

百方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.12
第40卷 第12期

目次(卷终)

研究报告

京津冀秋冬季 PM_{2.5} 污染概况和预报结果评估 朱媛媛,高愈霄,刘冰,王晓彦,朱莉莉,许荣,汪巍,丁俊男,李健军,段小丽(5191)

2016~2017年采暖期华北平原东部 PM_{2.5} 组分特征及来源解析 张逸琴,王杰,高健,徐仲均,车飞,马彤,杨艳,刘素,闫璐璐(5202)

霾不同发展阶段下污染气体和水溶性离子变化特征分析 王振彬,刘安康,卢文,杨晓旻,王红磊,陈魁,夏丽(5213)

上海郊区家庭妇女 PM_{2.5} 重金属组分暴露水平、来源与健康风险 罗燃燃,戴海夏,张蕴晖,乔利平,马英歌,周敏,夏斌,朱清扬,赵迎亚,黄成(5224)

固定污染源可凝结颗粒物测量方法 蒋靖坤,邓建国,王刚,张莹,李妍菁,段雷,郝吉明(5234)

家具企业挥发性有机物排放特征及其环境影响 张嘉妮,曾春玲,刘锐源,姚懿娟,柯云婷,范丽雅,叶代启(5240)

抗生素企业 VOCs 排放清单及影响范围模拟 竹涛,吕怡蓉,边文璟,牛文凤,袁前程,段二红,于洋,林军(5250)

新乡市机动车排放对道路灰尘中重金属与多环芳烃污染的影响 李琦路,吴锦涛,张颖,孙玉静,乔泓钦,张子伟,裴梦园,张孟琼,任明浩(5258)

成都市道路积尘中全氟化合物的污染特征及暴露风险评估 方淑红,朱和祥,叶芝祥,印红玲,孙静(5265)

祁连山北坡中段降水稳定同位素特征及水汽来源分析 张百娟,李宗省,王昱,李永格,吕越敏,袁瑞丰,桂娟(5272)

长江南京段水源水中抗生素的赋存特征与风险评估 封梦娟,张芹,宋宁慧,卜元卿,杨正标,刘艳华,郭瑞昕,陈建秋,张圣虎(5286)

夏秋季混凝剂对复合锰氧化膜去除地表水中氨氮和锰的影响 程丽杰,黄廷林,程亚,张莎莎,阮昭意,卢磊(5294)

浙江省 H 市供水系统消毒副产物及其健康风险评价 刘俊萍,于建全,李青松,马晓雁,杨玉龙,贾佳(5302)

三峡库区城镇化背景下河流 DOM 的吸收及荧光光谱特征 陈昭宇,李思悦(5309)

川西高原河流水体 CDOM 的光化学降解特性 刘堰杨,孙辉,刘琛,王小沁(5318)

三峡库区典型紫色土小流域径流及氮磷流失特征 曹瑞霞,刘京,邓开开,先宇,王伟,方芳,欧阳文娟,郭劲松(5330)

九龙江流域河流磷输出对土地利用模式及水文状况的响应 黄亚玲,唐莉,黄金良,肖才荣(5340)

不同尺度土地利用方式对鄱阳湖湿地水质的影响 方娜,刘玲玲,游清徽,田娜,吴燕平,阳文静(5348)

太湖草藻型湖区磷赋存特征及其环境意义 耿雪,文帅龙,孙培荣,徐楚天,李大鹏,黄勇(5358)

太湖竺山湾沉积物碳氮磷分布特征与污染评价 方家琪,祁闯,张新厚,韩睿明,黄和笑,王卓森,王国祥(5367)

降雨强度对洱海流域凤羽河氮磷排放的影响 李晓虹,雷秋良,周脚根,张亦涛,李影,胡万里,武淑霞,翟丽梅,王洪媛,刘宏斌(5375)

外源 Ca²⁺ 和 K⁺ 作用下河口区碱蓬水质净化效果和耐盐碱提高机制 吴丹,孙萍,陈广琳,陈友媛,彭昌盛(5384)

泽泻(*Alisma orientale*) 对全氟化合物的吸收和传输特征-浓度的影响 王团团,李贝贝,王赛,华佩,陈军,应光国(5394)

复合人工湿地中反硝化除磷作用的发生及其稳定性 刘冰,郑煜铭,李清飞,赵承美,魏巍,张凯(5401)

锆、镧和镧锆改性沸石添加控制底泥磷释放的对比 刘婷,赵钰颖,林建伟,詹艳慧,秦琴(5411)

生物炭结构性质对氨氮的吸附特性影响 陈梅,王芳,张德俐,易维明(5421)

溶解氧对悬浮与附着生长系统短程硝化反应的影响机制 王嗣禹,刘灵婕,王芬,季民(5430)

间歇恒定/梯度曝气对 SNAD 工艺启动的影响 李冬,刘志成,徐贵达,李帅,张杰(5438)

共基质模式下铁盐脱氮反应器的运行性能及微生物学特征 王茹,刘梦瑜,刘冰茵,赵治国,袁林江(5446)

阶梯曝气对城市污水好氧颗粒污泥系统的影响 李冬,魏子清,劳会妹,李帅,张杰(5456)

酵母菌降解胞外聚合物提升剩余活性污泥的脱水性能 俞心怡,向金豪,刘英,龚天翼,张彬辉,吕文洲(5465)

基于 GEE 的 1998~2018 年京津冀土地利用变化对生态系统服务价值的影响 娄佩卿,付波霖,林星辰,闭璐,马瑞雪,唐廷元(5473)

基于 MDS 与 TOPSIS 模型的滨海滩涂围垦区土壤质量评价 解雪峰,濮励杰,朱明,吴涛,许艳(5484)

淹水增加对闽江河口淡水潮汐湿地孔隙水地球化学特征及 CO₂ 和 CH₄ 排放通量的影响 李敬,黄佳芳,罗敏,刘育秀,谭季,朱爱菊,王声钰,仝川(5493)

养殖塘 CH₄ 排放特征及其影响因素 王娇,肖薇,张秀芳,张弥,张文庆,刘强,陈争,董保华,李旭辉(5503)

施肥对高粱地土壤呼吸及其温度敏感性的影响 严俊霞,张媛,焦晓燕(5515)

高硒高镉区土地安全区划方法 王锐,侯宛苓,李雨潼,余涛,陈娟(5524)

不同配比复合材料对农田镉污染土壤的修复效果 陈树兰,许晨阳,耿增超,王强,祝乐,龚园,拓卫卫(5531)

水铝钙石对不同镉污染农田重金属的钝化效果及机制 吴秋梅,刘刚,王慧峰,胡文友,黄标(5540)

狮子山矿区不同土地利用类型对土壤微生物群落多样性的影响 黄健,朱旭炎,陆金,孙雨,赵兴青(5550)

林地转型耕地对东北丘陵区白浆土 *cbbL* 细菌群落丰度和结构的影响 王蕊,吴宪,李刚,修伟明,王丽丽,张贵龙(5561)

粤港澳大湾区场地污染特征、治理修复与环境管理研究专辑

粤港澳大湾区污染场地土壤风险管控制度体系建设与思考 常春英,董敏刚,邓一荣,肖荣波,刘丽丽(5570)

粤港澳大湾区土壤污染问题计量及可视化分析 张宁,张盛,杨海超,张建通(5581)

城市生活垃圾填埋场的物质存量特征及其环境影响:以粤港澳大湾区为例 马仕君,周传斌,杨光,赵志岚,刘懿颀(5593)

粤港澳大湾区丘陵区带某电镀场地重金属污染特征与迁移规律分析 侯文隽,龚星,詹泽波,刘锋,黄子航,杨立宏,林晓琛(5604)

粤港澳大湾区典型化工场地苯系物污染特征及迁移规律 邓一荣,陆海建,董敏刚,程洲,庄长伟,肖荣波,钟音,彭平安(5615)

针铁矿-富里酸复合材料对铅镉污染土壤的钝化修复性能 刘千钧,李想,周阳媚,唐杰鹏,林亲铁,姚琨(5623)

广东大宝山矿区土壤植物体系重金属迁移过程及风险评价 陈洁宜,刘广波,崔金立,肖唐付(5629)

Hydrus-1D 模型在推导基于保护地下水的土壤风险控制值中的应用 林挺,罗飞,朱艳,杨坤,郝秀平(5640)

《环境科学》第 40 卷(2019 年)总目录 (5649)

《环境科学》征订启事(5233) 《环境科学》征稿简则(5285) 信息(5357, 5420, 5429)

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

侯文隽, 龚星*, 詹泽波, 刘锋, 黄子航, 杨立宏, 林晓琛

(广东工业大学土木与交通工程学院, 广州 510006)

摘要: 粤港澳大湾区电镀企业的数量、生产规模均居全国前列, 电镀生产排放的污染物造成该区电镀场地普遍存在土壤和地下水重金属污染现象, 调查并分析区域电镀场地土壤和地下水重金属污染特征及迁移规律是粤港澳大湾区该类场地安全再利用的必要工作. 在详细调查粤港澳大湾区丘陵地带某电镀场地土壤和地下水重金属污染现状的基础上, 定量分析了不同深度土壤、地下水中的重金属空间分布特征, 并结合场地水文地质条件探讨了粤港澳大湾区丘陵地带电镀场地土壤和地下水中的重金属迁移规律. 结果表明, 该电镀场地土壤和地下水已受到不同程度的重金属污染, 土壤中 Ni、Cr⁶⁺ 和 Cu 超标率依次为 20.5%、12.8% 和 2.7%; 地下水中 Ni、Pb 和 Cr⁶⁺ 超标率依次为 41.7%、33.3% 和 33.3%; 场区内重金属污染与电镀厂生产功能分区相对应, 说明重金属主要来源于电镀废物泄漏. 由于该场区填土层以下为渗透性较差的粉质黏土, 不利于重金属污染物向深部迁移, 因而重金属污染物主要集中在表层土壤; 但是在全风化花岗岩埋深较浅的电镀车间范围内, 土层渗透性增大, 重金属迁移深度显著增加, 其中 Cr⁶⁺ 由于酸性土壤的吸附作用较弱, 甚至出现了 10 m 深度的高浓度检出现象. 虽然场区浅层含水层渗透性较弱, 但是酸性土壤和地下水氧化环境有利于 Cr⁶⁺ 和 Ni 的迁移, 因而在地下水位埋深较浅和土壤重金属迁移深度较大的电镀车间出现了 Cr⁶⁺ 和 Ni 超标现象; 而粤港澳大湾区花岗岩中 Pb 含量背景值较高可能是造成场区地下水 Pb 超标的主要原因. 因此, 粤港澳大湾区丘陵地带电镀场地的 Ni、Cr⁶⁺ 和 Cu 主要集中在浅层土壤和地下水中, 区域广泛分布的低渗透黏土层在一定程度上阻隔了重金属的扩散迁移; 但是在土壤酸化和花岗岩埋深较浅的地区, 以及地下水以氧化环境为主的丘陵地带, Ni 和 Cr⁶⁺ 在土壤和地下水中的迁移深度将显著增加.

