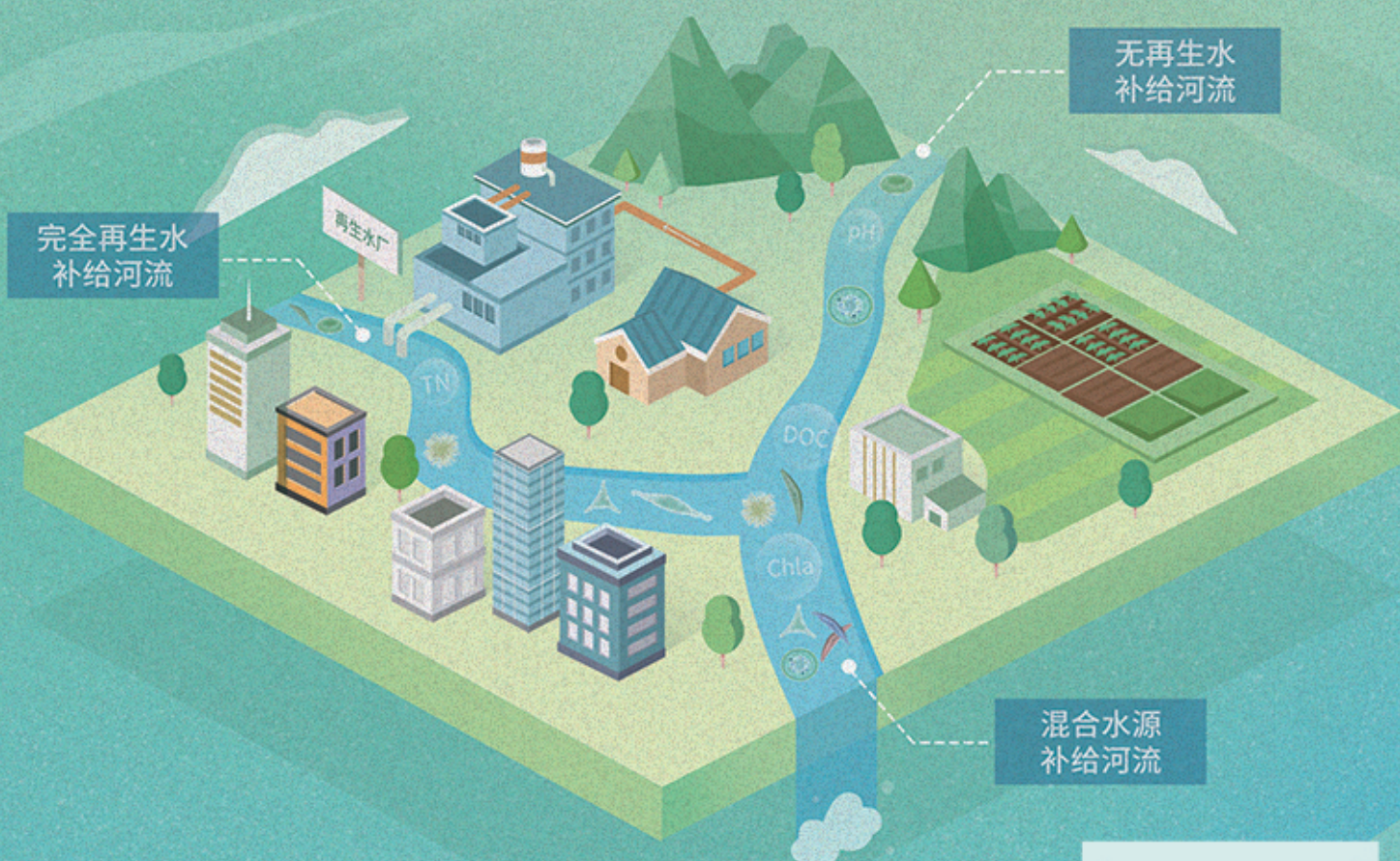


不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系

侯颖, 李信, 白灵, 白乙娟, 张淑荣, 王圣瑞, 郑蕾, 丁爱中



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年12月

第43卷 第12期

Vol.43 No.12

目次(卷终)

关中平原城市群 PM _{2.5} 时空演变格局及其影响因素	张军, 金梓函, 王玥, 李旭, 戴恩华 (5333)
中原城市群 PM _{2.5} 浓度驱动因子联动效应及非线性影响	周志衡, 周廷刚, 秦宁 (5344)
长株潭城市群 PM _{2.5} 和 O ₃ 浓度时空分布特征及影响因素分析	刘贤赵, 张国桥, 杨文涛, 吴业荣, 李朝奎, 任毅 (5354)
张掖市城区大气细颗粒物 PM _{2.5} 的化学组成及来源解析	潘成珂, 黄韬, 高宏, 常莉敏, 宋世杰, 毛潇萱, 王佳欣, 赵渊, 马建民 (5367)
2018~2019年冬季天津和青岛 PM _{2.5} 中重金属污染特征与健康风险评估	赵明升, 任丽红, 李刚, 刘亚妮, 赵刚, 张佳浩, 高元官, 杨小阳 (5376)
青岛大气降水中金属浓度、溶解度及其来源解析	孔令冬, 祁建华, 张旭 (5387)
2015~2021年陕西关中城市群臭氧污染变化趋势	赵伟, 王硕, 庞晓蝶, 高博, 卢清, 刘明, 陈来国, 范绍佳 (5399)
海南省背景区域臭氧及其前体物污染特征	谢文晶, 邢巧, 谢东海, 吴晓晨, 胡珊珊, 徐文帅 (5407)
基于双维度校验的珠三角区域臭氧生成机制长期时空演化特征识别	杨雷峰, 谢丹平, 杨俊, 韩静磊, 刘丽君, 袁自冰 (5421)
郑州市夏季大气 VOCs 污染特征及来源解析	齐一谨, 王玲玲, 倪经纬, 何海洋, 赵东旭, 龚山陵 (5429)
兰州市夏季挥发性有机物污染特征及来源解析	杨燕萍, 陈强, 孟宪红, 孙健, 王莉娜, 陶会杰, 杨丽丽 (5442)
地下停车场 VOCs 污染特征与健康风险评估	刘妍, 杨宁, 孙露娜, 吴亚君, 宋鹏飞, 赵耀, 姜昆, 毛洪钧 (5453)
缸内直喷汽油车颗粒物化学组分特征	李家琛, 葛蕴珊, 王浩浩, 王欣, 郝利君, 谭建伟 (5464)
废弃物焚烧处理温室气体排放情景模拟与预测	严薇, 刘舒乐, 吴正方, 高庆先, 杜海波, 马占云, 冯鹏 (5470)
长江颗粒(类)金属元素分布、来源和向海输送	刘珈铭, 吴文涛, 刘笑天, 刘军, 王昊, 臧家业, 张爱周, 冉祥滨 (5478)
澜沧江水系氮磷污染及硝酸盐来源解析	郭树芳, 陈安强, 刁斌, 居学海, 黄宏坤, 刘建香, 毛妍婷, 郭云周, 雷宝坤 (5491)
小浪底水库水沙调控期滨河湿地地下水与河水转化关系	肖春艳, 刘怡凡, 赵同谦, 郭晓明, 陈飞宏, 杨晨 (5499)
磨刀门水道输水水库群饮用水水源水质的时空变化	张坤峰, 昌盛, 张琦, 王思瑞, 谢琼, 张茉莉, 樊月婷, 杨光, 付青 (5509)
疫情背景下长江中游地区典型饮用水源中 PPCPs 分布特征与风险评估	樊月婷, 昌盛, 张坤峰, 涂响, 杨光, 王山军, 张茉莉, 谢琼, 付青 (5522)
北江中上游地表水和沉积物中 PAHs 和 PCBs 污染特征和风险评估	昌盛, 白云松, 涂响, 付青, 张坤峰, 潘杨, 王山军, 杨光, 汪星 (5534)
平朔矿区不同水体水化学特征及氟分布成因	孙龙, 刘廷玺, 段利民, 张文瑞, 郑国峰 (5547)
三峡水库典型消落带土壤 DOM 组分特征及其对有效态镉释放影响	张宝豪, 武亚遵, 徐东昱, 高丽, 李艳艳, 王启文, 高博 (5560)
不同溶解氧条件下沉积物-水体系磷循环	刘笑天, 刘军, 王以斌, 刘珈铭, 吴文涛, 冯耀, 臧家业, 冉祥滨 (5571)
2011~2019年鄱阳湖水质演化特征及主要污染因子解析	谢慧钰, 胡梅, 嵇晓燕, 曹炳伟, 贾世琪, 徐建, 金小伟 (5585)
乌梁素海表层沉积物中营养盐和重金属分布特征以及风险评价	杜彩丽, 黎佳茜, 李国文, 李晓光, 赵琛, 张列宇 (5598)
生物炭吸附雨水径流难生物降解有机氮效能及机制	苏增辉, 孙萍, 陈友媛, 罗冠杨, 王秀海, 郑天元 (5608)
不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系	侯颖, 李信, 白灵, 白乙娟, 张淑荣, 王圣瑞, 郑蕾, 丁爱中 (5616)
锰氧化物改性生物炭基质材料对典型喹诺酮类抗生素的吸附及其在人工湿地的应用	高惠子, 田伟君, 张子钰, 邹梦圆, 杨淑洁, 赵婧, 储美乐, 江俊峰 (5627)
KOH 活化小麦秸秆生物炭对废水中四环素的高效去除	徐晋, 马一凡, 姚国庆, 张宇珊, 杨李琪, 周娜, 范世锁 (5635)
改性凹凸棒负载硫化亚铁的制备及其对水中 Mo(VI)的吸附机制	练建军, 郭洪艳, 叶天然, 孔巧平, 徐晴, 吴朝阳, 陈波, 牛司平 (5647)
桉树生物炭负载绿色合成纳米零价铁去除水中 Cr(VI)	刘沁文, 丁爱中, 梁信, 谢领辉, 鄢俊彬, 李娜 (5657)
镁改性硅藻土回收废水氮磷产物对水中 Pb ²⁺ 和 Zn ²⁺ 的去除	吴盈秋, 夏鹏, 李远, 王学江 (5667)
钠化改性河南南部膨润土吸附亚甲基蓝性能分析	程飞鹏, 杨冬亮, 常乐, 吴登峰 (5676)
上海市典型工业用地土壤和地下水重金属复合污染特征及生态风险评价	李晓曼, 李青青, 杨洁, 黄沈发, 张施阳, 吉敏 (5687)
重庆市煤矸山周边农用地土壤重金属污染评价和定量溯源解析	马杰, 刘萍, 刘今朝, 郭春会, 张秀, 王玲灵 (5698)
典型石油场地周边土壤重金属形态特征及源解析	官健, 何连生, 李强, 王耀锋, 曹莹, 刘晓雪, 高存富 (5710)
基于 PMF 模型的垃圾焚烧厂周边农田土壤重金属源解析	张恬雨, 胡恭任, 于瑞莲, 林承奇, 黄华斌 (5718)
香河县农田土壤重金属污染生态与健康风险评估	陈瑜佳, 屈星辰, 张斌, 李现涛, 朱国平, 查同刚 (5728)
地质构造单元交接带表土中重金属污染特征对比及源解析:以重庆城口地区为例	刘永林, 吴梅, 刘睿, 李军, 倪润祥, 刘双燕, 田兴磊, 赵家宇, 刘怡, 夏传波 (5742)
新疆典型地区植物和土壤多环芳烃污染特征、来源解析及健康风险评估	杨北辰, 解启来, 郑芊, 郑晓波, 叶金明, 唐成金, 梁晓晖 (5751)
肥料调控强化象草对重度 Cd 污染农田修复效果	伍港繁, 周航, 唐棋, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (5761)
微碱性土壤施用烟秆生物炭与磷酸盐降低小麦籽粒镉积累	杨艳征, 张银鸽, 李畅, 扶海超, 秦世玉, 王龙, 刘亥扬, 刘红恩, 睢福庆, 赵鹏 (5769)
产多胺细菌提高小麦 Cd 抗性和消减 Cd 吸收机制	姬明飞, 吴雪姣, 李晓哲, 陈兆进, 姚伦广, 张君, 庞发虎, 韩群 (5778)
硫酸盐还原菌对碱性和酸性农田土壤中重金属的钝化效果及其作用机制	高羽, 刘雨辰, 郭晓方, 吉莉, 张桂香, 张哲海, 夏红丽, 何文峰, 张博远 (5789)
巨大芽孢杆菌对土壤理化性质及植物富集镉的影响	王萍, 李一曼, 王雪佳, 许亚琼, 张书强, 李倩, 徐凯莉, 李荣华, 张增强 (5798)
嘉陵江滨岸带不同土地利用类型土壤真菌群落结构与功能多样性	竹兰萍, 徐飞, 王佳颖, 朱智豪, 张拓, 张富斌 (5808)
添加生物炭对琼北地区双季稻田生物固氮的影响	赵炎, 袁新生, 唐瑞杰, 邵晓辉, 李凯凯, 文昌丽, 陈琦琦, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (5819)
基于g-C ₃ N ₄ 研究环境中甲氧苄啶的光降解行为及其毒性	朱娜, 王星阳, 焦俊恒, 王磊, 梁栋, 李广科, 桑楠 (5832)
“双碳”目标下中国省域碳排放核算分析	杨柏, 秦广鹏, 郭钦 (5840)
长株潭城市群地类转移的碳传导效应与预测	杨旭, 刘贤赵 (5850)
基于分类的张家港市生活垃圾典型处置情景环境效益分析	张涛, 郑钧文, 孙煜豪, 白冬锐, 杨婷, 张冰, 郭含文, 陈坦, 王洪涛 (5861)
《环境科学》第43卷(2022年)总目录	(5873)
《环境科学》征订启事(5386) 《环境科学》征稿简则(5521) 信息(5607,5741,5768)	

