

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

2000~2018年我国大气重金属沉降通量时空变化特征

陈其永, 郜允兵, 倪润祥, 潘瑜春, 阎跃观, 杨晶, 刘孝阳, 顾晓鹤



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年9月

第43卷 第9期
Vol.43 No.9

目次

2000~2018年我国大气重金属沉降通量时空变化特征	陈其永, 郇允兵, 倪润祥, 潘瑜春, 阎跃观, 杨晶, 刘孝阳, 顾晓鹤(4413)
面向二/三维城市形态指标的 PM _{2.5} 浓度调控模拟	李莎, 邹滨, 刘宁, 冯徽徽, 陈军, 张鸿辉(4425)
减排背景下成都大气 PM _{2.5} 碳质组分特征	陈璐瑶, 于阳春, 黄小娟, 董贵明, 张军科(4438)
青岛秋冬季 PM ₁ 中金属元素污染特征及健康风险评估	刘子杨, 张宜升, 张厚勇, 马子轸, 陶文鑫, 王娇, 薛莲, 彭倩倩, 杜金花, 赵娇娇, 彭亮, 孙英杰(4448)
港口地区大气 PM _{2.5} 中多环芳烃污染特征及来源分析	王鹏程, 杨凌霄, 别淑君, 黄琦, 齐安安, 虞雄, 王滢铭, 徐鹏, 张天琪, 王文兴(4458)
天津市冬季道路颗粒物粒径分布及来源解析	张国涛, 殷宝辉, 白雯宇, 郭丽瑶, 王智宇, 张楠, 郑镇森, 张利文, 杨文, 韩斌, 白志鹏(4467)
北京市生物源一次气溶胶浓度变化特征及影响因素	梁林林, 刘畅, 刘旭艳, 徐婉筠, 张根, 程红兵, 刘雨思(4475)
北京市城区夏季 VOCs 变化特征分析与来源解析	孟祥来, 孙扬, 廖婷婷, 张琛, 张成影(4484)
东莞工业集中区夏季臭氧污染与非污染期间 VOCs 组分特征及其来源	周振, 肖林海, 费蕾蕾, 余纬, 林满, 黄筠筠, 张智胜, 陶俊(4497)
生活垃圾填埋场恶臭污染的时空变化与膜阻隔效果	何品晶, 李健晨, 吕凡, 章骅, 邵立明(4506)
不同年份太湖水域全氟化合物健康风险源解析对比	武婷, 孙善伟, 樊境朴, 鲁富蕾, 郭昌胜, 徐建(4513)
沱江流域典型及新兴全氟/多氟化合物的污染特征及来源解析	宋娇娇, 汪艺梅, 孙静, 方淑红(4522)
白洋淀不同类型水体表层沉积物重金属的赋存形态及风险	许梦雅, 张超, 单保庆, 刘操(4532)
喹诺酮类抗生素在城市典型水环境中的分配系数及其主要环境影响因子	剧泽佳, 付雨, 赵鑫宇, 陈慧, 宋圆梦, 赵波, 张纪媛, 卢梦洪, 崔建升, 张璐璐(4543)
石家庄地下水中喹诺酮类抗生素生态风险及其与环境因子的相关性	陈慧, 剧泽佳, 赵鑫宇, 付雨, 崔建升, 张璐璐(4556)
不同淹水环境下湖泊沉积物 DOM 的特征与来源	陈佳, 李忠武, 金昌盛, 文佳骏, 聂小东, 王磊(4566)
晋城市沁河流域秋季浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系	高梦蝶, 李艳粉, 李艳利, 孙昂, 田爽, 张春晖, 耿亚平, 李林霞(4576)
不同配置绿色屋顶径流水质特征及综合评价	章孙逊, 张守红, 闫婧, 王任重远, 杨航(4587)
紫外光化过硫酸盐降解磷酸氯喹	李阳, 许玻琨, 邓琳, 罗伟(4597)
微气泡臭氧氧化预处理实际制药废水去除 SS 和有机物性能	刘春, 陈蕊, 张静, 杨旭, 陈晓轩, 郭延凯, 武明泽, 庞勃(4608)
废水排放对近海环境中抗生素抗性基因和微生物群落的影响	陈嘉瑜, 苏志国, 姚鹏城, 黄备, 张永明, 温东辉(4616)
生物炭和秸秆还田对微咸水滴灌棉田土壤真菌群落结构多样性的影响	郭晓雯, 陈静, 鲁晓宇, 李远, 陶一凡, 闵伟(4625)
有机物料投入对喀斯特地区土壤磷素赋存形态与含 <i>phoD</i> 基因细菌群落的影响	夏鑫, 乔航, 孙琪, 刘坤平, 陈香碧, 何寻阳, 胡亚军, 苏以荣(4636)
煤矿矿区复垦植被类型对土壤微生物功能基因和酶活的影响	宁岳伟, 刘勇, 张红, 李君剑(4647)
生物炭施用对黄壤土壤养分及酶活性的影响	袁访, 李开钰, 杨慧, 邓承佳, 梁红, 宋理洪(4655)
黄河源区斑块化退化高寒草甸土壤细菌群落多样性变化	孙华方, 李希来, 金立群, 赵玉蓉, 李成一, 张静, 宋梓涵, 苏晓雪, 刘凯(4662)
模拟氮沉降对三江平原小叶章湿地土壤微生物碳源利用能力的影响	翁晓虹, 隋心, 李梦莎, 刘赢男, 张荣涛, 杨立宾(4674)
石家庄市土壤中喹诺酮类抗生素空间分布特征及其与微生物群落相关性	赵鑫宇, 剧泽佳, 陈慧, 付雨, 宋圆梦, 赵波, 张纪媛, 卢梦洪, 崔建升, 张璐璐(4684)
典型氧化还原环境中微塑料表面的微生物群落组成特征与构建机制	龚志伟, 马杰, 苏趋, 林亚楠, 董鑫磊, 周立昌, 王宗平, 郭刚(4697)
作物秸秆材料处理养殖废水中氮的周年去除效果及其对氮循环微生物丰度的影响	刘铭羽, 夏梦华, 蒋磊, 彭健, 陈坤, 赵聪芳, 李希, 孟岑, 曾睿, 王栋, 李裕元, 吴金水(4706)
不同外碳源对尾水极限脱氮性能及微生物群落结构的影响	王伟, 赵中原, 张鑫, 由志鹏, 黄子晋, 彭永臻(4717)
总氮提标改造工程的微生物群落结构分析	李海松, 王柯丹, 陈晓蕾, 阎登科, 许子聪, 胡培基(4727)
IFAS 工艺处理南方低碳源污水的泥膜微生物互作规律分析	赫俊国, 江伟勋, 何卓义, 刘新平, 吴世华, 储昭瑞, 冯杰(4736)
黄土高原土地利用方式对微塑料丰度和形态分布的影响	郝永丽, 胡亚鲜, 白晓雄, 郭胜利(4748)
南方丘陵区土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价	王玉, 辛存林, 于爽, 薛红蕾, 曾鹏, 孙平安, 刘凡(4756)
兰州市耕地“五毒”重金属的风险评价与归因分析	张利瑞, 彭鑫波, 马延龙, 康乐, 张妍娥, 王泉灵, 张松林(4767)
石家庄市栾城区农田土壤重金属分布特征及作物风险评价	孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 郑国砥, 陈同斌, 刘杰(4779)
典型城市土壤中重金属锑(Sb)的含量分布特征及风险评价	沈城, 叶文娟, 钱诗颖, 吴健, 朱旭东, 王敏(4791)
有色金属矿业城市典型村镇土壤重金属污染评价及来源解析	汪峰, 黄言欢, 李如忠, 吴鸿飞(4800)
柠檬酸及刈割强化象草修复镉污染土壤的效应	唐棋, 伍港繁, 辜娇峰, 周航, 曾鹏, 廖柏寒(4810)
稻田干湿过程甲基化效率变化与关键影响因素分析	张玥, 李令仪, 文炯, 曾希柏, 苏世鸣(4820)
外源茉莉酸对水稻幼苗根系砷积累及抗逆应答效应	李颜, 黄益宗, 保琼莉, 黄永春, 张盛楠(4831)
秸秆还田配施化肥对土壤养分及冬小麦产量的影响	宋佳杰, 徐郁阳, 白金泽, 于琦, 程伯豪, 冯永忠, 任广鑫(4839)
冬季绿肥对黄土高原旱作春玉米农田土壤温室气体排放的影响	张少宏, 王俊, 方震文, 付鑫(4848)
庞泉沟自然保护区土壤呼吸空间分异性影响因素探索	李晓敏, 严俊霞, 杜自强, 王琰(4858)
小型养殖塘水体中 CH ₄ 、CO ₂ 和 N ₂ O 浓度的时空变化特征及影响因素	石婕, 张弥, 邱吉丽, 万梓文, 赵若男, 谢燕红, 陈明健, 赵佳玉, 肖薇, 刘寿东(4867)
丁基黄药对选矿区土壤吸附铅镉的影响	胡志浩, 郭朝晖, 冉洪珍, 肖细元, 彭驰, 李钰滢(4878)
秸秆生物炭吸附对乙酰氨基酚的机制及其位能分布特征	商岑尧, 顾若婷, 张强, 谢慧芳, 王冰玉(4888)
黄土高原地区生态脆弱性时空变化及其驱动因子分析	张良侠, 樊江文, 张海燕, 周德成(4902)
植物促生菌在重金属生物修复中的作用机制及应用	马莹, 王玥, 石孝均, 陈新平, 李振轮(4911)
《环境科学》征订启事(4512) 《环境科学》征稿简则(4735) 信息(4696, 4790, 4887)	

