

铜矿尾矿库污染物在地下水中运移规律数值模拟

高小文^{1,2}, 吕敬^{1,2}, 李秀娟^{1,2}, 高策^{1,2}, 孙启明^{1,2}

(1. 长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要: 尾矿库是矿山生产环节的必建场所,对周边环境有深远影响。以甘肃南坪铜矿为研究对象,运用 Visual MODFLOW 建立三维可视化水文地质模型,并通过 MT3DMS 溶质运移模块对 4 种特征污染物在无防渗和防渗破损两种非正常工况下进行污染物运移规律模拟和预测,从而验证尾矿库的可靠性,为尾矿库周边环境污染治理提供依据。结果表明:污染物在地下水中沿水流方向运移,随运移距离的增大,污染物浓度逐渐减小;总磷和氨氮运移距离远,对水环境的影响超过总砷和六价铬;相对于尾矿库无防渗,尾矿库采取防渗措施,可以有效降低对地下水污染的风险。

关键词: 尾矿库; 污染物; 地下水; Visual MODFLOW; 污染物运移; 数值模拟

中图分类号: X523

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)02-0120-06

Numerical simulation of contaminant transport characteristics in groundwater of copper mine tailings

GAO Xiaowen^{1,2}, LÜ Jing^{1,2}, LI Xiujuan^{1,2}, GAO Ce^{1,2}, SUN Qiming^{1,2}

(1. School of Environmental Science and Engineering of Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effect in Arid Region of Ministry of Education, Xi'an 710054, China)

Abstract: Tailing pond is a necessary construction for mining production, which has a profound impact on the surrounding ecological environment. This paper takes a copper mine at southern Gansu Province as the research object, using Visual MODFLOW to establish visible three-dimensional hydrogeological model. The MT3DMS module was used to simulate and predict solute transport characteristics of 4 kinds of pollutants under two kinds of working conditions (no impervious layer and damaged impervious layer) so as to verify the reliability of the tailings pond and provide the basis for the surrounding environment pollution control. The results indicated that the pollutants transported along the flow direction in the groundwater, and the pollutant concentration decreased with the increase of the migration distance. Total phosphorus and ammonia nitrogen's migration distance were far, the impact on the water environment was more than that of total arsenic and six valence chromium; compared with no impervious layer, tailings with anti-seepage measures can effectively reduce the risks of groundwater pollution.

Key words: tailing-dam; pollutant; groundwater; Visual MODFLOW; pollutant transport; numerical simulation

1 研究背景

矿山开发常会导致环境污染,其中地表水和地下水的污染对人类社会的影响较大^[1]。重金属、氨氮、磷、砷等主要污染物对地下水的污染后果是非常严重的,污染后的地下水环境恢复具有时间长、恢复机理复杂、恢复困难等特点^[2]。尾矿库是矿山堆放废渣和排放废水的主要设施,也是矿区地下水污染物的直接来源。尾矿库在企业生产过程中必然会产生一定的污染物,污染物对企业周围的地下水和地

表水环境会产生重要影响。对尾矿库内污染物运移规律进行研究,帮助矿山企业加强对尾矿库的监测,有利于保护尾矿库周边地下水环境。自 1988 年 MODFLOW-88 模拟软件问世以来^[3],地下水数值模拟在国内不断发展,其成为研究地下水流动规律的主流方法。目前地下水数值模拟软件有加拿大 Waterloo 水文地质公司在原美国地质调查局开发的三维有限差分地下水流动模型 MODFLOW 软件基础上应用现代可视化技术开发的 Visual MODFLOW、有限元地下水流动系统 FEFLOW、地下水模

拟系统 GMS 等。其中 FEFLOW 能方便地处理不规则边界且各向异性的非均质含水层,以及倾斜岩层和复杂边界,可以剖分大小形状不一的计算单元来适应水头、浓度等变量的变化和要求,所建立的模型有较高的精度,但是要求计算机内存大、运算能力强,对于大区域问题,模型识别与校验过程困难; Visual MODFLOW 对于一维、二维流等简单问题,它的数学表达式和计算过程都比较简单、直观易懂,算法效率比较高,对一些概化比较简单均匀的研究区,运算速度快,占用内存少,对于解决地下水流问题来说,有限差分法的精度比较好;GMS 也是基于有限差分法的三维地下水流软件,其整合了 MODFLOW 程序包,并加强了三维地质可视化显示,建模过程直观,操作简便^[4-7]。

