

# 岩溶区某锰矿尾矿回填区地下水环境数值模拟预测

楚敬龙, 林星杰, 苗 雨, 刘楠楠, 谭海伟, 刘 芳

(北京矿冶科技集团有限公司, 北京 100160)

**摘 要:**针对岩溶区某锰矿尾矿回填区渗漏污染地下水问题进行影响预测, 运用数值模拟方法, 模拟了污染物在岩溶含水层中的时空分布情况。结果表明: 在 30 年的模拟期内, 污染物在回填区下游的最大迁移距离为 300 m, 有 9 个地下水保护目标受到影响, 包括分散式饮用水源井及泉水, 但未影响到回填区北部的集中式饮用水源保护区。研究结果可为岩溶区的地下水污染预测提供一定的借鉴。

**关键词:**数值模拟; 岩溶区; 尾矿回填区; 污染预测

**中图分类号:**TD166

**文献标志码:**A

**文章编号:**1671-4172(2020)01-0088-06

## Numerical simulation and prediction of groundwater environment in the tailings backfill zone of a manganese mine in Karst Area

CHU Jinglong, LIN Xingjie, MIAO Yu, LIU Nannan, TAN Haiwei, LIU Fang

(BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China)

**Abstract:** This paper predicted the degree and the range of groundwater leakage pollution in the tailings backfill zone of a manganese mine in karst area, and simulated the temporal and spatial distribution of the pollutant in karst aquifer, using the numerical simulation method. The results indicated that the maximum migration distance of the pollutant will be 300 m in downstream of the backfill zone during the 30-year simulation period, and nine groundwater protection targets will be affected by the leakage pollution, including decentralized drinking water wells and springs, while the centralized drinking water source protection area to the north of the backfill zone will not be affected. This paper can provide some references for groundwater pollution prediction in karst area.

**Key words:** numerical simulation; karst area; tailings backfill zone; pollution prediction

矿业开采带来巨大的经济利益, 但同时也产生大量的矿业废弃地, 导致严重的生态破坏和环境污染<sup>[1]</sup>。这些矿业废弃地包括尾矿库、废石场、采空区、堆浸场及采空回填区等, 其内所含尾砂、废石等废弃物常含有与矿业开采相关的重金属等污染物, 这些废弃地若无防渗措施或防渗措施失效, 在降雨淋溶或自身含水渗漏的情况下, 可能对周围地下水产生污染。在我国南方岩溶区存在大量采矿废弃地, 由此产生的岩溶渗漏污染是经常遇到且必须解决的重大环境问题, 而渗漏污染物造成的地下水及地表水污染问题, 已对水环境和居民生活造成了较大影响<sup>[2-3]</sup>。

鉴于此, 众多学者对污染物在岩溶含水层中的

迁移行为及岩溶水的数值模拟技术等方面做出了相关研究。赵伟丽等<sup>[4]</sup>划分了 4 种岩溶渗漏的水动力弥散类型, 分别为管道型(岩溶强发育)、管道裂隙型(岩溶强发育)、裂隙孔隙型(岩溶中等—弱发育)、采空区型(类似地表径流), 为岩溶含水层污染预测评价提供了依据; 陆嘉等<sup>[5]</sup>以氯化物为预测因子, 利用地下水数值模拟软件 Visual Modflow 对煤层气采出水进入地下水后污染物的迁移路径和污染范围进行模拟, 结果表明污染物基本不会对周围居民饮水健康造成影响; 张科正等<sup>[3]</sup>针对岩溶区某磷石膏堆放场渗漏污染问题进行研究, 运用地下水数值模拟软件 GMS 模拟了岩溶区地下水流场及污染物(磷)在岩溶含水层的运移情况, 确定了污染物的浓度分布; 胡建青等<sup>[6]</sup>结合准格尔矿区水文地质特点, 利用地下水数值模拟方法, 定量研究了深层岩溶水资源

