

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2016.06.007

复杂断层矿区地下水三维数值模拟

朱 君¹, 安瑞瑞²

(1. 中国辐射防护研究院, 山西 太原 030006; 2. 山西晋环科源环境资源科技有限公司, 山西 太原 030024)

摘要: 为了提高复杂断层矿区地下水数值模拟结果的准确度, 以内蒙古某矿区错综分布的 10 条倾斜断层为研究对象, 采用 FEFLOW 软件将倾斜断层简化处理为垂直透水断层, 建立复杂断层矿区地下水三维数值模型, 并预测了矿区开采 30 年后对上覆各含水层的破坏程度。结果表明: 二叠系山西组砂岩裂隙含水层受开采直接影响, 最大降深约 150.23 m; 上覆二叠系石盒子组砂岩裂隙含水层和新近系砂砾石含水层无稳定隔水层, 水位差的加剧导致越流量增加, 最大降深约 23 m; 第四系松散孔隙含水层由于下部完整且较厚的黏土层, 基本上不受影响。对断层的有效概化有助于提高数值模型的仿真性和结果的精准度。

关键词: 复杂断层矿区; FEFLOW; 地下水数值模拟

中图分类号: P641 文献标志码: A 文章编号: 1004-6933(2016)06-0045-06

Three-dimensional numerical simulation of groundwater in mining areas with complex faults

ZHU Jun¹, AN Ruirui²

(1. China Institute for Radiation Protection, Taiyuan 030006, China;

2. Jinhuankeyuan Environmental Resources Technology Company, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of results of numerical simulation of groundwater in mining areas with complex faults, we conducted a case study in a mining area in Inner Mongolia, where ten inclined faults were intricately distributed. We used the FEFLOW software to simplify the inclined faults as vertical permeable faults, and established a three-dimensional numerical model of groundwater in the mining area with complex faults. Using the model, we predicted the destruction of the overlying aquifers in the mining area after 30 years. The results show that the drawdown of the Permian Shanxi formation aquifer, affected by exploitation, was about 150.23 m. The drawdown of the Permian Shihezi formation aquifer and the Neogene aquifer was about 23 m, which was because the water level difference intensified, leading to the increase of flow, and there was no steady aquifuge. The quaternary loose rock pore aquifer was not affected due to the integrated and thick clay layer. The study shows that effective generalization of faults is helpful to improve the accuracy of numerical simulation and its results.

Key words: mining areas with complex faults; FEFLOW; groundwater numerical simulation

随着地下水数值模拟技术的发展, 应用该技术反映矿区地下水动态变化已是目前最常用的方法, 国际上通用的商业软件有 Visual Modflow、GMS、FEMWATER、FEFLOW 等。如何提高数值模拟的精准度使之更加符合实际情况是亟待解决的问题。矿区断层构造复杂, 有的区域甚至纵横交错, 断层的概化和处理成为影响模拟结果的一个重要因素。目前, 国内在地下水数值模拟中能概化三维断层并应

用到模型中的实例很少, 普遍的做法是将断层两侧地层的渗透系数分区取值, 或者与相邻含水层视为一个系统。而考虑断层因素的情况也是应用 Visual Modflow、GMS 针对单断层的简单构造区, Visual Modflow 和 GMS 采用有限差分法, 缺点是网格剖分方向必须与断层走向一致, 见图 1 中的 Fa、Fb; 否则概化断层的网格呈“锯齿”状, 见图 1 中的 Fc, 影响计算结果的收敛性和精度, 显然在复杂断层区域采

用有限差分法已无法满足精度要求^[1-5]。FEMWATER 和 FEFLOW 采用有限节点法,能够消除“锯齿”状网格的不利影响,更好地描述复杂的断层构造,模拟计算结果更加真实^[6-8]。国外应用 FEFLOW 在地下水模型中对复杂断层的概化已经能够做得非常精准,因此国内亟须弥补差距^[9-13]。本文以内蒙古某煤矿内的 10 条断层为例,建立复杂断层区的地下水三维数值模型。

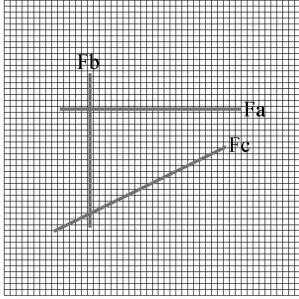


图 1 有限差分法断层概化示意图

1 研究区概况

1.1 基本情况

研究矿区位于内蒙古自治区与宁夏回族自治区交界处,属于华北地台、鄂尔多斯盆地西缘褶皱冲断带的北段,即贺兰山—横山段。褶皱、断裂较发育,褶皱轴向及主要断裂多呈近南北向展布,其次为北东—北东东向断裂及北西向断裂。总体构造形态为受断层切割的单斜,地层总体东倾,走向近南北,在单斜基础上发育次级褶曲和少量断层。

