

文章编号: 1001-6112(2010)06-0536-05

# 鄂尔多斯盆地上古生界流体压力分布与成因

王胜利<sup>1</sup>, 许化政<sup>2</sup>

(1. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 2. 中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院, 北京 100083)

**摘要:**鄂尔多斯盆地上古生界的流体压力从一个侧面反映了盆地内的天然气藏类型。深盆气表现为区域的负压异常,且随气层埋藏深度变大和煤层  $R_0$  的增大,负压程度越来越大;与构造有关的气藏,则普遍表现为静水压力或正异常压力特征。深盆气的负压特征与区域性的构造抬升剥蚀有关,负压程度的不同则受煤层成熟演化程度的控制。盆地腹部高演化程度区的煤层高生气强度和地层水的高汽化程度,使盆地腹部天然气“湿度”小,比重小,压力系数低;向盆地边缘方向随热演化程度变低,天然气“湿度”变大,比重变大,压力系数升高。深盆气区压力系数的规律性变化反映了天然气近距离运移和就地成藏的特征。

**关键词:**天然气“湿度”;构造气藏;流体压力;上古生界;深盆气藏;鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

## PRESSURE DISTRIBUTION AND GENESIS OF FLUID IN THE UPPER PALEOZOIC OF THE ORDOS BASIN

Wang Shengli<sup>1</sup>, Xu Huazheng<sup>2</sup>

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Petrochina, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The fluid pressure in the Upper Paleozoic of the Ordos Basin reflects the type of gas reservoir from one aspect. The deep gas reservoir has the negative abnormal pressure, and with rises of the buried depth and  $R_0$  value of coal layer, the negative abnormal pressure would rise correspondingly. The gas reservoir in connection with the structure shows hydrostatic pressure or positive abnormal high pressure. The negative abnormal pressure is related to the regional structure uplift denudation and the pressure is controlled by evolution degree of maturation. The high gas generation of the coal layer and high vaporization in high evolution zone caused the low nature gas moisture, low gravity and low pressure coefficient in the center of the basin. With the lower thermal evolution at the basin margin, the nature gas moisture, gravity and pressure coefficient will be higher. The regular variation of pressure coefficient in the deep gas accumulation reflects the short distance gas migration and in-situ gas reservoir formation.

**Key words:** nature gas moisture; structural gas reservoir; fluid pressure; Upper Paleozoic; deep basin gas accumulation; Ordos Basin

20 世纪 90 年代中期以来,在鄂尔多斯盆地上古生界陆续发现了苏里格庙、乌审旗、靖边、榆林等大型气田。这些气田均具有大面积含气、储层致密、异常压力、气水倒置等特点,与深盆气具有很多相似性<sup>[1-3]</sup>。本文讨论了上古生界流体压力的分布特征、压力分布的影响因素,为探讨该地区深盆气藏的发育、富集规律提供了一个新的角度。

## 1 上古生界流体压力分布特征

### 1.1 压力的垂向分布特征

图 1 为鄂尔多斯盆地上古生界流体压力—深度

关系图。图中菱形点为水层测试压力数据,数据主要来自浅于 2 000 m 的含水地层,大于 2 000 m 的数据点来自杭锦旗地区的盒八段。地层压力随深度增加而沿直线增大,各点大致在同一直线上,基本与静水压力相同,压力系数等于 1。

图 1 中三角形数据点为靖边气田上古生界的测压数据,压力系数的数据点均落在 0.92~0.97 范围内,回归曲线与静水压力线近平行,表现为低的负压异常<sup>[4]</sup>。低的负压可能与气的散失有关;由于上古生界溶蚀孔隙储层连通性较好,气藏内压力分布比较均匀,不同深度的压力系数较为统一,导

