



数值模拟在沂水铁矿区地下水环境影响评价中的应用

周晓雪,付佳妮,刘建霞,孙建明

(青岛地质工程勘察院,山东 青岛 266071)

摘要:地下水数值模拟在矿区地下水环境评价中应用较少,通过对山东沂水铁矿区进行水文地质详细勘察,建立了尾矿库及矿区地下水水流及水质数学模型,预测和评价了该矿建设实施过程中对地下水环境可能造成的直接影响和间接危害。结论为矿山建设阶段和运行阶段正常情况下,尾矿区水位水质变化对地下水环境没有明显的影响,非正常情况或者事故状态下,预测污染因子在泄漏点附近一定范围出现超标现象;采矿区矿井排水对当地浅层地下水位影响较大。针对这种影响和危害提出防治措施,为沂水铁矿建设项目选址决策、工程设计和环境管理提供科学依据。

关键词:铁矿;数值模拟;地下水;环境影响评价;山东沂水

中图分类号:X820.3

文献标识码:B

1 工程概况

山东沂水铁矿为一新建矿山,矿区位于沂水县北部诸葛镇上峪一带,面积约 4.55 km^2 。位于沂沭断裂带之西侧,属丘陵区,切割剥蚀一般,地形总体为北东高南西低,最高点为矿区北部的宿山,标高为 395.5 m ,最低点位于矿区西南部的上峪小河汇入跋山水库处,标高 163.0 m ,为当地最低侵蚀基准面。矿区多年平均降水量 760.4 mm ,地表水属沂河流域,有跋山水库、上峪小河以及多个塘坝。

根据开发利用方案,矿床为一大型铁钛矿床,矿石属易选矿石,矿床开采及加工技术条件简单,平均品位:TFe 14.68% , TiO_2 6.63% 。该矿设计最终产品为铁钛精矿。矿体露天开采的服务年限为30年,开采深度+225 m标高至+100 m标高;采用纵向采剥法,双向推进,沿矿体上盘边界开沟,向上下盘两侧推进;露天采场生产主要包括采矿和剥离2部分,其采剥工艺为:穿孔—爆破—铲装—运输4个主要环节;选矿厂工艺流程包括粗碎、中碎、筛分和细碎过程,选矿采用磁选和重力浮选等物理方法,过程中不添加化学药剂,参考附近铁矿水质监测结果,采

矿废水中所含的重金属、硫酸盐浓度不超标。矿区在道路路面外两侧设排水盖板明沟以收集厂区地面雨水统一排出厂区,厂区外侧部分地段设毛石混凝土梯形截水沟,截水沟由北向南,最终排入附近河沟中。尾矿库位置在矿区西北侧约 6.0 km 处的南侧山谷中,面积约 $218.82\times 10^4\text{ m}^2$,有效库容为 $10\ 331.45\times 10^4\text{ m}^3$,尾矿库采用斜槽—排水管排水系统,主要排水构筑物包括斜槽和排水管,排水管与斜槽交会处设有跌水井过渡,排水管末端在尾矿坝外侧设有排水消能池。

根据开发利用方案,I号矿坑 $\pm 0\text{ m}$ 和II号矿坑+50 m涌水量分别为 $524.3\text{ m}^3/\text{d}$ 和 $633.6\text{ m}^3/\text{d}$,小于 $0.2\text{ 万 m}^3/\text{d}$;污染源来自于尾矿矿浆下渗,但尾矿库建设采取了严格防渗措施;矿区内地下水矿化度小于 1.0 g/L ,为水质较好的淡水,另外距矿区西南部 0.5 km 的跋山水库是一座大型水库,水质较好,是较理想的矿区生活及工业用水水源。

2 矿区水文地质特征

区内地层出露简单,主要有新太古代泰山岩群雁翎关组,岩性组合为黑云斜长变粒岩、黑云角闪变

收稿日期:2013-05-24;修订日期:2013-08-20;编辑:王秀元

作者简介:周晓雪(1984—),女,山东德州人,主要从事地质试验、水质分析、水文地质等工作;E-mail:18653285683@163.com。

粒岩、斜长角闪岩、磁铁石英角闪岩,分布在上峪东沟以东、以北一带;古生代寒武纪长清群馒头组,岩性以紫红色、砖红色粉砂质页岩为主,分布于尾矿库所在地;新生代临朐群牛山组玄武岩,分布于正地形之高处,第四纪地层则分布于沟谷、平缓丘地等负地形处。区内构造较发育,塑性构造有小柔皱、小褶皱、片麻理等,断裂构造有 3 条。区内岩浆岩发育,主要分布古元古代傲徕山、红门超单元和中元古代摩天岭超单元。

