

鄂尔多斯盆地东部上古生界石千峰组低压气藏特征

杨 华^{1,2}, 姬 红¹, 李振宏¹, 孙六一¹

1. 中国石油长庆油田分公司, 陕西西安 710021

2. 成都理工大学地球科学学院, 四川成都 610059

摘要: 鄂尔多斯盆地的气源主要来自于山西组—太原组的海陆交互相煤系地层, 上石盒子组沉积了一套巨厚的泥岩, 具有很强的封盖能力, 天然气很难穿层运移。近年来, 相继在盆地东部的石千峰组地层中发现了一系列次生气藏, 其形成机理逐步引起了勘探家的关注。根据次生气藏的特点, 结合包裹体测试计算, 认为其形成原因主要是由于下部超压地层进行超压释放, 从而在区域性盖层内部形成一系列泄压通道, 原生气藏泄漏而形成的。形成过程主要经历了下部高温高压原生气藏的形成、原生气藏泄压与次生气藏的形成、次生气藏的长时间调整 3 个阶段。

关键词: 鄂尔多斯盆地; 原生气藏; 次生气藏; 超压形成; 超压释放; 泄压通道; 油气运移。

中图分类号: P618.130

文章编号: 1000-2383(2004)04-0413-07

收稿日期: 2004-03-19

Characteristics of Underpressured Gas Pool in Upper Paleozoic Shiqianfeng Formation of Eastern Ordos Basin

YANG Hua^{1,2}, JI Hong¹, LI Zhen-hong¹, SUN Liu-yi¹

1. Changqing Oil Field Branch Company of China Petroleum, Xi'an 710021, China

2. Geosciences College, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract: The gas source in Ordos basin mainly comes from the alternate marine-continental coal-bearing measures of Shanxi and Taiyuan formations. The Upper Shihezi Formation with a vast thick mudstone layer can be taken as a very good seal, so it is difficult for natural gas to pass through. Recently, some secondary gas pools have been found in Shiqianfeng Formation lying above the Upper Shihezi Formation in eastern Ordos basin. In this paper, according to the properties of secondary gas pools and the inclusion data, the secondary gas pools are thought to be formed due to the leakage of the original gas pools penetrating through the regional caprock when the overpressures within lower overpressured strata release. The forming process of gas reservoirs includes three stages, that is, the formation of the primary gas pools with high temperature and high pressure, the leakage of the primary gas pools and the formation of the secondary gas pools, and late adjustment and maintenance of the secondary pools.

Key words: Ordos basin; primary gas pools; secondary gas pools; overpressure; overpressure release; pressure releasing pathway; oil and gas migration.

鄂尔多斯盆地为一富含天然气的大型叠合盆地, 不仅生气范围广、生气强度大, 而且含气层位多、气藏类型丰富(图 1)(付金华等, 2000)。经过 20 多年的勘探实践, 先后在下古生界以及上古生界太原组、山西组、下石盒子组都发现了具有相当规模的气藏(气田), 尽管这些气藏的规模大小不一、储集类型

不同、成因有别, 但它们都分布在区域性盖层—上石盒子组以下的地层中。这是因为二叠系山西组和太原组为自生自储式的生储盖组合, 形成气藏具有得天独厚的优势; 而下石盒子组储层直接与山西组和太原组气源岩相接, 上部又具有自身的泥岩层封盖, 形成下生上储式的生储盖组合, 具有形成气藏的有

