第48卷 第3期
2002年5月
地 质 论 评 GEOLOGICAL REVIEW
Vol. 48 No. 3
May 2002
http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx

沁水盆地南部煤层气成藏动力学机制研究

叶建平[1)] 武 强[1)] 叶贵钧[2)] 陈春琳[3)] 岳 巍[3)] 李红柱[3)] 翟振荣[3)]
1) 中国矿业大学(北京校区),100083; 2) 中国煤炭地质总局,河北涿州,072752
3) 中国煤炭地质总局第一勘探局,河北邯郸,056004

内容提要 应用油气成藏动力学方法,研究沁水盆地南部煤层气成藏动力学机制。通过热力场、应力场、地下水动力场的分析,认为本区具有良好的生烃条件和储集条件,晋城矿区南部,地下水流场为一种汇流区,这种地下水流场特征,导致煤层气在汇流区域得到富集,形成地下水和煤储层中流体的能量的积聚,这种能量的聚集是形成高压储层的基础和保证。同时,南部还是低地应力分布区,渗透率相对地高,因此南部煤层气富集,煤层气产能大,是煤层气勘探开发最有利地区。晋城矿区北部为单向流动的地下水动力场,使得在相同地质背景下的同一地区出现不同的煤层气成藏特征。

关键词 沁水盆地 煤层气 成藏动力学 热力场 应力场 水动力场

成藏动力学是综合利用地质、地球物理、地球化学手段和计算机模拟技术,通过能量场演化及其控制的化学动力学、流体动力学过程分析,研究沉积盆地油气形成、演化和运移过程和聚集规律的综合性学科(郝芳等,2000)。成藏动力学研究的基础是盆地演化历史和流体输导格架,研究的核心是能量场演化及其控制的化学动力学和流体动力学过程。常规油气盆地的成藏动力学研究进展迅速。利用成藏动力学方法,研究含煤盆地煤层气成藏动力学机制,预测煤层气生成、运移、富集规律,预测煤层气富集高产区,具有理论意义和实践指导作用。

刘焕杰等(1998)曾提出"含煤层气系统"概念,含煤层气系统包括已形成的煤层气藏、煤层气源岩——煤层、煤储层、盖层、上覆岩层和煤层气藏形成时的一切地质作用及其合理的时空配置。煤层气与常规油气的差别在于煤层气主要以吸附状态储集在煤的微孔隙中,煤层既是源岩又是储集层。但是煤层气勘探开发不仅要研究煤层气的生成和富集规律,更重视煤层气的生产能力和开采条件,因此,借鉴油气成藏动力学方法,研究含煤盆地的热力场、应力场、水动力场,研究含煤盆地热历史和深部热背景对有机质转化的影响,煤层及其顶板含水层的输导系统,煤层气运移的驱动力,煤层气藏的能量变化,从而指导煤层气的勘探开发。本文以沁水盆地南部晋城矿区为基础,论述煤层气成藏动力学机制,表明能量场及其成藏动力学过程在煤层气获得富集高产中的至关重要的作用。

1 沁水盆地南部煤层气藏热力场特征及煤层气赋存规律

沁水盆地南部含煤地层太原组和山西组平均厚约150 m,煤层总厚平均15 m左右。含两层主要煤层,厚度大,结构简单,发育稳定。其中3号煤5.04~7.11 m,平均6.11 m。15号煤层厚0.80~6.17 m,平均厚3.21 m。因此煤层作为源岩又作为储层具有很好的基础条件。

晋城矿区位于华北聚煤盆地南部晋东南、济源、焦作到豫东永城的高煤级带。本区在晚古生代聚煤作用结束后,覆盖了三叠纪的巨厚沉积,煤层经受了深成变质作用,出现第一次生烃高峰。燕山运动强烈的岩浆活动,产生区域地热异常,使得已经过深成变质的煤叠加了区域岩浆热变质作用(杨起等,1988),发生第二次生烃过程。煤级由烟煤向无烟煤演化,镜质组反射率达3.4%~4.0%,形成了现今的煤级分布格局。由于这种盆地温度场的背景,晋城矿区煤的生烃历程长,生成大量煤层甲烷,从而提供了丰富的气源。无烟煤中虽然大孔隙已经关闭,但仍有微孔隙发育,吸附能力强,因此煤层的含气量也可以很高。

