

断裂调整型致密砂岩气藏成藏过程模拟与成藏模式

姜福杰^{1,2*}, 邵新荷^{1,2}, 李林涛³, 庞雄奇^{1,2}, 李敏^{1,2}, 陈晓智³, 李龙龙⁴, 郑定业^{1,2}, 呼延钰莹⁵

1 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

2 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

3 中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028

4 中国石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所, 江苏无锡 214126

5 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 河北廊坊 065000

* 通信作者, jiangfj@cup.edu.cn

收稿日期: 2021-11-04

国家重大科技专项(2016ZX05047001-006)和国家自然科学基金项目(41872128)联合资助

摘要 鄂尔多斯盆地边缘致密气勘探起步较晚, 但突破明显, 以东北缘临兴地区上古生界致密气为典型代表。但相较于盆地内部而言, 盆地边缘地质条件复杂, 受断裂调整改造的致密气藏成藏过程和成藏机理尚待系统揭示。基于对临兴地区致密气层分布特征剖析、储层流体包裹体特征分析以及盆地埋藏—热演化史模拟等, 恢复了盆地边缘断裂调整型致密砂岩气的成藏过程并阐明了成藏模式。研究区致密气层在源内、近源及远源3套成藏组合中表现出差异分布特征: 源内成藏组合气层个数最少, 近源成藏组合气层数量居中, 远源成藏组合气层个数最多; 近源气层厚度最小, 源内气层厚度居中, 远源气层厚度最大。流体包裹体主要赋存于石英颗粒的微裂隙中, 少量赋存于方解石胶结物和石英次生加大边中。流体包裹体均一温度分布范围很广, 为81.7~180℃, 这可能与紫金山岩浆侵入对烃源岩热历史产生影响有关。研究区天然气充注成藏分两个阶段, 在成藏早期由于断裂和裂缝不发育, 天然气以源内充注为主、近源充注为辅; 到成藏中后期, 伴随紫金山岩浆侵入产生大量断层和裂缝, 天然气优先沿断层和裂缝充注到近源和远源储层中, 而对源内储层的贡献相对较少。总体而言, 断裂调整型致密气藏成藏过程受断层和裂缝控制作用明显, 断层起到“气泵”的作用, 因此, 在盆地边缘致密气勘探中, 要高度重视断层和裂缝的研究。

关键词 致密气; 充注过程; 成藏模式; 上古生界; 临兴地区

Accumulation process simulation and an accumulation model of a fault-adjusted tight sandstone gas reservoir

JIANG Fujie^{1,2}, SHAO Xinhe^{1,2}, LI Lintao³, PANG Xiongqi^{1,2}, LI Min^{1,2}, CHEN Xiaozhi³, LI Longlong⁴, ZHENG Dingye^{1,2}, HUYAN Yuying⁵

1 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 College of Geosciences, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

引用格式: 姜福杰, 邵新荷, 李林涛, 庞雄奇, 李敏, 陈晓智, 李龙龙, 郑定业, 呼延钰莹. 断裂调整型致密砂岩气藏成藏过程模拟与成藏模式. 石油科学通报, 2021, 04: 539-552

JIANG Fujie, SHAO Xinhe, LI Lintao, PANG Xiongqi, LI Min, CHEN Xiaozhi, LI Longlong, ZHENG Dingye, HUYAN Yuying. Accumulation process simulation and an accumulation model of a fault-adjusted tight sandstone gas reservoir. Petroleum Science Bulletin, 2021, 04: 539-552. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2021.04.037

3 CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing 100028, China

4 Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi 214126, China

5 Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, China

Abstract An apparent breakthrough has been made in tight gas exploration in the edge of Ordos Basin, although tight gas exploration started late. The typical example of tight gas at the edge of the basin is the Upper Paleozoic tight gas in the Linxing area on the northeast edge of Ordos Basin. However, compared with the interior of the basin, the geological conditions at the edge of the basin are complex, and the reservoir-forming processes and the mechanism of tight gas reservoir adjustment and transformation by faults needs to be systematically revealed. Based on the analysis of tight gas reservoir distribution characteristics, reservoir fluid inclusion characteristics, and basin burial-thermal evolution history simulation in the Linxing area, the reservoir-forming process of fault-adjusted tight sandstone gas at the edge of the basin is now understood, and the reservoir-forming model is clarified. The tight gas reservoirs show differential distribution characteristics in three sets of reservoir-forming combinations. The number of in-source reservoir-forming combinations is the least, the number of near-source reservoir-forming combinations is in the middle, and the number of far-source reservoir-forming combinations is the most. The thickness of near-source gas reservoirs is the smallest, the thickness of inner source gas reservoirs is the middle, and the thickness of far source gas reservoirs is the largest. Fluid inclusions mainly occur in microcracks in quartz grains, and a small amount occurs in calcite cement and quartz overgrowths. The homogenization temperature of fluid inclusions ranges from 81.7 °C to 180 °C, showing the influence of the Zijinshan magma intrusion on the thermal evolution of source rocks. There are two stages of natural gas charging and accumulation in the study area. In the early stage of gas accumulation, faults and fractures were not developed. The natural gas was mainly charged into the in-source reservoirs, supplemented by the near-source reservoirs. In the middle and late stages of hydrocarbon accumulation, a large number of faults and fractures were generated with the intrusion of the Zijinshan magma. Natural gas was preferentially charged into the near-source and far-source reservoirs along the faults and fractures caused by the intrusion of the magma, and the contribution to the in-source reservoirs was relatively tiny. Generally speaking, the tight gas charging at the basin edge is obviously controlled by faults and fractures, with faults playing the “gas pump.” To explore fault-adjusted tight sandstone gas reservoirs, we should attach great importance to studying faults and fractures.

Keywords tight sandstone gas; charging process; accumulation model; Upper Paleozoic; Linxing area

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2021.04.037

0 引言

鄂尔多斯盆地是我国致密气重要的生产基地, 近几十年来在盆地内部已发现苏里格、榆林、大牛地、神木、米脂等多个大型致密气田^[1-3]。学者们针对这些气田的储层特征、天然气和烃源岩的有机地球化学特征以及油气聚集和分布规律等方面开展了大量研究工作并取得了丰富成果^[4-7]。然而, 迄今为止, 学者们对盆地边缘致密气成藏特征认识还不十分清楚。

临兴区块位于鄂尔多斯盆地东北缘, 该区块广泛发育低孔低渗的砂岩储层, 致密气资源丰富并已经取得勘探突破, 在临近烃源岩的本溪组(C₂b)、太原组(P₁t)、山西组(P₁s)和下石盒子组(P₂x)储层, 以及远离烃源岩的上石盒子组(P₂s)和石千峰组(P₃s)储层中都获得了可观的致密气产量^[8], 单井日产气量高达 $2.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ^[9]。截至2020年6月, 临兴地区上古生界致密气探明地质储量超过 $1010 \times 10^8 \text{ m}^3$, 基本建产达到 $10 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ^[10]。临兴地区发育煤层、碳质泥岩和泥岩3种类型的源岩, 有机质丰度高, 成熟度适中,

为致密气成藏提供了优质烃源; 此外, 大面积叠覆连续的砂体作为致密气储层, 普遍具有低孔低渗的特征。临兴地区致密气藏的分布特征与Schenk和Pollastro^[11]所认为的近源成藏的观点不一致, 推测其原因可能与临兴地区在早白垩世经历强烈的岩浆活动导致断裂十分发育这一地质特征密切相关^[12-14]。本文以临兴地区上古生界为研究对象, 在致密气分布特征分析的基础上, 结合流体包裹体分析和盆地模拟, 系统揭示了盆地边缘致密砂岩储层中天然气的充注过程、机制和模式, 以期为深化盆地边缘致密气成藏机理认识、丰富致密气成藏理论研究, 指导致密气勘探实践提供理论依据。

1 地质背景

鄂尔多斯盆地是我国典型的克拉通盆地, 面积约为 $37 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[15]。该盆地由6个亚构造单元组成, 即伊盟隆起、西缘逆冲带、天环坳陷、伊陕斜坡、晋西断褶带和渭北隆起^[16](图1a)。研究区位于盆地东北

部, 横跨晋西挠褶带西缘和伊陕斜坡东缘^[17]。总体上, 鄂尔多斯盆地构造相对稳定, 地层为单斜, 向西倾斜(倾角约为 1°), 盆地内大型断层较少^[18-19]。

1.1 上古生界源储组合与成藏类型

研究区上古生界沉积地层广泛发育, 包括石炭系本溪组(C₂b)、下二叠统太原组(P₁t)和山西组(P₁s)、中二叠统下石盒子组(P₂x)和上石盒子组(P₂s)以及上二叠统石千峰组(P₃s)(图 2)。本溪组、太原组和山西组主要发育海陆过渡环境的潮坪—障壁岛沉积为主^[20]。研究表明, 本溪组、太原组和山西组发育的煤和泥岩是鄂尔多斯盆地的主要烃源岩, 有机质类型以 III 型和 II₂ 型干酪根为主^[21-22]。石千峰组发育一套厚度大、连续性好的泥岩, 被认为是致密气藏的区域封盖层。典型的致密气储层有太二段(P₁t₂)、盒八段(P₂s₈)和石五段(P₃s₅)。太二段砂岩主要发育于潮坪相, 盒八段主要发育辫状河三角洲分流河道砂岩。石五段砂岩发育于曲流河相。根据储层与烃源岩的组合特征, 将上古生界致密气成藏组合划分为 3 种类型: 源内成藏(C₂b 组、P₁t 组和 P₁s 组)、近源成藏(P₂x 组)和远源成藏(P₂s 组和 P₃s 组)^[23-24]。

