

沁南地区寺头断裂在天然气运聚中的作用

林玉祥¹, 吴玉琛¹, 栾伟娜¹, 邢永生¹, 钱 铮², 刘建军²

(1. 山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 中国石油天然气股份有限公司 华北油田研究院, 河北 任丘 062552)

摘 要:利用钻测井、地震资料及前人勘探成果,在沁南地区郑庄—樊庄区块构造发育特征与煤系地层天然气成藏条件研究基础上,探讨断裂构造在天然气运移过程中的控制作用。通过断层的封闭性探究,确定区内规模最大的寺头断层现今为一条封闭性断层,对天然气的运移起到了很好的封堵作用;而地史时期,寺头断层活动性较强时为输导断层,对天然气成藏起到了供气作用,也导致现今断裂构造附近煤层实测含气量偏低。另外,晚白垩世—古近纪寺头断层发生显著的左行走滑,断层不同部位受力不同,引起输导性能的非均质性,既出现对天然气起封堵作用的压应力集中区,又有对天然气起输导作用的张应力集中区。

关键词:寺头断层;走滑断层;封闭性;输导作用;天然气成藏

中图分类号:P618.130

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2015)06-0001-08

Control Effect of Sitou Fault on Natural Gas Migration and Accumulation in Qinnan Field

Lin Yuxiang¹, Wu Yuchen¹, Luan Weina¹, Xing Yongsheng¹, Qian Zheng², Liu Jianjun²

(1. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

2. Research Institute of Huabei Oilfield Company, China National Petroleum Corporation, Renqiu, Hebei 062552, China)

Abstract: Based on the existing seismic/logging data and previous exploration results, combined with the research of coal strata natural gas accumulation conditions and the tectonic development characteristics of Zhengzhuang-Fanzhuang block in Qinnan field, this paper studied the control effect of faults on the migration of natural gas. Through the exploration of the fault's closeness, it has been ascertained that Sitou Fault, the biggest fault in the studied area, is presently a closed fault and has a good sealing effect on gas migration. But in the geological history, Sitou Fault was once an open fault with strong activities, which provided gas supply to the gas reservoir and led to the low measured gas content of the coal seam near the fault. Meanwhile, in the late Cretaceous-Paleogene period, Sitou fault made a remarkable sinistral strike-slip, resulting in the anisotropy of gas transportation due to different stress in different parts of the fault. As a result, in the fault there were both crushing stress concentrated areas sealing gas migration and tensile stress concentrated areas helping gas transportation.

Key words: Sitou Fault; strike-slip fault; closeness; transporting role; gas accumulation

沁水盆地南部是重要的煤层气富集区,已投入工业开发,但对其游离气的研究尚处于探索阶段。游离气成藏过程中,各种类型的输导体系是连接源岩与圈闭之间的“桥梁和纽带”,对游离气的运聚起到十分重要的

收稿日期:2014-06-07

基金项目:国家自然科学基金项目(41172108);国家油气专项“十二五”课题(2011ZX05033-04,2011ZX05004-01);中国石油“十二五”科技攻关课题(2011A-0203)

作者简介:林玉祥(1963—),男,山东临清人,教授,博士生导师,主要从事油气地质勘探方面的研究工作。

E-mail: sddlyx@126.com

作用。断层作为输导体系中重要的构造要素,直接控制该区气藏的形成与分布。

断裂对油气的控制作用即断裂构造在油气运移过程中起输导作用还是封堵作用^[1]。断裂带输导性能的强弱主要受断层两盘及断裂带三者之间排替压力的影响,排替压力则受多方面因素共同作用,如断层性质、活动强度、断层两盘岩性对置关系、断裂带内泥岩涂抹、断裂带所受压应力、断面产状、地层产状及断层走向等,另外排替压力的大小与油气运移期长短、油源丰度和构造活动期的配置关系等多方面因素有关^[2-7]。本文主要研究沁南地区断裂构造在游离气运聚过程中的作用,揭示断裂构造在沁南地区游离气成藏中的控制作用。

构造因素为控制区内天然气藏的重要因素,对气藏的聚集及分布具有重要影响^[8]。寺头断裂作为区内最大断裂,前人对其研究仅停留在断层封闭性阶段^[9-10]。本研究以寺头断层为例,从走滑断裂的形成机制分析不同部位的受力情况,首次提出对气藏有聚集作用的压应力集中区和对气藏有逸散作用的张应力集中区,并深入分析其对天然气聚集成藏的影响。

