

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第12期

Vol.39 No.12

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

中国燃煤电厂大气污染物排放的健康影响特征	秦雨, 张强, 李鑫, 赵红艳, 同丹, 郑逸璇, 耿冠楠, 贺克斌 (5289)
基于 LUR 模型的中国 PM _{2.5} 时空变化分析	刘炳杰, 彭晓敏, 李继红 (5296)
长三角淳安地区二次颗粒物污染形成机制	黄丹丹, 周敏, 余传冠, 朱书慧, 王裕成, 乔利平, 楼晟荣, 陶士康, 杨强, 李莉 (5308)
春季沙尘过程北京市不同粒径大气气溶胶污染特征及来源分析	杨阳, 李杏茹, 陈曦, 刘水桥, 刘雨思, 徐静, 王莉莉, 陶明辉, 王格慧 (5315)
成都双流夏秋季环境空气中 VOCs 污染特征	邓媛元, 李晶, 李亚琦, 吴蓉蓉, 谢绍东 (5323)
佛山市典型铝型材行业表面涂装 VOCs 排放组成	李霞, 苏伟健, 黎碧霞, 龙森, 黎丽莉, 张洲, 于跃刚, 王云鹏, 王新明 (5334)
四川省人为源大气污染物排放清单及特征	周子航, 邓也, 谭钦文, 吴柯颖, 杨欣悦, 周小玲 (5344)
炼焦工序颗粒物排放特征	王彦辉, 赵亮, 孙文强, 叶竹, 蔡九菊 (5359)
小流域大气氮干湿沉降特征	王焕晓, 庞树江, 王晓燕, 樊彦波 (5365)
流域氮素主要输出途径及变化特征	李文超, 雷秋良, 翟丽梅, 刘宏斌, 胡万里, 刘申, 任天志 (5375)
生物炭配施缓控释肥对稻田田面水氮素动态变化及径流流失的影响	斯林林, 周静杰, 吴良欢, 胡兆平 (5383)
长江上游农业源溪流雨季中 N ₂ O 间接排放特征	田琳琳, 王正, 朱波 (5391)
不同氮污染特征河流 N ₂ O 浓度、释放通量与排放系数	王森, 李亚峰, 雷坤, 杨丽标 (5400)
多种同位素手段的硝酸盐污染源解析: 以会仙湿地为例	彭聪, 潘晓东, 焦友军, 任坤, 曾洁 (5410)
典型岩溶槽谷区土壤水 δD 和 δ ¹⁸ O 时空分布特征: 以重庆市中梁山岩溶槽谷为例	吴韦, 蒋勇军, 贾亚男, 彭学义, 段世辉, 刘九缠, 王正雄 (5418)
沁河冲洪积扇地下水水化学特征及成因分析	刘江涛, 蔡五田, 曹月婷, 蔡月梅, 边超, 吕永高, 陈远铭 (5428)
2017 年最大降水对再生水受水河道径流组成的影响	廖安然, 宋献方, 张应华, 杨丽虎, 卜红梅, 马英, 韩冬梅, 秦文婧, 杨胜天 (5440)
周村水库主库区水体热分层形成过程中沉积物间隙水 DOM 的光谱演变特征	周石磊, 张艺冉, 黄廷林, 李再兴, 罗晓 (5451)
三峡库区沉积物中镍污染特征评价	张伟杰, 殷淑华, 徐东昱, 高丽, 高博 (5464)
四面山大洪湖底泥/水界面汞的迁移转化规律	郭攀, 孙涛, 杨光, 马明 (5473)
大兴安岭南麓河湿地类型对土壤中甲基汞分布的影响	周心功, 刘玉荣, 李晶, 周志峰 (5480)
模拟三峡库区消落带土壤有机磷酸酯类水释放特征	杨婷, 何明靖, 杨志豪, 魏世强 (5487)
典型旅游城市河流水体及污水厂出水中全氟烷基酸类化合物的空间分布及其前体物的转化	王世亮, 孙建树, 杨月伟, 张敏 (5494)
4 种不同工况生物滤池净化效能与微生物特性分析	江肖良, 李孟, 张少辉, 张世羊 (5503)
微量元素锰对威氏海链藻生长及叶绿素荧光的影响	王木兰, 姜玥璐 (5514)
广东省水库拟柱胞藻 (<i>Cylindropermopsis raciborskii</i>) 的分布特征及影响因子分析	雷敏婷, 彭亮, 韩博平, 雷腊梅 (5523)
磁性壳聚糖接枝聚丙烯酰胺去除水体中腐殖酸	尤雯, 刘海成, 曹家玮, 沈耀良, 陈卫 (5532)
臭氧-生物活性炭对微污染原水中典型持久性有机物的去除效果	兰亚琼, 刘锐, 马正杰, 陈吕军 (5541)
水解酸化/AO 组合工艺处理印染废水色度去除与脱氮性能	顾梦琪, 尹启东, 刘爱科, 吴光学 (5550)
“异养-硫自养”组合工艺去除高浓度高氯酸盐特性	刘颖男, 陶华强, 宋圆圆, 张春青, 逯彩彩, 韩懿, 李海波, 郭建博 (5558)
静压快速启动亚硝酸盐依赖型甲烷厌氧氧化反应	王一因, 胡振, 茹东云, 姜丽萍, 刘华清 (5565)
多级 AO 耦合流离生化工艺流量分配比优化及脱氮机制	王帆, 李军, 边德军, 聂泽兵, 张莉, 孙艺齐 (5572)
主流条件下两级式 PN-ANAMMOX 工艺的高效能脱氮过程	刘文如, 杨殿海, 沈耀良, 王建芳, 吴鹏, 钱飞跃, 陈重军 (5580)
不同基质浓度对 ANAMMOX 菌短期储存的影响	高雪健, 张杰, 李冬, 曹正美, 郭跃洲, 李帅 (5587)
主流厌氧氨氧化工艺的优化及其微生物的群落变迁	付昆明, 李慧, 姜姗, 仇付国, 曹秀芹 (5596)
厌氧氨氧化污泥恢复过程中的颗粒特性	陈方敏, 顾澄伟, 胡羽婷, 黄勇, 李祥, 陆明羽, 方文辉, 金润 (5605)
低温反硝化菌——施氏假单胞菌 N3 的筛选及脱氮性能	路俊玲, 陈慧萍, 肖琳 (5612)
复垦工业场地土壤和周边河道沉积物重金属污染及潜在生态风险	吴健, 王敏, 张辉鹏, 黄宇驰, 徐志豪, 李青青, 陈昊, 黄沈发 (5620)
不同土地利用类型土壤重金属生态风险与人体健康风险	李春芳, 曹见飞, 吕建树, 姚磊, 吴泉源 (5628)
某大型神渣场土壤 As 污染特征及生态风险评价	刘庚, 石瑛, 田海金, 李豪, 张蕾, 牛俊杰, 郭观林, 张朝 (5639)
亚热带典型岩溶水库细菌丰度和细菌生产力及其与环境因子的关系	辛胜林, 梁月明, 彭文杰, 宋昂, 靳振江, 朱美娜, 李强 (5647)
岩溶区典型灌丛植物根系丛枝菌根真菌群落结构解析	梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧 (5657)
模拟氮沉降对干旱半干旱温带草原土壤细菌群落结构的影响	李宗明, 沈菊培, 张丽梅, 刘国平, 白文明, 贺纪正 (5665)
添加磷素对低磷稻田根际土壤固碳自养微生物数量的影响	柏菁, 李奕霏, 刘守龙, 祝贞科, 李科林, 彭佩钦, 吴小红, 葛体达, 吴金水 (5672)
长期不同施肥对稻田土壤有机碳矿化及激发效应的影响	马欣, 魏亮, 唐美玲, 徐福利, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (5680)
黄土丘陵区撂荒恢复过程中植物群落组成与土壤养分及酶活性变化的关系	乔文静, 戴银月, 张伟, 付淑月, 杨改河, 韩新辉, 陈正兴, 高德新, 冯永忠 (5687)
生活垃圾不同填埋阶段的富里酸对五氯苯酚的降解	刘思佳, 何小松, 张慧, 祖国峰, 席北斗, 李丹, 党秋玲 (5699)
CO ₂ 倍增条件下不同生育期水稻碳氮磷含量及其计量比特征	唐美玲, 肖谋良, 袁红朝, 王光军, 刘守龙, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (5708)
基于层次分析法的医疗废物处置技术评价	许晓芳, 谭全银, 刘丽丽, 李金惠 (5717)
中国农田畜禽粪尿氮负荷量及其还田潜力	刘晓永, 王秀斌, 李书田 (5723)
《环境科学》第 39 卷(2018 年)总目录	(5740)
《环境科学》征订启事(5343) 《环境科学》征稿简则(5439) 信息(5595, 5619, 5638)	

