



# 煤炭科学技术

煤炭科学研究院 COAL SCIENCE AND TECHNOLOGY

## 重庆松藻矿区关闭煤矿涌水来源与模式判识研究

康小兵 李晓雪 饶丽芳 张文发 罗向奎 王克峰

### 引用本文:

康小兵, 李晓雪, 饶丽芳, 等. 重庆松藻矿区关闭煤矿涌水来源与模式判识研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(10): 220–230.  
KANG Xiaobing, LI Xiaoxue, RAO Lifang. Source identification and pattern study of closed coal mines water inflow in Songzao Mining Area, Chongqing City[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(10): 220–230.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1640>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### “释水-断面流”法在矿井涌水量预测中的应用

Application of “water release cross section flow” method in mine water inflow prediction——Taking Hetaoyu Coal mine in the southern margin of Ordos Basin as an example

煤炭科学技术. 2023, 51(S1): 310–317 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0917>

##### 宁正矿区新庄煤矿首采区侏罗系延安组8号煤层顶板涌(突)水危险性评价

Risk assessment of roof water inrush in No. 8 coal seam of Jurassic system Yan'an Formation in the first mining area of Xinzhuang Coal Mine in Ningzheng Mining Area

煤炭科学技术. 2023, 51(S1): 298–309 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0919>

##### 基于客观组合权-改进集对分析模型的矿井突水水源识

Identification of mine water inrush source based on objective combined weights-improved set pair analysis model

煤炭科学技术. 2022, 50(4): 156–164 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/b8e26494-24ec-4e4f-a52f-8693f033d9b1>

##### 岩溶凹陷式露天矿山大流量涌水治理技术

Treatment technology of large flow water gushing in karst depression open-pit mine

煤炭科学技术. 2024, 52(1): 267–279 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1972>

##### 采动诱发的含原生裂隙覆岩运移及涌(淋)水时空特征分析

Study on overlying strata containing primary fractures migration and spatial-temporal characteristics of water gushing (leaching) caused by mining field disturbance

煤炭科学技术. 2023, 51(7): 129–139 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0323>

##### 基于PSO-XGBoost的矿井突水水源快速判识模型

A rapid identification model of mine water inrush based on PSO-XGBoost

煤炭科学技术. 2023, 51(7): 72–82 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0446>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

康小兵, 李晓雪, 饶丽芳, 等. 重庆松藻矿区关闭煤矿涌水来源与模式判识研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(10): 220–230.

KANG Xiaobing, LI Xiaoxue, RAO Lifang, *et al.* Source identification and pattern study of closed coal mines water inflow in Songzao Mining Area, Chongqing City[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(10): 220–230.

## 重庆松藻矿区关闭煤矿涌水来源与模式判识研究

康小兵<sup>1</sup>, 李晓雪<sup>1</sup>, 饶丽芳<sup>1</sup>, 张文发<sup>1</sup>, 罗向奎<sup>2</sup>, 王克峰<sup>2</sup>

(1. 成都理工大学 环境与土木工程学院, 四川 成都 610059; 2. 重庆市地质矿产勘查开发局 208 水文地质工程地质队, 重庆 400700)

**摘要:** 关闭煤矿涌水来源的准确判识、涌水模式的正确划分对科学处置关闭煤矿排水造成的水资源浪费和水环境污染等问题具有重要意义。基于重庆松藻矿区多个关闭煤矿一个水文年的涌水流量动态监测数据、水化学指标及微生物指标数据, 采用涌水的流量动态解析、流量-降雨水文序列相关函数等水量分析手段和水化学指标描述性统计、矿井水样间水化学指标 Pearson 相关函数等水质分析方法, 并结合矿区水文地质条件, 提出了“水量-水化学-微生物-水文地质条件”多元正-反演分析的关闭煤矿涌水来源综合判识、涌水模式研究的综合方法。研究结果表明: 关闭煤矿涌水量对降雨的响应存在骤升缓降、缓升缓降、平稳3种波动类型; 涌水水源、导水介质的不同是导致矿井涌水流量动态变化及其对降雨的响应存在时空差异性的主要原因, 也是矿井水 TDS、pH、化学关联程度和微生物含量变异性大的关键因素; 综合水量、水质的特性对关闭煤矿涌水来源进行综合判识, 并基于识别结果, 提出了降雨入渗型、含水层释水型、老空水溢出型、复合型4种矿区关闭煤矿涌水模式。多元综合分析方法能有效判识岩溶矿区关闭煤矿涌水来源, 深化了对关闭煤矿涌水特征的认识, 为松藻矿区关闭煤矿涌水的科学防治与环境-资源协调发展提供了理论支撑。

**关键词:** 关闭煤矿; 相关函数; 多元分析; 涌水来源; 涌水模式

中图分类号: TD742

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)10-0220-11

### Source identification and pattern study of closed coal mines water inflow in Songzao Mining Area, Chongqing City

KANG Xiaobing<sup>1</sup>, LI Xiaoxue<sup>1</sup>, RAO Lifang<sup>1</sup>, ZHANG Wenfa<sup>1</sup>, LUO Xiangkui<sup>2</sup>, WANG Kefeng<sup>2</sup>

(1. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. NO.208 Hydrogeology and Engineering Geology Team, Chongqing Bureau of Geology and Minerals Exploration, Chongqing 400700, China)

**Abstract:** Accurate identification of the source of water gushing in closed coal mines and correct division of water gushing modes are of great significance for scientific disposal of water resources waste and water environment pollution caused by closed coal mine drainage. A comprehensive method for water inflow characterization, source identification, and model research for closed coal mines by multivariate analysis of “water quantity–hydrochemistry–microorganism–hydrogeological conditions” is proposed. The method is based on the dynamic monitoring data of water inflow and the water chemical and microbial indexes of several closed coal mines in the Songzao mining area of Chongqing in a hydrological year. Water quality analysis methods, such as flow dynamic analysis of water inflow and flow–rainfall hydro-logical series correlation function, descriptive statistics of water chemical indexes, and the Pearson correlation function of water chemical indexes between mine water samples are also used as bases. The method is further coupled with the hydrogeological conditions of the mining area. Results show that there are three types of fluctuations in the response of water inflow from closed coal mines to rainfall: sudden rise and slow drop, slow rise and slow drop, and stable. The difference in water inflow source and water diversion medium is the main reason for the dynamic change in mine water inflow and the temporal and spatial differences in its response to rainfall. It also causes the characteristics of large variability in TDS, pH, chemical correlation degree, and microbial content of mine water. Based on wa-

收稿日期: 2022-10-08 责任编辑: 黄小雨 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-1640

基金项目: 重庆市国土资源和房屋管理局 2015 年度重点前期工作资助项目 (2015-999-03); 云南省岩土工程与地质灾害重点实验室(培育)开放基金资助项目 (YNYDK-202209)

作者简介: 康小兵(1981—), 男, 江苏丹阳人, 副教授, 博士。E-mail: Kangxiaobing09@cdut.cn

ter source identification, four types, rainfall infiltration type, aquifer release type, old empty water overflow type, and compound type, of water gushing modes of closed coal mines in mining areas are proposed. The multivariate comprehensive analysis method identifies the source of water inrush from closed coal mines in karst mining areas effectively, deepens the understanding of the characteristics of water inrush from closed coal mines, and provides theoretical support for the scientific prevention and control of closed coal mine water inrush in Songzao mining area and the coordinated development of environment and resources.

