

doi:10.3799/dqkx.2011.076

王河煤矿矿井涌水量数值模拟及预测

李平¹, 郭会荣^{1*}, 吴孔军¹, 靳孟贵¹, 李学问²

1. 中国地质大学环境学院, 湖北武汉 430074

2. 河南省地质测绘总院, 河南郑州 450006

摘要: 针对岩溶充水矿井涌水量数值模拟中边界条件概化和非均质性刻画难题, 采用分别建立区域模型和局部模型的方法解决边界概化问题, 运用信息复合技术刻画岩溶介质的非均质性. 以具有完整水文地质边界的荃巩矿区为计算区建立区域模型, 以区域模型计算出的流量作为边界条件建立王河煤矿矿井涌水量模拟模型(局部模型). 在充分分析钻孔、构造、突水、物探等资料的基础上, 运用信息复合技术对煤矿充水含水层进行垂向和平面参数分区. 在此基础上, 利用GMS建立了精细的王河煤矿涌水量模拟模型. 利用该模型预测了不同开采工作面的矿井正常涌水量和最大涌水量. 结果表明, 开采111070、113090、113110、113120工作面时, 正常涌水量分别为490、350、560、590 m³/h, 最大涌水量分别为690、490、790、830 m³/h. 预测结果可为矿山设计部门确定开采方案、布置排水设备和制定防治水措施提供科学依据.

关键词: 矿井涌水量; 数值模拟; 区域模型; 局部模型; 地下水; 煤矿.

中图分类号: P641.2

文章编号: 1000-2383(2011)04-0755-06

收稿日期: 2010-10-08

Numerical Simulation and Forecast of Mine Discharge in Wanghe Coal Mine

LI Ping¹, GUO Hui-rong^{1*}, WU Kong-jun¹, JIN Meng-gui¹, LI Xue-wen²

1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Institute of Geologic Mapping in Henan Province, Zhengzhou 450006, China

Abstract: In numerical simulation of mine discharge of karst water, a regional model and a local model are constructed to solve the boundary conceptualization, and the heterogeneity of karst medium is depicted using information compound technology. The regional model of the study area, Xinggong mining area, is constructed due to the fact that it has complete hydrogeological boundary which can provide specified flow values for boundaries in the simulation model of mine discharge in Wanghe coal mine, which is the local model. The vertical and horizontal parameters of the water filling aquifer are divided using information compound technology, based on the analysis of many data such as borehole, structure, water inrush and geophysical investigation. The refined simulation model of mine discharge in Wanghe coal mine is then constructed. The normal mine discharge and maximum mine discharge of different mining faces are forecasted using this model. The results show that when mining the faces of 111070, 113090, 113110 and 113120, the normal mine discharges are 490, 350, 560 and 590 m³/h respectively, and the maximum mine discharges are 690, 490, 790, and 830 m³/h respectively. The results can provide a scientific basis for the mine design department to determine mining scheme, arrange drainage equipment and take measures to control water.

Key words: mine discharge; numerical simulation; regional model; local model; groundwater; coal mines.

矿井涌、突水一直都是煤矿安全生产中倍受重视的问题. 涌水量预测的准确与否直接影响矿山设计部门能否准确设计井下排水方案、制定合理的防治水措施. 矿井涌水量预测方法主要有类比外推法、解析法、数值法、水均衡法、随机模拟法等. 其中, 数

值法能考虑较多的影响因素, 解决较复杂的问题, 且具有较高的精度, 倍受国内外学者的青睐(武强等, 1992; Bochenska *et al.*, 2000; Rapantova *et al.*, 2007). 在矿井涌水量数值模拟中, 关键问题是如何合理概化矿区开采条件下的水文地质模型, 使之能

基金项目: 国家重点基础研究发展计划“973”项目(No. 2010CB428802); 国家“863”计划(No. 2007AA06Z337).

