

## 沁水盆地陷落柱特征及其对气藏的影响

林玉祥<sup>1</sup>, 韩继雷<sup>1</sup>, 孟彩<sup>1</sup>, 钱铮<sup>2</sup>, 刘建军<sup>2</sup>

(1. 山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 中国石油华北油田分公司 勘探开发研究院, 河北 任丘 062552)

**摘要:** 沁水盆地广泛发育岩溶陷落柱, 对气藏形成与分布产生了较大影响。为分析其对气藏的影响, 通过对陷落柱的形成条件、发育特征及分布规律等方面的研究发现, 沁水盆地陷落柱主要形成于喜马拉雅期; 在平面上成群集中分布, 多为半截柱, 直径为 100~300 m, 大多切穿主煤层的 3 号煤层; 陷落柱内发育了大量破碎带及松散堆积, 为煤层及砂岩中的天然气向外运移提供了通道; 陷落柱形成并切穿煤层以后, 使煤层压力降低, 为柱内及附近的煤层气解析提供了条件; 陷落柱还沟通了煤系地层上、下相邻的含水层, 致使不同地层之间水动力发生联系, 使得解析出来的天然气以游离态或伴随地下水循环运移至上覆地层中。因此, 除个别情况起到输导作用在浅层形成新的气藏外, 陷落柱对煤系地层中的气藏常起到破坏作用, 在其周围形成煤系地层含气量低值区, 致使天然气中甲烷含量降低, 氮气和二氧化碳含量增高, 但陷落柱的影响范围较局限。

**关键词:** 陷落柱 形成条件 破碎带及松散堆积物 煤层 天然气 沁水盆地

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2015)04-0044-05

## Characteristics of collapsed columns in Qinshui Basin and its impact on gas reservoir

Lin Yuxiang<sup>1</sup>, Han Jilei<sup>1</sup>, Meng Cai<sup>1</sup>, Qian Zheng<sup>2</sup>, Liu Jianjun<sup>2</sup>

(1. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao City,

Shandong Province, 266590, China; 2. Exploration and Development Research Institute, PetroChina

Huabei Oilfield Company, Renqiu City, Hebei Province, 062552, China)

**Abstract:** Karst collapsed columns are widely developed in Qinshui basin, which has great influence on formation and distribution of gas accumulation. In order to analyze its influence on gas accumulation, by studying the column's formation conditions, characteristics and distribution, it is found that the columns mainly formed during the time of Himalayan movement; they distribute in groups in the plane and most of them are half columns with a general diameter range of 100-300 m, cut through the upper main coal bed, namely the 3<sup>rd</sup> coal bed. Lots of broken belts and decompaction belts developed in the collapsed columns, which provide pathways for the gas accumulating in coal and sandstone to migrate outside. The seam pressure declines after the formed columns cut through the coal bed, which provides conditions for the coal seam gas desorption. The collapsed columns also communicate the seam vertically with the upper and the lower adjacent aquifers, which results in the hydrodynamic connectivity of different strata and the migration of desorbed gas into the upper stratum in free state or accompanying with underwater circulation. So the collapsed columns would play a role in destroying the gas accumulation in the coal measure strata, which leads to a low coal seam gas concentration around the columns and a decline methane concentration and an increasing concentration of N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>. Additionally, several collapsed columns play a role in migrating seam gas into shallow strata to form new gas reservoirs. But most of the cases show that the areas influenced by the columns are always limited.