量的变化,将研究区内的寒武、奥陶系碳酸盐岩地下水系统概化为岩溶裂隙普遍发育(已构成一细密网络状的含水结构)、地下水运移符合达西定律的非均质各向异性的三维非稳定流系统;赵良杰等<sup>[7]</sup>为了描述岩溶多重含水介质存在非达西流问题,研究了管道流 CFP 模型在岩溶区数值模拟中的应用,该方法具有一定通用性,可为实际应用提供指导。

广西覆盖型岩溶区某堆积型锰矿赋存于第四系残坡积层中,分布于低洼地或缓坡部位,矿体埋藏浅。主开采区包括 6 个堆积锰矿体,分为三期进行露天开采,其中第一期包含①号矿体,服务年限 9.6 年;第二期包含②、③、④、⑤共四个矿体,服务年限 12.1 年;第三期包含⑥号矿体,服务年限 2.3 年。选厂前 2.5 年所产生的尾矿脱水后运至 CK1~CK3 旧采空区回填,2.5 年后所产生的尾矿脱水后运至新产生的露天采空区进行回填。本文以该堆积型锰矿的尾矿回填区污染渗漏为例,运用地下水数值模拟软件 GMS,建立研究区地下水水流及溶质运移数值模型,预测污染物在岩溶含水层中的时空分布情况,评价尾矿回填区污染渗漏对岩溶区地下水敏感目标的影响,以期对岩溶区的地下水污染预测及防治提供一定的研究基础。

## 1 研究区概况

### 1.1 自然地理条件

本研究范围包含各矿体历史遗留采坑在内,西侧以 A 河流为界,北侧以 B 河流为界,东侧沿着地表水分水岭山脊线(涵盖石炭系大埔组( $C_2pd$ )岩溶较发育区),南侧到达 C 村南部一带,为一个相对完整的水文地质单元,总面积约 14.5 km<sup>2</sup>。

区内主体构造线呈近南东—北西走向,山脉排列、水系发育均受构造控制。地势上北东侧较高,西侧较低为河谷,属强烈剥蚀浅切割的丘陵低山地形,地貌形态为岩溶峰林、洼地、孤峰等,高程多在+150~+400 m,相对高差 100~150 m,海拔最低为+122~+127 m(A 河),靠近村屯地段地形较平缓。年平均降雨量 1 980 mm,A 河从矿区西部自南南东向北北西流过,河床两岸谷地宽阔平坦,多为水田或耕地。B 河为 A 河支流,在研究区北部由东向西注入 A 河。