本文以甘肃省合作市某铜矿尾矿库区作为研究区,因研究区模型范围小、概化简单均匀,故采用最为广泛使用的 Visual MODFLOW 三维有限差分软件模拟尾矿库 4 种特征污染物在地下水中的运移过程,为矿区地下水环境影响评价和治理提供科学依据。

2 研究区概况

2.1 气候与自然环境

南畔铜矿尾矿库位于甘肃省藏族自治州合作市,该地区位于青藏高原东缘,属高原大陆性季风气候,具有寒冷湿润、冬长夏短的气候特点。年均气温在零下 0.5 ~ 3.5℃,极端最高气温 28℃^[8];降雨集中在 7、8、9 月份,根据合作市气象局多年的气象观测资料算得当地多年平均降雨量为 545 mm^[9],地表径流深 200 ~ 350 mm,年蒸发量 1 222 mm^[10];研究区地貌形态为典型的高原中山地貌,东北部地区为夷平面,南部地区为低山峡谷,地形地块零碎,坡度较大,地区地形切割强烈,地势南北高中间低,并自

东北向西南倾斜,海拔高度 2 860 ~ 3 430 m^[11]。

2.2 水文地质条件

依据尾矿库周围地表水分水岭圈定研究区,研究区内有一条由东向西穿越研究区的常年性河流咯河,从尾矿库北侧流过。研究区内地下水类型主要有第四系洪积砂砾石孔隙水、基岩裂隙水及碎屑岩类裂隙水。其中第四系洪积砂砾石孔隙水赋存于咯河河漫滩及沟谷河床,在岩石分化裂隙及构造裂隙发育的山区富存基岩裂隙水。

研究区地下水主要有大气降水及基岩裂隙水补给,水流由分水岭顺地势流向沟谷。排泄方式主要以泉或渗流的形式在地形低洼处或河流切割地排泄,个别地带以矿区生产井开采地下水及蒸发形式排泄。

3 模型建立

3.1 概念模型

模拟区范围包括咯河部分汇流区域,除咯河流入模拟区外,周边边界均为分水岭。研究区长 5 840 m,宽 4 140 m,平面面积 23. 9148 km²,底部边界取在标高 2 683. 51 m 处,顶部边界取在地表。

根据已有钻孔资料统计,研究区内地层岩性从地表往下依次主要为第四系冲洪积砂砾石、二叠系十里墩组(Psl)泥质粉砂岩、石英角岩。第四系砂砾石渗水良好,可将区内渗透介质概化为多孔介质,地层的分布使多孔介质表现为非均质各项同性^[12]。

由于研究区处在山区,研究区边界由概化为第二类零流量边界的水分岭边界圈定;咯河河谷区概化为第一类边界;研究区内咯河、无名沟等地表河流和泉点排泄地下水,概化为排泄边界;研究区底部地层为透水性差的完整基岩,模型中概化为隔水底板;地表面接受大气降水入渗补给,作为潜水面边界。其数学模型描述如下:

$$\left\{ \begin{aligned} &\frac{\partial}{\partial x}(K \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K \frac{\partial H}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K \frac{\partial H}{\partial z}) = S_s \frac{\partial H}{\partial t} \quad (x,y,z) \in \Omega, t \geq 0 \\ &H(x,y,z,0) = H_0(x,y,z) \quad (x,y,z) \in \Omega \\ &H(x,y,z,0) |_{B_1,B_2,B_3} = H_1(x,y,z,t) \quad t \geq 0 \\ &-K \frac{\partial H}{\partial n} |_{B_4,B_5,B_6,B_9} = 0 \quad t \geq 0 \\ &Q_r |_{B_7} = C_r(H - H_r) \quad t \geq 0, \text{河流及泉边界} \\ &\begin{cases} H |_{B_8} = z \\ -(K + W) \frac{\partial H}{\partial z} + W |_{B_8} = \mu \frac{\partial H}{\partial t} \end{cases} \quad t \geq 0, \text{在潜水面} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

