

引用格式:陈倩倩.南华北盆地海陆过渡相页岩特征及勘探层位优选——以通许地区上古生界为例[J].油气藏评价与开发,2022,12(4):690-697.

CHEN Qianqian. Characteristics and exploration horizon optimization of marine-continental transitional shale in the South of North China Basin: A case study of Upper Paleozoic in Tongxu area[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(4): 690-697.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2022.04.018

南华北盆地海陆过渡相页岩特征及勘探层位优选

——以通许地区上古生界为例

陈倩倩

(中国石化华北油气分公司勘探开发研究院,河南 郑州 450006)

摘要:牟页1井和郑东页2井太原组泥页岩试气突破,证实了南华北区域上古生界海陆过渡相页岩气具深挖资源潜力。结合通许3井、通许4井最新资料,综合分析南华北盆地通许地区上古生界太原组与山西组泥页岩地球化学、岩石学、储集空间、物性特征以及含气性等,结果表明:①太原组与山西组泥页岩有机质来源于高等植物,属Ⅲ型干酪根;TOC(总有机碳)值介于1.0%~4.5%,属于好的烃源岩; R_o (镜质体反射率)值为2.4%~3.4%,处于过成熟阶段;泥页岩储层脆性矿物含量较高,有利于后期压裂改造。②储集空间以裂缝和微裂缝为主,无机孔次之,有机质孔发育较少,且呈孤立状分布;整体孔渗值较低,微裂缝对渗透率有明显改善作用。③综合对比已有试气成果及页岩气评价参数,太原组页岩气资源潜力明显优于山西组,是南华北盆地海陆过渡相页岩气勘探研究的重点层位。

关键词:页岩气;上古生界;海陆过渡相;通许地区;南华北盆地

中图分类号:TE132

文献标识码:A

Characteristics and exploration horizon optimization of marine-continental transitional shale in the South of North China Basin: A case study of Upper Paleozoic in Tongxu area

CHEN Qianqian

(Exploration and Development Research Institute, Sinopec North China Oil and Gas Company, Zhengzhou, Henan 450006, China)

Abstract: The gas test breakthrough of mudstone shale of Taiyuan Formation in Well-MY1 and Well-ZDY2 has proved that the Upper Paleozoic marine-continental transitional shale gas in the South of North China Basin has potential for further tapping resources. Based on the latest data of Well-TX3 and Well-TX4, this paper comprehensively analyzes the shale geochemistry, petrology, reservoir space, physical properties and gas bearing properties of the Taiyuan Formation and Shanxi Formation of the Upper Paleozoic in Tongxu area in the South of North China Basin, the results show that: ① The organic matter of the mud shales of the Taiyuan and Shanxi Formations comes from the vascular plant and belongs to type Ⅲ Kerogen; TOC value is 1.0%~4.5% and belongs to good source rock; R_o value is 2.4%~3.4% and is in the over mature stage. The mud shale reservoir has higher brittle mineral content, which is favorable for the later fracturing reconstruction. ② The reservoir space is dominated by fractures and micro-fractures, followed by inorganic pores, less developed organic pores and isolated distribution. ③ Based on the comparison of the gas test results and shale gas evaluation parameters, the shale gas resource potential of Taiyuan Formation is obviously better than that of Shanxi Formation.

Keywords: shale gas; Upper Paleozoic; marine-terrestrial transitional facies; Tongxu region; the South of North China Basin

目前,中国主要发育的海相、陆相、海陆过渡相页岩气中,海相页岩气在四川盆地已实现规模开发,

但占全国页岩气资源总量四分之一的海陆过渡相页岩气尚处于起步阶段^[1-3]。南华北盆地上古生界山西

收稿日期:2021-09-14。

作者简介:陈倩倩(1988—),女,硕士,工程师,主要从事油气勘探综合研究工作。地址:河南省郑州市陇海西路199号中国石化华北分公司勘探开发研究院,邮政编码:450006。E-mail: chenqianbc@126.com

组、太原组存在丰富的碳质泥页岩。在适当的地质背景以及匹配的钻采工艺下,泥页岩也是有效的产层^[4]。河南豫矿公司部署的牟页1井与郑东页2井在太原组获得试气突破,证实南华北盆地富含天然气。在前人认识基础上^[5-9],结合新钻井通许3井、通许4井资料,通过一系列分析化验手段,对南华北盆地上古生界富有机质泥页岩特征进行描述,对含气性开展分析,并对山西组、太原组泥页岩各项参数综合对比,明确勘探潜力,最终达到优选有利勘探层位的目的。

1 地质背景

南华北地区位于华北地台南部,南邻秦岭—大别褶皱系,东以郯庐断裂带为界,自青白口纪到新近纪经历了6个构造演化阶段,构造演化史极其复杂,盆地可划分成5个二级构造单元,研究区位于太康隆起区^[10-11](图1)。在构造作用和古地貌的双重控制