**Key words:** closed coal mine; correlation function; multivariate analysis; water inrush sources; water gushing mode

## 0 引言

“双碳”目标下我国煤矿产业加速退出。据统计,截止2021年底我国共关闭煤矿5700处,预估到2030年我国关闭煤矿数量将达到1.5万处<sup>[1]</sup>。从水文地质和水资源角度来看,煤矿一经关闭,闭坑矿井便成为矿区不同深度含水层发生水力联系的通道、地下水汇集储存空间和地下水污染场所,将造成资源-安全-环境三重问题。为实现关闭煤矿排水的趋利避害,需准确判识矿井涌水来源及涌水模式。

煤炭作为我国主体能源<sup>[2]</sup>,有着悠久的开采历史,但受制于复杂的水文地质条件,煤矿水害事故频发<sup>[3]</sup>。为探究矿井水害问题的本质,国内外学者对煤矿涌水开展了较为深入的研究。姜本在上世纪80年代就对我国南方典型岩溶煤矿床涌水规律进行了探讨<sup>[4]</sup>。HUANG等<sup>[5]</sup>建立Piper-主成分分析(PCA)-Fisher水源识别模型,经验证该模型在识别煤矿涌水过程中具有较高的准确率。陈陆望等<sup>[6]</sup>基于宿县矿区主要突水含水层地下水水化学数据,得出矿区四含水主要受采矿活动控制、煤系水主要受断裂控制、太灰水主要受采矿活动及构造共同控制。赵利军等<sup>[7]</sup>研究发现在复合隔水条件下,柳塔煤矿因矿业活动使之隔水层产生裂隙,形成导水通道,从而导致矿井涌水量与降雨量呈线性相关。针对关闭煤矿,MENENDEZ等<sup>[8]</sup>对西班牙阿斯图里亚斯一处关闭煤矿进行水资源评估,并验证了利用关闭煤矿建造抽水蓄能水电站的可能性。虎维岳等<sup>[9]</sup>将废弃采矿区的地下水运移介质划分为多层状发育的岩溶空隙及裂隙、非均匀分布的网络管道、似层状分布的强渗透网络裂隙、非均匀不规则分布的扰动裂隙4种类型。李琰庆等<sup>[10]</sup>通过分析淮南老矿区内废弃煤矿透水机理,总结出废弃煤矿存在裂隙带导通地表水、洪水倒灌废弃煤矿和老窑水冲破煤岩柱3种透水方式。

重庆松藻矿区是西南地区重点煤炭产业基地之一<sup>[11]</sup>,也是我国典型岩溶矿区,矿井涌水问题一直备受关注。巫显钧<sup>[12]</sup>、周述<sup>[13]</sup>等通过采面涌水量动态结合矿区地质条件、矿井布置情况,得到矿区煤矿总采工作面涌水主要为离层裂隙水,李永祥等<sup>[14]</sup>研究

得出煤层上覆下伏长兴组及茅口组岩溶水沿断裂构造、“三带”裂隙及茅口组开采巷道等介质涌出。目前,松藻矿区多集中于煤矿建设与开发过程中的涌水规律探究,而对关闭煤矿涌水来源及模式的研究还不够深入,同时大多数关闭煤矿已做封井处理,又大大增加了对其涌水来源及模式探究的难度。

笔者基于松藻矿区关闭煤矿涌水流量动态监测及水化学、微生物检测结果,采用涌水动态解析、流量-降雨水文序列<sup>[15-16]</sup>、水质指标描述性统计分析、矿井涌水间水化学指标的双变量相关分析等方法,剖析矿井涌水径流特征、释水体储导水性质,反演矿井涌水来源,并综合矿区水文地质条件,提出关闭煤矿涌水模式。以期为岩溶矿区关闭煤矿及其矿井涌水资源规划利用提供依据,缓解区域水资源供需矛盾,产生经济效益的同时促进环境的可持续发展。

## 1 研究区概况

松藻矿区位于重庆市綦江区西南部,地势西南高,东北低,以山地为主,区内水系发育。矿区地处娄山褶皱带与四川盆地沉降带接合部位,其东侧属川黔南北构造体系,西侧属北东向华夏构造体系。区域由东向西依次有两河口向斜、羊叉滩背斜、大木树向斜及鱼跳背斜,其褶曲幅度由东向西逐渐减缓,波幅减小,褶曲轴线在平面上北东向收敛,南西向发散,整体呈“帚”状。闭坑煤矿大多分布于两河口向斜构造单元内,涌水矿井口皆位于两河口向斜东翼斜坡地带,研究区位置及关闭煤矿分布如图1所示。

矿区出露地层均为沉积岩。除泥盆系、石炭系、第三系、白垩系下统缺失外,寒武系至第四系均有不同程度出露。与矿区涌水有关的地层主要有茅口组( $P_2m$ )、龙潭组( $P_3l$ )、长兴组( $P_3c$ )、玉龙山组( $T_{1y}$ )、飞仙关组( $T_{1f}$ )、嘉陵江组( $T_{1j}$ )、雷口坡组( $T_2l$ )、须家河组( $T_{3xj}$ )。

松藻矿区开采龙潭组煤层,属泻湖-潮坪沉积相。龙潭组总厚57~107 m,可采煤层3~6层,由上到下分别为 $M_6$ 、 $M_7$ 、 $M_8$ 、 $M_9$ 、 $M_{11}$ 、 $M_{12}$ (图2),其中 $M_8$ 全区可采,煤层稳定厚度0.71~6.68 m,平均厚2.94 m,约

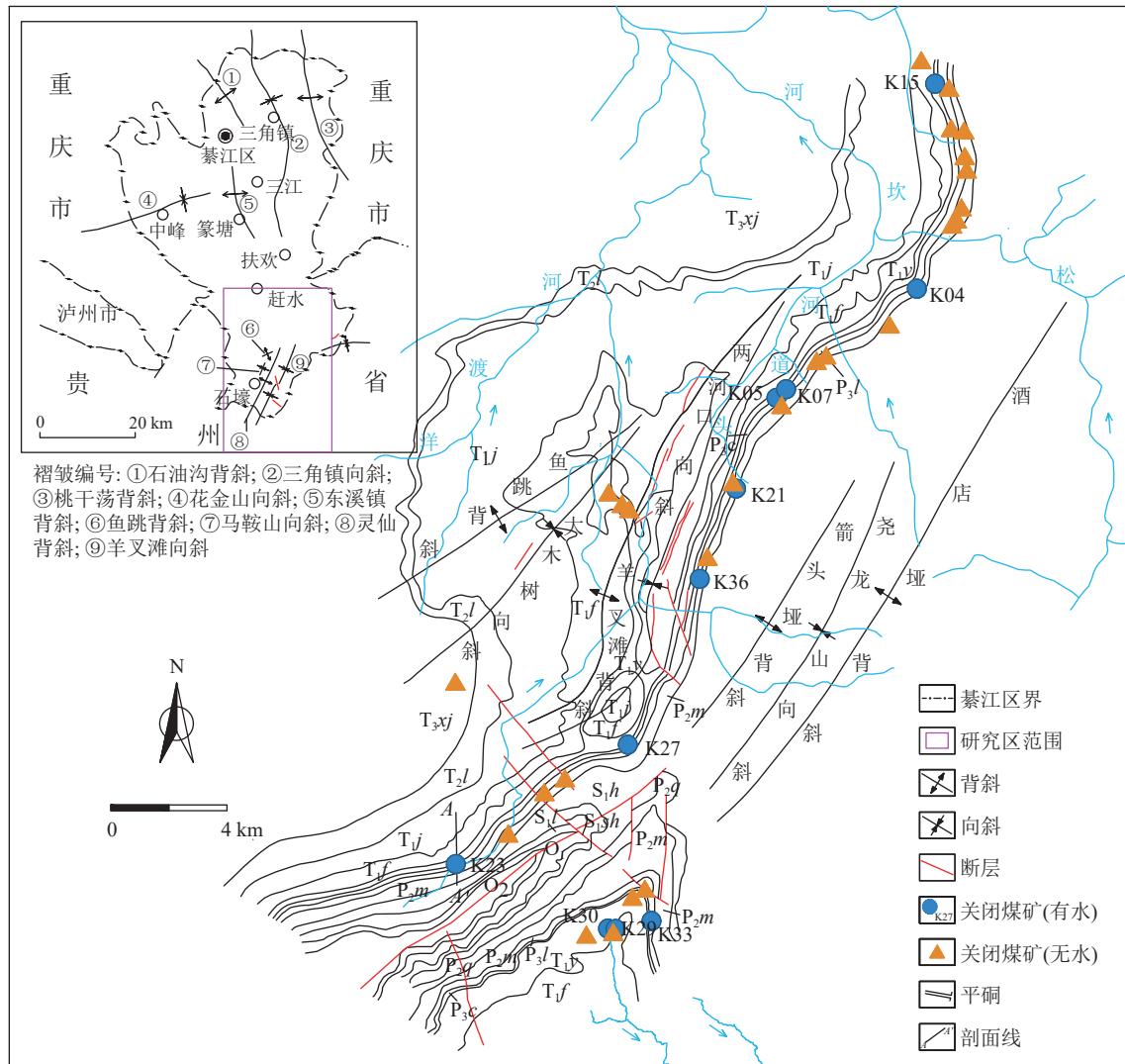


图 1 松藻矿区构造与关闭煤矿分布  
Fig.1 Songzao mining area structure and closed coal mine distribution map