作者简介: 李平(1982-), 女, 在读博士后, 主要从事地下水流数值模拟研究. E-mail: liping_0224@163.com

* **通讯作者:** 郭会荣, E-mail: elsieguo@126.com

真实反映研究区地下水系统的结构与功能特征,主要有两个方面:(1)边界条件概化.由于工作程度和评价需要,计算区往往只涉及较小范围而不是一个完整的水文地质单元.对边界条件的处理往往成为数值法解决预报问题的主要障碍.薛禹群等(1996)提出了预报过程中边界移动问题的处理方法.崔光中和朱远峰(1985)认为计算区边界应与岩溶水系统的自然边界一致.有学者通过建立区域模型和局部模型的方法解决边界概化问题(Leake *et al.*, 1998),即建立大尺度的区域模型,为小尺度的局部模型提供边界条件.该方法克服了上述方法的缺点,已经被广泛用于地下水模拟中,但未见用于矿区的报道.(2)岩溶介质的非均质性刻画.岩溶发育的非均质性是岩溶地区含水介质的共性.研究表明,地下水流模拟中最主要的困难是描述流动系统的非均质性(Tsang, 2000).对煤矿充水含水层非均质性刻画采用的资料有地质、构造、水化学、物探等;采用的方法有模糊聚类法、信息复合技术、物探方法、水化学方法等.其中,信息复合技术是随着计算机技术和遥感技术发展起来的,是对多源地学信息进行综合处理的一种新方法.它通过对原先几种单因素信息的复合,可以得到原先几种单独信息所无法提供的新信息,有助于提取更多有用的信息,因此,在煤矿突水危险性分区方面得到了广泛应用(尹会永等, 2008;张和生等, 2009),但用于含水介质参数分区的研究极少(武强等, 2000).

王河煤矿岩溶水系统的边界不是自然边界,边界条件不易确定.因此,将计算区延伸到具有完整水文地质边界的荥巩矿区,以荥巩矿区模型计算出的流量作为王河煤矿涌水量模拟模型的边界条件.这样,既能分析大区域范围内水流对矿井地下水的影响,又能保证涌水量预测的正确性与精确度.运用信息复合技术对钻孔、构造、突水、物探等资料进行复合,对煤矿充水含水层进行平面和垂向水文地质参数分区,科学、准确地刻画了岩溶含水介质的非均质性.在此基础上,建立了准确和精细的矿井涌水量模拟模型,预测了不同开采工作面的矿井涌水量,可为矿山设计部门确定开采方案、布置排水设备和制定防治水措施提供科学依据.

1 荥巩矿区地下水模拟模型

荥巩矿区模拟范围:北部以郭小寨断层和须水断层为界,东部以地下水分水岭为界,南部以荥密复

背斜轴部为界,西部以沙鱼沟断层和五指岭断层为界,面积为 1 019. 01 km²(图 1). 由于中寒武统徐庄组(E_{2x})页岩透水性很差,可看作隔水层,故认为下寒武统含水层与中、上统含水层无水力联系,计算时不考虑 E_{2x} 、 E_{1x} 和 Z_2 , 计算区面积变为 857. 80 km²(图 1).

本次模拟的目的含水层为石炭系太原组含水层、本溪组弱透水层、奥陶系含水层和中上寒武系含水层(包括 E_{2z} 和 E_3 含水层). 奥陶系含水层和中上寒武系含水层水力联系密切,概化为一个含水层,简称中上寒武—奥陶系含水层. 垂向上概化为 3 层. 将计算区含水层概化为非均质各向同性承压—无压含水层.

计算区侧向边界均为隔水断层或地下水分水岭,概化为隔水边界. 地下水在南部中上寒武—奥陶系出露范围接受大气降水的补给,然后由南向北径流进入矿区. 因此上部边界在南部裸露区为潜水面,是位置不断变化的水量交换边界;北部覆盖区上部地层由太原组泥岩、砂质泥岩和中细砂岩组成,裂隙不发育,透水性差,概化为隔水边界. 下部边界为中寒武统徐庄组页岩,概化为隔水边界. 计算区内地下水的补给量主要是降水入渗补给;排泄量主要是矿井排水,其次是泉排泄和人工开采. 将计算区水文地质条件概化为非均质各向同性承压—无压三维非稳定地下水系统.