研究区内各矿体下游分布有 1 个集中式饮用水源,19 口分散式机/民井,5 处泉水取水点,水源均为石炭系大埔组( $C_2pd$ )岩溶水,可作为地下水保护

目标。见图 1。

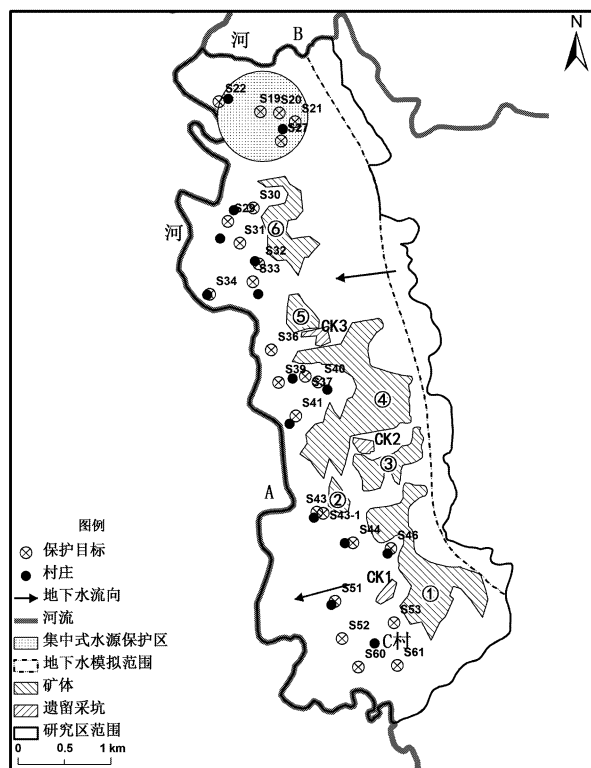


图 1 地下水保护目标图

Fig. 1 Groundwater protection targets chart

### 1.2 水文地质特征

研究区含水岩组分为松散岩类含水岩组、碳酸盐岩含水岩组、基岩构造裂隙含水岩组三类。1) 松散岩类含水岩组主要分布于 A 河两岸,一般分三层,上部为亚黏土,岩屑亚黏土及岩屑质亚黏土,含少量锰矿块;中部为堆积锰矿体,由氧化锰矿块与亚黏土、黏土及岩屑混杂组成;下部岩性为黏土,岩屑黏土,岩屑亚黏土。该层枯季一般不含水,雨季则常具季节性的含水特性,透水性差,为相对隔水层。2) 碳酸盐岩含水岩组含裂隙溶洞水,分为中等富水性和弱富水性两个等级。中等富水性的岩溶水赋存于泥盆系上统融县组( $D_3r$ )、唐家湾组( $D_2t$ )及石炭系大埔组( $C_2pd$ )、英塘组( $C_1yt$ )地层中,岩性为灰岩、白云岩,分布于矿区东北部,主要接受大气降雨补给,岩溶较发育;弱富水性的岩溶水赋存于二叠系栖霞组( $P_2q$ )地层中,主要岩性为灰岩,常含燧石结核及条带,局部白云质较多,整体岩溶弱发育。3) 基岩构造裂隙含水岩组含基岩构造裂隙水,主要赋存于中泥盆统信都组( $D_2x$ )、中二叠统孤峰组( $P_2g$ )及上二叠统龙潭组( $P_3l$ )等地层中,富水性弱,对矿床充水影响弱。

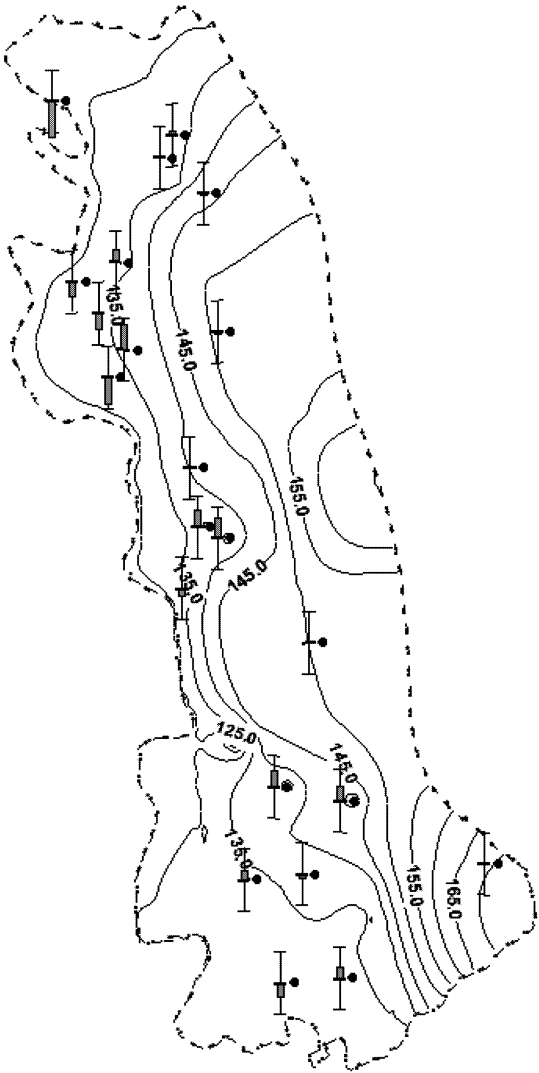


图 2 水位拟合图

Fig. 2 Water level fitting chart

研究区地下水以中等富水性的碳酸盐岩裂隙溶洞水为主。矿区处于石炭系大埔组( $C_2pd$ )碳酸盐岩裂隙溶洞水中等富水性的岩溶水地区,岩性为灰岩、白云岩。岩溶水主要接受大气降雨补给,顺地形自东向西径流,主要运移于岩溶裂隙之中,最终排泄于 A 河。因上覆第四系透水性差,有相对隔水作用,因此岩溶水具承压性质,部分向上越流至第四系,在低洼处呈泉水排泄出地表。

