

基于 Visual MODFLOW 的西北某铜金属冶炼项目地下水环境影响预测模拟

尹芝华 孙 晖 任 锋 杨 彦 张启军 郝言正

(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

[摘 要] 以西北某铜金属冶炼项目为研究对象,在水文地质勘察基础上,运用 Visual MODFLOW 建立地下水水流模型和溶质运移耦合模型,分析该铜冶炼厂在非正常工况废酸泄露条件下特征污染物在地下水环境中的迁移规律。预测表明,在整个模拟期内, SO_4^{2-} 污染晕随地下水流动而迁移,其浓度和污染范围先增加后减小。两口下游虚拟观测井监测结果显示, SO_4^{2-} 污染物浓度均低于标准要求。地下水环境影响预测模拟有助于企业减少地下水污染的风险,确保生产质量安全。

[关键词] 铜冶炼; 废水污染; 水文地质; 溶质运移; 数值模拟; 地下水; 源强分析

[中图分类号] TF811; X758

[文献标志码] B

[文章编号] 1008-5122(2021)05-0045-06

DOI: 10.19610/j.cnki.cn11-4011/tf.2021.05.010

Groundwater Environmental Impact Prediction Simulation Based on Visual MODFLOW for a Copper Refining Project in Northwest China

YIN Zhi-hua, SUN Hui, REN Feng, YANG Yan, ZHANG Qi-jun, HAO Yan-zheng

Abstract: By taking a copper smelter project in northwest China as the research object, based on the hydrogeological investigation, the groundwater flow model and solute transport coupling model were established by using Visual MODFLOW to analyze the transport law in the groundwater environment of the characteristic contaminants under the condition that waste acid leaks from the copper refining plant under abnormal working conditions. The prediction results showed that during the whole simulation period, SO_4^{2-} pollution halo migrated with groundwater flow, and its concentration and pollution range increased first and then decreased gradually. The monitoring results of two downstream virtual observation wells showed that the pollutant concentration was lower than the standard requirements. The prediction simulation helps enterprises to reduce the risk of groundwater pollution and ensure the quality and safety of production.

Key words: copper smelter; wastewater pollution; hydrogeology; solute transport; numerical simulation; groundwater; source intensity analysis

[收稿日期] 2021-05-19

[作者简介] 尹芝华(1991—),男,河南新乡人,硕士,工程师,主要从事土壤和地下水污染防控工作。

[引文格式] 尹芝华,孙晖,任锋,等.基于 Visual MODFLOW 的西北某铜金属冶炼项目地下水环境影响预测模拟[J].有色冶金节能,2021,37(5):45-50.

0 前言

随着我国铜金属冶炼行业的快速发展,与之相关的环境隐患问题日渐突出^[1]。由于铜金属冶炼技术复杂,污染生产环节较多,废水产生量较大,且含有大量浓度较高的一类重金属污染物,国家相关

文件^[2-3]均把铜金属冶炼业列为重金属污染防控的重点行业。同时,铜金属冶炼过程还会产生废酸等工艺废水和冶炼水碎渣、制酸系统铅渣、砷渣、废酸处理站的中和渣、石膏渣、脱硫副产物等固体废物^[4]。一旦原辅材料、产品、废水和固体废物在贮存、运输、使用和处理等过程中发生泄露,将对土壤和地下水环境造成污染^[5]。若地下水环境遭受污染,由于地下水污染治理的长期性、艰巨性,其修复工作困难重重,且耗资巨大^[6-7]。因此,有必要深入分析铜冶炼项目在运营期对地下水环境的影响,从而防患于未然。

Visual MODFLOW 软件以操作简单、界面友好等优点成为目前国际上先进的地下水渗流和溶质运移的标准可视化专业软件,是由加拿大 Water-100 水文地质公司在原 MODFLOW 软件的基础上应用可视化技术开发研制的。目前,Visual MODFLOW 已广泛应用于模拟地下水污染物运移,以及预测不同管理方案的污染物运移的影响^[7-8]。

