

文章编号: 1006-4362(2024)01-0123-06

基于GMS的某矿区地下水污染的数值模拟研究

马宇琪¹, 徐世光^{1,2}

(1. 昆明理工大学公共安全与应急管理学院, 昆明 650093; 2. 云南地矿工程勘察集团公司, 昆明 650011)

摘要: 在已有资料的基础上, 以云南省丽江市某矿区为研究对象, 通过对该研究区的水文地质条件进行了详细调查后, 结合研究区监测井, 利用GMS软件建立该区域的地下水水流场模型和溶质运移模型。在合理的误差范围内模拟计算了水流场模型, 且模拟预测了主要污染物Mn离子在地下水中的运移规律。研究表明, 在污染物持续泄露了28a预测期内, Mn离子扩散约335m, 需合理对地下水进行监测、做好厂区的防渗工作和应急管理工作, 对下游饮用的及作为农业用水、生活用水中的泉点作系统监测。场地水土环境质量评价及地下水污染治理可用本文的研究作为科学依据。

关键词: GMS; 数值模拟; 地下水污染; 溶质运移

中图分类号: P641; X523 **文献标识码:** A

NUMERICAL SIMULATION OF GROUNDWATER POLLUTION IN A MINING AREA BASED ON GMS

MA Yu-qi¹, XU Shi-guang^{1,2}

(1. School of Public Safety and Emergency Management, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. Yunnan Geological and Mineral Engineering Survey Group, Kunming 650011, China)

Abstract: Based on the existing data, this paper takes a mining area in Lijiang City, Yunnan Province as the research object. After a detailed investigation of the hydrogeological conditions in the study area, combined with the monitoring wells in the study area, the GMS software is used to establish the groundwater flow field model and solute transport model in the area. The flow field model is simulated and calculated within a reasonable error range, and the migration law of main pollutant Mn ion in groundwater is simulated and predicted. The research results show that during the 28-year prediction period of the continuous leakage of pollutants, the diffusion of Mn ions is about 335m, so it is necessary to reasonably monitor the groundwater, do a good job in the anti-seepage work and emergency management of the plant, and systematically monitor the spring points in the downstream drinking water and as agricultural water and domestic water. The research of this paper can be used as the scientific basis for the evaluation of soil and water environmental quality and the treatment of groundwater pollution.

Key words: GMS; groundwater pollution; numerical simulation; solute transport

1 前言

随着社会的快速发展,地表水资源紧缺无法满足我国城乡居民用水、工业生产用水以及农业生产用水。因此具有水质澄清、分布广泛、水量稳定等特点的地下水,往往成为人们生产生活中必不可少的重要水源。但是近些年来,我国工业和化学污染大量增加,地下水资源受到严重污染^[1-2]。地下水深埋于地下很难被人们发现,且一旦发现污染,造成的环境和生态破坏很难治理与恢复^[3],所以深入了解地下水及其污染物迁移特征规律具有重要意义,能够对地下水资源的管理和开发利用提供科学依据。数值模拟方法是地下水定量分析研究的重要手段^[4],是通过计算机软件建立地质模型,用此来模拟预测地下水污染状况^[5]。其中 GMS 软件是具备强大的可视化与模拟功能,是被广泛认可的地下水三维数值模拟软件^[6]。本文选定丽江某矿区为研究区,该研究区域运行时间较长,由于环保意识、管理疏忽等问题导致在运行过程中堆浸场发生渗漏,对地下水造成了严重的污染,制约着人们的社会经济发展,且给人类的健康造成严重威胁,因此综合分析当地污

染物迁移规律、确定污染范围及污染物浓度对完善该区域的地下水污染控制和修复措施、生态环境建设等有重要意义^[7]。

2 水文地质概况

研究区地处云贵高原西北部,位于金沙江东岸,矿区所在位置为北亚热带山地季风气候,区域年平均气温为 13.5℃,根据记载,历史最高气温为 32.3℃,历史最低气温为-11.2℃;区内多年平均降雨量 925.8 mm,年最大降雨量 1 000.0 mm,最低降雨量 750.0 mm;当地的雨季为 5 月至 10 月,预计的降雨占全年降水总量的 80%;多年平均蒸发量 2 221.0 mm,约为年均降雨量 2 倍,热量与水量失调,山体温度较高,岩体风化强烈、破碎(图 1)。

