

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第3期

Vol.38 No.3

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国人为源挥发性有机物反应性排放清单	梁小明, 张嘉妮, 陈小方, 石田立, 孙西勃, 范丽雅, 叶代启 (845)
上海城郊地区冬季霾污染事件反应性 VOCs 物种特征	高爽, 张坤, 高松, 修光利, 程娜, 潘研 (855)
京津冀地区主要排放源减排对 PM _{2.5} 污染改善贡献评估	吴文景, 常兴, 邢佳, 王书肖, 郝吉明 (867)
北京冬季 PM _{2.5} 中金属元素浓度特征和来源分析	乔宝文, 刘子锐, 胡波, 刘景云, 逢妮妮, 吴方堃, 徐仲均, 王跃思 (876)
2015 年石家庄市采暖期一次重污染过程细颗粒物在线来源解析	路娜, 李治国, 周静博, 赵鑫, 杨丽丽, 冯媛, 靳伟 (884)
利用 SPAMS 研究南宁市四季细颗粒物的化学成分及污染来源	刘慧琳, 陈志明, 毛敬英, 梁桂云, 黄炯丽, 李宏姣, 杨俊超, 莫招育 (894)
南半球海洋大气气溶胶单颗粒的理化特性分析	迟建伟, 李传金, 孙俊英, 张剑, 王辉, 王瀚韬, 李卫军 (903)
喷泉产生的细菌气溶胶空间分布特性	张崇森, 袁琳, 许鹏程, 刘可欣 (911)
生物滴滤塔净化含硫混合废气	叶杰旭, 缪孝平, 诸葛蕾, 赵翔宇, 江宁馨, 章晶晓, 陈东之, 陈建孟 (918)
西安城市不同功能区街道灰尘磁学特征及环境污染分析	房妮, 张俊辉, 王瑾, 姜珊, 夏敦胜 (924)
城乡交错带典型溪流沟渠沉积物氮污染特征及硝化-反硝化潜力	秦如彬, 李如忠, 高苏蒂, 张瑞钢 (936)
三峡库区小江支流沉积物硝化反硝化速率在蓄水期和泄水期的特征	王静, 刘洪杰, 雷禹, 徐晶, 宋立岩, 李勇 (946)
隔河岩水库二氧化碳通量时空变化及影响因素	赵登忠, 谭德宝, 李翀, 申邵洪 (954)
白洋淀多环芳烃与有机氯农药季节性污染特征及来源分析	王乙震, 张俊, 周绪申, 孔凡青, 徐铭霞 (964)
唐山陡河水库沉积物汞的分布、来源及污染评价	吴婷婷, 王明猛, 陈旭锋, 刘文利, 李太山, 闫海鱼, 何天容, 李仲根 (979)
三峡库区消落带优势草本植物淹水后汞的释放特征	邓晗, 张翔, 张成, 王永敏, 王定勇 (987)
电镀厂周边地表水中重金属分布特征及健康风险评估	余葱葱, 赵委托, 高小峰, 程胜高, 黄庭, 尹伊梦, 赵珍丽 (993)
九龙江表层沉积物重金属赋存形态及生态风险	林承奇, 胡恭任, 于瑞莲, 韩璐 (1002)
厦门筲箕湖表层沉积物金属元素赋存形态及污染评价	杨秋丽, 于瑞莲, 胡恭任, 林承奇, 韩璐 (1010)
龙口市污水灌溉区农田重金属来源、空间分布及污染评价	李春芳, 王菲, 曹文涛, 潘健, 吕建树, 吴泉源 (1018)
碳化稻壳-铁锰氧化菌耦合净化严寒村高铁锰地下水效能与机制	孙楠, 湛燕丽, 张颖, 鲁岩, 宋秋霞, 李春艳, 姜昭 (1028)
高藻水臭氧预氧化过程有机物转化及消毒副产物生成趋势	张赛, 胡学斌, 古励, 李莉, 郭显强 (1038)
预处理对短流程超滤工艺不可逆膜污染影响的中试试验	杨海燕, 邢加建, 王灿, 孙国胜, 赵焱, 梁恒, 徐叶琴, 李圭白 (1046)
Cu-Al ₂ O ₃ 中骨架铜类芬顿催化去除水中有机污染物	徐丹, 张丽丽, 柳丽芬 (1054)
过硫酸钾氧化去除 Cu(CN) ₂ 中的氰污染物	王云飞, 李一兵, 王彦斌, 齐璠静, 赵凯, 田世超, 郭涛, 关伟, 赵旭 (1061)
微生物燃料电池强化去除农药 2,4-二氯苯氧乙酸及同步产电性能	全向春, 全燕苹, 肖竹天 (1067)
桉树遗态结构 HAP/C 复合材料对水中 Cu(II) 的吸附特征	李超, 朱宗强, 曹爽, 朱义年, 谭笑, 丁慧 (1074)
基于 A ² /O 处理工艺的生活污水的成组生物毒性评价	张秋亚, 马晓妍, 王晓昌, 游猛 (1084)
污水氮浓度对粉绿狐尾藻去氮能力的影响	马永飞, 杨小珍, 赵小虎, 胡承孝, 谭碧玲, 孙学成, 吴金水 (1093)
全海水盐度抑制下厌氧氨氧化工艺的恢复特性	齐泮晴, 于德爽, 李津, 管勇杰, 魏思佳 (1102)
饥饿对疏自养反硝化反应器生物群落结构的影响	李芳芳, 施春红, 李海波, 袁蓉芳, 马方曙 (1109)
快速启动厌氧氨氧化工艺	闫刚, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, 程朝阳 (1116)
一种 CANON 工艺处理低氨氮废水的新模式	完颜德卿, 袁怡, 李祥, 毕贞 (1122)
侧流磷回收对低溶解氧 EBPR 系统性能的影响	马娟, 宋璐, 俞小军, 孙雷军, 孙洪伟 (1130)
厌氧氨氧化污泥群体感应信号分子检测及影响研究	陈舒涵, 李安婕, 王越兴, 吴玲娟 (1137)
有机负荷对醋糟厌氧消化系统启动的影响	戴晓虎, 于春晓, 李宁, 董滨, 戴翎翎 (1144)
过氧化钙预处理对活性污泥脱水性能的影响机制	白润英, 陈湛, 张伟军, 王东升 (1151)
不同工况蚯蚓人工湿地表层污泥处理效果	董梦珂, 李怀正, 徐一啸 (1159)
全氟辛酸对大肠杆菌的氧化胁迫和膜损伤	杨蒙, 李伟, 叶锦韶, 龙焰, 秦华明 (1167)
纳米银在环境水样和实验介质中的理化性质和毒性效应	衣俊, 程金平 (1173)
血吸虫病疫区鱼体器官中氯苯化合物的污染特征	李昆, 赵高峰, 周怀东, 张盼伟, 刘巧娜, 赵晓辉, 李东佼, 任敏, 赵丹丹 (1182)
纳米沸石对大白菜生长、抗氧化酶活性及镉形态、含量的影响	秦余丽, 熊仕娟, 徐卫红, 赵婉伊, 王卫中, 陈永勤, 迟苏琳, 陈序根, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (1189)
利用 <i>in vitro</i> 方法研究不同铁矿对土壤砷生物可给性的影响	钟松雄, 尹光彩, 黄润林, 何宏飞, 陈志良, 林亲铁, 王文科 (1201)
不锈钢电极对重金属污染土壤的强化电动修复及电极腐蚀结晶现象与机制	温东东, 付融冰, 张卫, 顾莹莹 (1209)
施用无害化污泥影响土壤碳库组分和碳库管理指数的演变	刘晓, 黄林, 郭康莉, 张雪凌, 杨俊诚, 姜慧敏, 张建峰 (1218)
施氮和水分管理对光合碳在土壤-水稻系统间分配的量化研究	王婷婷, 祝贞科, 朱捍华, 汤珍珠, 庞静, 李宝珍, 苏以荣, 葛体达, 吴金水 (1227)
模拟酸雨对次生林土壤呼吸及异养呼吸的影响	陈书涛, 孙鹭, 桑琳, 胡正华 (1235)
土壤硝化和反硝化微生物群落及活性对大气 CO ₂ 浓度和温度升高的响应	刘远, 王光利, 李恋卿, 潘根兴 (1245)
岩性对喀斯特灌丛土壤固氮菌与丛枝菌根真菌群落结构及丰度的影响	梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧 (1253)
板栗产区有机堆肥产物磷形态特征及其对叶片磷含量的影响	宋影, 郭素娟, 张丽, 孙慧娟, 谢明明, 武燕奇, 王静 (1262)
酸性物质对猪粪秸秆堆肥过程中氮素转化的影响	姜继超, 尧倩 (1272)
《环境科学》征稿简则 (1092)	
《环境科学》征订启事 (1158)	
信息 (1166, 1261, 1271)	

