

# 大屯矿区中心区地下水资源承载力研究

杨 小 刚

(中国煤炭科工集团西安研究院有限公司 陕西 西安 710077)

**摘 要:** 为了优化大屯矿区中心区地下水开采方案,降低地下水超采对地面沉降的影响,缓解该中心区供水能力不足的问题,基于地下水数值模拟方法对该中心区进行了地下水资源承载力研究。根据中心区水文地质、气象和水资源利用等资料依次建立了其水文地质概念模型、数学模型和数值模型,借助 Visual Modflow 进行了求解,利用长观井水位数据对模型进行了识别和验证。结果表明:9 口超采井在开采水量为 192~480 m<sup>3</sup>/d,减少幅度为 20%~50%,按这样开采水量可实现含水层的承压开采,可缓解中心区地面沉降,合理利用水资源。

**关键词:** 水资源承载力;地下水;Visual Modflow;识别和验证

中图分类号:TD82;P641 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2015)08-0144-05

## Study on carrying capacity of groundwater resources in central area of Datun Mining Area

Yang Xiaogang

(Xi'an Research Institute Company Limited, China Coal Technology and Engineering Group, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** In order to optimize an groundwater exploitation plan in central area of Datun Mining Area, to reduce over exploitation of the groundwater affected to the surface subsidence and to release the water supply insufficient in the central area, based on the numerical simulation method of the ground water, study on the carrying capacity of the groundwater resources in the central area was conducted. According to the hydrogeology, meteorological and water resource utilization and other informations, the hydrogeologic conception model, mathematic model and numerical model were established in sequence. The Visual Modflow was applied to the solution and the water level data from the long-term observation well was applied to the identification and verification of model. The results showed that nine over exploitation wells had a water over drainage value of 192~480 m<sup>3</sup> per day. With a reduction of 20% ~ 50%, the water pressurized mining could be realized in the aquifer, the surface subsidence in the central area would be released and the water resources could be rationally utilized.

**Key words:** carrying capacity of water resources; ground water; Visual Modflow; identification and verification

## 0 引 言

大屯矿区中心区(下称中心区)是大屯煤电集团公司职工和家属的生活区,随着中心区范围扩大及人口数量的增加,各水源井的开采量日渐增加,供水能力呈现愈来愈不足的趋势,有些水源井由于超能力开采而损坏甚至报废。同时由于对中心区各含水层的补给能力重视不足,区域内水源井的布置不合理<sup>[1]</sup>,导致地面沉降不均一,水资源安全问题逐

渐凸显<sup>[2-3]</sup>,从而给居民正常生活带来了很大的影响。合理开发利用矿井水资源、促进水资源可持续发展仍是一项紧迫而现实的研究课题<sup>[4-5]</sup>。因此,对该矿区进行地下水开采能力研究十分必要。

数值模拟方法在地下水资源承载力研究方面应用较为成熟。基于有限差分计算原理的 Modflow 系列软件国内应用起步于 20 世纪 90 年代<sup>[6]</sup>,2003 年之后在区域地下水资源评价中开始流行。贾振兴等<sup>[7]</sup>基于该软件建立了临汾土门地下水模型,利用

收稿日期:2015-03-28;责任编辑:曾康生 DOI: 10.13199/j.cnki.est.2015.08.029

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(51034003);国家科技支撑计划资助项目(2012BAC10B03、2012BAK04B04)

作者简介:杨小刚(1978—),男,甘肃甘谷人,工程师。Tel: 13630280955, E-mail: yangxiaogang@cctegxian.com

引用格式:杨小刚.大屯矿区中心区地下水资源承载力研究[J].煤炭科学技术,2015,43(8):144-148,111.

Yang Xiaogang. Study on carrying capacity of groundwater resources in central area of Datun Mining Area[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(8): 144-148, 111.

