

鄂尔多斯盆地陇东地区上古生界天然气富集规律

李 军^{1,2},王禹诺³,赵靖舟^{1,2},李 磊⁴,郑 杰⁴,胡维强¹

[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. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院,北京 100083; 4. 中国石油 长庆油田公司 勘探开发研究院,陕西 西安 710018]

摘要:基于鄂尔多斯盆地陇东地区上古生界气源条件、储层特征、盖层特征等的分析,对研究区上古生界天然气富集主控因素进行了研究。研究表明,鄂尔多斯盆地陇东地区上古生界天然气气藏的形成与分布主要受气源、盖层和储层条件三元耦合关系控制。气源条件、山西组1段直接盖层条件共同控制区域上气藏的形成与分布。区域上生烃强度高,山西组1段泥岩盖层厚度大于35 m的区域为山西组1段气藏有利成藏区,山西组1段泥岩盖层厚度小于35 m的区域则主要为石盒子组8段气藏有利成藏区。储层条件控制天然气的局部富集,其中气源条件、山西组1段盖层条件相似时储层“甜点”控气,即储层质量越好天然气越富集;气源条件、山西组1段盖层条件均有利时,相对较差储层亦可成藏。值得注意的是,气源、盖层和储层条件三元耦合关系控制的天然气最佳成藏富集区并非三者均为最优的地区,而是三者最佳配置、相互补偿形成的有利区。

关键词:三元耦合控藏;天然气富集规律;致密砂岩气;陇东地区;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Accumulation patterns of natural gas in the Upper Paleozoic in Longdong area, Ordos Basin

Li Jun^{1,2}, Wang Yunuo³, Zhao Jingzhou^{1,2}, Li Lei⁴, Zheng Jie⁴, Hu Weiqiang¹

[1. School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China;

2. Shaanxi Key Lab of Petroleum Accumulation Geology, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China;

3. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

4. Exploration & Development Research Institute of PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an, Shaanxi 710018, China]

Abstract: Based on the analysis of source rocks, reservoirs and cap rocks in the Upper Paleozoic, Longdong area, Ordos Basin, studies were performed on the controlling factors of natural gas accumulation. It's shown that the formation and distribution of gas reservoirs in the Upper Paleozoic are mainly controlled by the source rocks, reservoirs and cap rocks and the coupling relationship among them. Source rocks and cap rocks of the Shanxi Formation jointly control the formation and distribution of the gas reservoir in the region. The gas play fairway of the first member of Shanxi Formation (P_2s^1) are distributed in area with high gas generation intensity and thick P_2s^1 cap rock over 35 meters. In contrast, gas play fairway of the eighth member of Shihezi Formation (P_2h^8) occurs in area where the thickness of P_2s^1 cap rock is less than 35 meters. Local enrichment of gas is determined by the reservoir conditions. When the source rocks and cap rocks of the first member of the Shanxi Formation are similar, "sweet spot" controls gas distribution, that is to say the better the quality of the reservoir is, the more enrichment the natural gas is. When both the source rocks and cap rocks of the first member of Shanxi Formation are favorable, gas reservoir can also be formed in the relatively poor formations. It is worth noting that best gas enrichment area is not the one where the gas source, seal and reservoir conditions are all favorable, rather the one where the gas source, seal and reservoir conditions match and compensate best.

Key words: coupling of three-factor controlling gas accumulation, natural gas enrichment pattern, tight sand gas, Longdong area, Ordos Basin

鄂尔多斯盆地是中国致密砂岩气资源最丰富的盆地之一。现已在上古生界发现并探明了苏里格、榆林、

收稿日期:2015-02-25;修订日期:2015-12-10。

第一作者简介:李军(1982—),博士、讲师,油气成藏地质学、非常规油气地质与勘探。E-mail:lijun@xsyu.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(41502132);国家科技重大专项(2011ZX05007-004);陕西省教育厅重点项目(15JS093);西安石油大学青年科技创新基金项目(2013BS018)。

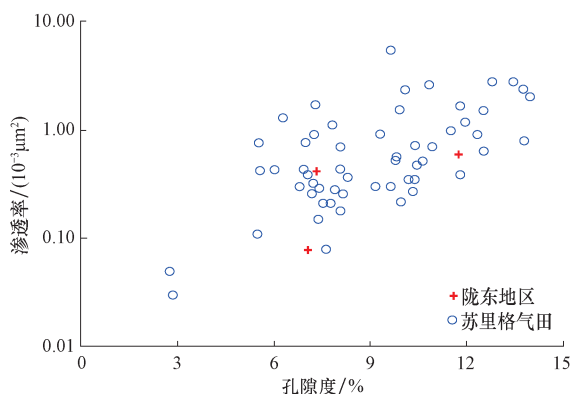


图2 陇东地区和苏里格气田产水井孔渗相关性

Fig. 2 Plot of porosity versus permeability for water production wells in Longdong area and Sulige gasfield

层孔隙度分别为 7.02%, 7.31% 和 11.75%, 平均为 8.69%; 渗透率分别为 0.081×10^{-3} , 0.590×10^{-3} 和 $0.774 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均为 $0.481 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 总体上储层物性较好。研究区气源条件与苏里格气田西区(苏西地区)相似,而在苏西地区也有大量气水同产井以及少量的水井。苏西地区产水井物性也较好,孔隙度分布在 2.72% ~ 13.95%, 平均为 9.06%, 渗透率分在 $0.003 \times 10^{-3} \sim 5.450 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均为 $0.469 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。与苏西地区相比,陇东地区产水井孔隙度略低,渗透率略高,总体上基本持平(图2)。前人研究表明苏西地区的产水主要和生烃强度较低有关^[28-29]。事实上,根据上述分析也可知,这些产水井储层质量本身没有问题,气源较差、成藏动力不足导致的天然气充注强度不高可能才是产水的最重要因素。在一些储层条件相对较好的地区,由于天然气饱和度不高也会导致储层中大量地层水的存在,从而在试气过程中产水。

