

山西省煤田区陷落柱分布规律与成因模式

彭纪超,张渝,胡社荣

中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院,北京 100083

摘要 通过搜集山西省煤田区陷落柱发育资料,绘制山西省煤田区陷落柱发育分布图,结合华北山西断块煤田地质与水文地质特征和陷落柱形成条件,得出山西陷落柱分布规律为:1) 主要发育在盆地边缘,如大同盆地北缘和沁水盆地边缘;2) 河流和岩溶泉水发育的地区,陷落柱更为发育,如太原西山、霍州和阳泉地区;3) 沿新生代伸展构造山西地堑发育。根据山西省区域构造演化和陷落柱的形成条件分析得出,山西省陷落柱形成受到构造运动的控制,其构造条件为“两升两反”:在构造运动上升期间,岩溶发育,陷落柱形成方式以热液溶蚀、真空塌陷和重力塌陷为主;在构造反转期间,上覆岩层稳定性被破坏,陷落柱形成方式以重力塌陷叠加循环塌陷为主。

关键词 山西省;煤田区;陷落柱;构造条件

中图分类号 TD163

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.11.002

Distribution of the collapse columns in coal fields of Shanxi Province and its genetic models

PENG Jichao, ZHANG Yu, HU Sherong

College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China

Abstract By collecting massive amount of data from local coal fields in Shanxi Province, a map of the distribution of the collapse columns in this area is generated. The distribution of the collapse columns is discussed combined with the data of coal geology and hydrogeology, as well as the formation condition of the collapse columns. The collapse columns are mainly developed in such areas: 1) near the margin of the basin, such as Datong basin and Qinshui basin; 2) the area with river and karst spring, for instance, Xishan of Taiyuan, Huozhou and Yangquan areas; 3) the area along the Shanxi graben system. According to the tectonic evolution and the formation condition of the collapse columns in Shanxi Province, the following conclusions are made. The formation of the collapse columns is controlled by the tectonic movement and its tectonic condition which is “Two uplift-Two tectonic inversion”. During the uplift, the karst well development and the formation mechanism of the collapse columns are combined with the hydrothermal dissolution, the vacuum corrosion and the gravitational collapse. During the tectonic inversion, the stability of the layer above the karst is destroyed and the formation mechanism of the collapse columns is combined with the gravitational collapse and the circulation collapse. This study may help discover the distribution law of the collapse columns in deeper layers, and has the theoretical and practical significance concerning the coal mine safety and effectiveness.

Keywords Shanxi Province; coal fields; collapse column; tectonic condition

岩溶陷落柱是中国华北地区特有的岩溶地质现象,主要分布在山西、河北、河南、陕西、山东、江苏、安徽等20多个煤

田中^[1]。2004年统计发现华北有陷落柱45处,总数接近3000处^[2]。2005年华北陷落柱已经超过3650个^[3]。彭纪超等^[4]根

收稿日期:2015-02-10;修回日期:2015-04-21

作者简介:彭纪超,博士研究生,研究方向为煤田地质与构造,电子邮箱:pjc811469@163.com

引用格式:彭纪超,张渝,胡社荣.山西省煤田区陷落柱分布规律与成因模式[J].科技导报,2015,33(11):17-22.

据不完全统计,指出陷落柱数量远超出以上数字,仅山西省煤田区就揭露了3571个。目前,陷落柱分布规律研究主要针对整个华北地区^[5-8],或者山西省某一矿区^[9,10],很少有专门研究山西省陷落柱发育规律^[4,11]。目前,山西省煤田区陷落柱分布规律仍引用王锐^[12]的观点:1)沿汾河沿岸;2)太行山西坡带,以阳泉最多。

岩溶陷落柱对煤矿产生的影响主要表现为破坏煤系地层,降低煤炭资源储量;巷道掘进通过或绕过陷落柱,使采煤成本增加,最严重的是连通含水层,导致矿井突水事故,直接威胁采矿人员生命安全。随着采煤深度的逐渐增加,陷落柱发育密度增大^[13],矿井受奥灰承压水的威胁也日益增加。因此,根据最新资料,对山西省陷落柱分布规律再次研究,对认识华北区陷落柱发育规律和煤炭资源安全开采具有重要的理论意义与实践意义。