某大型砷渣场地土壤 As 污染特征及生态风险评价

刘庚¹, 石瑛², 田海金³, 李豪¹, 张蕾¹, 牛俊杰¹, 郭观林⁴, 张朝^{4*}

(1. 太原师范学院汾河流域科学发展研究中心, 太原 030619; 2. 太原师范学院生物系, 太原 030619; 3. 云南靖尚达环境咨询有限公司, 昆明 650228; 4. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012)

摘要: 为精确识别大型污染场地土壤污染特征并评价其生态风险, 以我国某大型砷渣场地为研究对象, 采集场地土壤样品 184 个、周边农田土壤样品 101 个和砷渣样品 14 个, 选择场地中特征污染物 As, 采用多元统计学、地统计学、地累积指数以及潜在生态风险系数等方法揭示研究区 As 污染特征和生态风险程度。结果表明, 场地土壤、农田土壤及砷渣中 As 含量的平均值分别为 1 333.0、358.1 和 17 316.1 mg·kg⁻¹, 其污染程度均远高于国家土壤环境质量Ⅲ级标准。污染物垂向分布特征及 3 维空间分布范围结果显示, As 在各土壤剖面深度内均有不同程度的累积, 具有一定的空间异质性, 场地表层土壤污染较为严重, 场地土壤样点中 As 含量明显高于周边农田土壤。潜在生态危害系数评价结果表明, 各土层的潜在生态危害系数平均值均超过了 100, 场地土壤和周边农田土壤所有样点中等危害程度以上的样点累积比例分别达到 58.21% 和 61.39%, 表明该场地及周边农田土壤区域存在着比较严重的生态环境风险。

关键词: 大型污染场地; 重金属; 污染评价; 生态风险; 分布特征

中图分类号: X53; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)12-5639-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201804087

Soil Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of As at a Large-scale Arsenic Slag-contaminated Site

LIU Geng¹, SHI Ying², TIAN Hai-jin³, LI Hao¹, ZHANG Lei¹, NIU Jun-jie¹, GUO Guan-lin⁴, ZHANG Chao^{4*}

(1. Research Center for Scientific Development in Fenhe River Valley, Taiyuan Normal University, Taiyuan 030619, China; 2. Department of Biology, Taiyuan Normal University, Taiyuan 030619, China; 3. Yunnan Jingshangda Environmental Consulting Co., Ltd., Kunming 650228, China; 4. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: A large-scale arsenic slag-contaminated site was selected to determine soil pollution characteristics and the degree of ecological risk of a large-scale contaminated site. In this study, 184 site soil samples, 101 agricultural soil samples, and 14 arsenic slag samples were collected and the pollution characteristics and ecological risk of As were evaluated using multivariate statistics, geostatistics, and the geoaccumulation and potential ecological risk index methods. The results show that the average As contents in site soil, agricultural soil, and arsenic slag are 1 333.0, 358.1, and 17 316.1 mg·kg⁻¹, respectively. The degree of contamination of As exceeds the national standard Ⅲ of the environmental soil quality. The results of the vertical and three-dimensional distributions of contamination show that As is accumulated to different extents in different strata. The accumulation in the site surface soil is the most serious. The As concentrations in site soil samples are higher than that in agricultural soil samples. The potential ecological risk index method shows that all mean potential ecological risk indexes exceed 100 in different strata. Moreover, the percentage of samples in site and agricultural soils at medium pollution level ratios is 58.21% and 61.39%, respectively, illustrating that the As pollution of soil samples from this contaminated site and surrounding farm areas is serious.

Key words: large-scale contaminated site; heavy metals; pollution assessment; ecological risk; distribution characteristics

工业污染场地是一个全球性环境问题, 工业企业在生产过程中形成的各类型污染物对土壤、地下水等环境介质以及人体健康产生严重危害, 其造成的环境影响已受到广泛关注^[1~3]。我国随着相关产业转移等政策的实施, 涌现了数以万计的重污染、高风险的工业污染场地, 据统计, 中国需要修复的污染场地数量至少在十万块以上^[4]。精确识别场地的污染特征是认识污染物环境行为过程、评价污染风险以及制定相关修复治理决策的基础^[5]。目前相关学者针对污染场地污染危害识别及空间分布模

拟^[6,7]、生态及健康风险评估^[8~10]、修复治理技术^[11,12]等方面开展了深入的研究。

砷等一些重金属元素广泛存在于有色金属采选企业的生产过程当中, 该类型遗留场地由于具有污

收稿日期: 2018-04-12; 修订日期: 2018-06-08

基金项目: 污染场地安全修复技术国家工程实验室开放基金项目(NEL-SRT201708); 国家自然科学基金青年科学基金项目(41401236); 山西省“1331工程”重点创新团队建设项目; 太原师范学院校级1331工程重点创新团队、重点实验室计划项目

作者简介: 刘庚(1981~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为土壤污染与控制, E-mail: liugeng9696@126.com

* 通信作者, E-mail: 251882481@qq.com

染范围大,污染持续时间长、污染成因复杂、影响环境介质多等特征,因此在染物迁移转化过程、暴露途径和风险受体、环境敏感点以及产生的生态环境损害等方面同一般城市工业污染场地不同^[13,14],针对大型有色金属采选污染场地需要开展有针对性的污染特征识别及生态风险评价研究.在生物毒性显著的几种主要重金属及类金属元素中,砷表现出其特殊的性质,是一种典型的人类致癌物^[15].我国也是世界上砷污染较为严重的国家之一,土壤和地下水中砷污染问题所引起的人体健康威胁已受到广泛关注^[16,17],针对土壤^[18,19]、水体^[20,21]、沉积物^[22,23]等环境介质以及在不同区域尺度上开展了砷污染特征和风险评价的研究.

