

doi: 10.12029/gc20220313002

蒲泊伶, 王凤琴, 王克, 孙建博, 李艳霞, 时保宏, 赵卫卫, 郭小波. 2023. 延安地区长 7 段页岩气成藏富集条件及发育模式[J]. 中国地质, 50(5): 1285–1298.

Pu Boling, Wang Fengqin, Wang Ke, Sun Jianbo, Li Yanxia, Shi Baohong, Zhao Weiwei, Guo Xiaobo. 2023. The enrichment conditions and model of shale gas reservoir in the Chang 7 member of Mesozoic Yanchang Formation in Yan'an, Ordos Basin[J]. *Geology in China*, 50(5): 1285–1298(in Chinese with English abstract).

延安地区长 7 段页岩气成藏富集条件及发育模式

蒲泊伶^{1,2}, 王凤琴^{1,2}, 王克^{1,2}, 孙建博³, 李艳霞^{1,2}, 时保宏^{1,2}, 赵卫卫^{1,2}, 郭小波^{1,2}

(1. 西安石油大学地球科学与工程学院, 陕西 西安 710065; 2. 西安石油大学陕西省油气成藏地质学重点实验室, 陕西 西安 710065; 3. 陕西延长石油(集团)有限责任公司研究院, 陕西 西安 710075)

摘要:【研究目的】鄂尔多斯盆地中生界延长组长 7 段页岩具有岩性岩相、沉积厚度变化快、有机质丰度高但成熟度偏低、黏土含量高、地层普遍低压一常压的特点, 对长 7 段页岩开展页岩气富集条件及发育模式的研究, 利于探寻适合长 7 页岩气勘探开发的地质理论, 以期对该地区下一步勘探工作提供指导, 进一步完善陆相页岩气地质理论。【研究方法】基于钻井、岩心和分析测试资料, 从生烃条件、储集条件、保存条件等方面, 对长 7 段页岩气成藏富集条件进行了系统研究, 建立页岩气富集发育模式。【研究结果】研究认为: (1) 研究区长 7 页岩有机质丰度高, TOC 基本大于 1.5%, 且处于大量生油气阶段, R_o 基本在 0.8%~1.3%, 生气潜力较大; (2) 黏土矿物含量高, 基本在 40%~60%, 利于页岩气吸附, 具有吸附气产出的特征; (3) 相对稳定的构造背景是页岩气得以保存的重要条件; (4) 页岩气富集模式可分为页岩与砂质纹层互层式和厚层富有机质页岩式两种模式, 砂质纹层有效改善页岩储层物性, 连续沉积的厚层富有机质页岩是气保存的重要形式。【结论】依据对长 7 页岩气富集特征的解剖, 将长 7 页岩气富集规律总结为“两大一多”的特征: 生气潜力大、连续厚度大、砂质纹层多。

关键词: 陆相页岩气; 富集规律; 油气勘查工程; 延长组; 延安地区; 鄂尔多斯盆地

创新点: 总结长 7 段页岩气成藏富集条件, 建立长 7 段页岩气富集发育模式。

中图分类号: P618.13 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2023)05-1285-14

The enrichment conditions and model of shale gas reservoir in the Chang 7 member of Mesozoic Yanchang Formation in Yan'an, Ordos Basin

PU Boling^{1,2}, WANG Fengqin^{1,2}, WANG Ke^{1,2}, SUN Jianbo³, LI Yanxia^{1,2},
SHI Baohong^{1,2}, ZHAO Weiwei^{1,2}, GUO Xiaobo^{1,2}

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, Shaanxi, China; 2. Shanxi Key Laboratory of Petroleum Accumulation Geology, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, Shaanxi, China; 3. Yanchang Petroleum (Group) Co., Ltd, Xi'an 710075, Shaanxi, China)

Abstract: This paper is the result of oil and gas exploration engineering.

收稿日期: 2022-03-13; 改回日期: 2022-08-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(42102178)和国家科技重大专项项目(2017ZX05039001)联合资助。

作者简介: 蒲泊伶, 女, 1981 年生, 博士, 副教授, 主要从事页岩气富集地质条件的研究工作; E-mail: sd_yujiao@sina.com。

[Objective] The Chang 7 shale of Mesozoic Yanchang Formation in Ordos Basin is characterized by rapid changes of lithologies and lithofacies, thick, high abundance but low maturity of organic matter, high clay content and low-normal strata pressure. The study on shale gas enrichment conditions and development model of the Chang 7 shale is beneficial to explore the geological theory suitable for the exploration and development of Chang 7 shale gas, in order to provide guidance for the next exploration work in the region and further improve the geological theory of continental shale gas. **[Methods]** Based on drilling, core analysis, and test data, the accumulation and enrichment conditions of the Chang 7 shale gas were systematically studied from the aspects of hydrocarbon generation conditions, reservoir conditions and preservation conditions, and the enrichment and development model of shale gas was established. **[Results]** The results show that : (1) Chang 7 shale in the study area has high organic matter abundance, TOC is basically greater than 1.5%, and is in the oil and gas generation window, R_o is basically between 0.8% and 1.3%, and has the geological conditions of shale gas generation; (2) The clay mineral content is high, basically 40%–60%, which is beneficial to shale gas adsorption and has a certain adsorbed gas production; (3) The relatively stable tectonic background is an important condition for the preservation of shale gas; (4) The enrichment model of shale gas can be divided into two types: interbedded shale and sandy lamina type, and thick organic-rich shale type. The sandy lamina effectively improves the physical properties of shale reservoirs. The thick organic-rich shale deposited continuously is an important form of gas preservation. **[Results]** Based on the dissection of the enrichment characteristics of Chang 7 shale gas, the enrichment law of Chang 7 shale gas is summarized as “two large and one many”: large gas generation potential, large continuous thickness and many sandy laminae.

Key words: continental shale gas; enrichment characteristics; oil and gas exploration engineering; Yanchang Formation; Yan'an area; Ordos Basin

Highlights: Accumulation and enrichment conditions of the Chang 7 shale gas are summarized, and enrichment and development model of the Chang 7 shale gas is established.

About the first author: PU Boling, female, born in 1981, associate professor, mainly engaged in shale gas enrichment geological conditions; E-mail: sd_yujiao@sina.com.

Fund support: Supported by the National Natural Science Foundation of China (No.42102178) and National Science & Technology Major Project (No.2017ZX05039001).

1 引 言

鄂尔多斯盆地是中国陆相页岩气重点勘探开发的地区,建立了中国首个陆相页岩气示范区,已建成一定产能。延安地区是鄂尔多斯盆地最早实现页岩气突破的地区,2011年中国第一口陆相页岩气井柳坪177井页岩气(长7段纯页岩)点火成功,初始产量2350 m³/d(姜呈馥等,2014),随后,鄂尔多斯盆地第一口页岩气水平井——延页平1井在陕西甘泉县顺利完钻(曾维特等,2014)。目前已钻探页岩气井60余口,压裂试气后获得较好的页岩气显示。

陆相页岩气的勘探目前主要是借鉴国内外海相页岩气的成功经验,在实际勘探中发现,陆相页岩与海相页岩地质特征差别巨大。中国南方下古生界海相富有机质页岩具有连续厚度大且分布稳定(有效厚度大于30 m)、有机质含量高(TOC>2%)、岩石脆性高、地层超高压、高过成熟(R_o 普遍大于2%)、储层条件好、保存条件好的特点(蒋裕强等,2010;王社教等,2012;郭彤楼和张汉荣,2014;

郭旭升等,2014;潘仁芳等,2016;张鉴等,2016;朱彤等,2016;金之钧等,2016;谢军等,2017;马永生等,2018);而对于鄂尔多斯盆地中生界延长组长7段页岩为代表的陆相湖泊沉积,岩性岩相、沉积厚度变化快,较海相页岩具有更强的非均质性,页岩中黏土矿物含量高,有机质丰度高但成熟度偏低,基本处于成熟阶段($R_o=0.8\%\sim 1.1\%$),地层普遍低压—常压(马永生等,2018)。因此,海相页岩气的经验并不完全适合陆相页岩气的勘探,对于适合中国陆相页岩气富集特点的研究方法和思路仍需不断探索。本文立足于延安地区关键页岩气井资料,结合页岩有机地化特征、储层特征、岩石学特征、成藏机理等方面,研究长7段页岩气富集规律,以期对该区陆相页岩气下一步开发工作提供指导和参考。

