

西山煤田岩溶陷落柱柱壁角特征研究及其意义

赵金贵¹, 王江玮¹, 杨高峰², 郭敏泰¹

(1. 太原理工大学 矿业工程学院, 山西 太原 030024; 2. 山西焦煤集团, 山西 太原 030024)

摘要:【意义】随着采掘向深部延伸, 岩溶陷落柱已成为华北煤田矿井开采最隐蔽的致灾地质因素之一。柱壁角是描述陷落柱形态特征的重要指标之一。【方法和结果】以西山煤田上下煤层综采均切割过的265个岩溶陷落柱为数据源, 通过分区、统计、函数构建、地质类比, 挖掘西山煤田岩溶陷落柱柱壁角中蕴藏的地质信息, 获得如下认识: (1) 西山煤田陷落柱平均柱壁角为84.29°, 超50%的陷落柱柱壁角在85°~90°, 平均柱壁角自西北到东南逐渐增大, 从82.05°增大到87.57°。(2) 西山煤田陷落柱柱壁角与8号煤层揭露的陷落柱面积成反比, 依据柱壁角与陷落柱面积大小关系, 陷落柱划分为: 充分塌陷陷落柱(90°~85°)、次充分塌陷陷落柱(<85°~81°)、不充分塌陷陷落柱(<81°); 对应的2号煤层陷落柱面积分别为<556 m²、556~1 700 m²、>1 700 m², 等效半径为<13.3 m、13.3~23.3 m、>23.3 m; 对应的8号煤层陷落柱面积分别为<1 250 m²、1 250~2 750 m²、>2 750 m², 半径分别为<20 m、20~30 m、>30 m。充分塌陷陷落柱一般发育有柱顶空腔, 柱体结构较为松散, 可导通顶板裂隙水与柱顶空腔水, 以及底板承压奥灰水, 是西山煤田导水陷落柱的一种重要类型。【结论】类比地质历史时期降雨量结果显示, 具有“北柱南相”的西山煤田岩溶陷落柱, 可能形成于气候湿热的古近纪渐新世时期, 强烈的岩溶作用吸收了大气中的CO₂, 并锁定在沉积区, 可能是导致全球大气CO₂含量急剧降低的重要原因。

关键词: 西山煤田; 岩溶陷落柱; 柱壁角; 充分塌陷陷落柱; 形成时间

中图分类号: TD166; P642.25

文献标志码: A

The characteristics of Karst Collapse Pillar Wall Angle and its significance in Xishan Coalfield

ZHAO Jingui¹, WANG Jiangwei¹, YANG Gaofeng², GUO Mintai¹

(1. College of mining engineering, Taiyuan University of technology, Taiyuan 030024, China;

2. Shanxi Coking Coal Group, Taiyuan 030024, China)

Abstract: With the extension of mining to the deep, karst collapse pillar has become one of the most hidden geological factors causing disaster in coal mining in North China. Pillar wall Angle is one of the important indexes to describe the morphological characteristics of collapsed pillars. Based on 265 karst collapse pillars cut by fully mechanized mining in upper and lower coal seams in Xishan coal field as data sources, the geological information contained in the wall corner of karst collapse pillars in Xishan coal field was excavated through zoning, statistics, function construction and geological analogy, and the following understanding was obtained: (1) The average pillar wall Angle of the collapse pillar in Xishan Coalfield is 82.49°, and the pillar wall Angle of over 50% of the collapse pillar is between 85 and 90°. The average pillar wall Angle increases gradually from northwest to southeast, from 82.05° to 87.57°. (2) The wall Angle of the collapse pillar in Xishan coal field is inversely proportional to the area of the collapse pillar revealed by No. 8 coal seam. According to the relationship between the wall Angle of the collapse pillar and the area of the collapse pillar, the collapse pillar can be divided into: full collapse pillar (90° ~ 85°), sub-full collapse pillar (85° ~ 81°) and inadequate collapse pillar (< 81°); The corresponding subsidence pillar area of No. 2 coal seam is less than 556 m², between 556 and 1700 m², and greater than 1700 m², and the equivalent radius is less than 13.3m, 13.3 m-23.3m, and greater than 23.3m. The corresponding collapse pillar area of No. 8 coal seam is less than 1250m², between 1250m² and 2750m², and greater than 2750m². The radius is less than 20m, between 20 and 30m, and greater than 30m. The fully collapsed collapse pillar is an important type of water-conducting collapse pillar in Xishan coal field, which generally has the top cavity and the top cavity cavity, and the pillar structure is relatively loose. (3) The rainfall results of the geological historical period show that the karst collapse pillar in the Xishan coalfield with "north pillar and south phase" may have formed in the Paleo-Oligocene period with hot and humid climate. The strong karst process absorbed atmospheric CO₂ and locked it in the sedimentary area, which may be an important reason for the sharp reduction of global atmospheric CO₂ content.

