

基于多元非线性回归分析的露天煤矿涌水量预测

何 保¹,李振南¹,赵世杰²

(1.辽宁工程技术大学 矿业学院,辽宁 阜新 123000;2.辽宁工程技术大学 优化与决策研究所,辽宁 阜新 123000)

摘要:为准确预测元宝山露天煤矿涌水量,提高煤矿生产安全系数,基于矿区多降雨量和煤炭产量实测数据,以降雨量和煤炭产量为涌水量影响因子,运用水文地质比拟法和多元非线性回归分析法,分别建立矿区涌水量预测模型,通过对比分析,确定更精确的预测方法。研究结果表明:水文地质比拟法的比拟值与涌水量实测值相差较大,二者相关系数为-0.719,呈负相关,预测精度低;而多元非线性回归分析法的涌水量预测值与实测值相关系数达0.946,显著性水平检验 R^2 为0.894,能解释涌水量89.4%的变异,预测更精确,可作为今后矿区涌水量预测的依据,指导矿山安全生产。

关键词:元宝山露天煤矿;涌水量;水文地质比拟法;多元非线性回归分析法

中图分类号:TD742 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2018)05-0125-05

Prediction on water inflow of surface mine based on multi-element nonlinear regression analysis

HE Bao¹, LI Zhennan¹, ZHAO Shijie²

(1. School of Mining Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;

2. Institute of Optimization and Decision, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: In order to accurately predict the mine water inflow from Yuanbaoshan Surface Mine and to improve the safety coefficient of the coal mine production, based on the site measured data of several years' rainfalls and coal productions in the mining area and the rainfall and coal production as the impact factors of the mine water inflow, a hydrogeologic analogy method and multi-element nonlinear regression analysis method was applied to individually establish the water inflow prediction model of the mining area. With the comparison analysis, a more accurate prediction method could be determined. The study results showed that the analogy value of the hydrogeologic analogy method would have a high difference to the site measured value of the water inflow, the correlation coefficient between the two values was -0.719 and was a negative correlation and the prediction accuracy was low. But the correlation coefficient between the predicted value of the water inflow obtained by the multi-element nonlinear regression analysis method and the site measured value was 0.946, the significance level test R^2 was 0.894 and could explain the variation of the 89.4% water inflow. Thus the prediction would be more accurate and could be the basis to the prediction of the water inflow in the late mining area and to guide the mine safety production.

Key words: Yuanbaoshan Surface Mine; water inflow; hydrogeologic analogy method; multi-element nonlinear regression analysis

0 引言

矿井涌水是直接关系矿山安全的重大问题,对矿区涌水的预测及其控制一直都是矿山安全管理的重点^[1-2]。随着自然科学、数学及计算机的迅速发展,一些新的理论被不断引入矿井涌水量预测,并确

立了确定性分析法和非确定性分析法,即数理统计法和数值模拟法等两大类预测方法,为矿井涌水量的研究奠定了一定的理论基础^[3-5]。近年来,许多学者在前人研究的基础上,对矿井涌水量预测等方面的问题进行深入研究,对涌水量的预测具有宝贵的参考价值。其中,王其虎等^[6]建立了基于时间序

收稿日期:2017-12-11;责任编辑:王晓珍 DOI:10.13199/j.cnki.est.2018.05.020

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51374121)

作者简介:何 保(1963—),男,辽宁锦州人,副教授,硕士研究生导师,博士。E-mail:1142001723@qq.com

引用格式:何 保,李振南,赵世杰.基于多元非线性回归分析的露天煤矿涌水量预测[J].煤炭科学技术,2018,46(5):125-129.

HE Bao, LI Zhennan, ZHAO Shijie. Prediction on water inflow of surface mine based on multi-element nonlinear regression analysis [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(5): 125-129.