上海市典型工业用地土壤和地下水重金属复合污染特征及生态风险评价

李晓曼, 李青青*, 杨洁, 黄沈发, 张施阳, 吉敏

(上海市环境科学研究院, 国家环境保护城市土壤污染控制与修复工程技术中心, 上海 200233)

摘要: 针对上海市3类典型工业用地(化工、金属加工和危废治理)土壤和地下水中有毒有害6种重金属(As、Cd、Cr、Pb、Hg和Ni)的污染程度、分布特征和生态风险效应开展了分析和评价。结果表明,3类工业用地30个潜在污染区域土壤和地下水均受到重金属污染,Cd、Cr、Pb、Hg和Ni在表层土壤中存在明显累积,As、Cr、Pb和Ni在地下水中存在明显累积,土壤中重金属含量和变异系数随着垂直深度的加深而逐渐降低,表明受人类活动扰动影响趋小。不同重金属污染来源不同,土壤中Cr和Hg主要来源于金属加工和危废治理业,Cd、Pb和Ni在3个行业土壤中均有累积;地下水中As主要来源于化工和危废治理行业,Cr主要来源于金属加工行业,Ni主要来源于金属加工和危废治理行业,Pb在3个行业地下水中均有累积。金属加工行业土壤和地下水内梅罗综合污染指数最高,重金属Cr、Pb和Ni存在明显的水土复合污染现象,可能与土壤重金属含量、迁移性和企业管理水平有密切关系。土壤和地下水重金属潜在生态风险处于轻度~中度范围,土壤中重金属Hg和Cd的潜在生态风险水平较高,主要受重金属毒性影响,地下水中重金属Ni的潜在生态风险水平较高,主要受重金属含量影响。

关键词: 工业用地; 土壤; 地下水; 重金属; 复合污染; 生态风险评价

中图分类号: X52; X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)12-5687-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202202127

Compound Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Groundwater of Typical Industrial Lands in Shanghai

LI Xiao-man, LI Qing-qing*, YANG Jie, HUANG Shen-fa, ZHANG Shi-yang, JI Min

(State Environmental Protection Engineering Center for Urban Soil Contamination Control and Remediation, Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China)

Abstract: The pollution degree, distribution characteristics, and synergistic ecological risk of heavy metals were studied by analyzing the contents of As, Cd, Cr, Pb, Hg, and Ni values in soil and groundwater of three types of typical industrial land (chemical industry, metal processing, and hazardous waste treatment) in Shanghai. The results showed that the soil and groundwater in 30 potential pollution areas of the three types of industrial land were polluted by heavy metals. Cd, Cr, Pb, Hg, and Ni were obviously accumulated in the surface soil, whereas As, Cr, Pb, and Ni were accumulated in the groundwater. The content and variation coefficients of heavy metals in the soil gradually decreased with the deepening of vertical depth, indicating that the impact of human activities was lessened. The pollution sources of the various heavy metals were different; Cr and Hg in the soil were mainly from metal processing and the hazardous waste treatment industry, whereas Cd, Pb, and Ni were accumulated in the soil of all three industries. In groundwater, As mainly came from the chemical industry and hazardous waste treatment industry, Cr mainly came from the metal processing industry, Ni mainly came from metal processing and the hazardous waste treatment industry, and Pb accumulated in groundwater of all three industries. The Nemero comprehensive pollution index of the soil and groundwater in the metal processing industry was the highest. Cr, Pb, and Ni in the metal processing industry had synergistic pollution characteristics in soil and groundwater, which may have been closely related to soil heavy metal content, migration, and enterprise management level. The potential ecological risk of heavy metals in soil and groundwater was generally in the mild to moderate range, the potential ecological risk level of Hg and Cd in soil was relatively high, which was mainly affected by the toxicity of heavy metals, and the potential ecological risk level of Ni in groundwater was relatively high, which was mainly affected by the content of heavy metals.

Key words: industrial land; soil; groundwater; heavy metals; compound pollution; ecological risk assessment

随着工业化和城市化的飞速发展,退二进三^[1]和城市更新^[2,3]中的土壤和地下水^[4]重金属污染问题已成为国内外环境科学等领域研究的热点。污染土壤和地下水环境的重金属主要有As、Cd、Cr、Pb、Hg和Ni这6种^[5],主要来源是采矿冶炼^[6]、金属加工^[7]、化工生产^[8]、医药制造和废弃物处理^[9]等工业生产活动。工矿企业通过“三废”排放的重金属进入土壤后很难被降解^[10],还会垂向迁移进入地下水^[11],对生态环境和人体健康构成威胁^[12,13]。因此,分析工业用地土壤和地下水重金属污染情况,进行生态环境风险评价,对于开展重金属污染防控和

环境修复治理具有重要意义。

不同类型工业用地的重金属污染状况存在一定差异,因此目前已有针对针对不同行业土壤和地下水重金属污染情况的研究,如朱水等^[14]的研究发现垃圾处理园区周边地下水中重金属污染物主要为Zn和Ni,土壤中主要为Cr、Cu、Ni、Pb、As和Cd,同时指出重金属在土壤剖面中存在明显的纵向迁移

收稿日期: 2022-02-18; 修订日期: 2022-03-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1802401); 2021年度院青年创新基金项目(CX2021140326)

作者简介: 李晓曼(1991~),女,硕士,工程师,主要研究方向为土壤与地下水环境调查及风险评估, E-mail: lixiaoman0317@163.com

* 通信作者, E-mail: liqq@saes.sh.cn

现象. 徐腾等^[15]的研究发现我国制革场地土壤和地下水受重金属 Cr 污染严重, 土壤以三价铬污染为主, 地下水中铬含量和形态受到土壤铬分布、污染时间、水文地质等因素的共同影响. 侯文隽等^[16]的研究发现电镀场地土壤和地下水中重金属含量均超标的污染物为 Ni 和 Cr, 场地内酸性土壤和地下水氧化环境有利于 Ni 和 Cr 的垂向迁移. 此外, 其他工业用地土壤和地下水也出现不同程度的重金属累积现象^[17~19]. 然而, 目前关于工业用地重金属污染的研究多集中于单个行业^[20,21]或单个因子^[22], 缺乏覆盖多行业和大尺度的总体分析和判断. 由于上海市工业门类丰富, 城市更新速度快, 退役场地多, 便于取样调查^[23], 且水土之间水力联系紧密, 复合污染场地较多, 因此, 本研究以上海市工业用地为例, 筛选 3 种分布广泛、污染典型的工业用地(化工、金属加工、危废治理)中的典型区域, 针对不同深度土壤及浅层地下水中重金属(As、Cd、Cr、Pb、Hg 和 Ni)进行含量分析, 对土壤和地下水中重金属的垂向分布特征进行综合解析, 对不同工业类型间重金属污染种类进行溯源, 对典型区域潜在生态风险进行评价, 以期为工业用地土壤和地下水系统性防控与治理提供数据基础和技术支撑.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

上海市区境为长江三角洲冲积平原的一部分, 地势平坦, 土壤符合典型黏性土壤特性, 具有养分含量多、通透性差、土壤温度变化慢、小孔隙多等特点^[24,25]. 30 个典型行业地块即 30 个潜在污染区域(每个行业各 10 个)分别位于南部近郊闵行区、北部近郊宝山区以及远郊奉贤、嘉定、青浦、浦东新区、金山和松江区等(图 1). 根据已有勘察资料^[26,27], 研究区土层自上而下大致可划分为: ①人工填土层, 包括杂填土和素填土, 层厚 0.5~3.5 m, 土层松散, 夹植物根茎和碎石等, 土质不均匀, 渗透性中等; ②粉质黏土, 层厚 0.5~2.7 m, 呈褐黄至灰黄色, 可塑状态, 夹铁锰氧化物, 渗透性较差; ③淤泥质粉质黏土, 层厚 1.7~2.6 m, 呈灰色和软塑状态, 渗透性较差. 区域浅层地下水属于潜水类型, 水位埋深在 1 m 左右, 随季节、降水和周边地表径流影响涨落水位差为 0.5~1 m.