矿区地下水类型划分为第四系松散岩类孔隙潜水、碎屑岩类裂隙水和基岩裂隙水 3 种类型,矿山开采区 3 类型均有分布,尾矿库区主要为碎屑岩类裂隙水。

(1)第四系松散岩类孔隙潜水:呈条带状分布在矿区上内峪小河两侧,宽 200~1 300 m 不等,含水层厚度一般 2~5 m,下游最厚可达 7.0 m,岩性为冲洪积砂质粘土、砂砾石等,结构松散,透水性好,含孔隙潜水,单井涌水量一般小于 500 m³/d,水位埋深 1.5~2.5 m,年变幅 1.0 m 左右,随季节变化明显,主要接受大气降水及基岩裂隙水的补给,排泄以人工开采及径流排泄为主。地下水化学类型为 SO₄·HCO₃-Ca·Mg 型,矿化度小于 0.5 g/L。

(2)碎屑岩类裂隙水:含水层为寒武纪馒头组砂质页岩、粉-细砂岩等,主要分布在大诸葛镇、尾矿库、孔家庄西等位置。水位埋深 1~5 m,单井涌水量小于 100 m³/d。水质良好,为 HCO₃-Ca·Mg 型,矿化度为 0.45 g/L 左右。

(3)基岩裂隙水:主要指埋藏于风化带中的网状基岩裂隙水,含水层主要岩性为中粗粒含黑云二长花岗岩,水位埋深随地形而异,深度 10~20 m,年变幅 2~3 m,基岩裂隙水主要接受大气降水的补给,沿地形坡降顺坡径流,至地形有利处以潜流及泉的形式排泄出,地下水水位埋深随地形而异,一般 3~7 m,根据抽水试验资料,试验涌水量 0.241~0.34 L/s,单位涌水量 0.019~0.038 L/s·m,属弱富水的含水层。水化学类型 HCO₃-Ca·Mg 型,矿化度小于 0.5 g/L,水温 14℃。

3 地下水环境影响预测与评价

3.1 尾矿库地下水数学模型及预测评价

3.1.1 水文地质条件概化

(1)矿山开采区

评价区数值模型研究面积为 47.99 km²。以矿山为分水岭,地下水由北向南流向矿山,部分水流沿分水岭汇入西侧跋山水库中,部分由东侧继续流向下流。由于矿体呈带状分布,矿体顶、底板岩性相同,均为中细一中粗粒二长花岗岩等,为弱含水层,没有明显的补给与隔水边界,因此形成无限状态下弱补给边界条件。评价区潜水含水层厚度一般 2~5 m,下游最厚可达 7.0 m。水位埋深 1.5~2.5 m,年变幅 1.0 m 左右,随季节变化明显,主要接受大气降水及基岩裂隙水的补给,排泄以人工开采及径流排泄为主。

(2)尾矿库区

根据评价区范围内含水层的变化规律和观测点的分布情况,确定数值模型研究面积为 36.80 km²。含水层在模型研究范围的边缘逐渐变薄,趋于尖灭,过渡为弱透水的粘性土或直接与不透水的页岩接触,东、西两侧可视为隔水边界,北界、南界因研究区内外含水层连通,可视为透水边界。含水层以下,主要为寒武纪长清群馒头组页岩或砂质页岩,组成区域性隔水底板,不存在地下水的越流补给。除局部地段外,含水层以上均分布一层弱透水的粉质粘土或粉土。

评价区内的潜水水位埋深 1.5~2.5 m,潜水含水层主要接受降雨入渗补给和径流补给,主要排泄方式为径流排泄、蒸发排泄及少量开采。

(3)水文地质参数主要为给水度、渗透系数、降雨入渗系数等,按抽水实验、详查报告、岩性特征、参考经验值给定初始值,通过模型模拟调试,最终获得实际水文地质参数^[1]。

3.1.2 地下水水流模型

水流模型可概化为无压(潜水)二维流偏微分方程:

$$\frac{\partial}{\partial x}[K(H-H_b)\frac{\partial H}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y}[K(H-H_b)\frac{\partial H}{\partial y}] + W = \mu \frac{\partial H}{\partial t}$$

