

# 基于 MT3DMS 的某采煤厂污染物运移模拟

董洁<sup>1,2</sup>, 周佩瑶<sup>1,2</sup>, 葛佳亮<sup>1,2</sup>, 王昕<sup>3</sup>

(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; 3. 陕西工程勘察研究院有限公司, 陕西 西安 710068)

**摘要:** 随着工业化发展速度加快,大量采煤带来的环境污染问题日益突出。为了保护安康石煤开采区域的生态环境,掌握当地污染物运移规律尤为重要。因此,基于安康市 2018 年 2 月地下水头场资料,利用 Visual Modflow 中的 MT3DMS 模块建立溶质运移模型,对采煤厂污染易发区域的多种特征污染物在不同情况下的运移进行研究,并提出相应的污染防治建议。结果表明:当未采取任何措施时,Al<sup>3+</sup>、Fe<sup>3+</sup> 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 这 3 种特征污染物在泄漏 1 000 d 后超标面积在 1 893 ~ 5 975 m<sup>2</sup> 之间;当安装防渗层或加快检漏频率后,仅 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 在泄漏 1 000 d 后出现 1 693 m<sup>2</sup> 的超标,其余污染物浓度均低于超标限。

**关键词:** 特征污染物; MT3DMS; 污染物运移; 防渗层; 检漏频率; 煤矿

中图分类号: X523

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)02-0081-07

## Numerical simulation of pollutant migration in a coal mining plant based on MT3DMS

DONG Jie<sup>1,2</sup>, ZHOU Peiyao<sup>1,2</sup>, GE Jialiang<sup>1,2</sup>, WANG Xin<sup>3</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effects in Arid Region, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 3. Shaanxi Institute of Engineering Prospecting (SIEP), Xi'an 710068, China)

**Abstract:** With the rapid development of industrialization, environmental pollution caused by a large number of coal mining has become increasingly severe. In order to protect the ecological environment of stone coal mining area in Ankang City, it is very important to understand the local pollutant migration rules. Therefore, based on the groundwater head data of February 2018 in Ankang City, a solute transport model was established by using the MT3DMS module of Visual Modflow to study the transport of various characteristic pollutants in polluted areas of coal mining plants under different conditions and to provide the corresponding pollution prevention and control suggestions. The results showed that: the excess area of the three characteristic pollutants (Al<sup>3+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) was between 1893 – 5975 m<sup>2</sup> after 1000 d leakage without any treatments. When the impermeable layer is installed or the leakage detection frequency is increased, only 1693 m<sup>2</sup> of NH<sub>4</sub><sup>+</sup> appears after the leakage of 1000 d, and the concentration of other pollutants is lower than the level of the limit.

**Key words:** characteristic pollutant; MT3DMS (A Modular Three – Dimensional Multispecies Solute Transport model); pollutant migration; impermeable layer; leak detection frequency; coalmining plant

## 1 研究背景

煤炭资源是现代化工业发展的基本能源,是推动社会经济发展的驱动力。近年来,随着工业化进程的不断加快,大量采煤造成了矿区土地资源的坍

塌和浪费、水资源水量与水质的变化、固体及气体污染等一系列问题<sup>[1-5]</sup>,已经严重影响了我国可持续发展战略的实施。为了响应新时代下绿色开采的理念,我国煤矿行业开始对各地煤炭的开采技术进行整改,坚决不走“先污染后治理”的道路。

收稿日期:2018-10-04; 修回日期:2018-12-15

作者简介:董洁(1994-),女,山西芮城人,在读硕士研究生,研究方向:地下水模拟及渗流理论。

陕西是一个以煤为主的能源大省,虽然煤炭资源丰富,但是由于前期开采技术落后,造成了煤炭资源的回收率低、污染严重等问题,加大了陕西省内的环境压力及生态危害程度。陕北地区的煤炭资源开采技术研究已相对成熟<sup>[6]</sup>;而陕南作为一个石煤资源广泛分布的典型区域,复杂的水文地质环境阻碍了当地开采技术的研究,因此对于陕南石煤开采技术的研究显得极为重要。安康石煤普遍具有高灰、高硫、发热量低、含氟等特点<sup>[7]</sup>,直接燃烧降低了煤炭的利用率,产生了大量的固体及气体污染物,造成了当地居民的蓄积性氟中毒<sup>[8]</sup>。改变当地石煤开采技术,提高石煤利用率迫在眉睫。陕西煤业在2013年首次提出,将含钒石煤通过循环硫化床锅炉燃烧,将燃烧后的飞灰进行多次加工产出五氧化二钒,燃烧后生成的废渣进行处理制作成建材,实现对石煤的高效利用<sup>[9]</sup>。开采工艺的改进减小了煤矿正常开采工况下的危害,但煤矿一旦发生非正常工况的泄漏,同样会造成当地水资源的污染。因此,掌握地下水污染物运移规律是预报水质及污染治理的基础。