Keywords: Xishan Coalfield; Karst collapse pillar; pillar wall angle; full collapse pillar; formation time

收稿日期: 2024-03-13; 接收日期: 2024-07-12

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(42293352)

第一作者: 赵金贵, 1974年生, 男, 山西新绛人, 博士, 副教授, 从事煤系构造与岩溶陷落柱研究. E-mail: 22971865@qq.com

广泛分布于华北石炭-二叠及侏罗煤系的岩溶陷落柱,是集突水、瓦斯、构造于一体的复杂地质体^[1],迄今已发现数万个,尤以具隐蔽性、突发性、灾难性的突水导水陷落柱危害最大,单次损失达数千万至数十亿。在地下开采过程中,煤系岩溶陷落柱一直处于认不清、识不明、难预测,致使重大安全事故频发。由于岩溶陷落柱物探解译精确度不高、分布规律难寻、是否存在导水突水未知,导致矿井地质工作者始终处于疲惫应对状态。随着采掘向深部延伸,岩溶陷落柱业已成为华北煤田矿井开采最隐蔽致灾的地质因素之一。

煤系岩溶陷落柱是地质历史时期岩溶水系统形成演化的结果,岩溶记录与全球变化密切相关^[2-3]。陷落柱柱体形态中记录的地质历史时期地表环境变化信息,必定与全球地表岩溶过程一致。碳酸盐岩是地球上最大的碳库,碳循环与岩溶作用之间密切相关^[4],表层岩溶作用可回收大气CO₂^[5],进而形成碳汇^[6]。煤系岩溶陷落柱大规模形成与地质历史时期全球环境变化之间是否存在耦合关系?前提是必须界定煤系岩溶陷落柱的形成时间,有助于丰富和深化北方古岩溶,以及华北古环境演变的认知,亦可为地下开采过程中煤系岩溶陷落柱的预测、陷落柱形成演化机理的构建提供支撑。近年来,已从柱体组构次生矿物的年代记录^[7]、柱体岩块最大塌落距与表壳地貌剥蚀速率^[8-9]及岩溶形态等方面^[10-11],探索了陷落柱的形成时间,但陷落柱的形态特征中是否蕴含着其形成时间的信息?

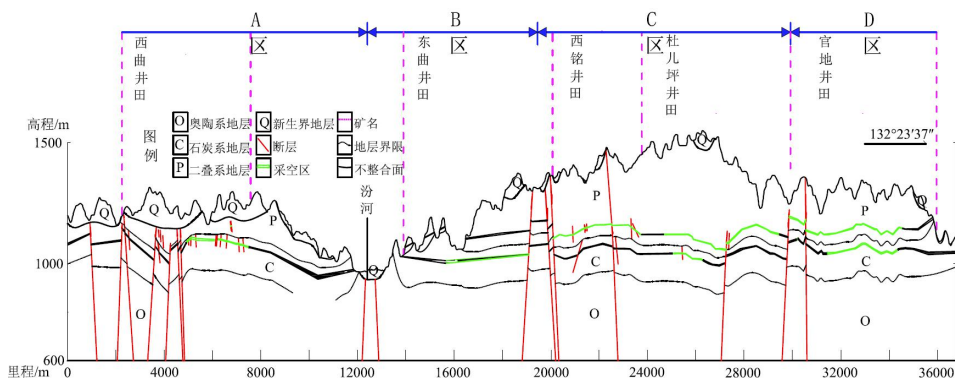
陷落柱柱壁角是刻画陷落柱形态特征的重要参数之一,是依据上组煤揭露的陷落柱形态,准确预测下组煤中陷落柱及柱根处溶洞的大小、计算陷落柱是否能够塌通到地表,进而形成注水“天窗”的关键。方法不同,获得陷落柱的柱壁角也不同,归纳起来,获取柱壁角的途径主要有4种,一种是直接测量野外及井下

揭露的陷落柱柱壁^[12],如在地表一些煤系上覆松散层中,岩溶陷落柱的剖面形状多呈不规则状,有时上大下小,柱壁角为-40°~-50°^[13],这种方法获得的结果往往是局部柱体的柱壁角。第二种是根据物探剖面或钻探剖面勾勒柱壁角^[14-15],但误差较大。第三种是根据上下煤组综采机切割过的陷落柱形态计算柱壁角^[12],如根据上下煤组揭露陷落柱计算的太原山西铭井田与阳泉新景矿区陷落柱柱壁角为82°~85°^[12,16],其特点是能够准确反映陷落柱整体的形态特征,但需要大量综采切割的陷落柱形态数据,才具有代表性。第四种是地质类比,如根据成因类似的岩溶天坑坑壁角类比,天坑的形成与岩溶陷落柱的形成类似,塌陷角近90°^[17];也可根据采煤沉陷塌陷角类比,但由于采煤沉陷区塌陷不充分,塌陷角往往呈上大下小的漏斗状^[18]。随着海量综采切割陷落柱地质数据的积累,运用第三种方法计算陷落柱柱壁角既准确,又方便,并能够展现陷落柱的整体形态特征。本文中的陷落柱柱壁角是指陷落柱柱体的平均柱壁角。笔者以西山煤田综采切割过上下煤组陷落柱的形态数据为依据,计算西山煤田岩溶陷落柱柱壁角,挖掘柱壁角中蕴含的地质信息。