3 模型建立

3.1 水文地质概念模型

水文地质概念模型是对地下水系统进行综合分析、对水文地质条件进行科学总结和处理的基礎上建立起来的,是建立数学模型的基础^[8]。通过 GMS 软件的 MODFLOW 模块模拟水文地质单元内的水

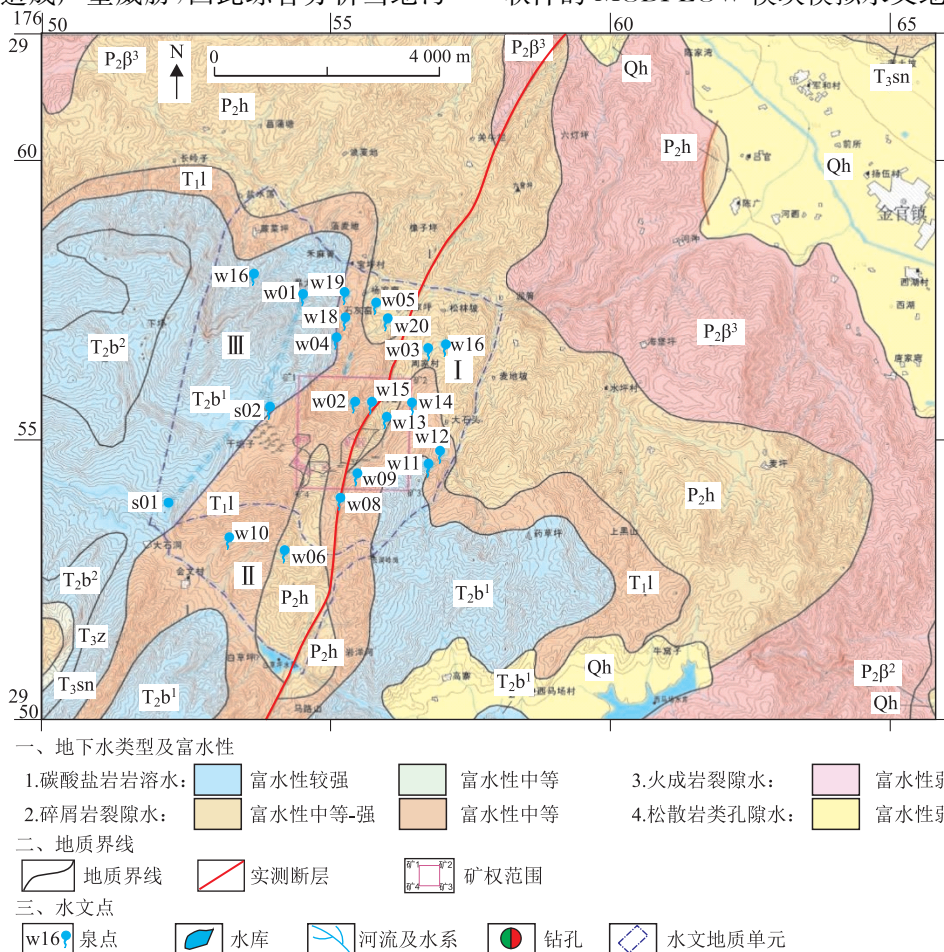


图 1 区域水文地质图

流场。研究区内的含水层基岩岩性主要为二叠系黑泥哨组砂岩、页岩、玄武岩、三叠系腊美组砂岩、三叠系北衙组灰岩组成。因此从纵向上将区域内地下水结构概化为多层结构,分为潜水含水层和基岩承压含水层,即松散层孔隙水、碎屑岩裂隙水、岩溶水 3 层。模拟范围北部为下坪河,是地下水的排泄基准,此外,地表分水岭分别在研究区西、南两侧,降雨入渗补给量被地表分水岭分做两个区域,分水岭两侧地下水补、径、排条件各不相同,因而将研究区南、西两侧地表分水岭概化为该模型的隔水边界,研究区北部下坪河为定水头边界,东部以大石头村溪沟为定流量边界组成下坪河水文地质单元,其中水溪沟为排水沟。将模型中的含水层定义为非均质各向异性含水层,地下水的流动动力条件为三维稳定流。