在砷矿开采过程中会形成含有重金属元素的废渣及尾矿库,由于长时期的露天堆放,在降水淋溶作用下可能导致冶炼废渣等物质吸附的有毒有害元素解吸、迁移^[24],对场地内及周边土壤产生不同程度的污染.根据该类型场地环境污染特征,精准识别特征污染物的空间分布范围,分析污染物含量在不同土壤剖面深度垂向空间分布特征并量化污染物的生态环境风险,对场地的风险管控和修复治理决策的制定具有重要的意义.目前,在我国针对有色金属采选类型污染场地的污染特征识别及生态风险评价等方面的研究仍较为欠缺,关于大型砷渣场地的研究还未有报道.因此,本研究拟以我国西南某大型砷渣场地为案例,系统揭示案例场地土壤中砷污染特征并评价其生态风险,以期为该类型场地的风险评估和修复治理等工作提供科学指导.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

该场地已有 60 余年生产历史,凭借当地丰富的矿产资源优势,大力发展砷矿开采与冶炼活动,生产工艺属于土法炼砷.生产过程中由于生产场地不断变化,现存砷渣堆放点共有 3 号炉及 4 号炉等几个主要的堆放区.本研究选择堆放时间长、影响范围大且周边敏感目标较多的 3 号炉及 4 号炉为目标研究区域.场地所在区域属构造溶蚀、侵蚀中山斜坡地貌,总体地势南西高北东低.3 号生产区位于北部山坡中上部,废渣分布标高 2 116 ~ 2 132 m,地形平缓,4 号生产区位于南部沟谷南岸山坡上,废渣分布标高 2 050 ~ 2 080 m.区内多年平均气温 17.9℃,一般 5 ~ 10 月为雨季,此间降水量占年降水量的 82.8%.多年平均蒸发量为 1 128.0 mm,多

年平均相对湿度在 78% 左右,多年平均风速 2.8 m·s⁻¹,最大风速 20 m·s⁻¹,风向为西风.

1.2 样品采集与化验分析

砷渣堆场上部主要以生产性砷渣废料和尾矿为主,下部为黏土层,以下为基岩.根据场地地层条件,按表层土样(0.1 m)、中间层土样(0.5 m)、基岩上层土样(1.5 m)来确定采样深度.在重点关注区域内,综合原有的场地地质资料,为进一步识别土壤特征污染物的迁移转化特征,在部分点位 1.5 ~ 14 m 深度内采集不同深度的剖面样品.现场采样采用冲击钻钻探和人工挖掘采样 2 种方法.土壤样品采集参照国家环境保护部《场地环境监测技术导则》(HJ 25.2-2014)的相关要求,现场钻探时,在每个钻孔处利用 RTK 测量钻孔的平面坐标和海拔高程.土壤样品的采集与装瓶均在短时间内完成,减少空气暴露时间,达到质量控制目的.

为全面了解该场地污染分布情况,采用网格布点和判断布点相结合的方法设计采样方案,对砷渣堆放区域按 15 m 间隔布点并进行适当加密,对于生产区以外 100 m 范围内的区域,按照 60 m 间隔布设采样点,在该场地共布设土壤钻孔点位 54 个.为识别该场地对周边农田土壤的影响,在周边农田区域布设钻孔点位 34 个,按 0.1、0.5 和 1.5 m 深度分 3 层采集样品,研究区全部土壤钻孔点位如图 1,其中 As 含量分级显示为表层土壤中污染物含量.

采集后的土壤样品通过自然风干、除杂过 100 目筛后待测,测定标准和程序依据 HJ 350-2007 中的相关要求和技术规范,样品检出限为 0.5 mg·kg⁻¹,采用原子荧光光谱法测定土壤砷含量.依据 HJ/T 299 方法对砷渣中砷含量进行溶出,然

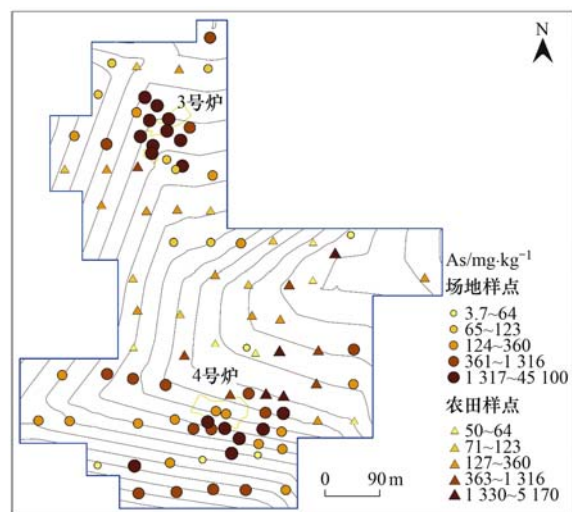


图 1 研究区采样点分布示意

Fig. 1 Soil sampling site locations

后采用 GB 5085.3-2007 中的分析方法测定浸出液浓度. 分析过程中加入国家标准土壤样品(GSS-8)和空白样进行质量控制, 样品回收率在 90% ~ 110% 之间.

1.3 数据处理及分析方法

本研究采用描述性统计分析方法揭示研究区土壤 As 含量的数据统计特征, 采用地统计学模型分析污染物的垂向分布特征及三维空间分布范围. 选择地累积指数方法评价研究区土壤中 As 污染程度:

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C}{kB}$$
 (1)

式中, I_{geo} 为地累积指数, C 为土壤 As 含量的实测值, 单位为 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, B 为当地土壤 As 的背景值, 单位为 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 经测定该区域土壤背景值为 $20 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, k 用于校正区域背景值差异(取常数 1.5, 无量纲). 分级标准: $I_{geo} \leq 0$, 无污染; $0 < I_{geo} \leq 1$, 轻微污染; $1 < I_{geo} \leq 2$, 轻度污染; $2 < I_{geo} \leq 3$, 中度污染; $3 < I_{geo} \leq 4$, 偏重污染; $4 < I_{geo} \leq 5$, 重污染; $I_{geo} > 5$, 高度污染^[25].

采用潜在生态风险系数方法对研究区土壤中 As 进行潜在生态风险评价,

$$E_r = T_r \times C_r = T_r \times (C_s/C_n)$$
 (2)

式中, E_r 为重金属的潜在生态风险系数; T_r 为 As 的毒性系数, 取 10; C_r 为 As 的富集系数; C_s 为 As 含量实测值; C_n 为场地重金属背景参考值. 根据潜在生态风险系数可将土壤污染分为以下几级: $E_r < 40$, 低潜在生态风险; $40 \leq E_r < 80$, 中等潜在生态风险; $80 \leq E_r < 160$, 中高等潜在生态风险; $160 \leq E_r < 320$, 高等潜在风险; $E_r > 320$, 极高等潜在风险^[26].

本研究中 As 含量的描述性统计分析及生态风

险评价结果统计采用软件 SPSS 16.0, 垂向空间分布特征分析采用地理信息系统软件 ESRI ArcGIS 10.0, 污染物三维空间分布范围表征在 EVS. Pro 软件中实现.

