

“矿井水防治与资源化利用”专题



移动扫码阅读

曾一凡,武 强,赵苏启,等.我国煤矿水害事故特征、成因与防治对策[J].煤炭科学技术,2023,51(7):1-14.
ZENG Yifan, WU Qiang, ZHAO Suqi, *et al.* Characteristics, causes, and prevention measures of coal mine water hazard accidents in China[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 1-14.

我国煤矿水害事故特征、成因与防治对策

曾一凡^{1,2,3},武 强^{1,2,3},赵苏启⁴,苗耀武⁴,张 晔^{1,2,3},梅傲霜^{1,2,3},孟世豪^{1,2,3},刘晓秀^{1,2,3}

(1. 中国矿业大学(北京)国家煤矿水害防治工程技术研究中心,北京 100083; 2. 矿山水防治与资源化利用国家矿山安全监察局重点实验室,北京 100083; 3. 中国矿业大学(北京)内蒙古研究院,内蒙古 鄂尔多斯 017000; 4. 国家矿山安全监察局,北京 100713)

摘要:水害作为煤矿“五大灾害”之一,在威胁煤矿安全生产和职工生命安全方面,已成为仅次于瓦斯事故的第二大“杀手”。2000—2022年,全国煤矿共发生水害事故1206起、死亡5018人,其中较大以上水害事故103起,死亡2039人。为总结事故教训,探寻事故规律,用事故教训推动水害防治工作,从地理区域、年代、季节、水文地质类型、突水水源和煤矿企业所有制等对水害事故特征进行了不同维度的统计和分析。结果表明,在事故特征方面,矿井水文地质类型复杂程度与水害事故发生频率高度一致;华南地区事故起数和伤亡人数位居首位,且全年内水害事故高发期主要集中在3—5月和7—8月;老空水是水害事故的主要充水水源,具有极强的隐蔽性和危害性,并且主要发生在技术探查及管理更弱的乡镇所有制煤矿中。在事故成因方面,客观上开采环境复杂,主观上重视不够,即管理不当和违法违规开采,是事故发生的主要原因;点状的陷落柱和线状断层构造等隐蔽导水内边界以及老空水等未按规定探放,是事故发生的主要技术原因。最后,采用文献计量学可视化分析发现,当前煤矿水害方面聚焦的研究主题可以很好地对应“预测预报、有疑必探、先探后掘、先治后采”的煤矿防治水原则。从破解煤矿水害“风险查不清”“有险断不准”“出险治不了”等困境出发,相应从矿井充水因素和隐蔽致灾地质因素普查、立体充水水文地质条件分析以及分类源头精准防治等3大方面提出相应的对策;并顺应水害防控信息化和智能化发展趋势,提出透明矿山、水害灾变监测预警和应急救援等保障技术措施。

关键词: 矿山安全; 矿井突水; 隐蔽致灾因素; 探放水; 水害防治

中图分类号: TD745 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2023)07-0001-14

Characteristics, causes, and prevention measures of coal mine water hazard accidents in China

ZENG Yifan^{1,2,3}, WU Qiang^{1,2,3}, ZHAO Suqi⁴, MIAO Yaowu⁴, ZHANG Ye^{1,2,3}, MEI Aoshuang^{1,2,3}, MENG Shihao^{1,2,3}, LIU Xiaoxiu^{1,2,3}

(1. National Engineering Research Center of Coal Mine Water Hazard Controlling, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Mine Water Control and Resources Utilization, National Mine Safety Administration, Beijing 100083; 3. China University of Mining and Technology-Beijing Inner Mongolia Research Institute, Ordos 017000, China; 4. National Mine Safety Administration, Beijing 100713)

Abstract: As one of the top “five major hazards” in coal mines, water hazards have become the second leading cause of danger for coal mine safety and worker lives, next only to gas accidents. Between 2000 and 2022, a total of 1 206 water hazard accidents occurred in coal mines in China, resulting in 5 018 deaths, among which 103 larger-scale events resulted in 2 039 deaths. In order to identify accident patterns, summarize lessons learned, and promote prevention of water hazard accidents, various aspects were analyzed statistically, including geographical regions, years, seasons, hydrogeological types, water sources, and ownership of coal mines. Analyses revealed that the com-

收稿日期: 2023-04-08 责任编辑: 周子博 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2023-0500

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFC2902004); 国家自然科学基金资助项目(42072284, 42027801)

作者简介: 曾一凡(1984—),男,湖北咸宁人,副教授。E-mail: zengyf@cumtb.edu.cn

通讯作者: 武 强(1959—),男,内蒙古呼和浩特人,中国工程院院士。E-mail: wuq@cumtb.edu.cn

plexity of hydrogeological conditions highly correlated with the frequency of water-related accidents. Southern China recorded the highest number of incidents and casualties, and the peak incidence periods throughout the year mainly concentrated in March to May and July to August. Goaf water was identified as the primary source of water filling, which presented strong concealment and harm, mainly occurring in township-owned coal mines with weaker technical exploration and management capabilities. As for the causes of accidents, complex mining environments and insufficient attention subjectively, i.e., improper management and illegal mining, were the main reasons for accidents. Hidden water-bearing structures such as point-like collapse columns and linear fault structures, as well as goaf water that were not explored and placed in accordance with regulations, were identified as the main technical causes of accidents. By analyzing bibliometrics, it was found that current research themes focusing on coal mine water disasters align well with the principles of “predicting and forecasting, exploring if in doubt, exploring before mining, treating before mining”. To address the problems of “unclear risk assessment, inaccurate risk identification, and incapability to cope with accidents” in coal mine water disasters, corresponding countermeasures were proposed in three aspects: surveying filling factors and hidden geological factors causing disasters, analyzing three-dimensional hydrogeological conditions of filling water, and implementing an accurate classification source prevention. In response to the trend of informationization and intelligent development of water disaster prevention and control, technical measures such as transparent mines, water disaster monitoring and early warning, and emergency rescue were proposed.

Key words: mine safety; mine water inrush; hidden disaster-causing factors; water exploration and discharge; water hazard prevention and control.

0 引言

水害事故是仅次于瓦斯事故的煤矿群死群伤“第二杀手”,同时也是制约我国煤炭资源安全经济开采的主要灾害之一。常言道“水火无情”,煤矿水害事故隐蔽性强、灾害发生速度快以及危害性大,一旦发生突水事故,轻则增加排水费用,造成吨煤成本升高、生产环境恶化、采掘接替紧张等;重则造成人员伤亡、采区或矿井被淹、抢救难度大、救援复矿时间长、经济损失重、社会影响广等。

我国是一个由多个板块经多序次地质构造运动拼接而成的陆地,造成我国是世界上水文地质条件最为复杂的国家^[1]。煤矿开采可能受到大气降水直接补给型、地表水充水型、地下水充水型(如松散孔隙水、基岩裂隙水、可溶岩岩溶水和烧变岩水等)以及人为充水型的袭夺水、离层水和老空(窑)水等多种水源的严重威胁。随着东部矿区煤炭开采深度的逐渐加大以及西部矿区大采高、放顶煤等高强度开采技术的发展,突(涌)水灾变控制因素和灾变机理日趋多变,特别是资源整合矿井中,废弃老窑和采空区比比皆是,重特大突水事故时有发生。上述复杂的水文地质条件和煤矿开采背景造就我国成为世界煤矿水害最为严重的国家之一^[2]。例如2020—2022年,全国煤矿先后发生3起重大水害事故、6起较大水害事故,共造成78人死亡,同时发生多起水害涉险事故;特别是2021年全国发生的4起煤矿死亡事故,均为水害事故。充分暴露出煤矿水害防治工作仍存在诸多突出问题和薄弱环节。

煤矿突水事故调查分析一直是矿山安全工程领

域关注的重点。我国相关部门和专家也一直在跟踪研究,国家矿山安全监察局(原国家煤矿安全监察局)自2003年以来,编制了多本全国煤矿典型事故案例汇编,共收录了2000—2022年的1205起水害事故,包含了事故经过及类别、事故原因及性质、事故防范建议等内容,为本文的撰写提供了可靠的数据来源^[3]。丁百川^[4]对2011—2016年我国煤矿灾害事故进行详细分析,并提出重大灾害的防治建议。苗耀武等^[5]分析了2020年全国煤矿水害事故的基本情况、存在问题,将致灾因素归纳为6个方面;孙文洁等^[6]整理了2000—2015年的数据资料,发现重大水害事故单起死亡人数最多;魏久传等^[7]对2001—2013年我国发生的煤矿水害事故的相关信息分层次、分类别统计,阐明了相关因素与煤矿水害事故之间的关系;尹尚先等^[8]分析了水害事故发生的主要原因,并提出了相应技术措施,规范了超前探放水流程;张培森等^[9]对2008—2020年我国的水害事故信息进行汇总,分析获得水害事故集群性发生省份。虽然当前研究取得了一定的成果,但水害事故“预测难、扩散快、救援难、周期长、恢复难、损失大、伤亡多”等问题突出,针对不同水害特征规律下的综合防治体系尚未成型。

前车之覆,后车之鉴。笔者通过对2000—2022年煤矿水害事故的综合统计分析,系统性分析水害事故发生的特征规律,探讨揭示水害事故背后的原因,总结煤矿水害研究现状并提出相应的防控对策。旨在深刻汲取煤矿水害事故教训,进一步健全我国的煤矿水害风险防控体系,为煤矿的安全、高效开采及水害预防、治理提供参考和借鉴。