式中: H 为水头, m ; K 为渗透系数, m/d ; S_s 为弹性释水系数, $1/d$; W 为降水补给强度, m^2/d ; μ 为给水度; Ω 为渗流区; x, y, z 为坐标轴方向, m ; t 为时间, d ; n 为各边界的外法线方向; H_0 为渗流区初始流场, m ; H_1 为一类边界水头, m ; Q_r 为河流(泉)地下水交换量, m^3/d ; H_r 为河流(泉)水位标高, m ; C_r 为河床(泉)介质渗透性能参数, m^2/d ; $B_1 - B_9$ 的含义见图 1 水文地质概念模型分区图。Visual MODFLOW 是基于有限差分法开发的软件, 可以求解上述数学模型^[12-13]。

3.2 水流模型

根据有限差分原理, 用差商代替微分方程及边界条件中的微商, 利用 Visual MODFLOW 建立地下水流数值模型, 在水平面上采用间距为 10m 等间距正交网格将研究区剖分为 414 行、514 列。依据钻孔资料和地层结构划分 3 个含水层, 从下往上为基岩裂隙含水层、基岩分化裂隙含水层、第四系洪积砂砾石孔隙含水层。

根据研究区内多年的钻孔资料并结合对区域地层分布规律的认识, 通过 Kriging^[14]插值生成模型分层数据, 运用 Surfer 软件对研究区边界以外进行白化, 获得研究区三维几何模型, 其水文地质参数分区见图 1(水文地质概念模型分区图)。

3.3 模型识别

根据研究区地形地貌分布特征以及当地的气象资料, 初步确定山区大气降水入渗补给系数为 0.06, 区内河谷区大气降水入渗补给系数为 0.25, 降水入渗系数分区见图 1; 在野外开展水文地质调查试验, 获取渗透系数 K 和给水度 μ 值, 通过模型识别, 最终获得模拟所需水文地质参数。

在三维几何模型的基础上加入研究区内的周边及底部边界条件、大气降水入渗补给系数、水文地质参数生成研究区三维水文地质模型并进行稳定流模拟计算, 得到研究区地下水稳定流场, 通过流场形态分析可知, 区内地下水在接受降水入渗补给后总体由各级分水岭处向各自的沟谷系统汇流, 在沟谷及其边坡的一定范围内以泉或溢流的形式出露地表, 与区域地下水流动特征基本一致。

根据模型计算得出稳定流场及各剖分单元格水头值, 由表 1(计算河水位与工程勘察期间实测河水位对比表)验证模型, 河水位误差在 0.01 ~ -0.71 m 范围, 基本满足模型精度要求。

模型经过识别验证后, 最终水文地质参数由表 2(研究区水文地质参数表)给出, 模型剖分 3 层, 其中第 1 层分为山区和河谷区, 第 2、3 层依次为基岩

风化带和基岩区。

表 1 计算河水位与工程勘察期间实测河水位对比表 m

模型坐标(行、列号)		计算水位	实测水位	误差
422	21	2807.71	2808.42	-0.71
400	67	2820.35	2820.92	-0.57
440	109	2831.71	2832.20	-0.49
487	170	2851.30	2851.84	-0.54
481	195	2857.94	2858.57	-0.63
472	272	2873.55	2873.73	-0.18
478	293	2879.94	2879.91	0.03
481	295	2881.85	2881.64	0.21
495	305	2885.57	2885.36	0.21
507	322	2884.89	2884.88	0.01

表 2 研究区水文地质参数表

分区	渗透系数/ ($m \cdot d^{-1}$)	给水度	弹性释 水率/ m^{-1}	总孔 隙率	纵向弥 散度/ m
山区	0.12	0.02	1.0×10^{-5}	0.02	0.1
河谷区	8.64	0.20	1.0×10^{-5}	0.20	24
基岩风化带	0.04	0.02	1.0×10^{-5}	0.02	10
基岩	0.008	0.01	1.0×10^{-5}	0.01	0.1