2 地质背景

鄂尔多斯盆地是中国重要的陆相大型含油气盆地,盆地可划分为6个一级构造单元,即北部伊盟隆起、西部天环坳陷和西缘冲断带、南部渭北隆起、

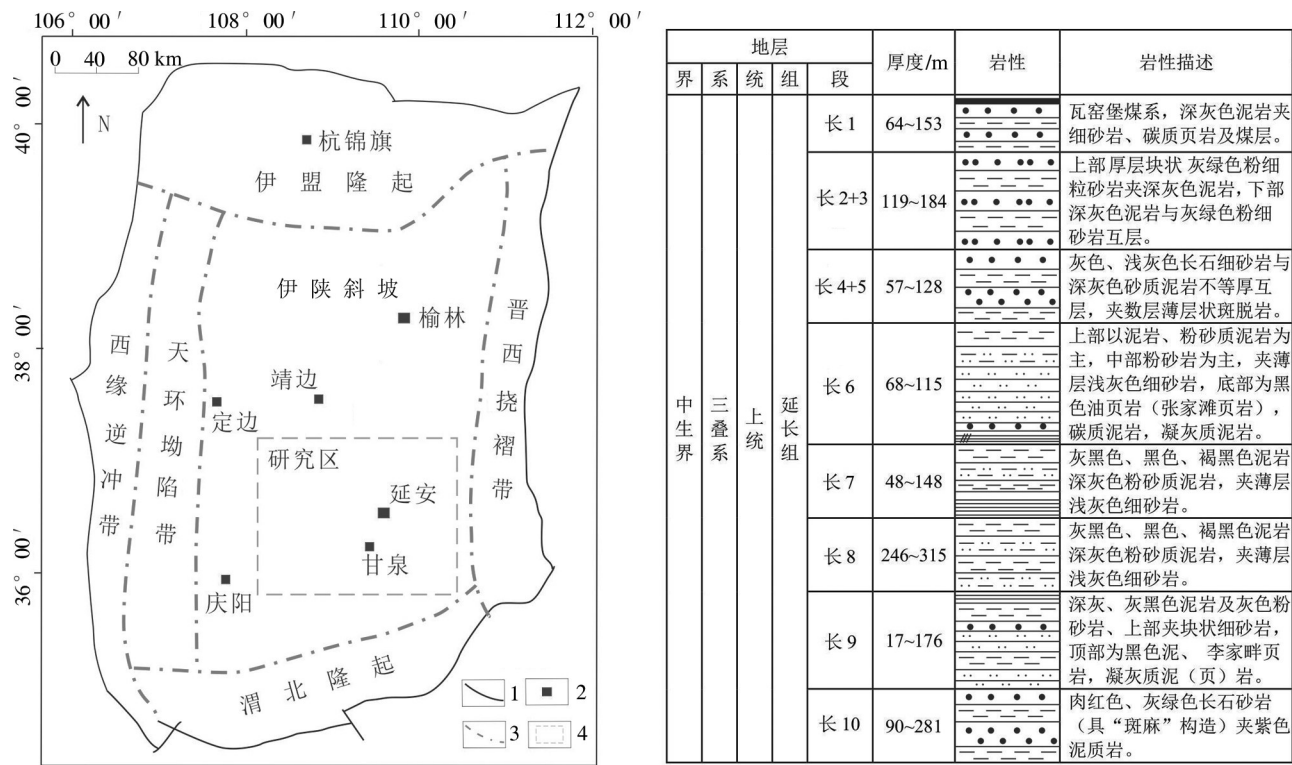


图1 研究区位置图及延长组地层综合柱状图
1—盆地边界;2—地名;3—构造边界;4—研究区
Fig. 1 Location map of study area and comprehensive columnar map of Yanchang Formation
1—Basin boundary; 2—Place name; 3—Construction boundary; 4— Research area

东部晋西挠褶带和中部伊陕斜坡(赵向原等, 2016),研究区位于伊陕斜坡的东南部(图1)。盆地中南部三叠统延长组是中国陆相三叠系中出露最好、研究最早、发育比较齐全的地层剖面(范柏江等, 2017),是鄂尔多斯盆地中最早发育的一套以河流—湖泊相为特征的陆源碎屑岩系(王朋飞等, 2018),同时也是常规油气与非常规油气勘探开发目的层系。根据岩性、沉积特征,将延长组自上而下划分为长1至长10等10个油层组,其中长7期为湖泊发展的鼎盛时期,大范围发育了一套深湖—半深湖相页岩层(张文正等, 2015)。

3 长7页岩气成藏地质条件

3.1 长7页岩发育地质特征

通过岩心观察及钻、录井资料统计,研究区内长7段地层沉积厚度约70~130 m,埋深介于1100~1800 m,沉积连续、稳定、分布范围广。根据岩性电性组合特征可将长7段自下而上进一步划分为长

7₃、长7₂、长7₁三个亚段。研究区延长组长7段整体处于半深湖—深湖相沉积环境中,主要以富含有机质暗色泥页岩为主(图2),岩性主要为深灰色泥岩、泥质粉砂岩、灰黑色—黑色泥页岩、油页岩。其中,长7₃段主要发育深湖相沉积厚层富有机质黑色泥岩,是延安地区页岩气勘探主要目的层段。长7₁与长7₂段在不同井中均可见重力流沉积,以灰色细砂岩、深灰色粉砂岩沉积为特征,可见变形层理,可见油迹。重力流沉积砂体在横向上不具有连通性。

通过钻井资料统计及地层连井剖面对比分析,长7段地层沉积厚度分布变化较大,表现出西北部厚度小,东南部厚度大的特点(图3,图4),物源方向来自于盆地东北方向,逐渐向东南方向过渡为浅湖—三角洲沉积,至半深湖—深湖沉积。研究区东南方向湖水水体深度逐渐增大,为湖盆的沉积、沉降中心及厚度中心,靠近湖盆中心位置长7段地层的沉积厚度最高可达160 m;区域上可分为两个页岩较为发育区,其中中西部西区采油厂的最大厚度为60 m左右;

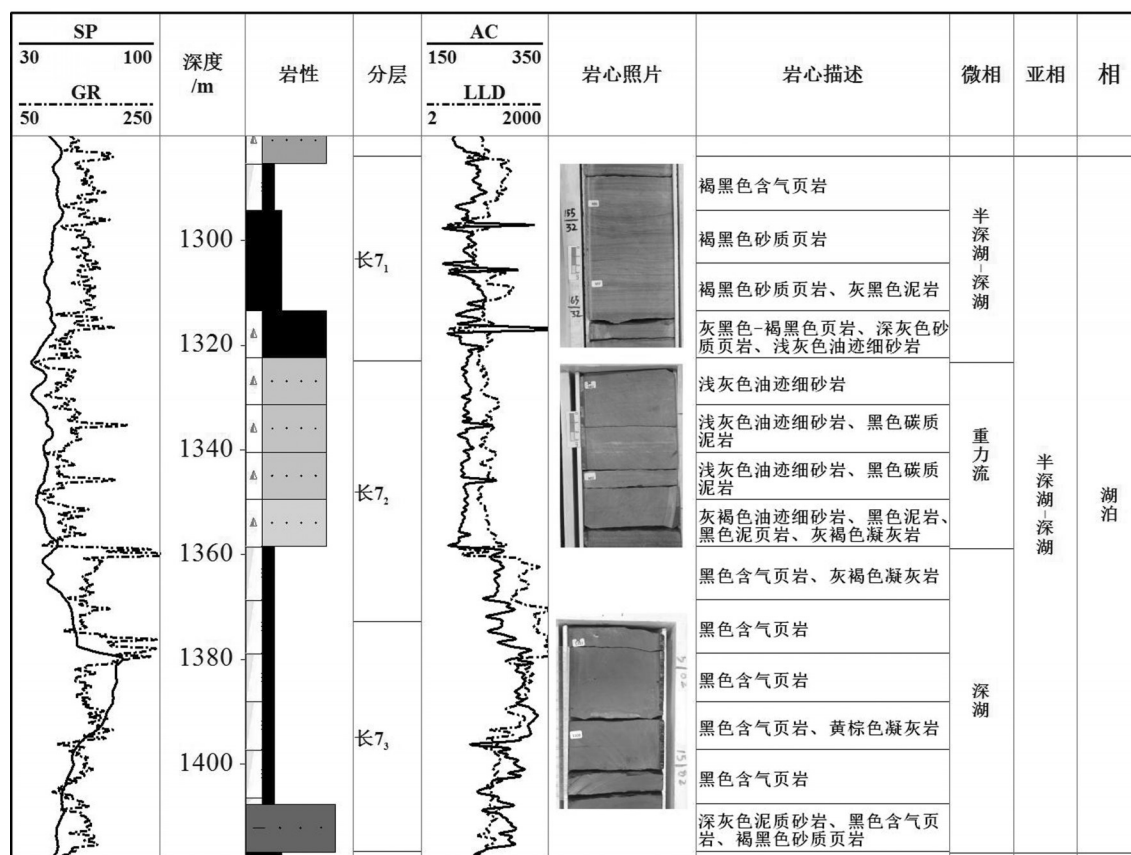


图2 延长组岩性及沉积相单井综合柱状图

Fig.2 Comprehensive histogram of lithology and sedimentary facies of Yanchang Formation in single well

而东南部直罗采油厂下寺湾采油厂区域最大厚度达100 m以上,最小厚度也在50 m以上(图4)。

3.2 长7页岩烃源地球化学条件

根据前人研究经验,有机质丰度高、类型好、热演化程度适中是保证页岩有效气源供给的前提条件。通过对研究区16口页岩气井506块页岩岩心样品的有机碳测试分析统计表明,长7段页岩有机质含量丰富,TOC基本都在1.5%以上,最高可达12%,主体分布在3%~6%。氯仿沥青“A”含量0.74%~1.76%,总烃含量66.87%~92.02%(表1)。从纵向有机地球化学剖面分布特征来看(图5),长7页岩有机质含量高的层段集中在黑色页岩中,主要分布在长7₂底部及长7₃亚段,甚至大部分页岩有机质丰度比海相页岩高很多,这与盆地的古构造、古气候、古沉积环境和事件作用有关(袁伟等,2019)。