由此看来,陇东地区上古生界气源条件略显不足。在这种情况下,气源条件对天然气在区域上的成藏与分布的控制作用就显得尤为明显。平面上,产气井主

要分布在煤层厚度大于 4 m, 生烃强度大于 $10 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 的区域,且存在随着煤层厚度增大、生烃强度增高,产气量也增加的趋势。纵向上,天然气垂向运移的最远距离与煤层厚度和累计生烃强度同样存在良好的正相关关系。随着煤层厚度和生烃强度增大,天然气垂向运移距离增加,在煤层厚度大于 6 m, 生烃强度大于 $20 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 的区域,天然气垂向运移最远距离可达 120m 以上(图3)。

2 盖层条件及其控气作用

对于致密砂岩气而言,无论是早期提出的深盆气理论^[25,30]、盆地中心气理论^[24],还是后来发展的连续型气藏理论^[31-34]和准连续型气藏理论^[23,28],都鲜有将盖层条件作为致密砂岩气藏形成与分布的控制因素,认为其保存可能主要与气水动态平衡和致密砂岩的自封闭作用有关。

和鄂尔多斯盆地其他地区一样,陇东地区上古生界发育山1段、下石盒子组、上石盒子组和石千峰组等多套泥岩盖层。其中最重要的有两套,一套为山1气藏直接盖层,主要指山1段泥岩。另一套为下石盒子组泥岩区域盖层。其中下石盒子组泥岩区域盖层累计厚度大,最薄的在 45 m 左右,最厚达 80 m,且在垂向上连续分布,封盖能力强,其对研究区气藏的区域封盖作用毋庸置疑,因此本文不作重点讨论。本文重点讨论山1段直接盖层对研究区气藏形成与分布的控制作用。

前人研究表明,除了生烃增压驱动天然气运移外,扩散运移也是鄂尔多斯盆地上古生界天然气进入山1段的一种重要运移方式^[21]。以超压作为主要运移动力形成的气藏对保存条件的要求,比以浮力等作为二次运移主要动力形成的气藏高。同时,对于天然气的

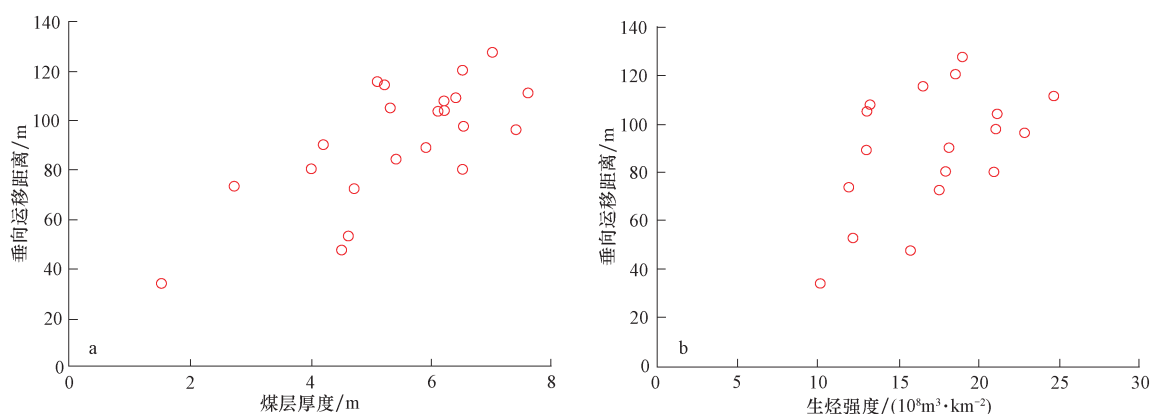


图3 陇东地区上古生界天然气垂向运移距离与煤层厚度及生烃强度的相关性

Fig. 3 Coal seam thickness and gas generation intensity vs. vertical migration distance of gas in the Upper Paleozoic, Longdong area

a. 天然气垂向运移距离与煤层厚度相关性; b. 天然气垂向运移距离与生烃强度相关性

扩散运移来说,同样意味着扩散散失,如果没有有效的封堵条件,天然气的扩散充注量和散失量就会大致相当,从而很难形成有效的天然气聚集。因此,山1段若要形成可观的天然气聚集,良好的直接封盖条件就显得尤为重要。陇东地区山1气藏直接盖层泥岩物性致密,孔隙度分布在 $0.25\% \sim 4.56\%$,渗透率分布在 $0.0006 \times 10^{-3} \sim 0.0216 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,在鄂尔多斯盆地北部,这套泥岩的突破压力最小值为 $2 \sim 6 \text{ MPa}$ ^[35]。同时,该泥岩盖层具有扩散系数低的特点,扩散系数分布在 $1.01 \times 10^{-8} \sim 9.62 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$,对于扩散散失天然气具有较好的封盖作用。另外,这套泥岩盖层局部还存在超压封盖^[35]。平面上,陇东地区山1气藏直接盖层累计泥岩厚度主要分布在 $18 \sim 55 \text{ m}$,在局部地区纵向上泥岩连续分布,单层厚度较大,如QT3井泥岩单层厚度大于 40 m 。定量统计分析表明,这套泥岩累计厚度一般达到 27 m 便对天然气具有较好的封盖作用^[36]。

从研究区目前的勘探成果来看,山1段工业气流井均分布在山1段直接盖层泥岩单层厚度较大,纵向上分布连续,累计厚度大于 35 m 的区域。在山1段直接盖层小于 35 m 的区域,山1段产气量明显降低,局部出现了产水现象(图4)。当然,前已述及研究区局部出现的产水现象主要还是由于气源较差,充注强度不高所致。在整体气源较差的背景下,盖层条件较差可能会使局部地区含气性更差,在储层条件较好时,存在自由水的区域产水现象更加突出。

对于陇东地区盒8段气藏来说,山1段是其天然气运移的输导体系。盒8段若要成藏,山1段必须具

有较好的输导性能,要求山1段泥岩相对不发育,单层厚度小,砂岩、泥岩呈互层式发育,或者在厚层泥岩中大量发育可供天然气有效运移的裂缝。从研究区目前的勘探成果来看,盒8段工业气流井均分布在山1段直接盖层小于 35 m 的区域,在山1段盖层大于 35 m 的区域,盒8产气量明显降低(图5)。