1 寺头断裂特征

沁南地区郑庄—樊庄区块属于晋城斜坡带,区内构造复杂,褶皱与断裂构造极其发育。受地质历史时期多期构造运动的影响,郑庄—樊庄区块区内主要发育两组方向的断层,一组呈 NW 向和 SN 向,另一组呈 NE 向(图 1),且大部分断层具有规模小、断距小、倾角大、延伸短等特点^[11]。断层在郑庄区块内以 NE 向为主,而在樊庄区块除了 NE 向之外,还有部分断层呈近 SN 向和 NWW 向展布。在断裂发育程度上,郑庄区块明显多于樊庄区块。断距大于 200 m 的断层多发育于研究区中部,主要有寺头断层和后城腰断层,两者都呈由一组 NE 向正断层组成的弧形断裂带(表 1)。

寺头断层作为郑庄—樊庄区块 NE 向展布的规模最大的断层,全长 40 km,区内延伸 20 km,向南西延伸至寺头、白龙庙一带,向北至圪堆上东侧消失。断层走向变化较大,南部走向 NE60°,往北转为 NE10°~25°。寺头断层具有张扭性特征,平面上断裂和褶皱组合呈雁列式、侧列式、“S”和反“S”形等走滑构造变形的基本特征;剖面上,断层陡直向下直插基底,断穿石炭系一二叠系等区内主要含气地层,以发育上缓下陡的半花状构造样式为主,少量负花状构造,为扭张构造应力作用下的走滑构造,受燕山期左旋剪切挤压应力作用影响形成^[12],具有左行走滑特征。喜山运动时期,由于盆地整体受 NE 向挤压应力的影响,寺头断层在原有左行走滑的基础上被改造,形成目前的构造格局。

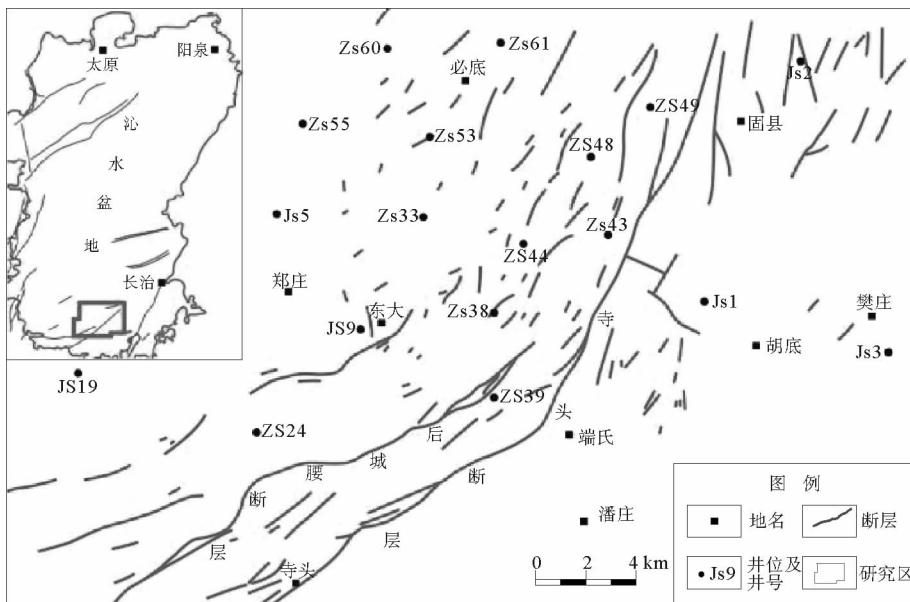


图 1 沁水盆地郑庄—樊庄区块 3# 煤层顶面断裂纲要图

Fig. 1 Outline diagram of faults on top of the 3[#] coal seam in Zhengzhuang-Fanzhuang Block, Qinsui Basin

表 1 沁水盆地郑庄区块主要断层要素表

Tab.1 Key elements of faults in Zhengzhuang Block, Qinshui Basin

断层编号	断层名称	断层分级	断层落差/m	断层产状		
				走向/(°)	倾向	倾角/(°)
1	寺头断层	2	50~100	NE10~25	NW	70~75
2	后城腰断层	3	25~50	NE15~55	NW	60

2 天然气藏类型及分布特征

沁水盆地含有丰富的气藏资源,包括以石炭—二叠系中的 3# 煤层及 15# 煤层为主要气源岩并保存在煤层中的煤层气资源,和由煤层逸散出的煤层气及盆地内其他气源岩产出的游离气在砂岩储层中保存的游离气资源(图 2)。

