

许光泉, 张海涛, 周继生, 等. 华北煤田岩溶陷落柱及其突水研究综述及展望[J]. 中国岩溶, 2022, 41(2): 259-275.  
DOI: 10.11932/karst20220207

# 华北煤田岩溶陷落柱及其突水研究综述及展望

许光泉<sup>1</sup>, 张海涛<sup>1</sup>, 周继生<sup>2</sup>, 李旭<sup>1</sup>, 汪敏华<sup>2</sup>, 刘满才<sup>2</sup>

(1. 安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南 232001;

2. 淮南矿业(集团)有限责任公司煤业分公司, 安徽 淮南 232001)

**摘 要:** 华北煤田岩溶陷落柱(简称“陷落柱”)是地质历史演化过程中形成的产物。80 多年来, 在中国华北煤田 39 个矿区煤矿开采过程中共揭露 10 000 多个陷落柱, 因其导致的重大突水淹井事故 20 余起, 研究岩溶陷落柱对系统认识中国矿山岩溶水文地质条件以及防治岩溶水害具有十分重要的理论与现实意义。文章系统梳理、总结了华北煤田陷落柱的发育特征、成因机理、突水机理、探查与防治方法, 归纳出近年来华北南缘陷落柱的研究成果, 并结合目前华北煤田生产过程中陷落柱研究与水害防治中存在的问题, 从陷落柱形成机理与演化过程、小型隐伏陷落柱精细化探查与解译、陷落柱“动态监测—预测模型—突水机理”模式以及陷落柱水害防治技术体系等方面展望了其今后研究趋势及水害防治的方向。

**关键词:** 岩溶陷落柱; 成因机理; 突水机理; 水害防治; 华北煤田

**中图分类号:** TD745 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-4810(2022)02-0259-17 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



## 0 引 言

岩溶陷落柱(以下简称“陷落柱”)是在中国华北煤田最早发现的, 其根部发育于奥陶系或寒武系碳酸盐岩中, 向上穿过石炭系、二叠系、三叠系地层, 甚至进入侏罗系、白垩系及第四系松散岩层的陷落充填体<sup>[1]</sup>。它为一种“不规则圆形柱状地质体”, 也称之为“陷落柱”或“无煤柱”。

通过对华北煤田 80 多年来的勘探和开采发现, 从中国西北(如山西、内蒙等地区)到华北南缘(如安徽的淮南、淮北、河南的豫西), 陷落柱均有不同程度的揭露, 且具有明显的区域性<sup>[2]</sup>。存在于煤系地层中的陷落柱, 不仅造成中国煤炭资源储量的减少, 而且增加煤系地层地质条件的复杂性, 尤其是在煤矿

开采过程中, 它极大地改变了煤矿开采过程中矿井充水条件, 严重威胁着矿井生产安全。截止 2019 年底, 中国华北煤田共发生 20 多起因陷落柱突水的淹井事故, 造成严重的经济损失和人员伤亡<sup>[3]</sup>。陷落柱一直是华北煤田岩溶水害防治的重点和难点, 也是地下工程科学研究的热点之一。

本文从陷落柱的发育特征、成因机理、突水机理、探查与防治方法等方面, 系统归纳总结中国陷落柱的研究现状, 并从陷落柱形成机理与演化过程、小型隐伏陷落柱精细化探查与解译、陷落柱“动态监测—预测模型—突水机理”模式以及陷落柱水害防治技术体系等方面展望了今后陷落柱研究及水害防治方向, 以为今后华北煤田岩溶水害防治的研究工作提供参考。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42172279, 4210020704); 安徽省高等学校自然科学研究项目(KJ2021A0441); 安徽理工大学引进人才科研启动基金项目(2021yjrc26)

第一作者简介: 许光泉(1967—), 男, 教授, 博士生导师, 从事矿山水文地质教学与研究工作。E-mail: gqxu67@163.com。

通信作者: 张海涛(1986—), 男, 讲师, 从事矿山水文地质研究教学与研究工作。E-mail: entao0824@163.com。

收稿日期: 2021-02-28

## 1 陷落柱基本特征

### 1.1 空间分布特征

截止至 2019 年底,在中国华北 39 个地区共发现 10 000 多个陷落柱,其中,山西省 8 500 多个,河北省 1 200 多个,其他地区共 300 多个<sup>[3-5]</sup>。由于华北地区下古生界碳酸盐岩地层的沉积环境、岩性结构、地质构造、古水文和古地貌差异等,导致区内陷落柱在平面上分布呈现出一定区域性特点<sup>[2,4]</sup>。华北煤田陷落柱的空间分布情况如下(图 1):

(1)汾河沿岸 从山西霍县至汾西、灵石、汾阳至太原西山一带。该区域寒武系、奥陶系灰岩和石炭系、二叠系煤层大量出露,以及良好的地下水循环条件,致使汾河两岸陷落柱发育<sup>[6-8]</sup>。

(2)太行山西麓 集中分布在山西晋城、高平、长治、平顺、襄垣、武乡至西阳、平顶、曲阳等地区。该区奥陶系灰岩分布广泛,岩溶发育,且地表水和地下水循环交换条件好<sup>[5,9]</sup>。

(3)太行山东麓和东南麓 从河南焦作、鹤壁、安阳到河北慈县、峰峰、井陘等矿区。该区奥陶系灰岩除受大气降水的直接补给外,还接受山西高原地表水和地下水的补给,地下水溶蚀和侵蚀能力强<sup>[5,9]</sup>。

(4)燕山南麓 主要分布在开滦矿区的范各庄矿、唐家庄矿和林西矿,位于燕山南缘的次级向斜内。

该区受多期地质构造作用,张性断裂发育,水动力条件好,奥陶系岩溶极为发育<sup>[5,9]</sup>。

(5)郯庐断裂带西侧 从山东枣庄、济南,江苏徐州、大屯,到安徽淮北、淮南等地区,陷落柱大致沿郯庐断裂带走向展布。受多期构造活动影响,区内 NWW 和 NNE 向张扭性断裂(层)发育,古地表和地下水径流条件较好,为古岩溶发育和陷落柱形成提供强有力的水动力条件<sup>[10]</sup>。

### 1.2 形态及充填特征

华北煤田陷落柱平面形态多以圆形和椭圆形为主,其次为肾形和长条形。陷落柱长轴长度从几米到几百米不等,最大可以达到 600 m;长轴与短轴比率一般为 2:1~4:1,最大可达 40:3<sup>[5]</sup>。在华北煤田南缘的淮南顾桂矿区调研时发现,谢桥煤矿 2<sup>#</sup>陷落柱呈“串珠状”分布在煤系地层中,这是受该区特殊的地质构造和古水文环境影响形成的<sup>[11-12]</sup>。陷落柱剖面上多呈上小下大圆锥状,周边裂隙较为发育,其剖面形状主要有 7 种(图 2),其底部埋深从十几米到几百米不等。

陷落柱柱体内通常被破碎的围岩碎屑及次生矿物质充填胶结。不同陷落柱或同一陷落柱不同位置的充填物类型和充填结构都存在明显差异<sup>[2]</sup>:(1)大部分陷落柱柱体下部充填物岩性混杂、层位混乱、

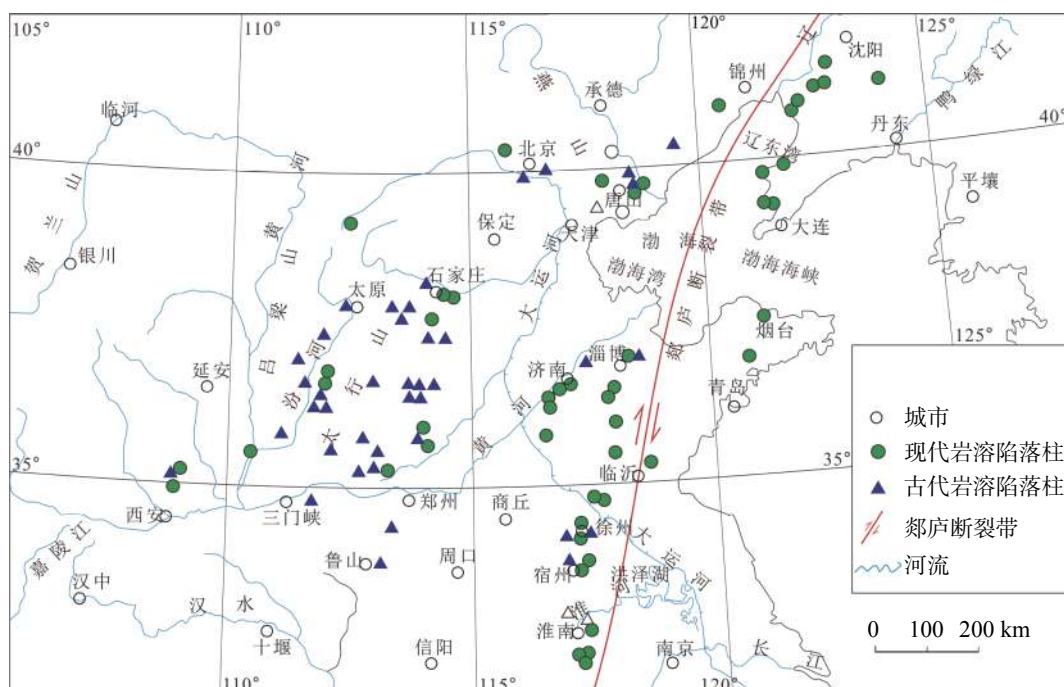


图 1 华北煤田陷落柱分布特征(根据文献[5]修改)

Fig. 1 Distribution characteristics of KCCs in the coalfield of North China (modified according to the reference [5])

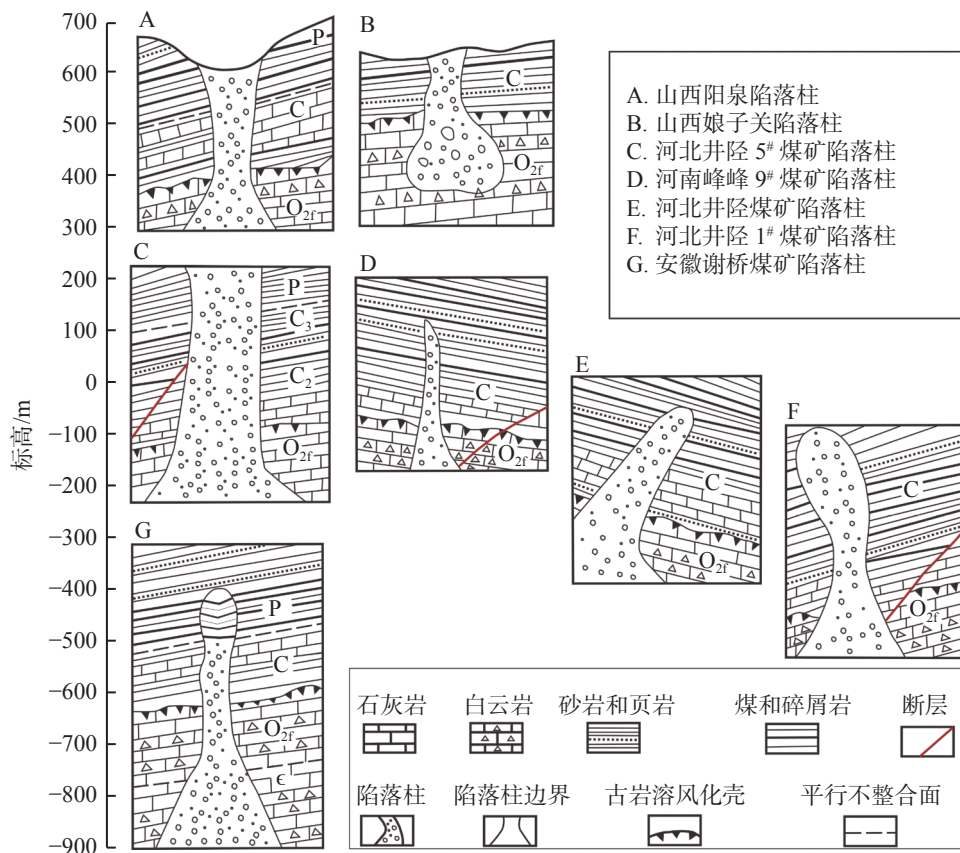


图 2 华北煤田陷落柱的剖面特征 (根据文献 [5] 修改)