初始条件:

$$H(x, y, t)|_{t=0} = H_0(x, y) \quad (x, y) \in D$$

边界条件:

$$K(H-H_b)\frac{\partial H}{\partial n}|_{\Gamma_2} = -q(x, y, t) \quad (x, y) \in \Gamma_2$$

式中: H 为地下水水位标高(m); H_b 为含水层底板标高(m); $(H-H_b)$ 为含水层厚度(m); μ 为含水层的

给水度(无量纲); K 为含水层的渗透系数(m/d); W 为含水层垂向输入或输出的水量(m^3/d),包括降水入渗量、河渠渗漏量、灌溉回渗量、人工回灌量及工农业开采量; $\frac{\partial H}{\partial n}$ 为二类边界水头的外法向导数; $q(x, y, t)$ 为二类边界点在 t 时刻的单宽流量 $m^3/(d \cdot m)$; D 为地下水渗流域; Γ_2 为二类边界。模拟区数值模型计算单元划分见图 1。

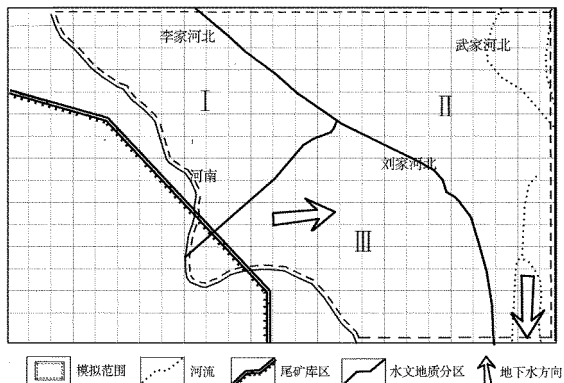


图 1 尾矿库第四纪地层区数值模型计算单元划分图

鉴于模拟区为新建矿山,资料较少,地下水动态监测资料只有丰水期至枯水期间的数据,故选择此期间的观测井水位进行模拟识别,即识别期为 2011 年 9 月 26 日—2012 年 4 月 10 日,用识别期内其他未参加模型识别的观测井资料进行验证。进而确定模拟区内的水文地质参数分区和各分区内水文地质参数。

根据 2011 年 9 月 26 日的统测水位资料,采用内插法形成地下水流场,作为模型识别的初始流场^[2];根据 2011 年 9 月 26 日的水位输入模型,模型自动计算边界地下水径流量;根据区内降雨量资料,及降水入渗系数计算大气降水入渗补给量;模型识别期间,降雨量偏小,河流一直断流,灌溉回渗对地下水的补给量可忽略,故模型中的 3 项补给量均为零;模拟区范围内计开采用井 5 眼,开采量为 $1\ 670\ m^3/d$ (含矿山排水量),将其概化分配到 50 个网格单元,在模型识别期内,将开采量输入模型。

模拟区降水入渗系数及 3 个分区水文地质参数分别见表 1,表 2。

表 1 降水入渗系数(α)

岩性	粘土	粉质粘土	粉土	粉细砂、中细砂
降水入渗系数	0.15	0.23	0.25	0.30

表 2 含水层渗透系数(K)及给水度(μ)

分区	给水度(μ)	渗透系数(K)(m/d)
I	0.165	20
II	0.179	70
III	0.166	30

将模型所需各种水文地质参数、含水层空间分布数据、初始水头、各种随时间变化的输入输出水量等数据,输入模型的相应单元,模型运行 7 个时段,并自动绘制各拟合点的实测曲线和计算曲线。经多次调算,曲线拟和较好,如图 2,图 3 所示。新建立的水文地质参数与原输入参数系列比较吻合。