地下水污染物运移模型是建立在水流及溶质运移数学模型的基础上探究污染物运移规律的一种方式。Visual Modflow 是由加拿大 Waterloo Hydrogeologic 公司开发的具有系统化、规范化、精确化、简单化、直观性等特点的数值模拟软件<sup>[10]</sup>,被广泛应用于气田开采、矿产开采、石油开采项目诸多领域<sup>[11-14]</sup>。经过实践证明,Visual Modflow 在不同水文地质条件下的污染物运移结果均是可靠的,并为当地矿产资源开发及环境保护提供了理论依据和科学指导<sup>[15-18]</sup>。本文以安康市某采煤厂为研究对象,在对提钒采煤技术工艺及水文地质条件综合分析的基础上,利用 Visual Modflow 中的 MT3DMS 模块预测了污染易发区的多种特殊污染物的运移,为采煤区环境的保护提供科学依据。

## 2 研究区概况

研究区位于陕西省安康市汉滨区,地处北亚热带湿润季风气候区,光照适中、雨量充足,气候温和,四季分明。由于受地形的影响,气候具有明显的垂直地带性特征,南北山区气温低,中部河谷与丘陵区气温高。多年平均气温 15.5℃,多年平均降水量 799.3 mm<sup>[19]</sup>,一年之中,连阴雨主要在春、夏、秋三季出现,相对集中于秋季。厂区所在主沟为马槽沟,沟道下游段常年有水,上游断雨后数天干涸,属汉江

北侧支沟,沟内溪水自北而南流入汉江。

厂区所在地质部位属秦岭南坡与安康盆地接壤地带。其地貌形态从北到南依次为低山丘陵、洪积台地和汉江谷地。区内发育的地层主要有志留系的变质岩、第四系洪积、冲洪积和冲积层,按沉积时代由老至新依次为:志留系(S)、第四系中更新统洪积层( $Q_p^{2pl}$ )、第四系全新统冲洪积层( $Q_h^{1al+1pl}$ )、第四系全新统冲积层( $Q_h^{1al}$ )。研究区内地下水主要赋存于志留系全、强-中风化千枚岩裂隙含水层及第四系全新统冲洪积碎石土孔隙含水层中。区内地下水以大气降水和北部千枚岩裂隙含水层中侧向径流为主要补给来源,主要通过向汉江及支沟中的地表水体和下游相邻含水层径流排泄、以泉的形式排泄及人工开采地下水3种方式进行排泄。

## 3 模型建立

### 3.1 概念模型

研究较复杂的水文地质环境时,应不考虑对研究区影响较小的因素,以完整流域的自然边界确定水文地质模型范围可以增强其真实性与完整性<sup>[20]</sup>。

此次选取马槽沟汇流流域作为研究区模拟范围,东、西、北部边界均为分水岭(图1中A2),均可用第二类零流量边界刻画;南部马槽沟沟谷汇入汉江区域用第一类定水头边界刻画(图1中A1);研究区顶部接受大气降水补给,用潜水面边界刻画;微风化基岩的结构完整、透水性差作为研究区底部,用第二类零流量边界刻画;马槽沟内的间歇性河流及少量出露的泉点用 Drain 边界刻画。根据水文地质调查结果,区内的渗透系数介质用多孔非均质各向异性介质刻画。

