

DOI: 10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2019. 01. 009

河北某电镀污染场地 Cr^{6+} 污染调查

赵德刚, 赵 亮, 田西昭, 单 强, 李红超

(河北省地质环境监测院, 河北 石家庄 050021)

摘要:为查明河北某电镀污染场地 Cr^{6+} 的污染程度和空间分布, 并对其可能影响的污染范围及风险进行预测, 采用取样化验、三维数值模拟等方法对污染场地进行调查和评价。结果表明: 污染场地在未进行人工干预治理时, 污染物受到地下水流向和含水层介质的影响, 在电镀废水停止泄露后的 180 d 内, 调查区西南部大片区域的地下水有被污染的风险。

关键词:污染场地; Cr^{6+} ; 电镀厂; 地下水; 河北省

中图分类号: X523 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004 - 6933 (2019) 01 - 0047 - 05

Investigation of Cr^{6+} pollution in an electroplating contaminated site in Hebei Province // ZHAO Degang, ZHAO Liang, TIAN Xizhao, SHAN Qiang, LI Hongchao (*Geological Environmental Monitoring Institute of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, China*)

Abstract: In order to ascertain the pollution degree and spatial distribution of Cr^{6+} in an electroplating contaminated site in Hebei Province and predict its possible contamination scope and risk, sampling test and three-dimensional numerical simulation were used to investigate and evaluate the contaminated site. The evaluation results show that the pollutants are affected by groundwater flow direction and aquifer medium when the contaminated site is not treated by manual intervention. Within 180 days after the electroplating wastewater stops leaking, the groundwater in a large area of southwest of the investigation area will be polluted.

Key words: contaminated site; Cr^{6+} ; electroplating factory; groundwater; Hebei Province

污染场地会对土壤或地下水造成污染, 对人类健康和环境产生危害, 如美国 Love 运河污染就是一起典型的污染场地引起的公害事件, 导致人们的生命健康受到损害, 产生了巨大经济损失^[1-2]。随着我国工业的不断发展, 地下水重金属污染问题日益突出^[3-6]。电镀企业普遍存在规模小、工艺简单、管理不规范等特点, 极易造成场地重金属污染^[7-9]。很多电镀厂缺乏系统完善的管理机制和必要的环保措施, 致使部分电镀厂遭到不同程度的破坏或发生严重的电镀污水渗漏。电镀污染场地主要是铬污染。而铬污染场地中 Cr^{6+} 化合物具有很强的氧化性和毒性, 易溶于酸或水, 进入环境后将对人体健康及周围环境造成持续危害^[10]。鉴于 Cr^{6+} 的高毒性、高迁移性等特征, 需要及时对铬污染场地开展修复治理。而在开展修复治理前应对污染场地进行地质调查工作。本研究以河北某电镀厂污染场地为例, 探讨分析污染场地调查的技术路线、原则、内容及方法等。

从保护生态环境, 保障人体健康角度, 提出加强污染场地环境管理及相关防治措施的对策建议。

1 研究区概况

选取位于河北省某村东北方向的养殖场内的某电镀厂为研究对象。研究区电镀污染场地面积为 0.62 km^2 , 属低山丘陵区, 地势北高南低, 处在沟谷中, 场地两侧为山体。污染源距离居民区最近距离约 125 m。由于电镀车间渡槽内电镀液出现渗漏, 导致下游水井出现明显的变色。现场调查采样后, 经化验分析下游地下水 Cr^{6+} 质量浓度超过生活饮用水卫生标准限值近 800 倍, 地下水受到严重污染。污染场地包气带结构受地形地貌和水文地质条件的控制, 场地内包气带厚度为 2.68 ~ 5.15 m, 平均厚度为 3.38 m。其岩性大部分以第四系粉土夹碎石为主, 局部地区为强风化片麻岩。污染源处 (镀槽和洗槽位置) 人工开挖深度已达 2.8 m, 揭穿了包气

带,因此该处现状包气带厚度为 0 m,渗漏出的污染物可直接进入含水层并向下游运移。

2 研究方法

世界发达国家开展污染场地的调查工作是在不同目的(一般以风险评价、污染修复为目的)驱动下、按阶段进行的,不同国家对调查阶段的划分、命名及涵盖的工作内容是不同的^[11-17]。我国 Cr⁶⁺ 污染场地调查的技术路线、原则、内容及方法如下。