关键词: 电镀场地; 土壤; 地下水; 重金属污染; 迁移规律

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)12-5604-11 DOI: 10.13227/j.hjks.201906234

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

HOU Wen-juan, GONG Xing*, ZHAN Ze-bo, LIU Feng, HUANG Zi-hang, YANG Li-hong, LIN Xiao-chen

(School of Civil and Transportation Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The Guangdong-Hong Kong-Macau Greater Bay Area presents the highest number of electroplating corporations in China; some of them of very large scale. Electroplating emissions are the cause of widespread heavy metal contamination of both soil and groundwater in the Guangdong-Hong Kong-Macau Greater Bay Area. Hence, the reuse of electroplating sites in this area should be preceded by an analysis of heavy metal characteristics and migration in the soil and groundwater. We performed such analyses in correspondence of a relocated electroplating site on the hilly lands of the Guangdong-Hong Kong-Macau Greater Bay Area, and quantitatively determined the spatial distribution of heavy metals. Moreover, we discussed the migration of heavy metals under the specific hydrogeological conditions of the area. The results showed that the soil and groundwater in correspondence of the electroplating factory were polluted by heavy metals in different degrees. The over-standard rates of Ni, Cr⁶⁺, and Cu in the soil were 20.5%, 12.8%, and 2.7%, respectively; meanwhile, those of Ni, Pb, and Cr⁶⁺ in the groundwater were 41.7%, 33.3%, and 33.3%, respectively. The pattern of heavy metal pollution reflected the functional division of the electroplating factory, the contaminants should have mainly derived from the leakage of electroplating wastes. A low-permeable silt clay layer located below the fill soil layer limited the downward transportation of heavy metals, which were hence mainly concentrated in the surface soils. However, in another area of the site characterized by shallow-buried and completely decomposed granite (having high permeability), heavy metals could be transported much deeper. The adsorption of Cr⁶⁺ by the soil tends to be weak in an acid-acidic environment, explaining the relatively high concentrations of Cr⁶⁺ recorded in the upper 10 m of soil. Although the conductivity of the shallow aquifers was low, the occurrence of acid soil and of an oxidizing water environment should have favored the transport of Cr⁶⁺ and Ni in the groundwater, causing high concentrations of Cr⁶⁺ and Ni in correspondence of the electroplating workshops (characterized by a relatively low water table and deep heavy metal transport depth). The excess of Pb in the groundwater probably resulted from the high Pb content of granite

收稿日期: 2019-06-28; 修订日期: 2019-09-04

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0903703); 国际岩溶研究中心国际合作项目暨自然资源部/广西岩溶动力学重点实验室开放课题基金项目(KDL201802)

作者简介: 侯文隽(1994~), 男, 博士研究生, 主要方向为环境岩土和水文地质, E-mail: 1111909003@mail2.gdut.edu.cn

* 通信作者, E-mail: xing_g@gdut.edu.cn

in the Guangdong-Hong Kong-Macau Greater Bay Area. Overall, we observed high concentrations of Ni, Cr⁶⁺, and Cu in the shallow soil and groundwater located in correspondence of the electroplating site on the hilly lands of the Guangdong-Hong Kong-Macau Greater Bay Area. The presence of low permeable clay restricted the downward diffusion of heavy metals. However, in the presence of acid soil and shallow buried granite, or of oxidized groundwater, the migration depth of Ni and Cr⁶⁺ was significantly higher.

Key words: electroplating site; soil; groundwater; heavy metal contamination; migration

粤港澳大湾区电镀企业的数量、生产规模、技术水平及产品质量等方面都处于国内前列,五金、PCB和电子元件的电镀加工在粤港澳大湾区尤为蓬勃,常见的有酸铜-镍-铬、镍铁-铬、多层镍铬、镀锌和PCB镀铜等^[1~6]。电镀三废通常含有锌、铜、镍、铬、铁、镉和铅等重金属,这些污染物质的下渗或处理不当导致重金属元素在环境中迁移和转化,最终将进入并累积于土壤和地下水中,直接或间接地危害着人体健康^[7~10]。粤港澳地区的电镀企业数量多、规模小、分布范围广且分散,缺乏统一规划^[5, 11, 12],加上企业管理不规范、偷排、漏排与管道泄漏等原因,粤港澳大湾区多处电镀场地土壤条件已发生改变并造成严重的重金属污染,人体健康风险非常高^[7, 13~17]。污染场地的土壤重金属污染也导致了场区及其周边地下水重金属污染,地下水污染范围和程度受区域水文地质条件控制^[18~24]。

近几年,广东省对电镀三废进行了大量的整治工作,有效地控制了其对环境的污染,其中对搬迁电镀场地进行重金属修复后安全再利用是重要的工作内容^[5, 25]。但是,现有粤港澳大湾区电镀场地的研究主要是针对场地土壤重金属污染特征及健康风险影响评估,对区域水文地质条件下土壤和地下水中重金属迁移规律的认识不够深入。因此,本文以粤港澳大湾区丘陵地带某电镀厂场地为研究对象,在场地土壤和地下水重金属污染现状调查的基础上,定量分析了电镀产业相关重金属在土壤和地下水中的空间分布特征,结合粤港澳大湾区丘陵地带特殊水文地质条件,探讨了该电镀场地重金属污染物在土壤和地下水中的迁移规律,以期为粤港澳大湾区丘陵地带电镀场地的重金属污染调查和修复利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 电镀场地概况

电镀场地位于江门市东北部,自2002年建成到2012年停止运营,根据该地区的城市总体规划,该场地未来土地利用方式主要为二类居住用地,但是场地土壤和地下水污染现状尚不明确,污染修复工作无法开展,严重制约其安全再利用。电镀场地占地面积约34 000 m²,运营期间主要承接镀铬、镀镍和镀铜等多种电镀业务,厂区分为4个电镀车间、污水处理站和办公等配套设施区,如图1所示。

电镀场地北部有残丘,整体地势北高南低。根据岩土勘察报告,场地内第四系(Q)土层自上而下分为:①人工填土层,包括素填土和杂填土,层厚1.2~4.7 m,渗透性中等;②粉质黏土,层厚1.0~4.5 m,渗透性较差;③淤泥质土,层厚1.5~5 m,渗透性较差;④全风化花岗岩,层厚较厚,渗透性较好,场区内普遍埋深较深,在电镀车间4内埋深较浅(2~3 m);⑤花岗岩基岩。电镀场地浅层地下水主要赋存在填土层、冲积层和残积层中,地下水埋深较浅(小于4 m),深层地下水是赋存在花岗岩中的基岩裂隙水,埋深较大,二者之间以淤泥质土和粉质黏土为隔水层,场地内地下水整体自西北往东南流,排泄至场地南侧的河流。

1.2 场地污染调查方法

1.2.1 监测点位布设

根据《场地环境监测技术导则》(HJ 25.2-2014)以及相关工作指南的要求,调查采样采用系统网格布点法和判断加密布点法相结合的方式布设采样点,根据区域地勘资料及其周边的水文地质特征,调查采样共布置土壤监测点80处,初期调查采集179个土样,后期针对出现超标现象的监测点补充取样186个土壤,设置地下水监测点12处,采集12个地下水样品,土壤和地下水监测点位见图1。土壤和地下水主要检测了铜(Cu)、镍(Ni)、锌(Zn)、铅(Pb)、镉(Cd)、砷(As)、汞(Hg)和六价铬(Cr⁶⁺)的含量,检测方法执行行业相关国家标准^[26~32]。

1.2.2 评价依据

土壤中Cu、Ni、Zn和Pb等筛选值采用《土壤重金属风险评价筛选值-珠江三角洲》(DB 44/T1415-2014)中建设用地-居住和公共用地方式下的土壤污染风险筛选值,Cr⁶⁺采用《北京市场地土壤环境风险评价筛选值》(DB 11/T811-2011)中住宅用地污染土壤筛选值。地下水筛选值采用《地下水水质标准》(GB/T 14848-2017)中的Ⅲ类地下水的标准限值。