3.2 数学模型

综合分析区域水文地质条件,研究区为非均质各向异性三维稳定流地下水系统。可用公式(1)描述。在非均质各向异性介质中,偏微分方程的解析解很难确定,因此有必要引用数值模拟的方法来描述特定情况下的地下水流动特性。MODFLOW 采用有限差分法求解方程得到模拟范围内的地下水流。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} + \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} + \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} + \frac{\partial H}{\partial z} \right) + W = 0 \quad (1)$$

其中, K_{xx} 为 x 方向渗透系数主值、 K_{yy} 为 y 方向渗透系数主值、 K_{zz} 为 z 方向渗透系数主值, m/d ; H 为含水层测压水头, m ; W 为源汇项。解偏微分方程需要定解条件,共有 3 类边界条件。

第一类边界(已知水头边界):

$$H(x, y, z, t) | S_i = \varphi_i(x, y, z, t), (s, y, z) \in S_i \quad (2)$$

式中, $H(x, y, z, t)$ 为边界 S_i 上的点在三维条件下 t 时刻的水头; $\varphi_i(x, y, z, t)$ 为 S_i 上的已知函数。

第二类边界(已知流量边界):

$$K \frac{\partial H}{\partial n} | S_i = q_i(x, y, z, t), (x, y, z) \in S_i \quad (3)$$

式中, n 为边界 S_i 的外法线方向; q_i 为 S_i 上单位面积的侧向补给量。

第三类边界(混合边界):

$$\frac{\partial H}{\partial n} + \alpha H = \beta \quad (4)$$

其中, α, β 为已知函数; H 为潜水含水层水头, m 。

3.3 区域网格划分

在下坪河水文地质单元内,模型定水头边界为

单元北侧的下坪河,西、南两侧均为隔水边界,南侧隔水边界以南至会文村部分为新的地下水系统,为了方便研究,将两个地下水系统建立为一个模型区域。以区域内松散层孔隙水、黑泥哨组碎屑岩裂隙含水层、腊美组碎屑岩裂隙含水层和北衙组碳酸盐岩裂隙溶洞水作为研究对象,建立一个 $8\ 879\ m \times 6\ 687\ m$ 的数值模拟区,垂向上将模型概化为 3 层,其中第一层为地表松散层,第二层为岩溶层,第三层为碎屑岩层,为使有限差分计算尽可能精确,但又不导致计算量过大而无法运行模型,将模拟区剖分为 $140 \times 100 \times 3$ 个单元格,每个单元格为 $68\ m \times 68\ m$,共 42 000 个网格(图 2)。通过在水文地质图中根据已有钻孔揭露信息和等高线,均匀地构造若干散点并将散点的高程和实际坐标、各地层高程数据导入 Excel,再结合野外地质调查修正这些散点的高程,最后将修正后的 Excel 数据通过插入 2D Scatter Data 的方法导入模型,利用克里金插值法建立能反应研究区真实地形的三维有限差分网格模型(图 3)。依据所建立的概念模型将边界条件及源汇项加载到三维网格模型中,从而建立起研究区地下水三维稳定流数值模型。