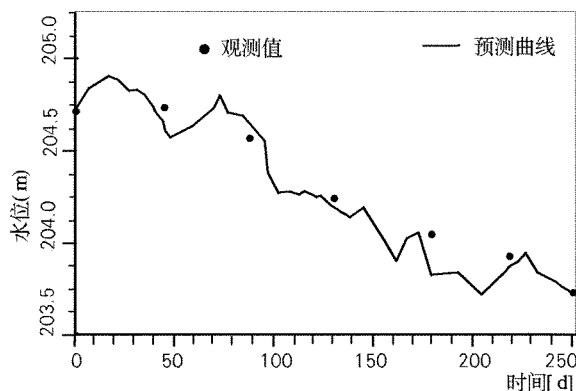


图 2 河南村东南 100 m 观测井水位拟合曲线图

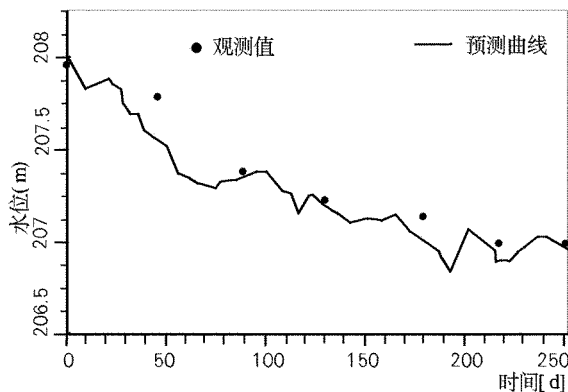


图 3 刘家河北东南 100 m 观测井水位拟合曲线图

3.1.3 水质数学模型

该次建立水质数值模型采用水平二维流场中的流体动力-弥散型数值模型^[3],弥散方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x}[(H-H_b)(D_{xx}\frac{\partial C}{\partial x} + D_{xy}\frac{\partial C}{\partial y} - CV_x)] + \frac{\partial C}{\partial y}[(H-H_b)(D_{xy}\frac{\partial C}{\partial x} + D_{yy}\frac{\partial C}{\partial y} - CV_y)] + I = \frac{\partial(H-H_b)C}{\partial t}$$

初始条件: $C(x, y, t) |_{t=0} = C_0(x, y) \quad (x, y) \in D$

边界条件: $C(x, y, t) |_{\Gamma} = C(x, y, t) \quad t > 0, (x, y) \in \Gamma$

式中: C 为饱和含水层中溶质浓度 (M/L^3); I 为水质方程中的源汇项, $I = \frac{CW}{n}$; n 为有效孔隙率; V_x ,

V_y 为地下水在纵、横向的流速分量 (L/T); D_{xx} ,

D_{xy}, D_{yy} 为不同方向的弥散系数 (L^2/T)。

在未考虑化学反应作用、生物降解作用、吸附作用的条件下,纵向弥散度 $\alpha_L = 0.20$, 横向弥散度 $\alpha_T = 0.015$, 有效孔隙度 $n = 0.20$ 。

利用 2011 年 9 月区内地下水水质分析资料作为初始浓度, 分别对 NO_3^- , COD, SO_4^{2-} 经过 Kriging 内插、网格化后作为初始浓度输入模型。

在模型调试运行期间, 通过调整污染物质进入含水层补给地下水的浓度、含水层对化学成分的降解与吸附作用^[4], 得到拟合曲线(图 4—图 6)。拟合曲线基本反映出地下水中离子浓度的变化趋势。经多次调整、试算, 得到污染物质绝对进入含水层补给地下水(垂向补给量与同时段垂向排泄量之差)的浓度 ($C = \frac{I \cdot n}{W}$, 符号意义同前)。