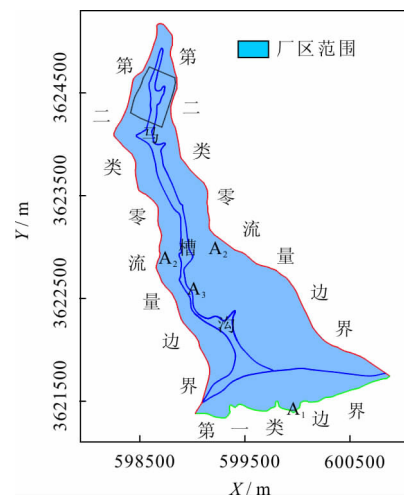


图1 研究区水文地质概念模型图

### 3.2 水流及溶质运移模型

3.2.1 数学模型 数学模型以对实际水文地质概念模型的高度认知为基础,分为随机性和确定性两种模型<sup>[21]</sup>。确定性数学模型是由完全肯定的函数关系建立的,随机性模型是由随机变量建立的模型。此次建立的数学模型是确定性模型,包括地下水水流模型及溶质运移模型。

根据研究区概况将模拟区概化为均质各向异性、稳定的三维地下水流系统。在不考虑地下水流的密度及黏滞性变化的情况下结合模型边界的概化结果,建立与之对应的三维水流数学模型。

通过对提钒工艺中产生的废水水质进行分析,确定污染源的初始及边界条件,在不考虑含水层中生物化学反应的作用下,结合水动力弥散方程建立污染物溶质运移数学模型。

3.2.2 数值模型 利用 Visual Modflow 建立一个东西长 3.2 km,南北长 4.1 km 的三维水流模型,水平面上采用 10 m 等间距剖分成 131 200 个单元格,代表实际面积 2.97 km<sup>2</sup>。垂向上剖分为 3 层,对应实际的第四系全新统冲洪积碎石土孔隙含水层、志留系全、强-中风化千枚岩裂隙含水层以及微风化基岩裂隙含水层。研究区参数分区图见图 2。

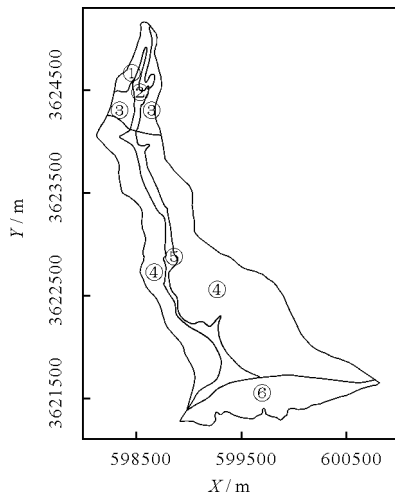


图 2 研究区参数分区图

### 3.3 模型验证

为了让建立的三维水流模型真实地反映含水层中地下水流的运动,利用实际流场对模型进行验证是必不可少的<sup>[22]</sup>。将各分区参数(见表 1)代入模型进行计算,得到研究区内多年平均稳定流场,分析流场可知,接受大气降水入渗补给后的地下水从周边分水岭向马槽沟沟谷汇流,溢出地表形成间歇性河流及少量泉水,与实际调查地下水流场方向相一

致。将模型计算的稳定流场与 2018 年 2 月实测地下水水位进行对比(见表 2),结果表明,计算地下水水位与实测地下水水位的平均误差为 0.29,基本满足模型精度要求。

表 1 模型水文地质参数表

分区编号	大气降水入渗补给系数	渗透系数/ (m·d <sup>-1</sup> )	给水度	弹性释水率/m <sup>-1</sup>	纵向弥散度/m
①	0.10	0.03	0.10	1.0×10 <sup>-5</sup>	10
②	0.30	0.65	0.20	1.0×10 <sup>-5</sup>	24
③	0.20	0.10	0.02	1.0×10 <sup>-5</sup>	0.1
④	0.09	0.03	0.01	1.0×10 <sup>-5</sup>	0.1
⑤	0.12	0.064	0.01	1.0×10 <sup>-5</sup>	24
⑥	0.30	1	0.35	1.0×10 <sup>-5</sup>	24

表 2 研究区地下水水位计算值与实测水位对比表

井孔编号	实测水位/m	计算水位/m	误差/m
SW3	353.60	354.10	0.50
SW18	326.80	326.45	-0.35
SW14	336.40	336.29	-0.11
SW13	338.50	338.40	-0.10
SW12	342.80	342.55	-0.25
MJ4	323.40	323.86	0.46
MJ1	361.90	362.45	0.55
W3	300.40	300.19	-0.21
MJ8	290.80	290.69	-0.11

