

鄂尔多斯盆地东缘上古生界致密储层含气系统压力演化

李 勇¹,朱治同¹,吴 鹏²,申陈州³,高计县²

[1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院,北京 100083;2. 中联煤层气有限责任公司,北京 100016;3. 中国石油青海油田公司采油一厂,青海 茫崖 816400]

摘要:鄂尔多斯盆地东缘上古生界多层系致密气发育,准确认识气藏压力演化过程对深化致密气成藏认识和实现气井高产稳产具有指导意义。综合应用钻测井资料和岩心流体包裹体测试,结合盆地埋藏史和热演化史模拟,揭示了鄂尔多斯盆地东缘上古生界含气系统压力演化。结果显示,研究区自下而上发育欠压、略微欠压和常压系统。均一温度和盐度总体上连续分布,反映了油气连续充注过程。太原组、山西组和下石盒子组均一温度和盐度正相关,反映近源生烃后快速充注;上石盒子组和石千峰组均一温度和盐度负相关,受流体远距离运移充注和紫金山构造热事件作用下的气藏再平衡影响。研究区在白垩纪中期大量生烃,形成了异常高压,储层压力在34.89~38.26 MPa。后期地层抬升造成储层压力降低,其中地层降温贡献了50.31%~57.85%;天然气膨胀引起的气体运移贡献了28.25%~41.95%,且以上部地层降低为主;孔隙反弹贡献了0.37%~0.79%。相关成果系统揭示了上古生界致密气藏压力系统演化及现今气藏压力成因,对于认识鄂尔多斯盆地和类似盆地致密气富集成藏规律具有借鉴意义。

关键词:流体包裹体;压力系统;致密气;上古生界;临兴地区;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Pressure evolution of gas-bearing systems in the Upper Paleozoic tight reservoirs at the eastern margin of the Ordos Basin

LI Yong¹, ZHU Zhitong¹, WU Peng², SHEN Chenzhou³, GAO Jixian²

[1. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;

2. China United Coalbed Methane Co. Ltd., Beijing 100016, China; 3. No. 1 Oil Extraction Factory, Qinghai Oilfield Company, PetroChina, Mangya, Qinghai 816400, China]

Abstract: Multiple tight gas reservoirs are well developed in the Upper Paleozoic sequences at the eastern margin of the Ordos Basin. An accurate understanding of the pressure evolution process of gas reservoirs will be of guiding value to gaining more insights into tight gas accumulation and achieving high and stable gas production in this region. In this study, drilling, logging, and core fluid inclusion test data, as well as simulations of burial and thermal evolution histories are integrated to reveal the pressure evolution of the Upper Paleozoic gas-bearing systems at the eastern margin of the Ordos Basin. The results show that reservoirs in the study area exhibit underpressure, slightly underpressure, and normal pressure systems from bottom to top. The homogenization temperature and salinity of fluid inclusions exhibit continuous distributions overall, suggesting a continuous hydrocarbon charging process. The Taiyuan, Shanxi, and Lower Shihezi formations demonstrate a positive correlation between the homogenization temperature and salinity of fluid inclusions, suggesting a rapid hydrocarbon charging process following near-source hydrocarbon generation. In contrast, the Upper Shihezi and Shiqianfeng formations exhibit a negative correlation between the homogenization temperature and salinity due to the long-distance fluid migration and charging, as well as the rebalancing of fluid inclusions in gas reservoirs under the influence of the Zijinshan tectono-thermal event. During the Mid-Cretaceous, the study area experienced the generation of large quantities of hydrocarbons, leading to the anomalously high reservoir pressure ranging from 34.89 ~ 38.26 MPa, followed by a decrease at later stages under the uplifting of strata. For the pressure

收稿日期:2023-07-20;修回日期:2023-10-20。

第一作者简介:李勇(1988—),男,博士、教授,煤与煤层气地质、非常规油气地质、煤系成矿学。E-mail: liyong@cumt.edu.cn。

基金项目:中国石油创新基金项目(2021DQ02-1003);中央高校基本科研业务费专项(2022JCCXDC02)。

drop, 50.31 % ~ 57.85 % was caused by the decline in formation temperature, 28.25 % ~ 41.95 % by natural gas swelling-induced gas migration (predominantly in upper strata), and 0.37 % ~ 0.79 % by pore rebound. The findings of this study systematically reveal the pressure system evolution of the Upper Paleozoic tight gas reservoirs in the Ordos Basin and the origin of the current reservoir pressure formation. These will be of referential value to understanding the enrichment and accumulation patterns of tight gas in the Ordos Basin and the like.

Key words: fluid inclusion, pressure system, tight gas, Upper Paleozoic, Linxing area, Ordos Basin

引用格式:李勇,朱治同,吴鹏,等. 鄂尔多斯盆地东缘上古生界致密储层含气系统压力演化[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(6): 1568–1581. DOI: 10.11743/ogg20230618.

LI Yong, ZHU Zhitong, WU Peng, et al. Pressure evolution of gas-bearing systems in the Upper Paleozoic tight reservoirs at the eastern margin of the Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(6): 1568–1581. DOI: 10.11743/ogg20230618.

鄂尔多斯盆地在致密气、煤层气和页岩油等领域勘探开发不断实现新突破,为保障国家能源安全发挥了重要作用^[1-3]。盆地东缘实现了下古生界奥陶系、上古生界石炭系和二叠系和中生界三叠系全层系天然气勘探开发不断突破,是天然气持续增储上产的重要领域^[4]。其中,石炭系-二叠系太原组、山西组、下石盒子组、上石盒子组和石千峰组的致密砂岩多层系连续含气,系统揭示这套层系含气系统压力演化模式,对于认识天然气生成、运移和聚集过程,揭示天然气富集成藏机制,服务实际生产具有重要指导意义。

杨华、袁际华和柳广弟等系统研究了鄂尔多斯盆地上古生界储层压力系统分布特征,并讨论了异常低压形成过程^[5-6]。地层超压一般受不平衡压实、流体膨胀(生烃和烃类裂解)、成岩作用、构造挤压和压力传递等因素影响,低压或欠压则受地层抬升-剥蚀反弹、地下水流动、断裂和不整合面压力释放、气体扩散及温度降低等因素影响^[7-11]。测井曲线组合分析法、声波速度-密度交会图法、孔隙度对比法、压力计算反推法等可以用于地层压力状态识别^[12],但是压力异常现象一般是由多种因素相互叠加所致,同时地层孔隙空间的强非均质性也会造成地层压力分布的复杂性。

本文结合钻井和测井数据计算获取了鄂尔多斯盆地东缘多层系压力系统分布,结合系统采集的流体包裹体样本,通过均一温度、盐度和捕获压力等计算了气藏压力系统变化,进一步结合盆地埋藏史分析气藏压力系统形成和演化。相关成果有助于鄂尔多斯盆地多层系天然气综合富集的形成演化机制,为多类型、多层系天然气立体勘探开发提供借鉴。

1 区域地质背景

鄂尔多斯盆地是发育在华北地台之上的叠合克拉通盆地,总面积约为 $25 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。本文采样井主要位

于鄂尔多斯盆地东缘晋西挠褶带,地层构造主体为西倾单斜,东侧受紫金山岩浆活动影响,断裂较为发育。紫金山岩浆活动总体可分为3期:①中三叠世的表浅层火山喷发-热液活动;②晚侏罗世—早白垩世的中浅层岩浆侵入活动;③晚白垩世的表浅层火山喷发活动^[13-15]。研究区内沉积地层包括中奥陶统马家沟组、上石炭统本溪组、下二叠统太原组和山西组、中二叠统上石盒子组和下石盒子组、上二叠统石千峰组、下三叠统刘家沟组、中三叠统和尚沟组和纸坊组、上三叠统延长组及第四系^[16-17]。研究区烃源岩以本溪组、太原组和山西组的煤岩和暗色泥岩为主,其中本溪组和太原组主要形成于海-陆过渡相潮坪、潟湖环境,山西组形成于浅水三角洲环境(图1)。研究区岩石物性普遍较差,太原组、山西组、本溪组内部与烃源岩相邻的致密砂岩和上石盒子组、下石盒子组、石千峰组通过裂缝或断裂与烃源岩沟通的致密砂岩是主要储层。

2 现今地层压力系统

研究区储层垂向发育多个含气系统,不同含气系统地层压力存在差异。综合考虑压实作用和其他高压形成机制作用,Eaton等(1975)提出了基于测井的地层压力计算方法^[18-19]:

$$\frac{p}{D} = \frac{p_0}{D} - \left[\frac{p_0}{D} - \left(\frac{p}{D} \right)_n \right] \left(\frac{\Delta t_n}{\Delta t_0} \right)^x \quad (1)$$

式中: p 为地层压力,MPa; p_0 为上覆岩层压力,MPa; D 为地层深度,m; $(p/D)_n$ 表示正常地层压力梯度,MPa/m; Δt_n 为正常声波时差, $\mu\text{s/ft}$; Δt_0 为实际声波时差, $\mu\text{s/ft}$; x 为伊顿指数,取值因地区而异。

