doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2023.09.001

陆相页岩气富集主控因素

——以鄂尔多斯盆地延安探区山西组为例

李艳霞^{1,2},吴雨威¹,王巧玲³,王凤琴^{1,2},张凤奇^{1,2},孙建波⁴,郭皓炎¹ LI Yanxia^{1,2}, WU Yuwei¹, WANG Qiaoling³, WANG Fengqin^{1,2}, ZHANG Fengqi^{1,2}, SUN Jianbo⁴, GUO Haoyan¹

- 1.西安石油大学地球科学与工程学院,陕西 西安 710065;
- 2.全国石油和化工行业致密油气地质重点实验室,陕西 西安 710065;
- 3.中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司技术检测中心,山东 东营 257000;
- 4.陕西延长石油(集团)有限责任公司研究院,陕西 西安 710069
- 1. College of Earth Sciences & Engineering, Xi' an Shiyou University, Xi' an 710065, Shaanxi, China;
- 2. National Key Laboratory of Tight Oil and Gas Geology in Petroleum and Chemical Industry, Xi' an 710065, Shaanxi, China;
- 3. Technical Testing Center of Sinopec Shengli Oilfield Branch, Dongying 257000, Shandong, China;
- 4. Research Institute of Shaanxi Yanchang Petroleum (Group) Co., Ltd., Xi' an 710069, Shaanxi, China

摘要:为揭示鄂尔多斯盆地东南部页岩及页岩气富集特征,选取延安探区页岩样品进行岩石热解、镜质体反射率、页岩解析气、等温吸附等实验分析,对研究区山西组页岩气的富集主控因素进行详细的探讨。结果表明:①有机碳总量变化范围较大,以Ⅲ型干酪根为主。镜质体反射率 R_o 平均值为 $2.39\%\sim2.51\%$,处于高成熟—过成熟阶段。②有机碳含量、热解参数游离烃(S_1)及热解烃(S_2)均与解析气含量、等温吸附气含量呈现正相关性,镜质体反射率 R_o 与解析气、残余气及总含气量具正相关关系。③储层孔隙度较低,物性与页岩气含量成正比;粘土矿物含量较高,比表面积高,有利于提高页岩对气体的吸附能力,但是粘土矿物含量与页岩气产量成反比。④山 1 段早白垩世末期地层过剩压力较高,延川—张家滩—云岩—宜川一带的地层过剩压力基本在 10 MPa 以上,地层过剩压力对页岩气的保存具有决定作用。研究结果认为,页岩气的富集主控因素为高有机质丰度、高热演化程度,其次物性显示测试样品渗透率较高、早白垩世末期的地层过剩压力较大,为页岩气提供了重要的保存条件。

关键词:有机质丰度;有机碳成熟度;物性;粘土矿物;过剩压力;页岩气;鄂尔多斯盆地

中图分类号:P618.13 文献标志码:A 文章编号:1671-2552(2023)09-1423-09

Li Y X, Wu Y W, Wang Q L, Wang F Q, Zhang F Q, Sun J B, Guo H Y. Main controlling factors of continental shale gas enrichment: A case study of Shanxi Formation in Yan 'an exploration area, Ordos Basin. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42 (9):1423-1431

Abstract: To reveal the enrichment characteristics of shale gas in the southeastern Ordos Basin, shale samples from Yan ´an exploration area were selected for geochemical tests of organic matter, rock pyrolysis, and vitrinite reflectance. At the same time, a large number of experimental methods such as thin section identification, whole rock, and clay minerals, shale gas analysis, and isothermal adsorption were carried out to discuss the main controlling factors of shale gas enrichment in Shanxi Formation in the study area. And the following research results are obtained: 1The total organic carbon(TOC) varies widely in the shale of Shanxi Formation shale, and the type III kerogen is the main one. The average value of R_o is 2.48%, which is in the high mature—overmature stage. 2The organic carbon

收稿日期:2022-10-26;修订日期:2023-01-04

资助项目:国家科技重大专项《陆相页岩气成藏主控因素及甜点预测》(编号:2017ZX05039001)和陕西省基金项目《连续型油藏砂岩输导体系与石油运移时效性探讨》(编号:2013IM5006)