软件自带 Modpath 模块开展了取水井粒子反向示踪模拟,并结合研究区水文地质资料,确定了各级水源保护区界线。文献[8-9]分别利用 Modflow 对 2 个地下水超采区承德市和郑州市地下水资源承载力进行了评价和预测,取得了相对可靠的成果。笔者拟从水动力学角度出发,在前人研究成果的基础上,分析了大屯矿区区域补、径、排条件,利用现有水文地质、气象以及水资源利用等实测数据,借助 Visual Modflow 软件建立中心区地下水二维数值模型,并基于长观井实测水位数据对模型进行识别和验证<sup>[10-13]</sup>,利用率定好的模型评价该区域地下水水资源承载力。在此基础上提出合理的地下水开采方案,从而实现区内含水层由无压变承压,并在一定程度上达到缓解地面沉降的目的<sup>[14-17]</sup>。

1 大屯矿区概况及地下水资源现状

1.1 大屯矿区、地理概况

大屯矿区位于江苏省沛县北部,属于丰沛平原的一部分,区内地势平坦,海拔高度为+32—+38 m,气候属华北型黄河南区,为季风型大陆性气候,四季分明。夏季降水集中,常出现连日暴雨,2000—2010 年平均降水量为 695.2 mm,降水多集中在 6 月下旬至 9 月下旬,平均蒸发量为 1 615.34 mm。

1.2 水文地质条件

研究区含水岩组按含水层的性质可分为 6 个含水岩组(Ⅰ—Ⅵ)和 5 个隔水层段(Ⅰ—Ⅴ)。其中Ⅰ含水层中上部夹 1 层淤泥质黏土,可视为一弱透水层,以该层为界,上部以孔隙潜水为主,下部为半承压水;Ⅱ—Ⅵ含水层为孔隙承压水。据区域资料分析,5 个隔水层段分布较稳定,其中Ⅲ、Ⅳ隔水层分布稳定,厚度大,塑性指数高,隔水性能强,研究区内供水的主要开采层位为Ⅱ+Ⅲ含水岩组。

1.3 地下水开采现状

截至 2011 年底,中心区内有开采井 21 口,单井开采量为 960 m<sup>3</sup>/d,地下水位基本稳定,地下水流场已经基本处于稳定状态。中心区南部以 7 村为中心的一定范围内,地下水位已经基本降至Ⅱ+Ⅲ含水岩组的顶板,Ⅱ+Ⅲ含水岩组顶部含水层已经近似无压状态;有近半开采井的地下水水位已经低于该处Ⅱ+Ⅲ含水岩组的顶板,Ⅱ+Ⅲ含水岩组顶部含水层已经处于无压状态(表 1)。Ⅱ+Ⅲ含水岩组为承压含水层组,当承压含水层的水位低于顶板标高时,含水层将出现相对比较明显的压缩,此时将加剧

地面沉降。调查发现,中心区的局部区域实际已经出现了地面沉降现象。因此,目前地下水开采量已经大于允许开采量,属于地下水超采状态。

表 1 部分开采井 2011 年平均水位与含水层顶板标高

Table 1 Average waterlevel and height of aquifer roof in some exploited well some in 2011

开采井	含水层顶板 标高/m	2011 年平均 水位/m	水位标高/m
7 村	+4.0	2.6	-1.4
10 村	+12.0	8.8	-3.2
11 村 1	+16.0	12.5	-3.5
11 村 2	+18.0	10.1	-7.9
11 村 3	+13.0	8.6	-4.4
服装	+13.3	11.8	-1.5
矿医	+18.4	7.8	-10.6
一中	+14.0	8.2	-5.8
总厂	+25.1	15.3	-9.8

2 地下水流数值模拟

2.1 模拟范围

中心区面积为 7.94 km<sup>2</sup>,边界位于中心区向外平均约 600 m 处,呈椭圆形,长轴方向为目前开采井分布的方向,中心区范围如图 1 所示。