1 地质概况

西山煤田位于吕梁山东麓、晋中盆地西北缘,南北长约75 km,东西宽约20~50 km,最高高程2 202 m,最低高程750 m。西山煤田赋存的地层有C-P煤系、∈-O灰岩、T及N、Q盖层。其中含煤20层,主采上组2、3号煤,下组8、9号煤。煤层最大埋深1 500 m,一般在400~1 000 m。

选择西山煤田上下煤组综采全切割过的265个陷落柱揭露面积、煤层间距、煤层倾角、空间位置等为数据源,按照柱壁角计算方法,计算西山煤田柱壁角,分析陷落柱柱壁角在空间上的变化特征。



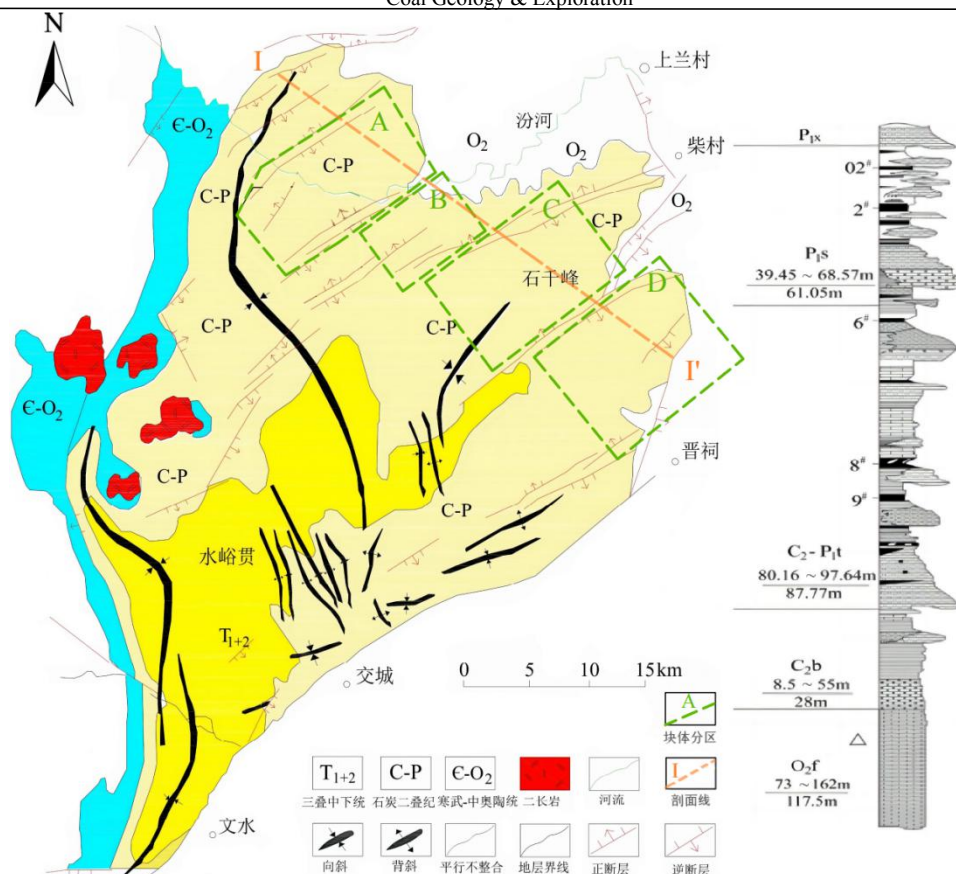


图1 西山煤田地质图与煤系剖面图和柱状图

Fig.1 Geological map and coal measure pillar map and section map of Xishan coalfield

2 方法

在上下组煤层采掘工程平面图上, 综采全切割过的同一个陷落柱的形心为柱心, 上下煤层揭露陷落柱面积的等面积圆组成圆台的顶底面, 上下组煤层柱心之间连线的距离为圆台高度, 在通过柱体中心轴的垂向剖面上, 柱壁线与水平线之间朝向柱心的夹角, 即为陷落柱柱壁角。具体柱壁角计算方法: 将陷落柱在煤层中的揭露面积换算为等面积圆(S), 其半径为 R , 其中2号煤层中陷落柱等效半径为 R_2 , 8号煤层陷落柱等效半径为 R_8 。2号煤层到8号煤层之间柱体高度为 h (为上下组煤层底板等高线上柱心处的高程差), 通过下式(1)计算陷落柱柱壁角 α 。

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{h}{R_8 - R_2} \quad (1)$$

以断距大于30 m的断层将西山煤田分割成4个地质块体(图1), 分块计算与统计陷落柱柱壁角, 其中A块体位于红岩村断层与古交断层之间, 陷落柱个数有98个($n=98$), 其中镇城底矿35个、西曲矿57个、屯兰矿6个。B块体位于古交断层与王封断层之间, 陷落柱个数 $n=60$, 均位于东曲矿。C块体位于王封断层与杜儿坪断层之间, 陷落柱个数 $n=88$, 其中西铭矿13个、