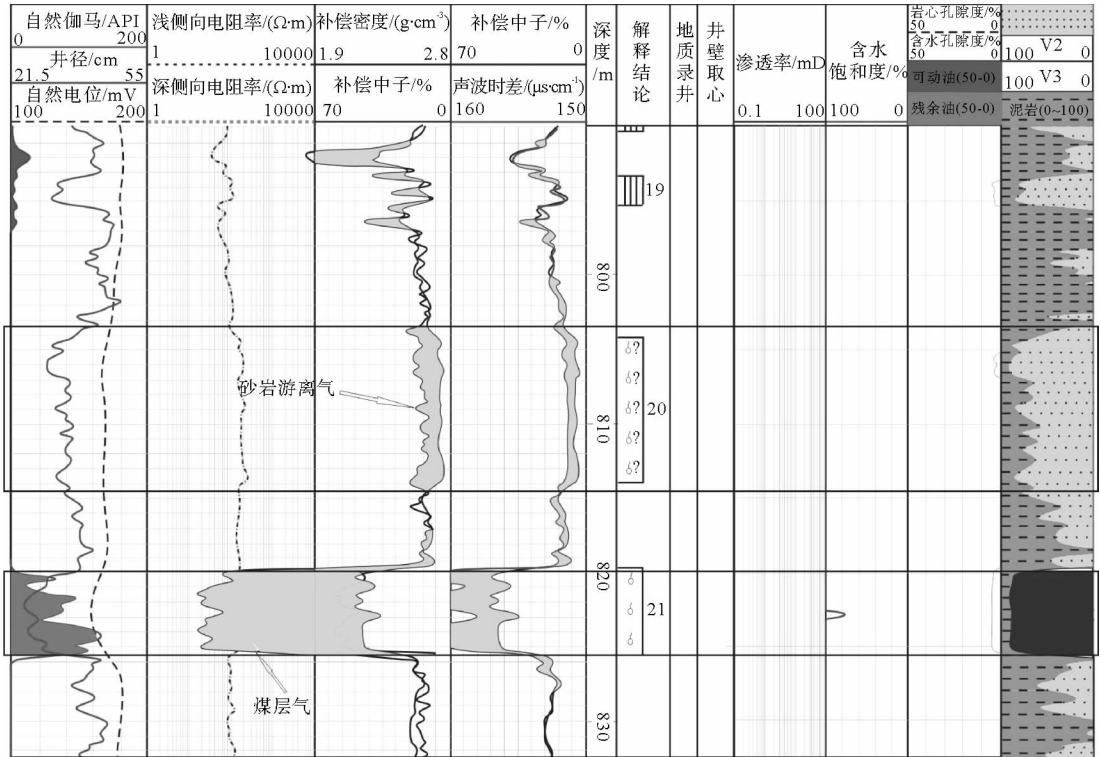


图 2 沁水盆地郑试 49 井石炭—二叠系地层含气测井分析

Fig.2 Logging analysis of gas in Carboniferous-Permian of Zhengshi 49 well, Qinshui Basin

石炭—二叠系是盆地内煤层气与砂岩游离气主要的储集地层,煤层气在自身吸附力及毛细管力作用下得以在煤层中保存,砂岩储层中的游离气则在上覆泥岩盖层及砂岩自身低孔低渗高毛细管力作用下保存。但因该段地层埋深相对较浅,后期构造作用极易对其产生影响。在对寺头断层的研究中发现,断层向下直插盆地基底,当断层断穿石炭—二叠系时,断层会破坏该段地层内气藏资源原有的平衡状态,因此本文研究断裂对盆地内天然气运聚作用的影响,着重分析石炭—二叠系中的气藏。

3 寺头断裂封闭性

寺头断层破碎带胶结致密,导气、导水能力差,现今为一条封闭性较好的断裂^[13]。本区东南部煤系地层

露头接受地表水补给,在重力作用下,向西北方向顺层径流,遇到寺头断裂形成沁南地区山西组 3[#] 煤层气藏的断层-水动力复合封堵边界。断层两侧同一层位的地层水矿化度存在较大差别。以山西组 3[#] 煤层为例,郑庄区块平均地层水矿化度为 2 600 mg/L,明显高于樊庄区块,二者相差高达 700 mg/L(图 3)。此外,对断层两侧奥陶统含水层进行抽水试验,两侧水质类型和矿化度也存在较大差异^[14]。

然而,在晚白垩纪—古近纪时期,寺头断层作为一条较大规模的走滑断层,由于断裂带内部沿走向断层的产状及排列方式变化引起局部应力场的变化,产生了具有导气作用的张应力集中区和具有封堵作用的压应力集中区。沿断层走向,局部受力作用的不同导致不同部位断层的导气性也不同。断层两侧 3[#] 煤层含气量存在较大差别,位于寺头断裂东侧的樊庄区块煤层含气量比较高,一般在 20 m³/t 以上,部分井区高达 30 m³/t,而位于断层西侧的郑庄区块,尤其以靠近寺头和后城腰断裂附近的区域,煤层实测含气量明显偏低,一般小于 10 m³/t^[15],说明在某些部位断裂对煤层气的运移起到输导作用。

