鄂尔多斯盆地东部山西组页岩气成藏特征及勘探对策

刘洪林[1,2,3)]，王怀厂[4)]，张辉[4)]，赵伟波[4)]，刘燕[4)]，刘德勋[1,2,3)]

1）中国石油勘探开发研究院，北京，100083；2）中国石油非常规油气重点实验室，北京，100083；
3）国家能源页岩气研发(实验)中心，河北廊坊，065007；4）中国石油长庆油田勘探开发研究院，西安，710021

内容提要：我国海陆过渡相页岩气资源量约占全国资源总量的三分之一，勘探开发前景广阔。鄂尔多斯盆地过渡相页岩分布范围广、厚度大，受到广泛关注，勘探开发一直未能获得突破。为查明过渡相页岩地质特征与海相页岩储层特征及成藏规律的差异，本文以鄂尔多斯盆地东部山西组页岩为例，通过总有机碳、镜质组反射率、矿物组成、微观孔隙和含气量分析开展页岩气生成、储集和成藏过程的对比研究，分析认为山西组页岩成藏过程有其特殊性，其干酪根来源于Ⅲ型高等植物，液态烃产量很少，缺乏气泡成孔过程，有机质纳米孔数量少，砂泥煤互层的沉积特征排烃效率高，影响页岩含气性。山西组页岩气形成后，大部分页岩气已运移到附近砂岩中形成致密气，致密砂岩、煤层和页岩呈三明治式成藏。预测研究区内东南部为有利区域。在勘探山西组页岩气时考虑煤系“含气带”，通过立体勘探寻找有利的富气层段。

关键词：鄂尔多斯；山西组；页岩；有机质纳米孔

我国页岩气勘探开发工作在最近几年取得了较快发展，海相页岩气勘探开发关键技术已经取得重大突破，在四川盆地长宁、威远、涪陵和云南昭通地区建成了国家级页岩气示范区。除海相地层外，海陆过渡相地层是重要领域。据统计，我国海陆过渡相页岩气可采资源 $8.97\times10^{12}\,m^3$，鄂尔多斯盆地占一半以上(Ross and Bustin，2007；Yu Bingsong，2012；Gong Meilin et al.，2013；Dong Dazhong et al.，2016)。与海相地层相比，海陆过渡相利于形成页岩气、煤层气和砂岩气等多种类型天然气叠置气藏(Wang Shejiao et al.，2011；Feng Ziqi et al.，2013；Yan Deyu et al.，2015；Sun Zepeng et al.，2017)。过渡相地层往往呈现页岩频繁与煤、致密砂岩互层，纵横向变化快，单层厚度小，累计厚度大的特征(例如，Yan Deyu et al.，2013，2015；Fu Jinhua et al.，2013；Zhao Keying and Guo Shaobin，2015；Lan Chaoli et al.，2016；Zhou Shuai et al.，2016)。海陆过渡相页岩有机质含量变化较大，有机质类型以混合型-腐殖型为主(例如，Zhang Jizhen et al.，2015；Lan Chaoli et al.，2016；Tang Xuan et al.，2016；Xiong Fengyang et al.，2017；Yang Chao et al.，2017)；孔隙类型主要有粒间孔、晶间孔、溶蚀孔、微裂缝和有机质孔隙，其中有机质孔发育程度差异较大(例如，Zhao Keying and Guo Shaobin，2015；Zhang Jizhen et al.，2015；Xiong Fengyang et al.，2017；Zhang Qin et al.，2017)；黏土矿物含量较高，可压裂性较海相地层页岩差(例如，Fu Jinhua et al.，2013；Lan Chaoli et al.，2016)。目前，国内针对海陆过渡相页岩气藏的研究主要集中在四川盆地周缘龙潭组(Liu Guangxiang et al.，2015；Zhang Jizhen et al.，2015；Meng Fanyang et al.，2017)和鄂尔多斯盆地山西组、太原组和本溪组(例如，Fu Jinhua et al.，2013；Guo Wei et al.，2015；Zhao Keying and Guo Shaobin，2015；Lan Chaoli et al.，2016；Tang Xuan et al.，2016；Xiong Fengyang et al.，2017；Zhang Qin et al.，2017)。一些生产公司开展了海陆过渡相页岩气勘探开发试验，在一些探井获得页岩气流，但是还没有获得商业突破。本文

注：本文为国家科技重大专项(编号2017ZX05035)和中国石油科技重大专项(编号2019B-49)资助的成果。
收稿日期：2019-11-11；改回日期：2020-01-17；网络发表日期：2020-02-12；责任编委：邱楠生；责任编辑：周健。
作者简介：刘洪林，男，1973年生。博士，高级工程师，非常规油气专业。Email：liuhonglin69@petrochina.com.cn。

引用本文：刘洪林，王怀厂，张辉，赵伟波，刘燕，刘德勋. 2020. 鄂尔多斯盆地东部山西组页岩气成藏特征及勘探对策. 地质学报，94(3)：905～915，doi：10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2020139.
Liu Honglin，Wang Huaichang，Zhang Hui，Zhao Weibo，Liu Yan，Liu Dexun. 2020. Geological characteristics and exploration countermeasures of shale gas in the Shanxi Formation of the Ordos basin. Acta Geologica Sinica，94(3)：905～915.

以鄂尔多斯盆地山西组页岩为研究对象，通过对露头和岩芯样品进行总有机碳(TOC)、镜质组反射率(R_o)、全岩矿物组成、微观孔隙类型和含气量分析，分析山西组页岩储层地质特征，在此基础上探讨山西组页岩气藏成藏特殊性，并提出经济勘探开发山西组页岩的勘探策略，对于加快海陆过渡相页岩气勘探开发具有重要意义。

1　区域地质概况

鄂尔多斯盆地属于华北克拉通的一部分，现今基本构造格局形成于燕山期，发展完善于喜马拉雅期，整个盆地构造面貌总体为一东翼缓而长、西翼陡而短、南北翘起的不对称大向斜。根据盆地基底特征、构造形态，结合沉积和油气分布等特点，分为6个一级构造单元：渭北挠褶带、西缘冲断推覆构造带、天环凹陷、陕北斜坡、晋西挠褶带、伊盟隆起(Zhao Keying and Guo Shaobin，2015；Sun Zepeng et al.，2017)。鄂尔多斯盆地晚古生代经历了陆表海、近海湖盆以及内陆拗陷湖盆等古地理演化过程(Yan Deyu et al.，2013；Zhou Shuai et al.，2016)。研究区位于鄂尔多斯盆地东部(图1)。

研究区过渡相地层主要发育在中石炭统本溪组、上石炭统太原组和下二叠统山西组。其中，本溪组以障壁岛-潮坪-泻湖为主；太原组发育辫状河-三角洲-泻湖-潮坪-障壁岛-浅海陆棚碳酸盐岩沉积；山西组以三角洲-潮坪沉积为主。总体来看，本溪组和太原组页岩欠发育，而山西组页岩普遍厚度大，为本文研究目的层段。

山西组根据岩性与电性特征划分为山一段和山二段。山一段以灰色砂岩与深灰色页岩互层为主，局部发育薄层煤线；山二段以黑色页岩与灰色砂岩为主，夹3～5层煤层，煤厚度普遍2～7m不等，其内部可划分为山$_2^1$、山$_2^2$ 和山$_2^3$ 三个砂组(图2)。山西组页岩普遍具有“四高两低”特征，即高伽马(GR)、高电阻率(RT)、高声波时差(AC)、高补偿中子(CNL)、低密度(DEN)和低光电效应(图2)。