占矿区总储量的 60%,为矿区主采煤层,其余煤层局部可采<sup>[17]</sup>。煤层下伏平行不整合接触茅口组( $P_2m$ )灰岩,中间存在古侵蚀面,上覆整合接触长兴组( $P_3c$ )灰岩。矿区主要开采煤层硫分含量均大于 3.2%,属于高硫煤( $S_{td}>3.0\%$ )范畴<sup>[18]</sup>。

矿区大面积出露灰岩,岩溶发育强烈,岩溶水分布较广泛,地下水类型以岩溶裂隙水为主,主要接受大气降雨补给,其埋藏和分布不均一。根据矿区主采煤层上覆与下伏的地层岩性、富水性、地下水赋存介质和水动力特征,矿区含隔水岩组划分见表 1。

## 2 数据与研究方法

### 2.1 数据来源

本次研究的 34 个关闭煤矿,受地形切割、岩溶发育、采动裂隙等空间差异性的影响,其中 10 个关闭煤矿涌水量相对较大,其余为无水或少水煤矿。

研究数据来自这 10 个涌水量较大的关闭煤矿,矿井涌水量为 2016 年 1 个水文年 1 月 2 次的监测数据(图 3),水化学常规因子( $pH$ 、 $TDS$ 、 $Na^++K^+$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Cl^-$ 、 $SO_4^{2-}$ 、 $HCO_3^-$ )和微生物(菌落总数、总大肠菌群)指标为同年 10 月取样分析测试结果。降雨量数据取自距离矿区最近的綦江、桐梓两个气象站 2016 年逐日降雨量平均值(图 3)。

### 2.2 研究方法

1)统计分析。运用 SPSS 软件对矿井涌水水质检测指标含量数据进行描述性统计分析,来反映数据分布状态、一般数值特征等特性。

2)相关性分析。将时间序列相关函数与 Pearson 相关函数分别用于关闭煤矿涌水水量、水化学关联性的探讨。相关性分析是衡量变量间相关密切程度的一种统计学方法,通过对相关系数的计算,量化复杂现象,并从中揭示规律<sup>[20]</sup>。



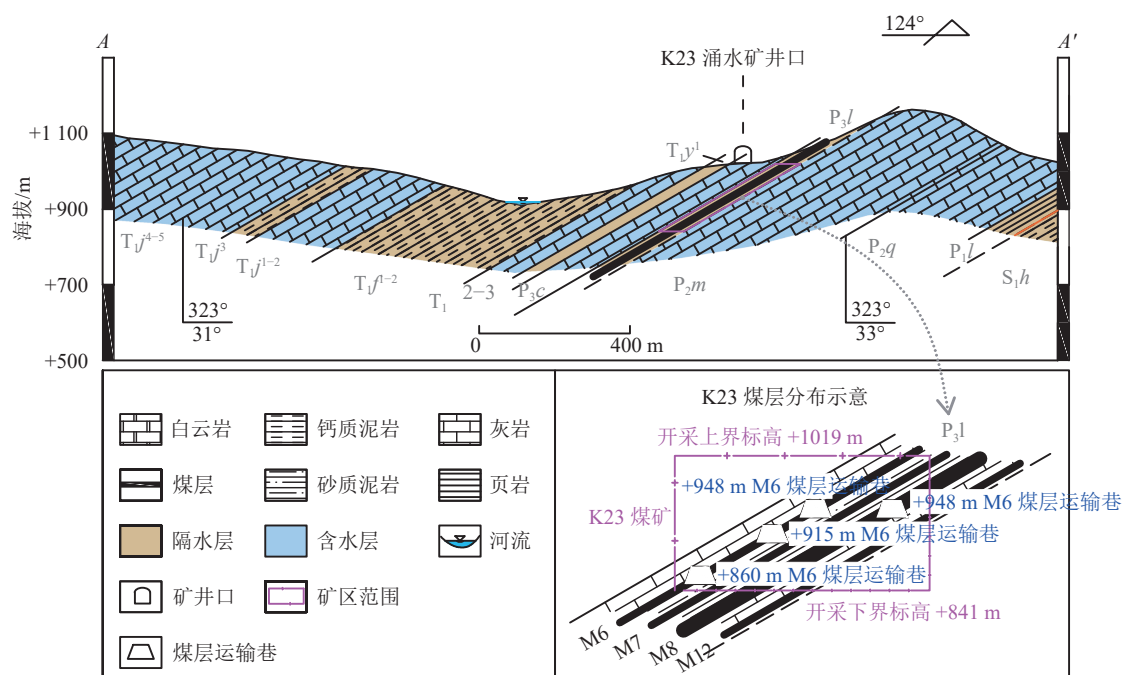


图2 K23煤矿剖面图及煤层分布示意

Fig.2 Profile and coal seam distribution diagram of K23 coal mine

表1 松藻矿区含隔水层划分及特征<sup>[19]</sup>Table 1 Division and characteristics of aquifer in Songzao mining area<sup>[19]</sup>

序号	地层代号	平均厚度/m	含水层类型	含水性质	主要岩性	水质类型
1	$T_{j^{4-5}}$	505	强含水层	岩溶裂隙承压含水层	石灰岩白云岩	$HCO_3^-+SO_4^{2-}-Ca^{2+}+Mg^{2+}$
2	$T_{j^3}$	36	隔水层	—	钙质泥岩	—
3	$T_{j^{1-2}}$	110	中等含水层	岩溶裂隙承压含水层	石灰岩	$HCO_3^-Ca^{2+}+Mg^{2+}$
4	$T_{j^{4-2}}$	178	隔水层	—	钙质泥岩	—
5	$T_{j^{2-3}}$	86	中等含水层	岩溶裂隙承压含水层	泥质灰岩石灰岩	$HCO_3^-Ca^{2+}+Mg^{2+}$
6	$T_{j^1}$	41	隔水层	—	钙质泥岩, 泥质灰岩	—
7	$P_{3c}$	51	弱含水层	岩溶裂隙承压含水层	石灰岩	$HCO_3^-Ca^{2+}, HCO_3^-+SO_4^{2-}-K^++Na^++Ca^{2+}$
8	$P_{3l}$	74	隔水层	—	碎屑岩、煤层	—
9	$P_{2m}$	>100	弱含水层	岩溶裂隙承压含水层	石灰岩	$HCO_3^-K^++Na^++Ca^{2+}, Cl^-+HCO_3^-K^++Na^++Ca^{2+}$

①水文序列相关函数。水文序列相关分析是基于时间尺度上水文序列关联程度的定量判断。自相关系数是为描述水文序列自身内部相关性, 互相关函数旨在描述两个序列间的内在联系。自相关函数  $R(k)$  和互相关函数  $R_{xy}(k)$  计算公式如下:

$$R(k) = \frac{C(k)}{C(0)} \quad (1)$$

$$R_{xy}(k) = \frac{C_{xy}(k)}{\sigma(x)\sigma(y)} \quad (2)$$

其中

$$C(k) = \frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^{n-k} (x_i - \bar{x})(x_{i+k} - \bar{x}) \quad (3)$$

$$C_{xy}(k) = \frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^{n-k} (x_i - \bar{x})(y_{i+k} - \bar{y}) \quad (4)$$

式中:  $R(k)$  为自相关系数;  $R_{xy}(k)$  为互相关系数;  $C(k)$  为序列的自协方差;  $C(0)$  为样本方差;  $C_{xy}(k)$  为两个序列的互协方差;  $n$  为时间序列长度;  $k$  为滞后时间;  $\sigma(x)$ 、 $\sigma(y)$  分别为  $X_n$ 、 $Y_n$  序列的样本标准差;  $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$  为  $X_n$ 、 $Y_n$  的样本均值。