1.2 构造特征

矿区内共有 10 条断层,其中逆断层 6 条(F1、F2、F3、F5、F6、F8),正断层 4 条(F4、F7、F9、F10),均属于倾斜断层,错断了新近系以下地层,断层特征见表 1。

表 1 断层特征

断层	性质	走向	倾向	倾角/(°)	延展长度/m
F1	逆	NNE	E	70~75	1000
F2	逆	NNE	E	70	3500
F3	逆	NNW	E	70~75	4000
F4	正	近 EW	N	70	2300
F5	逆	NNW	E	70	1300
F6	逆	NW	NE	70	2500
F7	正	NE	NW	70~75	1300
F8	逆	NNW	NE	70	900
F9	正	NW	SW	70	1400
F10	正	NE	SE	70	800

1.3 水文地质条件

矿区开采煤层位于二叠系山西组,上覆含水层从上至下为第四系松散孔隙含水层,厚 2.05 ~ 59.50 m,主要以大气降水补给,受下伏新近系黏土

隔水层控制,厚度 82.60 ~ 397.32 m,由东北向西南径流。新近系下部砂砾石层含水层,厚度 5.45 ~ 60.48 m,平均厚 19.78 m,孔隙发育,透水性好,为该地区富水性最佳的含水层,主要接受区域侧向补给,由西北向东南径流。二叠系石盒子组砂岩裂隙含水层,厚 128.06 ~ 638.76 m,主要接受上覆新近系砂砾石层含水层补给,由西北向东南径流。二叠系山西组砂岩裂隙含水层,厚 24.42 ~ 121.69 m,主要接受上覆新近系砂砾石层含水层越流补给和二叠系石盒子组砂岩裂隙含水层直接补给,由西北向东南径流。因此二叠系砂岩裂隙含水层与新近系砂砾石层含水层地下水有着相同的变化规律。

2 地下水数值模拟

2.1 模拟区及边界条件

模型的东边界(AB 段),以葱沟断层为界,概化为流量边界。模型的北边界(AD 段)、南边界(BC 段),大致以地下水流线为界,概化为流量边界。模型的西边界(CD 段),以已知水头为界,概化为定水头边界。模拟区面积约 130 km²,基本概况见图 2。

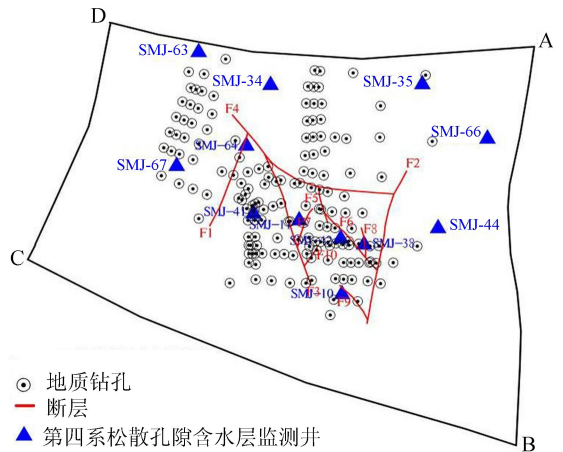


图 2 模拟区基本概况示意图

2.2 目标含水层概化

开采煤层上覆 4 含水层,分别为第四系松散孔隙含水层、新近系砂砾石含水层、二叠系石盒子组砂岩裂隙含水层和二叠系山西组砂岩裂隙含水层。另外第四系松散孔隙含水层与新近系砂砾石含水层之间有 82.60 ~ 397.32 m 的黏土层,可视为弱透水系,因此整个模拟区自上而下划分为 5 层(表 2)。

表 2 目标含水层概化情况

地层	概化层
第四系(Q)	松散孔隙含水层
新近系(N ₂)	弱透水系
	砂砾石含水层
二叠系石盒子组(P _{sh})	砂岩裂隙含水层
二叠系山西组(P _{1s})	砂岩裂隙含水层

2.3 断层概化

矿区内的 10 条断层均属于倾斜断层, 倾角在 $70^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 之间, 纵横交错, 较为复杂, 故将倾斜断层处理为垂直断层。空间离散时, 垂向上分为 5 层, 断层处网格加密, 共生成三角网格 370 060 个, 节点 217 537 个。网络剖分示意图见图 3, 断层概化三维示意图见图 4。

