

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2017.02.08

徐州东部废弃矿井地下水流场演化模拟研究

潘 玥¹, 刘 勇², 曾献奎¹, 吴吉春¹

(1. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210023;

2. 中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116)

摘要:以徐州东部废弃矿井为例, 太原组灰岩含水层为研究对象, 通过建立废弃矿井地区地下水流系统模型, 运用数值模拟技术对区域地下水流场演变过程进行研究, 揭示矿井废弃地区地下水流场演化的一般规律: 煤矿关闭前, 为满足生产生活需要, 矿井进行大量排水、抽水工作, 矿区形成若干降落漏斗, 如位于矿区西部的青山泉煤矿和北部的韩桥煤矿内均存在大面积降落漏斗, 中心水位低于 -25 m。受水力梯度影响, 地下水向低洼的矿坑处汇集, 原生地下水流系统遭到破坏。矿井闭坑后, 原有排水系统全部停止工作, 地下水位缓慢回升, 降落漏斗逐渐减小, 根据模型模拟结果, 发现水位回升速度随矿井关闭时间的增加而减慢: 在矿井关闭第 1 年内, 水位回升速度较大, 为 1.14 m/a; 关闭第 3 年时, 水位回升速度减少至 0.165 m/a; 矿井关闭 10 年时, 地下水最高水位为 -16.55 m, 从关闭第 3 年至第 10 年的 7 年时间内, 水位回升速度仅 0.039 m/a, 矿区地下水流系统得到恢复, 模拟区最终形成自北向南的近似稳定的地下水径流场。

关键词: 废弃矿井; GMS; 数值模拟; 预测

中图分类号: P641.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2017)02-0052-05

Numerical simulation of groundwater flow field evolution in abandoned mine in the east Xuzhou

PAN Yue¹, LIU Yong², ZENG Xiankui¹, WU Jichun¹

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210023, China;

2. School of Resources and Earth Sciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: Based on the study of the abandoned mine in the east of Xuzhou, the evolution of Taiyuan Formation Aquifer groundwater movement has been detected through the establishment of groundwater system model in abandoned mine area and the study of the evolution of regional groundwater dynamic field using numerical simulation technology. It can be seemed that before the coal mine closed it has to drain away a lot of groundwater for the use of living and producing. So in the diggings there are various cones of depression, such as Qingshanquan coal mine and Hanqiao coal mine whose groundwater levels are below minus 25 meters in the cone centers. After the mine closed, all the drainage systems stopped and the groundwater level rises slowly, as well as the scope of depression cones. The rate of the level raising has become more and more slowly since the mine closed according to the simulation. In the first year after the mine closed, the rate will be 1.14 meters per year. Two years later, the rate will drop to 0.165 meters per year. By the time the mine has been closed for 10 years, the top groundwater level will have reached minus 16.55 meters while the rate will have decreased to 0.039 meters per year. Groundwater system of the coal mine will regain to a stable flow field which is the north to the south.

Keywords: abandoned mine; Groundwater Modeling System; numerical simulation; prediction

收稿日期: 2016-10-08; 修订日期: 2017-01-08

基金项目: 地下水流数值模拟概念模型的不确定性分析(41302181); 水利部科技推广计划项目“徐州矿井废水综合生态治理示范技术”(TG1517); 江苏省水利科技项目“徐州矿井水综合生态治理技术及开发利用模式研究与应用”(2014052)

第一作者: 潘玥(1994-), 女, 硕士研究生, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: Joy_py@foxmail.com

采矿过程中,开采扰动改变了矿区原生地下水系统,影响地下水补径排关系,即便是矿井废弃后,之前造成的含水介质的变化,地下水动力场、水循环系统的演化等还在持续作用。目前越来越多的矿区由于煤炭资源趋于枯竭而关闭,废弃矿井对矿区地下水系统产生的影响已不容忽视^[1]。