1.2 岩浆侵入与断层发育

紫金山岩体是鄂尔多斯盆地东部与燕山期构造

活动有关的岩浆侵入体。暴露于地表的面积约为 23.3 km²。紫金山岩体侵入了鄂尔多斯盆地东缘中三叠统地层^[25]。紫金山岩体岩性复杂, 呈环状分布。岩体内环为喷发岩, 包括火山角砾岩, 外环主要为侵入岩, 如二长岩和正长岩^[26]。杨兴科等^[27-28]利用 U-Pb 同位素 SHRIMP 定年确定岩浆活动的主要时期为早白垩世, 集中在 132~125 Ma 之间。紫金山岩体活动造成研究区地块隆升并伴随大量断层发育, 形成了一个大型背斜构造, 同时在构造顶部和翼部形成了大量径向分布的高角度断层, 使研究区的局部构造环境复杂化(图 1b)。

2 气层分布特征

临兴区块气层在上古生界源内、近源及远源 3 套成藏组合中表现出差异分布特征, 诸如气层个数、气层厚度以及含气饱和度等方面。对临兴区块单井不同成藏组合气层个数进行了统计(图 3), 发现源内成藏组合气层个数最少, 约 117 个; 近源成藏组合气层数量居中, 约 132 个; 而远源成藏组合气层个数最多, 约 233 个。通过对不同成藏组合气层厚度分布特征统计发现, 近源气层厚度最小, 源内气层厚度居中, 远源气层厚度最大。其中, 源内气层厚度集中在 1~2 m, 最高可达 10 m; 近源气层厚度集中在 1~4 m,

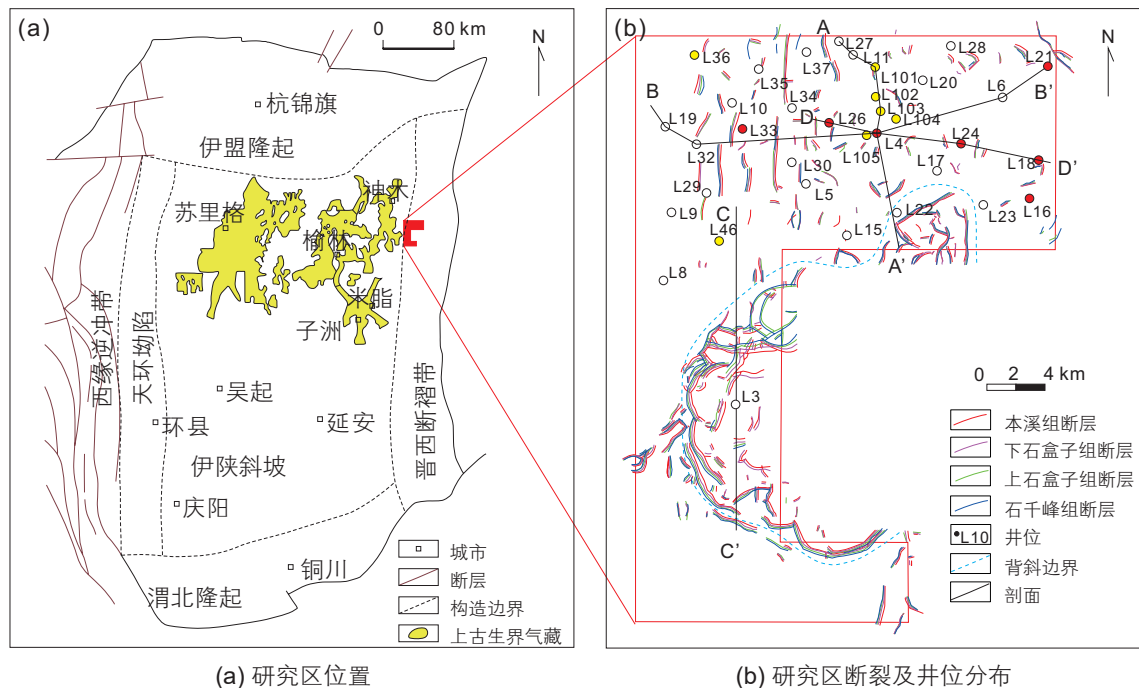


图 1 鄂尔多斯盆地临兴地区构造位置及断层分布特征

Fig. 1 Structural location and fault distribution in Linxing area, Ordos Basin

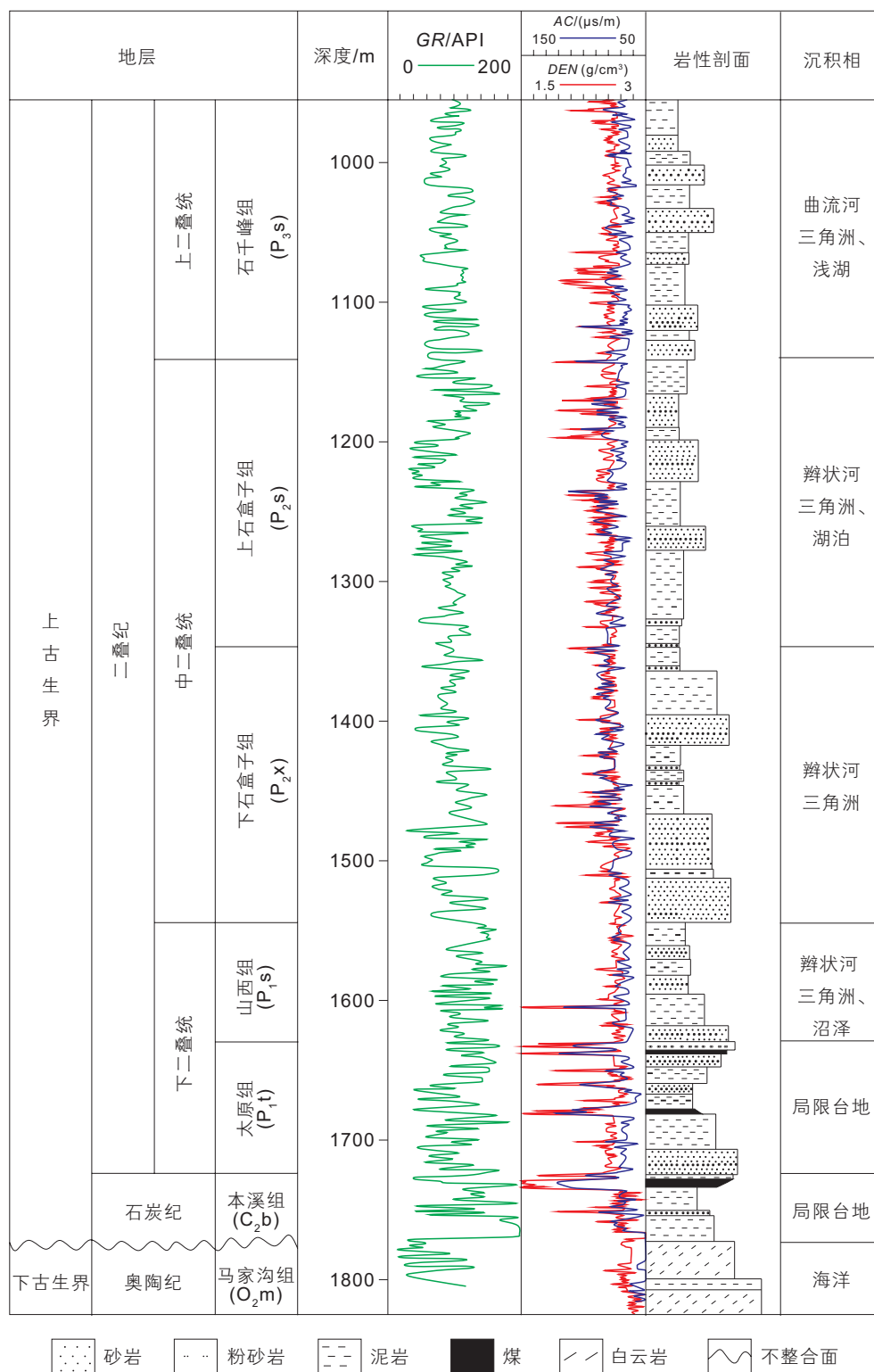


图2 鄂尔多斯盆地临兴地区上古生界地层柱状图(据文献[24]修改)

Fig. 2 Stratigraphic column of Upper Paleozoic in Linxing area, Ordos Basin (modified after literature [24])

最高达8 m;远源气层厚度较大,集中在1~6 m,最高可达16 m,这与远源组合多发育河流相沉积相关(图4)。不同成藏组合气层含气饱和度差异也较明显,源内气层测井解释含气饱和度分布在50%~80%,以

60%~70%为主;近源气层测井解释含气饱和度相对较为分散,50%~60%分布较多;远源测井解释含气饱和度分布在40%~70%,以60%~70%为主(图5)。源内气层含气饱和度高于近源、远源气层含气饱和度,推