content, pyrolysis parameters free hydrocarbon (S_1), and pyrolysis hydrocarbon (S_2) are positively correlated with the content of desorption gas and isothermal adsorption gas. The vitrinite reflectance R_o is positively correlated with desorption gas, residual gas, and total gas content, indicating that the abundance of organic matter and thermal evolution maturity control the content of shale gas directly. The physical property test data of the shale reservoir show that the porosity is low, with an average of 0.77% and an average permeability of $0.039 \times 10^{-3} \mu \text{m}^2$, and the physical property is directly proportional to the shale gas content. The clay mineral content is high, ranging from 57.87% to 60.28%, mainly composed of the illite/montmorillonite mixed layer and kaolinite. With a high specific surface area, which is conducive to improving the gas adsorption capacity of shale. But the clay mineral is inversely proportional to shale gas production. The formation excess pressure at the end of Early Cretaceous in the shan1 member is relatively high, and the excess pressure in the Yanchuan-Zhangjiatan-Yunyan-Yichuan line is above 10 MPa, which plays a decisive role in the preservation of shale gas. In conclusion, high organic matter abundance and high maturity are the basic control factors of shale gas enrichment in Shanxi Formation of Ordos Basin. Secondly, the physical properties show that the test samples have high permeability and the formation excess pressure at the end of Early Cretaceous in the shan1 member is relatively high, which provides important preservation conditions.

Key words: organic matter abundance; organic carbon maturity; physical property; clay mineral; preservation pressure; shale gas; Ordos Basin

页岩气主要以游离状态和吸附状态赋存于页岩孔裂隙中,具有典型的"自生自储,原地成藏"的特点(李剑等,2020;邹才能等,2020)。富有机质页岩根据沉积环境主要分为海相页岩、陆相页岩和海陆过渡相页岩(孟凡洋等,2017)。四川盆地涪陵、长宁、昭通、威远等多个地区的上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组海相页岩气勘探开发已获得巨大成功,2020年页岩气年产量已超 200×108 m³(邹才能等,2021)。

与海相页岩气相比,陆相和海陆过渡相页岩气 勘探程度较低,尤其海陆过渡相页岩气。中国海陆 过渡相页岩主要发育于石炭系—二叠系,分布于华 北的鄂尔多斯盆地(闫德宇等,2015;孙则朋等, 2017; Li et al., 2019; 刘亢等, 2021)、沁水盆地和南 华北盆地(Liang et al., 2018), 西北的柴达木盆地 (曹军等,2016),在中国南方主要发育在四川盆地 和中下扬子地区的二叠系(吴小力等,2018)。石炭 系、二叠系主要为富含煤系地层,其富有机质页岩 发育良好,有机质丰度高,热演化程度高,是页岩气 勘探的重要潜在目标。鄂尔多斯盆地页岩气累计 探明储量可达 2.7×10¹² m³(郗兆栋等, 2016; 张琴 等,2022),山西组作为鄂尔多斯盆地上古生界重要 的含气层,发育一套累计厚度大、热演化程度高、分 布广泛的泥页岩,具有形成大规模页岩气藏的有利 地质条件(付金华等,2013;琚宜文等,2016;董大忠 等,2021;吴鹏等,2021)。盆地内延川地区的云页 平 3、云页平 4 井等获得 5×10⁴~6×10⁴ m³/d 的工业 气流,展示出山西组页岩气良好的勘探开发潜力

(匡立春等,2020)。

山西组非均质性较强,岩性、矿物组分、物性、有机地球化学等参数在纵横向上变化快,加大了寻找页岩气甜点目标的难度,使页岩气富集因素不清,制约了海陆过渡相页岩气的全面勘探开发。本文系统分析鄂尔多斯盆地东南部页岩的地质特征,阐明研究区山西组页岩气形成的条件和地质要素,在实测资料基础上,重点分析有机质丰度、热演化成熟度、物性、岩相等影响山西组页岩含气性的关键要素,总结页岩气富集控制因素,为寻找盆地页岩气有利勘探目标提供指导。

1 区域地质背景

鄂尔多斯盆地位于中国中西部地区,是一个整体沉降、坳陷迁移、构造简单的大型多旋回克拉通盆地(付金华等,2013),其古生界构造可细分为西缘逆冲带、天环坳陷、伊盟隆起、伊陕斜坡、渭北隆起、晋西挠褶带 6 个构造单元(卢进才等,2006)。研究区域地处鄂尔多斯盆地伊陕斜坡的东部(图1),其地质构造为西倾的单斜构造,面积约20 km²。

在单井地层划分基础上,通过地层对比研究显示,延安地区山西组地层厚度发育较稳定,一般为80~135 m,最大厚度在150 m左右。其中,山1段厚度在40~70 m之间,平均值为51.5 m,岩性主要发育暗色泥岩,包括炭质泥岩、页岩,以及厚度不等的细砂岩夹薄层粉砂岩和少量煤层。山2段厚度在40~65 m之间,平均值为50.3 m。山2段中上部为