②Pearson 相关函数。Pearson 相关性用于衡量两个序列间的线性关系。其计算公式为

$$r_{xy} = \frac{\sigma^2(xy)}{\sigma(x)\sigma(y)} = \frac{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

式中:  $r$  为相关系数;  $m$  为样本数量;  $\sigma^2(xy)$  为  $x$ 、 $y$  序列的协方差;  $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 、 $\sigma(x)$ 、 $\sigma(y)$  与式(1)—式(4)相同。

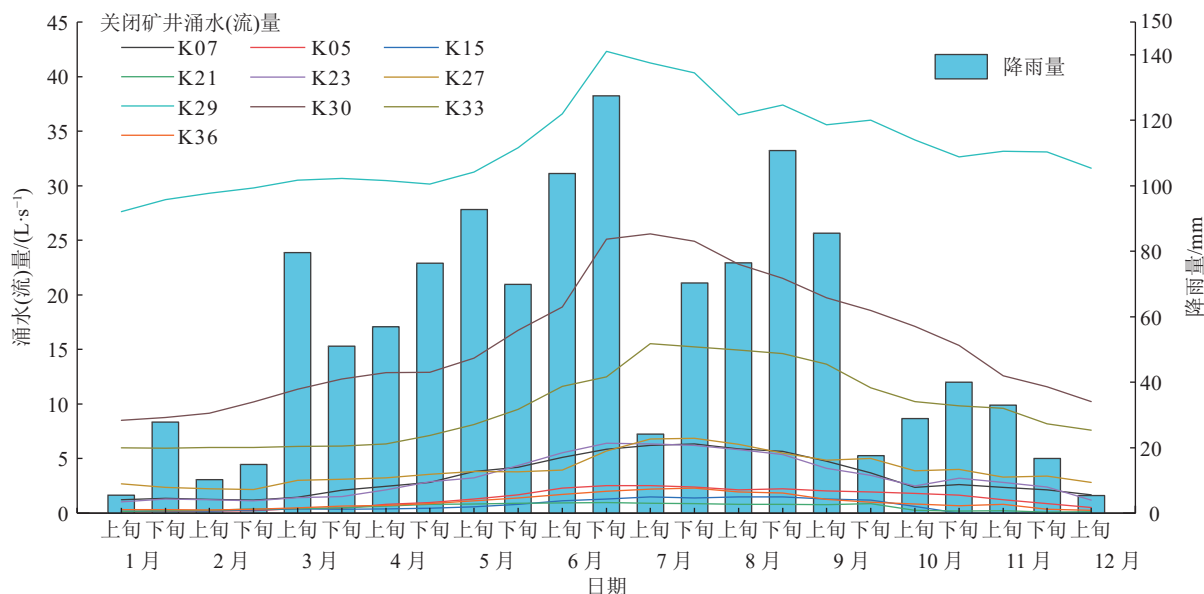


图3 关闭煤矿涌水(流)量监测动态曲线

Fig.3 Dynamic curve of water inflow monitoring in closed coal mine

### 3 关闭煤矿涌水特征与来源判识

#### 3.1 涌水动态成因解析

1) 涌水量波动特征。煤矿涌水的动态特征是水文地质结构、水的补给来源、导水介质和采动破坏扰动程度等因素的综合反映<sup>[21]</sup>。由降雨量与关闭煤矿流量动态(图3)可以看出,大多数关闭煤矿涌水量存在明显季节性变化,且不同关闭煤矿涌水量存在明显差异,主要有以下3种波动类型。

① 骤升缓降型:关闭煤矿 K29、K30、K33 涌水量较大,且流量年波动幅度也大,流量对降雨的响应呈现出骤升缓降势态。说明这3个关闭煤矿释水体富水性好,存在岩溶管道与径流系统连通的可能性较大,补给迅速;且发育大量裂隙通道,径流较岩溶管道缓慢,因此流量消降迟缓。由此推断其流量波动原因是由于这3个关闭煤矿位于万隆村冲沟处,地形切割浅,裂隙发育,地下水水力梯度较大,交替循环迅速。

② 缓升缓降型:关闭煤矿 K07、K23、K27 涌水量中等,流量年波动幅度较小,对降雨的响应为缓升缓降型。说明这3个关闭煤矿释水体富水性较差,径流通道不存在岩溶管道等大型导水介质,多为裂隙流,矿井涌水的补给与消降都较缓慢。

③ 平稳型:K05、K15、K21、K36 涌水量较小,流量年波幅也极小,表现出平稳的特征。说明该类关闭煤矿释水岩体富水性差,或导水通道不发育。

2) 水文序列相关分析。自相关系数可以反映系统的记忆性,记忆性又取决于释水体的蓄水能力和

径流速度<sup>[22]</sup>。关闭煤矿涌水量与降雨量自相关函数(图4a)可以反应出:因降雨事件为没有记忆性的纯随机函数,所以研究区降雨量的自相关性较差,且波动幅度较大<sup>[23]</sup>。关闭煤矿涌水流量自相关性较好, $R(k)$ 都在 0.8~0.95,且变化趋势大致相同,随滞后期的增加而减小。

本次将降雨量时间序列作为输入信号,10个关闭煤矿涌水量时间序列作为输出信号,煤矿涌水量对降雨响应的敏感程度依靠这两序列互相关系数来反映<sup>[24-25]</sup>。得到关闭煤矿涌水量与降雨量的互相关函数图(图4b),结果显示:

K27、K29、K30 三个关闭煤矿涌水量对降雨量的响应存在1个月的滞后性,涌水量大且与降雨量的相关性较差,说明释水体自身蓄水量大、透水性较差,且这几处关闭煤矿涌水流量的波动主要受自身调蓄,因此初步推断这几处关闭煤矿涌水来源于巷道揭露的碳酸盐岩含水层。其余关闭煤矿涌水量对降雨量的响应滞后时间 $\leq 15$  d,对降雨的响应较为敏感。推断矿井涌水存在较为良好的补给通道,或释水体补给条件较好。

K21 涌水量与降雨的相关性好,降雨对涌水量的控制作用较强,说明降雨入渗对矿井涌水贡献较大。K05、K33 涌水量与降雨量互相关性差,推测煤矿涌水为大气降雨沿通道直接补给的可能性小,涌水可能来源于矿坑老空水、巷道揭露的碳酸盐岩含水层释水。K07、K15、K23、K36 流量对降雨量的响应程度中等,K07、K23 流量中等,K15、K36 流量较小,从涌水动态无法断定其涌水来源,还需借助水化

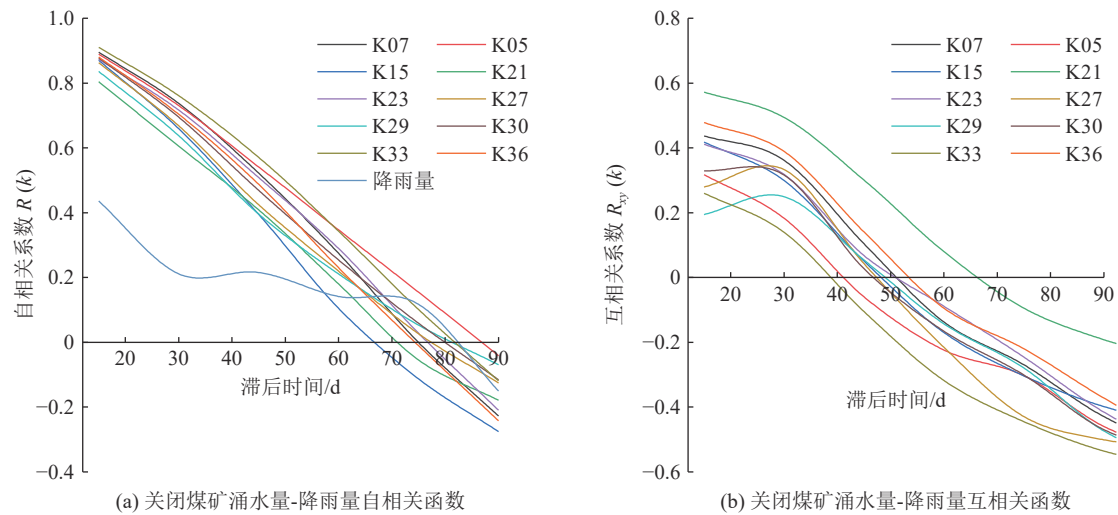


图 4 关闭煤矿涌水量自相关函数与涌水量-降雨量互相关函数

Fig.4 Self-correlation function of water inflow and cross-correlation function of water inflow and rainfall in closed coal mine