收稿日期: 2015-05-11。

作者简介: 林玉祥(1963—), 男, 山东临清人, 教授, 博士, 从事油气地质勘探方面的研究。联系电话: 13969636291, E-mail: sldklyx@126.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目“沁水盆地煤层气与致密砂岩气共生藏机理研究”(41172108), 国家科技重大专项“沁水盆地游离气成藏机制与分布研究”(2011ZX05033-04), 中国石油科研攻关项目“沁水盆地煤系地层游离气富集成藏条件研究”(2011A-0203)。

**Key words:** collapsed column; forming conditions; broken belts and decompaction deposits; coal bed; natural gas; Qinshui basin

陷落柱是由于下伏易溶岩层在地下水强烈的溶蚀作用下,形成大量孔洞而使上覆岩层失稳,向溶蚀空间冒落、塌陷所形成的筒状柱体。目前,对于陷落柱的研究主要集中在煤矿开发领域。陷落柱作为一种典型的岩溶构造,其形成过程及形成之后对天然气成藏都产生很大的影响。沁水盆地南部拥有丰富的天然气资源,目前已发现煤层气藏和砂岩气藏2种主要资源类型,分布于石炭系一二叠系含煤地层中。目前普遍认为这2种资源的形成及分布以构造成因占主要地位,因此研究主要集中在断裂、褶皱等大型构造对气藏的影响。而陷落柱作为研究区广泛分布的构造类型,其对气藏的影响亦不可忽视。为此,笔者在陷落柱的形成条件、发育特征与分布规律等研究基础上,重点分析岩溶陷落柱对天然气成藏的影响,以期在勘探开发过程中更为准确地预测气藏资源与储量。

## 1 陷落柱形成条件

陷落柱的形成过程比较复杂,其形成条件相互影响,并随地质历史时期构造运动的发展而变化。前人对陷落柱的形成机制问题尚未形成合理定论,存在重力塌陷说、膏溶塌陷说、循环塌陷说和真空吸蚀塌陷说等<sup>[1-5]</sup>,各具差异性,但都认为陷落柱发育必须具备岩溶、水动力和构造3个条件。沁水盆地岩溶发育较好,水动力条件较强,在地质演化过程中构造应力发育,具有较好的陷落柱形成条件。

### 1.1 岩溶作用

沁水盆地太原组纵向上发育3~5层灰岩,厚度较小;而奥陶系灰岩平均厚度大于500 m,同时夹杂厚度不等的石膏层。在盆地整体隆升期遭受了长达120 Ma的风化剥蚀和淋滤,形成以岩溶斜坡为主并伴随部分平台与洼地发育的古岩溶地貌。沁水盆地南部地区主体为平原型岩溶斜坡,古地表岩溶水以水平运动为主,水平潜流带较为发育。此外,由于燕山运动晚期的异常热事件,加速了奥陶系灰岩含水层地下水的强烈对流,为层内岩溶发育提供良好的水动力<sup>[6]</sup>。因此,纵向上巨厚的奥陶系灰岩裂隙含水层、地史时期长时间的风化剥蚀和燕山期的异常高地温都为研究区岩溶发育提供了有利条件。

### 1.2 水动力条件

沁水盆地纵向上主要有奥陶系、石炭系一二叠

系和中新界3套含水地层,根据其发育情况可分为碳酸盐岩类岩溶裂隙、碎屑岩夹碳酸盐岩裂隙、碎屑岩类裂隙和松散岩类孔隙4大类含水层组。其中以碳酸盐岩类岩溶裂隙含水层组为主,发育于奥陶系中厚层碳酸盐岩,出露于研究区中东部及南部山区,受水面积较广,形成补给区;其他3类含水层组与奥陶系灰岩岩溶裂隙含水层组之间存在数层隔水层,阻隔了各含水层组之间垂向上的水动力联系,使各含水层组相对独立,对奥陶系灰岩岩溶发育影响较小,对陷落柱的形成影响也较小。

燕山期盆地雏形形成以后,在霍山地区大面积出露奥陶系灰岩地层,其岩溶裂隙发育<sup>[7]</sup>,是岩溶裂隙水的主要补给区。在重力作用下,地下水从高地势地区向低地势的晋城地区顺层径流,最终在构造发育区排泄,为奥陶系岩溶的发育提供了良好的水动力条件<sup>[8]</sup>。