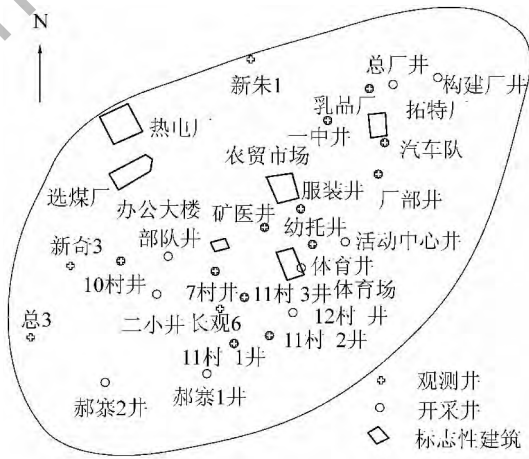


图 1 中心区范围

Fig. 1 Range of central area

2.2 水文地质概念模型

将中心区所开采的含水层(Ⅱ+Ⅲ含水岩组)作为主要模拟含水层,区内含水层岩性和厚度均有不同程度的变化,参数随空间变化,故将其概化为非均质各向同性。Ⅱ+Ⅲ含水岩组间具有一定的水力联系,水流主要以水平径流和垂向上的越流为主,渗流基本符合达西定律,且补给、排泄和水位随时间发生变化,水流运动形式可以概化为二维非稳定流。

由于中心区内已经形成了较大范围的降落漏

斗,地下水的补给以侧向径流补给为主、垂向越流补给为辅。水平方向上将模拟层侧向边界概化为透水边界,为第二类流量边界;垂向上,模拟层上部接受 I 含水岩组的越流补给,为越流边界,下伏为隔水层,隔水性能较好,故为相对隔水边界。中心区的地下水排泄方式单一,为人工开采,共有 21 口井开采地下水,单井开采量为  $960 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

### 2.3 数学模型的建立及求解

研究区概化为非均质、各向同性、二维非稳定流,数学模型为

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left( km \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( km \frac{\partial H}{\partial y} \right) + q_1 = \mu_s \frac{\partial H}{\partial t} \\ H(x, y, t) \Big|_{t=0} = H_0(x, y, t) \\ km \frac{\partial H}{\partial n} \Big|_{r_2} = q_2(x, y) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $k$  为渗透系数;  $m$  为含水层厚度;  $H$  为模拟层水位;  $q_1$  源汇项;  $\mu_s$  为含水层贮水系数;  $t$  为时间;  $x$ 、 $y$  为二维空间变量;  $H_0$  为初始水位;  $r_2$  为第二类边界条件;  $q_2$  为第二类边界处的交换量。

根据中心区的含水层结构、边界条件和地下水渗流场特征<sup>[5]</sup>,将模拟区划分成 149 行和 148 列,计算单元数为 15 267 个,垂向上为一层,矩形单元  $x$  方向长为 23.3 m,  $y$  方向长为 22.4 m。图 2 为中心区单元剖分图。

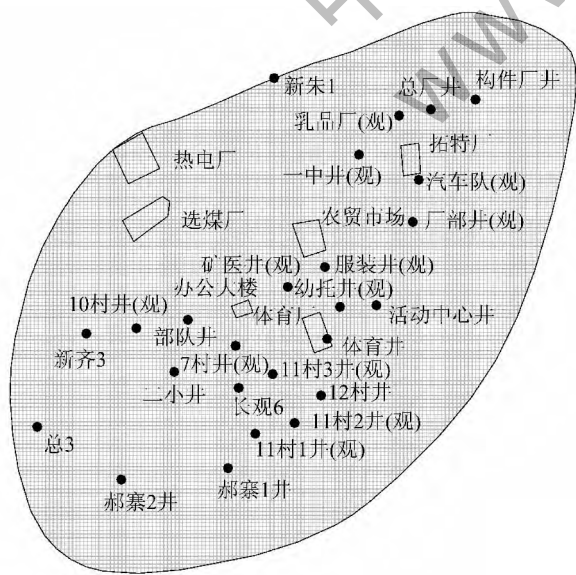


图 2 研究区单元剖分图

Fig. 2 Subdivision of research area

### 2.4 水文地质参数初始分区及初始流场

根据含水层的成因时代、岩性特征以及岩石的水理性质及抽水试验求参结果,对含水层进行初始分区及赋值<sup>[18-19]</sup>,并利用初始水位绘制初始水位等值线,如图 3 所示。