典型城市土壤中重金属锑(Sb)的含量分布特征及风险评价

沈城¹, 叶文娟¹, 钱诗颖¹, 吴健^{1*}, 朱旭东², 王敏¹

(1. 上海市环境科学研究院, 上海 200233; 2. 华东理工大学资源与环境工程学院, 国家环境保护化工过程环境风险评价与控制重点实验室, 上海 200237)

摘要: 为探讨重金属锑(Sb)在城市土壤中的分布特征和潜在风险, 基于上海市 102 个地块 1 670 个不同深度剖面土壤样品数据, 分析 4 种典型土地利用类型土壤重金属 Sb 的含量分布特征, 并通过潜在生态风险指数法和健康风险评价模型进行风险评价。结果表明, 研究区域土壤 $\omega(\text{Sb})$ 的平均值为 $0.52 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 并呈现明显的聚集分布特性; 土壤 Sb 含量随着土壤深度的增加逐渐降低, 表层土壤 Sb 存在一定程度的富集, 人类活动影响了土壤中 Sb 的分布。工业用地表层土壤 Sb 含量相较于其它 3 种类型土壤差异显著, 其累积程度高于住宅用地和商服用地, 农用地 Sb 含量水平最低。区域整体上处于清洁至尚清洁水平, 但工业用地的单项污染指数相对最高, 达到轻度污染水平, 住宅用地、商服用地和农用地分别为尚清洁或清洁水平; 潜在生态风险指数范围为 4.23 ~ 7.61, 区域整体表现为轻微潜在生态风险。工业用地潜在生态风险等级为中等, 需引起重视。健康风险评价结果显示土壤 Sb 非致癌风险较小或可忽略。

关键词: 土地利用类型; 土壤; 锑(Sb); 分布特征; 风险评价

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)09-4791-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202111294

Distribution Characteristics and Risk Assessment of Antimony in Typical Urban Soil

SHEN Cheng¹, YE Wen-juan¹, QIAN Shi-ying¹, WU Jian^{1*}, ZHU Xu-dong², WANG Min¹

(1. Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Environmental Risk Assessment and Control on Chemical Process, School of Resources and Environmental Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: In order to study the distribution characteristics and potential risk of antimony (Sb) in urban soil, the concentrations of soil Sb in four different land use types were analyzed based on the data of 1670 soil samples with different vertical profiles in 102 plots in Shanghai. The risks were evaluated using the potential ecological risk index method and health risk assessment model. The results showed that the average $\omega(\text{Sb})$ in the study area was $0.52 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, and the content of soil Sb gradually declined with the rise in soil profile depth. Sb was enriched in surface soil, which indicated that human activities had caused disturbance to the distribution of Sb in the soil. The content of Sb in the surface soil of industrial land was higher than that of residential land and commercial land, and the content of Sb in agricultural land was the lowest. The single-factor pollution index of industrial land was the highest, reaching a slight pollution level, whereas the residential land, commercial land, and agricultural land were at even-clean or clean levels, respectively. The whole region showed slight ecological risk, with the potential ecological risk index ranging from 4.23 to 7.61. The potential ecological risk level of industrial land was moderate, which needs to be addressed. The results of health risk assessment showed that the non-carcinogenic risk of Sb in the soil was low; however, it is of great concern to residents, especially children, when on residential land.

Key words: land uses; soil; antimony(Sb); distribution characteristics; risk assessment

城市土壤是城市生态环境的重要组成部分, 与城市居民健康密切相关^[1,2]。城市土壤中的重金属可悬浮于大气中, 并通过直接吸入、摄入和皮肤接触等方式危害人体健康^[3,4]。重金属锑(Sb)是环境中广泛存在的微量有毒元素, 与砷(As)有着相似的毒理特性, 较低浓度的 Sb 进入环境后便可造成生态风险^[5,6]。由于其潜在毒性和致癌性, 已被美国环保署(EPA)和欧盟(EU)列为优先污染物^[7,8]。近年来, 环境(土壤和水体等)中 Sb 水平的升高引起了政府和研究学者的广泛关注。相较于自然源^[9], 人类生产生活活动(如采矿、金属冶炼、半导体制造、化石燃料燃烧、垃圾焚烧和汽车元件的磨损释放等)对土壤 Sb 含量的影响更为强烈^[10~15]。不同人类活动演化形成的城市土地利用类型差异, 必然导致同种类型土壤的物理性质(质地、孔隙度、热性

质)和化学性质(吸收性、酸碱性和缓冲性)有所差异^[16~20], 进而影响重金属在土壤中的迁移转化和累积。因此考虑不同土地利用方式下土壤 Sb 含量的显著差异以及 Sb 对人体和动植物的毒性^[18,21~23], 确定土壤 Sb 的区域分布和潜在风险就显得非常重要。近年来, 国内外学者主要针对 Sb 矿开采冶炼区^[24,25]、工业园区^[26,27]和矿区周边农用地^[28,29]等区域的重金属污染特征进行了研究, 有研究针对单一用地中土壤重金属 Sb 污染特征进行了分

收稿日期: 2021-11-29; 修订日期: 2022-01-26

基金项目: 上海市生态环境局重大科研项目(沪环科[2018]第3号, 沪环科[2019]第22号, 沪环科[2020]第7号); 上海市环境科学研究院创新基金项目(CX2021110334, CX2021180327)

作者简介: 沈城(1993~), 男, 硕士, 主要研究方向为重金属污染治理, E-mail: shencheng@saes.sh.cn

* 通信作者, E-mail: wuj@saes.sh.cn

析^[30~32],有研究则更关注人体健康风险方面的探讨^[33~35],而针对城市区域性和不同土地利用类型的典型分布特征及评价研究还鲜见报道。

上海是我国最早的工业城市,也是快速城市化区域,相较于广东深圳($0.17\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)和福建厦门($0.45\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)等高度城市化区域,上海($0.75\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)土壤中重金属Sb含量相对较高^[36],同时,陈敏等^[37]在长江口地区集中式饮用水水源地中检测到Sb的存在,因此,为保障土地再开发利用的安全性和城市可持续健康发展,亟需深入探究城市化进程中土壤重金属的污染特征及风险水平.本文以上海市4种典型用地类型城市土壤作为研究对象,通过系统采样和检测分析,采用单项污染指数法和反距离权重插值法探究Sb在土壤中的含量和空间分布特征,明确土壤Sb对不同土地利用类型的累积响应,同时根据重金属Sb的类别毒性,调整潜在生态风险的分级标准完善评价方法,并结合人体健康暴露参数,分析其潜在生态风险和健康风险差异,以期为提高城市土地安全利用及环境管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

上海市地处东经 $120^{\circ}52'$ ~ $122^{\circ}12'$,北纬 $30^{\circ}40'$ ~ $31^{\circ}53'$,属亚热带海洋性季风气候,四季分明,日照充分,雨量充沛,土壤类型主要为水稻土、灰潮土和滨海盐土等.作为我国城市化、工业化进程最早的城市之一,上海市人口密集,土地利用类型多样,拥有如汽车制造、石油化工、钢材制造和电子产品制造业等多样的行业门类.城市发展的同时也带来了一定的土壤污染问题.本文结合城市土地再开发利用过程中的土壤污染状况调查,选取上海市4种不同土地利用类型的102个地块为研究对象(表1),其中农用地地块数为34块,均以蔬菜种植为主,占本研究地块总数的33.3%;其次为工业用地31块,以化学原料和化学制品制造业和金属制品业居多,占比30.4%;住宅用地以及商服用地的地块数分别占比16.7%和19.6%.地块位置分布如图1所示。

表1 土地利用类型特征描述

Table 1 Characteristic description of land use types		
土地利用类型	采样地块数 /个	特征描述
农用地	34	直接或间接为农业生产所利用的土地
工业用地	31	用于工业生产活动的土地
住宅用地	17	历史上长期用于居民生活居住的宅基地和附属土地
商服用地	20	商业、金融业、餐饮旅馆业及其他经营性服务业建筑及其相应附属设施用地