1 全国煤矿水害事故分析

1.1 矿井水文地质类型概况

截至2023年1月,全国共有煤矿4368座,其中正常生产建设煤矿2889座,停产停建煤矿1479座。其中,煤矿水文地质类型极复杂型33座、复杂型251座,合计占全国煤矿总数的6.5%,其合计产能占正常生产和在建产能的16%。从区域分布来看,水文地质类型复杂和极复杂的煤矿数量前十位的依次为陕西56座、河北28座、河南28座、山西25座、新疆24座、贵州23座、四川20座、内蒙古16座、安徽17座、山东17座,分别占到各自所属地区煤矿总数量的15%、48%、14%、3%、11%、3%、8%、3%、42%、18%。上述地区水文地质类型极复杂和复杂矿井占全国总数的89%,是典型的煤矿水文地质条件复杂地区,同时也是我国水害防治工作监察监管的重点区域。

1.2 水害事故基本情况

2000—2022年,我国共发生煤矿水害事故1206

起,死亡5018人,其中较大以上水害事故103起,死亡2039人。水害事故平均死亡人数约为4.16人/起,是煤矿事故平均死亡人数(1.69人/起)的246.2%。如图1所示,2000—2022年,煤矿水害事故起数总体趋势呈现先短期上升且基数大而后稳步下降,其中2002年达到水害事故的峰值159起,2019年达到最低值3起。2000—2005年煤矿水害事故死亡人数变化波动较大。峰值与低点相差近300人,在2005年达到峰值后至2022年,煤矿水害事故死亡人数稳步下降,2019年达到了最低点10人。说明我国在煤炭高效开采过程中,水害的防治越来越成熟,但矿井水害依旧在煤矿事故中占重要地位,水害防治工作依旧需要引起足够的重视。此外,自建国以来,我国共发生2起超过100人的生命损失的煤矿水害事故,2005年广东梅州市兴宁市大兴煤矿以及2007年山东省新泰市华源煤矿;自2010年山西王家岭煤矿水害事故发生至今,未发生特别重大水害事故。2000—2022年,我国11起特别重大煤矿水害事故信息见表1。

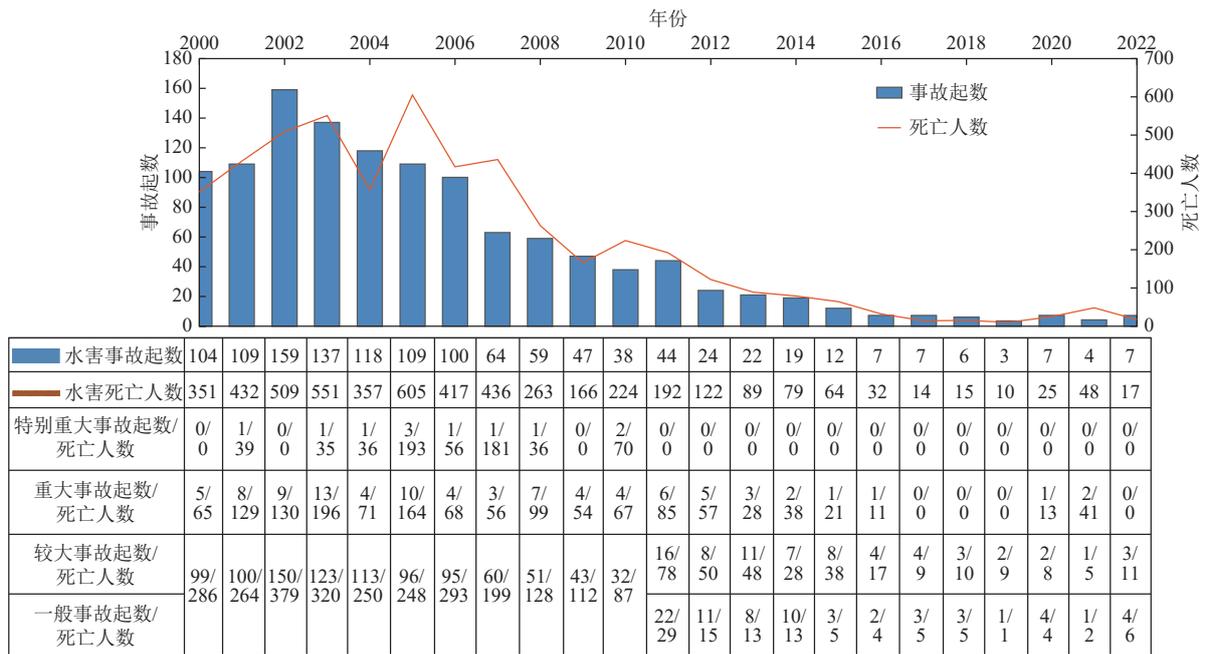


图1 2000—2022年我国煤矿水害事故起数和死亡人数情况

Fig.1 Number of deaths from water hazards in coal mines in China from 2000 to 2022

2 不同维度下的水害事故统计分析

通过对各省矿山安全监察局、中国煤矿安全网的相关数据进行汇总,分别从不同维度对我国2000—2022年23年间的煤矿水害事故进行统计,全面、深入地认识事故的成因和规律。

2.1 按空间分布统计

我国幅员辽阔,不同地区的地质条件、气候条件

以及受水害威胁程度不同,全国“井”字形煤炭资源分布,分为华北石炭二叠纪煤田岩溶-裂隙水害区、华南晚二叠纪煤田的岩溶水害区、东北白垩纪煤田的裂隙水害区、西北侏罗纪煤田的裂隙水害区、西藏—滇西中生代煤田裂隙水害区和台湾第三纪煤田裂隙水害区6个矿井水害区^[10]。

华北石炭二叠纪煤田岩溶-裂隙水害区煤炭资

表1 2000—2022年我国特别重大煤矿水害事故信息

Table 1 Information on particularly serious coal mine water accidents in China from 2000 to 2022

序号	事故日期	事故地区	事故单位	经济类型	死亡人数	水害类型	事故概况及原因
1	2001-05-18	四川	宜宾市南溪监狱 青龙嘴煤矿	国有煤矿	39	老空水	构造破坏裂隙带导通邻近老窑采空区,老空积水渗透和采动压力等共同作用下,构造破坏加剧,导致邻近老窑采空区积水突然溃入该矿井
2	2003-07-26	山东	枣庄市滕州市 木石煤矿	乡镇煤矿	35	老空水	违法越界开采煤层防水煤柱,工作面在生产过程中顶板冒落后与露天矿矿坑直接连通,导致露天坑内的积水、泥沙溃入井下
3	2004-12-12	贵州	铜仁市思南县 天池煤矿	乡镇煤矿	36	岩溶水	上山掘进接近与煤层立体斜交隐伏的岩溶溶洞,在强大的水压作用下发生透水事故
4	2005-04-24	吉林	吉林腾达 煤矿	私营	30	老空水	违法越界开采防水煤柱,吉安煤矿在掘进中,违法越界开采防水煤柱,放炮导通原蛟河煤矿采空区积水,水流泄入腾达煤矿,导致事故发生
5	2005-08-07	广东	梅州市兴宁市 大兴煤矿	乡镇煤矿	121	老空水	因超强度开采,导致煤层严重抽冒,破坏了安全防水煤柱,使上部积水迅速溃入井下,发生事故
6	2005-12-02	河南	洛阳市新安县 寺沟煤矿	乡镇煤矿	42	老空水	非法开采防水煤柱,导致邻近废弃矿井老空水及其连通的松散孔隙水和地表河水溃入井下,发生事故
7	2006-05-18	山西	大同市左云县 新井煤矿	乡镇煤矿	56	老空水	由于放炮震动破坏了与附近废弃矿井采空区的隔离带,造成采空区积水涌入矿井发生透水事故
8	2007-08-17	山东	新泰市华源煤矿	国有煤矿	181	地表洪水	突降暴雨,山洪暴发,导致柴汶河东都河堤被冲垮,洪水涌入导致事故发生
9	2008-07-21	广西	右江市矿务局 那读煤矿	国有煤矿	36	老空水	工作面第三开切眼掘进工作面发生老空透水事故
10	2010-03-01	内蒙古	乌海能源骆驼 山煤矿	国有煤矿	32	奥灰水	巷道掘进过程中遇垂向隐伏构造导致奥灰突水
11	2010-03-28	山西	华晋焦煤王 家岭煤矿	国有煤矿	38	老空水	首采工作面巷道掘进时遇老巷发生透水事故

源储量大、分布广泛,是我国主要的煤炭生产基地。23年间共发生重大水害事故37起,死亡848人。对发生水害矿井的水文地质类型^[11-12]进一步统计(图2)可以发现,中等及以上矿井共计23个,占比69.7%,其中复杂矿井12个,占比36.4%。该地区具有煤系地层下伏富水灰岩的特殊岩层结构,岩溶陷落柱为该地特有的水害来源。陷落柱分布具有极强的非均质性,难预测,定位困难,极易造成陷落柱突水事故。此外,华北煤田矿井年排水量达 $3.11 \times 10^9 \text{ m}^3$,占