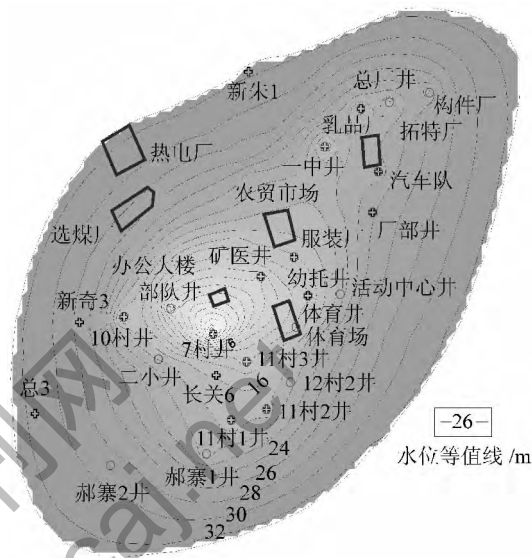


图 3 初始水位等值线

Fig. 3 Initial water level isoline

### 2.5 源汇项的处理

研究区地下水的补给主要为 I 含水层组的越流补给和侧向径流补给,排泄主要为人工开采。其中侧向径流补给量通过第二类边界控制,并由 GHB 边界条件计算;垂向越流补给量受降水影响较大。因此,越流补给动态与降水动态具有一定的相关性。中心区内缺乏 I 含水层组的水位观测资料, I 含水层组对模拟含水岩组的越流补给量由降水补给的方式给出。人工开采量通过井流量控制,单井开采量为  $960 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

### 2.6 模型的识别与验证

选用 2000 年 1 月 1 日—2005 年 1 月 1 日的地下水位、降雨量资料以及计算出的补给、排泄量对模型和水文地质参数进行识别,每个月有 5 个时间步长;再利用 2000 年 1 月 1 日~2011 年 7 月 31 日的地下水位、降雨量资料及补给、排泄量验证该模型和水文地质参数,对模型做进一步校核;通过计算水位与实际水位的拟合,率定出两者拟合最佳的模型参数。渗透系数分区如图 4 所示,分区号记作 1~20,各分区取值见表 2。贮水率和给水度对模型影响较小,不进行分区,其值分别为  $10^{-6}$  和 0.05。

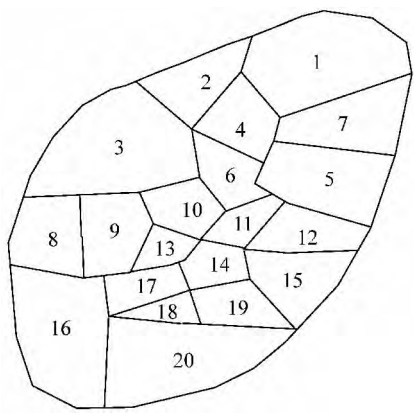


图 4 渗透系数求取分区

Fig. 4 Division graph of permeability coefficient

表 2 各分区中渗透系数求  $K_x$ 、 $K_y$  取结果

Table 2 Permeability coefficient value of each division

分区号	$K_x /$ ( $m \cdot d^{-1}$ )	$K_y /$ ( $m \cdot d^{-1}$ )	分区号	$K_x /$ ( $m \cdot d^{-1}$ )	$K_y /$ ( $m \cdot d^{-1}$ )
1	1.56	1.56	11	4.09	4.09
2	3.35	3.35	12	1.95	1.95
3	0.95	0.95	13	0.98	0.98
4	1.00	1.00	14	3.08	3.08
5	2.65	2.65	15	4.86	4.86
6	5.00	5.00	16	5.23	5.23
7	3.09	3.09	17	5.35	5.35
8	2.00	2.00	18	4.77	4.77
9	1.05	1.05	19	2.06	2.06
10	3.13	3.13	20	2.00	2.00