学特征进一步证实。

3.2 水化学演化环境分析

3.2.1 水化学特征分析

水化学组分的变化主要受补给来源和演化环境的控制<sup>[26]</sup>。研究区关闭煤矿涌水有煤系地层顶底板长兴组和茅口组灰岩含水层、矿坑老空水、降雨入渗三个来源,其中碳酸盐岩含水层水化学表现为 pH 呈中碱性,  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$  浓度相对较高, TDS 含量取决于地下水循环速度的快慢;矿坑老空水因封闭滞流加之煤层伴生矿物黄铁矿氧化,一般具有 pH 低、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、TDS 含量高的特点<sup>[27]</sup>。根据检测指标含量及比值关系可用来判识矿井水涌水来源。

由检测指标统计结果(表 2)可知,矿井涌水中 pH 与 TDS 变化幅度都较大,表明矿井水受多种因素

影响,涌水来源不尽相同。研究区矿井水样 pH 变化范围为 2.87~7.92,平均值为 5.92,其中 K05、K07、K36 矿井水 pH 分别为 2.88、3.03、2.87,呈强酸性,分析此类矿井涌水主要来源于含煤地层黄铁矿氧化形成的酸性矿坑老空水。水样 TDS 变化范围在 211.60~1 556.96 mg/L,平均值为 678.82 mg/L, K21、K36 矿井水 TDS 含量超过 1 g/L,且 pH 为酸性,推测这两处煤矿受到一定量的老空水补给。根据矿井水主要离子浓度与 TDS 的关系(图 5)可知,  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  与 TDS 呈显著正相关,其余离子与 TDS 相关性较小,表明阴阳离子中  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  的溶解输入对矿井水成分贡献最大。又因矿区碳酸盐岩含水层中石膏较少,矿井涌水中的  $\text{SO}_4^{2-}$  则主要来源于煤层黄铁矿<sup>[28]</sup>,  $\text{Ca}^{2+}$  则为碳酸盐岩溶解的产物。

表 2 关闭煤矿涌水水质常规指标及微生物指标统计结果

Table 2 Statistical results of conventional indexes and microbial indexes of water inflow from closed coal mines

项目	pH	质量浓度/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )							菌落总数/ ( $\text{CFU}\cdot\text{mL}^{-1}$ )	总大肠菌群/ ( $\text{MPN}\cdot 100\text{ mL}^{-1}$ )
		TDS	$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{HCO}_3^-$		
最小值	2.87	211.60	3.19	8.88	61.72	3.49	85.24	0.00	未检出	未检出
最大值	7.92	1 556.96	273.54	129.41	410.07	30.05	640.61	423.45	620.00	200.50
平均值	5.92	678.82	68.78	37.26	183.89	11.34	276.01	143.72	99.22	43.43
标准偏差	2.28	440.53	79.48	37.75	115.96	8.72	173.75	145.24	199.70	68.06

根据离子含量特征绘制 Piper 三线图(图 6),研究区关闭煤矿涌水水化学特征,得到研究区水化学类型所占比例由高到低依次为  $\text{SO}_4\text{-Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 。且随 TDS 含量的增加,矿井水水化学类型由  $\text{HCO}_3\text{-Ca}$  向  $\text{SO}_4\text{-Ca}$  过渡,再次体现了  $\text{SO}_4^{2-}$  离子含量对 TDS 的贡献。据前人研究可知,松藻矿区茅口组( $\text{P}_2\text{m}$ )碳酸盐岩含水层水化学类型主要为

$\text{HCO}_3\text{-K+Na+Ca}$  型,长兴组( $\text{P}_3\text{c}$ )碳酸盐岩含水层水化学类型主要为  $\text{HCO}_3\text{-Ca}$  型<sup>[19]</sup>。关闭煤矿 K23、K27 因巷道修建于长兴组地层中,水化学类型为  $\text{HCO}_3\text{-Ca}$  型, pH 呈中碱性,故推测这两处矿井涌水主要接受长兴组灰岩含水层补给;K33 因巷道修建于茅口组地层中,水化学类型为  $\text{HCO}_3\text{-Na}$  型,且 pH 呈中碱性、TDS 含量低,因此推测 K33 涌水主要接

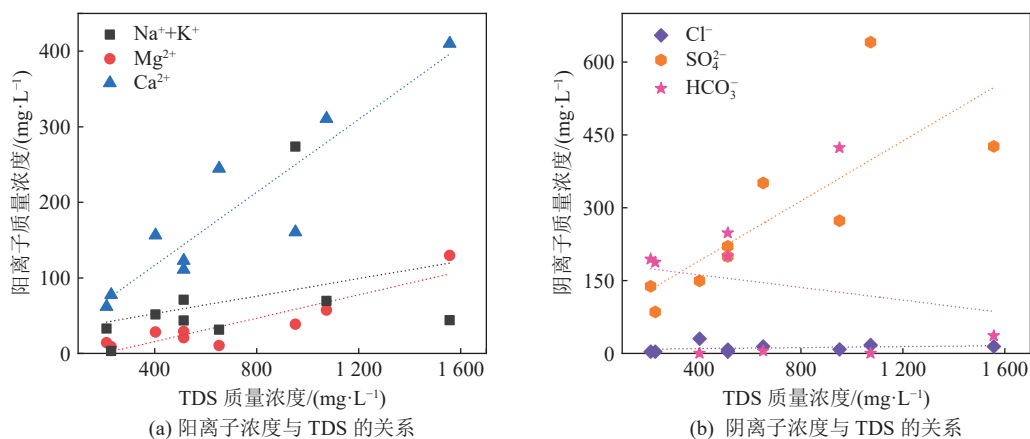


图 5 关闭煤矿涌水主要阴阳离子与 TDS 含量关系

Fig.5 Relationship between TDS content and main anions and cations in water inflow of closed coal mines

受茅口组灰岩含水层补给。

### 3.2.2 涌水常规离子含量相关性分析

通过矿井涌水水质指标的双变量 Pearson 相关系数绝对值大小,可识别矿井涌水来源关联程度。对矿井水样中 pH 值、TDS、Na<sup>+</sup>+K<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 8 个指标进行 Pearson 相关性分析,分析结果见表 3。由于水样间距小、水源类型相近,水样间相关系数普遍较高,其中有 84.44% 相关系数  $r > 0.7$ , 51.11% 相关系数  $r > 0.9$ ,运用传统相关系数等

级阈值进行相关性解释较为粗糙,因而根据数据情况将 0.99 设置为本次相关系数判别值对矿井涌水来源进行判别<sup>[29]</sup>。

K07-K36、K29-K30 达到相关系数判别值,相关系数分别为 0.993、0.992,表征两组水样来源相同,进一步证实了前文推断,结合其他特征表明 2 组煤矿涌水分别受控于老空水和含水层释水。K05、K07、K21、K36 相关系数均大于 0.96,关联性好,矿井涌水关键水源相同,为采空区老空水。结合水文序列分