研究区长7段页岩的有机质类型主要为Ⅱ型,以偏腐泥的混合型有机质为主,另外有部分偏腐植的混合型有机质,长7段页岩有机质类型较好,具有

很好的生油气潜力。有机质热演化程度是页岩气评价的关键参数,热演化程度的高低决定了页岩处于的有机质生烃演化阶段,决定了主要产物的类型和性质。通过镜质体反射率测定,研究区长7页岩主体处于生油窗范围,为有机质大量生油气阶段,部分进入生气窗范围,Ro主体在0.8%~1.3%,最高可达1.3%以上。热解分析结果表明,长7页岩 T_{max} 值分布在349~562℃,平均450℃。通过气体组分分析结果可知,长7页岩气的干燥系数(C_1/C_{1-5})为0.4~0.96,甲烷含量为64.72%~90.77%。因此,长7页岩中产出的气主要为石油伴生气,为油型湿气,部分地区可产干气。就目前的地质认识和勘探现状,热演化程度相对高的地区,尤其是 $Ro>1.1\%$ 的地区仍是下一步勘探的重点。同时,有学者认为长7段页岩中存在大量油溶相页岩气,也是不可忽视的页岩气资源(王香增等,2015)。

3.3 长7页岩储层特征

长7页岩层系岩性较为复杂,主要有粉砂岩、泥

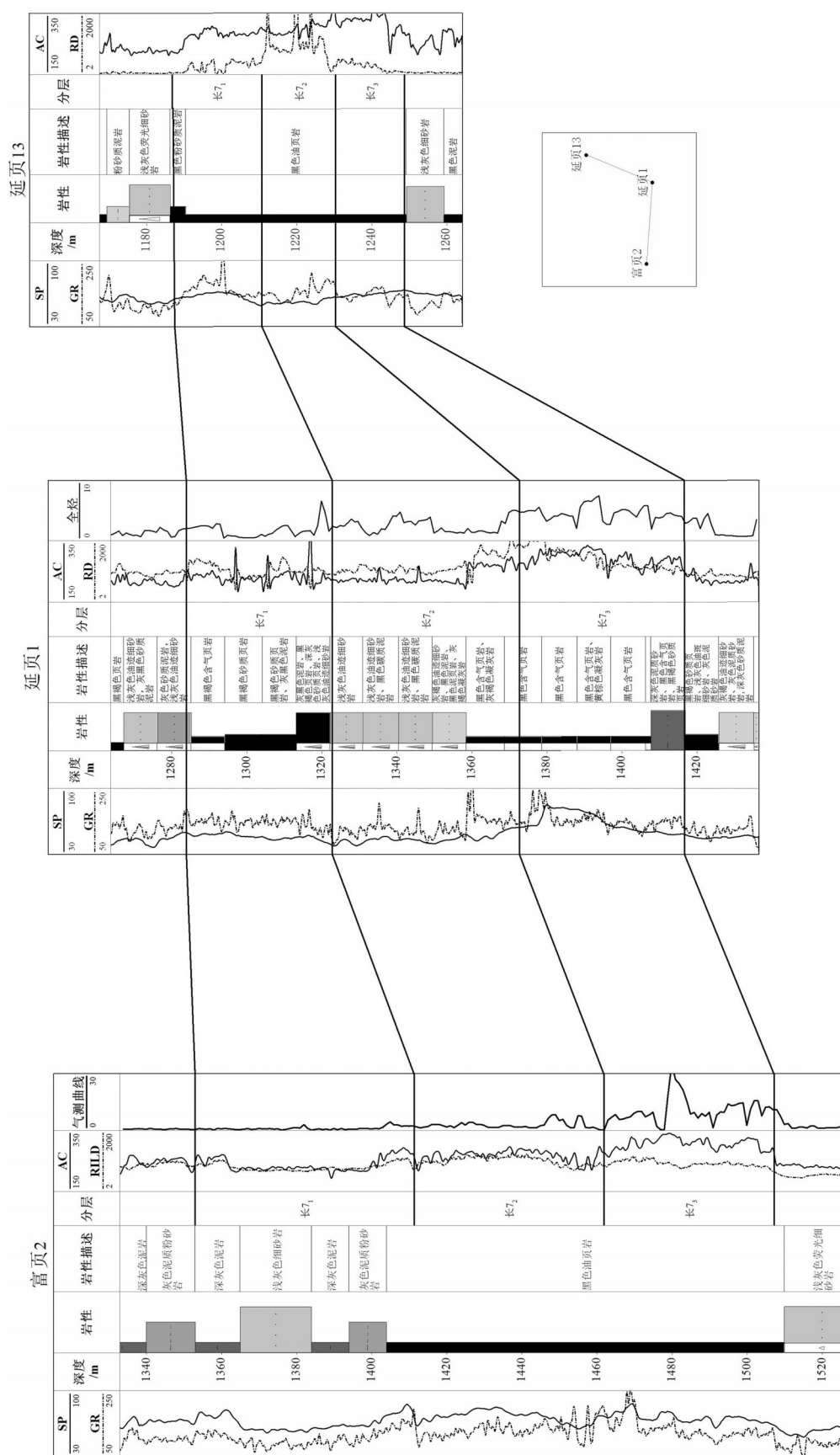


图3 富页2井-延页1井-延页13井延长组地层连井剖面图

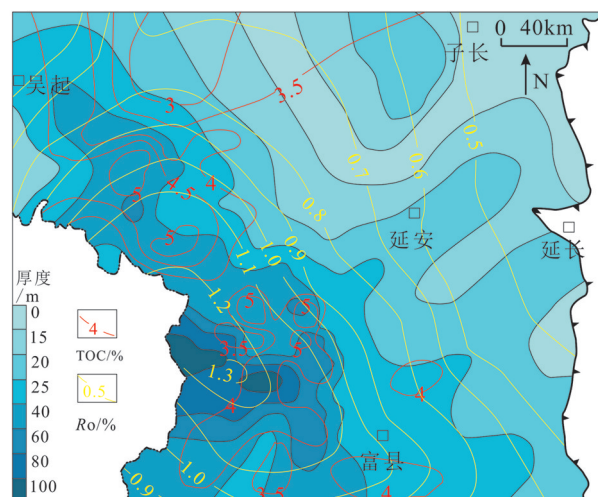


图4 延安地区长7段页岩厚度、TOC及Ro等值线图

Fig. 4 Shale thickness, TOC and Ro contour maps of Chang 7 member in Yan'an area

质粉砂岩、粉砂质泥岩、泥岩及页岩。通过X衍射分析表明,长7脆性矿物(石英+长石+方解石)占47.97%,塑性矿物(黏土矿物)占47.56%。其中,石

表1 延安地区延长组长7段页岩岩样抽提分析
Table 1 Extraction analysis of Chang 7 shale samples of Yanchang Formation in Yan'an area

编号	烷烃/%	芳烃/%	非烃/%	沥青质/%	总烃/%	氯仿沥青“A”/%
1	75.46	10.59	6.89	7.06	86.05	1.65
2	76.64	8.48	8.16	6.72	85.12	1.76
3	74.21	8.83	8.83	8.14	83.03	1.63
4	83.06	7.11	5.90	3.93	90.17	1.08
5	54.63	12.24	10.15	22.99	66.87	0.83
6	63.40	10.92	10.35	15.32	74.33	0.94
7	66.72	10.37	9.87	13.04	77.09	1.45
8	75.43	9.27	6.96	8.35	84.70	1.30
9	80.00	9.61	4.88	5.51	89.61	1.44
10	60.22	19.20	8.91	11.67	79.42	0.74
11	69.78	13.81	8.21	8.21	83.58	1.17
12	79.66	12.36	5.79	2.19	92.02	1.15

英矿物含量分布在22.2%~34.6%,均值为29.75%,长石类矿物包括钾长石、斜长石,钾长石含量为2.85%~6.78%,均值为5.3%,斜长石含量为6.72%~