将等式两边同时乘以地层深度 D ,得到公式(2)。正常声波时差 Δt_n 可通过公式(3)正常压实趋势方程计算。

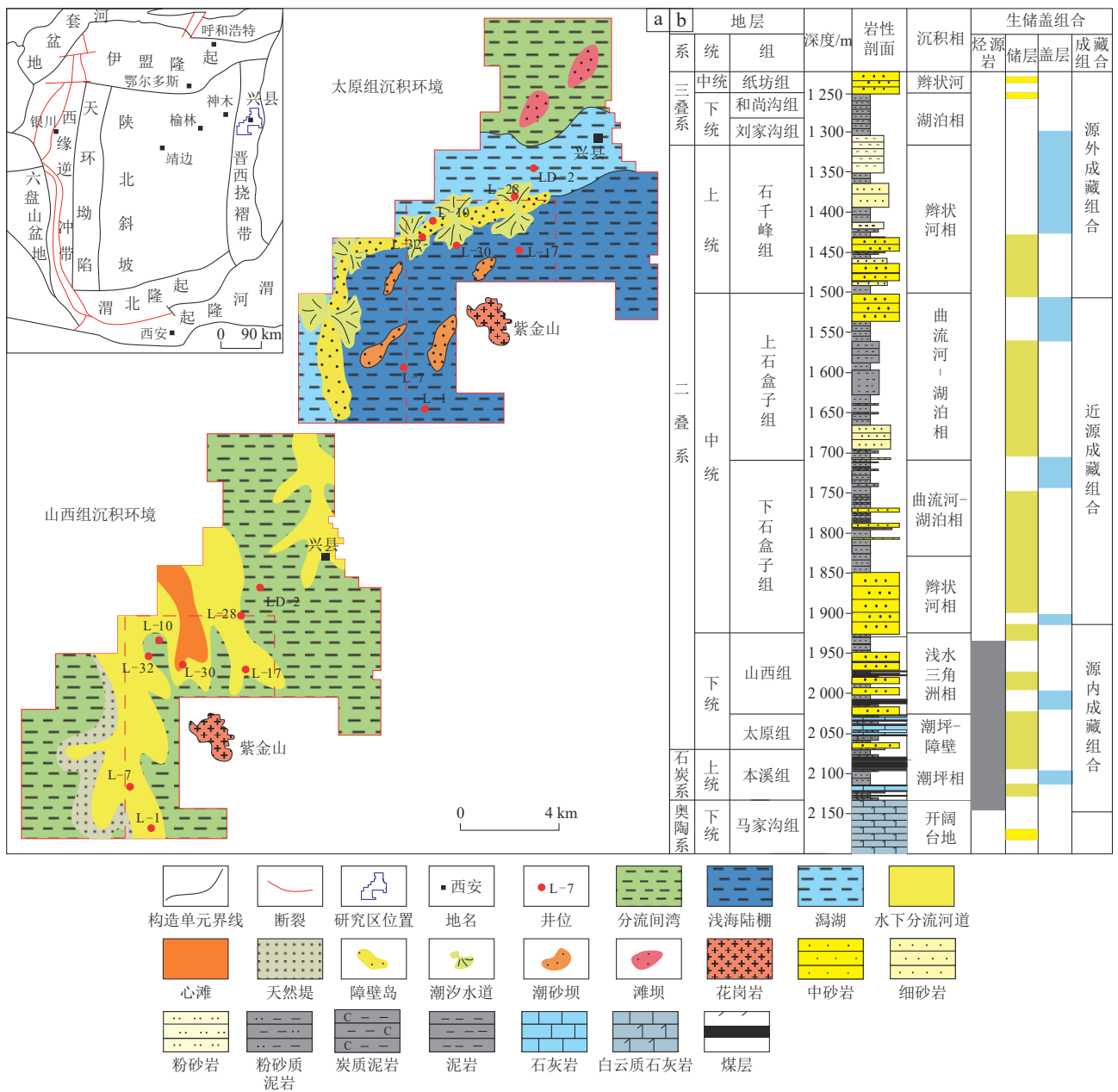


图1 鄂尔多斯盆地临兴地区煤系沉积环境(a)和地层综合柱状图(b)

Fig. 1 Sedimentary environment (a) and composite stratigraphic column (b) of coal measures in the Linxing area, Ordos Basin

$$p=p_0-(p_0-p_w)(\Delta t_n/\Delta t_0)^x \tag{2}$$

$$\ln(1/\Delta t_n)=kh+b \tag{3}$$

式中： p_w 为地层静水压力，MPa； h 为地层深度，m； k 和 b 为压实趋势线的斜率和截距，无量纲。

以有实测地层压力数据的L-1井和L-5井为例，介绍地层压力预测的具体步骤：

- ① 抽稀处理，将原始声波时差测井曲线每100个数据点求取1个平均值(图2)。
- ② 通过拟合出的正常压实趋势线方程，求取某一深度的正常压实声波时差(Δt_n) (表1)。
- ③ 利用研究区有限的实测地层压力数据和公

式(4)反求Eaton指数 x ，其取值见表2。

$$x=\ln[(p_0-p)/(p_0-p_w)]/\ln(\Delta t_n/\Delta t_0) \tag{4}$$

对研究区内有压力测试数据的井进行预测，将计算所得地层压力与实测压力进行比较，误差在0.13%~8.34%，平均2.88%(表3)。计算可得石千峰组压力梯度在 $(0.90\sim1.15)\times10^{-2}$ MPa/m，平均 1.00×10^{-2} MPa/m；上石盒子组压力梯度在 $(0.57\sim1.13)\times10^{-2}$ MPa/m，平均 0.93×10^{-2} MPa/m；下石盒子组压力梯度在 $(0.60\sim1.11)\times10^{-2}$ MPa/m，平均 0.91×10^{-2} MPa/m；山西组压力梯度在 $(0.64\sim1.12)\times10^{-2}$ MPa/m，平均 0.97×10^{-2} MPa/m；太原组压力梯度在 $(0.79\sim1.13)\times10^{-2}$ MPa/m，平均

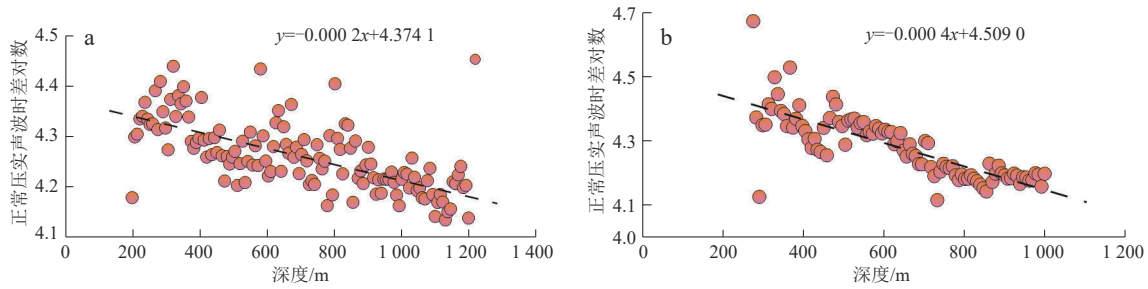


图2 鄂尔多斯盆地临兴地区拟合正常压实趋势曲线

Fig. 2 Normal compaction trends of the Linxing area, Ordos Basin

a. L-1井;b. L-5井

表1 鄂尔多斯盆地临兴地区正常压实声波时差计算

Table 1 Calculated sonic transit time under normal compaction for the Linxing area, Ordos Basin

井名	深度/m	层位	实际声波时差/(μ s/ft)	正常压实曲线方程	正常压实声波时差/(μ s/ft)
L-1井	1 599.5	上石盒子组	77.75	$t_n = -0.0002h + 4.3741$	57.64
L-5井	1 703.5	太原组	67.01	$t_n = -0.0004h + 4.5090$	45.95

注: t_n 为正常声波时差, μ s/ft; h 为地层深度,m。

表2 鄂尔多斯盆地临兴地区 Eaton 指数取值

Table 2 Eaton's exponent values of the Linxing area, Ordos Basin

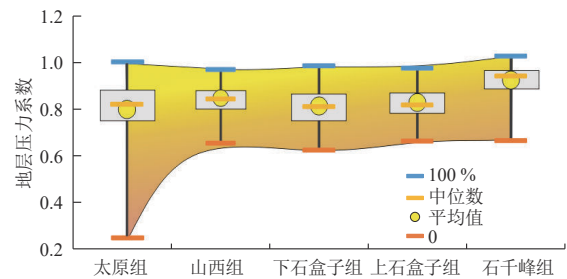
井名	深度/m	层位	上覆地层 压力/MPa	地层静水 压力/MPa	实测地层 压力/MPa	x 值
L-1	1 599.5	上石 盒子组	39.97	17.24	12.93	-0.580
L-5	1 703.5	太原组	41.07	18.36	17.43	-0.107

注: x 为伊顿指数,无量纲。表3 鄂尔多斯盆地临兴地区太原组—石千峰组地层压力
估算值与实测值对比Table 3 Comparison between estimated and measured
formation pressures from the Taiyuan to Shiqianfeng
formations in the Linxing area, Ordos Basin

井号	层位	深度/m	实测地层 压力/MPa	预测地层 压力/MPa	误差/%
L-1	太原组	2 029.09	17.958	17.935	0.13
		1 980.50	17.193	16.514	3.95
	上石盒子组	1 564.85	12.592	12.251	2.71
		1 570.71	13.961	12.797	8.34
L-6	下石盒子组	1 600.76	15.928	15.797	0.82
		1 573.15	15.285	15.712	2.79
	上石盒子组	1 434.40	14.558	14.530	0.19
		1 402.77	13.275	14.158	6.65
L-5	石千峰组	1 246.96	12.920	13.032	0.87
		1 214.21	12.536	12.790	2.03
L-5	山西组	1 668.06	17.032	16.871	0.95

0.96 $\times 10^{-2}$ MPa/m。

石千峰组压力系数主要分布在0.88~0.95,均值

图3 鄂尔多斯盆地临兴地区太原组—石千峰组现今地层
压力系数分布Fig. 3 Current formation pressure coefficients from the Taiyuan
to Shiqianfeng formations in the Linxing area, Ordos Basin