收稿日期: 2010-02-09; 修订日期: 2010-10-18。

作者简介: 王胜利(1972—),男,在读博士研究生,工程师,主要从事油田地质研究。E-mail: fiftenday@163.com。

基金项目: 国家科技重大专项“中西部重点碎屑岩领域油气富集规律与分布预测”(2008ZX05002-006)资助。

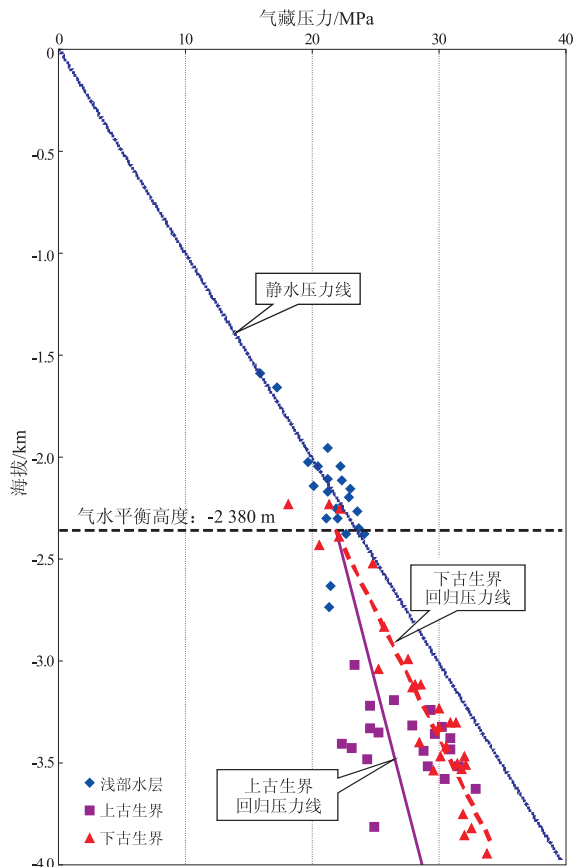


图 1 鄂尔多斯盆地古生界流体压力—深度关系

Fig. 1 Correlation of Paleozoic fluid pressure and depth in the Ordos Basin

致其回归曲线与静水压力线平行。根据压力特征判断, 下古生界气藏应为具弱边水的岩性气藏。

图 1 中方形数据点为苏里格、乌审旗、榆林气田区上古生界的测压数据点, 显示出以下特征: 1) 随气层埋藏深度变大, 压力系数愈来愈低, 最低者仅 0.73, 显示为超负压特征, 回归曲线愈来愈向左偏离静水压力线<sup>[5-7]</sup>。这可能与气层的测压层位有关, 埋深较大的太 1 段、山 2 段是主要的含煤层位, 深盆气成藏过程中生气量大, 地层水的汽化程度高, 导致甲烷气中凝析气含量低, 天然气的比重低。加之储集层致密, “封存箱”内不同深度储层间流体交换困难, 即埋深较大的太 1 段、山 2 段天然气比重低; 埋深相对浅的山 1、盒 8 段天然气中凝析气含量高, 天然气比重相对大, 因此导致深层测压数据点压力系数低和浅层压力系数偏高的特殊地质现象。2) 压力数据离散度大, 地层流体压力在 15.189~36.132 MPa 范围, 压力梯度为 0.73~0.97 MPa/hm, 平均梯度为 0.89 MPa/hm, 表现为负压和超负压的特点。

### 1.2 压力的平面分布特征

图 2 为鄂尔多斯盆地上古生界压力系数平面分布等值线图, 大致可分出 3 个压力区: 负压区、压力紊乱区和正常压力区, 它们分别与气藏的深盆气区、气水过渡区和含水区吻合<sup>[8]</sup>。

#### 1.2.1 负压区

负压区与深盆气区吻合。深盆气区的苏里格庙气田、靖边气田和乌审旗气田均为低压和超低压区, 压力系数为 0.73~1.0; 榆林气田的西部、大牛地气田南部和米脂气田的少部主要表现为低压, 压力系数为 0.82~1.0。压力系数为 0.97~1.0 的等值线大致和气田的北部边界吻合, 向气田内部, 即向盆地腹部, 地层压力由负压逐渐转为超负压, 压力系数降至 0.8 以下。