Fig. 2 Profile characteristics of KCCs in the coalfield of North China (modified according to the reference [5])

杂乱无章,但柱体上部岩性较均一,塌陷层位保持正常;(2)柱体内充填物的形状极不规则,大小不一,棱角明显,多被泥质、钙质、铁质和硅质充填胶结。因此,华北煤田内绝大多数的陷落柱导(含)水性较弱。

### 1.3 导(含)水性特征

华北煤田陷落柱根部常发育于奥陶系或寒武系碳酸盐岩中,向上塌陷穿过煤层或接近煤层底板,因而可能成为灰岩强含水层地下水和煤系地层之间的联系通道。但是,从目前揭露的众多陷落柱资料分析,华北煤田矿区的陷落柱绝大多数不导(含)水,只有少数发生突水(表 1)。长期研究发现,形成较早的陷落柱(古岩溶陷落柱),压实胶结比较好,导(含)水性弱,而形成较晚或正在形成中的陷落柱(现代岩溶陷落柱),压实胶结程度差,导(含)水性较强<sup>[2,13]</sup>。此外,陷落柱的导(含)水性还与充填物组成、裂隙发育程度以及采动影响等因素有关<sup>[14-17]</sup>。根据陷落柱充填物质特征、压实胶结程度以及导水性,可将其划分为全含水强导水型、边缘含水导水型和不导水或微弱导水疏干型 3 种类型<sup>[2]</sup>,其中全含水强导水型约占

华北煤田岩溶陷落柱的 1%,不导水或微弱导水疏干型占 95% 以上<sup>[13]</sup>。

## 2 陷落柱成因机理

### 2.1 形成条件

陷落柱的形成是中国华北地区特殊地质背景下,多种因素共同作用的产物,其孕育和演化发展过程极其复杂。根据陷落柱的分布特征和形成环境,其形成条件主要包括以下方面:

(1)可溶性岩及特殊地层结构 碳酸盐岩、硫酸盐岩和卤盐岩是岩溶及陷落柱发育的物质基础<sup>[18]</sup>。陷落柱底部多发育在巨厚的碳酸盐岩地层中,向上为一套多层结构的煤系地层(图 2)。碳酸盐岩含水层很容易通过断层和裂隙等构造,与上部煤系含水层发生水力联系,形成不同类型的溶洞和洞穴;同时,煤系地层中有机质成分进入地下水循环后,会加速溶洞和洞穴的扩大,为陷落柱的形成提供空间<sup>[19]</sup>。

(2)多期次多源流体侵蚀性作用 大量研究表明,中国塔里木盆地、鄂尔多斯盆地、渤海湾盆地和南

表 1 华北煤田部分煤矿陷落柱突水淹井事故

Table 1 Water inrush accidents of KCCs in some coal mines in North China

序号	突水煤矿	突水日期	最大突水量 / $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$	危害程度
1	河南焦作利丰煤矿	1967年3月29日	120	矿井被淹
2	河北开滦范各庄煤矿	1984年6月2日	2053	相邻4对矿井被淹
3	山东肥城国家庄煤矿	1993年1月5日	550	矿井被淹
4	安徽皖北任楼煤矿	1996年3月4日	576	矿井被淹
5	江苏徐州张集煤矿	1997年2月18日	402	矿井被淹
6	河北邢台东庞煤矿	2003年4月12日	1167	矿井被淹
7	河北峰峰九龙煤矿	2009年1月8日	120	矿井被淹
8	内蒙古桌子山骆驼山煤矿	2010年3月1日	1000	矿井被淹
9	河北峰峰黄沙煤矿	2011年12月11日	380	矿井被淹
10	安徽皖北桃园煤矿	2013年2月3日	167	矿井被淹
11	安徽淮南潘二煤矿	2017年5月25日	242	矿井巷道被淹

华北地区的奥陶系碳酸盐岩都至少经历了三期古岩溶作用,分别是古大气降水的风化剥蚀作用,石炭系—二叠系地层中有机质成熟过程中产生有机酸的腐蚀作用,以及中生代岩浆活动过程中产生热液流体的溶蚀作用<sup>[20-21]</sup>。然而,目前华北煤田陷落柱研究多集中在古大气降水和地下水对碳酸盐岩的溶蚀作用,缺乏对有机酸和热液作用对陷落柱形成演化的研究,因此,得出的结论和认识可能还存在一定的局限性。

(3)地质构造演化作用 大量统计发现,华北煤田陷落柱主要沿张性断裂、褶皱核部或转折端分布。张性断裂、次级向斜轴部或转折端不仅是地下水循环的水流通道,也是陷落柱地下水系统的径流与排泄带,有利于陷落柱的形成和发育<sup>[12,22]</sup>。此外,新构造运动不仅引起老构造复活和新构造产生,而且不断改变岩溶地下水侵蚀基准面的位置,从而扩大地下水循环范围,加快了溶蚀和侵蚀速度<sup>[4-5]</sup>。

(4)古岩溶地下水作用 集中径流带是地下水系统垂向运动的驱动力,也是陷落柱系统颗粒和碎屑物迁移的主要通道<sup>[4-5]</sup>。因此,在古岩溶泉发育区域和古岩溶地下水径流带内,陷落柱广泛分布<sup>[22]</sup>。

## 2.2 形成机理学说

陷落柱成因研究始于 20 世纪 30 年代末,早期通过对山西汾河、太行山和内蒙等地区调查,提出的陷落柱成因为岩溶洞穴形成、可溶性岩层大量坍塌、上覆非可溶性岩层连续坍塌的三阶段模式<sup>[5]</sup>。目前,关于陷落柱成因机理学说主要有以下 5 种,分别是:

(1)岩溶重力塌陷学说 即岩溶洞穴形成阶段,岩石受地下水冲刷、溶蚀,使其中的裂隙不断扩大,其

间不断进行化学溶蚀与机械搬运作用,造成顶部和两侧岩层发生坍塌,最终导致上覆非可溶性岩层的塌陷<sup>[23]</sup>。

(2)膏溶塌陷学说 赋存于奥陶系的中厚层状硬石膏,因地壳持续上升,在地下水流动作用下不断地被溶蚀和侵蚀带走,最终导致周围岩石发生塌落充填<sup>[24]</sup>。

(3)真空吸蚀塌陷学说 在地下水排泄或地壳局部升降过程中,岩溶腔内水位大幅度下降使腔内水体由承压转为无压,并在腔内水面与盖层之间产生真空负压,造成上覆岩体被吸蚀塌落<sup>[25-26]</sup>。

(4)热液成因学说 早期在火成岩体中的热液,侵入地下碳酸盐岩地层中,造成复杂的地下水循环和溶蚀作用,加大碳酸盐溶解度而形成陷落柱<sup>[27-28]</sup>。

(5)地下水内循环学说 封闭的地下环境中,奥陶系中对流散热的“烟囱”效应,促使灰岩地下水发生内部对流扩散现象,加速碳酸盐岩溶解而形成陷落柱<sup>[29]</sup>。

由于华北煤田奥陶系先期的沉积环境差异导致地层岩性和结构上的不同,加里东运动的抬升导致区域性风化剥蚀程度不同,海西运动造成石炭系—二叠系成煤环境不同,再加上中生代—新生代多期构造运动(印支运动、燕山运动、喜马拉雅和新构造运动)的区域性差异,致使华北煤田陷落柱成因机理存在一定差别。综合前人研究成果以及对华北南缘陷落柱的研究发现,华北南缘淮南煤田陷落柱的形成是以奥陶系或寒武系碳酸盐岩为物质基础,以多期次多源腐蚀性流体(如大气降水、地表水、地下水和岩浆热液等)为溶蚀动力条件,以多期次构造运动产生的断层和裂隙为流体运移通道,以碳酸盐岩中

溶蚀形成的古岩溶为空间基础,在岩体自重、地应力以及溶洞内真空负压共同作用下,经过长期垮落、溶蚀、搬运、塌陷、冒落等周而复始过程形成的,其

形成与演化过程如图 3 所示<sup>[30]</sup>。华北南缘陷落柱的形成主要与中生代多期构造运动有关,其中燕山运动可能是陷落柱形成和发展的关键阶段<sup>[30-31]</sup>。

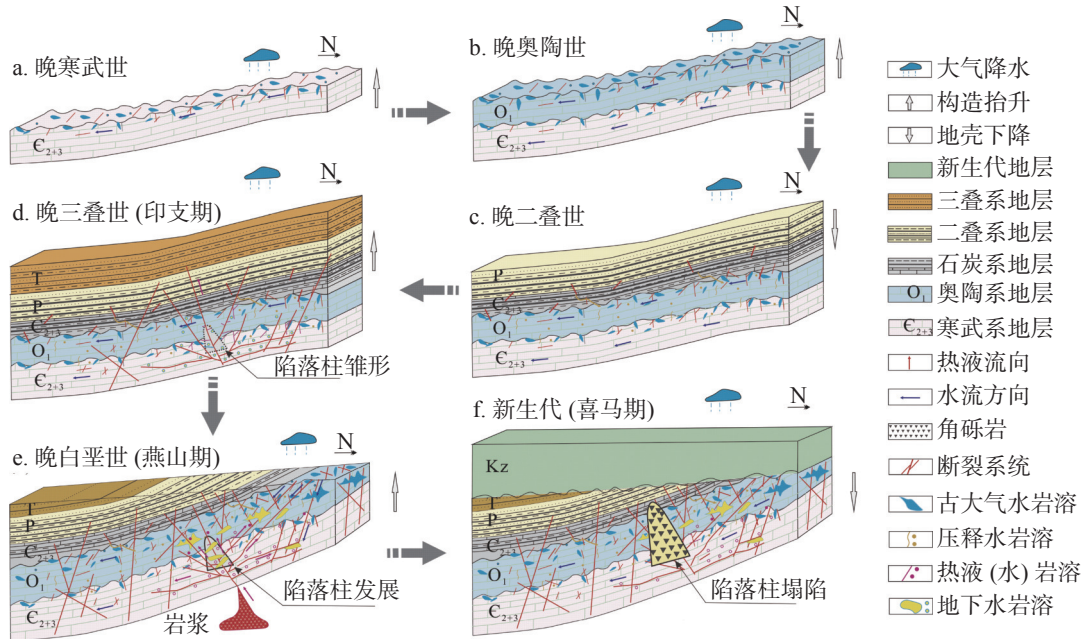


图 3 华北南缘淮南煤田陷落柱形成与演化过程<sup>[30]</sup>

Fig. 3 Evolution process of KCCs in Huainan coalfield on the southern margin of North China<sup>[30]</sup>