## 4 污染物模拟预测

通过对某采煤厂提钒技术进行工程分析,发现废水处理站内沉降池中的吸附余液与沉钒母液中各离子浓度较其他废水浓度高 1~2 个数量级,因此,当未来发生非正常泄漏时,此处污染物的泄漏对当地环境将会产生极其严重的危害,故将沉降池作为预测点。考虑到当污染物发生泄漏时,可以采取两种途径降低危害:一是采取防渗措施,降低污染物泄漏浓度;二是加快检漏频率,缩短污染物泄露时间。故本次对 3 种情况进行了模拟:一是未采取任何措施,污染物直接泄漏;二是安装防渗层,降低污染物浓度至原浓度的 1/10;三是改变检漏频率,每周进行一次检漏,泄漏时间约是原来的 1/2。在对研究区工程资料与多年降水量资料综合分析的基础上,计算出这 3 种情况下污染源的源强(见表 3),影响的含水层均为潜水含水层。

表3 非正常工况下污染源强

情景设定	渗漏位置	特征污染物	泄漏速率/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ )	污染物浓度/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	渗漏时长/d	评价标准/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	含水层
情况1	沉降池	$\text{Al}^{3+}$	32.92	3882.80	15	0.2	潜水
	沉降池	$\text{Fe}^{3+}$	32.92	2650.50	15	0.3	潜水
	沉降池	$\text{NH}_4^+$	32.92	15031.87	15	0.5	潜水
情况2	沉降池	$\text{Al}^{3+}$	32.92	388.28	15	0.2	潜水
	沉降池	$\text{Fe}^{3+}$	32.92	265.05	15	0.3	潜水
	沉降池	$\text{NH}_4^+$	32.92	1503.18	15	0.5	潜水
情况3	沉降池	$\text{Al}^{3+}$	32.92	3882.80	7	0.2	潜水
	沉降池	$\text{Fe}^{3+}$	32.92	2650.50	7	0.3	潜水
	沉降池	$\text{NH}_4^+$	32.92	15031.87	7	0.5	潜水

以《地下水质量标准》(GB/T14848-2017) III类标准作为超标限,采用各离子检测方法可检测出的最低值作为检出限,通过溶质运移数值模型进行模拟,可以得到在3种情况下不同特征污染物在不同时间的超标范围、影响范围和最大运移距离。因

项目的服务年限为20 a,所以模型运行时间设计为7 300 d,并将污染物在100、1 000、7 300 d运移结果输出,结果显示7 300 d各类污染物均未检测出,因此仅对100、1 000 d的各污染物运移情况进行统计(见图3~5)。