### 1.3 构造条件

构造条件主要包括构造应力场及其产生的构造形变。燕山期,沁水盆地南部地区受北西西—南东东向挤压应力作用,形成了北东向褶皱群。喜马拉雅期,应力方向转变为北东—南西向,对前期形成的褶皱进行了叠加改造,并形成以寺头断层为代表的北东—北北东向走滑断裂带,其应力场的改变打破了前期的应力平衡状态,加速了陷落柱发育<sup>[9]</sup>。

从中奥陶世末期到石炭纪初期,受晋冀鲁豫运动影响,沁水盆地全面隆起并遭受长期的强烈剥蚀与溶蚀,在地表一定深度内形成了溶洞及溶痕并被风化矿物充填。中石炭世初期,地壳下降,研究区开始新的沉积,形成煤系地层。侏罗纪晚期,受区域性北西西—南东东向挤压应力场影响,古生界形成了大量褶皱与断裂,并伴随节理、裂隙、破碎带发育,太行山隆起的形成,使得奥陶系灰岩大面积出露,形成补给区,为奥陶系岩溶发育提供了良好的水动力。而区域应力场在喜马拉雅期发生改变,打破了前期的平衡状态,岩溶孔洞上覆岩层在自身重力、上覆岩层压力和附加构造应力作用下沿早期发育的裂缝塌陷、冒落,在孔洞内沉积、成岩<sup>[10]</sup>。

## 2 陷落柱发育特征与分布规律

对于沁水盆地陷落柱的形成时间说法不一。多数学者认为陷落柱形成于晋冀鲁豫运动,发育及

成熟于燕山期—喜马拉雅期运动<sup>[10-12]</sup>;部分学者通过铀系定年法,确定喜马拉雅期古近纪为华北区域岩溶陷落柱的主要形成时期<sup>[9,13]</sup>。

平面上,沁水盆地发育的陷落柱一般成群集中出现,呈带状定向分布;其平面分布不均匀,主要发育在岩溶水强径流带与褶皱、断裂和构造方向转折带的叠加部位<sup>[14]</sup>,呈北东向带状展布,在寺头—后城腰断裂附近区域发育密度较大,部分地区呈零星分布。截至2010年,沁水盆地南部郑庄区块共发现82个陷落柱,直径为100~300 m,多为半截柱<sup>[15]</sup>,在纵向上切穿山西组3号煤层。

陷落柱在纵向和横向上都具有分带性特征,尤其在水平方向上更加明显。根据陷落柱对周围地层的影响作用,在水平方向上可分为中心塌陷带、边缘过渡带和外围影响带<sup>[16]</sup>。其中,中心塌陷带为陷落柱的主体部分,其内为在陷落柱发育过程中,柱体内部岩层坍塌,混杂堆积的岩块;边缘过渡带即陷落柱与正常地层的过渡地带,为陷落柱形成过程中柱体两侧与围岩作用形成的软泥及碎块;外围影响带即由于岩层坍塌,而对原始地层产生牵引作用使其向下弯曲,发育裂隙及小断层。

陷落柱在垂直方向可分为顶部悬空带、上部整体碎裂带、中部松散破碎带和下部致密混杂带。其

中,顶部悬空带为由于下部地层坍塌而失去支撑的悬空地层,即陷落柱顶的悬空带;上部整体碎裂带为陷落柱上部整体垮塌的地带,被众多裂隙所分割;中部松散破碎带是陷落柱内部由上覆垮落岩层堆积而成的松散地带,压实胶结程度差;下部致密混杂带为陷落柱底部压实胶结程度较好、结构致密的地带,为柱体的主要组成部分。