需要指出的是,陇东地区盒8段在山1段直接盖层大于 35 m 的区域,山1段在山1段直接盖层小于 35 m 的区域天然气与水同时产出,但是产气量明显降低。这与鄂尔多斯盆地北部苏里格等大气田干井很少的勘探实际情况一致,同时与鄂尔多斯盆地上古生界广覆式生烃、大面积弥漫式充注形成的大面积含气,但井与井之间含气性差异较大成藏特征^[28]也是一致的。至于是否产水,主要受充注强度控制,保存条件和储层条件等因素也有一定的影响。鄂尔多斯盆地北部苏里格气田产水井分布区生烃强度小于 $16 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 。产出的地层水分为毛细管水和自由水两种。毛细管水发育储层孔隙度为 $8\% \sim 10\%$,渗透率为 $0.35 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。自由水储层孔隙度大于 10% ,渗透率大于 $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ^[29],产水井储层物性普遍较好。在生烃强度较低的地区,天然气充注强度不大,如果储层物性较好,保存条件相对较差,储层中可能存在较多的地层水,由此会导致试气时产水现象比较突显。因此对于陇东地区来说,生烃强度总体较低,在山1段盖层条件较差,同时储层物性又较好的地区,山1段产水的可能性便相对较大。同样,在山1段盖层条件较好,同时盒8段储层也较好的地区,盒8段产水的可能性也相对较大。但总体上,盖层条件与产水之

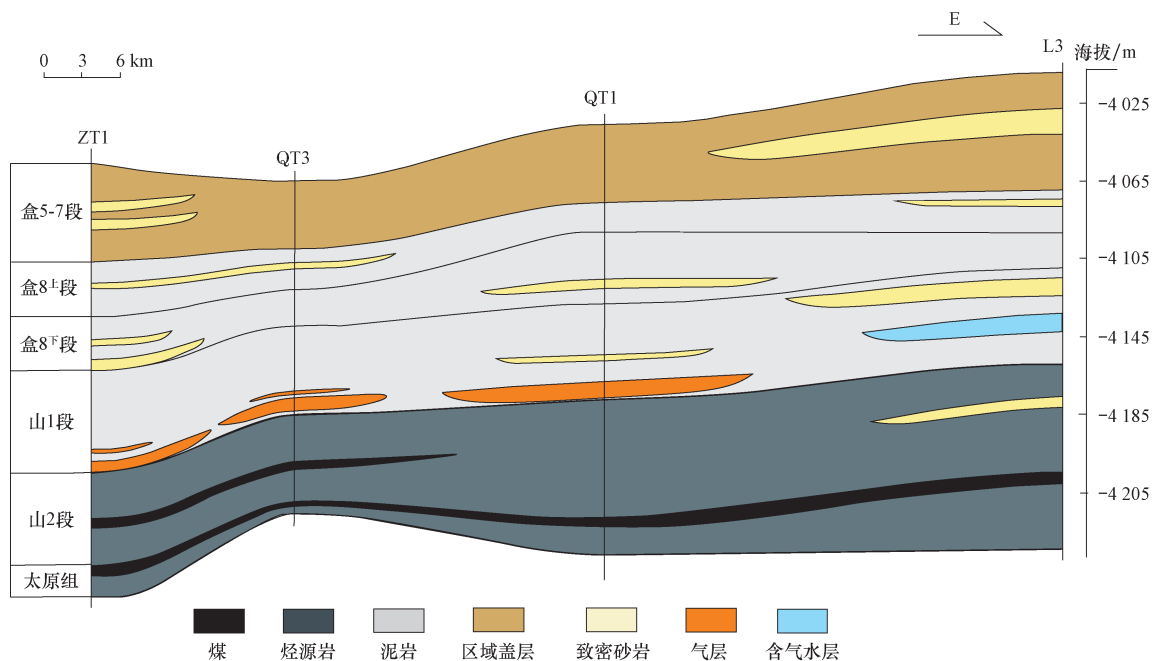


图4 陇东地区 ZT1 井—L3 井山1 气藏剖面

Fig. 4 Gas reservoir profile of the first member of the Shanxi Formation from Well ZT1 to Well L3 in Longdong area

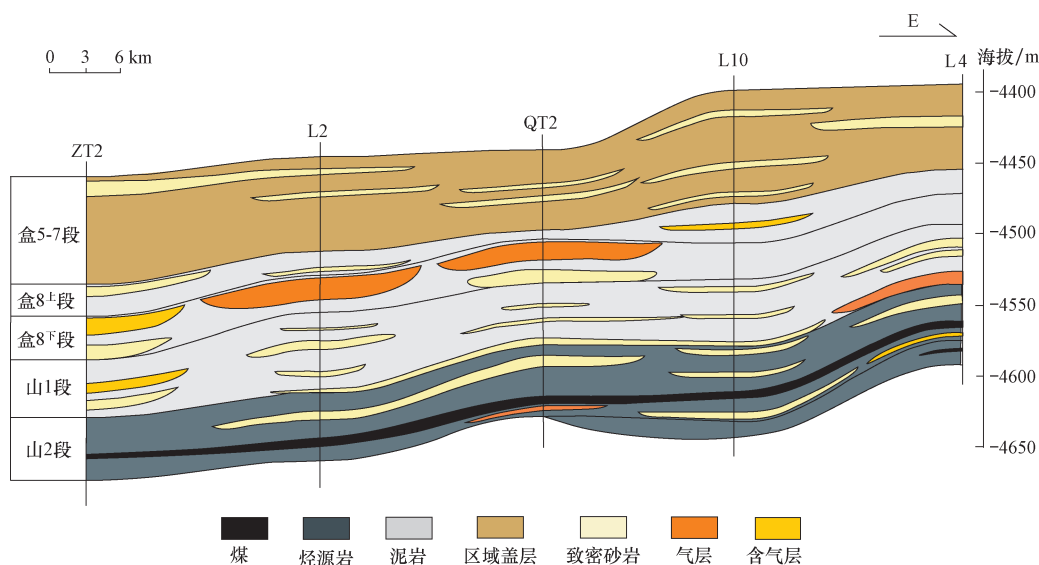


图 5 陇东地区 ZT2 井—L4 井盒 8 气藏剖面

Fig. 5 Gas reservoir profile of the eighth member of the Shihezi Formation from Well ZT2 to Well L4 in Longdong area