其中 7 村井的模拟结果如图 5 所示,由图 5 可以看出,计算水位与实测水位拟合良好,模型具有一定的精度,是有效的。拟合误差的原因主要是开采井的开采量统计存在误差,但从整体上来说,模型对于含水层结构、含水层边界的概化以及水文地质参数的选取是合理的,能够较为真实的反映含水层特征,可以用该模型进行水位预报。

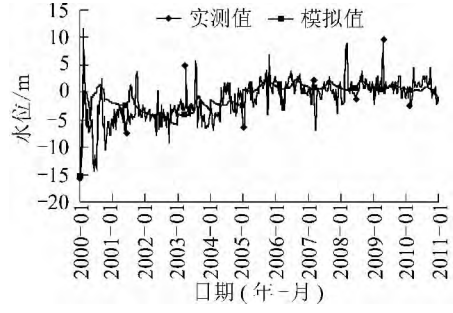


图 5 7 村井模拟计算值和实测值对比

Fig. 5 Comparison of numerical simulation and measured value of Well 7 Cun

2.7 模型预测

1) 预测方案。考虑自然条件以及水源地开采量的影响,笔者采用 3 个枯水年、4 个平水年和 3 个枯水年降水量数据,年平均降水量为 616 mm,降水量偏少的情况下,以各开采井处含水层均不出现无压现象为判断标准,计算各开采井的开采量。预测时间从 2012 年 1 月 1 日预测至 2021 年 12 月 31 日,时间长度为 10 年。

2) 预测结果。经过计算,出现无压的 9 口开采井新的开采量为:7 村井、10 村井、11 村 1 井、11 村 3 井和服装井的开采量减至现开采量的 80%,开采量为 768  $m^3/d$ ; 11 村 2 井、矿医井、一中井和总厂井的开采量减至现开采量的 50%,开采量为 480  $m^3/d$ ,此时可满足各开采井处含水层均不出现无压现象。预测结果如图 6、图 7 所示。

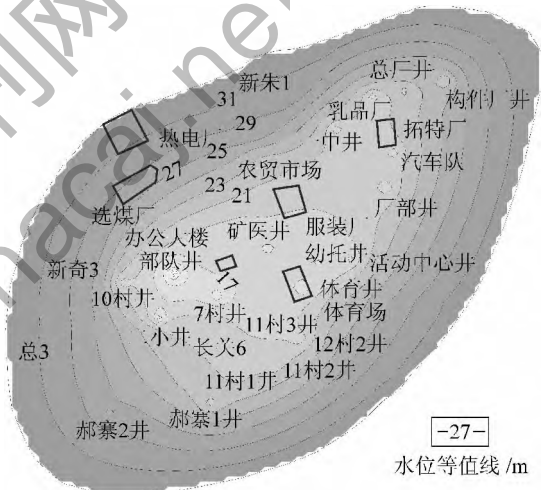


图 6 预测 2021 年末水位等值线

Fig. 6 Water level isoline in at end of 2021

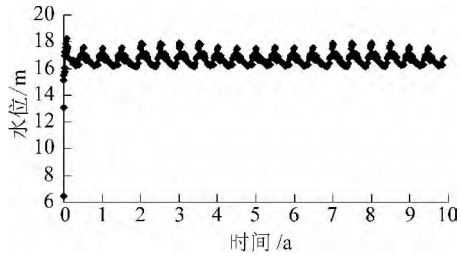


图 7 一中井水位历时曲线

Fig. 7 Water level duration curve of Well 1 Zhong

3 结论及建议

1) 地下水超采导致中心区 9 口开采井处含水层平均地下水位已经降至或低于 II + III 含水岩组顶板, II + III 含水岩组顶部含水层基本处于无压状态, 中心区出现地面沉降现象。