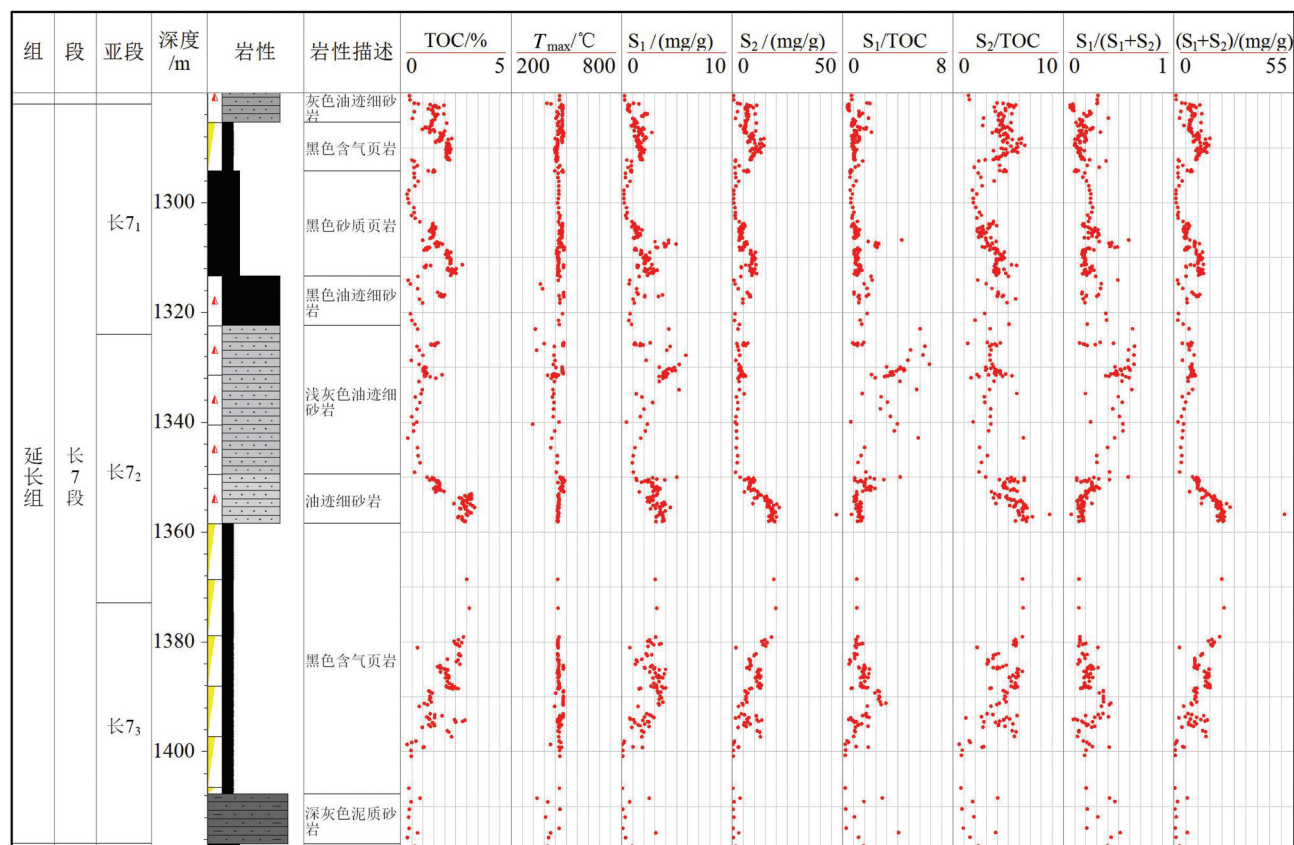


图5 延长组长7段单井地球化学剖面

Fig.5 The geochemical profile of the Chang 7 shale samples in single Well

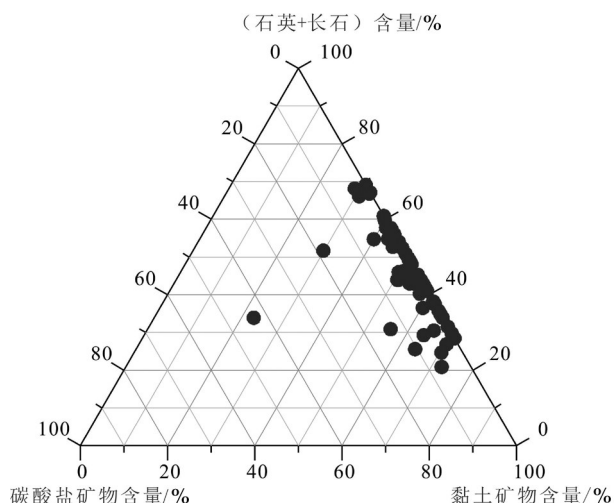


图6 研究区长7页岩矿物组成三角图

Fig. 6 Triangle diagram of mineral composition of the Chang 7 shale samples in the study area

17.0%,均值为10.27%;碳酸盐岩矿物包括方解石和白云石,其中方解石含量为2.85%~6.78%,均值为5.3%,白云石含量为2.85%~6.78%,均值为5.3%。长7段黏土矿物含量为43.0%~54.27%,均值为47.56%,其中高岭石含量为5.0%~10.75%,均值为9.38%,绿泥石含量为5.4%~17.73%,均值含量为12.32%,伊利石含量为20.9%~29.72%,均值为24.47%,伊/蒙混层含量为49%~71%,均值为57.39%。从矿物组成上来看,长7页岩含有较高的黏土矿物含量,相对较低的碳酸盐岩矿物含量(图6)。

通常情况下,有机质孔的发育程度与TOC和热演化程度密切相关,生烃后有机质体积缩小以及气体生成时体积膨胀造成有机质中产生大量孔隙(Schieber, 2010),有机质孔随着成熟度的增加孔隙增多(Loucks et al., 2009; Chalmers et al., 2009)。有研究发现,在 R_o 小于0.6%时有机孔基本不发育,当 R_o 在1.0%左右时才产生少量的有机孔,当 R_o 在1.5%~1.6%时,有机孔成为页岩主要孔隙类型(Modica and Lapierre, 2012)。但也有学者提出了不同看法:随 R_o 值增大,有机质孔隙大小和比例均降低(Curtis et al., 2011)或未见明显增大(Fishman et al., 2012)。吴松涛等(2015)通过成岩热演化模拟实验发现,鄂尔多斯盆地长7段页岩在 R_o 大于1.2%时有机质孔开始大量发育。

通过扫描电镜观察(图7),长7页岩储层的孔隙类型多样,主要有粒间孔、粒内孔、溶蚀孔、晶间孔、有机质孔及粒缘孔缝、收缩缝、溶蚀缝等,具备较好的储集性能。孔隙的连通性是页岩气能够从页岩储层中产出的重要因素(Cutris et al., 2012),高频的湖进湖退的水动力环境使得陆相页岩中砂质夹层和纹层发育(王香增等, 2014),砂质纹层对改善页岩的储集性能有重大贡献。延长探区内所有的页岩气高产井都发育砂质纹层(姜呈馥等, 2014; 王香增和任来义, 2016),且砂质纹层广泛发育原生粒间孔和次生溶蚀孔(王香增和任来义, 2016),是游离气的主要赋存空间(王香增, 2016)。加之这些粉砂质夹层/纹层的存在使得页岩地层具有更高的脆性,有利于裂缝的形成和保存(程明等, 2015)。

3.4 页岩气含量及赋存方式

页岩气赋存形式及其含气性的评价是页岩气勘探与开发研究的重要内容,它不仅对页岩气的含气量预测、资源潜力评价和产能评估具有重要意义,还影响页岩气藏的气藏类型、渗流方式和开采方法等(Li et al., 2018)。通过现场解析分析,长7页岩的解析气含量主要在0.2~2.6 m³/t,平均1.30 m³/t,最大可达2.6 m³/t,表现出较高含气性的特点。考虑到自钻遇岩心开始,到取出岩心放入密封罐的过程中,有大量天然气逸散,页岩的实际含气量应大于此方法测试的含气量。

前人研究认为,长7段页岩气的赋存方式包括游离态、吸附态和溶解态,以吸附态为主(王永伟等, 2014)。页岩气的三种赋存状态中,游离气的含量决定了页岩气藏的初始产能,而吸附气和溶解气含量则决定了页岩气藏能够稳产开采的时间(Orozco and Aguilera, 2015)。利用全烃和甲烷含量异常值可以对页岩含气量,特别是其中的游离气含量进行直接反映(张金川等, 2021),通过气测曲线(图3)可以看出,长7页岩具有一定含气量,且纵向上含气性差异较大,通常长7₃段地层中的气测值相对较高。有研究认为,页岩气的赋存形式与孔隙结构的发育密切相关(魏祥峰等, 2017),在孔隙空间体积较小的微孔中,天然气更多地以吸附状态为主存在;在储集空间较大的宏孔中,天然气更倾向于以游离状态存在(张金川等, 2021)。

王香增等(2014)依据页岩最大甲烷吸附量与

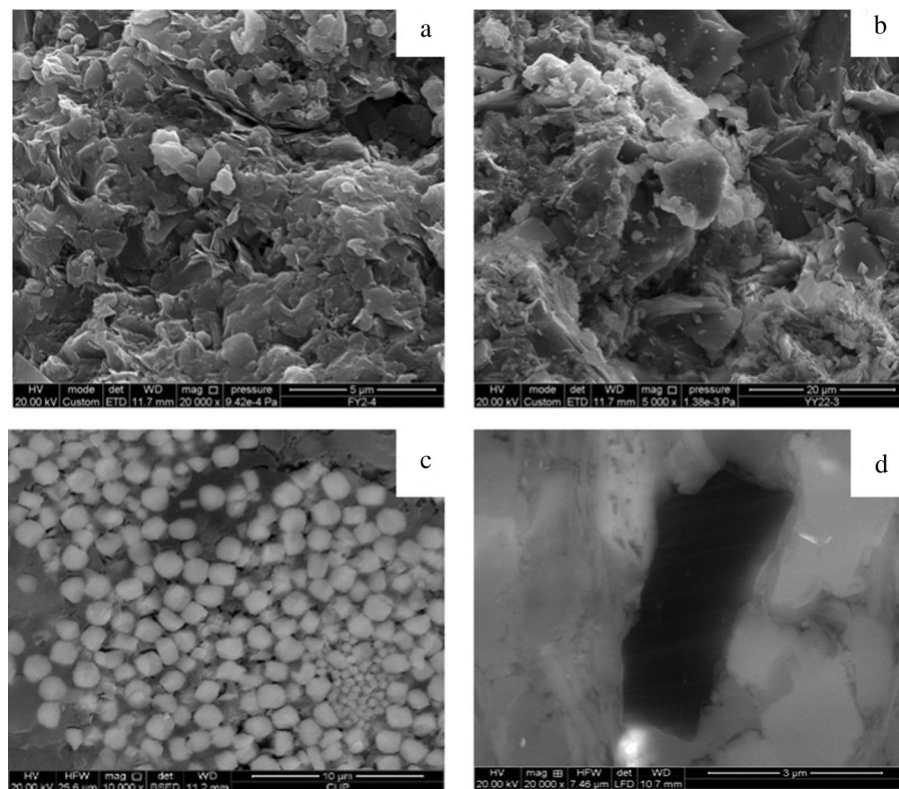


图7 研究区长7页岩扫描电镜照片

a—片状伊利石层间孔;b—粒间孔;c—黄铁矿晶间孔;d—有机质孔

Fig.7 Scanning electron microscope photographs of Chang 7 shale samples in the study area

a—Flaky illite interlayer pores; b—Intergranular pore; c—Pyrite intergranular pores; d—Organic pore