通过大量新地质资料搜集和实地调查,目前山西9大矿区揭露了129处,共9223个岩溶陷落柱(表1^[3,4,14-24])。山西省煤田区陷落柱分布图显示,大同盆地北缘桑干河流域,沁水盆地腹部沁源地区同样有大量陷落柱分布。本文拟结合山西省区域构造历史,综合多种陷落柱成因机制和陷落柱分布特征,提出山西省煤田区陷落柱的成因模式。

表1 山西省煤田区陷落柱揭露数量

Table 1 Numbers of the collapse columns in coal fields of Shanxi Province

矿区	发育矿区数	陷落柱数量
大同	7	93
宁武	9	49
西山	14	3391
汾西	14	1626
霍州	21	1135
阳泉	20	1917
潞安	19	371
晋城	19	591
河东	6	50

1 陷落柱分布规律

通过搜集前人研究成果,结合山西省区域地质构造情况,绘制山西省煤田区陷落柱分布图(图1)。由图1可见,陷落柱发育分布在桑干河流域的大同和朔州,汾河流域的太原、霍州、临汾,沁水盆地边缘阳泉、长治、晋城及沁水盆地腹部沁源。此外,河东煤田也有零星分布。

通过分析,山西省煤田区陷落柱分布有以下3个特征:

1) 主要发育在盆地边缘。如大同矿区和宁武矿区发育了142个陷落柱,主要分布在大同盆地北缘。沁水盆地东缘的阳泉、长治和晋城矿区分别发育了岩溶陷落柱1917、371和591个。

相对盆地中心部位,盆地边缘为隆起区域并且有寒武奥

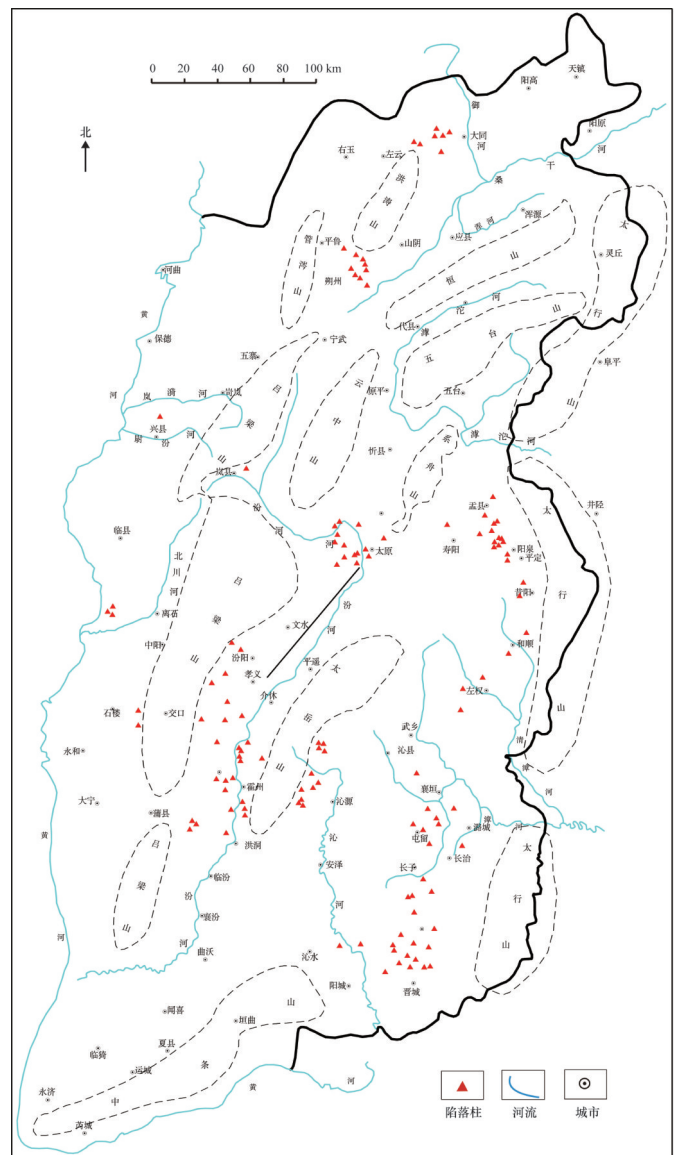


图1 山西省煤田区陷落柱分布

Fig. 1 Distribution map of collapse columns in coal fields of Shanxi

陶系灰岩出露地表,接受地表径流的溶蚀。地表径流通过溶蚀通道补给岩溶地下水,然后排向盆地中心。由于岩溶地下水的排泄补给条件较好,岩溶较为发育,为陷落柱的形成提供了塌陷空间。大同煤田各时代地层从北到南逐渐增厚。因此,盆地北部含煤地层厚度与寒武系灰岩距离较近,甚至不整合接触。