2 结果与分析

2.1 重金属污染调查结果

2.1.1 土壤

土壤中重金属(Cu、Cr⁶⁺、Ni、Zn、Pb、Cd、As和Hg)在所有样品中均有不同程度的检出(表1),其中Cu、Cr⁶⁺和Ni在部分样品中的检测结果超过对

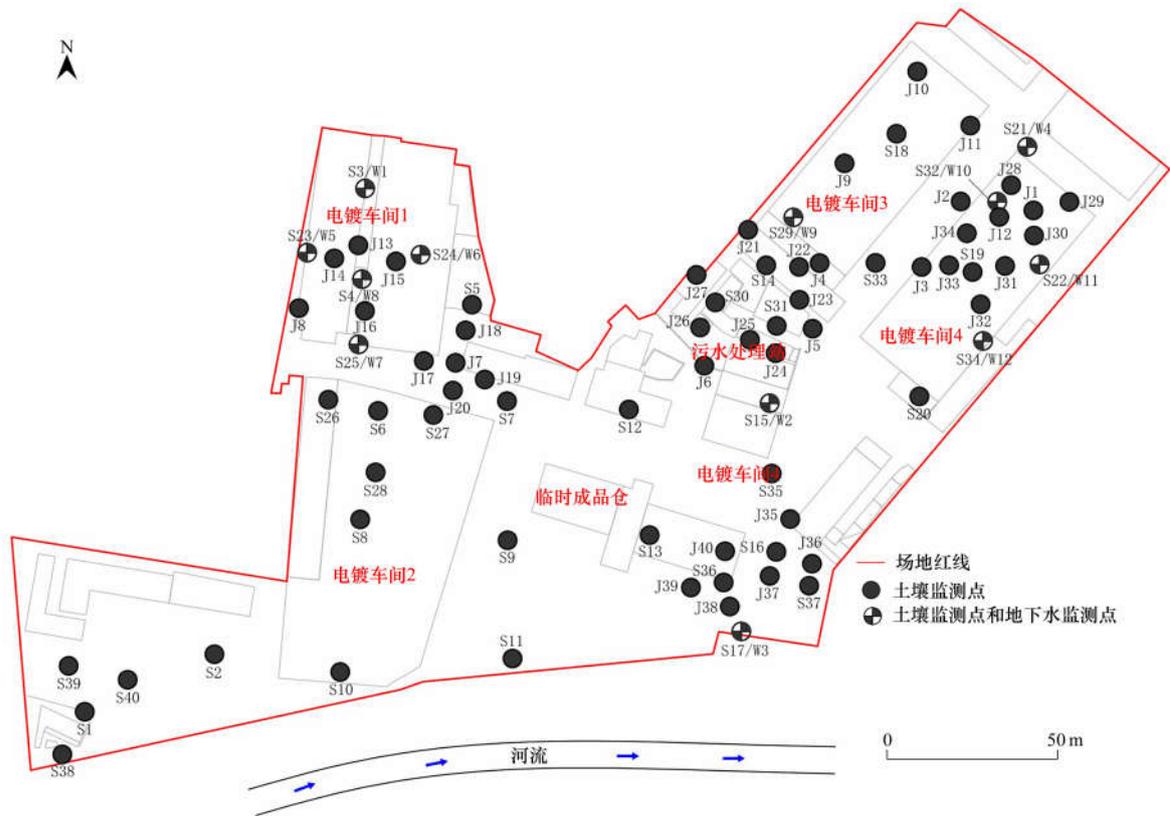


图1 土壤和地下水重金属监测点位示意

Fig. 1 Map showing the points in which we analyzed the level of heavy metal pollution (in soil and groundwater)

表1 土壤重金属监测结果统计

Table 1 Statistics of heavy metal contents in the soil samples

重金属	样品量/个	检出率/%	最大值 /mg·kg ⁻¹	平均值 /mg·kg ⁻¹	筛选值 /mg·kg ⁻¹	超标率/%	最大超标倍数 /倍
Cu	365	100	8 140	78	300	2.7	27
Cr ⁶⁺	365	50.7	1 573	61	30	12.8	52.5
Ni	365	98.3	3 374	146	150	20.5	22.5
Zn	179	100	160	38.6	500	0	—
Pb	179	100	294	58.1	300	0	—
Cd	365	100	2.54	0.14	10	0	—
As	179	100	27.8	3.57	10	0	—
Hg	179	100	1.22	0.064	4	0	—

应的筛选值, 超标率依次为 2.7%、12.8% 和 20.5%, 最大超标倍数分别为 27、52.5 和 22.5 倍。

2.1.2 地下水

地下水中重金属 (Cu、Cr⁶⁺、Ni、Zn、Pb、Cd、As

和 Hg) 在所有样品中均有检出 (表 2), 其中 Cr⁶⁺、Ni 和 Pb 在部分样品中的浓度超过对应的筛选值, 超标率依次为 33.3%、41.7% 和 33.3%, 最大超标倍数分别为 1 920、45 750 和 35.8 倍。

表2 地下水重金属监测结果统计

Table 2 Statistics of heavy metal contents in the groundwater samples

重金属	样品量/个	检出率/%	最大值 /μg·L ⁻¹	平均值 /μg·L ⁻¹	筛选值 /μg·L ⁻¹	超标率/%	最大超标倍数 /倍
Cu	12	83.3	14.3	5.34	1 000	0	—
Cr ⁶⁺	12	50	96 000	20 433.25	50	33.3	1 920
Ni	12	100	915 000	76 297.53	20	41.7	45 750
Zn	12	58.3	39.9	15.29	1 000	0	—
Pb	12	83.3	358	44.97	10	33.3	35.8
Cd	12	91.7	3.51	0.83	5	0	—
As	12	100	2.80	1.10	10	0	—
Hg	12	33.3	0.47	0.19	1	0	—

2.2 场地重金属污染分布特征

根据电镀场地调查结果可知,场地内土壤和地下水已受到不同程度的重金属污染,场地土壤中的超标重金属包括 Cu、Cr⁶⁺ 和 Ni,地下水中的超标重金属包括 Pb、Cr⁶⁺ 和 Ni. 本节仅关注出现超标现象的重金属元素,即不同深度土壤中的 Cu、Cr⁶⁺ 和 Ni,地下水中的 Pb、Cr⁶⁺ 和 Ni 的空间分布特征.

2.2.1 土壤重金属污染

土壤重金属污染主要分布在电镀车间 1、电镀车间 2、电镀车间 4、污水处理站和废水排放渠管沿线(如图 2~5),但是不同重金属元素的空间分布特征不同.

(1)pH 电镀场地土壤 pH 在浅层(0~1 m)范围内主要表现为碱性[图 2(a)],向深部过渡,土壤酸性增强,表层碱性土壤主要分布在电镀车间 1、电镀车间 2 和污水处理站,酸性土壤分布在电镀车间 4[图 2(a)和 2(b)]. 2 m 以下深度土壤 pH 值随深度的增加呈现不断减小的趋势,深度超过 4 m 的场区土壤 pH 约半数小于 5,说明深部土壤以酸性土为主[图 2(b)~2(e)].

(2)Cu 污染 Cu 污染主要位于 0~2 m 填土层范围内,深度 2 m 以上的 Cu 污染浓度均低于筛选值[图 3(a)~3(e)]. 场区范围内 Cu 共有 9 处监测点存在超标现象,最大污染浓度(8140 mg·kg⁻¹)的深度达 1.7 m,集中分布在电镀车间 1 西南角、电镀车间 2 和污水处理站[图 3(a)和 3(b)]. 电镀车间 1 和电镀车间 2 的 Cu 污染主要是在 0~1 m 的填土范围内,检测点超标分别有 2 处和 1 处;污水处理站的 Cu 污染分布范围较大,影响深度最深,最大污染浓度和倍数分别为 2520 mg·kg⁻¹ 和 8.4 倍[图 3(a)和 3(b)].

(3)Cr⁶⁺ 污染 Cr⁶⁺ 污染在所有深度土壤中均有体现,且分布但较零散[图 4(a)~4(e)]. 污水处理站有 1 处轻度的 Cr⁶⁺ 污染(42 mg·kg⁻¹),深度为 0.3 m[图 4(a)]. 电镀车间 1 内有 2 处监测点存在超标现象,对应的最大污染浓度为 345 mg·kg⁻¹ 和 46.5 mg·kg⁻¹,最大污染深度为 1.7 m[图 4(a)和 4(b)]. 电镀车间 4 内有多处监测点存在 Cr⁶⁺ 超标,最大污染浓度和倍数分别为 1573 mg·kg⁻¹ 和 52.4 倍,污染深度最大达 8.5 m,说明该区 Cr⁶⁺ 污染最严重[图 4(c)~4(e)].

(4)Ni 污染 场区土壤中 Ni 出现深部超标的现象最多,平面上主要集中在电镀车间 4,少数分布在电镀车间 1、污水处理站和排污渠[图 5(a)~5(e)]. 电镀车间 1 和排污渠范围内分别有 2 处和 3 处浅表土壤(0~1 m)存在 Ni 超标现象,其 Ni 超标

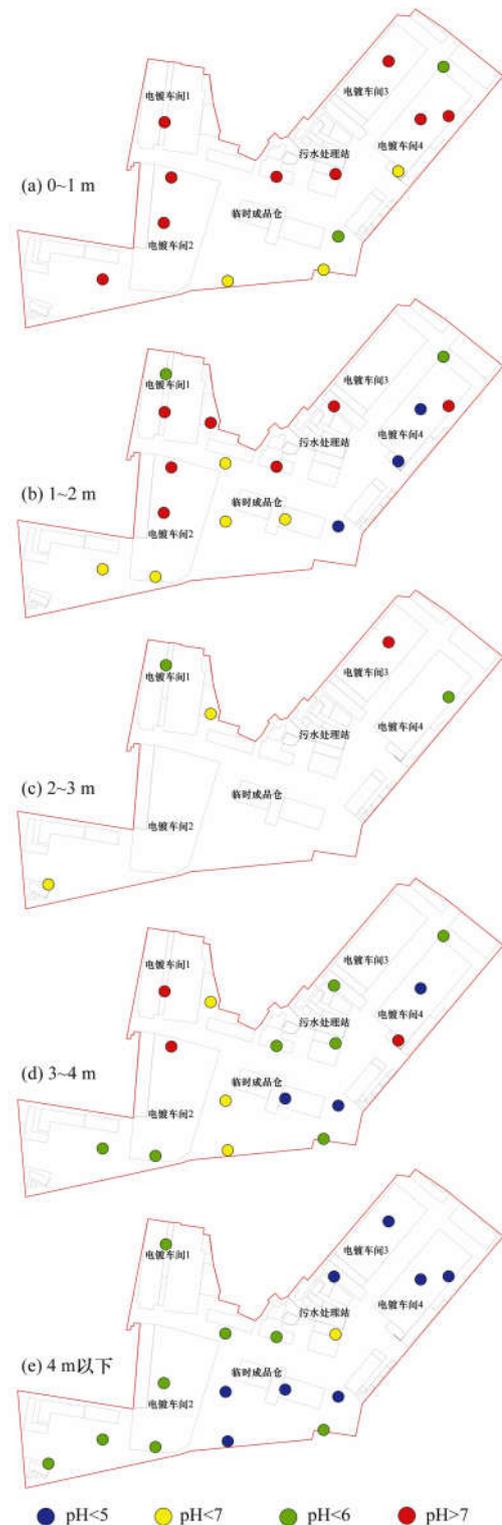


图 2 土壤 pH 空间分布

Fig. 2 The pH spatial distribution based on the soil samples

倍数均小于 5[图 5(a)]. 污水处理站在 0~2 m 范围内有 7 处土壤 Ni 超标,最大污染浓度和倍数为 1850 mg·kg⁻¹ 和 12.3 倍[图 5(a)和 5(b)]. 电镀车间 4 范围内不同深度的大部分监测孔均存在 Ni 污染现象,其污染最大深度达 9.5 m,表层土壤中(0~2 m)有 5 处超标倍数大于 10,说明该区 Ni 污染极其严重[图 5(a)~5(e)].