总有机碳含量相关关系推测,该区富有机质暗色页岩中大规模分布吸附态页岩气的可能性较大。影响该页岩吸附气量的主要因素为有机质丰度与黏土矿物含量。有机质丰度不仅影响页岩的生气能力,还影响页岩的吸附气量(图8a);黏土矿物具有较多的微孔隙和较大的比表面积,对气体具有较强的吸附能力(Ross and Bustin, 2008)。由于长7页岩中黏土矿物含量高(基本在40%~60%),石英含量低(主体在20%~40%),碳酸盐岩矿物含量极低,因此吸附态应是长7页岩气的主要赋存形态。通过解析气量与黏土矿物含量关系图(图8b)不难看出,黏土矿物含量与解析气量呈现出较好的正相关关系,黏土矿物含量越高,页岩解析气量也越高。

由于长7页岩成熟度不高,一般都小于1.3%,除部分高成熟地区可产干气之外,大部分地区主要处于生油窗范围内,主要产物为液态烃和石油伴生气。除了运移到输导层中的油气外,滞留在页岩层中的液态烃可在地下的温度压力条件下溶解一部

分页岩气。烃源岩的生烃潜量(S_1+S_2)是烃源岩已经生成、吸附在烃源岩有机质或黏土矿物表面的吸附烃和孔隙中的游离烃及有机质热解后生成的烃之和,反映烃源岩生成烃类的潜在能力,其是烃源岩评价的重要参数之一。其中, S_1 (可溶烃)也是较低成熟度页岩中溶解态页岩气含量估算的重要依据。根据热解分析结果,长7页岩 S_1 含量主要变化在0.02~14.7 mg/g。

3.5 良好的保存条件

页岩气的保存条件包括顶底板的封隔条件及相对稳定的构造背景。根据美国页岩气勘探开发经验,生气高峰、抬升时间越晚越好(金之钧等, 2016),适度抬升状态下的有效保存是页岩气富集的关键,快速的抬升剥蚀导致的构造卸载作用,在垂向上产生拉张作用,形成裂缝(何治亮等, 2016),抬升剥蚀作用还会破坏区域盖层的完整性及封盖性能,导致地层围压降低(翟刚毅等, 2017)。研究区长7页岩在距今100 Ma左右达到最大埋藏深度,

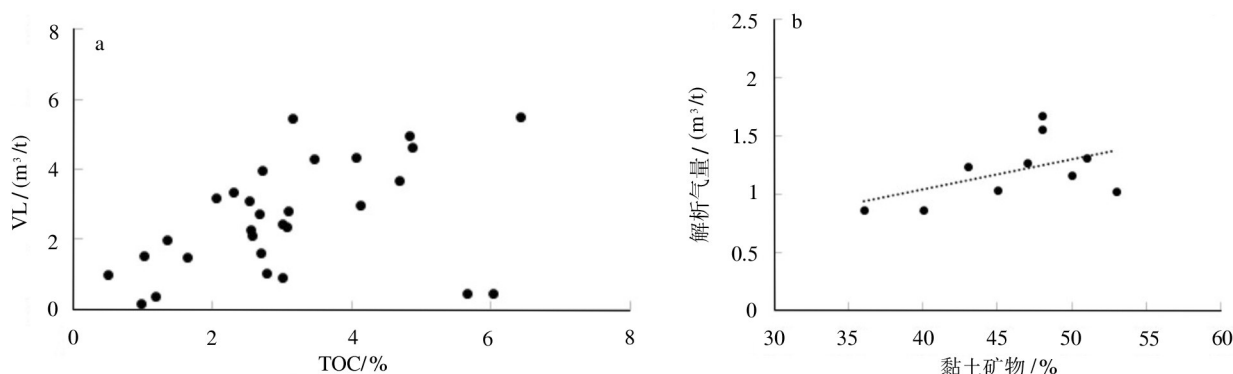


图8 延安地区长7段页岩TOC含量与最大吸附气含量(a)及黏土矿物含量与解析气量(b)关系图

Fig.8 The relationship between TOC content and analytical maximum adsorbed gas content (a), clay content and analytical gas content (b) in the Chang 7 shale samples in Yan'an area

达到生烃高峰,白垩纪中期受燕山构造运动影响发生大规模抬升(王香增和高潮,2014),抬升时间相对较晚,有利于页岩气的保存。页岩中生成的油气首先要满足自身的饱和,达到过饱和后油气才能继续运移到输导层中,过快的抬升剥蚀会导致页岩地层中的吸附气快速脱附,以游离气状态逃逸到其他地层中。延长组抬升相对稳定缓慢且时间相对较短,使得该地层中的油气能够得以相对较慢的速度逸散,而页岩地层具有孔渗性差,排烃阻力大等特点,使得大量油气仍滞留在页岩层中。在地质历史时期内的生气中心具有较高含气量,曾经历过深埋及油气大量生烃,地层曾经历过超压,由于后期构造抬升作用导致地层压力降低,油气逐渐散失,但抬升时间较晚,仍有大量油气滞留。且地层抬升作用缓慢,并未产生大的断裂,在岩心观察中发现长7页岩中构造裂缝极少,可见少量规模较小的垂直裂缝,被方解石充填(图9a),或见并未发生地层错断的小断层(图9b),为较弱的构造应力背景下,岩石塑性较强,虽发生了错动,但地层并未发生错断,表明长7页岩的抬升作用并不是十分强烈,对页岩气的聚集保存可以起到很好的保护作用。

页岩及其上下地层的岩性和物性特征是页岩气能否被成功勘探开发的关键,是确定“甜点”的关键因素。顶底板的封隔性不仅影响页岩气能否在页岩层中保存下来,同时在人工压裂中,若不具封闭性良好的顶、底板或隔层,会导致页岩层段压裂能量的损失,压裂效果降低,降低产能(Pollastro, 2007)。研究区内长7段上覆为长6底部泥页岩沉

积,它是一套岩性致密的富有机质的油页岩,对下伏长7₁段页岩气具有物性封闭和烃浓度封闭两种封盖机理,可以对长7页岩中赋存的页岩气起到有效封隔的作用;长7₁段富集层段下伏为长7₂+长7₃段富有机质页岩段,可作为其有效的底板。研究区长7段发育稳定分布且厚度大的深湖—半深湖相沉积暗色泥页岩,除部分地区发现长7₁及长7₂段中发育重力流砂体之外,其余地层均为厚层富有机质泥页岩,由于泥页岩本身具有较高毛细管力,具有很好的封隔性能,其自身可形成封隔条件。因此,研究区长7段页岩具有较好的顶底板封隔条件。

4 长7页岩气富集有利条件及发育模式

通过以上研究发现,长7页岩气富集区具备以下地质特征:富有机质页岩连续厚度大、丰富的气源供给、高TOC含量、储集性能较好、含气性较高等特点。因此,依据对延长组页岩气富集特征的解剖,将延长组页岩气富集规律总结为“两大一多”的特征:生气潜力大、连续厚度大、砂质纹层多。

4.1 生气潜力大

较大的生气强度是保证充足气源的基础条件,研究区长7段页岩具有生气强度较高且集中的特征。生气强度受控于烃源岩的有机质丰度、类型及演化程度,研究区页岩普遍具有有机质丰度高的特征,具有很好的生气基础。其有机质类型好,以偏腐泥的混合型有机质为主,利于生油气。因此,对于长7段页岩来说,影响其生气量的最关键因素在于其热演化程度。有机质热演化程度是页岩气评

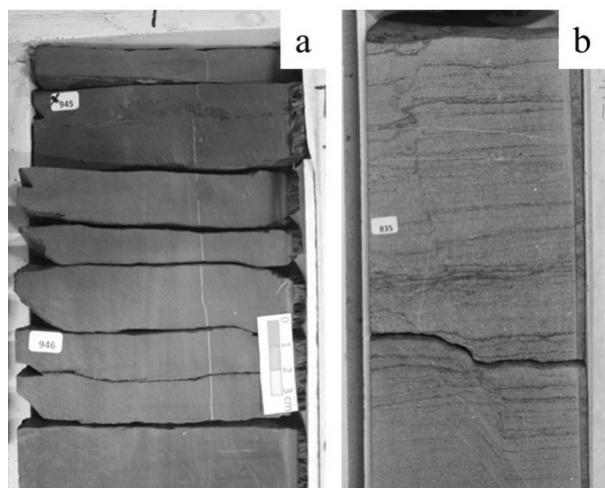


图9 延安地区长7段页岩裂缝发育
a—垂直构造裂缝,方解石充填;b—裂缝

Fig.9 Fracture development of the Chang 7 shale in Yan'an area
a—Vertical structural fracture, calcite filling; b—Fracture

