amendments on copper distribution among particle-size and density fractions in Champagne vineyard soils[J]. Environmental Pollution, 2001, **112**(3): 329-337.
- [20] King L D. Retention of metals by several soils of the southeastern United States[J]. Journal of Environmental Quality, 1988, **17**(2): 239-246.
- [21] Silveira M L A, Alleoni L R F, Camargo O A, *et al.* Copper adsorption in oxidic soils after removal of organic matter and iron oxides[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2002, **33**(19-20): 3581-3592.
- [22] 平成航. 酸碱法脱硫的原理及其设备的计算方法[J]. 化学世界, 1956, (11): 571-574.

CONTENTS

PUF Passive Air Sampling of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmosphere of the Yangtze River Delta, China: Spatio-Temporal Distribution and Potential Sources	ZHANG Li-fei, YANG Wen-long, DONG Liang, <i>et al.</i> (3339)
Quantitative Analysis of Nitrate in Atmospheric Particulates PM _{2.5} with Fourier Transform Infrared Spectroscopy	LIU Na, WEI Xiu-li, GAO Min-guang, <i>et al.</i> (3347)
Study on Contribution Factor to Atmospheric ·OH by O ₃ , HONO, HCHO and H ₂ O ₂ in Spring at Mangdang Mountain, Fujian Province	LIU Hao, WANG Hui-xiang (3352)
A Review on Current Situations of Steroid Estrogen in the Water System	DU Shao-ting, JIN Chong-wei, LIU Yue (3358)
A Study on the Veterinary Antibiotics Contamination in Groundwater of Jiaying	LÜ Xing, YU Wei-juan, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3368)
Contamination Characteristics of Short-Chain Chlorinated Paraffins in Edible Fish of Shanghai	JIANG Guo, CHEN Lai-guo, HE Qiu-sheng, <i>et al.</i> (3374)
Detection of Endotoxin Activity in Water Environment and Analysis of Influence Factors for TAL Assay	ZHANG Can, LIU Wen-jun, ZHANG Ming-lu, <i>et al.</i> (3381)
Cellular Response of Freshwater Green Algae to the Toxicity of Tetracycline Antibiotics	XU Dong-mei, WANG Yan-hua, RAO Gui-wei (3386)
Illumination's Effect on the Growth and Nitrate Reductase Activity of Typical Red-Tide Algae in the East China Sea	LI Hong-mei, SHI Xiao-yong, DING Yan-yan, <i>et al.</i> (3391)
Compare the Growth of <i>Enteromorpha prolifera</i> Under Different Nutrient Conditions	PANG Qiu-ting, LI Feng, LIU Xiang-qing, <i>et al.</i> (3398)
Phytoplankton Pigment Patterns and Community Structure in the Yangtze Estuary and Its Adjacent Areas	LAI Jun-xiang, YU Zhi-ming, SONG Xiu-xian, <i>et al.</i> (3405)
Genetic Diversity of Picoeukaryotic Phytoplankton in the Lakes Along the Middle-lower Reaches of the Yangtze River	LI Sheng-nan, SHI Xiao-li, XIE Wei-wei, <i>et al.</i> (3416)
Studies on Seasonal Variation and Sources of Nitrogen and Phosphorus in a Canyon Reservoir Used as Water Source	HUANG Ting-lin, QIN Chang-hai, LI Xuan (3423)
Characteristics of Sediment Phosphorus in the Jiulong River-Reservoir System and Its Ecological Significance	LU Ting, CHEN Neng-wang, CHEN Zhu-hong, <i>et al.</i> (3430)
Variation of Nitrogen During the High Suspended Sediments Concentration Water Supply in an Artificial Shallow Lake	CHEN You-yuan, SHEN Yu, YANG Shi-ying (3437)
Limestone and Pyrite-Limestone Constructed Wetlands for Treating River Water	ZHANG Jing, LI Rui-hua, LI Jie, <i>et al.</i> (3445)
Dynamics of Carbon, Nitrogen and Phosphorus Storage of Three Dominant Marsh Plants in Hangzhou Bay Coastal Wetland	SHAO Xue-xin, LI Wen-hua, WU Ming, <i>et al.</i> (3451)