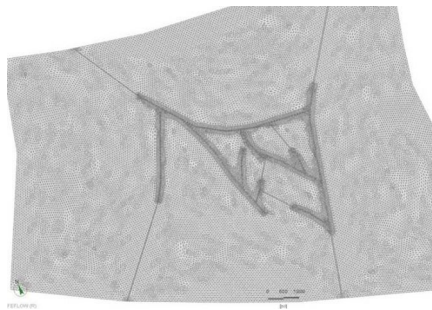


图 3 网格剖分示意图

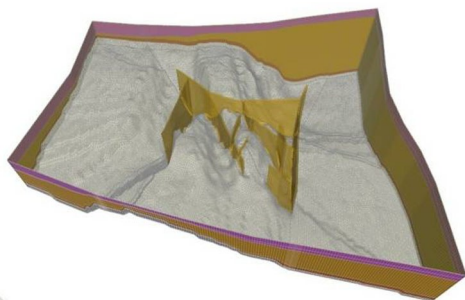


图 4 断层概化三维示意图

2.4 水文地质参数

水文地质参数的取值, 包括含水层、弱透水层、断层 x, y, z 方向的主渗透系数 K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} 、弹性释水系数 S_y 、单位贮存量 S_s 。渗透系数的取值主要是参考矿区及相邻矿区的抽水试验资料, 抽水历时曲线见图 5, 图中 S 为水位降深, Q 为流量, 得到第四系松散孔隙含水层、新近系砂砾石含水层、二叠系石盒子组砂岩裂隙含水层、二叠系山西组砂岩裂隙含水层水平方向的渗透系数 K_{xx}, K_{yy} , 垂直方向的渗透系数 K_{zz} 一般为水平方向渗透系数的 $1/10^{[9-12]}$ 。另外, 根据矿区《水文地质勘查成果报告》, 断层透水, 渗透系数约为相邻含水层的 10 倍, 经模型校核后确定该参数取值。弹性释水系数 S_y 、单位贮存量 S_s 主要取经验值。另外, 第四系松散孔隙含水层根据水文地质参数不同分为 A、B 2 个区。具体取值情况见图 6 和表 3。