基金项目: 国家重点基础研究发展规划“973”项目(No. 2001CB209104-5)。

作者简介: 杨华(1963—), 男, 高级工程师, 主要从事油气藏方向的研究。E-mail: yh_cq@petrochina.com.cn

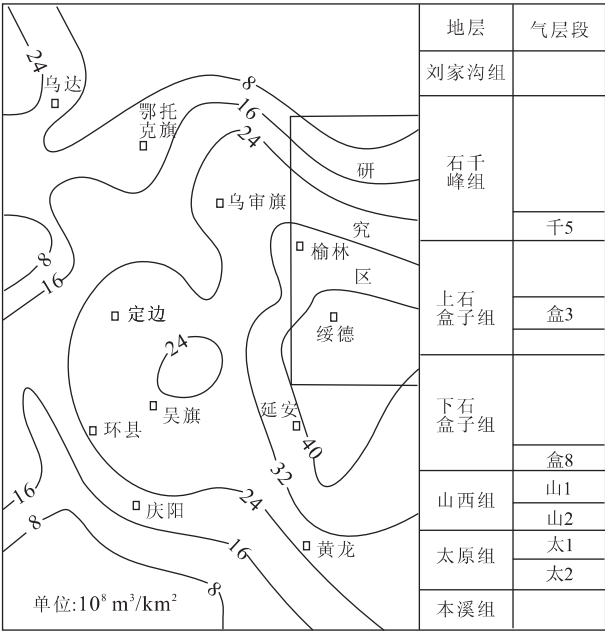


图 1 鄂尔多斯盆地上古生界生气强度及含气层位
Fig. 1 Gassource intension and gas-bearing strata of Up-
per Paleozoic in Ordos basin

利条件(赵林等,2000). 在 2 套生储盖组合之上又有上石盒子组的厚层泥岩作为上古生界气层的区域性盖层,构成了一个以太原组、山西组为源岩层,以下石盒子组砂岩为主要储集层,以上石盒子组泥岩为盖层的区域性生储盖组合. 一般认为,这套上石盒子组厚层泥岩把上古生界地层分为上、下 2 套储集体,下部为气藏形成的有利层段,上部则为气藏形成的不利层段. 尽管上古生界砂层在纵向上多层分布,在平面上互相叠置,形成立体交互式储体网络,在这个生储盖组合中上、下储层有可能由于局部封盖能力变差而相互连通,但对上石盒子组盖层的理论研究和实践证明,天然气很难穿过上石盒子组的区域性厚层泥岩在上部地层中形成气藏(闵琪等,2000). 近年来,随着天然气勘探的进一步深入,在地层抬升较大的盆地东部地区,2000 年首次在榆 17 井石千峰组地层中获得了工业性气流.

此后,又在该区先后发现了神 8 井区、盟 5 井区石千峰组气藏,从而揭开了天然气勘探领域新的篇章. 综合研究认为,该气藏形成的原因主要是下部超压地层由于超压释放形成的次生气藏. 本文从上古生界超压形成以及超压释放过程来讨论石千峰组次生气藏的形成机理和成藏模式(Chapman, 1980; Daines, 1982; Sahay and Fertl, 1988; Hunt, 1990; 刘晓峰和解习农,2001; 马启富等,2001).

1 气源及气藏特征

1.1 气源分析

鄂尔多斯盆地发育有 3 套烃源岩,即下古生海相碳酸盐岩、上古生界海陆交互相煤系地层以及中生界河湖相泥岩和煤系地层. 长期的油气勘探和研究证明,上古生界太原组、山西组以及下石盒子组气藏气源来自上古生界煤系地层. 近年来发现的石千峰组气藏,经区域地质综合研究和气源对比认为,气源同样来自上古生界煤系地层. 目前,碳、氢同位素是油气源岩对比的主要手段,从上、下地层气藏碳同位素 $\delta^{13}C$ 对比可以看出(图 2), $\delta^{13}C_1$ 、 $\delta^{13}C_2$ 、 $\delta^{13}C_3$ 都落在了煤成区,上、下气层气源都来自上古生界煤系地层,属于煤成气,从氢同位素对比也能得出相同的结果.

1.2 气藏特征

目前所发现的石千峰组气藏总体上表现为: 较低的压力和压力系数、较轻的天然气组分、较低的含气饱和度和砂体充满度、较小的气藏规模等.

盆地东部地区上石盒子组以下地层的气藏压力一般都在 20 MPa 以上,气藏之间的压力相差非常小(表 1);而石千峰组气藏压力在 15 MPa 以下,最小的只有 7.1 MPa,压力比下部气藏压力小得多,如榆 17 井下石盒子组气藏和石千峰组气藏仅相差 200 多 m,但气藏之间的压力却相差 2 倍之多(表 1),说明在气藏形成过程中经历了明显的压力释放过程. 已发现的 3 个气藏的压力不仅比下部地层气藏压力小,而且气藏相互之间的压力也相差很大. 出现这种原因主要是由于在地层抬升过程中,下部高压气藏的能量释放在时间上和空间上的不均衡性,