Dissolved Organic Matter Release of <i>Zizania caduciflora</i> and <i>Phragmites australis</i> from Lake Dianchi	XIE Li, YANG Hao, QU Xiao-xia, <i>et al.</i> (3458)
Influence of Tap Water Treatment on Perfluorinated Compounds Residue in the Dissolved Phase	ZHANG Hong, CHEN Qing-wu, WANG Xin-xuan, <i>et al.</i> (3467)
Study on Chlorinated Disinfection Byproducts and the Relevant Health Risk in Tap Water of J City	LI Xiao-ling, LIU Rui, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3474)
Effect of the Change in Sulphate and Dissolved Oxygen Mass Concentration on Metal Release in Old Cast Iron Distribution Pipes	WU Yong-li, SHI Bao-you, SUN Hui-fang, <i>et al.</i> (3480)
Research on Low-level Hg(II) Removal from Water by the Heavy Metal Capturing Agent	HU Yun-jun, SHENG Tian-tian, XUE Xiao-qin, <i>et al.</i> (3486)
Coagulation Characteristics of Polyferric Chloride-Poly (Epiclorohydrin-Dimethylamine) Composite Flocculant for Simulated Water Treatment	LIU Xin-xin, YANG Zhong-lian, GAO Bao-yu, <i>et al.</i> (3493)
Microstructure Morphology and Flocculation Mechanism of the Decolorizing Flocculant Poly-aluminum(III)-magnesium(II)-sulfate	SANG Yi-min, CHANG Xue-hong, CHE Yue, <i>et al.</i> (3502)
Efficient Degradation of Tetrabromobisphenol A in Water by Co-doped BiFeO ₃	OUYANG Lei, DING Yao-bin, ZHU Li-hua, <i>et al.</i> (3507)
Preparation Bimetallic Heterogeneous Fenton-Like Catalyst as Sepiolite Supported and Its Surface Chemical Characterization	SU Cheng-yuan, LI Wei-guang, LIU Xing-zhe, <i>et al.</i> (3513)
Nitrite Denitrification Characteristics with Redox Mediator	ZHAO Li-jun, MA Zhi-yuan, GUO Yan-kai, <i>et al.</i> (3520)
Advanced Nitrogen Removal Using Innovative Denitrification Biofilter with Sustained-Release Carbon Source Material	TANG Lei, LI Peng, ZUO Jian-e, <i>et al.</i> (3526)
N ₂ O Production in Nitrogen Removal by Micro-expansion of Granular Sludge	CHEN Li-li, GAO Da-wen (3532)
Sludge Dewaterability with Combined Conditioning Using Fenton's Reagent and CPAM	MA Jun-wei, LIU Jie-wei, CAO Rui, <i>et al.</i> (3538)
Kinetic Characteristics of High-rate ANAMMOX Granules	TANG Chong-jian, XIONG Lei, WANG Yun-yan, <i>et al.</i> (3544)
Monitoring Nitrogen Deposition on Temperate Grassland in Inner Mongolia	ZHANG Ju, KANG Rong-hua, ZHANG Bin, <i>et al.</i> (3552)
Non-Point Loads of Soluble Cadmium by <i>in situ</i> Field Experiment with Different Landuses, in Central Hunan Province Mining Area	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, CHEN Zhe, <i>et al.</i> (3557)
Heavy Metal Speciation and Stability in the Sediment of Lihu Lake	WANG Shu-hang, WANG Wen-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (3562)
Analysis and Evaluation of Heavy Metals Along the Chaohe River in Miyun County	YU Yang, GAO Hong-chao, MA Jun-hua, <i>et al.</i> (3572)
Magnetic Properties of Topsoils in Typical Industrial Belt Along the Yellow River in Arid Regions in Northwest China and Their Environmental Significance	XU Shu-jing, ZHANG Ying, YU Ye, <i>et al.</i> (3578)
Study on Composite Stabilization of Arsenic (As) Contaminated Soil	WANG Hao, PAN Li-xiang, ZHANG Xiang-yu, <i>et al.</i> (3587)
Heavy Metal Contents and Enrichment Characteristics of Dominant Plants in a Lead-Zinc Tailings in Xiashuiwan of Hunan Province	HE Dong, QIU Bo, PENG Jin-hui, <i>et al.</i> (3595)
Comparison of Soil Fertility Among Open-pit Mine Reclaimed Lands in Antaibao Regenerated with Different Vegetation Types	WANG Xiang, LI Jin-chuan, YUE Jia-ning, <i>et al.</i> (3601)