下,南华北盆地上古生界经历了海相—海陆过渡相—陆相沉积演化过程,在太原组识别出有障壁海岸沉积相,在山西组识别出海陆过渡相三角洲沉积相体系(图2)。

2 海陆过渡相泥页岩特征

2.1 富有机质泥页岩地球化学特征

2.1.1 有机质类型

由于太原组和山西组泥页岩有机质热演化程度较高,为了准确判断有机质类型,综合采用有机质碳同位素分析、有机元素分析和透射光下干酪根镜检等手段。有机碳同位素分析中,几乎100%的样品的 $\delta^{13}C$ PDB(‰)值高于-26‰,反映出有机质来源为陆生高等植物;由于太原组、山西组 R_o 普遍大于2%,属高成熟—过成熟状态,有机元素分析不能准确反映有机质类型;透射光下,干酪根镜检实验显示75%显

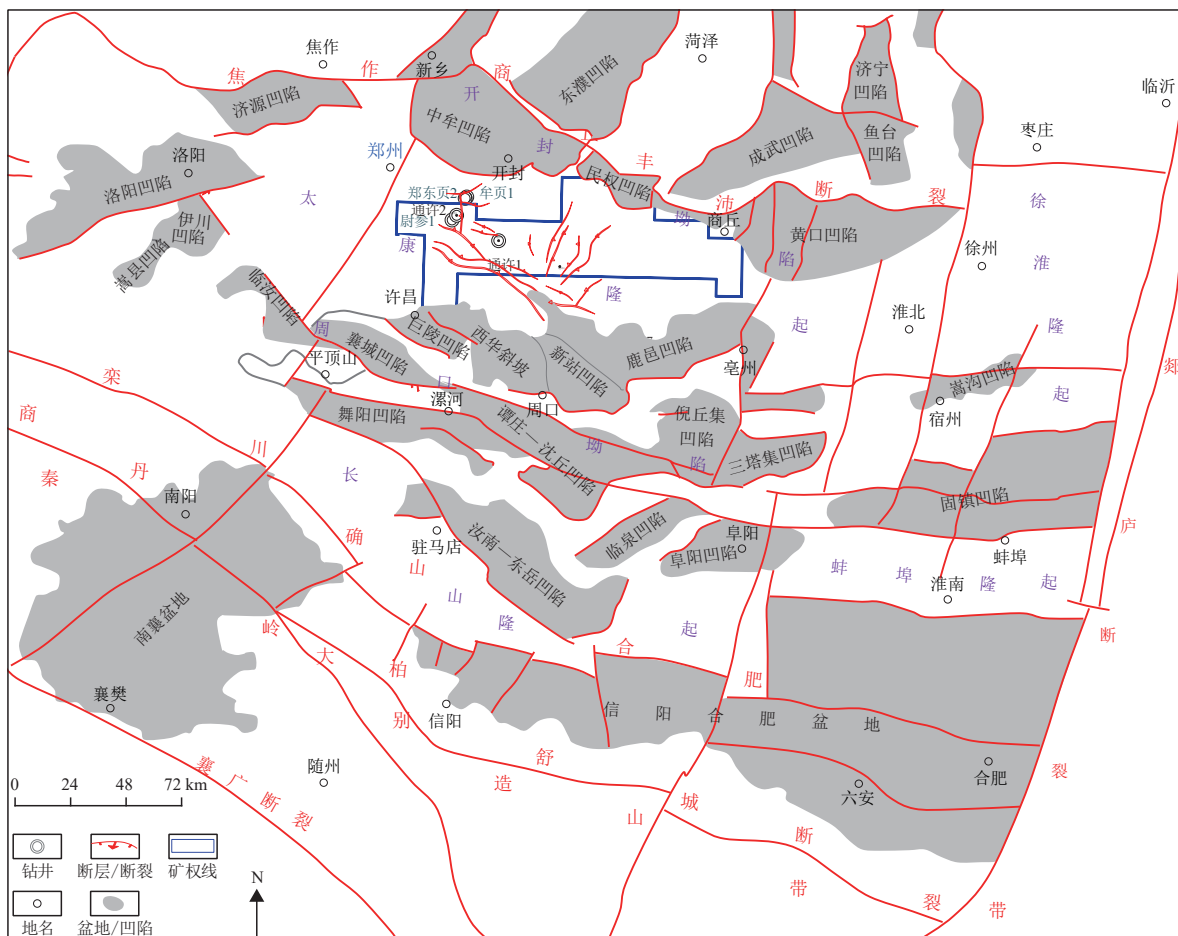


图1 南华北盆地通许地区构造位置

Fig. 1 Structural location of Tongxu area in the South of North China Basin

微组分为镜质组(主要为黑色镜质体),其次为腐泥成分,有机质类型均为Ⅲ型。综合各项实验数据,明确太原组、山西组泥页岩有机质类型为Ⅲ型。

2.1.2 有机质丰度

通许地区太原组、山西组泥页岩有机质丰度指

标主要靠有机碳含量(TOC)来衡量,所测得生烃潜力参数以及氢指数不足以反映生烃潜力。

太原组、山西组泥页岩 TOC 值介于 0.08 % ~ 9.84 %,主体分布在 1.0 % ~ 4.5 % 范围内,平均有机碳含量为 1.53 %,33.3 % 的样品的 TOC 值大于 2.0 %,属好的烃源岩,且对比分析发现太原组有机质丰度