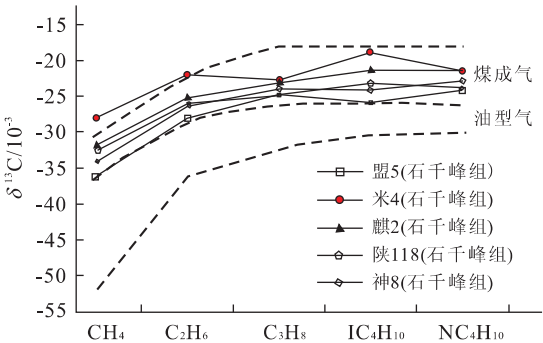


图 2 鄂尔多斯盆地上古生界气源对比
Fig. 2 Gas source contrast of Upper Paleozoic in Or-
dos basin

表 1 鄂尔多斯盆地东部上古生界压力统计

Table 1 Strata pressure of Upper Paleozoic in eastern Ordos basin

井号	层位	深度/m	原始地层压力/MPa	压力系数
榆 17	石千峰组	1 816	7. 1	0. 39
神 8	石千峰组	1 718	9. 7	0. 58
盟 5	石千峰组	1 536	15. 18	1. 0
镇川 8	下石盒子组	2 035	21. 99	1. 1
镇川 4	下石盒子组	2 080	22. 27	1. 09
榆 17	下石盒子组	2 095	21. 37	1. 04
镇川 7	下石盒子组	2 154	24. 2	1. 15
榆 17	山西组	2 168	21. 23	1. 0
镇川 2	太原组	2 256	25. 2	1. 12

以及下部地层气藏的不同组合,导致了石千峰组气藏在形成时间和空间上的多期性和气源上的多源性.

压力系数的变化和压力一样,也反映了同样的变化趋势. 从上、下地层的压力和压力系数可以发现,上、下地层应属于 2 个不同的压力系统. 上部压力系统压力系数小,变化大;而下部压力系统压力系数大,变化小.

上石盒子组和石千峰组天然气组分明显比下部地层天然气轻,甲烷含量高,乙烷以上重组分含量低,上部气藏天然气甲烷含量在 94% 以上,而下部气藏大部分在 90% 以下(表 2). 石千峰组气藏距下部地层气藏仅有 200 多 m,天然气组分差异如此之大,很难用上、下地层同期成藏来解释,结合其他地质分析,认为组分差异为不同期成藏造成的.

石千峰组下部砂岩相当发育,而且物性也好,孔隙度 10%~12%,渗透率 $2\times 10^{-3}\sim 76\times 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$,最大渗透率为 $411\times 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$,但形成的气藏规模

小,砂体充满度和含气饱和度低,这些特征不同程度地反映出气源相对不足. 鄂尔多斯盆地是气源相当充足的盆地,而且东部地区处在上古生界最大生烃中心,上部气藏气源不足说明石千峰组气藏形成比较复杂,并不是简单地天然气从烃源岩到石千峰组储层进行长期充注,而是一种短期的甚至是瞬间充注.

2 成藏过程

超压的存在是含油气盆地的普遍现象,超压与油气的生成、运移、聚集与分布有着密切的关系. 尽管上古生界地层目前处在常压状态,甚至有些地区处在欠压状态,但在地史上确实出现过超压状态,只不过随着地质历史的变迁,地层超压已经泄压(图 3). 多项研究结果表明,在早白垩世末期,从太原组到上石盒子组的生储盖组合中,生、储、盖层都处在超压状态,并形成了以奥陶系顶部的铝土岩为箱底,以上石盒子组泥岩为箱顶的高温高压巨型(盆地级)封存箱. 所以在早白垩世末期,鄂尔多斯盆地为超高压盆地. 虽然在早白垩世末生储盖都处在超压状态,但超压形成的机理各不相同.