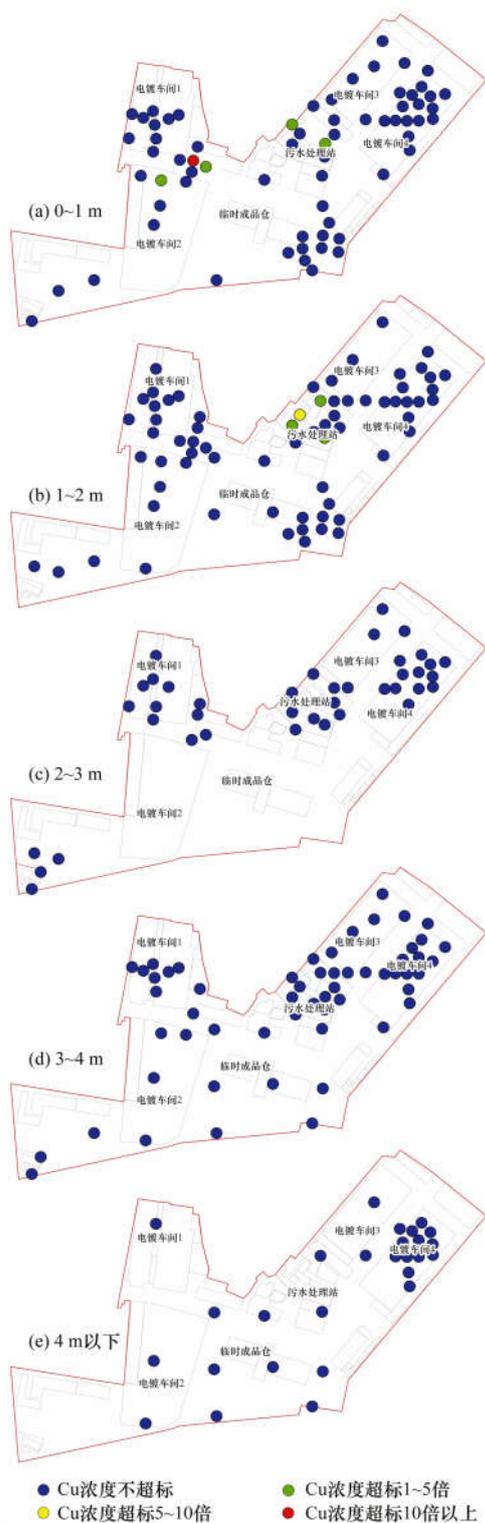


图3 土壤 Cu 浓度空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of Cu concentration based on the soil samples

综上所述,按照电镀场地土壤重金属污染面积、浓度和深度,3种重金属元素污染程度由高到低依次为: Ni > Cu > Cr⁶⁺。

2.2.2 地下水重金属污染

(1) pH 场区地下水 pH 值为 6.23 ~ 7.87, 除排污渠和电镀车间 4 的 2 处地下水 pH 小于 6.5, 其

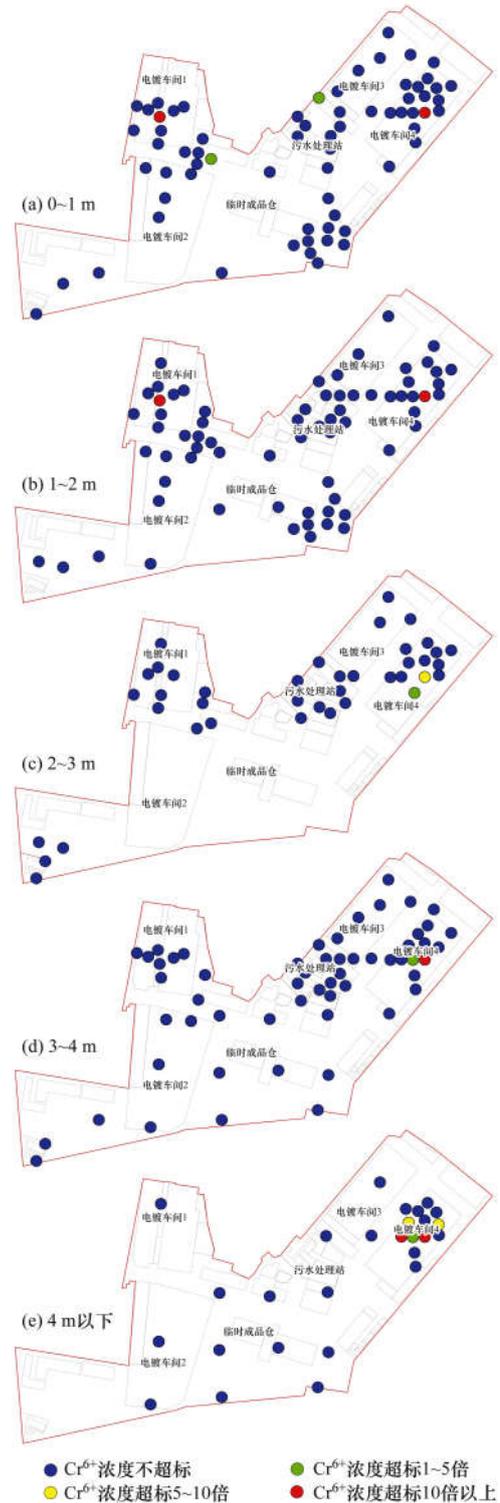


图4 土壤 Cr⁶⁺ 浓度空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of Cr⁶⁺ concentration based on the soil samples

余各处地下水 pH 均满足地下水 III 类质量标准[图 6 (a)]. 电镀车间 1 范围内的地下水以碱性为主, 而在电镀车间 4 范围内主要为酸性地下水[图 6 (a)].

(2) 重金属污染 地下水主要为 Cr⁶⁺、Ni 和 Pb 污染, 集中在电镀车间 1 和电镀车间 4[图 6 (b) ~ 6

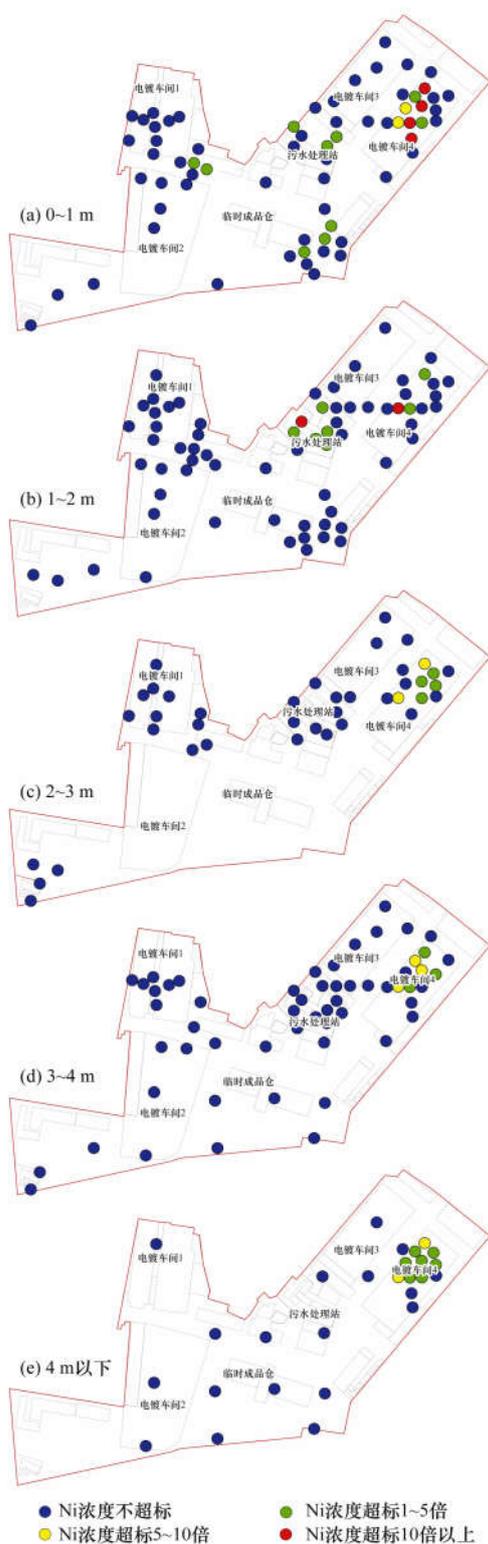


图5 土壤 Ni 浓度空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of Ni concentration based on the soil samples

(d)]. 地下水 Cr^{6+} 在电镀车间 1 和电镀车间 4 有超标现象, Cr^{6+} 最大浓度和超标倍数分别为 $96\ 000\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 1 920 倍[图 6 (b)]. 电镀车间 1 和电镀车间 4 分别有 2 处和 3 处地下水被 Ni 污染, 其中电镀车间 1 范围内的 Ni 浓度为 $24.3\sim 58.1\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 超

标倍数为 1.2~2.9 倍, 电镀车间 4 内的 Ni 超标倍数都超过 5 倍, 有 2 处超标倍数大于 10 倍, 最大 Ni 浓度和超标倍数达到 $915\ 000\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 45 750 倍[图 6 (c)]. 电镀车间 1 和电镀车间 4 范围内各有 2 处地下水出现了土壤中不超标的 Pb 超标现象, 其中电镀车间 1 的 Pb 浓度为 $18.9\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $18.5\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 超标倍数均小于 5 倍; 而电镀车间 4 的 Pb 浓度为 $25.9\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $358\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 最大超标倍数为 35.8 倍[图 6 (d)].