2) 岩溶泉水和河流发育的地区陷落柱发育程度高。如桑干河流域的大同矿区,汾河流域的太原西山矿区和霍州矿区娘子关泉域的阳泉矿区等。

有河流和岩溶泉水发育的区域,水源补给充足,排泄条件好,通常形成强径流带。这些区域,水动力条件好,岩溶基底更容易被溶蚀,塌陷物质也容易被掏空,能为陷落柱的继续发展提供塌陷空间。大同矿区属于神头泉域,霍州矿区属

于郭庄岩溶泉域,太原西山矿区属于兰村—晋祠岩溶泉域,阳泉地区陷落柱分布在娘子关岩溶泉域。这些矿区的陷落柱比较发育,尤其是太原西山地区,该地区的可溶岩层以过渡性岩层为主^[25],如白云质灰岩,灰质白云岩。过渡性碳酸盐的溶解速率相对成分较纯的碳酸盐较高。此外,太原西山地区地层中硬石膏比重大,石膏的溶解度比方解石、白云石大得多。岩溶地层的岩性特征也是太原西山岩溶陷落柱更为发育的因素。

3) 沿新生代伸展构造山西地堑发育。大同、朔州、太原西山、汾西和霍州等煤田陷落柱分布在山西地堑两侧(图2)。

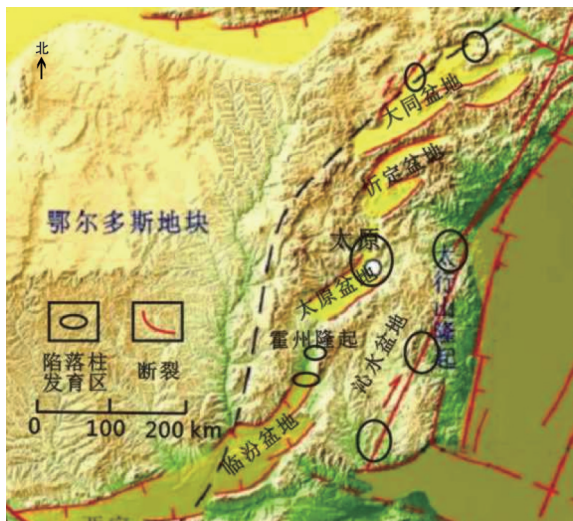


图2 山西新生代伸展盆地与陷落柱分布示意

Fig. 2 Cenozoic extensional basins and distribution of collapse columns in Shanxi

山西新生代由于构造应力改变,形成一系列地堑式伸展盆地。如太原盆地、大同盆地、临汾盆地。古近纪以来,由于印度板块对亚欧板块继续碰撞产生的东扩张效应与太平洋—库拉板块向东俯冲使山西地区应力场改变,由印支期燕山期的挤压应力转换为伸张应力,随着太行山的抬升,形成山西地堑系^[26]。由于应力方向与性质改变,煤系盖层在拉张应力作用下容易塌陷,为陷落柱的形成提供物质保障。

2 陷落柱成因模式

华北区大多数陷落柱都分布在山西省煤田区^[27],本文拟通过分析构造运动与区域构造活动史对陷落柱形成的作用,提出山西省陷落柱的成因模式。

陷落柱的形成通常是一个复杂的过程,需要同时具备3个条件:二元结构、活动并具侵蚀性的地下水和构造运动的作用。

1) 二元结构。存在厚层可溶性灰岩基底和易破碎的碎屑岩盖层。整个华北地区石炭—二叠纪碎屑岩地层直接不整合上覆于中奥陶统可溶灰岩上,具备了发育岩溶陷落柱的二元结构。

2) 活动并具侵蚀性的地下水。地下径流是形成溶洞的关键条件,控制了陷落柱的形成与发展。地下径流越强,对灰岩的溶蚀作用越强,地下水的不断溶蚀,溶洞也会连通,越来越大,为上覆地层塌陷提供空间。当溶洞被填满后,又被地下水冲刷,形成新的可塌陷空间,为陷落柱的继续发育提供保障。

