

# 关于一种基于现场实时数据驱动的煤与瓦斯突出预警方法专利

## 申诉材料

一种基于现场实时数据驱动的煤与瓦斯突出预警方法为我方自主独创研究方法，申请号:2021116143842 主要针对在煤与瓦斯突出预警方法的应用过程中，复杂的理论模型往往由于参数不能实时获取，难以实时指导现场应用这一问题。而现有的快速模型主要单纯依据统计学方法或人工智能算法，缺少统计学方法和人工智能算法融合的数学模型。

### 1、预警指标选择

煤与瓦斯突出是煤矿采掘过程中常发生的一种极其复杂的煤岩动力灾害，它是含瓦斯煤岩流体瞬间在采掘空间内时空演变的强烈而复杂的动力过程，突出产生的动力效应能够产生强大的能量造成设备损坏、人员伤亡，甚至诱发瓦斯爆炸等二次灾害，严重威胁矿井的安全生产。目前，专家学者普遍认为煤与瓦斯突出是应力、瓦斯及煤体物理力学性质综合作用的结果。煤与瓦斯突出是煤体从积聚能量、发展、破坏到释放能量的动态演变过程，可分为孕育、发动、发展和终止四个阶段。

(1) 突出孕育阶段。地应力是激发突出的主导，采掘作业开始后，采掘空间载荷转移至煤壁，煤壁地应力梯度增高并集中，推动瓦斯压力增高。此外，地应力变化影响煤体内部结构变化，控制瓦斯的赋存与运移，为煤岩体动力灾害发生提供能量。在此阶段，煤岩体会出现多种突出征兆，如闷雷声、瓦斯浓度忽大忽小、瓦斯涌出量异常等。

(2) 突出发动阶段。地应力和瓦斯联合作用促使煤体破碎失稳，推动突出的发展，瓦斯压力增加几倍到几十倍。煤体吸附瓦斯后产生膨胀变形，大量吸附状态的瓦斯进入解吸过程并参与突出，瓦斯膨胀能是瓦斯突出的主要能源。煤岩体内弹性势能、瓦斯内能、失稳煤岩体的重力势能等将失稳煤体破碎并抛出。

(3) 突出发展阶段。突出激发阶段会形成小的突出孔洞，在外界压力突然降低时，较高的瓦斯压力促使煤体内瓦斯快速释放，造成煤体破碎，高瓦斯压力梯度的瓦斯风暴搬运破碎煤体。突出的发展取决于煤的物理力学性质，突出孔顺畅促进突出的发展，反之则阻止突出继续发展。

(4) 突出终止阶段。当突出能量逐渐衰减至不能产生破坏煤体的能力，或者是突出孔洞受阻，地应力与瓦斯压力梯度骤降，不满足持续破坏失稳的条件时，瓦斯突出将停止。

通过煤与瓦斯突出演化过程可以发现：井下采掘活动会破坏煤层应力的原始平衡状态，地应力通过控制煤体孔隙率和渗透率的变化，影响着深部煤体中的瓦斯运移；采掘工作面周

围的瓦斯大小影响着煤体瓦斯压力分布及其梯度,决定瓦斯涌出量的大小。瓦斯涌出动态变化特征受到煤岩体应力、瓦斯压力、煤岩体透气性、煤体变形破裂程度等多种因素影响和控制,其变化规律与瓦斯突出危险性基本相符。

综上所述,瓦斯涌出量全程参与了煤与瓦斯突出的全过程,同时其参数值可以通过能够实时获取的在线监测参数巷道瓦斯浓度和巷道风速计算获取,如公式 1 所述。因此,该参数可以作为主要因素进行深度分析。

$$Q_s = 60Cv_sS \quad (1)$$

式中:  $Q_s$ —巷道瓦斯涌出量,  $\text{m}^3/\text{min}$ ;  $C$ —巷道瓦斯浓度, %;  $v_s$ —巷道风速,  $\text{m/s}$ ;  $S$ —测定点巷道横截面积,  $\text{m}^2$ 。

根据公式 (1), 瓦斯涌出量与瓦斯浓度、风速、巷道横截面积呈函数关系。通过选取掘进工作面回风巷瓦斯传感器, 回风巷巷道横截面积, 风速, 进行瓦斯突出的前兆特征规律分析工作。

为深入挖掘瓦斯涌出量变化所包含的信息, 可采用移动平均线、偏离率、离散率、波动率作为瓦斯涌出量动态变化的特征指标。

#### (1) 移动平均线

移动平均线主要是反映瓦斯涌出量时间序列数据的变化趋势, 表明采掘活动过程的动态工程扰动和瓦斯涌出量在一定时期内的变化状态 (上升、水平走向、下降), 趋势具有稳定的特点, 即趋势一旦确立, 就会延续一段时间, 直到外力迫使其改变这一状况, 否则趋势一直延续。

$$\bar{C}_n = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} C_i \quad (2)$$

式中,  $\bar{C}_n$  为  $n$  个瓦斯涌出量数据平均值;  $n$  为某时间段内序列记录数;  $C_i$  为序列中第  $i$  个记录的瓦斯涌出量。

#### (2) 偏离率

偏离率反映瓦斯涌出量实时时间序列数据偏移该时间周期瓦斯涌出量移动平均值的量, 偏离率考虑了该时间周期内由于煤层瓦斯含量、瓦斯压力、煤层透气性系数变化等因素所表现出的瓦斯涌出量变化情况。

$$A(n) = \frac{C_t - \bar{C}_n}{\bar{C}_n} \quad (3)$$

式中:  $C_t$  表示  $t$  时刻瓦斯涌出量;  $\bar{C}_n$  为  $n$  个瓦斯涌出量数据平均值。

#### (3) 离散率



离散率反映了瓦斯涌出量信号序列的离散程度，即各值偏离均值的程度。离散率越大，瓦斯涌出量变化幅度越大；反之越小。一定时间步长的瓦斯涌出量值的离散率表明了瓦斯涌出的变化程度。

$$\left. \begin{aligned} \mu &= \frac{1}{m} \sum_{t=1}^m C_t \\ B(m) &= \frac{1}{m-1} \sum_{t=1}^m (C_t - \mu)^2 \end{aligned} \right\} (4)$$