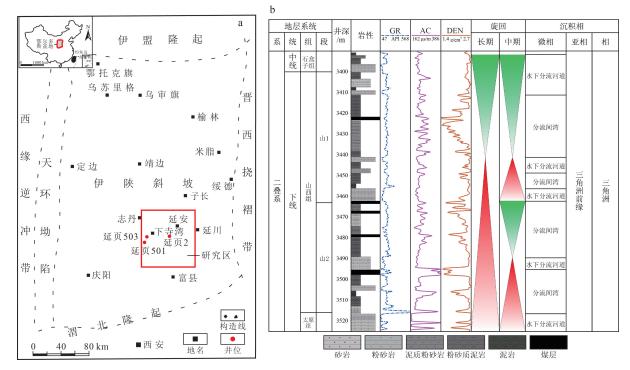


图 1 研究区构造位置(a)和地层综合柱状图(b)

Fig. 1 Structural location(a) and stratigraphic comprehensive histogram(b) of the study area

黑色泥岩、灰色粉细砂岩及煤层,沉积构造主要发育水平层理、交错层理、斜层理等。山2段下部主要发育黑色泥页岩夹深灰色泥质粉砂岩,以及高等植物的根茎叶化石,黄铁矿较多,沉积构造主要发育水平层理、块状层理。

2 样品及实验方法

山西组泥岩样品取自延页 2 井、延页 501 井、延 页 503 井、长 96 井等。

本次研究采用 LECO CS230 碳硫分析仪测定总有机碳(TOC)含量。首先,对实验所需的页岩样品进行研磨。其次,采用盐酸去除样品中的碳酸盐。然后将样品在 $900 \sim 1000$ ℃的氧气中燃烧 2 h 左右,最后用固体红外探测器测量 CO_2 气体的含量。

根据中国石油天然气行业标准 SY/T 5124 (2012),采用反射式光学显微镜,测定镜质组(R_o)在油浸粘附条件下的平均随机反射率。

根据中国石油天然气行业标准 SY/T5163 (1995),采用 Bruckerd 8 Advance 型 X 射线衍射仪分析矿物组成。

解吸罐测试用于确定页岩样品的总吸附气含量。解吸气量指常压下页岩样品在样品解吸罐中

密封后自然解吸出的气体量(曾维特等,2014)。岩心从钻孔中提出后,迅速密封在密封槽中,然后放入预热的水浴箱中,模拟储层温度进行解吸。最后通过 Langmuir(1918) 吸附法对得到的吸附实验结果进行探究。

3 影响页岩气富集的主要因素

结合国内外其他盆地页岩气勘探的实践经验,通过观察野外剖面、钻井岩心,选取延安探区页岩样品,结合钻井、测井资料,开展有机碳、岩石热解、镜质体反射率等测试,同时进行薄片鉴定、全岩和粘土矿物、页岩孔隙度、渗透率、页岩解析气、等温吸附等实验,对研究区山西组页岩气的富集及主控因素进行详细的探讨,认为研究区山西组页岩气的成藏控制因素有7个,其中有机质丰度、成熟度、物性为主要控制因素,矿物脆度、埋藏深度或压力为次要因素,后者对页岩气富集保存也具有控制作用。

3.1 山西组有机质丰度与含气性

沉积相研究显示,山西组储层纵向上岩性变化快,单层厚度薄,页岩与煤层伴生,页岩富含植物茎叶化石,通常沉积在三角洲富植沼泽与贫植沼泽环境。根据页岩热解分析的结果,有机质类型以Ⅲ型

2023年

3.1.1 山西组有机碳特征

1426

研究区有机碳总量(TOC)在山西组内部变化 范围较大,主要展布范围为 0.34% ~29.30%, 主峰有 2个区间,分别为 1.0%~1.5% 及大于 3%。实测样 品中,山1段 TOC 范围为 0.1%~3.5%,平均为 0.75%, 山西组山 2 段泥页岩样品 TOC 范围为 0.1%~5.1%,平均为0.67%,多数样品烃源岩级别较 好,基本为黑色泥岩及炭质泥岩(图2);按照页岩气 开发标准,有机碳大于2%,山西组的有机碳能够达 到页岩气含气标准。