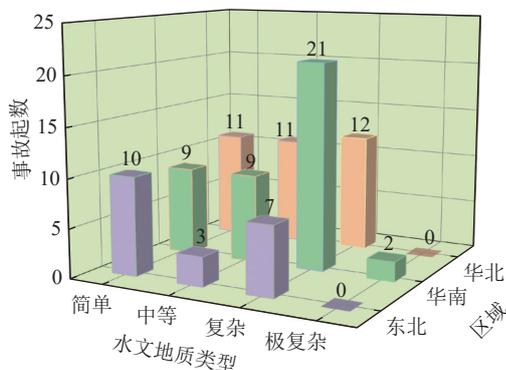


图2 发生水害事故矿井的水文地质类型统计

Fig.2 Types of hydrogeology in water hazards mines occurred

全国总排水量的43%,矿井涌水量大,防治水难度较高。

华南晚二叠纪煤田的岩溶水害区,23年间共发生重大水害事故42起,死亡801人。华南地区发生水害矿井的水文地质类型划分为中等及以上矿井30个,占比达75%,其中复杂矿井21个,占比52.5%,极复杂矿井1个,占比2.5%。华南地区地质条件复杂,岩溶地貌发育,溶洞、钙化等地质构造分布广,形成了复杂且水量大的地下水系统;其次,该地区气候多雨,补给强度大,难以有效抽排,防治难度大;同时,该地区煤田开采普遍属于井工开采,开采历史较长,存在着大量的老空区。地下水系统和老空区交互的复杂性,使其成为23年间矿井水害最频发的区域。

东北侏罗系煤田裂隙水害区水文地质条件相对简单,受水害威胁相对较小,23年间共发生重大水害事故17起,死亡276人。东北地区发生水害的水文地质类型的矿井中,中等及以上矿井10个,占比50%,其中复杂矿井7个,占比35%。开采煤层顶板多为松散的新进系冲积层,含水性强且开采深度较浅,顶板冒落容易触及上覆含水层或地表水体,造成突水事故。

西藏-滇西中生代煤田裂隙水害区和台湾第三

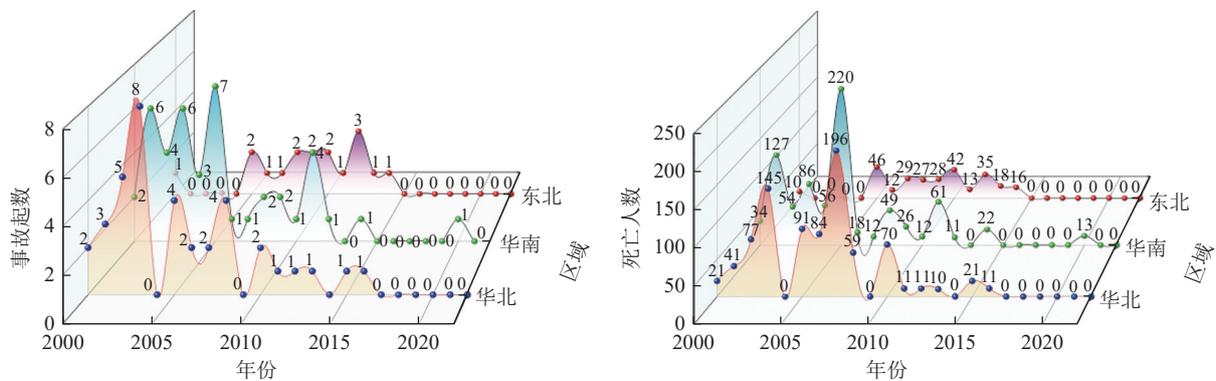
纪煤田裂隙水害区储煤量少,仅为全国储量的0.1%,煤矿总量少,开采强度低。该区水文地质条件简单,煤矿水害威胁程度相对低,在23年间未发生重大水害事故。

西北侏罗纪煤田裂隙水害区主要以顶板水害为主。其煤系沉积稳定,煤炭资源富集程度高,可开采煤层厚。随着大采高和综采放顶煤等高强度规模化开采技术的发展,开采效率大幅提升的同时,也带来了矿山水害安全防治和生态脆弱区环境保护等多重问题。随着国家煤炭开采中心向西部转移,西北地区特有的水文地质条件和开采方式,造成近3年的重大水害事故主要集中于西北侏罗纪煤田裂隙水害

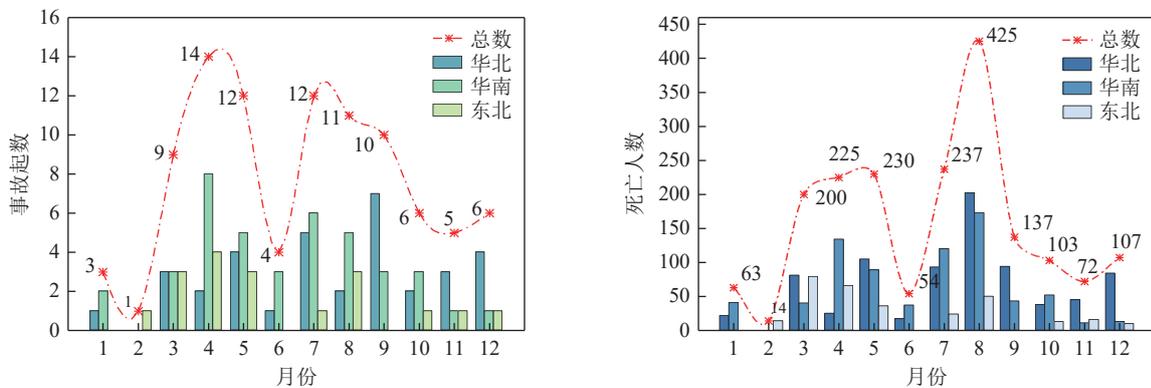
区,3年累计死亡人数达49人。

2.2 按时间分布统计

西藏—滇西、台湾、西北3个水害区在研究年份中并未呈现统计意义,故进一步对华北、华南、东北3个水害区进行时间分布的统计(图3a)。结果表明,华北和华南水害区水害发生频次具有较高的一致性,主要分为3个阶段,分别是2000—2005年高频发水害阶段、2006—2012年中频发水害阶段和2013—2022年低频发阶段。水害模式和防治手段的改进,以及开采强度的逐步降低,华北和华南水害事故呈现明显下降趋势。东北地区的水害事故主要集中在2005—2014年之间,数量少但持续发生。



(a) 水害事故数量和死亡人数的年份分布统计



(b) 水害事故数量和死亡人数的月份分布统计

图3 重大水害事故时间分布统计

Fig.3 Time distribution statistics of major water hazards

重大及以上水害事故总量按月份分布情况如图3b所示,3个地区全年均呈现2个水害事故高发期,分别为3—5月和7—8月。7—8月高发期的平均死亡人数达28.7人/起,此阶段主要受季节气候影响,雨季时矿井涌水接受补给,突水频发且突水量大,易造成淹井事故;3—5月高发期的平均死亡人数达18.8人/起,此阶段是由于春节期间大部分矿井停产,春节后煤炭资源较为缺乏,企业急于加大煤炭产量,易于忽视安全管理。

华南水害区的地质特性决定了该水害区最易接受降雨补给,且在汛期雨量集中。7—8月是华南水害区最主要的水害事故高发期,统计期间内共发生水害事故11起,死亡293人,平均死亡人数为26.6人/起。3—5月是东北水害区的最主要事故高发期,除了春节等人为因素影响以外,该地区3—5月气温回升,巨大温差极易岩石膨胀开裂,同时融雪水量导致地下水水位上升,矿井涌水风险增大,容易引发矿山水害事故。

2.3 按矿井充水水源统计

充水水源分析是水害事故统计和分析中至关重要的一环。根据充水水源的赋存介质,共将其分为松散孔隙水及裂隙水、岩溶水、老空水和大气降水及地表水四部分。通过对2011—2022年间发生的较大及以上煤矿水害充水水源进行统计(图4),松散孔隙水及裂隙水、岩溶水、大气降水及地表水平均死亡人数分别为6.7人/起、2.7人/起、10.5人/起;水害事故发生最主要的水源为老空水,12年间共发生70起,造成485人死亡,平均死亡人数6.9人/起。

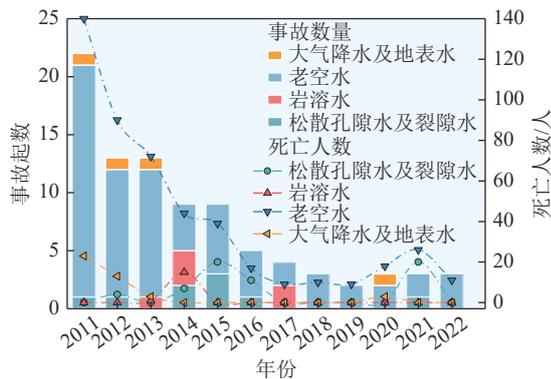


图4 2011—2022年煤矿水害按充水水源分布

Fig.4 Distribution of water hazards in coal mines by water-filled water sources from 2011 to 2022

我国煤层充水条件复杂多样,其中老空水和地表水造成损失最大。老空水边界形状极不规则。若缺乏原来采掘活动遗留矿井周围准确测绘资料,在开采过程中难以分析判断开采工程和水体的距离,从而成为煤炭开采的安全隐患。这种水体流动方式不同于地下含水层的径流,水量赋存十分集中,压力传递迅速。水体与掘进工程的距离小于安全距离时,会迅速灌入大量老空水。该类型水害具有很大的破坏性,必然会造成人员伤亡。地表水类型有长年有水的河流、湖泊、水库、塘坝等。若在煤矿井下防水煤(岩)柱留设不当,掘进工程接触断层等导水构造或发生顶板冒落时,沟通地表水体并使大量地表水迅速溃入井下,造成煤矿水害事故。这类水体涌水量大,水流迅速,也具有很大破坏性。

