

沁水盆地致密气成藏条件与勘探潜力研究

梁建设,王存武,柳迎红,高印军,杜江峰,冯汝勇,朱学申,余杰

(中海油研究总院,北京 100027)

摘要:沁水盆地常规天然气和致密气资源潜力目前仍存在较大争议。为探索沁水盆地致密气勘探潜力,对沁水盆地中南部已钻煤层气参数井重新进行了测井解释,发现了多个致密气可疑层,并重点从烃源岩条件和储集条件对该盆地致密气成藏条件进行了分析,探讨了该盆地致密气勘探潜力。研究表明,沁水盆地具有较好的致密气成藏条件,晚石炭世—早二叠世沁水盆地整体处于海陆过渡相环境,发育了多套煤系烃源岩,具有广布式分布、大面积生烃的特征;上二叠统发育多套三角洲平原分流河道相和河流相砂岩储层,与分流间湾相和湖泊相泥岩形成较好的储盖组合。综合来看,沁水盆地具有较好的致密气烃源条件和储盖条件,可以形成下生上储型致密气藏,具有一定的勘探潜力,应引起重视。

关键词:沁水盆地;致密气;成藏条件;勘探潜力

中图分类号:TE122

文献标志码:A

文章编号:1672-1926(2014)10-1509-11

引用格式:Liang Jianshe, Wang Cunwu, Liu Yinghong, *et al.* Study on the tight gas accumulation conditions and exploration potential in the Qinshui Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(10): 1509-1519. [梁建设,王存武,柳迎红,等. 沁水盆地致密气成藏条件与勘探潜力研究[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(10): 1509-1519.]

0 引言

近年来致密气已成为天然气勘探开发的重要领域,2012年,致密气产量约占全球非常规气产量的75%。美国已在23个盆地发现了900多个致密气田,可采储量为 $6 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[1-2],2012年产量达 $1\ 630 \times 10^8 \text{ m}^3$,约占美国天然气产量的24%。我国致密气勘探开发也取得巨大成功,在鄂尔多斯盆地、四川盆地及塔里木盆地相继发现了一批致密气田,累计探明致密气储量为 $3.6 \times 10^{12} \text{ m}^3$,2013年致密气产量达 $340 \times 10^8 \text{ m}^3$,占全国天然气总产量的近1/4^[3]。这其中,尤以鄂尔多斯盆地致密气勘探开发最为成功,在上古生界石炭系—二叠系先后发现了米脂、乌审旗、大牛地、神木和苏里格等5个致密气大气田,致密气资源量高达 $10.37 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[4-5]。

沁水盆地与鄂尔多斯盆地以吕梁山相隔,在中

生代之前与鄂尔多斯盆地同为华北克拉通盆地的一部分,具有相似的沉积环境,发育相似的地层^[6]。然而,沁水盆地在常规油气和致密气方面的勘探却一直未有突破。早在20世纪60年代和70年代,该盆地就开始了以古生界和新近系为目的层的石油地质普查,先后钻探了19口井,但均未见任何油气显示^[7]。80年代又进行了以上古生界煤成气为目的的石油地质普查,共钻探9口井,其中阳1井获得工业气流。阳1井位于沁水盆地东北部的阳泉地区聂家庄背斜^[8],该背斜于1959年钻探的矿1井在石炭系发生井喷并烧毁井架。为了评价该构造的含气性,于1982年钻探了阳1井,该井在太原组上部灰岩中(22.8~25.08m)测试获得工业气流,用8mm油嘴放喷10h,井口压力稳定在1.5MPa,折合产量为 $1\ 774 \text{ m}^3/\text{d}$ ^[8-9]。此后,沁水盆地进入了以煤层气为主的勘探开发阶段。

收稿日期:2014-03-20;修回日期:2014-05-08.

基金项目:国家科技重大专项“深煤层气开发技术研究和装备研制”(编号:2011ZX05042);国家科技重大专项“山西沁水盆地南部煤层气直井开发示范工程(二期)”(编号:2011ZX05060)联合资助.

作者简介:梁建设(1965-),男,陕西富平人,教授级高级工程师,主要从事海洋油气、非常规油气勘探研究. E-mail: liangjsh@cnooc.com.cn.

沁水盆地是否具有致密气勘探潜力一直以来都存在较大争议,这主要是由于前期的探井绝大多数都已失利。笔者通过对沁水盆地已钻的部分煤层气参数井重新开展测井解释,复查出多口井具有可疑致密气层,坚定了沁水盆地具有一定的致密气勘探潜力的信心。同时试图通过对沁水盆地致密气成藏条件的解剖,重点从烃源条件和储集条件出发,论述沁水盆地的致密气成藏条件以及致密气勘探潜力。

沁水盆地位于华北克拉通盆地的中心位置,西缘以霍山大断裂与霍山隆起相隔,东缘以晋获断裂与太行山隆起相邻,北部和南部分别与五台山隆起和中条山隆起毗邻,面积为 $4.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图 1)。沁水盆地是我国煤层气勘探的重点地区之一,该区煤层厚度大、埋藏浅,具有较好的煤层气富集条件,是目前最重要的煤层气产区,煤层气地质资源量高

达 $3.97 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 探明储量为 $3\ 384 \times 10^8 \text{ m}^3$, 日产煤层气超过 $175 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

1 地层发育及构造演化特征

沁水盆地基底为上太古界一下元古界变质岩,地层沉积充填序列自下而上依次为古生界奥陶系、石炭系、二叠系,中生界三叠系和新生界第四系(图 1)。沁水盆地的构造演化大致可分为 3 个阶段(图 2)。

(1) 克拉通演化阶段。根据前人^[10-13]的研究成果,从寒武纪到早奥陶世,沁水盆地所在的整个华北克拉通盆地处于一个边缘活动、内部稳定的特定大地构造位置,构造—沉积环境稳定,以陆表海碳酸盐岩沉积为主。中奥陶世以后,由于加里东运动,造成华北地台的整体抬升和沉积间断,导致华北克拉通盆地内上奥陶统、志留系、泥盆系和下石炭统的广泛