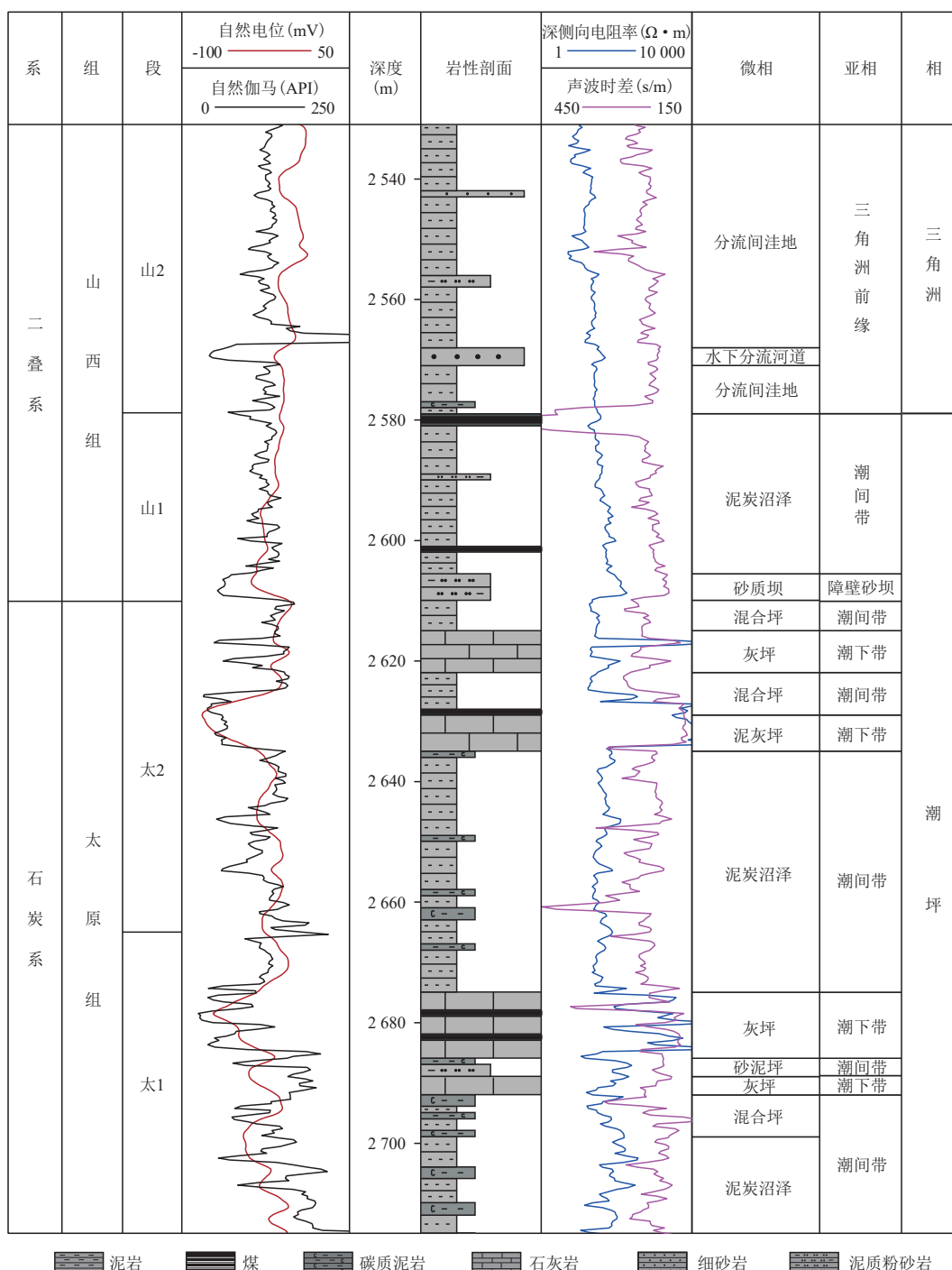


图2 南华北盆地通许地区通许2井沉积相柱状图

Fig. 2 Sedimentary facies histogram of Well-TX2 in Tongxu area in the south of North China Basin

高于山西组(图3);纵向来看,因海陆过渡相沉积环境中砂泥互层频繁,夹杂煤线,岩性具较强非均质性,导致TOC值变化较大。研究区石炭—二叠系泥页岩经历过复杂的构造运动,具较高的热演化程度,生烃潜力参数分布在0.03~0.56 mg/g,平均值为0.17 mg/g,氢指数分布在2~104 mg/g范围内,平均值为17 mg/g,残余生烃潜力及残留氯仿沥青“A”含量低,生烃潜力得不到有效反映,因此,有机质丰度评价主要参考TOC值。

2.1.3 有机质成熟度

依据有机质成熟度划分标准,当 R_o 大于2.0%时,即处于过成熟阶段。研究区太原组、山西组 R_o 介于2.4%~3.4%,平均为2.9%,且太原组泥页岩成熟度大于山西组。

岩石热解峰温 T_{max} 理论上随着有机质演化程度的增加而增加,有机质成熟度在一定程度上能够得到反馈。当 T_{max} 大于510℃时,热演化即处于过成熟阶段。研究区山西组、太原组 T_{max} 数值普遍大于500℃,再次证实页岩达到过成熟阶段。

2.2 富有机质页岩岩石学与矿物组分特征

页岩矿物组成,尤其是脆性矿物含量,是页岩气产出的重要控制因素,页岩气储层的形成,不仅需要较高的有机质丰度,而且还要含有一定量的石英、长石等脆性矿物^[12-13]。