3) 构造运动的作用。由于构造作用使地壳抬升,地下水下蚀作用增强,溶洞不断扩大,地下水位下降,会产生真空压力,对上覆岩层具有破坏作用。上覆岩层受到多次不同方向构造应力破坏,不断塌陷形成如今的岩溶陷落柱。

2.1 陷落柱形成的构造条件

山西省区域构造运动控制了陷落柱的形成与发展,其作用主要表现在为地下溶洞的生长提供有利条件,和破坏上覆地层稳定性为塌陷提供充填物质。根据陷落柱形成的基本条件与分布现状,结合区域构造历史,认为山西省岩溶陷落柱形成受到“两升两反”的构造条件控制。

1) “两升”。“两升”指加里东期和燕山期晚期两期地壳抬升,为岩溶的发育提供了条件。

第1期抬升为加里东期,整个华北地壳抬升导致中石炭统假整合于中奥陶统灰岩上。中奥陶统可溶性灰岩暴露地表长达1.4亿年,遭到风化剥蚀,奥陶系顶部准平原化,仅在陆表形成初始空洞,深部没有大型溶洞发育。解奕炜等^[25]曾提出奥陶系顶面除30 m左右的风化壳没有见到喀斯特地貌。加里东期为岩溶初次溶蚀,仅在地表形成少量岩溶溶洞。虽然暴露期岩溶不能保存或保存很少的岩溶洞穴,但对后期的岩溶发育有重要的控制作用^[28]。

第2期抬升为燕山运动中期(晚侏罗世—早白垩世),山西地块整体抬升遭受剥蚀并逐渐均夷而准平原化,形成65~95百万年的北台期夷平面^[26]。该时期是燕山运动高峰期,大量的岩浆活动,导致地下水温度增加,地下水的溶解饱和度增加,溶蚀灰岩的能力增强。地块抬升导致该区地下水下蚀作用增强,逐渐掏空深部灰岩,连通形成溶洞暗河,为岩溶陷落柱的发育提供了初始坍塌空间。同时,由于地下水下降,空腔内形成真空负压,致使上覆岩层坍塌。该期奥陶系灰岩开始了第二次新岩溶作用,也是华北地区岩溶陷落柱初始发育的时间。期间,在沁水盆地东缘阳泉、长治和晋城等地陷落柱开始发育。由于盆地边缘奥灰出露,属于局部埋藏岩溶,这种类型的岩溶是现今岩溶面貌的定型期,陷落柱是该期的典型标志^[28]。

2) “两反”。“两反”是指燕山早期和新近纪的两期构造反转使上覆岩层受到不同方向应力作用而破碎,尤其是中新世挤压应力转换为拉张应力,为陷落柱岩体塌陷和继续发展提供了动力保障。

第1期构造反转是在燕山早期。古太平洋—库拉板块向亚欧板块的俯冲,导致华北板块受到北西—南东向的挤压,华北地区构造方向由印支期的近东西向转变为北东向。该时期是华北地区第一个构造体制的转换时期(图3(a))。山

西地区的沉积构造开始产生分化,进入一个构造运动比较频繁的时期。上覆地层受到两期构造应力作用(印支期南北向,燕山期北西—南东向主压应力),岩层从2个方向(东西向和北东—北北东向)发生X型共轭破裂,重力的作用向下塌陷,形成陷落柱(重力塌陷说)。解奕炜等^[25]研究山西省西山煤田发现X型剪节理的中心部位,裂隙宽、岩层破碎,其溶蚀作用更强。多数陷落柱正是由X剪节理中心部位岩溶发育而成。但是由于奥陶纪(系)基底溶洞尚未发育完整,陷落柱还缺少发育的必要条件。

第2期构造反转是在喜山期(中新世)。新近纪中新世,印度板块与亚欧板块的持续汇聚,导致华北地区应力场改变,形成了华北地区构造的变形组合。太行山继续抬升,形成山西地堑系。山西地区从北西—南东向的挤压应力转换为北北西—南南东向拉张应力,这是山西地区第2期构造反转(图3(b))。挤压应力转换为张拉应力,使得岩层可以顺着前期形成的节理裂隙产生破坏,向下塌陷。同时,由于裂隙张开,还有利于地下水渗流。中新世以来,汾河和桑干河发育完成和岩溶泉域的作用下,山西地堑周缘,如太原西山、霍州、汾西、阳泉等地区的水动力条件丰富,为陷落柱的再发育提供了动力保障。该期继承了燕山期陷落柱初始塌陷继续发育,是山西地区陷落柱主要的发育时期^[28]。