间不存在必然联系。山 1 段直接盖层控制研究区天然气藏在平面与纵向上的形成与分布,最终形成了山 1 段、盒 8 段气藏少有叠合分布的格局。

3 储层条件及其控气作用

人们早已认识到储层对致密砂岩气藏形成与分布的控制作用,最为流行的观点就是“甜点”控气理论,即认为整体致密背景上的相对高孔渗区或者裂缝发育区是致密砂岩气的有利成藏区。本文通过对陇东气区储层条件及其控气作用的研究表明,储层对天然气藏形成和分布的控制作用受气源条件和山 1 段直接盖层的发育情况影响,主要存在两种情况。

3.1 气源和山 1 段直接盖层条件相同或者相似时“甜点”控气

气源和山 1 段直接盖层条件相同或者相似时,天然气的富集程度主要受储层质量控制,储层物性越好,天然气越富集。

在生烃强度大于 $15 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 的区域内,对山 1 段泥岩大于 30m 区域的山 1 气藏和山 1 段泥岩厚度小于 30m 的盒 8 气藏的进行统计,气藏含气饱和度、试气产量均随着储层孔隙度、渗透率的升高而升高,呈较好的正相关关系(图 6)。含气饱和度随着石英含量的增加而增高,随着岩屑、碳酸盐胶结物、粘土矿物胶结物含量的增加而降低(图 7)。石英颗粒含量高可以显著改善储层的抗压实性能,从而在压实作用过程中保留更多的原生孔隙,有效改善储层储集性能。储层中岩屑含量,特别是泥岩等塑性岩屑含量的增高会降低岩石抗压实性能,从而不利于原生孔隙的保存,降低

储层质量。碳酸盐胶结物和粘土矿物胶结物是研究区储层中的两种主要起减孔作用的物质,因此,随着这些组分含量的增加,储层质量变差,含气性也变差。

将气源和山 1 段直接盖层条件的差异性缩到更小时,天然气的富集程度与储层质量相关度则更高。以 QT1 井区为例,区内石炭系—二叠系烃源岩生烃强度为 $16 \times 10^8 \sim 18 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$,山 1 段直接盖层大于 35 m。由图 8 可以看出,气层含气饱和度与储层孔隙度、渗透率呈良好的正相关关系。

3.2 气源条件和盖层条件均对成藏有利时相对较差储层仍可成藏

气源条件、山 1 段盖层条件均对天然气成藏有利时,储层条件略差的情况下,天然气仍然可以成藏。对于山 1 段气藏来说,气源条件、山 1 段盖层条件均较好时,储层质量较差的区域也可成藏;对于盒 8 段气藏来说,较差的储层若要成藏,则要求烃源条件较好而且山 1 段盖层较差。

研究区 ZT1 井山 1 段 4 390.3 ~ 4 393.6 m 处,储层孔隙度平均为 2.06%,渗透率平均为 $0.024 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,试气无阻流量为 $5.48 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;QT3 井山 1 段 4 390.30 ~ 4 393.60 m 处,储层孔隙度平均 2.92%,渗透率平均为 $0.078 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,试气无阻流量为 $7.10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (图 8)。综合分析表明,山 1 段高产井的出现主要得益于良好的烃源条件和山 1 段直接盖层条件。ZT1 井、QT3 井区烃源岩生烃强度为 $16 \times 10^8 \sim 18 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$,山 1 段直接盖层厚度大于 35 m,最大单层厚度大于 30 m,且分布连续。

陇东地区盒 8 段气藏同样存在差储层获得较好试气成果的实例,如 ZIT1 井,盒 8 段储层孔隙度平均为

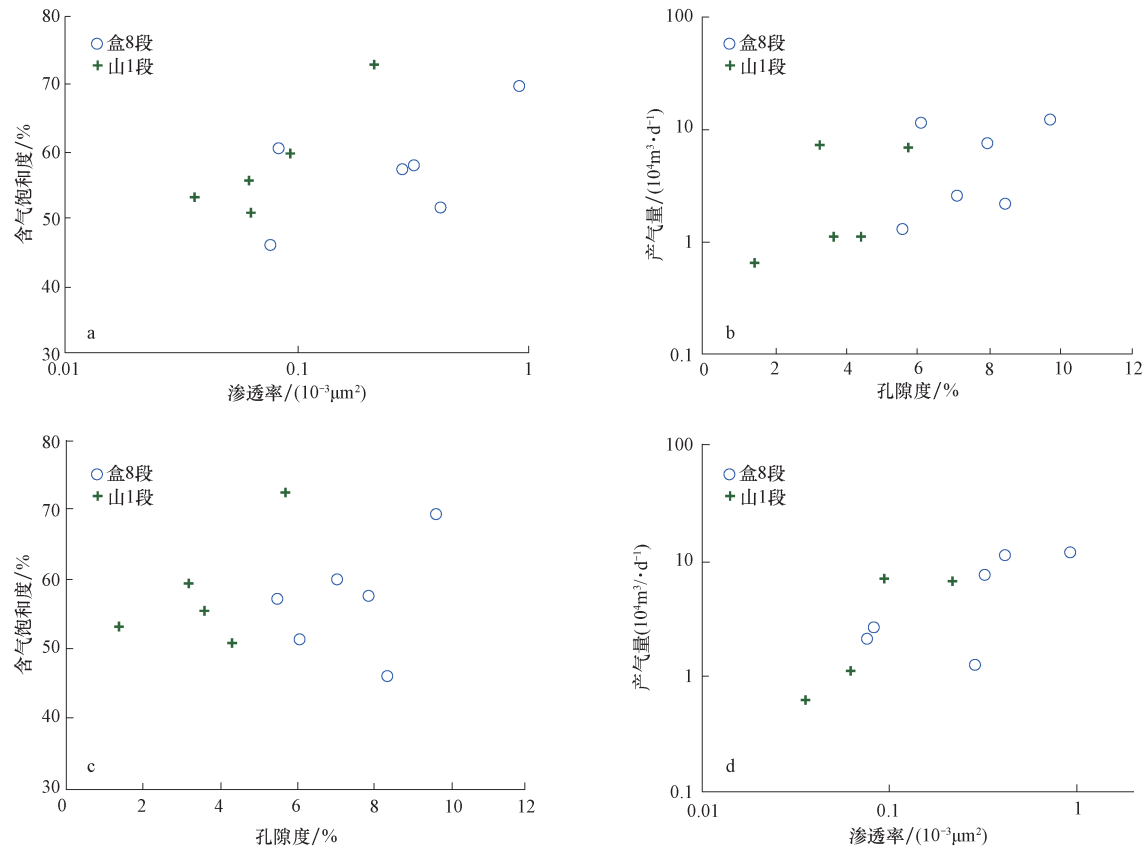


图6 陇东地区储层孔隙度、渗透率与含气饱和度和试气产量关系

Fig. 6 Porosity and permeability vs. gas saturation and tested gas production of reservoirs in Longdong area