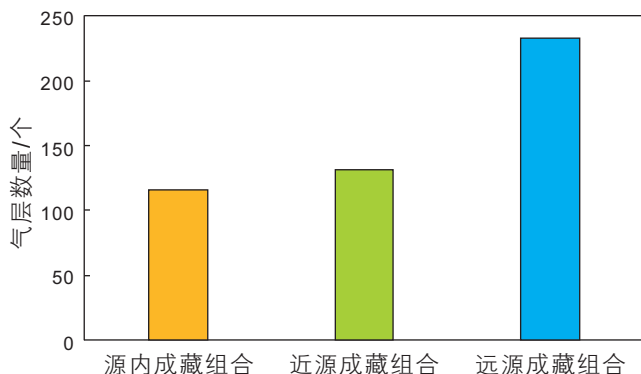


图3 临兴地区上古生界不同成藏组合气层分布特征
Fig. 3 Gas layer distribution characteristics of different reservoir forming combinations of the Upper Paleozoic in Linxing area, Ordos Basin

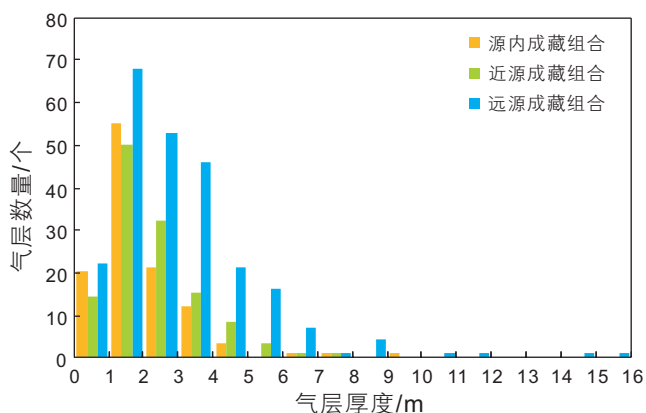


图4 临兴地区上古生界不同成藏组合气层厚度分布直方图
Fig. 4 Gas layer's thickness distribution histogram of different reservoir forming combinations of the Upper Paleozoic in Linxing area, Ordos Basin

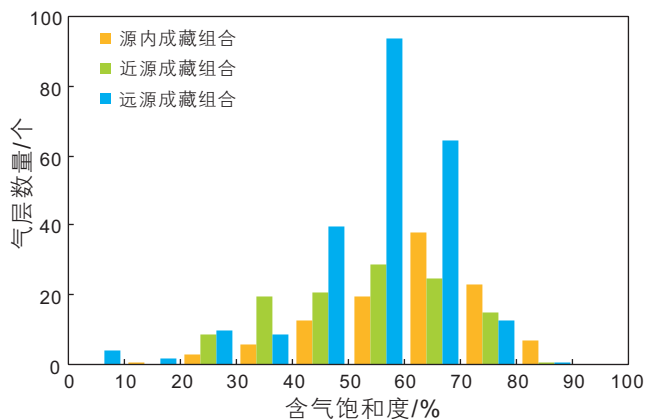


图5 临兴地区上古生界不同成藏组合气层含气饱和度分布直方图
Fig. 5 Gas saturation distribution histogram of different reservoir forming combinations of the Upper Paleozoic in Linxing area, Ordos Basin

测可能与储层的孔隙空间偏小和源岩充气强度较大都有关系。

此外，对临兴区块测井解释的气层孔隙度进行了统计，结果表明：源内测井解释气层孔隙度分布在4%~8%；近源测井解释气层孔隙度分布在4%~9%，且比较分散；远源测井解释孔隙度主要分布在6%~9%，集中在8%~9%。因此认为源内气层孔隙度相对较小，而远源孔隙度较大，近源气层孔隙度介于源内与远源之间(图6)。进一步对气层孔隙度和气层层数，气层厚度以及气层含气饱和度做了相关性分析(图7)，结果表明随孔隙度增大，气层个数增多，气层厚度明显增大，含气饱和度变化不明显，但有分区特征。

3 成藏期次

流体包裹体信息能够揭示致密气成藏过程^[34]。这些包裹体主要沿石英颗粒的微裂缝呈串珠状分布，在石英次生加大边中也有少量分布，此外，在碳酸盐胶结物中极为少见(图8)。包裹体类型以盐水包裹体为主，含有少量油气包裹体。绝大多数包裹体均一相态为液相，包裹体气液比在5%~20%左右。包裹体直径大小主要集中在5~10 μm^[30]。包裹体在单偏振光下主要呈无色、浅褐色、灰色或浅黄色等；荧光下呈蓝绿色、黄绿色或弱黄色，偶见无色，反映包裹体为成熟度较高的湿气—干气包裹体。包裹体形状通常为椭圆形和拉长型，偶见不规则型，包裹体尺寸变化很大。

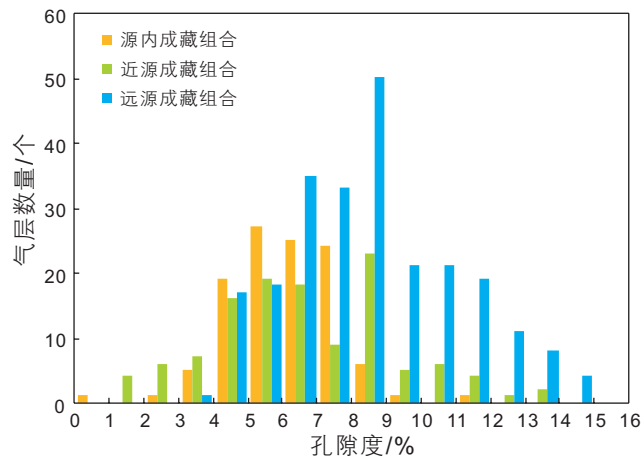


图6 临兴地区上古生界不同成藏组合气层孔隙度分布直方图
Fig. 6 Gas layer's porosity distribution histogram of different reservoir forming combinations of the Upper Paleozoic in Linxing area, Ordos Basin

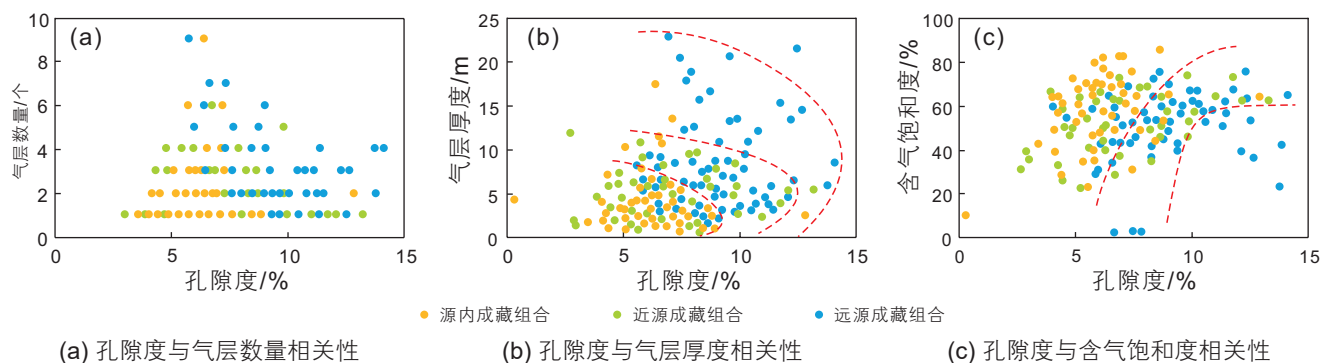


图7 临兴地区上古生界不同成藏组合气层孔隙度与分布特征关系图

Fig. 7 Relationship between porosity and distribution characteristics of different reservoir forming combinations of the Upper Paleozoic in Linxing area, Ordos Basin