### 3 陷落柱对煤系地层的影响

研究区陷落柱主要是由奥陶系灰岩受地下水溶蚀形成孔穴发育而成,主要包括岩溶洞穴、溶洞扩大成第2层洞穴和岩溶陷落柱3个形成阶段<sup>[10]</sup>。不同的构造部位,其岩溶洞穴发育程度不同,所形成的陷落柱不同,对煤系地层的影响也不同。根据陷落柱的形态及其切穿地层的情况可分为下伏柱、半截柱和通天柱3类(图1)。其中,下伏柱是发育于煤系地层下部的陷落柱,未切穿煤系地层,对煤系地层及其天然气藏影响较小;半截柱切穿煤系地层,对煤系地层中气藏的影响较为复杂,其在奥陶系灰岩溶洞扩大过程中,上覆地层坍塌,使煤系地层及砂泥岩层连续性被破坏;通天柱的柱口出露于地表,岩溶洞穴上覆地层全部塌陷。

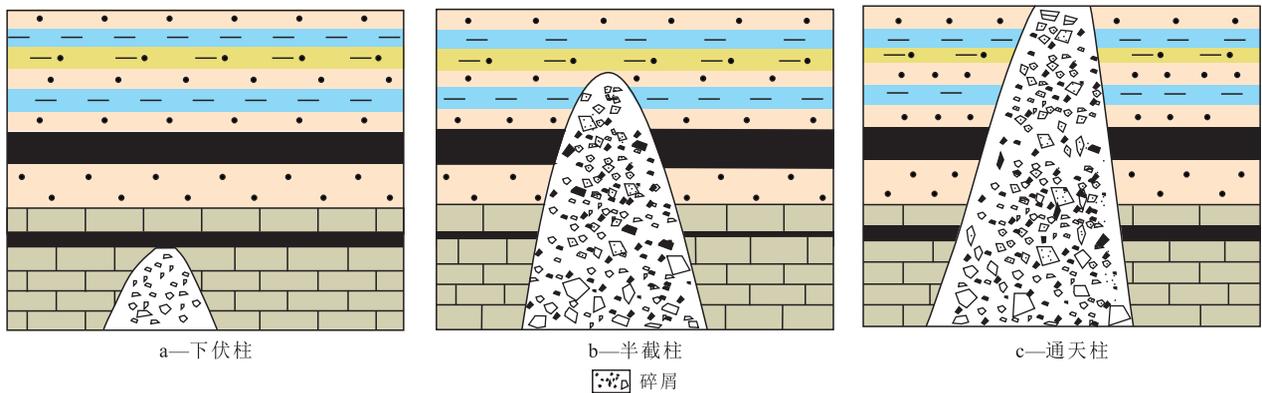


图1 沁水盆地陷落柱类型及剖面结构特征

Fig.1 Types and profile structure features of the collapsed columns in Qinshui basin

陷落柱充填物多为煤系地层岩块,除极少数陷落柱内部保留原有地层层序外,大部分陷落柱内部地层层序混乱,堆积物杂乱无章。在陷落柱的发育过程中,下伏柱因未贯穿上覆地层,对气藏影响较小;随着岩溶洞穴继续发育,上覆地层坍塌,坍塌的岩块在陷落柱内杂乱堆积,结构松散,同时陷落柱两侧过渡带岩层破碎,裂隙发育,对侧向运移的天然气没有起到很好的封闭作用,途中半截柱切穿上、下主力煤系地层,煤系地层中含有高浓度的天然气,当陷落柱发育到一定规模时,煤系地层及上

覆地层因下部岩溶洞穴发育失去支撑而向下垮塌,储层中的天然气则在气体浓度差的作用下沿破碎带及陷落柱内部松散带向外运移,使陷落柱对煤系地层中的天然气藏起到了破坏作用;而当岩溶洞穴进一步发育至地表形成通天柱时,连通地表与下部煤系地层,对天然气藏的形成产生更大的破坏作用。