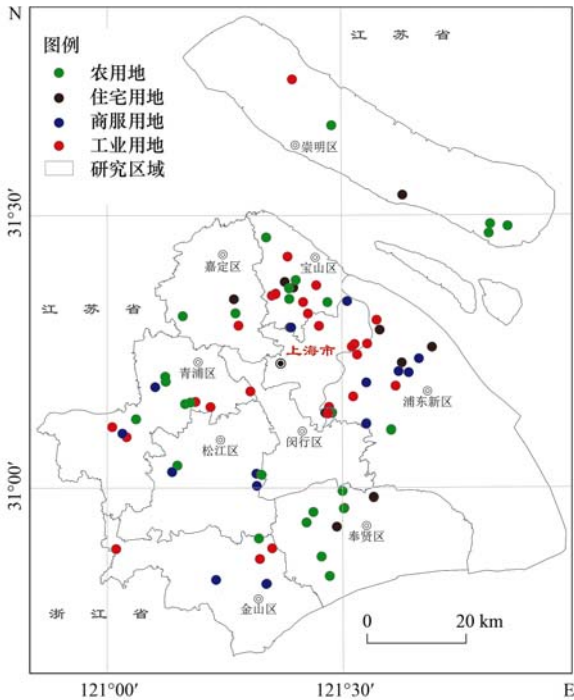


图1 研究区域地块分布示意

Fig. 1 Location distribution of the research plots

1.2 布点、采样及检测

在综合考虑城市用地类型分异的基础上,对研究区域处于土地在开发利用阶段的102个地块进行合理布点,共布设708个点位.采样时主要结合现场踏勘实际情况,综合考虑污染源分布、污染物类型、污染物迁移途径以及地块水文地质等情况,识别疑似污染区域并进行布点,采用Geoprobe原状土壤钻机高频冲击方式进行钻探取样,采集各布点区域内土壤点位表层($0\sim0.5\text{ m}$)、中层($0.5\text{ m}\sim$ 地下水位线)和深层($\geq$ 地下水位线)土壤样品,其中 0.5 m 以下的土壤样品根据判断布点法筛选判断后采集,表层杂填土和中深层存在罐槽、管线等情况则不进行采样,同时采集的土壤质控平行样不少于每个场地总样品数的10%,其中平行样不纳入后续统计分析,同层土壤根据现场快速筛查结果最高值确定采样部位并采取四分法保留 0.8 kg .样品装于土壤样品密封瓶中编号、记录并保存,样品总量为1670个.研究区域土壤地块、点位及样品数量汇总见表2。

采集的土壤样品均室温避光风干,去除动植物残体、碎石等杂物,研磨过100目尼龙筛后置于牛皮纸袋中备用.本研究中,Sb含量的测定方法参照HJ 680-2013,采用微波消解/原子荧光法对土壤样品前处理及检测,实验室检出限为 $0.01\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平行样本间的相对标准偏差小于5%。

1.3 风险评价

1.3.1 单项污染指数法

单因子污染指数是土壤环境质量评价的重要参

表 2 研究区域地块、点位和样品数量
Table 2 Table of plots, sites, and sample quantity

项目	地块数 /个	采样点位数 /个	样品数/个			样品数合计 /个
			表层	中层	深层	
农用地	34	186	172	152	119	443
工业用地	31	332	304	253	233	790
住宅用地	17	77	65	53	63	181
商服用地	20	113	113	58	85	256
合计	102	708	654	516	500	1 670

数,可显示土壤单个重金属的污染程度^[38,39],计算公式为:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \tag{1}$$

式中, P_i 为土壤中某项重金属的单因子污染指数; C_i 为该重金属的实测值($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); S_i 为该重金属在土壤中的环境质量评价标准或研究区域土壤环境背景值($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),本研究采用上海市背景值($0.75\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[40]. 污染等级的划分: $P_i \leq 0.7$ 为清洁; $0.7 < P_i \leq 1$ 为尚清洁; $1 < P_i \leq 2$ 为轻度污染; $2 < P_i \leq 3$ 为中度污染; $P_i > 3$ 为重度污染.

1.3.2 潜在生态指数法

潜在生态风险指数法由瑞典科学家 Håkanson^[41] 提出,该方法同时考虑各重金属元素在

环境中的含量和生态环境效应与它们对环境的毒性差异,被广泛应用于土壤和沉积物中重金属的生态风险评估^[42,43]. 其中单项重金属的计算公式如下:

$$E_r^i = T_i \times \frac{C_i}{B_i} \tag{2}$$

式中, E_r^i 为土壤中重金属 i 对应的单项潜在生态风险指数; C_i 为重金属 i 在土壤环境中的含量值($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); B_i 为重金属 i 的含量标准值($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)或地球化学背景值($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),本研究选用上海市土壤环境背景值; T_i 为土壤中重金属 i 所对应的毒性响应系数,本文参考了 Wang 等^[44] 确定的 Sb 毒性系数,为 7. Sb 的毒性响应系数与毒性系数相等^[45]. 该方法的分级标准需要根据实际情况进行调整^[46],调整后潜在生态风险评价分级标准见表 3.

表 3 修正的土壤重金属 Sb 潜在生态风险评价分级标准
Table 3 Classification of the modified potential ecological risk assessment of Sb

级别	1 级(轻微)	2 级(中等)	3 级(重度)	4 级(强烈)	5 级(极强)
E_r^i	$E_r^i < 7$	$7 \leq E_r^i < 14$	$14 \leq E_r^i < 28$	$28 \leq E_r^i < 56$	$E_r^i \geq 56$

1.3.3 反距离权重插值

反距离权重插值(IDW)是基于相近相似原理,离得越近的物体,它们的性质就越相似;相反,离得越远的物体它们的相似性就越小^[47]. 反距离权重插值方法是利用预测区域里的已知样本点的观测值来预测区域内除了样本点以外的其他值,因其原理简单易行,插值结果精确,已被广泛应用在数据插值处理中^[48]. 反距离权重插值方法的计算公式如下:

$$Z(S_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(S_i) \tag{3}$$

式中, $Z(S_0)$ 为待观测点 S_0 的预测值; N 为观测计算中要用到的预测点周围样本点的数量; λ_i 为在预测计算过程中使用的各个样本点的权重,其值随着样本点与预测点之间的距离增大而减小; $Z(S_i)$ 是在 S_i 处得到实测值的数据.

1.3.4 健康风险评估

采用 EPA 推荐的暴露评价模型和健康风险评价模型分别开展住宅用地(敏感用地)和工业用地、

商服用地(非敏感用地)表层土壤 Sb 的健康风险评估. 有研究表明^[49],总 Sb 和 Sb^{5+} 主要通过经口摄入途径进入人体血液, Sb^{3+} 主要通过呼吸吸入途径进入人体后积累于红细胞中. 此外, Gebel^[50] 的研究指出,经口摄入是 Sb 进入人体的主要暴露途径,是危害人体健康的主要来源,因此本研究仅探讨总锑对人体的健康风险,其对应的暴露量和危害商计算公式如下:

$$\text{OISER}_{\text{nc}} = \frac{\text{OSIR} \times \text{EF} \times \text{ED} \times \text{ABS}_0}{\text{BW} \times \text{AT}_{\text{nc}}} \times 10^{-6} \tag{4}$$

$$\text{HQ}_{\text{ois}} = \frac{\text{OISER}_{\text{nc}} \times C_{\text{sur}}}{\text{RfD} \times \text{SAF}} \tag{5}$$

式中, OISER_{nc} 为经口摄入土壤暴露量 [$\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$]; HQ 为经口摄入土壤途径的危害商,表征重金属的潜在非致癌风险; OSIR 为重金属在土壤环境中的含量值($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); EF 为人群暴露频率($\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$); ED 为暴露时间(a); ABS_0 为经口摄入吸收效率因子; BW 为体重(kg), AT_{nc} 为非致癌

效应平均时间 (d); RfD 为经口摄入参考剂量 [$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$]; C_{sur} 为表层土壤中污染物含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); SAF 为暴露于土壤的参考剂量分配系数. 健康风险评价模型所用参数参照《建设用地土壤污染风险评估技术导则》(HJ 25.3-2019).

1.4 数据统计与分析

本研究使用 Excel 2016 和 SPSS 软件对数据进行处理,图表由 Origin2018 完成. 地块分布和土壤 Sb 含量空间分布由 Arcgis 10.6 完成,其中空间分布是采用反距离权重 (IDW) 在 Arcgis 中对土壤中重金属 Sb 含量进行空间插值来完成.