式中： $C_t$ 表示 $t$ 时刻瓦斯涌出量； $m$ 为某时间段内序列记录数。

#### (4) 波动率

变动率的描述包含两方面：一是序列的振动幅度，可通过振幅变化率  $R_{OSC}$  来表示，即在一定的时间间隔内，初始时刻瓦斯涌出量与末端时刻瓦斯涌出量之间的相对变化率；另一方面是序列的变化次数，可通过频次变化率  $R_{OFC}$  来表示，即在一定的时间间隔内瓦斯涌出量变化的次数。这两方面的综合，描述了瓦斯涌出量变化的实际情况。

$$R_{OSC}(n) = [(C_{Tmax} - C_{Tmin})/C_{Tmax}] (5)$$

式中： $R_{OSC}(n)$ 为 $n$ 时间段内的振幅变化率； $C_{Tmax}, C_{Tmin}$ 分别为时间间隔内瓦斯涌出量的最大值和最小值。

$$R_{OFC} = f(C_{(t-n)-t}) (6)$$

式中： $C_{(t-n)-t}$ 为从 $t-n$ 时刻起到 $t$ 时刻的瓦斯涌出量； $f()$ 表示计算变化次数。

在不同采煤掘进工艺条件下，正常采煤掘进工作面的瓦斯涌出量会在一定的范围内周期性波动，瓦斯涌出的移动平均线是一条平稳变化的水平线，瓦斯涌出量偏离率、离散率、波动率曲线均表现较为平稳。当瓦斯涌出量突然增大或减少时，瓦斯涌出量移动平均线、偏离率、离散率、波动率出现异常的变动情况。

选用均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)和平均绝对百分比误差(mean absolute percentage, MAPE)作为指标来衡量模型的预测准确度。RMSE 和 MAPE 反映预测瓦斯涌出量与实际瓦斯涌出量之间的偏差，其值越小，预测效果越好，其值越大，则失真度越高。MAPE 具有对异常值更好的鲁棒性，反映的是模型的整体预测效果，而 RMSE 更加强调了异常值对模型预测效果的影响，同时运用这两种指标可以更好的评估模型预测准确度。

计算公式分别为：

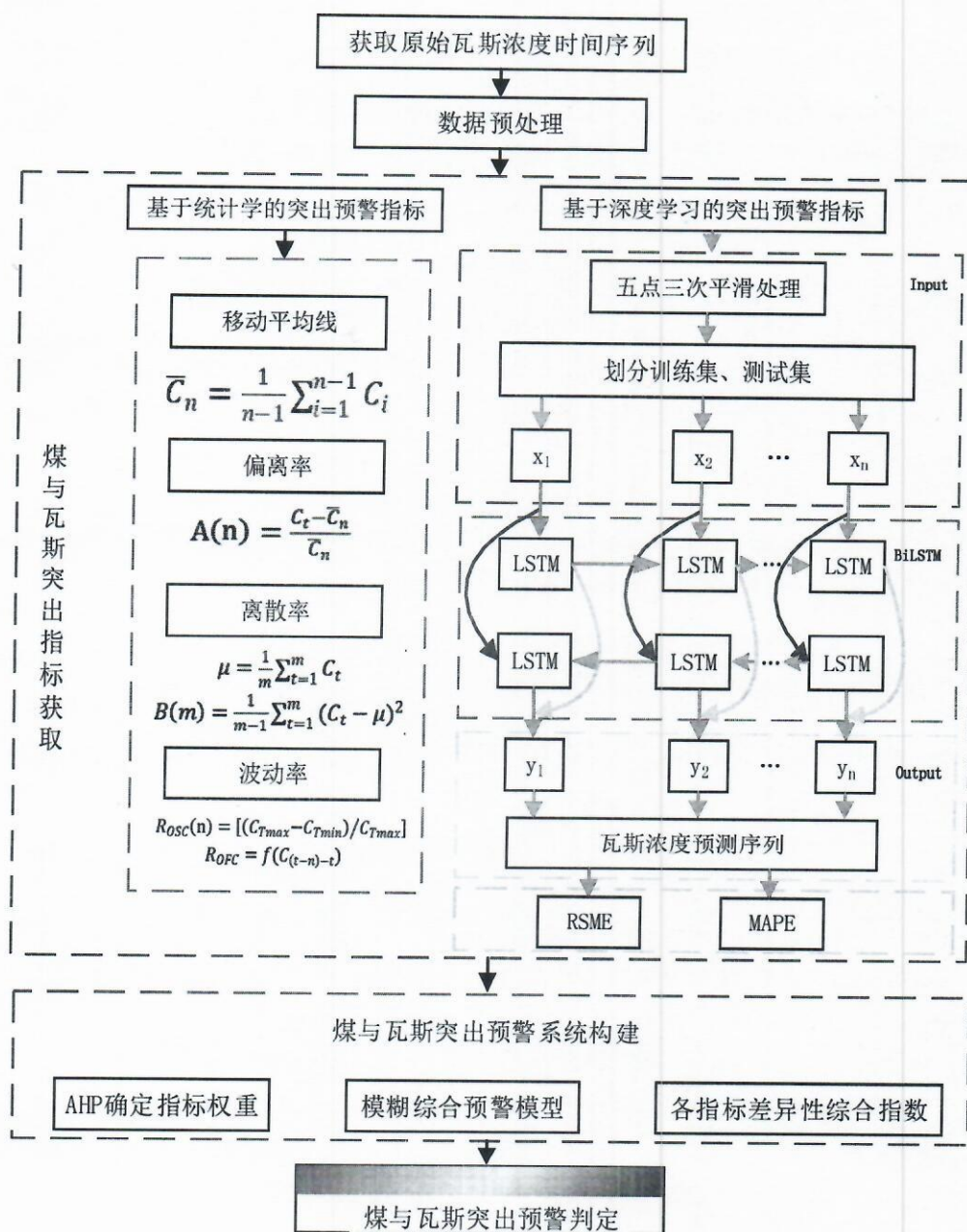
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_i - \hat{C}_i)^2} (7)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{C_i - \hat{C}_i}{C_i} \right| (8)$$