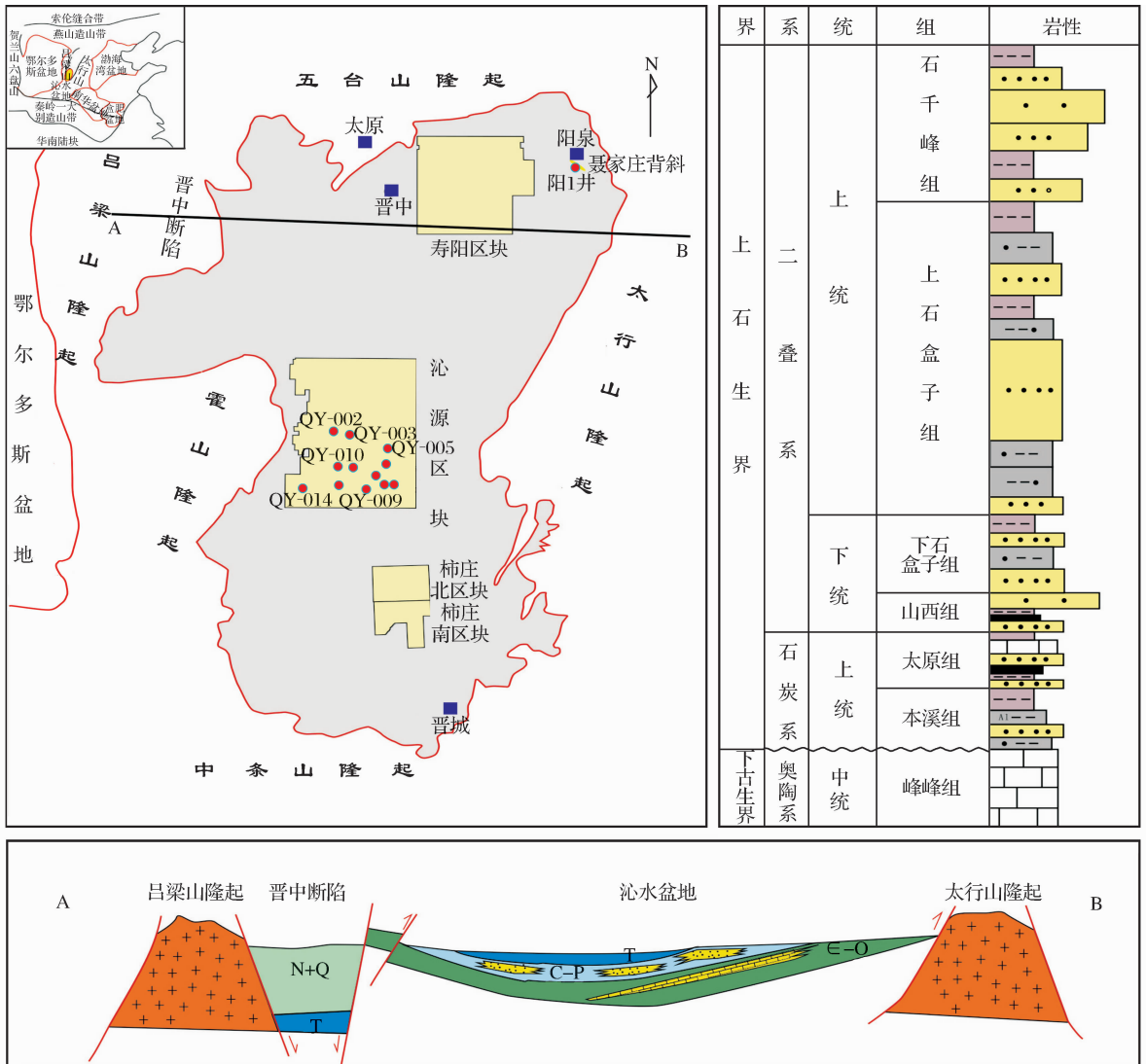


图 1 沁水盆地地理位置示意
Fig. 1 The schematic location of Qinshui Basin

缺失。到中石炭纪晚期,华北克拉通盆地逐渐下沉,进入了晚石炭世乃至整个晚古生代的构造演化序幕和沉积建造阶段。

(2)成盆演化阶段。三叠纪末期一早侏罗世开始,由于太平洋板块与印度板块对华北板块的俯冲,在研究区内形成 NW—SE 向的挤压应力。中国大陆进入陆内变形阶段,沁水盆地东西部的太行山和吕梁山隆起,中间 NNE 向向斜形态逐步形成。燕山运动早期,构造运动强度相对较弱,由于基底的不均一性,形成形态呈复式向斜的沁水盆地雏形,轴部中心在清徐—交城以西一带。燕山运动后期,构造活动强烈,地层垂向变动强度增大,盆地两侧太行山和吕梁山强烈隆起,构造迹线为 NE—NNE 向,同时形成一系列平行展布呈雁列的褶皱、逆冲断层,西北侧狐偃山至祁县一带岩浆活动剧烈。

(3)盆地改造阶段。喜马拉雅运动早期,随着太平洋板块俯冲带向东迁移,欧亚大陆边缘由安第斯型大陆边缘转化为西太平洋沟—弧—盆型大陆边

缘,导致弧后地幔物质活动激化,热地幔上拱,岩石圈侧向伸展,形成本区 NW—SE 向拉张,研究区内形成一些走向 NE—NNE 向的正断层,寺头断层就是该期构造作用下的产物。喜马拉雅运动中后期,受太平洋板块与印度洋板块的联合作用,地幔活动减弱,逐渐由拉张应力场转变为挤压应力场,主压应力方向偏转为 NE—NNE 向。由于喜马拉雅期多次的拉张—挤压抬升,使先期形成的褶皱进一步被改造,逐渐形成现今的构造格局。

2 沉积演化特征

沁水盆地寒武纪—中奥陶世接受了浅海相沉积。此后,华北地区整体抬升,遭受长期风化剥蚀^[14-16]。自中石炭世本溪期开始缓慢沉降,在奥陶系灰岩风化壳之上,受来自 NEE 向海水侵入,形成了陆表海环境,发育了障壁岛—潟湖沉积体系。该期泥炭沼泽相分布局限,持续时间短,仅形成了一些薄煤层或煤线。太原组沉积时期,受阶段性海侵—

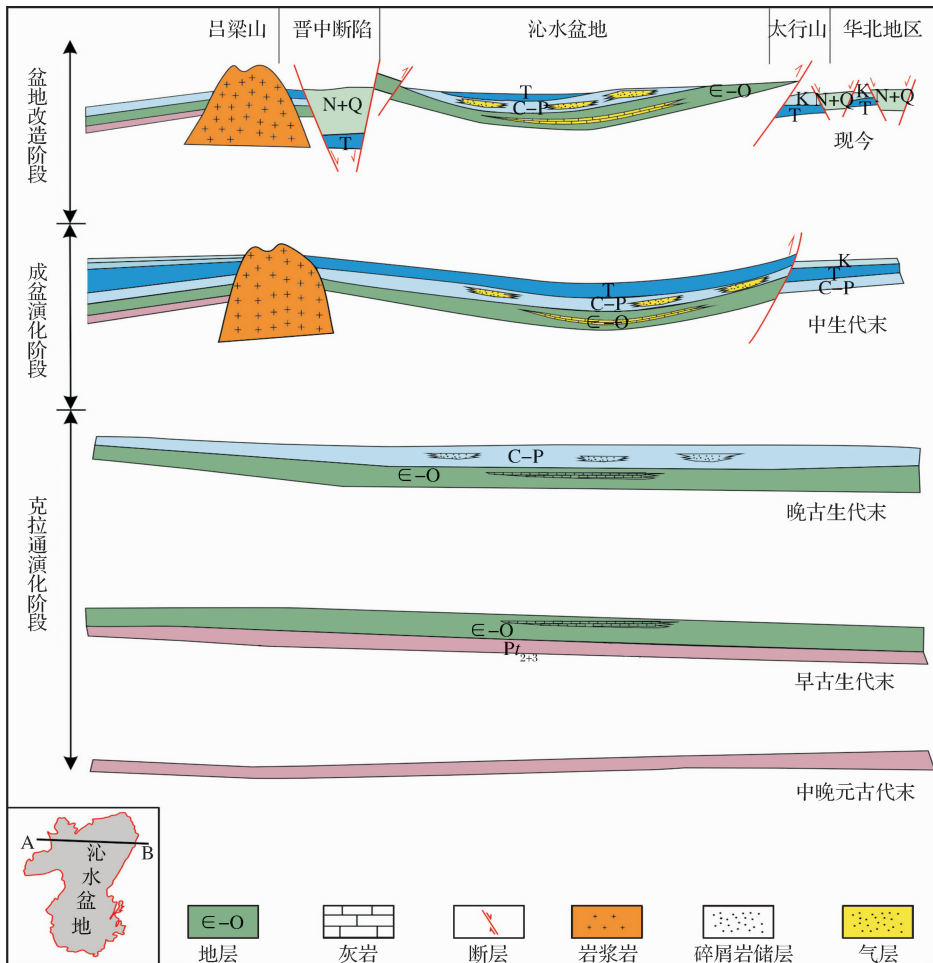


图 2 沁水盆地构造演化示意

Fig. 2 Sketch diagram of tectonic evolution of Qinshui Basin

海退作用,沁水盆地形成了由广阔的碳酸盐台地、障壁岛—潟湖、潮坪、泥炭沼泽为组合的环境,沉积了多个由潟湖或潮坪相泥岩、砂岩→森林沼泽泥炭→碳酸盐台地灰岩组成的旋回性组合,其间沉积了3~4层煤,以中部庙沟灰岩之下的15[#]煤层最发育。该煤层形成于持续时间长、分布面积广的森林泥炭沼泽环境^[17]。进入下二叠统山西组沉积时期,受由北而南缓倾地形控制,海岸线逐渐向南移动,沉积环境由潮坪、潟湖演变为浅水三角洲,中晚期在三角洲平原及前缘背景上发生了多次广布的森林泥炭沼泽化过程,并以泥炭沼泽环境最为发育,沉积了广泛分布的2[#]煤、3[#]煤。