收稿日期:2001-10-22;改回日期:2002-02-28;责任编辑:周健。
作者简介:叶建平,男,1962年生,高级工程师。现为中国矿业大学博士研究生,主要从事煤层气勘探开发、煤田地质的研究和生产工作。通讯地址:100011,北京市安外大街甲88号,中联煤层气公司;电话:010-64299993; Email: yejp01@263.net

表 1 晋城矿区煤层气含量统计表

Table 1 Gas content in the Jincheng mine

井田/勘探区	3 煤			15 煤		
	含气量范围(m^3/t)	平均含气量(m^3/t)	煤层深度(m)	含气量范围(m^3/t)	平均含气量(m^3/t)	煤层深度(m)
潘庄一井	4.34～25.74	12.80(26)	197.37～468.00	7.73～38.70	20.44(20)	335.93～472.95
潘庄二井	6.41～21.86	12.66(35)	238.56～585.05	9.21～34.07	17.95(38)	325.44～677.04
大宁二井	3.98～21.45	11.71(17)	150.10～684.50	6.89～22.51	13.67(17)	301.20～773.50
樊庄勘探区	7.16～16.89	12.27(11)	442.98～776.30	6.17～19.18	11.35(8)	535.58～841.44

注:数据引自潘庄一井、潘庄二井、大宁二井、樊庄勘探区等煤田地质勘探报告;括号内数值为统计点数。

据 4 个井田/勘探区 173 个煤田勘探钻孔的煤层气解吸测试数据统计,含气量为 3.98～38.70 m^3/t,一般大于 11.00 m^3/t。其中 3 煤层含气量平均为 11.71～12.80 m^3/t,15 煤含气量平均为 11.35～20.44 m^3/t,属于煤层气富集区。

煤层甲烷含量总体上具有南高北低,西高东低的展布规律(表 1)。各井田/勘探区煤层气赋存差异较大。潘庄一井和潘庄二井,埋深浅,多在 600 m 以浅,但煤层气最富集,含气饱和度最高。樊庄勘探区位于深部,15 煤埋深 535.58～841.44 m,但含气量比潘庄区低,含气饱和度也较低。显然在本区埋深不是含气量和饱和度的主要控制因素。

2 沁水盆地南部煤层气藏应力场特征

储层温度和压力是煤层气运移的驱动力,煤层裂隙和应力环境确定了其输导能力。据刘焕杰等(1998)、叶建平等(1998)研究,沁水盆地南部,印支期构造运动表现为 SN 向的水平挤压应力场,但影响不大,没有留下明显的构造形迹。燕山期为 NW－SE 向近水平挤压应力场,形成了 NNE－NE 向次级褶皱构造,成为主要控气构造类型,晋城矿区富气带就是沿次级向斜轴部呈 NNE 向分布,并呈 EW 向相间展布。新生代构造运动以 NW－SE 向近水平伸展应力场为主,形成一系列规模较小的近 SN 向次级褶皱,并叠加在燕山期 NNE－NE 向次级褶皱之上,常构成煤层气局部富气中心。通过现代构造应力场有限元模拟和分析(刘焕杰等,1998),现代构造应力场的主应力差差值较大,大于 80 MPa,高主应力差分布区,有利于提高煤层渗透率。

煤层气注水/压降法试井和小型水力压裂法测试结果表明(表 2),本区 3 煤层现代应力场最小水平应力(即闭合压力)为 5.57～9.30 MPa,最小水平应力梯度 13.01～17.62 kPa/m,低于正常应力梯度。表 2 表明,从南部向北部应力梯度呈增高趋势,潘庄应力梯度最小,为 9.88 kPa/m,樊庄北部最高,为 17.62 kPa/m。由此导致北部的渗透率低,南部的煤层渗透率较高。煤层渗透率随应力的增加而减小。如上述,本区具有良好的生烃基础和保存条件,煤层气资源丰富。渗透率是决定煤层气生产能力的关键因素,渗透率极大地影响煤层气渗流能力,它决定了含煤盆地的输导格架和能量场。由此可见,樊庄南部到潘庄一带不仅含气量高,含气饱和度高,而且应力梯度小,渗透率较高,将是最有利的煤层气富集高产区。