2.4 按矿井企业所有制统计

根据经济类型所有制将矿井分为4个类别,分别是国有重点企业、国有地方企业、乡镇企业和其他企业。2011—2022年发生的较大及以上水害事故统计(图5),矿井水害事故主要集中于乡镇企业,总数达54起,死亡418人,分别占水害统计总数58.4%和50%;其次为国有重点企业,发生矿井水害事故

23起,死亡293人,分别占总数的25.8%和37.8%;其他企业6起,死亡42人,占比分别为9%和8.5%;国有地方企业6起,死亡29人,占比为6.7%和3.7%。

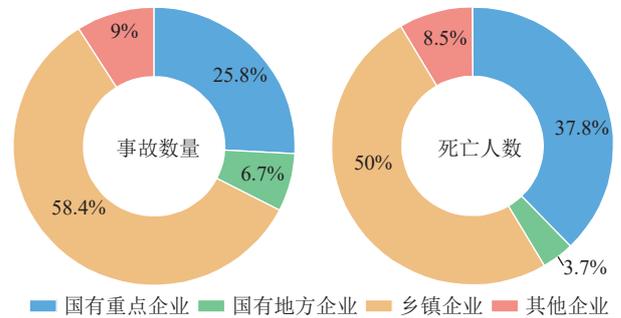


图5 水害事故企业所有制情况

Fig.5 Ownership of enterprises with water hazards

乡镇企业技术力量相对较弱,缺乏必要的安全投资和管理经验,存在以下问题:①投入不足:由于资金和技术等方面的原因,乡镇企业在矿井建设和生产经营过程中常常存在投入不足的情况,难以保证相关设备和工具的安全可靠性;②监管不规范:由于乡镇企业的管理经验相对较少,很多企业在矿井的安全管理上还没有形成科学、规范的管理制度和标准,难以有效遏制安全事故的发生;③人员素质较低:许多乡镇企业在招聘和培训员工方面并不严谨,导致矿工群体的普遍化素质较低,意识不够安全,加上缺乏必要的安全教育和培训,极易发生安全事故。

国有企业在生产管理过程中,制度规范,对工人的教育工作落实到位同时具有较为完备的安全保证体系,减小了水害事故发生的可能性。

3 煤矿水害事故原因与经验教训

3.1 水害事故致因统计分析

煤矿水害事故发生的原因较复杂、千差万别,分为直接原因和间接原因,直接原因主要包含机械、物质或环境的不安全状态和人的不安全行为,而间接原因主要指的是能导致直接原因发生的事件。总体来说,客观上开采环境复杂以及主观上重视不够,是事故发生的主要原因,因我国水害事故在2010年前不区分统计一般和较大水害事故,对2010—2020年全国煤矿发生的较大以上水害事故的直接原因按技术、管理、非法违法开采3类进行归类分析(图6)。

1)管理原因。在统计的98起较大以上水害事故中,属管理原因的水害事故共62起,占63.3%。其中因探放水措施落实不到位导通老(窑、巷)空水所造成的事故共41起,占41.8%。例如山西襄矿西故

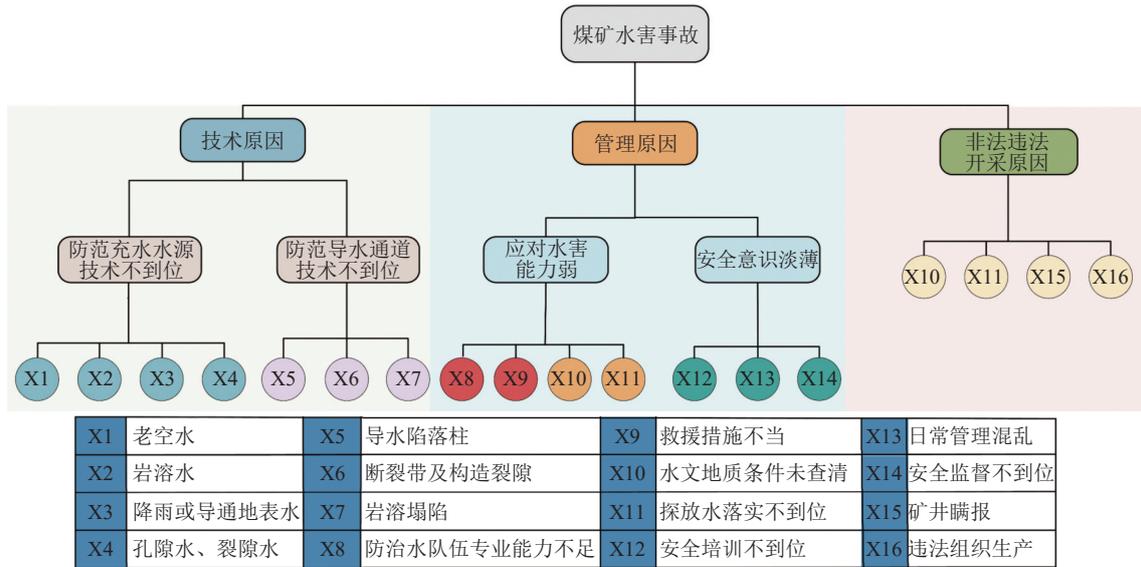


图 6 水害事故致因统计分析
Fig.6 Statistical analysis of causes of water disasters

县煤业有限公司“10·25”较大水害事故,由于在邻近老空积水和断层区域违法违规组织生产,未按规定进行探放水,3号巷采面爆破作业后,在老空水压力作用下造成断层破碎带松动垮塌导通老空区,导致已整合关闭煤矿的老空水溃入矿井,造成4人死亡。因废弃井筒治理不彻底所造成的事故共14起,占14.3%。例如黑龙江省鸡西市鸡东县金地煤矿“10·11”重大透水事故,在原立井水文地质资料不清的情况下,平巷掘进工作面违章放炮,打通了与原立井相连的一条巷道,井筒和巷道中的积水溃入该平巷,导致水害事故发生,死亡13人。因汛期雨季“三防”措施不到位所造成的事故共8起,占8.2%。例如广西壮族自治区来宾市合山煤业八矿河里樟村井“7·2”重大溃浆溃水事故,汛期强降雨天气造成井田内采空区上覆土层塌陷,大量泥浆经过采空区,冲破-200m石门密闭溃入井下,导致事故发生,造成20人死亡。因出现透水征兆时未及时采取有效措施所造成的事故共19起,占19.4%。例如山西省王家岭矿“3·28”特别重大透水事故,该矿20101回风巷掘进工作面附近时,在小煤窑老空区积水情况未探明的情况下,发现透水征兆后未及时采取撤出井下作业人员等果断措施,继续掘进作业导致老空区积水透出,造成标高+583.168m以下的巷道被淹,造成38人死亡、115人受伤特重大事故。

2)技术原因。在统计到的98起煤矿较大水害事故中,属技术原因的水害事故共15起,主要为防范导水通道(点状的陷落柱和线状断层构造)和老空水等技术措施不到位15.3%。其中因防范导水陷落

柱技术措施不到位所造成的水害事故共6起,占6.1%。例如淮南潘二煤矿“5·25”较大突水事故,12123工作面底板联络巷掘进工作面底板存在隐伏陷落柱,在采动应力和承压水作用下,奥陶系灰岩水通过隐伏陷落柱从巷道底板突出,造成矿井被淹。因防范断裂破碎带技术措施不到位所造成的事故共8起,占8.2%。例如宜春市袁州区西村镇北槽煤矿“11·22”较大透水事故,该矿F₇正断层造成上盘煤系地层与下盘的茅口灰岩对接,-155m西集中运输巷掘进工作面进入F₇正断层影响带,巷道停止掘进后,在高压及构造应力持续作用下突破有限隔水岩柱形成集中通道导致茅口灰岩水滞后溃出,造成7人死亡。防范老空水技术措施不到位所造成的事故共1起,占1%。例如四川芙蓉集团实业有限责任公司杉木树煤矿“12·14”较大水害事故,相邻煤矿越界开采,杉木树煤矿防范措施不到位,来自相邻煤矿的采(老)空水在动水压力作用下瞬间突破杉木树煤矿N26边界探煤上山绞车房顶部边界煤柱,冲毁该上山下口N26-YM-29密闭,涌入矿井N26采区,造成5名作业人员溺水死亡。

3)违法开采原因。在统计的98起较大以上水害事故中,属非法违法开采原因的水害事故共28起,占28.6%。其中因超层越界非法开采所造成的事故共14起,占14.3%。例如黑龙江省鸡西煤业恒鑫源煤矿“7·31”重大透水事故,该矿越界回采到鸡西矿务局恒山矿(已报废)采空区下部,左一片长壁后退回采后,顶板发生垮落,通过上覆岩层产生的裂隙和断层破碎带与恒山矿采空区连通,采空区积水缓慢

涌入,上覆围岩经过长时间冲刷,岩层力学性能发生变化,受采动影响围岩承压能力失衡,在鸡西矿务局恒山矿采空区积水的高压作用下,压垮与采空区之间的岩柱,采空区大量积水溃入矿井引发事故,导致24人死亡。因超层越界非法开采所造成的事故共11起,占11.2%。例如湖南衡阳源江山煤矿“11·29”重大透水事故,该矿在-500 m水平61煤采掘期间,明知工作面上方采空区存在积水,仍然心怀侥幸,冒险蛮干,巷道式开采急倾斜煤层,在矿压和上部水压共同作用下发生抽冒,导通上部导子二矿-350~-410 m采空区积水,造成13人死亡。