早二叠世晚期至晚二叠世的上石盒子组—石千峰组沉积时期,沉积环境由三角洲平原及前缘演变

为以陆相河流及湖泊为主的环境组合,气候由潮湿转为干旱。进入三叠纪,沁水盆地快速沉降,沉积了厚达数千米的河湖相碎屑岩,使石炭系—二叠系煤层被深埋,接受深成变质作用。早、中侏罗世沉积仅在晋中断陷东侧附近很小范围分布,其他中生代沉积至今仍未被发现。

3 烃源岩发育特征

沁水盆地烃源岩主要为上石炭统太原组及下二叠统山西组煤系烃源岩,包括煤和暗色泥岩。钻井揭示太原组和山西组含煤16层,单层最大厚度为7.8m,煤层总厚度为1.2~23.6m。其中太原组15[#]煤和山西组3[#]煤在全盆地稳定分布(图3),在平面上具有“广布式分布、大面积生烃”的特点。

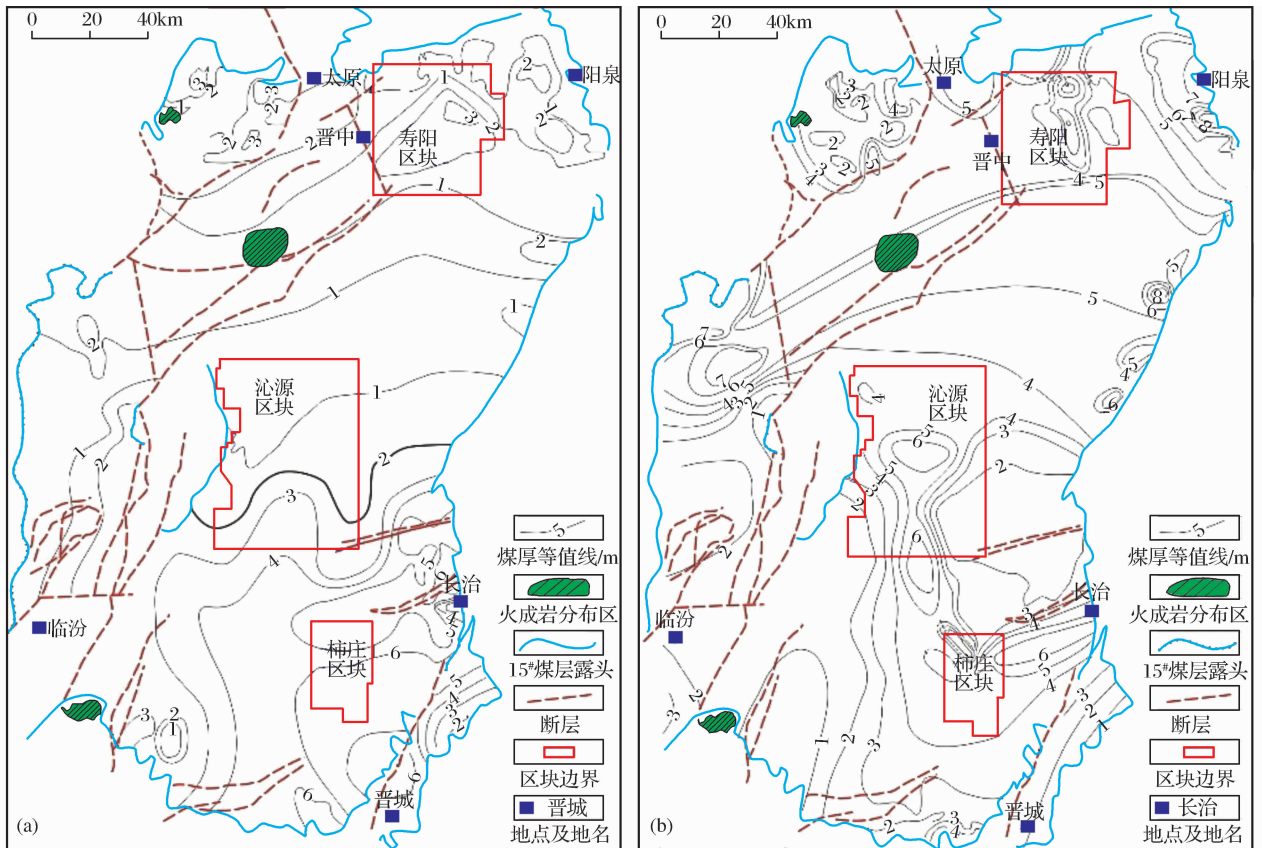


图3 沁水盆地3[#]煤层(a)和15[#]煤层(b)厚度平面分布(据文献[16]修改)

Fig. 3 The flat thickness distribution of coal seam No. 3(a) & NO. 15(b) in Qinshui Basin

3.1 烃源岩热演化史

一般认为,沁水盆地南北两端的煤岩受到燕山期岩浆活动而发生强烈热变质作用,形成烟煤—无烟煤^[18-20],但也有学者^[21-22]认为该地区的高变质煤受到印支期华北板块与扬子板块拼接过程的后缘岩石圈拉伸减薄作用产生的高地温梯度带的烘烤作用

而发生热变质。受岩浆活动的影响,沁水盆地南部石炭系—二叠系煤系烃源岩热演化史呈现阶段性:①在经历晚海西—印支期快速埋藏后,煤系烃源岩 R_o 值达到0.5%并开始生烃;②而后,随燕山运动早期的构造抬升,烃源岩热演化趋于终止,随后又有小幅沉降;③燕山运动中期,岩浆活动强烈,受此影

响石炭系—二叠系煤系烃源岩成熟度急剧增加,形成二次生烃;④晚白垩世至今,随着抬升作用的持续进行,烃源岩生烃作用趋于停止^[23-26](图4)。

3.2 太原组烃源岩

太原组由一套灰色中细粒长石石英砂岩、灰黑色粉砂岩、泥岩、灰岩和煤层组成(图5),厚度为68.28~140.64m,总体上呈北厚南薄的特点,煤层厚为0.4~19.4m,平均为6.36m;暗色泥岩厚度在10~60m之间,平均为35m左右。煤的成熟度在平面上有较大变化,沁水盆地南部最高,沁水、阳城、晋城一带, R_o 值可达2.5%~5.0%,襄汾毛家岭高达6.95%~8.17%,在隆起区 R_o 值仅为2.00%~2.50%,霍山以西是成熟度最低的地区, R_o 值在