a. 含气饱和度与渗透率的关系; b. 产气量与孔隙度的关系; c. 含气饱和度与孔隙度的关系; d. 产气量与渗透率的关系

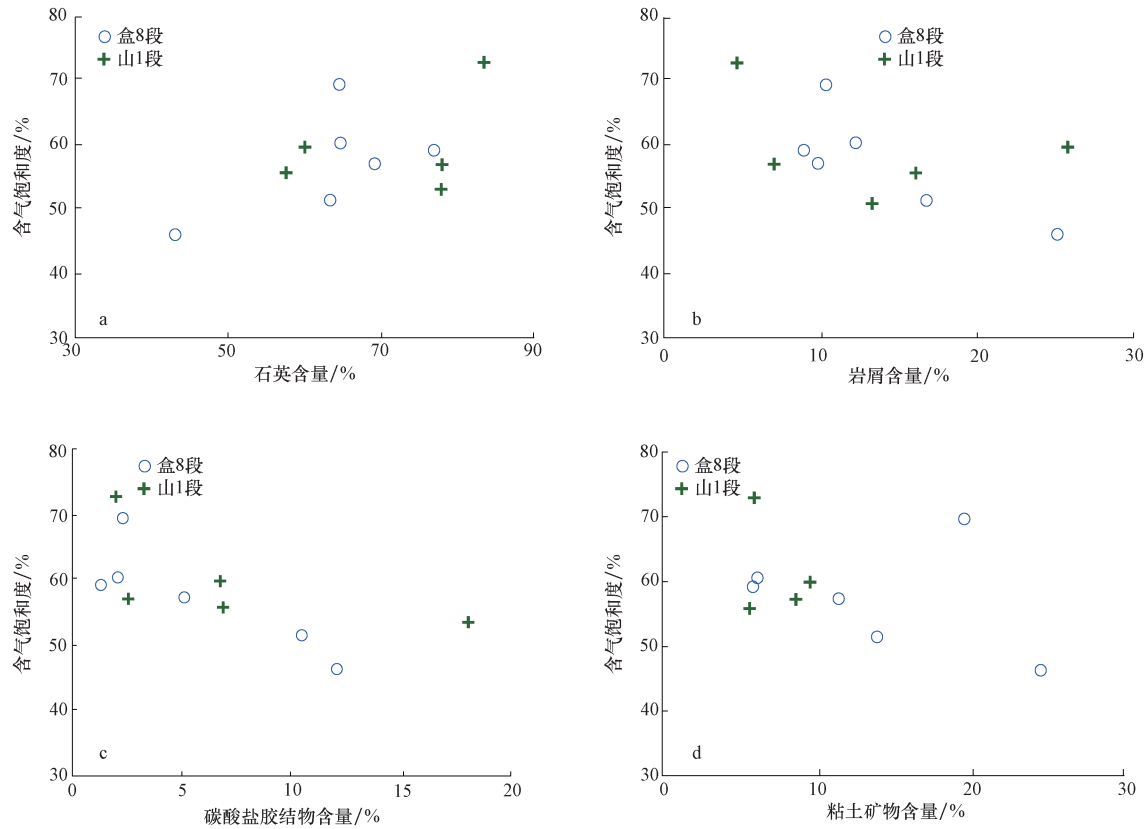


图7 陇东地区储层岩石学参数与含气饱和度的关系

Fig. 7 Petrologic parameter vs. gas saturation of reservoirs in Longdong area

a. 石英含量与含气饱和度的关系; b. 岩屑含量与含气饱和度的关系; c. 碳酸盐胶结物含量与含气饱和度的关系; d. 粘土矿物含量与含气饱和度的关系

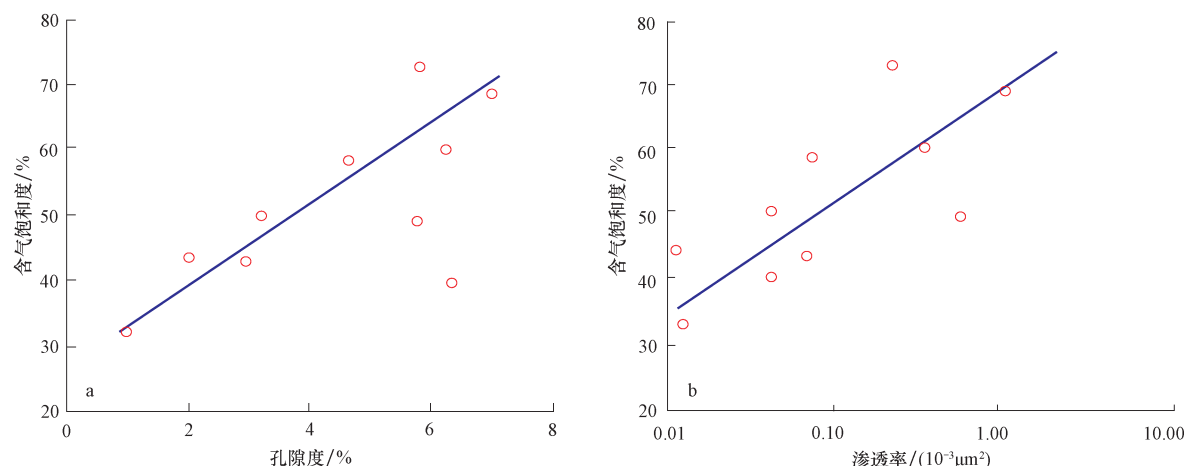


图8 陇东地区QT1井区储层孔隙度(a)和渗透率(b)与含气饱和度关系

Fig. 8 Porosity(a) and permeability(b) vs. gas saturation of reservoirs in QT1 well block of Longdong area