2 结果与讨论

2.1 场地样品及周边农田土壤中 As 含量的数据统计特征

研究区场地土壤、周边农田土壤以及砷渣中 As 含量的描述性统计分析结果如表 1 所示, 可以看出重金属 As 在砷渣、场地土壤及周边农田土壤不同剖面深度中均有一定程度累积. 场地土壤、农田土壤及砷渣样品中 As 含量范围分别为 $5.4 \sim 32\,400.0$ 、 $12.2 \sim 6\,620.0$ 和 $12.2 \sim 45\,100.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 砷渣样品中 As 含量的最大值高达 $45\,100.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 具有极高的人体健康风险, 应属于企业关闭后遗留在场址中的经提纯过的砷渣. 场地土壤中砷含量最高达到 $32\,400.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 超过标准值 810 倍(以国家土壤环境质量标准(GB 15618-1995) III 级标准临界值 $40 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 为标准, 下同), 农田土壤中砷含量最大值为 $6\,620 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 超过标准值 165.5 倍. 场地土壤和农田土壤 As 含量在不同剖面深度的偏度和峰度值较大, 且变异系数值均超过了 100%, 表明该场地 As 含量的空间分布具有较大的变异特征. 场地土壤和农田土壤中所有样点的累积分布如图 2 所示, 90% 的样品检测结果处于 $20 \sim 10\,000 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的区间内, 76% 的样品处于 $20 \sim 1\,000 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的区间内. 以上述 $40 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 标准进行统计, 场地土壤和周边农田土壤所有样点的超标率分别高达 80% 和 90%, 表明目标研究区域受到 As 污染已较为严重.

表 1 As 含量数据的统计特征
Table 1 Statistical characteristics for As

类型	深度/m	N	范围 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	标准差 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	均值 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	中值 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	偏度	峰度	变异系数	超标率 ¹⁾ /%
场地土壤	0.1	54	13.6 ~ 32 400.0	5 515.7	2 558.0	420.4	3.7	16.2	2.2	80
	0.5	38	32.9 ~ 9 930.0	1 943.4	657.9	74.1	4.1	17.2	3.0	
	1.5	47	3.72 ~ 29 000.0	4 635.6	1248.2	66.9	5.2	29.6	3.7	
	3	11	5.4 ~ 9 200.0	3 653.1	1635.8	42.0	1.9	2.1	2.2	
	6	21	7.91 ~ 2 870.0	613.8	221.8	51.9	4.4	19.9	2.8	
	10 ~ 14	13	9.6 ~ 215.0	63.9	63.3	43.8	1.6	1.8	1.0	
农田土壤	0.1	34	50.1 ~ 5 170.0	937.0	509.9	155.5	4.0	19.1	1.8	90
	0.5	34	25.3 ~ 6 620.0	1 198.2	437.6	99.6	4.6	22.9	2.7	
	1.5	33	12.2 ~ 533.0	121.1	119.9	63.7	2.1	4.2	1.0	
砷渣	—	14	12.2 ~ 45 100.0	17 000.3	17 316.1	9 480.0	0.87	-1.0	1.0	

1) 以国家土壤环境质量标准(GB 15618-1995) III 级标准临界值 $40 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 为标准

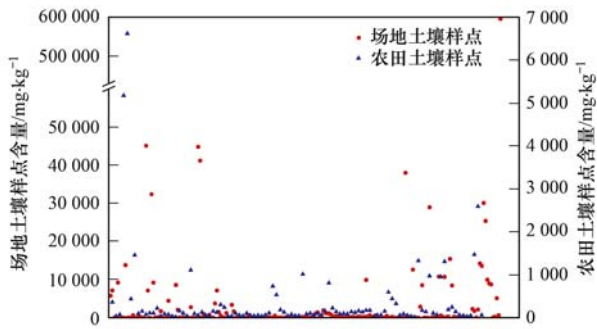


图2 土壤中As含量累积频率分布

Fig. 2 Frequency distribution of As concentrations

2.2 土壤As含量垂向分布特征

场地土壤和周边农田土壤As含量的垂向空间分布如图3所示. 不同区域中As含量的垂向分布表现出了较大的差异性, 场地土壤中As超标最深处达到14 m, 生产区以内除砷渣堆放场外的土壤As超标多分布在6 m或者3 m以内. 周边农田土壤区域的As超标多分布在1 m范围以内. 场地土壤所有样点中As的最小值为 $3.72 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 最大值为 $32\,400.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 从不同层最大值的分布范围来看, 除1.5 m深度的最大值高于0.5 m深度的最大值外, 场地土壤中As含量的最大值从表层到底层基本呈减小趋势, 表明场地土壤中污染物的累积释放受迁移转化和人为干扰因素的影响, 不同剖面深度内As含量的极差范围都较大, 最小值与最大值相差数百倍甚至上千倍. 从农田土壤在不同剖面深度As含量范围和均值来看, 农田土壤中第1层和第2层As含量的最大值以及均值较为接近, 但到第3层明显降低.

对比分析场地土壤和周边农田土壤受污染情况, 场地土壤在不同剖面深度的污染程度高于农田土壤, 这可能是因为该场地主要砷渣堆放区和重污染区域位于山坡上, 由于长期地表渗流进入堆体, 使污染物向周边区域发生了扩散迁移, 另外原企业在生产过程中产生大量烟尘等污染物, 远离目标场地的区域由于受到长期的大气沉降或生产过程中烟尘随风扩散等作用, 造成周边农田土壤区域受到污染, 但随着污染物迁移距离的增大, 污染物含量会逐渐降低.

2.3 场地及周边农田土壤中As含量的三维空间分布特征

将场地土壤和农田土壤钻孔样点数据进行整合, 结合分层采样的深度、样点数量以及地层特征, 将原始数据按照0.1、0.5和1.5 m及以下3层进行三维空间分布表征. 在对原始数据集预处理以

及三维体模型构建基础上, 选用地统计学中Krig-3D模型进行空间分布插值计算. 在应用Krig-3D模型插值之前, 需要对待插值数据进行半变异函数的拟合, 根据理论半变异函数拟合的结果, 对特征污染物As含量进行三维空间插值计算, 最终三维空间分布结果如图4所示. 整个研究区域中As的污染分布范围较广, 在生产区、周边的农田、林地和草地等区域均存在As污染现象. As超标严重区域主要分布在原生产厂区以及砷渣堆放区域, 原企业在历史生产过程中, 产生了大量的含砷冶炼废渣, 因此造成了局部区域As污染较为严重. 从污染物分层的空间分布规律来看, 参照国家土壤环境质量标准(GB 15618-1995) As含量Ⅲ级标准临界值 $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 污染物在第1层和第2层的污染超标范围较大, 且局部区域存在高污染特征, 第3层的污染超标范围相对较小, 且污染程度较轻, 污染物在向深层土壤迁移转化过程中, 会有吸附-解析、降解-积累、溶解-沉淀等环境过程, 因此污染物随着土层深度的增加含量呈逐渐降低的趋势.