采用矩形等距剖分,网格间距为 500 m×500 m. 采用有限差分法将所建立的数学模型离散为有限差分方程组,利用 GMS 软件中的 MODFLOW 模块求解. 模型识别期为 2007—01—01~2008—01—01,验证期为 2008—01—01~2009—01—01.

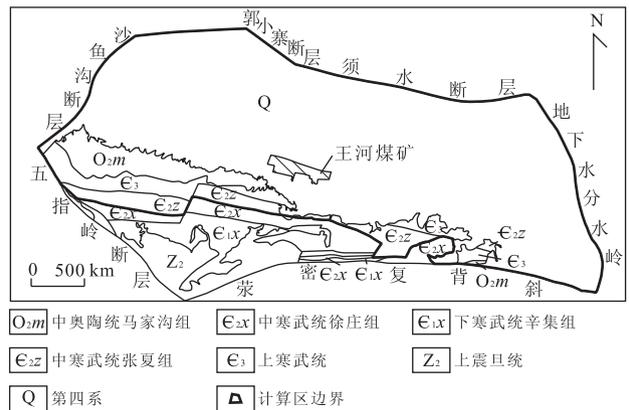


图 1 荥巩矿区范围及地表出露地层

Fig. 1 The range of Xingong mining area and outcropping strata

2 王河煤矿岩溶水水文地质概念模型

2.1 区域模型到局部模型的转化

从区域模型建立局部模型有很多方法,常用方法是把局部模型的边界作为已知水头边界,其水头用区域模型计算出的水头值。第2种方法是把局部模型的边界作为已知流量边界,其流量为区域模型计算出的流量值。本文采用第2种方法。

2.2 计算区范围

局部模型计算范围(图2中虚线所示)是根据王河井田边界(图2中实线所示)修改确定的。北部边界从煤层底板标高-150 m等值线改为-200 m等值线,南部边界改为煤层底板标高0 m等值线(0 m以下为采空区,不做模拟),西部和东部边界以井田边界为界。计算区面积为7.21 km²。

2.3 含水层结构概化

本次模拟目的含水层为石炭系太原组下段灰岩含水层(C₃t₁₋₂)和中上寒武—奥陶系灰岩含水层(Є-O),2个含水层通过中间的本溪组弱透水层(C₂b)发生水力联系。C₃t₁₋₂含水层岩溶发育程度一般,概化为非均质各向同性承压含水层。Є-O含水层,岩溶裂隙较发育,有明显的不均匀性和方向性,概化为非均质各向异性承压含水层。

2.4 垂向和平面参数分区

中上寒武—奥陶系灰岩含水层岩溶裂隙较发育,非均质性强。本文利用信息复合技术对其进行垂向和平面参数分区。

(1)垂向参数分区:本文结合瞬变电磁物探资料和垂向岩溶发育规律对中上寒武—奥陶系灰岩含水层进行垂向参数分区。本次采用井下瞬变电磁测深法对-1煤深部采区进行勘探,包括5个工作面及7个井下测压孔。根据瞬变电磁勘探结果,将中上寒武—奥陶系含水层分为3层:Є-O₁、Є-O₂、Є-O₃。

岩溶发育是决定奥陶系灰岩渗透性的重要因素。根据钻孔揭露,奥陶系灰岩顶面以下30 m范围内岩溶较发育,岩溶形态包括溶孔、溶蚀裂隙和小溶洞,富含岩溶承压水。

根据物探资料和垂向岩溶发育规律,将研究区含水层分为5层:C₃t₁₋₂、C₂b、Є-O₁、Є-O₂、Є-O₃。根据区内22个钻孔资料及水文地质图,利用GMS建立了王河井田水文地质结构模型(图3)。