杜儿坪矿75个。D块体位于杜儿坪断层与碾底断层之间, 陷落柱个数 $n=19$, 均采自白家庄矿。

3 结果

统计结果显示, 西山煤田陷落柱平均柱壁角为 84.29° , 不同地质块体中发育的陷落柱平均柱壁角不同(表1), 自西北至东南(图1), 柱壁角逐渐增大, 自 82.05° 逐渐增大到 87.57° 。西山煤田西北部接近岩溶水系统的补给区, 东南部为岩溶水系统的径流区, 随着远离补给区, 陷落柱平均柱壁角逐渐增大, 呈现出规律性变化。

表1 柱壁角分地质块体统计特征

Table 1 Statistical characteristics of geological blocks by collapse pillar wall angle

柱壁角/ $^\circ$	各地质块体不同柱壁角区间陷落柱占比/%				
	全部($n=265$)	A($n=98$)	B($n=60$)	C($n=88$)	D($n=19$)
0~75	3	6	2	1	0
>75~80	13	24	8	8	0
>80~85	32	47	15	32	15
>85~90	52	24	75	59	85
平均柱壁角/ $^\circ$					
	84.29	82.05	85.7	85.14	87.57

是哪些因素控制着柱壁角在空间上的规律性变化? 在寻找诸如断层、褶皱、陷落柱形态等众多参数与柱壁角关系的过程中, 未发现地层构造产状要素与陷落柱柱壁角大小之间存在函数关系, 也未发现上下

煤组陷落柱层间高度与柱壁角之间存在函数关系。但发现8号煤层揭露陷落柱面积与柱壁角的大小之间呈线性负相关关系(图2), 显著性为 $P=0.00$ 。

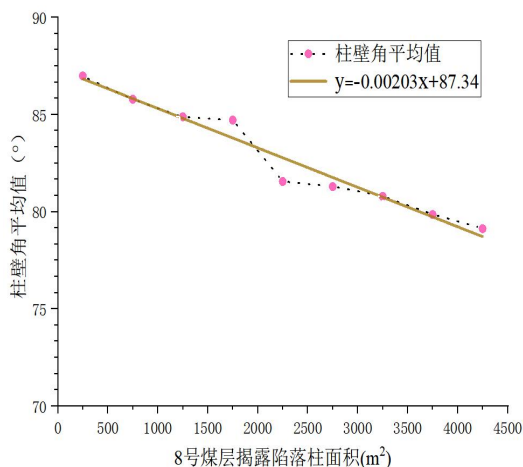


图2 8号煤层揭露陷落柱面积与柱壁角之间的关系

Fig.2 No. 8 coal seam reveals the relationship between the area of the collapse pillar and the Angle of the collapse wall

4 讨论

导致陷落柱形成的煤系基底溶洞所在部位, 即为陷落柱柱根。西山煤田陷落柱平均柱壁角自NW至SE逐渐增大, 8号煤层揭露的陷落柱面积与柱壁角之间呈线性负相关关系, 是否预示着陷落柱柱壁角与柱根处溶洞的塌陷程度有关?

4.1 柱壁角与塌陷程度关系

煤系岩溶陷落柱是煤系下伏大跨度溶洞垮落所致, 煤层中揭露陷落柱面积越大, 形成陷落柱时, 柱根处的溶洞规模也应越大, 那么, 能够导致充分塌陷的煤系基底溶洞大小的阈值是多少? 与哪些因素有关? 8号煤层揭露陷落柱面积与柱壁角之间存在负相关关系表明, 陷落柱柱根处的溶洞跨度越大, 柱壁角反而越小, 二者成反比(图2), 推断煤系基底溶洞随着跨度的增大, 对应的容纳空间却不足以容纳上覆地层中的塌落物, 致使陷落柱处于塌陷不充分状态, 即柱壁角与塌陷程度正相关。因此, 可依据柱壁角大小与陷落柱塌陷面积之间的关系, 将陷落柱划分为三种类型。第一种类型: 柱壁角大于 85° , 当揭露陷落柱面积(8号煤层)小于 1250 m^2 时, 陷落柱处于充分塌陷状态, 称

之为“充分塌陷陷落柱”; 第二种类型: 柱壁角在 $85^\circ\sim 81^\circ$, 对应的8号煤层揭露陷落柱面积在 $1250\sim 2750\text{ m}^2$ 时, 陷落柱处于次充分塌陷状态, 称之为“次充分塌陷陷落柱”; 第三种类型: 柱壁角小于 81° , 对应的8号煤层揭露陷落柱面积大于 2750 m^2 时, 陷落柱处于不充分塌陷状态, 称之为“不充分塌陷陷落柱”。由柱壁角大小空间分布结果显示(表1), 靠近岩溶水系统补给区的A块体陷落柱多为次充分塌陷陷落柱, 充分与次充分塌陷陷落柱占比71%; B块体陷落柱多为充分塌陷陷落柱, 充分与次充分塌陷陷落柱占比90%; C块体的陷落柱多为充分塌陷陷落柱, 充分与次充分塌陷陷落柱占比91%; D块体的陷落柱全部为充分及次充分塌陷陷落柱, 占比100%。