3.1.2 有机碳含量与解析气含量

代表页岩气含量的解析气量是评价研究区是 否具备页岩气商业开发的关键指标。多数样品有机

碳含量大于 1%,可以满足解析气含量达到 1 m³/t,总 体上有机碳含量与解析气含量呈正相关性,随着有 机碳含量的增高,解析气总量增大(图3)。同样,在 四川盆地威远地区的下寒武统筇竹寺组和长宁地 区下志留统龙马溪组页岩中,存在 TOC 与解析气 的正相关性(黄金亮等,2012;孟宪武等,2014;张瑜 等,2015)。研究表明,研究区有机碳含量的高低是 生成页岩气的关键,高有机质不仅提供了生成天然 气的物质基础,而且形成了大量的有机质孔隙(付 常青等,2016),有利于储层孔隙发育,为页岩气的 保存和富集提供了存储条件,对泥页岩中页岩气的 含量起到直接控制作用。

GEOLOGICAL BULLETIN OF CHINA

根据研究区山西组有机碳与等温最大吸附气 量关系图(图4)可以得出,等温吸附气含量随着有 机碳含量的增高而增高,说明有机碳含量与等温吸

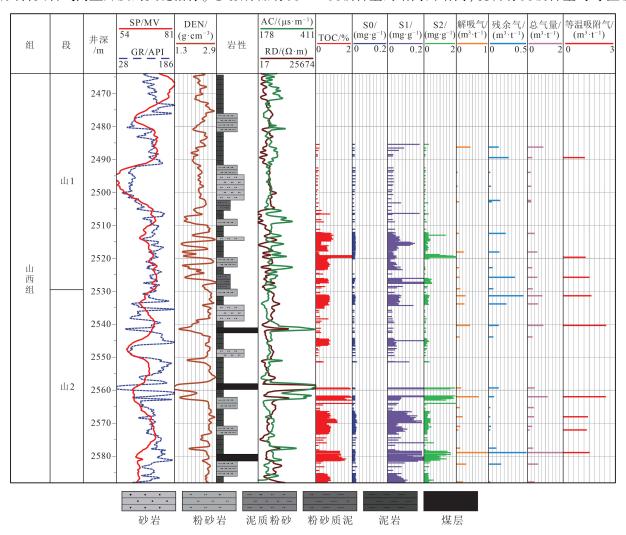


图 2 延页 2 井山西组地球化学参数与含气量图

Fig. 2 Geochemical parameters and gas content of Shanxi Formation in Yanye No.2 well

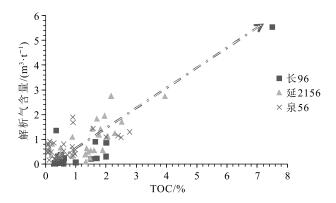


图 3 研究区山西组有机碳与解析气总量关系图 Fig. 3 Chart of relationship between organic carbon and total desorbed gas of Shanxi Formation in the study area

附气具有一定的正相关性,等温吸附气的含量与泥页岩的吸附储集空间呈正相关性,代表潜在的吸附能力,表明有机碳对页岩的吸附气含量具有直接的控制作用。

对延页 2 井山西组的页岩样品进行热解分析,得到 S_0 、 S_1 和 S_2 含量参数 (S_0 为 C_1 ~ C_7 的气态烃类组分含量,单位为 mg/g; S_1 为 C_8 ~ C_{33} 的液态烃类组分含量,单位为 mg/g; S_2 为大于 C_{33} 重油及胶质和沥

青质的含量,单位为 mg/g)。根据延页 2 井地球化学参数与含气量综合柱状图(图 2)得出,有机碳含量、热解参数游离烃 (S_0,S_1) 及热解烃 (S_2) 均与解析气含量、等温吸附气含量呈现正相关性。综上所述,研究区有机质丰度的高低对页岩气的含量大小具有直接控制作用,是影响页岩气产量最主要的控制因素。

3.2 有机质成熟度与含气性

3.2.1 山西组有机质成熟度

镜质组反射率(R_o)是表征烃源岩有机质热演化程度的最主要指标。研究区山西组泥页岩样品的镜质组反射率结果显示,泥页岩均已达到高成熟阶段,山2段 R_o分布在2.0%~3.34%(41个样品)之间,平均2.51%(图5),已经进入生气阶段;山1段 R_o分布在1.765%~3.38%(19个样品)之间,平均2.39%(图5),山1段镜质体反射率 R_o略低于山2段,也已经进入生气阶段,高于商业开发页岩气成熟度 R_o=1.1%的下限标准,有利于页

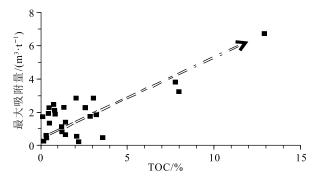


图 4 研究区山西组有机碳与等温最大吸附气量关系图 Fig. 4 The relationship between organic carbon and isothermal maximum adsorption gas volume of Shanxi Formation in the study area