按照电镀场区地下水污染情况, 3 种重金属对地下水的污染程度由高到低依次为: $\text{Ni} > \text{Cr}^{6+} > \text{Pb}$.

3 讨论

粤港澳大湾区中南部为三角洲平原, 东、西和北三面主要以低山丘陵为主, 地表水系发育. 区域地层从震旦系至第四系均有出露, 其中丘陵地区以火成岩和沉积岩类为主, 平原地区以松散堆积物为主, 地下水类型则分别为基岩裂隙水和松散岩类孔隙水为主^[33~35]. 粤港澳大湾区丘陵地带地下水以垂直迁移为主, 具有埋深浅、径流途径短、以氧化环境为主等特点. 平原地带在第四纪沉积过程中经历了河流相-三角洲相的 3 次旋回, 因而在松散岩类孔隙水垂向上分为两个含水层, 地下水具有水位埋深较浅、地下径流条件差、封闭条件好、以还原环境为主等特点^[35~38]. 因此, 在讨论粤港澳大湾区电镀场地重金属在土壤和地下水中的污染成因及迁移规律时, 不仅要结合电镀场区产品工艺和生产功能分区, 还要根据目标场地的特定水文地质条件分析.

3.1 土壤重金属污染成因及迁移规律

由电镀场地土壤重金属监测结果的空间分布特征可知, 土壤重金属超标点区域与电镀厂生产功能区是对应的, 笔者在调查时发现电镀车间有拆迁建筑物碎片, 污水处理站和排水渠也已拆除并回填完毕, 因此场区浅表土壤中的重金属污染物可能来源于拆迁或生产废水下渗. 本文选取存在重金属污染的各个生产区土壤重金属监测剖面分析不同重金属元素在电镀场地土壤中的迁移规律, 如图 7 所示. 电镀车间 1、污水处理站和排水渠的重金属污染主要集中在表层土壤, 其原因是场区填土之下为冲积成因的粉质黏土, 渗透性较差, 不利于重金属污染物进一步下渗[图 7 (a)~7(d)和 7(g)~7(h)]. 但是, 电镀车间 4 范围内的深层土壤也存在不同程度的重金属污染, 其原因是电镀车间 4 下部花岗岩风化层埋深较浅(约 2~3 m), 岩土渗透性较黏土增加, 有利于重金属污染物向下迁移[图 7 (e)和 7(f)]. Ni、Cu 浓度均随土壤深度增加表现出污染物浓度递减

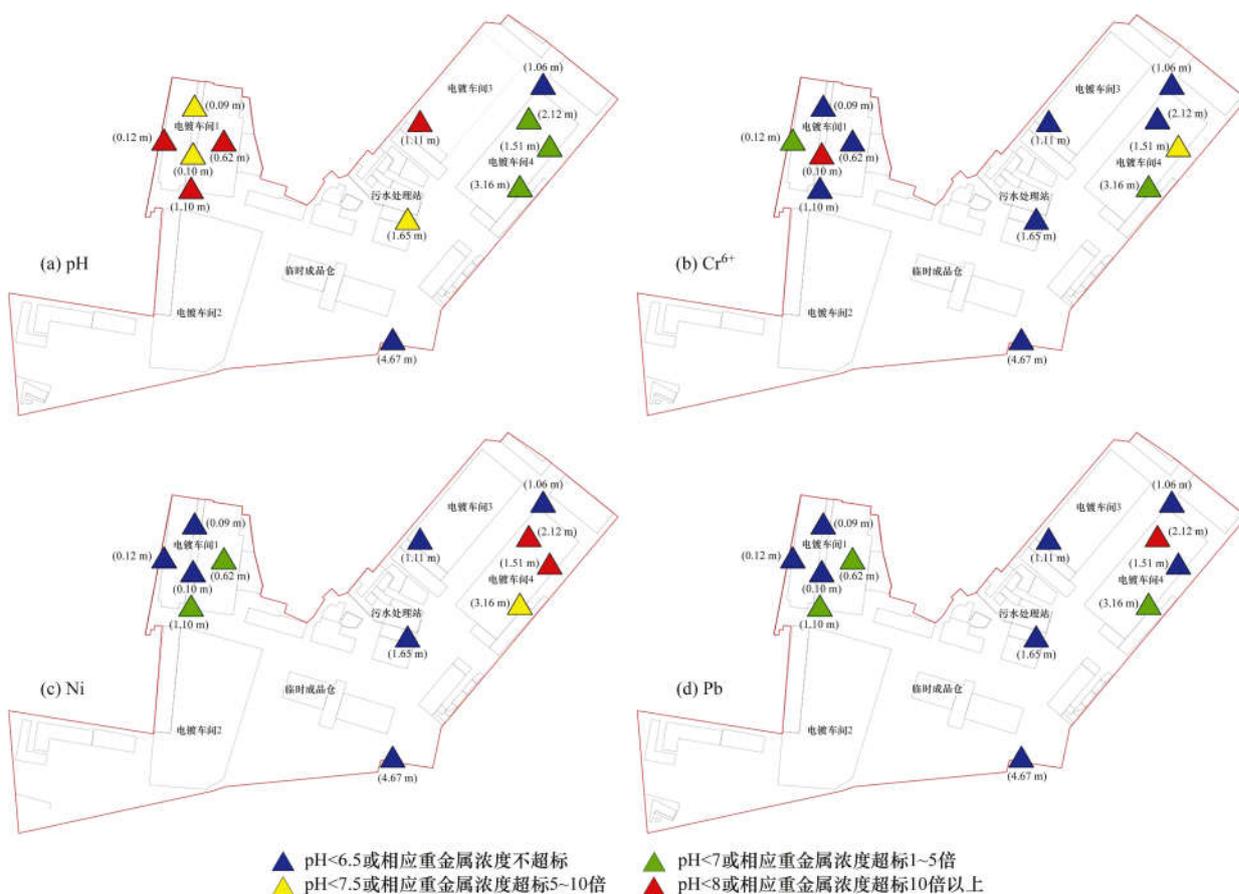


图 6 地下水 pH 和重金属浓度空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of pH and heavy metal concentration based on the groundwater samples

的趋势,但是, Cr^{6+} 在电镀车间 4 出现了深部的高浓度检出现象[图 7(f)]. 有研究表明,土壤对 Cr^{6+} 的吸附作用受到地下水的 pH 影响,地下水 pH 在 2 ~ 6.5 时的土壤 Cr^{6+} 吸附量随 pH 增加而增加,随后随地下水 pH 增加而减小,在 pH 为 7 时,土壤对 Cr^{6+} 的吸附量已很少^[39, 40]. 本电镀场地地下水 pH 多处于 6.5 ~ 7.5 之间,因此土壤对 Cr^{6+} 的吸附量较小,加上 Cr^{6+} 易溶于水且具有较强的运移能力^[41, 42],有利于 Cr^{6+} 沿渗透性较好的全风化花岗岩向深部迁移,因而造成电镀车间 4 的深部 Cr^{6+} 高浓度检出现象.

3.2 地下水重金属污染成因及迁移规律

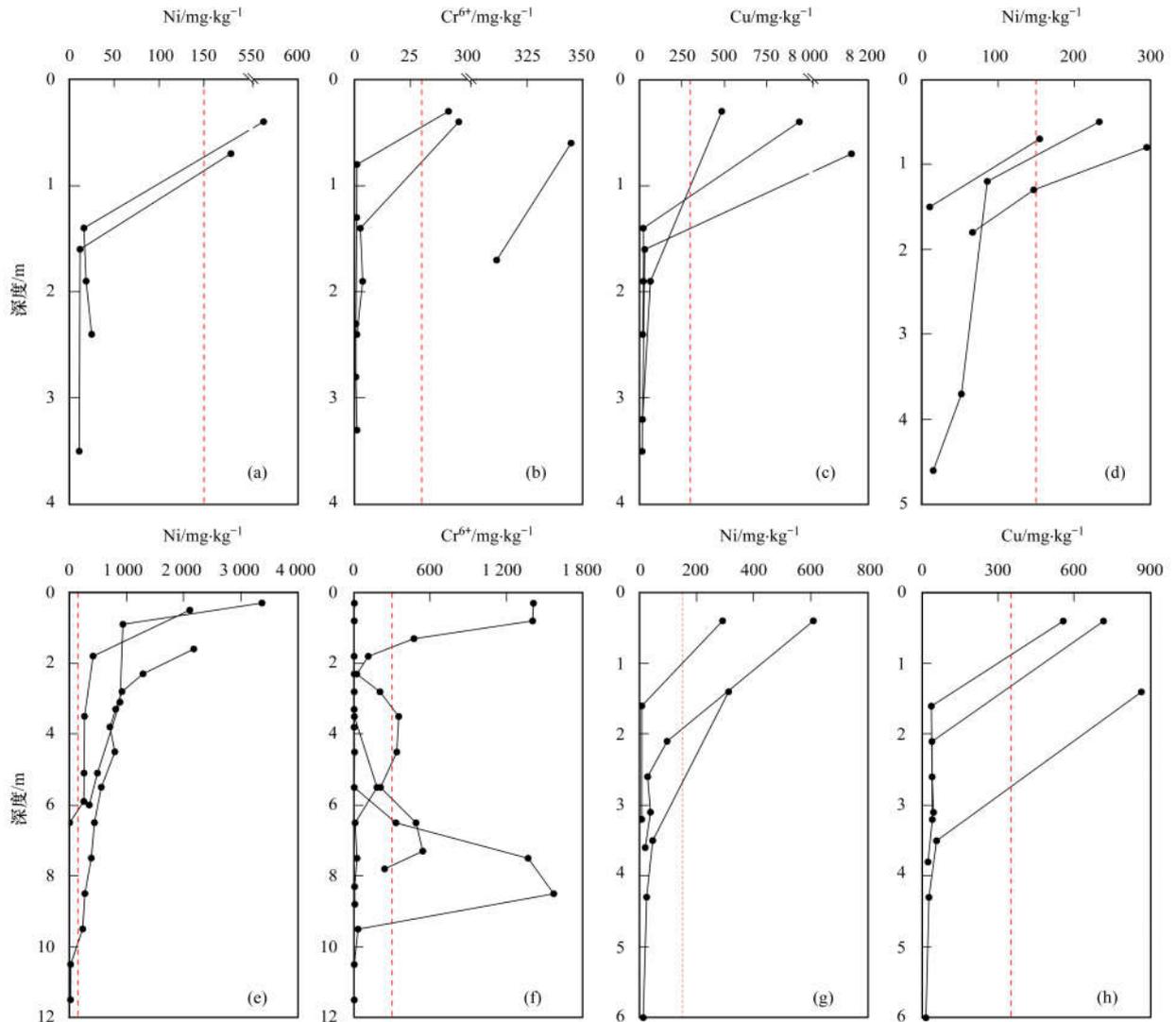
根据土壤和地下水重金属监测结果可知,土壤中重金属超标现象在电镀厂各功能区都存在,但是