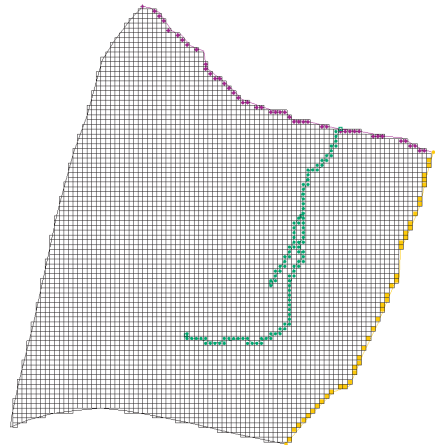


图 2 模型区域单元网格剖分图

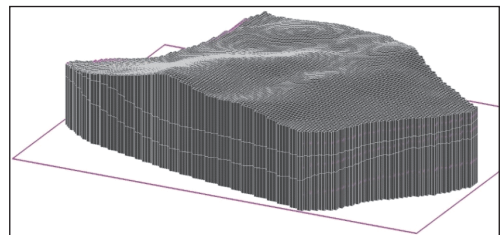


图 3 研究区三维有限差分网格模型

3.4 数值模型补、径、排条件及边界设定

(1) 边界条件

由于区域构造运动使高原褶皱形成连绵不断高

低起伏的山地且山地高差较大,经查明区域内西、南的地表分水岭与地下分水岭相一致,故将该水文地质单元的西、南两侧分水岭定义下坪河水文地质单元的隔水边界。以北部下坪河作为北部边界,以獐子旦村东侧高海拔分水岭作为水文地质单元的西部隔水边界,以大石头村溪沟作为该水文单元的东部边界,以长洞岭岗以西的一系列分水岭作为水文单元的南部边界。由于本次研究工作范围包括矿区所在的下坪河水文地质单元和单元南侧至会文村区域,故将两个区域合并在一个概念模型中,分为两个地下水系统,两系统的南侧和北侧为同一个分水岭。

(2) 补给项

研究区地下水补给来源主要为降雨补给,降雨入渗系数是降雨入渗量与降水量的比值。由于区域内的水位埋深不同、岩性不同以及降雨量的不同,所以降雨入渗系数是一个比较难精确测定的参数,还需要进行人为的调试。在以大气降水入渗补给为主的地下水埋藏区,大气降水之后,由于入渗使地下水位升高,增加了地下水的储存量和径流量。但是由于地下水的排泄作用,降雨后地下水继续向区域内的河流、泉水排泄,水位又出现缓慢下降,下降时间和下降值根据岩性及降雨量大小决定,地下水的储存量和径流量也会在被降雨影响后增加的基础上降低。所以根据地下水位的深降及地下水系统的排泄作用,采用地下水动态资料法计算降雨入渗补给系数。

通过量化计算所得降雨入渗补给系数是建立地下水流场模型和计算模型水量均衡的前提。研究区地处下坪河水文地质单元,根据前文所述,该单元是一个具有完整补径排能力的地下水系统,根据水量均衡理论,本次研究将采取公式(5)来求取研究区降雨入渗补给系数。

$$\lambda = \sum Q_{\text{排泄量}} t / \chi^F \quad (5)$$

式中, λ 为降雨入渗系数; Q 为无降雨河流流经区域增加量, m^3/s ; t 为固定时段, s ; χ 为固定时段内降雨量, mm ; F 为区域总面积, m^2 。

区内主要河流为矿区北部的下坪河,受降雨量变化的影响,下坪河流量变化较大,丰水季与枯水期流量相差数倍,且在测量河水流量时容易产生测量误差,故在计算研究区降雨入渗系数时采用某个具有代表性时段内的流量增量带入公式(5)计算。降雨量取研究区内多年最大降雨量 $1\,000\text{ mm/a}$ 。计算所得区域降雨入渗系数为 $0.125\,4\text{ m/d}$ 。

(3) 排泄项

下坪河及大部分泉点为水文地质单元内的主要

的排泄对象。

3.5 参数分区与取值

(1) 渗透系数

研究区渗透系数主要通过对区域内已掌握的地质资料进行划分,将研究区域一共分为 36 个区,其中 14~19、21~27 为在堆浸场西北侧、厂区东侧所实际布设水文地质孔进行抽注水试验所计算的渗透系数值。计算结果见表 1。根据 ZK1~ZK26 的抽水(注水)试验,研究区各含水层组渗透系数非均质性强,地下水丰富,有必要对这部分试验区域进行细分。该研究模拟了真实的地下水三维稳定流动,分区和赋值见图 4 和表 1。

表 1 渗透系数分区赋值

序号	$K_x/\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$	序号	$K_x/\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$
1 区	0.31	19 区	0.25
2 区	0.28	20 区	0.18
3 区	0.38	21 区	0.1
4 区	0.21	22 区	0.23
5 区	0.26	23 区	0.14
6 区	0.37	24 区	0.13
7 区	0.31	25 区	0.11
8 区	0.19	26 区	0.19
9 区	0.38	27 区	0.21
10 区	0.25	28 区	0.20
11 区	0.29	29 区	0.41
12 区	0.36	30 区	0.37
13 区	0.21	31 区	0.15
14 区	0.16	32 区	0.17
15 区	0.15	33 区	0.11
16 区	0.18	34 区	0.21
17 区	0.13	35 区	0.19
18 区	0.21	36 区	0.24