2.1 技术路线

污染场地环境调查技术流程为:在资料收集、现场踏勘、人员访谈的基础上进行初步采样计划,根据评估数据判断是否进行详细采样,之后根据采样化验结果等资料进行报告编制工作,最后提出对策建议,为下一步污染治理提供科学依据。

2.2 原则

a. 针对性原则。针对场地的特征和潜在污染物特性,进行污染浓度和空间分布调查,为场地的环境管理提供依据。

b. 规范性原则。采用程序化和系统化的方式规范场地环境调查过程,保证调查过程的科学性和客观性。

c. 可操作性原则。综合考虑调查方法、时间、经费等因素,结合现阶段科技水平和相关人员素质,使调查过程切实可行。

2.3 内容

a. 开展污染区与周边的环境水文地质调查,明确地下水系统的补给、径流和排泄的方式。查明调查区内的相关水文地质参数。

b. 开展地下水水位统测工作,明确地下水的补排关系,圈定可能受镀铬液渗漏威胁的范围。

c. 开展全面的土壤、地下水采样测试工作,确定现状 Cr⁶⁺ 浓度的分布情况,确定污染范围和程度。

d. 评价污染场地地下水和土壤的污染程度。

e. 建立场地水文地质数值模型,预测 Cr⁶⁺ 污染范围及其风险变化。

f. 勘察污染场地的地质条件,为后期的污染治理提供基础数据。

2.4 方法

污染场地调查工作所采取的方法一般包括调查访问、资料收集、地形测绘、专项水文地质测绘、地球物理勘探、工程点测量、工程地质钻探、水文地质钻探、监测井建设、简易抽水试验、水位统测、取土样分析化验、取水样分析化验、三维水质模拟等。在实际工作中可根据项目所需经费、时间及场地情况进行适当选取。本研究主要介绍取土样分析化验、取水

样分析化验、三维数值模拟 3 种主要方法。

2.4.1 取土样分析化验

参考 HJ 25.1—2014《场地环境调查技术导则》和 HJ 25.2—2014《场地环境监测技术导则》相关要求,依据 HJ/T 166—2004《土壤环境监测技术规范》和 GB 15618—1995《土壤环境质量标准》要求,结合工程地质取样钻探工作,开展土壤取样监测工作。

土壤分析化验项目为 Cr⁶⁺、Cu、Pb、Zn、Cd、As、Hg、Cr、Ni 和 pH 共计 10 项。另外对镀槽四壁及周边土壤进行取样,按照 HJ/T 298—2007《危险废物鉴别技术规范》进行危险废物鉴别试验(图 1)。



图 1 场地平面布置及土壤采样布点

2.4.2 取水样分析化验

依据 HJ/T 164—2004《地下水环境监测技术规范》、HJ 493—2009《水质采样样品的保存和管理技术规定》和 GB/T 14848—93《地下水质量标准》要求,开展地下水取样工作。根据地下水流场特征确定具体取样位置,以受污染源威胁的居民井为取样对象,以圈定现状污染范围为主要目的(图 2)。

地下水分析化验指标主要有 K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Fe²⁺、Fe³⁺、Cu、Pb、Zn、Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻、CO₃²⁻、NO₃⁻、F⁻、CN⁻、全硬度、永久硬度、暂时硬度、负硬度、总酸度、总碱度、溶解性总固体、As、Hg、Se、Cr⁶⁺、Cr³⁺、Cd、游离 CO₂、Ni、Al、Mn、COD_{Mn}、pH 和石油类共计 36 项。