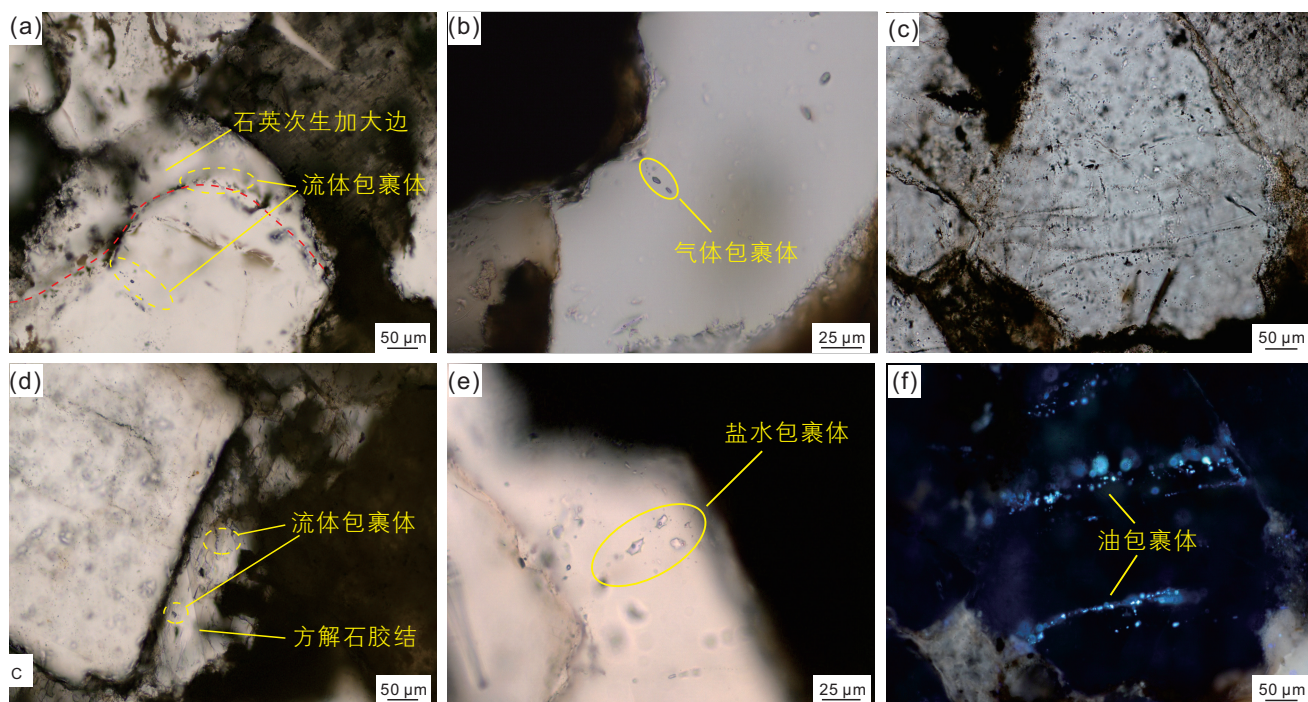
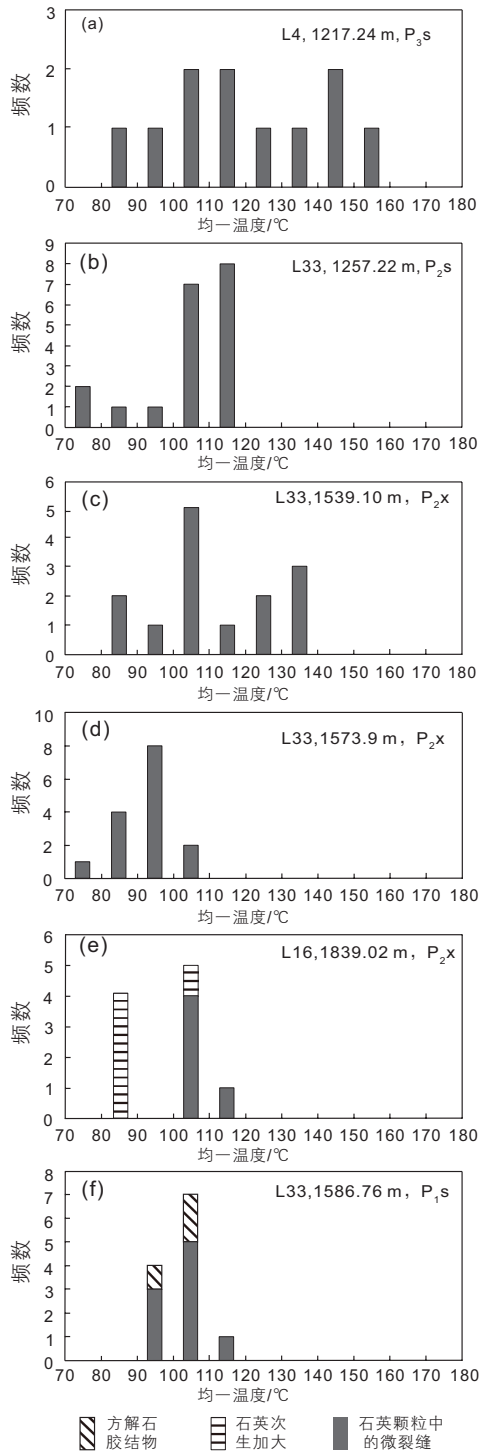


图8 临兴地区上古生界致密砂岩储层流体包裹体产状

Fig. 8 Occurrence of fluid inclusions in tight sandstone reservoirs of Upper Paleozoic in Linxing area, Ordos Basin

与石英颗粒中的微裂缝、石英次生加大边和方解石胶结物相关的盐水包裹体的均一温度范围主要为 81.7~180 °C(图9)。通过对比不同井的流体包裹体均一温度分布特征,发现研究区流体包裹体均一温度分布差异较大,这可能是紫金山岩浆侵入对研究区热历史的影响所致。垂向上,源内、近源和远源储层的流体包裹体均一温度分布表现为不同的模式。源内储

层的流体包裹体均一温度峰值在 100~110 °C,近源储层的流体包裹体均一温度峰值在 110~120 °C,远源储层的流体包裹体均一温度峰值在 110~120 °C和 145~155 °C。流体包裹体测温结果分析表明,临兴地区上古生界致密气为一期充注成藏,由源内充注成藏逐渐向近源和远源充注成藏。



(a) 石千峰组流体包裹体均一温度, L4 井, 1217.24 m;
 (b) 上石盒子组流体包裹体均一温度, L33 井, 1257.22 m;
 (c) 下石盒子组流体包裹体均一温度, L33 井, 1539.10 m;
 (d) 下石盒子组流体包裹体均一温度, L33 井, 1573.90 m;
 (e) 下石盒子组流体包裹体均一温度, L16 井, 1839.02 m;
 (f) 山西组流体包裹体均一温度, L33 井, 1586.76 m

图 9 临兴地区上古生界致密砂岩储层流体包裹体均一温度
Fig. 9 Homogenization temperature of fluid inclusions in tight sandstone reservoirs of Upper Paleozoic in Linxing area, Ordos Basin

4 致密气充注过程与分布控制因素

4.1 岩浆侵入与致密气充注的关系

根据流体包裹体均一温度的分布特征, 上古生界致密砂岩储层流体包裹体均一温度主要分布在 100~155 °C, 结合临兴地区埋藏—热演化史图(图 10), 确定上古生界天然气充注成藏时间约为 192~120 Ma。而源内、近源和远源气藏形成的时间存在差别, 以源内气藏形成时间最早, 近源气藏次之, 远源气藏形成时间最晚。其中, 源内气层充注成藏时间大致为 192~160 Ma, 对应早侏罗世—中侏罗世, 近源气层充注成藏时间主要为 163~148 Ma, 对应中侏罗世—晚侏罗世, 远源气层充注成藏时间主要为 140~120 Ma, 即早白垩世^[13]。

早白垩世(140~110 Ma), 临兴地区东部发生了紫金山岩浆侵入构造热事件^[9]。通过对比紫金山岩浆侵入和天然气充注的时间发现, 紫金山岩浆侵入发生在源内和近源天然气主要成藏时期之后, 而与远源天然气主要成藏期匹配。分析表明, 紫金山岩浆侵入主要对研究区上古生界远源天然气的充注成藏产生重要影响。

紫金山岩浆侵入加快了研究区上古生界烃源岩的热演化进程, 影响远源天然气藏的气体成分。前人研究表明, 临兴地区上古生界烃源岩的成熟度存在异常跳跃现象, 远高于正常热演化所达到的成熟度, 证实岩浆侵入对烃源岩的加热效应^[13]。根据临兴地区上古生界埋藏—热演化史模拟结果(图 10), 上古生界烃源岩在晚三叠世进入生烃门限, 晚侏罗世至早白垩世是天然气形成的高峰期(图 10)。紫金山岩浆活动进一步加快烃源岩的热演化, 天然气产物由湿气向干气快速过渡。此外, 紫金山岩浆侵入造成断裂和裂缝大量发育, 为远源天然气的充注提供了通道, 促使部分源内和近源储层中天然气向远源储层中运移。至早白垩世末期, 研究区遭受了强烈的隆升和剥蚀, 岩浆活动就此结束。此后, 烃源岩结束生烃, 天然气分布相对稳定。

4.2 断层发育对致密气层分布的影响

致密气的分布与断层有着密切的关系^[37-39]。本次研究通过统计 26 口井 482 个气层的测井解释的含气饱和度, 来探讨断层发育对致密气层分布的影响。紧邻紫金山岩浆侵入体的断裂发育规模较大, 此类断裂对上古生界的天然气藏起到破坏作用, 以紫金山岩浆

侵入体附近的L22井和L23井为例,大部分储层为含气饱和度较低的干层,少数储层为气层或贫气层,但它们的厚度很小。而断裂在研究区的大部分地区都是中等发育的,没有切穿整个上古生界地层。例如,在

L4井和L10井中发现了许多厚度较大的源内、近源和远源气层。此外,在未受断层发育影响的构造稳定区,天然气层主要发育在源内和近源储层中,而在远源储层中几乎不发育(例如L6井)(图11)。