电镀厂周边地表水中重金属分布特征及健康风险评价

余葱葱¹, 赵委托^{2*}, 高小峰³, 程胜高^{1*}, 黄庭¹, 尹伊梦¹, 赵珍丽¹

(1. 中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430074; 2. 核工业二〇三研究所环境工程与评价中心, 咸阳 712000; 3. 东京大学大学院工学系研究科, 东京 113-8656)

摘要: 选取东莞市麻涌镇、沙田镇、虎门镇、长安镇和大岭山镇为研究区域, 对区域电镀厂周边 30 个地表水样中 8 种重金属(包括 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 和类重金属 As、Hg)进行测定, 运用多元统计分析和人体健康风险评价模型研究地表水中重金属分布特征和健康风险。结果表明, 地表水中 Cr、Pb 最大浓度和 Hg 平均浓度超过《地表水环境质量》(GB 3838-2002)Ⅲ类水质标准, Cr、Cu、Hg、Ni、Zn 和 Pb 含量均呈现出雨季高于旱季。多元统计分析表明, Cd、Cr、Cu、Ni 和 Zn 主要来源于周边电镀企业污染, Pb 和 Hg 受交通污染源影响较大, As 与自然源有密切关系。地表水体健康风险评价结果表明, 重金属污染对儿童威胁大, 经饮水途径暴露的健康风险比皮肤接触途径大 2~3 个数量级。此外, Cr 和 As 致癌风险高于最大可接受风险水平($5.0 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$); 非致癌性重金属健康风险大小呈现出 $\text{Pb} > \text{Ni} > \text{Cu} > \text{Hg} > \text{Zn}$, 风险水平在 $10^{-10} \sim 10^{-7} \text{ a}^{-1}$, 低于最大可接受风险水平 2~5 个数量级。

关键词: 电镀厂; 地表水; 重金属; 多元统计分析; 健康风险评价

中图分类号: X522; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)03-0993-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201607159

Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water Around Electroplating Factories

YU Cong-cong¹, ZHAO Wei-tuo^{2*}, GAO Xiao-feng³, CHENG Sheng-gao^{1*}, HUANG Ting¹, YIN Yi-meng¹, ZHAO Zhen-li¹

(1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. The Center of Environmental Engineering and Assessment, No. 203 Research Institute of Nuclear Industry, Xianyang 712000, China; 3. Graduate School of Engineering, University of Tokyo, Tokyo 113-8656, Japan)

Abstract: To investigate the distribution characteristics and the human health risks of heavy metals in surface water samples, 30 samples were collected around electroplating factories of Machong, Shatian, Humen, Changan and Dalingshan towns in Dongguan city, 8 heavy metals(As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb and Zn) contents were measured and analyzed by using multivariate statistical analysis method and human health risk assessment model. The results showed that the maximum concentrations of Cr, Pb and the average concentration of Hg exceeded Environmental Quality Standards for Surface Water(GB 3838-2002, Grade Ⅲ), the concentrations of Cr, Cu, Hg, Ni, Zn and Pb during rainy season were all higher than that those during dry season. Multivariate statistical analysis indicated that Cd, Cr, Cu, Ni and Zn mainly originated from the contaminated electroplating factories, Pb and Hg were mainly affected by the traffic sources, and As was significantly correlated with natural sources. Health risk assessment result of surface water indicated that heavy metal pollution would lead to high health risks especially for children, and the health risks of heavy metals through drinking pathway were 2-3 orders of magnitude higher than the values caused by dermal contact pathway. Moreover, carcinogenic risks caused by Cr and As were higher than the maximum allowance levels ($5 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$), and non-carcinogenic risks of the heavy metals ($10^{-10} \sim 10^{-7} \text{ a}^{-1}$) decreased in the order of $\text{Pb} > \text{Ni} > \text{Cu} > \text{Hg} > \text{Zn}$, which were 4-5 orders of magnitude lower than the maximum allowance levels.

Key words: electroplating factories; surface water; heavy metals; multivariate statistical analysis; health risk assessment

东莞市近几十年来凭借地处珠江三角洲“黄金地段”区位优势, 迅速实现由农业社会向工业社会转变, 成为全球重要工业制造基地之一^[1]。电镀厂是东莞市常见企业, 日常生产过程中产生大量含有重金属废水、固体废物和废气^[2], 重金属具有持久性、隐蔽性、不可降解性等特点, 排放到环境后不断迁移、转化最终进入并累积于水体、空气和土壤中, 直接或间接地危害着人体健康^[3,4]。地表水体中微量重金属人体暴露途径主

要包括饮水、皮肤接触等, 低剂量、长期暴露会对人体造成伤害^[5], 因此, 研究电镀厂周边地表水环境中重金属分布特征, 评价潜在人体健康风

收稿日期: 2016-07-25; 修订日期: 2016-10-18

基金项目: 中央高校新青年教师科研启动基金项目(CUGW140908); 国家自然科学基金项目(41072023, 41402312)

作者简介: 余葱葱(1992~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境风险评价与管理, E-mail: cugycc2015@163.com

* 通信作者, E-mail: weituo2006@126.com; chengsg@cug.edu.cn

险具有重要意义. 目前,王若师等^[6]、李祥平等^[7]、Achary 等^[8]采用美国环保署(USEPA)推荐的健康风险评价模型分别对东江流域、广州市主要饮用水源地、孟加拉湾西南海岸等不同地表水体中重金属污染进行了初步健康风险评价,在健康风险评价模型的基础上,周荣喜等^[9]引入多属性决策理论,陈耀宁等^[10]构建了三角随机模型,祝慧娜等^[11]构建了基于区间数的健康风险模糊综合评价模型对区域水环境进行了更深入的健康风险研究.

近年来,电镀厂周边环境污染问题越来越受到重视,已有研究者对电镀厂附近水体沉积物^[12]、空气^[13]、土壤^[13~16]及农作物^[16]中重金属含量、分布及潜在健康风险进行了较多研究,但是关于电镀厂排放重金属对周边地表水环境影响研究较少. 本研究通过调查东莞市5镇(麻涌镇、沙田镇、虎门镇、长安镇和大岭山镇)电镀厂周边地表水中8种重金属(包括Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn和类重金属As、Hg)含量和分布特征,采用USEPA推荐的健康风险评价模型评估地表水重金属潜在健康风险水平,以期为区域地表水重金属污染水质目标管理和人群健康保障提供依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

东莞市位于广东省中南部、珠江口东岸,地势

东南高、西北低,地貌以丘陵台地、冲积平原为主^[17]. 主要河流有东江、石马河和寒溪河等,其中东江自东向西贯穿北界,通过大盛、麻涌、漳澎和泗盛围等4个口门汇入狮子洋,寒溪河和石马河自东南往西北注入东江. 自然土壤主要为砂页岩和花岗岩发育的赤红壤及山地地区的黄壤. 研究区企业分布密集,电镀厂数量多达50余家,企业周边分布着麻涌河、狮子洋、金河涌、四甲架河、茅洲河、东引河和黄沙河等,区域雨季为4~9月,其中4~6月为前汛期,7~9月为后汛期.