2　样品和分析方法

本次研究在岩芯描述和露头考察基础上，共采集代表性露头和岩芯样品45个。页岩TOC使用LECO-CS230碳硫分析仪测试获得，依据标准为国标GB /T 19145—2003；R_o 使用Axio Scope A1显微光度计测定，通过测定沥青反射率计算得到等效镜质组反射率，测试依据分别为中国石油天然气行业标准SY /T5124—2012和SY/T5125—2014；矿物组成使用D/Max-2500PC X射线衍射仪进行测定，测试依据为SY/T5163-2010；微观孔隙采用氩离子抛光仪Gatan Model 697进行抛光，然后使用FEI Heilos 650F型扫描电镜进行微观孔隙观察；孔隙度用氦孔仪进行测定，渗透率采用脉冲方法获得。所有试验均在中国石油勘探开发研究院完成。

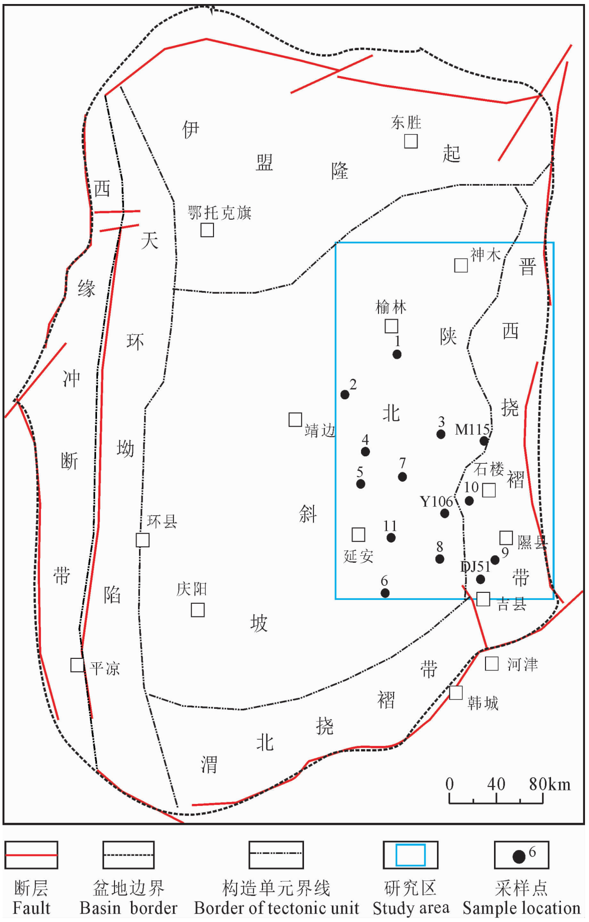

图1　鄂尔多斯盆地构造分区图

Fig. 1　Tectonic subdivision of Ordos basin

由于实测TOC含量样品较少，为更全面评价研究区山西组TOC含量分布，采取利用井实测TOC含量标定测井资料，再根据测井资料预测TOC含量的方法来评价研究区TOC含量的平面分布。由于富含有机质泥、页岩在测井上具有高RT、高AC、高GR、低DEN特征，综合利用这4条曲线可定量预测TOC含量(Xu Xiaohong et al.，1998；Wang Guiwen et al.，2002；Kinley et al.，2008；Yang Taotao et al.，2013)。根据井实测的TOC值和实测样品深度所对应的AC、DEN、GR及RT测井拟合的TOC含量计算方程为：

$$TOC=0.02268\times AC+4.776595\times \log RT+$$

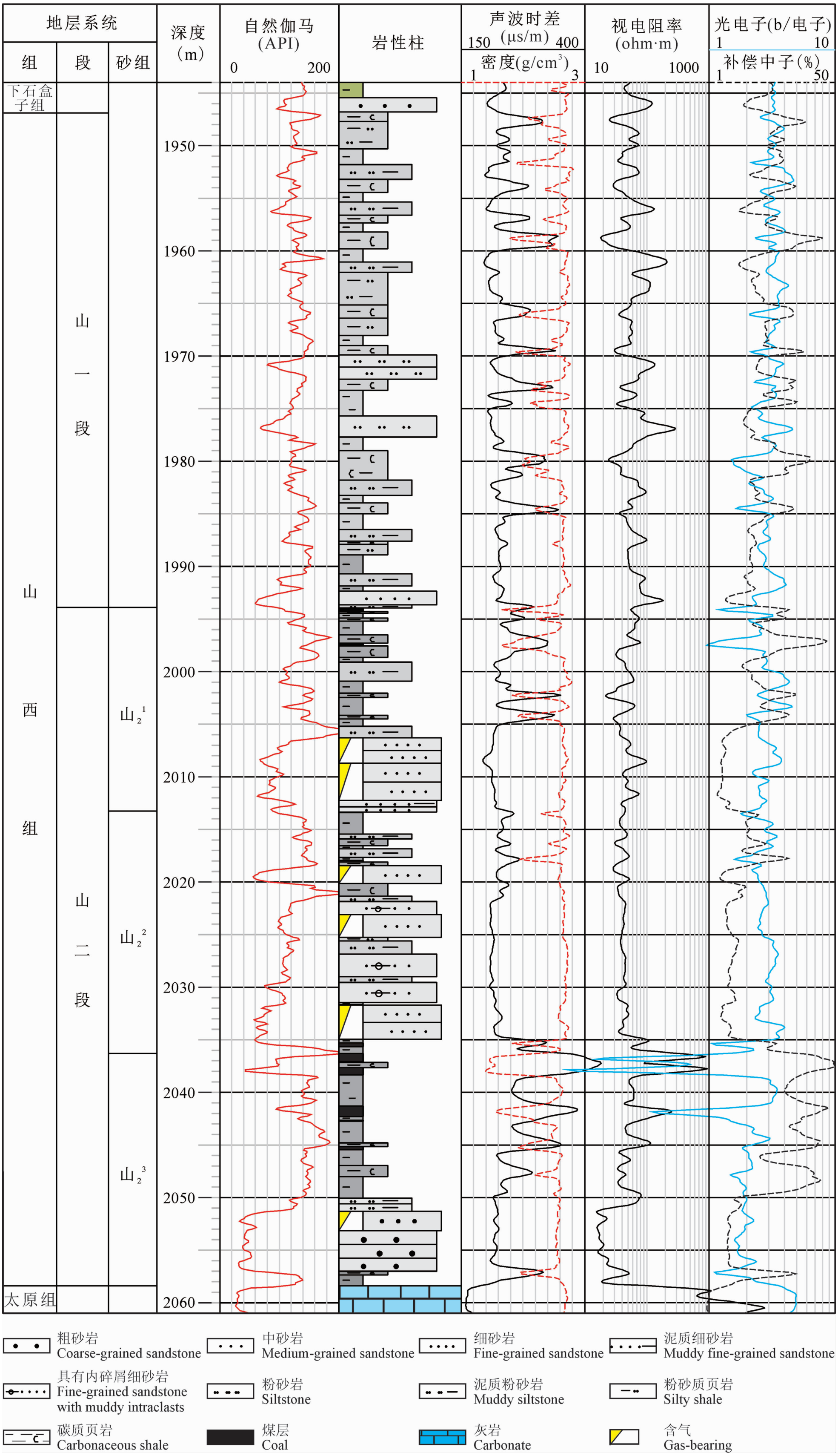

图 2　鄂尔多斯盆地东部山西组地层柱状图(Y106 井)

Fig. 2　Stratigraphic column of Shanxi Formation in eastern Ordos basin (well Y106)

1.078298×DEN−0.03825×GR−11.8104 (1)

式中:AC 为实测的声波时差(μs/m);RT 为实测的电阻率(Ω·m);DEN 为实测的密度(kg/m^3);GR 为实测的自然伽马(API)。

含气量根据现场解析实测获得。考虑到实测含气量数据较少,对缺少实测含气量数据的井点,根据公式(1)计算的 TOC,利用 Guo Wei et al. (2015)建立的 TOC 与含气量相关性关系,计算各井目的层含气量,用以预测含气量的平面变化。