0.7%~1.25%之间^[27]。受高演化程度的影响,煤呈现出有机碳含量高、氢指数含量低、生烃潜力低的特点^[27], TOC 平均值为70.86%,氢指数平均值仅为86mg/g $_{TOC}$, S_1+S_2 值平均为50.34mg/g。从这些参数上已不能反映出煤的生烃能力。但根据现今煤层的含气量来看,沁水盆地南部煤含气量普遍可以达到10~18m³/t,中北部也可以达到8~13m³/t,可见在地质历史时期煤作为重要的烃源岩已大量生烃,其生烃能力与鄂尔多斯盆地类似。炭质泥岩 TOC 值介于0.13%~28.97%之间,平均为2.76%, I_H 值平均为22mg/g $_{TOC}$, S_1+S_2 值为0.99mg/g,总体为中等烃源岩, R_o 值平均为2.02%,现今处于过成熟演化阶段。

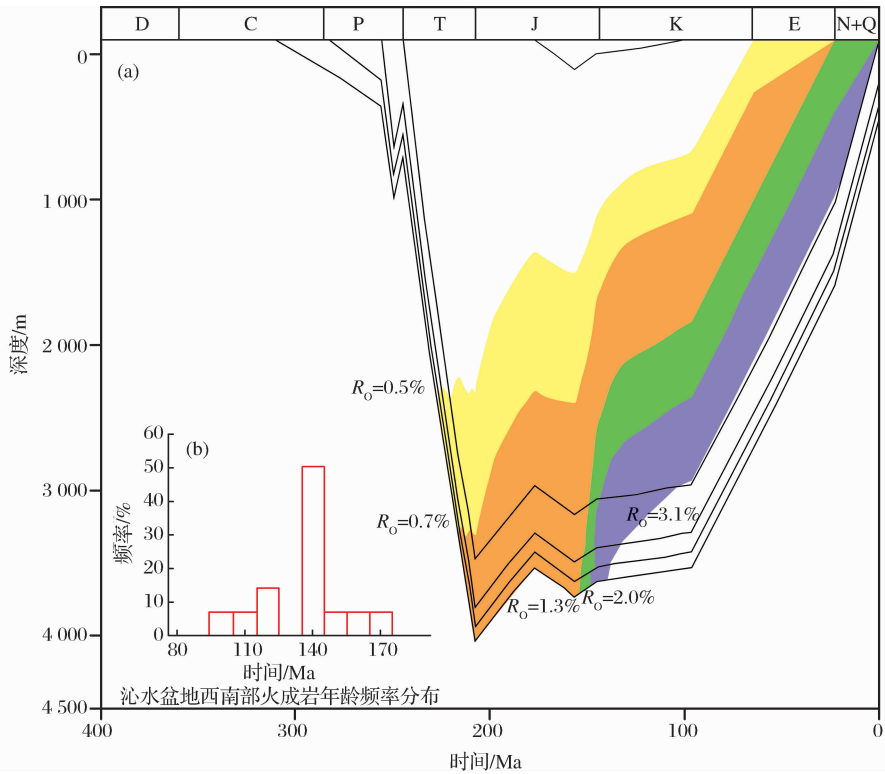


图4 沁水盆地南部二叠系烃源岩热演化史(据文献[23],修改)

Fig. 4 The thermal evolution history chart of Permian source rock in the south of Qinshui Basin

3.3 山西组烃源岩

山西组由一套中细粒长石石英砂岩、灰色粉砂质泥岩、泥岩和煤层组成(图5),总体呈北厚南薄的特点,煤层厚为0.5~11.15m,平均约为6m;暗色泥岩厚度在16~90m之间,平均约为30m。煤的 TOC 值介于40.81%~85.43%之间,平均值高达73.84%, S_1+S_2 值介于0.14~240.6mg/g之间,平均为63.5mg/g, I_H 平均值为86mg/g $_{TOC}$ 。炭质泥岩 TOC 平均值为2.76%, S_1+S_2 平均值为0.99mg/g,但 I_H

平均值仅为19mg/g $_{TOC}$, R_o 平均值为1.92%,现今处于过成熟演化阶段,总体达到中等烃源岩标准(表1)。

4 致密气储层特征

沁水盆地砂岩储层十分发育,主要分布在石千峰组、上石盒子组、下石盒子组、山西组和太原组,本溪组和峰峰组砂岩储层相对较少。笔者以沁水盆地中部沁源区块为例,来说明致密砂岩储层特征。沁源区块位于沁水盆地中部,面积为3388.227km²,

目前钻探煤层气参数井 13 口。笔者对其中的 12 口煤层气参数井进行了致密气复查,发现其中有 7 口井存在致密气层,共解释出气层 31.2m、可疑气层

172.8m。由于这些钻井之前未对砂岩储层开展测试分析工作,资料有限,笔者仅对砂岩储层的厚度、孔隙度等基本特征进行分析。

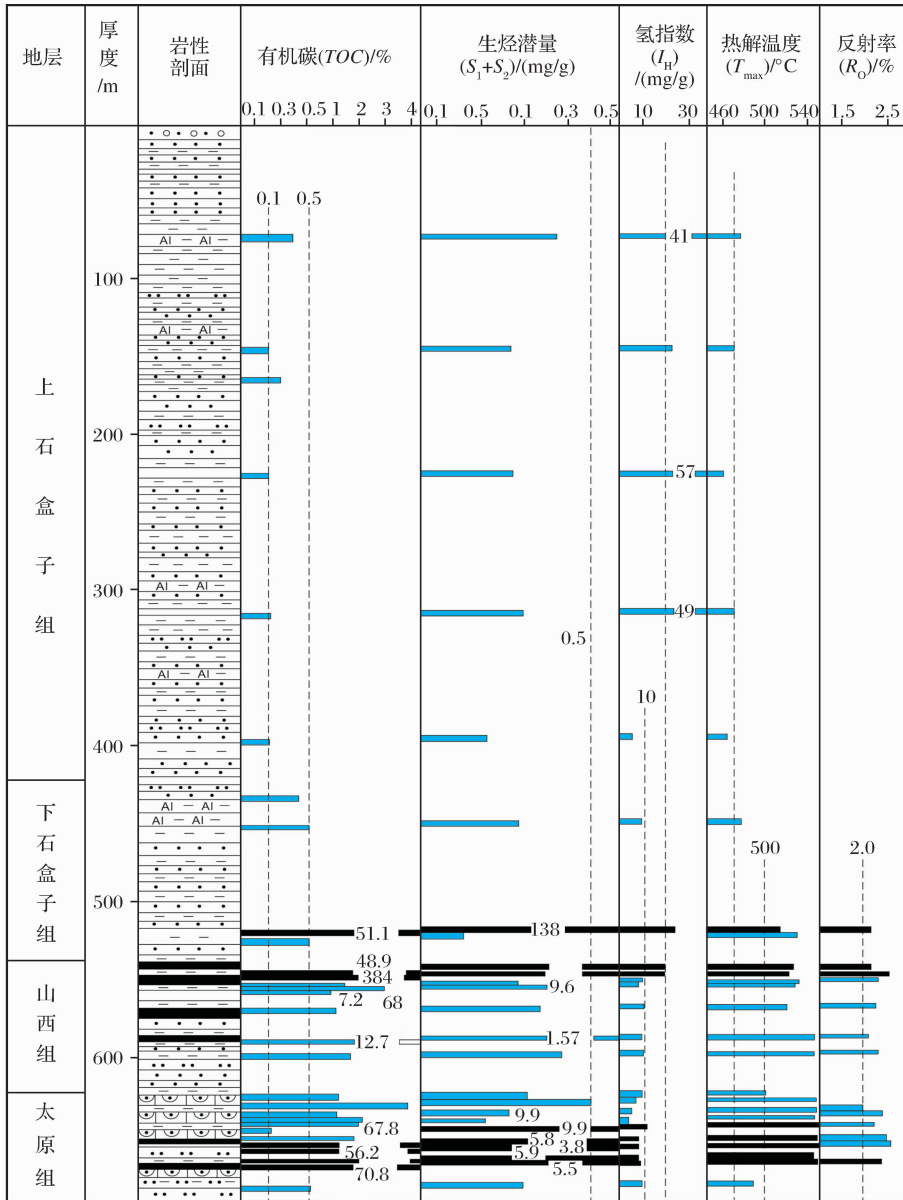


图 5 沁水盆地沁 4 井石炭系—二叠系有机地球化学剖面(据文献[27],修改)