借助全岩X-射线分析手段,泥页岩矿物组分可分成3类:以石英和长石为主的陆源碎屑矿物、黏土矿物和自生非黏土矿物。自生非黏土矿物中主要成分是碳酸盐矿物,其次是硫酸盐矿物。矿物组分分

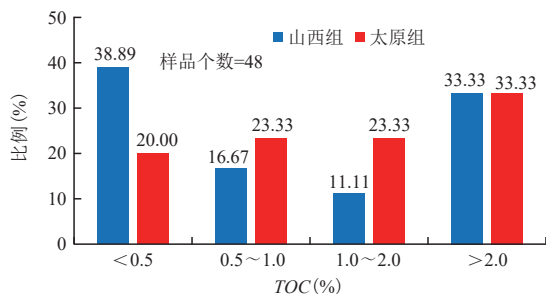


图3 南华北盆地上古生界太原组、山西组有机碳频率分布
Fig. 3 Distribution of organic carbon frequency in Taiyuan Formation and Shanxi Formation of Upper Paleozoic in the South of North China Basin

析显示太原组和山西组页岩储层矿物成分类似,均以石英和黏土矿物为主,还有部分碳酸盐岩和少量黄铁矿(图4),但同时又存在一定差异。其中太原组石英含量为2%~52%,平均为34.5%;黏土矿物含量为1%~64%,平均38.1%;相比山西组,碳酸盐矿物含量较高,平均为10.3%。山西组石英含量为21%~59%,平均为41.3%;黏土矿物含量为21%~70%,平均为50.2%。太原组脆性矿物含量高于山西组,而黏土矿物含量反之。

通许地区黏土矿物以伊利石为主,伊蒙混层次之,局部含高岭石和绿泥石,较高的伊利石含量反映较高的成岩作用,与高成熟度相对应。其中,太原组伊利石含量为35%~80%,平均为58%;高岭石平均为13.5%,伊蒙混层含量平均为20%。山西组伊利石含量为4%~99%,平均为59%;高岭石平均为13.8%,伊蒙混层含量平均为17%。

2.3 富有机质泥页岩储集空间类型

页岩气储集空间可以分为孔隙和裂缝两大类,国内外学者对泥页岩孔隙类型的划分分类方案未见统一^[8,14-16]。通过氩离子抛光+扫描电镜、压汞和气体吸附等实验室测试分析,对页岩样品储层类型、大小和特征细致研究,并参考由LOUCKS等^[14,17]提出的主流分类方案,将南华北盆地通许地区上古生界泥页岩储集空间类型划分为3类:有机质孔、无机孔、裂缝。裂缝、微裂缝占泥页岩储集空间的主导,其次是无机孔,有机质孔发育较少,一般孤立存在。

2.3.1 有机质孔

在扫描电镜下,有机质孔以圆形、椭圆形居多,

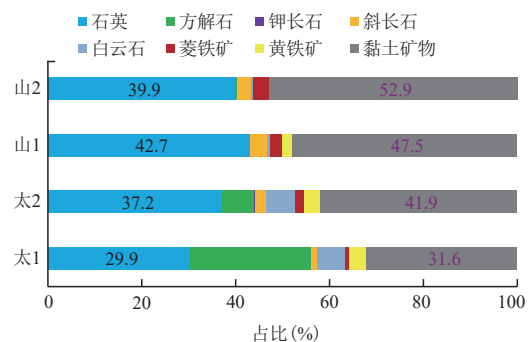


图4 通许地区山西—太原组矿物组分特征
Fig. 4 Mineral composition characteristics of Shanxi-Taiyuan Formation in Tongxu area

局部可见长条形和不规则形状;气孔轮廓清晰、边缘光滑,部分气孔边缘出现弯曲现象;气孔普遍以单个出现,少数气孔间彼此联通,有些较大的气孔一般是由多个气孔破裂联通形成(图5a);有机质孔大小一般为纳米级,孔径分布在10~500 nm,个别可达1~2 μm 。