寺头断层现今封闭性受多重因素共同控制,如两侧岩性配置关系、泥岩涂抹效应、成岩胶结作用等^[16-17]。通过计算断层泥比率(shale gouge ratio, SGR)和泥岩涂抹潜势(clay smear potential, CSP):

$$CSP = \sum \frac{\text{泥岩厚度}^2}{\text{断层内某一点至泥岩距离}}$$

$$SGR = \sum \frac{\text{泥岩厚度} \times \text{断层带内泥岩比率}}{\text{断距}} \times 100\%$$

发现寺头断层的不同部位 CSP 和 SGR 差异较大(图 4)。其中,寺头断层上升盘的山西组 3[#] 煤层,随着断层断距的变大,下降盘与其对接的地层由山西组逐渐向下石河子组过渡,CSP 和 SGR 由大变小,封闭性由好变差,在空间上具有较强的非均质性^[18]。如图 4 中选取的 3 个剖面,剖面 I 及剖面 III 的 CSP/SGR 明显小于剖面 II,说明寺头断层在剖面 II 的位置泥岩涂抹势较高、断层泥比率较大,封闭性与其他两个剖面相比极好,分析认为该剖面处于走滑断层中的压应力集中区,对气藏的侧向运移具有明显封堵作用;剖面 III 则为封闭性最差的地区,此处气藏无法得到有效保存,逸散到地表从而发生气藏的破坏,分析认为该剖面处于走滑断层中的拉应力区域,不能对气藏产生有效的保存作用。

4 断裂对天然气运移的控制作用

油气能够在断裂系统中运移的主要动力是地震泵作用或深部地层超压作用,通道为断裂带内部的破碎带及诱导裂缝带^[19]。其中,破碎带位于断裂的中心位置,主要以裂隙作为输导通道,其输导机制因断裂性质的不同而不同:①在岩石致密的压性和压扭性断裂中,颗粒排列紧密,缝洞极不发育,孔渗性差,其中形成的断层泥和糜棱岩具有很好的封闭性;②在张性和张扭性断裂中,缝洞发育,颗粒大小混杂,具开启性,是油气运移的良好通道,对于油气运移有重要作用。诱导裂缝带位于破碎带和正常原岩之间的过渡带,距破碎带越近则裂隙分布越多,发育越好,反之则类型分布越少,发育越差,裂隙密度越小。油气在诱导带中的运移通道主要是裂隙和构造连通孔隙。

寺头断层作为研究区 NE 向展布的最大规模断层,其输导作用研究对于整个区块具有重要意义。经钻探得知,寺头断层破碎带胶结致密,导气、导水能力差,地下水在重力作用下从高势能的东南部向西北方向顺层流动,遇到寺头断层形成水力滞留封闭区,形成煤层气藏水动力封堵边界。寺头断层作为一条规模较大的

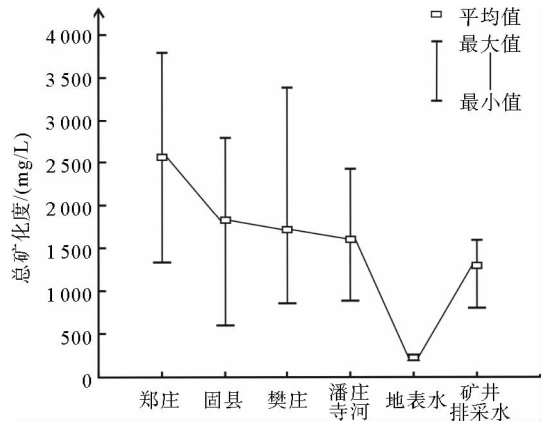


图 3 沁水盆地不同区块 3[#] 煤层水矿化度分布图

Fig. 3 Distribution graph of the water salinity of the 3[#] coal seam in different blocks, Qinshui Basin