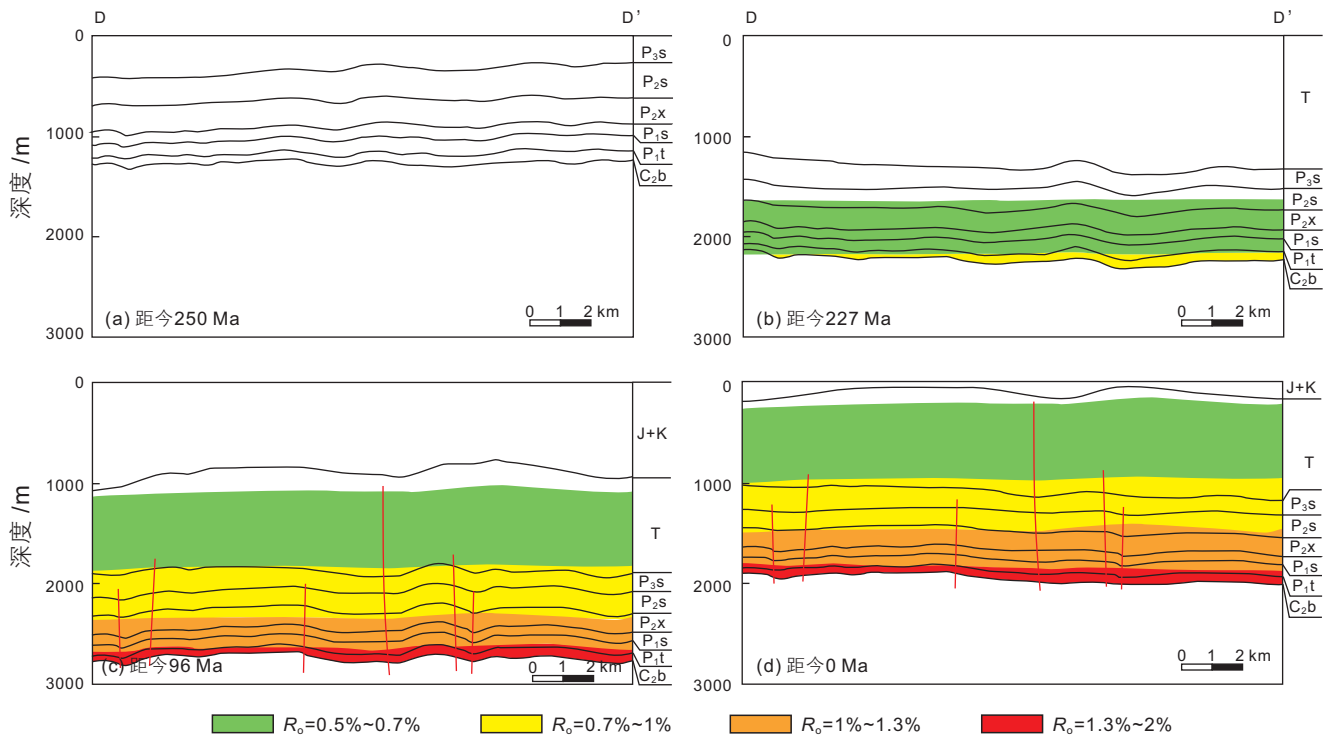


图10 鄂尔多斯盆地临兴地区上古生界埋藏—热演化历史

Fig. 10 Burial thermal history of the Upper Paleozoic in Linxing area, Ordos Basin

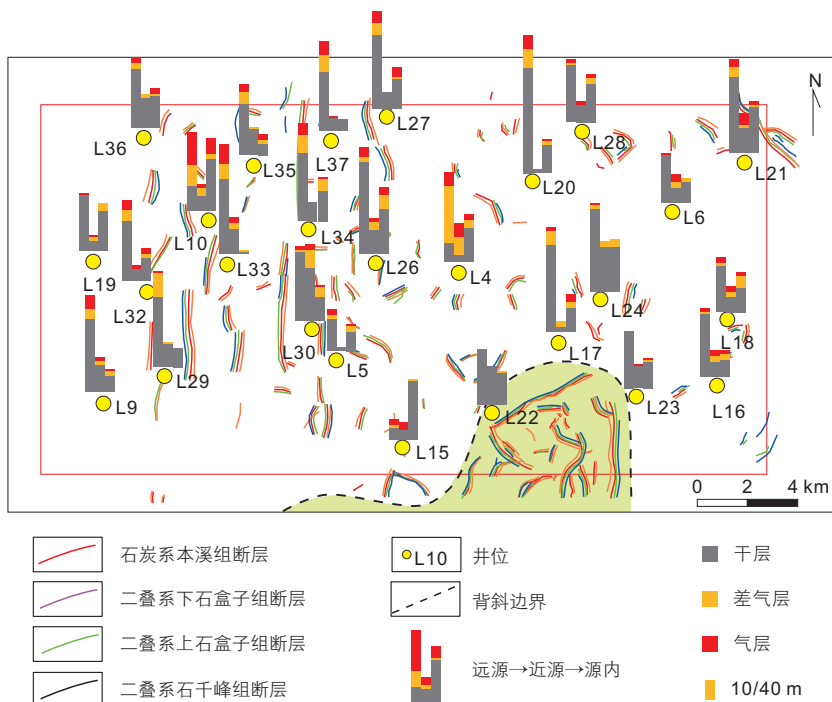


图11 鄂尔多斯盆地临兴地区断层对上古生界致密气层分布的影响

Fig. 11 The influence of faults on the distribution of Upper Paleozoic tight gas reservoirs in Linxing area, Ordos Basin

研究区致密储层含气饱和度变化明显,表明临兴地区天然气充注具有非均质性,没有发生明显的混合。源内、近源和远源储层的天然气饱和度略有不同,反映了不同成藏组合的天然气充注效率存在差异。远源气藏的含气饱和度为 34.9%~75.9%,平均值为 60.9%;近源气藏含气饱和度值为 45.91%~79.77%,平均值为 63.77%;源内气藏的含气饱和度为 31.6%~87.6%,平均 65.7%(图 12)。源内气藏的含气饱和度高于近源气藏和远源气藏的含气饱和度,表明天然气优先充注到源内储层。

4.3 烃源岩成熟度与致密气组分空间分布的关系

天然气的CH₄含量可作为气源岩热成熟度的指标^[40]。研究区源内气藏中天然气的CH₄含量较低,而近源和远源储层中天然气的CH₄含量变化较大(图 13)。因此,源内气藏中的天然气主要生成于低成熟阶段,而近源和远源气藏同时含有低成熟度和高成熟度天然气。由于远源气藏的天然气碳同位素资料较少,所以很难可靠地确定低成熟度或高成熟度天然气在远源储层中的贡献。结合天然气中CH₄含量的空间

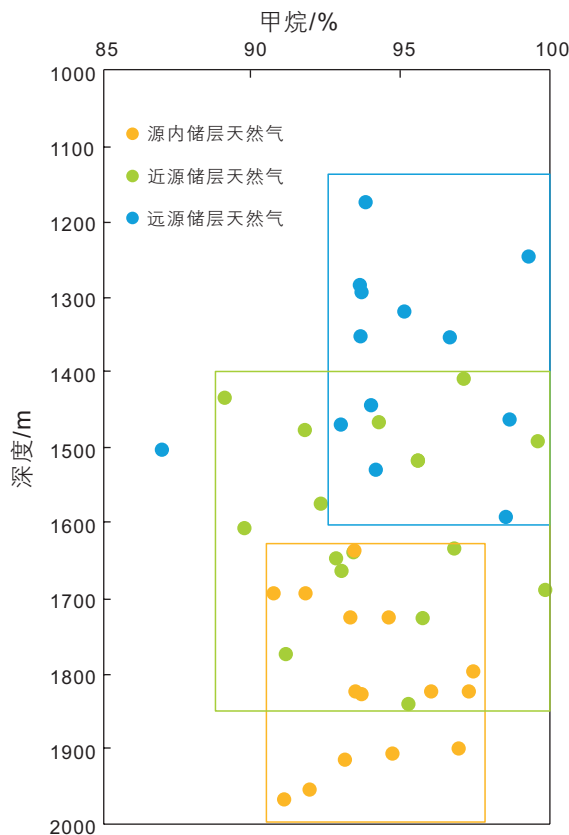


图 13 鄂尔多斯盆地临兴地区上古生界致密储层甲烷含量纵向变化

Fig. 13 Relationship between CH₄ contents of tight reservoirs and burial depth in the Upper Paleozoic in Linxing area, Ordos Basin

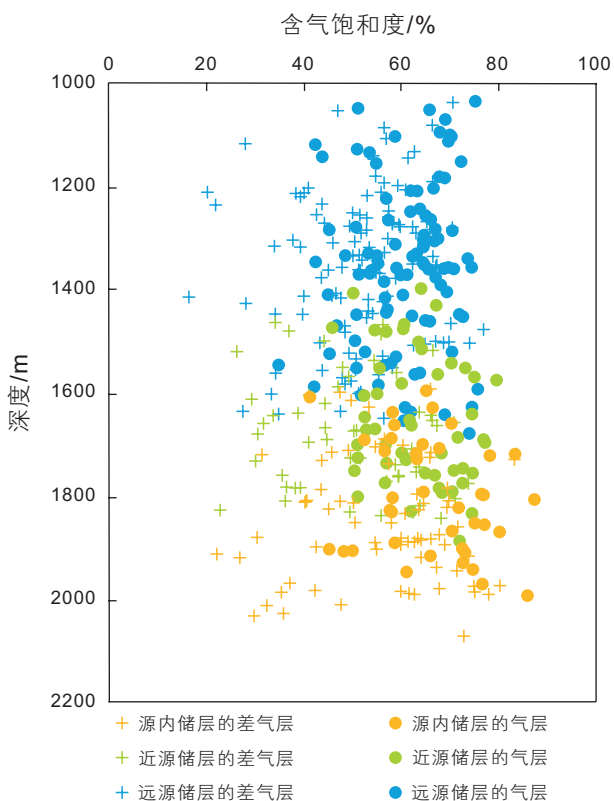


图 12 鄂尔多斯盆地临兴地区上古生界致密储层含气饱和度纵向变化

Fig. 12 Gas saturation versus burial depth in the Linxing area, Ordos Basin

变化,表明远源气藏以高成熟度天然气为主。此外,CH₄的碳同位素值比C₂H₄和C₃H₈的变化更明显(图 14),源内气藏的天然气碳同位素值较低,远源气藏的天然气碳同位素值较高,近源气藏的天然气碳同位素值差异较大。根据天然气R₀值计算,源区储层以低熟天然气为主,近源区和远源区同时存在低熟和高熟天然气。