岩气的聚集成藏(王社教等,2012)。

3.2.2 有机质热演化程度与含气量

油气生成理论认为,有机质热演化程度与天然 气的生成呈正比,随镜质体反射率 R。的增高,泥页 岩中生成的天然气增加。实验结果显示,代表页岩 气的解析气含量随着 R。增大而增大(图 6),有机质

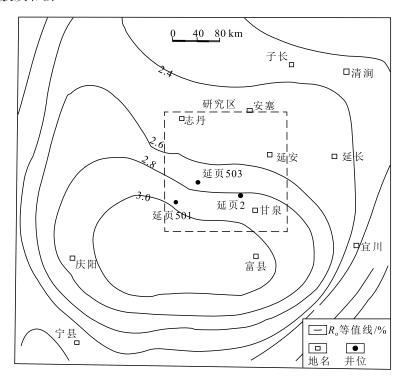


图 5 研究区山西组镜质体反射率 R_o 等值线图 Fig. 5 R_o contours map of vitrinite reflectance of Shanxi Formation in the study area

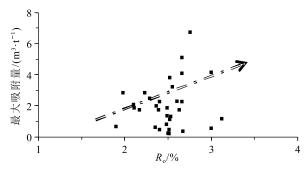


图 6 山西组境质体反射率体与等温最大吸附气量关系图 Fig. 6 Chart of the relationship between the vitrinite reflectivity and the maximum isothermal adsorption gas volume of the Shanxi Formation

热演化程度的增高直接控制泥页岩中页岩气的含 量,说明有机质的热演化程度是页岩气含量的基本 控制因素之一。

3.3 物性与含气性

根据储层物性测试数据,研究区山西组页岩孔 隙度分布在 0.4%~1.5% 之间,平均为 0.77%, 孔隙

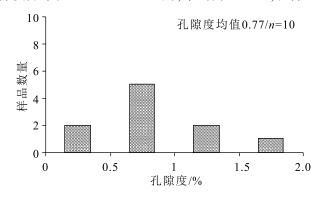
度低于商业开发页岩气要求的储层孔隙度 2%的下 限(兰朝利等,2016),说明研究区山西组泥页岩的 储存富集能力较差,达不到商业开发的稳产水平。 其渗透率较高,在 0.0066×10⁻³~0.2416×10⁻³ μm²之 间,平均 0.039×10⁻³ μm²,远高于商业开发页岩气所 要求的储层渗透率 10×10⁻⁹ μm²的下限,气井的开 发有望获得较高的产能(图7)。

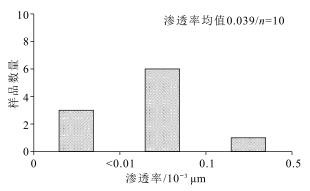
孔隙度与解析气含量关系图(图8)显示,随着 泥页岩孔隙度的增大,解析气含量也具有变大的趋 势,同时孔隙度增大,气测曲线显示的游离气含量 也在不断增大,说明页岩储层中的孔隙结构是页岩 气生成聚集的重要空间,研究区泥页岩物性的发育 程度是页岩含气量的控制因素之一。

岩相与含气性

GEOLOGICAL BULLETIN OF CHINA

对山西组采集的岩心观察可知,细粒岩石以灰 色、深灰色、黑色和灰黑色为主,其沉积构造主要为 块状层理和水平层理,也可以见到波状层理和透镜 状层理(图 9-a),岩性以页岩、含炭质页岩、炭质页





山西组泥页岩物性分布直方图

Fig. 7 Histogram of the physical distribution of mud shale in Shanxi Formation

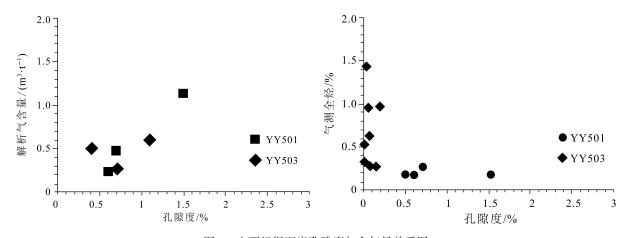


图 8 山西组泥页岩孔隙度与含气量关系图

Chart of the relationship between porosity and gas content of shale in Shanxi Formation

岩、含粉砂页岩和粉砂质页岩为主。有机质的类型包括顺层面富集的炭屑、植物茎干和页片(图 9-b);有机质含量变化较大,并对岩石颜色产生直接影响。页岩粒度分析的实验结果显示,粒径大多分布在 100~600 nm 之间,属粘土级,分选较差;部分含粉砂,粒径分布为 200~1000 nm,分选性较差。