式中： $C_i$ 表示真实瓦斯涌出量； $\hat{C}_i$ 表示预测瓦斯涌出量； $n$ 表示样本数量。

## 2、预警系统构建

通过持续采集和监测掘进工作面回风巷的瓦斯传感器、风速传感器数据，去除干扰数据后，计算得出瓦斯涌出量，提取瓦斯涌出量变化值的移动平均线、偏离率、离散率、波动率作为特征指标，同时将过去一段时间正常生产掘进过程中采集到的数据输入基于 BiLSTM 神经网络模型中进行训练调优，使模型训练误差达到预定要求，建立正常生产情况下的数据模型；将新采集到新数据作为测试数据集输入到数据模型中，得到瓦斯涌出量预测值和损失值，结合瓦斯涌出量变化特征指标作为煤与瓦斯突出的预警指标；根据预警指标，构建模糊综合预警模型，计算各指标差异性综合指数，确定差异性阈值，实现煤与瓦斯突出危险程度评价和预警。





### 3、计算过程

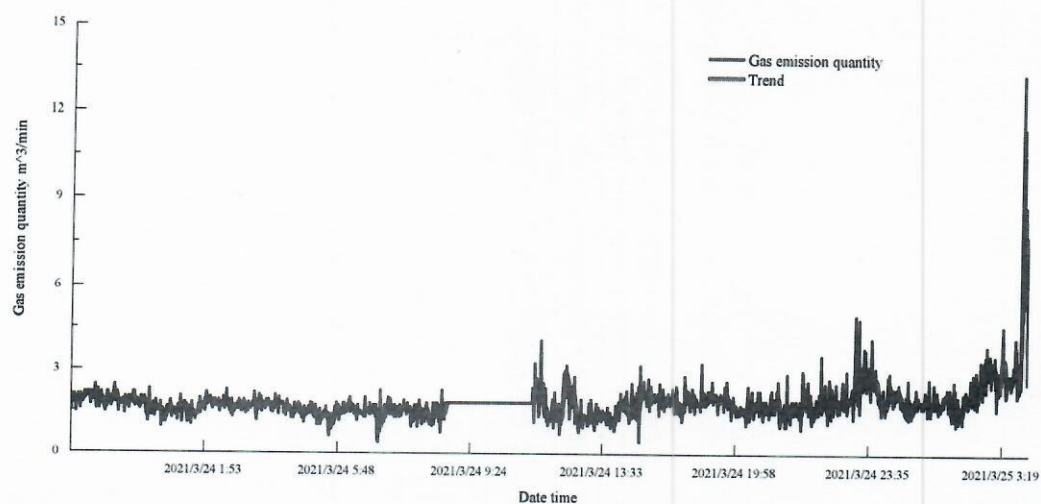
利用石港煤矿“3·25”煤与瓦斯突出事故数据进行方法的研究。事故发生地点为二采区 15210 进风巷掘进工作面，巷道为矩形断面，净高 3m、净宽 5m，采掘布置图如图 5 所示。选取 15210 进风掘进工作面事故发生前 1 个月安全监控数据进行数据挖掘与分析。采集到 43200 条瓦斯涌出量监测数据，整体上瓦斯涌出量随着采掘活动的进行起伏变化，事故发生前 4 天左右，瓦斯涌出量震荡频率明显增加，瓦斯涌出量异常变化，蕴含了煤与瓦斯突出的前兆信息，通过评价模型实现煤与瓦斯突出预测预警。

选取 2021 年 2 月 19 日到 3 月 20 日的瓦斯涌出量进行模型的学习训练，将 43200 条样本数据按照 0.8 比例划分训练集和测试集。模型运行结束后，将 3 月 21 日到事故发生前一刻的瓦斯涌出量数据加入到样本数据中，作为样本的测试集。将得到的损失值 RSME 和 MAPE，结合瓦斯涌出量时间序列的移动平均线、偏离率、离散率、波动率，全面反映突出前夕瓦斯涌出的变化异常情况。

针对石港煤矿“3·25”煤与瓦斯突出事故，选取 24 日 04 点-25 日 04 点的瓦斯涌出量监测数据，通过绘制移动平均线、偏离率、离散率、振幅变化率、变化频次曲线分析突出前夕瓦斯涌出量变化规律。

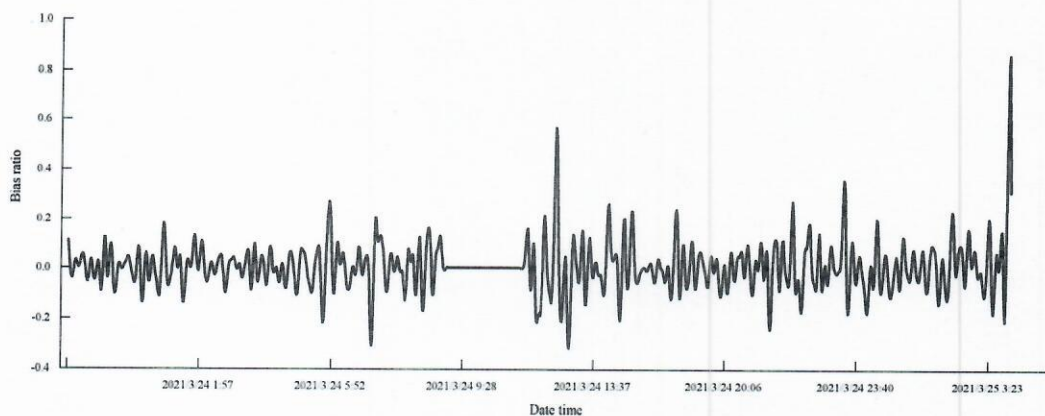
#### (1) 移动平均线

利用公式 (2) 选取 5min 为一个周期计算平均值，根据计算结果可以发现：突出前 24 小时-14 小时时间范围中瓦斯涌出量变化趋于相对平稳；突出前 12 小时，瓦斯涌出量出现“忽大忽小”的剧烈变化；突出前 4 小时达到峰值  $4.95 \text{ m}^3/\text{min}$ ，然后急剧下降；突出前 2 小时，瓦斯涌出量出现增长，突出前达到峰值  $4.56 \text{ m}^3/\text{min}$ ；发生事故前一刻瓦斯涌出量达到最大值  $13.4 \text{ m}^3/\text{min}$ 。整体上，瓦斯浓度呈“平稳-上升-下降-上升”的动态趋势，近似“W”形态，多次出现峰值。