2.4.3 三维数值模拟

根据地下水三维数值模拟相关要求,结合环境水文地质测绘工作进行模拟。工作目的是为预测污

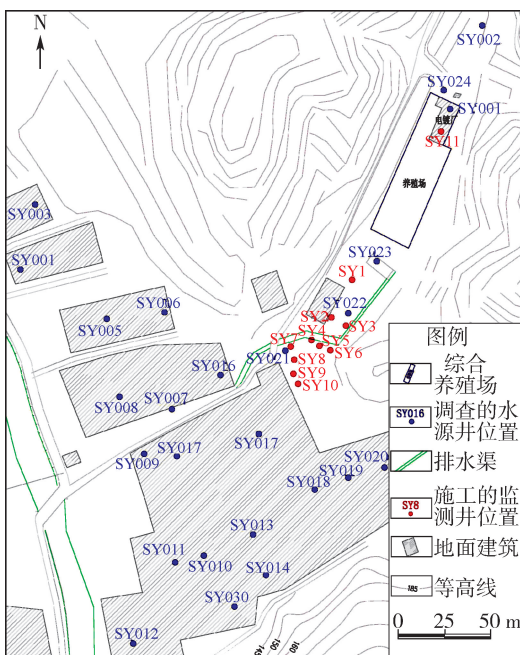


图2 地下水采样布点

染范围和优化修复治理工程布置提供依据。采用 Visual MODFLOW 4.1 模拟软件进行预测。

3 结果分析

3.1 土壤评价结果

根据土壤环境质量评价结果,污染场地存在个别土样镉、铜和镍超过 GB 15618—1995《土壤环境质量标准》中二级土壤标准,其中镉超标点存在于镀槽处,铜超标点存在于镀槽边,镍超标点存在于镀槽边、截流槽、倾倒点和上游背景值监测点。依据 DB11/T 811—2011《场地土壤环境风险评价筛选值》相关要求,以实测值与土壤风险基准值之比作为污染指数 F ,其土壤污染分级按照如下原则: $F \leq 1$ 表示未受污染; $F > 1$ 表示已受污染, F 值越大污染风险越高。通过土壤污染风险评价结果得知,污染风险因子为 Cr^{6+} 和 Ni ,其中 Cr^{6+} 的污染指数为 1.0~1.87,污染最重, Ni 的污染指数为 1.0~1.04,污染较轻。通过对镀槽和截流坑处的受污染土壤进行危险废物鉴别,依据 GB 5058.3—2007《危险废物鉴别标准—浸出毒性鉴别》相关规定,确认项目场地内受污染的土壤不是危险废物。

3.2 地下水评价结果

通过对污染场地附近 30 眼水井水进行分析化验,项目场地地下水质量距离污染源由近到远呈现出较差、良好、优良分布趋势,其中 14 眼监测井呈现较差水质。污染场地内地下水中呈现地下水质量 V 类因子的全部为 Cr^{6+} ,呈现地下水质量 IV 类因子的主要有 Cr^{6+} 和 Fe 。依据《地下水环境状况调查评价工作指南》相关要求,对项目场地地下水进行了

现状污染评价,污染指数 P 为评价因子实测值和背景值之差与标准值(《地下水质量标准》Ⅲ类限值)之比。污染指标分级标准为 $P \leq 0$,污染级别为 I 级,污染分级为未污染; $0 < P \leq 0.2$,污染级别为 II 级,污染分级为轻污染; $0.2 < P \leq 0.6$,污染级别为 III 级,污染分级为中污染; $0.6 < P \leq 1.0$,污染级别为 IV 级,污染分级为较重污染; $1.0 < P \leq 1.5$,污染级别为 V 级,污染分级为严重污染; $P > 1.5$,污染级别为 VI 级,污染分级为极重污染。通过取样化验结果可知,项目场地地下水质量距离污染源由远及近呈现出未污染、轻污染、中污染、较重污染、严重污染、极重污染的分布趋势。其中 13 眼监测井呈现极重污染,污染因子为 Cr^{6+} 和 Fe ;2 眼监测井呈现严重污染,污染因子为 Cr^{6+} 和 Fe ;1 眼监测井呈现较重污染,污染因子为 Cr^{6+} ;3 眼监测井呈现中污染,污染因子为石油类、 Mn 和 Fe ;9 眼监测井呈现轻污染,污染因子为 Cr^{6+} 、 SO_4^{2-} 、 Ni 、 Zn 、 Fe 、 Pb 、石油类和溶解性总固体;2 眼监测井呈现未污染。

3.3 地下水污染预测

在现状水文地质条件和地下水流场不发生改变的情况下,污染场地电镀废水泄露造成的污染将会继续。运用 Visual MODFLOW 软件在研究区水文地质概念模型的基础上建立地下水流数值模型对污染情况^[18]进行预测,具体过程如下。

3.3.1 含水层概化

研究目标为潜水含水层,厚度为 20~30 m。结合场地含水层分布情况的勘察,将地下水系统模型概化为两层:将地表以下第四系覆盖层及强风化片麻岩分布区域概化为第一层(含水层);将第一层底板以下的中风化、微风化及完整未风化片麻岩分布区域概化为第二层(隔水层)。将含水层概化为非均质各项同性介质。