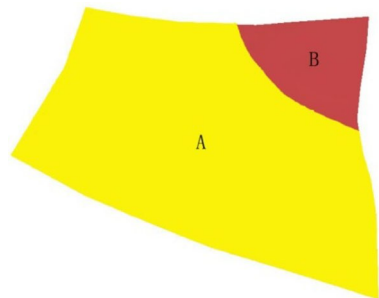


图 6 第四系松散孔隙含水层水文地质参数分区

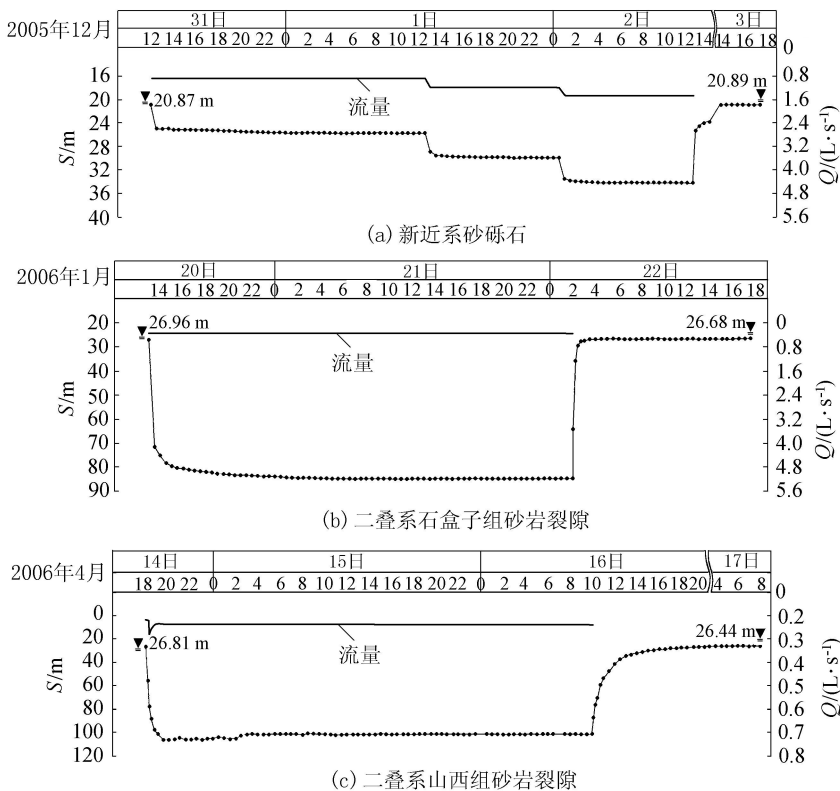


图 5 各含水层抽水历时曲线

表3 水文地质参数取值

地层	概化层	分区	$K_{xx}/(m \cdot d^{-1})$	$K_{yy}/(m \cdot d^{-1})$	$K_{zz}/(m \cdot d^{-1})$	S_y	S_g/m^{-1}
Q	松散孔隙含水层	A	6.5	6.5	0.65	0.18	0.00013
		B	10.89	10.89	1.089	0.25	0.00049
N ₂	弱透水层		8.64×10^{-6}	8.64×10^{-6}	8.64×10^{-7}	0.0008	2.6×10^{-5}
	砂砾石含水层		2.3272	2.3272	0.2372	0.35	0.001
P _{sh}	砂岩裂隙含水层		0.0034	0.0034	0.00034	0.02	6.9×10^{-5}
	断层		0.034	0.034	0.034	0.02	6.9×10^{-5}
P _{1s}	砂岩裂隙含水层		0.00373	0.00373	0.000373	0.03	6.9×10^{-5}
	断层		0.0373	0.0373	0.0373	0.03	6.9×10^{-5}

2.5 模型识别与验证

模拟区内共有12个第四系松散孔隙含水层地下水水位监测点,其位置分布见图2。在2014年8月—2015年3月的一个连续水文年对该含水层的水位进行了监测,具体监测值见表4,从监测结果分析,在一个连续水文年中,所有点位水位变化幅度在0.56~0.61m,可视为稳定流,将3期水位的平均值作为模型校核资料。

表4 第四系松散孔隙含水层水位监测值 m

编号	含水层水位			平均值
	丰水期 (2014-08-15)	枯水期 (2014-11-15)	平水期 (2015-03-15)	
SMJ-10	1226.76	1226.19	1226.47	1226.47
SMJ-11	1218.80	1218.23	1218.52	1218.52
SMJ-34	1218.26	1217.70	1217.98	1217.98
SMJ-35	1263.92	1263.33	1263.62	1263.62
SMJ-38	1231.49	1230.92	1231.20	1231.20
SMJ-41	1215.12	1214.53	1214.82	1214.82
SMJ-42	1229.52	1228.93	1229.23	1229.23
SMJ-44	1248.29	1247.71	1248.00	1248.00
SMJ-63	1206.44	1205.85	1206.14	1206.14
SMJ-64	1213.67	1213.06	1213.37	1213.37
SMJ-66	1272.08	1271.51	1271.79	1271.79
SMJ-67	1195.78	1195.18	1195.48	1195.48

模型建立后,对比计算水位与监测水位的吻合程度(图7~8),验证模型的合理性和准确性。在加入疏干排水条件前,以稳定流模式运行模型,计算得到第四系松散孔隙含水层的初始水位分布值。该地区年平均降雨量为270.4mm,降雨入渗系数经过模型验证和校核后取0.12,输入模型的降雨入渗量为32.85mm/d。通过稳定流模型计算得到第四系松

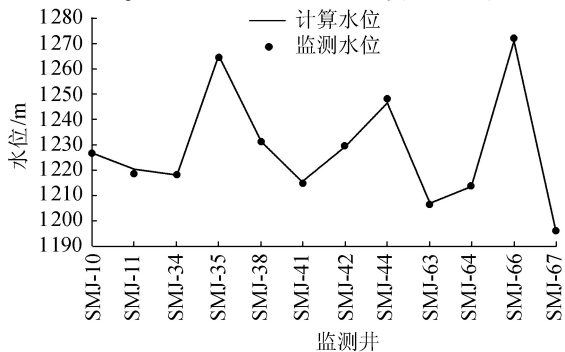


图7 第四系松散孔隙含水层水位拟合线

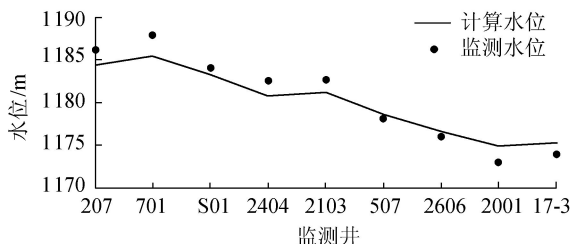


图8 二叠系石盒子组砂岩裂隙含水层水位拟合线

散孔隙含水层初始水位与实际监测水位的偏差范围在0.39~1.83m,其中偏差较大的有3处,分别是SMJ-11为1.69m,SMJ-35为1.83m,SMJ-44为1.74m。其余监测点的偏差均小于0.72m(表5)。