表 2 晋城矿区 3 煤煤层气储层参数表

Table 2 Reservoir parameters for coal C in the Jincheng mine

分区	渗透率($\times10^{-3}\mu m^2$)	闭合压力(MPa)	应力梯度(kPa/m)	含气饱和度(%)
樊庄北	0.004～0.946 (0.47)	8.30～11.09 (9.70)	16.07～17.62 (16.84)	56.41～85.67 (71.04)
樊庄中	0.065～1.095 (0.58)	8.86～9.30 (9.08)	15.82～16.35 (16.08)	49.32～60.12 (54.72)
樊庄南	0.605～2.000 (1.325)	5.57～7.97 (6.77)	13.01～13.98 (13.50)	78.99～93.98 (86.43)
潘庄	1.600～3.610 (2.61)①	3.30	9.88	96.42～100.00 (98.24)①

注:表内数据为最小值～最大值(平均值);① 引自中联煤层气公司等.2000.全国煤层气资源评价报告.其他引自中联煤层气公司测试资料。

3 沁水盆地南部煤层气藏水动力场特征

区内对煤层气影响较大的含水层有二叠系山西组砂岩裂隙含水层和太原组灰岩岩溶裂隙含水层。山西组砂岩裂隙含水层以 K_8 砂岩为主,厚 5～8 m,水位标高 550～750 m,单位涌水量 0.0015～0.05 L/(s·m),渗透系数<0.34 m/d。太原组灰岩岩溶裂隙含水层以 K_2 灰岩为主,富水性随埋深增大而逐步减弱,单位涌水量为 0.00035～0.0015 L/(s·m)。煤系基底的中奥陶统灰岩含水层,厚 360～530 m,水位标高约 663 m,单位涌水量 2～8 L/(s·m),但由于有峰峰组隔水层存在,与煤系地层没有水力联系,对煤矿开采,对煤层气赋存和生产基本没有影响。

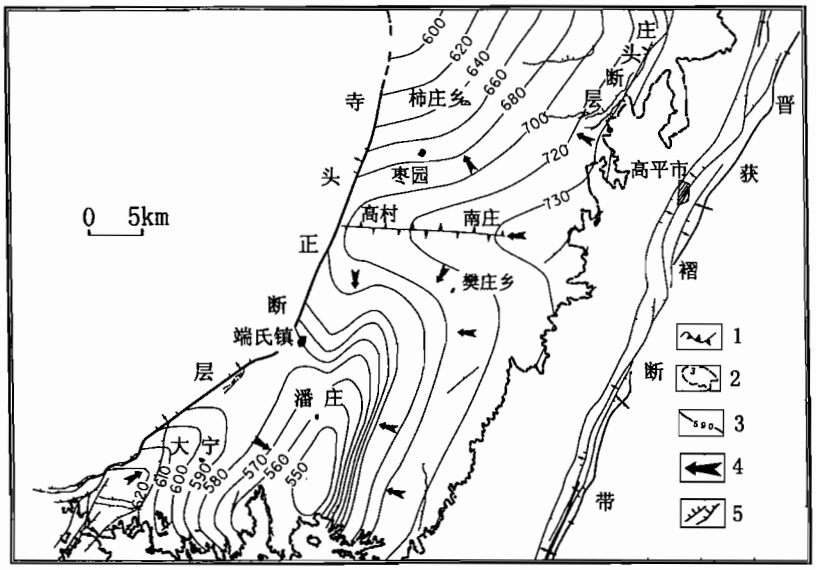


图 1　晋城矿区山西组含水层地下水流场图

Fig. 1　Equipotential line of Shanxi Formation aquifer in the Jincheng mine

1—地下分水岭；2—3 煤露头线；3—等水位线；4—地下水径流方向；5—断层

1—Groundwater divide; 2—outcrop line of coal C; 3—groundwater equipotential line; 4—groundwater flow direction; 5—fault

现以山西组含水层为例说明水动力场、水化学场特征及其对煤层气富集和高产的作用过程。晋城矿区樊庄中部大致在高村—南庄一线存在一条分水岭，分水岭两侧形成了不同的地下水流场(图 1、2)。

分水岭以南的地下水流场：北界地下水由分水岭向南径流；东部及南部为露头区，接受大气降雨补给，地下水由东向西、由南向北径流；西侧，地下水在西南部接受露头降水补给，一部分地下水通过西部边界寺头断层向西排泄，另一部分通过北东向分水岭作用使地下水由南西向北东径流，这样形成了向中部汇流之势。浅部地下水交替活跃，径流强度大。向深部随着侧向径流距离的延伸，径流强度逐渐减弱，在大宁、潘庄、樊庄南部地区的等势面低地，地下水径流条件最弱。