不同分子量的碳氢化合物的碳同位素值可用于判断在天然气充注过程中是否发生了不同类型和不同成熟度的气体混合^[41-43]。天然气的δ¹³C值表现为碳同位素的正序列(δ¹³C₁<δ¹³C₂<δ¹³C₃),未观察到碳同位素倒转现象(图 15a),表明具有不同热成熟度的天然气没有发生相互混合。此外,根据Prinzhofer等^[44]提出的图表对由扩散、细菌、气体混合或热成熟引起的气体异常进行识别和区分,如图 15b所示,δ¹³C₁₋₂/C₁曲线呈下凹形态,表明研究区天然气主要经历了扩散作用,没有发生混合。

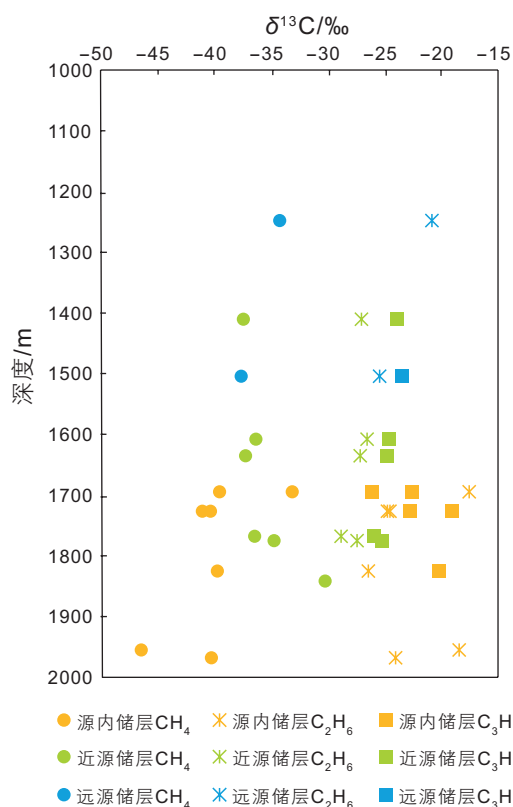
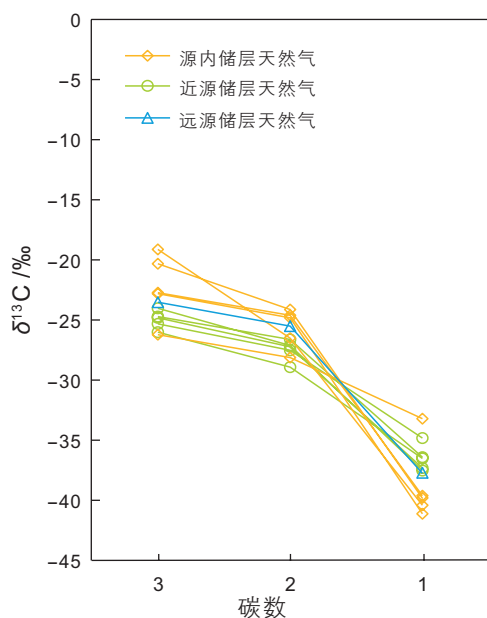
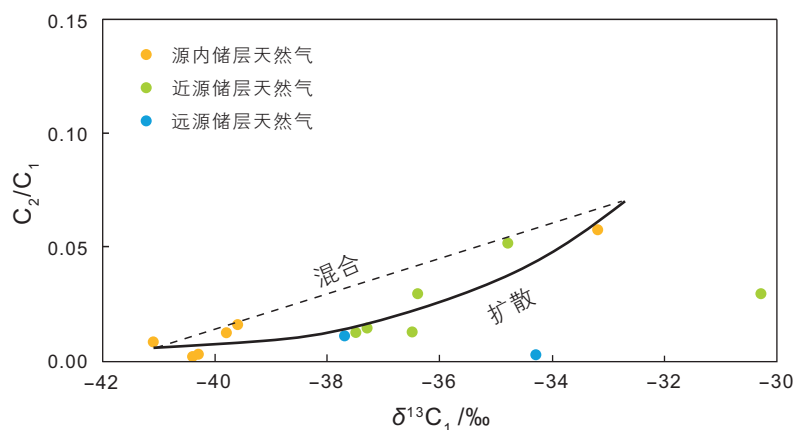


图 14 鄂尔多斯盆地临兴地区上古生界致密储层天然气碳同位素纵向变化

Fig. 14 Relationship between carbon isotope data of natural gas and burial depth in the Upper Paleozoic in Linxing area, Ordos Basin



(a) 不同碳数的天然气 $\delta^{13}\text{C}$ 值



(b) C_2/C_1 与 $\delta^{13}\text{C}_1$ 关系图

图 15 鄂尔多斯盆地临兴地区上古生界天然气混合程度判别

Fig. 15 Identification of gas mixing degree of Upper Paleozoic in Linxing area, Ordos Basin

5 致密气充注模式

临兴地区上古生界致密气充注成藏是烃源岩生烃与断层发育时空匹配的结果。根据烃源岩和天然气的有机地球化学特征、天然气充注时期和断层发育特征,并结合研究区的埋藏—热演化历史,总结出临兴地区上古生界致密气的充注模式(图 16)。

研究区烃源岩在晚三叠世进入早期生烃阶段,此时研究区构造总体稳定。致密气充注过程遵循 Schenk 和 Pollastro^[11]提出的模型,即天然气生成后,在气体膨胀力的控制下,向源内和近源储层中运移(绿色和蓝色箭头)。从烃源岩与储层的距离来看,致密气充注到源内储层比充注到远源储层效率更高。致密储层具有较大的毛细管力为天然气的保存提供了有利条件^[45]。伴随烃源岩生气过程产生的有机酸,可能有助于致密砂岩中局部形成相对高孔高渗的储集空间,从而形成致密气“甜点”。

晚侏罗世,烃源岩进入高成熟演化阶段,达到生烃高峰。由于源内和近源储层与烃源岩距离很近,优先发生天然气充注成藏(绿色和蓝色箭头),经过长时间的气体连续充注,源内储层的天然气充注量几乎达到最大值。早白垩世,大规模的紫金山岩浆侵入活动开始,导致烃源岩热成熟过程加快以及高角度断裂发育。断层的发育是远源成藏的重要控制因素。断层可

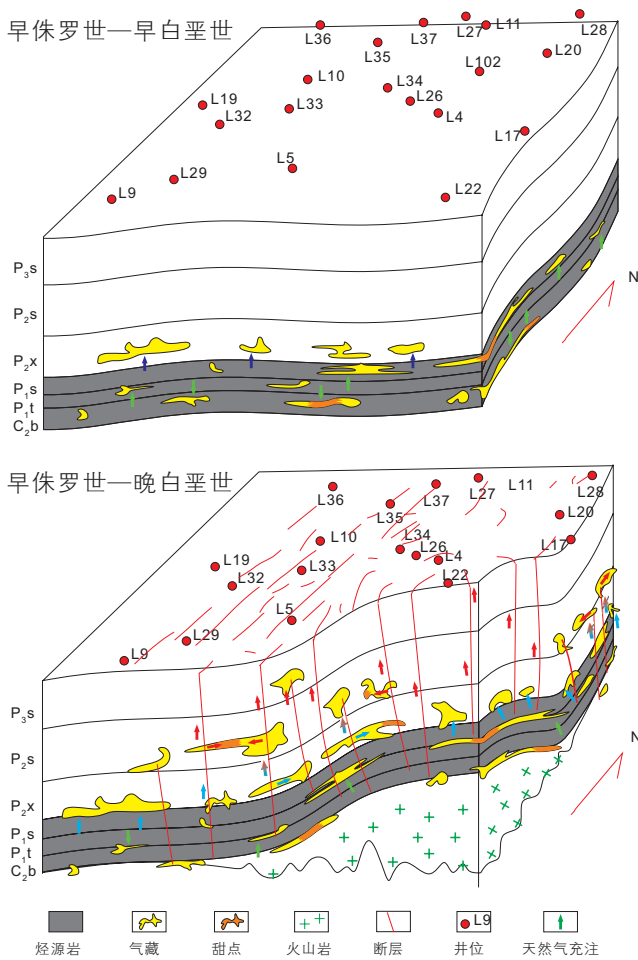


图 16 鄂尔多斯盆地临兴地区上古生界致密气充注模式
Fig. 16 Tight gas charging model of Upper Paleozoic in Linxing area, Ordos Basin