2 结果与讨论

2.1 土壤重金属 Sb 的含量分布特征

对上海市 102 个地块的 1670 个土壤样品检测分析,结果如表 4 和图 2 所示,上海市土壤 $\omega(\text{Sb})$ 的平均值为 $0.52 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 在不同深度土壤中均有 Sb

检出,且随着土壤深度的增加,土壤 Sb 含量逐渐降低,此结果与国内外许多学者的研究结果一致^[51,52]. 表层土壤中 $\omega(\text{Sb})$ 的平均值为 $0.62 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,略低于上海市土壤 Sb 背景值,略高于中层 ($0.50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和深层 ($0.37 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 土壤 $\omega(\text{Sb})$ 平均值,且表层土壤 $\omega(\text{Sb})$ 的最大值 ($1.99 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 同样高于中层 ($1.98 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和深层 ($0.72 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). 根据差异显著性分析,表层土壤 Sb 含量与中层和深层相比差异显著 ($P < 0.01$),表明 Sb 在表层土壤中存在明显富集. 总体上,土壤 Sb 含量的变异程度较高,变异系数高达 86.54%,其中表层和中层土壤 Sb 含量的变异系数 (48.39% 和 52.00%) 均大于深层 (35.14%). 由于深层土壤 Sb 含量的变化也属于强变异等级^[53],表明土壤母质对 Sb 的空间分布同样具有显著影响,而表层变异系数大于深层,说明人类活动对土壤 Sb 的分布造成了一定的干扰.

表 4 土壤 Sb 描述性统计分析¹⁾

Table 4 Concentrations of Sb in the soil at study area

项目	均值 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	中位数 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	标准差	范围 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	变异系数 /%	百分位数		
						25%	50%	75%
总体	0.52	0.42	0.45	0.12 ~ 1.99	86.54	0.30	0.42	0.60
表层	0.62	0.56	0.30	0.19 ~ 1.99	48.39	0.41	0.57	0.68
中层	0.50	0.42	0.26	0.12 ~ 1.98	52.00	0.34	0.42	0.58
深层	0.37	0.36	0.13	0.14 ~ 0.72	35.14	0.28	0.36	0.47

1) 地块数量 $N = 102$

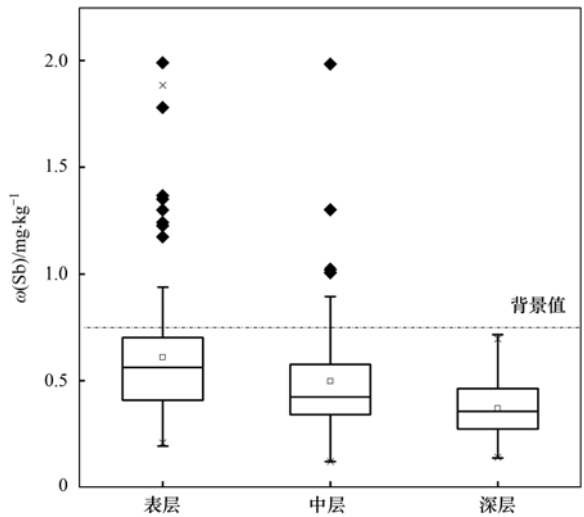


图 2 土壤 Sb 垂向分布特征

Fig. 2 Vertical distribution of soil Sb concentrations

进一步对研究区内土壤重金属 Sb 含量的空间分布特征进行空间插值分析,由于土壤 Sb 含量未通过 K-S 正态分布检验,故本研究采用反距离加权插值法 (IDW) 进行插值,在插值过程中,涉及搜索邻域的类型为平滑,设置搜索邻域的扇区类型定义为一个扇形,得到插值结果如图 3 所示. 从中可以看出,上海

市土壤 Sb 含量空间分布不均匀,呈现明显的聚集分布特征. 中心城区及嘉定、宝山、闵行和浦东新区等近郊区域含量较高,而远郊金山、奉贤和崇明区的土壤 Sb 含量普遍较低,这与文献^[54]的研究结果相一致. 土壤 $\omega(\text{Sb})$ 最大值 ($1.99 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 出现在浦东新区,是背景值的 2.65 倍;在嘉定、宝山和青浦区土壤 $\omega(\text{Sb})$ 的最大值分别为 1.37 、 0.90 和 $1.24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,是背景值的 1.20 ~ 1.83 倍. 土壤 Sb 含量较高的区域分布着较多的机械制造、金属冶炼、汽车零件生产、服装加工和油漆涂料生产等工业企业,有研究证实,涉及此类工业生产活动通常会造成其周边环境介质中 Sb 含量的升高^[55~57].

2.2 不同用地类型土壤中重金属 Sb 的累积特征

不同用地类型地块表层土壤 Sb 的累积特征如图 4 所示. 从各用地类型表层土壤 Sb 含量来看,工业用地土壤 $\omega(\text{Sb})$ 平均值最高,为 $0.82 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,超上海市土壤背景值,其次为住宅用地 ($0.59 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和商服用地 ($0.57 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),农用地 ($0.46 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 相对最低. 同时,Sb 在工业用地土壤中的最大值和中位值也相对最高. 表层土壤中 Sb 的变异系数由大到小依次为:工业用地 (39.57%)

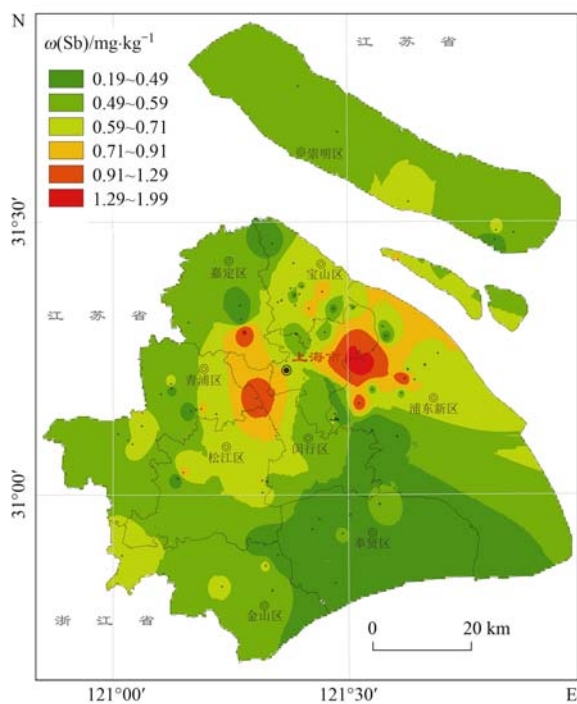
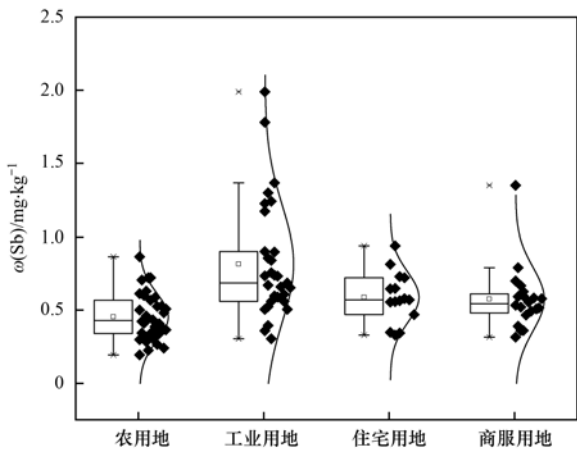


图3 表层土壤Sb含量分布

Fig. 3 Spatial distribution of Sb concentration in topsoil

> 商服用地 (21.76%) > 住宅用地 (17.33%) > 农用地 (12.57%), 表明工业活动对表层土壤中 Sb 的累积影响相对较大. 差异显著性结果显示, 工业用地表层土壤中 Sb 的含量与农用地、住宅用地和商服用地的含量相比差异显著 ($P < 0.05$). 此外, 工业用地相对于其它用地数据更加离散, 表明表层土壤中 Sb 的累积受工业生产活动的影响较大. 住宅用地和商服用地的 Sb 含量相比差异性不显著 ($P = 0.85$), 但分别与农用地存在显著差异 ($P < 0.05$), 相比之下, 农用地累积量较少.



散点表示各地块土壤Sb的累积含量, 曲线表示其正态分布概率

图4 不同用地类型地块表层土壤重金属Sb含量箱线图

Fig. 4 Box plots of Sb concentration in different land use types in surface soil

分析地块具体信息发现, 浦东新区 Sb 含量最大值地块历史时期为汽车维修厂和工程车停车场, 地

块中 Sb 含量较高的点位主要位于汽车维修废弃物的堆放区和土方运输停车场; 嘉定区 Sb 累积量较高的工业地块主要从事精密机械加工、金属制品、汽车零配件加工, 其中地块中 Sb 含量较高的点位主要位于某电梯制造公司的厂房内; 青浦区中 Sb 均值最高的某工业地块历史上进行过钢铁冶炼、喷漆及金属热处理, 地块中 Sb 含量最高的点位位于停车场中, 检测值达到 $4.43 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其他检测值较高的点位主要分布在原喷涂车间与废弃物堆放区; 宝山区土壤 Sb 累积较高的地块分布着金属制品加工、印刷、汽修和仓储等企业. 已有研究表明金属冶炼工艺中涉及大量煤炭燃烧^[58,59], 燃煤过程中大量 Sb 释放到大气中并随大气干湿沉降在表层土壤中造成富集; 油漆涂料行业常使用 Sb 作为颜料和固化剂^[60,61]; 氧化锑作为阻燃剂广泛用于轮胎和刹车片等产品中^[62]; 含 Sb 产品废弃物以及工业废水可能是造成土壤 Sb 含量升高的原因. 住宅用地和商服用地不涉及工业生产, 其表层土壤 Sb 的累积可能是来源于装修材料、涂料和油漆等^[63].