4 污染物运移模型及预测方法

4.1 运移模型

污染物在地下水中运动, 若不考虑其在含水层中的交换、吸附、生物化学反应等作用时, 污染物质在地下水中运移的数学模型表示为:

$$n \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(n D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (n C V_i) - C' W \quad (2)$$

$$D_{ij} = \alpha_{ijmn} \frac{V_m V_n}{|V|} \quad (3)$$

式中: α_{ijmn} 为含水层弥散度, m ; V_m, V_n 分别为 m 和 n 方向上的速度分量, m/d ; W 为面状源汇项强度, $m^3/(d \cdot m^2)$; V_i 为地下水渗流速度, m/d ; C 为含水层中污染物的浓度, mg/L ; D_{ij} 为 ij 方向上的分子扩散系数, m^2/d ; C' 为源汇项中污染物的浓度, mg/L ; n 为含水层有效孔隙率; x_i, x_j 为空间坐标变量, m ; t 为时间, d ^[15]。

4.2 污染物运移预测方法

在地下水水流模型基础之上分别模拟该尾矿库未采取防渗措施导致尾矿中废水渗入地下和尾矿库人工防渗层发生破损, 导致尾矿库废水渗入地下两种情况下 4 种特征污染物的运移情况。考虑到污染泄漏点距下游矿厂生产取水井约 1 300 m, 此次计算

范围选择为 0 ~ 2 000 m,依据孔隙介质二维数值模型的 $\lg\alpha_L - \lg L_s$ 图^[16],对应的纵向弥散度应介于 1 ~ 30 之间,本次模拟弥散度取值见表 2 研究区水文地质参数表。模型运行时间根据尾矿库设计服务年限设为 7 811 d (即 21.4 a),并设置 100,365,1 000,3 650,7 811 d 为应力期。本文采用的 MT3DMS 模块在地下水溶质迁移模拟方面有广泛的应用^[17-18]。

5 结果分析

本文研究尾矿库工程建设中,在非正常工况下污染物影响地下水的两种情况:(1)尾矿库未采取防渗措施导致尾矿库中废水渗入地下;(2)尾矿库人工防渗层发生损坏,导致尾矿库中废水渗入地下。将特征污染物的源强数据、渗漏量、影响时间等(见表 3 非正常工况下污染物源强表)代入溶质模型,计算得出两种非正常工况下污染物的影响范围面积和运移距离。

选取总磷作为代表性污染物,图 2 为总磷浓度历时曲线图,它反映总磷随时间的变化过程;图 3、4 反映总磷随时间运移的情况。

表 4 为尾矿库在未采取防渗措施工况下的预测结果。

表 3 非正常工况下污染物源强表							
工况	情景设定	渗漏量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	特征污染物	污染物浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	特征污染渗漏量/ ($\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$)	影响 时间/a	含水层
非 正 常 工 况	尾矿库未采取 防渗措施	310.79	六价铬	0.207	64.33	21.4	第四系孔隙水
			总 砷	0.146	45.38		
			氨 氮	1.713	532.38		
			总 磷	0.612	190.20		
	尾矿库人工防渗 层破损	54.60	六价铬	0.207	11.30	21.4	第四系孔隙水
			总 砷	0.146	7.97		
			氨 氮	1.713	93.53		
			总 磷	0.612	33.42		

由表 4 看出,在尾矿库未采取防渗措施工况下,事故发生后第 100、1 000、7 811 d,泄露地下水中的 4 种污染物最大运移距离均超过 300 m,影响范围均超过 $50 \times 10^4 \text{ m}^2$,浓度均超过地下水质量Ⅲ类水标准^[19]。观测孔处各污染因子的浓度变化均由小到大最后基本稳定,氨氮的浓度在 4 个污染物因子中最大,六价铬的浓度最小,由于尾矿库中存在持续污染源,21.4a 末各因子对地下水的影响还将持续。