3.5 粘土矿物与含气性

页岩的脆度由脆性矿物含量体现,其中石英、长石和方解石为最重要的脆性矿物,其含量直接决定了页岩气储层的脆性和可压裂性(张瑜等,2015),有利于后期储层压裂改造。粘土矿物通常被视为塑性矿物,高岭石、蒙脱石、伊利石、绿泥石、伊蒙混层等都属于粘土矿物,其吸附气体的能力较强,页岩气会以吸附态大量保存在泥页岩中,造成脱附困难,影响产气量。商业开发页岩气储层一般希望脆性矿物含量大于40%,而粘土含量小于30%(赵佩等,2014)。例如中国四川盆地下寒武统筇竹寺组,现已有大量的页岩气采出,其脆性矿物含量分布在55.6%~73.9%之间,平均值为64.1%(王道富等,

2013),下志留统龙马溪组页岩脆性矿物含量分布在 26.9%~86.6%之间,平均值为62.5%(王玉满等,2012)。

山西组泥页岩全岩 X-衍射数据显示,山 2 段粘土矿物的平均值为 60.28%,相对于山 1 段粘土矿物含量 57.87%略高,总体体现出陆相泥页岩粘土矿物含量高,导致页岩吸附气含量高。根据研究区山西组粘土矿物与气测曲线关系图(图 10),可以得出粘土矿物与代表游离气的气测全烃指数具有负相关性,随着粘土矿物含量增高,气测全烃含量降低。说明粘土矿物是影响页岩气产量的基本控制因素之一。

3.6 埋藏深度及保存压力

探区内目前发现页岩气产量的井主要分布在鄂尔多斯盆地东部,构造位置在伊陕斜坡东缘,靠近黄河峡谷地域,从北部到南部,即延川—张家滩—云岩—宜川—线,地层逐渐抬升,云页3—云页4—延页2—云页2,发现页岩气的山1段埋藏深度在2200~2400m之间,属于鄂尔多斯盆地山西组埋藏较浅的位置,埋藏浅,有利于页岩气开采,同时,如果微裂缝发育,会导致页岩气散失。

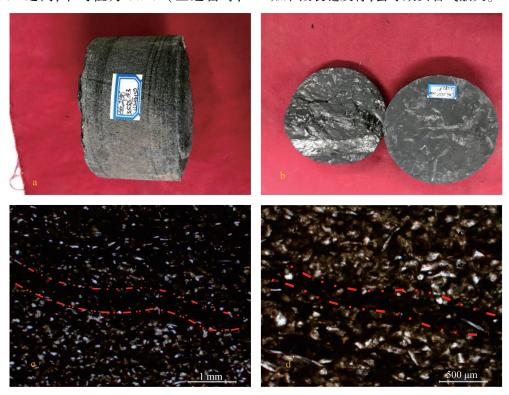


图 9 Y2156 山西组中发育层理和植物叶脉化石

Fig. 9 Development bedding and plant leaf vein fossils in Shanxi Formation of Well Y2156 a—Y2156 井,山西组,3589.93 m,水平层理,岩性包括页岩、炭质页岩、粉砂质页岩;b—Y2156 井,山西组,3560.20 m,灰黑色泥岩中的植物碎屑、茎、叶;c—Y2156 井,山西组,3562.12 m,泥质粉砂岩,水平层理,正交偏光,×5;d—Y2156 井,山西组,3587.56 m,泥质粉砂岩,交错层理,正交偏光,×10

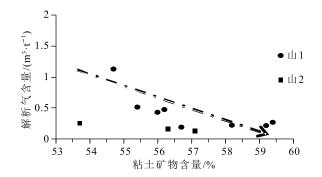


图 10 山西组粘土矿物与解析气含量关系图 F gi. 10 Chart of the relationship between clay minerals and gas logging curve of Shanxi Formation

通过对延安地区山西组近70口井早白垩世末 期的过剩压力恢复,山西组山1段早白垩世末期泥 页岩中的过剩压力较高,发育了多个大于 10 MPa 的相对高值区,中心部位可达 15 MPa 以上,最大可 达 30 MPa。在延川—张家滩—云岩—宜川一线,早 白垩世地层过剩压力基本在 10 MPa 以上,目前山 西组页岩层系中试气量较高的云页平 1、云页平 3、 云页2井,山西组山1段早白垩世末期泥页岩中的 过剩压力基本在 15~20 MPa 之间, 云页 4、延页 2 井 在 10~15 MPa 之间, 云页 5 井在 5~10 MPa 之间。 地层过剩压力是用地层异常压力减去静水柱压力, 一般情况下,较高的过剩压力可以有效地阻止下伏 储层中天然气向上运移,对下覆气藏起到"高压封 存"的作用。随压力的增大,赋存气体的含气量呈 增大趋势,但压力增大到一定程度后,含气量增加 缓慢,一定高的地层压力有利于吸附气的储存。