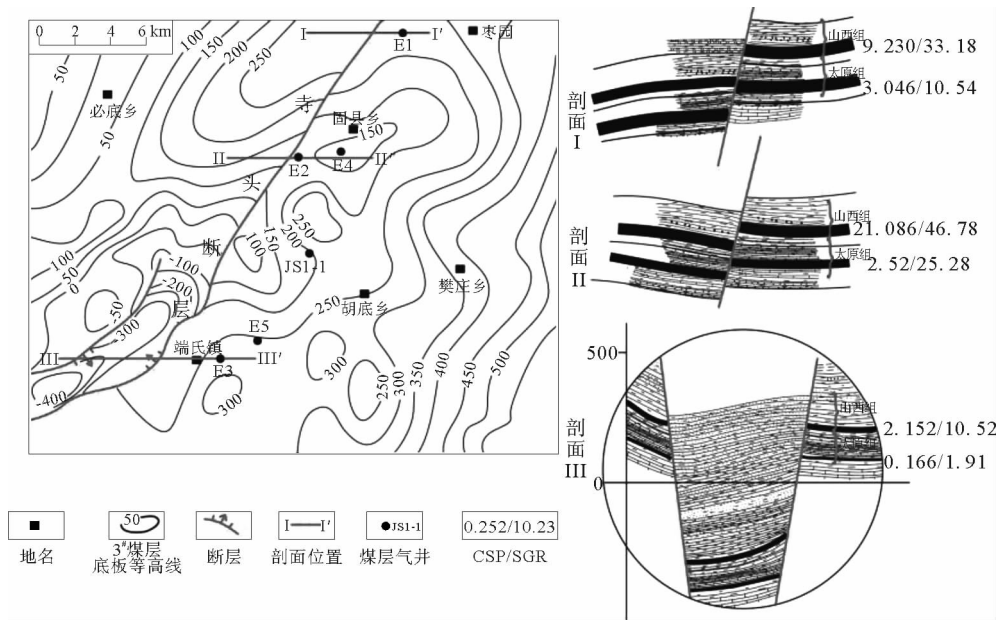


图4 沁水盆地寺头断层不同部位两盘对接关系及封闭性评价

Fig. 4 Butt relations between two sides and closeness in different parts of Sitou Fault, Qinsui Basin

走滑断层,沿断层产状及排列方式变化,局部构造应力场也会发生变化,产生局部张应力集中区和压应力集中区(图5),使走滑断裂带产生较强的非均质性,在某些部位造成增压形成压应力集中区,而在另一些部位释压形成局部引张区。区内上古生界气源岩共有三套,分别为煤岩、暗色泥岩、暗色石灰岩,其中以煤岩为主要气源岩。气藏形成以后,侧向运移至断层位置时,引张区是横张、纵张裂缝以及岩溶发育最有利的地区,对于游离气的垂向运移具有很好的输导作用,而压应力集中区则由于挤压应力的作用,对于游离气的侧向运移起到了封堵作用。

寺头断层对油气的控制作用有封堵和输导两个方面,这主要是因为断层内部局部应力场的不同,使走滑断裂带内部具有较强的非均质性,直接控制断裂带内不同构造部位储层发育程度和气藏的聚集分布。断层的水平走滑位移在断层两盘形成不同的应力状态,导致差异升降位移,形成不同的构造形态,压应力集中的地区挤压上升,而张应力集中的地区拉伸下沉,发育大量张裂缝,为含油气流体汇聚的低势区,由此划分出断层两侧的伸展区和聚敛区(图6)。

寺头断层的挤压区和拉伸区分别位于两种不同的应力区,导致在断层的不同部位对气藏的作用也不相同。郑庄区块寺头断层下降盘3[#]煤层不同部位的实测含气量存在较大差别(图7),其最高值和最低值相差可达20 m³/t,同时含气量变化与 $\delta^{13}\text{C}_1$ (Peedee Belemnite, PDB 标准)变化之间存在相关性,即煤层实测含气量越低, $\delta^{13}\text{C}_1$ 越轻,则该处为断层的张应力集中区,对油气的运移起输导作用;反之,位于具有封堵作用的压应力集中区。在封闭性相对较差的断层局部部位,含气量降低的同时,由于煤层CH₄与大气CO₂之间发生的碳同位素交换或地层水的差异溶解作用,也可导致 $\delta^{13}\text{C}_1$ 明显变轻。