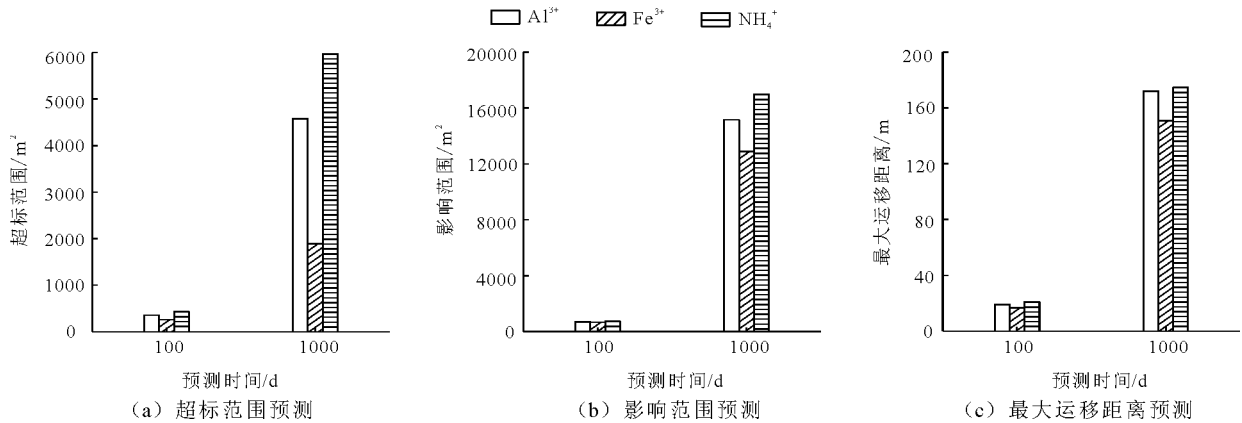


图3 情况1各污染物运移预测结果图

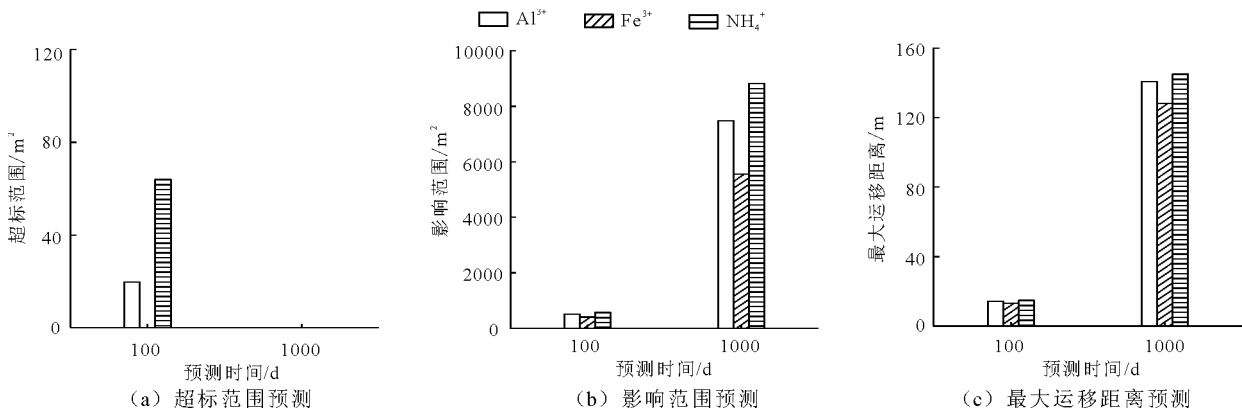


图4 情况2各污染物运移预测结果图

情况1:事故发生后第1 000 d,泄漏到地下水中的3种污染物的影响范围均超过了12 000  $\text{m}^2$ ,超标

范围超过了1 800  $\text{m}^2$ ,最大运移距离超过了150 m。情况2:事故发生后第1 000 d,泄漏到地下水中的3

种污染物的影响范围均超过了 5 500 m<sup>2</sup>, 浓度均低于超标限, 最大运移距离超过了 120 m。情况 3: 事故发生后第 1 000 d, 泄漏到地下水中的 3 种污染物的影响范围均超过了 10 000 m<sup>2</sup>, 除 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 检测出超标, 其余污染物浓度均低于超标限, 最大运移距离超过了 140 m。在 3 种情况下, 污染物的影响范围虽不断增大但均未超出厂界。

对比情况 1、2 可知, 由于两种情况下污染物浓度相差一个数量级, 因此总泄漏量相差一个数量级, 情况 1 中污染物的超标范围随着时间不断增大, 而情况 2 中随着时间的推移, 超标范围不断减小。由此可以证明, 在建设初期做好防渗措施可在很大程度上降低污染物对地下水环境的危害。对比情况

1、3 可知, 两种情况下污染物浓度相同, 泄漏时间缩短一半, 总泄漏量减少一半, 在泄漏发生后第 100 d, 两种情况的超标范围、影响范围、最大运移距离相差不大; 在泄漏发生后第 1 000 d, 情况 3 中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 的超标面积约为情况 1 的 1/3, 其余两种污染物均未超标。由此证明, 加快检漏频率也可以在一定程度上降低污染物对地下水环境的危害, 但效果没有安装防渗措施明显。

因 Al<sup>3+</sup> 在 3 种情况下对地下水的影响都较为明显, 因此选取 Al<sup>3+</sup> 作为代表性的污染物, Al<sup>3+</sup> 浓度随时间运移情况见图 6~8 (图中还标出了地下水位高程等值线, 单位为 m)。