2.1 区域性生储盖超压形成

山西组、太原组的烃源岩在侏罗世—早白垩世末进入生排气高峰期. 盆地模拟资料表明,在这阶段生成的天然气占整个烃源岩生气量的近 80%,地温梯度东部地区在 3. 8℃ 以上,压力系数高达 1. 6~1. 7,高压的产生主要是烃类生成以及在高成熟阶段液态烃大量裂解成气态烃,体积急剧膨胀,而天然气

表 2 鄂尔多斯盆地东部天然气组分分析

Table 2 Analysis of gas component in eastern Ordos basin

%

井号	层位	深度/m	甲烷	乙烷	丙烷	异丁烷	正丁烷	C ₄ 以上烃	含烃量
榆 7	千 5	2 172	97. 75	1. 39	0. 37		0. 08	0. 00	99. 58
榆 17	千 5	1 816	94. 40	1. 57	0. 31	0. 06	0. 06	0. 04	96. 44
神 3	盒 3	1 789	94. 00	0. 84	0. 06	0. 00	0. 01	0. 00	94. 91
榆 7	盒 4	2 362	95. 89	2. 15	0. 34		0. 05	0. 00	98. 51
盟 1	盒 7	2 434	89. 72	4. 43	1. 08	0. 25	0. 59	0. 12	96. 19
榆 7	盒 8	2 543	92. 57	4. 81	1. 22		0. 34	0. 01	99. 34
榆 17	盒 8	2 095	91. 16	5. 31	0. 84	0. 14	0. 14	0. 15	97. 73
盟 1	盒 8	2 478	89. 43	4. 92	1. 38	0. 24	0. 32	0. 18	96. 47
盟 1	盒 8	2 490	86. 12	4. 75	1. 21	0. 13	0. 24	0. 10	92. 55
盟 1	山 2	2 530	75. 55	4. 51	1. 13	0. 11	0. 17	0. 04	81. 51
盟 5	山 2	1 902	82. 61	0. 82	0. 26		0. 07	0. 16	83. 92
盟 5	太原组	1 940	90. 84	1. 76	0. 63		0. 11	0. 11	93. 45

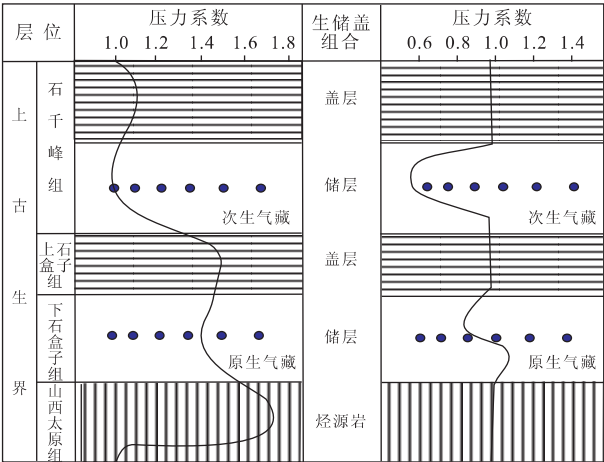


图 3 气藏与压力系数匹配关系

Fig. 3 Matched relationship between reservoir and pressure

只在与其相接触的下石盒子组砂岩以及与其同生的山西组、太原组砂岩中少量聚集,由于烃源岩有机质丰度高,生气量大,而聚集空间有限,进而在烃源岩内部形成了异常高压。

从下石盒子组、山西组和太原组储层包裹体测压数据可知(表 3),在早白垩世末的成藏压力为

45~53 MPa,压力系数为 1.3~1.5,所以这一时期储层段也处在超压状态. 储层段的超压是烃类在充注过程中通过烃源岩内的高压传递而形成的,并不是储层段内部自身产生的(Magara, 1978; Grauls and Baleix, 1994; Osborne and Swarbrick, 1997; Swarbrick and Osborne, 1998; 刘晓峰, 2002)。

在早白垩世末期,上古生界地层达到了历史最大埋深,区域性盖层上石盒子组泥岩在三叠系快速沉积和沉积厚度巨大的影响下,由于压实作用、粘土矿物脱水以及孔隙流体的热膨胀等因素,在盖层中产生了异常高压,这种高压盖层从理论和实践证明它不仅具备很强的物性封闭能力,而且具备压力封闭能力,是极好的盖层(吕延防等, 2000; 吕延防等, 1996)。