3 山西组页岩储层地质特征

3.1 有机碳特征

研究区山西组山一段 TOC 含量 0.04%~19.4%,山二段页岩 TOC 含量 0.07%~16.5%,山西组页岩 TOC 峰值 1.0%~3.0%(图 3)。相比之下,山二段 TOC 更高。平面上,山西组 TOC 含量从东向西,总体有减小的趋势,其中东部存在两个高 TOC 含量区域,TOC 含量超过 3%,即府谷—神木—佳县和绥德—延川以东区块(图 4)。

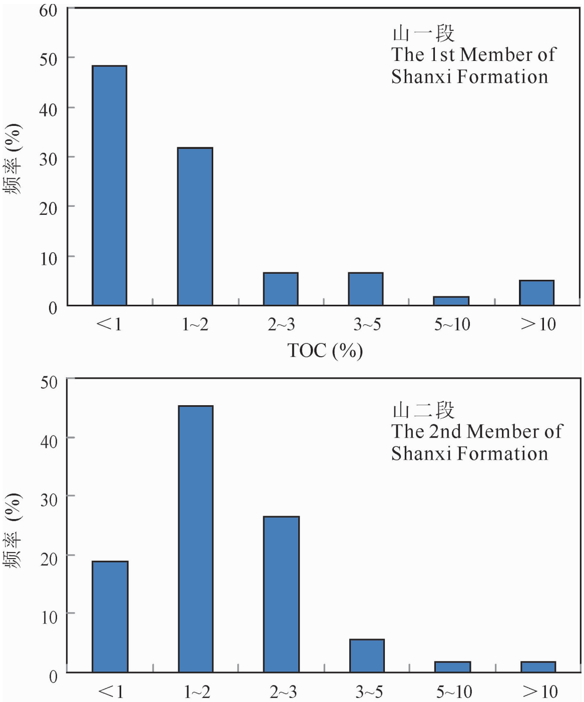

图 3 鄂尔多斯盆地东部山西组页岩 TOC 分布直方图

Fig. 3 Histogram map showing TOC of Shanxi shales in eastern Ordos basin

3.2 页岩平面分布特征

鄂尔多斯盆地东部在山西期形成了多套(碳质)页岩-灰色砂岩-(碳质)页岩-煤的三角洲-河流相沉

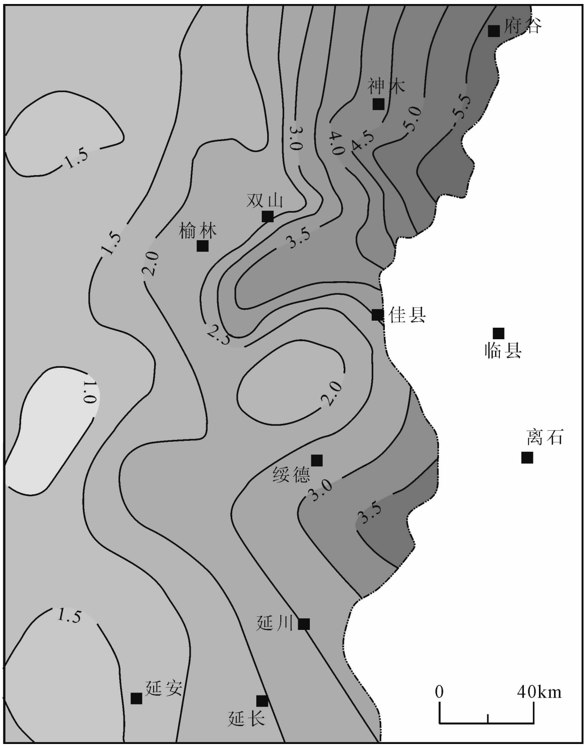

图 4 鄂尔多斯盆地东部山西组 TOC(%)等值线图

Fig. 4 TOC (%) isopach of Shanxi shales in eastern Ordos basin

积旋回。其中页岩普遍比较发育,一般 3~7 层。山一段页岩厚度 9.7~51.5m,平均 24.6m;山二段页岩厚度 21.4 ~92.3m,平均 41.2m。平面上,山西组页岩厚度中心分布在中部的榆林南—绥德西、东部的绥德—佳县以及南部的延安北—延川北,其中绥德—佳县地区最大厚度超过 90m(图 5)。

3.3 页岩储层微观特征

扫描电镜揭示研究区山西组页岩储层的孔隙类型主要有粒间孔、粒内孔、有机质孔和晶间孔(图 6)。从孔隙分布的比例来看,存在 20%~30%左右的有机质孔,孔隙直径一般小于 100nm,主要分布在 2~50nm 之间。孔隙形态呈开放状态,以两端开口的圆筒孔、四边开放的平行板孔(圆锥、圆柱、平板)及细颈瓶状(墨水瓶)孔等开放性孔为主(Fan Wentian,2019;Cao Taotao et al.,2016;Zhang Yan et al.,2017;Misch et al., 2016)。页岩孔隙度主要在 0.25%~4.85%之间,平均 2.3%,实测渗透率主要在 0.01×10^{-3}~0.1×10^{-3} μm^2 之间,平均 0.04×10^{-3} μm^2,且孔隙度与渗透率具有正相关关系。

3.4 页岩矿物组成

山西组山二段黑色页岩石英含量 8.2%~40.6%,黏土矿物含量 55.3%~70%,其余次要矿

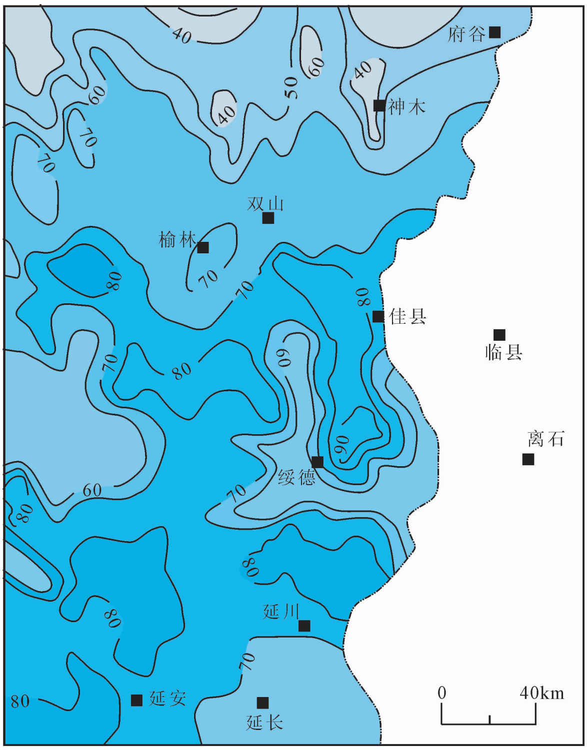

图 5　鄂尔多斯盆地东部山西组页岩等厚图(m)
Fig. 5　Thickness isopach (m) of Shanxi shales in eastern Ordos basin

物见黄铁矿、白云石、长石等。脆性矿物含量 9.5%～62.6%，平均 41.3%(图 7)。整体上，与美国和中国四川盆地海相页岩相比(Nie Haikuan et al.，2009；Zou Caineng et al.，2010；Li Jianzhong et al.，2012)，中国鄂尔多斯盆地东部山西组页岩脆性矿物较低而黏土矿物含量较高。

3.5　页岩成熟度

根据实测数据编制的鄂尔多斯盆地东部山西组页岩 R_o 等值线图显示(图 8)，目的层页岩 R_o 介于 1.2%～2.6%之间，平面上自北东向南西升高，与页岩埋深变化趋势具有良好的相关性。其中，沿绥德—榆林一线的东北部大部分地区小于 2.0%，该线南侧较高，一般超过 2.0%，部分地区达到 2.6%，反映研究区页岩普遍达到了生气高峰(Schenk et al.，1997；Fu Jinhua et al.，2013)。