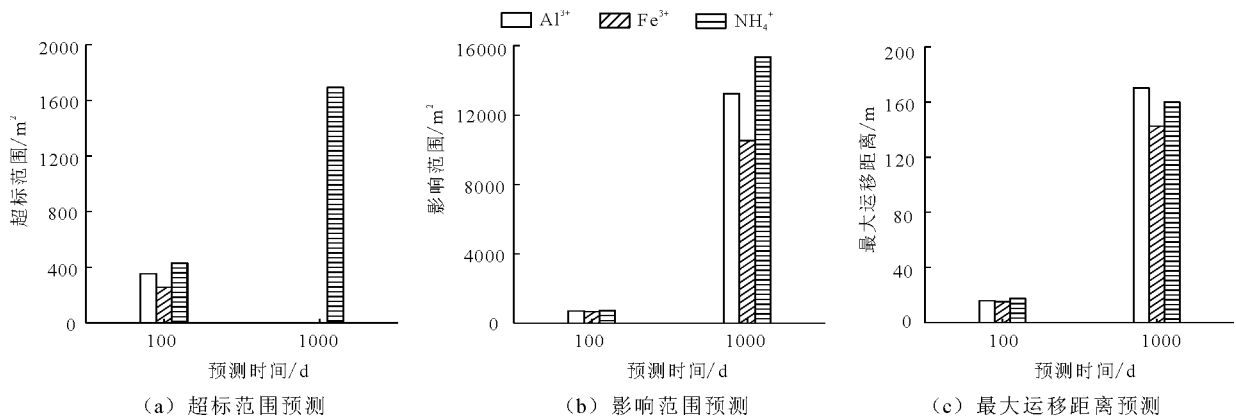


图 5 情况 3 各污染物运移预测结果图

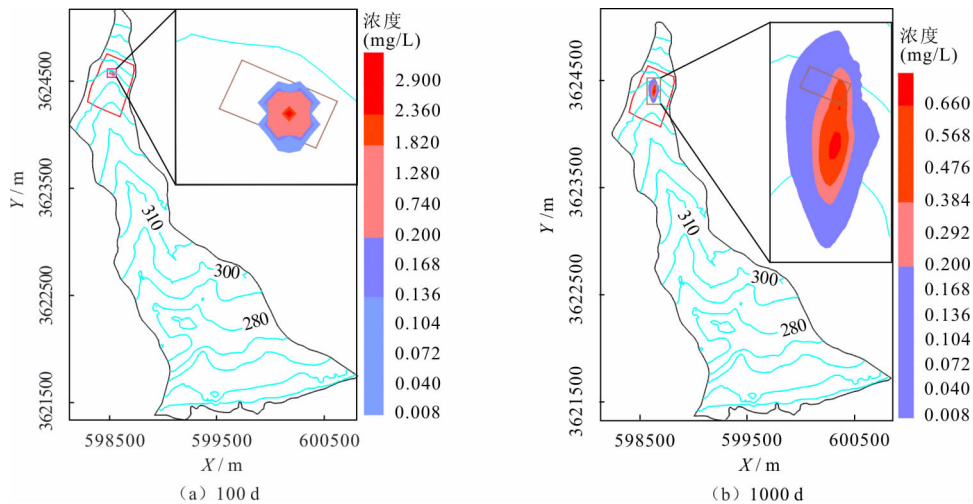


图 6 情况 1 下 Al<sup>3+</sup> 在 100、1 000 d 的运移图

从 3 种情况下 Al<sup>3+</sup> 浓度随时间运移图可知, 污染物运移沿着水流方向及垂直水流方向逐步扩散, 范围越来越大, 但水流方向运移速度比其他方向速度快。在污染晕形心处, 污染物浓度最高, 向四周逐渐减小。随着时间的推移, 形心距离污染物泄漏点

越远, 最大浓度也越来越小。由图 6~8 可以看出, 随着时间推移, 污染物浓度逐渐降低, 对地下水环境影响变小<sup>[23]</sup>。因厂区位于第四系全新统冲洪积碎石层, 其南部区域为第四系中更新统粉质黏土层, 污染物在碎石层内运移速度较快, 但污染物始终未运

移出厂界,同时南部的黏土层对污染物的运移起到了一定的阻滞作用,污染物未来将不会影响到下游敏感保护目标。对比图6~8可知,当未采取任何措施致使污染物浓度较高且持续时间较长时,虽地下水会对其产生一定的稀释作用,但污染物浓度在开始运移的很长一段时间内均高出超标限,此时污染物对地下水环境的影响还是极为明显的。

因此,建议从以下3方面来减小污染物带来的危害:(1)在建设前期,将可能发生污染物渗漏的区

域,选取复合衬层作为防渗层,其防止渗滤液和污染物泄漏较土工膜衬层及压实黏土衬层有明显优势<sup>[24]</sup>;(2)在做好防渗的基础上提高建设单位检漏的频率,这样可以及时发现污染物泄漏情况并采取应对措施;(3)若发生污染物泄漏,可采取排除处理净化法、流线控制法、屏蔽法、有效黏土技术、电化动力技术、生物技术、天然生物技术、原位生物技术等方法及时对已发现的污染水体及土体进行恢复处理<sup>[25]</sup>。