#### 1.2.2 压力紊乱区

压力紊乱区分布在盆地东部, 包括榆林气田东部和米脂气田大部, 上古生界流体以常压为主(压力系数 0.95~1.0), 也有负异常压力(0.85~0.95)和偏低的正异常压力(米脂气田洲 4—榆 8 井区, 压力系数 1.02~1.09)。压力紊乱区气水关系复杂, 位于深盆气向构造气藏的过渡部位, 钻井见水层较多<sup>[2]</sup>。从构造单元划分看, 该地区属于晋西挠折带向陕北斜坡的过渡部位, 地震(结合钻井)Tc3 反射层(石炭系太原组中部煤层)构造表明, 在宽缓的单斜背景上发育较多上古生界—中生界高角度正断层, 以及多排 NNE 走向的低缓鼻隆。鼻隆幅度约

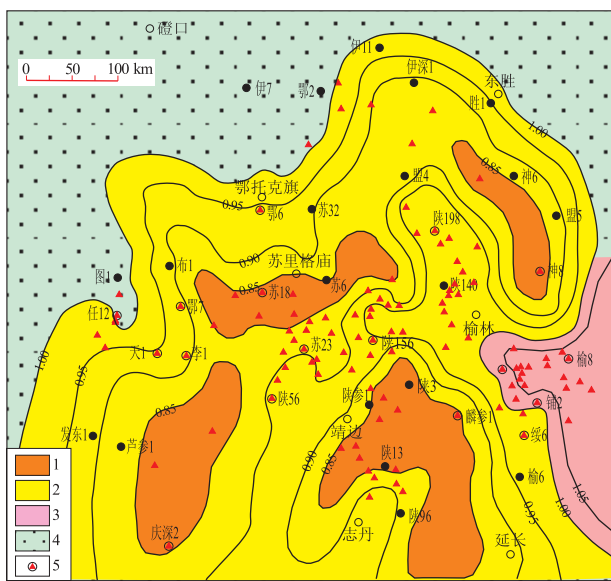


图 2 鄂尔多斯盆地上古生界压力系数平面分布等值线

1. 超负压区; 2. 负压区; 3. 压力紊乱区; 4. 正常压力区; 5. 资料点

Fig. 2 Contour map of the Upper Paleozoic pressure coefficient in the Ordos Basin

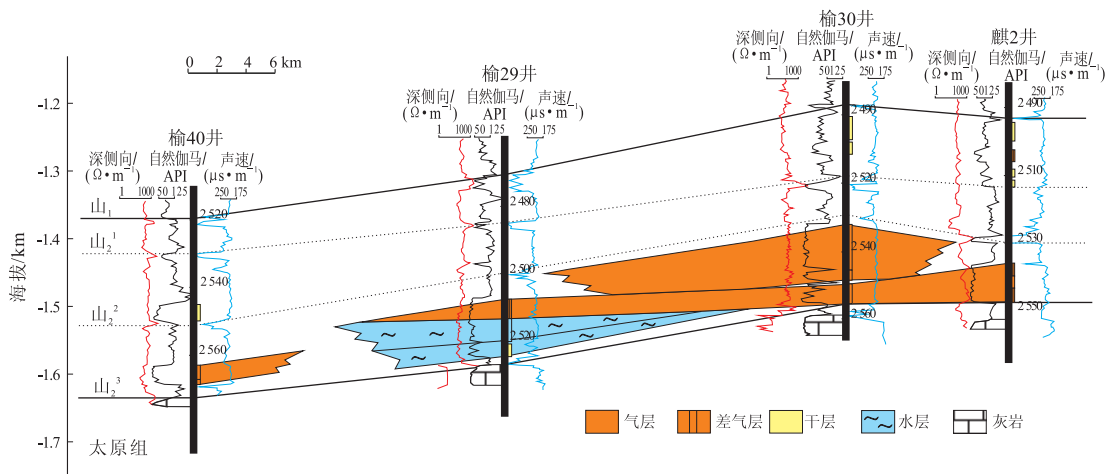


图 3 鄂尔多斯盆地压力紊乱区的构造—岩性气藏剖面

Fig. 3 Section of the structure and lithologic gas reservoir in pressure chaos area of the Ordos Basin