3.6　页岩含气性

研究区山西组页岩含气量总体较低，普遍低于 2.0 m^3/t，多介于 0.5～2.0 m^3/t 之间。平面上，页岩含气量总体自北东向南西升高，高于 2.0 m^3/t 的区域分布在绥德—延川—延长以西至延安以东的区域(图 9)。这种含气量的平面变化趋势显示了与 TOC 和 R_o 平面分布(图 4 和图 5)具有较好的相关性。与海相页岩含气量(Nie Haikuan et al.，2009；Wang Shiqian et al.，2009；Zou Caineng et al.，2011；Li Jianzhong et al.，2012)相比，山西组页岩含气量普遍较低。

4　山西组页岩气藏成藏规律

山西组页岩及其共生砂岩与煤形成在海陆过渡相环境。这导致山西组页岩成藏条件与海相页岩成藏条件有两个显著不同的特征。

4.1　有机质类型及其成熟过程

海相页岩中的有机质来源主要为浮游生物，包括各种藻类、浮游动物，富含蛋白质、类脂化合物及部分碳水化合物，含有相对中等分子量的正构烷烃(C_{12}～C_{20})、正构脂肪酸、丰富的甾类(C_{27}胆甾烷)、类异戊二烯烷烃(C_{14}～C_{20})，甾萜比通常大于 1(Yang Cai et al.，2017；Zhang Qin et al.，2018)。

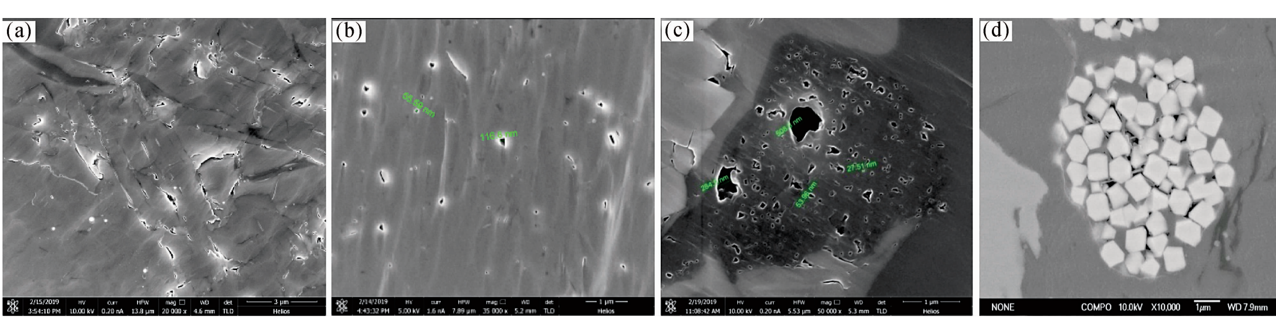

图 6　鄂尔多斯盆地东部山西组页岩孔隙类型扫描电镜图
Fig. 6　Typical FIB-SEM micrographs showing pore types of Shanxi shales in eastern Ordos basin
(a)—M115 井，粒间孔，山二段；(b)—Y106 井，粒内孔，山二段；(c)—DJ51 井，有机质孔，山二段；(d)—DJ51 井，黄铁矿晶间孔，山二段
(a)—Well M115, intergranular pores, the Second Member of the Shanxi Formation; (b)—Well Y106, pores within clastic grain, the Second Member of the Shanxi Formation; (c)—Well DJ51, pores within organic matter, the Second Member of the Shanxi Formation; (d)—Well DJ51, intercrystal pores among pyrites, the Second Member of the Shanxi Formation

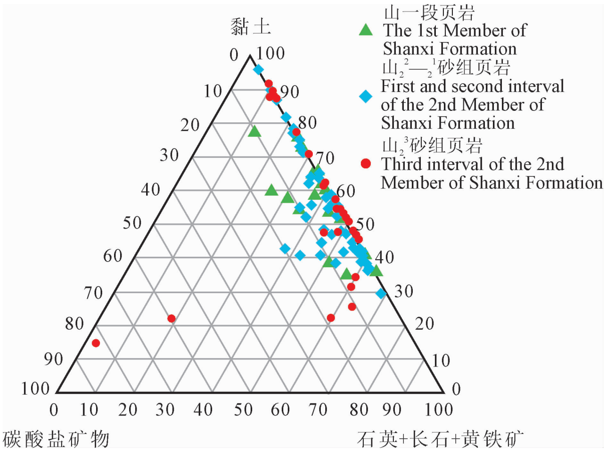

图 7　鄂尔多斯盆地山西组页岩矿物组成三角图

Fig. 7　Triangle diagram of mineral composition of Shanxi shale in eastern Ordos basin

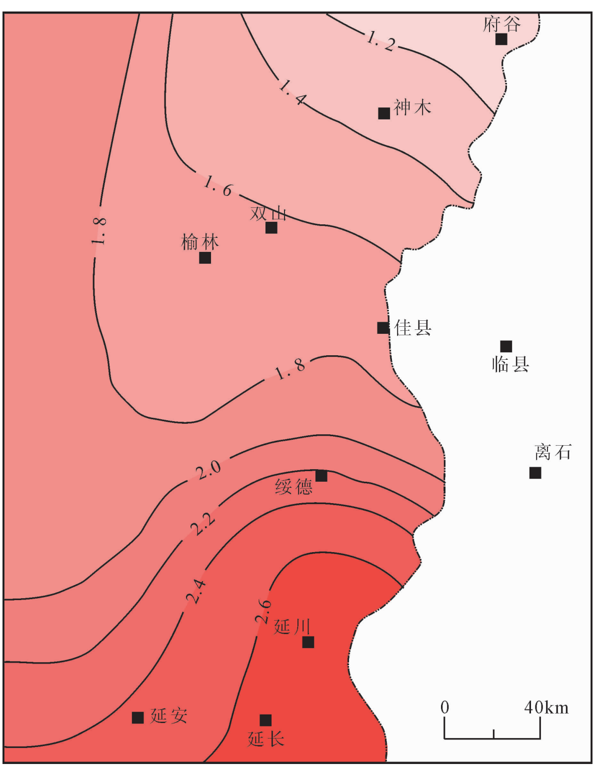

图 8　鄂尔多斯盆地东部山西组页岩 R_o(%)等值线图

Fig. 8　R_o(%) isopach of Shanxi shales in eastern Ordos basin

这些原始有机质易于形成Ⅰ、Ⅱ型为主的干酪根，在有机质成熟过程中会先生成大量液态烃，而这些液态烃在温度继续升高情况下会裂解形成甲烷，同时形成发育孔隙的沥青残余物。并且，海相页岩多形成于闭塞海盆底部，缺氧环境使硫还原进入沉积物形成硫化物，也有利于有机分子成环和芳构化，热演化过程中容易形成沥青，从而保存气泡成因的纳米有机质孔隙(Schenk et al.,1997)。