徐州东部矿区经过一百多年开采^[2],至2016年,区内煤矿已经全部关闭,当地经济也由能源开采转为发展生态旅游与生态农业。截止2012年,徐州东部矿区造成的工矿废弃土地面积超过 $2\,400 \times 10^4 \text{ m}^2$,其中塌陷废弃地超过 $334 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。废弃矿井造成的地下水动力条件改变及其引发的地下水污染对环境的影响较大,一旦污染范围扩大至居民饮用水及农田灌溉水水源地,后果不堪设想。通常情况下,污染物在含水层中的运移扩散以地下水流场为基础,因此,研究废弃矿井地下水流场及其演化规律,对保护地下水环境,促进当地经济发展具有十分重要的意义。

针对煤炭开发引起开采区地下水资源的变化等问题,国内外研究人员已做了大量工作。20世纪80年代初,以Brodie为首的科学家以煤矿开采区地下水水质及水量为主要研究对象,率先提出“水文地质效应”一词^[3]。Prasad等对矿区附近地下水环境质量及重金属污染物指标进行研究^[4]。Banks等对波兰Siersza矿区内废弃矿井水位回弹进行监测,建立了矿井基于水位变化的变体积矿坑充水模型(MIFIM),成功预测了废弃矿井内第一次水位回弹出现的时间与预期水位,发现在改变矿区地下水系统后污染现象会更加严重,增加治理难度^[5]。20世纪90年代,韩宝平等以重庆市南桐矿区为研究对象,系统地研究了地下采矿工程引发的水文地质效应^[6]。虎维岳等对废弃矿井水位回弹诱致环境与安全灾害展开分析,在研究了废弃矿井地下水运移介质场结构特征、地下水循环运动特征,水动力场特征的基础上,指出了现阶段对于已关闭矿井的水资源及地质灾害问题上面临的种种问题^[7]。

徐州东部矿区地下水多为承压性碳酸盐岩裂隙岩溶水,目前常用的地下水系统研究方法主要有Tank模型、裂隙模型、多孔介质模型、等效多孔介质—管道模型等^[8]。考虑到研究区水文地质资料有限,根据已有资料分析,结合现阶段常用处理方法^[9],将研究区域碳酸盐岩裂隙采用等效多孔介质处理。相较一般地区而言,矿井废弃地具有更复杂的水文地质条件。本文根据矿区地下水运动规律,综合废弃矿井内含水介质的特殊性、地下水流场边界条件及地下水的动态平衡

等条件,建立适合徐州东部废弃矿井的水文地质概念模型,将太原组灰岩含水层作为目的含水层,结合区域水文地质特征,模拟整个徐州东部废弃矿井地下水流场的变化,为下阶段废弃矿井地下水流系统的数值模拟研究工作提供参考。

1 研究区概况

研究区为贾汪复式向斜盆地构造,总体地势起伏为北西侧隆起、南东部拗陷。贾汪盆地三面环山,向南面敞开,降水通过裸露基岩的空隙入渗,研究区被各种隔水断裂划分为不同的地质单元。在纵向上,平原区第四系松散含水层厚度较小,含少量孔隙水,下部地层以灰岩为主,含岩溶水。