0.91,属近正常压力系统;上石盒子组压力系数在0.77~0.86,均值0.82;下石盒子组压力系数在0.73~0.86,均值0.80;山西组压力系数在0.78~0.87,均值0.83。上石盒子组、下石盒子组和山西组属略微欠压系统。太原组压力系数变化幅度大,主要分布在0.74~0.87,属欠压系统(图3)。研究区总体以欠压、略微欠压系统为主,发育部分近正常和正常压力系统。

3 古压力系统

3.1 流体包裹体显微特征

太原组—石千峰组储层中发育丰富的流体包裹体,主要赋存在石英矿物溶蚀孔隙和石英裂缝,少量分布于石英加大边(图4)。根据常温下包裹体成分和相态差异,可观察到3类包裹体,透射光下为浅褐色且具

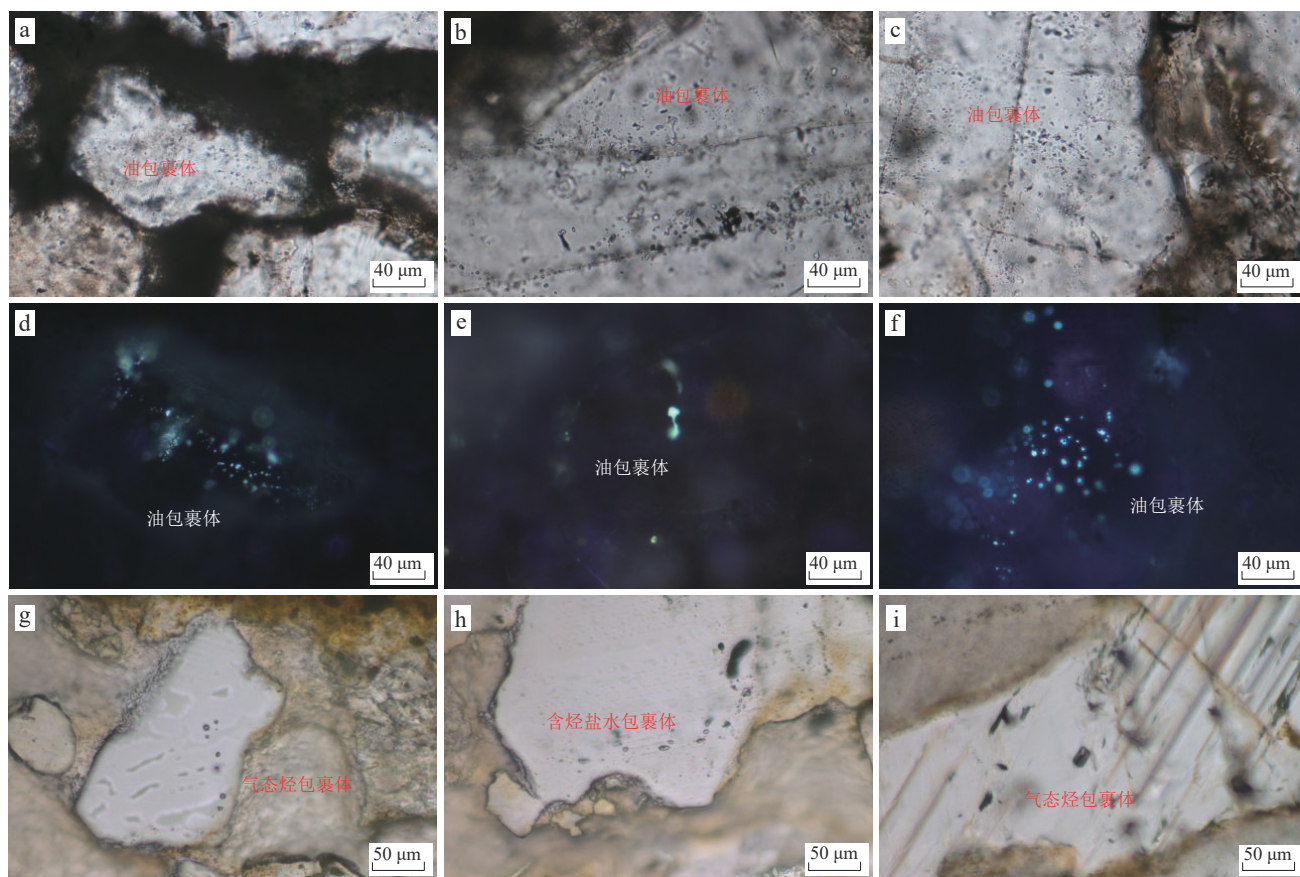


图4 鄂尔多斯盆地临兴地区流体包裹体显微特征照片

Fig. 4 Microscopic characteristics of fluid inclusions in the Linxing area, Ordos Basin

a. 透射光, 石英颗粒溶蚀孔隙中的浅褐色油包裹体, L-17井, 上石盒子组砂岩, 埋深1 451.93 m; b. 透射光, 石英颗粒内裂纹中浅褐色油包裹体, L-17井, 下石盒子组砂岩, 埋深1 676.85 m; c. 透射光, 石英颗粒内裂纹中浅褐色油包裹体, L-17井, 太原组砂岩, 埋深1 852.86 m; d. 荧光, 石英颗粒溶蚀孔隙中油包裹体, L-17井, 上石盒子组砂岩, 埋深1 451.93 m; e. 荧光, 石英颗粒内裂纹中油包裹体, L-17井, 下石盒子组砂岩, 埋深1 676.85 m; f. 荧光, 石英颗粒内裂纹中油包裹体, L-17井, 太原组砂岩, 埋深1 852.86 m; g. 透射光, 石英颗粒微裂隙中深灰色气态烃包裹体, LD-2井, 太原组砂岩, 埋深1 833.66 m; h. 透射光, 石英颗粒微裂隙中含烃盐水包裹体, LD-2井, 太原组砂岩, 埋深1 833.66 m; i. 透射光, 方解石胶结物微裂隙中深灰色气态烃包裹体, LD-2井, 太原组砂岩, 埋深1 833.1 m

有荧光的气液烃包裹体、透射光下为深灰色气态烃包裹体和透射光下透明且没有荧光的盐水包裹体。

流体包裹体大小不一, 石英次生加大边上包裹体较大, 通常直径大于 $10\ \mu\text{m}$, 仅有极少数小于 $10\ \mu\text{m}$, 形状有方形、椭圆形、长条形和不规则多边形; 石英颗粒表面、溶蚀孔隙及石英裂缝中的包裹体直径多在 $1\sim 10\ \mu\text{m}$, 少部分大于 $10\ \mu\text{m}$, 但基本都在 $20\ \mu\text{m}$ 范围内, 形状较石英次生加大边丰富, 有方形、椭圆形、长条形和半圆形等。流体包裹体均呈带状、线状、孤立、零星或成群分布(图4)。

3.2 均一温度和盐度特征

与烃类包裹体共生的盐水包裹体均一温度最接近油气流体活动时的真实地层温度, 选用此类包裹体对

天然气充注史进行研究^[20-22]。对太原组—石千峰组共30口井220块样品中4 104个测点开展流体包裹体均一温度分析, 测试结果如表4所示。

从分布范围来看, 太原组—石千峰组均一温度集中分布在 $90\sim 135\ ^\circ\text{C}$, 峰值主体出现在 $115\sim 130\ ^\circ\text{C}$ 。以上结果表明, 垂向上各层位处流体性质较均一, 且相互间连通性较好, 均在油气运移活跃期间捕获形成了流体包裹体。包裹体均一温度和盐度连续变化且无突现低值、缺失, 说明油气充注是一个相对连续的过程, 无显著时间间断(图5)。

太原组—石千峰组流体包裹体盐度分布范围较广, 在 $0\sim 23.05\ \%$ 均有分布, 但过半数样品盐度小于 $10\ \%$, 峰值为 $5.00\ \%\sim 7.50\ \%$, 平均值为 $8.17\ \%$, 整体属于低盐度包裹体(图5)。各层位间流体盐度相似,

表4 鄂尔多斯盆地临兴地区太原组—石千峰组测试数据统计

Table 4 Test data statistics of fluid inclusions from the Taiyuan to Shiqianfeng formations in the Linxing area, Ordos Basin

层位	测点数/个	均一温度/℃	均一盐度/%
石千峰组	1 004	68.90 ~ 191.80	0.35 ~ 22.58
上石盒子组	990	46.20 ~ 197.60	0.18 ~ 23.05
下石盒子组	1 105	34.40 ~ 198.30	0.35 ~ 21.82
山西组	466	73.60 ~ 198.60	0.18 ~ 20.89
太原组	539	100.00 ~ 130.00	0.35 ~ 20.75

但受地层水中盐类溶解度随温度升高等因素影响,上部层位捕获了盐度相对较高的流体。

太原组一下石盒子组的均一温度与盐度呈正相关关系。成岩早期地层埋藏浅且温度低,环境相对开放,流体交换作用比较普遍,地层流体的盐度较低,从而形成低温低盐的流体包裹体。之后随着埋深加大,地层流体温度升高,环境相对封闭,流体盐度升高。同时随着生烃强度增加,地层水中烃类和有机酸含量增多,孔隙水酸性增强,加快长石和方解石溶解, K^+ 、 Na^+ 和 Ca^{2+} 等离子迁移释放进孔隙水,进一步使流体盐度增加,形

成高温高盐流体包裹体,因此均一温度与盐度表现出正相关关系^[23-25]。上石盒子组和石千峰组的均一温度与盐度呈负相关关系,存在高温低盐的包裹体(图6)。下部地层流体在生烃高峰期向上运移过程中,下部地层中的部分流体会沿着裂缝向上部运移被捕获,形成低温高盐包裹体。除此之外,研究区在白垩纪晚期发生紫金山岩体活动,受烘烤作用,部分低均一温度和低盐度的流体包裹体会在岩浆的加热下发生了再平衡,如果未发生破裂,盐度会依旧保持较低水平,但均一温度升高^[26-27]。