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x}\left(k_{xx}\frac{\partial H}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k_{yy}\frac{\partial H}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k_{zz}\frac{\partial H}{\partial z}\right) + W = 0 & (x,y,z) \in \Omega \\ H(x,y,z)|_{S_1} = H_1(x,y,z) & (x,y,z) \in S_1 \\ K\frac{\partial H}{\partial n}|_{S_2} = q(x,y,z) & (x,y,z) \in S_2 \end{cases}$$

式中: $\Omega$ —地下水渗流区域; $H$ —地下水水头, m; $S_1$ —模型的第一类边界; $S_2$ —模型的第二类边

2 地下水数值模拟

2.1 水文地质概念模型

矿区堆积型锰矿赋存于第四系残坡积层中,分布于山前低洼地或缓坡部位,矿体埋藏浅,其中①号、②号、③号、④号、⑤号、⑥号矿体为凹陷开采,并作为尾矿的回填区,主要影响第四系下伏石炭系大埔组( $C_2pd$ )岩溶水,因此考虑堆积型锰矿的凹陷开采形成的尾矿回填区对矿区岩溶地下水的影响。

模拟范围:北边界为 B 河,概化为定水头边界;东边界为石炭系大埔组( $C_2pd$ )岩溶较发育区与二叠系栖霞组( $P_2q$ )岩溶弱发育区地层分界线,概化为弱流量边界;南边界为垂直于地下水等水位线,概化为零流量边界;西边界为 A 河,概化为定水头边界;上边界为第四系与石炭系大埔组的交界面,接受大气降水补给(以东侧裸露山区的大气降水补给为主),并越流补给上层第四系相对隔水层,同时以地下水侧向径流及人工开采的形式进行地下水排泄;下边界为深部岩溶弱发育的相对隔水层。

模拟范围之内的地下水主要在石炭系大埔组( $C_2pd$ )碳酸盐岩类裂隙溶洞水含水层中流动。根据矿区水文地质条件、水文地质平面图、剖面图及钻孔柱状图,综合考虑,将模拟范围内的含水层概化为一层,即石炭系大埔组( $C_2pd$ )碳酸盐岩类裂隙溶洞水承压含水层,岩性主要为灰岩、白云岩,平均发育厚度在第四系相对隔水层下约 20~30 m。

在岩溶相对中等—弱发育区,岩溶介质溶孔、溶蚀裂隙发育相对来说比较稳定,含水层中水力联系相对比较紧密,岩溶介质的发育具有相对均匀性,岩溶渗漏可认为符合均匀介质的运移规律,浓度水动力弥散曲线与理论曲线相符合<sup>[4]</sup>。因此研究区地下水系统可概化为非均质各向异性、空间单层结构稳定地下水流系统。

2.2 地下水流数学模型与溶质运移数学模型

1) 地下水流数学模型

基于 2.1 中的水文地质概念模型,可以用以下数学模型描述地下水流系统:

界; $k_{xx}$ 、 $k_{yy}$ 、 $k_{zz}$ 分别表示  $x$ 、 $y$ 、 $z$  主方向的渗透系数, m/d; $W$ —源汇项,包括降水入渗补给等, m<sup>3</sup>/d;

$H_1(x, y, z)$ —第一类边界已知地下水水头函数, m;

$n$ —边界  $S_2$  上的外法线方向<sup>[8]</sup>。

$q(x, y, z)$ —第二类边界单位面积流量函数,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;