我国西北某铜金属冶炼厂年处理铜精矿 45 万 t,采用“氧气底吹熔炼+氧气底吹连续吹炼+底吹精炼”三连炉全底吹连续炼铜生产工艺,主体工程主要由熔炼系统、电解系统、净液系统、渣处理系统、制酸系统等组成,主要污染源来自制酸系统的废水处理工序。本次利用 Visual MODFLOW 软件建立该铜金属冶炼厂区地下水水流及溶质运移数值模型,分析非正常工况废水持续泄露条件下特征污染物对地下水环境的影响,并提出针对性的防控对策,以预防与控制地下水环境恶化,保护地下水资源,降低企业服务期满后的场地修复风险,为类似铜金属冶炼项目环境决策、工程设计和环境管理提供科学依据。

1 研究区概况

1.1 自然地理条件

研究区所在区域地貌类型为山前冲洪积扇,总体地势北高南低,海拔高程为 1 020 ~ 1 140 m,总体地形较为平坦,地面坡降 1.5‰。铜冶炼厂位于山前冲洪积扇中上部,地处中纬度地区,远离海洋,深居内陆,属于半干旱中温带大陆性季风气候,多年平均降水量为 305.8 mm(降水主要集中于每年的 7 ~ 9 月),多年平均蒸发量为 2 287.4 mm(蒸发主要发生在每年的 4 ~ 8 月),多年平均气温 6.5℃。研究区东侧为季节性河流,河谷平坦,河长 115 km,平均

比降为 6‰,流域面积为 2 282 km²,多年平均流量为 1.0 m³/s,最终该河流汇入黄河。

1.2 水文地质特征

研究区主要分布第四系松散岩类、单一结构的孔隙潜水以及深部承压水。潜水层岩性主要为粉细砂岩、中砂岩,局部为中粗砂岩,含卵石,夹薄层粉土,水位埋深为 3.0 ~ 10.85 m,含水层结构松散,渗透良好,水量丰富,含水层厚度大于 20 m。承压含水层主要位于淤泥质、粉质黏土层之下,岩性主要为细砂岩和细粉砂岩,含水层厚度为 40 ~ 60 m,单井涌水量为 500 ~ 1 000 m³/d,溶解性总固体小于 1 000 mg/L,水化学类型以 HCO₃-Ca·Mg 型为主,水质良好。该含水层是研究区内生活用水的主要供水层。

同时,研究区位于区域上的地下水补给-径流区,主要接受大气降水、地表水和上游含水层的侧向补给,地下水流整体沿北北东向-南南西向径流,水力坡度为 2.5% ~ 3.0%,主要通过地下水开采(生活供水井、农灌井、工业生产井)和侧向径流发生排泄。研究区受季节性开采和上游水体补给作用影响,地下水动态类型为径流-开采型,地下水水位年际变幅为 0.22 ~ 1.22 m。

2 地下水数值模拟

2.1 水文地质概念模型

该西北铜金属冶炼厂区位于研究区北部,地形比较平坦。根据水文地质勘察结果,厂区包气带岩性主要为粉土和粉砂土,渗透系数为 0.037 06 ~ 0.079 66 m/d,其防污能力中等。浅层潜水层埋深 4.5 m 左右,岩性主要为粉细砂岩和中砂岩,含卵石,局部以粉质黏土为主,含水层厚度约 14.4 m。潜水层的相对隔水底板为中更新统、上更新统湖积-洪积层,岩性主要为黑灰色、青灰色的淤泥质砂黏土夹灰黑色粉细砂岩、粉砂岩,层理清晰,透水性极差,渗透系数小于 0.05 m/d,具有极好的隔水性,因此浅层潜水层与下伏承压含水层之间的水力联系较差。埋藏在稳定隔水层之下的地下水为承压水。

研究区西部以河流为天然边界,指定流量边界;东部边界垂直地下水等水位线,指定人为边界、零流量边界;北部边界平行于地下水等水位线,定义为定水头边界;南部边界为断层,阻水性,定义为零流量边界;上部边界为研究区的潜水

面,接受大气降水等补给以及人工开采等排泄方式;下部边界为潜水面以下的厚层淤泥质黏砂土底板,为隔水边界。

综上,研究区地下水系统可概化为各向均质同性、空间多层结构、三维稳定的地下水流系统。

2.2 地下水数学模型

2.2.1 地下水流数学模型

根据水文地质概念模型,用公式(1)来表达研究区地下水流系统。

$$\begin{cases} \frac{K_{xx}}{\partial x} \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{K_{yy}}{\partial y} \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{K_{zz}}{\partial z} \frac{\partial H}{\partial z} + W = 0 & (x, y, z) \in \Omega \\ H(x, y, z) = H_0(x, y, z) & (x, y, z) \in \Omega \\ K \frac{\partial H}{\partial n} \Big|_S = q(x, y, z) & (x, y, z) \in S \\ q(x, y, z) \Big|_\Gamma = C(h - h_0) & (x, y, z) \in \Gamma \end{cases} \quad (1)$$