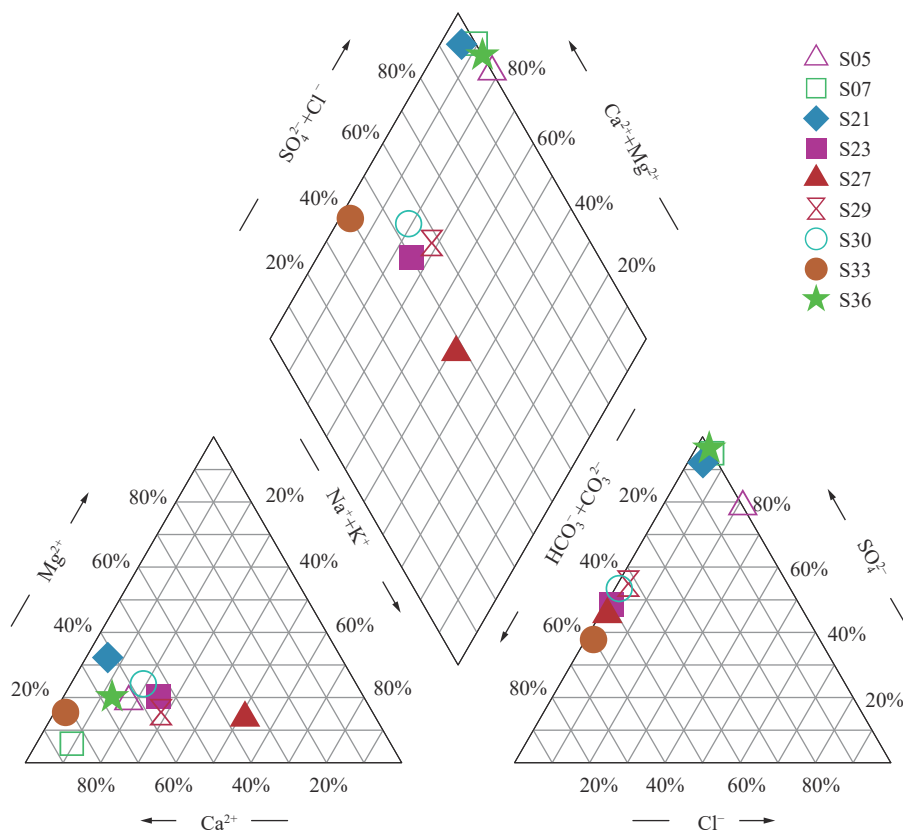


图 6 关闭煤矿涌水水化学成分 Piper 三线图

Fig.6 Piper triplot of chemical composition of coal mine water inrush



表 3 矿井水样 Pearson 相关系数  
Table 3 Pearson correlation coefficient of mine water samples

煤矿编号	K05	K07	K21	K23	K27	K29	K30	K33	K36
K05	1								
K07	0.980**	1							
K21	0.985**	0.960**	1						
K23	0.609	0.667	0.655	1					
K27	0.822*	0.798*	0.861**	0.867**	1				
K29	0.889**	0.893**	0.920**	0.889**	0.973**	1			
K30	0.836**	0.855**	0.879**	0.933**	0.959**	<u>0.992**</u>	1		
K33	0.660	0.681	0.719*	0.965**	0.885**	0.909**	0.944**	1	
K36	0.964**	<u>0.993**</u>	0.949**	0.670	0.797*	0.889**	0.855**	0.662	1

注：\*表示在0.05级别(双尾)上显著相关；\*\*表示在0.01级别(双尾)上显著相关；相关性系数大于0.990加粗标下划线。

析,降雨也为 K21 矿井水主要补给源,老空水受到降雨入渗稀释,矿井水 pH 值升高至 6.52。据水文序列相关函数分析,指示降雨入渗为 K23 涌水的关键因素,又因 K23 与这几处受老空水影响的煤矿相关系数均小于 0.68,与其余煤矿水样相关性大于 0.86,说明 K23 除降雨入渗外,矿井水接受含水层补给的量大于接受老空水补给的量。K33 与 K23 关联性好,相关系数为 0.965,表明 K33 也受降雨补给,又因 K33 与其余煤矿水样关联性优于 K23 与其余煤矿水样的关联性,说明 K33 涌水也受含水层释水、老空水补给,结合涌水动态与水化学两方面可知,K33 涌水补给比例由高到低分别为含水层释水、降雨、老空水。

3.3 细菌与微生物含量分析

地下水中的菌落与总大肠菌群主要来源于人畜粪便<sup>[30]</sup>,因此微生物指标含量可作为矿井水接受降雨补给量的指示因子。由表 2 可知 K23 矿井水菌落总数达到 620 CFU/mL,总大肠菌群>200.5 MPN/100 mL,为水样中微生物含量最高关闭煤矿,表明 K23 矿井水与地表连通性好,接受降雨补给量较大。另外 K27、K29 矿井水中微生物含量也相对较高,菌落总数、总大肠菌群含量分别在 100 CFU/mL、80 MPN/100 mL 左右,但远低于 K23,说明这两处煤矿矿井水亦受降雨地表汇流补给,但补给量小于 K23 所受降雨补给量。其余煤矿矿井水微生物含量较少,推测其原因为接受降雨补给量较少或入渗降雨未受污染。

4 关闭煤矿涌水模式

4.1 涌水来源

关闭煤矿矿井涌水量及其与降雨量的响应、地下水常规离子、微生物含量等动态数据,包含了大量地下水流动系统演化环境与水动力结构信息,对涌

水来源具有指示作用。基于前述分析,结合关闭煤矿基本水文地质条件,松藻矿区各关闭煤矿主要涌水来源判识结果见表 4。

4.2 涌水模式

根据研究区关闭煤矿涌水来源识别结果,将关闭煤矿划分出降雨入渗型、含水层释水型、老空水溢出型、复合型 4 种涌水模式。

1)降雨入渗型。矿区发育大量落水洞、溶隙、采动裂隙等通道与巷道直接相连,大气降雨在地表汇流后,沿以上优势通道快速通过地层,流至巷道,并随巷道涌出(图 7)。关闭煤矿涌水量与降雨量相关性好,对降雨响应敏感,涌水动态受降雨、导水介质控制,一般波动幅度较大。又因水岩作用时间短,矿井涌水水化学表现为降雨型,水化学类型为  $\text{HCO}_3^- \text{Ca}$  型,pH 呈中碱性,TDS、 $\text{SO}_4^{2-}$  含量偏低。若降雨流经人口密集处,受人为活动影响,呈现菌落总数、总大肠菌群等微生物含量高的特点,如研究区 K23。

2)含水层释水型。碳酸盐岩含水层在地表出露区接受补给,顺岩层径流,经水岩作用,灰岩水中  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$  含量较高,又因灰岩中伴生矿物石膏的溶滤增加了水中  $\text{SO}_4^{2-}$  含量。由于岩溶发育、巷道揭露、采矿扰动等原因形成导水通道,因煤矿关闭常年失修,防渗措施失效,造成灰岩含水层向矿井释水(图 8)。

该种模式的煤矿涌水主要与区域含水层储导水性有关,呈现含水层储水性好,导水介质发育且连通性好,则涌水量较大,反之则涌水量小。因矿区含水层富水性受补给范围及补给径流路径等的影响,导致矿井涌水量对降雨的响应存在一定的滞后性,且不同水动力条件下滞后时间存在差异。矿井水 pH

表 4 研究区关闭煤矿涌水特征及来源

Table 4 Characteristics and sources of water inrush from closed coal mines in study area

煤矿编号	关停年份	矿井口 所在地层	矿井口 高程/m	开采标高/m	涌水动态特征	涌水水化学特征	涌水主要来源
K05	—	P <sub>3c</sub>	383	—	涌水量小; 与降雨弱相关, 滞后响应时间≤15 d	pH=2.88; TDS 含量中等	矿坑老空水
K07	—	P <sub>3c</sub>	370	—	涌水量中等; 与降雨中等相关, 滞后响应时间≤15 d	pH=3.03; TDS 含量较高	矿坑老空水
K15	2016	T <sub>1y</sub>	569	+662 ~ +535	涌水量小; 与降雨中等相关, 滞后响应时间≤15 d	—	含水层释水
K21	2015	P <sub>2m</sub>	499	—	涌水量小; 与降雨强相关, 滞后响应时间≤15 d	PH=6.52; TDS 含量高	大气降雨矿坑老空水
K23	2015	P <sub>3c</sub>	980	+1 019 ~ +841	涌水量中等; 与降雨中等相关, 滞后响应时间≤15 d	pH=7.44; TDS 含量低微生物含量高	大气降雨
K27	2014	P <sub>3c</sub>	851	+1 160 ~ +845	涌水量中等; 与降雨中等相关, 滞后响应时间约1个月	pH=7.55; TDS 含量较高; 微生物含量较高	含水层释水
K29	2014	T <sub>1y</sub>	1 148	+1 380 ~ +950	涌水量大; 与降雨弱相关, 滞后响应时间约1个月	pH=7.92; TDS 含量中等; 微生物含量较高	含水层释水
K30	—	T <sub>1y</sub>	1 106	—	涌水量大; 与降雨中等相关, 滞后响应时间约1个月	pH=7.68; TDS 含量中等	含水层释水
K33	2013	P <sub>2m</sub>	1 316	+1 460 ~ +1 140	涌水量大; 与降雨弱相关, 滞后响应时间≤15 d	pH=7.39; TDS 含量低	含水层释水
K36	2015	P <sub>2m</sub>	820	+980 ~ +840	涌水量小; 与降雨中等相关, 滞后响应时间≤15 d	pH=2.87; TDS 含量高	矿坑老空水