以作为天然气运移的有利通道，沟通深部气源和远源储层，后期生成的天然气优先进入断层并运移到P_{3s}和P_{2s}等远源储层(红色箭头)。受盖层的遮挡，气体在远源储层中进一步发生侧向分异充注。该时期大规模的天然气生成不仅为天然气沿断层垂向运移和向砂体侧向充注提供了动力，而且也为“甜点”的局部发育提供了条件。同时，近源和源内储层早期充注的低熟天然气经历了扩散，可能通过断层进入远源储层(红色

箭头)。紫金山岩浆侵入体附近断裂发育，由于这些断层规模较大，穿透了整个上古生界地层，破坏了盖层，导致通过这些断层运移到浅层的天然气发生逸散而未成藏。此外，在未受断层影响的地区，天然气主要充注到源内和近源储层中。早期低熟天然气优先充注到源内储层，导致源内储层含气饱和度较高；高成熟天然气主要向近源储层运移。

早白垩世末期，研究区经历了隆升和剥蚀作用，导致烃源岩生气作用终止。到晚白垩世，断裂活动也结束。至此，天然气层在整个上古生界地层中稳定分布。

6 结论

(1) 临兴地区致密气层广泛分布在上古生界地层中，形成源内、近源及远源 3 套成藏组合。其中，源内成藏组合气层个数最少，近源成藏组合气层数量居中，远源成藏组合气层个数最多；近源气层厚度最小，源内气层厚度居中，远源气层厚度最大。此外，各套组合致密气储层物性特征差异明显。

(2) 临兴地区岩浆活动、断层发育及烃源岩生气过程控制了致密气的充注过程与分布特征。紫金山岩浆侵入促使局部地区烃源岩成熟过程加快。断层提供了天然气远距离充注成藏的通道。烃源岩的生气过程控制不同成熟度的天然气分布特征，其中低熟天然气在源内、近源和远源储层中均有分布，高熟天然气主要分布在近源和远源储层中。

(3) 上古生界致密气充注成藏是烃源岩生烃与断层发育时空匹配的结果。烃源岩在晚三叠世进入早期生烃阶段，该时期构造稳定，断裂不发育，天然气以源内充注为主、近源充注为辅。至早白垩世发生大规模岩浆侵入活动，导致断层十分发育，该时期烃源岩也达到产气高峰，为天然气充注提供了动力，天然气优先沿断层和裂缝充注到近源和远源储层中，而对源内储层的贡献相对较少。

参考文献

[1] 李剑, 魏国齐, 谢增业, 等. 中国致密砂岩大气田成藏机理与主控因素——以鄂尔多斯盆地和四川盆地为例[J]. 石油学报, 2013, 34(S1): 14-28. [LI J, WEI G Q, XIE Z Y, et al. Accumulation mechanism and main controlling factors of large tight sandstone gas fields in China: Case study on Ordos Basin and Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(S1): 14-28.]

[2] 冀光, 贾爱林, 孟德伟, 等. 大型致密砂岩气田有效开发与提高采收率技术对策——以鄂尔多斯盆地苏里格气田为例[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(3): 602-612. [JI G, JIA A L, MENG D W, et al. Technical strategies for effective development and gas recovery enhancement of a large tight gas field: A case study of Sulige gas field, Ordos Basin, NW China[J]. 2019, 46(3): 602-612.]

[3] 付金华, 董国栋, 周新平, 等. 鄂尔多斯盆地油气地质研究进展与勘探技术[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(3): 19-40. [FU J H,

- DONG G D, ZHOU X P, et al. Research progress of petroleum geology and exploration technology in Ordos Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2021, 26(3): 19–40.]
- [4] 曹青, 赵靖舟, 刘新社, 等. 鄂尔多斯盆地东部致密砂岩气成藏物性界限的确定[J]. *石油学报*, 2013, 34(6): 1040–1048. [CAO Q, ZHAO J Z, LIU X S, et al. Determination of physical property limits for the gas accumulation in tight sandstone reservoirs in the eastern Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(6): 1040–1048.]
- [5] 郭迎春, 宋岩, 庞雄奇, 等. 连续型致密砂岩气近源累计聚集的特征及成因机制[J]. *地球科学*, 2016, 41(3): 433–440. [GUO Y C, SONG Y, PANG X Q, et al. Characteristics and genetic mechanism of near-source accumulated accumulation for continuous-type tight-sand gas[J]. *Earth Science*, 2016, 41(3): 433–440.]
- [6] 郑定业, 姜福杰, 刘铁树, 等. 鄂尔多斯盆地东缘临兴地区天然气成因类型及气源分析[J]. *地球科学与环境学报*, 2018, 40(2): 203–214. [ZHENG D Y, JIANG F J, LIU F S, et al. Genetic types and sources of natural gas in Linxing area, the eastern margin of Ordos Basin, China[J]. *Journal of Earth Science and Environment*, 2018, 40(2): 203–214.]
- [7] 魏千盛, 魏克颖, 李桢禄, 等. 苏里格西部致密砂岩气藏储层成岩作用特征及孔隙度定量演化[J]. *地质与勘探*, 2021, 57(2): 439–449. [WEI Q S, WEI K Y, LI Z L, et al. Diagenesis and porosity evolution of tight sandstone gas reservoirs in the western Sulige area, Ordos Basin[J]. *Geology and Exploration*, 2021, 57(2): 439–449.]
- [8] 高计县, 孙文举, 吴鹏, 等. 鄂尔多斯盆地东北缘神府区块上古生界致密砂岩成藏特征[J]. *岩性油气藏*, 2021, 33(1): 121–130. [GAO J X, SUN W J, WU P, et al. Accumulation characteristics of Upper Paleozoic tight sandstone in Shenfu block, northeastern margin of Ordos Basin. *Lithologic Reservoirs*, 2021, 33(1): 121–130.]
- [9] 傅宁, 杨树春, 贺清, 等. 鄂尔多斯盆地东缘临兴—神府区块致密砂岩气高效成藏条件[J]. *石油学报*, 2016, 37(增刊 1): 111–120. [FU N, YANG S C, HE Q, et al. High-efficiency reservoir formation conditions of tight sandstone gas in Linxing-Shenfu blocks on the east margin of Ordos Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(S1): 111–120.]
- [10] 杜佳, 朱光辉, 吴洛菲, 等. 临兴地区致密气“多层系准连续”成藏模式与大气田勘探实践[J]. *天然气工业*, 2021, 41(3): 58–71. [DU J, ZHU G H, WU L F, et al. “Multi-series and quasi-continuous” tight gas accumulation pattern and giant gas field exploration practice in Linxing area[J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(3): 58–71.]
- [11] SCHENK C J, POLLASTRO R M. Natural gas production in the United States[R]. Center for Integrated Data Analytics Wisconsin Science Center, 2002.
- [12] 葛岩, 朱光辉, 万欢, 等. 鄂尔多斯盆地东缘紫金山侵入构造对上古生界致密砂岩气藏形成和分布的影响[J]. *天然气地球科学*, 2018, 29(4): 491–499. [GE Y, ZHU G H, WAN H, et al. The influence of Zijinshan structural belt to the formation and distribution of tight sandstone gas reservoir in Upper Paleozoic, in the eastern Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2018, 29(4): 491–499.]
- [13] 李林涛, 吴克强, 梁建设, 等. 紫金山热事件对鄂尔多斯盆地东缘B区块致密气成藏控制作用[J]. *天然气地球科学*, 2019, 30(10): 1430–1438. [LI L T, WU K Q, LIANG J S, et al. The domination of tight sand gas accumulation by the Zijinshan thermal event in the block B, eastern Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2019, 30(10): 1430–1438.]
- [14] 开百泽, 何登发, 马静辉, 等. 鄂尔多斯盆地构造沉降特征及对盆地成因的启示[J]. *地质科学*, 2020, 55(3): 657–671. [KAI B Z, HE D F, MA J H, et al. Tectonic subsidence characteristics of Ordos Basin and its enlightenment to basin genesis[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2020, 55(3): 657–671.]
- [15] ZHOU Y, JI Y, XU L, et al. Controls on reservoir heterogeneity of tight sand oil reservoirs in Upper Triassic Yanchang Formation in Longdong area, southwest Ordos Basin, China: Implications for reservoir quality prediction and oil accumulation[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, 78: 110–135.
- [16] 陈罗元, 钱玉贵, 廖璐瑶, 等. 苏里格气田苏14井区中二叠统下石盒子组盒7段有效储层综合评价[J]. *矿物岩石*, 2021, 41(02): 109–117. [CHEN L Y, QIAN Y G, LIAO L Y, et al. Comprehensive evaluation of He7 effective reservoir of middle Permian Lower Shihezi Formation in well block of Su-14 of Sulige gas field[J]. *Mineralogy and Petrology*, 2021, 41(2): 109–117.]
- [17] 谢英刚, 秦勇, 叶建平, 等. 临兴地区上古生界煤系致密砂岩气成藏条件分析[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(1): 181–191. [XIE Y G, QIN Y, YE J P, et al. Accumulation conditions of tight gas in the Upper Paleozoic of Linxing block[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(1): 181–191.]
- [18] 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 H, XI S L, WEI X S, et al. Evolution and natural gas enrichment of multicycle superimposed basin in Ordos Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2006, 11(1): 17–24.]
- [19] 付金华, 范立勇, 刘新社, 等. 苏里格气田成藏条件及勘探开发关键技术[J]. *石油学报*, 2019, 40(2): 240–256. [FU J H, FAN L Y, LIU X S, et al. Gas accumulation conditions and key exploration & development technologies in Sulige gas field[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(2): 240–256.]
- [20] 米立军, 朱光辉. 鄂尔多斯盆地东北缘临兴—神府致密气田成藏地质特征及勘探突破[J]. *中国石油勘探*, 2021, 26(3): 53–67. [MI L J, ZHU G H. Geological characteristics and exploration breakthrough in Linxing-Shenfu tight gas field, northeastern Ordos Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2021, 26(3): 53–67.]