地下水重金属污染只存在电镀车间 1 和电镀车间 4,其原因是电镀车间 1 的地下水埋深较浅,包气带厚度小,地下水防污性能较差(图 6),电镀车间 4 土壤中重金属污染物浓度高,迁移深度大,因而出现地下水重金属超标现象(图 3 ~ 5). 另外,土壤中重金属污染物为 Cu、 Cr^{6+} 和 Ni,而地下水重金属污染物为 Pb、 Cr^{6+} 和 Ni. 地下水中未发现 Cu 超标的原因是土壤中的 Cu 大部分以稳定有机络合物形式存在或吸附在土壤胶体表面,溶解度低,迁移能力差^[40, 43, 44]. 但是,在酸性土壤和氧化环境下, Cr^{6+} 和 Ni 主要以离子形式存在,不易被土壤吸附且具有较强的迁移能力^[35, 39, 40, 45]. 如表 3 所示,本次调查的电镀场地地下水耗氧量低,且几乎不存在亚硫酸盐、亚硝酸盐,表明该场地地下水环境为氧化环

表 3 地下水氧化还原环境表征指标¹⁾/mg·L⁻¹Table 3 Indexes considered for the oxidation-reduction environment in groundwater/mg·L⁻¹

指标	地下水监测点											
	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8	W9	W10	W11	W12
耗氧量	3.4	7.6	10.2	1.4	2	3.1	1.7	2.5	4.7	5.9	3.8	2.9
亚硫酸盐	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
硫酸盐	102	120	125	103	152	104	126	115	107	149	117	126
亚硝酸盐	ND	0.008	0.009	0.001	0.002	ND	0.004	ND	0.001	ND	ND	0.003
硝酸盐	0.42	0.27	1.29	1.4	1.36	2.54	0.98	1.57	1.36	2.04	1.42	2.41

1) ND 表示含量低于检出限



(a)、(b)和(c)表示电镀车间1,(d)表示排污渠,(e)和(f)表示电镀车间4,(g)和(h)表示污水处理站,红色虚线表示筛选值线

图7 Ni、Cr⁶⁺和Cu浓度随土壤深度变化曲线

Fig. 7 Concentrations of Ni, Cr⁶⁺, and Cu in the soil in relation to the sampling depth

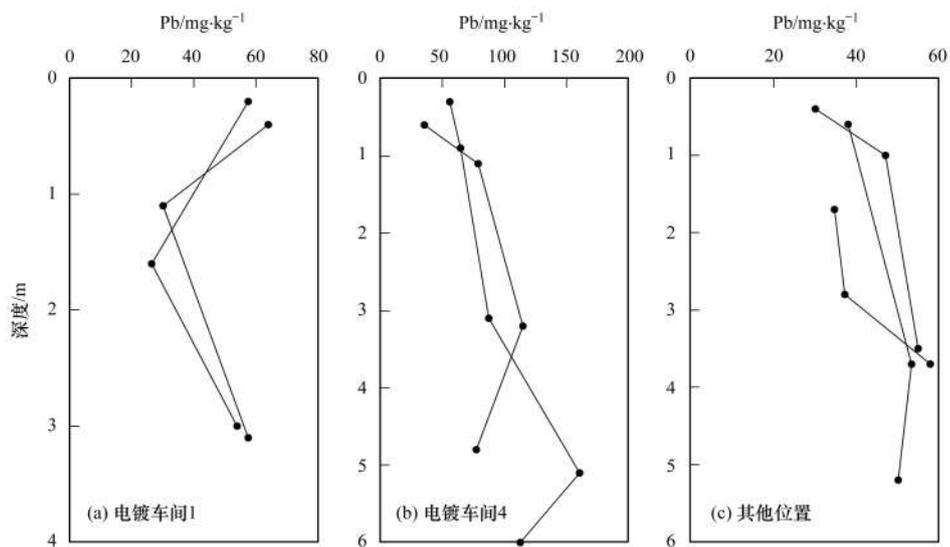


图8 Pb浓度随土壤深度变化曲线

Fig. 8 Pb concentration in the soil in relation to the sampling depth

境^[36,46],这与电镀场地位于粤港澳大湾区丘陵地带的水文地质特征是吻合的;同时,场区深层土壤为酸性土壤(图2),因而土壤中的 Cr^{6+} 和Ni能够向下迁移至地下水。

土壤调查结果表明Pb不存在超标现象,但是地下水中的Pb存在多处超标现象,本文利用土壤Pb监测数据来对比分析地下水Pb的污染原因。由图8可知,电镀场地内不同监测点的土壤Pb浓度均随土壤深度增加,且电镀车间4范围内的土壤Pb浓度较其他位置大,其原因是Pb在粤港澳大湾区花岗岩中背景值较高^[35],本场区土壤类型由浅至深依次为人工填土、粉质黏土、全风化花岗岩、花岗岩基岩,电镀车间4的全风化花岗岩埋深最浅,因此,土壤中Pb浓度随深度增加的本质是土壤成分发生了有规律的改变,且造成地下水位埋深浅(即电镀车间1)和土壤Pb浓度大(即电镀车间4)的位置出现Pb超标现象。本电镀场地浅层含水层渗透性较弱,水力梯度较小,地下水径流条件差,不利于地下水中重金属污染物随水流的扩散迁移^[35,40],这也是场区地下水重金属污染范围较土壤重金属污染范围小的主要原因。

4 结论

(1)粤港澳大湾区某电镀场地内存在土壤和地下水重金属污染现象,场地内土壤重金属超标率由高到低依次为Ni(20.5%)、 Cr^{6+} (12.8%)和Cu(2.7%),按照电镀场地土壤重金属污染浓度、深度和面积,3种重金属元素污染程度由高到低依次为:Ni>Cu> Cr^{6+} ;地下水重金属超标率由高到低依次为Ni(41.7%)、 Cr^{6+} (33.3%)和Pb(33.3%),3种重金属对地下水的污染程度由高到低依次为:Ni> Cr^{6+} >Pb。

(2)场区内土壤重金属污染与电镀厂生产功能区相对应,说明土壤重金属主要来源于电镀废物泄漏。由于场区填土层以下为渗透性较差的粉质黏土,不利于重金属污染物向下迁移,因而重金属污染主要集中在表层土壤。但是在全风化花岗岩埋深较浅的电镀车间4范围内,土层渗透性增加,使得土壤重金属迁移深度增加,其中Ni、Cu浓度均随土壤深度增加而减小, Cr^{6+} 由于酸性土壤的吸附作用较弱,出现了10m深度的高浓度检出现象。粤港澳大湾区丘陵地区花岗岩地层分布较广,因而应在类似电镀场地重金属污染调查时予以重视。

(3)场区的酸性土壤和地下水氧化环境使得Cu以络合物形式存在或被土壤吸附,但是有利于土壤 Cr^{6+} 和Ni的迁移,因而造成地下水中 Cr^{6+} 和Ni的高浓度检出。粤港澳大湾区花岗岩的Pb含量背景值

较高是电镀场地地下水出现Pb污染的主要原因。粤港澳大湾区花岗岩丘陵地带的浅层地下水以氧化环境为主,区内电镀场地污染调查应关注 Cr^{6+} 、Ni和Pb的深部污染。

参考文献:

- [1] 张炬,张三平. 三价铬电镀工艺研究的现状及方向[J]. 材料保护, 2011, 44(7): 43-46.
Zhang J, Zhang S P. Current status and development trend of trivalent chromium electroplating [J]. Materials Protection, 2011, 44(7): 43-46.
- [2] 田长春, 田秀明. 酸性光亮镀铜的原材料选择及工艺维护[J]. 表面技术, 2006, 35(3): 85-86.
Tian C C, Tian X M. Choice of raw material and craft maintenances in acid bright copper plating [J]. Surface Technology, 2006, 35(3): 85-86.
- [3] 孙俊, 陈晓东, 常文越, 等. 搬迁企业环境遗留问题分析及修复对策研究[J]. 环境保护科学, 2003, 29(4): 40-42.
Sun J, Chen X D, Chang W Y, et al. Analysing of environmental problems carry-over by the (move) transferred enterprises and research of restore measures [J]. Environmental Protection Science, 2003, 29(4): 40-42.
- [4] 刘海凤, 周长虹, 陈松. 酸性光亮镀铜工艺的研究[J]. 电镀与环保, 2005, 25(2): 16-18.
- [5] 梁国柱. 广东地区电镀业的现状与发展前景[J]. 材料保护, 2003, 36(1): 27-28.
- [6] 胡铁骑, 左丹江, 范宏义, 等. 中国电镀行业的发展与不平衡[J]. 材料保护, 2000, 33(2): 8-9.
- [7] 赵委托. 东莞地区电镀厂重金属污染与风险评价研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2016.
Zhao W T. Study on pollution and risk assessment of heavy metals surrounding electroplating plants in Dongguan [D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2016.
- [8] 陈志明, 王玉军, 于森, 等. 某电镀厂附近土壤铬污染及植物富集特征研究[J]. 中国农学通报, 2010, 26(19): 363-368.
Chen Z M, Wang Y J, Yu M, et al. Investigation for chromium-polluted soil and characteristics of plant accumulation nearby electroplating factory [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(19): 363-368.
- [9] Hang X S, Wang H Y, Zhou J M, et al. Risk assessment of potentially toxic element pollution in soils and rice (*Oryza sativa*) in a typical area of the Yangtze River Delta [J]. Environmental Pollution, 2009, 157(8-9): 2542-2549.
- [10] 杭小帅, 王火焰, 周健民. 电镀厂下游水体中重金属的分布特征及其风险评价[J]. 环境科学, 2008, 29(10): 2736-2742.
Hang X S, Wang H Y, Zhou J M. Heavy metals distribution characteristics and risk assessment of water below an electroplating factory [J]. Environmental Science, 2008, 29(10): 2736-2742.
- [11] 郑泽雄. 广东省电镀基地规划建设存在问题及对策探讨[J]. 电镀与涂饰, 2006, 25(8): 38-40.
Zheng Z X. Existing problems and countermeasures of planning and building of plating base in Guangdong province [J]. Electroplating & Finishing, 2006, 25(8): 38-40.
- [12] 王刚, 张路路, 尹倩婷, 等. 广东省电镀废水处理技术现状与达标分析[J]. 电镀与涂饰, 2014, 33(20): 891-895.
Wang G, Zhang L L, Yin Q T, et al. Current status of electroplating wastewater treatment technologies in Guangdong