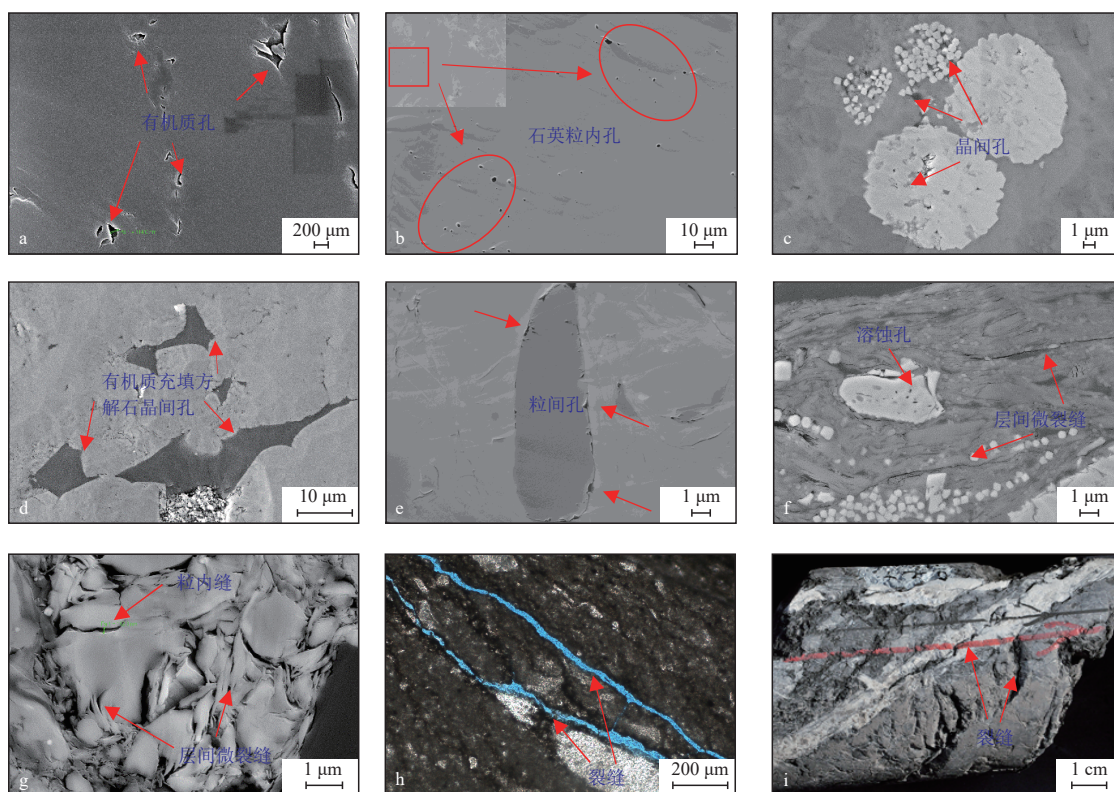
2.3.2 无机孔

研究区微观孔隙无机孔主要包括粒内孔、粒间孔。粒内孔通常发育在矿物质颗粒内部,镜下较多地观察到莓球状黄铁矿晶间孔、石英粒内孔隙以及长石、岩屑或碳酸盐溶蚀孔等,溶蚀孔隙一般为圆形、椭圆形等,孔径可达数微米,并且部分后期被有机质充填(图5b—图5d、图5f)。粒间孔一般发育在颗粒间,镜下可观察到矿物颗粒间形成的三角形孔隙以及与矿物颗粒接触的有机质周缘发育的成串粒间孔(图5e),由于强烈的压实作用,外加泥页岩较强的塑形,粒间孔相对少见。

2.3.3 裂缝、微裂缝

通许3井、通许4井岩心观察可见太原组泥页岩较多的发育网状缝、斜交缝以及其他杂乱分布的裂缝、微裂缝,部分裂缝被后期方解石充填或半充填(图5h、图5i)。

氩离子抛光+扫描电镜分析发现,微裂缝类型主要为黏土矿物层间缝或脆性矿物在抵抗压实作用过程中产生的微裂缝(图5f、图5g)。微裂缝一般长数微米,宽数十纳米,个别微裂缝后期被方解石或自生黏土矿物充填,渗流能力降低。随着成岩作用进行,黏土矿物脱水,尤其是蒙脱石失水转化成伊利石的过程中体积发生收缩,或者高岭石通过沂蒙混层向伊利石转化过程中,均产生大量层间微裂缝^[18],此类微裂缝占主导。因构造作用产生的微裂缝,其发育具局限性,一般以脆性矿物颗粒粒缘缝或粒内缝呈现。



a. 有机质孔, 2 561.23 m, 太原组, 通许3井; b. 孤立石英粒内孔, 1 923.18 m, 山西组, 通许1井; c. 黄铁矿晶间孔, 2 563.91 m, 太原组, 通许3井; d. 有机质充填方解石晶间孔, 2 567.02 m, 太原组, 通许3井; e. 粒间孔, 2 466.62 m, 太原组, 通许2井; f. 黄铁矿溶蚀孔、黏土矿物层间缝, 2 562.18 m, 太原组, 通许3井; g. 粒内缝、黏土矿物层间缝, 2 520.94 m, 太原组, 通许3井; h. 正交偏光镜下裂缝形态, 2 793.9 m, 太原组, 尉参1井; i. 岩心样品裂缝被方解石充填或半充填, 2 564.79 ~ 2 564.99 m, 太原组, 通许3井。

图5 南华北盆地上古生界(太原组—山西组)页岩层段孔隙类型特征

Fig. 5 Pore types of shale member of Upper Paleozoic (Taiyuan-Shanxi Formation) in the South of North China Basin

2.4 富有机质泥页岩物性特征及影响因素

孔渗数据统计发现,太原组、山西组泥页岩孔隙度分布在0.3%~5.39%,平均为2.9%,孔隙度整体呈较低值,超过半数孔隙度值大于3%;渗透率分布在 $(0 \sim 0.983) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均为 $0.17 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,其中接近半数样品渗透率小于 $0.001 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 或者难以检测,渗透率极低(图6a、图6b)。若从大量数据进行混沌拟合,孔渗之间不存在相关性,但根据孔渗特征值范围分类后分别进行拟合,得出大于 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的渗透率相对高值孔渗间呈现出较好正相关性,小于 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的孔渗间无相关性(图6c),推测主要与高比例的丝发状伊利石堵塞孔隙空间以及孔缝间孤立存在缺乏有效联通有关。另外,由于裂缝的存在,局部会出现渗透率异常值。