列分析的新型大气降水-矿坑涌水传递函数模型,发现不同滞后期大气降水对矿坑涌水具有明显的影响,从而更精确地预测矿井涌水量;黄存捍等^[7]基于非线性时间序列,将其最小嵌入维数作为支持向量机的输入节点,并据此建立一种新的矿井涌水量预测模型,结果发现:嵌入维数为4时,矿井涌水量的预测值与观测值较一致,预测精度最高;段俭君等^[8]首次采用相关分析法对塔山煤矿矿井涌水量与累计煤炭产量、累计掘进进尺及累计采空区面积等影响因子的相关性进行研究,并分别建立矿井涌水量的线性回归模型进行对比,提高了涌水量的预测精度。杨海军等^[9]系统地总结了国内外煤矿涌(突)水预测的主要进展,对判别涌(突)水水源和预测涌水量的各种方法进行深入探讨,为本次涌水量预测方法的选择提供一定的指导意见。笔者在掌握元宝山露天煤矿及相邻矿区多降雨量和煤炭产量实测数据的基础上,采用多元非线性回归分析法和水文地质比拟法预测矿区涌水量,通过对比分析,确定更精确的涌水量预测方法,为合理制定采掘方案、设计疏干排水系统、防止重大水害等工作提供可靠的参考依据,以更高效地指导矿山设计和安全生产工作^[10-12]。

1 矿区涌水量预测

1.1 预测方法的选择

准确地预测矿区涌水量对指导矿区安全生产和制定矿区水防治措施等具有重要意义^[13-14]。而对于不同矿区,水文地质特征及涌水量的影响因素不同,故选择预测方法时要根据矿区具体情况而定。笔者基于矿区多降雨量和煤炭产量以及相邻矿区涌水量的相关实测数据,选用水文地质比拟法和多元非线性回归分析法对矿区涌水量进行预测,并对2种预测结果进行对比评价,确定更精确的涌水量预测方法,为矿区的安全生产提供指导意见。

1.2 水文地质比拟法

1.2.1 比拟过程

水文地质比拟法预测涌水量适用于水文地质条件相似、且有多年与涌水量相关的观测数据的矿区^[15]。本矿区与现生产的风水沟煤矿相邻,煤系地层属同一沉积单元,水文地质条件相似,故本矿区的平均含水系数与风水沟煤矿的相近。根据1995—2005年风水沟煤矿涌水量和年煤炭产量的实测数

据(表1),风水沟煤矿1996—2005年中最大含水系数为2.038,最小含水系数为1.235,平均含水系数为1.477,通过SPSS软件的相关分析,确定风水沟煤矿涌水量与其煤炭年产量线性相关,故采用水文地质比拟法估算矿区涌水量。确定矿区涌水量计算公式为:

$$Q_t = K_p P_t \quad (1)$$

式中: Q_t 为矿区第 t 年的涌水量, 10^4 m^3 ; P_t 为矿区第 t 年的煤炭开采量, 10^4 t ; K_p 为含水系数, m^3/t 。

表1 风水沟煤矿的十年涌水情况

Table1 The water inflow situation of Fengshuigou coal mine in ten years

| 年份 | 年煤炭产量/ (10^4 t) | 含水系数/ ($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$) | 涌水量/ (10^4 m^3) |
|------|--------------------------------|---|--------------------------------|
| 1996 | 105.3 | 1.854 | 195.26 |
| 1997 | 114.1 | 1.272 | 145.15 |
| 1998 | 111.3 | 1.677 | 186.68 |
| 1999 | 100.8 | 2.038 | 205.42 |
| 2000 | 122.8 | 1.271 | 156.10 |
| 2001 | 125.6 | 1.315 | 165.13 |
| 2002 | 123.1 | 1.386 | 170.53 |
| 2003 | 135.7 | 1.405 | 190.64 |
| 2004 | 141.5 | 1.317 | 186.32 |
| 2005 | 153.6 | 1.235 | 189.64 |
| 平均 | 123.4 | 1.477 | 179.09 |

1.2.2 验证与结果分析

根据公式(1)得出的本矿区1995—2012年矿区涌水量比拟值与实测值的相差较大,且两者的差值逐年增加(图1)。例如2002年涌水量的比拟值和实测值分别为 $2.56 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $1.58 \times 10^8 \text{ m}^3$,2005年涌水量的比拟值和实测值分别为 $5.39 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $1.39 \times 10^8 \text{ m}^3$,误差较大,故此方法不能用于本矿区涌水量预测。