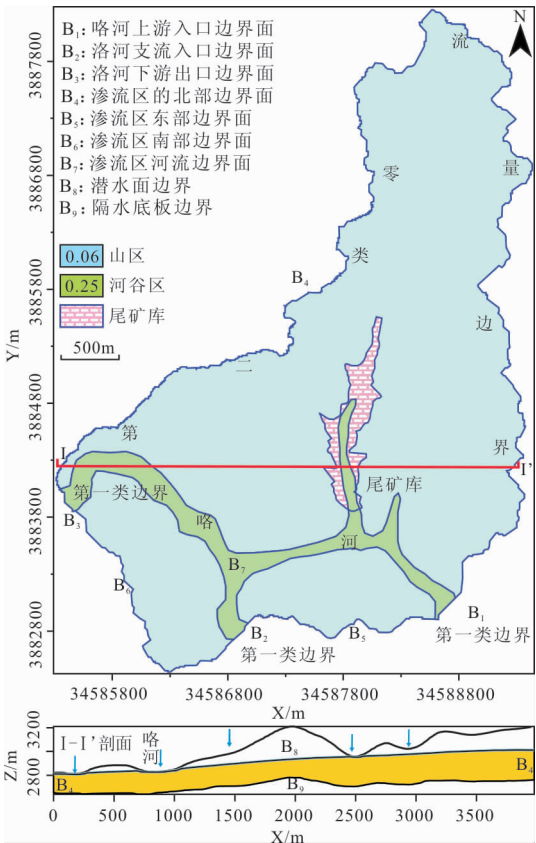


图 1 水文地质概念模型分区图

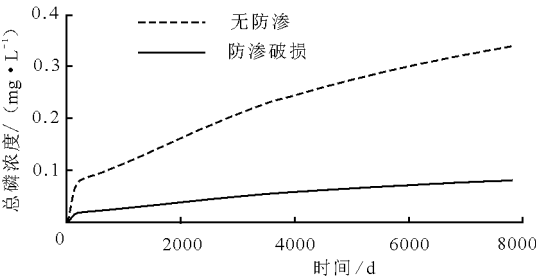


图 2 总磷浓度历时曲线图

表 5 为尾矿库防渗破损工况下的预测结果。由表 5 可以看出,在尾矿库防渗破损工况下,事故发生后 100、1 000、7 811 d,泄露地下水中 4 种污染物最大运移距离均超过 300 m,影响范围均超过 10×10^4

m²,浓度均超过地下水质量Ⅲ类标准^[19]。氨氮的浓度始终在 4 个因子中是最大的,总砷浓度最小,各污染因子在 21.4 a 末污染还在持续。

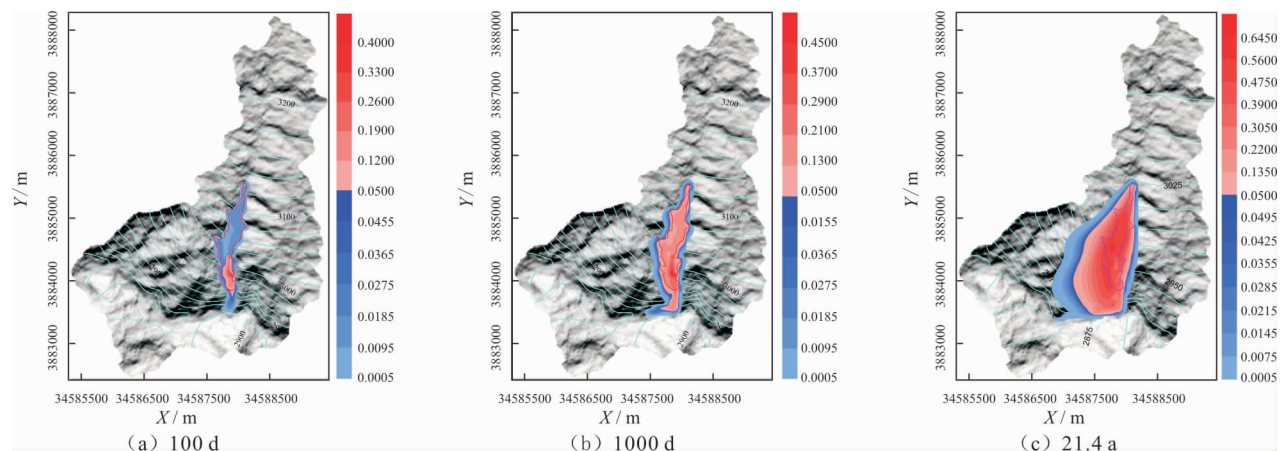


图 3 尾矿库未采取防渗施工况下总磷的运移图(单位:mg/L)