综上,客观上开采环境复杂,主观上重视不够,即管理不当和违法违规开采,是事故发生的主要原因;点状的陷落柱和线状断层构造等隐蔽导水内边界以及老空水等未依规照章探放是事故发生的主要技术原因。

3.2 矿井水害事故主要经验教训

1)防治水技术工作薄弱。一些煤矿水文地质勘探程度不足,含水层富水性、构造导水性、老空水影响范围等水文地质条件不清,水害危险性认识不准确,造成采掘过程中发生水害事故。另外部分事故企业未编制防治水规划和探放水设计,未制定探放水措施,缺少探放水整体规划和设计。

2)防治水投入不足。部分事故企业未按《煤矿防治水细则》要求配齐专用探放水设备,水文监测系统不能正常运行,排水系统不完善,防治水装备、设施达不到要求,设备投入不足。另外部分事故企业未按《煤矿防治水细则》要求配备防治水专业人员,建立专门探放水队伍,人员配备不足。

3)防治水管理不到位。部分企业现场不按设计施工,钻孔施工不到位,探放水效果验收不到位,物探、钻探资料不可靠或造假,并且未按要求使用专用探放水钻机,用风煤钻代替进行探放水,防治水现场管理不到位。一些矿井采掘活动接近陷落柱、断裂破碎带、导水裂隙带、顶板离层区及富水异常区等特殊工程地质区域时,未引起管理层的高度重视,对灾害后果认识不足,未及时调整和完善防治水措施,特别是超前探测和防治水措施不到位,钻孔验证不到位,盲目作业触发水害事故,超前探测和水害防治措施落实不到位。

4)违法违规组织生产。主要表现在4个方面:①超层越界、非法开采煤炭资源。部分事故企业法律意识、安全意识淡薄,突破依法办矿的红线,超层越界开采,非法盗采他矿资源,因邻矿积水情况不清

而引发事故。②生产经营层层转包。部分事故企业矿井现场生产管理混乱,存在“以包代管”现象,且承包施工队缺少施工资质、各自为政等问题突出。③盲目追求利益、边建边生产。部分事故企业急于收回投资、盲目追求利益,在批准建设区域外同时组织非法生产,终酿事故。④违章指挥、违规作业。部分工程管理人员只关心企业利益,片面追求工程进度,不顾职工生命安危,违章指挥工人冒险作业。

5)安全教育培训、应急演练及对突水事故应急处置不到位。部分事故暴露出企业应急救援培训针对性不强,管理人员和职工对透水预兆认识不清,自保互保意识不强;未开展水害事故专项应急演练工作,管理人员和职工在透水发生时应急处置能力差,出现透水预兆后,不及时撤人,继续违章冒险作业等问题。

4 煤矿水害防控研究现状

煤矿水害防控涉及地质学、水文地质学与采矿科学技术等跨学科交叉,主要由水害致灾理论方法研究(主要包括灾变机理、危险性评价、灾变预测等)和防治技术(主要包括探查技术、防治技术、保障技术等)构成,涉及面广,内外主控因素多且复杂,面临诸多世界性理论及技术难题^[13]。为探析煤矿水害防控理论和技术的国内外研究热点变迁及发展趋势,采用文献计量学可视化分析方法,以2013年以来中国知网(CNKI)数据库、Web of Science数据库收录的有关煤矿水害的检索信息为基础,使用CiteSpace软件对国内外研究现状进行分析。

通过CNKI数据库和Web of Science数据库关键词共现图(图7a和图7b)中各关键词的词频比例分析,煤矿水害的研究可总结为4个主题:水害预测、水害探查、水害治理和水害监测预警。这与“预测预报、有疑必探、先探后掘、先治后采”的煤矿防治水十六字原则可以很好地对应,表明了学术界和工业界中,以十六字原则为主体的防治水工作体系已经构建。结合关键词共现时间线图(图7c),可进一步发现,以综合物探和注浆为代表的突水预测、注浆改造和水害防治,近10年来一直是煤矿水害的研究热点,而综合物探、注浆和微震监测的较高出现频率,也反映出了这些方法近10年已被广泛应用于生产实际。

4.1 水害预测研究现状

水害预测预报是煤矿进行安全生产,防止水害事故发生的先决条件。水文地质勘探为水害预测提供了主采煤层与含水层间空间叠置关系、充水水源、

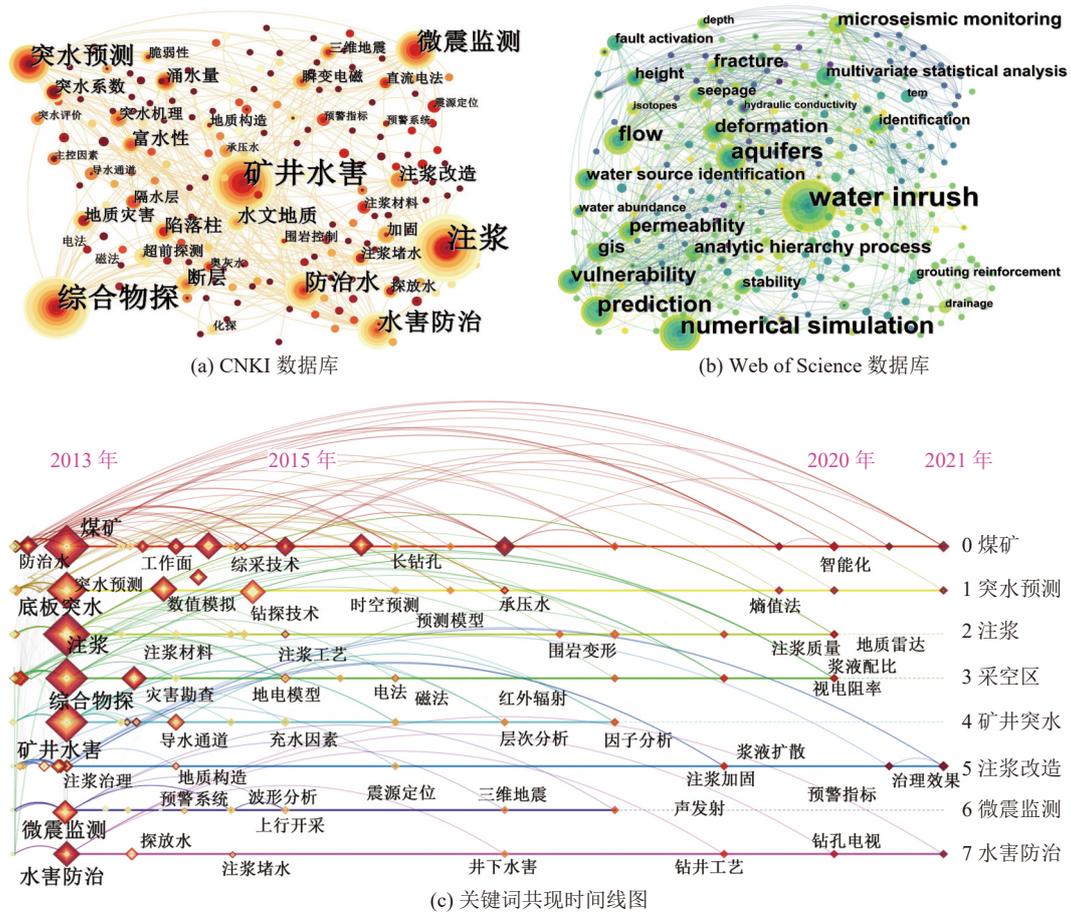


图 7 煤矿水害领域关键词共现图

Fig.7 Co-occurrence map of mine water hazard keywords

充水通道及老空区分布等地学信息,是水害预测预报的重要基础。水文地质勘探理念和技术手段的创新,提高了对地质构造、充水水源、导水通道、老空区等方面的探查精度,进而提高了水害预测预报的准确性。如地质构造勘探和老空区勘探的地面高分辨率三维地震、地面电法和充电法造影成像等技术。预测预报方法是水害预测的核心,由于煤矿水害预测理论不断完善,水害预测预报的技术方法也日益成熟^[14-15]。针对我国普遍面临的煤层底板突水难题,在原有“突水系数法”基础上,提出了可考虑更多影响因素的“脆弱性指数法”和“五图双系数法”等底板突水综合评价预测方法^[16-17];对于煤层顶板水害,提出了可以同时解决顶板充水水源、通道和强度三大关键技术难题的“三图-双预测法”^[18]。

分别以 CNKI 数据库和 Web of Science 数据库为基础,借助 CiteSpace 绘制煤矿水害预测领域的关键词共现图(图 8)。通过对图中各关键词的词频比例进行分析可知:现有的中文文献有关水害预测方面的研究主要集中在底板突水、突水预测方面,并且多采用数值模拟的手段进行研究(图 8a);同时英

文文献的相关研究也主要利用 Numerical Simulation (数值模拟)、GIS(地理信息系统)等手段,进行着 prediction(预测)、risk assessment(风险评估)等方面的研究(图 8b)。这说明国内外的研究趋势大体趋于一致,均以矿区水文地质数据为基础,进一步利用 GIS 和数值模拟等手段进行水害预测,从而推动煤矿水害预测理论与方法的不断进步。