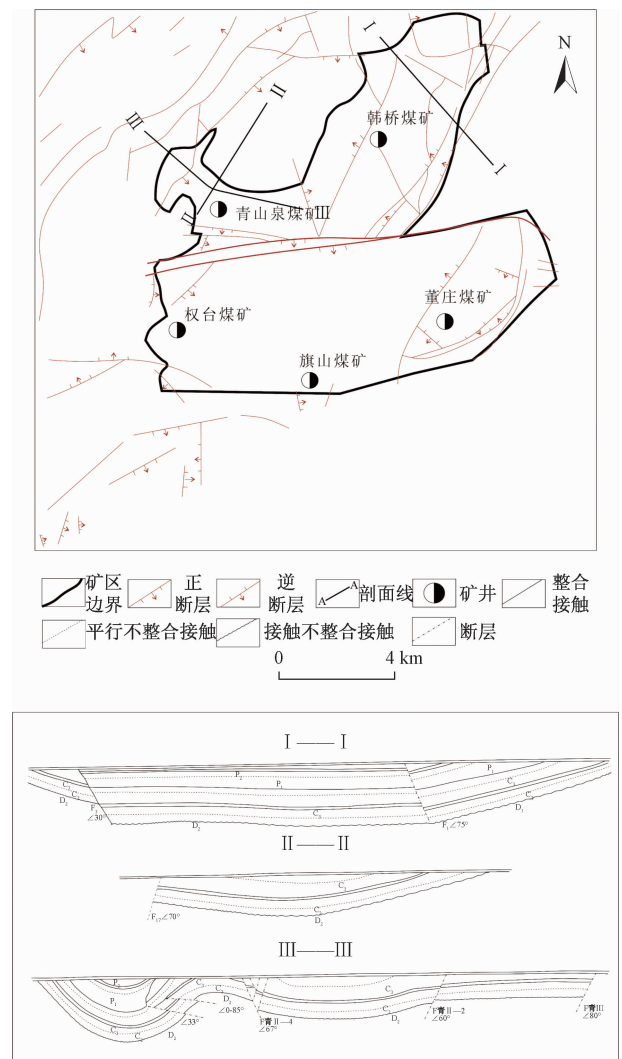


图1 贾汪矿区平面范围图及剖面图

Fig. 1 The layout and section of Jiawang diggings

石炭系太原组灰岩含水层上部为二叠系砂岩、页岩隔水层组,下部为本溪组页岩夹灰岩隔水层,因此可

以将含水层的上下两个地层概化为隔水层,太原组与上部第四系、下部奥陶系均无水力联系,仅在基岩露头处接受降水补给。故垂向上仅需考虑太原组灰岩含水层,其上下的二叠系砂岩含水层及本溪组、奥陶系含水层均不做考虑。

2 研究区地下水动力场演化模拟

2.1 模型概化

研究区实际水文地质条件较为复杂,区内断层、褶皱地层露头较多,将整个矿区划分为不同的水文地质单元,在实际条件的基础上对研究区目的含水层、边界条件进行简化,得到区域水文地质概念模型,见图 2。

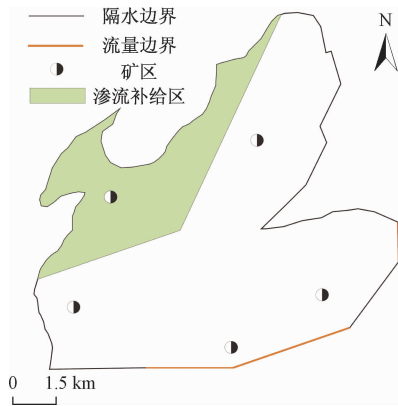


图 2 研究区边界条件概化

Fig. 2 Generalization of boundary conditions

北部边界:研究区北部的 F46、F21、F2 等断层均为隔水断裂带,可视为隔水边界。

南部边界:研究区南部为贾汪矿区的排泄区,但被断层切割,故将中间部分处理为流量边界,模拟初始值设为 $25\ 000\ \text{m}^3/\text{d}$ 。

西部边界:研究区西部以大庙复试背斜核部地层碎屑岩作为分水岭,处理为隔水边界。

东部边界:研究区东部偏北断层交错,有不少季节性泉出露,将此处概化为流量边界,模拟初始值为 $11\ 000\ \text{m}^3/\text{d}$ 。

研究区边界大多概化为隔水边界,仅在东部、南部小部分地区按照流量边界考虑。

渗流区仅为太灰水,与上部二叠系砂岩含水层及下部奥灰水之间均无水力联系,在基岩出露部位接受大气降水补给,故建立的模型为单层含水介质模型。研究区多年平均降水量为 $0.001\ 7\ \text{m}/\text{d}$,入渗补给率为 0.13 。在研究区内矿井闭坑前,日平均涌水总量