2.4 研究区As污染与生态风险评价

采用地累积指数方法对场地及周边农田不同剖面深度土壤的样点进行污染评价, 统计结果如表2所示. 场地土壤中从第1层到最底层的 I_{geo} 均值分别为4.23、2.15、1.95、1.51、0.99和0.56, 最大值为4.23, 出现在0.1 m深度内, 随着土层深度的增加, I_{geo} 均值呈逐渐减小的趋势, 场地土壤所有样点的 I_{geo} 均值为2.85. 从不同深度土层样点的污染程度统计结果来看, 表层土壤(0.1 m)中度污染、偏重污染、重污染以及高度污染的样点比例最高, 分别达到16.67%、18.52%、18.52%和29.63%, 中度污染以上的样点累积比例为83.34%, 表明该场地表层土壤污染较为严重. 表层以下各土层中度污染以上的样点累积比例分别为23.68%、36.17%、18.18%、21.74%和54.55%. 场地土壤中所有样点从无污染、轻微污染到高度污染的样点比例分别为12.94%、19.90%、17.41%、12.44%、8.96%、5.97%和22.39%, 中度以上污染样本比例占近50%, 尤其是高度污染样点较多, 比例达到22.39%, 地累积指数超过5的样本有45个. 周边农田土壤中从表层到第3层 I_{geo} 均值分别为2.83、2.02和1.44, 同样呈现出逐渐减小的趋势. 周边农田土壤中从表层到第3层无污染、轻微污染和轻度污染的样点比例呈增大趋势, 中度污染、重污染和高度污染的样点比例呈逐渐减小趋势, 偏重污染的

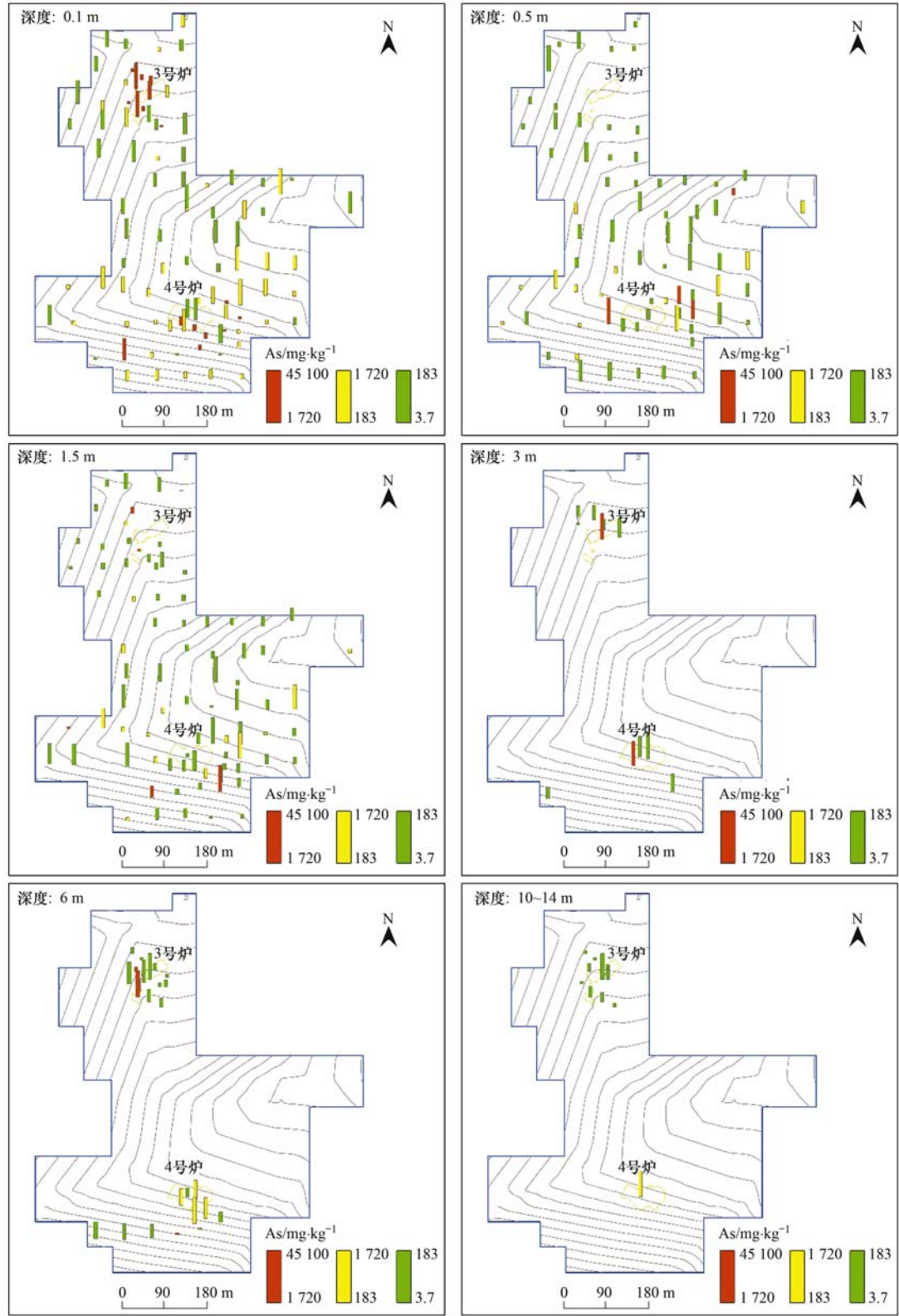


图3 土壤 As 含量垂向分布特征

Fig. 3 Vertical distribution of soil As

样点比例呈先减小后增大的趋势。从农田土壤所有样品的指数统计结果来看，中度以上污染样本所占的比例为 43.56%。

采用潜在生态风险系数方法评价研究区土壤中 As 的生态风险，潜在生态危害系数及危害程度统计结果如表 3 所示。从场地土壤不同土层的统计结

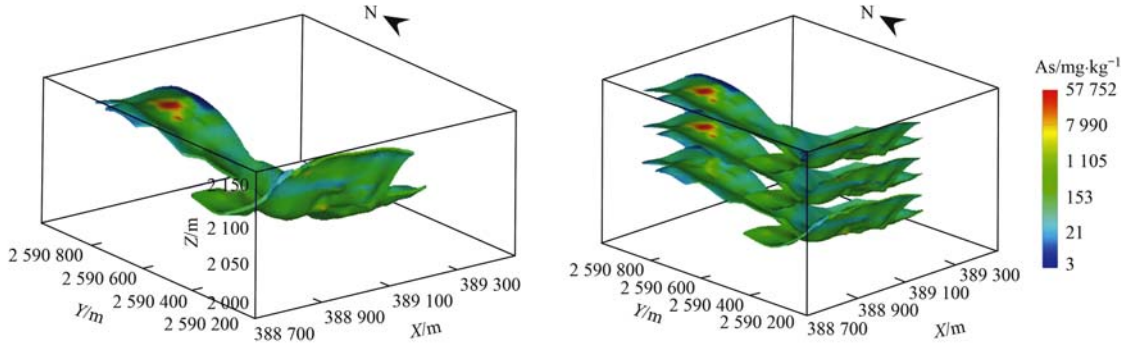


图 4 研究区土壤 As 三维空间分布范围

Fig. 4 Three-dimensional spatial distribution of soil As

果来看,不同土层样本的潜在生态危害系数均值由大到小分别为 $0.1\text{ m}>3\text{ m}>1.5\text{ m}>0.5\text{ m}>6\text{ m}>10\sim14\text{ m}$,除最底层($10\sim14\text{ m}$) E_r 均值较小外,其余各层的潜在生态危害系数均超过了100,最高达到了1279(0.1 m 深度),各层中等以上危害程度的样本比例分别为94.5%、47.5%、42.6%、18.2%、34.8%和27.3%,且从表层到底层污染程度有逐渐降低的趋势,这与前面的分析结论相似.场地土壤