地下水水化学场也进一步说明上述地下水流场特征。在晋城矿区东部及南部的补给区地下水水质类型多为 HCO_3-K+Na 型，矿化度较低，<600 mg/L。往深部，SO_4^{2-} 和 Cl^- 含量逐渐增加，潘庄一号井田 SO_4^{2-} 含量增大到 1003.48 mg/L，矿化度也逐渐加大到 2620 mg/L，水质类型变为 SO_4 HCO_3-K+Na 型(引自潘庄井田煤田勘探报告抽水试验资料)。反映了浅部地下水接受补给，地下水径流交替条件好；

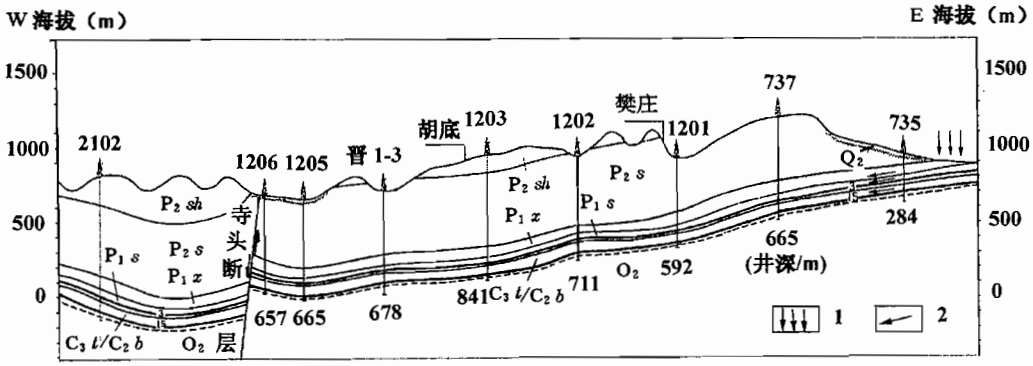


图 2　晋城矿区地质剖面及地下水径流示意图

Fig. 2　Groundwater flow system and stratigraphic cross section in the Jincheng mine

1—降雨补给；2—地下水径流方向

1—Rain recharged; 2—groundwater flow direction

深部径流缓慢甚至呈滞流状态，矿化度增高。地下水由高势能向低势能驱动，而煤层气由高压力向低压力运移渗流，最终在樊庄南部、潘庄、大宁一带形成地下水汇流区，煤层气侧向运移和垂向运移几乎没有发生。本区独特的地下水流场特征，导致煤层气在汇流区域得到富集，形成地下水和煤层中流体(气体、水)能量的积聚，这种能量的聚集是形成高压储层的基础和保证。

分水岭以北的樊庄中部和北部，地下水基本为单向流动，地下水流场：东部为露头区，接受大气降水补给，向西部径流，到深部地下水径流强度减弱；南侧从分水岭向西北流动。浅部是煤层气逸散带，含气量低，深部地下水径流缓慢，煤层气被保存并富集。

由此可见，南部是地下水汇流区，形成地下水水动力圈闭，形成了高含气量分布区，也是形成高含气饱和度的动因；分水岭以北的北部地区地下水为单向流动，成藏条件不如南部的地下水汇流区。

4 结语

盆地流体系统的动力学是当今盆地与能源研究中最具前缘性的领域(李思田，1999，2000)。受含煤盆地复杂多样性和煤储层特殊性制约，煤层气成藏机理尚在研究之中。从煤层气成藏动力学角度，通过对含煤盆地热力场、应力场和水动力场综合研究，论证煤层气生成、运移、富集、高产机制，将是一件十分重要和迫切的事情。含煤盆地热力场使煤级增高，煤发生生烃作用，这属于流体化学动力学过程。当地层被抬升，或地下水运动作用，使煤层温度增高或压力降低，煤层气将发生解吸运移，形成新的物质平衡，这种流体动力学过程，导致盆地流体能量的聚集或释放。

沁水盆地南部煤层厚度大，发育稳定，沉积-埋藏过程中煤发生深成变质作用，发生一次生烃；成煤期后燕山运动岩浆热源叠加，出现地热异常，煤级进一步增高到无烟煤，发生二次生烃。虽然经受了多期次的构造运动，但由于煤系地层中泥岩比例较高，封闭性较好，煤层气逸散较少，使煤层气大量得以保存。另一方面，本区的地下水动力场分析表明，晋城矿区南部为地下水汇流区，由于水动力的圈闭作用，在汇流区域煤层气得到富集，形成地下水和煤层中流体的能量的积聚，这种能量的聚集是形成高压储层的基础和保证。在樊庄中北部，地下水动力场与之不同，因此，煤层气含量相对较低。在相同地质背景条件下，正是由于地下水动力场的不同，导致了煤层气赋存状态的差异。