1.2 样品采集与处理

研究30个采样点于电镀厂排污口上下游约500 m、河道平直和水流平缓处(3~29号采样点分别位于同一排污口上、下游),2015年1月(冬季、旱季),2015年4月(春季、雨季),2015年7月(夏季、雨季)和2015年11月(秋季、旱季)采集地表水样品,地理位置和采样点见图1. 样品采集后立即用0.45 μm 滤膜过滤,向水样中加 HNO_3 酸化使其 $\text{pH} \leq 2$,运回实验室置于冰箱中保存(4°C ,避光). 采用AFS-230E双道原子荧光光度计(北京海光仪器公司)和Tekran2500CVAFS(加拿大)分别检测水样中As和Hg含量,采用ICP-MS(7500a,美国Agilent公司)检测水样中Cd、Cr、Cu、Ni、Pb和Zn含量,每个水样设置2个空白样和3个平行样. 经检验,待测元素相对误差(RE)均小于 $\pm 20\%$,相对标准偏差(RSD)均低于15%,符合USEPA要求

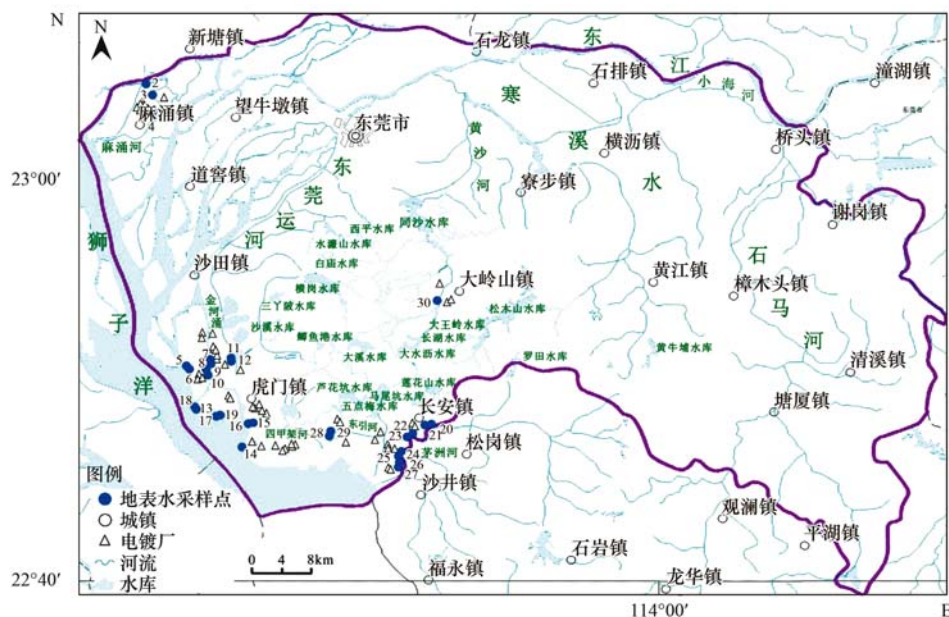


图1 研究区地理位置及采样点示意

Fig. 1 Location of the study area and sampling sites

(RSD < 30%)。

1.3 研究方法

1.3.1 饮水途径健康风险评价模型

$$R_i^c = [1 - \exp(-D_i \cdot SF)] / 76.49 \quad (1)$$

$$R_i^n = (D_i / \text{RfD}) \times 10^{-6} / 76.49 \quad (2)$$

$$D_i = \text{IR} \times c_i / \text{BW} \quad (3)$$

式中, R_i^c 为致癌物质 i 经饮水途径所致平均个人年健康风险, a^{-1} ; SF 为致癌物质经饮水途径摄入的致癌强度系数, $\text{kg} \cdot \text{d} \cdot \text{mg}^{-1}$; R_i^n 为非致癌物质 i 经饮水途径所致平均个人年健康风险, a^{-1} ; RfD 为非致癌物质经饮水途径日均摄入的参考剂量, $\text{kg} \cdot \text{d} \cdot \text{mg}^{-1}$; D_i 为重金属 i 经饮水途径的单位体重日均暴露剂量, $\text{kg} \cdot \text{d} \cdot \text{mg}^{-1}$; 76.49 为广东省人期期望寿命, a ; IR 为日平均饮水量, $\text{L} \cdot \text{d}^{-1}$; c_i 为重金属 i 的质量浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; BW 为人体体重, kg 。

1.3.2 皮肤接触途径健康风险评价模型

$$R_d^p = [1 - \exp(-D_d \times SF)] / 76.49 \quad (4)$$

$$R_d^f = (D_d \times 10^{-6} / \text{RfD}) / 76.49 \quad (5)$$

$$D_d = I_d \times A_{\text{sd}} \times \text{FE} \times \text{EF} \times \text{ED} / (\text{BW} \times \text{AT} \times f) \quad (6)$$

$$I_d = 2 \times 10^{-3} \times k \times c_d \times \sqrt{\frac{6 \times \tau \times \text{TE}}{\pi}} \quad (7)$$

式中, R_d^p 为致癌物质 d 经皮肤接触途径所致平均个人年健康风险, a^{-1} ; R_d^f 为非致癌物质 d 经皮肤接触途径所致平均个人年健康风险, a^{-1} ; D_d 为重金属 d 经皮肤接触途径的单位体重日均暴露剂量, $\text{kg} \cdot \text{d} \cdot \text{mg}^{-1}$; I_d 为每次洗澡单位面积对污染物 d 的吸附量, $\text{mg} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{次})^{-1}$; A_{sd} 为人体表面积, cm^2 ; FE 为洗澡频率, $\text{次} \cdot \text{d}^{-1}$; EF 为暴露频率, $\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$; ED 为暴露延时, a ; AT 为平均暴露时间, a ; f 为肠道吸附比率; k 为皮肤吸附参数, $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$; c_d 为重金属 d 的质量浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; τ 为延滞时间, h ; TE 为洗澡时间, h 。

根据世界卫生组织 (WHO) 和国际癌症研究机构 (IARC) 对化学物质致癌性全面评价, 本研究测定 8 种重金属中, 致癌性重金属有 As、Cd、Cr, 非致癌性重金属有 Cu、Hg、Ni、Pb、Zn, 毒理学特性参数和暴露参数见表 1 和表 2^[18~21]。

1.3.3 水环境健康风险评价总体模型

假定每种化学物质对人体健康危害毒性作用呈相加关系, 而不是协同或拮抗关系, 水环境总体健康危害风险可表示为:

$$R_Z = R_i^c + R_i^n + R_d^p + R_d^f \quad (8)$$

表 1 重金属毒理学特性参数

Table 1 Toxicological characteristic parameters of the heavy metals		
元素	致癌强度系数 SF / $\text{kg} \cdot \text{d} \cdot \text{mg}^{-1}$	毒性参考剂量 RfD / $\text{kg} \cdot \text{d} \cdot \text{mg}^{-1}$
As	15	—
Cd	6.1	—
Cr	41	—
Cu	—	0.005
Hg	—	0.0003
Ni	—	0.02
Pb	—	0.0014
Zn	—	0.3

表 2 重金属暴露参数

Table 2 Exposure parameters of the heavy metals		
参数	成人	儿童
日平均饮水量 $\text{IR} / \text{L} \cdot \text{d}^{-1}$	1.7	1.0
人均体重 BW / kg	57.0	22.9
人体表面积 $A_{\text{sd}} / \text{cm}^2$	16000	6660
洗澡频率 $\text{FE} / \text{次} \cdot \text{d}^{-1}$	0.3	0.3
肠道吸附比率 f	1	
皮肤吸附参数 $k / \text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$	0.001	
延滞时间 τ / h	1	
洗澡时间 TE / h	0.56	
参数	非致癌物	致癌物
暴露频率 $\text{EF} / \text{d} \cdot \text{a}^{-1}$	350	350
暴露延时 ED / a	35	70
平均暴露时间 AT / a	35	70

2 结果与讨论

2.1 电镀厂周边地表水重金属含量及分布特征

根据电镀厂周边地表水重金属全年含量 (表 3), 依据《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) III 类标准^[22], As、Cd、Cr、Cu、Pb 和 Zn 平均值均满足 III 类水质标准, 而 Hg 平均值和最大值分别是标准值的 3.50 和 7.50 倍, Cr 和 Pb 平均值虽未超标, 但最大值分别超过标准限值 3.88 和 1.03 倍。从季节变化看 (表 3), Cr、Cu、Hg、Ni、Zn、Pb 和 As、Cd 分别在春季、夏季和冬季最大, Cu、Ni、Pb、Zn 和 Cr、Hg 分别在秋季和冬季最小, 并且 Cr、Cu、Hg、Ni 和 Zn 季节平均最大值与最小值相差较大, 最大值分别是最小值的 2.66、2.82、2.63、2.88 和 3.61 倍。整体看, Cr、Cu、Hg、Ni、Zn 和 Pb 季节变化表现出一定规律性, 雨季含量均高于旱季, 可能与雨季地表径流较大有关。

与国内外其它区域地表水相比, 研究区地表水 Cr 和 Ni 含量普遍高于其他区域, 其中 Cr 含量是巴西 Pardo 河的 81.12 倍, Ni 含量是西班牙 Catalan 河的 58.06 倍。Cu 和 Hg 含量分别低于土耳其 Tigris

河和西班牙 Catalan 河,但高于其他区域,其中 Cu 含量分别超过西班牙 Catalan 河和巴西 Pardo 河达 113.27 和 51.13 倍. As、Cd、Pb 和 Zn 含量均高于西班牙 Catalan 河、巴西 Pardo 河和土耳其 Tigris 河,介于澜沧江重金属含量之间,其中 Pb 含量是土耳其 Tigris 河的 79.94 倍,Zn 含量是西班牙 Catalan

河的 85.22 倍. 与苏南某电镀厂下游地表水和广西某电镀厂下游地表水重金属平均含量相比,研究区地表水 Zn 含量是苏南某电镀厂下游地表水的 2.75 倍,Cd 和 Pb 含量低于广西某电镀厂下游地表水,Cr、Cu 和 Ni 含量远低于苏南某电镀厂下游地表水和广西某电镀厂下游地表水.