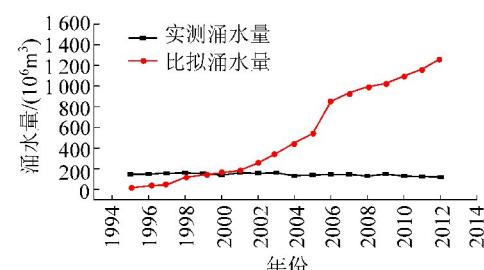


图1 元宝山露天煤矿实测涌水量与比拟涌水量对比

Fig.1 Comparison of the measured and analoged values of mine water inflow of Yuanbaoshan Surface Mine

究其原因,由图1可以看出,1995—2004年涌水量比拟值与实测值差值较小,且图像近似中心对称,而2004年之后,涌水量比拟值产生突变,与实测值差值逐年增加,且通过SPSS软件相关分析得出两者相关系数为-0.719,呈负相关^[16]。由此说明在本次比拟过程中,可能忽略了一个或多个对涌水量产生抑制作用的因素,导致比拟结果不理想。其抑制因素可能包括降雨量、煤炭开采方式,以及其他水文地质条件等。因此,为了更精确地预测矿区涌水量,选用操作简便、考虑的影响因素全面、精度较高的预测方法是关键。

1.3 多元非线性回归分析法

1.3.1 回归分析过程

多元非线性回归分析法适用于解释一个变量与多个变量间的非线性关系。李建林等^[17]也发现矿井涌水与煤炭开采、充水因素等影响因子具有典型的非线性运动特征。涌水量预测过程中,部分学者^[8,18]选用一元或多元线性回归分析来预测矿区涌水量,而笔者通过SPSS软件分析得出,涌水量与年煤炭产量间并非线性关系,而是近似某种曲线关系,故采用非线性回归分析法预测涌水量比较合理。

笔者以元宝山露天煤矿1995—2012年实测的年煤炭产量、降雨量和年矿区涌水量作为基础系列数据,利用SPSS软件对各变量数据进行相关性分析和回归分析得出:矿区降雨量和年煤炭产量是影响矿区涌水量的主要因素,影响矿区涌水量的因素从小到大依次为年煤炭产量、前1降雨量、当降雨量和前2降雨量,且矿区涌水量与当降雨量、前1降雨量和前2降雨量呈正相关,与年煤炭产量呈指数相关,显著水平均小于置信度0.05,随着煤炭的长期开采,矿区涌水量逐渐趋于稳定。故在此分析基础上,设矿区涌水量为因变量,前2降雨量、前1降雨量、当降雨量和年煤炭产量为自变量,建立多元非线性回归模型为:

$$Q_t = b_0 + b_1 L_{t-2} + b_2 L_{t-1} + b_3 L_t + b_4 \times (1 - e^{-P_t/b_5}) + \varepsilon, \varepsilon \sim N(0, \sigma^2) \quad (2)$$

式中: Q_t 为元宝山露天煤矿第 t 年的矿区涌水量, 10^6 m^3 ; b_i 为参数, $i = 0, 1, 2, 3, 4, 5$; L_{t-2} 为第 t 年前2年的降雨量, mm ; L_{t-1} 为第 $t-1$ 年前1年的降雨量, mm ; L_t 为第 t 年的降雨量, mm ; P_t 为第 $t-2$ 年的煤炭产量, 10^4 t ; ε 为随机误差(包括人为因素、测量工具及其他水文地质参数所产生的误差),

10^6 m^3 。

根据SPSS软件回归分析可得多元非线性方程式的参数估计值、估计值的标准误差,以及参数估计的相关系数矩阵和方差分析,见表2、表3、表4。

表2 参数估计值

Table 2 Parameters estimation

| 参数 | 估计 | 标准误差 | 95%置信区间 | |
|-------|---------|--------|----------|---------|
| | | | 下限 | 上限 |
| b_0 | -62.153 | 52.630 | -176.823 | 52.517 |
| b_1 | 0.448 | 0.069 | 0.299 | 0.597 |
| b_2 | 0.040 | 0.068 | -0.109 | 0.189 |
| b_3 | 0.105 | 0.078 | -0.065 | 0.275 |
| b_4 | 21.209 | 10.984 | -2.722 | 45.140 |
| b_5 | 123.842 | 77.385 | -44.767 | 292.450 |