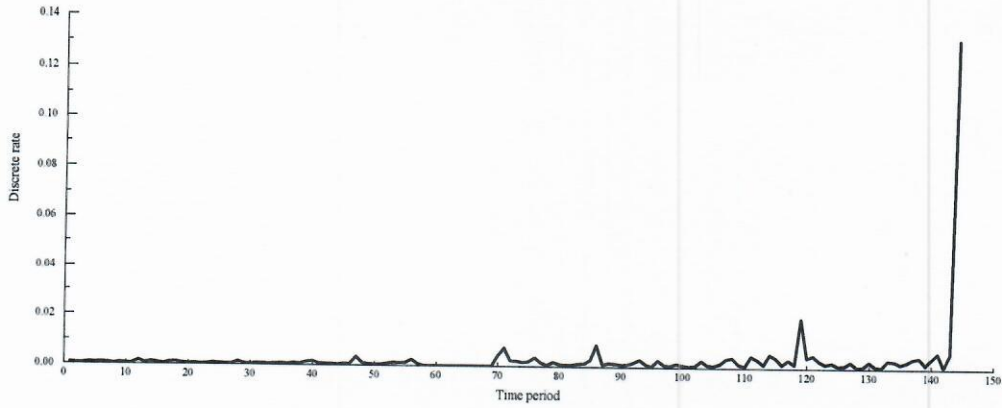
## (2) 偏离率

利用公式 (3) 和移动平均线结果计算瓦斯涌出量时间序列的偏离率, 根据计算结果可以发现: 突出前 24 小时-14 小时偏离率在  $\pm 0.2$  范围变化, 突出前 12 小时出现一次异常变化, 达到 0.567; 突出前瓦斯涌出量偏离率波峰处为 0.866; 瓦斯浓度“忽大忽小”变化导致偏离率整体高于突出前 24 小时-14 小时, 增加了 2-3 倍。



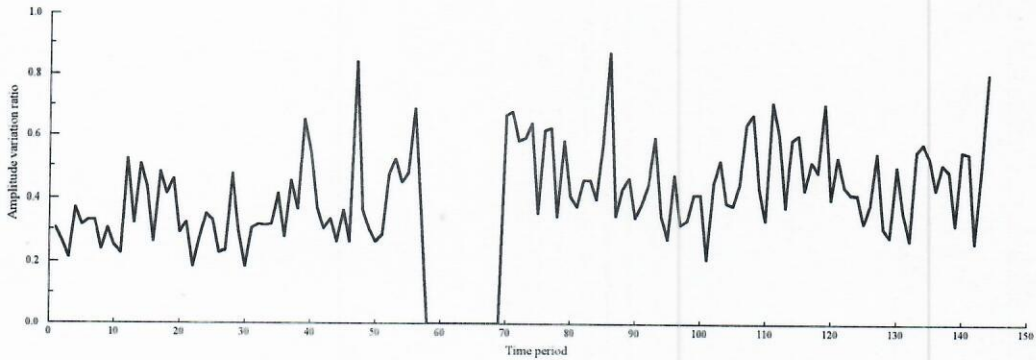
## (3) 离散率

利用公式 (4) 计算瓦斯涌出量时间序列的离散率, 时间周期为 10 分钟, 根据计算结果可以发现: 突出前 24 小时-14 小时偏离率在 0.0007 范围变化; 突出前 12 小时到突出时间范围内, 离散率平均值为 0.0023, 增大了 3 倍, 突出前瓦斯涌出量波峰处为 0.132。瓦斯涌出量异常变化导致离散率升高。



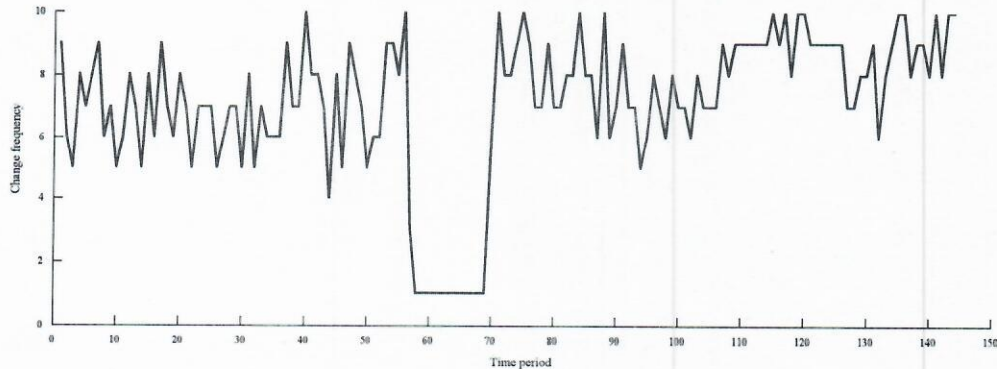
#### (4) 振幅变化率

利用公式(5)计算瓦斯涌出量时间序列的振幅变化率,时间周期为10分钟,根据计算结果可以发现:突出前24小时-14小时振幅变化率波动范围较大,平均值为0.362,突出前12小时出现一次波峰,值为0.87;突出前12小时到突出前夕,平均值为0.474。通过数据发现突出前夕整体振幅变化率趋于比较频繁。