10 m, NNW—SSE 向宽 6~15 km, 长 15~20 km。自北而南有陕 196 井、陕 205 井、陕 142 井、陕 118 井、陕 211 井、陕 217 井 6 排鼻隆构造。大量钻探资料证实, 这种鼻隆构造对榆林气田东部和米脂气田大部的天然气分布起控制作用。以榆林气田陕 141 井块山 2 气藏为例, 陕 141 井位于陕 196 背斜的高部位, 山 2 段砂体为气层, 其西侧低部位接深盆气, 东侧低部位牛 1 井、榆 7 井钻遇边水, 应属具边底水的构造气藏。又如陕 200 井位于陕 69 背斜的东翼, 山 2 段砂层的上部含气, 下部含水, 也属具边底水的构造气藏, 榆 79 井—榆 30 井山 2 段底部(山<sub>2</sub><sup>3</sup>)段砂体处于气水过渡带上, 上倾方向为气, 下倾方向含水, 低幅度构造和河道砂体一起构成相互独立的封闭单元, 并对气水分布、压力梯度产生小范围影响(图 3)。这种构造气藏的边底水与东部地层上倾方向的地层水相互沟通, 因此表现为常压或低的正异常压力特征。

压力紊乱区呈 NNE 向带状分布, 与低幅度背斜的走向一致。该带以东属晋西挠折带构造单元, 为正常流体压力发育区(水区); 该带以西属陕北斜坡构造单元, 为负的压力异常发育区(深盆气区)。

东高西低的构造形态造成盆地东部水区地层水向地层下倾方向渗滤, 或由于构造、断层遮挡, 或由于砂体连通差、岩性致密, 使原本属于深盆气的米脂—榆林东地区出现具边底水的构造—岩性气藏, 并造成地层压力的复杂性。

另外, 盆地东部构造抬升幅度大, 上覆层剥蚀厚度大, 目的层山 2 段气层埋深浅(气层中部海拔 -1 723.65~-1 543.41 m); 而深盆气区构造抬升幅度相对小, 上覆层剥蚀厚度相对小, 山 2 段气层中部海拔深度超过 -2 300 m, 两地区气层埋深

相差 700~800 m, 也是压力紊乱区气水关系复杂、压力梯度复杂的原因之一。

### 1.2.3 正常压力区

正常压力区主要指深盆气区北部的含水区, 以及盆地东部晋西挠折带含水区。这些地区的水层和局部构造顶部的气层测试压力, 都在正常压力范围之内, 与静水柱压力一致, 压力系数等于 1。个别井测试压力系数低(如伊 12、伊深 1 井盒八段测试压力系数分别为 0.69 和 0.78), 可能受区域潜水面海拔的影响。

## 2 压力分布的影响因素

### 2.1 流体性质

与地层水不同, 天然气的最大特点是流动性强、可压缩性强。在天然气充满地层后, 气藏中的孔隙空间一般不会再发生太大的变化, 而扩散作用、构造活动、抬升剥蚀则会使天然气散失、浓度降低、地温下降。早白垩世煤系埋深超过 4 000 m, 古地温梯度达 4.15~5.5 °C/hm<sup>[9]</sup>, 包裹体均一温度高达 140~170 °C<sup>[10-11]</sup>, 不仅是煤层生气的高峰期, 也是地层水汽化的主要时期。地层中流体体积的大量增加, 地层温度的异常升高, 使流体压力系数增高至 1.4~2.2<sup>[2]</sup>。但在晚白垩世—古新世的晚燕山—早喜山构造运动中, 该地区遭受强烈剥蚀, 剥蚀厚度达 800~1 400 m<sup>[12]</sup>。抬升剥蚀使煤系埋藏变浅、上覆层负荷降低、地温梯度降低(地温梯度由早白垩世的 4.15~5.5 °C/hm 降至晚白垩世的 2.4~3.1 °C/hm)、地层温度下降、储集层孔隙膨胀及气体散失, 促使鄂尔多斯地区深盆气的气浓度降低、含气边界萎缩、“气舱”内水蒸气凝析成水和凝析水在重力作用下重新聚集成“酸点”等一