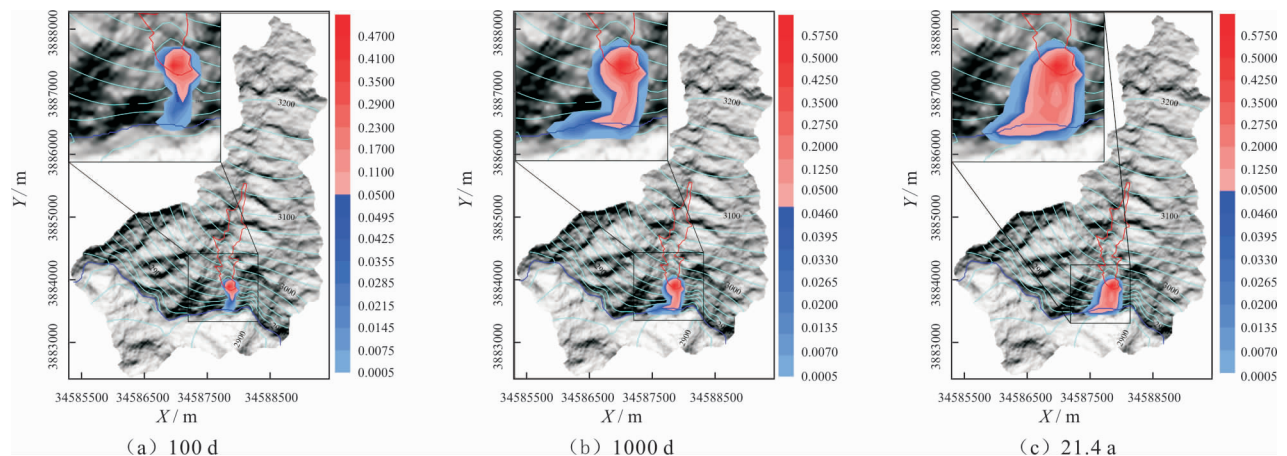


图 4 尾矿库人工防渗层发生破损事故工况下总磷的运移图(单位:mg/L)

表 4 尾矿库未采取防渗施工况下的预测结果表					
预测因子	预测时间/d	影响范围/m ²	超标范围/m ²	超标离开库区距离/m	最大运移距离/m
氨氮	100	620292.54	64931.23	0	372
	1000	988504.58	429753.27	280	612
	7811	1474229.68	524677.80	304	615
六价铬	100	576273.30	99514.00	0	351
	1000	913484.81	565011.45	312	596
	7811	2053416.27	972492.60	549	629
砷	100	560294.05	86778.61	148	323
	1000	891153.97	519545.99	381	592
	7811	1999537.46	1308674.33	596	1224
总磷	100	583403.77	80177.17	120	327
	1000	924219.13	492442.35	364	600
	7811	2078070.68	1269430.79	596	1127

注:最大运移距离起算点为尾矿库下游边界,运移方向为地下水流向。

表 5 尾矿库防渗破损工况下的预测结果表						
预测因子	预测天数/d	影响范围/m ²	超标范围/m ²	离开库区距离/m	超标离开库区距离/m	最大运移距离/m
氨氮	100	120993.87	17077.04	340	39	340
	1000	257731.20	38315.16	600	294	600
	7811	318527.90	75506.66	643	344	643
六价铬	100	110916.14	21330.57	345	70	345
	1000	230890.02	49311.91	596	279	596
	7811	285546.16	93912.12	605	371	605
砷	100	107267.82	12777.51	318	33	318
	1000	223797.42	30780.71	591	173	591
	7811	277245.06	54212.79	605	293	605
总磷	100	112373.57	42173.44	323	171	323
	1000	234304.90	98817.73	602	362	602
	7811	289692.79	160937.58	607	534	607