Fig. 5 The Carboniferous-Permian organic geochemistry section of Qin-4 well in the Qinshui Basin

表 1 沁水盆地煤系烃源岩特征参数统计^[27]

Table 1 Characteristic parameters of coal-measure source rock in the Qinshui Basin^[27]

烃源岩层位 (Source Rock Unit)	岩性 (Lithology)	TOC/%		I _H /(mg/g _{TOC})		(S ₁ +S ₂)/(mg/g)		T _{max} /°C		R _O /%		样品数 /个 (Number of Samples)
		范围 (Range)	平均值 (Average)	范围 (Range)	平均值 (Average)	范围 (Range)	平均值 (Average)	范围 (Range)	平均值 (Average)	范围 (Range)	平均值 (Average)	
山西组 (Shanxi Group)	煤 (Coal)	40.81~85.43	73.84	0.2~449	86	0.14~340.6	63.5	437~550	496	0.75~6.95	2.01	77
	暗色泥岩 (Dark Shale)	0.09~20.73	3.06	0~85	22	0.005~14.55	0.99	447~550	510	1.12~3.11	1.92	202
太原组 (Taiyuan Group)	煤 (Coal)	48.51~85.83	70.86	0~308	68	0.05~242.3	50.34	438~550	503	0.82~8.17	2.17	91
	暗色泥岩 (Dark Shale)	0.13~28.97	2.76	0~103	19	0.007~21.17	1.29	447~550	516	1.169~3.19	2.02	255

4.1 储层厚度

砂岩储层主要分布在石千峰组、上石盒子组,呈现单层薄、层数多、总厚度大的特点。单层平均厚度为1.5~7.1m。下石盒子组、太原组砂体发育较差,山西组最差,这3个组砂岩单层平均厚度为0.6~5.6m。

把砂岩储层单层厚度按照<2m、2~5m、5~10m、>10m共4个范围进行统计,沁源区块砂层厚度以<2m和2~5m为主[图6(a)]。石千峰组砂岩层厚度以<2m为主,上石盒子组砂岩层厚度以<5m为主,下石盒子组砂岩层厚度以<5m为主,山西组砂岩层以<2m为主,太原组砂岩层厚度以<5m为主[图6(b)]。

4.2 储层孔隙度

沁源区块砂岩储层没有孔隙度实测数据,笔者将测井解释孔隙度进行了分析。把砂岩储层孔隙度按照<2%、2%~4%、4%~6%、6%~8%、>8%共5个范围进行统计,从统计结果来看[图7(a)],沁源

区块砂岩层孔隙度以<6%为主,属于致密储层。石千峰组砂岩层孔隙度以<6%为主,上石盒子组砂岩层孔隙度以2%~8%为主,下石盒子组砂岩层孔隙度以<8%为主,山西组砂岩层孔隙度以<2%为主,太原组砂岩层孔隙度以<4%为主[图7(b)]。

5 致密气勘探潜力

5.1 致密气气层特征

以沁源区块为例,致密气层具有明显的测井响应特征,气测异常明显,低自然伽马(一般小于30API),高电阻率值(普遍大于100Ω·m),体积密度一般小于2.50g/cm³,中子密度具有明显的“挖掘”效应(图8)。气层的测井曲线特征与鄂尔多斯盆地临兴地区、神府地区典型气层测井响应特征具有相似性,如TB-3井在1592.5~1595.5m气层之间,也具有“低密度、低伽马、高电阻”的特征,中子密度也具有明显的挖掘效应,未压裂的天然气产量可达9046m³/d,显示出较好的含气性。

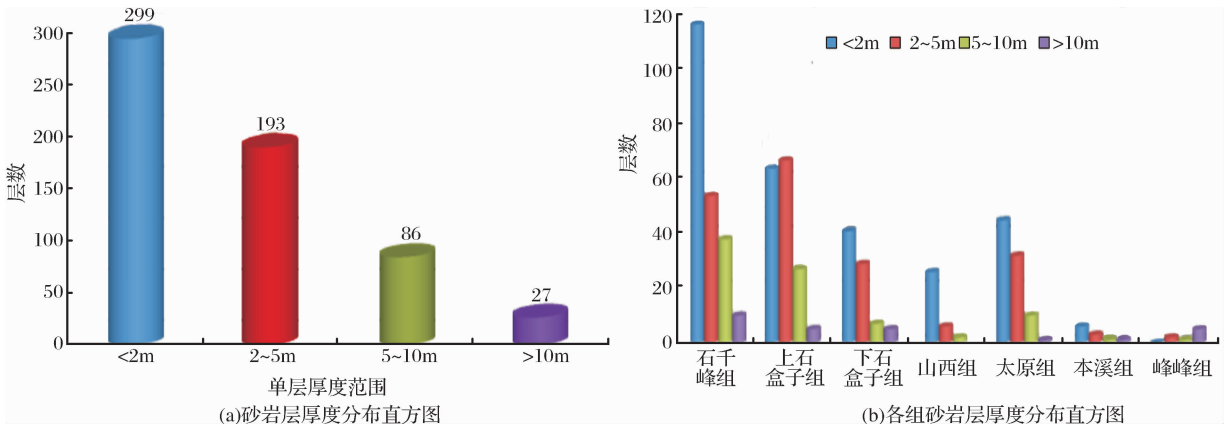


图6 砂岩层厚度分布

Fig. 6 The thickness distribution of sandstone layer

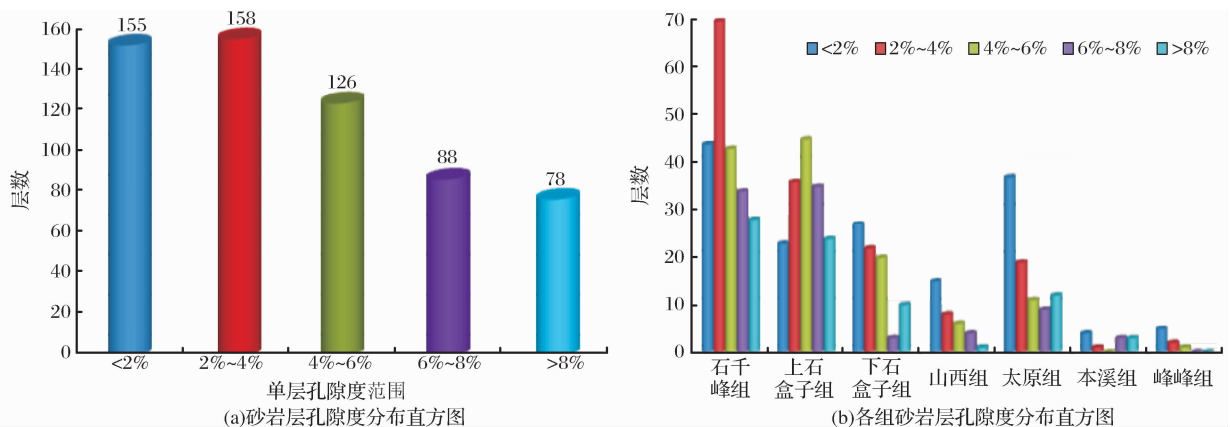


图7 砂岩层孔隙度分布

Fig. 7 The porosity distribution of sandstone layer

沁源区块解释的气层和可疑气层主要分布于下石盒子组和太原组(表 2),石千峰组、上石盒子组仅在 QY-008 井中解释出气层 25.9m/9 层、可疑气层 49m/6 层,此外本溪组和峰峰组解释出少量气层。沁源区块气层厚度以 <2m、2~5m 为主[图 9(a)]。石千峰组气层厚度以 <2m 为主,上石盒子组气层