表3 参数估计值的相关性

Table 3 Correlation of parameter estimates

| | b_0 | b_1 | b_2 | b_3 | b_4 | b_5 |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| b_0 | 1.000 | -0.646 | -0.597 | -0.773 | -0.939 | -0.612 |
| b_1 | -0.646 | 1.000 | 0.073 | 0.305 | 0.510 | 0.597 |
| b_2 | -0.597 | 0.073 | 1.000 | 0.177 | 0.554 | 0.388 |
| b_3 | -0.773 | 0.305 | 0.177 | 1.000 | 0.771 | 0.368 |
| b_4 | -0.939 | 0.510 | 0.554 | 0.771 | 1.000 | 0.455 |
| b_5 | -0.612 | 0.597 | 0.388 | 0.368 | 0.455 | 1.000 |

表4 方差分析

Table 4 Analysis of variance

| 源 | 平方和 | 自由度 | 均方 |
|--------|-------------|-----|------------|
| 回归 | 375 602.546 | 6 | 62 600.424 |
| 残差 | 312.454 | 12 | 26.038 |
| 未更正的总计 | 375 915.000 | 18 | — |
| 已更正的总计 | 2 954.944 | 17 | — |

因变量:年涌水量

$$R^2 = 1 - (\text{残差平方和}) / (\text{已更正的平方和}) = 0.894$$

由非线性回归分析的各统计量(表4)可知,回归平方和比残差平方和相差很大,且显著性水平检验 R^2 值为 0.894,能够解释涌水量 89.4% 的变异,说明本次回归分析的预测效果良好。故通过多元非线性回归分析可较精确地确定元宝山露天煤矿涌水量与各降雨量、煤炭产量的非线性关系,所建立预测模型的多元非线性回归方程式为

$$Q_t = -62.153 + 0.448L_{t-2} + 0.04L_{t-1} + 0.105L_t + 21.209(1 - e^{-P_t/123.842}) \quad (3)$$

1.3.2 回归验证与预测

1995—2012年矿区降雨量、煤炭产量、矿区涌水量实测值和预测值的变化情况如图2所示。由图2可知,年矿区涌水量预测值与实测值相近。其中,2005年的实测涌水量为 $1.39 \times 10^8 \text{ m}^3$,预测涌水量为 $1.40 \times 10^8 \text{ m}^3$,两者差值较小。又由SPSS软件相关分析得出,年矿区涌水量预测值与实测值相关系数达0.946,呈高度相关^[11],显著性水平检验 R^2 为0.894,拟合度高,预测更精确。因此,上述多元非线性回归分析模型适用于本矿区涌水量的预测。

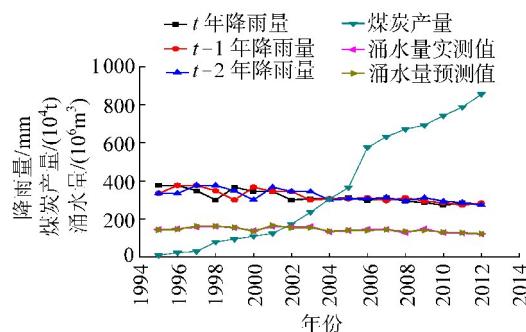


图2 元宝山露天煤矿降雨量、煤炭产量、矿区涌水量实测值和预测值的对比

Fig.2 Comparison of the rainfall, coal production, and the measured and simulated values of mine water inflow of Yuanbaoshan Surface Mine

1.4 对比评价与讨论

在涌水量预测过程中,水文地质比拟法和多元非线性回归分析法的原理和考虑影响因素不同,导致预测结果不同。其中,水文地质比拟法原理虽然简单,但受水文地质条件等因素的严格制约,具有一定的局限性,且本次比拟法的实测数据资料有限,仅研究了涌水量与煤炭开采量、含水系数之间的关系,忽略了其他水文地质条件等因素的影响,导致比拟结果不理想,预测精度低。而在多元非线性回归分析过程中,由于对矿区各年的煤炭产量和降雨量都有比较具体的资料,这为寻找矿区涌水量与煤炭产量、降雨量之间的关系提供了可靠的数据支持,同时多元非线性回归分析法对于数据的处理主要依靠SPSS统计分析软件,避免了人工运算的误差,且操作过程简单直接,并考虑水文地质参数及其他矿区涌水量影响因素的对预测结果的干扰,预测精度高,可较精确地依据现有数据预测矿区未来涌水量。故多元非线性回归分析法更适用于本矿区涌水量的