表 3 水质指标的统计描述及环境标准/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 3 Statistical description of water quality variables and the environmental guideline of national quality standards for surface waters/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

元素	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
平均值	8.71	1.57	40.56	147.25	0.350	156.76	27.18	161.91
最大值	12.20	2.38	194.12	902.60	0.750	961.63	51.62	823.83
最小值	5.12	0.66	7.14	8.33	0.100	7.53	11.36	15.61
标准差	1.93	0.46	42.87	228.85	0.187	230.03	10.16	201.91
标准限值 ¹⁾	50.00	5.00	50.00	1 000.00	0.10	—	50.00	1 000.00
季均浓度								
春季(旱季)	8.67	1.29	63.71	203.41	0.486	221.10	29.64	280.07
夏季(雨季)	8.03	1.31	49.88	175.23	0.401	194.46	30.50	203.28
秋季(雨季)	8.61	1.58	24.70	72.12	0.306	76.80	23.28	77.61
冬季(旱季)	9.51	2.12	23.97	138.25	0.185	134.69	25.32	86.69
澜沧江 ^[23]	5.3~21	0~3.9	—	0~80	0~0.2	—	11~32	0~706
长江 ^[24]	13.20	4.70	20.90	10.70	—	13.40	55.10	9.40
湘江 ^[25]	12.24	1.34	6.61	20.33	0.04	—	2.29	84.57
Catalan 河,西班牙 ^[26]	2.90	1.20	2.40	1.30	0.80	2.70	2.20	1.90
Pardo 河,巴西 ^[27]	1.93	0.06	0.50	2.88	—	6.33	4.10	13.14
Bilina 河,捷克 ^[28]	14.13	0.21	—	—	0.10	—	7.92	35.26
Tigris 河,土耳其 ^[29]	2.35	1.37	<5	165	—	72.0	0.34	37
苏南某电镀厂下游地表水 ^[30]	—	—	74.88	384.06	—	853.2	—	58.8
广西某电镀厂下游地表水 ^[16]	—	1.89	1 277.14	1 954.29	—	2 361.43	29.43	—

1) 地表水环境质量Ⅲ类标准(GB 3838-2002)

由地表水重金属在采样点堆积情况(图 2)和重金属年均浓度空间分布特征(图 3)可知,重金属含量变化范围为 $88.98 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (14 号采样点) ~ $2 769.68 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (16 号采样点),平均值 $544.29 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. Cu、Ni、Zn 含量变化幅度较大,贡献率远高于其他元素,其中贡献率最大采样点分别为 11、24、30 号,平均贡献率最大是 Zn(31.76%),其次为 Ni(23.40%)和 Cu(20.40%). 5 个镇中,地表水重金属年均浓度大小顺序呈现出虎门镇($1 084.12 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) > 大岭山镇($934.82 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) > 沙田镇($503.33 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) > 长安镇($355.02 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) > 麻涌镇($107.30 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$),Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 含量分布规律比较相似,高含量区主要位于虎门镇和沙田镇,以 15、16 号采样点处最为突出,而 As、Cd、Zn 年均浓度分别在沙田镇、长安镇、大岭山镇最高,最大浓度值分别出现在 25、28、30 号采样点.

将排污口上、下游采样点重金属浓度进行对比,排污口上游 9、11、22、24 号采样点和下游 10、12、23、25 号采样点重金属浓度相差较大,下游采

样点重金属浓度分别是上游的 2.51、1.24、3.29、1.40 倍,主要是下游采样点 Cr、Cu、Hg、Ni、Zn 含量高于上游,其中 10 号采样点 Cr、Cu、Ni 含量分别是 9 号采样点的 2.62、5.98、7.95 倍,12、25 号采样点 Hg 含量分别是 11、24 号采样点的 3.84、3.70 倍,23 号采样点 Zn 含量是 22 号采样点的 10.87 倍. 由此可见,电镀厂建设对周边地表水中重金属的分布产生了一定影响.

2.2 地表水重金属的多元统计分析

2.2.1 相关性分析

相关性分析表明(表 4),As 与其他元素之间无显著相关性;Cd、Cr、Cu、Ni 和 Zn 之间呈极显著相关,其中 Cu 和 Ni 相关系数最高(0.980),说明 Cu 和 Ni 关系最为密切,含量受彼此影响较大;Hg 仅与 Pb 之间存在显著相关性,而 Pb 还与 Cr、Cu、Ni 之间存在极显著相关性. 由此判断,Cd、Cr、Cu、Ni 和 Zn 具有一定同源性,Pb 一部分来源可能与 Hg 相同,一部分来源可能与 Cr、Cu、Ni 相同,As 来源与其他元素不同.

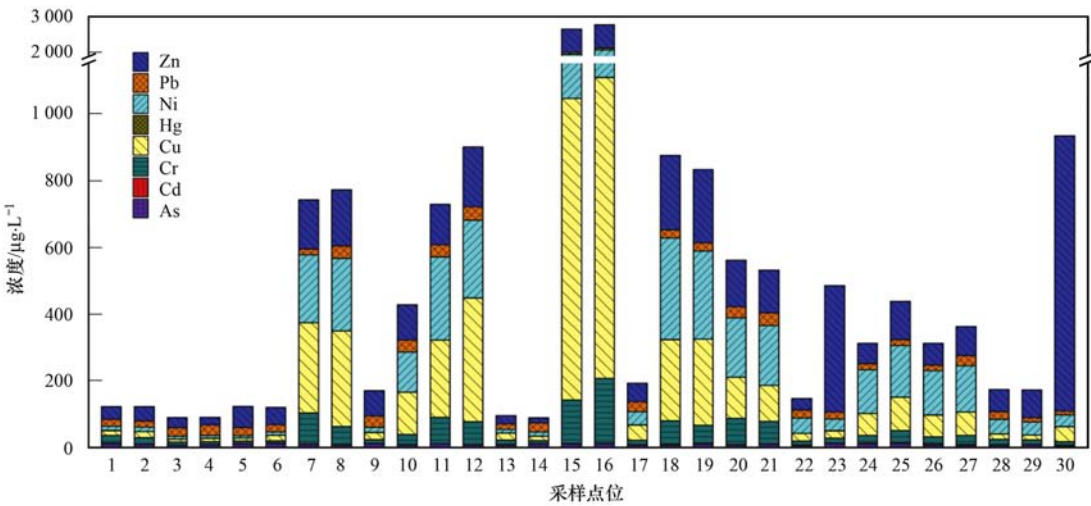


图 2 各采样点重金属四季平均总含量堆积

Fig. 2 Total mean concentrations in four seasons of heavy metals in the sampling sites