表5 拟合结果 m

编号	监测水位	计算水位	编号	监测水位	计算水位
SMJ-10	1226.47	1226.93	SMJ-42	1229.52	1229.01
SMJ-11	1218.52	1220.21	SMJ-44	1248.29	1246.55
SMJ-34	1217.98	1218.37	SMJ-63	1206.44	1207.06
SMJ-35	1263.62	1265.45	SMJ-64	1213.67	1213.28
SMJ-38	1231.20	1231.66	SMJ-66	1272.08	1271.36
SMJ-41	1215.12	1215.31	SMJ-67	1195.78	1195.61

另外根据《水文地质勘查成果报告》,矿区有9个水文地质钻孔监测过二叠系石盒子组砂岩裂隙含水层水位(表6);2个水文地质钻孔监测过二叠系山西组砂岩裂隙含水层和新近系砂砾石含水层之间的水位关系(表7)。由钻孔ZK2803、ZK2805可知,

表6 二叠系石盒子组砂岩裂隙含水层

监测水位与计算水位 m					
钻孔编号	监测水位	计算水位	钻孔编号	监测水位	计算水位
207	1186.15	1184.37	507	1178.23	1178.56
701	1187.93	1185.42	2606	1176.09	1176.61
S01	1184.03	1183.23	2001	1172.95	1174.87
2404	1182.47	1180.78	17-3	1173.85	1175.22
2103	1182.69	1181.17			

表7 二叠系山西组砂岩裂隙含水层和新近系砂砾石含水层之间的水位关系

钻孔号	地层编号	静止水位埋深/m
ZK2803	E	14.30
	P _{1s}	14.41
ZK2805	E	13.25
	P _{1s}	13.55

新近系砂砾石含水层(E)、二叠系山西组砂岩裂隙含水层(P_{1s})水位相差不大,间接说明新近系砂砾石层含水层以下地层没有稳定隔水层,二叠系石盒子组砂岩裂隙含水层和二叠系山西组砂岩裂隙含水层主要靠新近系砂砾石含水层补给,地下水有着相同的变化规律。

二叠系石盒子组砂岩裂隙含水层初始水位与实际监测水位的偏差范围在 0.33 ~ 2.51 m,根据以上 2 含水层水位拟合程度可知,建立的模型和水文地质参数的取值基本上能够反映实际情况。第四系松散孔隙含水层计算水位等值线图和二叠系石盒子组砂岩裂隙含水层计算水位等值线见图 9 ~ 10。

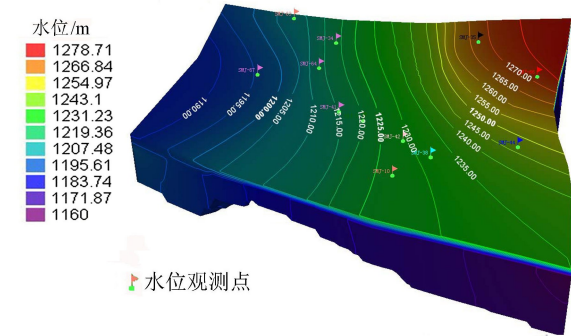


图 9 第四系松散孔隙含水层计算水位等值线

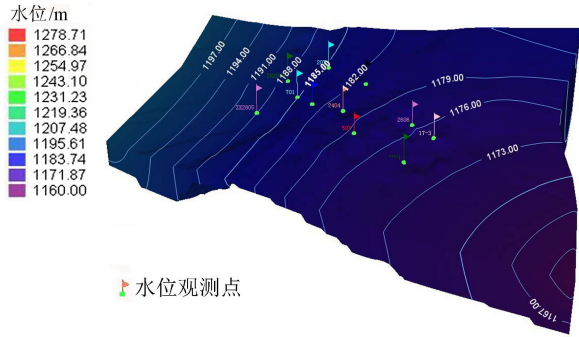


图 10 二叠系石盒子组砂岩裂隙含水层计算水位等值线

2.6 计算结果

根据冒落裂隙带和导水裂隙带计算,在煤层隐伏露头处附近最大高度能导通新近系底部砂砾石含水层,矿区开采后正常涌水量为 13800 m³/d,垂向上地下水速度加剧,将涌水量分采区、分时段输入模型,并以非稳定流模型计算矿区开采 30 年后对地下水资源的影响,得到矿区开采 30 年水位等值线见图 11。预测结果显示,开采后水位变化部分集中在新近系砂砾石含水层及以下区域,第四系松散孔隙含水层的水位等值线基本上没有变化,分析原因是第四系松散孔隙含水层底部有厚度 82.60 ~ 397.32 m 的完整且连续的棕红色黏土层,有效阻隔了地下水的渗漏和越流,对该含水层影响较小。