预测。

2 结论与建议

1)元宝山露天煤矿涌水量预测结果显示,水文地质比拟法的比拟涌水量与实测涌水量在1995—2004年差值较小,而2004年之后,两者差值逐年增加,且二者相关系数为-0.719,呈负相关,可能忽略了某些抑制因素对涌水量的影响,局限性较大,预测精度较低。而多元非线性回归分析法显著性水平检验 R^2 为0.894,预测涌水量更接近矿区实测涌水量,且两者相关系数达0.946,预测精度高,可为矿山设计和安全生产提供理论指导,实用价值大。故多元非线性回归分析法应用范围更广泛,建议今后使用多元非线性回归分析法预测涌水量。

2)由于矿区涌水量的影响因素较多,因此在今后的涌水量预测工作中,要综合考量和分析相关影响因素,并结合使用多种不同原理的预测方法,更高效地指导矿山设计和安全生产工作,实现安全效益与经济效益的统一。

参考文献(References):

- [1] 杨永国,陈玉华.矿井涌水量混沌特征与预测[J].地球科学:中国地质大学学报,2009,34(2):258-262.
YANG Yongguo, CHEN Yuhua. Chaotic characteristics and prediction for water inrush in mine [J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2009, 34(2):258-262.
- [2] 邢冬梅,叶义成,赵雯雯.我国矿山透水事故的统计分析及安全管理对策[J].金属矿山,2010(6):178-181.
XING Dongmei, YE Yicheng, ZHAO Wenwen. Statistical analysis and safety management counter measure of mine water inrush accident in China [J]. Metal Mine, 2010(6):178-181.
- [3] 朱宏军.鸳鸯湖矿区矿井涌水量预测方法研究[D].北京:煤炭科学研究总院,2014.
- [4] 杜敏铭,邓英尔,许模.矿井涌水量预测方法综述[J].四川地质学报,2009,29(1):70-73.
DU Minming, DENG Ying'er, XU Mo. Review of methodology for prediction of water yield of mine [J]. Acta Geologica Sichuan, 2009, 29(1):70-73.
- [5] 汪伟,罗周全,王益伟,等.基于混沌理论的矿井涌水量预测研究[J].中国安全科学学报,2013,23(4):51-56.
WANG Wei, LUO Zhouquan, WANG Yimei, et al. Research into mine water inflow forecast based on chaotic theory [J]. China Safety Science Journal, 2013, 23(4):51-56.
- [6] 王其虎,叶义成,刘艳章,等.矿坑涌水对大气降水的响应分析及预测[J].安全与环境学报,2012,12(1):182-186.
WANG Qihu, YE Yicheng, LIU Yanzhang, et al. Response analysis and forecasting of the pit-water due to the rainfall [J]. Journal of Safety and Environment, 2012, 12(1):182-186.