### 4 陷落柱对气藏的影响

在陷落柱形成之前,煤系地层和相邻含水层之

间没有直接的水动力关系,煤层气藏是一个相对封闭的系统。而当陷落柱形成并切穿煤系地层后,煤层气藏的封闭条件发生变化,煤系地层压力降低,为柱内及附近的煤层气解析提供了动力<sup>[17]</sup>;同时柱体周围的岩体因柱体向下塌陷,发育了大量张节理,提高了围岩的透气性,为解析出来的煤层气提供了良好的运移通道<sup>[18-19]</sup>。此外,陷落柱还连通了煤系地层上、下相邻的含水层,垂向上各层之间水动力发生联系,使得解析出来的煤层气以游离态直接扩散或伴随地下水循环运移至上覆地层,形成一个煤系地层含气量低值区<sup>[20]</sup>。

对煤系地层含气性影响最大的是通天柱和半

截柱<sup>[9]</sup>。通天柱使气体直接垂向逸散,而半截柱连通了煤系地层与相邻含水层发生直接的水动力联系,煤层气随地下水循环而散失,使陷落柱附近甲烷含量降低,氮气和二氧化碳含量增高,煤系地层整体含气量降低;半截柱也有封闭成藏的可能性,如沁水盆地东北部平定聂家庄煤成气探区阳1井的游离气藏就发育于陷落柱中。

#### 4.1 晋试5-6井陷落柱

研究区钻遇陷落柱的晋试5-6井,与相邻井晋试5-1和晋试5-8井相比,测井曲线存在明显差异,密度曲线纵向上杂乱无章,没有明显的变化规律(图2)。根据电测解释成果,该井在纵向上仅在太

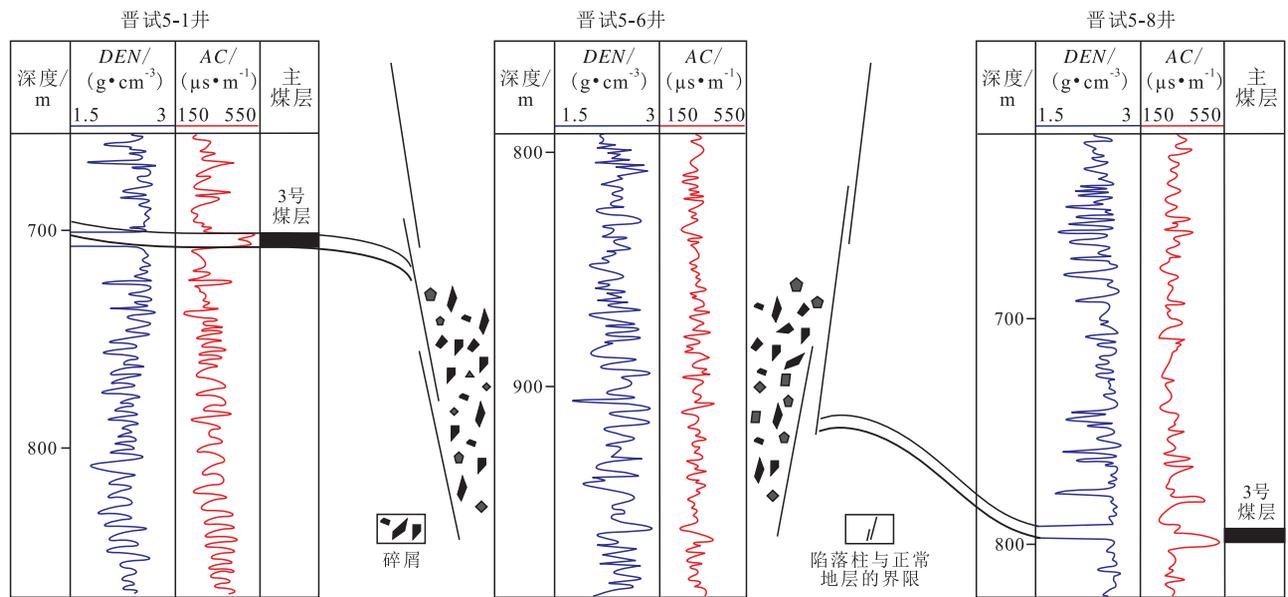


图2 晋试5-6井陷落柱附近煤层气运移机制

Fig.2 Migration mechanism of coalbed methane near collapsed columns in Well Jinshi5-6