厚度以 >5m 为主,下石盒子组气层厚度以 <5m 为主,太原组气层厚度以 <5m 为主。沁源区块气层孔隙度以 6%~10% 为主,石千峰组气层孔隙度以 6%~10% 为主,上石盒子组气层孔隙度以 6%~10% 为主,下石盒子组气层孔隙度以 8%~10% 为主,太原组气层孔隙度以 6%~10% 为主[图 9(b)]。

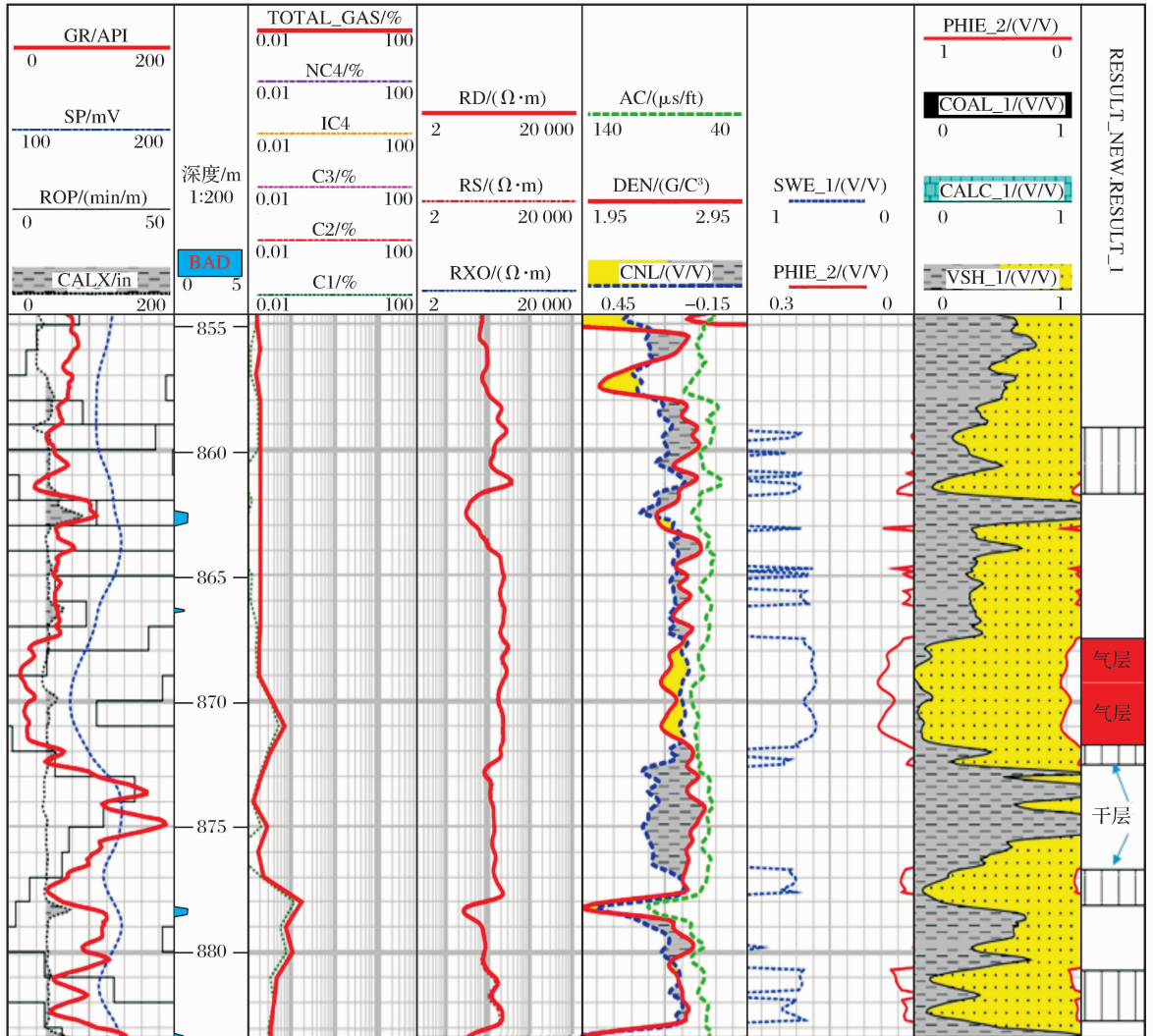


图 8 QY-002 井下石盒子组气层解释成果

Fig. 8 The interpretation result map of gas reservoir in the Xiashihezi Formation of QY-002 well

5.2 致密气勘探潜力

沁源区块和柿庄北区块煤层气参数井复查出多个可疑气层,目前还未测试,从已发现的可疑致密气层来看,无论是气层厚度、测井响应特征,还是气层的层位、分布,均与鄂尔多斯盆地现有致密气类似。鄂尔多斯盆地已经成为我国最大的致密气勘探开发的基地,目前已发现的较大的致密气田有 9 个,其中苏里格、乌审旗、神木和大牛地等多个探明储量超千

亿方大型气田为致密砂岩气田。苏里格气田为我国目前最大的气田,主要含气层系为上古生界二叠系石盒子组盒 8 段、山西组山 1 段。从与鄂尔多斯盆地类比表明,沁水盆地同样发育石炭系一二叠系煤系烃源岩,也具有广布式生烃、较好的储盖条件等特点;不同点是埋藏略浅,构造较复杂。因此,笔者认为,沁水盆地除了具有较大的煤层气勘探潜力外,致密砂岩气也具有一定的勘探前景,应引起重视。