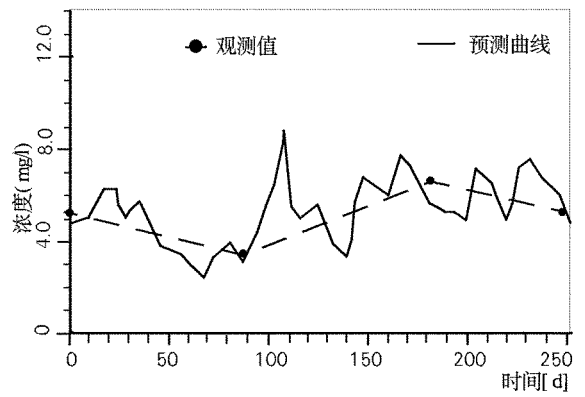


图 5 COD 浓度变化拟合曲线

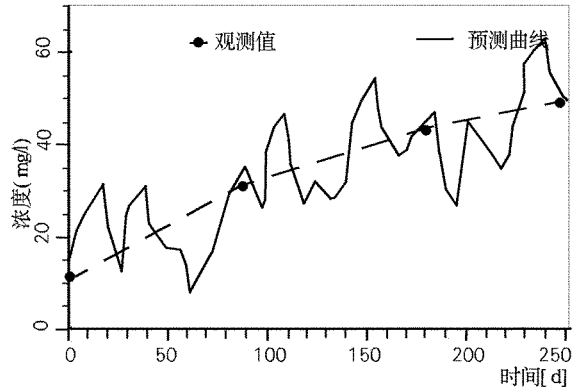


图 6 SO_4^{2-} 浓度变化拟合曲线

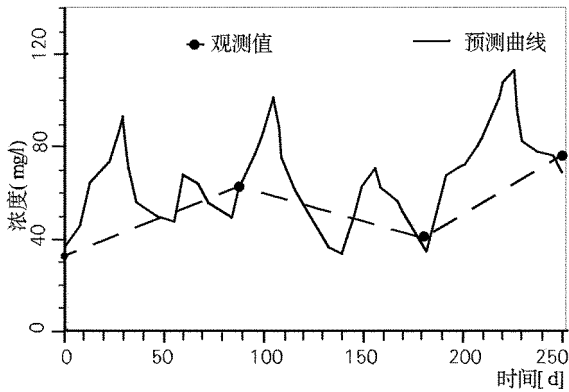


图 4 NO_3^- 浓度变化拟合曲线

依据矿区实际, 建设、运行和服务期满的生活、生产废水对地下水的影响较小。正常情况下不应有污水下渗而发生泄漏至地下水的情景发生。因此, 此次模拟预测情景主要针对非正常情况及事故风险状况进行设定, 非正常情况主要指尾矿坝底部渗漏, 沿第四纪松散堆积层渗入地下水中, 造成地下水污染。评价非正常情况泄漏点设定为: 尾矿坝中下部第四纪松散堆积层与坝体交界处。

假设未处理污水泄漏造成地下水污染, 泄漏物中含 COD, SO_4^{2-} , NO_3^- 等主要污染物, 浓度分别为:

7.92 mg/L, 92.23 mg/L 和 135 mg/L, 第四纪松散堆积层与坝体交界处面积约为 400 m²。

将含水层参数、初始条件和边界条件代入水质模型, 利用 Modflow 和 MT3D 软件, 联合运行水流和水质模型^[5], 得到污染物运移的预测结果(表 3)。

表 3 非正常工况情况下 NO_3^- , COD, SO_4^{2-} 污染影响范围

预测年 限(年)	污染影响范围(km ²)			污染超标范围(km ²)			最大运移距离(km)		
	NO_3^-	COD	SO_4^{2-}	NO_3^-	COD	SO_4^{2-}	NO_3^-	COD	SO_4^{2-}
1	0.0437	0.00457	0.00389	0.0437	0.00457	0	0.0311	0.00863	0.00234
5	0.0790	0.0211	0.0131	0.0790	0.0211	0	0.1545	0.228	0.0124
10	0.134	0.0743	0.0261	0.134	0.0743	0	0.3078	0.425	0.0235
20	0.237	0.399	0.497	0.237	0.399	0	0.5796	0.526	0.527
25	0.531	0.506	0.578	0.531	0.506	0	1.0874	1.108	0.998
30	0.410	0.445	0.455	0.410	0.445	0	1.3768	1.419	1.338

综合 NO_3^- , COD 和 SO_4^{2-} 对地下水潜水含水层污染影响模拟结果, 可以看出 NO_3^- , COD 浓度超标, 在尾矿库运行期间, 若发生泄漏事故, 则可能对地下水造成严重污染, 但污染物 30 年运移距离接近下游最近村庄距离 1.5 km。服务期满后, 污染现象并不

立即消失,持续一段时间后,污染物浓度随时间缓慢减小直至达到该地区的本底浓度。

在尾矿库区建设期,表层将会铺设一层较厚的粘土层。粘土层具有良好的防污染覆盖层,污染物浓度较低,同时库区没有水井,再加上已在各污水排放点及排污水管线设置了防漏措施,将会改善库区及周边地区地下水防污染的条件,尽可能地减少污染物进入地下水系统,在正常工况条件下,项目的实施不会对地下水环境产生明显的影响。

3.2 采矿区地下水环境预测评价

采用与尾矿库相同的水流模型对采矿区地下水环境影响进行预测评价,评价时段为在建设、生产运行和服务期满后的 3 个阶段,针对 I 号和 II 号矿体采矿过程中引起的水位变化及影响范围进行预测,面积为 47.99 km²。

预测结果为建设期水位影响不大;在矿体开采过程中,为保证采矿安全,需要进行疏干排水。可能会影响周边正常农业生产用水,根据其抽水试验降深 4 m 影响半径计算,矿体开采造成的影响范围约为 0.21 km²,地下水位标高为 140~170 m,只是改变了地下水径流方向,未形成明显的降落漏斗;地上开采服务期满地表矿体开采后将转入地下矿体开采,矿体周边第四纪含水层采用防渗隔水处理,而含水层底板为富水性较弱的岩浆岩基岩,上下层之间水力联系并不密切,因此地下开采对南部和中部的第四纪含水层影响不大,由于上游地下水补给的减少,水位未能恢复到采矿之前的高度,仍会在一定程度上影响到周边居民正常生活用水和农业生产。