## 2) 溶质运移数学模型

$$\begin{cases} \frac{\partial(\theta C)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \theta D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta v_i C) + q_s C_s + \sum R_n \\ C(x, y, z, 0) = C_0(x, y, z) & (x, y, z) \in \Omega, t = 0 \\ -D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} = 0 & (\Gamma_2, t > 0) \end{cases}$$

式中:  $C$ —地下水中组分的溶解相浓度,  $\text{mg}/\text{L}$ ;  
 $\theta$ —地层介质的孔隙度, 无量纲;  $t$ —时间,  $\text{d}$ ;  $x_i$ —沿  
 直角坐标系轴向的距离,  $\text{m}$ ;  $D_{ij}$ —水动力弥散系数  
 张量,  $\text{m}^2/\text{d}$ ;  $v_i$ —地下水平均实际流速,  $\text{m}/\text{d}$ ;  $q_s$ —单  
 位体积含水层流量, 代表源和汇,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $C_s$ —源或汇  
 水流中组分的浓度,  $\text{mg}/\text{L}$ ;  $\sum R_n$ —化学反应项,  
 $\text{mg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ;  $\Omega$ —溶质运移的区域;  $C_0$ —组分的初  
 始浓度,  $\text{mg}/\text{L}$ ;  $\Gamma_2$ —Neumann 边界。

## 2.3 数值模型识别与验证

在建立水文地质概念模型、数学模型的基础上,  
 运用基于有限差分法的 GMS 软件建立了地下水流  
 数值模型。应用 MODFLOW 模块, 将模拟区剖分  
 为  $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$  的矩形网格, 模型剖分共计 12 960  
 个计算单元。源汇项包括降雨入渗、地下水侧向径  
 流、地下水与地表水的相互补排、人工开采等, 均由  
 相应软件包进行刻画, 然后分配到相应单元格。

模型的识别与检验是整个模拟工作中极为重要  
 的一步, 是一个不断调节水文地质参数, 使模型结果  
 尽可能与实际调查资料相吻合的过程。根据研究区  
 专项水文地质勘查提供的渗透系数及其他水文地质  
 参数的建议值, 运行数值模型, 并根据抽水试验数据  
 及实际水文地质条件进行反复调参, 得到最终水文  
 地质参数分布情况, 并确定地下水流场。流场拟合  
 情况见图 2 所示。由图 2 可知, 对模拟区调查的 22  
 个水位观测点进行拟合, 误差小于 1 m 的数据为 21  
 个, 占比为 95.5%, 误差在 1~2 m 之间数据为 1 个  
 (最西北侧), 占比为 4.5%, 反应了水位拟合点处的  
 水位计算值和实际观测值匹配较好, 所建立的地下  
 水流数值模型基本达到精度要求。

## 3 预测结果及分析

### 3.1 预测情景

本次预测情景针对矿区①~⑥号矿体回填区尾  
 矿淋滤液渗漏进行模拟预测。本研究区的主要含水  
 层为第四系下伏石炭系大埔组碳酸盐岩含水岩组,  
 而锰矿开采位于第四系地层, 形成的采空区回填尾

矿, 在降雨淋溶条件下, 尾矿淋滤液会渗透至下伏的  
 岩溶含水层。尾矿回填是逐步开展的, 即先回填已  
 有旧采空区(CK1~CK3), 同时进行矿体开采, 旧采  
 空区填满后, 再回填不断形成的新采空区, 因而尾矿  
 的降雨淋滤液是逐步产生并随地下水往下游迁移  
 的。根据实际情况, 将各个尾矿回填区污染源概化  
 为补给浓度连续面源污染。

第一期开采共 9.6 年: 0~2.5 年, CK1~CK3  
 等旧采坑全部填满尾矿; 2.5~9.6 年, ①号矿体全  
 部开采完并填满尾矿。第二期开采共 12.1 年: 9.6~  
 10.3 年, ②号矿体全部开采完并填满尾矿; 10.3~  
 11.8 年, ③号矿体全部开采完并填满尾矿; 11.8~  
 20.7 年, ④号矿体全部开采完并填满尾矿; 20.7~  
 21.7 年, ⑤号矿体全部开采完并填满尾矿。第三期  
 开采共 2.3 年: 21.7~24 年, ⑥号矿体全部开采完  
 并填满尾矿。24~30 年, 为服务期满后。以此作为  
 时间序列, 对本情景进行污染物迁移模拟预测。