2.3 土壤重金属 Sb 潜在生态风险评价

结合单因子污染指数对 4 种用地类型地块表层土壤 Sb 污染等级进行划分, 结果显示有 83% 的地块处于清洁至尚清洁的水平, 15% 的地块为轻度污染水平, 2% 的地块为中度污染. 总体来看, 研究地块表层土壤 Sb 的单项污染指数均值为 0.81, 处于尚清洁的水平. 对比不同用地类型, 工业用地的单项污染指数均值 (1.08) 最高, 属轻度污染水平; 住宅用地和商服用地指数值相接近 (分别为 0.78 和 0.76), 为尚清洁水平; 农用地指数值 (0.66) 最低, 属清洁水平.

表层土壤 Sb 的潜在生态风险指数计算结果显示 (图 5), 所有地块总体潜在生态风险指数 (E_r) 为

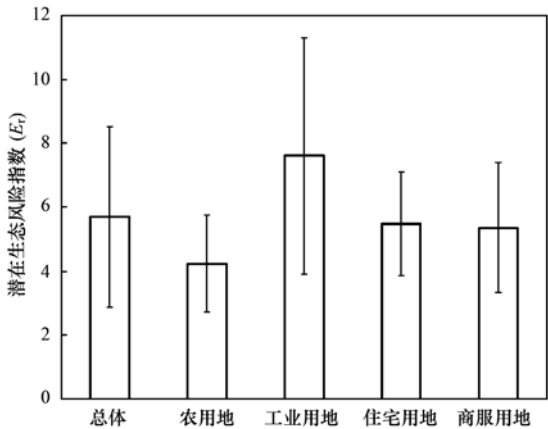


图5 不同用地类型表层土壤潜在生态风险评价

Fig. 5 Potential ecological risk index of heavy metals in different land use types

5.72,说明区域整体表现为轻微潜在生态风险. 4种用地类型地块表层土壤Sb的 E_r 值在4.23~7.61之间,其中农用地 E_r 平均值最低,农用地、住宅用地和商服用地均在轻微风险水平范围内;工业用地 E_r 平均值最高,潜在生态风险等级为中等.对比其他相关研究,广西都安县耕地土壤 E_r 值为6.16^[64];浙江江山市某果园土壤的 E_r 值为4.05^[65];安徽某燃烧电厂周边土壤的 E_r 值为5.96^[27];湖南某冶炼制造厂土壤 E_r 值为3.11^[66].住宅用地、商服用地和农用地土壤Sb含量和风险水平尚处于可接受的范围内,但工业用地,尤其是涉及汽修、金属加工制造、喷漆、印染和钢铁冶炼等行业时,其产生的潜在生态风险需引起高度重视.

2.4 土壤重金属Sb人体健康风险评估

根据人体健康风险评价模型,分别评估了住宅用地(敏感用地)、工业用地和商服用地(非敏感用地)表层土壤中基于总Sb的健康风险,结果如表5所示.不同用地类型土壤Sb的非致癌风险程度各异,但均未达到可接受的非致癌风险上限($HQ \leq 1$),即风险较小或可忽略.从关注人群来看,住宅用地土壤重金属Sb对儿童的非致癌风险大于成人,住宅用地土壤Sb对成人的非致癌风险高于工业用地和商服用地,其危害商分别是工业用地和商服用地的4.20倍和5.96倍.

综上所述,虽然住宅用地(敏感用地)土壤Sb含量和污染指数值较低,但其非致癌风险相对较高,且对于儿童来说更高,这与王世玉等^[67]、谢团辉等^[68]和李春芳等^[69]的研究结果相一致,因此,应该关注敏感用地人群(尤其是儿童)的健康风险.

表5 重金属Sb经口摄入暴露途径下的风险指数

Table 5 Hazard quotient of soil Sb under ingestion exposure

HQ	住宅用地		工业用地	商服用地
	儿童	成人	(成人)	(成人)
平均值	0.029 4	0.018 2	0.004 3	0.003 1
最小值	0.016 5	0.010 2	0.001 6	0.001 7
最大值	0.046 9	0.029 2	0.010 6	0.007 2

3 结论

(1)上海市土壤 ω (Sb)的平均值为0.52 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,随着土壤深度的增加,土壤Sb含量递减,表、中、深这3层的含量均值分别为0.62、0.5和0.37 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,表层土壤受到人类活动扰动,富集较明显;土壤Sb呈现较明显的空间聚集分布特征,在中心城区以及近郊地区土壤Sb含量较高,远郊含量普遍较低.

(2)4种用地类型地块中,土壤Sb含量从高到低依次为:工业用地、住宅用地、商服用地和农

地,工业用地表层土壤 ω (Sb)为0.82 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,超过上海市土壤环境背景值,呈现出明显的污染累积特征;其强变异性表明工业生产活动对表层土壤中的Sb有明显贡献,主要受到金属冶炼、油漆涂料、汽车制造等行业影响.农用地表层土壤 ω (Sb)最低为0.46 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,显著低于其他用地.

(3)基于单因子污染指数的生态风险评价结果显示,上海市土壤重金属Sb总体上处于尚清洁水平,但仍有15%的地块处于轻度污染水平,有2%的地块处于中度污染水平;从用地类型来看,工业用地的单因子污染指数为1.08,达到轻度污染水平.潜在生态风险评价结果表明,区域整体表现为轻微潜在生态风险,其中工业用地土壤Sb的潜在生态风险指数最高,存在中等潜在生态风险.

(4)基于人体健康风险评价模型的评价结果显示,整体上土壤Sb非致癌风险较小或可忽略.相较于工业用地和商服用地,住宅用地土壤Sb对人群(尤其是儿童)的非致癌风险相对较高.

参考文献:

[1] 谢天,侯鹰,陈卫平,等.城市化A对土壤生态环境的影响研究进展[J].生态学报,2019,39(4):1154-1164.
Xie T, Hou Y, Chen W P, et al. Impact of urbanization on the soil ecological environment: A review [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(4): 1154-1164.

[2] 何博,赵慧,王铁宇,等.典型城市化区域土壤重金属污染的空间特征与风险评价[J].环境科学,2019,40(6):2869-2876.
He B, Zhao H, Wang T Y, et al. Spatial distribution and risk assessment of heavy metals in soils from a typical urbanized area [J]. Environmental Science, 2019, 40(6): 2869-2876.

[3] Bi X Y, Zhang M H, Wu Y J, et al. Distribution patterns and sources of heavy metals in soils from an industry undeveloped city in Southern China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, 205, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.111115.

[4] 李小平,徐长林,刘献宇,等.宝鸡城市土壤重金属生物活性与环境风险[J].环境科学学报,2015,35(4):1241-1249.
Li X P, Xu C L, Liu X Y, et al. Bioactivity and environment risk of heavy metals in urban soil from Baoji City, P. R. China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(4): 1241-1249.

[5] Krachler M, Shotyck W, Emons H. Digestion procedures for the determination of antimony and arsenic in small amounts of peat samples by hydride generation-atomic absorption spectrometry [J]. Analytica Chimica Acta, 2001, 432(2): 303-310.

[6] 陈臻,吕文英.锑的环境毒理效应研究进展[J].广东化工,2014,41(10):78-79.
Chen Z, Lv W Y. Environmental toxicological effect of antimony: a review of recent researches [J]. Guangdong Chemical Industry, 2014, 41(10): 78-79.

[7] Bagherifam S, Brown T C, Fellows C M, et al. Derivation methods of soils, water and sediments toxicity guidelines: a brief review with a focus on antimony [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2019, 205, doi: 10.1016/j.gexplo.2019.106348.