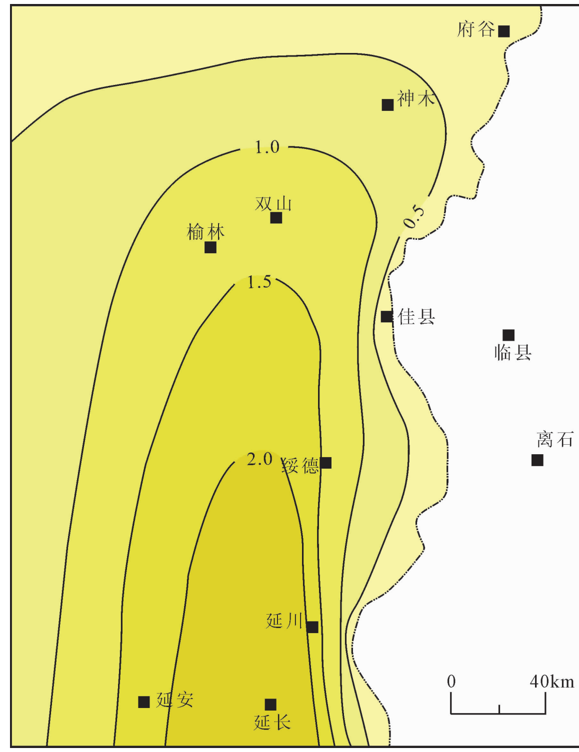

图 9　鄂尔多斯盆地东部山西组页岩含气量(m^3/t)等值线图

Fig. 9　Gas content (m^3/t) isopach of Shanxi shales in eastern Ordos basin

研究区山西组页岩主要形成在三角洲平原的沼泽环境和三角洲前缘分流间湾环境(Guo Wei et al.,2015)。页岩中形成有机质的原始物质主要为高等植物或湖泊水生生物，富含纤维素和木质素、蛋白质、类脂化合物，含有相对高分子量正构烷烃(C_{23}～C_{33})、各种萜类和藿烷甾族化合物(C_{27}、C_{28}和C_{29})、类异戊二烯烃(Schenk et al.,1997;Zhao Difei et al.,2018)。这些原始有机质形成的干酪根类型主要为Ⅲ型(Wang Shejiao et al.,2011;Zou Caineng et al.,2011;Zhang Lixia et al.,2012;Fu Jinhua et al.,2013;Yan Deyu et al.,2013;Yang Hua et al.,2013)。这使得山西组页岩有机质在成熟度逐渐升高过程中大多数直接生成甲烷，液态烃产量很少，没有发生大量的液态烃裂解生成甲烷，因此缺乏大量的液态烃裂解残余产物(沥青)及其中发育的气泡孔隙。这与观察到的山西组页岩孔隙中有机孔占比小于30%的现象相吻合。

4.2　山西组不同岩性空间配置关系及其对页岩气成藏的制约

目前已商业开发的海相页岩，包括美国的海相页岩和中国四川盆地志留系龙马溪组海相页岩，其连续厚度普遍较大，一般超过30m(Nie Haikuan et al.,2009;Wang Shiqian et al.,2009;Zou Caineng et al.,2011;Li Jianzhong et al.,2012)。海相页岩成熟过程中干酪根会先生成大量液态烃,但是较大的厚度不利于液态烃的排出,从而使较大数量的液态烃保留其中。继续升温过程中,液态烃裂解生成气态烃和富孔隙的残余沥青,并且生成的气态烃也由于海相页岩较大的厚度而不易排出,致使海相页岩往往含气量较高,包括吸附在残余沥青内的气态烃(图 10a)。

研究区位于鄂尔多斯盆地东部,山西组沉积时期位于晚古生代大华北克拉通盆地中部,物源主要来自盆地北部,沉积环境以三角洲-湖泊相为主(例如,Yu Xinghe et al.,2017;Chen Hongde et al.,2011;Guo Wei et al.,2015;Guo Yinghai and Liu Huanjie,1999),岩性主要由页岩和砂岩组成,下部的山二段发育 3～5 层煤。砂岩和页岩单层厚度较薄,且横向分布不稳定,厚度变化较大;煤层相对稳定,但是厚度变化也往往较大,多分布在页岩顶部。总体上,砂岩与页岩-煤组合呈互层关系,形成了具有“三明治”式特征的岩性空间结构(图 10b)。

山西组这种特殊的岩性结构以及以Ⅲ型干酪根为主的有机质类型,共同导致了山西组页岩或煤生成的天然气能够近距离、有效地排出到相邻砂岩中(即高效地排烃效率),形成常规砂岩气藏或致密砂岩气藏,从而导致页岩或煤中残余的天然气含量相对较少(图 10b),这可能是山西组页岩含气量较低的重要机制,也是与海相页岩气藏成藏特征的显著区别。

5　山西组页岩气藏勘探策略

勘探策略的制定与油气藏储量丰度关系密切。若某类岩性的油气藏储量丰度较高,可采取单独开采的策略。但是,当某类岩性的油气藏储量丰度低到实施单独开采无法获得经济效益时,则必须考虑其它勘探策略,以便于经济动用这类油气藏。

研究区山西组页岩含气量较低,单层厚度薄,横向分布不稳定,以及特殊的成藏条件都决定了山西组页岩具有较低储量丰度。因此,单独开采山西组页岩很难获得较好的经济效益。并且,山西组页岩脆性矿物含量较低,意味着储层改造效果也将受到一定程度影响,这进一步加剧了单独开发山西组页岩气藏的风险。对数口井页岩的试气效果证实了山西组页岩普遍较低的储量丰度。另一方面,研究区山西组的致密砂岩中往往存在具有较好物性的储

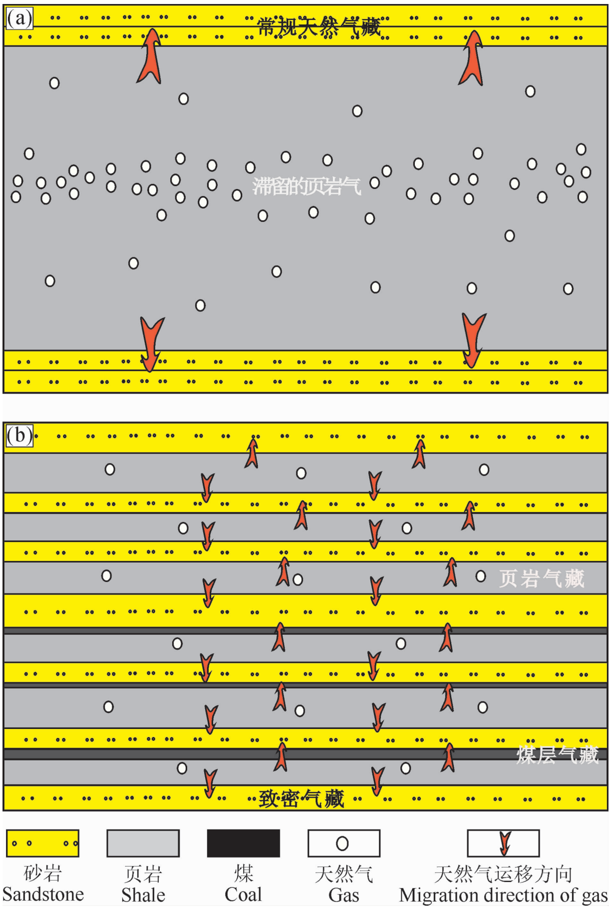

图 10　典型海相页岩气(a)与山西组页岩气(b)成藏模式对比

Fig. 10　Comparison of shale gas accumulation modes between typical marine shale (a) and Shanxi shale (b)

层,含气量高,这部分储层已获得商业开发,如子洲气田及其以北地区的部分山西组储层。但是其余的物性相对较差部分砂岩因为相对较为致密和含气量较低而未动用。此外,页岩顶部的煤层普遍含气量较高,一般可达到 6m^3/t,但是单层厚度往往小于 4m,难以单独开发。

由此,可以考虑对研究区山西组页岩气藏的勘探开发采取立体勘探开发的策略,即在页岩厚度大、含气量高的有利区内,将致密砂岩、页岩和煤层划分为一个开发层系,针对不同岩性的储层采取不同的增产工艺,最后合层开采,以获得最大的单井产量,实现山西组天然气的最有效动用。美国皮滲斯盆地的白河隆起气田地质特征与鄂尔多斯盆地类似,存在煤层气、页岩气和致密砂岩气纵向互层,采用立体勘探开发十分成功(Olson,2003)。因此,在鄂尔多斯盆地东部地区,山西组气藏在勘探开发上应加强煤层、页岩与致密砂岩气藏的综合评价,实施以“纵向含气带”为目标的煤系气立体勘探开发思路,同时