价的关键参数,热演化程度的高低决定了页岩处于的有机质生烃演化阶段,决定了主要产物的类型和性质。长7段页岩虽然大部分处于成熟阶段,但在沉积中心 R_o 可达1.2%以上,热演化程度越高,页岩产气量越高。同时,由于长7页岩的沉积中心与沉降中心一致,页岩沉积厚度、TOC及 R_o 的高值区几乎重合(图4),因此生气中心较为集中。通过平面展布特征分析,研究区内生气中心位于下寺湾—张家滩地区,与目前长7页岩气主要生产井所处位置一致。

4.2 连续厚度大

富有机质页岩厚度大且分布稳定是页岩气富集的重要条件,也是影响页岩气资源丰度高低的重要因素(李延钧等,2011)。富有机质页岩厚度大,生烃强度就大,气源供给充足,且厚度大有利于页岩气的滞留及保存。此外,稳定分布的厚层页岩也是实现压裂改造的必要条件。

长7泥页岩连续厚度较大,在20~80 m,是页岩气生成及储集的物质基础。由于页岩具有颗粒较细、岩性致密的特点,如纯页岩层段厚度较大,页岩气从纯页岩层段中排出需要克服巨大的毛细管阻力,大部分页岩气难以排出,在页岩层中滞留,只有距离顶底面较近的页岩层排烃效率较高。研究区长7₂段—长7₃段主要为大段的黑灰色—黑色页岩,

质纯,有机质含量高,具有较高的含气量。如延页1井长7₂段+长7₃段为大段黑色页岩层段,厚度为56 m,纯页岩段上覆长7₁段物性相对较好的粉砂质页岩夹砂质纹层段(图10)。

4.3 砂质纹层多

从微观尺度来看,砂质纹层中微孔隙较纯页岩更为发育,砂质纹层大大改善了页岩的储集空间。砂质纹层与黑色富有机质页岩互层形成“三明治”结构,页岩气从黑色页岩中生成后经过初次运移到砂质纹层中储集起来,砂质纹层物性好,具有较高的排烃效率,气体充注首先满足夹层达到饱和后,才会通过二次运移到其他地层当中,因此这种“三明治”结构非常利于页岩气的富集。具有“三明治”结构的黑色含薄砂层纹层状泥页岩主要分布在半深湖沉积环境,水平层理发育,由有机质、泥岩和粉砂岩互层形成。厚层发育段中常夹有10~20 cm的泥质粉砂岩,具有中高电阻、伽马、时差等电性特征。该类泥页岩分布范围广、厚度大(30 m左右),TOC主要分布于2%~6%,是页岩气甜点的主要储集类型。

砂质夹层及纹层中的刚性颗粒提高了页岩储层抗压实能力,有利于孔隙的保存,这一点与中上扬子地区五峰—龙马溪组下部的生物成因硅质颗粒所起到的作用一致(Lei et al., 2015)。当砂质夹层厚度越大、岩性粗至细砂时,砂岩段的物性更好,其储集游离气的能力将更强;而且厚层页岩段中砂质夹层及粉砂质纹层还能大幅提高储层的脆性指数,有利于钻井及后期压裂改造。

4.4 页岩气富集模式

通过以上研究成果,可将延安地区长7段页岩气划分为两种富集模式:厚层富有机质页岩式(I类甜点)以及页岩与砂质纹层互层式(II类甜点)(图11)。

厚层富有机质页岩式,主要分布在长7₂+长7₃段,该模式中页岩有机质含量极高,通常TOC大于2%,砂地比<0.1,页岩质纯、厚度大,可见极薄的砂质纹层,毫米级至厘米级。具有较高的气测值(>6%),测井曲线上主要表现为高Gr、高电阻、高时差、低密度的特征。黏土矿物含量相对较高(40%~60%),有利于气体吸附,砂质纹层是页岩气富集的主要层段,深湖相是控制页岩气“甜点”形成的主要

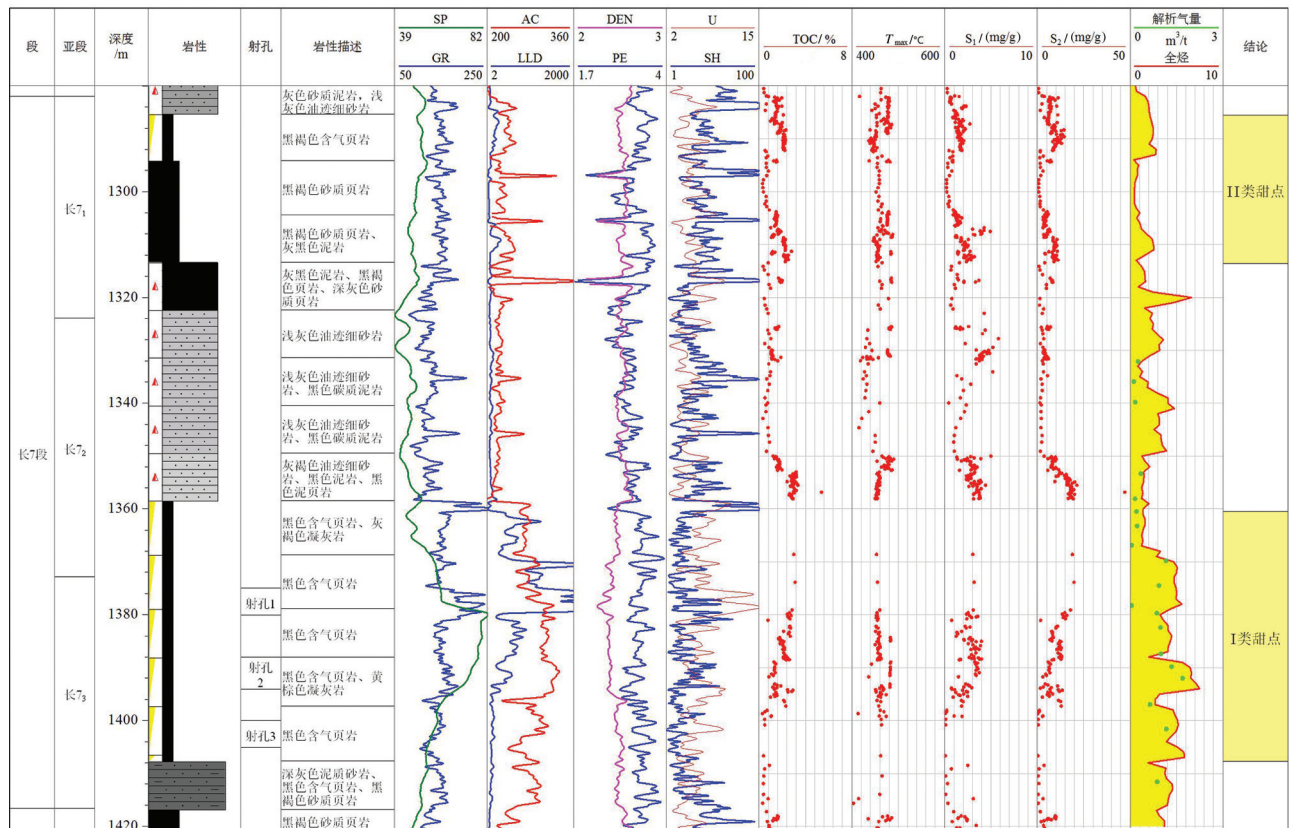


图10 延页1井延长组长7段页岩气甜点类型划分图
Fig.10 Classification of dessert types of the Chang 7 shale gas in Well Yanye 1

沉积相带,页岩气甜点区通常经历过地层高压或超压,相对稳定的构造条件是页岩气得以保存的重要前提。页岩连续厚度大,页岩气生成后难以排出而滞留在页岩层中,距离边界8~10 m的地层为有效排烃厚度。因此,厚度大于30 m的纯黑色页岩层段即可对页岩气形成有效保存。在此类甜点中,砂质纹层中通常储集更多的游离气,而厚层富有机质页岩中主要以吸附气为主。砂质纹层具有较好的孔渗性,不仅可以改善页岩的储集性能,还可以增加地层的脆性,有利于人工压裂。

页岩与砂质纹层互层式,这种模式主要分布在延长组长7₁段,TOC>2%,砂地比0.1~0.3。主要分布在半深湖—深湖沉积环境,由有机质、泥岩和粉砂岩互层形成,具有中高电阻、伽马、时差等电性特征。通过岩心及镜下薄片观察,长7₁段页岩砂质纹层最为发育,纹层厚薄不一,从1 mm到几厘米,多表现为灰色砂质纹层与黑色富有机质页岩呈薄互层或夹层,可见水平层理、低角度波纹层理、交错层

理、变形构造、冲刷面等沉积构造。黑色富有机质页岩与砂质纹层呈“三明治”结构,厚层发育段中常夹有10~20 cm的泥质粉砂岩,具有优良的生排烃条件,富有机质页岩(TOC>2%)提供页岩气来源,砂质