矿区开采 30 年后,二叠系山西组砂岩裂隙含水

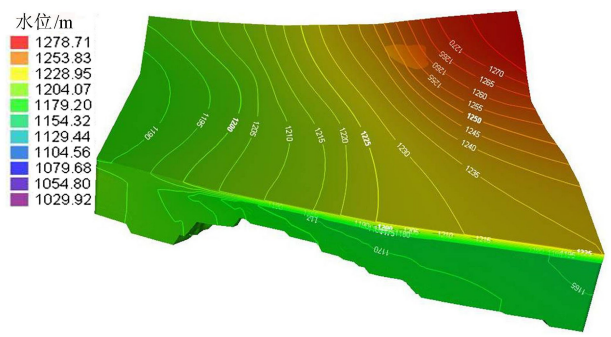


图 11 矿区开采 30 年后水位等值线

层、二叠系石盒子组砂岩裂隙含水层、新近系砂砾石含水层形成以开采区为中心的降落漏斗,最大降深及影响面积详见表 8。分析原因是二叠系山西组煤层开采后,“两带”直接破坏二叠系山西组砂岩裂隙含水层、二叠系石盒子组砂岩裂隙含水层下部以及煤层露头处的新近系底部砂砾石含水层,加大了地下水的渗漏和越流。另外矿区内的 10 条透水断层,形成渗水通道,加剧了上述含水层地下水的下渗。

表 8 含水层水位降深、影响面积

含水层	最大降深/m	影响面积/km ²
新近系砂砾石含水层	24.69	117.32
二叠系石盒子组砂岩裂隙含水层	24.93	117.16
二叠系山西组砂岩裂隙含水层	145.81	62.62

从预测结果来看(图 12 ~ 14),二叠系石盒子组砂岩裂隙含水层与新近系砂砾石含水层的水位及水位降深等值线基本相似。原因是该地区二叠系石盒子组砂岩裂隙含水层主要接受上覆新近系砂砾石层含水层补给,且两含水层之间没有隔水层,因此地下水有着相同的变化规律。

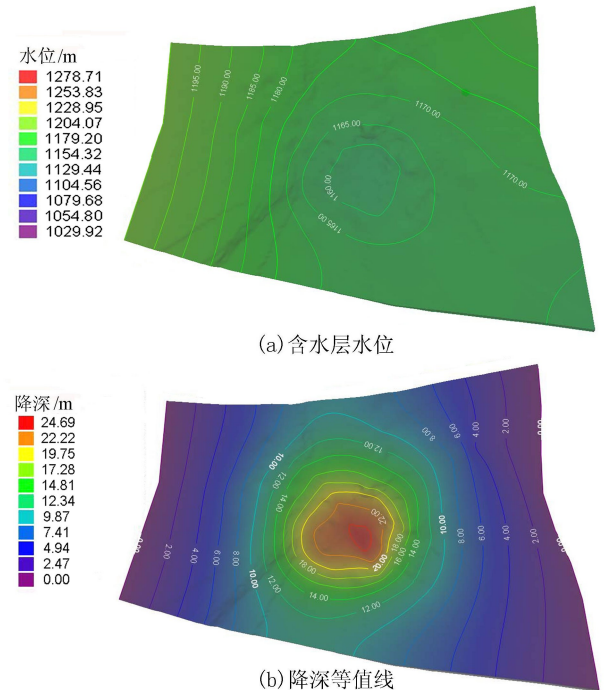
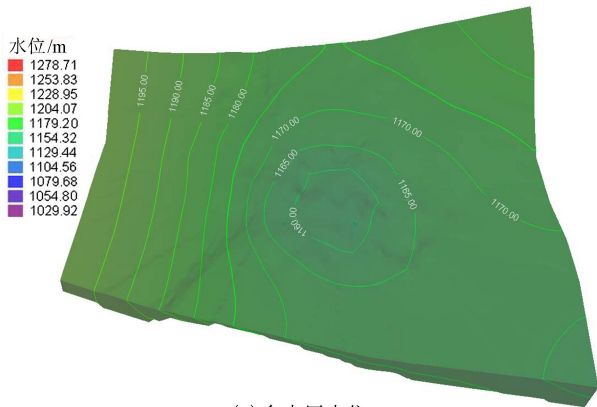
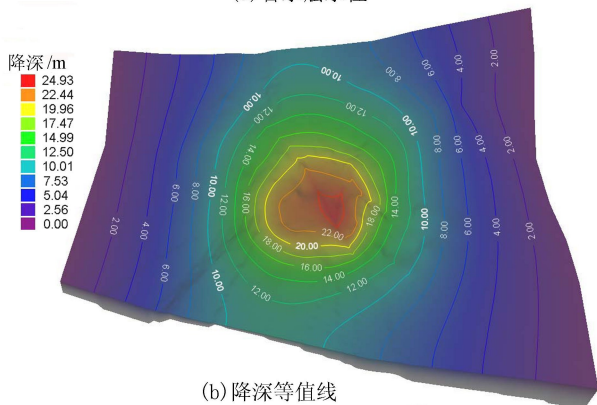