3.3.2 边界条件概化

模拟区上边界为潜水面,垂向上受到大气降水和蒸发的影响。下边界取潜水含水层底部隔水层,由于其下部为风化程度较低的片麻岩组成,为较好的隔水层,故将其概化为零通量边界。四周边界在概化时,考虑到地形地貌的影响以及地下水特征和实际资料,确定模型东、西、北 3 个方向为定水头边界。

3.3.3 地下水流特征

模拟区为潜水含水层,地下水流受到地形控制,由地势高的地区流向地势低的地区,地下水主要接受大气降水入渗补给。排泄途径为垂向蒸发、侧向径流排泄。鉴于调查区内地下水含水层介质单一,分布均匀,可将该区地下水径流概化为二维稳定流。

3.3.4 模型检验

在进行模拟预测前,需要对模拟效果进行评价。利用污染场地前期的地下水水质检测结果作为校正标准。利用机井中 Cr^{6+} 浓度与模拟结果进行对比,通过污染场地的第 10 天的采样化验结果对三维数值模拟结果进行了校正,模拟结果与实际观测值有较好的一致性,模拟结果的可信度较高。

3.3.5 地下水污染预测结果

根据对污染场地三维数值模拟,得出地下水污染预测结果见表 1。图 3 为发生污染的第 10 天、第 90 天、第 180 天和第 360 天的 Cr^{6+} 污染羽分布情况。

表 1 电镀厂地下水 Cr^{6+} 污染模拟预测结果

模拟时间/d	最大污染质量浓度/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	最大污染距离/m	模拟区域内污染面积/ m^2
10	2742	99	6476
90	2766	228	14772
180	169	386	19888
360	12	817	17464

由图 3 可以看出,受到地下水流向的影响,污染场地北部及东北部位于地下水上游区域,未受到污染。从污染初期到电镀废水停止泄露的第 90 天, Cr^{6+} 的污染羽已经由厂区扩散到居民区,污染面积达 14772 m^2 ,部分居民区水井中 Cr^{6+} 浓度已经超过地下水质量的 III 类水质标准(0.05 mg/L)。在第 90 天至 180 天,由于电镀废水停止泄露,高浓度污染区 Cr^{6+} 浓度降低,最高质量浓度由 2766 mg/L 降至 169 mg/L ,但污染范围持续扩大至 19888 m^2 ,污染范围已经超出了模拟区域,向调查区西南方向扩散。在污染发生的第 360 天, Cr^{6+} 最高质量浓度降至 12 mg/L 。电镀废水中的 Cr^{6+} 大量被截流在含水层中,剩余部分随水流向地下水下游区域扩散。

通过模拟未进行人工干预治理时 Cr^{6+} 在污染场地的时间和空间的分布情况发现,受地下水流向和含水层介质的影响,在电镀废水停止泄露后的 180 d 内,调查区西南部大片区域的地下水有被污染的风