陷落柱的柱根大小, 代表陷落柱形成时的溶洞大小, 西山煤田小回沟井田煤系三维地震勘探再解译的结果表明, 奥陶系中统两大石膏带是三维地震深部解译的标志层, 地震波特征显示这是柱根所在层位。第一泥灰岩石膏带位于峰峰组下段, 第二泥灰岩石膏带位于上马家沟组下段。太原西山玉门沟、平顺赵城及恒山陷落柱的野外观测表明, 柱根所在层位处于上马家沟组下段石膏带所赋存的泥灰岩中。因此, 以陷落柱的柱根位于奥陶系中统上马家沟组下段计算陷落柱柱根处溶洞面积的大小。

在太原西山煤田, 已揭露陷落柱的2号和8号煤层底板高程差的平均值为 76.91 m , 8号煤层底部与奥陶系中统上马家沟组下段底部的平均厚度为 443 m 。以 76.91 m 作为2号煤层与8号煤层底板之间平均厚度, 以 443 m 作为8号煤层与陷落柱柱根处之间平均厚度, 可依据2号煤层或8号煤层揭露的陷落柱面积, 以及对应的陷落柱的柱壁角(图2), 推算出其他层面陷落柱的面积。具体推算结果见表2。

充分塌陷陷落柱一般发育有柱顶空腔, 柱体结构较为松散, 是西山煤田导水陷落柱的一种重要类型, 如马兰矿区的28301、18306工作面、辽源矿区8105工作面、杜儿坪矿68309、68303、72907工作面上揭露的导水陷落柱均属于此类, 可导通顶板裂隙水与柱顶空腔水, 以及底板承压奥灰水。

表2 陷落柱类型划分及对应的参数

Table 2 Layer area corresponding to the type of collapsed pillar

陷落柱类型	柱壁角大小/(°)	2号煤层揭露陷落柱面积/m ²	2号煤层揭露陷落柱半径/m	8号煤层揭露陷落柱面积/m ²	8号煤层揭露陷落柱半径/m	柱根处溶洞面积/m ²	柱根处溶洞半径/m
充分塌陷	>85	<556	<13.3	<1250	<20	<10 862	<58.8
次充分塌陷	81~85	556~1 700	13.3~23.3	1250~2 750	20~30	10 862~14 870	58.8~68.8
不充分塌陷	<81	>1 700	>23.3	>2 750	>30	>14 870	>68.8

基底溶洞的容纳空间是由溶蚀量决定，溶蚀量由径流量决定，径流量主要由降雨量决定，即充分塌陷陷落柱基底溶洞大小与陷落柱形成时的降雨量密切相关，与天坑的形成过程类似^[17]，那么，是否可借助现阶段世界上发现的岩溶天坑大小及其形成时的降雨量大小，依据充分塌陷陷落柱柱根处溶洞大小，推算岩溶陷落柱形成的降雨量大小，进而推理岩溶陷落柱形成的时间？

4.2 陷落柱形成时的降雨量分析

天坑是出露地表，位于湿润热带、亚热带岩溶地貌区、岩溶洞穴充分塌陷的产物。近年来，世界岩溶天坑、岩溶水系统的研究与探测成果，可为深入认知岩溶陷落柱形成演化过程提供有益的借鉴。华北煤系岩溶陷落柱在成因上与南方岩溶天坑具有可比性，它们的相似处主要表现为：均为巨厚的可溶岩在岩溶水系统发育下陷落形成，都是可溶岩与水的相互作用，都是侵蚀基准以上地球表壳构造-地貌演化的产物。但二者又有区别，主要不同点为：地层结构、水岩作用方式、形成环境、蕴含的信息量、显现方式、危害程度、形成时间。岩溶天坑是由以灰岩单层结构地质体组成的白箱模型；而陷落柱则是由可溶岩与煤系和盖层组成的“三明治结构”的黑箱至灰箱模型。北方煤系下伏岩溶水系统以隐伏盖层下的水岩作用为主，南方的岩溶作用兼有地表与地下双向水岩相互作用。南方岩溶天坑及落水洞中的充填物已被地下河带走荡然无存，而北方岩溶陷落柱中还保留着地表已被剥蚀了的地层信息，即柱体中保留有地表过程信息。南方岩溶天坑可以进入观测探究，而北方煤系岩溶陷落柱则隐蔽在地质体中，具有隐蔽性，多处于隐伏状态，仅能观测到局部。煤系岩溶陷落柱在煤炭生产过程中“有害而无一利”，而南方的岩溶天坑及洞穴则成为旅游探险观赏的景区。

降雨量的大小是决定岩溶溶蚀量的关键指标。对地处北纬 24°、现阶段年均降水量 1 400 mm、充分塌陷的 14 个广西乐业天坑群的统计结果显示，平均底部面积为 22 469 m²，根据口径面积与底部面积及天坑深