### 3 陷落柱突水机理

陷落柱突水机理研究主要从采掘过程中诱发突水的力学机制、渗流转化机制、突水模式等几个方面进行综述。

#### 3.1 力学机制

基于比奥理论、高等渗流力学和弹塑性力学等基础理论,推导出陷落柱周边渗透区和弹性区的应力分布函数<sup>[32-34]</sup>;利用 RFP A<sup>2D</sup>-Flow、FIAC<sup>3D</sup>、ANSYS 等有限元软件和自制试验装置系统,对陷落柱突水的力学机制和突水规律进行研究<sup>[35-44]</sup>。结果表明:采动影响条件下,陷落柱体内会经历原岩应力—应力集中—应力释放三个过程。陷落柱应力集中状态下通常以竖向应力为主,一方面引起破碎岩体的二次破坏,另一方面会导致柱体内部空隙闭合、渗透率降低,启动压力梯度增大。当工作面接近陷落柱时,受采动(掘进)影响会促使陷落柱周边围岩应力集中区、渗透区和塑性破坏区范围不断扩大,陷落柱突水危险性增加,故通常将此区域作为保护煤柱留设的重要依据,以避免陷落柱活化突水<sup>[34-35,42]</sup>。当工作面直接揭露陷落柱

时,采动(掘进)形成的垂直张裂隙带,使底板有效隔水层厚度减小、岩体强度降低、局部应力集中;尤其是陷落柱边壁、工作面底板压缩区与膨胀区的分界线重合在一条线上时,关键层的最小主应力降至最低、剪切破坏能力达到最强状态,从而最容易发生底鼓突水<sup>[40-41]</sup>。当工作面推过陷落柱后,柱体内部应力释放,空隙和渗透率增大,启动压力梯度随之减小;同时,由于地下水的软化、侵蚀作用以及颗粒的迁移作用,进一步降低陷落柱的启动压力梯度,最终导致陷落柱突水事故发生<sup>[39,41,45]</sup>。陷落柱突水的滞后性是采动影响下破碎岩体的压实作用、二次破坏造成的渗透率减小和颗粒运移形成的渗流衰减等因素共同作用造成的,从底板揭露陷落柱至发生渗流突变的过程一般需要经过 1~3 个月时间<sup>[33,39,46-47]</sup>。

#### 3.2 渗流转化机制

根据破碎岩体渗流理论、固液两相流、地下水动力学等理论,以及陷落柱突水过程中流体流态转换(含水层层流到巷道紊流)的渗流本质,建立三流场(Darcy 层流、Forchheimer 流和 N-S 紊流)耦合非线性渗流模型;利用 COMSOL Multiphysics 等软件和

自行研制的破碎岩体渗透性试验系统,对陷落柱突水过程中三种流态转换的渗流本质和渗透率变化规律进行研究<sup>[48-54]</sup>。结果表明:陷落柱突水整个过程中,地下水经历了从小空隙结构的含水层,到大空隙结构的突水通道,最终汇集至巷道或工作面<sup>[48,55]</sup>;随着突水流体流速的不断增大,地下水由以黏滞阻力为主的 Darcy 层流向黏滞阻力和惯性阻力共同作用的 Forchheimer 流过渡,最后质变为以惯性阻力为主的 N-S 紊流<sup>[48,50,53-54]</sup>。陷落柱突水的突发性是由于陷落柱体内大颗粒流失导致破碎岩体空隙结构改变,地下水由 Darcy 层流迅速向 Forchheimer 流和 N-S 紊流转化造成的<sup>[49,53]</sup>。

### 3.3 突水模式

根据陷落柱与采煤工作面或巷道的位置关系,当陷落柱不穿过采煤工作面或巷道时,其突水部位为陷落柱的顶部或底部,称为顶底部突水模式;当陷落柱穿过采煤工作面或巷道时,一般突水发生在陷落柱侧壁(煤柱或岩柱),称为侧壁突水模式<sup>[2]</sup>。根据陷落柱与采煤工作面之间的关键层厚度与宽度之比,顶底部突水模型又分为薄板理论子模式(关键层厚度与宽度之比小于 1/5)和剪切破坏理论子模式(关键层厚度与宽度之比大于 1/5)<sup>[2,56]</sup>。侧壁突水模型也分为两种子模式:一种是陷落柱四周留有同心圆放水煤柱,地下

水突破防水煤柱而突水,为厚壁筒突水子模式;另一种是陷落远离采煤工作面或巷道,地下水通过压裂与其他构造导通而突水,为压裂突水子模式<sup>[2,56]</sup>。在这 4 种陷落柱突水模式的基础上,运用弹塑性力学、高等渗流力学和复变函数建立这 4 种子突水模式的本构模型和突水判据方程(具体内容见文献 [2,43,56-59]),这为预测陷落柱突水提供了评判依据。

## 4 陷落柱探查与危害防治

### 4.1 陷落柱探查

由于陷落柱通常是一种孤立的地质体,其空间形态不规则、大小不一、高度各异、隐蔽性强且呈点状突水通道等特征,陷落柱的探测难度很大<sup>[60]</sup>。目前,探查陷落柱形态、分布范围主要采用三维地震勘探技术<sup>[21]</sup>,探测其赋水特征的技术和方法有地球物理勘探(主要包括高密度电法、可控源音频大地电磁法、瞬变电磁法和电磁波法)、化探、巷探、钻探和水文地质条件分析等<sup>[61-62]</sup>。但每一种方法和技术都有其优缺点,除非综合利用上述所有方法和技术,从宏观到微观、逐步逼近,才能确定陷落柱的准确位置和导水性。陷落柱探查与防治技术流程如图 4 所示。

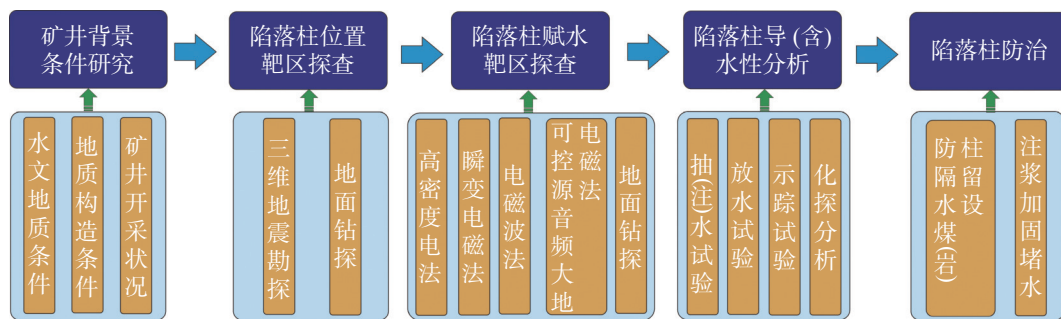


图 4 陷落柱探查与防治技术路线

Fig. 4 Technical route for the exploration and prevention of KCCs

(1)利用三维地震勘探方法和技术,初步确定陷落柱的影响范围

三维地震勘探是将地震波发射到地面,通过放射性探测器接收回波,利用计算机分析不同地质界面的回波参数,来解释煤层中断层、岩浆岩和陷落柱等地质体,是一种较为成熟的地球物理勘探方法<sup>[63-65]</sup>。它具有勘探面积大、成本低等优点,其缺点是受地形和地表物体影响较大。勾精为、李艳芳等<sup>[66-67]</sup>通过

物理模型试验、数值模拟和理论计算,证明三维地震勘探方法对陷落柱探测的可行性和科学性,并在西山、淮南、淮北等矿区的陷落柱探查中得到成功应用,取得较好效果<sup>[63,68-70]</sup>。因此,通常采用三维地震勘探技术,初步确定可能存在陷落柱的疑似区域,为钻探定位提供依据。

(2)采用综合物探方法,探测陷落柱影响区内的赋水性

地球物理勘探方法具有探测能力强、效率高、成本低等特点,常用于探测地下水的赋水性特征。目前,用于探测陷落柱赋水性特征的方法主要有高密度电法、可控源音频大地电磁法、瞬变电磁法和电磁波法<sup>[71-72]</sup>。其中,井下多采用高密度电法、瞬变电磁法和电磁波法对陷落柱的赋水性特征进行探测,地面常采用可控源音频大地电磁法和地面瞬变电磁法<sup>[73-74]</sup>。实践表明,地面瞬变电磁法和高密度电法仅对浅部发育的陷落柱探测效果较好,对于发育在深部的陷落柱特征探测效果不明显<sup>[61]</sup>。因此,在实际生产实践过程中,多采用井上、井下多种地球物理勘探方法相结合,综合探测分析陷落柱疑似区的赋水性特征。

(3)利用钻探、抽(注)水试验、化探等方法,确定陷落柱准确位置、形态及水文地质特征

根据三维地震和地球物理勘探成果,识别出陷落柱的疑似区域和靶区位置,借助地面钻探工程,进一步缩小陷落柱疑似区域的边界范围,并确定陷落柱的准确位置、形态和充填特征。利用地面钻孔抽(注)水试验、井下放水试验和示踪试验,结合化探分析手段(包括水质常规分析、同位素分析、微量元素分析和稀有气体分析等),查明陷落柱的导(含)水性及其与周围含水层之间的水力联系<sup>[75-79]</sup>。

## 4.2 水害防治

目前,用于陷落柱水害防治的主要方法有两种,即阻隔水煤(岩)柱留设和注浆加固/堵水。

### (1)阻隔水煤(岩)柱留设

阻隔水煤(岩)柱的留设应保证煤岩柱本身或顶、底板隔水层厚度足以抵抗临近含水层的静水压力,同时应兼顾压煤量的经济合理性<sup>[80]</sup>。目前,普遍采用含水或导水断层阻隔水煤(岩)柱留设公式,来计算导(含)水陷落柱阻隔水煤(岩)柱的留设宽度,其计算公式为<sup>[81]</sup>:

$$L = 0.5KM\sqrt{3P/K_p} \geq 20 \text{ m} \quad (1)$$

式中: $L$ 为煤岩柱留设的宽度, m;  $K$ 为安全系数,一般取 2~5;  $M$ 为煤层厚度或采高, m;  $P$ 为含水层或陷落柱水压值, MPa;  $K_p$ 为煤(岩)柱的抗拉强度, MPa。