式中, Ω 表示地下水渗流区域; H 为地下水水头,m; S 为模型的第二类边界; Γ 为模型的第三类边界(混合边界); K_{xx} 、 K_{yy} 、 K_{zz} 分别表示 x 、 y 、 z 主方向的渗透系数,m/d; W 表示源汇项,包括降水入渗补给、河流入渗补给、井的抽水量等; $H_0(x, y, z)$ 表示初始地下水水头函数,m,在稳定流里可不考虑; $q(x, y, z)$ 为边界单位面积流量函数,m³/d; n 为边界 S 上的外法线方向; h 为索取水头边界处水头,m; h_0 为天然水头,m; $C = KA/L$ (C 为流量,m³/d; A 为过水断面面积,m²; L 为 h 和 h_0 之间的距离,m)。

2.2.2 地下水溶质迁移数学模型

根据概化结果,用公式(2)来表达研究区地下水溶质迁移数学模型。

$$\begin{cases} \frac{\partial (\mu C)}{\partial t} = \frac{\partial (\mu D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j})}{\partial x_i} - \frac{\partial (\mu v_i C)}{\partial x_i} + q_s C_s + \sum R_n \\ C(x, y, z, 0) = C_0(x, y, z) \quad [(x, y, z) \in \Omega, t = 0] \\ -D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} = 0 \quad [\Gamma, t > 0] \end{cases} \quad (2)$$

式中, C 为地下水中组分的溶解相浓度,mg/L; μ 为含水层介质的孔隙度,无量纲; t 为时间,d; x_i 为沿直角坐标系轴向的距离,m; D_{ij} 为水动力弥散系数张量,m²/d; v_i 为孔隙水平平均实际流速,m/d; q_s 为单位体积含水层流量,代表源河汇,m³/d; C_s 为源或汇水流中组分的浓度,mg/L; $\sum R_n$ 为化学反应项,mg/m³·d; Ω 为溶质迁移的区域; C_0 为组分的初始浓

度,mg/L; Γ 为Neumann边界。

2.3 模型网格剖分及验证

2.3.1 模型网格剖分

Visual MODFLOW 模型的网格剖分(空间离散)利用软件的自动离散功能完成。考虑到模拟精度尤其是溶质迁移模型精度的要求,根据模拟区典型水文地质钻孔揭露的地层信息,在垂向上将模拟区剖分为1层,在水平方向上用正交网格剖分为90行×125列的网格,单元格大小为100 m×100 m,模拟区总共剖分为11 250个单元格(图1)。



图1 网格剖分图(黑色为非活动单元格)

2.3.2 水文地质参数确定

根据研究区已有的水文地质资料和水文地质试验,运用PEST模块进行参数分区和优化,最终确定的水文地质参数见表1,模拟区水文地质参数分区如图2所示。

表1 水文地质参数

区域	渗透系数/m·d ⁻¹	给水度	有效孔隙度
I	27	0.09	0.35
II	31	0.11	0.41
III	41	0.13	0.43

2.3.3 模型验证

模型验证是建立水文地质数值模型的关键步骤之一。通过模型校正、参数调试等过程,要求所模拟的地下水流场与实际地下水流场基本一致,以客观反映地下水流动的趋势,提高模型的仿真度。