- province and analysis on the compliance with the emission standard[J]. *Electroplating & Finishing*, 2014, **33**(20): 891-895.
- [13] 詹淑威, 潘伟斌, 曹英姿, 等. 三类工业污染场地重金属污染调查及评价[A]. 见: 第十届环境与发展论坛论文集[C]. 北京: 中华环保联合会, 联合国环境规划署, 2014. 7.
- [14] 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.
- [15] 林爱葵. 建立电镀园区, 推动电镀行业重金属污染防治——以江门市新会崖门定点电镀工业基地为例[J]. *环境*, 2012, (S1): 88-89, 92.
- [16] 李红艳, 黄雷, 张时伟, 等. 珠三角地区电镀厂土壤重金属形态分析[J]. *安徽农业科学*, 2016, **44**(36): 95-99.
Li H Y, Huang L, Zhang S W, *et al.* Speciation analysis of heavy metals in the soil of electroplating factories of the Pearl River Delta[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2016, **44**(36): 95-99.
- [17] 余葱葱, 赵委托, 高小峰, 等. 电镀厂周边地表水中重金属分布特征及健康风险评价[J]. *环境科学*, 2017, **38**(3): 993-1001.
Yu C C, Zhao W T, Gao X F, *et al.* Distribution characteristics and health risk assessment of heavy metals in surface water around electroplating factories [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(3): 993-1001.
- [18] 李云祺, 姚远, 庞练, 等. 基于 Visual Modflow 的西南矿区土壤地下水重金属污染评价[J]. *广东农业科学*, 2013, **40**(17): 168-169, 184.
Li Y Z, Yao Y, Pang L, *et al.* Assessment of groundwater heavy metal pollution in soil of southwest mining district based on Visual Modflow[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2013, **40**(17): 168-169, 184.
- [19] 雷鸣, 曾敏, 廖柏寒, 等. 某矿区土壤和地下水重金属污染调查与评价[J]. *环境工程学报*, 2012, **6**(12): 4687-4693.
Lei M, Zeng M, Liao B H, *et al.* Investigation and evaluation on heavy metal contamination in soils and groundwater of a mine zone[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2012, **6**(12): 4687-4693.
- [20] 关丽捷. 珠三角涉重金属企业存在环境管理问题及建议[J]. *资源节约与环保*, 2018, (8): 61.
- [21] Kumar M, Ramanathan A L, Tripathi R, *et al.* A study of trace element contamination using multivariate statistical techniques and health risk assessment in groundwater of Chhaprola Industrial Area, Gautam Buddha Nagar, Uttar Pradesh, India [J]. *Chemosphere*, 2017, **166**: 135-145.
- [22] Gong X, Chen Z H, Luo Z H. Spatial distribution, temporal variation, and sources of heavy metal pollution in groundwater of a century-old nonferrous metal mining and smelting area in China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, **186**(12): 9101-9116.
- [23] Fan C H, Chen Y C, Ma H W, *et al.* Comparative study of multimedia models applied to the risk assessment of soil and groundwater contamination sites in Taiwan [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **182**(1-3): 778-786.
- [24] 郭鹏然, 雷永乾, 周巧丽, 等. 电镀厂周边环境重金属分布特征及人体健康暴露风险评价[J]. *环境科学*, 2015, **36**(9): 3447-3456.
Guo P R, Lei Y Q, Zhou Q L, *et al.* Distribution characteristics of heavy metals in environmental samples around electroplating factories and the health risk assessment [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(9): 3447-3456.
- [25] 吴文晖, 邹辉, 朱岗辉, 等. 湘中某矿区地下水重金属污染特征及健康风险评估[J]. *生态与农村环境学报*, 2018, **34**(11): 1027-1033.
Wu W H, Zou H, Zhu G H, *et al.* Heavy metal pollution characteristics and health risk assessment of groundwater of a mine area in central Hunan [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2018, **34**(11): 1027-1033.
- [26] GB/T 17141-1997, 土壤质量 铅、镉的测定 石墨炉原子吸收分光光度法[S].
GB/T 17141-1997, Soil quality-Determination of lead, cadmium-Graphite furnace atomic absorption spectrophotometry [S].
- [27] GB/T 17139-1997, 土壤质量 镍的测定 火焰原子吸收分光光度法[S].
GB/T 17139-1997, Soil quality-Determination of nickel-Flame atomic absorption spectrophotometry[S].
- [28] GB/T 5750-2006, 生活饮用水标准检验方法[S].
GB/T 5750-2006, Standard examination methods for drinking water[S].
- [29] GB/T 17138-1997, 土壤质量 铜、锌的测定 火焰原子吸收分光光度法[S].
GB/T 17138-1997, Soil quality-Determination of copper, zinc-Flame atomic absorption spectrophotometry[S].
- [30] GB/T 22105-2008, 土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法[S].
GB/T 22105-2008, Soil quality-Analysis of total mercury, arsenic and lead contents in soils-Atomic fluorescence spectrometry[S].
- [31] U. S. EPA 3060A-1996, Alkaline digestion for hexavalent chromium[S].
- [32] U. S. EPA 7196A-1992, Cheomium, hexavalent (colorimetric) [S].
- [33] 陈培虹. 珠江三角洲地下水资源简介[J]. *人民珠江*, 1985, (1): 41-43.
- [34] 张昌延, 何江涛, 张小文, 等. 珠江三角洲高砷地下水赋存环境特征及成因分析[J]. *环境科学*, 2018, **39**(8): 3631-3639.
Zhang C Y, He J T, Zhang X W, *et al.* Geochemical characteristics and genesis analyses of high-arsenic groundwater in the Pearl River Delta [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(8): 3631-3639.
- [35] 张英. 珠江三角洲地区地下水环境背景值研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2011.
Zhang Y. Study on natural background levels in groundwater of Pearl River Delta[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2011.
- [36] 黄冠星, 孙继朝, 荆继红, 等. 珠江三角洲地区地下水铁的分布特征及其成因[J]. *中国地质*, 2008, **35**(3): 531-538.
Huang G X, Sun J C, Jing J H, *et al.* Distribution and origin of iron in groundwater of the Zhujiang delta[J]. *Geology in China*, 2008, **35**(3): 531-538.
- [37] 梁国玲, 孙继朝, 黄冠星, 等. 珠江三角洲地区地下水锰的分布特征及其成因[J]. *中国地质*, 2009, **36**(4): 899-906.
Liang G L, Sun J C, Huang G X, *et al.* Origin and distribution characteristics of manganese in groundwater of the Zhujiang River Delta[J]. *Geology in China*, 2009, **36**(4): 899-906.
- [38] 张英, 孙继朝, 黄冠星, 等. 珠江三角洲地区地下水环境背景值初步研究[J]. *中国地质*, 2011, **38**(1): 190-196.
Zhang Y, Sun J C, Huang G X, *et al.* A preliminary study of

- natural background levels of groundwater in the Zhujiang River Delta[J]. *Geology in China*, 2011, **38**(1): 190-196.
- [39] 黄顺红. 铬渣堆场铬污染特征及其铬污染土壤微生物修复研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009.
Huang S H. Characteristics of chromium pollution at chromium-containing slag site and chromium (VI) bioremediation in the contaminated soil [D]. Changsha: Central South University, 2009.
- [40] 王照宜. 污染场地铬、镍、铜、镉的垂向迁移及地下水可渗透反应墙修复技术[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
Wang Z Y. Vertical migration of Chromium, Nickel, Copper and Cadmium in contaminated sites and remediation technology of permeable reactive wall for groundwater[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [41] 张红娣, 熊昊, 孙强国. 黄石市某化工厂周围环境铬污染现状调查研究[J]. *公共卫生与预防医学*, 2009, **20**(4): 71-72.
- [42] 李培中, 吕晓健, 王海见, 等. 某电镀厂六价铬污染土壤还原稳定化试剂筛选与过程监测[J]. *环境科学*, 2017, **38**(1): 368-373.
Li P Z, Lü X J, Wang H J, *et al.* Screening of the reduction/stabilization reagent for Cr(VI) contaminated soil in a planting site and reaction process monitoring[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(1): 368-373.
- [43] 陈世俭, 胡霏堂. 土壤铜形态及有机物质的影响[J]. *长江流域资源与环境*, 1995, **4**(4): 367-371.
Chen S J, Hu A T. Effects of organic matter on fractionation and availability of copper in soil[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 1995, **4**(4): 367-371.
- [44] 谢正苗. 土壤中铜的化学平衡[J]. *环境科学进展*, 1996, **4**(2): 1-23.
Xie Z M. Chemical equilibria of copper in soils[J]. *Advances in Environmental Science*, 1996, **4**(2): 1-23.
- [45] 曾昭华. 长江中下游地区地下水中镍元素的背景特征及其形成的影响因素[J]. *环境科技*, 1998, (4): 12-16.
- [46] 庞园, 李志威, 张明珠. 广花盆地地下水三氮时空分布特征及影响因素分析[J]. *生态环境学报*, 2018, **27**(5): 916-925.
Pang Y, Li Z W, Zhang M Z. Analysis of spatial-temporal distribution and influencing factors of three-nitrogen in groundwater of Guanghua Basin[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2018, **27**(5): 916-925.