(2) 有效孔隙度

通过查阅相关资料及借鉴前人在场地内已做过的研究工作经验,将研究区岩体平均孔隙度设置为 0.30。

根据概念模型所述将边界赋给剖分好的网格,导入高程散点进行插值计算建立研究区地下水天然流场模型(图 5)。由流场可知,下坪河水文地质单元内地下水主要向东北方向流动。

3.6 数值模型的识别与验证

本次共筛选了 7 个水文地质钻孔水位以及 5 个泉点水文作为本次地下水流场验证的观测点,将各观测水位导入流场模型,输入观测值。根据计算水位与实际观测水位的差值和系统设定允许误差,MODFLOW 将生成如图 6 所示的误差条。当实际观测水位与计算水位的允许误差在不同的范围内时,误差将呈现不同的颜色,假设误差为 μ ,当 $\mu < 100\%$ 时误差棒为绿色;当 $100\% \leq \mu < 200\%$ 时

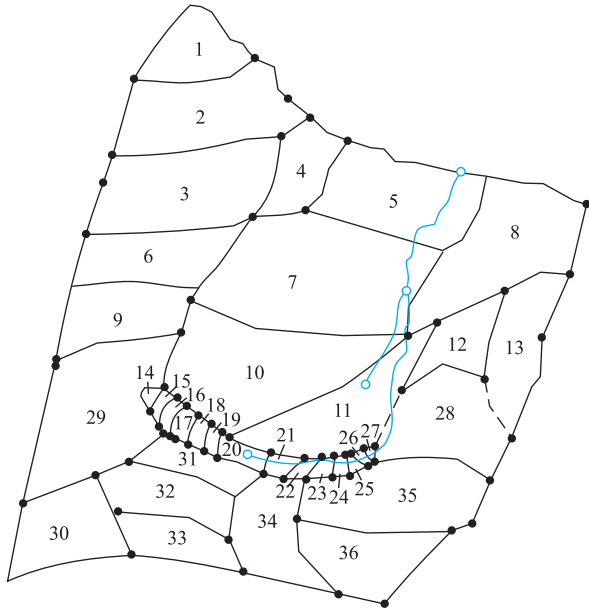


图 4 研究区渗透系数分区图

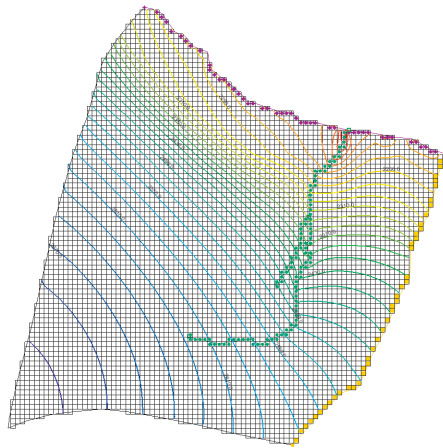


图 5 天然状态下水流场图

显示黄色;当 $\mu > 200\%$ 时,误差棒为红色^[9]。为使所建立流场模型更接近天然状况,本次研究在综合考虑测量误差及地质因素的前提下,将水流模型允许误差设置为 3~5 m。