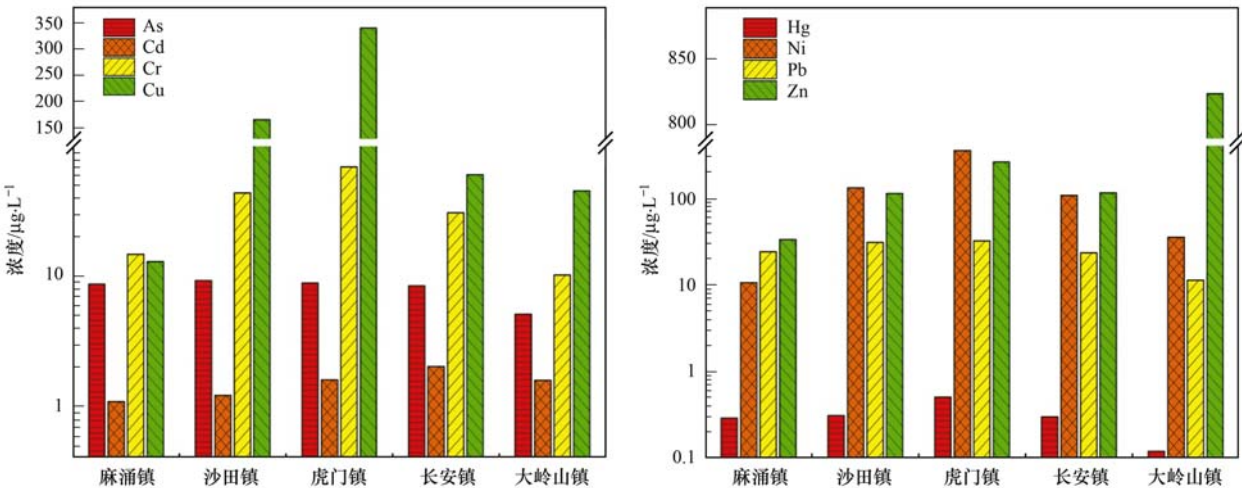


图 3 重金属年均浓度在各镇的空间分布特征

Fig. 3 Spatial distribution characteristics of annual average concentrations of heavy metals in towns

表 4 重金属的相关关系矩阵¹⁾

Table 4 Correlation matrix of the heavy metals

	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
As	1.000	0.033	0.229	0.198	0.082	0.218	0.113	0.001
Cd		1.000	0.689 **	0.526 **	0.025	0.639 **	−0.064	0.659 **
Cr			1.000	0.921 **	0.301	0.928 **	0.669 **	0.558 **
Cu				1.000	0.285	0.980 **	0.716 **	0.653 **
Hg					1.000	0.280	0.396 *	0.079
Ni						1.000	0.693 **	0.651 **
Pb							1.000	0.289
Zn								1.000

1) “*”和“**”分别表示在 0.05 和 0.01 水平(双侧)上显著相关

2.2.2 主成分和聚类分析

通过对监测数据进行检验,得到 KMO 和 Bartlett 值分别为 0.737 和 0.00,说明适合对重金属元素进行主成分分析^[31].按照因子筛选原则,提取累积方差达 81.548% 的 2 个成分作为主成分(表

5),主成分 1 占方差 51.057%,包括 Zn、Ni、Cu、Cr 和 Cd 等重金属,贡献率分别为 92.4%、90.7%、85.6%、78.6%和 72.5%;主成分 2 包括 Pb 和 Hg,贡献率分别为 98.4%和 71.5%,占方差 30.491%.将金属元素进行分类,主成分 1 及主成分 2 元素各

为一类,而 As 由于适中的矩阵载荷单独为一类.

聚类分析结果(图4)与相关性分析和主成分分析基本一致,将重金属元素分为三类:Cr、Cu、Ni、Cd 和 Zn 为一类,Hg 和 Pb 为一类,As 单独聚成一类.

表5 重金属的主成分因子载荷

Table 5 Factors matrix of the heavy metals in principal component analysis

元素	主成分1	主成分2
Zn	0.924	0.378
Ni	0.907	0.456
Cu	0.856	0.413
Cr	0.786	0.440
Cd	0.725	-0.547
Pb	0.445	0.984
Hg	-0.592	0.715
As	0.496	0.321
特征值	4.347	2.596
方差/%	51.057	30.491
累积方差/%	51.057	81.548

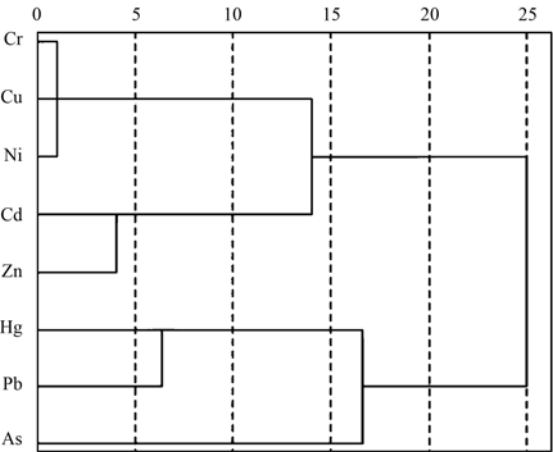


图4 地表水重金属聚类分析

Fig. 4 Clustering tree of the heavy metals in surface water

Cr、Cu、Ni、Zn 在 7、8、11、12、15、16、18、19 号采样点含量较高(图2),主要是上述采样点集中在电镀企业密集的虎门镇和沙田镇,周边分布着 28 家电镀厂. 一般来说,Cd、Cr、Cu、Ni 和 Zn 等重金属是电镀行业特征污染物^[32],可认为主成分 1 中元素主要来源于周边电镀企业. 研究区地表水 Pb 和 Hg 污染较普遍,尤以虎门镇最为严重,含量较高地方与城市主干道相邻. Pb 常被作为机动车污染源标志性元素^[33],蔡立梅等^[34]发现东莞市农田土壤中 Pb 和 Hg 污染较显著,在虎门镇存在明显积累现象,Pb 来源与公路网密集以及机动车辆急剧增加有关,说明主成分 2 中元素主要来源于道路交通. As 分布特征相比其他元素分布比较均匀(图2、图

3),在采样点和城镇间含量差异相对其他元素较小,其在空间分布上无明显规律,认为 As 与自然源有密切关系,主要受区域地质背景控制.

2.3 电镀厂周边地表水重金属健康风险评价

由地表水重金属经饮水和皮肤接触途径引起的平均个人年健康风险结果可知(表6),研究区电镀厂周边地表水的金属致癌风险较高,成人和儿童总致癌风险分别在 $3.25 \times 10^{-6} \sim 5.24 \times 10^{-3} \text{ a}^{-1}$ 和 $6.08 \times 10^{-6} \sim 1.11 \times 10^{-2} \text{ a}^{-1}$. 由致癌性重金属经饮水和皮肤接触途径引起的平均个人年健康风险以 Cr 最大,As 次之,Cd 最小. Cr 和 As 平均个人风险值高于国际辐射防护委员会 ICRP (International Commission on Radiological Protection) 推荐的最大可接受风险水平 $5.0 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$,而 Cd 低于最大可接受风险水平. 重金属经皮肤接触途径引起的致癌风险($7.13 \times 10^{-9} \sim 1.33 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$) 小于饮水途径($3.24 \times 10^{-6} \sim 1.11 \times 10^{-2} \text{ a}^{-1}$),与杜维等对长江武汉段水体经饮水、皮肤接触途径造成的健康风险研究结果相似^[35].

非致癌性重金属经饮水和皮肤接触途径引起的平均个人年健康风险大小表现为 $\text{Pb} > \text{Ni} > \text{Cu} > \text{Hg} > \text{Zn}$,对人体健康危害个人年均风险水平集中在 $10^{-10} \sim 10^{-7} \text{ a}^{-1}$,不会对暴露人群构成明显危害. 研究中,成人总非致癌风险($1.48 \times 10^{-10} \sim 5.90 \times 10^{-8} \text{ a}^{-1}$) 小于儿童总非致癌风险($2.77 \times 10^{-10} \sim 1.10 \times 10^{-7} \text{ a}^{-1}$),说明儿童是比成人更加敏感风险受体,受到重金属危害更大,此结果与祝慧娜等对湘江长株潭段水环境 Cd、As、Hg、Pb 的健康风险研究结果一致^[11].

重金属经饮水途径引起的平均个人年健康风险($1.48 \times 10^{-10} \sim 1.11 \times 10^{-2}$) 比皮肤接触途径($3.27 \times 10^{-13} \sim 1.33 \times 10^{-5}$) 大 2~3 个数量级,表明饮水是主要暴露途径. 就风险水平而言,非致癌性重金属风险水平比致癌性重金属小 4~5 个数量级,与王若师等学者研究结果一致^[6]. 因此,地区地表水环境金属健康风险主要来自致癌性重金属,Cr 和 As 应作为风险决策管理重点.