表 2 沁源区块测井解释成果数据

Table 2 The well logging interpretation data in Qinyuan block

井号	层位	顶深 /m	厚度 /m	有效孔隙度/%	气层类别	井号	层位	顶深 /m	厚度 /m	有效孔隙度/%	气层类别
QY-002	下石子盒子组	836.5	3.3	8.6	可疑气层	QY-008	石千峰组	950.3	1.0	7.9	可疑气层
	下石子盒子组	867.5	4.2	9.7	气层		石千峰组	953.1	1.4	6.8	可疑气层
	太原组	955.0	2.3	5.3	可疑气层		石千峰组	955.3	3.1	6.2	可疑气层
	太原组	1 032.8	3.3	8.3	可疑气层		石千峰组	971.1	0.4	8.4	气层
	太原组	1 037.4	4.4	12.3	可疑气层		石千峰组	972.2	3.0	6.4	气层
	本溪组	1 044.6	7.6	10.0	气层		石千峰组	977.6	1.3	11.5	气层
	本溪组	1 056.5	7.6	13.3	可疑气层		石千峰组	984.0	1.5	4.3	气层
	峰峰组	1 076.8	2.3	5.6	可疑气层		石千峰组	1 065.2	8.7	9.5	气层
QY-003	山西组	1 175.0	1.7	7.5	可疑气层		上石子盒子组	1 174.6	5.5	9.7	气层
	太原组	1 321.5	15.4	10.2	可疑气层		上石子盒子组	1 234.7	10.9	7.0	可疑气层
	太原组	1 338.8	0.9	6.1	可疑气层	上石子盒子组	1 275.9	16.1	9.8	可疑气层	
	太原组	1 362.0	2.4	9.8	可疑气层	上石子盒子组	1 311.8	7.2	8.8	可疑气层	
QY-007	下石子盒子组	1 611.1	5.2	9.5	可疑气层	上石子盒子组	1 340.1	9.1	10.4	可疑气层	
	下石子盒子组	1 624.5	16.8	8.8	可疑气层	上石子盒子组	1 479.7	3.8	7.2	可疑气层	
	下石子盒子组	1 656.3	4.8	5.0	可疑气层	上石子盒子组	1 528.7	1.9	7.0	可疑气层	
	太原组	1 767.8	3.7	5.6	可疑气层	太原组	1 730.4	4.7	7.3	可疑气层	
	太原组	1 786.4	2.2	6.1	可疑气层	QY-010	下石子盒子组	1 125.2	3.3	9.9	可疑气层
	太原组	1 790.5	0.7	7.2	可疑气层		下石子盒子组	1 144.4	1.8	9.0	可疑气层
	太原组	1 792.5	3.0	14.0	可疑气层		下石子盒子组	1 148.4	0.8	5.4	可疑气层
	太原组	1 798.1	0.5	8.4	可疑气层		下石子盒子组	1 150.3	1.6	5.1	可疑气层
QY-012	本溪组	1 772.0	1.6	6.4	可疑气层		下石子盒子组	1 176.6	1.6	12.4	可疑气层
QY-014	下石子盒子组	1 126.8	10.1	9.8	可疑气层		太原组	1 279.7	1.9	8.1	可疑气层
							太原组	1 284.8	3.2	7.9	可疑气层
							太原组	1 289.7	7.2	12.1	可疑气层

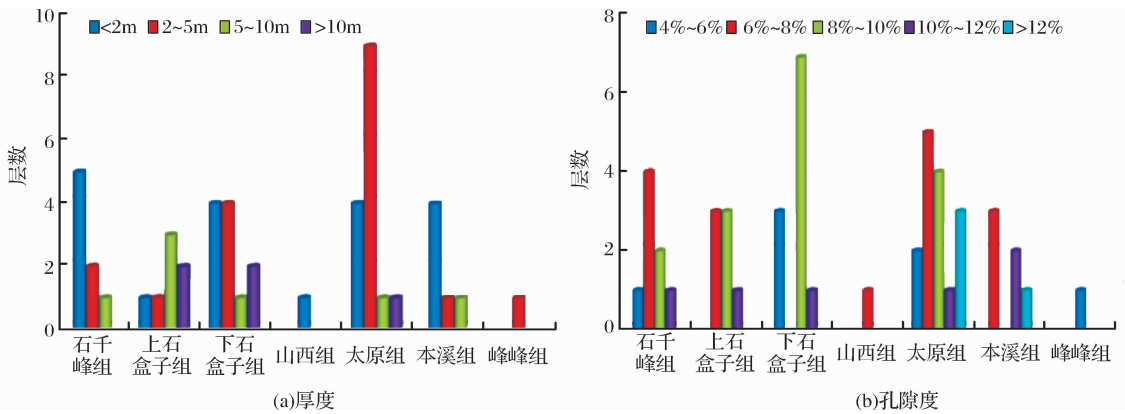


图 9 沁源区块 7 口钻井气层厚度和孔隙度统计直方图
 Fig. 9 The thickness and porosity histogram of 7 wells in Qinyuan block

6 结论

通过对沁水盆地石炭系—二叠系煤系烃源岩及致密砂岩储层发育特征的研究,认为沁水盆地具备形成致密气的基本地质条件,并被已钻井致密气复

查结果所证实。但同时,沁水盆地在燕山期和喜马拉雅期遭受了强烈构造变形,燕山期岩浆活动又造成煤系烃源岩过早成熟并排烃,地层整体埋藏较浅,这也在一定程度上影响了该盆地致密气成藏过程。在后续的致密气勘探过程中,也要注意勘探风险,应

重点落实相对有利的致密气勘探区带,积极探索,有序推进。

参考文献 (References):

- [1] Qiu Zhen, Zou Caineng, Li Jianzhong, *et al.* Unconventional petroleum resources assessment: Progress and future prospects[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(2): 238-246. [邱振, 邹才能, 李建忠, 等. 非常规油气资源评价进展与未来展望[J]. *天然气地球科学*, 2013, 24(2): 238-246.]
- [2] Zhao Jingzhou. Conception, classification and resource potential of unconventional hydrocarbons[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2012, 23(3): 393-406. [赵靖舟. 非常规油气有关概念、分类及资源潜力[J]. *天然气地球科学*, 2012, 23(2): 393-406.]
- [3] Zou Caineng, Zhang Guosheng, Yang Zhi, *et al.* Geological concepts, characteristics, resource potential and key techniques of unconventional hydrocarbon: On unconventional petroleum geology [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(4): 385-454. [邹才能, 张国生, 杨智, 等. 非常规油气概念、特征、潜力及技术——兼论非常规油气地质学[J]. *石油勘探与开发*, 2013, 40(4): 385-454.]
- [4] Yang Hua, Liu Xinshe, Yang Yong. Status and prospects of tight gas exploration and development in the Ordos Basin[J]. *Engineering Science*, 2012, 14(6): 40-48. [杨华, 刘新社, 杨勇. 鄂尔多斯盆地致密气勘探开发形势与未来发展展望[J]. *中国工程科学*, 2012, 14(6): 40-48.]
- [5] Wang Shaofei, An Wenhong, Chen Peng, *et al.* Characteristic and development techniques of Sulige tight gas pool[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(1): 138-145. [王少飞, 安文宏, 陈鹏, 等. 苏里格气田致密气成藏特征与开发技术[J]. *天然气地球科学*, 2013, 24(1): 138-145.]
- [6] Wang Tonghe, Wang Shuangxi. *Tectonic Evolution and Petroleum Accumulation of the North China Craton*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999: 1-194. [王同和, 王喜双. 华北克拉通构造演化与油气聚集[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999: 1-194.]
- [7] Zhao Xianzheng. Retrospect and prospect of the exploration and development of the Qinshui Basin[J]. *China Coalbed Methane*, 2010, 7(6): 3-4. [赵贤正. 沁水盆地煤层气勘探开发回顾与展望[J]. *中国煤层气*, 2010, 7(6): 3-4.]
- [8] Lin Yongzhou. Geological significance of coal-formed gas reservoir of Niejiashuang in Shanxi Province[J]. *Natural Gas Industry*, 1984, 4(4): 16-19. [林永洲. 山西聂家庄煤成气藏的地质意义及形成的基本地质条件[J]. *天然气工业*, 1984, 4(4): 16-19.]
- [9] Ge Baoxun, Yin Guoxun, Li Chunsheng. A preliminary study on sedimentary environments and law of coal-bearing formation in Yangquan, Shanxi[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1985, 3(3): 33-44. [葛宝勋, 尹国勋, 李春生. 山西阳泉矿区含煤岩系沉积环境及聚煤规律探讨[J]. *沉积学报*, 1985, 3(3): 33-44.]
- [10] Ju Yiwen, Wei Mingming, Xue Chuandong. Control of basin-mountain evolution on the occurrence of deep coal and coalbed methane in North China[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2011, 40(3): 390-396. [据宜文, 卫明明, 薛传东. 华北盆地演化对深部煤与煤层气赋存的制约[J]. *中国矿业大学学报*, 2011, 40(3): 390-396.]
- [11] Qin Yong, Jiang Bo, Wang Jiyao, *et al.* Coupling control of tectonic dynamical conditions to coalbed methane reservoir formation in the Qinshui Basin, Shanxi, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(10): 1355-1361. [秦勇, 姜波, 王继尧, 等. 沁水盆地煤层气构造动力条件耦合控藏效应[J]. *地质学报*, 2008, 82(10): 1355-1361.]
- [12] Li Yue, Lin Yuxiang, Yu Tengfei. Tectonic evolution of Qinshui Basin and free gas reservoir control[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2011, 31(4): 481-487. [李月, 林玉祥, 于腾飞. 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, 31(4): 481-487.]
- [13] Liu Chao, Zhang Qinglong, Ge Rongfeng, *et al.* Discussions on structural deformation features and genesis of Taihang Mega Fault, east edge of Qinshui Basin in Shanxi[J]. *Journal of Geology*, 2011, 32(2): 113-122. [刘超, 张庆龙, 葛荣峰, 等. 山西沁水盆地东缘太行大断裂构造变形特征及其成因探讨[J]. *地质学刊*, 2011, 32(2): 113-122.]
- [14] Sang Shuxun, Chen Shiyue, Liu Huanjie. Study on diversity of late Paleozoic coal-forming environments and models in North China[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2001, 36(2): 212-221. [桑树勋, 陈世悦, 刘焕杰. 华北晚古生代成煤环境与成煤模式多样性研究[J]. *地质科学*, 2001, 36(2): 212-221.]
- [15] Xu Zhenyong, Wang Yanbin, Chen Deyuan. Sequence stratigraphy & lithofacies palaeogeography in Qinshui Basin[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2007, 35(4): 5-11. [徐振永, 王延斌, 陈德元. 沁水盆地晚古生代煤层序地层及岩相古地理研究[J]. *煤田地质与勘探*, 2007, 35(4): 5-11.]
- [16] Sun Fenjin, Wang Yibing, Wang Bo, *et al.* The Enrichment Law and Favorable Prediction of Middle-High Rank Coalbed Methane in North China[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2012: 1-184. [孙粉锦, 王一兵, 王勃, 等. 华北中高煤阶煤层气富集规律和有利区预测[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2012: 1-184.]
- [17] Liu Honglin, Li Guizhong, Wang Guangjun, *et al.* Geological Characteristics and Development Prospects of CBM in Qinshui Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009: 1-52. [刘洪林, 李贵中, 王广俊, 等. 沁水盆地煤层气地质特征与开发前景[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009: 1-52.]
- [18] Yang Qi, Pan Zhigui, Weng Chengmin, *et al.* The Discussion on Carboniferous-Permian Coal Metamorphism and Geological Factors in North China[M]. Beijing: Science Press, 1988: 1-106. [杨起, 潘治贵, 翁成敏, 等. 华北石炭—二叠纪煤变质特征与地质因素探讨[M]. 北京: 科学出版社, 1988: 1-106.]
- [19] Yang Qi. A study on coal metamorphism in China[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 1989, 14(4): 341-345. [杨起. 中国煤变质研究[J]. *地球科学: 中国地*