图 12 开采 30 年后新近系砂砾石含水层水位及降深等值线

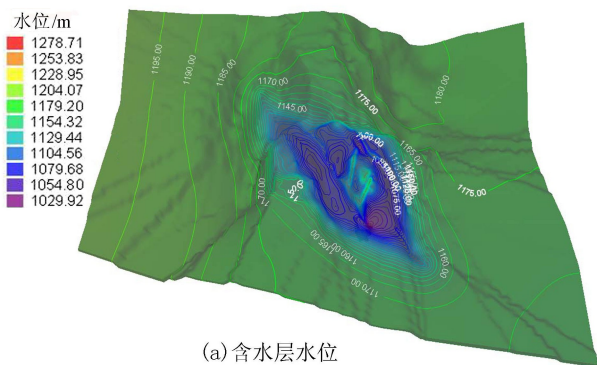


(a) 含水层水位

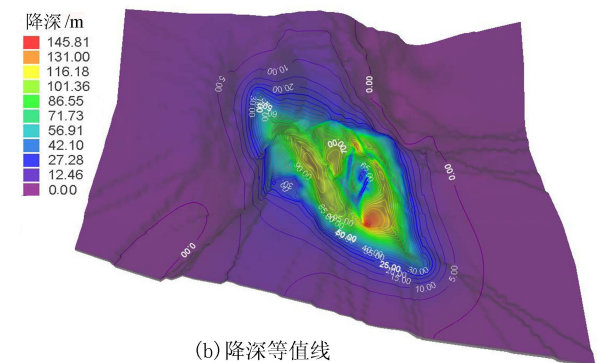


(b) 降深等值线

图 13 开采 30 年后二叠系石盒子组砂岩裂隙含水层水位及降深等值线



(a) 含水层水位



(b) 降深等值线

图 14 开采 30 年后二叠系山西组砂岩裂隙含水层水位及降深等值线

3 结论

复杂断层的概化和处理方式是影响数值模拟结果的重要因素,本文以内蒙古某矿区中的 10 条错综复杂的断层为研究对象,应用 FEFLOW 软件将倾斜断层简化为垂直透水断层,建立三维地下水数值模型,克服了以往 Visual Modflow、GMS 建模过程中断层处“锯齿”状网格对计算结果收敛性和精度的影响,并预测了矿区开采 30 年后,对上覆各含水层地下水资源的破坏程度,二叠系山西组砂岩裂隙含水层、二叠系石盒子组砂岩裂隙含水层、新近系砂砾石含水层受到了不同程度的影响,而第四系松散孔隙含水层由于底部较厚且完整、连续的黏土层阻隔几乎没有受到影响。

参考文献:

- [1] 王博,刘耀炜,孙小龙,等.断层对地下水渗流场特征影响的数值模拟[J].地震,2008,28(3):115-123. (WANG Bo, LIU Yaowei, SUN Xiaolong, et al. Numerical simulation of the influence of fault on the groundwater seepage field[J]. Journal of Earthquake, 2008, 28(3): 115-123. (in Chinese))
- [2] 梁世川,徐明,王磊,等. GMS 在地下水数值模拟及断层处理中的应用:以盖孜河水源地为例[J].地下水,2013,35(6):53-54,125. (LIANG Shichuan, XU Ming, WANG Lei, et al. Application of GMS in numerical simulation of groundwater and fault generalizability: as an example for the water source location of Gez river[J]. Ground Water, 2013, 35(6): 53-54, 125. (in Chinese))
- [3] 武强,朱斌,徐华,等. MODFLOW 在淮北地下水数值模拟中的应用[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2005,24(4):500-503. (WU Qiang, ZHU Bin, XU Hua, et al. Application of MODFLOW in groundwater numerical simulation in Huaibei City [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2005, 24(4): 500-503. (in Chinese))
- [4] 牛建立. 地下水数值计算中断层处理的“切割—导通法”[J]. 煤田地质与勘探,2002,30(5):39-40. (NIU Jianli. Cutting-conduction method for fault generalizability in groundwater numerical calculation[J]. Coal Geology & Exploration, 2002, 30(5): 39-40. (in Chinese))
- [5] 朱斌,武强. 断层影响下的地下水流数值模拟[J]. 桂林理工大学学报,2005,25(1):31-35. (ZHU Bin, WU Qiang. Numerical simulation of groundwater flow under the influence of faults [J]. Journal of Guilin University of Technology, 2005, 25(1): 31-35. (in Chinese))