度^[17]，推算天坑的平均塌陷角为钝角，约为 93°。南方岩溶区具有浅层岩溶水循环与地下管道流水循环耦合的二重岩溶水循环的结构特征，由于受到地表岩溶作用，柱壁角多大于 90°。乐业充分塌陷天坑群底部面积是西山煤田充分塌陷陷落柱柱根面积的 2 倍左右，但西山煤田揭露单位面积内陷落柱的数量远远大于乐业天坑群及其他地方天坑群单位面积内的数量。迄今发现最北的天坑群位于陕西汉中禅家岩，天坑坑口的投影面积在 5 000~50 000 m²^[31]，位于北纬 33°左右，年均降水量为 1 043.6 mm。800 mm 的年平均降雨量是天坑形成时的最低的门槛值，各大天坑所处位置现阶段的年均降雨水量，多在 1 200~1 900 mm^[17]。J. Szczygie 等^[19]研究表明重庆武隆天坑是在 1.2~0.5 Ma 间连通形成的岩溶天坑。F. Gabrovec 等^[20]运用二维裂隙网络遗传模型计算潜水区岩溶塌陷，结果表明 100 万年的时间，就能形成 200 m×200 m 面积的岩溶天坑。天坑是地质历史时期岩溶水系统演化的产物，其形成时的降雨量，远比现在要大^[19]，因此，可认为华北煤系岩溶陷落柱形成时的年均降雨量处于 800~1 400 mm 之间。那么，是否可依据地质历史时期华北克拉通年均降雨量的变化，类比陷落柱的形成时间？

4.3 陷落柱形成时间推断

从盆山耦合角度分析，在华北克拉通破坏过程中，华北克拉通中部煤田经历了两期岩溶水系统演化。古近纪初，随着吕梁山的隆升^[21]以及太行山前断裂的形成^[22]，岩溶水系统补给区与排泄区灰岩地层的出露，以及地势高差的拉动，开启了华北大岩溶水补给-径流-排泄系统；新近纪末，随着吕梁山的进一步隆升^[23-24]，以及汾渭地堑的形成^[24]，裂解了华北大岩溶水系统，启动并发育了华北克拉通中部现今的岩溶水系统。从现阶段的认知上来看，煤系陷落柱形成的时间要远早于南方岩溶天坑形成的时间^[8-10,25]，因此，作为岩溶作用的产物，华北煤系岩溶陷落柱具有“北柱南相”特点，是地质历史时期强烈岩溶作用的产物。那么，在华北克拉通破坏过程的驱动下，陆表岩溶水系统在何时又如何响应并形成大规模的岩溶陷落柱？

依据白垩纪以来华北克拉通的古纬度、古气候变化，以及自白垩纪以来华北克拉通降雨量变化可知，

始新世华北克拉通古气候为干热^[26], 对应年均降雨量为900~1 200 mm; 渐新世华北克拉通古气候为湿热, 对应年均降雨量为1 000~1 200 mm; 中新世华北克拉通古气候为温带偏凉, 对应的年均降雨量500~800 mm, 上新世华北克拉通古气候为温带偏暖, 对应的年均降雨量700~800 mm^[26]。能够满足西山煤田岩溶陷落柱形成时的降雨量时段是在始新世和渐新世, 但始新世气候干热, 华北克拉通处于裂解的初始阶段, 地貌的分异度还不足以形成大规模的岩溶水系统。而渐新世就是钱学溥^[26]所说的太行期, 符合大规模岩溶陷落柱形成时的年均降雨量条件, 地貌分异程度也足以形成大规模的岩溶水系统。渐新世以较暖的全球平均温度, 较弱的纬向温度梯度为特征, GSMT(全球表面平均温度)估算结果显示: 古近纪渐新世期间地球表面的平均温度为22~24℃, 比现代温度高8℃, 高纬地区较暖, 此时, 太原西山古纬度在(36.8±4.7)°左右^[27], 降雨量在1 000~1 200 mm, 是华北煤系岩溶陷落柱形成的重要时段, 与依据表壳地貌剥蚀速率推测的陷落柱形成时间^[9], 以及根据岩溶漏斗中钻孔孢粉恢复的太行期岩溶漏斗形成时间相一致^[26]。

全球岩溶类型多样, 资源与环境问题突出, 是地球关键带监测与研究的重点, 各种岩溶形态与其形成环境之间具有因果关系, 岩溶记录与全球变化密切相关^[2,4]。我国是一个岩溶大国, 岩溶区面积约占国土面积的1/3, 岩溶动力作用强烈而且对环境变化具有敏感性。北方岩溶的一大特色, 是通过陷落柱柱体的形态与组构, 记录了地质历史时期地表环境的变化过程。大气CO₂浓度的降低是始新世-渐新世气候变化的重要原因, 一直是古气候研究的焦点之一^[28-29]。整个渐新世的大气CO₂含量从800~1 000 m³/kg下降到了700~600 m³/kg^[30], 至于是什么原因导致古近纪始新世-渐新世大气CO₂浓度的降低, 迄今还没有一套合理的理论解释。对比华北克拉通地质历史时期气候环境变化指标表明, 华北煤系岩溶陷落柱形成于气候湿热的古近纪渐新世时期, 强烈的岩溶作用, 吸收大气中的CO₂, 并锁定在沉积区, 可能是导致全球大气CO₂含量急剧降低的重要原因。