注:最大运移距离起算点为破损边界,运移方向为地下水流向。

6 结 论

(1)在地形复杂、高程变化大、含水层倾斜的河谷区,用水平多层剖分方式建立地下水流数值模型能成功地计算出该区域流场,实测河水位与模拟计算河水位差值很小,符合模型精度要求,计算流场能反映研究区的地下水流特征。

(2)由数值模拟结果知,尾矿库未采取防渗措施工况下,事故发生后第100、1 000、7 811 d泄露地下水中的总磷、氨氮、六价铬、砷共4种污染物影响范围均超过 $50 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。在未采取防渗措施工况下,总磷在7 811 d污染范围扩大为 $200 \times 10^4 \text{ m}^2$;在防渗破损工况下,总磷在7 811 d污染范围扩大为 $28 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。

(3)尾矿库在未采取防渗措施工况下,代表性污染物总磷的范围很大,而且扩散的浓度也在不断上升,扩散方向主要以河谷区南北向为主;尾矿库人工防渗层破损情况下,总磷扩散范围相对较小,扩散浓度随时间的推移趋于稳定,由于防渗措施使总磷扩散方向与未采取防渗措施扩散方向不同,主要沿河谷区往西南方向扩散。

(4)由污染物在未采取防渗措施工况下扩散与人工防渗层破损下扩散范围对比可知,有效的防渗措施会大幅度地减小污染物扩散范围,有效防止矿区地下水污染。

参考文献:

- [1] 黑文艳. 矿山开采对水环境的影响趋势及措施分析[J]. 信息系统工程,2013(11):107.
- [2] 李晓光. 矿山开采对水环境的影响趋势及可持续发展措施[J]. 硅谷,2013(1):242.
- [3] 刘苑,武晓峰. 地下水中污染物运移过程数值模拟算法的比较[J]. 环境工程学报,2008,2(2):229-234.
- [4] 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,

18(5):90-92.

- [5] 冯洁. 可视化地下水数值模拟软件(VISUAL MODFLOW)在国内的应用[J]. 地下水,2013,35(4):34-36.
- [6] 郭晓东,田辉,张梅桂,等. 我国地下水数值模拟软件应用进展[J]. 地下水,2010,32(4):5-7.
- [7] 孙从军,韩振波,赵振,等. 地下水数值模拟的研究与应用进展[J]. 环境工程,2013(5):9-13+17.
- [8] 王学良. 合作市草畜平衡与草产业发展初探[J]. 甘肃畜牧兽医,2014,44(4):73-76.
- [9] 张国珍,何春生,武福平. 西北村镇集雨饮用水源地水质评价体系研究[J]. 干旱区资源与环境,2009,23(11):119-123.
- [10] 刘秀梅. 甘肃红豆草在不同生态区域的适应性[D]. 兰州:甘肃农业大学,2010.
- [11] 卓玛兰草,刘普幸. 合作市1958-2009年气候变化特征分析[J]. 人民黄河,2012,34(4):33-36.
- [12] 王钰,强怡星,杨海瑞. 基于Visual MODFLOW的某尾矿库地下水污染模拟[J]. 水资源与水工程学报,2015,26(5):93-99.
- [13] 薛禹群,谢春红. 地下水数值模拟[M]. 北京:科学出版社,2007.
- [14] 刘世翔,胡艳飞,闫清华,等. 专家克里金插值法在空间插值中的应用[J]. 地质与资源,2011,20(4):292-294.
- [15] 郑春苗,贝聂特. 地下水污染物迁移模拟[M]. 北京:高等教育出版社,2009.
- [16] 成建梅. 考虑可信度的弥散度尺度效应分析[J]. 水利学报,2002,33(2):90-94.
- [17] Prommer H, Barry D A, Zheng C. MODFLOW/MT3DMS-based reactive multicomponent transport modeling[J]. Ground water, 2003, 41(2):247-257.
- [18] Curtis G P, Davis J A, Naftz D L. Simulation of reactive transport of uranium(VI) in groundwater with variable chemical conditions[J]. Water Resources Research, 2006, 42(4):336-336.
- [19] 国家环境保护总局. GB/T 14848-1993 地下水质量标准[S]. 北京:中国标准出版社,1994.