#### (5) 变化频次

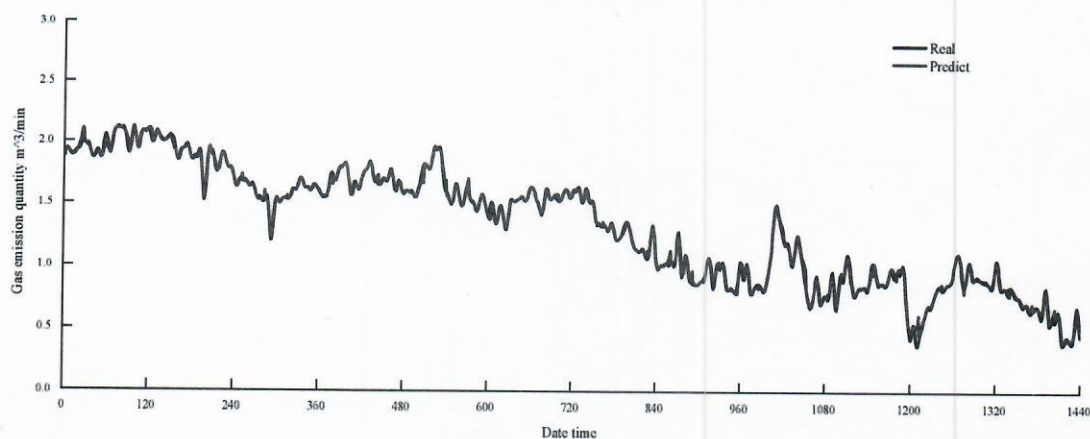
利用公式(6)计算瓦斯涌出量时间序列的变化频次,时间周期为10分钟,根据计算结果可以发现:突出前24小时-14小时变化频次在7次左右波动;突出前12小时到突出,变化频次平均值为8次;随着时间推移,越接近突出,变化越频繁,变化频次趋近于10次。



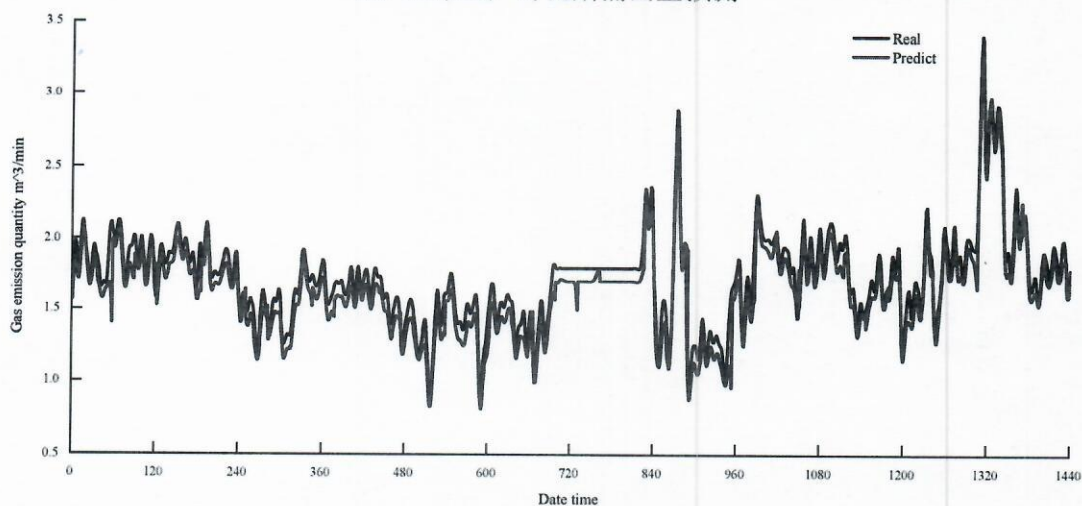
利用 BiLSTM 预测模型对正常生产瓦斯涌出量序列和包含事故前夕瓦斯涌出量序列分别进行仿真。正常生产瓦斯涌出量序列的预测结果平均 RSME 为 0.006, 平均 MAPE 为



2.274%，预测结果与真实值具有很好的一致性，表明 BiLSTM 预测模型对于瓦斯涌出量时间序列有较高的准确性；包含事故前夕瓦斯涌出量序列预测结果平均 RSME 为 0.023，平均 MAPE 为 10.14%，分别是正常的 3.8 倍和 4.5 倍，表明突出前夕瓦斯涌出量异常变化导致模型准确度下降，可以将模型评价指标作为突出预警指标之一，实现突出预警。