5 结论

(1) 西山煤田陷落柱平均柱壁角为84.29°, 超50%的柱壁角在85°~90°, 柱壁角自西北向东南逐渐增大, 从82.05°增大到87.57°。

(2) 陷落柱柱壁角 y 与8号煤层揭露面积 x 成反比, 符合函数关系: $y=-0.002\ 03x+87.34$, 即陷落柱面积越

大、柱壁角越小。根据柱壁角的大小, 可把陷落柱划分为充分塌陷陷落柱(90°~85°)、次充分塌陷陷落柱(<85°~81°)、不充分塌陷陷落柱(<81°) 3种类型。充分塌陷陷落柱是西山煤田导水陷落柱的一种重要类型, 可导通顶板裂隙水与柱顶空腔水, 以及底板承压奥灰水。

(3) 依据柱壁角推算的西山煤田煤系岩溶陷落柱柱根处溶洞大小, 与完全塌陷的南方岩溶天坑大小对比结果显示, 华北煤系岩溶陷落柱大规模形成于气候湿热的古近纪渐新世时期, 降雨量在1000~1200 mm, 强烈的岩溶作用, 吸收了大气中的CO₂, 并锁定在沉积区, 可能是导致全球大气CO₂含量急剧降低的重要原因。

参考文献(References)

- [1] 赵金贵, 郭敏泰, 李文生. 西山煤田岩溶陷落柱柱体形态与组构特征[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2389-2398.
ZHAO Jingui, GUO Mintai, LI Wensheng. Morphological and fabric characteristics of Karst collapse pillars in Xishan coalfield[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2389-2398.
- [2] 章程, 蒋忠诚, Chris Groves, 等. 岩溶 IGCP 国际合作 30 年与岩溶关键带研究展望[J]. 中国岩溶, 2019, 38(3): 301-306
Cheng Z. Karst IGCP International Cooperation and Perspectives of Karst Critical Zone Research[J]. Acta Geologica Sinica(English edition), 2019, 93(z2): 152-153.
- [3] 陈发虎, 傅伯杰, 夏军, 等. 近 70 年来中国自然地理与生存环境基础研究的重要进展与展望[J]. 中国科学: 地球科学, 2021, 49: 1659-1696.
Chen Fahu, Fu Bojie, Xia Jun, etc. Major advances in studies of the physical geography and living environment of China during the past 70 years and future prospects[J]. Science China Earth Sciences, 2021, 49: 1659-1696.
- [4] 袁道先. 岩溶作用对环境变化的敏感性及其记录[J]. 科学通报, 1995(13): 1210-1213.
Yuen Daoxin. Sensitivity of karstification to environmental change and its record[J]. Scientific Bulletin, 1995(13): 1210-1213.
- [5] 袁道先. 地质作用与碳循环研究的回顾和展望[J]. 科学通报, 2011, 56(26): 2157-2157.
Yuen Daoxin. Review and prospect of studies on geological processes and carbon cycling[J]. Scientific communication, 2011, 56(26): 2157-2157.
- [6] 刘文, 徐聪聪, 于令芹, 等. 不同地质背景下北方岩溶作用强度研究[J]. 中国岩溶, 2023, 42(5): 887-897.
Liu Wen, Xu Cong Cong, Yu Lingqin, etc. Study on karstification intensity in north China under different geological background [J]. China Karst, 2023, 42(5): 887-897.
- [7] 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 karst collapse pillar in coal measure, in Taiyuan Xishan by U-series [D]. Taiyuan University of technology, 2004.
- [8] 赵金贵, 郭敏泰. 太原东山大窑头煤系层间构造与岩溶陷落柱群发育模式[J]. 煤炭学报. 2013(11): 1999-2006.
Zhao Jingui, Guo Mintai. The interlayer structures and the karst collapse pillars style of the coal measure strata in Dayaotou village Eastern