1.2 采样点位布设

采样点位按照专业判断布点法, 主要布设在企业生产区、储存区、废水治理区和固废/危废存放区等, 企业布点位置示意如图 2 所示. 采集表层(0~-0.5 m)、深层(-0.5 m~地下水位线)和饱和

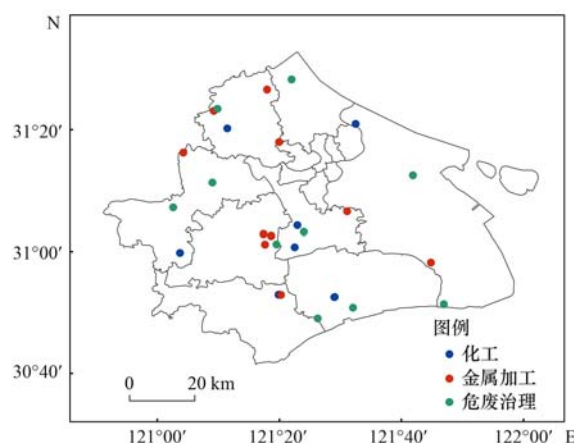


图 1 研究地块位置分布示意

Fig. 1 Location distribution of research sites

带($\geq$ 地下水位线)土壤样品及地下水监测井(开筛-1~-6 m)的地下水样品. 30 个潜在污染区域内共布设 194 个土壤监测点和 126 个地下水监测点, 其中 75 个土壤监测点和 49 个地下水监测点位于生产区, 44 个土壤监测点和 21 个地下水监测点位于储存区, 47 个土壤监测点和 32 个地下水监测点位于废水处理区, 28 个土壤监测点和 24 个地下水监测点位于固废/危废存放区. 共采集 582 个不同深度土壤样本和 126 个浅层地下水样本.

1.3 样品采集与分析

1.3.1 样品采集

土壤样品经自然风干, 去除植物根系、小石块等异物, 研磨过 100 目筛后保存, 待测. 地下水样品采集后分成两份, 一份使用 0.45 μm 滤头对水样进行过滤, 并加入硝酸使 pH 值低于 2, 备测重金属; 另一份水样不做处理. 水样均使用聚乙烯瓶储存, 采样瓶取满后用防水胶带密封保存, 待测.

1.3.2 污染物分析

土壤样品中 Cd、Cr、Pb 和 Ni 含量采用《土壤和沉积物 12 种金属元素的测定 王水提取-电感耦合等离子体质谱法》(HJ 803-2016)进行测定, 检出限分别为 0.07、2、2 和 2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; As 和 Hg 含量采用《土壤和沉积物 汞、砷、硒、铋、锑的测定微波消解/原子荧光法》(HJ 680-2013)进行测定, 检出限分别为 0.01 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 0.002 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

地下水样品中 Cd、Cr、Pb 和 Ni 含量采用《水质 65 种元素的测定 电感耦合等离子体质谱法》(HJ 700-2014)进行测定, 检出限分别为 0.000 05、0.000 09、0.000 09 和 0.000 06 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; As 和 Hg 含量采用《水质 汞、砷、硒、铋和锑的测定 原子荧光法》(HJ 694-2014)进行测定, 检出限分别为 0.000 3 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 0.000 04 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

在测定过程中, 为保证数据的准确性, 设置了包



图2 企业布点位置示意
Fig. 2 Schematic diagram of sampling points

含方法空白样品、加标样品、加标平行样品和样品平行样在内的质控样品。对于土壤和地下水样品,6种重金属的加标回收率分别为80%~107%和75%~112%,平行样品的相对标准偏差均小于15%,方法空白样品的检测结果均低于检出限。

1.4 评价方法

1.4.1 单因子污染指数法

采用单因子污染指数(P_i)对土壤/地下水中单一重金属污染程度进行评价^[28],计算公式如下:

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

式中, C_i 为重金属元素*i*的实测含量, S_i 为重金属元素*i*的评价标准值。单因子污染指数评价的分级标准见表1。

1.4.2 内梅罗综合污染指数法

采用内梅罗综合污染指数(P_N)对土壤/地下水中多种重金属元素的复合污染程度进行评价^[29],计算公式如下:

$$P_{imax} = (C_i/S_i)_{max} \tag{2}$$

$$P_{iave} = (C_i/S_i)_{ave} \tag{3}$$

$$P_N = \sqrt{(P_{imax}^2 + P_{iave}^2)/2} \tag{4}$$

式中, C_i 为重金属元素*i*的实测含量, S_i 为重金属元素*i*的评价标准, P_{imax} 为最大单项污染指数, P_{iave} 为平均单项污染指数, P_N 为内梅罗综合污染指数。内梅罗污染指数法评价的分级标准见表1。

表1 重金属污染等级划分标准

Table 1 Classification criteria of heavy metal pollution				
等级 划分	单因子污染指数分级标准		内梅罗污染指数分级标准	
	污染指数	污染等级	污染指数	污染等级
1	$P_i \leq 1$	未污染	$P_N \leq 0.7$	安全
2	$1 < P_i \leq 2$	轻度污染	$0.7 < P_N \leq 1$	警戒
3	$2 < P_i \leq 3$	中度污染	$1 < P_N \leq 2$	轻度污染
4	$P_i > 3$	重度污染	$2 < P_N \leq 3$	中度污染
5	/	/	$P_N > 3$	重度污染

1.4.3 潜在生态风险指数法

瑞典科学家 Hakanson 于1980年提出潜在生态风险指数法(RI)^[30],此后该方法被广泛应用于重金属生态风险评价。该方法综合考虑了重金属的污染浓度、毒性水平和生态效应等因素,反映了重金属对生态环境的潜在影响程度,计算方法如下:

$$E_i = T_i \times (C^i/C_i) \tag{5}$$

$$RI = \sum E_i \tag{6}$$

式中, C_i 为第 i 种元素实测含量; C_i 为第 i 种元素的参比值, E_i 为重金属元素 i 潜在生态危害系数, T_i 为重金属元素 i 的毒性响应系数; RI 为重金属综合潜在生态风险指数。

本研究中 6 项重金属毒性系数分别为 $Hg = 40$ 、 $Cd = 30$ 、 $As = 10$ 、 $Pb = Ni = 5$ 和 $Cr = 2$, 毒性系数总值 92, 经比较^[31,32], 本文将 RI 第一级阈值设为 104, 余下各级阈值逐级扩大 2 倍。潜在生态危害系数 E_i 与危害指数 RI 的生态风险程度分级的评价标准如表 2 所示。

表 2 重金属潜在生态风险分级标准
Table 2 Potential risk level of heavy metals

E_i	RI	生态风险程度
< 40	< 104	轻度
40 ~ 80	104 ~ 208	中度
80 ~ 160	208 ~ 416	较强
160 ~ 320	> 416	很强
> 320		极强

2 结果与讨论

2.1 土壤中重金属复合污染特征分析

2.1.1 土壤中重金属含量分布和变异特征

经分析, 重金属元素 As、Cd、Cr、Pb、Hg 和 Ni 在 30 个典型行业工业用地不同深度土壤中均有检出, 其含量统计如表 3 和图 3 所示。6 项重金属在表

表 3 典型工业用地表层土壤重金属含量描述性统计

Table 3 Heavy metal concentrations in the surface soil at typical industrial sites

重金属	最小值 /mg·kg ⁻¹	最大值 /mg·kg ⁻¹	平均数 /mg·kg ⁻¹	标准差	变异系数 /%	检出率 /%	上海市土壤背景值 ^[33] /mg·kg ⁻¹
As	4.00	22.30	8.05	2.63	32.63	100.00	9.11
Cd	0.04	1.18	0.15	0.12	81.10	100.00	0.13
Cr	23.00	2 070.00	102.68	194.04	188.97	100.00	75.00
Pb	8.90	1 660.00	42.27	121.85	288.24	100.00	25.48
Hg	0.02	2.42	0.11	0.18	161.82	100.00	0.10
Ni	16.00	1 010.00	57.95	95.71	165.15	100.00	40.00

2.1.2 不同行业土壤污染指数分析

以上海市土壤背景值为标准, 计算内梅罗综合污染指数和每个土壤样品污染指数占比, 结果见表 4 和图 4。从内梅罗综合污染指数的统计结果来看, 金属加工行业污染指数最高, 表层土壤污染指数达到 3.87, 属于重度污染水平, 深层和饱和带污染指数为 2.35 和 1.40, 达到中度和轻度污染水平, 其中, Cr、Pb 和 Ni 元素污染累积明显, 单因子污染指数超过 1, 且由图 4 可以看出, Cr、Pb 和 Ni 元素分别有 22.31%、11.00% 和 26.72% 的点位于重度污染水平。化工和危废治理行业污染指数处于 1~2 之间, 为轻度污染水平, 其中 Cd、Pb、Hg 和 Ni 元素污染累积明显, 且化工行业的 Cd 和危废治理行业