模拟以调查期间的实际枯水期地下水流场作为初始流场,通过进行水文地质参数反演以及边界条

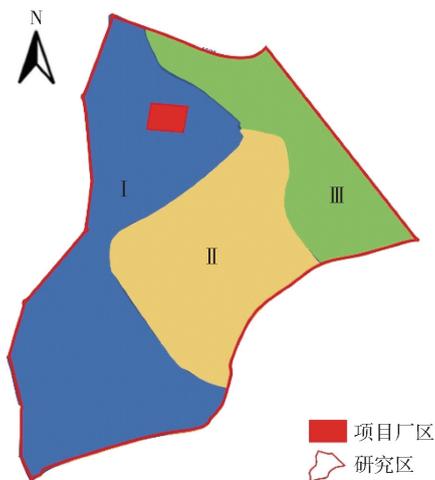


图2 研究区水文地质参数分区

件和源汇项的模型识别,得到地下水流场;通过将实际监测的地下水水位与模拟计算得到的地下水水位进行拟合,得到的流场图及水位拟合曲线如图3、图4所示。

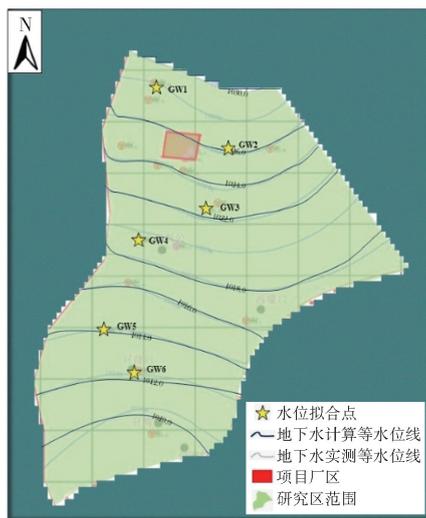


图3 模型计算的流场图

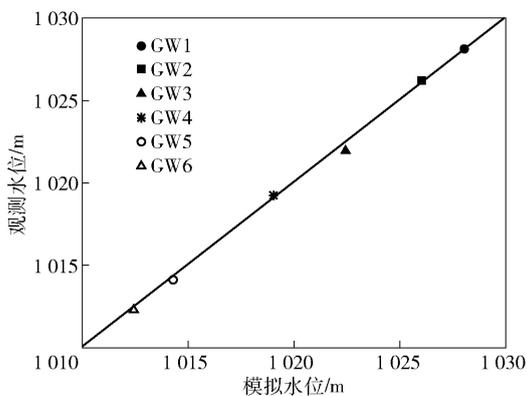


图4 水位拟合曲线图

由图3、图4可知,模型计算出的流场与实测的地

下水流场基本吻合,证实所建立的地下水流数值模型基本达到精度要求,可运用该模型进行地下水预测。

3 地下水数值模拟预测结果及分析

3.1 预测情景及源强分析

3.1.1 预测情景

根据建设项目工艺分析,本次主要针对铜冶炼厂污酸处理站的污酸中和池防渗系统破裂导致的污酸泄漏事故进行模拟预测。同时,结合《环境影响评价技术导则 地下水环境》(HJ 610—2016),地下水污染源可概化为连续恒定排放、非连续恒定排放以及瞬时排放,考虑实际情况以及不利环境的因素,设定本项目地下水污染源排放方式为非连续恒定排放。因此,预测情景可概化为污酸中和池以非连续恒定排放方式发生泄漏。

3.1.2 预测源强

根据相关研究^[9],一般情况下,当裂缝面积小于总面积的0.3%时,地下水泄漏情况不易发觉。由于废水泄漏量占废水产生量的比例较小,非正常状况不易被发现;同时,根据污酸处理站设备检验以及下游地下水水质监测(逢月)频次,模型试算得到的下游虚拟监测井污染物浓度变化曲线显示,污染物浓度在1个月左右超过了《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017)中的Ⅲ类标准,表明发生了污染事故。假设从监测污染到采取措施不再发生事故需5d,那么污染物泄漏时长约为65d。

污染物泄漏量的计算公式如下:

$$Q = KIA \quad (3)$$

式中, Q 为每日渗漏量, m^3/d ; A 为泄露面积, m^2 ; K 为天然包气带渗透系数, m/d ; I 为取值为1,无量纲。

经过计算,每日污酸渗漏量为 $0.0045 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

同时,根据《环境影响评价技术导则 地下水环境》(HJ 610—2016),结合项目污酸污染物种类、污染浓度、超标倍数及毒性大小,选择污染物 SO_4^{2-} 作为预测因子。

3.2 预测结果及分析

本次预测运用地下水水流运动MODFLOW模型和利用溶质迁移MT3D耦合模拟污染物在地下水中的迁移规律。由于包气带厚度不大,考虑环保最不利情况,假设污染物下渗后直接进入含水层,不考虑包气带对污染物的阻滞作用。污酸中和池泄漏发生100d、1000d、3650d、7300d时的 SO_4^{2-} 污染物的污染晕形状如图5所示。