在预测因子选择方面, 唐文杰等<sup>[9]</sup>通过对锰矿区  
 土壤重金属全量及其形态分布的分析, 认为在锰矿区  
 Cd 与 Mn 这 2 种重金属可利用态与潜在可利用态较  
 高, 是锰矿区污染土壤修复的主要修复对象。陈春强  
 等<sup>[1]</sup>对广西荔浦、平乐、来宾 3 个锰矿恢复区的土壤  
 和农作物进行调查和重金属含量分析, 得出 3 个锰矿  
 恢复区土壤的主要重金属污染因子是 Cd 与 Mn。根  
 据现有老采坑矿坑水浓度监测值可知, 锰的最大浓  
 度值为  $0.18 \text{ mg}/\text{L}$ , 超标 0.8 倍, 其余监测因子均满  
 足标准要求, 因此本次预测选取 Mn 作为预测因子。

### 3.2 结果及分析

各个污染源(CK1~CK3、①~⑥号矿体回填  
 区)按不同的浓度时间序列输入模型, 模拟期为 30  
 年, 得到 Mn 扩散预测结果。图 3 给出了渗漏后  
 9.6 年、21.7 年、24 年、30 年, Mn 在岩溶含水层中  
 的迁移范围。按照《地下水质量标准》(GB/T14848-  
 2017) 中 III 类标准, 该污染范围的外边界即为  
 $0.1 \text{ mg}/\text{L}$  等浓度线。表 1 为 Mn 在岩溶含水层中  
 的扩散范围及影响的保护目标<sup>[10]</sup>。

表 1 Mn 的迁移扩散预测结果

Table 1 Prediction results of migration and diffusion of Mn element

| 预测时间   | 矿体外最大扩散距离/m | 影响的保护目标                                                                                   | 超标范围                      | 污染羽最大浓度/(mg·L <sup>-1</sup> ) | 超标倍数 |
|--------|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|-------------------------------|------|
| 9.6 年  | 87          | 无                                                                                         | ①号矿体范围内及其下游               | 0.11                          | 0.1  |
| 21.7 年 | 275         | ①号下游:S44、S46、S53;<br>②号下游:S43、S43-1;                                                      | CK1、①~④号<br>矿体范围及其下游      | 0.16                          | 0.6  |
| 24 年   | 280         | ①号下游:S44、S46、S53;<br>②号下游:S43、S43-1;<br>④号下游:S37、S40;                                     | CK1、①~④号矿体<br>范围及其下游      | 0.16                          | 0.6  |
| 30 年   | 300         | ①号下游:S44、S46、S53;<br>②号下游:S43、S43-1;<br>④号下游: S37、S40;<br>⑥号下游:S30、S32;<br>污染羽未到达集中式水源保护区 | CK1、①~④号矿体、⑥号<br>矿体范围及其下游 | 0.16                          | 0.6  |

由预测结果可知:

1)在 CK1~CK3、①~⑥号矿体采空区逐步进行尾矿回填的过程中,渗滤液逐步产生,并随地下水由东向西迁移,在 30 年的模拟期内,污染羽前锋在矿体外最大迁移距离为 300 m。其中④号矿体的污染物迁移范围在 24 年时首先到达 A 河。①~③号矿体的污染物,由于其下游有 S43、S43-1、S44、S46、S53 取水井的存在,而被限制在一定范围内,没有继续往下游扩散。⑤号矿体及其周围未出现超标污染羽。⑥号矿体污染物未扩散到集中式水源保护区,鉴于集中式水源保护区的敏感性,应对集中式水