(2)平面参数分区:在充分分析裂隙、历年突水资料、物探资料及注浆钻孔资料的基础上,采用信息复合技术对中上寒武—奥陶系灰岩含水层进行平面

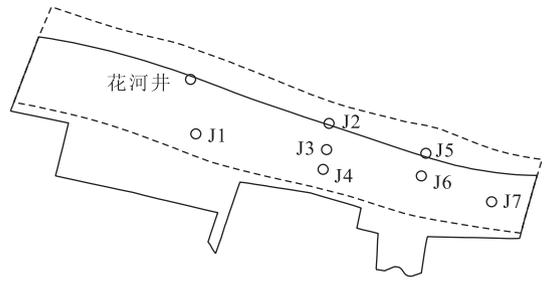


图2 局部模型计算范围

Fig. 2 Study area of the local model

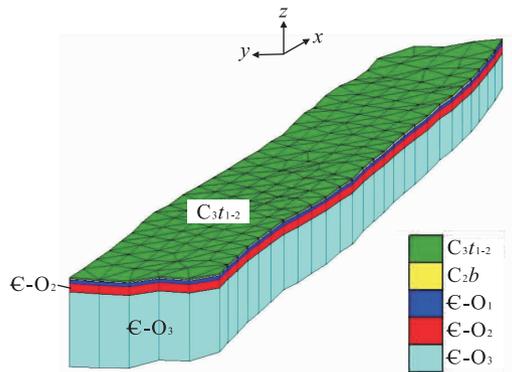


图3 水文地质结构模型

Fig. 3 Hydrogeological structure model

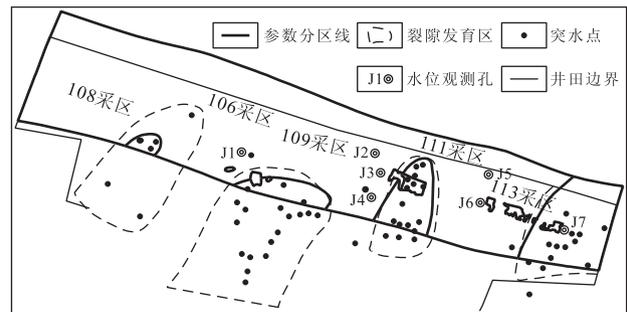


图4 突水点分布及参数分区

Fig. 4 Distribution map of water inrush points and division of hydrogeologic parameter

参数分区。①裂隙。王河矿在巷道掘进过程中,除偶尔揭露落差小于1 m断层外,揭露最多的是裂隙,裂隙的走向以北北东向为主,常成群密集出现,平面上呈条带状分布,形成4个裂隙发育带(图4)。裂隙带的发育方向为渗透性较强的方向。②突水资料。从王河煤矿突水点平面分布(图4)可以看出,突水点大多分布在4个条带状的区域,与岩溶裂隙发育带一致;突水点分布区的展布方向为北北东向,与矿井裂隙走向大致相同。突水点密集区也是渗透性较强区。③物探资料。探明了5个工作面的低阻异常区位置,

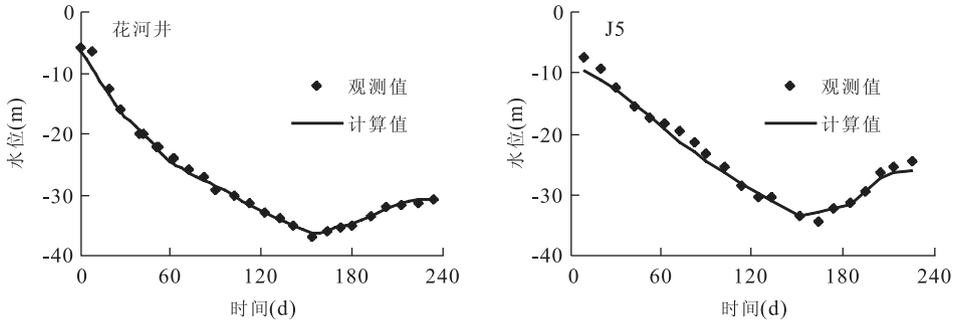


图 5 代表性观测井水位拟合曲线

Fig. 5 Fitting curve of water level in representative observation wells

低阻区附近岩层一般较为破碎、裂隙岩溶较为发育，渗透性较强。④注浆钻孔资料. 工作面突水后，王河煤矿对突水点附近奥陶系灰岩含水层进行了钻孔注浆封堵，注浆区为渗透性较强区。