(下转第 56 页)

- 索, 2004(12):115-117. (FAN Genyao. The system innovation trend of environmental governance [J]. Seeker, 2004(12):115-117. (in Chinese))
- [4] 王曦. 为可持续的未来分配和管理水: 中国水资源法律、政策和方法[J]. 上海交通大学学报(哲学社会科学版), 2005, 13(1): 5-18. (WANG Xi. Water allocation and management for sustainable future: China's water laws, policies and methods [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Philosophy and Social Sciences), 2005, 13(1): 5-18. (in Chinese))
- [5] 但家文. 解决跨省流域协调难应统筹发展思路[N]. 中国环境报, 2013-11-13(01)
- [6] 张璐璐. 莱茵河流域治理对我国流域管理的经验借鉴[N]. 光明日报, 2014-06-25(16)
- [7] 李瑞娟, 徐欣. 美国流域管理对我国有哪些启示?[N]. 中国环境报, 2016-02-03(03)
- [8] MILLINGTON P. Integrated river basin management: from concepts to good practice [EB/OL]. [2016-02-01]. <http://documents.shihang.org/curated/zh/2006/02/9727476/integrated-river-basin-management-concepts-good-practice>
- [9] United States Environmental Protection Agency. The great lakes [EB/OL]. [2016-02-01] <http://www.epa.gov/greatlakes/atlas/glat-ch5.html>
- [10] River Basin Management Plan South East River Basin District, Environment Agency. Environment and countryside [EB/OL]. [2016-02-01]. https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/295841/geso0910bsta-e-e.pdf
- [11] EU Life Environment Programme, University of Liverpool. Learning from experience: promoting integrated catchment management in South East England [EB/OL]. [2016-02-10]. http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=home.showFile&rep=file&fil=LIFE04_ENV_GB_000807_LAYMAN.pdf
- [12] Department of the Environment and Energy, Australian Government. Integrated water resource management in Australia: case studies-Murray-Darling Basin initiative [EB/OL]. [2016-02-10]. <http://www.environment.gov.au/node/24407>
- [13] 寇怀忠. 法国卢瓦尔-布列塔尼流域管理实践及启示[N]. 黄河报, 2014-10-16(03)
- [14] KAMPA E, KRANZ N, SCHONFELDER W, et al. Public participation in river basin management in Germany [EB/OL]. [2016-02-10]. http://www.harmonicop.uni-osnabrueck.de/_files/_down/Germany.pdf

(收稿日期: 2016-03-01 编辑: 徐娟)

(上接第 50 页)

- [6] 殷晓曦, 陈陆望, 林曼利, 等. 采动影响下任楼煤矿地下水三维数值模拟[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2013, 36(1): 93-98. (YIN Xiaoxi, CHEN Luwang, LIN Manli, et al. Three-dimensional numerical simulation of groundwater flow in Renlou Mine under mining disturbance [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2013, 36(1): 93-98. (in Chinese))
- [7] 韩巍, 李国敏, 黎明, 等. 大武水源地岩溶地下水开采动态数值模拟分析[J]. 中国岩溶, 2008, 27(2): 182-188. (HAN Wei, LI Guomin, LI Ming, et al. Dynamic numerical simulation of groundwater in Dawu karst water source location [J]. Carsologica Sinica, 2008, 27(2): 182-188. (in Chinese))
- [8] 刘志峰, 柳硕林, 王琳琳, 等. 数值模拟法在西龙河峰山断层带岩溶水允许开采量评价中的应用[J]. 地质学刊, 2010, 34(3): 271-274. (LIU Zhifeng, LIU Shuolin, WANG Linlin, et al. The application of numerical simulation method to evaluation the allowable exploitation amount of cavern water in Xilong River Yishan fault zone [J]. Journal of Geology, 2010, 34(3): 271-274. (in Chinese))
- [9] GMÜNDER C. Regional hydrogeological model of northern Switzerland [R]. Bern: Water Resources and Environment DHI-WASY, 2014.
- [10] LUO J. Hydrogeological model Zürich Nordost and Südranden [R]. Bern: Water Resources and Environment DHI-WASY, 2013.
- [11] LUO J. Hydrogeological model Jura Os [R]. Bern: Arbeitsbericht NAB 13-26, 2014.
- [12] LUO J. Hydrogeological model Jura Südfuss [R]. Bern: Water Resources and Environment DHI-WASY, 2014.
- [13] GMÜNDER C. Documentation of the Nagra regional 3D geological model 2012 [R]. Bern: Water Resources and Environment DHI-WASY, 2013.

(收稿日期: 2015-12-16 编辑: 王芳)