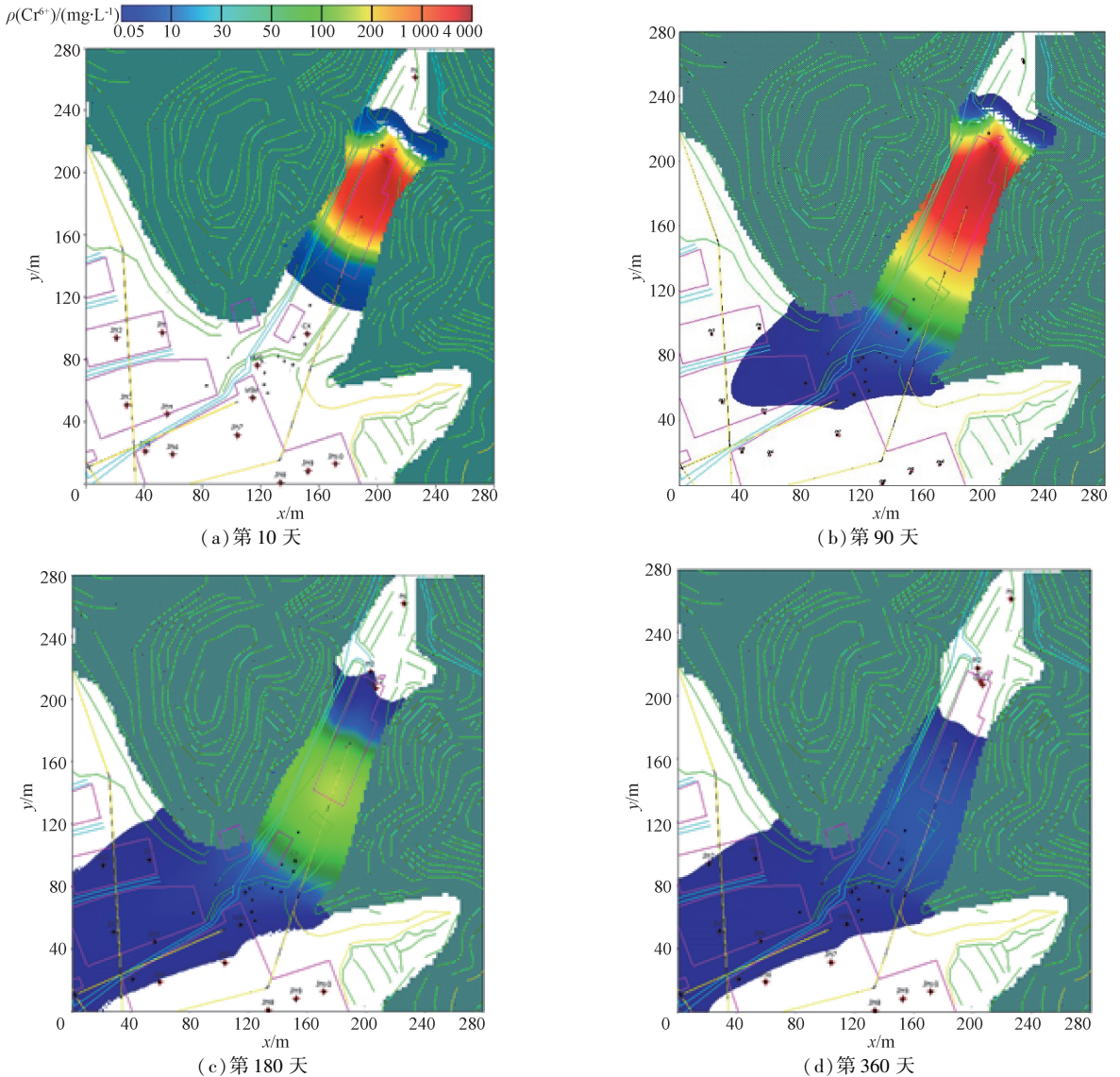


图 3 发生污染后不同时间 Cr^{6+} 污染羽分布情况

险,污染物流经的含水层也会截流大量污染物,增大后续污染治理的难度。因此,对污染区域采取及时有效的治理措施是十分必要的。

4 结 语

河北某电镀厂电镀车间渡槽内电镀液出现渗漏后,污染场地在未进行人工干预治理时,污染物受到地下水流向和含水层介质的影响,在电镀废水停止泄露后的 180 d 内,调查区西南部大片区域的地下水有被污染的风险。从保护生态环境、保障人体健康的角度,提出加强污染场地环境管理及相关防治措施的对策建议:

a. 尽快开展项目场地的环境风险评估工作,明确场地的敏感受体、风险途径及风险值,确定场地土壤和地下水的修复治理目标。

b. 在完成调查评估和风险评估的基础上,编制污染场地修复治理实施方案,并严格按方案开展相关工作,尽快完成污染场地修复治理工作。

c. 在未完成污染场地修复治理时,不要加大下游地下水开采量,以免加剧污染的扩散速度,影响用水安全。

d. 建立和完善地下水动态监测系统,及时掌握地下水水质、水位动态变化情况。

e. 政府相关部门要加强电镀企业的统一规划和管理,建立健全 Cr⁶⁺ 污染场地综合防治措施体系,制定发生污染事件的应急预案。

参考文献:

[1] National Academy of Engineering, USA. Love canal: an introduction [EB/OL]. (2006-07-20) [2017-05-19]. <http://onlineethics.org/CMS/edu/precol/scienceclass/sectone/cs6.aspx>.