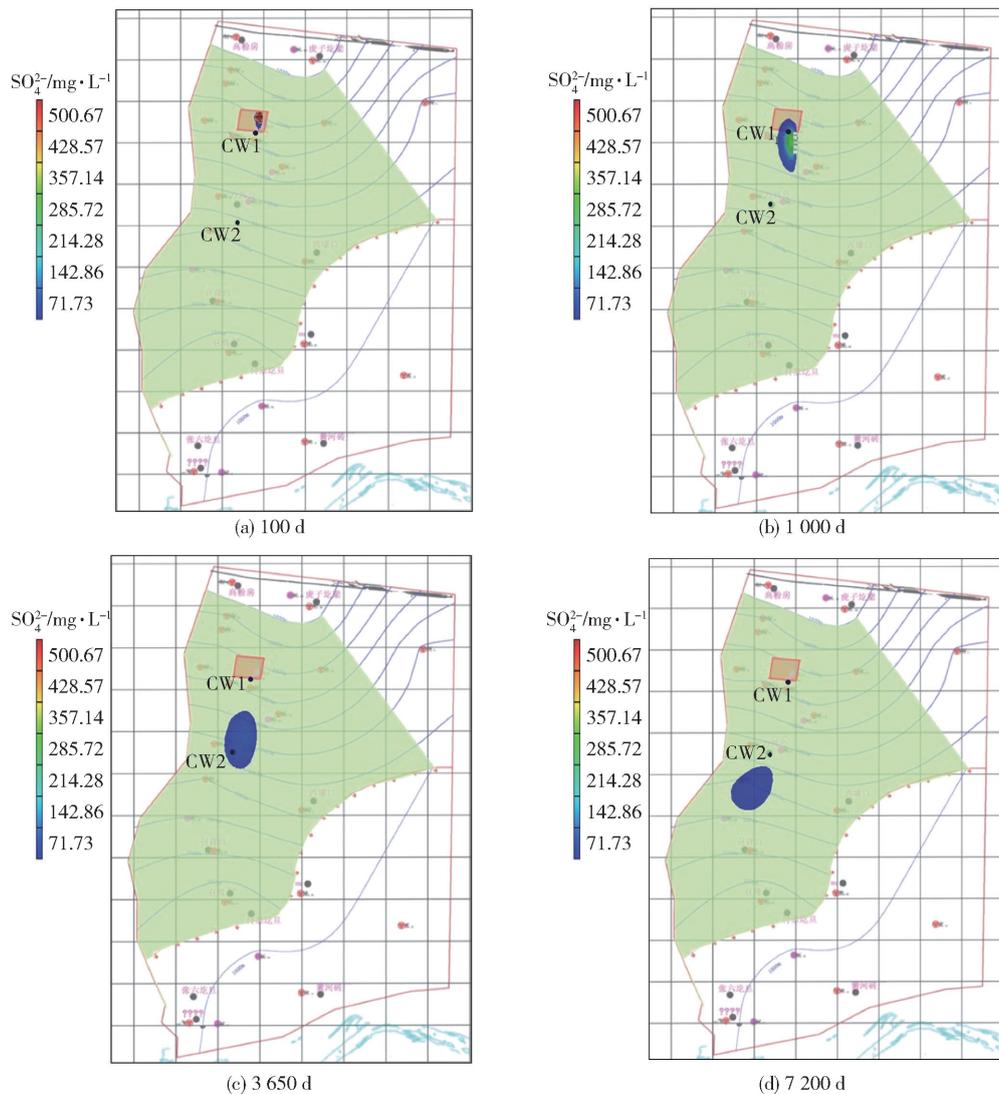


图5 非正常状况下污染物 SO_4^{2-} 不同时间污染晕变化

由图5可知,在非正常状况下,污酸中和池污染物 SO_4^{2-} 进入地下水之后,随地下水发生迁移。由于研究区地下水水力坡度较小, SO_4^{2-} 迁移缓慢,扩散范围有限。由于废酸泄漏65 d后因采取措施停止泄漏,污染物在地下水中的浓度和污染范围的变化规律为先增加后减小,污染晕也随地下水流动而迁移。整个模拟期内,地下水中 SO_4^{2-} 污染晕扩散范围未超过评价范围,且随着时间的推移,污染物浓度逐渐变小。