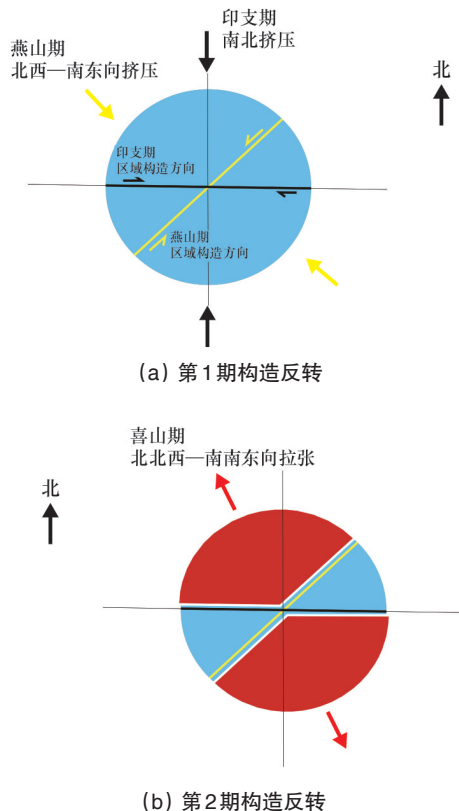


图3 山西省构造时期地层受力示意
Fig. 3 Stress diagram in stratum in different Tectonic periods

由上可得,山西省构造运动控制了岩溶陷落柱发育。第

1期构造抬升只是形成了初始溶洞,没有发育陷落柱的溶洞网络。第1期构造反转使上覆煤系地层受到挤压破碎,具备了形成陷落柱的物质条件,但由于溶洞不发育,塌陷空间有限,因此也不能形成岩溶陷落柱。第2期构造抬升导致岩溶空洞的发育,已经具备发育陷落柱的条件。山西地区岩溶陷落柱开始发育。资料显示,华北地区最早陷落柱形成于山西省平顺地区,形成时间为燕山运动之后^[12]。第2期构造反转期间,除了上覆地层的稳定性破坏,还有新生代山西地堑的形成、汾河和区域岩溶泉水的发育,这都是陷落柱形成的有利条件。因此,在第二次构造反转期间迎来了山西煤田区陷落柱形成的高峰。汾河流域的太原西山、霍州及晋城、阳泉等地的岩溶陷落柱大量发育^[29]。郭红玉^[30]通过铀系定年法研究测定了太原西山陷落柱形成时间为30~40万年前。

2.2 山西省煤田区陷落柱成因模式

至今,陷落柱的成因观点有膏溶塌陷说(钱学博)^[31]、循环塌陷说(王锐)^[12]、真空吸蚀说(徐卫国等)^[32]、热液成因说(陈尚平)^[33]和重力塌陷说(康彦仁)^[34]。膏溶塌陷说和热液成因说重点在解释岩溶溶洞的形成机制。重力塌陷说和真空吸蚀说重点在解释上覆盖层塌陷的力学机制。循环塌陷说强调陷落柱形成的过程具有阶段性。每一种成因学说都具有一定的针对性,同时也有一定的局限性。因此,通过综合各种学说解释陷落柱形成,有利于各种观点的融合与真正的成因模式的提出^[12,27,13-34]。

通过构造条件分析得到:山西煤田区陷落柱在第2期构造抬升期间,陷落柱才开始形成;第2期构造反转期间,陷落柱大量形成^[30]。因此,讨论山西煤田区岩溶陷落柱的成因模式主要针对这两个阶段。

第2期抬升发生在燕山晚期,岩浆活动比较频繁。如西山煤田西侧有岩浆侵入奥陶系、石炭系;马兰矿区还有侵入三叠系岩体。由于岩浆活动,增加了地下水温度,使地下水溶解度增加,加速了岩溶空洞的形成。此外,抬升还会产生真空压力,对上覆岩层产生吸附力。在重力的作用下,上覆被破坏岩层发生坍塌,形成陷落柱。因此,该期主要成因模式为热液溶蚀叠加真空吸附和重力塌陷作用。