GEOLOGICAL BULLETIN OF CHINA

云页平3、云页4、延页2、云页5、云页2井等在山1 段泥岩中发现有页岩气产出,其中,在水平井组云页平 3,产量较高,日产 4.59×10⁴ m³。单井中,延页 2 井,日 产 0.35×10⁴ m³, 云页 2 井, 日产 0.13×10⁴ m³(图 11), 单

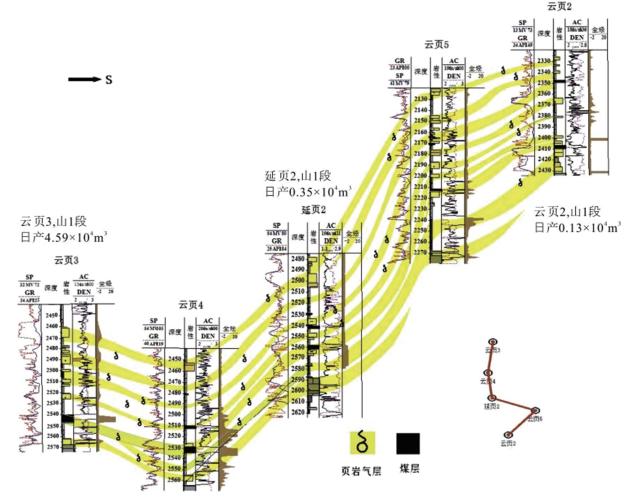


图 11 探区内山西组 1 段页岩气产层及产量

Fig. 11 Production layer and production of the shale gas in the 1 member of Shanxi Formation in the exploration area

井产量较低,符合陆相页岩气的特征。产出页岩气的岩性主要为泥岩、薄层砂岩或二者互层,薄砂层厚度小于5 m,云页2 井,井深在 2360~2380 m;延页2 井,井深在 2490~2510 m;云页平3 井,井深在 2460~2475 m;山2 段泥岩中气态烃含量显示比山1 段还要高,由于山2 段含有薄煤层,压裂求产,会导致出水,影响正常的致密砂岩气的产出,故目前只在山1 段求产。

综上所述,在一定范围内埋藏深度和地层过剩 压力对页岩气的保存具有控制作用。

4 结 论

- (1)有机碳含量、热解参数游离烃(S_0 、 S_1)及热解烃(S_2)均与解析气含量、等温吸附气含量呈现正相关性。研究区有机质丰度的高低对页岩气的含量具有直接控制作用,是影响页岩气产量最主要的控制因素。
- (2)镜质体反射率 R。与解析气、残余气及总含气量具有正相关关系,有机质成熟度的高低对页岩气的含量高低具有直接控制作用,是影响页岩气产量的基本控制因素。
- (3)泥页岩物性的发育程度对页岩的含气量具有控制作用。
- (4)粘土矿物与解析气具有负相关性,体现在粘土矿物含量高,导致页岩吸附气含量高的特点。
- (5)埋藏深度及地层过剩压力对页岩气的保存 具有决定作用。

参考文献

- Li Y, Yang J H, Pan Z J, et al. Unconventional natural gas accumulations in stacked deposits: A discussion of Upper Paleozoic coal—bearing strata in the east margin of the Ordos Basin, China [J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(1):111–129.
- Liang Q S, Hang X, Tian J C, et al. Geological and geochemical characteristics of marine—continental transitional shale from the Lower Permian Taiyuan Formation, Taikang uplift, southern North China Basin[J].Marine and Petroleum Geology, 2018, 98: 229—242.
- Langmuir I. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum [J]. Am. Chem. Soc., 1918, 40(9): 1361-1403.
- 曹军,刘成林,马寅生,等.柴达木盆地东部石炭系海陆过渡相煤系页 岩气地球化学特征及成因[J].地学前缘,2016,23(5):158-166.
- 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.
- 付金华,郭少斌,刘新社,等.鄂尔多斯盆地上古生界山西组页岩气成藏条件及勘探潜力[J].吉林大学学报(地球科学版),2013,43(2):382-389.
- 付常青,朱炎铭,陈尚斌.浙西荷塘组页岩孔隙结构及分形特征研究[J]. 中国矿业大学学报,2016,45(1):77-86.