3.3 古压力分布

包裹体捕获压力反映了其形成时的地层压力,可以用来重建油气充注或运移时期的地层古压力特征。采用张鼎等人提出的捕获温度与均一温度关系^[28]

$$T = 1.28778T_h - 16.75324 \quad (5)$$

式中: T 为包裹体捕获温度,℃; T_h 为包裹体均一温度,℃。

计算获得捕获温度后,结合 Bodnar 等人(1985)^[29]以及 Driesner 和 Heinrich(2007)提出的流体包裹体的

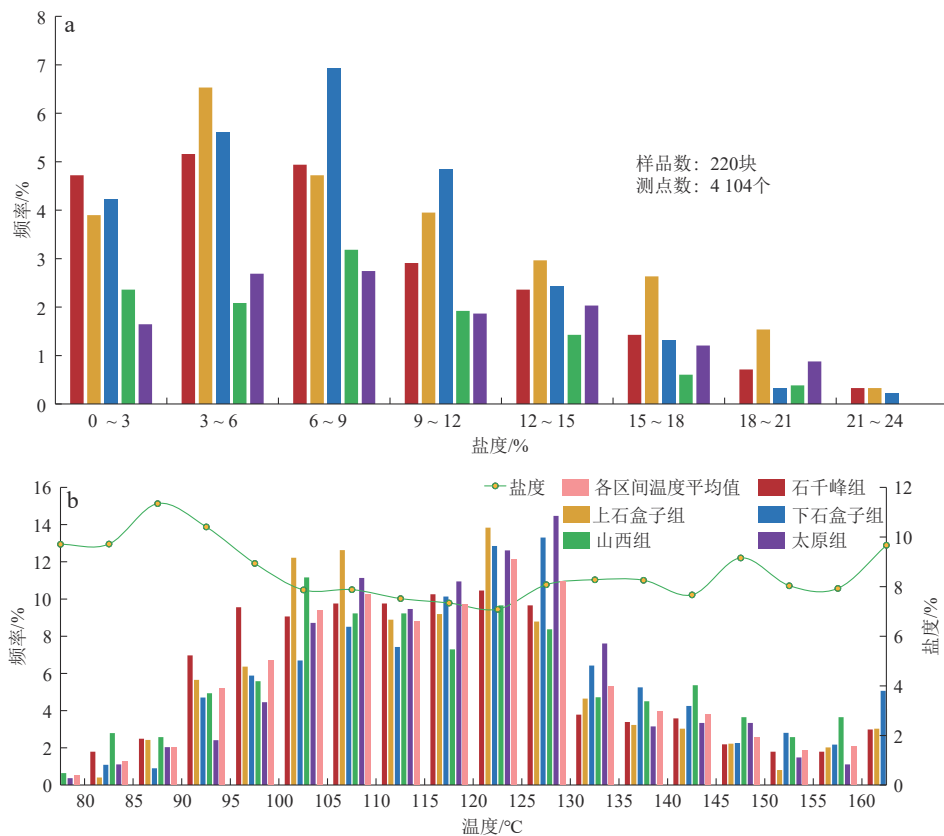


图5 鄂尔多斯盆地临兴地区太原组—石千峰组盐度(a)和均一温度(b)分布频率直方图

Fig. 5 Frequency histogram of the homogenization temperature and salinity of fluid inclusions from the Taiyuan to Shiqianfeng formations in the Linxing area, Ordos Basin

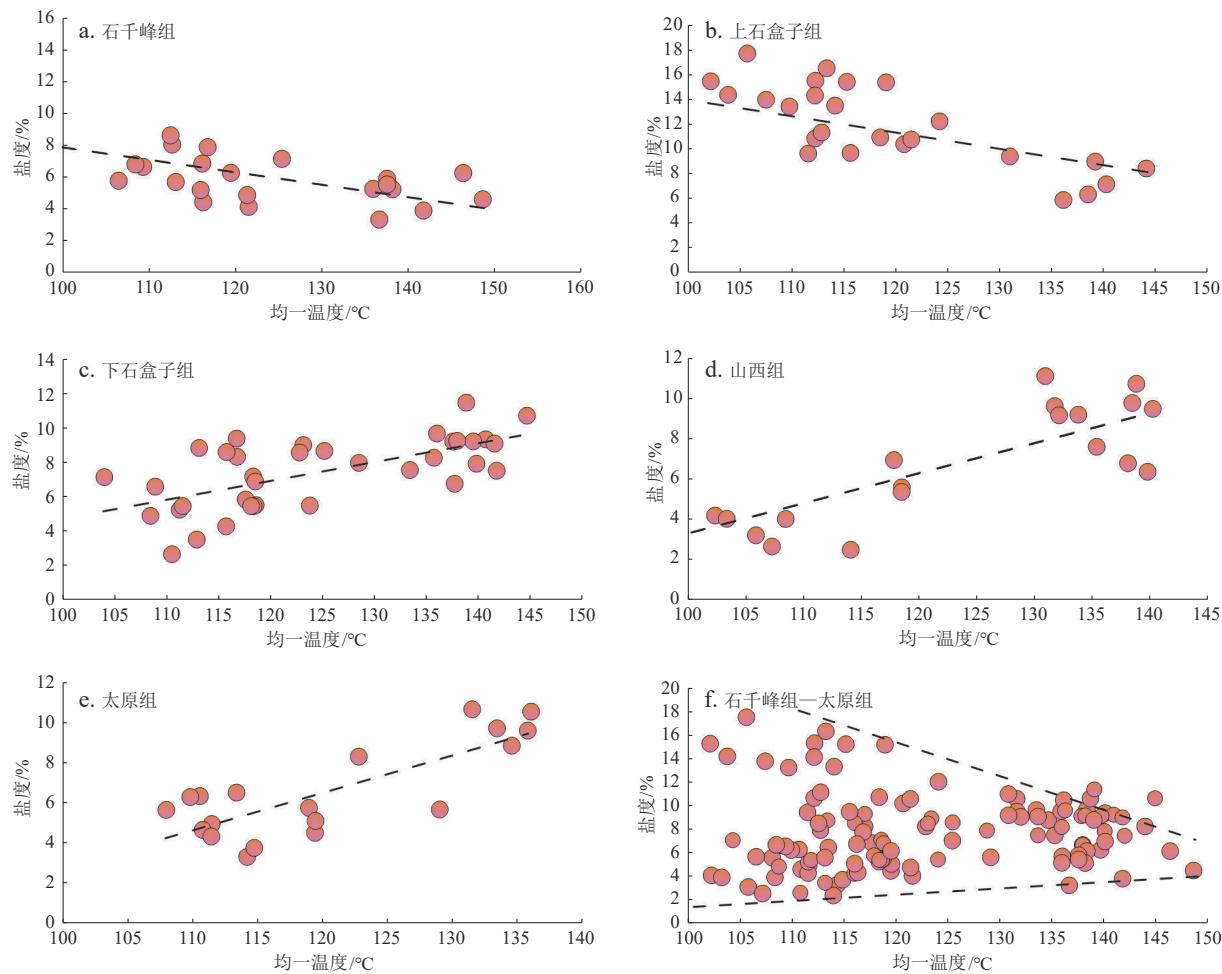


图6 鄂尔多斯盆地临兴地区太原组—石千峰组均一温度与盐度关系

Fig. 6 Relationships between the homogenization temperature and salinity of fluid inclusions from the Taiyuan to Shiqianfeng formations in the Linxing area, Ordos Basin

温度-压力曲线可以得到捕获压力^[30-32]。

石千峰组包裹体捕获温度在71.98 ~ 230.25 °C，平均130.52 °C；上石盒子组在73.14 ~ 237.72 °C，平均133.95 °C；下石盒子组在87.95 ~ 238.62 °C，平均138.09 °C；山西组在78.03 ~ 239.00 °C，平均138.08 °C；太原组在79.84 ~ 222.00 °C，平均135.73 °C。石千峰组包裹体捕获压力在23.91 ~ 45.24 MPa，平均34.89 MPa；上石盒子组在28.15 ~ 46.08 MPa，平均35.80 MPa；下石盒子组在29.70 ~ 48.00 MPa，平均37.58 MPa；山西组在27.14 ~ 49.24 MPa，平均38.26 MPa；太原组在29.88 ~ 46.79 MPa，平均37.40 MPa(表5)。

任战利等测算的鄂尔多斯盆地在白垩世古地温梯度最高可达4.5×10⁻² °C/m，高于今地温，存在异常地温场及构造热事件，同时也是油气大量生成时期^[33-34]。

表5 鄂尔多斯盆地临兴地区太原组—石千峰组捕获温度与捕获压力计算结果

Table 5 Calculated trapping temperatures and trapping pressures of fluid inclusions from the Taiyuan to Shiqianfeng formations in the Linxing area, Ordos Basin

层位	捕获温度/°C	捕获温度均值/°C	包裹体形成时平均深度/m	捕获压力范围/MPa	捕获压力均值/MPa	平均捕获压力系数
石千峰组	71.98 ~ 230.25	130.52	2 900.44	23.91 ~ 45.24	34.89	1.12
上石盒子组	73.14 ~ 237.72	133.95	2 976.66	28.15 ~ 46.08	35.80	1.12
下石盒子组	87.95 ~ 238.62	138.09	3 068.66	29.70 ~ 48.00	37.58	1.14
山西组	78.03 ~ 239.00	138.08	3 068.44	27.14 ~ 49.24	38.26	1.16
太原组	79.84 ~ 222.00	135.73	3 016.22	29.88 ~ 46.79	37.40	1.15