4.2 水害探查研究现状

井下超前探放水是在工作面推进前防止水害发生的关键步骤。超前探放水必须满足“三专”要求,即专业的技术人员,专业的探放水队伍,专业的探放水设备。掘进工作面的超前探放水主要有钻探、物探、化探和坑探几种手段,其中物探和钻探是最常用的 2 种手段。钻探为扰动破坏性探测,勘探结果直接明确,采掘工作面超前定向钻孔探放水技术由于具有人为定向和钻孔轨迹可循特点,可代替多个传统的直孔钻探,大幅提升了超前钻探的效率。物探为无损型探测,主要包括直流电法、瞬变电磁法、激发极化法、高分辨二维地震法、地质雷达陆地声纳法等^[19-22]。

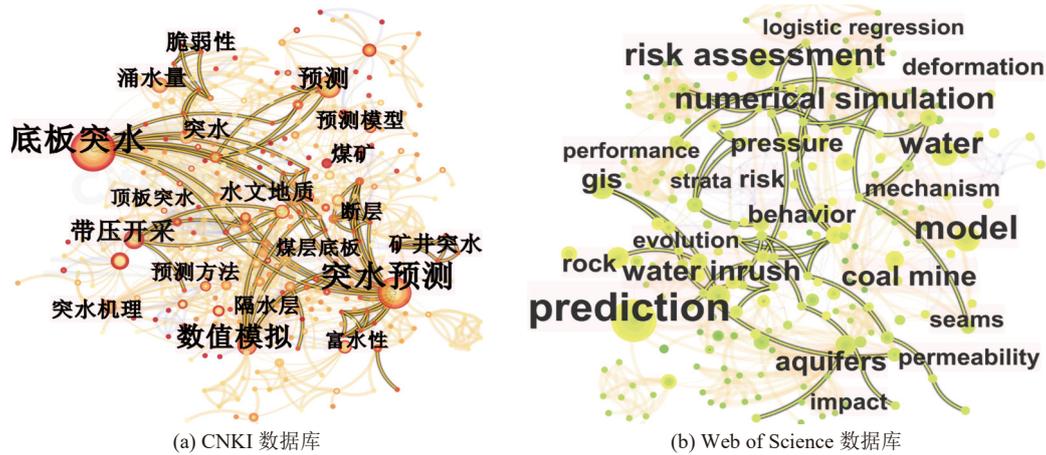


图8 煤矿水害预测领域关键词共现图

Fig.8 Co-occurrence map of mine water hazard prediction keywords

分别以 CNKI 数据库和 Web of Science 数据库为基础,借助 CiteSpace 绘制煤矿水害探查领域的关键词共现图(图9)。通过对图中各关键词的词频比例进行分析可知:中文文献中水害探查的研究主要集中于采空区、煤矿地质、陷落柱等方面,多采用钻探技术、物探技术、综合物探等手段,并将其在应用中得到创新(图9a);英文文献有关方面的研究主要围绕 aquifers(含水层)的 exploration(探查),多采用

hydraulic tomography(水力层析法)、directional drilling(定向钻进)等手段,以查明 permeability(渗透性)、potential groundwater yield zone(潜在的地下水富水区)等水文地质性质(图9b)。由此可见,国内外在煤矿水害探查方面研究基本一致,在充分研究区域水文地质条件基础上,利用多种手段对研究区域的充水含水层富水性、可能存在的导水通道等进行探查,不断推进煤矿水害探查理论及应用的发展。

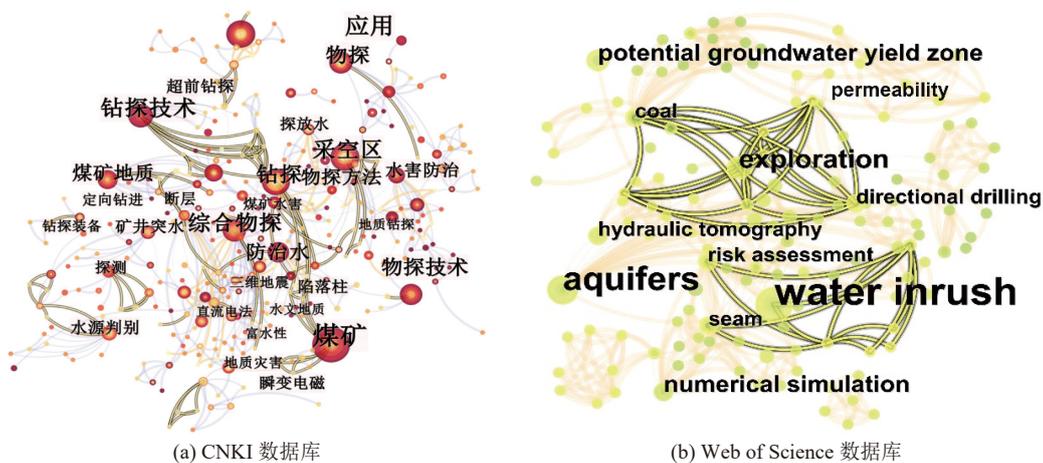


图9 煤矿水害探查领域关键词共现图

Fig.9 Co-occurrence map of mine water hazard exploration keywords

4.3 水害治理研究现状

煤矿水害治理是防止水害发生的关键环节。针对煤层底板含水层富水性强且水头高、底板隔水层薄弱或带状破碎、存在导水通道等特殊情况,传统的疏水降压处理方式难以保障矿井生产安全。为此,煤层底板注浆加固、含水层注浆改造以及注浆封堵导水通道等技术逐渐被广泛应用于此类煤矿。地面和井下整体或局部注浆技术可以改变含水层的富水

性,封堵陷落柱等地质构造的导水通道,在快速封堵治理水害方面有很大优势^[23-25]。

分别以 CNKI 数据库和 Web of Science 数据库为基础,借助 CiteSpace 绘制煤矿水害治理领域的关键词共现图(图10)。通过对图中各关键词的词频比例进行分析可知:中文文献煤矿水害治理研究集中在注浆加固、注浆改造方面,采用多种注浆材料、注浆技术和注浆工艺对于煤矿水害导水通道和破碎围

岩等进行治理(图 10a);英文文献研究也集中于 aquifers(含水层)、fracture development(裂隙发育)的 grouting reinforcement(注浆加固)治理(图 10b)。国内外对于水害治理技术基本一致,致力于研究富水性强的含水层和破碎带及导水裂隙带的治理方法,推动煤矿水害的防治在理论上的可实现性和在技术上的实用性。

4.4 水害监测预警研究现状

煤矿水害监测预警是防止水害发生的最后防线。在煤层采动过程中,围岩的压力、含水层水压、矿井涌水量等都会发生一系列的动态变化。水文监测已被广泛应用于各个矿山,通过实时、动态准确的捕捉这些信息,有助于对水害进行提前判识及预警。近些年随着探测技术的发展,多种手段被应用于水害监测预警体系^[26-28]。高精度微震监测技术通过监测岩体破裂产生的微震信号,能够实时、动态的监测煤层顶底板的变形及破裂情况以及断层、陷落柱等地

质构造的活化程度。多参数点状煤矿水害监测预警技术利用光纤光栅通信技术,对含水层的水压、水温等进行监测。

分别以 CNKI 数据库和 Web of Science 数据库为基础,借助 CiteSpace 绘制煤矿水害监测预警领域的关键词共现图(图 11)。通过对图中各关键词的词频比例进行分析可知:中文文献中煤矿水害监测预警技术研究聚焦于微震等新兴监测手段,以微震波观测地压活动,运用一系列预警指标,形成预警系统,从而进行水害预警(图 11a);英文文献研究也主要围绕 microseismic monitoring(微震监测),通过 numerical simulation(数值模拟)和各类 algorithm(算法)进行分析预警(图 11b)。国内外对于煤矿水害监测预警技术基本一致,以微震监测技术为主要手段,对于围岩的应力应变情况及构造活化程度等进行动态实时监测,对于预防特重大水害事故具理论意义和实用价值。