借鉴页岩气水平井分段体积改造工艺技术，最大程度地改造储层，才能获得较高的单井产气量，实现山西组页岩气藏的经济开发。

6 结论与认识

(1)鄂尔多斯盆地东部山西组沉积环境主要为近海沼泽-三角洲沉积环境，山西组发育黑色页岩、碳质页岩夹泥质粉砂岩及煤层，页岩具有厚度大、分布广泛、总有机碳含量高、演化程度高特征，具备页岩气形成的基本地质条件。

(2)鄂尔多斯盆地东部山西组页岩干酪根类型主要为Ⅲ型，液态烃产量很少，难以形成大量固化的有机质纳米气泡孔，储集空间类型中有机质纳米孔占比较少，有机质中含气量低于海相页岩。

(3)鄂尔多斯盆地东部山西组页岩气成藏存在特殊性，有机质纳米孔不发育，砂泥煤互层发育，大量页岩气已运移到附近砂岩中形成致密气，煤层、页岩和致密砂岩呈三明治式成藏，东南部为成藏有利区域，在勘探页岩气的同时考虑煤系“含气带”立体勘探寻找有利的煤系气富气层段。

References

Cao Taotao, Song Zhiguang, Luo Houyong, Zhou Yuanyuan, Wang Sibo. 2016. Pore system characteristics of the Permian transitional shale reservoir in the Lower Yangtze Region, China. Journal of Natural Gas Geoscience, 1(5): 383～395.

Chen Hongde, Li Jie, Zhang Chenggong, Cheng Lixue, Cheng Lijun. 2011. Discussion of sedimentary environment and its geological enlightenment of Shanxi Formation in Ordos basin. Acta Petrologica Sinica, 27(8): 2213～2229 (in Chinese with English abstract).

Dong Dazhong, Wang Yuman, Li Xinjing, Zou Caineng, Guan Quanzhong, Zhang Chenchen, Huang Jinliang, Wang Shufang, Wang Hongyan, Liu Honglin, Bai Wenhua, Liang Feng, Lin Wen, Zhao Qun, Liu Dexun, Qiu Zhen. 2016. Breakthrough and prospect of shale gas exploration and development in China. Natural Gas Industry B, 3(1): 12～26.

Fan Wentian, Hu Guohua, Wang Tao. 2019. Quantitative characterization of pore structure of marine-continental transitional facies shale in the eastern margin of Ordos basin. China Science Paper, 14(4): 429～434 (in Chinese with English abstract).

Feng Ziqi, Yu Bingshong, Zeng Qiunan, Jiang Haojie. 2013. Characteristics and main controlling factors of shale gas reservoir in the southeastern Ordos basin. Special Oil & Gas Reservoirs, 20(6): 40～43+142～143 (in Chinese with English abstract).

Fu Jinhua, Guo Shaobin, Liu Xinshe, Wang Yigang. 2013. Shale gas accumulation condition and exploration potential of the Upper Paleozoic Shanxi Formation in Ordos basin. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 43(2): 382～389 (in Chinese with English abstract).

Gong Meilin, Ding Wenlong, Pi Dongdong, Cai Junjie, Zhang Yeqian, Yao Jiali. 2013. Forming conditions of shale gas of the Shanxi Formation of Permian in the southeast of Ordos basin. Journal of Northeast Petroleum University, 37(3): 1～10+124 (in Chinese with English abstract).

Guo Wei, Liu Honglin, Xue Huaqing, Lan Chaoli, Tang Xiaoqi. 2015. Depositional facies of Permian Shanxi Formation gas shale in the northern Ordos basin and its impact on shale reservoir. Acta Geologica Sinica, 89(5): 931～941 (in Chinese with English abstract).

Guo Yinghai, Liu Huanjie. 1999. Transgression of Late Paleozoic Era in Ordos area. Journal of China University of Mining & Technology, 28(2): 28～31 (in Chinese with English abstract).

Kinley T J, Cook L W, Breyer J A, Jarvie D M, Busbey A B. 2008. Hydrocarbon potential of the Barnett Shale (Mississippian), Delaware basin, west Texas and southeastern New Mexico. AAPG Bulletin, 92(8): 967～991.

Lan Chaoli, Guo Wei, Wang Qi, Zhang Xin. 2016. Shale gas accumulation condition and favorable area optimization of the Permian Shanxi Formation, eastern Ordos basin. Acta Geologica Sinica, 90(1): 177～188 (in Chinese with English abstract).

Li Jianzhong, Li Denghua, Dong Dazhong, Wang Shejiao. 2012. Comparison and enlightenment on formation condition and distribution characteristics of shale gas between China and U. S. Engineering Sciences, 14(6): 56～63 (in Chinese with English abstract).

Liu Guangxiang, Jin Zhijun, Deng Mo, Zhai Changbo, Guan Honglin, Zhang Changjiang. 2015. Exploration potential for shale gas in the Upper Permian Longtan Formation in eastern Sichuan basin. Oil & Gas Geology, 36(3): 481～487 (in Chinese with English abstract).

Meng Fanyang, Chen Ke, Bao Shujing, Lin Tuo, Zhang Rui, Dong Zhoubin. 2017. Determination of marine-continental transitional facies shale gas: a case study of Baye No. 1 well in Badong area, western Hubei Province. Geology in China, 44(2): 403～404 (in Chinese).

Misch D, Mendez-Martin F, Hawranek G, Onuk P, Gross D, Sachsenhofer R F. 2016. SEM and FIB-SEM investigations on potential gas shales in the Dniepr-Donets basin (Ukraine): pore space evolution in organic matter during thermal maturation. IOP Conference Series: Material Science and Engineering 109 paper 012010.

Nie Haikuan, Tang Xuan, Bian Ruikang. 2009. Controlling factors for shale gas accumulation and prediction of potential development area in shale gas reservoir of South China. Acta Petrolei Sinica, 30(4): 484～491 (in Chinese with English abstract).

Olson T M. 2003. White River Dome Field: Gas Production from Deep Coals and Sandstones of the CretaceousWilliams Fork Formation. Piceance Basin Guidebook, 155～169.

Ross D J K, Bustin R M. 2007. Shale gas potential of the lower Jurassic Gordondale member, northeastern British Columbia, Canada. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 55(1): 51～75.

Schenk H J, Di Primio R, Horsfield B. 1997. The conversion of oil into gas in petroleum reservoirs. Part 1: Comparative kinetic investigation of gas generation from crude oils of lacustrine, marine and fluviodeltaic origin by programmed-temperature closed-system pyrolysis. Organic Geochemistry, 26(7-8): 467～481.

Sun Zepeng, Wang Yongli, Wei Zhifu, Zhang Mingfeng, Wang Gen, Wang Zixiang, Zhuo Shengguang, Xu Liang. 2017. Shale gas content and geochemical characteristics of marine-continental transitional shale: a case from the Shanxi Formation of Ordos basin. Journal of China University of Mining & Technology, 46(4): 859～868 (in Chinese with English abstract).

Tang Xuan, Zhang Jinchuan, Ding Wenlong, Yu Binsong, Wang Long, Ma Yulong, Yang Yiting, Chen Haoyu, Huang Huang, Zhao Panwang. 2016. The reservoir property of the Upper Paleozoic marine-continental transitional shale and its gas-bearing capacity in the southeastern Ordos basin. Earth Science Frontiers, 23(2): 147～157 (in Chinese with English abstract).

Wang Guiwen, Zhu Zhenyu, Zhu Guangyu. 2002. Logging identification and evaluation of Cambrian-Ordovician source rocks in syneclise of Tarim basin. Petroleum Exploration and Development,(4): 50~52 (in Chinese with English abstract).

Wang Shejiao, Li Denghua, Li Jianzhong, Dong Dazhong, Zhang Wenzheng, Ma Jun. 2011. Exploration potential of shale gas in the Ordos basin. Natural Gas Industry, 31(12): 40~46 (in Chinese with English abstract).