所有样点的潜在生态危害系数均值为108,达到中高等潜在生态风险程度,中等危害程度以上的样点累积比例为58.2%.周边农田土壤从表层到底层的潜在生态危害系数均值分别为255、219和60,呈现逐渐降低的趋势,3层土壤中中等以上危害程度的样点累积比例分别为73.5%、64.7%和45.4%,同样呈现逐渐降低的趋势.周边农田土壤所有样点的生态危害系数均值为65,达到

表 2 土壤 As 污染特征

Table 2 Characteristics of soil As pollution

类型	土壤深度/m	N	I_{geo} 均值	污染样本比例/%					
				无污染	轻微污染	轻度污染	中度污染	偏重污染	重度污染
场地	0.1	54	4.23	3.70	0.00	12.96	16.67	18.52	18.52
	0.5	38	2.15	13.16	36.84	26.32	0.00	7.89	2.63
	1.5	47	1.95	12.77	31.91	19.15	14.89	4.26	2.13
	3	11	1.51	36.36	36.36	9.09	0.00	0.00	0.00
	6	21	0.99	30.43	26.09	21.74	4.35	13.04	0.00
	10~14	13	0.56	0.00	0.00	45.45	18.18	9.09	0.00
	0.1~14	184	2.85	12.94	19.90	17.41	12.44	8.96	5.97
农田	0.1	34	2.83	0.00	14.71	23.53	26.47	8.82	5.88
	0.5	34	2.02	5.88	23.53	32.35	20.59	2.94	5.88
	1.5	33	1.44	6.06	33.33	30.30	18.18	9.09	3.03
	0.1~1.5	101	2.11	3.96	23.76	28.71	21.78	6.93	4.95

表 3 土壤 As 潜在生态风险系数

Table 3 Potential ecological risk index of soil As

类型	土壤深度/m	N	E_r 均值	污染样本比例/%				
				低	中等	中高等	高等	极高等
场地	0.1	54	1279	5.6	20.4	22.2	13.0	38.9
	0.5	38	329	52.6	13.2	13.2	7.9	13.2
	1.5	47	624	57.5	14.9	8.5	4.3	14.9
	3	11	818	81.8	0.0	0.0	0.0	18.2
	6	21	103	65.2	13.0	13.0	4.4	4.4
	10~14	13	35	72.7	9.1	18.2	0.0	0.0
	0.1~14	184	108	41.8	13.4	13.4	6.5	24.9
农田	0.1	34	255	26.5	29.4	14.7	5.9	23.5
	0.5	34	219	35.3	41.2	5.9	2.9	14.7
	1.5	33	60	54.6	24.2	12.1	9.1	0.0
	0.1~1.5	101	65	38.6	31.7	10.9	5.9	12.9

中等潜在生态风险程度, 中等以上危害程度的污染样本累积比例为 61.4%, 应对该区域农田土壤采取相应的环境风险管理措施。

3 结论

(1) 研究区场地土壤所有样点 As 含量的范围为 $3.72 \sim 32\,400.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值为 $1\,333.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 周边农田土壤所有样点 As 含量的范围为 $12.2 \sim 6\,620.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值为 $358.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 14 个砷渣样品中 As 的浸出量范围为 $12.2 \sim 45\,100.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值为 $17\,316.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 对比分析来看, 场地土壤样点中 As 含量明显高于周边农田土壤。按照国家土壤环境质量 III 级标准, 场地土壤和周边农田土壤的样点超标率分别达到 80% 和 90%。

(2) 从研究区 As 含量的垂向分布特征来看, 不同区域中 As 污染的垂向分布表现出了较大的差异性, 污染物从表层到底层的污染程度有逐渐降低趋势。三维空间分布插值结果表明, 整个研究区域中 As 的污染分布范围较广, 污染严重区域主要分布在原生产厂区以及砷渣堆放区域, 在表层土壤中存在污染“热点区”现象, 目标场地中 As 含量的污染分布规律与该场地污染源的位置、释放强度以及场地地形特征等因素有密切关系。

(3) 地累积指数结果表明该场地中 As 在不同土壤剖面深度内已有不同程度污染, 且在表层土壤中的累积富集情况较为严重。研究区土壤样本 As 总体介于中等以上污染程度, 场地土壤和周边农田土壤中等危害程度以上的样点累积比例达到 58.2% 和 61.4%, 存在较大的环境风险, 已威胁到生态环境质量和人体健康, 需开展有效地风险管控和修复治理措施。

参考文献:

- [1] Forslund J, Samakovlis E, Johansson M V, *et al.* Does remediation save lives? — On the cost of cleaning up arsenic-contaminated sites in Sweden [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**(16): 3085-3091.
- [2] Agostini P, Pizzol L, Critto A, *et al.* Regional risk assessment for contaminated sites Part 3: spatial decision support system [J]. *Environment International*, 2012, **48**: 121-132.
- [3] Di Guardo A, Terzaghi E, Raspa G, *et al.* Differentiating current and past PCB and PCDD/F sources: the role of a large contaminated soil site in an industrialized city area [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **223**: 367-375.
- [4] 尧一骏. 我国污染场地治理与风险评估[J]. *环境保护*, 2016, **44**(20): 25-28.
Yao Y J. Risk assessment and remediation of soil contamination in China[J]. *Environmental Protection*, 2016, **44**(20): 25-28.
- [5] 刘庚, 王尚义, 牛俊杰, 等. 不同三维模型对铅酸蓄电池污染场地土壤 Pb 空间分布预测的影响[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(12): 3157-3163.
Liu G, Wang S Y, Niu J J, *et al.* The influence of different three dimensional models on Pb distributing prediction in lead-acid battery contaminated sites [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(12): 3157-3163.
- [6] 唐小亮, 吴以中, 张瑜, 等. 氯丹和灭蚊灵在典型污染场地的空间分布研究[J]. *土壤通报*, 2012, **43**(4): 942-948.
Tang X L, Wu Y Z, Zhang Y, *et al.* Study on distribution of chlordane and mirex in a typical contaminated site [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, **43**(4): 942-948.
- [7] Liu G, Niu J J, Guo W J, *et al.* Assessment of terrain factors on the pattern and extent of soil contamination surrounding a chemical industry in Chongqing, Southwest China [J]. *CATENA*, 2017, **156**: 237-243.
- [8] 钟茂生, 姜林, 张丽娜, 等. VOCs 污染场地风险管理策略的筛选及评估[J]. *环境科学研究*, 2015, **28**(4): 596-604.
Zhong M S, Jiang L, Zhang L N, *et al.* Screening and evaluation of risk management strategies for a site contaminated by VOCs [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, **28**(4): 596-604.
- [9] Butt T E, Javadi A A, Nunns M A, *et al.* Development of a conceptual framework of holistic risk assessment—Landfill as a particular type of contaminated land [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **569-570**: 815-829.
- [10] Fang Y Y, Nie Z Q, Die Q Q, *et al.* Organochlorine pesticides in soil, air, and vegetation at and around a contaminated site in southwestern China: concentration, transmission, and risk evaluation [J]. *Chemosphere*, 2017, **178**: 340-349.
- [11] 张建荣, 李娟, 许伟. 原位生物稳定固化技术在铬污染场地治理中的应用研究 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(9): 3684-3689.
Zhang J R, Li J, Xu W. Research on the application of *in-situ* biological stabilization solidification technology in chromium contaminated site management [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(9): 3684-3689.
- [12] Cappuyns V. Inclusion of social indicators in decision support tools for the selection of sustainable site remediation options [J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, **184**: 45-56.
- [13] Chapman P M, Wang F Y, Janssen C, *et al.* Ecotoxicology of metals in aquatic sediments: binding and release, bioavailability, risk assessment, and remediation [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1998, **55**(10): 2221-2243.
- [14] Higuera P, Oyarzun R, Lillo J, *et al.* The Almadén district (Spain): anatomy of one of the world's largest Hg-contaminated sites [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **356**(1-3): 112-124.
- [15] 宋波, 刘畅, 陈同斌. 广西土壤和沉积物砷含量及污染分布特征 [J]. *自然资源学报*, 2017, **32**(4): 654-668.
Song B, Liu C, Chen T B. Contents and pollution distribution characteristics of arsenic in soils and sediments in Guangxi Zhuang autonomous region [J]. *Journal of Natural Resources*, 2017, **32**(4): 654-668.
- [16] Joseph T, Dubey B, Mcbean E A. A critical review of arsenic exposures for Bangladeshi adults [J]. *Science of the Total*