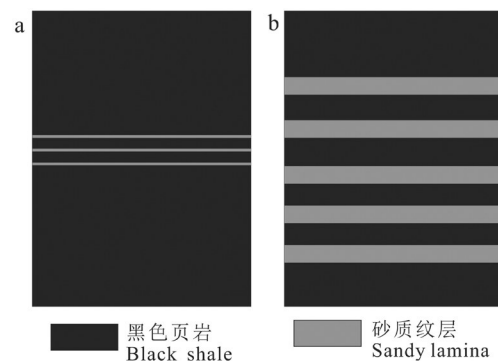


图11 延长组长7段页岩气富集模式图
a—厚层富有机质页岩式; b—页岩与砂质纹层互层式
Fig. 11 The enrichment model of the Chang 7 shale gas
a—Type of thick organic-rich shale; b—Type of interbedded shale and sandy lamina

纹层作为储集体储集页岩气。上覆的长6底部油页岩和下伏长7₂+长7₃段厚层黑色页岩作为有效顶底板封隔层,保存条件好。

5 结 论

通过对延安地区长7页岩的地质特征及页岩气富集规律研究,得出以下认识:

(1)有机质含量高、热演化程度高是延安地区长7段页岩气富集的关键;有机质与黏土矿物丰富利于页岩气的吸附;砂质纹层可以有效改善页岩储集性能,黑色页岩与砂质纹层互层有利于页岩气富集;纯页岩层段厚度大有利于页岩气的赋存。

(2)良好的顶底板封隔条件及相对稳定的构造背景是延安地区长7段页岩气得以保存的重要地质因素。

(3)延安地区长7段页岩气划分为两种富集模式:页岩与砂质纹层互层式以及厚层富有机质页岩式。页岩与砂质纹层互层式中黑色页岩与砂质纹层呈“三明治”结构;厚层富有机质页岩式中页岩气排烃受阻,纯页岩层段应大于30 m。

References

- Chalmers G R L, Bustin R M. 2007. The organic matter distribution and methane capacity of the Lower Cretaceous strata of northeastern British Columbia[J]. *International Journal of Coal Geology*, 70: 223–239.
- Cheng Ming, Luo Xiaorong, Lei Yuhong, Wang Xiangzeng, Yu Yuxi, Zang Lixia, Jiang Chengfu, Sun Binghua, Zhang Likuan. 2015. The distribution, fractal characteristic and thickness estimation of silty laminae and beds in the Zhangjiatan shale, Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 26(5): 845–854 (in Chinese with English abstract).
- Curtis M E, Sondergeld C H, Ambrose R J. 2012. Microstructural investigation of gas shales in two and three dimensions using nanometer–scale resolution imaging [J]. *AAPG Bulletin*, 96(4): 665–677.
- Curtis M Erman, Ambrose R J, Sondergeld C H. 2011. Investigation of the relationship between organic porosity and thermal maturity in the Marcellus Shale[R]. *SPE* 144370.
- Fan Bojiang, Wang Xiangzeng, Wu Xiaobin. 2017. Desorption analysis of shale and its geochemical characteristics: A case study of the Chang 7 member shale in the central south Ordos basin[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 46(3): 554–562, 577 (in Chinese with English abstract).
- Fishman N S, Lowers H A, Hackley P C, Hill R J, Egenhoff S O. 2012. Porosity in shales of the organic-rich Kimmeridge clay formation (Upper Jurassic), offshore United Kingdom[R]. Long Beach, California: AAPG Annual Convention and Exhibition.
- Guo Tonglou, Zhang Hanrong. 2014. Formation and enrichment mode of Jiaoshiba shale gas field, Sichuan Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 41(1): 28–36(in Chinese with English abstract).
- Guo Xusheng, Hu Dongfeng, Wen Zhidong, Liu Ruobing. 2014. Major factors controlling the accumulation and high productivity in marine shale gas in the Lower Paleozoic of Sichuan Basin and its periphery: A case study of the Wufeng–Longmaxi Formation of Jiaoshiba area[J]. *Geology in China*, 41(3): 893–901(in Chinese with English abstract).
- He Zhiliang, Nie Haikuan, Zhang Yuying. 2016. The main factors of shale gas enrichment of Ordovician Wufeng Formation–Silurian Longmaxi Formation in the Sichuan Basin and its adjacent areas[J]. *Earth Science Frontiers*, 23(2): 8–17(in Chinese with English abstract).
- Jiang Chengfu, Cheng Yuqun, Fan Bojiang, Gao Shengli. 2014. Progress in and challenges to geologic research of terrestrial shale in China: A case study from the 7th member of the Upper Triassic Yanchang Fm in the Yanchang exploration block, Ordos Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 34(2): 27–33(in Chinese with English abstract).
- Jin Zhijun, Hu Zongquan, Gao Bo, Zhao Jianhua. 2016. Controlling factors on the enrichment and high productivity of shale gas in the Wufeng–Longmaxi Formations, southeastern Sichuan Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 23(1): 1–10(in Chinese with English abstract).
- Lei Yuhong, Luo Xiaorong, Wang Xiangzeng, Zhang Lixia, Jiang Chengfu, Yang Wan, Yu Yuxi, Cheng Ming, Zhang Likuan. 2015. Characteristics of silty laminae in Zhangjiatan Shale of southeastern Ordos Basin, China: Implications for shale gas formation[J]. *AAPG Bulletin*, 99(4): 661–687.
- Li Qianwen, Pang Xiongqi, Tang Ling, Chen Gang, Shao Xinhe, Jia Nan. 2018. Occurrence features and gas content analysis of marine and continental shales: A comparative study of Longmaxi Formation and Yanchang Formation[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 56: 504–522.
- Li Yanjun, Liu Huan, Liu Jiaxia, Cao Lichun, Jia Xuecheng. 2011. Geological regional selection and an evaluation method of resource potential of shale gas[J]. *Journal of Southwest Petroleum University*, 33(2): 28–34.
- Loucks R G, Reed R M, Ruppel S C, Jarvie D M. 2009. Morphology, genesis, and distribution of nanometer–scale pores in siliceous mudstones of the mississippian barnett shale[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 79: 848–861.
- Lu Longfei, Qin Jianzhong, Shen Baojian, Tenger, Liu Weixin, Zhang Qingzhen. 2018. The origin of biogenic silica in siliceous shale from Wufeng–Longmaxi Formation in the Middle and Upper

- Yangtze region and its relationship with shale gas enrichment[J]. *Earth Science Frontiers*, 25(4): 226–236(in Chinese with English abstract).
- Ma Yongsheng, Cai Xunyu, Zhao Peirong. 2018. China's shale gas exploration and development: Understanding and practice[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 45(4): 561–574 (in Chinese with English abstract).
- Modica C J, Lapiere S G. 2012. Estimation of kerogen porosity in source rocks as a function of thermal transformation: Example from the Mowry Shale in the Powder River Basin of Wyoming[J]. *AAPG Bulletin*, 96(1): 87–108.
- Orozco D, Aguilar R. 2015. A material balance equation for stress-sensitive shale gas reservoirs considering the contribution of free, adsorbed and dissolved gas[C]//SPE/CSUR Unconventional Resources Conference. Society of Petroleum Engineers.
- Pan Renfang, Gong Qin, Yan Jie, Jin Jineng. 2016. Elements and gas enrichment laws of sweet spots in shale gas reservoir: A case study of the Longmaxi Fm in Changning Block, Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 36(2): 7–13(in Chinese with English abstract).
- Pollastro R M. 2007. Total petroleum system assessment of undiscovered resources in the giant Barnett Shale continuous (unconventional) gas accumulation, Fort Worth Basin, Texas[J]. *AAPG Bulletin*, 91(4): 551–578.
- Pu Boling, Wang Fengqin, Dong Dazhong, Sun Jianbo. 2021. Challenges of terrestrial shale gas exploration & development from Chang 7 shale in the Ordos Basin[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 14: 644.
- Ross D J K, Bustin R M. 2008. Characterizing the shale gas resource potential of Devonian Mississippian strata in the Western Canada sedimentary basin: Application of an integrated formation evaluation[J]. *AAPG Bulletin*, 92(1): 87–125.
- Schieber J. 2010. Common themes in the formation and preservation of intrinsic porosity in shales and mudstones—illustrated with examples across the Phanerozoic[C]//Proceedings of SPE Unconventional Gas Conference. Allen, TX: Society of Petroleum Engineers, SPE 132370.
- Wang Pengfei, Lü Peng, Jiang Zhenxue, Jin Can, Li Xin, Zhang Kun, Huang Pu, Wang Yi. 2018. Comparison of organic matter pores of marine and continental facies shale in China: based on Focused Ion Beam Helium Ion Microscopy(FIB–HIM)[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 40(5): 739–748(in Chinese with English abstract).
- Wang Shejiao, Yang Tao, Zhang Guosheng, Li Denghua, Chen Xiaoming. 2012. Shale gas enrichment factors and the selection and evaluation of the core area[J]. *Strategic Study of CAE*, 14(6): 94–100 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiangzeng. 2016. Advances in unconventional gas exploration and development of Yanchang Petroleum Group[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 37(1): 137–144 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiangzeng, Gao Chao. 2014. The hydrocarbon generation process of the Mesozoic Chang 7 lacustrine shale in south of Ordos Basin[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 1(1):2–10 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiangzeng, Gao Shengli, Gao Chao. 2014. Geological features of Mesozoic continental shale gas in south of Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 41(3): 294–304 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiangzeng, Hao Jin, Jiang Zhenxue, Guo Chao, Xing Jinyan, Li Zhuo, Tang Xianglu. 2015. Influencing factors and distributions of the oil dissolved shale gas content of member Chang 7 shale in Xiasiwan Area, Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 26(4): 744–753 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiangzeng, Ren Laiyi. 2016. Advances in theory and practice of hydrocarbon exploration in Yanchang exploration area, Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 37(1): 79–86(in Chinese with English abstract).
- Wang Yongwei, Gao Shengli, Gao Chao. 2014. Continental shale gas exploration and discussion on Issues related to geological theory in Yanchang exploration area, Ordos Basin[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 33(6): 88–98 (in Chinese with English abstract).
- Wu Songtao, Zhu Rukai, Cui Jinggang, Cui Jingwei, Bai Bin, Zhang Xiangxiang, Jin Xu, Zhu Desheng, You Jianchang. 2015. Characteristics of lacustrine shale porosity evolution, Triassic Chang 7 Member, Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 42(2): 167–176(in Chinese with English abstract).
- Xie Jun, Zhao Shengxian, Shi Xuewen, Zhang Jian. 2017. Main geological factors controlling high production of horizontal shale gas wells in the Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 37(7): 1–12(in Chinese with English abstract).
- Yuan Wei, Liu Guangdi, Xu Liming, Niu Xiaobing. 2019. Main controlling factors for organic matter enrichment in Chang 7 member of the Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 40(2): 326–334(in Chinese with English abstract).
- Zeng Weite, Zhang Jinchuan, Ding Wenlong, Wang Xiangzeng, Zhu Dingwei, Liu Zhujiang. 2014. The gas content of continental Yanchang shale and its main controlling factors: A case study of Liuping–171 well in Ordos basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 25(2): 291–301 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Gangyi, Wang Yufang, Bao Shujing, Guo Tianxu, Zhou Zhi, Chen Xianglin, Wang Jinzhu. 2017. Major factors controlling the accumulation and high productivity of marine shale gas and prospect forecast in Southern China[J]. *Earth Science*, 42(7): 1057–1068(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jian, Wang Lansheng, Yang Yueming, Wan Maoxia, Zhou Chunyan, Deng Hongbin, Kong Lingming. 2016. The development and application of the evaluation method of marine shale gas in

- Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 27(3): 433–441(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jinchuan, Liu Shugen, Wei Xiaoliang, Tang Xuan, Liu Yang. 2021. Evaluation of gas content in shale[J]. Oil & Gas Geology, 42(1): 28–40(in Chinese with English abstract).
- Zhang Wenzheng, Yang Hua, Yang Weiwei, Wu Kai, Liu Fei. 2015. Assessment of geological characteristics of lacustrine shale oil reservoir in Chang 7 Member of Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Geochimica, 44(5): 505–515(in Chinese with English abstract).
- Zhao Xiangyuan, Zeng Lianbo, Zu Kewei, Hu Xiangyang, Jiao Jun, Zhu Lifeng, Shi Jinxiong. 2016. Brittleness characteristics and its control on natural fractures in tight reservoirs: A case study from Chang 7 tight reservoir in Longdong area of the Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 37(1): 62–71(in Chinese with English abstract).
- Zhu Tong, Wang Feng, Yu lingjie, Sun Runxuan. 2016. Controlling factors and types of shale gas enrichment in the Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 37(3): 399–407(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 程明, 罗晓容, 雷裕红, 王香增, 俞雨溪, 张丽霞, 姜呈馥, 孙兵华, 张立宽. 2015. 鄂尔多斯盆地张家滩页岩粉砂质夹层 / 纹层分布、分形特征和估算方法研究[J]. 天然气地球科学, 26(5): 845–854.
- 范柏江, 王香增, 吴小斌. 2017. 页岩的气体解析特征及地球化学认识——以鄂尔多斯盆地中南部长 7 段页岩为例[J]. 中国矿业大学学报, 46(3): 554–562, 577.
- 郭彤楼, 张汉荣. 2014. 四川盆地焦石坝页岩气田形成与富集高产模式[J]. 石油勘探与开发, 41(1): 28–36.
- 郭旭升, 胡东风, 文治东, 刘若冰. 2014. 四川盆地及周缘下古生界海相页岩气富集高产主控因素: 以焦石坝地区五峰组—龙马溪组为例[J]. 中国地质, 41(3): 893–901.
- 何治亮, 聂海宽, 张钰莹. 2016. 四川盆地及其周缘奥陶系五峰组—志留系龙马溪组页岩气富集主控因素分析[J]. 地学前缘, 23(2): 8–17.
- 姜呈馥, 程玉群, 范柏江, 高胜利. 2014. 陆相页岩气的地质研究进展及亟待解决的问题——以延长探区上三叠统延长组长 7 段页岩为例[J]. 天然气工业, 34(2): 27–33.
- 金之钧, 胡宗全, 高波, 赵建华. 2016. 川东南地区五峰组—龙马溪组页岩气富集与高产控制因素[J]. 地学前缘, 23(1): 1–10.
- 李延钧, 刘欢, 刘家霞, 曹利春, 贾学成. 2011. 页岩气地质选区及资源潜力评价方法[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 33(2): 28–34.
- 卢龙飞, 秦建中, 申宝剑, 腾格尔, 刘伟新, 张庆珍. 2018. 中上扬子地区五峰组—龙马溪组硅质页岩的生物成因证据及其与页岩气富集的关系[J]. 地学前缘, 25(4): 226–236.
- 马永生, 蔡勋育, 赵培荣. 2018. 国页岩气勘探开发理论认识与实践[J]. 石油勘探与开发, 45(4): 561–574.
- 潘仁芳, 龚琴, 鄢杰, 金吉能. 2016. 页岩气藏“甜点”构成要素及富气特征分析——以四川盆地长宁地区龙马溪组为例[J]. 天然气工业, 36(2): 7–13.
- 王朋飞, 吕鹏, 姜振学, 金璨, 李鑫, 张昆, 黄璞, 王毅. 2018. 中国海陆相页岩有机质孔隙发育特征对比——基于聚焦离子束氮离子显微镜(FIB-HIM)技术[J]. 石油实验地质, 40(5): 739–748.
- 王社教, 杨涛, 张国生, 李登华, 陈晓明. 2012. 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, 14(6): 94–100.
- 王香增. 2016. 延长石油集团非常规天然气勘探开发进展[J]. 石油学报, 37(1): 137–144.
- 王香增, 高潮. 2014. 鄂尔多斯盆地南部长 7 陆相泥页岩生烃过程研究[J]. 非常规油气, 1(1): 2–10.
- 王香增, 高胜利, 高潮. 2014. 鄂尔多斯盆地南部中生界陆相页岩气地质特征[J]. 石油勘探与开发, 41(3): 294–304.
- 王香增, 郝进, 姜振学, 郭超, 邢金艳, 李卓, 唐相路. 2015. 鄂尔多斯盆地地下寺湾地区长 7 段油溶相页岩气量影响因素及其分布特征[J]. 天然气地球科学, 26(4): 744–753.
- 王香增, 任来义. 2016. 鄂尔多斯盆地延长探区油气勘探理论与实践进展[J]. 石油学报, 37(增刊 1): 79–86.
- 王永伟, 高胜利, 高潮. 2014. 鄂尔多斯盆地延长探区陆相页岩气勘探[J]. 地质科技情报, 33(6): 88–98.
- 吴松涛, 朱如凯, 崔京钢, 崔景伟, 白斌, 张响响, 金旭, 朱德升, 游建昌. 2015. 鄂尔多斯盆地长 7 湖相泥页岩孔隙演化特征[J]. 石油勘探与开发, 42(2): 167–176.
- 谢军, 赵圣贤, 石学文, 张鉴. 2017. 四川盆地页岩气水平井高产的地质主控因素[J]. 天然气工业, 37(7): 1–12.
- 袁伟, 柳广弟, 徐黎明, 牛小兵. 2019. 鄂尔多斯盆地延长组 7 段有机质富集主控因素[J]. 石油与天然气地质, 40(2): 326–334.
- 曾维特, 张金川, 丁文龙, 王香增, 朱定伟, 刘珠江. 2014. 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, 25(2): 291–301.
- 翟刚毅, 王玉芳, 包书景, 郭天旭, 周志, 陈相霖, 王劲铸. 2017. 我国南方海相页岩气富集高产主控因素及前景预测[J]. 地球科学, 42(7): 1057–1068.
- 张鉴, 王兰生, 杨跃明, 万茂霞, 邹春艳, 邓鸿斌, 孔令明. 2016. 四川盆地海相页岩气选区评价方法建立及应用[J]. 天然气地球科学, 27(3): 433–441.
- 张金川, 刘树根, 魏晓亮, 唐玄, 刘飏. 2021. 页岩含气量评价方法[J]. 石油与天然气地质, 42(1): 28–40.
- 张文正, 杨华, 杨伟伟, 吴凯, 刘飞. 2015. 鄂尔多斯盆地延长组长 7 湖相页岩油地质特征评价[J]. 地球化学, 44(5): 505–515.
- 赵向原, 曾联波, 祖克威, 胡向阳, 焦军, 朱利锋, 史今雄. 2016. 致密储层脆性特征及对天然裂缝的控制作用——以鄂尔多斯盆地陇东地区长 7 致密储层为例[J]. 石油与天然气地质, 37(1): 62–71.
- 朱彤, 王烽, 俞凌杰, 孙润轩. 2016. 四川盆地页岩气富集控制因素及类型[J]. 石油与天然气地质, 37(3): 399–407.