$12\ 250\ \text{m}^3$,渗流区概化为均质各向同性,根据研究资料,渗透系数平均值取 $8\ \text{m}/\text{d}$ ^[9]。由于资料有限,为简化模型,将涌水量分配到研究区西部与北部的青山泉矿井与韩桥矿井。

2.2 数学模型

不考虑地下水密度变化,根据研究区含水层及边界条件的概化,矿区地下水可概化为二维、各向同性、非均质、非稳定、承压含水系统^[10],建立地下水流动数学模型:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(KM \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(KM \frac{\partial H}{\partial y} \right) + W - P &= \mu^* \frac{\partial H}{\partial t} & (x, y) \in \Omega \\ H(x, y, 0) &= H_0(x, y) & (x, y) \in \Omega \\ KM \frac{\partial H}{\partial n} \Big|_{S_s} &= q_1(x, y, t) & (x, y) \in S_s \\ KM \frac{\partial H}{\partial n} \Big|_{S_e} &= q_2(x, y, t) & (x, y) \in S_e \\ K \frac{\partial H}{\partial n} \Big|_{S_{nw}} &= 0 & (x, y) \in S_{nw} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: K ——渗透系数;

H ——含水层水头;

W ——垂向补给量;

P ——抽水量;

μ^* ——贮水率;

t ——时间;

Ω ——渗流区;

$q(x, y, t)$ ——流量函数;

M ——含水层厚度;

S_s ——南部边界;

S_e ——东部边界;

S_{nw} ——北部与西部边界。

模拟地下水动态演化的方法主要为随机性模型和确定性模型两类^[11~12]。本文选用确定性模型模拟徐州东部废弃矿井地下水动力场演化规律,通过达西渗流定律为基础建立地下水渗流方程,以地下水模拟系统软件(GMS)的 MODFLOW 计算模块建立水动力场模型。

2.3 模型的验证

使用 GMS^[13] 软件对研究区地下水系统数学模型进行处理分析,运行 MODFLOW 模块,将矿区闭坑时间设为初始时间,得到徐州东部矿区在矿井闭坑时的初始流场图。