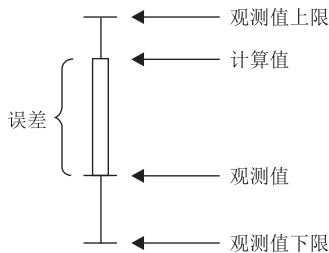


图 6 误差棒示意图

由(图 7)软件模拟出的天然地下水流场模型和实际现场观测值均在设定误差范围内。

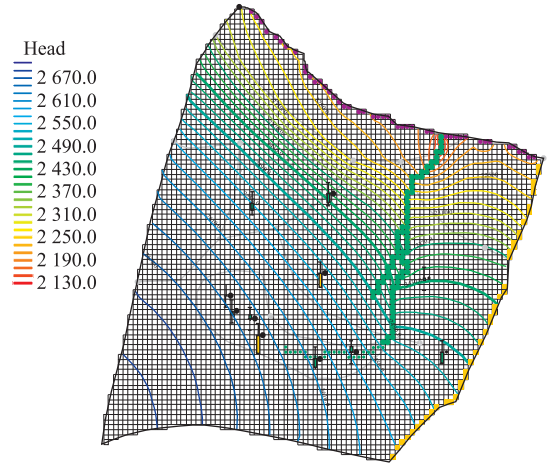


图 7 研究区天然流场模型拟合图

4 地下水污染预测分析

厂区内土层平均厚度为 12 m,堆浸场西北侧钻孔区域土层平均厚度为 15 m,本次对该场地松散层渗透系数选取经验值,依据水文地质手册,本次将松散层渗透系数取经验值为 1.87×10^{-6} cm/s (0.001 6 m/d)。渗漏液穿透黏土层大概需要 7 500~9 375 d。

本次地下水污染详细勘察在堆浸场东西两侧部署了地下水监测钻孔,根据水样检测结果显示地下水受到了不同程度的污染,其中在堆浸场西侧的 ZK21 位置,锰离子达到 859 mg/l,超过地下水三类标准 8 590 倍,可视为堆浸液最高浓度。在深层地下水中,场区东西两侧不同钻孔均有不同程度超标,厂区污染物已穿透第四系扩散至下覆砂岩裂隙,对下覆基岩裂隙水已造成不同程度的污染。根据落水洞 S02 水质监测数据显示,该点平季水样 pH 超标 5.9 倍,氨氮超标 5.56 倍,铜超标 4.82 倍,锰超标 77.5 倍,镉超标 3.8 倍,镍超标 18.3 倍,即锰离子为研究区典型污染物。在模拟拟合的区域地下水流场的基础上,分析拟定了场区污染源,并对典型污染物锰离子进行了数值模拟预测。预测以污染物穿透上覆粘土层进入下覆基岩为前提,以 1993 年建厂时为起点,模拟时限为 80 a,时间步长 100 d,模拟结果如图 8 所示。

综上,堆浸场的堆浸为场区主要污染源,堆浸场地表沉积 12~15 m 左右的松散层,通过选取松散层渗透系数经验值,计算得出污染物在发生泄漏 7 500~9 375 d 便穿透松散层进入下覆基岩裂隙含水层;通过数值模拟显示,典型污染物锰离子在穿透