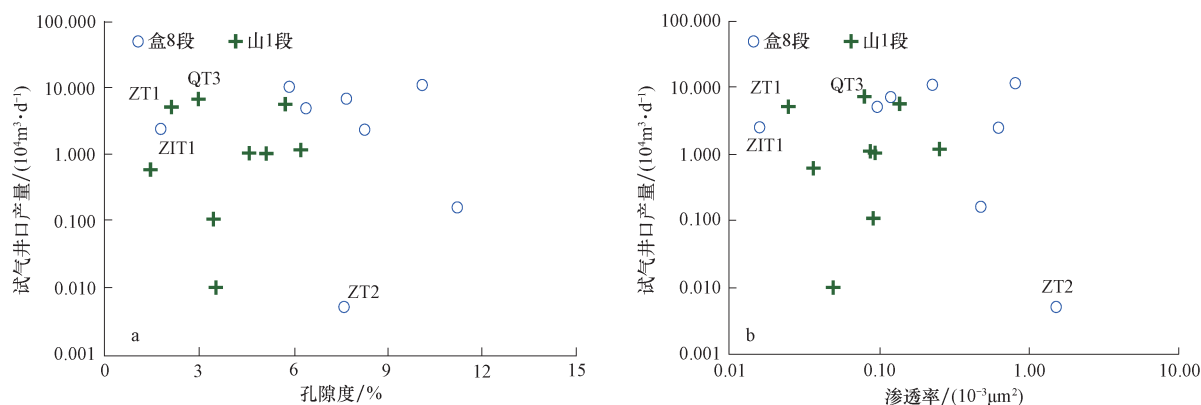


图9 陇东地区试气产量与孔隙度和渗透率关系

Fig. 9 Porosity(a) and permeability(b) vs. tested gas production of reservoirs in Longdong area

1.17%,渗透率平均为 $0.014 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,试气无阻流量为 $2.52 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (图9)。ZIT1井区生烃强度大于 $20 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$,处于研究区的生烃中心区,山1段泥岩厚度较薄且层数多,有利于天然气垂向运移至盒8段成藏。

4 结论

1) 气源条件与盖层条件控制陇东地区天然气藏在平面上与纵向上的形成与分布。天然气主要分布在石炭系-二叠系煤层厚度大于4 m,烃源岩累计生烃强度大于 $10 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 的地区,试气产量随着石炭系-二叠系煤层厚度增大、累计生烃强度增高而增加。在生烃强度大于 $10 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 的区域,山1段泥岩盖层厚度大于35m时为山1气藏有利成藏区,山1段泥岩盖层厚度小于35m时则主要为盒8气藏有利成藏区。

2) 储层条件控制天然气的局部富集,其中气源条件、山1段盖层条件相似时储层“甜点”控气,即物性越好天然气越富集,储层中石英等有利于提高储层质

量的组分的含量越高天然气越富集;气源条件、山1段盖层条件均有利时,相对较差储层亦可成藏。

3) 陇东地区上古生界天然气藏的形成与分布主要受气源、盖层和储层条件三元耦合关系控制,局部构造对气藏的形成与分布控制作用较弱。气源、盖层和储层条件三元耦合关系控制的天然气最佳成藏富集区并非三者均为最优的地区,而是三者最佳配置、相互补偿而形成的综合有利区。

参 考 文 献

- [1] 杨华,刘新社. 鄂尔多斯盆地古生界煤成气勘探进展[J]. 石油勘探与开发,2014,41(2):129-137.
Yang Hua, Liu Xinshe. Progress of Paleozoic coal-derived gas exploration in Ordos Basin, West China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(2):129-137.
- [2] 王香增. 延长探区天然气勘探重大突破及启示[J]. 石油与天然气地质,2014,35(1):1-9.
Wang Xiangzeng. Major breakthrough of gas exploration in Yanchang blocks and its significance[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(1):1-9.
- [3] 贾进斗,何国琦,李茂松,等. 鄂尔多斯盆地基底结构特征及其对古生界天然气的控制[J]. 高校地质学报,1997,3(2):17-