根据信息复合原理，综合上述构造裂隙、历年突水资料、物探资料及注浆钻孔资料的分析结果，利用 ArcGIS 平台复合在一起，对研究区含水层进行水文地质参数分区(图 4)。

2.5 边界条件概化

侧向边界：计算区侧向边界全部概化为二类边界，边界流量为区域模型计算出的流量；顶部边界：计算区上部为太原组中段碎屑岩段隔水层，由中细粒砂岩、砂质泥岩及泥岩组成，平均厚度为 25 m，裂隙不发育，透水性差，概化为隔水边界；底部边界：计算区底部为中寒武统徐庄组页岩，概化为隔水边界。

2.6 源汇项概化

计算区源汇项主要是矿井排水和突水。

综上所述，将计算区水文地质条件概化为非均质各向异性三维非稳定地下水水流系统。

3 王河煤矿岩溶水数值模拟模型

根据上述水文地质概念模型，研究区地下水流数学模型可用下面偏微分方程的定解问题来描述：

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial H}{\partial z} \right) + \epsilon = S_s \frac{\partial H}{\partial t}, & (x, y, z) \in \Omega, t \geq 0; \\ H(x, y, z, t) |_{t=0} = H_0(x, y, z), & (x, y, z) \in \Omega; \\ K_n \frac{\partial H}{\partial n} |_{S_2} = q(x, y, z, t), & (x, y, z) \in S_2, t \geq 0. \end{cases} \quad (1)$$

式中： Ω 表示模拟渗流区域； (x, y, z) 表示空间位置坐标； t 表示时间(d)； $H(x, y, z, t)$ 为模拟渗流区内地下水位(m)； K 为含水层渗透系数(m/d)； S_s 为含水层

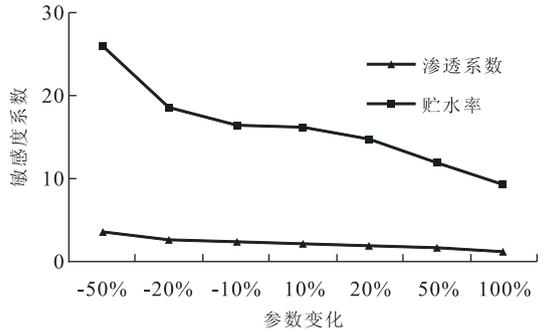


图 6 敏感度系数

Fig. 6 Sensitivity coefficient

的贮水率(m^{-1})； ϵ 为源汇项，主要是矿井排水； $H_0(x, y, z)$ 表示初始时刻(当 $t=0$ 时)渗流区内及边界上的地下水位(m)； S_2 表示二类边界； K_n 为边界法线方向的渗透系数(m/d)； \vec{n} 为边界外法线方向； q 是计算区二类边界上的单位面积流量($m^3 \cdot d^{-1} \cdot m^{-2}$)。

采用矩形网格剖分，首先以 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 进行剖分，然后在部分工作面和物探工作面以 25 m 和 50 m 为间距进行加密。水文地质参数初值根据区域模型的识别和验证结果确定。选择 2008-05-01~2009-01-01 作为局部模型的识别和验证时段。代表性观测孔的水位拟合图见图 5。

为了比较含水层不同的水文地质参数在水流模型中的作用，同时最大限度地降低不确定性因素对模型质量的影响，本文通过敏感度分析对模型的可靠性进行评价。敏感度系数计算公式如下：

$$X_{i,k} = \frac{h(a_k + \Delta a_k) - h(a_k)}{\Delta a_k / a_k}, \quad (2)$$

式中： $X_{i,k}$ 为地下水位 h 对第 k 个参数在第 i 个观测点上的敏感度系数； a_k 为第 k 个参数值； Δa_k 为参数值的变化； $h(a_k)$ 和 $h(a_k + \Delta a_k)$ 分别为参数变化前后的地下水位。

本文计算了渗透系数和贮水率对地下水位的敏

敏感度系数. $\Delta a_k/a_k$ 取为 $\pm 10\%$ 、 $\pm 20\%$ 、 $\pm 50\%$ 、 100% . 敏感度分析结果见图 6.