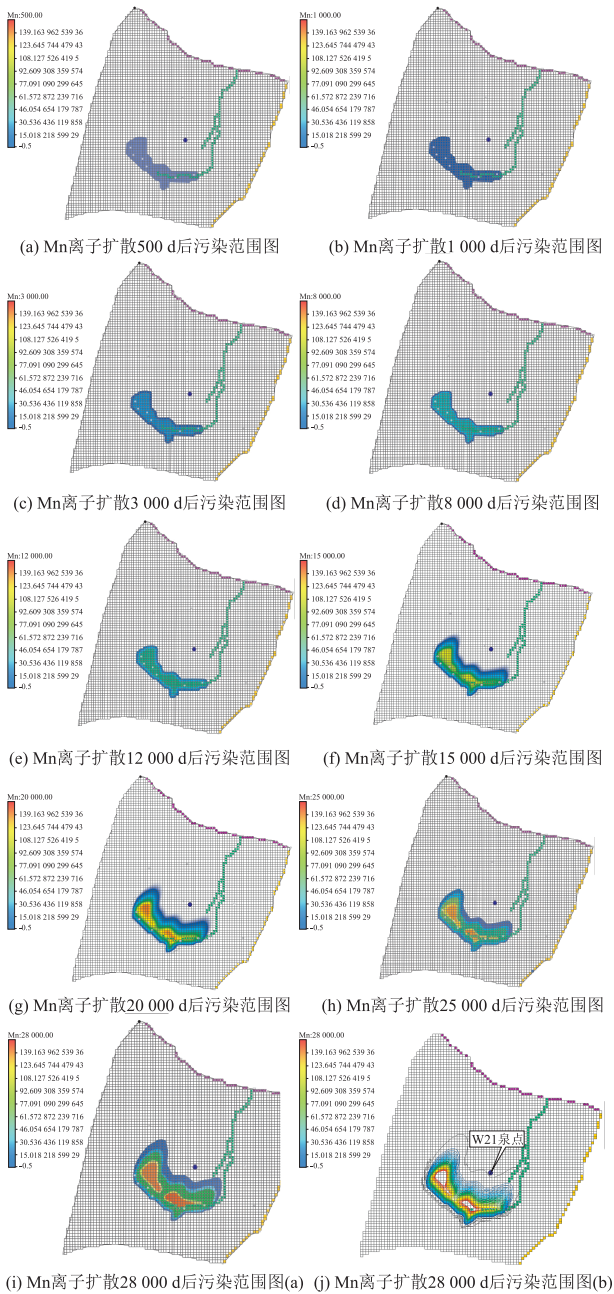


图 8 Mn 离子扩散污染范围图

第四系松散层进入下覆基岩后沿基岩裂隙持续向北东下游扩散,以 1993 年作为污染扩散起点,扩散约 28 a 至今,污染物仅扩散了 335 m,平均扩散速度为 12 m/a 左右;在污染物持续扩散的前提下,锰离子继续扩散约 17 800 d (48.8 a 后),污染物扩散至场区北东李家坪泉点(W21)附近,可能对李家坪泉点造成污染。

作者简介: 马宇琪(1998—),女,昆明理工大学硕士研究生在读,研究方向:地下水污染。E-mail:1436299286@qq.com
 通讯作者: 徐世光(1963—),男,教授级高级工程师,博士生导师,研究方向:地质灾害,水文地质与工程地质等。
 E-mail:xushiguang828@sina.com

5 结语

在污染物持续扩散的前提下对主要污染物 Mn 离子在不同时间的运移规律进行观测和分析。主要的结论与建议如下:

(1) 污染物渗入地下水,随矿区地下水流向总体由南向东北方向不断前移,矿区地段两侧为山脊,污染物先由两侧山脊向中部堆浸场汇集后,再分向东、西方向径流,并缓慢转向东北方向,最终和地下水整体径流方向相一致不断扩散。

(2) 锰离子扩散约 28 a 至今,扩散了 335 m,在水动力场的作用下,污染范围将不断增加。随着时间的推移,水平迁移距离不断增加,污染面积也不断扩大,在继续扩散 48.8 a 后,污染物扩散至场区北东李家坪 W21 号泉点附近,可能对李家坪泉点造成污染。

(3) 建议对该矿区地下水进行监测、做好厂区的防渗和应急管理工作,对下游饮用的及作为农业用水、生活用水中的泉点作系统监测,其中 W02 和 W21 泉点离矿区堆浸场和生产区最近,可将其作为重点监测对象,以免造成该泉点的污染。

参考文献

- [1] 屈永清,陈建信,任书影.我国地下水污染现状与防治对策[J].西部资源,2016,(4):125-126.
- [2] 金云龙,邱锦安,刘远锋,等.地下水污染物运移数值模拟研究及应用综述[J].地下水,2016,38(3):21-23.
- [3] 陈舟,施佳会,杨小辉,等.某垃圾发电厂地下水污染模拟研究[J].工程勘察,2014,42(12):38-42+93.
- [4] 肖再亮,王飞,洒永芳,等.基于数值模拟的某临河工业固体废物渣场地下水污染控制研究[J].水资源与水工程学报,2019,30(2):95-99.
- [5] 龚继文.基于 GMS 的某危废处置场地下水数值模拟[D].重庆大学,2016.
- [6] 陈雳华,张弛,郑凌云,等.基于 GMS 软件的河谷盆地型工业园区地下水污染控制模拟[J].环境污染与防治,2022,44(8):1025-1029.
- [7] 阮巍,徐世光,郭婷婷,等.石油炼化区地下水环境污染预测与防控研究[J].地质灾害与环境保护,2017,28(04):97-101.
- [8] 喻佳,汪家权,徐凤.某电厂项目地下水污染物运移模拟[J].广东化工,2014,41(4):66-67+56.
- [9] 高志鹏,郭华明,屈吉鸿.卫河流域河流-地下水系统氮素运移的数值模拟[J].地学前缘,2018,25(3):273-284.