26.
Jia Jindou, He Guoqi, Li Maosong, et al. Structural feature of basement in the Ordos Basin and its control to Paleozoic[J]. Geological Journal of China Universities, 1997, 3(2): 17–26.
- [4] 洪峰,宋岩,赵林. 鄂尔多斯盆地北部天然气成藏控制因素[J]. 天然气工业, 1998, 18(5): 33–36.
Hong Feng, Song Yan, Zhao Lin. Controlling factors of gas reservoir formation in the north of Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 1998, 18(5): 33–36.
- [5] 张文昭. 鄂尔多斯盆地大油气田形成的主要地质规律[J]. 中国矿业, 1999, 8(6): 3–7.
Zhang Wenzhao. Geological laws of petroleum reservoir formation in the Ordos Basin [J]. Chinese Mining Industry, 1999, 8(6): 3–7.
- [6] 赵林,夏新宇,戴金星,等. 鄂尔多斯盆地上古生界天然气富集的主要控制因素[J]. 石油实验地质, 2000, 22(2): 136–139.
Zhao Lin, Xia Xinyu, Dai Jinxing, et al. Major factors controlling the enrichment of the Upper Paleozoic natural gas in the Ordos Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2000, 22(2): 136–139.
- [7] 付金华,段晓文,席胜利. 鄂尔多斯盆地上古生界气藏特征[J]. 天然气工业, 2000, 20(6): 16–19.
Fu Jinhua, Duan Xiaowen, Xi Shengli. Characteristics of Upper Paleozoic natural gas reservoirs in the Ordos Basin [J]. Natural Gas Industry, 2000, 20(6): 16–19.
- [8] 李良,袁志祥,惠宽洋,等. 鄂尔多斯盆地北部上古生界天然气聚集规律[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(3): 268–271, 282.
Li Liang, Yuan Zhixiang, Hui Kuanyang, et al. Accumulation regularity of Upper Paleozoic gas in the north Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2000, 21(3): 268–271, 282.
- [9] 付金华,魏新善,黄道军. 鄂尔多斯大型含煤盆地岩性气藏成藏规律与勘探技术[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2005: 137–141.
Fu Jinhua, Wei Xinshan, Huang Daojun. Law of reservoir formulation and exploration techniques of natural gas lithologic reservoirs in Ordos Basin [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2005: 137–141.
- [10] 李剑,罗霞,单秀琴,等. 鄂尔多斯盆地上古生界天然气成藏特征[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(4): 54–59.
Li Jian, Luo Xia, Shan Xiuqin, et al. Natural gas accumulation in the Upper Paleozoic of Ordos Basin, China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(4): 54–59.
- [11] 赵文智,汪泽成,朱怡翔,等. 鄂尔多斯盆地苏里格气田低效气藏的形成机理[J]. 石油学报, 2005, 26(5): 5–9.
Zhao Wenzhi, Wang Zecheng, Zhu Yixiang, et al. Forming mechanism of low-efficiency gas reservoir in Sulige Gas Field of Ordos Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(5): 5–9.
- [12] 李宏伟,范军侠,袁士义,等. 苏里格气田下石盒子组层序地层学与天然气高产富集区分布规律[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(3): 340–344.
Li Hongwei, Fan Junxia, Yuan Shiyi, et al. Sequence stratigraphy and the distribution of natural gas enrichment and high production area in Lower Shihezi Formation, Sulige gas field, Ordos Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(3): 340–344.
- [13] 周新桂,张林炎. 塔巴庙气田上古生界致密储层裂缝系统基本特征及其在天然气成藏中的作用[J]. 地球学报, 2006, 27(4): 323–328.
Zhou Xingui, Zhang Linyan. Basic characteristics of natural fracture systems in the Upper Paleozoic tight sand reservoirs in Tabamiaio area, north Ordos Basin and its role in the process of gas reservoir formation [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2006, 27(4): 323–328.
- [14] 杨华,席胜利,魏新善,等. 鄂尔多斯多旋回叠合盆地演化与天然气富集[J]. 中国石油勘探, 2006, 11(1): 17–24.
Yang Hua, Xi Shengli, Wei Xinshan, et al. Evolution and natural gas enrichment of multicycle superimposed basin in Ordos Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2006, 11(1): 17–24.
- [15] 张君峰,兰朝利. 鄂尔多斯盆地榆林–神木地区上古生界裂缝和断层分布及其对天然气富集区的影响[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(2): 172–177.
Zhang Junfeng, Lan Chaoli. Fractures and faults distribution and its effect on gas enrichment areas in Ordos Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(2): 172–177.
- [16] 李仲东,郝蜀民,李良,等. 鄂尔多斯盆地上古生界压力封存箱与天然气的富集规律[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(4): 466–472.
Li Zhongdong, Hao Shumin, Li Liang, et al. Compartments in the Upper Paleozoic of northern Ordos Basin and their relationship with gas enrichment [J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28(4): 466–472.
- [17] 付金华,魏新善,任军峰. 伊陕斜坡上古生界大面积岩性气藏分布与成因[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(6): 664–667.
Fu Jinhua, Wei Xinshan, Ren Junfeng. Distribution and genesis of large-scale Upper Palaeozoic lithologic gas reservoirs on Yi-Shaan Slope [J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(6): 664–667.
- [18] 李熙酷,张满郎,谢武仁. 鄂尔多斯盆地上古生界岩性气藏形成的主控因素与分布规律[J]. 石油学报, 2009, 30(2): 168–175.
Li Xizhe, Zhang Manlang, Xie Wuren. Controlling factors for lithologic gas reservoir and regularity of gas distribution in the Upper Paleozoic of Ordos Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(2): 168–175.
- [19] 姚泾利,黄建松,郑琳,等. 鄂尔多斯盆地东北部上古生界天然气成藏模式及气藏分布规律[J]. 中国石油勘探, 2009, 14(1): 10–16.
Yao Jingli, Huang Jiansong, Zheng Lin, et al. Forming patterns and distribution laws of gas reservoir in northeastern Ordos Basin during Paleozoic [J]. China Petroleum Exploration, 2009, 14(1): 10–16.
- [20] 赵靖舟,王力,孙兵华,等. 鄂尔多斯盆地东部构造演化对上古生界大气田形成的控制作用[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(6): 875–881.
Zhao Jingzhou, Wang Li, Sun Binghua, et al. The control of the eastern tectonic evolution in Ordos Basin on the formation of the Upper Paleozoic giant gas field [J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(6): 875–881.
- [21] 李军,赵靖舟,凡元芳,等. 鄂尔多斯盆地上古生界准连续型气藏天然气运移机制[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(5): 592–600.
Li Jun, Zhao Jingzhou, Fan Yuanfang, et al. Gas migration mechanism of quasi-continuous accumulation in the Upper Paleozoic of Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(4): 592–600.
- [22] 许浩,张君峰,汤达祯,等. 鄂尔多斯盆地苏里格气田低压形成的控制因素[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(1): 64–68.
Xu Hao, Zhang Junfeng, Tang Dazhen, et al. Controlling factors of underpressure reservoirs in the Sulige gas field, Ordos Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(1): 64–68.
- [23] 赵靖舟,李军,曹青,等. 论致密大油气田成藏模式[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(5): 573–583.
Zhao Jingzhou, Li Jun, Cao Qing, et al. Hydrocarbon accumulation