[2] 刘玉强,李丽,王琪,等. 典型铬渣污染场地的污染状况与综合整治对策[J]. 环境科学研究,2009,22(2):248-253. (LIU Yuqiang, LI Li, WANG Qi, et al. Study on pollution situation at typical chrome residue contaminated sites and corresponding integrated remediation plan [J]. Research of Environmental Sciences, 2009, 22 (2) : 248-253. (in Chinese))

[3] 何晓文,许光泉,王伟宁. 浅层地下水重金属元素的富集特征研究[J]. 环境工程学报,2011,5(2):322-326. (HE Xiaowen, XU Guangquan, WANG Weining. Research on accumulation characteristics of shallow groundwater metal element [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2011, 5 (2) : 322-326. (in Chinese))

[4] 乔晓辉,陈建平,王明玉,等. 华北平原地下水重金属山前至滨海空间分布特征与规律[J]. 地球与环境,2013,41(3):209-215. (QIAO Xiaohui, CHEN Jianping, WANG

Mingyu, et al. Spatial distribution of heavy metals in groundwater from the piedmont to coastal areas in the North China Plain [J]. Earth and Environment, 2013, 41 (3) : 209-215. (in Chinese))

[5] 张兆吉,费宇红,郭春艳,等. 华北平原区域地下水污染评价[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2012,42(5):1456-1461. (ZHANG Zhaoji, FEI Yuhong, GUO Chunyan, et al. Regional groundwater contamination assessment in the North China Plain [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42 (5) : 1456-1461. (in Chinese))

[6] 张宝军,田西昭,白振宇,等. 铬污染场地铁碳微电解法原位修复实例研究[J]. 水资源保护,2015,31(5):82-86. (ZHANG Baojun, TIAN Xizhao, BAI Zhenyu, et al. Case study on situ recovery using ferric-carbon micro-electrolysis for chromium contaminated site [J]. Water Resources Protection, 2015, 31 (5) : 82-86. (in Chinese))

[7] 雍正,罗泽娇,宋萌萌. 武汉某退役电镀车间场地土壤重金属污染及形态分析[J]. 安全与环境工程,2014(3):46-50. (YONG Zheng, LUO Zejiao, SONG Mengmeng. Soil heavy metal pollution in a retired electroplating workshop in Wuhan and analysis [J]. Safety and Environmental Engineering, 2014 (3) : 46-50. (in Chinese))

[8] 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(10):1-4. (CHEN Zhiliang, ZHAO Shuhua, ZHOU Jianmin, et al. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in contaminated site of typical electroplating factory [J]. Environmental Pollution & Control, 2013 (10) : 1-4. (in Chinese))

[9] 周鼎,周建民,彭晓春,等. 某电镀搬迁场地土壤重金属污染健康风险评估[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版),2014(3):321-324. (ZHOU Ding, ZHOU Jianmin, PENG Xiaochun et al. Health risk assessments of soil polluted by heavy metals at a site of relocated electroplating [J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Science Edition), 2014 (3) : 321-324. (in Chinese))

[10] 赵庆辉,王兴润,张增强. 地下水六价铬运移的仿真及场地修复限值探讨[J]. 环境工程,2011,29(2):16-19. (ZHAO Qinghui, WANG Xingrun, ZHANG Zengqiang. Numerical simulation of transportation and migration of hexavalent chromium in ground water and remedial guide limit value of typical chromium slag contaminated sites [J]. Environmental Engineering, 2011, 29 (2) : 16-19. (in Chinese))

[11] Japan Environment Agency. Survey and countermeasures guidelines for soil and groundwater contamination [S]. Tokyo: Geo-environmental Protection Center, 1999: 11-115.

(下转第 62 页)