尽管异常高压已经泄压,但现在完全可以通过声波测井来识别和计算,超压大小的计算公式如下:

$$p = \rho_w (\ln 0.62 - \ln [c(t - t_{mq}) / (t_f - t_{ma})]) / 0.000599 + \rho_r \{ H - [\ln 0.62 - \ln (c(t - t_{mq}) / (t_f - t_{ma}))] / 0.000599 \} \quad (1)$$

p . 孔隙流体压力, ρ_w . 地层水密度, ρ_r . 岩柱密度, H . 为在最大埋藏时的深度, c . 为压实校正系数, t . 现今

表 3 鄂尔多斯盆地东部地区包裹体形成温度压力

Table 3 Temperature and pressure of inclusion forming in eastern Ordos basin

样品	层位	埋藏深度/m	形成阶段	形成温度/℃	形成压力/MPa	对应的成藏期次
胜 1—1	石千峰组	1 699.20	晚期	162	36.00	上部地层晚期在高温 低压下形成次生气藏
神 8—1	石千峰组	1 716.49	晚期	158	33.80	
神 8—1	石千峰组	1 719.58	晚期	162	27.60	
神 8	下石盒子组	1 716.86	晚期	160	32.20	
榆 20—2	下石盒子组	2 633.13	晚期	152	45.60	
榆 20—2	下石盒子组	2 627.01	晚期	156	38.20	下部地层晚期在高温 低压下形成原生气藏
榆 21	下石盒子组	3 045.42	晚期	167	49.30	
榆 19—1	下石盒子组	2 256.40	晚期	160	40.20	
榆 20—4	下石盒子组	2 695.62	晚期	162	38.00	
神 6—1	下石盒子组	2 039.00	晚期	161	38.60	
榆 20—6	下石盒子组	2 750.60	晚期	160	43.00	下部地层早期在次高温 高压下形成原生气藏
胜 1	下石盒子组	1 925.80	晚期	155	35.50	
神 8	下石盒子组	1 965.46	晚期	162	41.20	
神 6—2	下石盒子组	2 058.89	晚期	160	39.00	
榆 20	山西组	2 758.00	晚期	166	39.50	
榆 20	下石盒子组	2 692.68	晚期	161	35.50	下部地层早期在次高温 高压下形成原生气藏
神 8	下石盒子组	1 716.86	早期	151	50.10	
胜 1	下石盒子组	1 925.80	早期	150	48.40	
神 8	下石盒子组	1 965.46	早期	151	52.30	
神 6—2	下石盒子组	2 058.89	早期	155	50.80	
榆 20	下石盒子组	2 758.00	早期	148	53.00	
榆 20	下石盒子组	2 758.84	早期	146	50.00	
榆 20	下石盒子组	2 692.68	早期	152	45.00	

实测声波时差($\mu\text{s}/\text{m}$), t_{ma} . 岩石骨架声波时差($\mu\text{s}/\text{m}$), t_{f} . 孔隙流体声波时差($\mu\text{s}/\text{m}$).

用(1)式计算的盆地东部上石盒子组泥岩孔隙流体压力为40~55 MPa, 压力系数为1.2~1.5.

从理论计算以及包裹体测压证明区域性生储盖组合在早白垩世末处于超压状态. 从石千峰组包裹体压力、温度、组分和类型分析, 在早白垩世末处在高温常压或者近似常压状态.

2.2 超压释放与次生天然气运移

在早白垩世末, 东部地区大面积抬升, 上石盒子组泥岩变浅, 其上覆负载减小, 根据包体测温资料知(表3), 在地层抬升后地温并没有降低, 这就保证了尽管地层抬升, 但孔隙流体的压力几乎保持在最大埋深时期的异常高压状态, 当地层抬升到孔隙流体的压力大于岩石的破裂压力时, 泥岩产生破裂形成天然气向上运移的泄压通道.

任何固体的应力状态都可以用应力场的3个应力 S_1 、 S_2 和 S_3 来表示, 其中 S_1 为最大主应力, S_2 为次大主应力, S_3 为最小主应力. 一般情况下, 在一个沉积盆地中地下应力场的最大主应力 S_1 总是垂直向下的, 其数值等于地静压力; S_2 和 S_3 则是水平方向的. 如果地下岩石以弹性方式承受上覆地层载荷, 则最小主应力与最大主应力成正比, 即:

$$S_3 = \gamma * S_1 / (1 - \gamma). \quad (2)$$

式中 γ 为泊松比.