2) 根据计算,建议将7村井、10村井等9口开采井开采量减少至50%~80%,其他开采井维持现状,可恢复各开采井处含水层的承压状态。

3) 按照调整后的开采量开采地下水能够实现含水层恢复承压状态,缓解但并不能从根本上消除地面沉降现象。

#### 参考文献:

- [1] 谷学明,王远,赵卉卉,等.江苏省水资源利用与经济增长关系研究[J].中国环境科学,2012,32(2):351-358.  
Gu Xueming, Wang Yuan, Zhao Huihui, et al. Linking between water resources utilization and economic growth in Jiangsu Province [J]. China Environmental Science, 2012, 32(2): 351-358.
- [2] 段春青,刘昌明,陈晓楠,等.区域水资源承载力概念及研究方法的探讨[J].地理学报,2012,65(1):82-90.  
Duan Chunqing, Liu Changming, Chen Xiaonan, et al. Preliminary research on regional water resources carrying capacity conception and method [J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 65(1): 82-90.
- [3] 夏军,朱一中.水资源安全的度量:水资源承载力的研究与挑战[J].自然资源学报,2002,17(3):262-269.  
Xia Jun, Zhu Yizhong. The measurement of water resources security: A study and challenge on water resources carrying capacity [J]. Journal of Natural Resources, 2002, 17(3): 262-269.
- [4] 顾则仁.矿井水资源的开发利用[J].煤炭科学技术,2000,27(12):11-15.  
Gu Zeren. Development utilization of mining water resources [J]. Coal Science and Technology, 2000, 27(12): 11-15.
- [5] 丁文喜.中国水资源可持续发展的对策与建议[J].中国农学通报,2011,27(14):221-226.  
Ding Wenxi. Strategy and recommendations on sustainable development of water resources in China [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(14): 221-226.
- [6] 武强,董东林,武钢,等.水资源评价的可视化专业软件(Visual Modflow)与应用潜力[J].水文地质工程地质,1999,26(5):21-23.  
Wu Qiang, Dong Donglin, Wu Gang, et al. Visual Modflow of water resources evaluation and application potential [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1999, 26(5): 21-23.
- [7] 贾振兴,魏放,侯燕军,等. Visual Modflow 在临汾市土门供水水源地保护区划分中的应用[J].太原理工大学学报,2007,38(2):119-121.  
Jia Zhenxing, Wei Fang, Hou Yanjun, et al. The application of Visual-Modflow in protection zones of Tumen water supply well-field [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2007, 38(2): 119-121.
- [8] 束龙仓,刘波,刘猛,等.傍河水源地水位降落漏斗的扩展分析[J].河海大学学报:自然科学版,2006,34(1):6-8.  
Shu Longcang, Liu Bo, Liu Meng, et al. Expansion of groundwater depression cones in riverside well field [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences Edition, 2006, 34(1): 6-8.
- [9] 刘记成,王现国,葛雁,等. Visual Modflow 在郑州沿黄水源地地下水资源评价中的应用[J].地下水,2007,29(4):91-92.  
Liu Jicheng, Wang Xianguo, Ge Yan, et al. Application of Visual-Modflow in groundwater resources evaluation along Yellow River water source in Zhengzhou [J]. Ground Water, 2007, 29(4): 91-92.
- [10] 陈苏社,鞠金峰.大柳塔煤矿矿井水资源化利用技术[J].煤炭科学技术,2011,39(2):125-128.  
Chen Sushe, Ju Jinfeng. Utilization technology of mine water resources in Daliuta Mine [J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(2): 125-128.
- [11] 周如禄,张广文,郭中权,等.压力式气水相互冲洗滤池的开发与应用[J].煤炭科学技术,2013,41(2):113-120.  
Zhou Rulu, Zhang Guangwen, Guo Zhongquan, et al. Development and application of pressurized gas and water interacted flushing filter [J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(2): 113-120.
- [12] 王锦国,周志芳.裂隙岩体地下水溶质运移的尺度问题[J].水科学进展,2002,13(2):240-245.  
Wang Jinguo, Zhou Zhifang. Scale problem on groundwater solute transport in fractured rock [J]. Advances in Water Science, 2002, 13(2): 240-245.
- [13] 武强,董东林,石占华,等.可视化地下水模拟评价新型软件系统(Visual Modflow)与矿井防治水[J].煤炭科学技术,2000,28(2):18-20.  
Wu Qiang, Dong Donglin, Shi Zhanhua, et al. Visual Modflow system of groundwater simulation evaluation and mining treatment water [J]. Coal Science and Technology, 2000, 28(2): 18-20.
- [14] 骆祖江,曾峰,李颖.地下水开采与地面沉降控制三维全耦合模型研究[J].吉林大学学报:地球科学版,2009,39(6):1080-1086.  
Luo Zujiang, Zeng Feng, Li Ying. Study on three-dimensional full coupling model of groundwater exploitation and land-subsidence control [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2009, 39(6): 1080-1086.
- [15] 张光辉,费宇红,杨丽芝,等.深层水漏斗区开采量组成变化特征与机制[J].水科学进展,2010,21(3):370-376.  
Zhang Guanghui, Fei Yuhong, Yang Lizhi, et al. Variation characteristics and mechanisms of exploitation yield formation in the region with confined-groundwater depression cone [J]. Advances in Water Science, 2010, 21(3): 370-376.
- [16] 骆祖江,刘金宝,李朗.第四纪松散沉积层地下水疏降与地面沉降三维全耦合数值模拟[J].岩土工程学报,2008,30(2):193-198.  
Luo Zujiang, Liu Jinbao, Li Lang. Three-dimensional full coupling numerical simulation of groundwater dewatering and land-subsidence in Quaternary loose sediments [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(2): 193-198.
- [17] 董东林,王焕忠,武彩霞,等.断层及滑动构造复合构造区煤层顶板含水层渗流特征及突水危险性分析[J].岩石力学与工程学报,2009,28(2):373-379.