- 黄金亮,邹才能,李建忠,等.川南下寒武统筇竹寺组页岩气形成条件及资源潜力[J].石油勘探与开发,2012,39(1):69-75.
- 琚宜文,戚宇,房立志,等.中国页岩气的储层类型及其制约因素[J].地球科学进展,2016,31(8):782-798.
- 医立春,董大忠,何文渊,等,鄂尔多斯盆地东缘海陆过渡相页岩气地质特征及勘探开发前景[]].石油勘探与开发,2020,47(3):435-446.
- 卢进才,李玉宏,魏仙样,等.鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7油层组油页岩沉积环境与资源潜力研究[J].吉林大学学报(地球科学版),2006,(6):928-932.
- 兰朝利,郭伟,王奇,等.鄂尔多斯盆地东部二叠系山西组页岩气成藏条件与有利区筛选[∏.地质学报,2016,90(1):177-188.
- 李剑, 佘源琦, 高阳, 等. 中国天然气产业发展形势与前景[J]. 天然气工业, 2020, 40(4): 133-142.
- 刘亢.鄂尔多斯盆地石炭—二叠纪海陆过渡相页岩气成藏条件及勘探潜力[J].中国煤炭地质,2021,33(9):1-7.
- 孟宪武,田景春,张翔,等.川西南井研地区筇竹寺组页岩气特征[J].矿物岩石,2014,32(2):96-105.
- 孟凡洋,陈科,包书景,等.鄂西巴东地区(巴页 1 井)发现海陆过渡相页岩气[J].中国地质,2017,44(2):403-404.
- 石油勘探开发科学院实验中心.中国石油天然气行业标准 SY/T5163—1995[S].1995.
- 孙则朋,王永莉,魏志福,等.海陆过渡相页岩含气性及气体地球化学特征:以鄂尔多斯盆地山西组页岩为例[J].中国矿业大学学报,2017,46(4):859-868.
- 王社教,杨涛,张国生,等.页岩气主要富集因素与核心区选择及评价[J].中国工程科学,2012,14(6):94-100.
- 王玉满,董大忠,李建忠,等.川南下志留统龙马溪组页岩气储层特征[J].石油学报,2012,33(4):551-561.
- 王道富,王玉满,董大忠,等,川南下寒武统筇竹寺组页岩储集空间定量表征[J].天然气工业,2013,33(7):1-10.
- 吴小力,李荣西,李尚儒,等.下扬子地区海陆过渡相页岩气成藏条件与主控因素: 以萍乐坳陷二叠系乐平组为例[J].地质科技情报,2018,37(1):160-168.
- 吴鹏,曹地,朱光辉,等.鄂尔多斯盆地东缘临兴地区海陆过渡相页岩 气地质特征及成藏潜力[J].煤田地质与勘探,2021,49(6):24-34.
- 郗兆栋,田忠斌,唐书恒.鄂尔多斯盆地东缘海陆过渡相页岩气储层 孔隙特征及影响因素[J].中国地质,2016,43(6):2059-2069.
- 闫德宇,黄文辉,张金川.鄂尔多斯盆地海陆过渡相富有机质泥页岩特征及页岩气意义[J].地学前缘,2015,22(6):197-206.
- 曾维特,张金川,丁文龙,等.延长组陆相页岩含气量及其主控因素——以鄂尔多斯盆地柳坪 171 井为例[J].天然气地球科学,2014,25(2):291-301.
- 赵佩,李贤庆,孙杰,等.川南地区下古生界页岩气储层矿物组成与脆性特征研究[J].现代地质,2014,28(2):396-403.
- 张琴,邱振,张磊夫,等.海陆过渡相页岩气储层特征与主控因素——以鄂尔多斯盆地大宁—吉县区块二叠系山西组为例[J].天然气地球科学,2022,33(3): 396-407.
- 张瑜, 闫建萍, 贾祥娟, 等.四川盆地五峰组—龙马溪组富有机质泥岩孔径 分布及其与页岩含气性关系[]]. 天然气地球科学, 2015, 26(9): 1755-1762.
- 中国石油勘探开发研究院.中国石油天然气行业标准 SY/T 5124—2012[S].2012.
- 邹才能,潘松圻,荆振华,等.页岩油气革命及影响[J].石油学报,2020,41(1):1-12
- 邹才能,赵群,丛连铸,等.中国页岩气开发进展、潜力及前景[J].天然气工业,2021,41(1):1-14.