影响孔渗的因素很多^[19],例如骨架颗粒粒度大小、黏土矿物或有机质含量、岩性和压实作用、溶蚀作用等成岩作用。相关性对比分析显示,孔隙度和石英含量呈正相关,和黏土矿物含量呈负相关(图6d)。大于2%相对高值孔隙度,石英含量为33%~52%,均值含量41%,石英含量较高,黏土含量为35%~59%,平均42.8%,黏土含量偏低;分析认为随压实作用的进行,石英作为刚性矿物可有效保存其原生孔隙。随着自生黏土矿物含量增加,小于 $0.02 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的相对低值渗透率整体呈增加趋势(图6e),原因是黏土矿物层间孔缝有利于增强渗流能力;在强烈的压实作用下,由石英抗压实产生的原生粒间孔往往孤立存在,孔与孔之间缺乏有效联通,因此,渗透率与石英含量呈弱的负相关关系。

3 含气性分析

通过对太原组、山西组含气性分析发现,太原组总含气量为 $0.15 \sim 4.51 \text{ m}^3/\text{t}$,平均为 $1.32 \text{ m}^3/\text{t}$;山西组总含气量分布在 $0.29 \sim 2.86 \text{ m}^3/\text{t}$,平均为 $0.75 \text{ m}^3/\text{t}$;太原组含气性明显好于山西组(图7)。含气性与岩性也有一定关系,泥岩含气性明显占据优势,另外太原组中砂岩含气量与泥页岩相当,推测与其较好的物性条件有关。

4 不同层位页岩气勘探潜力对比分析

鉴于国内目前针对富有机质页岩勘探可用资料

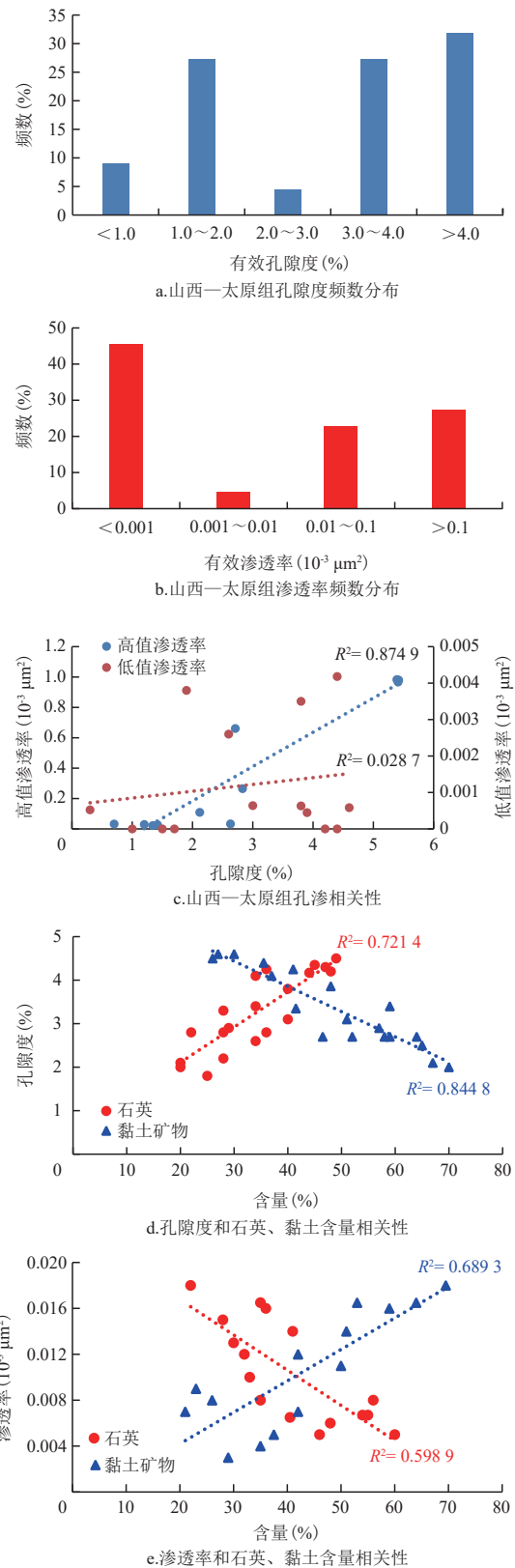


图6 南华北盆地通许地区太原组和山西组有效孔渗分布及各类相关性

Fig. 6 Effective porosity-permeability distribution and various correlations of Taiyuan Formation and Shanxi Formation in Tongxu area in the South of North China Basin

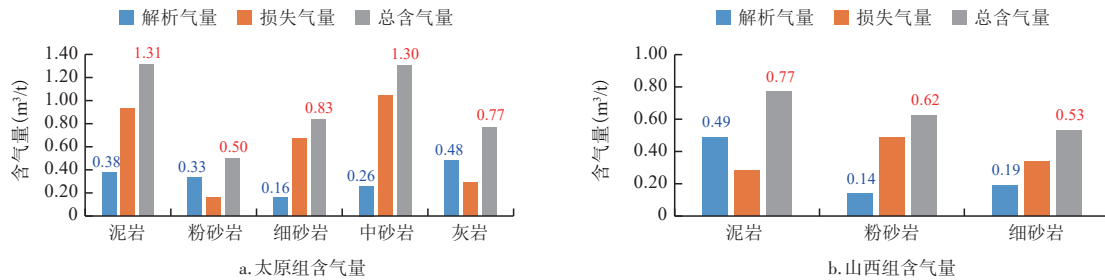


图7 通许地区不同岩性含气量分布

Fig. 7 Distribution of gas content in different lithology of Tongxu region

表1 南华北盆地上古生界海陆过渡相页岩主要特征

Table 1 Main characteristics of the Upper Paleozoic marine–continental transitional shale in the South of North China Basin