从初始流场图中可以清晰看出徐州东部矿区地下

水流场大致呈现从西北部流向东南部的趋势,且西北部水位高于东南部水位。青山泉与韩桥煤矿内两口抽水井造成了地下水位内两个突出的降落漏斗,遵循达

西定律,地下水向矿坑低洼处汇集。由于矿井前期排水导致全区在闭坑时水位较低,最高处仅 -18.29 m ,最大水位落差超过 27 m 。

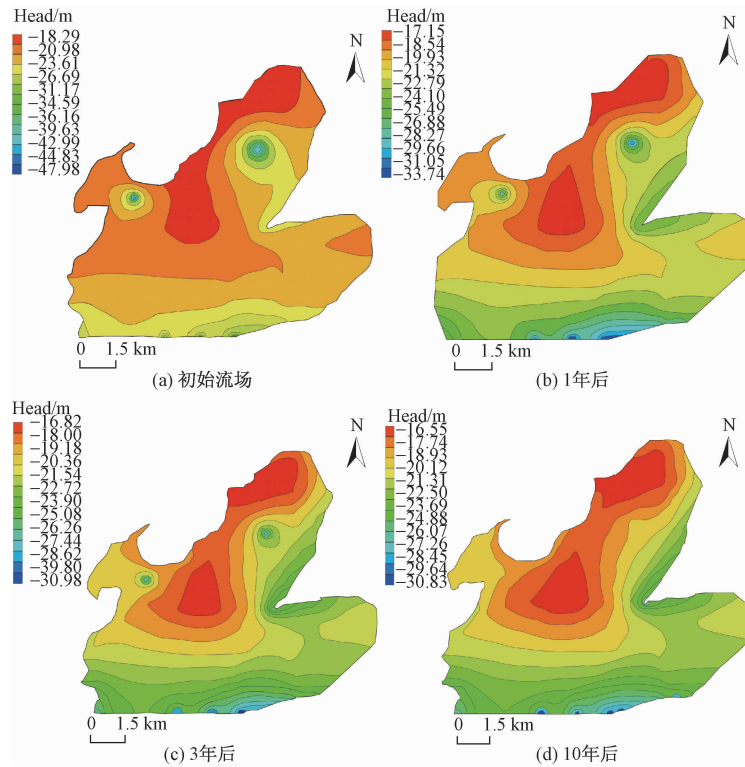


图 3 研究区初始流场及 1 年后、3 年后和 10 年后地下水流场预测图

Fig.3 Initial groundwater flow field of research area and prediction of groundwater flow field 1 year, 3 years and 10 years later

通过验证期观测井水位实测值与模拟值拟合结果(图 4)可以看出该模型拟合状况较好,基本符合地下水水位的变化趋势。实际水位受多种外界因素影响而产生波动,如气象水文因素,7 月左右为研究区汛期,降水量增加导致入渗补给增加,水位出现一个短暂的上升。而在建模过程中受资料限制将研究区补给概化为每个月补给量相差不多,符合误差范围。通过模拟流场图可以看出地下水流场符合实际情况,证明识别后的水文地质参数基本符合研究区实际情况。

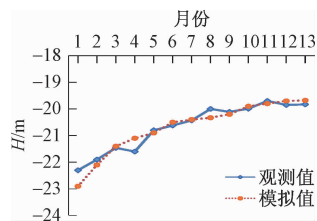


图 4 观测孔水位拟合结果

Fig.4 The groundwater level fitting result of the observation well

3 模拟结果与分析

受研究区气象、水文地质资料限制,对模型进行简化。假定矿井闭坑后,位于青山泉及韩桥煤矿的抽水井即停止工作,边界条件在模拟期内保持不变,年均降水量 0.0017 m/d ,入渗补给率为 0.13 ,渗流区假设为均质各向同性,渗透系数 8 m/d ,模拟研究区矿井闭坑 1 年、3 年、10 年的地下水流场分布(图 3)。

对比研究区矿井闭坑后 1 年、3 年、10 年的流场图发现,随着模拟时间的推移,模拟初期水位回升较快,平均每年上升 1.14 m ,区域内最大水位落差减小至 17 m 左右。1 年至 3 年模拟期时,水位回升速度明显减慢,仅 0.165 m/a ,矿区地下水最大水位落差约 14 m 。在后期 3 年至 10 年模拟期内水位回升速度大幅度减小,7 年时间内仅回升 0.27 m ,平均速度为 0.039 m/a ,最大水位落差不足 13 m 。很明显,随着矿井关闭时间的增加,地下水水位回升速度不断减慢,至矿井关闭 10 年后,整个研究区流场趋于稳定。同时,流场演变图清晰显示了位

于青山泉及韩桥煤矿的地下水位降落漏斗的范围在不断减小,漏斗中心的水位也在不断回升。至 10 年模拟期,研究区最高水位抬升至 -16.55 m ,天然情况下区域地下水水流场受四周边界及断层控制,形成研究区由北部向南部径流的近似稳定地下水水流场。

4 结论

(1)在煤矿开采时期由于矿井排水、抽水等过程,在矿区形成了若干个降落漏斗,地下水向低洼的矿坑处汇流,全区最高水位仅 -18.29 m ,最大水位落差超过 27 m ,矿井开采改变了地下水系统的天然流场。

(2)煤矿关闭后,降落漏斗不断减小,水位不断抬升,闭坑初期水位上涨较快,水位回升速度约 1.14 m/a ;闭坑后 3 年至 10 年模拟期内水位上涨幅度不断减小,水位回升速度减小至 0.165 m/a ;至 10 年模拟期,水位回升速度仅为 0.039 m/a ,地下水位基本稳定。区域最高水位相比较开采时上涨了 2 m 左右,位于青山泉及韩桥煤矿内的降落漏斗基本消失,研究区形成了自北向南的稳定径流场。