系列变化。这些变化的最终结果导致“封存箱”内流体压力大幅度下降。

在纵向上,气藏上覆的上石河子组为相对较细的岩石类型,阻止了浅部流体对深部流体的作用。在平面上,由于地层平缓,构造简单,砂体分割,岩性致密,盆地边缘的地层水也不能向盆地腹部大规模渗滤,“封存箱”内在盆地改造后再无新生流体补充,从而导致上古生界流体亏空、浓度下降,出现区域性负的压力异常。

负压异常仅出现在饱含天然气的地层中,特别是深盆气领域,因地层中不含液相的、可流动的水,天然气流体的亏空仅表现为压力系数的降低。但含底水的气藏则不同,尽管其气层中的天然气也有散失和温度下降,但底水可将其自身压力传递给气藏中的天然气,使其保持静水压力或正常压力。如杭锦旗北的什股壕气藏为常压的,米脂气田的镇川堡构造气藏为超压的。

### 2.2 构造背景

负压异常仅出现在构造简单的大型坳陷里,构造复杂或破碎度大的沉积盆地里不可能出现负压异常现象。鄂尔多斯盆地也一样,负压异常仅出现在构造简单的陕北斜坡上,构造变动相对大的天环坳陷、伊盟隆起、晋西挠折带均未见区域性负压异常现象。从盆地东西向剖面看,流体压力梯度从构造高部位向低部位逐渐降低,构造简单的陕北斜坡呈现区域性的负压力异常,且随埋藏深度加大,出现负压异常向超负压异常的顺次变化。但一旦出现构造变动,如出现褶皱或断层,尽管其幅度不大,即出现地层压力的紊乱现象,如出现洲 4—榆 8 井区的超压、陕 198—榆 6 井区的常压和神 6—神 8 井间的负压。

盆地东部的晋西挠折带构造区,地层普遍含水,又归一为静水压力区。

### 2.3 煤系 $R_o$ 。

图 4 为石盒子组气层甲烷含量与太原组镜质体反射率  $R_o$  值等值线的叠合图,从该图不难看出,该层位天然气甲烷含量总体上呈中部高两侧低的趋势,与山 2 段煤层  $R_o$  分布格局非常相似。特别是在南北方向上,南高北低的趋势相当明显,在靖边气田安塞一带甲烷含量最高达 99% 以上 ( $R_o > 2.0\%$ ),向北到乌审旗气田降低为 98% ( $R_o = 1.8\% \sim 2.0\%$ ),到乌审召进一步降低为 96%~97% ( $R_o = 1.3\% \sim 1.6\%$ ),在北部伊盟隆起杭锦旗地区最低,为 95% 左右 ( $R_o = 0.8\% \sim 1.2\%$ )。

图 5 为石盒子组气层压力系数与太原组镜质体

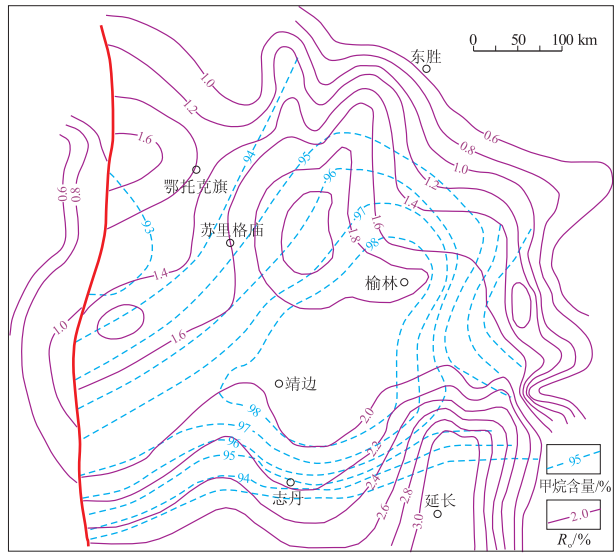


图 4 鄂尔多斯盆地石盒子组气层甲烷含量与太原组  $R_o$  值等值线叠合

Fig. 4 Overlapping contour map of methane content in Shihezi Formation and  $R_o$  in Taiyuan Formation of the Ordos Basin