各个镇健康总风险大小顺序为虎门镇 > 沙田镇 > 长安镇 > 麻涌镇 > 大岭山镇,风险值均高于最大可接受风险水平,其中虎门镇、沙田镇总风险较高可能与区域密集电镀企业向地表水环境中排放了 Cd、Cr、Cu、Ni 和 Zn 等重金属有关. 大岭山镇地表水重金属年均浓度仅低于虎门镇(图3),其中 Zn 含量远高于其他区域,Cr、As 含量低于其他区域,大

表 6 地表水重金属经饮水和皮肤接触途径引起的平均个人年健康风险/a⁻¹

Table 6 Average personal annual health risks caused by the heavy metals via drinking and dermal contact pathways in surface water/a ⁻¹										
人群 地点		As		Cd		Cr		Cu		
		饮水	皮肤	饮水	皮肤	饮水	皮肤	饮水	皮肤	
儿童	麻涌镇	2.98E-04	3.66E-07	5.55E-06	6.81E-09	1.36E-03	1.67E-06	6.48E-10	2.98E-12	
	沙田镇	7.23E-04	8.87E-07	1.52E-05	1.87E-08	7.75E-03	9.33E-06	1.89E-08	8.72E-11	
	虎门镇	5.31E-04	6.51E-07	3.90E-05	4.79E-08	1.02E-02	1.22E-05	3.40E-08	1.56E-10	
	长安镇	6.35E-04	7.78E-07	7.06E-05	8.67E-08	6.95E-03	8.45E-06	8.68E-09	3.98E-11	
	大岭山镇	4.38E-05	5.37E-08	3.41E-05	4.19E-08	2.38E-04	2.92E-07	7.42E-10	3.40E-12	
	各元素平均风险	4.46E-04	5.47E-07	3.29E-05	4.04E-08	5.29E-03	6.38E-06	1.26E-08	5.79E-11	
成人	麻涌镇	1.59E-04	3.51E-07	2.97E-06	6.53E-09	7.36E-04	1.60E-06	4.42E-10	2.87E-12	
	沙田镇	3.86E-04	8.50E-07	8.14E-06	1.79E-08	4.26E-03	9.01E-06	1.30E-08	8.43E-11	
	虎门镇	2.51E-04	5.51E-07	2.72E-05	3.96E-08	4.87E-03	9.88E-06	2.08E-08	1.36E-10	
	长安镇	3.40E-04	7.48E-07	3.77E-05	8.29E-08	3.78E-03	8.11E-06	5.92E-09	3.85E-11	
	大岭山镇	2.34E-05	5.15E-08	1.82E-05	3.09E-08	1.28E-04	2.80E-07	5.07E-10	3.29E-12	
	各元素平均风险	2.32E-04	5.10E-07	1.88E-05	3.56E-08	2.75E-03	5.78E-06	8.14E-09	5.29E-11	
人群 地点		Hg		Ni		Pb		Zn		各镇总风险
		饮水	皮肤	饮水	皮肤	饮水	皮肤	饮水	皮肤	
儿童	麻涌镇	2.22E-09	1.02E-11	1.01E-09	4.63E-12	9.24E-08	4.25E-10	2.53E-10	1.17E-12	1.67E-03
	沙田镇	4.77E-09	2.19E-11	3.07E-08	1.41E-10	9.61E-08	4.39E-10	1.73E-09	7.96E-12	8.50E-03
	虎门镇	6.76E-09	3.11E-11	7.12E-08	3.27E-10	1.01E-07	4.63E-10	3.50E-09	1.61E-11	1.07E-02
	长安镇	5.68E-09	2.61E-11	3.01E-08	1.38E-10	9.15E-08	4.22E-10	2.20E-09	1.01E-11	7.66E-03
	大岭山镇	2.23E-10	1.03E-12	1.21E-09	5.56E-12	4.63E-09	2.13E-11	1.56E-08	7.21E-11	3.16E-04
	各元素平均风险	3.93E-09	1.81E-11	2.69E-08	1.23E-10	7.71E-08	3.54E-10	4.66E-09	2.15E-11	
成人	麻涌镇	1.52E-09	9.88E-12	6.90E-10	4.47E-12	5.69E-08	3.76E-10	1.73E-10	1.13E-12	9.00E-04
	沙田镇	3.25E-09	2.11E-11	2.09E-08	1.36E-10	6.55E-08	4.27E-10	1.18E-09	7.67E-12	4.66E-03
	虎门镇	3.88E-09	2.52E-11	4.26E-08	2.77E-10	6.89E-08	4.47E-10	2.09E-09	1.36E-11	5.16E-03
	长安镇	3.71E-09	2.41E-11	2.06E-08	1.34E-10	5.58E-08	3.61E-10	1.50E-09	9.74E-12	4.17E-03
	大岭山镇	1.53E-10	9.91E-13	8.25E-10	5.37E-12	3.16E-09	2.05E-11	1.07E-08	6.95E-11	1.70E-04
	各元素平均风险	2.50E-09	1.63E-11	1.71E-08	1.11E-10	5.01E-08	3.26E-10	3.13E-09	2.03E-11	

岭山镇健康总风险最小可能与 Zn 具有较低毒性参考剂量和 Cr、As 具有较大致癌强度系数有关。

3 结论

(1)依据《地表水环境质量》(GB 3838-2002)Ⅲ类标准,研究区电镀厂周边地表水重金属 Cr、Hg、Pb 浓度均有超标现象,其中 Cr、Pb 最大值和 Hg 平均值超过标准限值,而 As、Cd、Cu 和 Zn 均未超标。从季节变化看,Cr、Cu、Hg、Ni、Zn 和 Pb 含量均呈现出雨季高于旱季。

(2)空间分布表明,地表水中 Cu、Ni、Zn 变化幅度较大,贡献率远高于其他元素,平均贡献率最大是 Zn (31.76%),其次为 Ni (23.40%)和 Cu (20.40%)。Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 含量分布规律较相似,高含量区主要位于虎门镇和沙田镇。

(3)多元统计分析表明,研究区地表水 Cd、Cr、Cu、Ni 和 Zn 主要来源于周边电镀企业污染,Pb 和 Hg 受交通污染源影响较大,As 受人为活动干扰较轻,与自然源有密切关系。

(4)健康风险评价表明,电镀厂周边地表水重

金属的健康风险大小依次为 Cr > As > Cd > Pb > Ni > Cu > Hg > Zn,儿童比成人更容易受到重金属污染威胁,经饮水途径暴露健康风险比皮肤接触途径大 2~3 个数量级。致癌性重金属 Cr 和 As 平均个人风险值高于 ICRP 推荐最大可接受风险水平,而 Cd 低于最大可接受风险水平;非致癌性重金属对人体健康危害风险水平集中在 10⁻¹⁰~10⁻⁷ a⁻¹,比致癌性重金属的风险水平小 4~5 个数量级。Cr 和 As 应作为风险决策管理优先控制对象。

参考文献:

[1] Du Y Y, Ge Y, Lakhani V C, et al. Comparison between CBR and CA methods for estimating land use change in Dongguan, China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2012, 22(4): 716-736.

[2] Liu T Y, Yang X, Wang Z L, et al. Enhanced chitosan beads-supported Fe⁰-nanoparticles for removal of heavy metals from electroplating wastewater in permeable reactive barriers [J]. Water Research, 2013, 47(17): 6691-6700.

[3] Sun Z G, Mou X J, Tong C, et al. Spatial variations and bioaccumulation of heavy metals in intertidal zone of the Yellow River estuary, China[J]. Catena, 2015, 126: 43-52.