- 403-407.
- [7] 刘盛东, 刘 静, 岳建华. 中国矿井物探技术发展现状和关键问题[J]. 煤炭学报, 2014, 39(1): 19-25.  
Liu Shengdong, Liu Jing, Yue Jianhua. Development status and key problems of Chinese mining geophysical technology[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(1): 19-25.
- [8] 程久龙, 李 飞, 彭苏萍, 等. 矿井巷道地球物理方法超前探测研究进展与展望[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1742-1750.  
Cheng Jiulong, Li Fei, Peng Suping, et al. Research progress and development direction on advanced detection in mine roadway working face using geophysical methods[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1742-1750.
- [9] 韩德品, 李 丹, 程久龙, 等. 超前探测灾害性含导水地质构造的直流电法[J]. 煤炭学报, 2010, 35(4): 635-639.  
Han Depin, Li Dan, Cheng Jiulong, et al. DC method of advanced detecting disastrous water-conducting or water-bearing geological structures along same layer[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(4): 635-639.
- [10] 张平松, 李永盛, 胡雄武. 巷道掘进直流电阻率法超前探测技术应用探讨[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(1): 135-140.  
Zhang Pingsong, Li Yongsheng, Hu Xiongwu. Application and discussion of the advanced detection technology with DC resistivity method in tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(1): 135-140.
- [11] 何继善. 双频激电法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.
- [12] 李术才, 刘 斌, 李树忱, 等. 基于激发极化法的隧道含水地质构造超前探测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(7): 1297-1309.  
Li Shucai, Liu Bin, Li Shuchen, et al. Study of advanced detection for tunnel water-bearing geological structures with induced polarization method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(7): 1297-1309.
- [13] 杨振威, 郝 伟, 李晓斌, 等. 频谱激电法的发展与展望[J]. 物探与化探, 2015, 39(1): 22-28.  
Yang Zhenwei, Zheng Wei, Li Xiaobin, et al. The development and prospect of the spectral induced polarization method[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(1): 22-28.
- [14] 聂利超, 李术才, 刘 斌, 等. 隧道激发极化法超前探测快速反演研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(2): 222-229.  
Nie Lichao, Li Shucai, Liu Bin, et al. Fast inversion for advanced detection using induced polarization in tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(2): 222-229.
- [15] 聂利超. 隧道施工含水构造激发极化定量超前地质预报理论及其应用[D]. 济南: 山东大学, 2014.  
Nie Lichao. Quantitative identification theory and its application of advanced geological prediction for water-bearing structure using induced polarization in tunnel construction period[D]. Jinan: Shandong University, 2014.
- [16] 张 力, 阮百尧, 吕玉增, 等. 坑道全空间直流聚焦超前探测模拟研究[J]. 地球物理学报, 2011, 54(4): 1130-1139.  
Zhang Li, Ruan Baiyao, Lyu Yuzeng, et al. Study of full-space numerical modeling of advanced exploration in tunnel with DC focus resistivity method[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(4): 1130-1139.
- [17] 邓小康. 隧道直流电阻率法超前聚焦探测研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.  
Deng Xiaokang. Research of DC focusing resistivity advanced detection in tunnel[D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [18] 张伟杰. 动态定向电场激励法煤巷掘进超前探测技术研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2012.  
Zhang Weijie. Research of advanced detection technology based on dynamic and directional electric field excitation method of coal roadway driving[D]. Beijing: China University of Mining and Technology(Beijing), 2012.
- [19] 杜毅博. 电场激励法煤巷综掘超前探测机理研究及原理样机研制[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2014.  
Du Yibo. Study on advanced detection mechanism of coal roadway tunneling based on electric field excitation method and principle prototype development[D]. Beijing: China University of Mining and Technology(Beijing), 2014.
- [20] 王志强, 肖文勋, 虞 龙. 开关电源设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.
- [21] 胡存生, 胡 鹏. 集成开关电源的设计制作调试与维修[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1995.