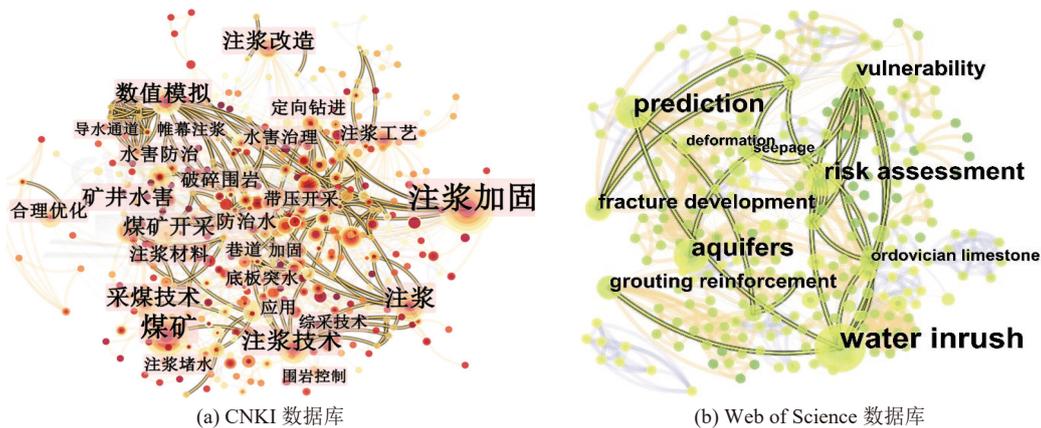


图 10 煤矿水害治理领域关键词共现图

Fig.10 Co-occurrence map of mine water hazard control keywords

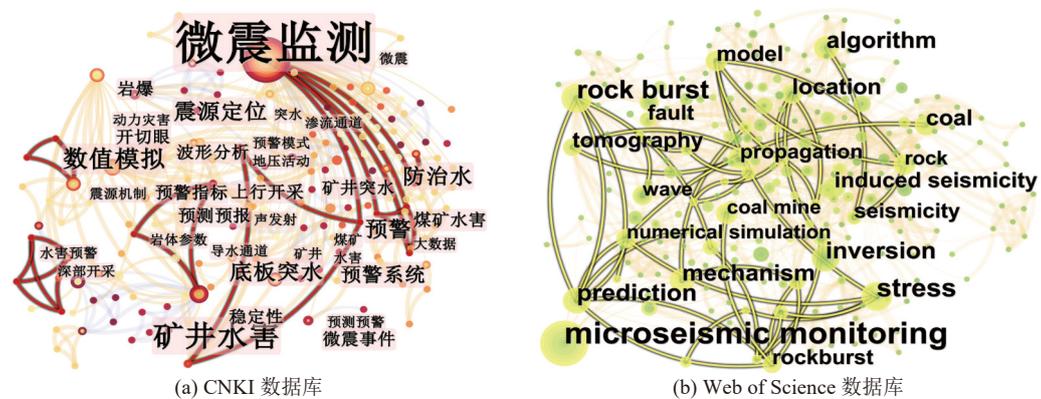


图 11 煤矿水害监测预警领域关键词共现图

Fig.11 Co-occurrence map of mine water hazard monitoring and warning keywords

5 水害防控对策

事故成因方面,客观上开采环境复杂,主观上重

视不够,是事故发生的主要原因;点状的陷落柱和线状断层构造等隐蔽导水内边界以及老空水等未依规

照章探放,是事故发生的主要技术原因。从破解煤矿水害“风险查不清”“有险断不准”“出险治不了”等困境出发,提出以下对策:

1)超前开展采掘区域井上、下补充勘探,查清矿井充水因素和隐蔽致灾地质因素。

结合煤矿采掘中长期规划,依规有计划、有针对性超前开展矿井(盘区)水文地质调查、勘探和观测等地面水文地质补充勘探工作,查清矿井各种充水因素。具备条件的应完成地面高精度三维地震,并针对三维地震反射波异常区(地质构造和老空区)超前开展探查验证和必要的治理工作;实现电法勘探“两覆盖”,查清含水层富水性、充水通道水力性质并验证等;另外建立或完善充水含水层水文动态监测网。

“有疑必探、先探后掘”是防治掘进工作面水害最重要的技术措施,井下超前探放水应照章与掘进循环进行,并遵循钻、物探等相结合的原则,明确探测目的,合理布置钻孔,坚持“一孔多用”。井下物探在半-全空间条件下开展探测工作,相较于井上地面物探有探测距离近、体积效应小,异常体探测精度高的优点。新水平、新采区、三维地震未覆盖区域(低品质区)掘进必须同时采用物探(瞬变电磁、并行电法、地震MSP)、钻探“双探”超前循环探查;工作面回采前采用槽波、坑透、瞬变电磁、并行电法等查明工作面内隐伏构造、老空和顶底岩层富水性,并钻探验证物探异常区。采用多种手段查清隐蔽致灾因素并做到相互验证,实现精细、准确探查。

2)重视井田和采掘工作面立体充水水文地质条件分析,严格落实水害分区等预测预报制度,提升地质保障水平。

只有准确分析矿井充水水文地质条件和合理建立矿井水文地质概念模型,才有可能根据具体水文地质条件,使用现代数学方法、模拟技术等,恰当地计算矿井涌水量、评估水害危险性和预警灾变等。通过挖掘煤田勘探、建井和开采揭露以来积累的一手地质和水文地质资料,从剖面上分析煤层顶底板多层充水含水层(组)结构,并通过分析多层充水含水层(组)内、外边界等控水作用,确定其相互间水力联系和方式;从平面上分析各充水含水层(组)赋存规律、非均质性、各向异性、地下水流场以及边界位置和边界条件等,建立与之对应的矿井涌水量预测水文地质概念模型;在上述立体分析的基础上,结合综合水文地质图等资料,进行水害风险辨识、隐患排查及采掘工作面潜在突水点位置和突水量预测。

“预测预报”作为煤矿防治水工作的首要原则,

主要包含水害“三区”划分(可采区、缓采区、禁采区)、水害危险性评价以及井下突(透)水异常征兆辨识等。前2项工作主要系统整体的评价预测矿井在采掘生产过程中可能面临的诸如顶板、底板、老空和构造等水害威胁的分区特征和程度。将矿井内可采煤层作为划分管理对象,以煤矿立体充水水文地质条件和隐蔽致灾因素为基础,准确划分“三区”(可采区、缓采区、禁采区),实行水患区域“三线”(警戒线、探水线、积水线)管理。根据预测预报成果,即可方便有效地制定出矿井不同类型水害的防治对策措施和建议。井下突(透)水异常征兆辨识是指井下采掘工作面或其他地点在接近或临处于突(透)水极限平衡状态前的不长时间段内,发现水质水量水温、煤岩应力应变或气体等异常变化现象。一旦判识出此类异常征兆,应当立即停止井下所有作业,“先撤人再报告后预警”。

3)坚持源头预防,实现水害分源精准防治。

松散层水以“防”为主,做到超前查清第四系含水层及风氧化带富水性、底界面形态、覆岩破坏类型和断层构造特征,确定水体采动等级,验证、评价煤(岩)柱可靠性;井下通过工作面合理布置避开采动压影响,做好压架风险评估,严控开采上限,超前断层治理,做到连续匀速回采,防止诱发溃水溃砂;条件可行下通过地面定向钻注技术实现松散层底板高压劈裂注浆再造隔水垫层与风化基岩注浆改造,从而切断第四系与基岩的水力沟通,减弱“风化基岩层”的富水性及封堵导水通道,实现松散层浅表水的防护和治理。

砂岩水以“疏”为主,在充分刻画地下水系统动态响应特征的基础上,利用最优化原理和非线性响应函数关系,构建矿井生产安全、生态水资源保护和高效疏降水等多目标、“远堵”与“近疏”相结合多层次的优化配置模型,引入智能深度学习算法,开发智能感知与决策系统,严格落实砂岩水探放效果评价标准,做到采前水压、水量疏降达标,实现“综合分析、超前探查、疏放验证、效果评价”原则下的实时动态优化配置^[29]。

底板灰岩水坚持奥灰与太灰水防治并重、“远堵”与“近疏”相结合、地面治理井下验证的原则,地面超前区域探查治理导通奥灰水的隐伏垂向导水构造,井下物探、钻探进一步探查验证、疏放太原组灰岩水,落实“探、治、验、评、监”五位一体防治体系。

内外边界导水通道以留设隔水煤(岩)柱为主,严禁在各种隔水煤(岩)柱中采掘。积极开展围岩破

坏和地表移动现场监测工作,综合分析并总结岩移规律,为矿区煤(岩)柱留设提供技术支撑。摸清建筑物保护等级、铁路等线性构筑物保护等级、矿区水体类型及允许采动等级、断层构造、覆岩岩性特征、松散层土体工程性质等地质条件,依据相关规范及开采成功经验留设并评价相应保护煤(岩)柱可靠性,建立稳定可靠的煤(岩)柱稳定性监测系统。

4)强化安全高效开采地质保障信息化和智能化,建设融合透明矿山、水害监测预警与应急救援于一体的地质保障系统。

地质保障系统通过对矿井水文地质特征分析、监测和预报进行全面掌握,实现对岩层水文地质调查和监测的数字化管理,通过数据一致性分析和精细化建模技术,对矿区地质地貌、地层构造、断层走向、矿体特征等进行数字化的建模,利用数字孪生等信息化、智能化技术,实现地质资料实时综合处理、数字化自动成图、三维立体化仿真展示,推进地质透明化。通过地质钻物探等技术手段,加强对矿区地质构造、地质灾害、岩层富水性等方面的监测,对矿井涌、突水等灾害报进行预测预报,一旦发现水害征兆,及时采取相应对策和处置措施,减少水害发生的影响和危害。基于全面、准确、实时的水文地质调查分析及井上下监测预警数据,构建矿井水害信息资源共享与应急救援智库,实现矿井水害事故预防、监测、预警、处置、评估等全过程动态管理和控制,强化应急预案标准化编制,增强人员技能和意识,有效提高掘进、开采工作的精细化管理水平,提高煤炭生产和灾害防治效率。

6 结 语

在我国现有能源禀赋的限制下,煤炭资源仍是我国能源供应体系中稳定且主要的供应来源^[30]。面对新时代经济发展对能源总需求不断增长,以及社会对安全生产期望不断增强的现状,应该对煤矿水害安全形势有清醒的认识。当前煤矿生产面临着水文地质条件和生产开采背景日趋复杂的局面,应该更加科学、更加清醒地认识到煤矿水害事故的发生规律,精准找出其背后存在的问题与控制成因,合理制定出减少煤矿水害事故的对策方案,不断创新煤矿防治水工作的思路与手段,切实为煤炭资源的安全、高效、绿色开采提供保障。

参考文献(References):

[1] 武 强.我国矿井水防控与资源化利用的研究进展、问题和展

望[J].煤炭学报,2014,39(5):795-805.