[4] Muhammad S, Shah M T, Khan S. Health risk assessment of heavy metals and their source apportionment in drinking water of

- Kohistan region, northern Pakistan[J]. *Microchemical Journal*, 2011, **98**(2): 334-343.
- [5] Giri S, Singh A K. Risk assessment, statistical source identification and seasonal fluctuation of dissolved metals in the Subamarekha River, India[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, **265**: 305-314.
- [6] 王若师, 许秋瑾, 张娴, 等. 东江流域典型乡镇饮用水源地重金属污染健康风险评价[J]. *环境科学*, 2012, **33**(9): 3083-3088.
- Wang R S, Xu Q J, Zhang X, *et al.* Health risk assessment of heavy metals in typical township water sources in Dongjiang River Basin[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(9): 3083-3088.
- [7] 李祥平, 齐剑英, 陈永亨. 广州市主要饮用水源中重金属健康风险的初步评价[J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(3): 547-553.
- Li X P, Qi J Y, Chen Y H. Preliminary health risk assessment of heavy metals in the main drinking water sources of Guangzhou [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, **31**(3): 547-553.
- [8] Achary M S, Panigrahi S, Satpathy K K, *et al.* Health risk assessment and seasonal distribution of dissolved trace metals in surface waters of Kalpakkam, southwest coast of Bay of Bengal [J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2016, **6**: 96-108.
- [9] 周荣喜, 范福云, 杨晓进. 基于多属性决策方法的饮用水健康风险全面评价[J]. *环境科学与管理*, 2011, **36**(3): 158-162.
- Zhou R X, Fan F Y, Yang X J. Comprehensive assessment of health risk to drinking and using water based on multi-attribute decision making[J]. *Environmental Science and Management*, 2011, **36**(3): 158-162.
- [10] 陈耀宁, 智国铮, 袁兴中, 等. 基于三角随机模拟和 ArcGIS 的河流水环境健康风险评价模型[J]. *环境工程学报*, 2016, **10**(4): 1799-1806.
- Chen Y N, Zhi G Z, Yuan X Z, *et al.* Assessment model of water environmental health risk based on stochastic simulation-triangular fuzzy numbers and ArcGIS [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, **10**(4): 1799-1806.
- [11] 祝慧娜, 袁兴中, 曾光明, 等. 基于区间数的河流水环境健康风险模糊综合评价模型[J]. *环境科学学报*, 2009, **29**(7): 1527-1533.
- Zhu H N, Yuan X Z, Zeng G M, *et al.* An integrated fuzzy model based on interval numbers for assessment of environmental health risks of water sources[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, **29**(7): 1527-1533.
- [12] Hang X S, Wang H Y, Zhou J M, *et al.* Characteristics and accumulation of heavy metals in sediments originated from an electroplating plant[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **163**(2-3): 922-930.
- [13] 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.
- [14] 陈志良, 赵述华, 周建民, 等. 典型电镀污染场地重金属污染特征与生态风险评价[J]. *环境污染与防治*, 2013, **35**(10): 1-4, 11.
- Chen Z L, Zhao S H, Zhou J M, *et al.* Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in contaminated site of a typical electroplating factory [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2013, **35**(10): 1-4, 11.
- [15] 厉炯慧, 翁珊, 方婧, 等. 浙江海宁电镀工业园区周边土壤重金属污染特征及生态风险分析[J]. *环境科学*, 2014, **35**(4): 1509-1515.
- Li J H, Weng S, Fang J, *et al.* Heavy metal pollution characteristics and ecological risk analysis for soil around Haining electroplating industrial park[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(4): 1509-1515.
- [16] Liu J, Zhang X H, Tran H, *et al.* Heavy metal contamination and risk assessment in water, paddy soil, and rice around an electroplating plant [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2011, **18**(9): 1623-1632.
- [17] 高磊, 陈建耀, 王江, 等. 东莞石马河流域水化学特征时空差异及来源辨析[J]. *环境科学*, 2015, **36**(5): 1573-1581.
- Gao L, Chen J Y, Wang J, *et al.* Temporal-spatial variation and source identification of hydro-chemical characteristics in Shima River Catchment, Dongguan City [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(5): 1573-1581.
- [18] US EPA. Risk assessment guidance for superfund: volume I: human health evaluation manual. Supplemental guidance. "Standard default exposure factors" interim final [R]. Washington: US EPA, 1991.
- [19] US EPA. Guidelines for exposure assessment [R]. Washington DC: US EPA, 1992. 186.
- [20] US EPA. Child-specific exposure factors handbook [R]. EPA/600/R-06/096F. Washington DC: US EPA, 2008.
- [21] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册(成人卷) [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2013. 90-780.
- Ministry of Environmental Protection. Exposure factors handbook of Chinese population (adult volume) [M]. Beijing: China Environmental Press, 2013. 90-780.
- [22] GB 3838-2002 地表水环境质量标准[S].
- GB3838-2002 Environmental Quality Standards for Surface Water [S].
- [23] Zhao Q H, Liu S L, Deng L, *et al.* Spatio-temporal variation of heavy metals in fresh water after dam construction: a case study of the Manwan Reservoir, Lancang River [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2012, **184**(7): 4253-4266.
- [24] Wu B, Zhao D Y, Jia H Y, *et al.* Preliminary risk assessment of trace metal pollution in surface water from Yangtze River in Nanjing Section, China [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2009, **82**(4): 405-409.
- [25] Zeng X X, Liu Y G, You S H, *et al.* Spatial distribution, health risk assessment and statistical source identification of the trace elements in surface water from the Xiangjiang River, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(12): 9400-9412.
- [26] Carafa R, Faggiano L, Real M, *et al.* Water toxicity assessment and spatial pollution patterns identification in a Mediterranean River Basin District. Tools for water management and risk analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2011, **409**(20): 4269-4279.
- [27] Alves R I S, Sampaio C F, Nadal M, *et al.* Metal concentrations in surface water and sediments from Pardo River, Brazil; human

- health risks [J]. *Environmental Research*, 2014, **133**: 149-155.
- [28] Kohušová K, Havel L, Vlasák P, *et al.* A long-term survey of heavy metals and specific organic compounds in biofilms, sediments, and surface water in a heavily affected river in the Czech Republic[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, **174**(1-4): 555-572.
- [29] Varol M, Şen B. Assessment of nutrient and heavy metal contamination in surface water and sediments of the upper Tigris River, Turkey[J]. *Catena*, 2012, **92**: 1-10.
- [30] 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.
- [31] Varol M. Assessment of heavy metal contamination in sediments of the Tigris River (Turkey) using pollution indices and multivariate statistical techniques [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **195**: 355-364.
- [32] Martín-Lara M A, Blázquez G, Trujillo M C, *et al.* New treatment of real electroplating wastewater containing heavy metal ions by adsorption onto olive stone [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, **81**: 120-129.
- [33] 袁宏林, 李星宇, 王晓昌. 西安市雨水径流中重金属季节性污染特征及分析[J]. *环境科学*, 2014, **35**(11): 4143-4147.
- Yuan H L, Li X Y, Wang X C. Heavy metals pollution and analysis of seasonal variation runoff in Xi'an[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(11): 4143-4147.
- [34] 蔡立梅, 马瑾, 周永章, 等. 东莞市农田土壤和蔬菜重金属的含量特征分析[J]. *地理学报*, 2008, **63**(9): 994-1003.
- Cai L M, Ma J, Zhou Y Z, *et al.* Heavy metal concentrations of agricultural soils and vegetables from Dongguan, Guangdong Province, China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2008, **63**(9): 994-1003.
- [35] 杜维, 李爱民, 鲁敏, 等. 长江武汉段水质重金属健康风险初步评价[J]. *环境科学与技术*, 2014, **37**(S2): 535-539.
- Du W, Li A M, Lu M, *et al.* Preliminary health risk assessment of heavy metals in the Yangtze River of Wuhan Area [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **37**(S2): 535-539.