第2期构造反转发生在新近纪。该期主要表现出区域应力性质的改变,使上覆岩层更容易塌陷。汾河和兰村—晋祠岩溶泉域的发育,形成了岩溶水系统,有利于陷落柱的再发育。该阶段成因模式为重力塌陷叠加循环塌陷作用。

山西省陷落柱发育经历了加里东期初次溶蚀,早燕山期初始发育,晚燕山期的再次溶蚀,喜山期的大量发育4个时期,最终形成了当今陷落柱格局。通过总结得到山西省陷落柱成因模式(表2)。

综上所述,构造条件不同,岩溶陷落柱的成因模式不同。山西省陷落柱成因模式可以归纳为:在构造运动上升期间,岩溶发育,陷落柱形成方式以热液溶蚀、真空塌陷和重力塌陷为主。在构造反转期间,上覆岩层稳定性被破坏,陷落柱形成方式以重力塌陷叠加循环塌陷为主。

表2 山西省陷落柱成因模式

Table 2 Formation mechanism of collapse columns in Shanxi Province

时期(构造条件)	岩溶发育特征	构造应力	陷落柱发育	形成方式
加里东(一升)	初次溶蚀	无	无	无
海西—印支期	停滞阶段	南北向挤压	无	无
燕山期早期(一反)	停滞阶段	北西—南东向挤压	无	无
燕山期晚期(两升)	再次溶蚀	北西—南东向挤压	初始发育	热液溶蚀+真空塌陷+重力塌陷
喜山期(两反)	继续发育	北北西—南南东拉张	大量发育	重力塌陷+循环塌陷

3 结论

1) 山西省岩溶陷落柱分布规律主要发育在盆地边缘,如大同盆地北缘,沁水盆地东缘。在岩溶泉水与河流发育区域,水动力较强,陷落柱发育程度高。沿新生代伸展构造山西地堑发育。

2) 山西省岩溶陷落柱发育的构造条件为“两升两反”。“两升”指加里东期和燕山期晚期两期地壳抬升,为岩溶的发育提供了条件。“两反”是指燕山早期和喜山期的两期构造反转使上覆岩层受到不同方向应力破碎,尤其是喜山期中新世挤压应力转换为拉张应力,为陷落柱上覆岩体塌陷和继续发展提供了物质保障。

3) 陷落柱的形成主要发生在“两升”和“两反”。在构造运动上升期间,岩溶发育,陷落柱形成方式以热液溶蚀、真空塌陷和重力塌陷为主。在构造反转期间,上覆岩层稳定性被破坏,陷落柱形成方式以重力塌陷叠加循环塌陷为主。

参考文献(References)