- patterns of large tight oil and gas fields[J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(5): 573–583.
- [24] Law B E. Basin-centered gas systems[J]. *AAPG Bulletin*, 2002, 86(11): 1891–1919.
- [25] Masters J A. Deep Basin gas trap, western Canada[J]. *AAPG Bulletin*, 1979, 63(2): 152–181.
- [26] Schmoker J W. Resource-assessment perspectives for unconventional gas systems[J]. *AAPG Bulletin*, 2002, 86(11): 1993–1999.
- [27] Fall A, Eichhubl P, Cumella S P, et al. Testing the basin-centered gas accumulation model using fluid inclusion observations; Southern Piceance Basin, Colorado[J]. *AAPG Bulletin*, 2012, 96(12): 2297–2318.
- [28] 赵靖舟, 付金华, 姚泾利, 等. 鄂尔多斯盆地准连续型致密砂岩大气田成藏模式[J]. *石油学报*, 2012, 33(s1): 37–52.
- Zhao Jingzhou, Fu Jinhua, Yao Jingli, et al. Quasi-continuous accumulation model of large tight sandstone gas field in Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 32(s1): 37–52.
- [29] 窦伟坦, 刘新社, 王涛. 鄂尔多斯盆地苏里格气田地层水成因及气水分布规律[J]. *石油学报*, 2010, 31(5): 767–773.
- Dou Weitan, Liu Xinshe, Wang Tao. The origin of formation water and the regularity of gas and water distribution for the Sulige gas field, Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2010, 31(5): 767–773.
- [30] Gies R M. Hydrocarbon Entrapment in Alberta Deep Basin[J]. *AAPG Bulletin*, 1984, 68(4): 930.
- [31] U. S. Geological Survey National Oil and Gas Resource Assessment Team. National Assessment of United States oil and gas resources [M]. US: Houston, 1995: 20.
- [32] Schmoker J W. Method for assessing continuous-type(unconventional) hydrocarbon accumulations(CD-ROM) [C]//Gautier D L, Dolton G L, Takahashi K I, et al. National assessment of United States oil and gas resources—results, methodology, and supporting data; U. S. Geological Survey Digital Data Series 30, 1995.
- [33] Schmoker J W. Resource-assessment perspectives for unconventional gas systems [J]. *AAPG Bulletin*, 2002, 86(11): 1993–1999.
- [34] Schmoker J W. U. S. Geological survey assessment concepts for continuous petroleum accumulations [C]//Petroleum systems and geologic assessment of oil and gas in the southwestern Wyoming Province, Wyoming, Colorado, and Utah (USGS Southwestern Wyoming Province Assessment Team ed.) Denver, 2005: 7.
- [35] 张文旗, 王志章, 侯秀林, 等. 盖层封盖能力对天然气聚集的影响——以鄂尔多斯盆地大牛地气田大12井区为例[J]. *石油与天然气地质*, 2011, 32(6): 882–889.
- Zhang Wenqi, Wang Zhizhang, Hou Xiulin, et al. Influences of caprock sealing capacity on natural gas accumulation; an example from D-12 well block of Daniudi gas field in Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2011, 32(6): 882–889.
- [36] 傅金华. 鄂尔多斯盆地上古生界盖层封盖性研究[J]. *天然气工业*, 1991, 11(6): 6–12.
- Fu Jinhua. A study of the sealing properties of the Palaeozoic caprocks in Ordos Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 1991, 11(6): 6–12.

(编辑 董立)

(上接第179页)

- [23] 邵济安, 张永北, 张履桥, 等. 大同地区早中生代煌斑岩-碳酸盐岩岩墙群[J]. *岩石学报*, 2003, 19(1): 93–104.
- Shao Ji'an, Zhang Yongbei, Zhang Luqiao, et al. Early Mesozoic dike swarms of carbonatites and lamprophyres in Datong area [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2003, 19(1): 93–104.
- [24] 阎国翰, 牟保磊, 曾贻善. 山西临县紫金山碱性岩-碳酸盐岩的稀土元素和氧锶同位素特征[J]. *岩石学报*, 1988, 3: 29–36.
- Yan Guohan, Mu Baolei, Zeng Yishan. Alkaline rocks and Carbonatites from Zijinshan, Lin county of Shanxi Province: REE and O-Sr isotopic characteristics[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1988, 3: 29–36.
- [25] 杨兴科, 晁会霞, 杨永恒, 等. 鄂尔多斯盆地东部紫金山一带岩浆-热力作用问题[C]//2006年全国岩石学与地球动力学研讨会论文摘要, 南京大学地球科学系, 2006: 459–461.
- Yang Xingke, Chao Huixia, Yang Yongheng, et al. Magmatism-thermal action in Zijinshan area in the east part of the Ordos basin [C]//The abstract collection of 2006 symposium on petrology and geodynamics in China in 2006, Department of Earth Sciences, Nanjing University, 2006: 459–461.
- [26] 英基丰, 周新华. 鲁西地区中生代碳酸盐岩类的微量元素和锶钕同位素组成特征[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2001, 20(4): 309–311.
- Ying Jifeng, Zhou Xinhua. Characterization of trace elements and Sr, Nd isotopes of carbonatites in the western Shandong province [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2001, 20(4): 309–311.
- [27] 邱家骧, 曾广策, 李昌年, 等. 秦巴碱性岩 [M]. 北京: 地质出版社, 1993, 1–176.
- Qiu JiaXiang, Zeng Guangce, Li Changnian, et al. The alkaline rocks in Qinling-Bashan Mountains [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993, 1–176.
- [28] 任富根, 李双保, 丁士应, 等. 熊耳裂陷印支期碱性岩浆活动成矿作用/生成模式 [M]. *地质论评*, 45(增刊): 660–667.
- Ren Fugen, Li Shuangbao, Ding Shiying, et al. Alkaline magmaactivities, mineralization and formation model in Xiong'er Fault Basin [M]. *Geological Review*, 45(Sup.): 660–667.
- [29] Dong Y P, Santosh M. Tectonic architecture and multiple orogeny of the Qinling Orogenic Belt, Central China [J]. *Gondwana Research*, 2015, doi: 10.1016/j. gr. 2015. 06. 009.
- [30] Zhu R X, Chen L, Wu F Y, et al. Timing, scale and mechanism of the destruction of the North China Craton [J]. *Science China (Earth Sciences)*, 2011, 54(6): 789–797.
- [31] 李振宏, 冯胜斌, 袁效奇, 等. 鄂尔多斯盆地及其周缘下侏罗统凝灰岩年代学及意义[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(5): 729–741.
- Li Zhenhong, Feng Shengbin, Yuan Xiaoqi, et al. Chronology and its significance of the Lower Jurassic tuff in Ordos Basin and its periphery [J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(5): 729–741.

(编辑 董立)