利用捕获温度和古地温梯度计算出流体包裹体形成时所处的深度,从而得出油气生成时的地层压力系数(表5)。研究区在早白垩世油气大量生成,太原组—石千峰组形成超压。

4 地层压力演化

4.1 古超压成因

根据古压力恢复,研究区地层在古生代和中生代时表现为超压。Barker认为,对于开放性的流体体系,即上下地层间连通性较好时,地层孔隙压力应略等于静水压力,所以异常压力表明地层为一套较封闭的体系,供输关系不平衡导致负压或超压^[35]。应用

PetroMod2016.2进行埋藏史和热演化史数值模拟,用声波时差法估算地层剥蚀量,大地热流值应用镜质体反射率(R_o)和磷灰石裂变行迹联合模拟^[36]。煤岩成熟度模拟采用Easy% R_o 模型^[37],煤岩生烃率基于PM_TIII_Tertiary-Coal_2C化学动力学模型。古地层压力恢复的原理是利用泥岩压实的不可逆原理,从而分别建立单层组地层的深度-孔隙度、时间-孔隙度的正常压实趋势线,然后用反回剥的方法推导出古地层压力。模拟结果显示研究区主要有两次快速沉降期,分别位于三叠纪和白垩纪。第一次快速沉降期,烃源岩埋深较浅、温度较低, R_o 值在0.5%~0.7%,生烃量较小。第二次快速沉降期,地层埋深迅速加大到3 000 m以下,温度升高到140℃以上, R_o 值升高到1.0%以上,开始大量生烃。

从图7b可以明显看到在250~200 Ma,即第一次快速沉降期,地层的孔隙压力只是略高于静水压力,同时地层开始生烃。但是这个时期生烃量较小,并且无欠压实作用形成的超压。在135~50 Ma,即第二次快速沉降期,地层孔隙压力明显高于静水压力,并且此阶段开始大量生烃,说明古超压的主要成因为生烃增压。将研究区流体包裹体捕获温度与捕获压力交汇后发现二者存在较好的线性关系(图8)。

4.2 现今低压成因

太原组—石千峰组在150~100 Ma期间孔隙度已下降到较低程度,有利于形成一个较封闭系统,尤其是太原组和山西组孔隙度已降至10%以下,符合前人对研究区天然气藏储层先致密后成藏的判断^[38-39]。从图7a中可以看到,在晚白垩纪以来的抬升剥蚀中,储层温度大幅降低,地层压力随之降低。100 Ma以后生烃速率开始减缓,地层压力开始减小,加上部分天然气

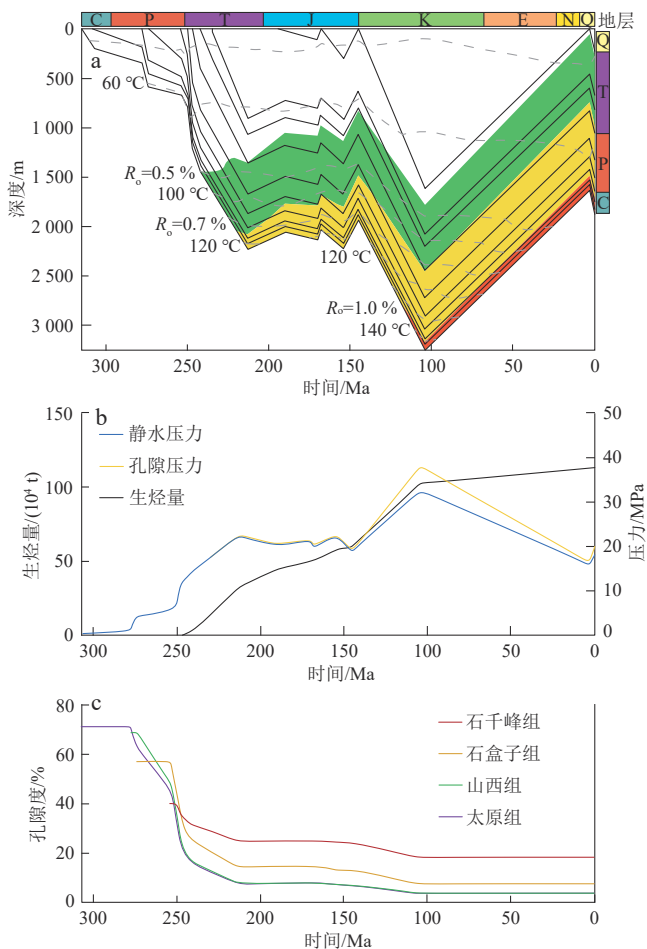


图7 鄂尔多斯盆地临兴地区埋藏史和热演化模拟(a),太原组生烃量、孔隙压力和静水压力曲线(b)及地层孔隙度演化(c)

Fig. 7 Diagram showing the simulated burial and thermal evolution histories (a), curves of generated hydrocarbon amount, pore pressure, and hydrostatic pressure (b), and diagram showing the evolution of formation porosity (c) for the Linxing area, Ordos Basin

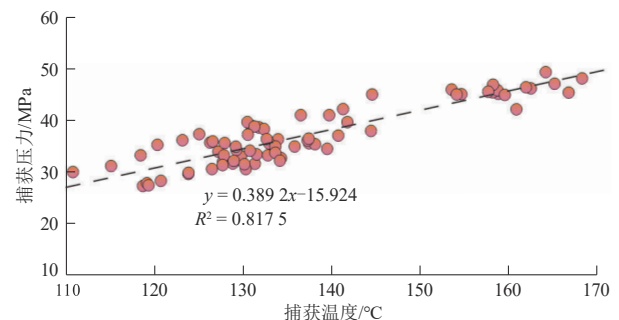


图8 鄂尔多斯盆地临兴地区流体包裹体捕获温度与捕获压力交汇图

Fig. 8 Cross plot of trapping temperature vs. trapping pressure of fluid inclusions in the Linxing area, Ordos Basin

沿构造裂缝或因压差发生了运移和轻烃扩散,造成了地层普遍低压的现状。

4.2.1 温度降低影响

运用公式(6)^[40]计算因温度下降导致的储层压力下降数值(表6)。随着地层抬升,温度和压力下降,气体压缩因子也发生变化^[41]。假设不存在气体的充注和散失,且忽略气体体积的变化,计算温度降低对古压力的影响,即:

$$\Delta p = p_{\text{古}} \left(1 - \frac{Z_{\text{今}} T_{\text{今}}}{Z_{\text{古}} T_{\text{古}}} \right) \quad (6)$$

式中: Δp 为温度下降导致的压力降低值,MPa; $p_{\text{古}}$ 为早白垩世末期地层压力,MPa; $Z_{\text{今}}$ 、 $Z_{\text{古}}$ 分别为现今、早白垩世末期气体压缩因子,无量纲; $T_{\text{古}}$ 为包裹体捕获温度,℃; $T_{\text{今}}$ 为现今地层温度,℃。经计算得出,因温度降低导致的地层压力下降幅度,石千峰组为53.39%,上石盒子组为50.31%,下石盒子组为57.14%,山西组为57.85%,太原组为56.76%。综合来看,温度下降是形成现今研究区地层低压的重要原因之一。

影响气体压缩因子的主要因素为温度 T 和压力 p ,利用Soave-Redlich-Kwong状态方程,可计算出在一定温度和压力下甲烷的压缩因子^[40]。将流体包裹体的捕获温度和捕获压力视为古地层温度和压力,便可计算出古压缩因子。同理,带入现今的地层温度和压力,可计算出现今地层中甲烷气体的压缩因子。

4.2.2 天然气膨胀影响

鄂尔多斯盆地含油气地层普遍致密,并且从白垩纪晚期开始盆地持续抬升,上覆地层剥蚀,天然气膨胀^[42-43]。考虑地层温度下降、孔隙反弹、上覆地层压力和地层毛细管力降低对天然气膨胀量的影响,运用公式(7)计算研究区天然气膨胀量百分比^[39]。

$$\frac{V_{\text{后}}}{V_{\text{前}}} = \frac{Z_{\text{后}} T_{\text{后}} p_{\text{前}}}{Z_{\text{前}} T_{\text{前}} (p_{\text{前}} - p_{\text{温}} - \Delta p_r - p_{\text{rc}})} \quad (7)$$

式中: $V_{\text{后}}$ 为地层抬升后天然气体积, m^3 ; $V_{\text{前}}$ 为地层抬升前天然气体积, m^3 ; $Z_{\text{后}}$ 为抬升后天然气压缩因子,无量纲; $Z_{\text{前}}$ 为抬升前天然气压缩因子,无量纲; $T_{\text{后}}$ 为抬升后地层温度,K; $T_{\text{前}}$ 为抬升前地层温度,K; $p_{\text{前}}$ 为抬升前的地层压力,MPa; $p_{\text{温}}$ 为温度降低引起的压力降低量,MPa; Δp_r 为孔隙反弹引起的压力降低量,MPa; p_{rc} 为地层毛细管力,MPa。

其中 Δp_r 可据公式(8)^[41]计算:

$$\Delta p_r = \frac{\Delta \sigma (C_b - C_r)}{\Phi C_g + [C_g - (1 + \Phi) C_r]} \quad (8)$$

式中: $\Delta \sigma$ 为上覆地层压力变化值,MPa; C_b 为地层孔隙压缩系数, MPa^{-1} ; C_r 为固体骨架物质压缩系数, MPa^{-1} ; Φ 为孔隙度,%; C_g 为天然气压缩系数, MPa^{-1} 。