层土壤样品中含量最高, 分别为 8.05、0.15、102.68、42.27、0.11 和 57.95 mg·kg⁻¹, 其中, Cd、Cr、Pb、Hg 和 Ni 含量超过上海市土壤背景值^[33], 分别是背景值的 1.13、1.37、1.66、1.09 和 2.39 倍。有研究表明, 变异系数越大, 受人为影响越严重, 变异系数大于 50%, 说明重金属含量空间分布不均匀。表层土壤中 Cd 的变异系数超过 50%, Cr、Pb、Hg 和 Ni 的变异系数超过 100%, 表现出明显的空间变异性, 表明这 5 项重金属受人类活动影响较大^[34,35]。随着土壤垂直深度的增加, 除 As 之外, 各项重金属元素的含量和变异系数逐渐降低, 说明垂向土壤受人为活动影响逐渐降低。这可能是因为工业生产活动中不慎泄漏或排放的重金属污染物首先富集在土壤表层, 之后在降雨淋溶等水力作用下发生纵向迁移, 但黏土层的阻滞作用导致其无法充分下渗, 因此深层与饱和带土壤受人为活动影响逐渐降低^[36]。As 与其他重金属污染趋势不同, 主要是因为 As 的性质与大多数重金属不同, 在土壤中多以含氧阴离子形式存在, As 在土壤中的吸附和迁移受土壤胶体性质(如水合作用、pH 值、特异性吸附、阳离子配位变化、同晶置换和结晶度等)的影响较大, 导致 As 在土壤中的吸附和迁移缺乏规律性, 与其他重金属有一定差别^[22,37]。

的 Hg 分别有 9.02% 和 8.08% 的点位于重度污染水平。

结合实际调查情况分析, 重度污染点位于主要分布在各企业生产区、固废/危废贮存区和废水处理区, 这些区域普遍涉及重金属的使用、储存和排放。部分企业由于历史较长、设施陈旧且管理不善等问题, 对土壤环境造成了很大的影响。Cd、Pb 和 Ni 作为化工和金属加工行业的主要原料^[38]以及危废治理行业的主要排放物^[39], 在 3 个行业土壤中均有不同程度的累积, 而 Cr 和 Hg 的主要来源是金属加工和危废治理行业。各类型企业土壤均存在多个元素累积, 呈现出复合污染的趋势, 表明企业生产对土壤环境影响严重。

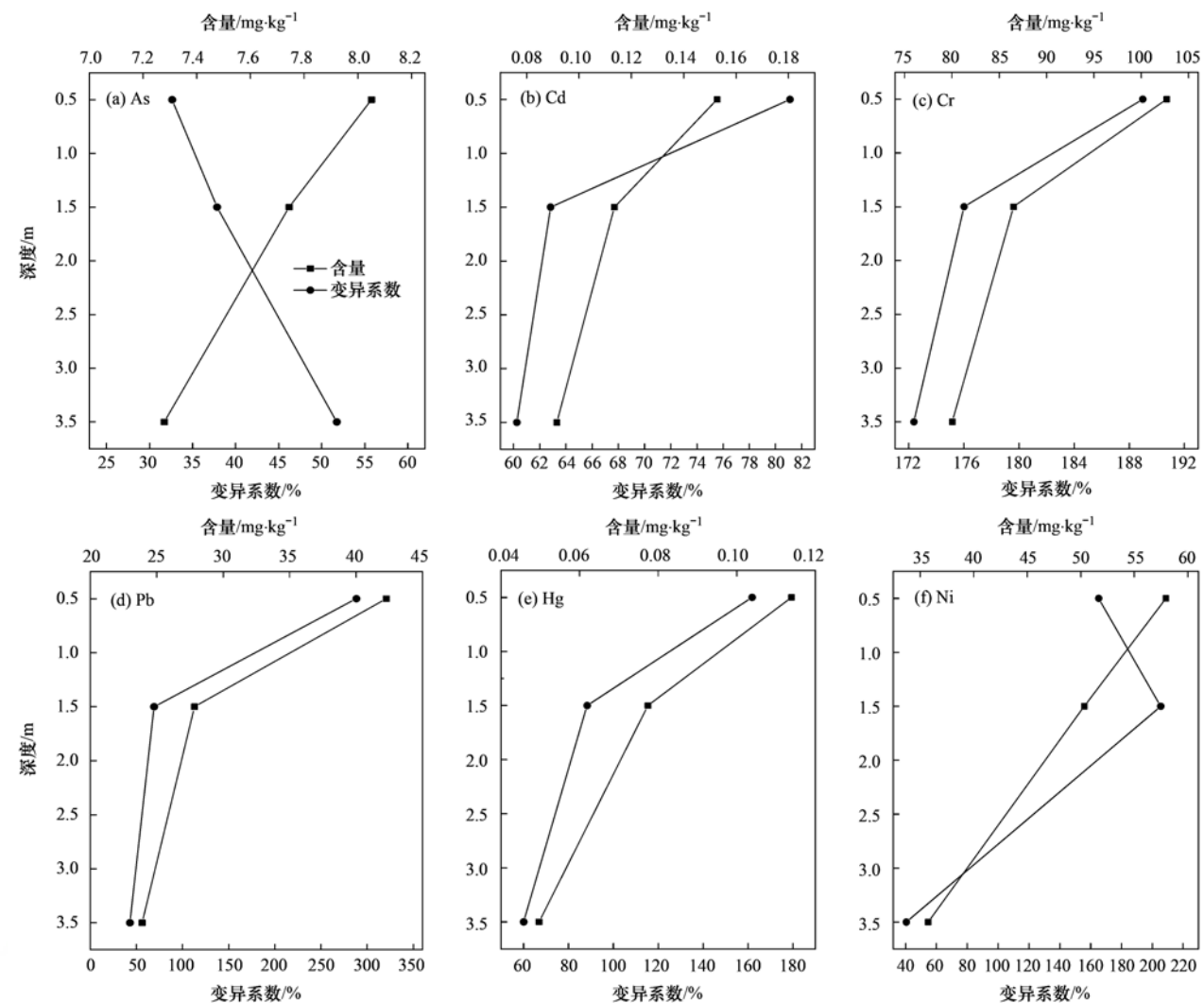


图3 土壤重金属不同深度分布

Fig. 3 Distribution of heavy metals in soil at different depths

表4 不同类型工业土壤重金属污染指数

		Table 4 Pollution index of heavy metals in soils of different types of industry					
行业类型	采样位置	单因子污染指数(P_i)					
		As	Cd	Cr	Pb	Hg	Ni
化工	表层	0.95	1.45	0.92	1.32	0.94	1.13
	深层	0.89	1.01	0.91	1.13	0.72	1.06
	饱和带	0.81	0.81	0.83	0.95	0.53	0.98
金属加工	表层	0.95	1.01	2.49	2.57	0.94	2.29
	深层	0.90	0.77	1.93	1.19	0.69	1.79
	饱和带	0.82	0.66	1.43	1.03	0.44	0.91
危废治理	表层	0.76	1.03	0.94	1.01	1.44	0.85
	深层	0.75	0.79	0.80	0.94	0.88	0.82
	饱和带	0.76	0.61	0.77	0.80	0.51	0.79

2.2 地下水重金属复合污染特征分析

2.2.1 地下水中重金属含量分布和变异特征

经分析,6种重金属元素在地下水中均有检出,其含量统计如表5. $\rho(\text{As})$ 、 $\rho(\text{Cd})$ 、 $\rho(\text{Cr})$ 、 $\rho(\text{Pb})$ 、 $\rho(\text{Hg})$ 和 $\rho(\text{Ni})$ 平均值分别为0.0129、0.0005、0.3712、0.0224、0.0001和0.2301 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,其中As、Cr、Pb和Ni均超过地下水Ⅲ类

标准^[40],分别是标准值的1.29、7.42、2.24和11.51倍.各重金属含量的变异系数均超过100%,表明地下水重金属,尤其是As、Cr、Pb和Ni元素受人类活动影响较大.