因为岩石的破裂是沿着最弱的方向进行的, 所以当超压泥岩的孔隙流体压力(p_f)超过最小主应力(S_3)与岩石的抗张强度(k)之和时, 即:

$$p_f \geq S_3 + k. \quad (3)$$

时, 岩石发生破裂, 这时将形成垂直层面方向为主的微裂缝.

因此, 泥岩开始破裂时的压力

$$p_{\text{co}} = \gamma * S_1 / (1 - \gamma) + k, \quad (4)$$

微裂缝闭合的孔隙流体压力应为

$$p < \gamma * S_1 / (1 - \gamma), \quad (5)$$

$$p < \gamma * \rho * h / (1 - \gamma). \quad (6)$$

ρ 为地层密度, h 为地层厚度. 根据测试结果, 计算过程中 γ 取0.4, ρ 取0.23 g/cm³.

根据以上公式对鄂尔多斯盆地东部的部分探井进行了计算, 总体上当地层向上抬升400~600 m时, 孔隙流体的压力大于地层破裂压力, 上石盒子组地层产生微裂隙, 形成天然气向上运移的泄压通道, 使下部处于超高压状态的天然气向上运移, 当压力

下降到闭合压力时, 泄压通道闭合. 闭合时间取决于下部孔隙流体压力、泄压速度以及地层抬升速度等综合因素.

3 成藏期次与成藏模式

3.1 成藏期次

从成因上把上古生界气藏分为2期, 即早期(第一期)和晚期(第二期), 早期成藏形成了上石盒子组以下地层中的原生气藏, 晚期成藏形成了上石盒子组以及上部地层中的次生气藏. 2期形成的气藏不论在形成机理、充注方式还是在所形成气藏的压力、组分等气藏特征方面相差非常大.

上石盒子组泥岩地层厚度不同, 埋深也各异, 以致在早白垩世末最大埋深时形成不同的孔隙流体压力; 另一方面, 在地层整体抬升时, 各地区抬升幅度不一. 由于这2个原因所形成的泄压通道在时间上有所不同. 在泥岩超压大、抬升幅度大的地区泄压通道形成时间较早, 次生气藏形成也早, 而在泥岩超压小、抬升幅度小的地区泄压通道形成时间较晚, 次生气藏形成也较晚. 所以, 次生气藏具有多期性. 目前, 由于资料较少, 很难再进一步划分次生气藏的期次.

3.2 成藏模式

石千峰组次生气藏的成藏模式具有3个过程: 一是下部高温高压原生气藏的形成过程, 二是原生气藏泄压与次生气藏的形成过程, 三是次生气藏的长时间调整过程.

3.2.1 高温高压原生气藏形成过程 在早白垩世末, 上古生界下部形成了一个盆地级高温高压封存箱, 上古生界所有的天然气生成、运移、聚集和成藏都发生在这个巨型封存箱中(图4a). 从包裹体温压以及组分资料也可以看出, 高压箱内部储层当初处在高温高压状态, 且包裹体为烃类包裹体, 表明有烃类运移; 在高压箱以上的石千峰组储层段处在高温常压状态, 且包裹体为水溶液包裹体, 表明没有烃类运移迹象. 烃源岩处在成岩后的大量生气阶段, 并以微裂缝方式排烃. 盖层处于超压状态, 对下伏气藏不仅起到了物性封闭作用, 而且还起到了压力封闭作用. 下石盒子储层中的压力系数为1.2~1.5, 不足以破坏盖层的封盖能力(岩石的自然破裂压力系数为1.96), 向上运移的天然气都聚集在区域盖层之下形成气藏. 总之, 由于气源充足、排烃压力大和封闭条件好等地质特点, 太原组、山西组和下石盒子组