- Environment, 2015, **527-528**: 540-551.
- [17] Martin M, Stanchi S, Hossain K M J, *et al.* Potential phosphorus and arsenic mobilization from Bangladesh soils by particle dispersion[J]. Science of the Total Environment, 2015, **536**: 973-980.
- [18] 刘畅, 宋波, 张云霞, 等. 西江流域土壤砷含量空间变异与污染评价[J]. 环境科学, 2018, **39**(2): 899-908.
Liu C, Song B, Zhang Y X, *et al.* Spatial variability and contamination of arsenic in soils of Xijiang river basin [J]. Environmental Science, 2018, **39**(2): 899-908.
- [19] Zhang X Y, Tang L S, Zhang G, *et al.* Heavy metal contamination in a typical mining town of a minority and mountain area, South China[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2009, **82**(1): 31-38.
- [20] 金银龙, 梁超轲, 何公理, 等. 中国地方性砷中毒分布调查(总报告)[J]. 卫生研究, 2003, **32**(6): 519-540.
Jin Y L, Liang C K, He G L, *et al.* Study on distribution of endemic arsenism in China[J]. Journal of Hygiene Research, 2003, **32**(6): 519-540.
- [21] 郭华明, 郭琦, 贾永锋, 等. 中国不同区域高砷地下水化学特征及形成过程[J]. 地球科学与环境学报, 2013, **35**(3): 83-96.
Guo H M, Guo Q, Jia Y F, *et al.* Chemical characteristics and geochemical processes of high arsenic groundwater in different regions of China [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2013, **35**(3): 83-96.
- [22] Rieuwerts J S, Mighanetara K, Braungardt C B, *et al.* Geochemistry and mineralogy of arsenic in mine wastes and stream sediments in a historic metal mining area in the UK[J]. Science of the Total Environment, 2014, **472**: 226-234.
- [23] 曾维特, 杨永鹏, 张东强, 等. 海南岛北部海湾沉积物重金属来源、分布主控因素及生态风险评价[J]. 环境科学, 2018, **39**(3): 1085-1094.
Zeng W T, Yang Y P, Zhang D Q, *et al.* Sources, distribution of main controlling factors, and potential ecological risk assessment for heavy metals in the surface sediment of Hainan Island North Bay, South China [J]. Environmental Science, 2018, **39**(3): 1085-1094.
- [24] 李艺. 有色金属矿山砷污染对生态环境的影响及其治理分析[J]. 地球与环境, 2008, **36**(3): 256-260.
Li Y. Impacts of arsenic pollution from nonferrous multi-metal mines on ecological environment and its governance analysis[J]. Earth and Environment, 2008, **36**(3): 256-260.
- [25] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine river[J]. Geojournal, 1969, **2**(3): 108-118.
- [26] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, **14**(8): 975-1001.