Wang Shiqian, Chen Gengsheng, Dong Dazhong, Yang Guang, Lü Zonggang, Xu Yunhao, Huang Yongbin. 2009. Accumulation conditions and exploitation prospect of shale gas in the Lower Paleozoic Sichuan basin. Natural Gas Industry, 29(5): 51~58 (in Chinese with English abstract).

Xiong Fengyang, Jiang Zhenxue, Li Peng, Wang Xiangzeng, Bi He, Li Yirun, Wang Ziyuan, Amooie M A, Soltanian M R, Moortgat J. 2017. Pore structure of transitional shales in the Ordos basin, NW China: Effects of composition on gas storage capacity. Fuel, 206: 504~515.

Xu Xiaohong, Huang Haiping, Lu Songnian. 1998. A quantitative relationship between well logging information and organic carbon content. Journal of Jianghan Petroleum Institute, (3): 11~15 (in Chinese with English abstract).

Yan Deyu, Huang Wenhui, Li Ang, Liu Hao, Liu Hanlin. 2013. Preliminary analysis of marine-continental transitional shale gas accumulation conditions and favorable areas in the Upper Paleozoic Ordos basin. Journal of Northeast Petroleum University, 37(5): 1~9, 62+127 (in Chinese with English abstract).

Yan Deyu, Huang Wenhui, Zhang Jinchuan. 2015. Characteristics of marine-continental transitional organic-rich shale in the Ordos basin and its shale gas significance. Earth Science Frontiers, 22(6): 197~206 (in Chinese with English abstract).

Yang Cai, He Zhiqiang, Guo Renwang, Bai Lingqi, Feng Yan, Lin Haitao. 2017. Carboniferous Taiyuan Formation paralic facies organic-rich argillutite hydrocarbon generation capacity analysis in northern Ordos basin. Coal Geology of China, 29(7): 14~17 (in Chinese with English abstract).

Yang Chao, Zhang Jinchuan, Wang Xiangzeng, Tang Xuan, Chen Yongchang, Jiang Lulu, Gong Xue. 2017. Nanoscale pore structure and fractal characteristics of a marine-continental transitional shale: A case study from the lower Permian Shanxi shale in the southeastern Ordos basin, China. Marine and Petroleum Geology, 88: 54~68.

Yang Hua, Fu Jinhua, Liu Xinshe, Meng Peilong. 2013. Accumulation conditions and exploration and development of tight gas in the Upper Paleozoic of the Ordos basin. Petroleum Exploration and Development, 39(3): 295~303 (in Chinese with English abstract).

Yang Taotao, Fan Guozhang, Lü Fuliang, Wang Bin, Wu Jingwu, Lu Yintao. 2013. The logging features and identification methods of source rock. Natural Gas Geoscience, 24(2): 414~422 (in Chinese with English abstract).

Yu Bingsong. 2012. Particularity of shale gas reservoir and its evaluation. Earth Science Frontiers, 19(3): 252~258 (in Chinese with English abstract).

Yu Xinghe, Wang Xiangzeng, Wang Nianxi, Shan Xin, Zhou Jinsong, Han Xiaoqin, Li Yalong, Du Yonghui, Zhao Chenfan. 2017. Sequence stratigraphic framework and sedimentary evolution characteristics of gas-bearing sandbody in the Upper Paleozoic in southeastern Ordos basin. Journal of Palaeogeography, 19(6): 935~954 (in Chinese with English abstract).

Zhang Jizheng, Li Xianqing, Wan Yuan, Fu Qinghua, Cai Yueqi, Niu Haiyan. 2015. Accumulation conditions and reservoir characteristics of marine-terrigenous facies coal measures shale gas from Longtan Formation in South Sichuan basin. Journal of China Coal Society, 40(8): 1871~1878 (in Chinese with English abstract).

Zhang Lixia, Jiang Chengfu, Guo Chao. 2012. Exploration potential of Upper Paleozoic shale gas in the eastern Ordosbasin. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 27(1): 23~26, 34 (in Chinese with English abstract).

Zhang Qin, Pang Zhenglian, Zhang Jinchuan, Lin Wen, Jiang Shu. 2017. Qualitative and quantitative characterization of a transitional shale reservoir: a case study from the Upper Carboniferous Taiyuan shale in the eastern uplift of Liaohe depression, China. Marine and Petroleum Geology, 80: 307~320.

Zhang Qin, Liang Feng, Pang Zhenglian, Zhou Shangwen, Lin Wen. 2018. Quantitative influence of soluble organic matter on pore structure in transitional shale. Petroleum Geology & Experiment, 40(5): 730~738 (in Chinese with English abstract).

Zhang Yan, Liu Jincheng, Xu Hao, Niu Xinlei, Qin Guohong, Cao Daiyong. 2017. Comparison between pore structure and fractal characteristics of continental and transitional coal measures shale: a case study of Yan'an and Taiyuan formations at the northeastern margin of Ordos basin. Acta Petrolei Sinica, 38(9): 1036~1046 (in Chinese with English abstract).

Zhao Difei, Guo Yinghai, Ren Chengyao, Li Yanfang. 2018. Development characteristics and affecting factors of nanopores in transitional shale reservoirs: an example of the Shanxi Formation. Journal of Northeast Petroleum University, 42(5): 1~16 (in Chinese with English abstract).

Zhao Keying, Guo Shaobin. 2015. Characteristics and main controlling factors of shale gas reservoirs in transitional facies: A case study of Upper Paleozoic in Ordos basin. Petroleum Geology & Experiment, 37(2): 141~149 (in Chinese with English abstract).

Zhou Shuai, Chen Shangbin, Si Qinghong, Han Yufu, Zhang Cao. 2016. Taiyuan shale gas accumulation characteristics in eastern Ordos basin. Special Oil & Gas Reservoirs, 23(1): 38~43+152~153 (in Chinese with English abstract).

Zou Caineng, Dong Dazhong, Wang Shejiao, Li Jiangzhong, Li Xinjing, Wang Yuman, Li Denghua, Cheng Keming. 2010. Geological characteristics, formation mechanism and resource potential of shale gas in China. Petroleum Exploration and Development, 37(6): 641~653 (in Chinese with English abstract).

Zou Caineng, Dong Dazhong, Yang Hua, Wang Yuman, Huang Jinliang, Wang Shufang, Fu Chengxin. 2011. Conditions of shale gas accumulation and exploration practices in China. Natural Gas Industry, 31(12): 26~39 (in Chinese with English abstract).

参　考　文　献

曹涛涛,宋之光,罗厚勇,周圆圆,王思波. 2016.下扬子地区二叠系海陆过渡相页岩孔隙体系特征.天然气地球科学,27(7):1332~1345.

陈洪德,李洁,张成弓,程立雪,程礼军. 2011. 鄂尔多斯盆地山西组沉积环境讨论及其地质启示. 岩石学报,27(8):2213~2229.

董大忠,王玉满,李新景,邹才能,管全中,张晨晨,黄金亮,王淑芳,王红岩,刘洪林,拜文华,梁峰,齐文,赵群,刘德勋,邱振. 2016. 中国页岩气勘探开发新突破及发展前景思考. 天然气工业,36(1):19~32.

范文田,胡国华,王涛. 2019.鄂尔多斯盆地东缘海陆过渡相页岩孔隙结构定量化表征.中国科技论文,14(4):429~434.

冯子齐,于炳松,曾秋楠,李昱霏,姜豪杰. 2013. 鄂尔多斯东南部页岩气储层特征及其主控因素. 特种油气藏,20(6):40~43+142~143.

付金华,郭少斌,刘新社,王义刚. 2013. 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. 吉林大学学报(地球科学版),43(2):382~389.

宫美林,丁文龙,皮冬冬,蔡俊杰,张业倩,付景龙,姚佳利. 2013.