原组解释1套煤系地层,与邻井相比,明显缺失了在区域上稳定分布的3号煤层。所以,该陷落柱纵向上切穿了3号煤层,沟通了煤系地层与顶、底板地层,柱体附近煤系地层解吸的游离气一方面向柱体顶部扩散运移,另一方面随地下水的循环而散失。

#### 4.2 郑试32井陷落柱

研究区郑试32井靠近陷落柱和断层(图3)。陷落柱在纵向上切穿了山西组,沟通了煤系地层与顶、底板地层,使其周围煤系地层实测含气量偏低。以郑试32井山西组3号煤层为例,其实测含气量为10.01~13.57 cm<sup>3</sup>/g(空气干燥基),而其附近的郑试33和郑试34井3号煤层平均实测含气量为25 cm<sup>3</sup>/g。通过分析郑试32井煤层气气体组分(扣除空气),发现甲烷含量平均约为90.82%,氮气约为7%,与其邻井相比,甲烷含量明显偏低而氮气含量明显偏高。

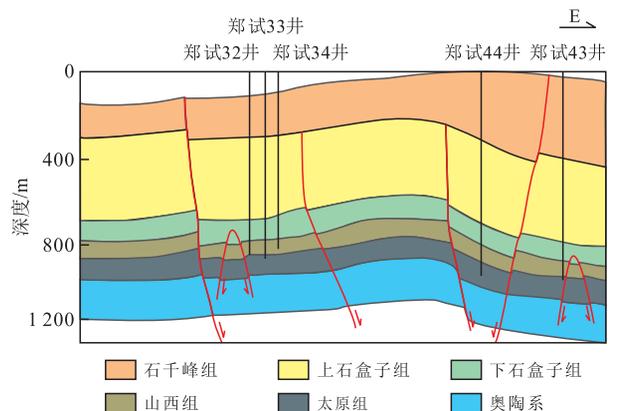


图3 郑试32井附近陷落柱

Fig.3 Collapsed columns near Well Zhengshi32

#### 4.3 郑试43井陷落柱

研究区郑试43井靠近陷落柱,其3号煤层平均实测含气量为7.09~9.03 cm<sup>3</sup>/g,而其相邻的郑试42井3号煤层平均实测含气量为17.93~25.47 cm<sup>3</sup>/g。

分析2口井各个组分可以看出,郑试43井3号煤层甲烷含量平均约为77.55%,氮气约为21%,其余为二氧化碳,与郑试44井相比其甲烷含量明显偏低,而二氧化碳和氮气含量明显偏高,说明郑试43井附近陷落柱已影响了其附近煤层气的运移及分布。

## 5 结束语

沁水盆地陷落柱成群集中分布,多为半截柱,直径为100~300 m,大多切穿主煤系地层3号煤层,主要形成于喜马拉雅期。陷落柱体内部物质堆积杂乱松散,在未充分胶结时具有良好的输导空间;陷落柱在发育过程中对地层的连续性及其完整性具有破坏作用,导致围岩发育大量裂隙及小断裂,也能起到输导作用。同时,陷落柱切穿煤系地层沟通煤系地层与顶、底板地层,会加速煤系地层吸附气的解析,促使游离气扩散或随地下水循环而散失,所以大部分陷落柱周围测试的煤岩含气量值都较低。但是陷落柱的影响范围比较有限,由于陷落柱本身的构造形态,其不可能在横向上产生大范围的影响。根据煤系地层含气量分析,离柱体较近的井受其影响较大,气体解析明显,而随着离柱体距离的增加,这种解析效应明显变弱。