[8] He M C, Wang N N, Long X J, et al. Antimony speciation in the environment: Recent advances in understanding the

- biogeochemical processes and ecological effects[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, **75**: 14-39.
- [9] 朱静, 郭建阳, 王立英, 等. 锑的环境地球化学研究进展概述[J]. *地球与环境*, 2010, **38**(1): 109-116.
- Zhu J, Guo J Y, Wang L Y, *et al.* Overview on research on environmentally geochemical characteristics of antimony [J]. *Earth and Environment*, 2010, **38**(1): 109-116.
- [10] Oorts K, Smolders E. Ecological threshold concentrations for antimony in water and soil[J]. *Environmental Chemistry*, 2009, **6**(2): 116-121.
- [11] Tighe M, Ashley P, Lockwood P, *et al.* Soil, water, and pasture enrichment of antimony and arsenic within a coastal floodplain system[J]. *Science of the Total Environment*, 2005, **347**(1-3): 175-186.
- [12] Leyva A G, Marrero J, Smichowski P, *et al.* Sorption of antimony onto hydroxyapatite [J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, **35**(18): 3669-3675.
- [13] Takahashi T, Shozugawa K, Matsuo M. Contribution of amorphous iron compounds to adsorptions of pentavalent antimony by soils[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2010, **208**(1-4): 165-172.
- [14] Cal-Prieto M J, Carlosena A, Andrade J M, *et al.* Antimony as a tracer of the anthropogenic influence on soils and estuarine sediments[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2001, **129**(1-4): 333-348.
- [15] Okkenhaug G, Amst tter K, Bue H L, *et al.* Antimony (Sb) contaminated shooting range soil: Sb mobility and immobilization by soil amendments[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(12): 6431-6439.
- [16] Tepanosyan G, Sahakyan L, Belyaeva O, *et al.* Continuous impact of mining activities on soil heavy metals levels and human health[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **639**: 900-909.
- [17] Kosheleva N E, Vlasov D V, Korlyakov I D, *et al.* Contamination of urban soils with heavy metals in Moscow as affected by building development [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **636**: 854-863.
- [18] He Y P, Han Z W, Wu F Z, *et al.* Spatial distribution and environmental risk of arsenic and antimony in soil around an antimony smelter of Qinglong county [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2021, **107**(6): 1043-1052.
- [19] Wang C R, Wan D J, Cao X Y, *et al.* Spatial distribution characteristic of antimony in typical paddy soil of eastern Hunan Province, China[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2021, **9**, doi: 10.3389/fenvs.2021.661148.
- [20] Dousova B, Lhotka M, Buzek F, *et al.* Environmental interaction of antimony and arsenic near busy traffic nodes[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **702**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134642.
- [21] 何孟常, 万红艳. 环境中锑的分布、存在形态及毒性和生物有效性[J]. *化学进展*, 2004, **16**(1): 131-135.
- He M C, Wan H Y. Distribution, speciation, toxicity and bioavailability of antimony in the environment[J]. *Progress in Chemistry*, 2004, **16**(1): 131-135.
- [22] Xue L, Ren H D, Li S, *et al.* Comparative proteomic analysis in *Miscanthus sinensis* exposed to antimony stress [J]. *Environmental Pollution*, 2015, **201**: 150-160.
- [23] 周建伟, 温冰, 周爱国, 等. 环境中锑污染及锑同位素示踪研究进展[J]. *自然杂志*, 2017, **39**(2): 120-130.
- Zhou J W, Wen B, Zhou A G, *et al.* Review of antimony pollution and antimony isotopic tracer in the environment[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2017, **39**(2): 120-130.
- [24] 王锐, 邓海, 贾中民, 等. 汞矿区周边土壤重金属空间分布特征、污染与生态风险评价[J]. *环境科学*, 2021, **42**(6): 3018-3027.
- Wang R, Deng H, Jia Z M, *et al.* Spatial distribution characteristics, pollution, and ecological risk assessment of soil heavy metals around mercury mining areas[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(6): 3018-3027.
- [25] 刘巍, 杨建军, 汪君, 等. 准东煤田露天矿区土壤重金属污染现状评价及来源分析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(5): 1938-1945.
- Liu W, Yang J J, Wang J, *et al.* Contamination assessment and sources analysis of soil heavy metals in opencast mine of east junggar basin in Xinjiang[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(5): 1938-1945.
- [26] 张永慧, 麻冰涓, 张东, 等. 南太行山山前平原工业园区土壤重金属污染特征及来源[J]. *环境化学*, 2017, **36**(8): 1821-1830.
- Zhang Y H, Ma B J, Zhang D, *et al.* Contamination and sources of heavy metals in the soils of industrial cluster in piedmont plain of south Taihang mountain[J]. *Environmental Chemistry*, 2017, **36**(8): 1821-1830.
- [27] 吕占禄, 张金良, 张晗, 等. 生物质能电厂周边土壤中重金属元素污染特征及评价[J]. *环境化学*, 2020, **39**(12): 3480-3494.
- Ly Z L, Zhang J L, Zhang H, *et al.* Pollution characteristics and evaluation of heavy metal pollution in surface soil around the biomass power plant[J]. *Environmental Chemistry*, 2020, **39**(12): 3480-3494.
- [28] 周艳, 陈楷, 邓绍坡, 等. 西南某铅锌矿区农田土壤重金属空间主成分分析及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2018, **39**(6): 2884-2892.
- Zhou Y, Chen Q, Deng S P, *et al.* Principal component analysis and ecological risk assessment of heavy metals in farmland soils around a Pb-Zn mine in southwestern China[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(6): 2884-2892.
- [29] 吴劲楠, 龙健, 刘灵飞, 等. 某铅锌矿区农田重金属分布特征及其风险评价[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(3): 1054-1063.
- Wu J N, Long J, Liu L F, *et al.* Spatial distribution and risk assessment of heavy metal pollution in farmland soil of a lead-zinc mining area[J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(3): 1054-1063.
- [30] 李航彬, 杨志辉, 袁平夫, 等. 湘中锑矿区土壤重金属锑的污染特征[J]. *环境科学与技术*, 2011, **34**(1): 70-74, 127.
- Li H B, Yang Z H, Yuan P F, *et al.* Characteristics of antimony pollution in soils at mining areas in central Hunan Province[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **34**(1): 70-74, 127.
- [31] 袁程, 张红振, 池婷, 等. 中南某锑矿及其周边农田土壤与植物重金属污染研究[J]. *土壤*, 2015, **47**(5): 960-964.
- Yuan C, Zhang H Z, Chi T, *et al.* Heavy metal and metalloid pollution of soils and plants in typical antimony mining area of Central-South China[J]. *Soils*, 2015, **47**(5): 960-964.
- [32] Chai L, Wang Y H, Wang X, *et al.* Pollution characteristics, spatial distributions, and source apportionment of heavy metals in cultivated soil in Lanzhou, China[J]. *Ecological Indicators*, 2021, **125**, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.107507.
- [33] 宁增平, 肖青相, 蓝小龙, 等. 都柳江水系沉积物锑等重金属空间分布特征及生态风险[J]. *环境科学*, 2017, **38**(7):