- [21] 胡维强, 刘玉明, 李洋冰, 等. 鄂尔多斯盆地临兴地区上古生界烃源岩特征及其生排烃史研究[J]. 长江大学学报(自科版), 2018, 15(19): 1-5. [HU W Q, LIU Y M, LI Y B, et al. The characteristics and generation-expulsion history of hydrocarbon source rocks of the Upper Paleozoic in Linxing area of Ordos Basin[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2018, 15(19): 1-5.]
- [22] 宋平, 郭明强, 赵靖舟, 等. 鄂尔多斯盆地东缘临兴地区上古生界烃源岩特征及其对天然气成藏的控制作用[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2019, 34(1): 22-28. [SONG P, GUO M Q, ZHAO J Z, et al. Characteristics of Upper Paleozoic source rocks in Linxing area, eastern margin of Ordos Basin and their controlling effect on accumulation of natural gas[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2019, 34(1): 22-28.]
- [23] YANG H, LIU X, YAN X, et al. Discovery and reservoir-forming geological characteristics of the shenmu gas field in the Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry B, 2015, 2(4): 295-306.
- [24] 郑定业, 庞雄奇, 姜福杰, 等. 鄂尔多斯盆地临兴地区上古生界致密气成藏特征及物理模拟[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(4): 744-754. [ZHENG D Y, PANG X Q, JIANG F J, et al. Characteristics and physical simulation of the Upper Paleozoic tight gas accumulation in Linxing area, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(4): 744-754.]
- [25] 陈刚, 丁超, 徐黎明, 等. 鄂尔多斯盆地东缘紫金山侵入岩热演化史与隆升过程分析[J]. 地球物理学报, 2012, 55(11): 3731-3741. [CHEN G, DING C, XU L M, et al. Analysis on the thermal history and uplift process of Zijinshan intrusive complex in the eastern Ordos Basin[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(11): 3731-3741.]
- [26] 丁超, 陈刚, 张宏发, 等. 鄂尔多斯盆地东部紫金山岩体地球化学与构造环境分析[J]. 矿物岩石, 2011, 31(3): 74-81. [DING C, CHEN G, ZHANG H F, et al. Geochemical characteristics and geological environment of Zijinshan complex in the eastern Ordos Basin[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2011, 31(3): 74-81.]
- [27] 杨兴科, 晁会霞, 郑孟林, 等. 鄂尔多斯盆地东部紫金山岩体 SHRIMP 测年地质意义[J]. 矿物岩石, 2008, 28(1): 54-63. [YANG X K, CHAO H X, ZHENG M L, et al. Geological significance of SHRIMP dating of Zijinshan alkali complex in the eastern Ordos Basin, China[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2008, 28(1): 54-63.]
- [28] 杨兴科, 晁会霞, 张哲峰, 等. 鄂尔多斯盆地东部紫金山岩体特征与形成的动力学环境——盆地热力-岩浆活动的深部作用典型实例剖析[J]. 大地构造与成矿学, 2010, 34(2): 269-281. [YANG X K, CHAO H X, ZHANG Z F, et al. Characteristics of the Zijinshan complex and its dynamic environment in the east of the Ordos Basin: Analysis of a classic example on the deep processes of thermal-magma activity in the basin[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2010, 34(2): 269-281.]
- [29] 张璐, 祝彦贺, 李林涛, 等. A 区块断层成因机制及其对致密气成藏的影响[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(3): 57-64. [ZHANG L, ZHU Y H, LI L T, et al. The genetic mechanism of faults and its influence on tight gas accumulation in block A, Northeast Ordos Basin[J]. Marine Geology Frontiers, 2020, 36(3): 57-64.]
- [30] 李龙龙. 鄂尔多斯盆地临兴区块上古生界烃源岩生排烃史与天然气成藏期次研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018. [LI L. Hydrocarbon generation and expulsion history of source rocks and natural gas accumulation period in the Upper Paleozoic of the Linxing Block, Ordos Basin [D]. Beijing: China University of Petroleum-Beijing, 2018.]
- [31] 张辉, 魏新善, 康锐, 等. 流体包裹体在鄂尔多斯盆地上古生界致密砂岩气研究中的应用[J]. 非常规油气, 2017, 4(4): 107-110. [ZHANG H, WEI X S, KANG R, et al. The application of fluid inclusions to tight sandstone reservoirs of Upper Paleozoic in Ordos Basin[J]. Unconventional oil & gas, 2017, 4(4): 107-110.]
- [32] PITMAN J K, SPENCER W C, POLLASTRO R M. Petrography, mineralogy, and reservoir characteristics of the Upper Cretaceous mesaverde group in the east central Piceance Basin, Colorado. U. S[J]. Geological Survey Bulletin, 1989, 1787: 3137.
- [33] 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]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 2012, 96: 2297-2318.
- [34] 刘瑞, 郭少斌, 屈凯旋, 等. 南华北盆地山西组砂岩的气体来源、成岩阶段与成藏过程研究[J]. 石油科学通报, 2021, 6(3): 356-368. [LIU R, GUO S B, QU K X, et al. Study of gas source, diagenesis stage and accumulation process of the sandstone of the Shanxi Formation in the southern north China Basin[J]. Petroleum Science Bulletin, 2021, 6(3): 356-368.]
- [35] SHANLEY K W, CLUFF R M, ROBINSON J W. Factors controlling prolific gas production from low-permeability sandstone reservoirs: implications for resource assessment, prospect development, and risk analysis[J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 2004, 88: 1083-1121.
- [36] TOBIN R C, MCCLAIN T, LIEBER R B, et al. Reservoir quality modeling of tight-gas sands in Wamsutter field: Integration of diagenesis, petroleum systems, and production data[J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 2010, 94: 1229-1266.
- [37] 刘新社, 周立发, 侯云东. 运用流体包裹体研究鄂尔多斯盆地上古生界天然气成藏[J]. 石油学报, 2007, 28(6): 37-42. [LIU X S, ZHOU L F, HOU Y D. Study of gas charging in the Upper Paleozoic of Ordos Basin using fluid inclusion[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(6): 37-42.]
- [38] 廖宗湖, 陈伟伦, 李薇, 等. 川东北须家河组致密砂岩断缝系统 I: 断层破碎带的平面分布特征[J]. 石油科学通报, 2020, 04: 441-448. [LIAO Z H, CHEN W L, LI W, et al. Fault-fracture systems of the Xujiata tight sandstone in the northeast Sichuan Basin, Part I: Distribution of fault damage zones[J]. Petroleum Science Bulletin, 2020, 04: 441-448.]

- [39] 廖宗湖, 凡睿, 李薇, 等. 川东北须家河组致密砂岩断缝系统II: 断层破碎带的结构特征[J]. 石油科学通报, 2020, 04: 449-457. [LIAO Z H, FAN R, LI W, et al. Fault-fracture systems of the Xujiahe tight sandstone in the northeast Sichuan Basin, Part II: Structure characteristics of fault damage zones[J]. Petroleum Science Bulletin, 2020, 04: 449-457.]
- [40] 刘玲, 汤达祯, 许浩. 临兴上古生界致密储层裂缝发育特征及对致密气富集影响[J]. 高校地质学报, 2019, 25(3): 457-465. [LIU L, TANG D Z, XU H. Development of fractures and its effects on gas accumulation in the Upper Paleozoic tight sandstone reservoirs of the Linxing Block[J]. Geological Journal of China Universities, 2019, 25(3): 457-465.]
- [41] SCHOELL M. Genetic characterization of natural gases[J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1983, 67(12): 2225-2238.
- [42] ROONEY M A, CLAYPOOL G E, CHUNG H M, et al. Modeling thermogenic gas generation using carbon isotopic ratios of natural gas hydrocarbons[J]. Chemical Geology, 1983, 126: 219-232.
- [43] 孙晓, 王杰, 陶成, 等. 鄂尔多斯盆地大牛地下古生界天然气地球化学特征及其来源综合判识[J]. 石油实验地质, 2021, 43(2): 307-314. [SUN X, WANG J, TAO C, et al. Evaluation of geochemical characteristics and source of natural gas in Lower Paleozoic, Daniudi area, Ordos Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(2): 307-314.]
- [44] PRINZHOFER A, PERNATON E. Isotopically light methane in natural gas: Bacterial imprint or diffusive fractionation[J]. Chemical Geology, 1997, 142: 193-200.
- [45] 庞雄奇, 金之钧, 姜振学, 等. 深盆气成藏门限及其物理模拟实验[J]. 天然气地球科学, 2003, 14(3): 207-214. [PANG X Q, JIN Z J, JIANG Z X, et al. Critical condition for gas accumulation in the deep basin trap and physical modeling[J]. Natural Gas Geoscience, 2003, 14(3): 207-214.]

(编辑 付娟娟)