源保护区进行地下水水质监测,并采取相应预防措施,防止集中式水源地受到污染。

2)在污染物迁移扩散过程中,受影响的保护目标为:①号矿体下游:S44(泉水)、S46(泉水)、S53(机井);②号矿体下游:S43(民井)、S43-1(机井);④号矿体下游:S37(泉水)、S40(泉水);⑥号矿体下游:S30(民井)、S32(民井),其取水层位均为岩溶水含水层。一旦这些村屯的饮用水井及泉水受到影响,应立即采取措施,启动应急预案,确保村民取水不受影响。

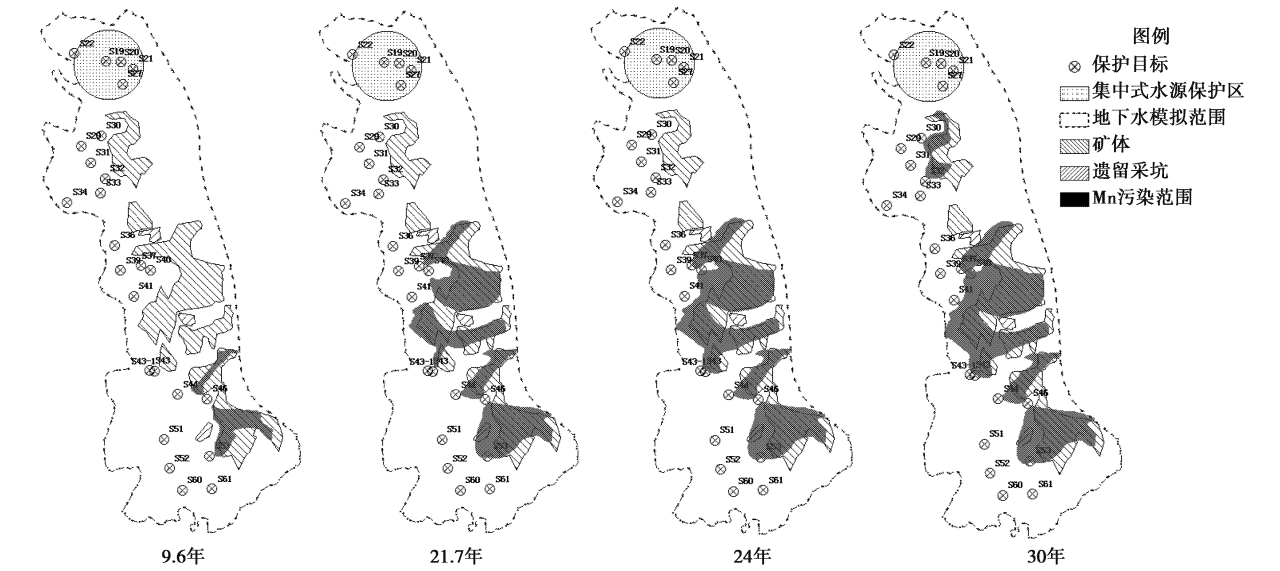


图 3 不同时间的 Mn 迁移扩散图

Fig. 3 Chart of Mn migration and diffusion at different times

4 结论

1)本文以 Mn 为预测因子,应用地下水模拟软件 GMS 对研究区进行了水文地质概化,建立了研

究区地下水数值模型,预测了锰矿尾矿回填区污染物渗漏对地下水环境的影响。结果表明,污染物随地下水由东向西往 A 河迁移,模拟期内,有 9 个分散式居民饮用水井及泉水受到影响,但不会影响到

⑥号矿体北侧的集中式水源保护区。

2)本研究区处于覆盖型岩溶区,下伏岩溶含水层富水性中等,岩溶较发育,溶孔、溶蚀裂隙发育相对均匀,水力联系相对密切,可概化为均匀介质含水层进行模拟预测,为岩溶区的地下水污染预测提供一定的借鉴。

参 考 文 献

[1] 陈春强,邓 华,陈小梅. 广西 3 个锰矿恢复区农作物重金属健康风险评价[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2017, 35(4):127-135.  
CHEN Chunqiang, DENG Hua, CHEN Xiaomei. Assessment on human health risk of heavy metal in the food crops from three manganese mine recovery areas in Guangxi, China[J]. Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition), 2017, 35(4):127-135.