CONTENTS

Concentration Characteristics and Assessment of Model-Predicted Results of PM _{2.5} in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in Autumn and Winter	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, LIU Bing, <i>et al.</i> (5191)
Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} During the Heating Period of 2016-2017 in the Eastern Part of the North China Plain	ZHANG Yi-qin, WANG Jie, GAO Jian, <i>et al.</i> (5202)
Change in Characteristics of Pollution Gas and Water-soluble Ions at Different Development Stages of Haze	WANG Zhen-bin, LIU An-kang, LU Wen, <i>et al.</i> (5213)
Exposure Levels, Sources, and Health Risks of Heavy Metal Components of PM _{2.5} in Housewives in Rural Shanghai	LUO Ran-ran, DAI Hai-xia, ZHANG Yun-hui, <i>et al.</i> (5224)
Measuring the Condensable Particle Matter from a Stationary Source	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, WANG Gang, <i>et al.</i> (5234)
Volatile Organic Compound Emission Characteristics of Furniture Manufacturing Enterprises and the Influence on the Atmospheric Environment	ZHANG Jia-mi, ZENG Chun-ling, LIU Rui-yuan, <i>et al.</i> (5240)
VOCs Emission Inventory and Impact Range Simulation of Antibiotic Enterprises	ZHU Tao, LÜ Yi-rong, BIAN Wen-jing, <i>et al.</i> (5250)
Effects of Vehicle Emissions on Heavy Metals and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Pollution in Road Dust in Xinxiang	LI Qi-lu, WU Jin-tao, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (5258)
Pollution Characteristics and Exposure Risk Assessment of Perfluoroalkyl Substances in Road Dust, Chengde	FANG Shu-hong, ZHU He-xiang, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (5265)
Characteristics of Stable Isotopes and Analysis of Water Vapor Sources of Precipitation at the Northern Slope of the Qilian Mountains	ZHANG Bai-juan, LI Zong-xing, WANG Yu, <i>et al.</i> (5272)
Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Source Water of the Nanjing Reach of the Yangtze River	FENG Meng-juan, ZHANG Qin, SONG Ning-hui, <i>et al.</i> (5286)
Effects of Different Coagulants on Co-manganese Oxides Filter Media for Removing Ammonium and Manganese from Surface Water in Summer and Autumn	CHENG Li-jie, HUNAG Ting-lin, CHENG Ya, <i>et al.</i> (5294)
Disinfection By-products and the Relevant Health Risk in the Water Supply System in H City of Zhejiang Province	LIU Jun-ping, YU Jian-quan, LI Qing-song, <i>et al.</i> (5302)
Absorption and Fluorescence Spectra of Dissolved Organic Matter in Rivers of the Three Gorges Reservoir Area Under the Background of Urbanization	CHEN Zhao-yu, LI Si-yue (5309)
Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Natural Rivers of Western Sichuan Plateau	LIU Yan-yang, SUN Hui, LIU Chen, <i>et al.</i> (5318)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Losses and Runoff in a Typical Purple Soil Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	CAO Rui-xia, LIU Jing, DENG Kai-kai, <i>et al.</i> (5330)
Responses of Riverine Phosphorus Exports to Land Use and Hydrological Regime in the Jiulong River Watershed	HUANG Ya-ling, TANG Li, HUANG Jin-liang, <i>et al.</i> (5340)
Effects of Land Use Types at Different Spatial Scales on Water Quality in Poyang Lake Wetland	FANG Na, LIU Ling-ling, YOU Qing-hui, <i>et al.</i> (5348)
Environmental Significance of Phosphorus Fractions of Phytoplankton-and Macrophyte-Dominated Zones in Taihu Lake	GENG Xue, WEN Shuai-long, SUN Pei-rong, <i>et al.</i> (5358)
Spatial Distribution and Pollution Evaluation of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in Sediments of Zhushan Bay at Taihu Lake	FANG Jia-qi, QI Chuang, ZHANG Xin-hou, <i>et al.</i> (5367)
Effect of Rainfall Intensity on the Content of Nitrogen and Phosphorus Components in Plateau Areas: A Case Study of the Fengyu River Watershed	LI Xiao-hong, LEI Qiu-liang, ZHOU Jiao-gen, <i>et al.</i> (5375)
Water Purification Effect and Saline-alkali Tolerance Improvement Mechanism of <i>Suaeda salsa</i> in the Estuary Area	WU Dan, SUN Ping, CHEN Guang-lin, <i>et al.</i> (5384)
Concentration-dependent Accumulation and Translocation of PFASs by Wetland Plant <i>Alisma orientale</i>	WANG Tuan-tuan, LI Bei-bei, WANG Sai, <i>et al.</i> (5394)
Occurrence of Denitrifying Dephosphatation in a Hybrid Constructed Wetland System and Its Stability	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, LI Qing-fei, <i>et al.</i> (5401)
Comparison of the Control of Sedimentary Phosphorus Release Using Zirconium-, Lanthanum-, and Lanthanum/Zirconium-Modified Zeolites as Sediment Amendments	LIU Ting, ZHAO Yu-ying, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (5411)
Effect of Biochar Structure on Adsorption Characteristics of Ammonia Nitrogen	CHEN Mei, WANG Fang, ZHANG De-li, <i>et al.</i> (5421)
Effect of Dissolved Oxygen on Partial Nitrification of Suspended and Attached Growth Systems	WANG Si-yu, LIU Ling-jie, WANG Fen, <i>et al.</i> (5430)
Effects of Different Intermittent Aeration Strategies on the Start-up of SNAD Process	LI Dong, LIU Zhi-cheng, XU Gui-da, <i>et al.</i> (5438)
Operational Performance and Microbiological Characteristics of an Iron-Salt Denitrification Reactor in Co-substrate Mode	WANG Ru, LIU Meng-yu, LIU Bing-yin, <i>et al.</i> (5446)
Effect of Step Aeration on a Municipal Sewage Aerobic Granular Sludge System	LI Dong, WEI Zi-qing, LAO Hui-mei, <i>et al.</i> (5456)
Improvement of the Dewaterability of Excess Activated Sludge with Mixed Yeasts by Degrading Extracellular Polymeric Substances	YU Xin-yi, XIANG Jin-hao, LIU Ying, <i>et al.</i> (5465)
Influence of Land Use Change on Ecosystem Service Value Based on GEE in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 1998 to 2018	LOU Pei-qing, FU Bo-lin, LIN Xing-chen, <i>et al.</i> (5473)
Assessment of Soil Quality in Coastal Tidal Flat Reclamation Areas Based on MDS-TOPSIS Model	XIE Xue-feng, PU Li-jie, ZHU Ming, <i>et al.</i> (5484)
Effect of Increasing Tidewater Inundation on Porewater Geochemistries and CO ₂ and CH ₄ Effluxes in the Tidal Freshwater Marshes of the Minjiang River Estuary, Southeast China	LI Jing, HUANG Jia-fang, LUO Min, <i>et al.</i> (5493)
Methane Emission Characteristics and Its Influencing Factors over Aquaculture Ponds	WANG Jiao, XIAO Wei, ZHANG Xiu-fang, <i>et al.</i> (5503)
Effect of Fertilization on Soil Respiration and Its Temperature Sensitivity in a Sorghum Field	YAN Jun-xia, ZHANG Yuan, JIAO Xiao-yan (5515)
Land Safety Zoning Method in High-Selenium and High-Cadmium Areas	WANG Rui, HOU Wan-ling, LI Yu-tong, <i>et al.</i> (5524)
Remediation Effects of Different Composite Materials on Cadmium-Contaminated Farmland Soil	CHEN Shu-lan, XU Chen-yang, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (5531)
Hydrocalumite Passivation Effect and Mechanism on Heavy Metals in Different Cd-Contaminated Farmland Soils	WU Qiu-mei, LIU Gang, WANG Hui-feng, <i>et al.</i> (5540)
Effects of Different Land Use Types on Microbial Community Diversity in the Shizishan Mining Area	HUANG Jian, ZHU Xu-yan, LU Jin, <i>et al.</i> (5550)
Effects of Conversion of Forest to Arable Land on the Abundance and Structure of the <i>cblL</i> -Harboring Bacterial Community in Albic Soil of the Hilly Region of Northeast China	WANG Rui, WU Xian, LI Gang, <i>et al.</i> (5561)
Thoughts on and Construction of a Risk Management and Control System for Contaminated Sites in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	CHANG Chun-ying, DONG Min-gang, DENG Yi-rong, <i>et al.</i> (5570)
Visualized Quantitative Research of Soil Pollution in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	ZHANG Ning, ZHANG Sheng, YANG Hai-chao, <i>et al.</i> (5581)
Characteristics and Environmental Impacts of Materials Stored in Municipal Solid Waste Landfills: A Case Study of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	MA Shi-jun, ZHOU Chuan-bin, YANG Guang, <i>et al.</i> (5593)
Heavy Metal Contamination and Migration in Correspondence of an Electroplating Site on the Hilly Lands of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China	HOU Wen-juan, GONG Xing, ZHAN Ze-bo, <i>et al.</i> (5604)
Pollution Characteristics and Migration of BTEX at a Chemical Contaminated Site in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DENG Yi-rong, LU Hai-jian, DONG Min-gang, <i>et al.</i> (5615)
Immobilization Impact of Goethite-Fulvic Acid Composites on Pb-Cd Contaminated Soil	LIU Qian-jun, LI Xiang, ZHOU Yang-mei, <i>et al.</i> (5623)
Mobilization of Heavy Metals in a Soil-Plant System and Risk Assessment in the Dabaoshan Mine Area, Guangdong Province, China	CHEN Jie-yi, LIU Guang-bo, CUI Jin-li, <i>et al.</i> (5629)
Calculation of the Soil Risk Control Value through a Hydrus-1D Model for Groundwater Protection	LIN Ting, LUO Fei, ZHU Yan, <i>et al.</i> (5640)
INDEX HUANJING KEXUE CONTENTS 2019, Vol. 40	(5659)