### 参考文献:

- [1] 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):344-347.  
Qian Xuepu.The formation of gypsum karst collapse-column and its hydrogeological significance [J].Carsologica Sinica, 1988, 7(4):344-347.
- [2] 倪新锋,王招明,杨海军,等.塔北地区奥陶系碳酸盐岩储层岩溶作用[J].油气地质与采收率,2010,17(5):11-16.  
Ni Xinfeng, Wang Zhaoming, Yang Haijun, et al. Formation mechanism of Ordovician carbonate karst reservoir in the Northern Tarim Basin [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2010, 17(5): 11-16.
- [3] 尹尚先.煤矿区突(涌)水系统分析模拟及应用[D].北京:中国矿业大学,2002.  
Yin Shangxian. Analysis simulation and applications of water inrush system in coal mine area [D]. China University of Mining & Technology, 2002.
- [4] 郭望,陈践发,曹青,等.油气藏中气态地层水的存在及其意义[J].油气地质与采收率,2013,20(1):36-39,43.  
Guo Wang, Chen Jianfa, Cao Qing, et al. Occurrence and significance of gaseous water in reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 20(1): 36-39, 43.
- [5] 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):175-180.

- Xu Weiguo, Zhao Guirong. The implication of suction action for ground subsidence in karst mining areas [J]. Geological Review, 1981, 27(2): 175-180.
- [6] 王经明,刘文生,关永强.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):11-18.  
Wang Jingming, Liu Wensheng, Guan Yongqiang. Mechanism of groundwater inner circulation in collapse column formation in North China coal field—A case study at Fengfeng mine [J]. Carsologica Sinica, 2007, 26(1): 11-18.
- [7] 肖阳,江同文,冯积累,等.缝洞型碳酸盐岩油藏开发动态分析方法研究[J].油气地质与采收率,2012,19(5):97-99.  
Xiao Yang, Jiang Tongwen, Feng Jilei, et al. Study of dynamic analytic method on fractured-vuggy carbonate reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(5): 97-99.
- [8] 池卫国.沁水盆地煤层气的水文地质控制作用[J].石油勘探与开发,1998,25(3):15-18.  
Chi Weiguo. Hydro geological control on the coalbed methane in Qinshui basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 1998, 25(3): 15-18.
- [9] 王首同,白玉,王恒.华北煤田陷落柱区域成因探讨[J].河南理工大学学报:自然科学版,2010,29(4):479-483.  
Wang Shoutong, Bai Yu, Wang Heng. Study on the regional causes of collapse column in coal mine area of North China [J]. Journal of Henan Polytechnic University: Natural Science, 2010, 29(4): 479-483.
- [10] 段东升.潞安矿区构造演化对煤田陷落柱发育的影响[J].商场现代化,2005,11(6):174-175.  
Duan Dongsheng. The impact of tectonic evolution on mining collapse column development in Lu'an mine area [J]. Market Modernization, 2005, 11(6): 174-175.
- [11] 赵志怀,陆远昭,陆家河.山西煤田地质构造与陷落柱发育规律的初步探讨[J].中国地质,1996,(6):20-22.  
Zhao Zhihui, Lu Yuanzhao, Lu Jiahe. Preliminary study on geology structure and collapse column development law in Shanxi Coalfield [J]. Geology in China, 1996, (6): 20-22.
- [12] 陈敬敏,姚军朋,张子敏,等.晋城成庄煤矿陷落柱成因与差异升降运动[J].河南理工大学学报:自然科学版,2006,25(6):465-468.  
Chen Jingyi, Yao Junpeng, Zhang Zimin, et al. Subsided columns genesis in Chengzhuang Colliery, Jincheng and differential uplifting-subsidence movement [J]. Journal of Henan Polytechnic University: Natural Science, 2006, 25(6): 465-468.
- [13] 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,2001.  
Guo Hongyu. Dating the development of collapse pillars in coal measure Taiyuan Xishan by u-series [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2001.
- [14] 司淑平,马建民,胡德西.煤系地层陷落柱成因机理与分布规律[J].断块油气田,2001,8(2):15-18.  
Si Shuping, Ma Jianmin, Hu Dexi. The origin mechanism and distribution regularity of karst collapse in coal measure strata [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2001, 8(2): 15-18.