其中 C_r 可据公式(9)^[44]计算得出:

$$C_r = \frac{3(1 - 2\nu)}{E_s} \quad (9)$$

式中: ν 为泊松比,无量纲; E_s 为弹性模量,MPa。

C_b 可据公式(10)^[45]计算得出:

$$C_b = \frac{\Phi}{1 - \Phi} C_r \quad (10)$$

C_g 可根据天然气的对比温度和对比压力查询Trube图版得到^[38]。

再据公式(11)^[41]计算天然气在地层抬升膨胀时所产生的压力(表7):

$$p_e = p_{\text{前}} - p_{\text{温}} - \Delta p_r - p_j \quad (11)$$

式中: p_e 为天然气在地层抬升膨胀时所产生的压力,MPa; p_j 为抬升后的静水压力,MPa。

经计算后得到研究区太原组、山西组、下石盒子组、上石盒子组和石千峰组的天然气膨胀量分别为7.14%、7.31%、6.73%、3.65%和8.01%,对应天然气膨胀力分别为5.70、6.36、7.07、7.25和9.22 MPa。因为该计算方法是抵消了温度降低和孔隙回弹等效应之后计算的净增加量,所以天然气实际体积膨胀量和膨胀力会大于计算值。

太原组、山西组、下石盒子组和石千峰组内的天然

表6 鄂尔多斯盆地临兴地区太原组—石千峰组温度影响的地层压力降低值及相关参数

Table 6 Temperature-induced decrease in pressure and relevant parameters for the Taiyuan to Shiqianfeng formations in the Linxing area, Ordos Basin

层位	古地层压力/MPa	古地层温度/℃	古压缩因子	现地层压力/MPa	现地层温度/℃	现压缩因子	温度导致的地层压力降低值/MPa
石千峰组	34.89	130.52	1.013 2	12.91	41	0.864 0	11.74
上石盒子组	35.80	133.95	1.020 2	12.52	47	0.872 9	11.71
下石盒子组	37.58	138.09	1.032 5	15.75	52	0.872 4	12.47
山西组	38.26	138.08	1.038 0	16.87	56	0.877 4	12.37
太原组	37.40	135.73	1.031 6	17.22	59	0.881 0	11.45

表7 鄂尔多斯盆地临兴地区太原组—石千峰组天然气膨胀力及相关参数

Table 7 Natural gas swelling pressure and relevant parameters from the Taiyuan to Shiqianfeng formations in the Linxing area, Ordos Basin

参数	太原组	山西组	下石盒子组	上石盒子组	石千峰组
深度/m	2 051.50	1 974.50	1 831.50	1 708.50	1 408.50
静水压力/MPa	20.10	19.35	17.95	16.74	13.80
抬升前压力/MPa	37.40	38.26	37.58	35.80	34.89
因温度下降的压力/MPa	11.45	12.37	12.47	11.71	11.74
Δp_i /MPa	0.14	0.17	0.08	0.10	0.13
膨胀力/MPa	5.70	6.36	7.07	7.25	9.22

注: Δp_i 为孔隙反弹引起的压力降低量, MPa。

气膨胀量均在7%左右,只有上石盒子组的膨胀量小于4%(图9)。上石盒子组的毛管压力最大,导致地层中的天然气膨胀量最小。从太原组往上到石千峰组天然气膨胀力逐渐变大,且均大于5 MPa(图10),这足以使地层内的天然气发生二次运移。天然气膨胀力实际

上是天然气对外的压强,现今气藏膨胀后不再具有膨胀力,因此可以将膨胀力作为因天然气膨胀导致气藏压力降低的量。因天然气膨胀导致的压力下降,石千峰组为41.95%,上石盒子组为31.14%,下石盒子组为32.39%,山西组为29.73%,太原组为28.25%。

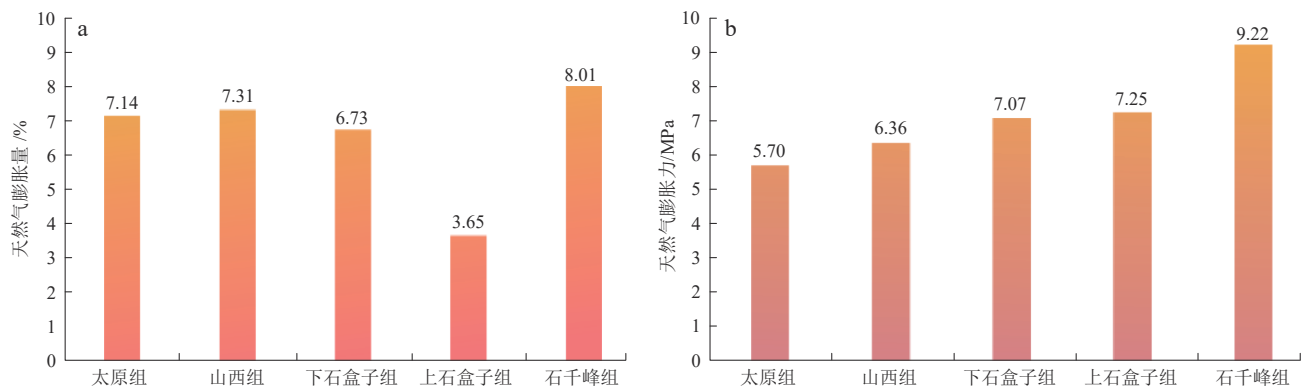


图9 鄂尔多斯盆地临兴地区太原组—石千峰组天然气膨胀量(a)和膨胀力(b)

Fig. 9 Swelling-induced increment (a) and swelling pressure (b) of natural gas from the Taiyuan to Shiqianfeng formations in the Linxing area, Ordos Basin

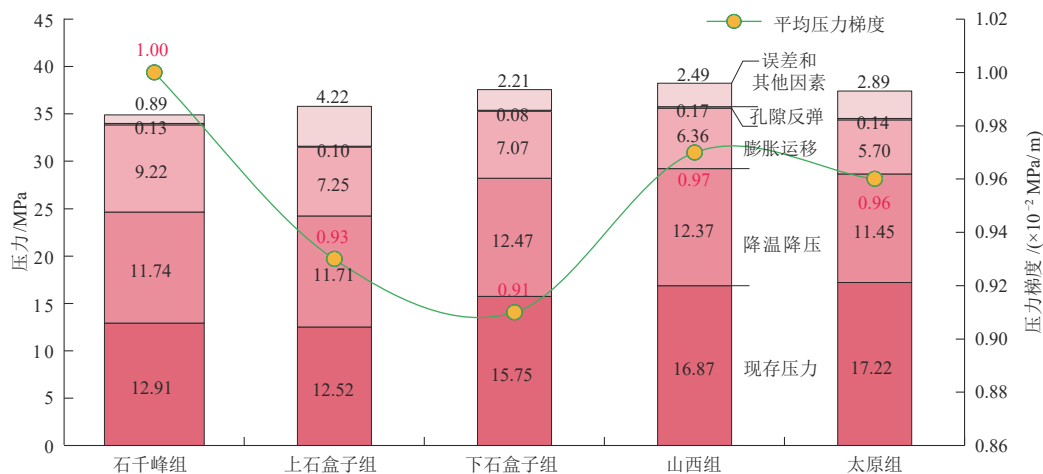


图10 鄂尔多斯盆地临兴地区太原组—石千峰组气藏压力影响因素贡献度

Fig. 10 Proportions of factors influencing gas reservoir pressure from the Taiyuan to Shiqianfeng formations in the Linxing area, Ordos Basin

天然气膨胀引起的二次运移使烃源岩内剩余的天然气再次排出,储集层内的天然气二次调整成藏。研究区地层非均质强,物性较好的区域内的天然气在膨胀力的作用下向物性较差的区域运移,使地层压力重新分布。上述过程会同时排出地层孔隙中的水,又因储层致密,下部流体与上部流体沟通较差,会使地层压力进一步降低。天然气在膨胀运移的过程中,部分气体会沿着断层或自主扩散至地表。研究区在白垩纪发生了紫金山岩体隆起,地层在紫金山隆起和区域地应力的双重作用下,形成了大量裂缝^[46]。天然气在膨胀力和自身浮力的推动下,沿着裂缝向上层扩散,最终逸散到大气中。

4.2.3 孔隙反弹影响

地层抬升过程中,随着温度和上覆地层压力的降低,孔隙会发生膨胀从而导致地层压力降低。上文在计算天然气膨胀量时,利用公式(8)^[45]已计算出各个层位因孔隙反弹压力降低的值。计算得出石千峰组下降0.13 MPa,下降幅度为0.59%;上石盒子组下降0.10 MPa,下降幅度为0.43%;下石盒子组下降0.08 MPa,下降幅度为0.37%;山西组下降0.17 MPa,下降幅度为0.79%;太原组下降0.14 MPa,下降幅度为0.69%。

综合来看各因素导致气藏压力降低占比,其中温度降低导致的压力下降占比最大,其次是天然气膨胀引起的气藏调整导致的压力降低,孔隙反弹的占比最

小(图10)。需要指出的是,虽然计算温度降低引起的压力降低值忽略了天然气散失和体积变化的影响,但是在计算天然气膨胀量时考虑了温度降低这一因素,因此由体积变化带来的误差可以在计算天然气膨胀时得到补充。而天然气的散失现无法进行精确的计算,只能通过总体的压力降低值减去除天然气散失外的各因素引起的压力降低值得到一个粗略的结果,即图10中的“误差和其他因素”。石千峰组气藏压力下降幅度和现今压力梯度最大,太原组气藏压力下降幅度和现今压力梯度最小,说明上部地层中的天然气在运移和散失的同时得到了下部天然气的补充,并且上部地层埋藏较浅,最终导致其压力梯度较大。下部地层中的天然气无法得到有效补充,且埋深较大,体现为现今压力梯度较浅部地层小。其中山西组泥页岩含量比例相对较高,地层封闭性好,尽管有较大幅度的降温和膨胀运移导致的压力下降,现今地层压力梯度较太原组高。