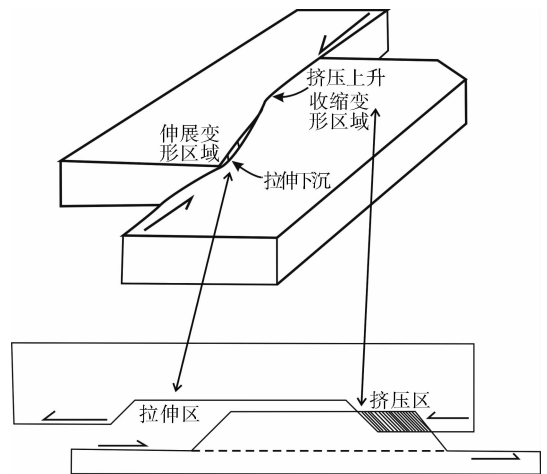


图5 沁水盆地寺头断层位移示意图

Fig. 5 Exhibition diagram of displacement of Sitou Fault, Qinsui Basin

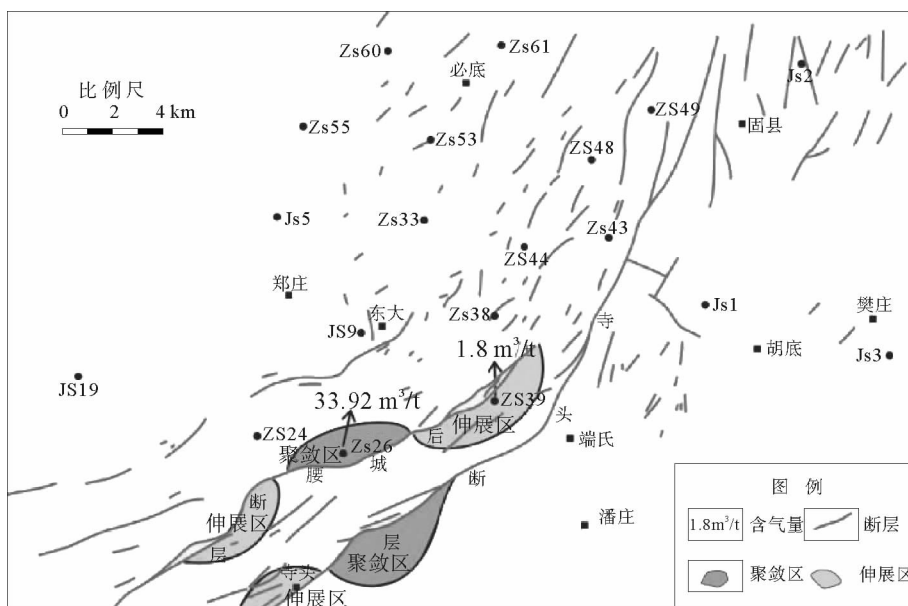


图 6 沁水盆地寺头断层两侧聚敛区及伸展区

Fig. 6 The convergent area and stretching area on both sides of Sitou Fault, Qinsui Basin

虽然寺头断层对煤层气藏的作用具有封堵和散失两方面,但在地质历史时期无疑却属于输导断层,对煤层气藏起到了调整和破坏作用。结合区域构造演化可知,沁水盆地煤岩的二次生烃作用主要发生于燕山晚期,而寺头断层的发育开始于燕山期,成熟于喜马拉雅早期^[16],在这个阶段,断层活动性较强,处于开放状态。一方面,断裂切割煤层,破坏煤层顶板的封闭性能,加速煤层吸附气的解吸和扩散;另一方面,沟通了煤储层附近的含水层,使得部分天然气呈溶解状态散失,解吸的游离气或水溶气随着地下水流动,沿断裂垂向运移,到达地表发生逸散。这种破坏作用使得现今寺头断层和后城腰断层之间地堑 3[#] 煤层实测含气量或含气饱和度比其他地方偏低。以郑试 39 井为例(图 8),3[#] 和 15[#] 煤层实测平均含气量(空气干燥基)分别为 1.49 m³/t 和 1.39 m³/t,且大部分 3[#] 煤岩样品中的 N₂ 组分浓度较高,均超过 50%。说明由于断层的活动,沟通了古煤层气藏和大气,使两者发生交换,CH₄ 大量散失,而 N₂ 组分浓度明显升高。

5 结论

1) 沁南地区寺头断层现今封闭性较好,为封闭性断层。但在地史时期主要起输导作用,对气藏起到了破坏作用,因为研究区煤岩二次生烃的主要时期发生在燕山晚期,而该时期寺头断层活动性较强,处于开放状态,沟通了古煤层气藏和大气,从而对古气藏产生了极大的破坏作用。

2) 寺头断层在晚白垩纪—古近纪走滑运动时期,由于在空间上的非均质性较强,使其在不同部位受力作用不同,而产生对油气运移有封堵作用的压应力集中区和对油气运移有输导作用的张应力集中区。张应力

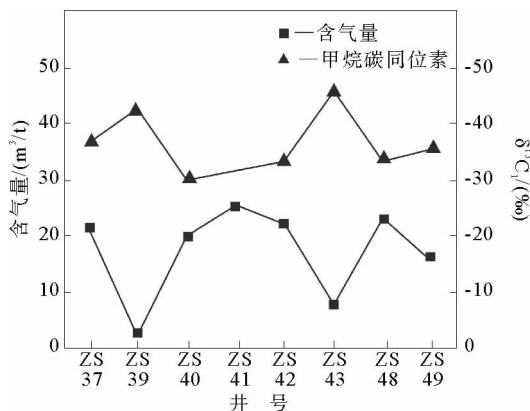


图 7 沁水盆地郑庄区块寺头断层下降盘 3[#] 煤岩实测含气量与 δ¹³C₁ 相关性分析

Fig. 7 Correlation analysis between the 3[#] coal gas content measured and the δ¹³C₁ in the downthrow side of Sitou Fault in Zhengzhuang Block, Qinsui Basin