参考文献:

- [1] 冯美生. 废弃煤矿对地下水污染研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2006. [FENG M S. The study on groundwater pollution in abandon coal mine[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2006. (in Chinese)]
- [2] 吴迪, 赵华, 李钢. 江苏省徐州市工矿废弃地复垦潜力评价研究[J]. 中国煤炭, 2013, 39(8): 119 - 123. [WU D, ZHAO H, LI G.. Reclamation potentiality evaluation of industrial and mining wasteland in Xuzhou[J]. China Coal, 2013, 39(8): 119 - 123. (in Chinese)]
- [3] Brodie G A, Britt C R, Tomaszewski T M. Anoxic limestone drains to enhance performance of aerobic acid drainage treatment wetlands[J]. Environmental Pollution. 1997(1):115 - 122.
- [4] Prasad B, Kumari P, Bano S, *et al.* Ground water quality evaluation near mining area and development of heavy metal pollution index [J]. Applied Water Science. 2014(4):11 - 17.
- [5] Banks D, Frolik A, Gzyl G, *et al.* Modeling and monitoring of mine water rebound in an abandoned coal mine complex; Siersza Mine, Upper Silesian Coal Basin, Poland[J]. Hydrogeology Journal, 2010, 18 (2): 519 - 534.
- [6] 韩宝平, 郑世书. 煤矿开采诱发的水文地质效应研究[J]. 中国矿业大学学报, 1994, 9(3): 70 - 77. [HAN B P, ZHENG S S. Study on the hydrogeological effect induced by coal mining [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 1994, 9(3): 70 - 77. (in Chinese)]
- [7] 虎维岳, 闫兰英. 废弃矿井地下水污染特征及防治技术[J]. 煤矿环境保护, 2000, 14(4): 37 - 38. [HU W Y, YAN L Y. Characteristics of groundwater pollution in abandon coal mine and control technique [J]. Coal Mine Environmental Protection, 2000, 14 (4): 37 - 38. (in Chinese)]
- [8] 常勇, 刘玲. 岩溶地区水文模型综述[J]. 工程勘察, 2015(3): 37 - 44. [CHANG Y, LIU L. Review of karst hydrological models [J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2015(3): 37 - 44. (in Chinese)]
- [9] 吴吉春, 曾献奎. 废弃矿井地下水污染数值模拟[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2015: 48 - 49. [WU J C, ZENG X K. Numerical simulation of groundwater pollution in abandoned mine [M]. Beijing: China Water and Power Press, 2015: 48 - 49. (in Chinese)]
- [10] 吴乐, 张有全, 宫辉力, 等. 北京市西山地区地下水数值模拟及预测[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(3): 29 - 36. [WU L, ZHANG Y Q, GONG H L, *et al.* Numerical simulation of groundwater flow for Xishan area in Beijing [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(3): 29 - 36. (in Chinese)]
- [11] 王书功, 康尔泗, 李新. 分布式水文模型的进展及展望[J]. 冰川冻土, 2004, 26(1): 61 - 65. [WANG S G, KANG E S, LI X. Progress and prospect of distributed hydrological model[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(1): 61 - 65. (in Chinese)]
- [12] Wigmosta M S, Vail L W, Lettenmaier D P. A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain [J]. Water Resources Research, 1994, 30 (6): 1665 - 1679.
- [13] 徐永亮, 于静洁, 张一驰, 等. 生态输水期间额济纳绿洲区地下水动态数值模拟[J]. 水文地质工程地质, 2014, 14(4): 11 - 18. [XU Y L, YU J J, ZHANG Y C, *et al.* Groundwater dynamic numerical simulation in the Ejina Oasis in an ecological water conveyance period[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 14(4): 11 - 18. (in Chinese)]