## (上接第 148 页)

- Dong Donglin, Wang Huanzhong, Wu Caixia, et al. Seepage characters of roof aquifers in faults and sliding structure and risk analysis of water inrush[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2): 373-379.
- [18] 钱家忠, 吴剑锋, 董洪信, 等. 徐州市张集水源地裂隙岩溶水三维等参有限元数值模拟[J]. 水利学报, 2003(3): 37-41.  
Qian Jiazhong, Wu Jianfeng, Dong Hongxin, et al. An isoparametric finite element 3D numerical model for the fracture karst flow in a wells field[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003(3): 37-41.
- [19] 陈 喜, 陈润洪. 美国 Sand Hills 地区地下水数值模拟及水量平衡分析[J]. 水科学进展, 2004, 15(2): 94-99.  
Chen Xi, Chen Xunhong. Numerical modeling of groundwater flow and analysis of water budget in Nebraska Sand Hills, USA[J]. Advances in Water Science, 2004, 15(2): 94-99.
- [20] 白 乐, 李怀恩, 何宏谋, 等. 煤矿开采区地表水-地下水耦合模拟[J]. 煤炭学报, 2015, 40(4): 931-937.  
Bai Le, Li Huaen, He Hongmou, et al. Integrated simulation of surface water and groundwater in a high intensive coal mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(4): 931-937.
- [21] 赵苏启, 武 强, 尹尚先. 广东大兴煤矿特大突水事故机理分析[J]. 煤炭学报, 2006, 31(5): 619-622.  
Zhao Suqi, Wu Qiang, Yin Shangxian. Mechanism analysis of water inrush in Daxing Coal Mine, Guangdong[J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(5): 619-622.