WU Qiang. Progress, problems and prospects of prevention and control technology of mine water and reutilization in China[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(5): 795-805.

[2] 张胜利,汤家轩,王 猛.“双碳”背景下我国煤炭行业发展面临的挑战与机遇[J].中国煤炭,2022,48(5):1-5.

ZHANG Shengli, TANG Jiakuan, WANG Meng. Challenges and opportunities for the development of China's coal industry under the background of carbon peak and carbon neutrality[J]. China Coal, 2022, 48(5): 1-5.

[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 Engineering, 2022, 41(6): 86-89.

[4] 丁百川.我国煤矿主要灾害事故特点及防治对策[J].煤炭科学技术,2017,45(5):109-114.

DING Baichuan. Features and prevention countermeasures of major disasters occurred in China coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(5): 109-114.

[5] 苗耀武,叶 兰.2020年全国煤矿水害事故分析及其防治对策[J].中国煤炭,2021,47(2):51-54.

MIAO Yaowu, YE Lan. Analysis and prevention countermeasures of coal mine water disaster in China in 2020[J]. China Coal, 2021, 47(2): 51-54.

[6] 孙文洁,韩 权,杨 恒,等.2000—2015年我国煤矿水害事故特征分析[J].煤炭工程,2017,49(5):95-98.

SUN Wenjie, HAN Quan, YANG Heng, et al. Analysis on water inrush accidents in China's coal mines 2000—2015[J]. Coal Engineering, 2017, 49(5): 95-98.

[7] 魏久传,肖乐乐,牛 超,等.2001—2013年中国矿井水害事故相关性因素特征分析[J].中国科技论文,2015,10(3):336-341.

WEI Jiuchuan, XIAO Lele, NIU Chao, et al. Characteristics analysis of the correlation factors of China mine water hazard accidents in 2001-2013[J]. China Sciencepaper, 2015, 10(3): 336-341.

[8] 尹尚先,王玉国,李文生.矿井水灾害:原因·对策·出路[J].煤田地质与勘探,2023,51(1):214-221.

YIN Shangxian, WANG Yuguo, LI Wensheng. Cause, countermeasures and solutions of water hazards in coal mines in China[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(1): 214-221.

[9] 张培森,李复兴,朱慧聪,等.2008—2020年煤矿事故统计分析及防范对策[J].矿业安全与环保,2022,49(1):128-134.

ZHANG Peisen, LI Fuxing, ZHU Huicong, et al. Statistical analysis and prevention countermeasures of coal mine accidents from 2008 to 2020[J]. Mining Safety Environmental Protection, 2022, 49(1): 128-134.

[10] 武 强.煤矿防治水手册[M].北京:煤炭工业出版社,2013.

[11] 武 强,赵苏启,孙文洁,等.中国煤矿水文地质类型划分与特征分析[J].煤炭学报,2013,38(6):901-905.

WU Qiang, ZHAO Suqi, SUN Wenjie, et al. Classification of the hydrogeological type of coal mine and analysis of its characteristics in China[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(6): 901-905.

[12] GUI Hr, LIN MI. Types of water hazards in China coalmines and

- regional characteristics[J]. *Natural Hazards*, 2016, 84(2): 1501–1512.
- [13] 尹尚先. 煤矿水害防治基础科学发展思考[J]. *煤炭工程*, 2016, 48(S2): 96–100.
YIN Shangxian. Thoughts of basic science development on mine water control and prevention[J]. *Coal Engineering*, 2016, 48(S2): 96–100.
- [14] 董书宁, 虎维岳. 中国煤矿水害基本特征及其主要影响因素[J]. *煤田地质与勘探*, 2007, 35(5): 34–38.
DONG Shuning, HU Weiyue. Basic characteristics and main controlling factors of coal mine water hazard in China[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2007, 35(5): 34–38.
- [15] 靳德武. 煤矿水害防治中的综合水文地质分析方法[J]. *煤田地质与勘探*, 1998, 26(2): 54–56.
JIN Dewu. The general rules of fossil weathered residuum in mining area and mechanism of cutting waterproof coal pillar[J]. *Coal Geology & Exploration*, 1998, 26(2): 54–56.
- [16] 刘守强, 武强, 曾一凡, 等. 基于GIS的改进AHP型脆弱性指数法[J]. *地球科学*, 2017, 42(4): 625–633.
LIU Shouqiang, WU Qiang, ZENG Yifan, *et al.* The improved AHP Vulnerable index method based on GIS[J]. *Earth Science*, 2017, 42(4): 625–633.
- [17] 易伟欣. 五图-双系数法在煤矿突水评价中的应用[J]. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 2013, 32(5): 556–560.
YI Weixin. Application of Five figures and double coefficients method on evaluation of water inrush in coal mine[J]. *Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science)*, 2013, 32(5): 556–560.
- [18] 武强, 许珂, 张维. 再论煤层顶板涌(突)水危险性预测评价的“三图-双预测法”[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(6): 1341–1347.
WU Qiang, XU Ke, ZHANG Wei. Further research on “three maps-two predictions” method for prediction on coal seam roof water bursting risk[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(6): 1341–1347.
- [19] 曾一凡, 刘晓秀, 武强, 等. 双碳背景下“煤-水-热”正效协同共采理论与技术构想[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(2): 538–550.
ZENG Yifan, LIU Xiaoxiu, WU Qiang, *et al.* Theory and technical conception of coal-water-thermal positive synergistic co-extraction under the dual carbon background[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(2): 538–550.
- [20] 曾一凡, 梅傲霜, 武强, 等. 基于水化学场与水动力场示踪模拟耦合的矿井涌(突)水水源判识[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(12): 4482–4494.
ZENG Yifan, MEI Aoshuang, WU Qiang, *et al.* Source discrimination of mine water inflow or inrush using hydrochemical field and hydrodynamic field tracer simulation coupling[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(12): 4482–4494.
- [21] 牟义, 李健, 邱浩, 等. 朔州矿区岩溶承压构造水超前探放技术[J]. *煤炭工程*, 2020, 52(9): 81–86.
MOU Yi, LI Jian, QIU Hao, *et al.* Advance exploration and drainage technology for karst pressure-bearing structural water in Shuozhou mining area[J]. *Coal Engineering*, 2020, 52(9): 81–86.
- [22] 闫明, 管强盛. 新安矿底板灰岩水害超前探查治理技术研究与应用[J]. *煤炭技术*, 2023, 42(1): 193–196.
YAN Ming, GUAN Qiangsheng. Research and application of advanced exploration and control technology for floor limestone water damage in Xin’an coal mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 42(1): 193–196.
- [23] 董书宁, 刘其声, 王皓, 等. 煤层底板水害超前区域治理理论框架与关键技术[J]. *煤田地质与勘探*, 2023, 51(1): 185–195.
DONG Shuning, LIU Qisheng, WANG Hao, *et al.* Theoretical framework and key technology of advance regional control of water inrush in coal seam floor[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(1): 185–195.
- [24] 邢茂林. 煤矿深部巷道群穿灰岩推覆体水害超前治理技术[J]. *煤炭工程*, 2023, 55(2): 81–85.
XING Maolin. Advance control of water hazard through limestone nappes in deep roadway group in coal mine[J]. *Coal Engineering*, 2023, 55(2): 81–85.
- [25] 曾一凡, 武强, 杜鑫, 等. 再论含水层富水性评价的“富水性指数法”[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(7): 2423–2431.
ZENG Yifan, WU Qiang, DU Xin, *et al.* Further research on “water-richness index method” for evaluation of aquifer water abundance[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(7): 2423–2431.
- [26] 连会青, 徐斌, 田振焱, 等. 矿井水情监测与水害风险预警平台设计与实现[J]. *煤田地质与勘探*, 2021, 49(1): 198–207.
LIAN Huiqing, XU Bin, TIAN Zhentao, *et al.* Design and implementation of mine water hazard monitoring and early warning platform[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(1): 198–207.
- [27] 靳德武, 赵春虎, 段建华, 等. 煤层底板水害三维监测与智能预警系统研究[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(6): 2256–2264.
JIN Dewu, ZHAO Chunhu, DUAN Jianhua, *et al.* Research on 3D monitoring and intelligent early warning system for water hazard of coal seam floor[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(6): 2256–2264.
- [28] 姜鹏, 叶锦娇, 李健. 煤矿井上下一体化水文监测预警系统研究与应用[J]. *煤炭工程*, 2021, 53(7): 21–25.
JIANG Peng, YE Jinjiao, LI Jian. Research and application of integrated underground-surface hydrological monitoring and early warning system for coal mine[J]. *Coal Engineering*, 2021, 53(7): 21–25.
- [29] 曾一凡, 孟世豪, 吕扬, 等. 基于矿井安全与生态水资源保护等多目标约束的超前疏放水技术[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(8): 3091–3100.
ZENG Yifan, MENG Shihao, LYU Yang, *et al.* Advanced drainage technology based on multi-objective constraint of mine safety and water resources protection[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(8): 3091–3100.
- [30] 武强, 涂坤, 曾一凡, 等. 打造我国主体能源(煤炭)升级版面临的主要问题与对策探讨[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(6): 1625–1636.
WU Qiang, TU Kun, ZENG Yifan, *et al.* Discussion on the main problems and countermeasures for building an upgrade version of main energy (coal) industry in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(6): 1625–1636.