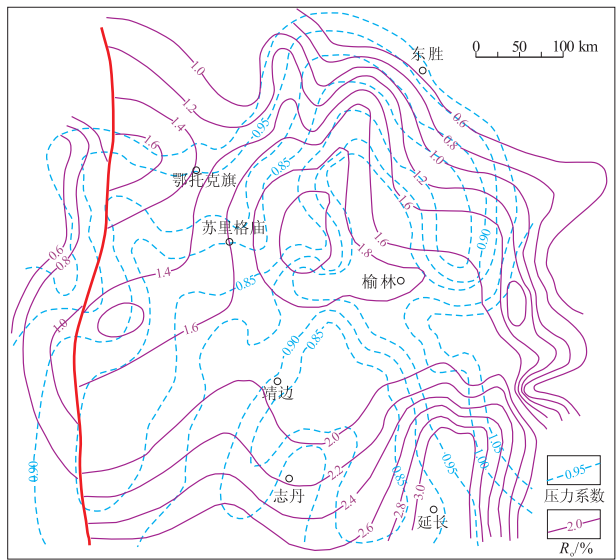


图 5 鄂尔多斯盆地石盒子组气层压力系数与太原组  $R_o$  值等值线叠合

Fig. 5 Overlapping contour map of pressure coefficient of gas zone in Shihezi Formation and  $R_o$  in Taiyuan Formation of the Ordos Basin

反射率  $R_o$  值等值线的叠合图,同样可看出二者的负相关性。在气藏的北部,压力系数为 0.95~1.0 的等值线与  $R_o$  为 1.2%~1.4% 的等值线几近平行,向气田内部,随  $R_o$  值变大,压力系数顺次降低。在  $R_o > 2.0\%$  的区域(吴堡—靖边、靖边—延长)分别出现 2 个超负压中心,压力系数低于 0.85。

$R_o$  大于 1.25% 的区域内,属广大的深盆气领域,与陕北斜坡构造单元符合,上古生界压力系数

均低于 1.0。随  $R_0$  增大,古地温增高,甲烷生成量越大,地层水“汽化”越彻底,“汽化”水在甲烷气中的浓度(或称“湿度”)则越来越小,即天然气的比重越来越小,这可能是深盆地领域内普遍负压和随成熟度增高,压力系数越来越低的地质原因。

上述特征还说明,气层中的天然气组成主要受邻近气源岩的成熟度控制,天然气侧向运移距离不长,以就近运移聚集为主。这一方面与盆地上古生界储层的致密性有关,也与陕北斜坡极低的构造倾角有关。Law<sup>[13]</sup>认为,深盆气的直接运移距离一般只有数百米或更短。

### 3 结论

1)鄂尔多斯盆地上古生界含气领域普遍偏负的流体压力特征,从侧面反映了深盆地气的特殊性。深盆地气产层纵向上距气源岩越近、平面上成熟度越高( $R_0$  越大),流体压力系数越低,一方面反映了天然气近距离运移、就地成藏的特点,另一方面反映了原始地层水汽化和汽化水被甲烷气溶解的成藏历程。

2)榆林东一米脂气田上古生界复杂的流体压力特征是深盆地气被改造的结果。晚燕山—早喜山构造运动改变了该区原来地层平缓的拗陷特征,出现地层褶皱(低幅度背斜)、高角度断层,从而发生地层水侵入、天然气向构造高部位运移的流体调整,形成具边底水的构造—岩性气藏。

3)下古生界马五段风化壳气藏经历了与上古生界深盆地气类似的埋藏改造过程,同样具有区域性负压特征。但不同的是,下古生界风化壳气藏随埋深增加,气层压力线性增大,与静水压力线近似平行,与上古生界深盆地气压力系数的影响因素截然不同。据此判断,下古生界风化壳气藏是一个有弱边水的低压气藏,气层压力降低引起的底水侵入受限。