集中区拉伸下沉的同时,发育大量张裂缝,对油气的输导起到了良好的通道作用;而压应力集中区,则会对油气的运移产生极强的封堵作用。

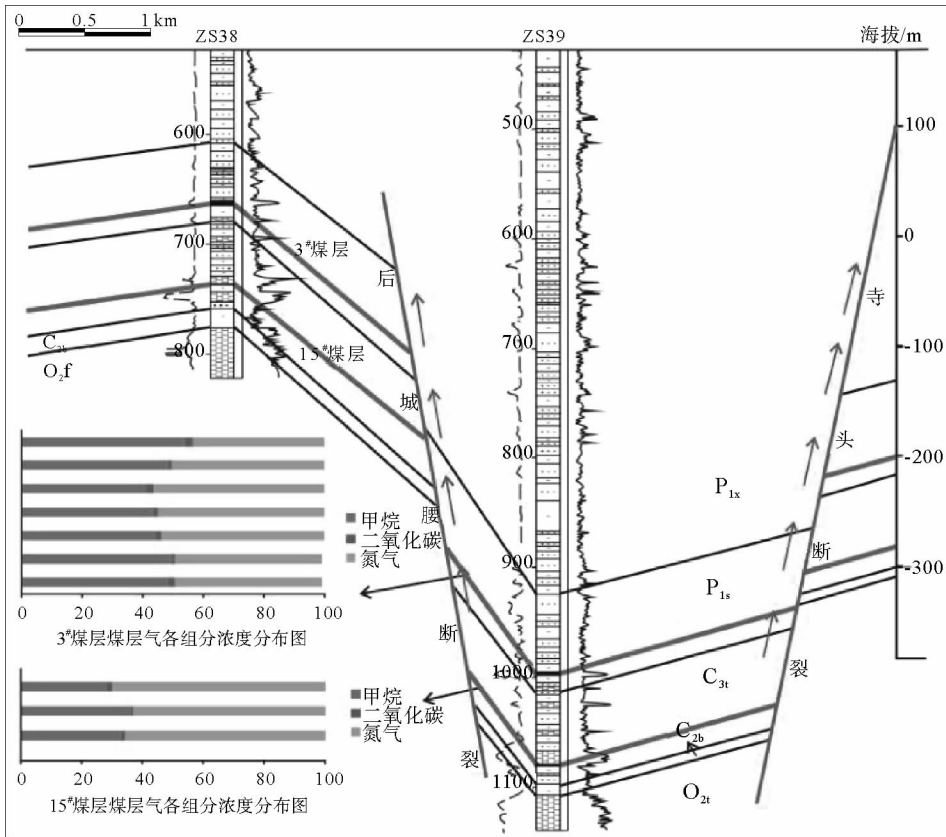


图 8 寺头断层对天然气运移的影响示意图

Fig. 8 Exhibition diagram of Sitou Fault's influence on the migration of the natural gas

3) 寺头断层两侧煤层气含量不同,煤层气甲烷碳同位素的组成变化与断层对天然气的输导引起的气藏调整与破坏作用有关。分析可知,位于输导断层附近的煤岩实测含气量数值较低,同时甲烷碳同位素比值也相对较低,说明该断层部位 CH_4 气体大量散失,而 N_2 等大气组分浓度较高,气藏遭到破坏;反之,处于封堵断层部位附近的煤岩实测含气量数值则相对较高,同时甲烷碳同位素比例也相对较高,气藏保存较好。

参考文献:

- [1] 高长海, 查明, 张新征, 等. 埕北断坡区断层输导体系与油气成藏模式[J]. 新疆石油地质, 2007, 28(6): 721-724.
Gao Changhai, Zha Ming, Zhang Xinzheng, et al. Fault transport system and hydrocarbon accumulation pattern in Chengbei fault-ramp area[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2007, 28(6): 721-724.
- [2] 刘泽容, 信荃麟, 邓俊国, 等. 断块群油气藏形成机制和构造模式[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998: 23-26.
- [3] 赵密福, 李亚辉, 信荃麟, 等. 鲁克沁构造带稠油成藏机制研究[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2001, 25(1): 51-54.
Zhao Mifu, Li Yahui, Xin Quanlin, et al. Forming mechanism of heavy crude in Luke-Qin structure belts[J]. Journal of the University of Petroleum, China, 2001, 25(1): 51-54.
- [4] 刘伟, 窦齐丰, 王韶华. 断层封闭性综合分析方法: 以永安油田沙二下油藏为例[J]. 新疆石油地质, 2003, 24(4): 289-291.
Liu Wei, Dou Qifeng, Wang Shaohua, et al. Integrated approach of sealing properties of fault in complex fault block oil-gas field; An example of the lower member of Sha-2 reservoir in Yong'an oilfield[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2003, 24(4): 289-291.
- [5] 陈永娇, 周新桂, 于兴河, 等. 断层封闭性要素与封闭效应[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(6): 38-40.