为进一步了解模拟区地下水中污染物浓度随时间的变化情况,在厂区边界和厂区下游敏感点村庄设置两口虚拟浓度观测井,编号分别为 CW1 和 CW2。这两口监测井中污染物浓度随时间变化的情况如图6所示。

由图6可知,厂区边界和厂区下游敏感点村庄

观测井中的 SO_4^{2-} 浓度在整个模拟期内的最高值分别为 148.12 mg/L 和 55.518 mg/L,叠加环境现状值后, SO_4^{2-} 浓度分别为 214.12 mg/L 和 113.518 mg/L,均低于《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017)中规定的Ⅲ类标准(250 mg/L),说明考虑环境现状值叠加情况下,非正常状况污酸中和池污染物 SO_4^{2-} 对厂界及周边敏感点的影响程度在可接受范围内。

4 结束语

基于 Visual MODFLOW 模型,针对西北某铜金属冶炼厂的污酸中和池泄漏情景,通过地下水环境影响识别、水文地质参数反演、水文地质概念模型的建立,进行地下水环境影响预测模拟。预测结果表明,非正常状况下铜冶炼厂废酸中和池发生泄漏后,

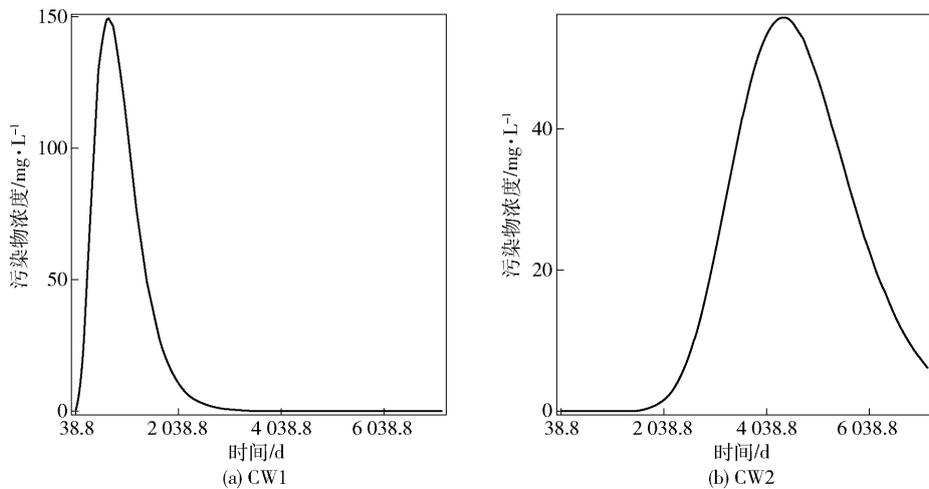


图6 非正常状况下污染物 SO_4^{2-} 浓度变化历时曲线

污染物对地下水环境的影响在可接受范围内。该预测方法能够满足冶炼项目地下水环境影响评价的需求,可为类似有色金属冶炼项目地下水环境影响评价提供参考,为促进有色金属冶炼企业安全生产和保护地下水环境提供科学依据。

[参考文献]

- [1] 陈莉. 我国铜冶炼生产现状及发展趋势[J]. 有色冶炼, 1998(8): 31-34, 45.
- [2] 原国家环境保护部. 重金属污染综合防治“十二五”规划[R]. 2014.
- [3] 国家生态环境部. 关于加强涉重金属行业污染防控的意见[R], 2018.
- [4] 马倩玲. 浅析铜冶炼行业污染物的产生及治理[C]// 金属采掘·冶炼环境影响评价国际研讨会论文集. 武汉: 环境保护部环境工程评估中心, 2012: 62-67.
- [5] 赵晋, 陈春丽. 铜冶炼企业固废产生节点分析及处置措施建议[J]. 有色冶金设计与研究, 2013, 34(3): 75-78.
- [6] 王大纯, 张人权, 史毅虹, 等. 水文地质学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1986.
- [7] 薛禹群, 张幼宽. 地下水污染防治在我国水体污染控制与治理中的双重意义[J]. 环境科学学报, 2009, 29(3): 474-481.
- [8] 王庆永, 贾忠华, 刘晓峰, 等. Visual MODFLOW 及其在地下水模拟中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2007(5): 90-92.
- [9] 刘国东, 黄玲玲, 邢冰, 等. 典型建设项目地下水污染源识别与源强计算[J]. 环境影响评价, 2014(4): 42-46, 51.