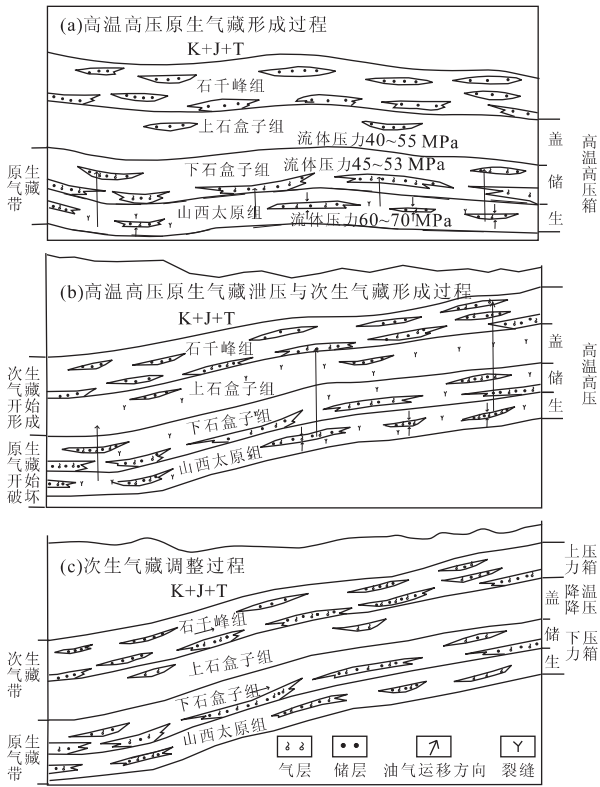


图 4 石千峰组气藏成藏模式

Fig. 4 Gas pools model of Shiqianfeng Formation

砂岩根据自身的生储盖组合关系,凡满足成藏条件的砂体都形成了高温高压气藏.在封存箱以上的石千峰组地层处在高温常压状态,而且没有天然气运移聚集发生.

3.2.2 高温高压原生气藏泄压与次生气藏的形成过程 到了晚白垩世早期,构造运动使盆地整体抬升,当抬升到某一位置时,盖层异常压力大于盖层的破裂压力,盖层产生泄压通道,下部高温高压箱泄压,天然气在上部高温常压地层中幕式充注成藏.随着天然气不断地向上运移,下部高压带压力下降,当压力下降到不足以使微裂缝开启时,泄压通道闭合,天然气在纵向上的运移结束(图 4b).根据包体测温(表 3),在地层抬升过程中,地温不仅没有降低,反而有所升高,这有 3 方面的意义:其一,保证了高温高压箱的压力基本不变,使其有足够大的压力形成泄压通道;其二,气源岩的演化并没有因地层抬升而立即终止,这说明次生气藏是用脉冲式充注方式形成的;其三,次生气藏是在高温常压状态下充注成藏,这正是石千峰组次生气藏在后期盆地整体降温后,压力系数降至常压以下的原因(近似等同于降温降压过程).泄压通道的闭合压力大于常压,也就是

说下部原生气藏在泄压后的压力也大于常压.所以,原生气藏在降温后压力系数要远远高于次生气藏.

3.2.3 次生气藏的调整过程 在泄压通道闭合后,尽管天然气在纵向上运移结束,但气藏调整并没有结束.这种调整分别是在 2 个压力系统下进行的(图 4c),次生气藏在上部低压系统中调整,而原生气藏在下部相对高压系统中进行调整.这种调整主要在横向上,天然气经过长时间的调整,到目前基本上达到了某种平衡状态.

4 结论

(1)石千峰组气藏是在地层抬升过程中,以下部高温高压原生气藏作为“气源岩”,以区域性盖层超压释放产生的微裂缝作为运移通道,从而形成的低温低压次生气藏.(2)早白垩世末期的抬升运动尽管没有大规模破坏下部原生气藏,但早期在下部地层中形成的高温高压原生气藏遭受了不同程度的泄漏,在上部地层中形成了次生气藏,盆地东部天然气分布进行了重新调整,使气藏丰度和压力降低,富集程度降低.(3)由于次生气藏在形成时间和空间上的多期性和气源上的“多源”性,造成目前气藏压力和压力系数变化大;由于在纵向上的分异运移和在横向上的分异成藏,造成次生气藏在组分上变化明显.(4)研究和勘探实践证明,鄂尔多斯盆地之所以能够形成世界级的大气田,除了具有广覆式生烃基础、充足的气藏充注时间以及良好的储集条件外,与稳定分布的区域性盖层密不可分;而区域性盖层上部的石千峰组气藏由于充注时间过短,形成的气藏规模有限.