- Chen Yongqiao, Zhou Xingui, Yu Xinghe, et al. Sealing factors of faults and their sealing effects[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(6): 38-40.
- [6] 李平平. 叠合型盆地断层封闭性评价的地质模型[J]. 新疆石油地质, 2005, 26(2): 164-166.
Li Pingping. Geologic model for fault sealing evaluation of superimposed basins[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2005, 26(2): 164-166.
- [7] 赵密福. 断层封闭性研究现状[J]. 石油勘探与开发, 2004, 25(3): 333-336.
Zhao Mifu. A Review on fault seal study[J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 25(3): 333-336.
- [8] 梁宏斌, 林玉祥. 沁水盆地南部煤系地层吸附气与游离气共生藏研究[J]. 中国石油勘探, 2011(2): 72-78.
Liang Hongbin, Lin Yuxiang. Study on coexistence of absorbed gas and free gas in coal strata south of Qinshui Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2011(2): 72-78.
- [9] 李月, 林玉祥. 沁水盆地构造演化及其对游离气藏的控制作用[J]. 桂林理工大学学报, 2011(4): 481-487.
Li Yue, Lin Yuxiang. Tectonic evolution of Qinshui Basin and free gas reservoir control[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2011(4): 481-487.
- [10] 梁宏斌, 张璐. 沁水盆地樊庄区块构造对煤层气富集的控制作用[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2012, 31(1): 1-9.
Liang Hongbin, Zhang Lu. Control action of structure in Fanzhuang block of Qinshui Basin on coal-bed gas field enrichment [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2012, 31(1): 1-9.
- [11] 孟庆春, 张永平, 郭希波, 等. 沁水盆地南部高煤阶煤层气评价工作及其成效: 以郑庄-樊庄区块为例[J]. 天然气工业, 2011, 31(11): 14-17.
Meng Qingchun, Zhang Yongping, Guo Xibo, et al. Evaluation of CBM in high-rank coal deposits in the southern Qinshui Basin: A case study of Zhengzhuang and Fanzhuang blocks[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(11): 14-17.
- [12] 陈刚. 沁水盆地燕山期构造热事件及其油气地质意义[J]. 西北地质科学, 1997, 18(2): 63-67.
Chen Gang. Tectothermal event of the Yanshanian and its significance in Qinshui Basin[J]. Northwest Geoscience, 1997, 18(2): 63-67.
- [13] 丰庆泰. 沁水盆地柿庄南区块煤层气藏地质特征[J]. 山西大同大学学报: 自然科学版, 2012, 28(3): 72-76.
Feng Qingtai. The geological characteristics of CBM reservoir of southern Shizhuang in Qinshui Basin[J]. Journal of Shanxi Datong University: Natural Science, 2012, 28(3): 72-76.
- [14] 段利江. 晋城地区郑庄区块煤层气解吸分馏特征研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2007: 36-42.
- [15] 焦双志, 徐大明, 孟庆春, 等. 沁水盆地郑庄区块煤层气储层特征及储量计算方法[J]. 中国煤层气, 2011, 8(1): 6-11.
Jiao Shuangzhi, Xu Taiming, Meng Qingchun, et al. Characteristics of CBM reservoir in Zhengzhuang block in Qinshui Basin and method for calculation of reserves[J]. China Coalbed Methane, 2011, 8(1): 6-11.
- [16] 李金海. 沁水盆地东南部3号煤层气藏富集高渗控制因素研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2009: 22-29.
- [17] 孙平. 煤层气成藏条件与成藏过程分析[D]. 成都: 成都理工大学, 2007: 46-51.
- [18] 王猛, 朱炎铭, 李伍, 等. 沁水盆地郑庄区块构造演化与煤层气成藏[J]. 中国矿业大学学报, 2012, 41(3): 425-432.
Wang Meng, Zhu Yanming, Li Wu, et al. Tectonic evolution and reservoir formation of coalbed methane in Zhengzhuang Block of Qinshui basin[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2012, 41(3): 425-432.
- [19] 付晓飞, 方德庆, 吕延防, 等. 从断裂带内部结构出发评价断层垂向封闭性的方法[J]. 地质科学, 2005, 30(3): 328-336.
Fu Xiaofei, Fang Deqing, Lü Yanfang, et al. Method of evaluating vertical sealing of faults in terms of the internal structure of fault zones[J]. Earth Science, 2005, 30(3): 328-336.

(责任编辑: 高丽华)