现有资料显示,过去华北煤田导(含)水陷落柱的阻隔水煤岩柱留设宽度一般为 50 m 左右,且过导(含)水陷落柱的工作面均未发生突水事故<sup>[38,44-45]</sup>。但正如本文公式(1)所反映,阻隔水煤岩柱尺寸大小  $L$

与煤层厚度或采高( $M$ )、含水层或陷落柱水压( $P$ )、煤(岩)柱的抗拉强度( $K_p$ )和安全系数( $K$ )均有密切关系,因此,50 m 的宽度不一定能适用于所有的导(含)水陷落柱阻隔水煤岩柱的留设,需要根据现场实际情况进行重新计算、分析和评估。

### (2)注浆加固/堵水

对于不导水陷落柱,为提高回采率和减少工作面搬家次数,通常会选择直接推过陷落柱方式开采。研究发现,工作面采动应力和陷落柱体应力的相互影响作用可分为弱、中、强三个影响阶段,对应回采工作面与陷落柱距离分别为:100~150 m(弱影响段),50~100 m(中等影响段)和小于 50 m(强影响段)。据此,提出在不导水陷落柱前后 50 m 范围内,对工作面顶板和煤壁进行注浆加固,该方法在山西金庄煤矿的陷落柱防治中获得了成功应用<sup>[82-83]</sup>。

对于导水陷落柱,郑士田等<sup>[84]</sup>提出,可通过向陷落柱及其影响带进行注浆,建立人工“止水塞”(或称“堵水塞”)的方法,切断陷落柱导水通道的水源。该项技术在任楼、东庞等煤矿陷落柱突水得到成功应用,并取得良好效果<sup>[84-86]</sup>。此外,导水陷落柱突水后的治理方法还有直接封堵法、“三段式”堵水法、巷道截流法、返流注浆法和构筑水闸墙法等,这些方法在开滦范各庄、皖北任楼和徐州张集等煤矿陷落柱突水灾害治理中得到了成功应用<sup>[84-87]</sup>。

目前,陷落柱综合治理技术已基本成熟,但对于一些受制于地面建筑物和采空区影响的陷落柱,采用常规的注浆方式不易达到堵水目的。近年来,地面定向水平钻孔技术已逐渐应用到深部岩溶及陷落柱区域探查与治理工程中。地面定向水平钻孔技术是将先进的定向钻进技术与传统的地面预注浆工艺相结合,在地面合适位置布置钻机,利用地面钻机通过直孔段和造斜段的施工,使钻孔变为水平方向,可沿目标地层顺层钻进,同时可在地下形成多个分支孔,增加探查和治理的覆盖范围。该项技术已在淮南潘二和淮北朱庄等煤矿陷落柱治理中得到成功应用<sup>[88-89]</sup>。

## 5 陷落柱研究展望

陷落柱是中国复杂地质条件下形成的特殊地质体,也是地质历史演化过程中留下的“结晶”,不同地区存在较大差异性。经过 80 多年的研究,虽取得大量研究成果,但仍存在一些不足之处:(1)陷落柱的

形成环境复杂多变,形成机理众说纷纭;(2)小型隐伏陷落柱难以探查清楚,解释工作难度大;(3)陷落柱突水预测模型考虑因素不够全面,突水机理与实际情况差距较大;(4)陷落柱水害防治工作被动性较大,缺乏健全的、系统的防治技术体系。

### 5.1 将陷落柱形成机理与演化过程相结合

陷落柱是在一个漫长地质历史时期演化而形成的,在这一过程中,古地理环境(古地貌、古气候等)、古水文(古水动力场和古水化学场)和古构造应力场等都在不断演化和变迁中;地质历史时期中的地质构造运动,如加里东运动、海西运动、印支运动、燕山运动和喜山运动等,对陷落柱的演化都起着重要作用。根据对华北南缘陷落柱的研究认为,要揭示陷落柱的形成过程,不仅以陷落柱发育特征及分布规律为基础,以地球系统科学为指导,以区域地质构造演化为时间主线(图5),还要采用岩石学、构造地质学、水文学、地貌学、岩溶水文地质学以及GIS、RS等多学科和多方法来研究其演化过程。

### 5.2 小型隐伏陷落柱精细化探查与解释研究

众多学者对于陷落柱解释做了大量工作,利用三维地震时间剖面和多属性结合的手段对陷落柱进行解释,同时总结陷落柱在时间剖面 and 属性平面上的特征,取得丰硕成果<sup>[63,68-70]</sup>。但由于小型隐伏陷落柱(本文是指直径小于5m的陷落柱)具有埋藏深、隐蔽性强和多解性等特点,且小型陷落柱波形特征与某些地质现象(如小型地堑、小型向斜、倾角变陡区等)又具有类似性,很难通过三维地震属性和时间切片辨识清楚,也极易造成错误解译。

因此,在小型隐伏陷落柱探查与解释工作方面,要继续完善全空间物理场基础理论,开发新装备、新技术和新方法,进一步提高地球物理勘探的精度、分辨率、抗干扰能力和增加探测深度,实现“精细探测、精细数据、精细解释”的目标<sup>[63]</sup>。对于疑似的小型隐伏陷落柱,还应采用物探、钻探、化探、水化学和同位素等多种方法和技术相结合,综合分析和验证。

### 5.3 建立“动态监测—预测模型—突水机理”相结合研究模式

陷落柱突水是水—岩耦合基础上的力学响应,是以裂缝及其内部缺陷相互作用过程中的萌生、扩展和贯通为主要表现形式,不仅涉及渐进破裂过程,

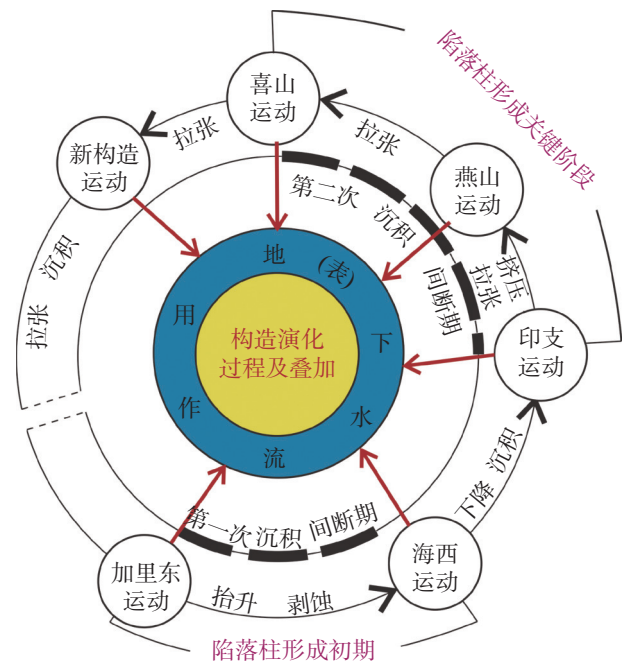


图5 地质构造演化对陷落柱形成作用过程示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the effect of geological structure evolution on the formation of KCCs

而且也是复杂非线性时空问题<sup>[48,90]</sup>。然而,现有(解析、半解析或数值)模型方法与实际情况差距较大,受缺陷和裂缝扩展影响,水—岩耦合模型存在不确定性<sup>[91-92]</sup>。此外,目前的陷落柱突水机理研究,基本上都是从前人提出的多种突水机理基础上衍生出来的,这些理论中都没有很好地将突水机理与数学模型、突水前兆、动态监测技术进行有机结合,造成应用上的困难。

因此,提出将陷落柱“动态监测—预测模型—突水机理”联合研究的思考,整体思路如图6所示。首先,建立区域动态监测系统,监测陷落柱突水全过程中(包括突水前、突水时和突水后)应力、变形、声发射、破裂(波速)、水压(位)、水化学、水温等参数,但由于矿井井下环境恶劣,目前的监测设备暂无法满足这种极端环境下的多参数采集任务,因此,急需研发新的稳定性多参数指标监测仪器和系统;其次,借助大数据和云平台数据处理技术,基于以信息传递为特征动态监测系统,结合现有水—岩耦合数值模型建立多参数集成的陷落柱突水预测模型;最后,根据动态监测及突水模型预测结果,分析陷落柱多场耦合作用下高度非线性和非均质特征的变形—损伤—破坏全过程<sup>[93-96]</sup>,修正和完善现有陷落柱突水机理和预测模型,并指导陷落柱突水预测新模型的



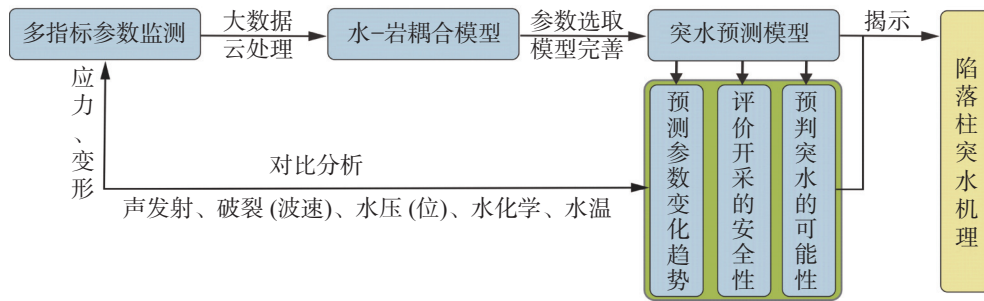


图 6 “动态监测—预测模型—突水机理”示意图

Fig. 6 Schematic diagram of “dynamic monitoring-prediction model-water inrush mechanism”

建立及参数选取。

此外，高精度微震监测技术目前是监测和预报陷落柱突水危险性中比较好的方法，虽然该项技术在突水通道监测预警方面还存在很多难点。高精度微震监测的实时、连续监测，是识别断层和陷落柱等导水通道孕育、发展到最终失稳过程的有效技术手段，利用高精度微震监测与数值模拟耦合，可以揭示采动引起陷落柱等构造活化和灾变的机制<sup>[97-100]</sup>。因此，高精度微震监测为陷落柱突水机理和预测预报的研究提供了一种新思路、新方法和新技术。

#### 5.4 加强陷落柱水害防治技术体系研究

尽管陷落柱探查和治理工作已进行了 80 多年，但陷落柱突水事故还时有发生<sup>[3]</sup>。究其原因在于，目前陷落柱水害防治工作仍沿用传统的矿井防治水思想和方法，限于局部的、被动的、应急性的水害防治体系，缺乏整体的、系统的、预见性的战略水害防治

思想和技术体系。例如，对于三维地震没有解释到的小型隐伏陷落柱，通常当作小断层或煤层变薄带处理；对于三维地震解释的疑似陷落柱，多从眼前利益考虑，常采用留设防隔水煤岩柱和(或)注浆加固方法来处理；对于某一区发现有多处疑似陷落柱时，缺乏区域性探查、区域性研究和区域性治理的战略思想，多是“头痛医头、脚痛医脚”的传统防治方法。