2.2.2 不同行业地下水污染指数分析

以地下水Ⅲ类标准值为标准,计算内梅罗综合污染指数和每个地下水样品污染指数占比,结果见

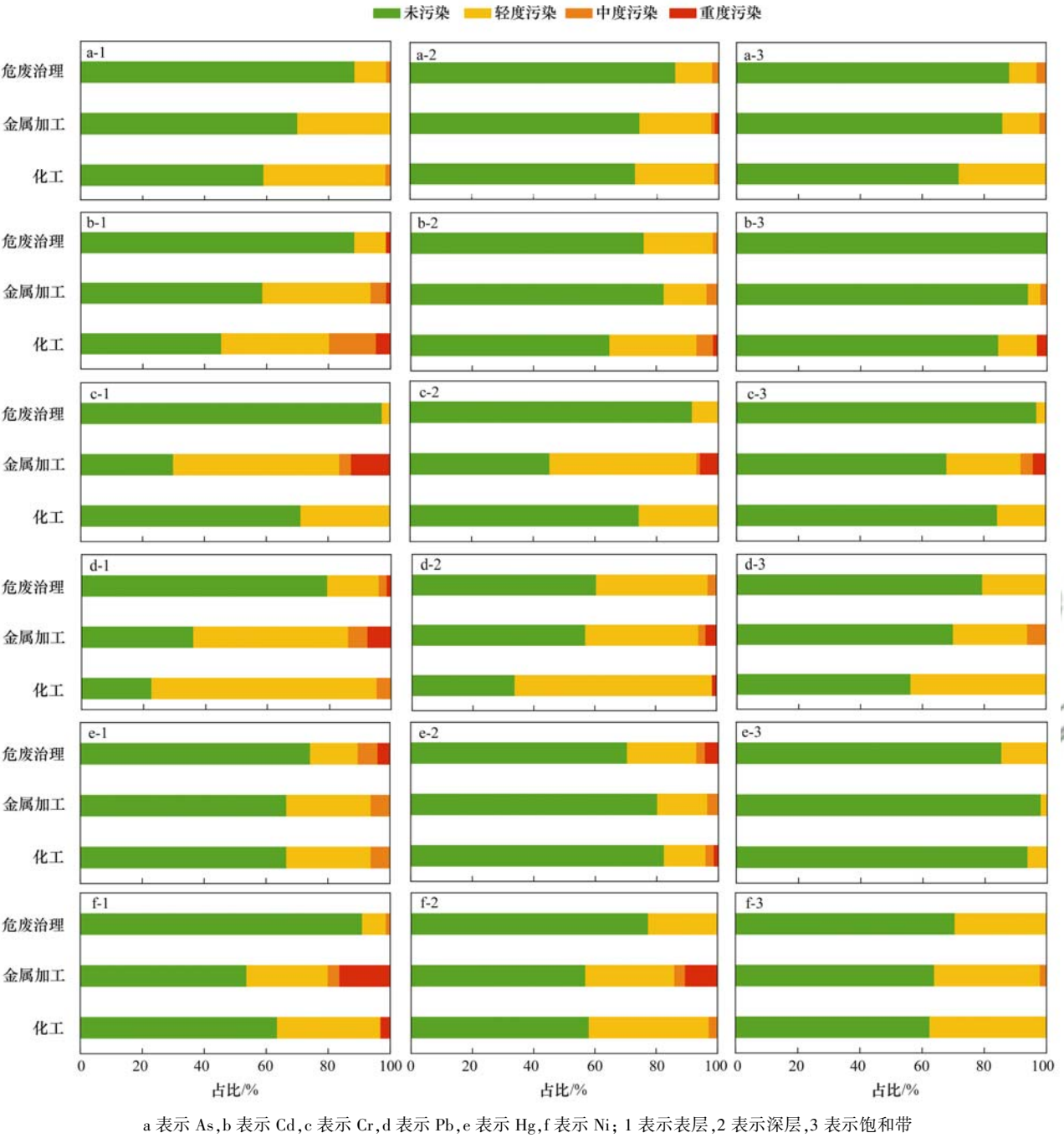


图 4 不同行业类型土壤重金属单因子污染指数占比

Fig. 4 Single factor pollution index of heavy metals in soils at typical industrial sites

表 5 典型工业用地地下水重金属含量描述性统计¹⁾

Table 5 Heavy metal concentrations in groundwater at typical industrial sites							
重金属	最小值 /mg·L ⁻¹	最大值 /mg·L ⁻¹	平均数 /mg·L ⁻¹	标准差	变异系数 /%	检出率 /%	地下水质量标准-Ⅲ类 ^[40] /mg·L ⁻¹
As	ND	0.223	0.012 9	0.027 4	212.53	96.03	0.010
Cd	ND	0.023	0.000 5	0.002 2	457.05	48.41	0.005
Cr	ND	19.600	0.371 2	2.143 1	578.14	99.21	0.050
Pb	ND	0.408	0.022 4	0.055 8	249.05	94.44	0.010
Hg	ND	0.004	0.000 1	0.000 4	422.62	22.22	0.001
Ni	0.000 18	9.240	0.230 1	1.052 2	457.92	100.00	0.020

1) ND 表示低于分析方法检出限,参与后续统计分析时按 1/2 检出限计算

表 6 和图 5. 从内梅罗综合污染指数的统计结果来看,金属加工行业综合污染指数为 25.38,属于重度污染等级,其中,Cr、Pb 和 Ni 元素单因子污染指数超过 1,且分别有 14.00%、10.00% 和

50.00% 的点位达到重度污染等级,污染累积明显;危废治理行业综合污染指数为 11.79,属于重度污染等级,其中,Ni、Pb 和 As 元素污染累积较明显,分别有 17.95%、23.08% 和 7.69% 的点位达到重度污染等级;化工行业综合污染指数为 2.88,属于中度污染等级,其中,As 和 Pb 元素表

现出较明显的累积趋势,分别有 18.92% 和 13.51% 点位达到重度污染等级.可见,地下水中 Cr 污染主要来源于金属加工行业,As 主要来源于化工和危废治理行业,Ni 主要来源于金属加工和危废治理行业,Pb 在 3 个行业地下水中均有不同程度的累积.

表 6 不同类型工业企业地下水重金属污染指数

行业类型	单因子污染指数(P_i)						内梅罗综合污染指数(P_N)
	As	Cd	Cr	Pb	Hg	Ni	
化工	2.31	0.06	0.19	1.84	0.10	0.94	2.88
金属加工	0.62	0.04	18.24	1.42	0.02	17.62	25.38
危废治理	1.17	0.20	0.38	3.67	0.17	13.65	11.79

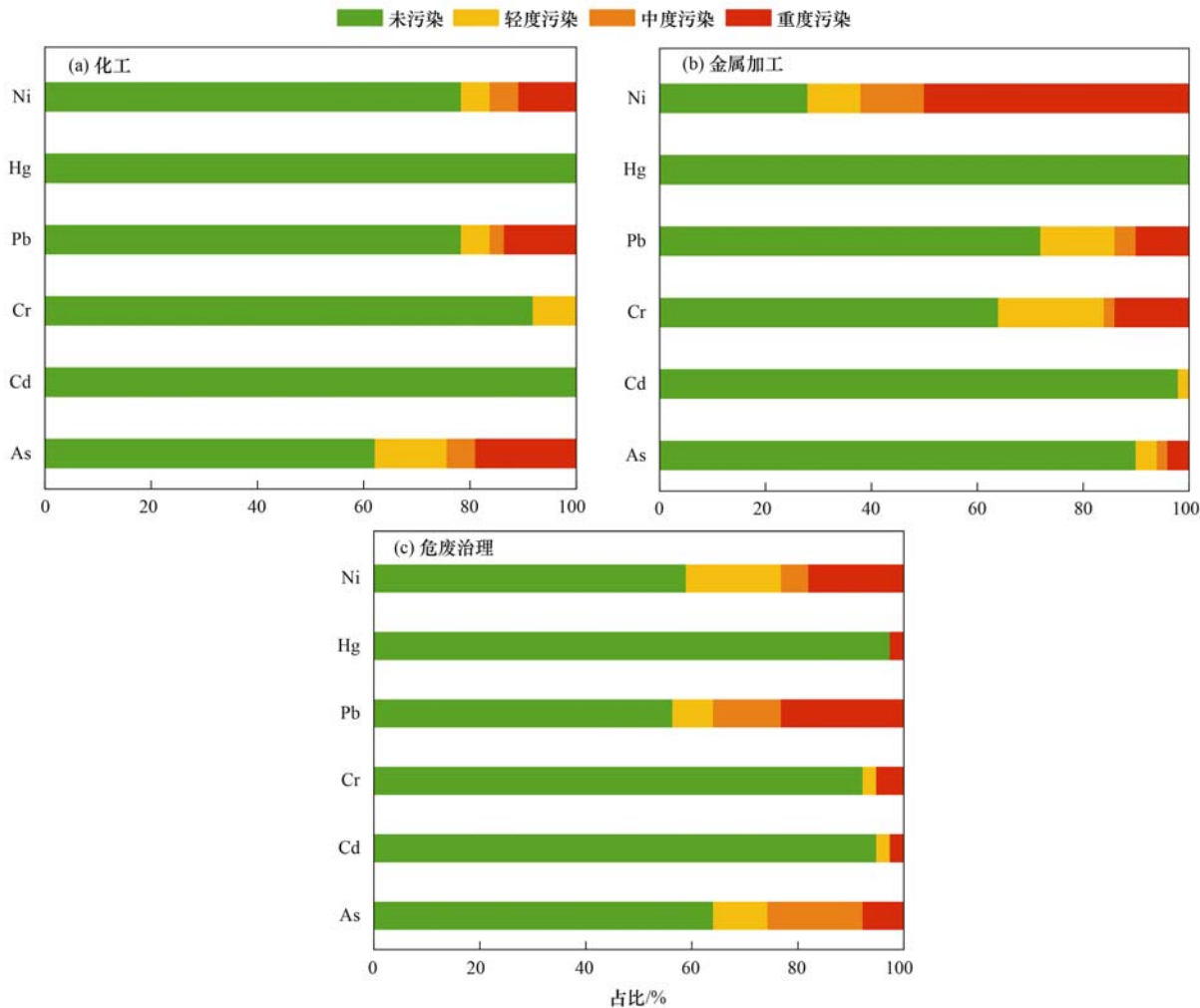


图 5 不同行业类型地下水重金属单因子污染指数占比

Fig. 5 Single factor pollution index of heavy metal in groundwater at typical industrial sites

2.3 土壤-地下水污染系统耦合研究

分析显示,3 种典型行业类型中,金属加工行业造成的土壤和地下水重金属污染最为严重,主要污染物为 Cr、Pb 和 Ni.3 种重金属在各深度土壤和地下水中均具有显著累积趋势,且部分点位土壤和地下水均达到重度污染等级,说明极可能存在水土复合污染情况.

化工和危废治理行业未发现重金属水土复合污染现象,土壤和地下水主要污染物各不相同,化工行业土壤主要污染物为 Cd、Pb 和 Ni,地下水主要污染物为 As 和 Pb,危废治理行业土壤主要污染物为 Hg 和 Cd,地下水主要污染物为 Ni 和 Pb.水土复合污染现象的出现可能与土壤重金属的含量和迁移性有密切关系.一方面,金属加工行业

水土复合污染点位主要出现在电镀车间位置,这些车间普遍存在镀铬、镀镍等生产活动,涉及大量硫酸、盐酸和重金属原料使用,产生多种富含重金属的酸性电镀废水^[41]. 由于生产和排污过程中可能出现原料和废水的泄漏,导致表层土壤重金属含量远超背景值. 另一方面,电镀废水无序排放导致土壤呈现较强的酸性环境,而 Pb^[42]、Cr 和 Ni^[16]在酸性土壤中主要以弱酸提取态为主,迁移能力强且不易被土壤吸附,而研究区包气带厚度小,地下水埋深浅,因此高浓度重金属较易迁移至饱和带土壤并解吸释放到地下水.

与金属加工行业不同,化工和危废治理行业土壤重金属污染主要集中在表层,且处于轻度污染水平,表明重金属大多被黏土层阻隔而未迁移至含水层,因此地下水中的主要污染物与土壤并不相同,其地下水污染物可能来自于地理式构筑物中污染物泄漏等直接污染,而非来自土壤污染物的迁移下渗.

此外,水土复合污染现象还与企业管理情况有密切关系. 金属加工行业企业规模较小,成立时间较早,地点分散,缺乏统一规划与管理^[43],发展相对粗放,部分企业存在防渗措施不到位、原辅材料存储不规范或废水处理不当等现象,导致电镀三废中重金属污染物进入并累积于土壤和地下水,而化工和危废处理企业规模较大,分布较集中,受到重点监管并配置较为齐全的防渗和三废处理设施^[28,44],因此土壤和地下水污染程度较轻,未出现水土复合污染现象.