4.3 地层压力演化模式

综合上文研究内容,得出了上古生界天然气藏的压力系统演化模式(图11)。在大约300 Ma,地层开始缓慢沉降,深度较浅,上下地层之间连通性好,地层压力正常,此阶段为正常压力期。在大约250 Ma,地层开始快速沉降,地层迅速致密,孔隙度迅速减小,为异常压力形成提供了条件。随着温度和压力升高,烃源岩有机质成熟度逐渐增大,并且伴随有烃类生成,

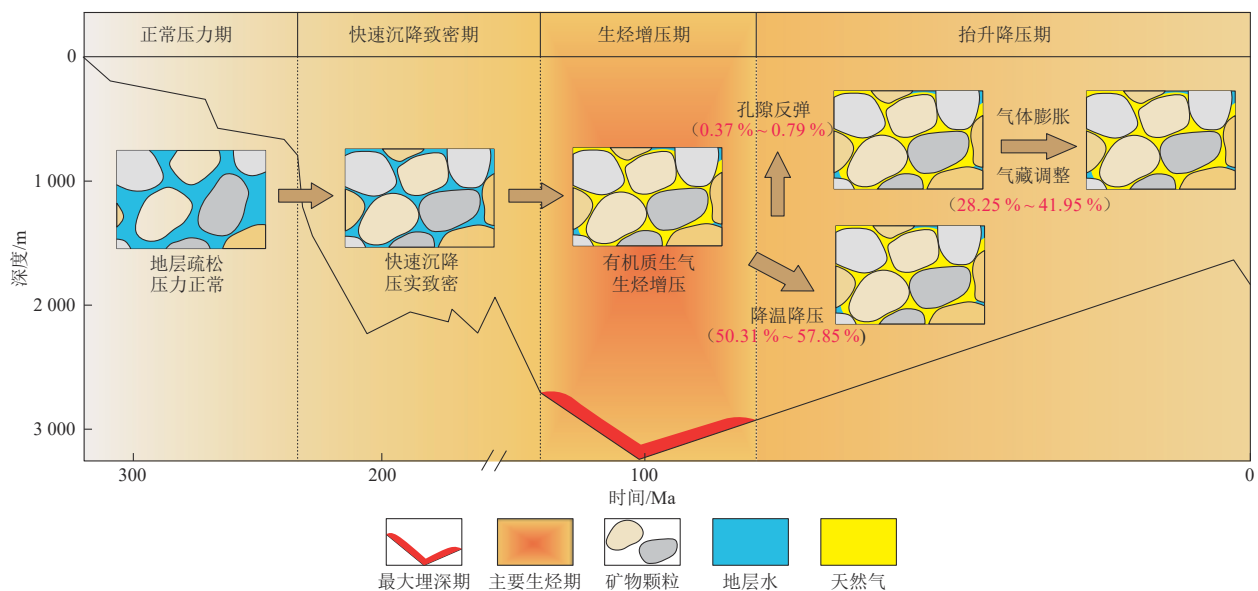


图11 鄂尔多斯盆地临兴地区上古生界天然气藏压力系统演化模式

Fig. 11 Evolutionary pattern of the pressure system in the Upper Paleozoic natural gas reservoirs in the Linxing area, Ordos Basin
(红色数字为地层压力下降幅度)

为古超压提供条件,此阶段为快速沉降致密期。在100 Ma左右烃源岩进入生烃高峰,形成超压,排出了地层水分,此阶段为生烃增压期。此后地层抬升,温度降低和孔隙反弹使气藏压力降低,同时上覆岩层减薄,天然气发生膨胀,驱使天然气向物性较差的区域运移,压力系统重新调整,部分气体逸散,此阶段为抬升降压期。

5 结 论

1) 上古生界致密气储层总体以欠压和略微欠压系统为主,发育部分近正常、正常压力系统。按照压力系数变化程度,可以将上古生界各层段从上至下划分为3套压力系统,即太原组欠压系统、山西组—上石盒子组略微欠压系统和石千峰组正常压力系统。

2) 储层流体包裹体均一温度的连续变化和多个峰值,说明了上古生界天然气为多阶充注和连续成藏。上石盒子组和石千峰组中的流体包裹体盐度与均一温度出现异常负相关关系,推测气体远距离运移充注和构造热事件导致的流体包裹体再平衡所致。

3) 压力系统演化显示地层压力由生烃超压到现今欠压转变。地层在白垩纪中期大量生烃,在3 500 m左右埋深条件下增压至34.89~38.26 MPa。后期地层抬升,地层温度降低,压力下降,压降幅度在50.31%~57.85%,以石千峰组压降最大。随着上覆地层压力降低,天然气再次运移,压力重新调整,压降幅度在28.25%~41.95%,以石千峰组压降最大。上覆地层剥蚀使孔隙反弹导致压力下降,压降幅度在0.37%~0.79%,形成了现今压力系统。

参 考 文 献

- [1] 郭旭升,周德华,赵培荣,等.鄂尔多斯盆地石炭系—二叠系煤系非常规天然气勘探开发进展与攻关方向[J].石油与天然气地质,2022,43(5):1013-1023.
- GUO Xusheng, ZHOU Dehua, ZHAO Peirong, et al. Progresses and directions of unconventional natural gas exploration and development in the Carboniferous-Permian coal measure strata, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(5): 1013-1023.
- [2] 胡素云,赵文智,侯连华,等.中国陆相页岩油发展潜力与技术对策[J].石油勘探与开发,2020,47(4):819-828.
- HU Suyun, ZHAO Wenzhi, HOU Lianhua, et al. Development potential and technical strategy of continental shale oil in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(4): 819-828.
- [3] 李勇,徐立富,张守仁,等.深煤层含气系统差异及开发对策[J].煤炭学报,2023,48(2):900-917.

- LI Yong, XU Lifu, ZHANG Shouren, et al. Gas bearing system difference in deep coal seams and corresponded development strategy[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 900-917.
- [4] 李勇,许卫凯,高计县,等.“源-储-输导系统”联控煤系气富集成藏机制——以鄂尔多斯盆地东缘为例[J].煤炭学报,2021,46(8):2440-2453.
- LI Yong, XU Weikai, GAO Jixian, et al. Mechanism of coal measure gas accumulation under integrated control of “source reservoir-transport system”: A case study from east margin of Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(8): 2440-2453.
- [5] 杨华,姬红,李振宏,等.鄂尔多斯盆地东部上古生界石千峰组低压气藏特征[J].地球科学,2004,29(4):413-419.
- YANG Hua, JI Hong, LI Zhenhong, et al. Characteristics of underpressured gas pool in Upper Paleozoic Shiqianfeng Formation of eastern Ordos Basin[J]. Earth Science, 2004, 29(4): 413-419.
- [6] 袁际华,柳广弟.鄂尔多斯盆地上古生界异常低压分布特征及形成过程[J].石油与天然气地质,2005,26(6):792-799.
- YUAN Jihua, LIU Guangdi. Distribution characteristics and formation process of Upper Paleozoic abnormally low pressure zones in Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(6): 792-799.
- [7] 宋昊,蒋有录,侯帅,等.长岭断陷龙凤山地区下白垩统地层压力特征及其对油气成藏的影响[J].特种油气藏,2022,29(2):42-50.
- SONG Hao, JIANG Youlu, HOU Shuai, et al. Pressure characteristics and its influence on hydrocarbon accumulation of Lower Cretaceous Formation in Longfengshan Area, Changling Faulted Depression[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2022, 29(2): 42-50.
- [8] 肖阳,刘守昱,何永志,等.致密砂岩裂缝性气藏缝网压裂裂缝复杂程度评价方法[J].特种油气藏,2022,29(2):157-163.
- XIAO Yang, LIU Shouyu, HE Yongzhi, et al. Evaluation method of fracture complexity of fracture network fracturing for tight sandstone fractured gas reservoir[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2022, 29(2): 157-163.
- [9] 王飞,吴宝成,廖凯,等.从闷井压力反演页岩油水平井压裂裂缝参数和地层压力[J].新疆石油地质,2022,43(5):624-629.
- WANG Fei, WU Baocheng, LIAO Kai, et al. Inversion of fracture parameters and formation pressure for fractured horizontal wells in shale oil reservoir based on soaking pressure[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2022, 43(5): 624-629.
- [10] 鲁雪松,张凤奇,赵孟军,等.准噶尔盆地南缘高探1井超压成因与盖层封闭能力[J].新疆石油地质,2021,42(6):666-675.
- LU Xuesong, ZHANG Fengqi, ZHAO Mengjun, et al. Genesis of overpressure and sealing ability of caprocks in Well Gaotan 1 in the southern margin of Junggar basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology,