- Safety and Environment, 2012, 12(1): 182-186.
- [7] 黄存捍, 冯 涛, 王卫军, 等. 基于分形和支持向量机矿井涌水量的预测 [J]. 煤炭学报, 2010, 35(5): 806-810.
- HUANG Cunhan, FENG Tao, WANG Weijun, et al. Mine water inrush prediction based on fractal and support vector machines [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(5): 806-810.
- [8] 段俭君, 徐会军, 王子河. 相关分析法在矿井涌水量预测中的应用 [J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(6): 114-116, 76.
- DUAN Jianjun, XU Huijun, WANG Zihe. Correlational analysis method applied to prediction of mine water inflow quantity [J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(6): 114-116, 76.
- [9] 杨海军, 王广才. 煤矿突水水源判别与水量预测方法综述 [J]. 煤田地质与勘探, 2012, 40(3): 48-54, 58.
- YANG Haijun, WANG Guangcui. Summarization of methods of distinguishing sources and forecasting inflow of water inrush in coal mines [J]. Coal Geology & Exploration, 2012, 40(3): 48-54, 58.
- [10] 宋桂军, 梁 冰, 王俊光, 等. 长沟峪煤矿矿井涌水量预测研究 [J]. 煤炭技术, 2008, 27(11): 81-83.
- SONG Guijun, LIANG Bing, WANG Junguang, et al. Prediction study on mine inflow in Changgouyu Coal Mine [J]. Coal Technology, 2008, 27(11): 81-83.
- [11] 黄 欢. 矿井涌水量预测方法及发展趋势 [J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(S1): 127-130.
- HUANG Huan. Prediction method of mine inflow and its development [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(S1): 127-130.
- [12] 陈酩知, 刘树才, 杨国勇, 等. 矿井涌水量预测方法的发展 [J]. 工程地球物理学报, 2009, 6(1): 68-72.
- CHEN Mingzhi, LIU Shucai, YANG Guoyong, et al. The development of mining water inflow predict method [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2009, 6(1): 68-72.
- [13] 李 平, 郭会荣, 吴孔军, 等. 王河煤矿矿井涌水量数值模拟及预测 [J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2011, 36(4): 755-760.
- LI Ping, GUO Huirong, WU Kongjun, et al. Numerical simulation and forecast of mine discharge in Wanghe Coal Mine [J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2011, 36(4): 755-760.
- [14] 王雪冬, 董 慧. 基于广义回归神经网络的矿井涌水量预测 [J]. 中国安全生产科学技术, 2014, 10(11): 90-93.
- WANG Xuedong, DONG Hui. Prediction of water yield in mine based on generalized regression neural network [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2014, 10(11): 90-93.
- [15] 虎维岳, 闫 丽. 对矿井涌水量预测问题的分析与思考 [J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(1): 13-18, 38.
- HU Weiyue, YAN Li. Analysis and consideration on prediction problems of mine water inflow volume [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(1): 13-18, 38.
- [16] 李洁明, 祁新娥. 统计学原理 [M]. 上海: 复旦大学出版社, 2007: 354-371.
- [17] 李建林, 张洪云, 冯有利, 等. 煤矿断层构造复杂程度的非线性分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2011, 22(4): 69-73.
- LI Jianlin, ZHANG Hongyun, FENG Youli, et al. Nonlinear analysis of complexity of faults structures in coal mines [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2011, 22(4): 69-73.
- [18] 江 峰, 刘坡拉, 武亚遵, 等. 基于多元相关分析法的岩溶隧道涌水量预测 [J]. 安全与环境工程, 2015, 22(3): 162-168.
- JIANG Feng, LIU Pola, WU Yazun, et al. Prediction of the water inflow in karst tunnel based on multiple correlation analysis [J]. Safety and Environmental Engineering, 2015, 22(3): 162-168.

(上接第 124 页)

- 究 [D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2016.
- [16] 李 胜, 毕慧杰, 范超军, 等. 基于流固耦合模型的穿层钻孔瓦斯抽采模拟研究 [J]. 煤炭科学技术, 2017, 45 (5): 121-127.
- LI Sheng, BI Huijie, FAN Chaojun, et al. Simulation study of gas drainage with borehole passed through strata based on fluid-solid coupling [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45 (5): 121-127.
- [17] 刘 超, 李树刚, 薛俊华, 等. 基于微震监测的采空区覆岩高位裂隙体识别方法 [J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45 (4): 709-716.
- LIU Chao, LI Shugang, XUE Junhua, et al. Identification method of high fractured body for overlying strata in goaf based on micro-
- seismic monitoring technology [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45 (4): 709-716.
- [18] 马 巍, 梁 冰, 石占山, 等. 梯形破断顶板综放面高抽巷层位确定试验 [J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2016, 35(10): 1015-1019.
- MA Wei, LIANG Bing, SHI Zhanshan, et al. Experiment on the layer of highly-located drainage roadway of breaking roof in ladder-shape in fully mechanized caving face [J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2016, 35 (10): 1015-1019.
- [19] 张 村. 高瓦斯煤层群应力-裂隙-渗流耦合作用机理及其对卸压抽采的影响 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
- [20] 李 立. 采动影响下煤体瓦斯宏观尺度通道演化机理研究 [D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2016.