CONTENTS

Reactivity-based Anthropogenic VOCs Emission Inventory in China	LIANG Xiao-ming, ZHANG Jia-ni, CHEN Xiao-fang, <i>et al.</i> (845)
Characteristics of Reactive VOCs Species During High Haze-Pollution Events in Suburban Area of Shanghai in Winter	GAO Shuang, ZHANG Kun, GAO Song, <i>et al.</i> (855)
Assessment of PM _{2.5} Pollution Mitigation due to Emission Reduction from Main Emission Sources in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	WU Wen-jing, CHANG Xing, XING Jia, <i>et al.</i> (867)
Concentration Characteristics and Sources of Trace Metals in PM _{2.5} During Wintertime in Beijing	QIAO Bao-wen, LIU Zi-rui, HU Bo, <i>et al.</i> (876)
Online Source Analysis of Particulate Matter (PM _{2.5}) in a Heavy Pollution Process of Shijiazhuang City During Heating Period in 2015	LU Na, LI Zhi-guo, ZHOU Jing-bo, <i>et al.</i> (884)
Analysis of Chemical Composition and Pollution Source of the Fine Particulate Matter by the SPAMS in the Four Seasons in Nanning	LIU Hui-lin, CHEN Zhi-ming, MAO Jing-ying, <i>et al.</i> (894)
Physico-chemical Characteristics of Individual Aerosol Particles in Marine Atmosphere on South Hemisphere	CHI Jian-wei, LI Chuan-jin, SUN Jun-ying, <i>et al.</i> (903)
Characteristics of Spatial Distribution of Bacterial Aerosols Produced by Fountain	ZHANG Chong-miao, YUAN Lin, XU Peng-cheng, <i>et al.</i> (911)
Removal of Volatile Sulfur Odor by the Biotrickling Filter	YE Jie-xu, MIAO Xiao-ping, ZHUGE Lei, <i>et al.</i> (918)
Magnetic Characteristics and Environmental Pollution Analysis of Street Dust in Different Functional Zones of Xi'an City	FANG Ni, ZHANG Jun-hui, WANG Jin, <i>et al.</i> (924)
Pollution Characteristics and Nitrification and Denitrification Potential of Superficial Sediments from Streams in an Urban-Rural Fringe	QIN Ru-bin, LI Ru-zhong, GAO Su-di, <i>et al.</i> (936)
Nitrification and Denitrification Rates in a Small Tributary, Nanhe River, of Three Gorge Dam Reservoir During Water Collection and Release Events	WANG Jing, LIU Hong-jie, LEI Yu, <i>et al.</i> (946)
Tempo-spatial Variations and Influential Factors of Carbon Dioxide Emissions from the Geheyan Reservoir over the Qingjiang River Basin, China	ZHAO Deng-zhong, TAN De-bao, LI Chong, <i>et al.</i> (954)
Seasonal Pollution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Surface Water of Baiyangdian Lake	WANG Yi-zhen, ZHANG Jun, ZHOU Xu-shen, <i>et al.</i> (964)
Distributions, Sources and Pollution Assessment of Hg in Sediment of Douhe Reservoir in Tangshan City	WU Ting-ting, WANG Ming-meng, CHEN Xu-feng, <i>et al.</i> (979)
Release Characteristics of Mercury from Submersed Typical Herbaceous Plants in the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Area	DENG Han, ZHANG Xiang, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (987)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water Around Electroplating Factories	YU Cong-cong, ZHAO Wei-tuo, GAO Xiao-feng, <i>et al.</i> (993)
Speciation and Ecological Risk of Heavy Metals in Surface Sediments from Jiulong River	LIN Cheng-qi, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (1002)
Fractionation and Contamination Assessment of Metal Elements in the Surface Sediments of Yundang Lagoon in Xiamen	YANG Qiu-li, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1010)
Source Analysis, Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Sewage Irrigation Area Farmland Soils of Longkou City	LI Chun-fang, WANG Fei, CAO Wen-tao, <i>et al.</i> (1018)
Efficiency and Mechanism of Purifying High Iron-Manganese from Ground Water in the Cold Villages and Towns Based on The Coupling of Rice Husk and Iron-Manganese Oxidizing Bacteria	SUN Nan, CHEN Yan-li, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1028)
Peroxidation of High Algae-laden Water by Ozone; Algae Organic Matter Transformation and Disinfection By-products Formation	ZHANG Sai, HU Xue-bin, GU Li, <i>et al.</i> (1038)
Effects of Pretreatment on Hydraulic Irreversible Membrane Fouling During Ultrafiltration Short Process: A Pilot Study	YANG Hai-yan, XING Jia-jian, WANG Can, <i>et al.</i> (1046)
Fenton-like Catalytic Removal of Organic Pollutants in Water by Framework Cu in Cu-Al ₂ O ₃	XU Dan, ZHANG Li-li, LIU Li-fen (1054)
Oxidation Destruction of Cu(CN) ₃ ²⁻ by Persulfate	WANG Yun-fei, LI Yi-bing, WANG Yan-bin, <i>et al.</i> (1061)
Enhanced Removal of Herbicide 2,4-dichlorophenoxyacetic Acid and Simultaneous Power Generation in Microbial Fuel Cells	QUAN Xiang-chun, QUAN Yan-ping, XIAO Zhu-tian (1067)
Adsorption Characteristics of Copper in Water by the Porous Biomorph-Genetic Composite of HAP/C with Eucalyptus Wood Template	LI Chao, ZHU Zong-qiang, CAO Shuang, <i>et al.</i> (1074)
Biological Toxicity Evaluation of Domestic Wastewater Based on A ² /O Treatment Processes Using a Battery of Bioassays	ZHANG Qiu-ya, MA Xiao-yan, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1084)
Effect of Wastewater Nitrogen Concentrations on Nitrogen Removal Ability of <i>Myriophyllum aquaticum</i>	MA Yong-fei, YANG Xiao-zhen, ZHAO Xiao-hu, <i>et al.</i> (1093)
Recovery Performance of ANAMMOX Process after Inhibition Resulting from Seawater	QI Pan-qing, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (1102)
Impact of Starvation Conditions on Biological Community Structure in Sulfur Autotrophic Denitrification Reactor	LI Fang-fang, SHI Chun-hong, LI Hai-bo, <i>et al.</i> (1109)
Quick Start-up of Anaerobic Ammonium Oxidation Process	LÜ Gang, XU Le-zhong, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (1116)
A New Model for the Treatment of Low Ammonia Nitrogen Wastewater by CANON Process	WANYAN De-qing, YUAN Yi, LI Xiang, <i>et al.</i> (1122)
Effects of Side-stream Phosphorus Recovery on the Performance of EBPR System Under Low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, SONG Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (1130)
Identification and Influence of Quorum Sensing on Anaerobic Ammonium Oxidation Process	CHEN Shu-han, LI An-jie, WANG Yue-xing, <i>et al.</i> (1137)
Effects of Organic Loading Rate on Startup Performance of Anaerobic Digestion with Vinegar Residues	DAI Xiao-hu, YU Chun-xiao, LI Ning, <i>et al.</i> (1144)
Influencing Mechanism of Calcium Peroxide Pre-treatment on Dewatering Performance of Waste Activated Sludge	BAI Run-ying, CHEN Zhan, ZHANG Wei-jun, <i>et al.</i> (1151)
Treatment Effects of Earthworm Constructed Wetlands in Different Working Conditions	DONG Meng-ke, LI Huai-zheng, XU Yi-xiao (1159)
Effect of PFOA on Oxidative Stress and Membrane Damage of <i>Escherichia coli</i>	YANG Meng, LI Yi, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1167)
Physicochemical Properties and Antibacterial Effect of Silver Nanoparticles; A Comparison of Environmental and Laboratorial Conditions	YI Jun, CHENG Jin-ping (1173)
Pollution Characteristics of Chlorobenzenes in Organs of Fish from Typical Epidemic Areas of Schistosomiasis Prevalence	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1182)
Effect of Nano Zeolite on Growth, Activity of Antioxidant Enzyme, and Chemical Fractions and Concentration of Cd in Chinese Cabbage	QIN Yu-li, XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (1189)
Effect of Different Iron Minerals on Bioaccessibility of Soil Arsenic Using <i>in vitro</i> Methods	ZHONG Song-xiong, YIN Guang-cai, HUANG Run-lin, <i>et al.</i> (1201)
Enhanced Electrokinetic Remediation of Heavy Metals Contaminated Soils by Stainless Steel Electrodes as well as the Phenomenon and Mechanism of Electrode Corrosion and Crystallization	WEN Dong-dong, FU Rong-bing, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (1209)
Influence of the Application of Non-Hazardous Sewage Sludge on the Evolution of Soil Carbon Pool and Carbon Pool Management Index	LIU Xiao, HUANG Lin, GUO Kang-li, <i>et al.</i> (1218)
Input and Distribution of Photosynthesized Carbon in Soil-Rice System Affected by Water Management and Nitrogen Fertilization	WANG Ting-ting, ZHU Zhen-ke, ZHU Han-hua, <i>et al.</i> (1227)
Effects of Simulated Acid Rain on Soil Respiration and Heterotrophic Respiration in a Secondary Forest	CHEN Shu-tao, SUN Lu, SANG Lin, <i>et al.</i> (1235)
Response of Soil Nitrifier and Denitrifier Community and Activity to Elevated Atmospheric CO ₂ Concentration and Temperature	LIU Yuan, WANG Guang-li, LI Lian-qing, <i>et al.</i> (1245)
Effects of Lithology on the Abundance and Composition of Soil Nitrogen-fixing Bacteria and Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities in Karst Shrub Ecosystem	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (1253)
Characterization of Phosphorus Forms in Organic Composts and Their Effects on Leaf Phosphorus Content of <i>Castanea mollissima</i> in Chinese Chestnut Producing Area	SONG Ying, GUO Su-juan, ZHANG Li, <i>et al.</i> (1262)
Effects of Acidic Materials on the N Transformations During the Composting of Pig Manure and Wheat Straw	JIANG Ji-shao, YAO Qian (1272)