由图 6 可以看出, 贮水率对地下水水位的影响很大, 渗透系数对地下水水位的影响较小. 因此, 在参数识别时要分清主次, 这样可以减少模型识别的工作量, 提高模型的精度, 减少模型的不确定性对矿井涌水量预测结果的影响.

4 矿井涌水量预测

据调查, 王河矿近期准备开采东翼 111070 工作面、113090 工作面、113110 工作面和 113120 工作面.

为保证安全, 煤矿开采时, 水压必须降到安全水头以下. 由突水系数公式, 按下式计算理论安全水压:

$$P = T_s \cdot M, \quad (3)$$

式中: P 为理论安全水压 (MPa); T_s 为突水系数 (MPa/m); M 为有效隔水层厚度 (m).

王河井田煤层底板隔水层本溪组泥岩平均厚度为 9 m, 最小厚度为 4.2 m, 最大厚度为 20.5 m. 在开采影响下, 底板隔水层会发生破坏. 因此, 本溪组泥岩有效隔水层厚度定为 4 m.

根据王河煤矿 2005—2008 年典型突水事件资料, 结合全国煤矿经验值, 将王河煤矿—50~

—200 m 开采标高下的临界突水系数定为 0.06 MPa/m.

将 $T_s=0.06$ MPa/m 和 $M=4$ m 代入式(3)可得, $P=0.24$ MPa. 根据近期开采工作面的煤层底板标高, 计算其安全水位(表 1).

预测模型的初始时刻为 2009—01—01, 预测期为 1.5 a. 首先在区域模型中, 降水量取多年平均降水量, 矿井排水量取各煤矿正常涌水量实测值, 预测地下水流场, 得到局部模型的边界流量. 然后, 给定疏干排水量, 运用局部模型对开采范围内水位降到安全水位所需要的疏干时间进行预测. 疏干排水量与疏干时间的关系见表 1.

将疏干区边界作为定水头边界, 预测稳定条件下的矿井正常涌水量和最大涌水量(表 2).

从涌水量预测结果可以看出, 研究区中上寒武—奥陶系含水层中的水是可以疏降的, 通过采取疏水降压措施进行安全开采是可行的.

5 结论

(1) 本文采用建立区域模型和局部模型的方法解决边界条件概化难题, 利用大尺度的区域模型为小尺度的局部模型提供边界条件, 准确刻画了王河井田的边界条件, 保证了王河煤矿矿井涌水量预测的正确性与精确度. (2) 采用信息复合技术对煤矿充水含水层进行垂向和平面水文地质参数分区, 综合利用了裂隙、历年突水资料、物探资料及注浆钻孔资料, 科学、准确地刻画了岩溶含水介质的非均质性. 在此基础上, 建立了精细的矿井涌水量数值模拟模型. (3) 矿井涌水量预测结果表明, 开采 111070 工作面时, 正常涌水量为 490 m³/h, 最大涌水量为 690 m³/h; 开采 113090 工作面时, 正常涌水量和最大涌水量分别为 350, 490 m³/h; 开采 113110 工作面时, 正常涌水量和最大涌水量分别为 560 和 790 m³/h; 开采 113120 工作面时, 正常涌水量和最大涌水量分别为 590, 830 m³/h. 该结果可为王河煤矿矿井水害防治提供科学依据.