- 2784-2792.
- Ning Z P, Xiao Q X, Lan X L, *et al.* Spatial distribution characteristics and potential ecological risk of antimony and selected heavy metals in sediments of Duliujiang river [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(7): 2784-2792.
- [34] 熊佳, 韩志伟, 吴攀, 等. 独山锑冶炼厂周边土壤锑砷空间分布特征、污染评价及健康风险评估[J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(2): 655-664.
- Xiong J, Han Z W, Wu P, *et al.* Spatial distribution characteristics, contamination evaluation and health risk assessment of arsenic and antimony in soil around an antimony smelter of Dushan county [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(2): 655-664.
- [35] 姚冬菊, 刘恩光, 宁增平, 等. 贵州某锑冶炼厂周边农田土壤锑、砷污染与人体健康风险评估[J]. *地球与环境*, 2021, **49**(6): 673-683.
- Yao D J, Liu E G, Ning Z P, *et al.* Contamination and human health risks of Sb and As in farmland soils around a typical antimony smelter in Guizhou, China [J]. *Earth and Environment*, 2021, **49**(6): 673-683.
- [36] He M C, Wang X Q, Wu F C, *et al.* Antimony pollution in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **421-422**: 41-50.
- [37] 陈敏, 万华, 徐爱兰. 长江口地区饮用水源地有毒有害污染状况分析与评价[J]. *南通大学学报(自然科学版)*, 2011, **10**(2): 41-47.
- Chen M, Wan H, Xu A L. Analyse and evaluation on situation of the toxic and harmful pollution of drinking water source in Changjiang river estuary area[J]. *Journal of Nantong University (Natural Science Edition)*, 2011, **10**(2): 41-47.
- [38] 张爱国, 魏兴萍. 西南典型岩溶槽谷土壤重金属污染与来源解析[J]. *环境科学与技术*, 2020, **43**(12): 166-176.
- Zhang A G, Wei X P. Pollution and source analysis of heavy metals in soils of typical karst troughs in Southwestern China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, **43**(12): 166-176.
- [39] 周伟, 李丽丽, 周旭, 等. 基于地理探测器的土壤重金属影响因子分析及其污染风险评价[J]. *生态环境学报*, 2021, **30**(1): 173-180.
- Zhou W, Li L L, Zhou X, *et al.* Influence factor analysis of soil heavy metal based on geographic detector and its pollution risk assessment[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, **30**(1): 173-180.
- [40] 王云, 汪雅谷, 罗海林, 等. 上海市土壤环境背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992.
- [41] Håkanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [42] Qin J Q, Huang X P. Heavy metal pollution and ecological risk assessment in sediments of Xiling channel inland waterway of Guangdong Province[J]. *Asian Agricultural Research*, 2019, **11**(6): 40-46, 49.
- [43] 邓海, 王锐, 严明书, 等. 矿区周边农田土壤重金属污染风险评价[J]. *环境化学*, 2021, **40**(4): 1127-1137.
- Deng H, Wang R, Yan M S, *et al.* Risk assessment of heavy metal pollution in farmland soil around mining area [J]. *Environmental Chemistry*, 2021, **40**(4): 1127-1137.
- [44] Wang N N, Wang A H, Kong L H, *et al.* Calculation and application of Sb toxicity coefficient for potential ecological risk assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **610-611**: 167-174.
- [45] Yao C, Jiang X, Che F F, *et al.* Antimony speciation and potential ecological risk of metal(loid)s in plain wetlands in the lower Yangtze River valley, China [J]. *Chemosphere*, 2019, **218**: 1114-1121.
- [46] 李一蒙, 马建华, 刘德新, 等. 开封城市土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 2015, **36**(3): 1037-1044.
- Li Y M, Ma J H, Liu D X, *et al.* Assessment of heavy metal pollution and potential ecological risks of urban soils in Kaifeng City, China[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(3): 1037-1044.
- [47] 汤国安, 杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [48] 王劲峰, 廖一兰, 刘鑫. 空间数据分析教程[M]. (第二版). 北京: 科学出版社, 2019.
- [49] 姜昱聪, 贾晓洋, 夏天翔, 等. 起爆药污染场地土壤中锑的环境风险评估[J]. *环境科学研究*, 2020, **33**(2): 485-493.
- Jiang Y C, Jia X Y, Xia T X, *et al.* Environmental risk assessment of antimony in contaminated soil by primary explosives [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(2): 485-493.
- [50] Gebel T. Arsenic and antimony: comparative approach on mechanistic toxicology [J]. *Chemico-Biological Interactions*, 1997, **107**(3): 131-144.
- [51] Liang Y H, Liu Q C, Li Y K, *et al.* Speciation analysis and ecological risk assessment of antimony in Xikuangshan, Hunan province[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2021, **30**(2): 1289-1296.
- [52] 郎春燕, 王登菊, 黄军. 成都燃煤电厂周围土壤中砷、锑、铅、锌分布特征及污染评价[J]. *环境化学*, 2011, **30**(8): 1439-1444.
- Lang C Y, Wang D J, Huang J. Distribution characteristics and pollution evaluation of As, Sb, Pb and Zn in soil around the coal-fired power plant in Chengdu [J]. *Environmental Chemistry*, 2011, **30**(8): 1439-1444.
- [53] 管孝艳, 王少丽, 高占义, 等. 盐渍化灌区土壤盐分的时空变异特征及其与地下水埋深的关系[J]. *生态学报*, 2012, **32**(4): 1202-1210.
- Guan X Y, Wang S L, Gao Z Y, *et al.* Spatio-temporal variability of soil salinity and its relationship with the depth to groundwater in salinization irrigation district [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(4): 1202-1210.
- [54] 国土资源部中国地质调查局. 中华人民共和国多目标区域地球化学图集 上海市及近岸海域[M]. 北京: 地质出版社, 2016.
- [55] Lee W K, Rhee T H, Kim H S, *et al.* Effects of antimony trisulfide (Sb₂S₃) on sliding friction of automotive brake friction materials[J]. *Metals and Materials International*, 2013, **19**(5): 1101-1107.
- [56] Rakshit S, Sarkar D, Punamiya P, *et al.* Antimony sorption at gibbsite-water interface[J]. *Chemosphere*, 2011, **84**(4): 480-483.
- [57] Varrica D, Bardelli F, Dongarrà G, *et al.* Speciation of Sb in airborne particulate matter, vehicle brake linings, and brake pad wear residues[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **64**: 18-24.
- [58] Lin Q, Liu E F, Zhang E L, *et al.* Reconstruction of atmospheric trace metals pollution in southwest China using sediments from a large and deep alpine lake: Historical trends, sources and sediment focusing [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **613-614**: 331-341.
- [59] Smichowski P. Antimony in the environment as a global

- pollutant: a review on analytical methodologies for its determination in atmospheric aerosols[J]. *Talanta*, 2008, **75** (1): 2-14.
- [60] Turner A, Filella M. Antimony in paints and enamels of everyday items[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **713**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.136588.
- [61] Mamta, Singh Y, Maurya K K, *et al.* A review on properties, applications, and deposition techniques of antimony selenide[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2021, **230**, doi: 10.1016/j.solmat.2021.111223.
- [62] Iijima A, Sato K, Yano K, *et al.* Emission factor for antimony in brake abrasion dusts as one of the major atmospheric antimony sources[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42** (8): 2937-2942.
- [63] 林晓峰. 泉州市城市表层土壤重金属污染评价研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2011.
Lin X F. Assessment of heavy metal pollution in the urban topsoil of Quanzhou city[D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2011.
- [64] 吴洋, 杨军, 周小勇, 等. 广西都安县耕地土壤重金属污染风险评价[J]. *环境科学*, 2015, **36**(8): 2964-2971.
Wu Y, Yang J, Zhou X Y, *et al.* Risk assessment of heavy metal contamination in farmland soil in Du'an autonomous county of Guangxi zhuang autonomous region, China[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(8): 2964-2971.
- [65] 贺灵, 孙彬彬, 吴超, 等. 浙江省江山市猕猴桃果园土壤环境质量与生态风险评价[J]. *岩矿测试*, 2019, **38**(5): 524-533.
He L, Sun B B, Wu C, *et al.* Assessment of soil environment quality and ecological risk for kiwifruit orchards in Jiangshan city, Zhejiang Province[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2019, **38**(5): 524-533.
- [66] 周向红, 王平山, 王定华, 等. 冶炼制造企业土壤重金属含量变化及其污染风险评价[J]. *安徽农业科学*, 2019, **47** (1): 60-63, 82.
Zhou X H, Wang P S, Wang D H, *et al.* Heavy metal content change and pollution risk assessment of soil in smelting and manufacturing enterprise[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2019, **47**(1): 60-63, 82.
- [67] 王世玉, 吴文勇, 刘菲, 等. 典型污灌区土壤与作物中重金属健康风险评估[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(4): 1550-1560.
Wang S Y, Wu W Y, Liu F, *et al.* Assessment of human health risks of heavy metals in the typical sewage irrigation areas[J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(4): 1550-1560.
- [68] 谢团辉, 郭京霞, 陈炎辉, 等. 福建省某矿区周边土壤-农作物重金属空间变异特征与健康风险评价[J]. *农业环境科学学报*, 2019, **38**(3): 544-554.
Xie T H, Guo J X, Chen Y H, *et al.* Spatial variability and health risk assessment of heavy metals in soils and crops around the mining area in Fujian Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38**(3): 544-554.
- [69] 李春芳, 曹见飞, 吕建树, 等. 不同土地利用类型土壤重金属生态风险与人体健康风险[J]. *环境科学*, 2018, **39**(12): 5628-5638.
Li C F, Cao J F, Lv J S, *et al.* Ecological risk assessment of soil heavy metals for different types of land use and evaluation of human health[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(12): 5628-5638.