CONTENTS

Patterns of Mortality from Air Pollutant Emissions in China's Coal-fired Power Plants	QIN Yu, ZHANG Qiang, LI Xin, <i>et al.</i> (5289)
Analysis of the Temporal and Spatial Variation of PM _{2.5} in China Based on the LUR Model	LIU Bing-jie, PENG Xiao-min, LI Ji-hong (5296)
Physicochemical Properties of the Aerosol Particles and Their Impacts on Secondary Aerosol Formation at the Background Site of the Yangtze River Delta	 HUANG Dan-dan, ZHOU Min, YU Chuan-guan, <i>et al.</i> (5308)
Analysis of Different Particle Sizes, Pollution Characteristics, and Sources of Atmospheric Aerosols During the Spring Dust Period in Beijing	YANG Yang, LI Xing-ru, CHEN Xi, <i>et al.</i> (5315)
Characteristics of Ambient VOCs at the Shuangliu Site in Chengdu, China, During Summer and Autumn	DENG Yuan-yuan, LI Jing, LI Ya-qi, <i>et al.</i> (5323)
Source Profiles and Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds from Surface Coating of Aluminum Products in Foshan, China	LI Xia, SU Wei-jian, LI Bi-xia, <i>et al.</i> (5334)
Emission Inventory and Characteristics of Anthropogenic Air Pollutant Sources in the Sichuan Province	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, TAN Qin-wen, <i>et al.</i> (5344)
Characteristics of Particulate Matter Emissions from the Coking Process	WANG Yan-hui, ZHAO Liang, SUN Wen-qiang, <i>et al.</i> (5359)
Dry and Wet Deposition of Atmospheric Nitrogen in Small Catchments	WANG Huan-xiao, PANG Shu-jiang, WANG Xiao-yan, <i>et al.</i> (5365)
Seasonal Changes of the Pathways of Nitrogen Export from an Agricultural Watershed in China	LI Wen-chao, LEI Qiu-liang, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (5375)
Dynamics and Runoff Losses of Nitrogen in Paddy Field Surface Water Under Combined Application of Biochar and Slow/Controlled-Release Fertilizer	 SI Lin-lin, ZHOU Jing-jie, WU Liang-huan, <i>et al.</i> (5383)
Indirect Nitrous Oxide Emissions from an Agricultural Headwater Stream During the Rainy Season in the Upper Reach of the Yangtze River	TIAN Lin-lin, WANG Zheng, ZHU Bo (5391)
Concentration, Flux, and Emission Factor of N ₂ O in Rivers with Different Nitrogen Pollution Features	WANG Miao, LI Ya-feng, LEI Kun, <i>et al.</i> (5400)
Identification of Nitrate Pollution Sources Through Various Isotopic Methods: A Case Study of the Huixian Wetland	PENG Cong, PAN Xiao-dong, JIAO You-jun, <i>et al.</i> (5410)
Temporal and Spatial Distribution of the Soil Water δD and $\delta^{18}O$ in a Typical Karst Valley: A Case Study of the Zhongliang Mountains, Chongqing City	 WU Wei, JIANG Yong-jun, JIA Ya-nan, <i>et al.</i> (5418)
Hydrochemical Characteristics of Groundwater and the Origin in Alluvial-proluvial Fan of Qinhe River	LIU Jiang-tao, CAI Wu-tian, CAO Yue-ting, <i>et al.</i> (5428)
Impact of Maximum Precipitation in 2017 on the Runoff Component of Reclaimed Water-Intaking River	LIAO An-ran, SONG Xian-fang, ZHANG Ying-hua, <i>et al.</i> (5440)
Spectral Evolution Characteristics of DOM in Sediment Interstitial Water During the Formation Stage of Thermal Stratification in the Main Reservoir Area of the Zhoucun Reservoir	 ZHOU Shi-lei, ZHANG Yi-ran, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5451)
Pollution Characteristic of Ni in Sediments in the Three Gorges Reservoir	ZHANG Wei-jie, YIN Shu-hua, XU Dong-yu, <i>et al.</i> (5464)
Migration and Transformation of Mercury at Sediment-Water Interface of the Dahong Lake Reservoir in the Simian Mountains	GUO Pan, SUN Tao, YANG Guang, <i>et al.</i> (5473)
Effects of Wetland Types on Distribution of Soil Methylmercury Based on the Region of Nanweng River in the Greater Xing'an Mountains	ZHOU Xin-quan, LIU Yu-rong, LI Jing, <i>et al.</i> (5480)
Simulation of the Migration and Release Characteristics of Organophosphate Esters in Fluctuation Zone Soil of the Three Gorges Reservoir During Flooding	 YANG Ting, HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (5487)
Spatial Distribution of Perfluoroalkyl Acids and Transformation of Their Precursors in River Water Samples and Effluents of Wastewater Treatment Plants in a Typical Tourism City	 WANG Shi-liang, SUN Jian-shu, YANG Yue-wei, <i>et al.</i> (5494)
Purification Efficiency and Microbial Characteristics of Four Biofilters Operated Under Different Conditions	JIANG Xiao-liang, LI Meng, ZHANG Shao-hui, <i>et al.</i> (5503)
Effects of Manganese on the Growth and Fluorescence Induction Kinetics of <i>Conticribra weisflogii</i>	WANG Mu-lan, JIANG Yue-lu (5514)
Distribution and Factors Affecting <i>Cylindrospermopsis raciborskii</i> in Guangdong Reservoirs	LEI Min-ting, PENG Liang, HAN Bo-ping, <i>et al.</i> (5523)
Removal of Humic Acid from Water by Magnetic Chitosan-Grafted Polyacrylamide	YOU Wen, LIU Hai-cheng, CAO Jia-wei, <i>et al.</i> (5532)
Ozone-Biological Activated Carbon for Advanced Removal of Typical Persistent Organic Pollutants from Micro-Polluted Source Water in the Yangtze Delta Region	 LAN Ya-qiong, LIU Rui, MA Zheng-jie, <i>et al.</i> (5541)
Color and Nitrogen Removal from Synthetic Dye Wastewater in an Integrated Hydrolysis/Acidification and Anoxic/Aerobic Process	GU Meng-qi, YIN Qi-dong, LIU Ai-ke, <i>et al.</i> (5550)
Removal Characteristics of High Concentrations of Perchlorate Using a "Heterotrophic Sulfur Autotrophic" Combination Process	LIU Ying-nan, TAO Hua-qiang, SONG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (5558)
Rapid Start-up of a Nitrite-Dependent Methane Anaerobic Oxidation Reaction Under Static Pressure Conditions	WANG Yi-nan, HU Zhen, RU Dong-yun, <i>et al.</i> (5565)
Optimization of the Flow Distribution Ratio and Mechanism of Nitrogen Removal in a Multi-level AO Coupled Flow Biochemical Process	WANG Fan, LI Jun, BIAN De-jun, <i>et al.</i> (5572)
High-rate Nitrogen Removal in a Two-stage Partial Nitrification-ANAMMOX Process Under Mainstream Conditions	LIU Wen-ru, YANG Dian-hai, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (5580)
Effects of Different Substrate Concentrations on the Short-term Storage of ANAMMOX Bacteria	GAO Xue-jian, ZHANG Jie, LI Dong, <i>et al.</i> (5587)
Optimization of the Mainstream Anaerobic Ammonia Oxidation Process and Its Changes of the Microbial Community	FU Kun-ming, FU Chao, LI Hui, <i>et al.</i> (5596)
Granular Characteristics of Anaerobic Ammonia Oxidation Sludge During the Recovery Process	CHEN Fang-min, GU Cheng-wei, HU Yu-ting, <i>et al.</i> (5605)
Characterization of a Newly Isolated Strain <i>Pseudomonas</i> sp. N3 for Denitrification at Low Temperature	LU Jun-ling, CHEN Hui-ping, XIAO Lin (5612)
Heavy Metal Pollution and Potential Ecological Risk of Soil from Reclaimed Industrial Sites and Surrounding River Sediments	WU Jian, WANG Min, ZHANG Hui-peng, <i>et al.</i> (5620)
Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals for Different Types of Land Use and Evaluation of Human Health	LI Chun-fang, CAO Jian-fei, LÜ Jian-shu, <i>et al.</i> (5628)
Soil Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of As at a Large-scale Arsenic Slag-contaminated Site	LIU Geng, SHI Ying, TIAN Hai-jin, <i>et al.</i> (5639)
Relationship Between the Bacterial Abundance and Production with Environmental Factors in a Subtropical Karst Reservoir	XIN Sheng-lin, LIANG Yue-ming, PENG Wen-jie, <i>et al.</i> (5647)
Structure Analysis of Arbuscular Mycorrhizal in Roots from Different Shrubs in Karst Regions	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (5657)
Effects of Stimulated Nitrogen Deposition on the Bacterial Community Structure of Semiarid Temperate Grassland	LI Zong-ming, SHEN Ju-pei, ZHANG Li-mei, <i>et al.</i> (5665)
Effect of Phosphorus Addition on the Abundance of Autotrophic CO ₂ -Fixation Microorganisms in Rhizospheric Soil from a Phosphorus-Limited Paddy Field	 BAI Jing, LI Yi-fei, LIU Shou-long, <i>et al.</i> (5672)
Effects of Varying Long-term Fertilization on Organic Carbon Mineralization and Priming Effect of Paddy Soil	MA Xin, WEI Liang, TANG Mei-liang, <i>et al.</i> (5680)
Relationship Between the Vegetation Community and Soil Nutrient and Enzyme Activity During the Restoration of Abandoned Land in the Loess Hilly Region	 QIAO Wen-jing, DAI Yin-yue, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (5687)
Degradation of Pentachlorophenol by Fulvic Acid in a Municipal Solid Waste Landfill	LIU Si-jia, HE Xiao-song, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (5699)
Effect of CO ₂ Doubling and Different Plant Growth Stages on Rice Carbon, Nitrogen, and Phosphorus and Their Stoichiometric Ratios	 TANG Mei-ling, XIAO Mou-liang, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i> (5708)
Assessment of Medical Waste Disposal Technologies Based on the AHP	XU Xiao-fang, TAN Quan-yin, LIU Li-li, <i>et al.</i> (5717)
Livestock and Poultry Faeces Nitrogen Loading Rate and Its Potential Return to Farmland in China	LIU Xiao-yong, WANG Xiu-bin, LI Shu-tian (5723)