虽有些陷落柱可能暂时没有发生突水，但局部的平衡状态也会因为人类开采活动和自然能量转化而破坏，一旦条件成熟，陷落柱突水还是可能发生的，且代价是相当沉重的。因此，必须建立健全陷落柱水害防治技术体系，主要包括陷落柱若干基础理论研究、陷落基本特征探查、陷落柱水害预防、陷落柱水害治理和陷落柱水害应急预案等技术子体系(图 7)，这对陷落柱的研究和水害防治都具有极为重要的理论和现实意义。

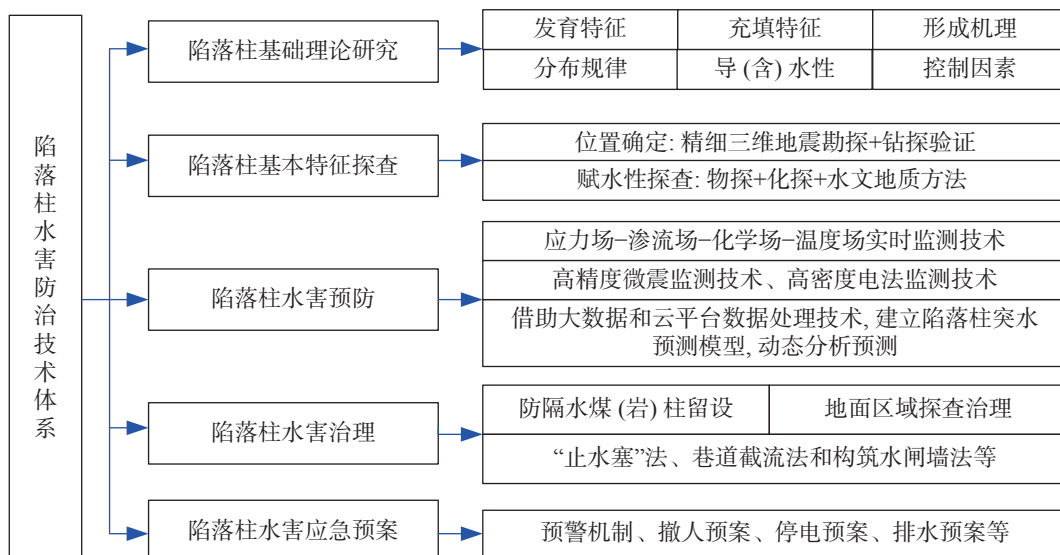


图 7 陷落柱水害防治技术体系

Fig. 7 System of prevention and control technology of KCC water disaster

## 参考文献

- [ 1 ] 王锐. 论华北地区岩溶陷落柱的形成[J]. 水文地质工程地质, 1982, 9(1): 41-45.  
WANG Rui. Formation of karst subsidence column in North China[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1982, 9(1): 41-45.
- [ 2 ] 尹尚先, 吴文金, 李永军. 华北煤田岩溶陷落柱及其突水研究[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2008.  
YIN Shangxian, WU Wenjin, LI Yongjun. Research on karst collapse column and water inrush in North China coalfield[M]. Beijing: Coal Industry Press, 2008.
- [ 3 ] 尹尚先, 连会青, 刘德民, 尹慧超. 华北型煤田岩溶陷落柱研究70年: 成因·机理·防治[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(11): 1-29.  
YIN Shangxian, LIAN Huiqing, LIU Demin, YIN Huichao. 70 years of investigation on karst collapse column in North China coalfield: cause of origin, mechanism and prevention[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(11): 1-29.
- [ 4 ] He K Q, Dong G, Wen D, Wang R L. The effects of karst collapse on the environments in north China[J]. *Environmental Geology*, 2007, 52(3): 449-455.
- [ 5 ] He K, Yu G, Lu Y. Palaeo-karst collapse pillars in northern China and their damage to the geological environments[J]. *Environmental Geology*, 2009, 58(5): 1029-1040.
- [ 6 ] 李金凯, 周万芳. 华北型煤矿床陷落柱作为导水通道突水的水文地质环境及预测[J]. 中国岩溶, 1989, 8(3): 192-199.  
LI Jinkai, ZHOU Wanfang. The hydrogeological environment and prediction of the water inrush from the collapse column of the North China-type coal deposit as an aqueduct[J]. *Carsologica Sinica*, 1989, 8(3): 192-199.
- [ 7 ] Xu W, Zhao G. Mechanism and prevention of karst collapse near mine areas in China[J]. *Environmental Geology and Water Sciences*, 1988, 12(1): 37-42.
- [ 8 ] 侯恩科, 夏玉成. 矿井陷落柱的成因分析及其预测[J]. 西北地质, 1994, 15(2): 18-22.  
HOU Enke, XIA Yucheng. Genetic analysis and prediction of mine collapse column[J]. *Northwest Geology*, 1994, 15(2): 18-22.
- [ 9 ] 贾贵廷, 胡宽裕. 华北型煤田陷落柱的形成及分布规律[J]. 中国岩溶, 1989, 8(4): 261-267.  
JIA Guiting, HU Kuanrong. Formation and distribution of collapse columns in North China coalfield[J]. *Carsologica Sinica*, 1989, 8(4): 261-267.
- [ 10 ] 许光泉, 孙丰英, 刘丽红, 李佩全, 汪敏华, 刘满才. 淮南潘谢矿区岩溶类地质异常体演化过程及预测[J]. 煤田地质与勘探, 2016, 44(1): 62-68.  
XU Guangquan, SUN Fengying, LIU Lihong, LI Peiquan, WANG Minhua, LIU Mancai. Evolution process and prediction of karst geological abnormal bodies in Panxie coal mining area in Huainan[J]. *Coal Geology and Exploration*, 2016, 44(1): 62-68.
- [ 11 ] Zuo J P, Peng S P, Li Y J, Chen Z H, Xie H P. Investigation of karst collapse based on 3-D seismic technique and DDA method at Xieqiao coal mine, China[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2009, 78(4): 276-287.
- [ 12 ] 程广琪, 刘登宪, 傅先杰, 王峻嵩. 淮南煤田北西向断裂与岩溶陷落柱关系研究[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(10): 108-111.  
CHENG Guangqi, LIU Dengxian, FU Xianjie, WANG Junying. Study on relationship between northwest directional failure and karst sinkhole in Huainan coalfield[J]. *Coal Science and Technology*, 2013, 41(10): 108-111.
- [ 13 ] 尹尚先, 武强, 王尚旭. 北方岩溶陷落柱的充水特征及水文地质模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(1): 77-82.  
YIN Shangxian, WU Qiang, WANG Shangxu. Water-bearing characteristics and hydro-geological models of karstic collapse columns in north China[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(1): 77-82.
- [ 14 ] Ma D, Bai H, Miao X, Pu H, Jiang B Y, Chen Z Q. Compaction and seepage properties of crushed limestone particle mixture: an experimental investigation for Ordovician karst collapse pillar groundwater inrush[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(1): 2-14.
- [ 15 ] Gui H, Xu J, Zhang D. Relationship between hydraulic conductivity of karst collapse column and its surrounding lithology[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(5): 215.
- [ 16 ] Li H, Bai H, Wu J, Ma Z G, Ma K W, Du G M, Du Y B, He S X. A cascade disaster caused by geological and coupled hydro-mechanical factors-water inrush mechanism from karst collapse column under confining pressure[J]. *Energies*, 2017, 10(12): 1-19.
- [ 17 ] 桂辉, 杨志斌, 韩翔旭. 皖北矿区岩溶陷落柱导水性差异原因研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(6): 165-169.  
GUI Hui, YANG Zhibin, HAN Xiangxu. Study on reason for differences of hydraulic conductivity of karst collapse columns in Wanbei Mining Area[J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(6): 165-169.
- [ 18 ] 袁道先, 蒋勇军, 沈立成, 蒲俊兵, 肖琼. 现代岩溶学[M]. 北京: 科学出版社, 2016.  
YUAN Daoxian, JIANG Yongjun, SHEN Licheng, PU Junbing, XIAO Qiong. *Modern karst science* [M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [ 19 ] 李定龙, 周治安, 王桂梁. 马家沟灰岩(古)岩溶研究中的若干问题探讨[J]. 地质科技情报, 1997, 16(1): 23-28.  
LI Dinglong, ZHOU Zhian, WANG Guilang. Approaching problems in karstic studying of MaJiaGou limestone in area of north China[J]. *Geological Science and Technology Information*, 1997, 16(1): 23-28.
- [ 20 ] Tian F, Jin Q, Lu X B, Lei Y H, Zhang L K, Zheng S Q, Zhang H F, Rong Y S, Liu N G. Multi-layered ordovician paleokarst reservoir detection and spatial delineation: A case study in the Tahe Oilfield, Tarim Basin, Western China[J]. *Marine and*