CONTENTS

Temporal and Spatial Variation Characteristics of Heavy Metal in Atmospheric Deposition in China from 2000 to 2018	CHEN Qi-yong, GAO Yun-bing, NI Run-xiang, <i>et al.</i> (4413)
Simulation of PM _{2.5} Concentration Based on Optimized Indexes of 2D/3D Urban Form	LI Sha, ZOU Bin, LIU Ning, <i>et al.</i> (4425)
Characteristics of Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Chengdu Under the Background of Emission Reduction	CHEN Lu-yao, YU Yang-chun, HUANG Xiao-juan, <i>et al.</i> (4438)
Characteristics and Health Risk Assessment of Trace Elements in Atmospheric PM ₁ During Autumn and Winter in Qingdao	LIU Zi-yang, ZHANG Yi-sheng, ZHANG Hou-yong, <i>et al.</i> (4448)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric PM _{2.5} -bound Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Port Area	WANG Peng-cheng, YANG Ling-xiao, BIE Shu-jun, <i>et al.</i> (4458)
Size Distribution and Source Apportionment of Road Particles During Winter in Tianjin	ZHANG Guo-tao, YIN Bao-hui, BAI Wen-yu, <i>et al.</i> (4467)
Characteristics and Impact Factors of Number Concentration of Primary Biological Aerosol Particles in Beijing	LIANG Lin-lin, LIU Chang, LIU Xu-yan, <i>et al.</i> (4475)
Characteristic Analysis and Source Apportionment of VOCs in Urban Areas of Beijing in Summer	MENG Xiang-lai, SUN Yang, LIAO Ting-ting, <i>et al.</i> (4484)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in a Typical Industrial Area in Dongguan During Periods of Ozone and Non-ozone Pollution in Summer	ZHOU Zhen, XIAO Lin-hai, FEI Lei-lei, <i>et al.</i> (4497)
Temporal and Spatial Variation in Odor Pollution and Membrane Barrier Effect in Municipal Solid Waste Landfill	HE Pin-jing, LI Jian-chen, LÜ Fan, <i>et al.</i> (4506)
Comparison of Health Risk from Sources of Perfluoroalkyl Substances in Taihu Lake for Different Years	WU Ting, SUN Shan-wei, FAN Jing-pu, <i>et al.</i> (4513)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Typical and Emerging Per- and Polyfluoroalkylated Substances in Tuojiang River Basin	SONG Jiao-jiao, WANG Yi-mei, SUN Jing, <i>et al.</i> (4522)
Speciation and Risk of Heavy Metals in Surface Sediments of Different Types of Water Bodies in Baiyangdian Lake	XU Meng-ya, ZHANG Chao, SHAN Bao-qing, <i>et al.</i> (4532)
Distribution Coefficient of QNs in Urban Typical Water and Its Main Environmental Influencing Factors	JU Ze-jia, FU Yu, ZHAO Xin-yu, <i>et al.</i> (4543)
Ecological Risk Assessment of Quinolones Antibiotics and the Correlation Analysis Between QNs and Physical-Chemical Parameters in Groundwater, Shijiazhuang City	CHEN Hui, JU Ze-jia, ZHAO Xin-yu, <i>et al.</i> (4556)
Characteristics and Sources of DOM in Lake Sediments Under Different Inundation Environments	CHEN Jia, LI Zhong-wu, JIN Chang-sheng, <i>et al.</i> (4566)
Characteristics of Phytoplankton Community Structure and Their Relationships with Environmental Factors in Autumn in Qinhe River Basin of Jincheng Region	GAO Meng-die, LI Yan-fen, LI Yan-li, <i>et al.</i> (4576)
Integrated Assessment of Runoff Quality from Green Roofs with Different Configurations	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, YAN Jing, <i>et al.</i> (4587)
Degradation of Chloroquine Phosphate by UV-activated Persulfate	LI Yang, XU Bo-hui, DENG Lin, <i>et al.</i> (4597)
Removal Performance of Suspended Solid (SS) and Organic Compounds in the Pre-treatment of Actual Pharmaceutical Wastewater by Microbubble Ozonation	LIU Chun, CHEN Rui, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (4608)
Effects of Wastewater Discharge on Antibiotic Resistance Genes and Microbial Community in a Coastal Area	CHEN Jia-yu, SU Zhi-guo, YAO Peng-cheng, <i>et al.</i> (4616)
Effects of Biochar and Straw Returning on Soil Fungal Community Structure Diversity in Cotton Field with Long-term Brackish Water Irrigation	GUO Xiao-wen, CHEN Jing, LU Xiao-yu, <i>et al.</i> (4625)
Effects of Organic Materials on Phosphorus Fractions and <i>phoD</i> -harboring Bacterial Community in Karst Soil	XIA Xin, QIAO Hang, SUN Qi, <i>et al.</i> (4636)
Effects of Different Vegetation Types on Soil Microbial Functional Genes and Enzyme Activities in Reclaimed Coal Mine	NING Yue-wei, LIU Yong, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (4647)
Effects of Biochar Application on Yellow Soil Nutrients and Enzyme Activities	YUAN Fang, LI Kai-yu, YANG Hui, <i>et al.</i> (4655)
Changes in Soil Bacterial Community Diversity in Degraded Patches of Alpine Meadow in the Source Area of the Yellow River	SUN Hua-fang, LI Xi-lai, JIN Li-qun, <i>et al.</i> (4662)
Effects of Simulated Nitrogen Deposition on Soil Microbial Carbon Metabolism in <i>Calamagrostis angustifolia</i> Wetland in Sanjiang Plain	WENG Xiao-hong, SUI Xin, LI Meng-sha, <i>et al.</i> (4674)
Spatial Distribution of Quinolone Antibiotics and Its Correlation Relationship with Microbial Community in Soil of Shijiazhuang City	ZHAO Xin-yu, JU Ze-jia, CHEN Hui, <i>et al.</i> (4684)
Composition Characteristics and Construction Mechanism of Microbial Community on Microplastic Surface in Typical Redox Environments	GONG Zhi-wei, MA Jie, SU Qu, <i>et al.</i> (4697)
Annual Nitrogen Removal Efficiency and Change in Abundance of Nitrogen Cycling Microorganisms in Swine Wastewater Treated by Crop Straw Materials	LIU Ming-yu, XIA Meng-hua, JIANG Lei, <i>et al.</i> (4706)
Effects of External Carbon Sources on Ultimate Nitrogen Removal Performance and Microbial Community in Secondary Effluent Treating Process	WANG Wei, ZHAO Zhong-yuan, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4717)
Microbial Community Structure of Activated Sludge for Total Nitrogen Upgrading Project	LI Hai-song, WANG Ke-dan, CHEN Xiao-lei, <i>et al.</i> (4727)
Analysis of Microbial Interaction Law of Mud Membrane in IFAS Process for Treating Low Carbon Source Sewage in South China	HE Jun-guo, JIANG Wei-xun, HE Zhuo-yi, <i>et al.</i> (4736)
Abundances and Morphology Patterns of Microplastics Under Different Land Use Types on the Loess Plateau	HAO Yong-li, HU Ya-xian, BAI Xiao-xiong, <i>et al.</i> (4748)
Evaluation of Heavy Metal Content, Sources, and Potential Ecological Risk in Soils of Southern Hilly Areas	WANG Yu, XIN Cun-lin, YU Shi, <i>et al.</i> (4756)
Risk Assessment and Attribution Analysis of "Five Toxic" Heavy Metals in Cultivated Land in Lanzhou	ZHANG Li-rui, PENG Xin-bo, MA Yan-long, <i>et al.</i> (4767)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils and Crops in Luancheng, Shijiazhuang City	MENG Xiao-fei, GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (4779)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Antimony in Typical Urban Soil	SHEN Cheng, YE Wen-juan, QIAN Shi-ying, <i>et al.</i> (4791)
Contamination Assessment and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Typical Villages and Towns in a Nonferrous Metal Mining City	WANG Feng, HUANG Yan-huan, LI Ru-zhong, <i>et al.</i> (4800)
Effect of Citric Acid and Mowing on Enhancing the Remediation of Cadmium Contaminated Soil by Napier Grass (<i>Pennisetum purpureum</i> Schum)	TANG Qi, WU Gang-fan, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (4810)
Arsenic Methylation Efficiency Changes During Paddy Soil Drying and Its Key Influencing Factors Analysis	ZHANG Yue, LI Ling-yi, WEN Jiong, <i>et al.</i> (4820)
Effects of Exogenous Jasmonic Acid on Arsenic Accumulation and Response to Stress in Roots of Rice Seedlings	LI Yan, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i> (4831)
Effects of Straw Returning and Fertilizer Application on Soil Nutrients and Winter Wheat Yield	SONG Jia-jie, XU Xi-yang, BAI Jin-ze, <i>et al.</i> (4839)
Effect of Winter Cover Cropping on Soil Greenhouse Gas Emissions in a Dryland Spring Maize Field on the Loess Plateau of China	ZHANG Shao-hong, WANG Jun, FANG Zhen-wen, <i>et al.</i> (4848)
Detection of Influencing Factors of Spatial Variability of Soil Respiration in Pangqiangou Nature Reserve	LI Xiao-min, YAN Jun-xia, DU Zi-qiang, <i>et al.</i> (4858)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of Methane, Carbon Dioxide, and Nitrous Oxide Concentrations and the Influencing Factors in Small Aquaculture Pond	SHI Jie, ZHANG Mi, QIU Ji-li, <i>et al.</i> (4867)
Effect of Butyl Xanthate on Pb ²⁺ and Cd ²⁺ Adsorption by Soil Around a Dressing Plant	HU Zhi-hao, GUO Zhao-hui, RAN Hong-zhen, <i>et al.</i> (4878)
Sorption Mechanism and Site Energy Distribution of Acetaminophen on Straw-derived Biochar	SHANG Cen-yao, GU Ruo-ting, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (4888)
Spatial-temporal Variations and Their Driving Forces of the Ecological Vulnerability in the Loess Plateau	ZHANG Liang-xia, FAN Jiang-wen, ZHANG Hai-yan, <i>et al.</i> (4902)
Mechanism and Application of Plant Growth-Promoting Bacteria in Heavy Metal Bioremediation	MA Ying, WANG Yue, SHI Xiao-jun, <i>et al.</i> (4911)