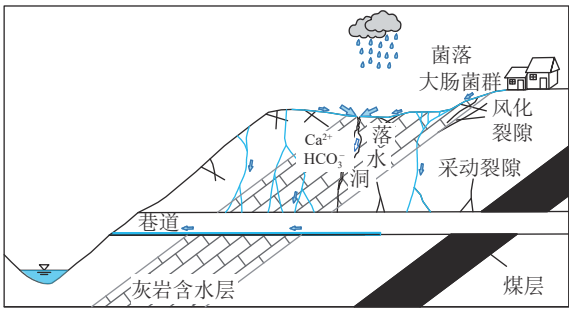


图 7 降雨入渗型涌水示意  
Fig.7 Schematic diagram of rainfall infiltration water inflow

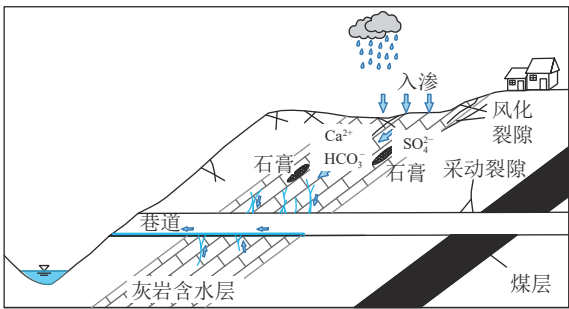


图 8 含水层释水型涌水示意  
Fig.8 Schematic diagram of aquifer releasing water inflow

呈中碱性、TDS 含量受地下水循环速度影响, 矿井水水化学类型以  $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 、 $\text{SO}_4\text{-Ca}$  型为主。研究区关闭煤矿涌水多为含水层释水, 如 K15、K27、K29、K30、K33。

3)老空水溢出型。煤层埋深较浅, 以上山开拓

为主, 采空区老空水沿巷道流至矿井口涌出(图 9)。因研究区煤层富硫, 黄铁矿等低价位的硫氧化, 导致老空水  $\text{SO}_4^{2-}$  含量高, 进而降低水质 pH。另外, 采空区储水环境较封闭、补给条件差, 因此溢出的老空水水量较小, 对降雨响应迟缓, 涌水动态多为缓升缓降型。综上, 该种模式矿井水水化学特征表现 pH 偏低, TDS、 $\text{SO}_4^{2-}$  含量较高, 水化学类型表现为  $\text{SO}_4\text{-Ca}$  型。如研究区 K05、K07、K36 三处关闭煤矿就为典型老空水溢出型。

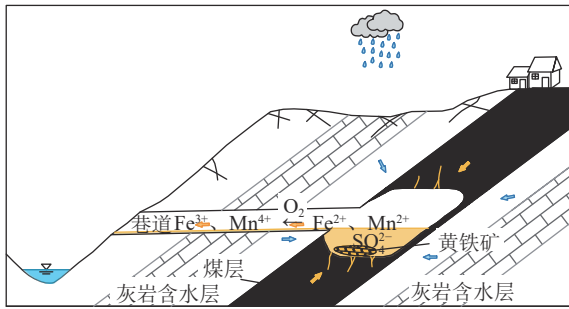


图 9 矿坑老空水溢出型涌水示意  
Fig.9 Schematic diagram of spilling water from old mine water

4)复合型。在自然与人为双重作用下, 关闭煤矿涌水存在 2 种或 2 种以上来源, 此类属于复合型涌水模式。该模式矿井水水量水质特征具有多样性, 涌水水量大小主要受降雨入渗或含水层释水影响; 因矿井老空水水化学特征明显, 对涌水水质的控制

作用较强,因此复合有老空水的关闭煤矿涌水水化学表现为矿井水或弱矿井水性质。如K21矿井涌水量与降雨相关性好,对降雨响应速度较快,但pH值为6.52呈弱酸性、TDS含量也较高,说明K21涌水模式为降雨入渗-老空水溢出两种模式复合型。

## 5 结 论

1)矿区关闭煤矿涌水动态及对降雨的响应存在时空差异性。空间差异体现在不同煤矿涌水量的不同,主要受矿井水释水体和导水介质的类型、性质影响;时间差异性主要表现为关闭煤矿涌水季节性变化明显、流量对降雨响应滞后时间的不同;受释水体储水性和导水介质之间连通性等地质条件控制,研究区煤矿涌水随降雨的变化存在骤升缓降、缓升缓降、平稳三种动态。

2)由矿井水来源和演化环境不同,煤矿涌水水化学环境特征也有差异。受碳酸盐岩含水层及煤层黄铁矿氧化的影响,关闭煤矿涌水水化学类型有 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 、 $\text{SO}_4\text{-Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 三种,其中以 $\text{SO}_4\text{-Ca}$ 型为主, $\text{SO}_4\text{-Ca}$ 型次之。且 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 离子含量与TDS显著正相关,对矿井水成分贡献较大。微生物及TDS含量、pH值离散性较大。

3)结合矿井水文地质条件、矿井涌水量动态、涌水量与降雨量水文序列自相关和互相关函数、矿井水水化学特征、微生物含量、水样间水化学相关系数判别值与水样间关联性大小关系,分析了每个矿井涌水的主要来源。基于矿井涌水来源判识结果,提出了大气降雨入渗型、含水层释水型、老空水溢出型、复合型4种矿区关闭煤矿涌水模式。