鄂尔多斯盆地东南部下寺湾—云岩区二叠系山西组页岩气形成条件. 东北石油大学学报，37(3)：1～10＋124.
郭伟，刘洪林，薛华庆，兰朝利，汤小琪. 2015. 鄂尔多斯盆地北部山西组页岩沉积相及其对页岩储层的控制作用. 地质学报，89(5)：931～941.
郭英海，刘焕杰. 1999. 鄂尔多斯地区晚古生代的海侵. 中国矿业大学学报，(2)：28～31.
兰朝利，郭伟，王奇，张欣. 2016. 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，90(1)：177～188.
李建忠，李登华，董大忠，王社教. 2012. 中美页岩气成藏条件、分布特征差异研究与启示. 中国工程科学，14(6)：56～63.
刘光祥，金之钧，邓模，翟常博，管宏林，张长江. 2015. 川东地区上二叠统龙潭组页岩气勘探潜力. 石油与天然气地质，36(3)：481～487.
孟凡洋，陈科，包书景，林拓，张瑞，董周宾. 2017. 鄂西巴东地区(巴页1井)发现海陆过渡相页岩气. 中国地质，44(2)：403～404.
聂海宽，唐玄，边瑞康. 2009. 页岩气成藏控制因素及中国南方页岩气发育有利区预测. 石油学报，30(4)：484～491.
孙则朋，王永莉，魏志福，张明峰，汪亘，王自翔，卓胜广，徐亮. 2017. 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. 中国矿业大学学报，46(4)：859～868.
唐玄，张金川，丁文龙，于炳松，王龙，马玉龙，杨镱婷，陈皓禹，黄璜，赵盼旺. 2016. 鄂尔多斯盆地东南部上古生界海陆过渡相页岩储集性与含气性. 地学前缘，23(2)：147～157.
王贵文，朱振宇，朱广宇. 2002. 烃源岩测井识别与评价方法研究. 石油勘探与开发，(4)：50～52.
王社教，李登华，李建忠，董大忠，张文正，马军. 2011. 鄂尔多斯盆地页岩气勘探潜力分析. 天然气工业，31(12)：40～46.
王世谦，陈更生，董大忠，杨光，吕宗刚，徐云浩，黄永斌. 2009. 四川盆地下古生界页岩气藏形成条件与勘探前景. 天然气工业，29(5)：51～58.
许晓宏，黄海平，卢松年. 1998. 测井资料与烃源岩有机碳含量的定量关系研究. 江汉石油学院学报，(3)：11～15.
闫德宇，黄文辉，李昂，刘浩，刘翰林. 2013. 鄂尔多斯盆地上古生界海陆过渡相页岩气聚集条件及有利区预测. 东北石油大学学报，37(5)：1～9＋62＋127.
闫德宇，黄文辉，张金川. 2015. 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. 地学前缘，22(6)：197～206.
杨才，贺志强，郭仁旺，白灵麒，冯岩，林海涛. 2017. 鄂尔多斯盆地北缘石炭系太原组泥页岩生烃能力分析. 中国煤炭地质，29(7)：14～17.
杨华，付金华，刘新社，孟培龙. 2013. 鄂尔多斯盆地上古生界致密气成藏条件与勘探开发. 石油勘探与开发，39(3)：295～303.
杨涛涛，范国章，吕福亮，王彬，吴敬武，鲁银涛. 2013. 烃源岩测井响应特征及识别评价方法. 天然气地球科学，24(2)：414～422.
于炳松. 2012. 页岩气储层的特殊性及其评价思路和内容. 地学前缘，19(3)：252～258.
于兴河，王香增，王念喜，单新，周进松，韩小琴，李亚龙，杜永慧，赵晨帆. 2017. 鄂尔多斯盆地东南部上古生界层序地层格架及含气砂体沉积演化特征. 古地理学报，19(6)：935～954.
张吉振，李贤庆，王元，付庆华，蔡月琪，牛海岩. 2015. 海陆过渡相煤系页岩气成藏条件及储层特征——以四川盆地南部龙潭组为例. 煤炭学报，40(8)：1871～1878.
张丽霞，姜呈馥，郭超. 2012. 鄂尔多斯盆地东部上古生界页岩气勘探潜力分析. 西安石油大学学报(自然科学版)，27(1)：23～26＋34.
张琴，梁峰，庞正炼，周尚文，齐文. 2018. 可溶有机质对海陆过渡相页岩孔隙结构的定量影响. 石油实验地质，40(5)：730～738.
张岩，刘金城，徐浩，牛鑫磊，秦国红，曹代勇. 2017. 陆相与过渡相煤系页岩孔隙结构及分形特征对比——以鄂尔多斯盆地东北缘延安组与太原组为例. 石油学报，38(9)：1036～1046.
赵迪斐，郭英海，任呈瑶，李艳芳. 2018. 过渡相页岩气储层纳米级孔隙发育特征与影响因素——以太原西山古交地区山西组为例. 东北石油大学学报，42(5)：1～16.
赵可英，郭少斌. 2015. 海陆过渡相页岩气储层孔隙特征及主控因素分析——以鄂尔多斯盆地上古生界为例. 石油实验地质，37(2)：141～149.
周帅，陈尚斌，司庆红，韩宇富，张超. 2016. 鄂尔多斯盆地东缘太原组页岩气成藏特征. 特种油气藏，23(1)：38～43＋152～153.
邹才能，董大忠，王社教，李建忠，李新景，王玉满，李登华，程克明. 2010. 中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力. 石油勘探与开发，37(6)：641～653.
邹才能，董大忠，杨桦，王玉满，黄金亮，王淑芳，付成信. 2011. 中国页岩气形成条件及勘探实践. 天然气工业，31(12)：26～39.

Geological characteristics and exploration countermeasures of shale gas in the Shanxi Formation of the Ordos basin

LIU Honglin*[1,2,3], WANG Huaichang[4], ZHANG Hui[4], ZHAO Weibo[4], LIU Yan[4], LIU Dexun[1,2,3]

1) *Research Institute Petroleum Exp. & Dev., Petrochina, Beijing*, 100083;

2) *PetroChina Key Laboratory for Unconventional Oil and Gas, Beijing*, 100083;

3) *National Energy Shale Gas Research and Development (Experiment) Center, Langfang, Hebei*, 065007;

4) *Exploration and Development Research Institute, Changqing Oilfield, Petrochina, Xi'an*, 710021

* *Corresponding author*: *liuhonglin69@petrochina.com.cn*

Abstract

Shale gas resources of the transitional facies account for about one-third of the total amount in China, and have broad prospects for exploration and development. A breakthrough in exploration and development has not been achieved despite the large thickness and wide distribution of the transitional facies in the Ordos basin. This study aims to determine differences in the geological characteristics between the transitional and marine shale gas reservoirs and their reservoir-forming principles by analyzing the total carbon content, vitrinite reflectance, mineral composition, micropore texture and gas content in the eastern Ordos basin. The comparative study of shale gas generation, storage and accumulation processes between transitional and marine shale gas reservoirs shows that the shale reservoir formation process of Shanxi Formation has its particularity. Its kerogen belongs to type III originating from higher plants, with little liquid hydrocarbon production, which is bubble pore formation process with a small amount of organic nanopore. Interbeds of sand-mud-coal in the formation mean that the source rock has a high efficiency of hydrocarbon expulsion, resulting in low content in the shale. The shale gas accumulation process of the Shanxi Formation is quite different from that of the marine shale gas because of its high expulsion efficiency and influence on shale gas content. After generation within the Shanxi Formation shale, a lot of gas has migrated to the overlying or underlying tight sandstones. The tight sandstones, coals and shale reservoirs resemble a sandwich. It is predicted that the southeast of the study area is a favorable area. When exploring the shale gas in Shanxi Formation, the "gas bearing zone" of coal series should be comprehensively considered, which means favorable shale gas-rich zones should be investigated together with tight sandstones and coals using three-dimensional exploration strategy for commercial production.

Key words: Ordos basin; Shanxi Formation; shale gas; organic matter nanopore