- Mountain Taiyuan[J]. 2013, 38(11):1999-2006(8).
- [9]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(08): 1716-1724.
- ZhaoJin-gui, Guo Mintai. Discover and formation time of karst collapse pillar in Laomaling,Pingshun County[J]. Journal of China Coal Society, 2014,39(08): 1716-1724.
- [10]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(04):344-348.
- Qian Xuepu. Formation of gypsum Kras collapse pillar and its hydrogeological significance[J]. China Karst, 1988(04) : 344-348.
- [11] Wei C,Yue J, Li Z, et al. Comprehensive study on a collapse pillar in Kongzhuang coal mine[J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2009, 1(1):895-902.
- [12] 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. Morphological characteristics and tectonic hydrological evolution of karst collapse pillars in Xishan coalfield [D].Taiyuan: Taiyuan University of technology, 2004.
- [13]宁建宏,张广忠.陷落柱的地震识别技术及其应用[J].煤田地质与勘探, 2005,33(3): 64-67.
- Ning Jianhong, Zhang Guangzhong. Seismic identification technology of collapse pillars and its application[J]. Coalfield geology and exploration, 2005,33 (3): 64-67.
- [14]尹尚先,连会青,刘德民,等.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 , et al. 70 years of investigation on Karst collapse pillar in North ChinaCoalfield: cause of origin, mechanism and prevention [J] . Coal Science and Technology, 2019, 47(11):1—29.
- [15]赵永清.北徐楼煤矿陷落柱充水、导水性分析及防治[D].山东科技大学, 2006.
- Zhao Yongqing. Analysis and prevention of water filling and water conductivity of subsided pillar in Beixulou coal mine[D].Shandong University of Science and Technology, 2006.
- [16]李骏.阳泉新景煤矿构造叠加改造特征及其对煤体变形的控制[D].徐州: 中国矿业大学. 2016.
- Li Jun.The Structure Superposition-Transformation Characteristics and its Control of Coal Deformation in the Xinjing Coalmine, Yangquan[D].China University of mining and technology.2016.
- [17]朱学稳,黄保健,朱德浩,陈伟海.广西乐业大石围天坑群发现·探测·定义与研究[M].广西科学技术出版社, 2003.
- [18]赵金贵,岳科杉,李彦荣,等.韩咀煤矿 32101 工作面采动地裂缝走向与黄土地貌关系探讨[J].煤炭学报, 2021, 46(S02):898-906.
- Zhao Jingui,Yue Keshan,Li Yanrong, et al.Discussion on the relationship between mining-induced ground fractures strike and loess landform at 32101 face of Hanzui coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(S02):898-906.
- [19]Szczygieł J, Golicz M, HercMan H, et al. Geological constraints on cave development in the plateau-gorge karst of South China (Wulong, Chongqing)[J]. Geomorphology, 2017, 304:50-63.
- [20]Franci Gabrovšek, Uroš Stepišnik. On the forMation of collapse dolines: Amodelling perspective[J]. Geomorphology, 2011, 134(1-2):23-31.
- [21]赵俊峰, 刘池洋, Nigel MOUNTNEY,等. 吕梁山隆升时限与演化过程研究[J].中国科学:地球科学, 2015, 000(010):P.1427-1438.
- Zhao Junfeng,Liu Chiyang,Nigel.P. Mountney.Uplifting Timing and Evolution Processes of the Lüliang Mountain, in Middle Part of North China Craton[J]. Chinese Science: geoscience, 2015, 000 (010): p.1427-1438.
- [22]徐杰, 高战武. 太行山山前断裂带的构造特征[J].地震地质, 2000, 22(2):111-122.
- Xu Jie, Gao Zhanwu. The structural characters of the piedmont fault zone of taihang mountain. Seismology and Geology[J]. 2000, 22(2):111-122.
- [23]李建星. 吕梁山新生代隆升的裂变径迹证据及其隆升机制探讨[J].中国地质, 2015(4):960-972.
- Li Jianxing. Apatite fission track evidence for the Cenozoic uplift of the Lüliang Mountains and a discussion on the uplift mechanism[J]. Chinese geology, 2015 (4): 960-972.
- [24]王乃樛等.山西地堑系新生代沉积与构造地貌[M].科学出版社,1996.
- Wang Nailiang, etc. Cenozoic sedimentation and tectonic geomorphology of Shanxi graben system[M]. Science Press, 1996.
- [25]卢耀如.岩溶水文地质环境演化与工程效应研究[M].北京:科学出版社,1999.
- [26]钱学溥.太行期岩溶剥蚀面的发现及地文期的划分[J].中国岩溶, 1984(2):27-33.
- Qian Xuepu. The discovery of karst denudation surface of the Taihang stage and the division of physiographic stages [J]. Carsologica Sinica, 1984, 2: 27-33.
- [27]任收麦,黄宝春. 晚古生代以来古亚洲洋构造域主要块体运动学特征初探[J]. 地球物理学进展, 2002,3 (17):113-120.
- Shou-Mai R .Preliminary Study on Post-Late Paleozoic Kinematics of the Main Blocks of the Paleo-Asian Ocean[J].Progress In Geophysics[J].2002,3 (17):113-120.
- [28]Zachos,J.Trends, Rhythms, and Aberrations in Global Climate 65 Ma to Present[J].Science, 2001, 292(5517):686-693.
- [29] Deconto R M , Pollard D , Wilson P A ,et al.Thresholds for Cenozoic bipolar glaciation[J].Nature, 2008, 455(7213):652-656.
- [30] H. Ao, G. Dupont-Nivet, E. J. Rohling, P. Zhang, J.-B. Ladant, A. P. Roberts, A. Licht, Q. S. Liu, Z. H. Liu, M. J. Dekkers, H. K. Coxall, Z. D. Jin, C. J. Huang, G. Q. Xiao, C. J. Poulsen, N. Barbolini, N. Meijer, Q. Sun, X. K. Qiang, J. Yao, Z. S. An, Orbital climate variability on the northeastern Tibetan Plateau across the Eocene–Oligocene transition. Nat. Commun. 11, 5249 (2020).
- (责任编辑 范章群)