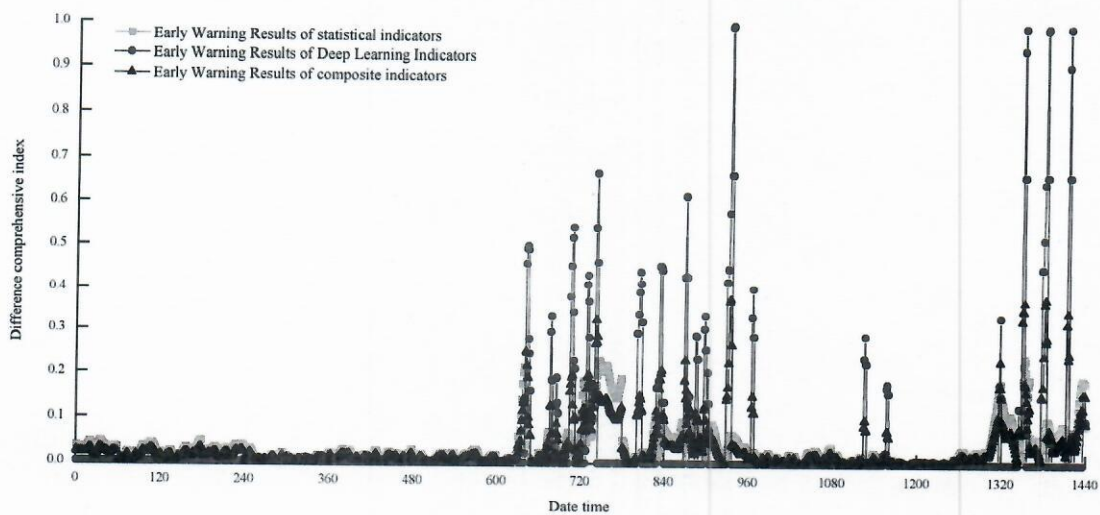
(a) 正常生产时瓦斯涌出量预测



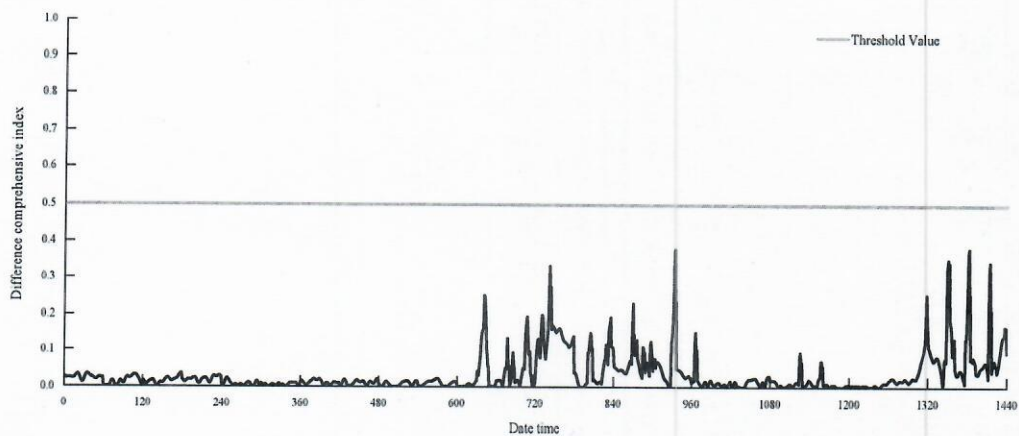
(b) 事故前夕瓦斯涌出量预测

选取石港煤矿 3 月 19 日、20 日正常生产瓦斯涌出量监测数据，利用选取的瓦斯涌出量变化特征统计学指标、深度学习评价指标和综合指标对瓦斯涌出量进行预警研判。

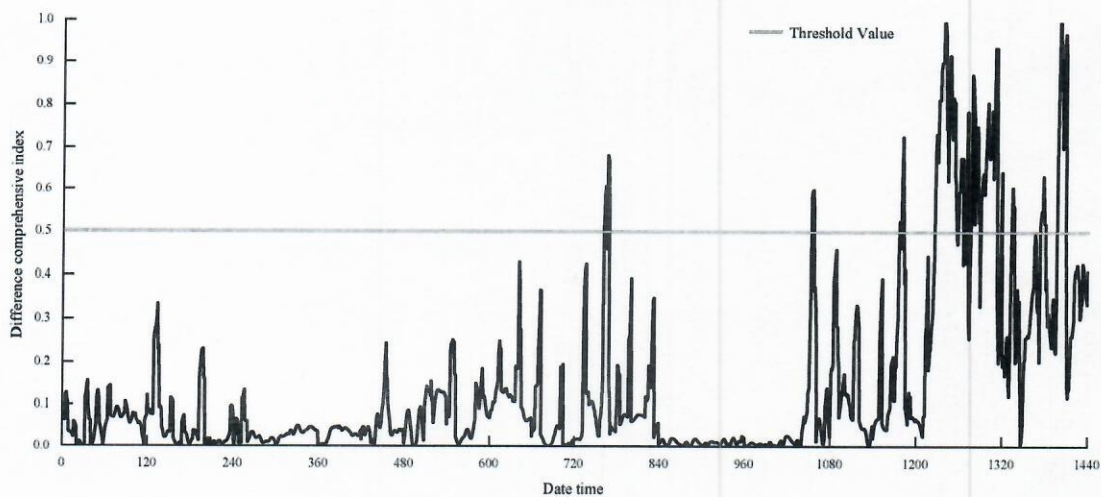




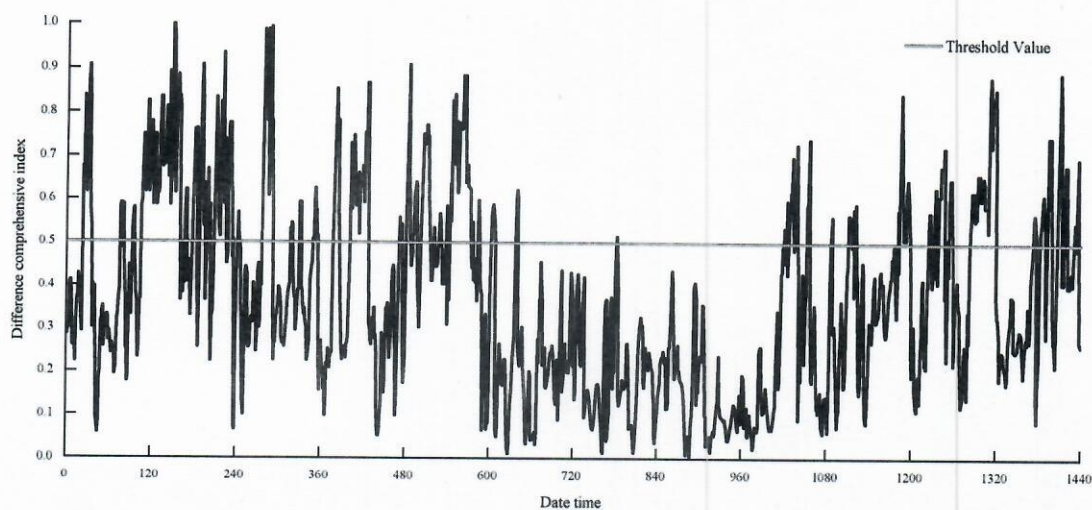
3月19日-24日石港煤矿预警结果:



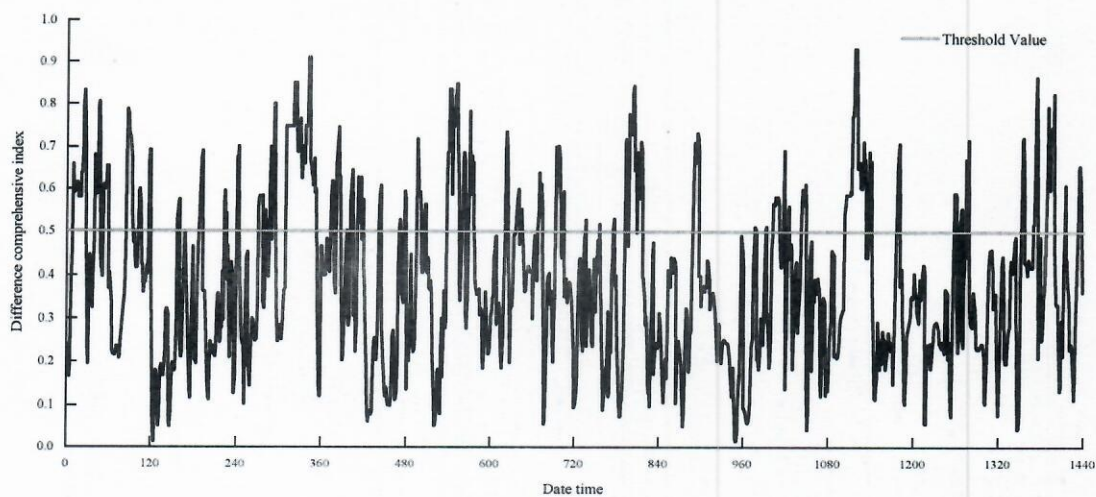
(a) 3月19日突出预警结果



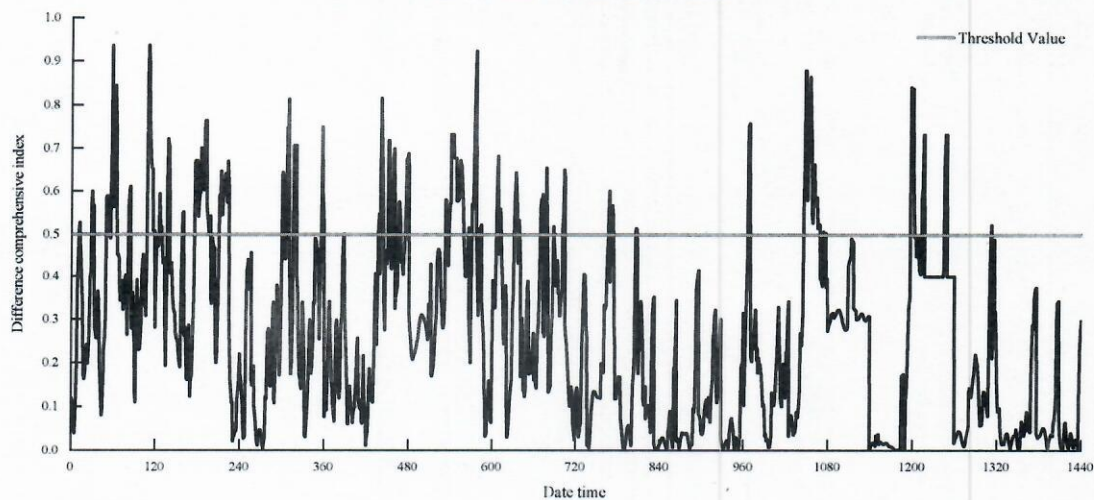
(b) 3月20日突出预警结果



(c) 3月21日突出预警结果

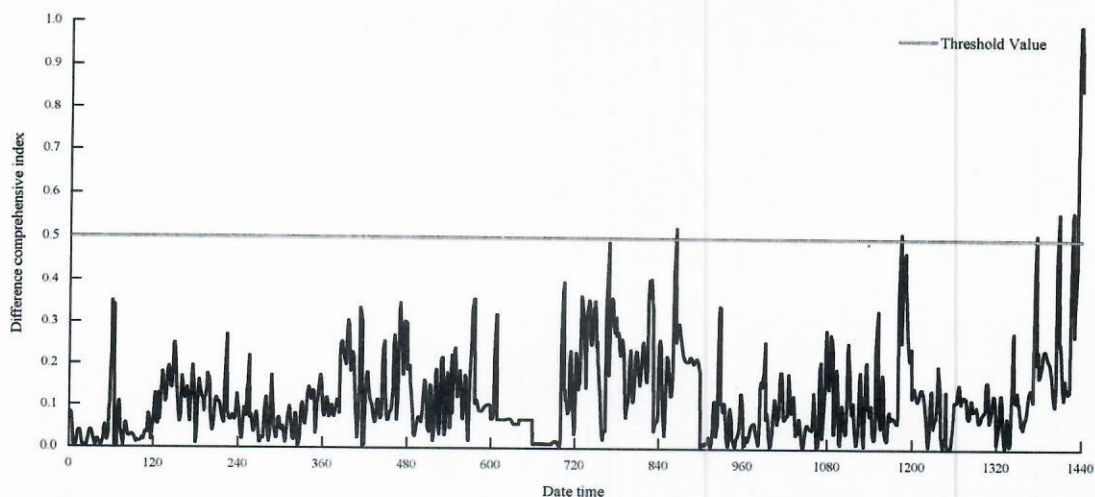


(d) 3月22日突出预警结果



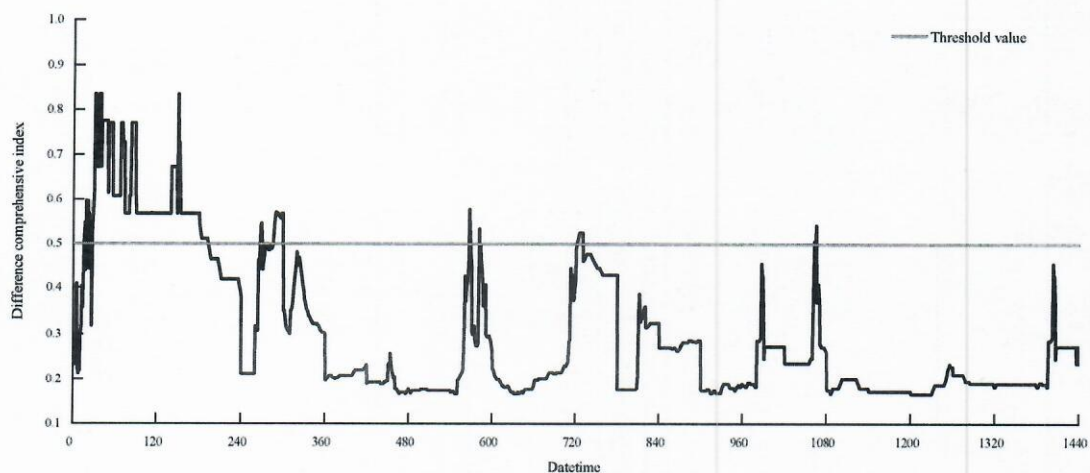
(e) 3月23日突出预警结果



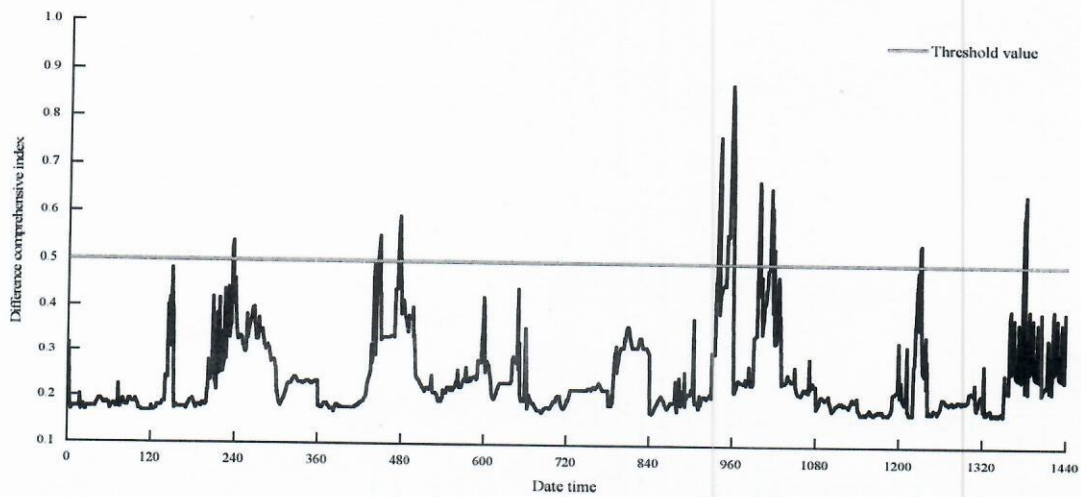


(f) 3月24日突出预警结果

运用煤与瓦斯突出预警模型对东风煤矿和鹤壁六矿事故前后数据进行验证分析。采集东风煤矿4月8日8点-9日8点24小时数据进行预警分析,出现多次橙色预警和红色预警。采集鹤壁六矿6月3日17点-4日17点24小时数据进行预警分析,出现多次橙色预警和红色预警。通过与瓦斯涌出量时间序列对比分析发现,煤与瓦斯突出发生前夕瓦斯涌出量均出现异常变化情况,与煤与瓦斯突出发生规律吻合。



(a) 东风煤矿突出预警结果



(b) 鹤壁六矿突出预警结果

#### 4、仿真数据

名称	修改日期	类型	大小
1月4号	2022/1/4 14:28	文件夹	
验证数据	2022/12/7 13:54	文件夹	
预警	2022/12/7 13:53	文件夹	
smoothing.xlsx	2022/1/5 16:53	XLSX 工作簿	6.858 KB
模拟.xlsx	2022/12/14 17:19	XLSX 工作簿	11 KB
事故前夕.xlsx	2022/1/4 15:51	XLSX 工作簿	63 KB
正常生产.xlsx	2022/1/4 15:52	XLSX 工作簿	52 KB

名称	修改日期	类型	大小
10-18_训练 1(1).jpg	2022/1/18 9:07	JPG 文件	682 KB
19日.opju	2022/1/5 14:13	Unicode Origin ...	47 KB