- Petroleum Geology, 2016, 69(3): 53-73.
- [ 21 ] 李定龙. 皖北奥陶系古岩溶及其环境地球化学特征研究[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001.  
LI Dinglong. Research on Ordovician paleokarst and its environmental geochemical characteristics in northern Anhui [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001.
- [ 22 ] 尹尚先, 武强, 王尚旭. 华北煤矿区岩溶陷落柱特征及成因探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(1): 120-123.  
YIN Shangxian, WU Qiang, WANG Shangxu. Studies on characters and forming mechanism of collapse columns at mine area of north China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(1): 120-123.
- [ 23 ] 史俊德, 连冬香, 杨士臣. 论岩溶塌陷问题[J]. 华北地质矿产杂志, 1998, 5(3): 264-267.  
SHI Junde, LIAN Dongxiang, YANG Shicheng. Discussions on the engineering geologic problems relevant to karst collapse[J]. Jour Geoland Min Res North China, 1998, 5(3): 264-267.
- [ 24 ] 钱学溥. 石膏喀斯特陷落柱的形成及其水文地质意义[J]. 中国岩溶, 1988, 7(4): 344.  
QIAN Xuepu. The formation of gypsum karst collapse-collum and its hydrogeological significance[J]. Carsologica Sinica, 1988, 7(4): 344.
- [ 25 ] 徐卫国, 赵桂荣. 试论岩溶矿区地面塌陷的真空吸蚀作用[J]. 地质论评, 1981, 27(2): 86-95.  
XU Weiguo, ZHAO Guirong. The implication of suction action for ground subsidence in karst mining areds[J]. Geological Review, 1981, 27(2): 86-95.
- [ 26 ] 徐卫国, 赵桂荣. 真空吸蚀作用引起的塌陷实例[J]. 水文地质工程地质, 1988, 15(3): 54-55.  
XU Weiguo, ZHAO Guirong. Example of collapse caused by vacuum aspiration[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1988, 15(3): 54-55.
- [ 27 ] 潘彤. 火山侵蚀和塌陷: 以侵入体为中心的矿床叠生的成因[J]. 世界地质, 1996, 15(1): 35-38.  
PAN Tong. Volcanic erosion and subsidence: the genesis of deposits centered on intrusions[J]. World Geology, 1996, 15(1): 35-38.
- [ 28 ] 丁博钊, 张光荣, 陈康, 耿玮, 朱兴卉, 范畅. 四川盆地高石梯地区震旦系岩溶塌陷储集体成因及意义[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(8): 1211-1218.  
DING Bozhao, ZHANG Guangrong, CHEN Kang, GENG Wei, ZHU Xinghui, FAN Chang. Genesis research of collapsed-paleo-cave systems in Sinian carbonate strata in central Sichuan Basin, SW China[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(8): 1211-1218.
- [ 29 ] 王经明, 刘文生, 关永强, 王军现, 吴燾. 华北煤田陷落柱的地下水内循环形成机理: 以峰峰矿区为例[J]. 中国岩溶, 2007, 26(1): 11-17.  
WANG Jingming, LIU Wensheng, GUAN Yongqiang, WANG Junxian, WU Fan. Mechanism of groundwater inner circulation in sinking column formation in North China coal field-A case study at Fengfeng mine[J]. Carsologica Sinica, 2007, 26(1): 11-17.
- [ 30 ] Zhang H T, Xu G Q, Zhan H B, Zheng J B, Wang M H, Liu M C, Pan S Q, Wang N. Formation mechanisms of paleokarst and karst collapse columns of the Middle Cambrian-Lower Ordovician carbonates in Huainan coalfield, Northern China[J]. Journal of Hydrology, 2021, 601(1): 126634.
- [ 31 ] 赵金贵, 郭敏泰. 平顺老马岭岩溶陷落柱的发现及形成时段探讨[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1716-1724.  
ZHAO Jingui, GUO Mintai. Discover and formation time of karst collapse pillar in Laomaling, Pingshun County[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1716-1724.
- [ 32 ] 啜晓宇, 滕吉文. 强导(含)水隐伏陷落柱底板突水机理研究[J]. 地球物理学报, 2017, 60(1): 430-440.  
CHUAI Xiaoyu, TENG Jiwen. Water inrush mechanism research of strong conduction (water including) karstic collapse column[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(1): 430-440.
- [ 33 ] 李连崇, 唐春安, 左宇军, 李根, 刘超. 煤层底板下隐伏陷落柱的滞后突水机理[J]. 煤炭学报, 2009, 34(9): 1212-1216.  
LI Lianchong, TANG Chunan, ZUO Yujun, LI Gen, LIU Chao. Mechanism of hysteretic groundwater inrush from coal seam floor with karstic collapse columns[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(9): 1212-1216.
- [ 34 ] 李见波, 许延春. 承压水渗流条件下预防陷落柱突水力学模型及应用[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(2): 217-224.  
LI Jianbo, XU Yanchun. Mechanical model of the collapse column water inrush prevention considering the confined water seepage and its application[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2016, 45(2): 217-224.
- [ 35 ] 王家臣, 李见波. 预测陷落柱突水灾害的物理模型及理论判据[J]. 北京科技大学学报, 2010, 32(10): 1243-1247.  
WANG Jiachen, LI Jianbo. Physical model and theoretic criterion of the forecast of water inrush caused by collapse columns[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2010, 32(10): 1243-1247.
- [ 36 ] 张文忠. 陷落柱突水三维大型模拟实验系统研制及应用[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(1): 56-61.  
ZHANG Wenzhong. Development and application of 3D large-scale simulation experiment system of water inrush caused by collapse column[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2016, 45(1): 56-61.
- [ 37 ] 李振华, 李见波, 贺志宏. 双柳煤矿陷落柱发育特征及突水危险性分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(1): 84-89.  
LI Zhenhua, LI Jianbo, HE Zhihong. Analysis on development characteristics of karst collapse column and water inrush risk in Shuangliu coal mine[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2014, 31(1): 84-89.
- [ 38 ] 王家臣, 王树忠, 熊崇山. 五阳煤矿陷落柱发育特征及突水危险性评价[J]. 煤炭学报, 2009, 34(7): 922-926.  
WANG Jiachen, WANG Shuzhong, XIONG Chongshan. The

- collapse column development characteristics and the evaluation on water bursting risk of Wuyang Coal Mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2009, 34(7): 922-926.
- [ 39 ] 张勃阳, 白海波, 张凯. 采动影响下陷落柱的滞后突水机理研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2016, 45(3): 447-454.  
ZHANG Boyang, BAI Haibo, ZHANG Kai. Study on the mechanism of delayed water inrush of collapse column under the influence of mining[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2016, 45(3): 447-454.
- [ 40 ] 尹尚先, 王尚旭. 陷落柱影响采场围岩破坏和底板突水的数值模拟分析[J]. *煤炭学报*, 2003, 28(3): 264-269.  
YIN Shangxian, WANG Shangxu. A numerical simulation analysis of influence of karstic collapse columns on rock mass yield and water inrush from coal floor[J]. *Journal of China Coal Society*, 2003, 28(3): 264-269.
- [ 41 ] 尹尚先, 武强. 煤层底板陷落柱突水模拟及机理分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(15): 2551-2556.  
YIN Shangxian, WU Qiang. Simulation and mechanism analysis of water inrush from karstic collapse columns in coal floor[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(15): 2551-2556.
- [ 42 ] 张均锋, 张华玲, 孟达, 曹杰. 采动影响下强充水型隐伏岩溶陷落柱围岩变形与渗流场数值模拟[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(s1): 2824-2829.  
ZHANG Junfeng, ZHANG Hualing, MENG Da, CAO Jie. Numerical simulation of rock deformation and seepage field with a fully-water karstic collapse column under mining influence[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(s1): 2824-2829.
- [ 43 ] 宋彦琦, 王兴雨, 程鹏, 彭长剑, 徐爽. 椭圆形陷落柱厚壁筒突水模式力学判据及数值模拟[J]. *煤炭学报*, 2011, 36(3): 452-455.  
SONG Yanqi, WANG Xingyu, CHENG Peng, PENG Changjian, XU Shuang. The mechanical criterion and numerical simulation of thick-walled elliptical cylinder collapse column model under water inrush[J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(3): 452-455.
- [ 44 ] 刘志军, 熊崇山. 陷落柱突水机制的数值模拟研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(s2): 4013-4018.  
LIU Zhijun, XIONG Chongshan. Numerical simulation study on water inrush mechanism from collapse column[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(s2): 4013-4018.
- [ 45 ] 尹尚先, 王尚旭. 不同尺度下岩层渗透性与地应力的关系及机理[J]. *中国科学:地球科学*, 2006, 36(5): 472-480.  
YIN Shangxian, WANG Shangxu. Relationship between rock permeability and ground stress and mechanism under different scales[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2006, 36(5): 472-480.
- [ 46 ] 武强, 朱斌, 李建民, 洪益清, 钱增江. 断裂带煤矿井巷滞后突水机理数值模拟[J]. *中国矿业大学学报*, 2008, 37(6): 780-785.  
WU Qiang, ZHU Bin, LI Jianmin, HONG Yiqing, QIAN Zengjiang. Numerical Simulation of Lagging Water-Inrush Mechanism of Rock Roadways Near Fault Zone[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2008, 37(6): 780-785.
- [ 47 ] 武强, 朱斌, 刘守强. 矿井断裂构造带滞后突水的流—固耦合模拟方法分析与滞后时间确定[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(1): 93-104.  
WU Qiang, ZHU Bin, LIU Shouqiang. Flow-solid coupling simulation method analysis and time identification of lagging water-inrush near mine fault belt[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(1): 93-104.
- [ 48 ] 杨天鸿, 师文豪, 刘洪磊, 杨斌, 杨鑫, 刘再斌. 基于流态转换的非线性渗流模型及在陷落柱突水机理分析中的应用[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(2): 315-321.  
YANG Tianhong, SHI Wenhao, LIU Honglei, YANG Bin, YANG Xin, LIU Zaibin. A non-linear flow model based on flow transition and its application in the mechanism analysis of water inrush through collapse pillar[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(2): 315-321.
- [ 49 ] 张勃阳, 白海波, 张凯. 类陷落柱介质渗流突变机制试验研究[J]. *岩土力学*, 2016, 37(3): 745-752.  
ZHANG Boyang, BAI Haibo, ZHANG Kai. Experimental research on seepage mutation mechanism of collapse column medium[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(3): 745-752.
- [ 50 ] 杨天鸿, 陈仕阔, 朱万成, 孟召平, 高延法. 矿井岩体破坏突水机制及非线性渗流模型初探[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(7): 1411-1416.  
YANG Tianhong, CHEN Shikuo, ZHU Wancheng, MENG Zhaoping, GAO Yanfa. Water inrush mechanism in mines and nonlinear flow model for fractured rocks[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(7): 1411-1416.
- [ 51 ] 张凯, 姚邦华, 吴松刚, 张宏图. 陷落柱的变质量渗流特性及其突水危险性数值模拟[J]. *采矿与安全工程学报*, 2013, 30(6): 892-896.  
ZHANG Kai, YAO Banghua, WU Songgang, ZHANG Hongtu. Study on the characteristics of variable mass seepage and water inrush mechanism of collapse column[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2013, 30(6): 892-896.
- [ 52 ] 姚邦华, 茅献彪, 魏建平, 王登科. 考虑颗粒迁移的陷落柱流固耦合动力学模型研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2014, 43(1): 30-35.  
YAO Banghua, MAO Xianbiao, WEI Jianping, WANG Dengke. Study on coupled fluid-solid model for collapse columns considering the effect of particle transport[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2014, 43(1): 30-35.
- [ 53 ] 张勃阳, 白海波, 张凯. 陷落柱充填物全应力—应变过程的渗流特性研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2016, 33(4): 734-740.  
ZHANG Boyang, BAI Haibo, ZHANG Kai. Research on permeability characteristics of karst collapse column fillings in complete stress-strain process[J]. *Journal of Mining and Safety*