页岩地层 地层年代	埋深 (m)	页岩 面积 (km ²)	页岩厚度 (m)		有机质 类型	TOC(%)		热成熟度		脆性矿物 含量(%)		黏土矿物 含量(%)		含气量 (m ³ /t)	
			范围	平均		范围	平均	范围	平均	范围	平均	范围	平均		
山西组 P ₁ sh	1 846 ~ 2 740	2 459	5 ~ 60	50	Ⅲ型	0.08 ~ 4.19	1.12	2.36 ~ 3.33	2.73	21 ~ 59	39	21 ~ 70	50.2	0.29 ~ 2.86	0.75
太原组 C ₃ t	1 942 ~ 2 808	1 687	5 ~ 65	35	Ⅲ型	0.5 ~ 9.84	2.32	2.51 ~ 3.39	2.95	31 ~ 53	39	1 ~ 64	38.1	0.15 ~ 4.51	1.32

少,通常参照北美页岩评价标准^[20-22],结合我国陆相页岩气现状制定出有机质页岩选区评价标准^[8]。对照评价标准,太原组—山西组页岩层系 TOC 均值为 1.7%,有机质类型为Ⅲ型,成熟度均大于 2%,脆性矿物含量 21%~59%,黏土矿物含量 1%~70%,有效孔隙度适中,累计厚度大,埋深适中,含气量较低,整体呈现较好的页岩气勘探潜力。对比分析发现(表 1),太原组富有机质页岩有机地化参数明显优于山西组,外加郑东页 2 井、牟页 1 井在太原组测试时分别获得 3 000 m³/d 与 1 260 m³/d 的气流,证实太原组比山西组具备更好的勘探潜力,是下步页岩气勘探的重点层位。

5 结论

1) 太原组和山西组泥页岩有机质来源于高等植物,属Ⅲ型干酪根;TOC 介于 1.0%~4.5%,均值为 1.53%,为好的烃源岩;泥页岩成熟度均大于 2.0%,处于过成熟阶段;纵向上有机质丰度、含气量等参数非均质性强;储层矿物成分以石英和黏土为主,含少量碳酸盐岩和黄铁矿,太原组脆性矿物含量高于山西组,而黏土矿物反之。

2) 储集空间类型主要是有机质孔、无机孔、裂缝和微裂缝。裂缝和微裂缝占储集空间的主体,其次是无机孔,有机质孔发育较少,一般呈孤立状存在。整体孔渗值较低,微裂缝对渗透率有明显的改善作用,大于 0.01×10⁻³ μm² 的相对高值渗透率样品孔渗相关性好。

3) 南华北盆地通许地区上古生界海陆过渡相泥页岩有机质丰度中等偏低,成熟度高、脆性矿物含量较高、有效孔隙度适中、累计厚度大、埋深适中,整体呈现较好的勘探潜力,且太原组各项参数优于山西组,是下步页岩气勘探的重点层位。

参考文献

- [1] 邹才能,翟光明,张光亚,等. 全球常规-非常规油气形成与分布、资源潜力及趋势预测[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(1): 13-25.
ZOU Caineng, ZHAI Guangming, ZHANG Guangya, et al. Formation, distribution, potential and prediction of global conventional and unconventional hydrocarbon resources[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(1): 13-25.
- [2] 董大忠,邱振,张磊夫,等. 海陆过渡相页岩气层系沉积研究进展与页岩气新发现[J]. 沉积学报, 2021, 39(1): 29-45.
DONG Dazhong, QIU Zhen, ZHANG Leifu, et al. Progress on sedimentology of transitional facies shales and new discoveries of shale gas[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(1): 29-45.
- [3] 贾承造,郑民,张永峰. 中国非常规油气与勘探开发前景[J].