[2] 邹国富,范柱国,朱春蓉,等. 云南普朗铜矿尾矿库喀斯特渗漏示踪试验研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2009, 36(3):292-297.  
ZOU Guofu, FAN Zhuguo, ZHU Chunrong, et al. A tracing test of karst seepage of the tailing reservoir in the Pulang Copper Deposit, Yunnan, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2009, 36(3):292-297.

[3] 张科正,陈 舟,陈长生,等. 岩溶区某磷石膏堆场地下水渗流与污染物运移数值模拟[J]. 中国煤炭地质, 2018, 30 (5): 46-52.  
ZHANG Kezheng, CHEN Zhou, CHEN Changsheng, et al. Numerical simulation of groundwater seepage and pollutant migration in a karst area phosphogypsum dump [J]. Coal Geology of China, 2018, 30 (5):46-52.

[4] 赵伟丽,褚学伟,董 毓,等. 岩溶含水层渗漏污染弥散类型分析-以贵州废渣堆场污染为例[J]. 地下水, 2011, 33(2):6-14.  
ZHAO Weili, CHU Xuewei, DONG Yu, et al. A analysis on leakage pollution dispersion type in karst aquifer — Taking the waste residue site pollution for example [J]. Groundwater, 2011, 33(2):6-14.

[5] 陆 嘉,张春晖,何绪文,等. 基于数值模拟方法研究煤层气采出水对地下水环境的影响[J]. 中国矿业, 2013, 22(5):

57-60.  
LU Jia, ZHANG Chunhui, HE Xuwen, et al. Assessment of coal-bed methane produced water in groundwater pollution based on numerical simulation[J]. China Mining Magazine, 2013, 22(5):57-60.

[6] 胡建青,张文涛. Visual MODFLOW 在准格尔旗深层岩溶地下水资源评价中的应用[J]. 煤炭与化工, 2018, 41(1): 13-19.  
HU Jianqing, ZHANG Wentao. Application of Visual MODFLOW in assessment of deep karst groundwater in Jungar Banner[J]. Coal and Chemical Industry, 2018, 41(1): 13-19.

[7] 赵良杰,夏日元,杨 杨,等. 基于 CFP 的岩溶管道流数值模拟研究-以桂林寨底地下河子系统为例[J]. 地球学报, 2018, 39(2):225-232.  
ZHAO Liangjie, XIA Riyuan, YANG Yang, et al. Research on numerical simulation of karst conduit media based on CFP: A case study of Zhaidi Karst underground river subsystem of Guilin[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2018, 39(2):225-232.

[8] 范书凯,崔海明,周连碧. 基于 GMS 的矿坑涌水量预测与环境影响分析[J]. 中国矿业, 2015, 24(S2):178-181.  
FAN Shukai, CUI Haiming, ZHOU Lianbi. Forecasting the mine water inflow and analyzing the impact on the environment based on the GMS[J]. China Mining Magazine, 2015, 24(S2): 178-181.

[9] 唐文杰,黄江波,李 衡,等. 广西一锰矿区土壤重金属的赋存形态研究[J]. 环境科学与技术, 2017, 40(增刊 1): 314-318.  
TANG Wenjie, HUANG Jiangbo, LI Heng, et al. Research on soil heavy metal form of a manganese ore zone in Guangxi[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 40 (S1): 314-318.

[10] 楚敬龙,林星杰,白 飞,等. 数值法在西北某铜冶炼项目地下水环境影响评价中的应用[J]. 有色金属工程, 2015, 5(5): 88-92.  
CHU Jinglong, LIN Xingjie, BAI Fei, et al. Application of numerical method in groundwater environmental impact assessment of a copper smelting project in Northwest China[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2015, 5(5):88-92.