- Engineering, 2016, 33(4): 734-740.
- [ 54 ] 师文豪, 杨天鸿, 刘洪磊, 杨斌, 杨鑫, 周永发. 矿山岩体破坏突水非达西流模型及数值求解[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(3): 446-455.  
SHI Wenhao, YANG Tianhong, LIU Honglei, YANG Bin, YANG Xin, ZHOU Yongfa. Non-Darcy flow model and numerical simulation for water-inrush in fractured rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(3): 446-455.
- [ 55 ] 赵延林, 张盛国, 万文, 王卫军, 蔡璐, 彭青阳. 基于流态转换理论巷道前伏溶洞突水的流固耦合-强度折减法分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(9): 1852-1862.  
ZHAO Yanlin, ZHANG Shengguo, WAN Wen, WANG Weijun, CAI Lu, PENG Qingyang. Solid-fluid coupling-strength reduction method for karst cave water inrush before roadway based on flow state conversion theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(9): 1852-1862.
- [ 56 ] 尹尚先, 武强. 陷落柱概化模式及突水力学判据[J]. 北京科技大学学报, 2006, 28(9): 812-817.  
YIN Shangxian, WU Qiang. Generalized modes and academic criterions of water inrush from paleo-sinkholes[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2006, 28(9): 812-817.
- [ 57 ] 刘国林, 尹尚先, 王延斌. 华北型煤田岩溶陷落柱侧壁厚壁筒突水模式研究[J]. 工程地质学报, 2007, 15(2): 284-287.  
LIU Guolin, YIN Shangxian, WANG Yanbin. Model of water inrush for thick wall cylinder at side face of paleo-sinkholes in north-china-type coalfields[J]. Journal of Engineering Geology, 2007, 15(2): 284-287.
- [ 58 ] 尹尚先, 王尚旭, 武强. 陷落柱突水模式及理论判据[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(6): 964-968.  
YIN Shangxian, WANG Shangxu, WU Qiang. Water inrush patterns and theoretic criteria of karstic collapse columns[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(6): 964-968.
- [ 59 ] 杨为民, 司海宝, 吴文金. 岩溶陷落柱导水类型及其突水风险预测[J]. 煤炭工程, 2005, 38(8): 60-63.  
YANG Weimin, SI Haibao, WU Wenjin. Water conducted type karst sink hole and prediction of water inrush risk[J]. Coal Engineering, 2005, 38(8): 60-63.
- [ 60 ] Zhang S H, Lin C R. Study on the genesis of karstic collapse column and characteristics of high resolution seismic data in one coal field[J]. International Journal of Coal Science and Technology, 2008, 14(4): 648-650.
- [ 61 ] 杨武洋. 煤矿陷落柱赋水特征的综合物探探查原理与方法[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(1): 45-50.  
YANG Wuyang. Integrated geophysical prospecting principle and method of exploring the water enrichment of coal mine collapse column[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2013, 30(1): 45-50.
- [ 62 ] 朱国维, 王怀秀, 韩堂惠. 地面—井下联合地震勘探确定岩溶陷落柱空间分布[J]. 煤炭科学技术, 2008, 31(5): 33-36.  
ZHU Guowei, WANG Huaixiu, HAN Tanghui. Surface and underground combined seismic survey to define space distribution of karst sink hole[J]. Coal Science and Technology, 2008, 31(5): 33-36.
- [ 63 ] 彭苏萍, 杜文凤, 赵伟, 师素珍, 何登科. 煤田三维地震综合解释技术在复杂地质条件下的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(s1): 2760-2765.  
PENG Suping, DU Wenfeng, ZHAO Wei, SHI Suzhen, HE Dengke. 3D coalfield seismic integrated interpretation technique in complex geological condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(s1): 2760-2765.
- [ 64 ] 刘礼安, 崔凤林, 张剑锋. 三维复杂构造中地震波模拟的单程波方法[J]. 地球物理学报, 2004, 47(3): 514-520.  
LIU Linong, CUI Fenglin, ZHANG Jianfeng. Seismic modeling with one-way wave equation in 3D complex structures[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2004, 47(3): 514-520.
- [ 65 ] 贾东, 李一泉, 王毛毛, 李海滨. 断层相关褶皱的三维构造几何学分析: 以川西三维地震工区为例[J]. 岩石学报, 2011, 27(3): 732-740.  
JIA Dong, LI Yiquan, WANG Maomao, LI Haibin. Three-dimensional structural geometry of fault-related folds: Examples from 3-D seismic explored blocks in the western Sichuan Province, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(3): 732-740.
- [ 66 ] 勾精为, 程增庆, 陈加林. 三维地震探测陷落柱的可行性研究[C]//计算机在地学中的应用国际讨论会论文摘要集, 1991.  
GOU Jingwei, CHENG Zengqing, CHEN Jialin. Feasibility study of three-dimensional seismic detection of collapsed columns [C]//Abstracts of International Symposium on the Application of Computers in Geoscience, 1991.
- [ 67 ] 李艳芳, 程建远, 熊晓军, 聂爱兰, 张宪旭. 陷落柱三维地震正演模拟及对比分析[J]. 煤炭学报, 2011, 36(3): 456-460.  
LI Yanfang, CHENG Jianyuan, XIONG Xiaojun, NIE Ailan, ZHANG Xianxu. 3D seismic forward modeling of collapse column and comparison[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(3): 456-460.
- [ 68 ] 查文锋. 山西某矿陷落柱三维地震成果可靠程度评价[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(5): 147-151.  
CHA Wenfeng. Evaluation of the reliability of the collapse column interpreted by 3D seismic in a mine in Shanxi Province[J]. Coal Geology and Exploration, 2017, 45(5): 147-151.
- [ 69 ] 庄益明, 宋利虎, 刘镜竹. 蚂蚁追踪技术在三维地震精细解释中的应用: 以淮北祁南煤矿82采区为例[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 4(2): 173-176.  
ZHUANG Yiming, SONG Lihu, LIU Jingzhu. Application of ant tracking technology in 3D seismic fine interpretation of faults: A case study on mining district No. 82 in Huaibei Qinan coal mine[J]. Coal Geology and Exploration, 2018, 4(2): 173-176.
- [ 70 ] 杨双安, 张淑婷, 郭勇洪, 魏书宏, 李连英, 张胤彬. 时间剖面上分析陷落柱充水性的探讨[J]. 中国矿业大学学报, 2001, 30(5): 503-505.

- YANG Shuangan, ZHANG Shuting, GUO Yonghong, WEI Shuhong, LI Lianying, ZHANG Yinbin. Analysis of water-filling of subsided column based on time section[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2001, 30(5): 503-505.
- [ 71 ] 刘志新, 刘树才, 于景邨. 综合矿井物探技术在探测陷落柱中的应用[J]. *物探与化探*, 2008, 32(2): 212-215.
- LIU Zhixin, LIU Shucui, YU Jingcun. The application of integrated mining geophysical technology to detecting the collapse column[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2008, 32(2): 212-215.
- [ 72 ] 袁伟, 李天亮, 李东北, 熊健. 音频大地电磁法在某灰岩地区煤炭资源勘查中探测岩溶和陷落柱的应用[J]. *物探化探计算技术*, 2016, 38(6): 727-733.
- YUAN Wei, LI Tianliang, LI Dongbei, XIONG Jian. Audio magneto-telluric method to detect karst and collapse column in the limestone region in the exploration of coal resources[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2016, 38(6): 727-733.
- [ 73 ] 原文涛. 瞬变电磁法在采空区及陷落柱探测中的应用[J]. *物探与化探*, 2012, 36(10): 164-167.
- YUAN Wentao. The application of transient electromagnetic method to the detection of goaf and collapse columns[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2012, 36(10): 164-167.
- [ 74 ] 程久龙, 李飞, 彭苏萍, 孙晓云. 矿井巷道地球物理方法超前探测研究进展与展望[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(8): 1742-1750.
- CHENG Jiulong, LI Fei, PENG Shuping, SUN Xiaoyun. Research progress and development direction on advanced detection in mine roadway working face using geophysical methods[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(8): 1742-1750.
- [ 75 ] 桂和荣, 陈陆望. 矿区地下水水文地球化学演化与识别[M]. 北京: 地质出版社, 2007.
- GUI Herong, CHEN Luwang. Hydrogeochemical evolution and identification of groundwater in mining areas [M]. Beijing: Geological Press, 2007.
- [ 76 ] 尹尚先, 徐斌, 徐慧, 夏向学. 化学示踪连通试验在矿井充水条件探查中的应用[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(1): 129-134.
- YIN Shangxian, XU Bin, XU Hui, XIA Xiangxue. The application of chemical tracer experiments on exploring the mine water filling conditions[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(1): 129-134.
- [ 77 ] 李霞, 陈文芳, 万利勤, 夏飞雪, 张一博, 袁梦丽. 河南嵩县北部基岩山区地下水水化学特征和环境同位素特征分析[J]. *地球学报*, 2017, 38(3): 403-412.
- LI Xia, CHEN Wenfang, WAN Liqin, XIA Feixue, ZHANG Yibo, YUAN Mengli. An Analysis of Hydrochemical Characteristics and Environmental Isotopic Characteristics of the Groundwater in the Bedrock Mountain Area in Northern Songxian County, Henan Province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2017, 38(3): 403-412.
- [ 78 ] 刘人太, 李术才, 张庆松, 张伟杰, 孙子正, 朱明听. 示踪试验分析方法在地下工程水害治理中的应用研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(4): 814-821.
- LIU Rentai, LI Shucui, ZHANG Qingsong, ZHANG Weijie, SUN Zizheng, ZHU Mingting. Research on application of tracer experiment analysis method to water hazards management in underground engineering[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(4): 814-821.
- [ 79 ] 徐占杰, 刘钦甫, 宋璞, 姬景超, 毋应科. 寺家庄井田陷落柱对煤层气井产出水地球化学特征的影响[J]. *煤田地质与勘探*, 2017, 45(2): 50-54.
- XU Zhanjie, LIU Qinfu, SONG Pu, JI Jingchao, WU Yingke. Effect of karstic collapse column on hydrogeochemistry of produced water from coalbed methane wells in Sijiazhuang mine field[J]. *Coal Geology and Exploration*, 2017, 45(2): 50-54.
- [ 80 ] 田多, 师皓宇, 梁兴旺, 牛国星. 综放工作面过陷落柱阶段划分及其顶板结构分析[J]. *采矿与安全工程学报*, 2015, 32(1): 49-53.
- TIAN Duo, SHI Haoyu, LIANG Xingwang, NIU Guoxing. Stage division and roof structure analysis during fully mechanized caving face passing a collapse column[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2015, 32(1): 49-53.
- [ 81 ] 国家安全生产监督管理总局. 煤矿防治水规定[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2009.
- State administration of work safety. Regulations on prevention and control of water in coal mine [M]. Beijing: Coal Industry Press, 2009.
- [ 82 ] 张村, 屠世浩, 白庆升, 张艳伟, 杨乾龙. 陷落柱周边应力变化及推采控制研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2014, 43(6): 974-980.
- ZHANG Cun, TU Shihao, BAI Qingsheng, ZHANG Yanwei, YANG Qianlong. Stress changes around collapse column and the control technology by directly passing operation in long-wall working face[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2014, 43(6): 974-980.
- [ 83 ] 郝兵元, 张玉江, 戚庭野, 冯国瑞, 白锦文, 章敏, 康立勋. 综采面过陷落柱采动应力与柱体应力相互影响模拟研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2015, 32(2): 192-198.
- HAO Bingyuan, ZHANG Yujiang, QI Tingye, FENG Guorui, BAI Jinwen, ZHANG Min, KANG Lixun. Simulation of interaction between mine-induced stress and stress of collapse column with fully-mechanized working face advancing[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2015, 32(2): 192-198.
- [ 84 ] 郑士田, 马培智. 陷落柱中“止水塞”的快速建立技术[J]. *煤田地质与勘探*, 1998, 26(3): 51-53.
- ZHENG Shitian, MA Peizhi. The technique building "concrete plug" quickly in collapse column[J]. *Coal Geology and Exploration*, 1998, 26(3): 51-53.
- [ 85 ] 段中稳. 隐伏导水陷落柱的综合防治[J]. *采矿与安全工程学报*, 2004, 21(2): 115-117.
- DUAN Zhongwen. Integrated prevention and control of concealed water guiding collapse column[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2004, 21(2): 115-117.