- 2021, 42(6): 666-675.
- [11] 刘晓峰, 解习农. 东营凹陷低压系统的特征及成因机制[J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(1): 66-69.
- LIU Xiaofeng, XIE Xinong. Origin and characteristics of under pressure systems in Dongying Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2002, 23(1): 66-69.
- [12] 赵靖舟, 李军, 徐泽阳. 沉积盆地超压成因研究进展[J]. 石油学报, 2017, 38(9): 973-998.
- ZHAO Jingzhou, LI Jun, XU Zeyang. Advances in the origin of overpressures in sedimentary basins [J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(9): 973-998.
- [13] 杨兴科, 杨永恒, 季丽丹, 等. 鄂尔多斯盆地东部热力作用的期次和特点[J]. 地质学报, 2006, 80(5): 705-711.
- YANG Xingke, YANG Yongheng, JI Lidian, et al. Stages and characteristics of thermal actions in eastern part of Ordos Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(5): 705-711.
- [14] 杨永恒, 杨兴科. 紫金山岩体的热力构造类型、期次及其对鄂尔多斯盆地东缘多种能源矿产的影响作用[J]. 地球学报, 2007, 28(6): 620-626.
- YANG Yongheng, YANG Xingke. Thermal structure types and stages of Zijinshan rock body and their influence upon several energy resources and minerals in eastern Ordos Basin [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2007, 28(6): 620-626.
- [15] 何登发, 包洪平, 开百泽, 等. 鄂尔多斯克拉通地块活化了吗? [J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(6): 1271-1291.
- HE Dengfa, BAO Hongping, KAI Baize, et al. Has the Ordos Block, a cratonic block been reactivated? [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(6): 1271-1291.
- [16] 李勇, 吴鹏, 高计县, 等. 煤成气多层系富集机制与全含气系统模式——以鄂尔多斯盆地东缘临兴区块为例[J]. 天然气工业, 2022, 42(6): 52-64.
- LI Yong, WU Peng, GAO Jixian, et al. Multilayer coal-derived gas enrichment mechanism and whole gas bearing system model: A case study on the Linxing Block along the eastern margin of the Ordos Basin [J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(6): 52-64.
- [17] 何登发, 包洪平, 开百泽, 等. 鄂尔多斯克拉通地块活化了吗? [J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(6): 1271-1291.
- HE Dengfa, BAO Hongping, KAI Baize, et al. Has the Ordos Block, a cratonic block been reactivated? [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(6): 1271-1291.
- [18] EATON B A. The equation for geopressure prediction from well logs [C]//Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME, Dallas, Texas, 1975. Houston: Society of Petroleum Engineers, 1975: SPE-5544-MS.
- [19] 臧艳彬, 王瑞和, 王子振, 等. 利用Eaton法计算地层孔隙压力的不确定性分析[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2012, 34(4): 55-61.
- ZANG Yanbin, WANG Ruihe, WANG Zizhen, et al. Evaluation of uncertainties for pore-pressure taking Eaton method as an example [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2012, 34(4): 55-61.
- [20] 潘雪峰. 储层流体包裹体技术研究与应用[D]. 成都: 西南石油大学, 2013.
- PAN Xuefeng. Research and application on reservoir fluid inclusion technology [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2013.
- [21] 米敬奎, 戴金星, 张水昌. 含油气盆地包裹体研究中存在的问题[J]. 天然气地球科学, 2005, 16(5): 602-605, 636.
- MI Jingkui, DAI Jinxing, ZHANG Shuichang. Some problem existed in research of inclusion occurring in oil and gas bearing basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2005, 16(5): 602-605, 636.
- [22] 柳少波, 顾家裕. 包裹体在石油地质研究中的应用与问题讨论[J]. 石油与天然气地质, 1997, 18(4): 326-331, 342.
- LIU Shaobo, GU Jiayu. Application of fluid inclusions to petroleum geological study and discussion [J]. Oil & Gas Geology, 1997, 18(4): 326-331, 342.
- [23] 卢焕章, 范宏瑞, 倪培, 等. 流体包裹体[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- LU Huanzhang, FAN Hongrui, NI Pei, et al. Fluid inclusion [M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [24] GOLDSTEIN R H. Fluid inclusions in sedimentary and diagenetic systems [J]. Lithos, 2001, 55(1/4): 159-193.
- [25] 米洪刚, 张兵, 朱光辉, 等. 临兴致密砂岩气藏地质特征认识及开发潜力分析[J]. 特种油气藏, 2022, 29(6): 65-72.
- MI Honggang, ZHANG Bing, ZHU Guanghui, et al. Geological Characteristics and Development Potential Analysis of Linxing Tight Sandstone Gas Reservoir [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2022, 29(6): 65-72.
- [26] 祝武权. 临兴地区岩浆侵入背景下的煤层气聚集藏作用研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017.
- ZHU Wuquan. Characterization of coalbed methane accumulation and reservoir under the background of magma invasion in Lin-Xing district [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2017.
- [27] 曹梦春, 陈勇, 刘闯, 等. 沉积盆地成岩环境下流体包裹体再平衡机制及其判别方法[J]. 地质论评, 2017, 63(1): 21-34.
- CAO Mengchun, CHEN Yong, LIU Chuang, et al. Mechanism and identification of fluid inclusion re-equilibration in diagenetic environment of sedimentary basins [J]. Geological Review, 2017, 63(1): 21-34.
- [28] 张翥. 含油气盆地流体包裹体分析技术及应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2016.
- ZHANG Nai. Analysis technology and application of fluid inclusions in oil and gas bearing basins [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2016.
- [29] BODNAR R J, BURNHAM C W, STERNER S M. Synthetic fluid inclusions in natural quartz. III. Determination of phase equilibrium properties in the system H₂O-NaCl to 1 000 °C and 1 500 bars [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1985, 49(9): 1861-1873.
- [30] DRIESNER T. The system H₂O-NaCl. Part II: Correlations for molar volume, enthalpy, and isobaric heat capacity from 0 to

- 1 000 °C, 1 to 5 000 bar, and 0 to 1 X_{NaCl} [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, 71(20): 4902–4919.
- [31] DRIESNER T, HEINRICH C A. The system $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$. The system $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$. Part I: Correlation formulae for phase relations in temperature-pressure-composition space from 0 to 1 000 °C, 0 to 5 000 bar, and 0 to 1 X_{NaCl} [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, 71(20): 4880–4901.
- [32] STEELE-MACINNIS M, LECUMBERRI S P, BODNAR R J. HokieFlincs_ $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$: A Microsoft Excel spreadsheet for interpreting microthermometric data from fluid inclusions based on the *PVTX* properties of $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ [J]. *Computers & Geosciences*, 2012, 49: 334–337.
- [33] 任战利, 于强, 崔军平, 等. 鄂尔多斯盆地热演化史及其对油气的控制作用[J]. *地学前缘*, 2017, 24(3): 137–148.
- REN Zhanli, YU Qiang, CUI Junping, et al. Thermal history and its controls on oil and gas of the Ordos Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(3): 137–148.
- [34] 任战利, 祁凯, 李进步, 等. 鄂尔多斯盆地热动力演化史及其对油气成藏与富集的控制作用[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(5): 1030–1042.
- REN Zhanli, QI Kai, LI Jinbu, et al. Thermodynamic evolution and hydrocarbon accumulation in the Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(5): 1030–1042.
- [35] BARKER C. Generation of anomalous internal pressures in source rocks [C]//IFP Exploration Research Conference. [S. l.]: [s. n.], 1987: 页码范围缺失.
- [36] 杨鹏, 任战利, ZHAO Jianxin, 等. 方解石原位 U-Pb 测年结合磷灰石裂变径迹方法约束鄂尔多斯盆地西南部构造演化[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(5): 1189–1201.
- YANG Peng, REN Zhanli, ZHAO Jianxin, et al. Tectonic evolution analysis constrained jointly by in-situ calcite U-Pb dating and apatite fission track for southwestern Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(5): 1189–1201.
- [37] SWEENEY J J, BURNHAM A K. Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics [J]. *AAPG Bulletin*, 1990, 74(10): 1559–1570.
- [38] 王晓梅, 赵靖舟, 刘新社, 等. 鄂尔多斯盆地东部上古生界现今地层压力分布特征及成因[J]. *石油与天然气地质*, 2013(5): 646–651.
- WANG Xiaomei, ZHAO Jingzhou, LIU Xinshe, et al. Distribution characteristics and genesis of present formation pressure of the Upper Paleozoic in the eastern Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2013(5): 646–651.
- [39] 刘畅, 张道旻, 李超, 等. 鄂尔多斯盆地临兴区块上古生界致密砂岩气藏成藏条件及主控因素[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(5): 1146–1158.
- LIU Chang, ZHANG Daomin, LI Chao, et al. Upper Paleozoic tight gas sandstone reservoirs and main controls, Linxing Block, Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(5): 1146–1158.
- [40] 李云清, 何鹏, 王金成. 碳氢燃料在亚临界及超临界状态下的状态方程研究[J]. *石油与天然气化工*, 2007, 36(1): 1–3, 17.
- LI Yunqing, HE Peng, WANG Jincheng. Investigation on equation of state for hydrocarbon fuel at subcritical and supercritical conditions [J]. *Chemical Engineering of Oil and Gas*, 2007, 36(1): 1–3, 17.
- [41] 李军, 赵靖舟, 魏新善, 等. 地层抬升引发的天然气膨胀及其聚集效应——以鄂尔多斯盆地苏里格气田为例[J]. *石油勘探与开发*, 2022, 49(6): 1094–1106.
- LI Jun, ZHAO Jingzhou, WEI Xinshan, et al. Gas expansion caused by formation uplifting and its effects on tight gas accumulation: A case study of Sulige Gas Field in Ordos Basin, SW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(6): 1094–1106.
- [42] LI Jun, ZHAO Jingzhou, WEI Xinshan, et al. Origin of abnormal pressure in the Upper Paleozoic shale of the Ordos Basin, China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 110: 162–177.
- [43] TIAB D, DONALDSON E C. *Petrophysics: Theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties* [M]. 3rd ed. Boston: Gulf Professional Publishing, 2011.
- [44] 李传亮. 岩石压缩系数与孔隙度的关系[J]. *中国海上油气(地质)*, 2003, 17(5): 355–358.
- LI Chuanliang. The relationship between rock compressibility and porosity [J]. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 2003, 17(5): 355–358.
- [45] GHEDAN S G, 胡建国, 李祐佑. 天然气压缩系数[J]. *天然气勘探与开发*, 1995, 18(2): 80–83.
- GHEDAN S G, HU Jianguo, LI Huyou. Natural gas compressibility factor [J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 1995, 18(2): 80–83.
- [46] 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 Yan, ZHU Guanghui, WAN Huan, 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.

(编辑 张亚雄)