2.4 生态风险评价

运用潜在生态风险指数法对重金属元素的风险

水平进行评价,结果如表 7 所示. 土壤重金属潜在生态风险指数计算结果表明,3 个典型行业土壤综合潜在生态风险等级(RI)为:表层>深层>饱和带,表层土壤 RI 值大于 104,处于中度风险等级,深层与饱和带土壤 RI 值小于 104,处于轻度风险等级. 重金属单项潜在生态风险指数(E_i)在 1.55~57.69 之间,其中 Hg 和 Cd 的 E_i 值明显高于其他重金属,这一结论与很多土壤潜在生态风险评价的研究相一致^[34~38,45,46]. 对比 3 个行业之间的生态风险指数可知各行业土壤重金属生态风险相差不大.

地下水重金属潜在生态风险指数计算结果表明,金属加工和危废治理行业地下水综合潜在生态风险(RI)处于中度风险等级,化工行业处于轻度风险等级. 重金属单项潜在生态风险指数(E_i)在 0.38~88.10 之间,其中 Ni 元素的 E_i 值明显高于其他重金属,Ni 在金属加工和危废治理行业地下水中的生态风险等级分别达到较强风险等级和中度风险等级.

以上分析表明,在工业用地风险管控过程中,土壤环境应重点关注 Hg 和 Cd 的生态风险影响,地下水环境应重点关注 Ni 的生态风险影响. 生态风险水平与污染程度并不完全一致,主要是因为生态风险指数不仅与重金属污染水平有关,还兼顾了重金属毒性水平. 在 6 项重金属中,Hg 和 Cd 的毒性系数最大,且在土壤中的含量超过背景值,因此表现出更高的生态风险水平. 然而,Hg 和 Cd 在地下水中含量未超过背景值,因此风险水平较低. 相反,Ni 的毒性系数虽然不大,但是地下水中 Ni 的平均含量很高,是背景值的 19.38 倍,表现出较高的风险水平.

表 7 不同行业类型重金属潜在生态风险指数
Table 7 Potential ecological risk results of heavy metals

行业类型	采样位置	单项潜在生态风险(E_i)						综合潜在生态风险(RI)
		As	Cd	Cr	Pb	Hg	Ni	
化工	表层	9.52	43.62	1.84	6.62	37.66	5.67	104.93
	深层	8.86	30.30	1.82	5.67	28.84	5.28	80.78
	饱和带	8.11	24.39	1.66	4.74	21.09	4.89	64.89
	地下水	23.11	1.89	0.38	9.18	4.19	4.68	43.43
金属加工	表层	9.48	30.28	4.98	12.83	37.77	11.45	106.79
	深层	8.98	23.04	3.85	5.93	27.79	8.97	78.56
	饱和带	8.15	19.82	2.86	5.13	17.76	4.56	58.30
	地下水	6.25	1.18	36.49	7.11	0.96	88.10	140.09
危废治理	表层	7.60	30.96	1.88	5.07	57.69	4.27	107.46
	深层	7.54	23.79	1.60	4.68	35.00	4.10	76.71
	饱和带	7.64	18.28	1.55	3.99	20.47	3.93	55.86
	地下水	11.71	6.02	0.76	18.37	6.63	68.23	111.72

3 结论

(1)上海市典型工业场地存在土壤和地下水重

金属污染现象,重金属 Cd、Cr、Pb、Hg 和 Ni 在表层土壤中存在明显累积,As、Cr、Pb 和 Ni 在地下水中存在明显累积,含量超过背景值且变异系数较大,表

明受人类活动影响较大.在土壤中,随着垂直深度的加深,重金属含量逐渐降低,深层和饱和带土壤重金属含量接近或低于背景值水平,受人类活动扰动影响趋小.

(2)不同重金属污染来源不同,土壤中 Cr 和 Hg 的主要来源为金属加工和危废治理业,Cd、Pb 和 Ni 在 3 个行业土壤中均有不同程度的累积.地下水中 As 主要来源于化工和危废治理行业,Cr 主要来源于金属加工行业,Ni 主要来源于金属加工和危废治理行业,Pb 在 3 个行业地下水中均有不同程度的累积.

(3)金属加工行业土壤和地下水综合污染指数最高,重金属 Cr、Pb 和 Ni 存在明显的水土复合污染现象,这可能与土壤重金属含量、迁移性和企业管理水平有密切关系.部分金属加工企业受历史管理水平的影响,导致富含重金属的原料和酸性电镀废水泄漏至土壤,重金属不易被酸性土壤吸附从而迁移至地下水.化工和危废治理行业未出现水土复合污染现象,地下水污染物可能来自于地埋式构筑物中污染物泄漏等直接污染,而非土壤污染物的迁移下渗.

(4)从生态风险评价结果来看,上海市典型工业用地土壤和地下水重金属潜在生态风险处于轻度~中度范围,土壤中重金属 Hg 和 Cd 的潜在生态风险水平较高,地下水中重金属 Ni 的潜在生态风险水平较高.在后续开发过程中,需进一步加强风险管控,以确保土壤和地下水安全利用.

参考文献:

- [1] Huang G X, Zhang M, Liu C Y, *et al.* Heavy metal(loid)s and organic contaminants in groundwater in the Pearl River Delta that has undergone three decades of urbanization and industrialization: distributions, sources, and driving forces[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **635**: 913-925.
- [2] 李梦婷,沈城,吴健,等.快速城市化区域不同用地类型土壤重金属含量分布特征及生态风险[J].*环境科学*, 2021, **42**(10): 4889-4896.
- Li M T, Shen C, Wu J, *et al.* Content and ecological risks of heavy metals in soil with different land uses in a rapidly urbanizing Area[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(10): 4889-4896.
- [3] Ravindra K, Mor S. Distribution and health risk assessment of arsenic and selected heavy metals in groundwater of Chandigarh, India[J]. *Environmental Pollution*, 2019, **250**: 820-830.
- [4] 黄婉彬,鄢春华,张晓楠,等.城市化对地下水水量、水质与水热变化的影响及其对策分析[J].*地球科学进展*, 2020, **35**(5): 497-512.
- Huang W B, Yan C H, Zhang X N, *et al.* The impact of urbanization on groundwater quantity, quality, hydrothermal changes and its countermeasures[J]. *Advances in Earth Science*, 2020, **35**(5): 497-512.
- [5] 杨悦锁,陈煜,李盼盼,等.土壤、地下水中重金属和多环芳烃复合污染及修复研究进展[J].*化工学报*, 2017, **68**(6): 2219-2232.
- Yang Y S, Chen Y, Li P P, *et al.* Research progress on co-contamination and remediation of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in soil and groundwater[J]. *CIESC Journal*, 2017, **68**(6): 2219-2232.
- [6] Luo C, Routh J, Dario M, *et al.* Distribution and mobilization of heavy metals at an acid mine drainage-affected region in South China, a post-remediation study[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **724**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138122.
- [7] 赵利刚,蒲生彦,杨金艳,等.某铬渣堆场周边土壤地下水Cr⁶⁺污染特征研究[J].*环境工程*, 2015, **33**(2): 117-121.
- Zhao L G, Pu S Y, Yang J Y, *et al.* The Cr⁶⁺ pollution characteristics of groundwater and soil in the surroundings of a chromium slag site[J]. *Environmental Engineering*, 2015, **33**(2): 117-121.
- [8] 孙雪菲,张丽霞,董玉龙,等.典型石化工业城市土壤重金属源解析及空间分布模拟[J].*环境科学*, 2021, **42**(3): 1093-1104.
- Sun X F, Zhang L X, Dong Y L, *et al.* Source apportionment and spatial distribution simulation of heavy metals in a typical petrochemical industrial city[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(3): 1093-1104.
- [9] 李亚静,黄庭,谢哲宇,等.非正规垃圾填埋场土壤和地下水重金属污染特征与评价[J].*地球与环境*, 2019, **47**(3): 361-369.
- Li Y J, Huang T, Xie Z Y, *et al.* Characteristics and assessment of heavy metal pollution in soil and groundwater of informal landfills[J]. *Earth and Environment*, 2019, **47**(3): 361-369.
- [10] 李锋,刘思源,李艳,等.工业发达城市土壤重金属时空变异与源解析[J].*环境科学*, 2019, **40**(2): 934-944.
- Li F, Liu S Y, Li Y, *et al.* Spatiotemporal variability and source apportionment of soil heavy metals in a industrially developed city[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(2): 934-944.
- [11] 师环环,潘羽杰,曾敏,等.雷州半岛地下水重金属来源解析及健康风险评价[J].*环境科学*, 2021, **42**(9): 4246-4256.
- Shi H H, Pan Y J, Zeng M, *et al.* Source analysis and health risk assessment of heavy metals in groundwater of Leizhou Peninsula[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(9): 4246-4256.
- [12] García-Rico L, Meza-Figueroa D, Jay Gandolfi A, *et al.* Health risk assessment and urinary excretion of children exposed to arsenic through drinking water and soils in Sonora, Mexico[J]. *Biological Trace Element Research*, 2019, **187**(1): 9-21.
- [13] Rehman I U, Ishaq M, Ali L, *et al.* Enrichment, spatial distribution of potential ecological and human health risk assessment via toxic metals in soil and surface water ingestion in the vicinity of Sewakht mines, district Chitral, Northern Pakistan[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, **154**: 127-136.
- [14] 朱水,申泽良,王媛,等.垃圾处理园区周边土壤-地下水重金属分布特征[J].*中国环境科学*, 2021, **41**(9): 4320-4332.
- Zhu S, Shen Z L, Wang Y, *et al.* Spatial distribution characteristics of heavy metals in the soil-groundwater system around an integrated waste management facility[J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(9): 4320-4332.
- [15] 徐腾,南丰,蒋晓锋,等.制革场地土壤和地下水中铬污染来源及污染特征研究进展[J].*土壤学报*, 2020, **57**(6): 1341-1352.