References

Chapman, R. E., 1980. Mechanical versus thermal cause of abnormal high pore pressure in shales; Reply. *AAPG Bulletin*, 64(2): 2179—2183.

Daines, S. R., 1982. Aqua thermal pressuring and geopressure evaluation. *AAPG Bulletin*, 66: 931—939.

Fu, J. H., Duan, X. W., Xi, S. L., 2000. Characteristics of Upper Paleozoic gas reservoirs in Ordos basin. *Natural Gas Industry*, 20(6): 16—20 (in Chinese with English abstract).

Grauls, D. J., Baleix, J. M., 1994. Role of overpressures and insitu stresses in fault-controlled hydrocarbon migration—A case study. *Marine and Petroleum Geology*,

(11):734—742.

Hunt, J. M., 1990. Generation and migration of petroleum from abnormally pressured fluid compartments. *AAPG Bulletin*, 74(1):1—12.

Liu, X. F., 2002. Overpressure transfer: Concept and mode. *Experimental Petroleum Geology*, 24(6):533—536 (in Chinese with English abstract).

Liu, X. F., Xie, X. N., 2001. Overpressure relief and its implication to hydrocarbon migration and accumulation. *Geological Science and Technology Information*, 20(4):51—56.

Lü, Y. F., Fu, G., Gao, D. L., 1996. Sealing-cap research of reservoir. Petroleum Industry Press, Beijing, 60—65 (in Chinese).

Lü, Y. F., Fu, G., Zhang, F. Q., et al., 2000. Quantitative study on sealing ability of overpressure caprock. *Acta Sedimentological Sinica*, 18(3):465—469 (in Chinese).

Ma, Q. F., Chen, S. Z., Zhang, Q. M., et al., 2001. Overpressure basin and oil-gas distribution. Geological Publishing House, Beijing, 1—253 (in Chinese).

Magara, K., 1978. Compaction and fluid migration: Practical petroleum geology. Elsevier Scientific Publishing company, Amsterdam, Oxford, New York, 1—313.

Min, Q., Fu, J. H., Xi, S. L., et al., 2000. Characteristics of natural gas migration and accumulation in the Upper Paleozoic of Ordos basin. *Petroleum Exploration and Development*, 27(4):26—30 (in Chinese with English abstract).

Osborne, M. J., Swarbrick, R. E., 1997. Mechanisms for generation overpressure in sedimentary basins: A reevaluation.

AAPG Bulletin, 81(6):1023—1041.

Sahay, B., Fertl, W. H., 1988. Origin and evaluation of formation pressures. Kluwer Academic Publishers, London, 1—242.

Swarbrick, R. E., Osborne, M. J., 1998. Mechanisms that generate abnormal pressures: An overview. *AAPG, Memoir*, 70:13—43.

Zhao, L., Xia, X. Y., Dai, J. X., 2000. Major Factors controlling the enrichment of the Upper Paleozoic natural gas in the Ordos basin. *Experimental Petroleum Geology*, 22(2):136—140 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

付金华, 段晓文, 席胜利, 2000. 鄂尔多斯盆地上古生界气藏特征. 天然气工业, 20(6): 16—20.

刘晓峰, 2002. 超压传递: 概念和方式. 石油实验地质, 24(6): 533—536.

刘晓峰, 解习农, 2001. 超压释放及其对油气运移和聚集的意义. 地质科技情报, 20(4): 51—56.

吕延防, 付广, 高大岭, 1996. 油气藏封盖研究. 北京: 石油工业出版社, 60—65.

吕延防, 付广, 张发强, 等, 2000. 超压盖层封烃能力的定量研究. 沉积学报, 18(3): 465—469.

马启富, 陈斯忠, 张启明, 等, 2001. 超压盆地与油气分布. 北京: 地质出版社, 1—253.

闵琪, 付金华, 席胜利, 等, 2000. 鄂尔多斯盆地上古生界天然气运移聚集特征. 石油勘探与开发, 27(4): 26—30.

赵林, 夏新宇, 戴金星, 2000. 鄂尔多斯盆地上古生界天然气富集的主要控制因素. 石油实验地质, 22(2): 136—140.