- [4] 邢利英,张国珍. 基于改进的共轭梯度算法重构地下水污染源项[J]. 水资源保护,2017,33(3):42-46. (XING Liying, ZHANG Guozhen. Reconstruction of the groundwater pollution source with improved conjugate gradient algorithm[J]. Water Resources Protection,2017, 33(3):42-46. (in Chinese))
- [5] 姜继平,董芙嘉,刘仁涛,等. 基于河流示踪实验的 Bayes 污染溯源:算法参数、影响因素及频率法对比[J]. 中国环境科学,2017,37(10):3813-3825. (JIANG Jiping, DONG Fujia, LIU Rentao, et al. Applicability of Bayesian inference approach for pollution source identification of river chemical spills: a tracer experiment based analysis of algorithmic parameters, impacts and comparison with frequentist approaches [J]. China Environmental Science, 2017, 37 (10): 3813-3825. (in Chinese))
- [6] 刘颖,刘丹. 我国流域事故污染源搜索的困境与方法初探[J]. 水资源与水工程学报,2009,20(1):72-77. (LIU Ying, LIU Dan. Study on the predicament and method in searching a accidental pollution source in watershed [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2009, 20(1):72-77. (in Chinese))
- [7] 郑军,张立,杨常青,等. 跨国界流域重金属污染溯源体系框架初步构建[J]. 水资源保护,2015,31(6):57-61. (ZHENG Jun, ZHANG Li, YANG Changqing, et al. Initial framework construction of sources identification system of heavy metal pollution in trans-boundary river basin [J]. Water Resources Protection, 2015, 31 (6): 57-61. (in Chinese))
- [8] 刘颖,朱清新,刘丹. 基于最优搜索理论的流域事故污染源搜索新方法[J]. 环境科学与技术,2008,31(11):140-145. (LIU Ying, ZHU Qingxin, LIU Dan. New method for searching accidental pollution source in drainage area based on optimal search theory [J]. Environmental Science & Technology, 2008, 31 (11): 140-145. (in Chinese))
- [9] 李雪,曹芳芳,陈先春,等. 敏感区域目标污染物空间溯源分析:以新安江流域跨界省断面为例[J]. 中国环境科学,2013,33(9):1714-1720. (LI Xue, CAO Fangfang, CHEN Xianchun, et al. Spatial source apportionment analysis of target pollutant for sensitive area: a case study in Xin'anjiang River Basin for interprovincial assessment section [J]. China Environmental Science, 2013, 33(9): 1714-1720. (in Chinese))
- [10] 张玉珍,黄文丹,王智苑,等. 福建敖江流域水域生态系统健康评估[J]. 湖泊科学,2015,27(6):1079-1086. (ZHANG Yuzhen, HUANG Wendan, WANG Zhiyuan, et al. Evaluation of aquatic ecosystem health in Aojiang Basin, Fujian Province [J]. Journal of Lake Sciences, 2015, 27(6):1079-1086. (in Chinese))
- [11] 翁笑艳. 山仔水库叶绿素 a 与环境因子的相关分析及富营养化评价[J]. 干旱环境监测,2006,20(2):73-78. (WENG Xiaoyan. Correlation between Chlorophyll-a and related environmental factors in Shanzi Reservoir [J]. Arid Environmental Monitoring, 2006, 20(2):73-78. (in Chinese))
- [12] 李小梅,吴春山,庄一庭,等. 石板材加工行业的水环境污染特征研究[J]. 福建师范大学学报(自然科学版),2006,22(4):67-71. (LI Xiaomei, WU Chunshan, ZHUANG Yiting, et al. Pollution characteristics of water environment caused by stone-processing industry [J]. Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition), 2006, 22(4):67-71. (in Chinese))

(收稿日期:2018-03-13 编辑:王芳)

(上接第 51 页)

- [12] USA STM. E1739-2002 standard guidance for risk-based action applied at petroleum release sites [S]. Washington D C : ISO, 2002 : 1-53.
- [13] UK EPA. Model procedures for the management of land contamination [R]. Bristol : Environment Agency-Rio House, 2003 : 4-22.
- [14] New Zealand Ministry for the Environment. Site investigation and analysis of soils: contaminated land management guideline No. 5 [S]. Wellington : Ministry of the Environment, 2004 : 4-8.
- [15] ISO TC190 SC2. Guidance on the procedure for the investigation of urban and industrial sites with regard to soil contamination; ISO-10381-5 [S]. Bern : ISO, 2005 : 3-32.
- [16] 蔡五田,张敏,刘雪松,等. 论场地土壤和地下水污染调查与风险评价的程序和内容[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(6):125-134. (CAI Wutian, ZHANG Min, LIU Xuesong, et al. On procedure and contents of investigation and risk assessment with regard to site soil and groundwater contamination [J]. Hydrogeo-logical & Engineering Geology, 2011, 38(6):125-134. (in Chinese))
- [17] 蔡五田. 论污染场地的几个问题[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(1):123-128. (CAI Wutian. Several issues on contaminated sites [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2015, 42(1):123-128. (in Chinese))
- [18] 李五金,于福荣,付丽,等. 东光县地下水水压采效果及环境影响预测[J]. 水资源保护,2017,33(5):123-129. (LI Wujin, YU Furong, FU Li, et al. Forecast of underground water compressive exploitation effects and environmental impact in Dongguang County [J]. Water Resources Protection, 2017, 33 (5): 123-129. (in Chinese))

(收稿日期:2018-01-29 编辑:王芳)