- [ 86 ] 南生辉, 蒋勤明, 郭晓山, 李抗抗, 刘再斌, 石磊. 导水岩溶陷落柱堵塞建造技术[J]. *煤田地质与勘探*, 2008, 36(4): 29-33. NAN Shenghui, JIANG Qinming, GUO Xiaoshan, LI Kangkang, LIU Zaibin, SHI Lei. Construction technique of groundwater-preventing piston in Karst flow collapse column[J]. *Coal Geology and Exploration*, 2008, 36(4): 29-33.
- [ 87 ] 何思源. 开滦范各庄矿岩溶陷落柱特大突水灾害的治理[J]. *煤田地质与勘探*, 1986, 14(2): 37-44. HE Siyuan. Treatment of extraordinary water inrush disaster in karst collapse column of Fanzhizhuang coal mine[J]. *Coal Geology and Exploration*, 1986, 14(2): 37-44.
- [ 88 ] 郑士田. 两淮煤田煤层底板灰岩水害区域超前探查治理技术[J]. *煤田地质与勘探*, 2018, 46(4): 142-146. ZHENG Shitian. Advanced exploration and control technology of limestone water hazard in coal seam floor in Huainan and Huaibei coalfields[J]. *Coalfield Geology and Exploration*, 2018, 46(4): 142-146.
- [ 89 ] 郑士田. 地面定向钻进技术在煤矿陷落柱突水防治中的应用[J]. *煤炭科学技术*, 2018, 46(7): 234-238. ZHENG Shitian. Application of ground directional borehole technology to control prevention karst collapsed column water inrush in coal mines[J]. *Coal Science and Technology*, 2018, 46(7): 234-238.
- [ 90 ] Howard J E. Global invariants for variable-mass systems[J]. *Physical Review Letters*, 2006, 97(16): 1-4.
- [ 91 ] 杨天鸿, 唐春安, 芮勇勤, 朱万成, 李元辉, 谭国焕. 不同围压作用下非均匀岩石水压致裂过程的数值模拟[J]. *计算力学学报*, 2004, 21(4): 419-424. YANG Tianhong, TANG Chunan, RUI Yongqin, ZHU Wancheng, LI Yuanhui, TAN Guohuan. Numerical simulation of hydraulic fracturing process in heterogeneous rocks under different confining pressures[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2004, 21(4): 419-424.
- [ 92 ] 周创兵, 陈益峰, 姜清辉, 卢文波. 论岩体多场广义耦合及其工程应用[C]//全国岩石力学与工程学术大会, 2008: 1329-1340. ZHOU Chuangbing, CHEN Yifeng, JIANG Qinghui, LU Wenbo. On multi-field generalized coupling of rock mass and its engineering application [C]//National Conference on Rock Mechanics and Engineering, 2008: 1329-1340.
- [ 93 ] 荆自刚, 李白英, 孙振鹏. 峰峰二矿开采活动与底板突水关系研究[J]. *煤炭学报*, 1984, 21(2): 81-87. JING Zigang, LI Baiying, SUN Zhenpeng. Study on the relationship between the mining activities of Fengfeng No. 2 Mine and the water inrush from the floor[J]. *Journal of China Coal Society*, 1984, 21(2): 81-87.
- [ 94 ] 王作宇, 刘鸿泉. 承压水上采煤[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993. WANG Zuoyu, LIU Hongquan. *Confined water mining* [M]. Beijing: Coal Industry Press, 1993.
- [ 95 ] 杨映涛. 论岩石体积应变与孔隙中流体压力的关系及其应用途径[J]. *水文地质工程地质*, 1989, 33(1): 29-33. YANG Yingtao. The relation between volumetric strain of the rock and fluid pressure in the pores and its application[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 1989, 33(1): 29-33.
- [ 96 ] 王经明. 承压水沿煤层底板递进导升突水机理的模拟与观测[J]. *岩土工程学报*, 1999, 21(5): 546-549. WANG Jingming. In-situ measurement and physical analogue on water inrush from coal floor induced by progressive intrusion of artesian water into protective aquiclude[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1999, 21(5): 546-549.
- [ 97 ] 杨天鸿, 唐春安, 谭志宏, 朱万成, 冯启言. 岩体破坏突水模型研究现状及突水预测预报研究发展趋势[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(2): 268-277. YANG Tianhong, TANG Chunan, TAN Zhihong, ZHU Wancheng, FENG Qiyan. State of the art of inrush models in rock mass failure and developing trend for prediction and forecast of groundwater inrush[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(2): 268-277.
- [ 98 ] 姜福兴, 叶根喜, 王存文, 张党育, 关永强. 高精度微震监测技术在煤矿突水监测中的应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(9): 1932-1938. JIANG Fuxing, YE Genxi, WANG Cunwen, ZHANG Danguyu, GUAN Yongqiang. Application of high-precision microseismic monitoring technique to water inrush monitoring in coal mine[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(9): 1932-1938.
- [ 99 ] 徐佩芬, 李传金, 凌甦群, 张胤彬, 侯超, 孙勇军. 利用微动勘察方法探测煤矿陷落柱[J]. *地球物理学报*, 2009, 52(7): 1923-1930. XU Peifen, LI Chuanjin, LING Suqun, ZHANG Yinbin, HOU Chao, SUN Yongjun. Mapping collapsed columns in coal mines utilizing microtremor survey methods[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(7): 1923-1930.
- [ 100 ] 姜福兴, 刘伟建, 叶根喜, 李伟. 构造活化的微震监测与数值模拟耦合研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(2): 3590-3597. JIANG Fuxing, LIU Weijian, YE Genxi, LI Wei. Coupling study of microseismic monitoring and numerical simulation for tectonic activation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(2): 3590-3597.

## Study and prospect of karst collapse columns and their water inrush in the coalfield of North China

XU Guangquan<sup>1</sup>, ZHANG Haitao<sup>1</sup>, ZHOU Jisheng<sup>2</sup>, LI Xu<sup>1</sup>, WANG Minhua<sup>2</sup>, LIU Mancai<sup>2</sup>

(1. School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China;

2. Huainan Mining (Group) Co., Ltd. Coal Branch, Huainan, Anhui 232001, China)

**Abstract** Karst collapse columns (KCCs) are formed in the process of geological evolution in North China coalfield. Their roots are developed in the Ordovician or Cambrian carbonate rocks, and pass upward through Carboniferous, Permian, Triassic strata, and even enter the Jurassic, Cretaceous and Quaternary loose rock strata. Over the past 80 years, more than 10,000 mines have been exposed in 39 mining areas in the coalfields of North China, resulting in more than 20 major water inrush accidents. Therefore, the study on KCCs is of important theoretical and practical significance for the systematic understanding of karst hydrogeological conditions of mines in North China and of prevention and control of karst water disaster as well.

This study systematically summarized the spatial distribution characteristics of KCCs in the coalfields of North China, mainly focusing the areas along the Fenhe river, the western foothills of Taihang mountain, the foothills of eastern and southeastern Taihang mountain, the foothills of southern Yanshan mountain, and the west side of the Tanlu fault zone. The plane shapes of KCCs are mostly circular and elliptical, and their cross-sections are mainly cone-shaped. KCCs are usually filled and cemented by broken debris of wall rock and secondary minerals, so most of the collapsed columns in the coalfields do not conduct (contain) water, and only few cases of water inrush occur there. KCCs usually form in such basic conditions as soluble rocks and special stratigraphic structures, multi-stage and multi-source fluid erosiveness, geological tectonic evolution, and paleokarst groundwater flow. Five theories on the genesis mechanism have been put forward, namely “karst gravity collapse”, “gypsum dissolution collapse”, “vacuum absorption collapse”, “hydrothermal origin” and “groundwater internal circulation”.

According to the current research on the formation and evolution of KCCs in the Huainan coalfield in the southern margin of North China, this study shows that consisting of Ordovician or Cambrian carbonate rocks, KCCs move through fluid migration channels of faults and fractures generated by multi-stage tectonic movements in this area, and are accommodated with the paleokarst formed by dissolution in the carbonate rocks. After a long-term process of dissolution, transportation, and collapse, KCCs are finally formed with the joint effect of the self-gravity of the rock mass, the in-situ stress, and the vacuum negative pressure in the cave. The formation of KCCs is related to the multi-stage tectonic movements in Mesozoic, and the Yanshan movement might be the key stage of its formation and development.

In this study, the water inrush mechanism of KCCs in the mining process is reviewed from the aspects of mining-induced water inrush mechanism, seepage transformation mechanism, and water inrush model. Four modes of water inrush of KCCs in working face or roadway, as well as the mechanical mechanism and seepage transformation mechanism of water inrush are analyzed, and the reasons for the sudden and hysteresis of water inrush are also explained. The technical route for KCC detection and prevention are determined by geophysical prospecting, geochemical prospecting, roadway prospecting, drilling, and hydrogeological conditions.

At present, the prevention and control of KCC water disaster is mainly carried out from two aspects, exploration and treatment. In terms of exploration, several methods can be used. The technology of three-dimensional seismic exploration can be adopted to preliminarily determine the impacted area of collapse columns. The comprehensive geophysical method can be used to detect the water-bearing area of KCCs. The exact location, shape and hydrogeological characteristics of KCCs can be determined by methods of drilling, the test of pumping (draining)



water, geochemical exploration and others. In terms of treatment, two methods can be mainly adopted, water-proof coal (rock) pillar retention and grouting reinforcement/water blocking to cut off the hydraulic connection between the KCCs water channel and the water inrush source. This technology has been successfully applied in the treatment of KCCs in the mining areas subject to karst water disaster such as Hebei and Anhui.

As to the research gap and deficiency in the prevention of water disaster caused by KCCs, the following suggestions are put forward,

(1) Under the guidance of earth system science, the study on evolution of KCCs can be conducted combined with the formation mechanism of KCCs. Meanwhile, a multidisciplinary method involving petrology, structural geology, hydrology, geomorphology, karst hydrogeology, GIS, RS, and others can also be applied based on the time axis of evolution of regional geological structure.

(2) For the precise detection, data and interpretation of small hidden collapse columns, efforts should be made to perfect the basic theory of full-space physics, to develop new equipment, new technologies and new methods, to further improve the precision, resolution, anti-interference competence of geophysical exploration, and to increase the detection depth.

(3) Research on the KCCs model of “dynamic monitoring-prediction model-water inrush mechanism” should be conducted. Firstly, a dynamic monitoring system to obtain parameters such as stress, deformation, acoustic emission, rupture (wave velocity), water pressure (position), water chemistry, and water temperature during the water inrush process of KCCs can be established, and an indicator monitoring instrument of stable multi-parameter can be developed. Secondly, with the help of big data and data processing technology of cloud platform, a multi-parameter integrated water inrush prediction model of KCCs can be established based on the dynamic monitoring system characterized by information transmission and the existing water-rock coupling numerical model.

(4) The prevention and control technology system of KCCs water disaster should be established and improved. This system will mainly include the technical subsystem such as basic theoretical research on KCCs formation, exploration of KCC basic characteristics, prevention, management and emergency planing of KCC water disaster. In short, the establishment of the system is of important theoretical and practical significance for the research of KCCs and water disaster control.

**Key words** karst collapse column, formation mechanism, water inrush mechanism, prevention and control of water disaster, the coalfield of North China

(编辑 黄晨晖)