- Xu T, Nan F, Jiang X F, *et al.* Progresses in research on sources and characteristics of chromium pollution in soils and groundwater of tannery sites [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, **57** (6): 1341-1352.
- [16] 侯文隽, 龚星, 詹泽波, 等. 粤港澳大湾区丘陵地带某电镀场地重金属污染特征与迁移规律分析[J]. *环境科学*, 2019, **40** (12): 5604-5614.
- Hou W X, Gong X, Zhan Z B, *et al.* Heavy metal contamination and migration in correspondence of an electroplating site on the hilly lands of the Guangdong-Hong Kong-Macau Greater Bay Area, China [J]. *Environmental Science*, 2019, **40** (12): 5604-5614.
- [17] 张义, 周心劝, 曾晓敏, 等. 长江经济带工业区土壤重金属污染特征与评价[J]. *环境科学*, 2022, **43** (4): 2062-2070.
- Zhang Y, Zhou X Q, Zeng X M, *et al.* Characteristics and assessment of heavy metal contamination in soils of industrial regions in the Yangtze River Economic Belt [J]. *Environmental Science*, 2022, **43** (4): 2062-2070.
- [18] 王照宜, 潘伟斌, 陈捷, 等. Cr、Ni、Cu 和 Cd 在珠三角某区域工业污染场地包气带和潜水层中的迁移规律[J]. *环境工程学报*, 2016, **10** (12): 7326-7332.
- Wang Z Y, Pan W B, Chen J, *et al.* Migration regulation of Cr, Ni, Cu and Cd in aeration zone and phreatic aquifer of industrial contaminated sites in the Pearl River Delta region [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, **10** (12): 7326-7332.
- [19] 蔡子波. 加油站场地调查及污染土壤和地下水修复方法研究[J]. *化工管理*, 2021, (14): 48-50.
- Cai Z B. Gas Station site investigation and remediation of contaminated soil and groundwater [J]. *Chemical Enterprise Management*, 2021, (14): 48-50.
- [20] 白丽荣, 龚航远, 徐敏, 等. 太原市某垃圾填埋场渗滤液及周边环境重金属污染及健康风险评估[J]. *生态毒理学报*, 2021, **16** (4): 313-322.
- Bai L R, Gong H Y, Xu M, *et al.* Heavy metal pollution and health risk assessment of a landfill site in Taiyuan City [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2021, **16** (4): 313-322.
- [21] 刘颖, 周念清. 复合污染场地污染特征分析及健康风险评估[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2018, **46** (7): 934-943.
- Liu Y, Zhou N Q. Pollution characteristics and health risk of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in a co-contaminated site [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2018, **46** (7): 934-943.
- [22] 邓雯文, 罗艳丽, 王翔, 等. 地下水-土壤系统中砷含量及健康风险评价[J]. *环境科学与技术*, 2021, **44** (4): 204-211.
- Deng W W, Luo Y L, Wang X, *et al.* Arsenic content and health risk assessment in groundwater-soil system [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, **44** (4): 204-211.
- [23] 吴健, 王敏, 张辉鹏, 等. 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[J]. *环境科学*, 2018, **39** (12): 5620-5627.
- Wu J, Wang M, Zhang H P, *et al.* Heavy metal pollution and potential ecological risk of soil from reclaimed industrial sites and surrounding river sediments [J]. *Environmental Science*, 2018, **39** (12): 5620-5627.
- [24] 陈雅敏, 冯述青, 杨天翔, 等. 我国不同类型土壤有机质含量的统计学特征[J]. *复旦学报(自然科学版)*, 2013, **52** (2): 220-224.
- Chen Y M, Feng S X, Yang T X, *et al.* Statistical characteristics of organic matter content from different soil classes in China [J]. *Journal of Fudan University (Natural Science)*, 2013, **52** (2): 220-224.
- [25] 赵庆英, 杨世伦, 刘守祺. 长江三角洲的形成和演变[J]. *上海地质*, 2002, (4): 25-30.
- Zhao Q Y, Yang S L, Liu S Q. The formation and development of the Changjiang (Yangtze) river delta [J]. *Shanghai Geology*, 2002, (4): 25-30.
- [26] 李韬. 上海地区浅部水文地质条件对地下水污染物迁移的影响研究[J]. *上海国土资源*, 2018, **39** (2): 78-83.
- Li T. Influence of shallow hydrogeological conditions on the migration of groundwater pollutants in Shanghai [J]. *Shanghai Land & Resources*, 2018, **39** (2): 78-83.
- [27] 葛佳, 陈敏. 上海地区浅层土壤中污染物迁移特征分析[J]. *上海国土资源*, 2017, **38** (4): 93-96.
- Ge J, Chen M. Analysis of pollutant migration characteristics in shallow soil in Shanghai [J]. *Shanghai Land & Resources*, 2017, **38** (4): 93-96.
- [28] 曾伟斌, 顾高铨, 万小铭, 等. 多功能区工业园土壤和地表灰尘重金属污染及生态风险差异分析[J]. *环境科学*, 2021, **42** (3): 1105-1113.
- Zeng W B, Gu G Q, Wan X M, *et al.* Heavy metal contents of soil and surface dust and its ecological risk analysis in a multifunctional industrial park [J]. *Environmental Science*, 2021, **42** (3): 1105-1113.
- [29] Nemerow N L. Scientific stream pollution analysis [M]. Washington: Scripta Book Co, 1974.
- [30] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, **14** (8): 975-1001.
- [31] 徐争启, 倪师军, 虞先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. *环境科学与技术*, 2008, **31** (2): 112-115.
- Xu Z Q, Ni S J, Tuo X G, *et al.* Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **31** (2): 112-115.
- [32] 朱静, 侯耀宗, 邹书成, 等. 武汉集中式饮用水源地土壤重金属的时空分布特征及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2021, **42** (7): 3215-3222.
- Zhu J, Hou Y Z, Zou S C, *et al.* Spatio-temporal distribution characteristic and risk assessment of heavy metals in soils around centralized drinking water sources in Wuhan [J]. *Environmental Science*, 2021, **42** (7): 3215-3222.
- [33] 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.
- [34] 赵慧, 何博, 王铁宇, 等. 我国南方典型城市土壤重金属污染特征及源汇关系分析[J]. *环境科学学报*, 2019, **39** (7): 2231-2239.
- Zhao H, He B, Wang T Y, *et al.* Pollution characteristics of heavy metals and source-sink relationship in typical city of the South China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39** (7): 2231-2239.
- [35] 陈佳林, 李仁英, 谢晓金, 等. 南京市绿地土壤重金属分布特征及其污染评价[J]. *环境科学*, 2021, **42** (2): 909-916.
- Chen J L, Li R Y, Xie X J, *et al.* Distribution characteristics and pollution evaluation of heavy metals in greenbelt soils of Nanjing City [J]. *Environmental Science*, 2021, **42** (2): 909-916.
- [36] 张炜华, 于瑞莲, 杨玉杰, 等. 厦门某旱地土壤垂直剖面中重金属迁移规律及来源解析[J]. *环境科学*, 2019, **40** (8): 3764-3773.