Biodegradation of Triphenyltin and Its Effect on <i>Klebsiella pneumoniae</i>	YE Jin-shao, TIAN Yun, YIN Hua, <i>et al.</i> (3607)
Isolation and Degradation Characteristics of Dichloromethane-Degradation Bacterial Strain by <i>Methylobacterium rhodesianum</i> H13	LIU Hong-xia, ZHU Run-ye, OUYANG Du-juan, <i>et al.</i> (3613)
Effect of Different Primers on Microbial Community of Activated Sludge	XU Ai-ling, WU Deng-deng, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i> (3620)
Reaction of SO ₂ over CaAl Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites Samples	CAO Lin, WANG Hai-lin, XIE Qiang (3627)
Optimization for MSW Logistics of New Xicheng and New Dongcheng Districts in Beijing Based on the Maximum Capacity of Transfer Stations	YUAN Jing, LI Guo-xue, ZHANG Hong-yu, LUO Yi-minget <i>al.</i> (3633)
Application of Multiple Lines of Evidence Analysis Technology in the Assessment of Sites Contaminated by Heavy Metals	JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, ZHU Xiao-yong, <i>et al.</i> (3641)
Heavy Metals and Their Sources in Outdoor Settled Dusts in Different Function Areas of Cities	LI Xiao-yan, LIU Yan-qing (3648)
Study on Distribution Characteristics and Potential Ecological Risk of Soil Heavy Metals in the Yellow River Beach Region in Kaifeng City	ZHANG Peng-yang, QIN Ming-zhou, YAN Jiang-hong, <i>et al.</i> (3654)
Study on Pollution Evaluation of Heavy Metal in Surface Soil of the Original Site of Qingdao North Station	ZHU Lei, JIA Yong-gang, PAN Yu-ying (3663)
Distribution Characteristics and Ecological Risk of Pb in Soils at a Lead Battery Plant	ZHENG Li-bao, CHEN Wei-ping, JIAO Wei-tao, <i>et al.</i> (3669)
Effect of Lead on Soil Quality and Human Health Around a Lead Smeltery	ZHOU Xiao-yong, LEI Mei, YANG Jun, <i>et al.</i> (3675)
Distribution Characteristics of Lead in Different Particle Size Fractions of Surface Soil of a Lead-acid Battery Factory Contaminated Site	YUE Xi, SUN Ti-chang, HUANG Jin-lou (3679)
Research on the Application of <i>In-situ</i> Biological Stabilization Solidification Technology in Chromium Contaminated Site Management	ZHANG Jian-rong, LI Juan, XU Wei (3684)
Research on the Effect and Technique of Remediation for Multi-Metal Contaminated Tailing Soils	ZHU Guang-xu, GUO Qing-jun, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (3690)
Analysis of Washing Efficiency and Change in Lead Speciation in Lead-contaminated Soil of a Battery Factory	REN Bei, HUANG Jin-lou, MIAO Ming-sheng (3697)
Remediation Efficiency of Lead-Contaminated Soil at an Industrial Site by Ultrasonic-assisted Chemical Extraction	WANG Xin-jie, HUANG Jin-lou, LIU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (3704)
Parameters Optimization and Cleaning Efficiency Evaluation of Attrition Scrubbing Remediation of Pb-Contaminated Soil	YANG Wen, HUANG Jin-lou, PENG Hui-qing, <i>et al.</i> (3709)
Adsorption of Cd ²⁺ on Biochar from Aqueous Solution	GUO Wen-juan, LIANG Xue-feng, LIN Da-song, <i>et al.</i> (3716)
Effect of Inorganic Amendments on the Stabilization of Heavy Metals in Contaminated Soils	CAO Meng-hua, ZHU Xi, LIU Huang-cheng, <i>et al.</i> (3722)

《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9月15日 34卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 9 Sep. 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