- [1] 李金凯,周万芳. 华北型煤床陷落柱突水水文地质环境及预测[J]. 煤矿安全, 1988, 7: 6-12.
Li Jinkai, Zhou Wanfang. The hydrogeological environment and predict of the water inrush of the collapse columns in Northern China coal field [J]. Safety in Coal Mines, 1988, 7: 6-12.
- [2] 赵苏启,武强,郭启文,等. 导水陷落柱突水淹井的综合治理技术[J]. 中国煤炭, 2004(7): 27-29.
Zhao Suqi, Wu Qiang, Guo Qiwen et al. Comprehensive control technologies of water bursting from water conducted collapsing pole[J]. China Coal, 2004(7): 27-29.
- [3] 贺可强,王滨,杜汝霖,等. 中国北方岩溶塌陷[M]. 北京:地质出版社, 2005: 152-182.
He Keqiang, Wang Bin, Du Rulin, et al. Karst collapse in North China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005: 152-182.
- [4] 彭纪超,刘海荣,孙利华,等. 山西省煤矿区陷落柱分布规律与突水预测研究[J]. 中国煤炭地质, 2010, 22(7): 26-30.
Peng Jichao, Liu Hairong, Sun Lihua, et al. A study on subsided column distribution pattern and water bursting prediction in Shanxi coal mines[J]. Coal Geology of China, 2010, 22(7): 26-30.
- [5] 申瑞屏,史桃桃,李永军. 岩溶陷落柱分布规律研究[J]. 有色金属: 矿山部分, 2014, 66(3): 37-40.
Shen Ruiping, Shi Taotao, Li Yongjun. Study on distribution of Karst collapse column[J]. Nonferrous Metals: Mining Section, 2014, 66(3): 37-40.
- [6] 张宝柱,陈振东. 华北型煤田岩溶陷落柱分布规律及其水文地质意义[J]. 阜新矿业学院学报:自然科学版, 1996, 15(3): 44-47.
Zhang Baozhu, Chen Zhendong. Distribution of karstic collapse columns of North-China type coal field and its hydrogeological significance[J]. Journal of Fuxin Mining Institute: Natural Science Edition, 1996, 15(3): 44-47.
- [7] 刘国林,黄万新,周文国,等. 华北型煤田岩溶陷落柱发育分布规律研究[J]. 河北建筑科技学院学报, 1997, 14(2): 29-32.
Liu Guolin, Huang Wanxin, Zhou Wenguo, et al. On the development and distribution rules of the subsidence columns in coalfields of North China[J]. Journal of Hebei Institute of Architectural Science and Technology, 1997, 14(2): 29-32.
- [8] 李永军,彭苏萍. 华北煤田岩溶陷落柱分类及其特征[J]. 煤田地质与勘探, 2006, 34(4): 53-57.
Li Yongjun, Peng Suping. Classifications and characteristics of Karst collapse columns in North China coalfields[J]. Coal Geology and Exploration, 2006, 34(4): 53-57.
- [9] 洪雷. 大同四台井田岩溶陷落柱发育规律的研究[J]. 矿业安全与环保, 2003(增1): 217-218.
Hong Lei. The study on the distribution rule of the development of the collapse columns in Sitai coal mine, Datong[J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2003(Suppl 1): 217-218.
- [10] 上官明磊,张玉贵,张子敏,等. 屯留矿陷落柱分布特征及成因探讨[J]. 煤, 2010, 5: 11-13.
Shangguan Minglei, Zhang Yugui, Zhang Zimin, et al. Collapse column distribution and genesis in Tunliu coalmine[J]. Coal, 2010, 5: 11-13.
- [11] 余丽. 山西地区陷落柱发育规律研究[J]. 煤炭技术, 2011, 30(10): 144-145.
Yu Li. Study on develop regulation of Karst collapse column in zone [J]. Coal Technology, 2011, 30(10): 144-145.
- [12] 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(1): 37-41.
Wang Rui. Discuss on the formation of the collapse columns in Northern China[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1982(1): 37-41.
- [13] 赵金贵. 西山煤田岩溶陷落柱形态学特征及构造水文演化[D]. 太原:太原理工大学, 2004.
Zhao Jingui. The morphology of collapse pillar forest in coal measure and structure-hydrology evolution in Xishan coalfield, Taiyuan, China [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2004.
- [14] 王彦仓,焦勇,汪剑,等. 浅谈沁水盆地郑庄区块陷落柱形成机理及