- 质大学学报,1989,14(4):341-345.]
- [20] Tang Yalan. Geological factors of coal metamorphism in central-northern Henan Province[J]. Geological Review,1987,33(1):48-57. [唐亚兰. 河南省中北部地区煤变质作用地质因素探讨[J]. 地质论评,1987,33(1):48-57.]
- [21] Hao Yongfu. Metamorphic origin of anthracite in the northwest of Henan Province[J]. Coal Geology of China,1989,1(1):13-18. [郝永富. 论豫西北无烟煤的变质成因[J]. 中国煤田地质,1989,1(1):13-18.]
- [22] Hu Sherong, Hao Guoqiang, Xu Fang, *et al.* Study on high metamorphic coal belts origination and coalbed methane enrichment in central and southern parts of North China plate [J]. Coal Science and Technology,2013,41(11):108-112. [胡社荣,郝国强,徐方,等. 华北板块中南部高变质煤带成因与煤层气富集研究[J]. 煤炭科学技术,2013,41(11):108-112.]
- [23] Qin Yong, Fu Xuehai, Wei Zhongtao, *et al.* Geodynamic Conditions on CBM Accumulation and Controlling Effect[M]. Beijing: Science Press, 2012: 1-317. [秦勇,傅雪海,韦重涛,等. 煤层气成藏动力条件及其控藏效应[M]. 北京: 科学出版社,2012:1-317.]
- [24] Xu Chunhua, Fan Qingzhen, Kong Fanshun, *et al.* Misunderstanding on evaluation of coal-measure hydrocarbon source rock[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2001,8(1):78-80. [徐春华,樊庆真,孔凡顺,等. 煤系烃源岩评价中的误区[J]. 油气地质与采收率,2001,8(1):78-80.]
- [25] Ren Zhanli, Zhao Zhongyuan. Late Mesozoic comparative research on the geothermal field of the Ordos Basin and Qinshui Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica,1997,15(2):134-137. [任战利,赵重远. 鄂尔多斯盆地与沁水盆地中生代晚期地温场对比研究[J]. 沉积学报,1997,15(2):134-137.]
- [26] Li Wei, Zhang Zhihuan, Zhu Lei, *et al.* The history analysis of hydrocarbon expulsion from the coalbeds in the Carboniferous-Permian in Qinshui Basin, Shanxi[J]. Acta Sedimentologica Sinica,2005,23(2):337-344. [李伟,张枝焕,朱雷,等. 山西沁水盆地石炭—二叠系煤层生排烃史分析[J]. 沉积学报,2005,23(2):337-344.]
- [27] Lü Jianwei. Evaluation of Source Rocks in Qinshui Basin and Zuoquan Block[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2012. [吕建伟. 沁水盆地及左权区块烃源岩评价[D]. 北京: 中国地质大学,2012.]

Study on the Tight Gas Accumulation Conditions and Exploration Potential in the Qinshui Basin

LIANG Jian-she, WANG Cun-wu, LIU Ying-hong, GAO Yin-jun,
DU Jiang-feng, FENG Ru-yong, ZHU Xue-shen, YU Jie
(CNOOC Research Institute, Beijing 100027, China)

Abstract: Although the Qinshui Basin is a key area for CBM exploration and exploitation in China, there is a big controversy about the potential of conventional and tight gas. In order to explore the potential of tight gas in the Qinshui Basin, the log interpretations for CBM parameter wells in the south-central area of the Qinshui Basin were done again, and a number of suspected tight gas reservoirs were identified. Compared with Ordos Basin, the tight gas accumulation condition and accumulation model of the Qinshui Basin were analyzed, and the exploration potential were also investigated based on the hydrocarbon source and reservoir conditions analysis. The result indicated that there were good tight gas reservoir conditions in the Qinshui Basin. A series of coal-measure source rocks which are widely distributed in the whole basin were developed with transitional facies during the Late Carboniferous-Early Permian, and hydrocarbon generation happened almost everywhere. Good reservoir-seal assemblage consisting of delta plain distributary channel and fluvial sandstone and distributary interchannel and lacustrine mudstone were formed in Late Permian. In short, there are good hydrocarbon source conditions and reservoir-seal assemblage in the Qinshui Basin, and tight gas reservoirs could be formed by the gas generation in the lower formation and storage in the upper formation. More attention should be paid to the exploration of tight gas in the Qinshui Basin in future.

Key words: Qinshui Basin; Tight gas; Accumulation conditions; Exploration potential