## 参考文献(References):

- [1] 袁 亮,姜耀东,王 凯,等.我国关闭/废弃矿井资源精准开发利用的科学思考[J].煤炭学报,2018,43(1):14-20.  
YUAN Liang, JIANG Yaodong, WANG Kai, *et al.* Precision exploitation and utilization of closed /abandoned mine resources in China[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 14-20.
- [2] 袁 亮.推动我国关闭/废弃矿井资源精准开发利用研究[J].煤炭经济研究,2019,39(5):1.  
YUAN Liang. Promote the precise development and utilization of closed/abandoned mine resources in China[J]. Coal Economic Research, 2019, 39(5): 1.
- [3] 吴金随,张辞源,尹尚先,等.近20 a我国煤矿水害事故统计及分析[J].煤炭技术,2022,41(6):86-89.  
WU Jinsui, ZHANG Ciyuan, YIN Shangxian, *et al.* Statistics and analysis of coal mine water damage accidents in China in recent 20 years[J]. Coal Technology, 2022, 41(6): 86-89.
- [4] 姜 本,刘明智.我国南方典型岩溶煤矿床涌水规律和防治水方向的探讨[J].煤炭学报,1982,7(2):70-76.  
JIANG Ben, LIU Mingzhi. Laws of water-inrush and guiding principles for water control in some typical karst coal deposits in south China[J]. Journal of China Coal Society, 1982, 7(2): 70-76.
- [5] HUANG Pinghua, WANG Xinyi. Piper-PCA-fisher recognition model of water inrush source: A case study of the jiaozuo mining area[J]. Geofluids, 2018: 1-10.
- [6] 陈陆望,许冬清,殷晓曦,等.华北隐伏型煤区地下水化学及其控制因素分析—以宿县矿区主要突水含水层为例[J].煤炭学报,2017,42(4):996-1004.  
CHEN Luwang, XU Dongqing, YIN Xiaoxi, *et al.* Analysis on hydrochemistry and its control factors in the concealed coal mining area in North China: A case study of dominant inrush aquifers in Suxian mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(4): 996-1004.
- [7] 赵利军,曹 恒,朱马别克·达吾力.复合隔水条件下煤层群涌水控制因素及对瓦斯赋存的影响[J].中国安全生产科学技术,2020,16(7):55-60.  
ZHAO Lijun, CAO Heng, DAURI Jumabek. Controlling factors of water inflow in coal seam group under composite water-resisting conditions and their influence on gas occurrence[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, 16(7): 55-60.
- [8] Menendez J, Lored J, Galdo M, *et al.* Energy storage in underground coal mines in NW Spain: Assessment of an underground lower water reservoir and preliminary energy balance[J]. Renewable Energy, 2019, 134: 1381-1391.
- [9] 虎维岳,周建军,闫兰英.废弃矿井水位回弹诱致环境与安全灾害分析[J].西安科技大学学报,2010,30(4):436-440.  
HU Weiyue, ZHOU Jianjun, YAN Lanying. Study on environment and safety disasters from abandoned coalmines[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2010, 30(4): 436-440.
- [10] 李琰庆,赵华杰,夏抗生.废弃煤矿诱发的透水机理及防治技术[J].煤矿安全,2020,51(6):87-92.  
LI Yanqing, ZHAO Huajie, XIA Kangsheng. Mechanism and control technology of water inrush caused by abandoned coal mines[J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(6): 87-92.
- [11] 史箫笛,康小兵,罗向奎,等.闭坑煤矿井下空间资源开发利用评价[J].煤炭科学技术,2020,48(3):112-119.  
SHI Xiaodi, KANG Xiaobing, LUO Xiangkui, *et al.* Development and utilization evaluation of underground space resources in closed pit coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(3): 112-119.
- [12] 巫显钧,李宗福,孙大发.松藻矿区M8煤层采面涌水特征与对策[J].中国煤炭地质,2015,27(4):35-38,48.  
WU Xianjun, LI Zongfu, SUN Dafa. Coal Seam M8 Stopping Face Water Gushing Characteristics and Countermeasures in Songzao Mining Area[J]. Coal Geology of China, 2015, 27(4): 35-38, 48.
- [13] 周述和,唐 聪.松藻煤矿综采工作面顶板大型突水原因初探[J].低碳世界,2013(16):124-125.  
ZHOU Shuhe, TANG Cong. Preliminary study on the causes of large-scale water inrush in roof of fully mechanized working face in Songzao Coal Mine[J]. Low Carbon World, 2013(16): 124-125.

- 124–125.
- [14] 李永祥. 茅口组石灰岩巷道防治水技术[J]. *建井技术*, 2015, 36(1): 18–20, 17.  
LI Yongxiang. Technology of Water Prevention and Control for Roadway of Maokou Formation Limestone[J]. *Mine Construction Technology*, 2015, 36(1): 18–20, 17.
- [15] LUO Mingming, CHEN Zhihua, ZHOU Hong, *et al.* Hydrological response and thermal effect of karst springs linked to aquifer geometry and recharge processes[J]. *Hydrogeology Journal*, 2018, 26(2): 629–639.
- [16] XANKE Julian, GOEPPE Nadine, SAWARIEH Ali, *et al.* Impact of managed aquifer recharge on the chemical and isotopic composition of a karst aquifer, Wala reservoir, Jordan[J]. *Hydrogeology Journal*, 2015, 23(5): 1027–1040.
- [17] 吴超. 松藻矿区构造特征及煤体变形程度定量评价研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.  
WU Chao. Study on structural features and quantitative evaluation of coal deformation degree on Songzao Mining Area[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.
- [18] ZHAO Lei, Colin R. Ward, David French, *et al.* Mineralogical composition of Late Permian coal seams in the Songzao Coalfield, southwestern China[J]. *International Journal of Geology*, 2013, 116: 208–226.
- [19] 吴国代, 曾春林, 程军, 等. 松藻矿区地下水动力场特征及其对煤层气富集的影响[J]. *煤田地质与勘探*, 2018, 46(4): 55–60.  
WU Guodai, ZENG Chunlin, CHENG Jun, *et al.* Characteristics of groundwater dynamic field and its effect on coalbed methane accumulation in Songzao mining area[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2018, 46(4): 55–60.
- [20] 梁吉业, 冯晨娇, 宋鹏. 大数据相关分析综述[J]. *计算机学报*, 2016, 39(1): 1–18.  
LIAN Jiye, FENG Chenjiao, SONG Peng. A survey on correlation analysis of big data[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2016, 39(1): 1–18.
- [21] 韩宝平, 郑世书, 周笑绿, 等. 南桐二井采区突水动态研究[J]. *煤田地质与勘探*, 1994, 23(6): 36–40.  
HAN Baoping, ZHENG Shishu, ZHOU Xiaolv, *et al.* Researches on regime of water inrush in allotment on. 2 of Nantong Coal Mine[J]. *Coal Geology & Exploration*, 1994, 23(6): 36–40.
- [22] 束龙仓, 刘丽红, 陶玉飞, 等. 贵州后寨典型岩溶小流域水动力特征分析[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2008, 36(4): 433–437.  
SHU Longcang, LIU Lihong, TAO Yufei, *et al.* Hydrodynamic characteristic analysis of Houzhai karst watershed in Guizhou Province[J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*, 2008, 36(4): 433–437.
- [23] 王朋辉, 姜光辉, 袁道先, 等. 岩溶地下水位对降雨响应的时空变异特征及成因探讨—以广西桂林甑皮岩为例[J]. *水科学进展*, 2019, 30(1): 56–64.  
WANG Penghui, JIANG Ganghui, YUAN Daoxian, *et al.* Characteristics and cause of spatial and temporal variability of karst groundwater level's response to rainfall—a case study of Zengpiyan cave site in Guilin, Guangxi, China[J]. *Advances in Water Science*, 2019, 30(1): 56–64.
- [24] CAI Zuansi, OFTERDINGER Ulrich. Analysis of groundwater-level response to rainfall and estimation of annual recharge in fractured hard rock aquifers, NW Ireland[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 535: 71–84.
- [25] HOCKING Mark, KELLY Bryce F. J. Groundwater recharge and time lag measurement through vertosols using impulse response functions[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 535: 22–35.
- [26] 曹慧丽, 李伟, 苏春利, 等. 水化学及硫同位素对大冶矿区地下水硫酸盐污染的指示[J]. *地球科学*, 2023, 48(9): 3432–3443.  
CAO Huili, LI Wei, SU Chunli, *et al.* Indication of hydrochemistry and  $\delta^{34}\text{S-SO}_4^{2-}$  on sulfate pollution of groundwater in Daye Mining Area[J]. *Earth Science*, 2023, 48(9): 3432–3443.
- [27] 马燕华, 苏春利, 刘伟江, 等. 水化学和环境同位素在示踪枣庄市南部地下水硫酸盐污染源中的应用[J]. *环境科学*, 2016, 37(12): 4690–4699.  
MA Yanhua, SU Chunli, LIU Weijiang, *et al.* Identification of Sulfate Sources in the Groundwater System of Zaozhuang: Evidences from Isotopic and Hydrochemical Characteristics[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(12): 4690–4699.
- [28] SUN Jing, Kobayashi T, STROSNIDER William H J, *et al.* Stable sulfur and oxygen isotopes as geochemical tracers of sulfate in Karst Waters[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 551: 245–252.
- [29] 尹恒, 姜丽丽, 裴尼松, 等. 基于水化学和多元统计的煤矿采空积水识别[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(27): 11051–11058.  
YIN Heng, Jiang Lili, PEI Nisong, *et al.* Identification of coalmine goaf groundwater based on hydrogeochemistry and multivariate statistics[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(27): 11051–11058.
- [30] 王月, 安达, 席北斗, 等. 某基岩裂隙水型危险废物填埋场地下水污染特征分析[J]. *环境化学*, 2016, 35(6): 1196–1202.  
WANG Yue, AN Da, XI Beidou, *et al.* Groundwater pollution characteristics of the hazardous waste landfill built upon bedrock fissure water[J]. *Environmental Chemistry*, 2016, 35(6): 1196–1202.