- 分布规律[J]. 中国石油勘探, 2010(2): 45-48.
- Wang Yancang, Jiao Yong, Wang Jian, et al. A preliminary study on genetic mechanism and distribution regularity of Zhengzhuang block collapse columns in Qinshui basin[J]. China Petroleum Exploration, 2010(2): 45-48.
- [15] 张书林, 张子敏, 王运革, 等. 潞安常村井田陷落柱分布规律与成因初探[J]. 河南理工大学学报: 自然科学版, 2011, 30(3): 283-287.
- Zhang Shulin, Zhang Zimin, Wang Yunge, et al. The research on spatial distribution and forming mechanism of karstic collapse columns at Changcun coal mine field of Lu'an[J]. Journal of Henan Polytechnic University: Natural Science Edition, 2011, 30(3): 283-287.
- [16] 李永军, 许海涛. 陷落柱发育规律及富水性特征分析[J]. 有色金属: 矿山部分, 2013, 65(2): 71-74.
- Li Yongjun, Xu Haitao. Analysis on development regularity and watery features of collapse column[J]. Nonferrous Metals: Mining Section, 2013, 65(2): 71-74.
- [17] 尹尚先, 虎维岳, 刘其声, 等. 承压含水层上采煤突水危险性评估研究[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(3): 311-315.
- Yin Shangxian, Hu Weiyue, Liu Qisheng, et al. Risk assessment for water inrush from confined aquifers located under coal seams[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 37(3): 311-315.
- [18] 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.
- [19] 史红霞. 潞安矿区岩溶陷落柱相关因素分析[J]. 煤, 2004(4): 52-53.
- Shi Hongxia. Study on rational supporting way in gob-side entry of fully-mechanized coal winning workplace[J]. Coal, 2004(4): 52-53.
- [20] 张敬凯. 山西曹村井田岩溶陷落柱发育规律研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2009.
- Zhang Jinkai. Regularity of Karstic collapse columns development in Caocun coal mine, Shanxi[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2009.
- [21] 文朝生, 宋改改. 对凤凰山井田陷落柱的探讨[J]. 煤, 2002(4): 50-51.
- Wen Chaosheng, Song Gaigai. Discuss on the collapse columns in the Fenghuangshan coal mine[J]. Coal, 2002(4): 50-51.
- [22] 刘晓晨. 山西团柏井田岩溶地下水涌水量的数值模拟及预测[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2009.
- Liu Xiaochen. Numerical simulation and prediction for the Tuanbai mine discharge of karst groundwater in Shanxi[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2009.
- [23] 张村, 屠世浩, 白庆升, 等. 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, et al. Stress changes around collapse column and the control technology by directly passing operation in longwall working face[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2014, 43(6): 974-980.
- [24] 李俊杰, 郭英海, 车灿辉, 等. 西山煤田古交矿区陷落柱特征及其导水性分析[J]. 中国煤炭地质, 2010, 22(4): 40-44.
- Li Junjie, Guo Yinghai, Che Canhui, et al. Subsided column features and water conductivity analysis in Gujiao mine area, Xishan coalfield [J]. Coal Geology of China, 2010, 22(4): 40-44.
- [25] 解奕炜, 李俊杰, 车灿辉. 西山煤田陷落柱形成之主控因素分析[J]. 中国煤炭, 2009, 10: 83-87.
- Xie Yiwei, Li Junjie, Che Canhui. An analysis of the decisive factors determining the formation of collapse columns in Xishan coal field[J]. China Coal, 2009, 10: 83-87.
- [26] 曹现志, 李三忠, 刘鑫, 等. 太行山东麓断裂带板内构造地貌反转与机制[J]. 地学前缘, 2013, 20(4): 88-103.
- Cao Xianzhi, Li Sanzhong, Liu Xin, et al. The intraplate morphotectonic inversion along the Eastern Taihang mountain fault zone, North China and its mechanism[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(4): 88-103.
- [27] 尹尚先, 吴文金, 李永军, 等. 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, et al. Study on the collapse columns and its water inrush in Northern China coal field[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2008.
- [28] 李定龙. 华北地区奥陶系灰岩岩溶研究的几点思考[J]. 世界地质, 1997, 16(1): 35-37.
- Li Dinglong. Several thinkings on ordovician limestone karst study in area of North China[J]. World Geology, 1997, 16(1): 35-37.
- [29] 秦福锋, 刘柱, 郭洪良. 华北型煤田岩溶陷落柱综合探测和分布规律特征[J]. 价值工程, 2014, 30: 94-95.
- Qin Fufeng, Liu Zhu, Guo Hongliang. Karstic collapse column integrated detection and distribution in North China type coalfields[J]. Value Engineering, 2014, 30: 94-95.
- [30] 郭红玉. 太原西山岩溶陷落柱发育时间研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2004.
- Guo Hongyu. Dating the development of collapse pillars in coal measure in Taiyuan Xishan[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2004.
- [31] 钱学博. 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): 70-74.
- Qian Xuebo. The formation of gypsum Karst collapse-column and its hydrogeological significance[J]. Carsologica Sinica, 1988, 7(4): 70-74.
- [32] 徐卫国, 赵桂荣. 华北煤田岩溶陷落柱形成机理与突水的探讨[J]. 水文地质工程地质, 1990(6): 41-43.
- Xu Weiguo, Zhao Guirong. The discuss on the formation mechanism and water inrush of the collapse columns in Northern China coal fields [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1990(6): 41-43.
- [33] 陈尚平. 河北峰峰地区岩溶陷落柱成因探讨[J]. 中国岩溶, 1993, 12(3): 52-63.
- Chen Shangping. A discussion on the genesis of Karst collapse columns in Fengfeng area, Hebei Province[J]. Carsologica Sinica, 1993, 12(3): 52-63.
- [34] 康彦仁. 论岩溶塌陷形成的致塌模式[J]. 水文地质工程地质, 1992(4): 32-34.
- Kang Yanren. Collapse-causing models in Karstic collapse process[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1992(4): 32-34.

(责任编辑 王媛媛)