表 1 疏干排水量与疏干时间

Table 1 Water discharge and time when dewatering

开采工作面	底板标高 (m)	安全水位 (m)	疏干排水量 (m ³ /h)	疏干时间 (d)
111070	-86.5	-62.5	540	172
			1 080	36
			540	122
113090	-95	-71	540	122
			1 080	31
			540	439
113110	-110	-92	540	439
			1 080	116
			1 620	52
113120	-120	-102	540	472
			1 080	116
			1 620	53

表 2 正常涌水量和最大涌水量预测结果 (m³ · h⁻¹)

Table 2 The forecasting normal and maximum mine discharge

开采工作面	111070	113090	113110	113120
正常涌水量	490	350	560	590
最大涌水量	690	490	790	830

References

Bochenska, T., Fiszler, J., Kalisz, L. M., 2000. Prediction of groundwater inflow into copper mines of the Lubin Głogów Copper district. *Environmental Geology*, 39 (6): 587—594. doi:10.1007/s002540050470

Cui, G. Z., Zhu, Y. F., 1985. On the problem of boundary

condition in karst ground water system forecasting. *Carsologica Sinica*, (1, 2): 49—57 (in Chinese with English abstract).

Leake, S. A., Lawson, P. W., Lilly, M. R., et al., 1998. Assignment of boundary conditions in embedded ground water flow models. *Ground Water*, 36(4): 621—625. doi:10.1111/j.1745-6584.1998.tb025836.x

Rapantova, N., Grmela, A., Vojtek, D., et al., 2007. Ground water flow modelling applications in mining hydrogeology. *Mine Water and the Environment*, 26(4): 264—270. doi:10.1007/s10230-007-0017-1

Tsang, C. F., 2000. Modeling groundwater flow and mass transport in heterogeneous media: issues and challenges. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 25(5): 443—450 (in Chinese with English abstract).

Wu, Q., Chen, M. Y., Tian, K. M., et al., 1992. The research of a para-three-dimensional numerical model for forecasting water inflow in mine in the coalfield of North China. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 17(1): 87—94 (in Chinese with English abstract).

Wu, Q., Jiang, Z. Y., Sun, D. Y., et al., 2000. Condition of water burst and dynamic forecast of inflow in Donghuantuo mine. *Coal Geology & Exploration*, 28(6): 32—35 (in Chinese with English abstract).

Xue, Y. Q., Wu, J. C., Xie, C. H., et al., 1996. Numerical simulation of ground water drainage for Yuanbaoshan opencast coal mine. *Journal of China Coal Society*, 21(3): 255—260 (in Chinese with English abstract).

Yin, H. Y., Wei, J. C., Liu, T. B., et al., 2008. Evaluation of

water inrush in seam floor based on multi-originated information complex. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 27(2): 6—9 (in Chinese with English abstract).

Zhang, H. S., Xue, G. W., Shi, X. W., et al., 2009. Prediction of water inrush from coal seam floor confined based on geo-information composite overlay analysis. *Journal of China Coal Society*, 34(8): 1100—1104 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

崔光中, 朱远峰, 1985. 论岩溶水系统预报时边界条件问题. *中国岩溶*, (1, 2): 49—57.

Tsang, C. F., 2000. 非均质介质中地下水流动与溶质运移模拟——问题与挑战. *地球科学——中国地质大学学报*, 25(5): 443—450.

武强, 陈明佑, 田开铭, 等, 1992. 中国华北型煤田矿坑涌水量预测的“准三维”数值模型研究. *地球科学——中国地质大学学报*, 17(1): 87—94.

武强, 江中云, 孙东云, 等, 2000. 东欢坨矿顶板涌水条件与工作面水量动态预测. *煤田地质与勘探*, 28(6): 32—35.

薛禹群, 吴吉春, 谢春红, 等, 1996. 元宝山露天煤矿地下水疏干数值模拟. *煤炭学报*, 21(3): 255—260.

尹会永, 魏久传, 刘同彬, 等, 2008. 基于多源信息复合的煤层底板突水评价. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 27(2): 6—9.

张和生, 薛光武, 石秀伟, 等, 2009. 基于地学信息复合叠置分析对煤层底板突水的预测. *煤炭学报*, 34(8): 1100—1104.