4 地下水环境保护措施

4.1 尾矿库污染治理措施

认真检查维护可能产生跑、冒、滴、漏等现象的尾矿库排水管、排水管与斜槽交汇处设置的跌水井过渡;严格按照有关技术规范和要求,加强尾矿区防渗工作。结合尾矿区含水层系统和地下水径流系统特征,考虑潜在污染源、模型模拟预测结果布置地下水监测点,建立全区地下水监控体系;制定地下水风险事故应急响应预案,明确风险事故状态下应采取的封闭、截留等措施。

4.2 采矿区治理措施

在 II 号矿体北部建筑拦截坝,改变上裕小河流

经方向,引导其流经 I 号矿体与 II 号矿体之间低洼处,继续汇入水库。在矿体开采过程中,针对未被探明的导水构造及时用高标号水泥浆对岩体进行灌浆浇筑,并检查封孔质量。处理后的矿区部分排水用作农田灌溉,同时作为浅层地下水补源。及时对采矿坑进行回填等措施,尽量减少对地质、地貌和植被的破坏。定期监测地下水动态变化,完善地下水动态监测网。

5 结语

(1)通过对山东沂水铁矿进行详细水文地质勘察,将对铁矿尾矿库区及采矿区水文地质条件进行概化,并利用 Modflow 和 MT3D 软件分别建立了地下水数值模拟模型。

(2)通过模型运移,得出尾矿库区及采矿区地下水环境影响预测结果:矿山建设阶段和运行阶段正常情况下尾矿区水位水质变化对地下水环境没有明显的影响,不会导致漏斗、污染等环境水文地质问题。非正常情况或者事故状态下,预测污染因子在泄漏点附近一定范围出现超标现象,但采取定期监测、应急响应、布设截渗井进行抽水、及时监测水质变化等环保措施后,随地下水的不断更新、污染源的源头控制,可以把超标范围控制到污染源小范围地区,跋山水库的供水水质不会受到污染。

采矿区矿井排水对当地浅层地下水位的影响较大,由于项目建设之前采取居民搬迁的措施,不存在生活用水问题,但在矿区开采中和转入地下开采后,将影响到周边农业生产和绿植覆盖,影响范围 0.21 km²,跋山水库供水量不会受到影响。

参考文献:

- [1] 孙纳正. 地下水水质的数学模拟[J]. 水文地质工程地质, 1983, (6): 1-6.
- [2] 董志高, 黄勇. 地下水动态预测模型综述[J]. 西部探矿工程, 2002, (4): 36-39.
- [3] 孙纳正. 地下水污染——数学模型和数学方法[M]. 北京: 地质出版社, 1998: 66-69.
- [4] 陈武, 艾俊哲, 李凡修, 等. 地下水水质综合评价方法探讨[J]. 地下水, 2002, (2): 74-75.
- [5] 王庆永, 贾忠华. 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.

Application of Numerical Simulation in Groundwater Environmental Impact Assessment in Iron Mining Area

ZHOU Xiaoxue, FU Jiani, LIU Jianxia, SUN Jianming

(Qingdao Geo - engineering Exploration Institute, Shandong Qingdao 266071, China)

Abstract: Application of numerical simulation of groundwater is seldom used in environmental impact assessment of groundwater in mining area. Through detailed investigation of hydrogeology in Yishui iron mine in Shandong province, groundwater flow and water quality mathematical model of tailings and mining area have been established, and some possible direct and indirect harms to groundwater environment have been predicted and evaluated in the process of mine construction. It is regarded that under the normal circumstances of mine construction period and the operational period, water level and water quality in tail mine have no significant effects to groundwater environment. Under the circumstances of abnormal conditions or under accident conditions, it is predicated that contamination factors will exceed the standard in some areas near leaking points, while drainage in mining areas has significant effects to local shallow groundwater level. Pointing to these impacts and dangers, some corresponding control measures have been put forward to provide a scientific basis for location decisions, engineering design and environmental management of Yishui iron deposit construction project.

Key words: Numerical simulation; iron deposit; groundwater; environmental impact assessment