- Zhang W H, Yu R L, Yang Y J, *et al.* Migration and source analysis of heavy metals in vertical soil profiles of the drylands of Xiamen City[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(8): 3764-3773.
- [37] Sadiq M. Arsenic chemistry in soils: An overview of thermodynamic predictions and field observations[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1997, **93**(1-4): 117-136.
- [38] 沈城, 刘馥雯, 吴健, 等. 再开发利用工业场地土壤重金属含量分布及生态风险[J]. *环境科学*, 2020, **41**(11): 5125-5132.
- Shen C, Liu F W, Wu J, *et al.* Distribution and ecological risk of heavy metals in the soil of redevelopment industrial sites[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(11): 5125-5132.
- [39] 赵曦, 黄艺, 李娟, 等. 大型垃圾焚烧厂周边土壤重金属含量水平、空间分布、来源及潜在生态风险评价[J]. *生态环境学报*, 2015, **24**(6): 1013-1021.
- Zhao X, Huang Y, Li J, *et al.* Environmental Levels, spatial distribution, sources and potential ecological risk of heavy metals in soils surrounding a large solid waste incinerator[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, **24**(6): 1013-1021.
- [40] GB/T 14848-2017, 地下水质量标准[S].
- [41] 岑雨秋, 高文皓, 周建人. 电镀废水特征污染物的危害及处理方法研究进展[J]. *电镀与精饰*, 2020, **42**(9): 31-34.
- Cen Y Q, Gao W H, Zhou J R. Hazards of characteristic pollutants in electroplating waste-water and researching progress on method of disposal[J]. *Plating & Finishing*, 2020, **42**(9): 31-34.
- [42] 袁峰, 唐先进, 吴骥子, 等. 两种铁基材料对污染农田土壤砷、铅、镉的钝化修复[J]. *环境科学*, 2021, **42**(7): 3535-3548.
- Yuan F, Tang X J, Wu J Z, *et al.* Simultaneous immobilization of arsenic, lead, and cadmium in paddy soils using two iron-based materials[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(7): 3535-3548.
- [43] 刘志杰, 张家伟. 电镀行业企业场地土壤污染调查及成因分析[J]. *广东化工*, 2018, **45**(6): 167-169.
- Liu Z J, Zhang J W. Site investigation and reasons of pollution in a electroplating plant[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2018, **45**(6): 167-169.
- [44] 柴育红, 王明新, 赵兴青. 化工工业园区地表灰尘重金属污染及健康风险: 以常州市为例[J]. *环境工程*, 2019, **37**(8): 190-194, 172.
- Chai Y H, Wang M X, Zhao X Q. Pollution and health risk assessment of heavy metals in surface dust from chemical industrial parks: a case study in Changzhou[J]. *Environmental Engineering*, 2019, **37**(8): 190-194, 172.
- [45] 赖书雅, 董秋瑶, 宋超, 等. 南阳盆地东部山区土壤重金属分布特征及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2021, **42**(11): 5500-5509.
- Lai S Y, Dong Q Y, Song C, *et al.* Distribution characteristics and ecological risk assessment of soil heavy metals in the eastern mountainous area of the Nanyang Basin[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(11): 5500-5509.
- [46] 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, Lü 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 Evolution Pattern of PM _{2.5} and Its Influencing Factors in Guanzhong Plain Urban Agglomeration	ZHANG Jun, JIN Zi-han, WANG Yue, <i>et al.</i>	(5333)
Linkage Effect and Nonlinear Impact of PM _{2.5} Concentration Driving Factors in Central Plains Urban Agglomeration	ZHOU Zhi-heng, ZHOU Ting-gang, QIN Ning	(5344)
Analysis of Spatiotemporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and O ₃ in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Urban Agglomeration, China	LIU Xian-zhao, ZHANG Guo-qiao, YANG Wen-tao, <i>et al.</i>	(5354)
Chemical Composition and Source Apportionment of PM _{2.5} in Zhangye City	PAN Cheng-ke, HUANG Tao, GAO Hong, <i>et al.</i>	(5367)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of PM _{2.5} Heavy Metals in Tianjin and Qingdao in Winter of 2018-2019	ZHAO Ming-sheng, REN Li-hong, LI Gang, <i>et al.</i>	(5376)
Concentration, Solubility, and Sources of Metal Elements in Atmospheric Precipitation in Qingdao	KONG Ling-dong, QI Jian-hua, ZHANG Xu	(5387)
Trends of Ozone Pollution in Guanzhong Urban Agglomeration from 2015 to 2021	ZHAO Wei, WANG Shuo, PANG Xiao-die, <i>et al.</i>	(5399)
Pollution Characteristics of Ozone and Its Precursors in Background Region of Hainan Province	XIE Wen-jing, XING Qiao, XIE Dong-hai, <i>et al.</i>	(5407)
Identification of Ozone Formation Mechanism Long-term Spatio-temporal Evolutions in PRD Based on Two-dimensional Mutual Verification	YANG Lei-feng, XIE Dan-ping, YANG Jun, <i>et al.</i>	(5421)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient Summer Volatile Organic Compounds in Zhengzhou, China	QI Yi-jin, WANG Ling-ling, NI Jing-wei, <i>et al.</i>	(5429)
Summer Pollution Characteristics and Sources of Volatile Organic Compounds in Lanzhou	YANG Yan-ping, CHEN Qiang, MENG Xian-hong, <i>et al.</i>	(5442)
Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs in an Underground Parking Garage	LIU Yan, YANG Ning, SUN Lu-na, <i>et al.</i>	(5453)
Chemical Characterizations of Particles from Direct-injection Gasoline Vehicles	LI Jia-chen, GE Yun-shan, WANG Hao-hao, <i>et al.</i>	(5464)
Scenario Simulation and Prediction of Greenhouse Gas Emissions from Incineration of Solid Waste	YAN Wei, LIU Shu-le, WU Zheng-fang, <i>et al.</i>	(5470)
Distribution, Sources, and Export of the (Sub-) Metal Elements in the Changjiang River	LIU Jia-ming, WU Wen-tao, LIU Xiao-tian, <i>et al.</i>	(5478)
Analysis of Nitrogen and Phosphorus Pollution and Nitrogen Sources in the Lancang River	GUO Shu-fang, CHEN An-qiang, XI Bin, <i>et al.</i>	(5491)
Transformation Relationship of Groundwater and River Water in Riparian Wetland During Water and Sediment Regulation of Xiaolangdi Reservoir in Yellow River	XIAO Chun-yan, LIU Yi-fan, ZHAO Tong-qian, <i>et al.</i>	(5499)
Spatiotemporal Variation in Water Quality of Modaomen Waterway Conveyance Reservoir Drinking Water Sources	ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, ZHANG Qi, <i>et al.</i>	(5509)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River During the COVID-19 Pandemic	FAN Yue-ting, CHANG Sheng, ZHANG Kun-feng, <i>et al.</i>	(5522)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PAHs and PCBs in Surface Water and Sediments in Middle and Upper Reaches of Beiji River	CHANG Sheng, BAI Yun-song, TU Xiang, <i>et al.</i>	(5534)
Hydrochemical Characteristics and Fluorine Distribution and Causes of Different Water Bodies in Pingshuo Mining Area	SUN Long, LIU Ting-xi, DUAN Li-min, <i>et al.</i>	(5547)
Characteristics of Dissolved Organic Matters and Their Influence on Labile Cadmium Release from Soils of Typical Water Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir	ZHANG Bao-hao, WU Ya-zun, XU Dong-yu, <i>et al.</i>	(5560)
Phosphorus Cycling in a Sediment-water System Controlled by Different Dissolved Oxygen Levels of Overlying Water	LIU Xiao-tian, LIU Jun, WANG Yi-bin, <i>et al.</i>	(5571)
Water Quality Evolution Characteristics and Pollution Factor Analysis in Poyang Lake from 2011 to 2019	XIE Hui-yu, HU Mei, JI Xiao-yan, <i>et al.</i>	(5585)
Distribution and Risk Assessment on the Nutrients and Heavy Metals in Surface Sediments of Wuliangsu Lake	DU Cai-li, LI Jia-xi, LI Guo-wen, <i>et al.</i>	(5598)
Effect and Mechanism of Biochar Adsorption on Unbiodegradable Organic Nitrogen in Stormwater Runoff	SU Zeng-hui, SUN Ping, CHEN You-yuan, <i>et al.</i>	(5608)
Phytoplankton Community Structures and Their Relationship with Environmental Factors in Rivers Supplied with Different Water Sources	HOU Ying, LI Xin, BAI Ling, <i>et al.</i>	(5616)
Adsorption of Typical Quinolone Antibiotics by Manganese Oxide-Modified Biochar Substrate and Its Application in CWs	GAO Hui-zi, TIAN Wei-jun, ZHANG Zi-yu, <i>et al.</i>	(5627)
Effect of KOH Activation on the Properties of Biochar and Its Adsorption Behavior on Tetracycline Removal from an Aqueous Solution	XU Jin, MA Yi-fan, YAO Guo-qing, <i>et al.</i>	(5635)
Preparation of Modified Attapulgite-supported Iron Sulfide and Its Adsorption Mechanism for Mo(VI)	LIAN Jian-jun, WU Hong-yan, YE Tian-ran, <i>et al.</i>	(5647)
Removal of Cr(VI) from Water Using Green Synthesis Nanoscale Zero-Valent Iron Supported on <i>Eucalyptus</i> Biochar	LIU Qin-wen, DING Ai-zhong, LIANG Xin, <i>et al.</i>	(5657)
Removal of Pb(II) and Zn(II) from Wastewater via Magnesium-Modified Diatomite Product Recovering Nitrogen and Phosphorus	WU Ying-qi, XIA Peng, LI Yuan, <i>et al.</i>	(5667)
Adsorption of Methylene Blue on Sodium-Modified Bentonite from Southern Part of Henan	CHENG Fei-peng, YANG Dong-liang, CHANG Le, <i>et al.</i>	(5676)
Compound Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Groundwater of Typical Industrial Lands in Shanghai	LI Xiao-man, LI Qing-qing, YANG Jie, <i>et al.</i>	(5687)
Pollution Evaluation and Quantitative Traceability Analysis of Heavy Metals in Farmland Soils Around the Gangue Heap of a Coal Mine in Chongqing	MA Jie, LIU Ping, LIU Jin-zhao, <i>et al.</i>	(5698)
Species Distribution and Source Analysis of Heavy Metals in Surrounding Soil Around Typical Petroleum Sites	GONG Jian, HE Lian-sheng, LI Qiang, <i>et al.</i>	(5710)
Source Analysis of Heavy Metals in Farmland Soil Around a Waste Incineration Plant Based on PMF Model	ZHANG Tian-yu, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i>	(5718)
Ecological and Health Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil of Xianghe County	CHEN Yu-jia, QU Xing-chen, ZHANG Bin, <i>et al.</i>	(5728)
Comparison of the Concentrations, Sources, and Distributions of Heavy Metals in Topsoils of the Junction Zone of Geological Tectonic Units: A Case Study in Chengkou County, China	LIU Yong-lin, WU Mei, LIU Rui, <i>et al.</i>	(5742)
Occurrence, Source Analysis, and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Plants and Soils from Typical Areas of Xinjiang, China	YANG Bei-chen, XIE Qi-lai, ZHENG Qian, <i>et al.</i>	(5751)
Effects of Strengthening <i>Pennisetum purpureum</i> Schumacher with Fertilizer Application Strategy on Remediation of Severely Cadmium-polluted Farmland	WU Gang-fan, ZHOU Hang, TANG Qi, <i>et al.</i>	(5761)
Tobacco Stem Biochar and Phosphate Application Decrease Wheat Grain Cadmium Accumulation in Alkaline Soils	YANG Yan-zheng, ZHANG Yin-ge, LI Chang, <i>et al.</i>	(5769)
Polyamine-producing Bacteria Improve Cd Resistance and Reduce Uptake of Cd in Wheat	JI Ming-fei, WU Xue-jiao, LI Xiao-zhe, <i>et al.</i>	(5778)
Effect and Mechanism of Sulfate-Reducing Bacteria on the Passivation of Heavy Metals in Alkaline and Acidic Agricultural Soils	GAO Yu, LIU Yu-chen, GUO Xiao-fang, <i>et al.</i>	(5789)
Effects of <i>Bacillus megaterium</i> on Soil Physicochemical Properties and Its Effects on the Accumulation of Cd and Zn in Plant	WANG Ping, LI Yi-man, WANG Xue-jia, <i>et al.</i>	(5798)
Soil Fungal Community Structure and Function Diversity of Different Land Use Types in the Waterfront Area Along the Jialing River	ZHU Lan-ping, XU Fei, WANG Jia-ying, <i>et al.</i>	(5808)
Effect of Biochar Application on Biological Nitrogen Fixation in Double Cropping Paddy Field in Northern Hainan	ZHAO Yan, YUAN Xin-sheng, TANG Rui-jie, <i>et al.</i>	(5819)
Photodegradation Behaviors and Toxicity Characteristics of Trimethoprim into Different Environmental Media with the Presence of g-C ₃ N ₄	ZHU Na, WANG Xing-yang, JIAO Jun-heng, <i>et al.</i>	(5832)
Analysis of Provincial CO ₂ Emission Accounting in China Under the Carbon Peaking and Carbon Neutrality Goals	YANG Bai, QIN Guang-peng, WU Qin	(5840)
Temporal and Spatial Differences in Carbon Conduction and Prediction Effect of Land Type Transfer in Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration	YANG Xu, LIU Xian-zhao	(5850)
Environmental Benefit Analysis of Municipal Solid Waste Typical Disposal Scenarios in Zhangjiagang City Based on Classification	ZHANG Tao, ZHENG Jun-wen, SUN Yu-can, <i>et al.</i>	(5861)