20日.opju	2022/1/5 14:13	Unicode Origin ...	32 KB
21日.opju	2022/1/5 14:40	Unicode Origin ...	54 KB
22日.opju	2022/1/5 14:52	Unicode Origin ...	53 KB
23日.opju	2022/1/5 14:53	Unicode Origin ...	53 KB
24日.opju	2022/1/8 15:47	Unicode Origin ...	47 KB
变化次数.opju	2022/12/15 19:30	Unicode Origin ...	28 KB
模拟.opju	2022/12/14 18:21	Unicode Origin ...	25 KB
东风.opju	2022/1/7 14:29	Unicode Origin ...	36 KB
危险期比较.opju	2022/1/5 16:22	Unicode Origin ...	63 KB
危险期比较20日.opju	2022/1/5 17:05	Unicode Origin ...	72 KB
南渡率.opju	2022/12/15 16:19	Unicode Origin ...	25 KB
南渡率.opju	2022/12/14 20:40	Unicode Origin ...	50 KB
平滑数据.opju	2022/12/14 17:15	Unicode Origin ...	1,005 KB
事故前夕.opju	2022/1/4 15:59	Unicode Origin ...	55 KB
新建 XLSX 工作簿.xlsx	2022/1/7 8:39	XLSX 工作簿	10 KB
移动平均线.opju	2022/12/14 20:24	Unicode Origin ...	59 KB
原始数据.opju	2022/1/7 8:58	Unicode Origin ...	807 KB
模拟变化率.opju	2022/12/15 19:14	Unicode Origin ...	31 KB
正常生产.opju	2022/1/4 15:54	Unicode Origin ...	52 KB