- 石油勘探与开发,2012,39(2):129-136.
- JIA Chengzao, ZHENG Min, ZHANG Yongfeng. Unconventional hydrocarbon resources in China and the prospect of exploration and development[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2): 129-136.
- [4] 王兰生,邹春艳,郑平,等.四川盆地地下古生界存在页岩气的地球化学依据[J].天然气工业,2009,29(5):59-62.
- WANG Lansheng, ZOU Chunyan, ZHENG Ping, et al. Geochemical evidence of shale gas existed in the Lower Paleozoic Sichuan basin[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(5): 59-62.
- [5] 兰俊.海陆过渡相煤系页岩气成藏条件及储层特征[J].石油地质与工程,2021,35(5):27-32.
- LAN Jun. Reservoir forming conditions and reservoir characteristics of coal measure shale gas in marine continental transitional facies[J]. Petroleum Geology & Engineering, 2021, 35(5): 27-32.
- [6] 孙炳兴.南华北盆地太康隆起煤系页岩气地质特征及勘探潜力[J].中国煤炭地质,2021,33(2):35-40.
- SUN Bingxing. Coal measures shale gas geological features and exploration potential in Taikang Uplift, Southern North China Basin[J]. Coal Geology of China, 2021, 33(2): 35-40.
- [7] 王宇涵.阜阳凹陷石炭-二叠系地层烃源岩特征及有利区带评价优选[J].石油地质与工程,2021,35(6):38-43.
- WANG Yuhan. Characteristics of hydrocarbon source rocks in Carboniferous-Permian strata and evaluation and optimization of favorable zones in Fuyang sag[J]. Petroleum Geology & Engineering, 2021, 35(6): 38-43.
- [8] 邹才能,董大忠,杨桦,等.中国页岩气形成条件及勘探实践[J].天然气工业,2011,31(12):26-39.
- ZOU Caineng, DONG Dazhong, YANG Hua, et al. Conditions of shale gas accumulation and exploration practices in China[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(12): 26-39.
- [9] 冯辉,邱庆伦,汪超,等.南华北盆地中牟凹陷太原组—山西组页岩气成藏特征——以河南中牟区块ZDY2井为例[J].地质找矿论丛,2019,34(2):213-218.
- FENG Hui, QIU Qinglun, WANG Chao, et al. The shale gas accumulation characteristics of Taiyuan and Shanxi Formation in Zhongmu sag in basins in south of the North China: In case of well ZDY2 off Zhongmu block, Henan Province[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2019, 34(2): 213-218.
- [10] 彭艳霞.南华北盆地太原组页岩气形成条件研究[D].北京:中国地质大学(北京),2020.
- PENG Yanxia. The shale gas accumulation conditions of Taiyuan Formation in the Southern North China Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.
- [11] 魏晓亮.海陆过渡相页岩孔隙有效性及其对页岩气扩散的影响——以南华北盆地二叠系页[D].北京:中国地质大学(北京),2020.
- WEI Xiaoliang. Pore effectiveness of marine and continental transitional shale and its effect on shale gas diffusion: A case study of permian shale in Southern North China Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.
- [12] 黄大忠,邹才能,李建忠,等.页岩气资源潜力与勘探开发前景[J].地质通报,2011,30(2/3):324-336.
- HUANG Dazhong, ZOU Caineng, LI Jianzhong, et al. Resource potential, exploration and development prospect of shale gas in the whole world[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(2/3): 324-336.
- [13] 邱庆伦,李中明,冯辉,等.河南中牟区块太原组—山西组页岩气富集控制因素[J].地质与资源,2018,27(5):472-479.
- QIU Qinglun, LI Zhongming, FENG Hui, et al. Controlling factors of the shale gas enrichment in Taiyuan and Shanxi Formations of zhong mu block, Henan Province[J]. Geology and Resources, 2018, 27(5): 472-479.
- [14] LOUCKS R G, REED R M, RUPPEL S C, et al. Spectrum of pore types and networks in mudrocks and a descriptive classification for matrix-related mudrock pores[J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(6): 1071-1098.
- [15] 聂海宽,张金川.页岩气储层类型和特征研究——以四川盆地及其周缘下古生界为例[J].石油实验地质,2011,33(3):219-225.
- NIE Haikuan, ZHANG Jinchuan. Types and characteristics of shale gas reservoir: A case study of Lower Paleozoic in and around Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(3): 219-225.
- [16] 刘娜.南川地区龙马溪组优质页岩段微观孔隙结构特征[J].石油地质与工程,2021,35(4):21-25.
- LIU Nana. Micro pore structure characteristics of high quality shale section of Longmaxi formation in Nanchuan area[J]. Petroleum Geology & Engineering, 2021, 35(4): 21-25.
- [17] CURTIS J B. Fractured shale-gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1921-1938.
- [18] 郭少斌,王子龙,马啸.中国重点地区二叠系海陆过渡相页岩气勘探前景[J].石油实验地质,2021,43(3):377-385.
- GUO Shaobin, WANG Zilong, MA Xiao. Exploration prospect of shale gas with Permian transitional facies of some key areas in China[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(3): 377-385.
- [19] 唐帅.南华北盆地中牟区块过渡相页岩气渗流机理及产能分析[D].北京:中国地质大学(北京),2017.
- TANG Shuai. The gas flow mechanism and productivity analysis of transitional shales of Zhongmou Block in the Southern North China Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2017.
- [20] 刘树根,马文辛, LUBA Jansa, 等.四川盆地东部地区下志留统龙马溪组页岩储层特征[J].岩石学报,2011,28(8):2239-2252.
- LIU Shugen, MA Wenxin, LUBA Jansa, et al. Characteristics of the shale gas reservoir rocks in the Lower Silurian Longmaxi Formation, East Sichuan basin, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(8): 2239-2252.
- [21] BOWKER K A. Recent developments of the Barnett Shale Play, Fort Worth Basin[J]. West Texas Geological Society Bulletin, 2003, 42: 4-11.
- [22] BOYER C, KIESCHNICK J, SUAREZ-RIVERA R, et al. Producing gas from its source[J]. Oilfield Review, 2006, 18: 36-49.

(编辑 顾丽媛)