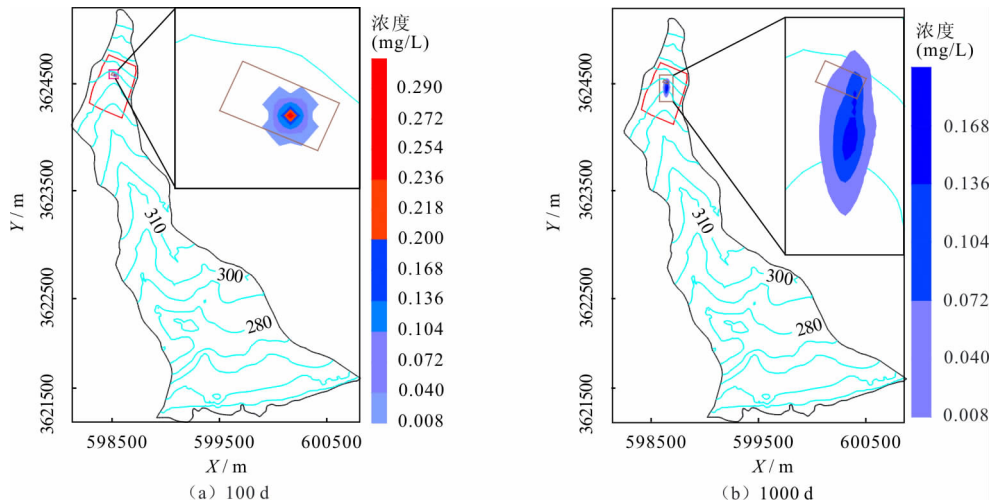


图7 情况2下 $\text{Al}^{3+}$ 在100、1000 d的运移图

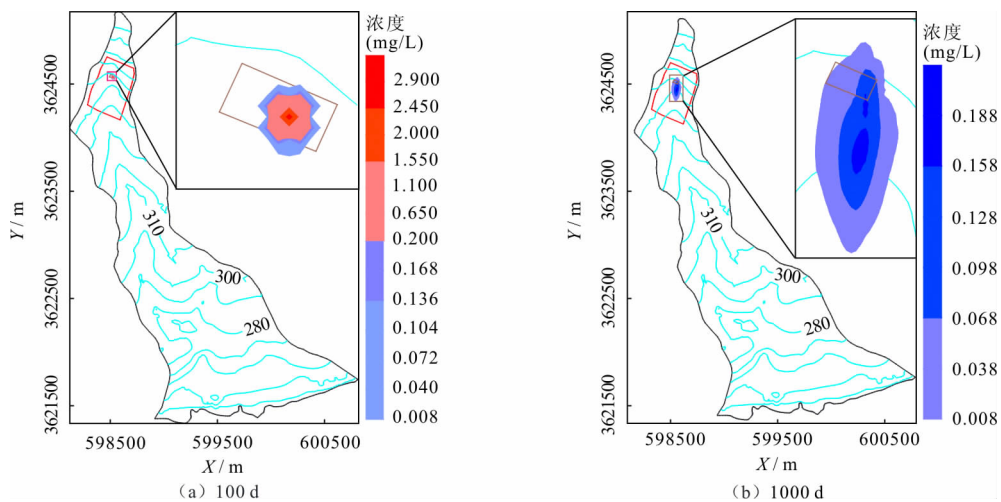


图8 情况3下 $\text{Al}^{3+}$ 在100、1000 d的运移图

## 5 结论与建议

(1) 利用 Visual Modflow 中 MT3DMS 模块建立的溶质运移模型在安康某采煤厂适用性很好,满足模型精度要求,可用于分析污染物运移规律,并为提出污染防治对策提供依据。

(2) 污染物主要沿着水流方向运移,且浓度在

泄漏发生100 d内存在一定范围的超标,但均未运移出厂界,不会影响下游敏感保护目标。

(3) 在污染物泄漏1000 d后,未采取措施情况下的污染物超标面积在1893~5975 m<sup>2</sup>之间,而安装防渗措施后各污染物浓度均低于超标限,加快检漏频率后除 $\text{NH}_4^+$ 超标面积为1693 m<sup>2</sup>,其余污染物均未超标。由此可见,安装防渗层和加快检漏频率