同时，应力场不仅影响煤层气的赋存状态，更影响煤层气的生产条件。由于经历了多期构造运动的叠加，使煤层气在次级向斜中相对富集。另一方面，在樊庄南部和潘庄一带是低地应力分布区，煤渗透率相对较高，因此这一带不仅煤层气富集，而且煤层气产能大，是煤层气勘探开发最有利地区。在含煤盆地演化过程中，正是由于这种热力场、应力场、水动力场的综合作用，煤层沉积条件、生烃条件、应力条件、水动力条件和输导格架的有利配置，形成了煤层气的富集高产区。

参 考 文 献

郝芳，邹华跃，姜建群. 2000. 油气成藏动力学及其研究进展. 地学前缘，7(3)：11～22.

李思田. 1999. 盆地分析与煤地质学研究. 地学前缘，6(增刊)：133～138.

李思田. 2000. 盆地动力学与能源资源. 地学前缘，7(3)：1～10.

刘焕杰，秦勇，桑树勋. 1998. 山西南部煤层气地质. 徐州：中国矿业大学出版社.

杨起，潘治贵，翁成敏，等. 1988. 华北石炭－二叠纪煤变质特征与地质因素探讨. 北京：地质出版社.

叶建平，秦勇，林大扬. 1998. 中国煤层气资源. 徐州：中国矿业大学出版社.

References

Hao Fang, Zou Huayao, Jiang Jianqun. 2000. Dynamics of petroleum accumulation and its advances. Earth Science Frontiers, 7(3): 11～22 (in Chinese with English abstract).

Li Sitian. 1999. Basin analysis and some new studies of coal geology. Earth Science Frontiers, 6 (suppl.): 133～138 (in Chinese with English abstract).

Li Sitian. 2000. The dynamics of sedimentary basins and energy resources-retrospective and prospects at the turn of the century. Earth Science Frontiers, 7(3): 1～10 (in Chinese with English abstract).

Liu Huanjie, Qin Yong, Sang Shuxun. 1998. Geology of coalbed methane in southern Shanxi, China. Xunzhou: China University of Mining & Technology Press (in Chinese).

Yang Qi, Pan Zhigui, Weng Chengmin, et al. 1988. Research on characteristic and geologic condition of coal metamorphism in Carboniferous – Permian, North China. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).

Ye Jianping, Qin Yong, Lin Dayang. 1998. Coalbed methane resources of China. Xunzhou: China University of Mining & Technology Press (in Chinese).

Study on the Coalbed Methane Reservoir-Forming Dynamic Mechanism in the Southern Qinshui Basin, Shanxi

YE Jianping[1], WU Qiang[1], YE Guijun[2], CHEN Chunlin[3], YUE Wei[3], LI Hongzhu[3], ZHAI Zhenrong[3]

1) *Beijing Campus, China University of Mining & Technology, Beijing*, 100083

2) *National Administration of Coal Geology, Zhuozhou*, 072752, *Hebei*

3) *The First Bureau of Exploration, National Administration of Coal Geology, Handan*, 056004, *Hebei*

Abstract

This paper deals with the application of the method of petroleum reservoir-forming dynamics in the study of the coalbed methane reservoir-forming dynamic mechanism in the southern Qinshui Basin. On the basis of an analysis of the thermodynamic field, stress field and hydrodynamic field, the authors suggest that there are favorable conditions of hydrocarbon generation and accumulation in the area. The groundwater hydrodynamic field in the southern part of the Jincheng mining district is a catchment area. The existence of such a groundwater hydrodynamic field led to the concentration of coalbed methane and accumulation of energy of groundwater and fluid in coalbeds. The accumulation of such energy is the basis and guarantee for the formation of high-pressure reservoirs. This part is also characterized by lower stress and higher permeability and thus is rich in coalbed methane and has a high coalbed methane productivity. So it is the most favorable area for coalbed methane exploration and development. But there is a groundwater hydrodynamic field with an unidirectional flow in the northern part of the Jincheng mining district. Thus there appear different coalbed methane reservoir-forming characteristics in the same area under the same geologic setting.

Key words: Qinshui Basin; coalbed methane; reservoir-forming dynamics; thermodynamic field; stress field; hydrodynamic field