在一定程度上可以降低污染物的危害,但前者比后者效果明显。

(4)开采前期做好采煤厂污染防治工作,建议在污染易发区选取复合衬层作为防渗层,以降低污染物发生泄漏的可能性和削减污水的排放量;在实际运行期间提高检漏频率,及时发现污染物泄漏并采取应急措施,尽可能降低石煤开采对地下水环境的影响。

#### 参考文献:

- [1] 相坤. 煤矿开采对地质环境的影响及防治措施[J]. 能源技术与管理,2016,41(03):126-127.
- [2] 郭锐. 煤矿绿色开采技术[J]. 化工设计通讯,2017,43(2):39-39.
- [3] 郭金龙. 煤矿地下水污染防治措施探究[J]. 能源与节能,2018(6):94-95.
- [4] 李媛. 新形势下如何做好煤矿环保工作[J]. 能源与节能,2018(1):88-89.
- [5] 赵利权,林清松,路永胜,等. 浅谈露天煤矿开采环境问题及防治对策[J]. 科技风,2018(8):58-59.
- [6] 段中会,贺丹,贺晓浪,等. 陕西煤炭产业转型与生态环境保护的若干思路[J]. 陕西煤炭,2016,35(4):5-8.
- [7] 陈西民,马合川,魏东,等. 安康石煤资源特征及勘查开发建议[J]. 陕西地质,2010,28(1):1-5+81.
- [8] 邓英,梁磊,何俊平,等. 2010年安康市燃煤污染型氟中毒监测结果分析[J]. 微量元素与健康研究,2012,29(6):42-45.
- [9] 杨学存,马合川. 安康石煤特征及其综合利用[J]. 陕西煤炭,2013,32(1):11-13.
- [10] 饶磊,魏兴萍,刘迅. 基于Visual Modflow的重庆某工业园区地下水污染物运移模拟[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版),2018,35(5):72-79+2.
- [11] 钱程,穆文平,邢渊,等. 某气田石油类污染物运移数值模拟研究[J]. 环境工程,2016,34(4):68-72+131.
- [12] 谢世杰,张强,冯浩然. 迁安某矿区尾矿库地下水氟化物运移模拟预测[J]. 甘肃水利水电技术,2013,49(3):4-6.
- [13] 钱伟,王玮,任宇泽,等. 甘肃格宏道金矿尾矿库污染物运移规律[J]. 南水北调与水利科技,2016,14(3):78-83.
- [14] 高小文,吕敬,李秀娟,等. 铜矿尾矿库污染物在地下水中运移规律数值模拟[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(2):120-125.
- [15] 尉鹏翔. Visual Modflow在地下水污染物运移模拟中的应用[J]. 水资源保护,2011,27(4):19-21+41.
- [16] 史启朋,王强,王博伦,等. Visual Modflow在地下水污染模拟中的应用[J]. 人民黄河,2012,34(12):69-71+74.
- [17] 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.
- [18] 赵贝,刘建军. 基于Visual Modflow地下水污染物溶质运移的模拟[J]. 石河子大学学报(自科版),2015,33(6):787-792.
- [19] 卢修富. 安康市水文特性[J]. 水资源与水工程学报,2009,20(4):154-157.
- [20] 祖斌. Visual Modflow在水文地质模型构建及地下水模拟中的应用[J]. 绿色科技,2018(16):233-234.
- [21] 徐凤. 基于Visual MODFLOW的西南岩溶区某项目地下水污染运移模拟研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2014.
- [22] 李理. Visual Modflow在安徽某金矿项目地下水环境影响评价中的应用[J]. 智能城市,2018,4(21):74-75.
- [23] 柯贤敏. 甘肃南畔铜矿尾矿库污染物运移规律研究[J]. 环境工程,2017,35(S2):20-23+27.
- [24] 刘建国,聂永丰,王洪涛,等. 填埋场不同防渗配置下渗滤液及污染物泄漏[J]. 清华大学学报(自然科学版),2004(12):1684-1687.
- [25] 刘启龙,王康,刘欣铭. 地下水污染治理方法探讨[J]. 黑龙江科学,2018,9(11):161-162.