4)负压异常仅出现在富含天然气的地层中,特别是深盆地领域。天然气扩散导致的气浓度下降表现为压力系数的降低。但含底水的气藏则不同,尽管其气层中的天然气也有散失和温度下降,但浓度降低会导致底水侵入,并将自身压力传递给气藏中的天然气,使其保持静水压力或正异常压力。

#### 参考文献:

[1] 薛会,王毅,徐波. 鄂尔多斯盆地杭锦旗探区上古生界天然气成藏机理[J]. 石油实验地质,2009,31(6):551—556.

[2] 李仲东,郝蜀民,李良,等. 鄂尔多斯盆地上古生界气藏与深盆地气藏特征对比[J]. 石油与天然气地质,2009,30(2):149—155.

[3] 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.

[4] 华宝钦,林锡祥,杨小梅. 鄂尔多斯盆地地下古生界负压气藏及运移[J]. 沉积学报,1994,11(2):105—113.

[5] 李熙哲,冉启贵,杨玉凤. 鄂尔多斯盆地上古生界盒 8 段—山西组深盆地气压力特征[J]. 天然气工业,2003,23(1):126—127.

[6] 冯乔,耿安松,徐小蓉,等. 鄂尔多斯盆地上古生界低压气藏成因[J]. 石油学报,2007,28(1):33—36.

[7] 刘宝宪,张军,黄道军,等. 鄂尔多斯盆地苏里格庙区块上古生界地层压力特征及成因分析[J]. 低渗透油气藏,2002,7(3):1—4.

[8] 李贤庆,侯浚杰. 鄂尔多斯盆地中部气田地层流体特征与天然气成藏[M]. 北京:地质出版社,2005.

[9] 任战利. 鄂尔多斯盆地热演化史与油气关系的研究[J]. 石油学报,1996,17(1):17—24.

[10] 任战利,赵重远,张军,等. 鄂尔多斯盆地古地温研究[J]. 沉积学报,1994,12(1):56—64.

[11] 胡国艺,单秀琴,李志生,等. 流体包裹体烃类组成特征及对天然气成藏示踪作用:以鄂尔多斯盆地西北部奥陶系为例[J]. 岩石学报,2005,21(5):1461—1465.

[12] 陈瑞银,罗晓蓉,陈占坤,等. 鄂尔多斯盆地中生代地层剥蚀量估算及其地质意义[J]. 地质学报,2006,80(5):685—693.

[13] LOW B W, DIKINSON W W. Conceptual model for origin of abnormally pressured gas accumulation in low permeability reservoirs[J]. AAPG Bulletin,1985,69(8):1295—1304.

(编辑 黄娟)

(上接第 535 页)

#### 参考文献:

[1] 陶奎元. 火山岩相构造学[M]. 南京:江苏科学技术出版社,1994:12—31.

[2] 邱家骧,陶奎元,赵俊磊,等. 火山岩[M]. 北京:地质出版社,1996:10—22.

[3] 谢家莹,陶奎元. 中国东南大陆中生代火山地质及火山—侵入杂岩[M]. 北京:地质出版社,1996:40—71.

[4] 刘文灿,孙善平,李家振. 大别山北麓晚侏罗世金刚台组火山岩地质及岩相构造特征[J]. 现代地质,1997,11(6):237—243.

[5] 蒙启安,门广田,张正和. 松辽盆地深层火山岩体、岩相预测方法及应用[J]. 大庆石油地质与开发,2001,20(3):21—24.

[6] 王璞瑛,陈树民,刘万洙,等. 松辽盆地火山岩相与火山岩储层的关系[J]. 石油与天然气地质,2003,24(1):18—27.

[7] 陈建文,王德发,张晓东. 松辽盆地徐家围子断陷营城组火山岩相和火山机构分析[J]. 地学前缘,2000,7(4):371—379.

[8] 谢家莹,蓝善先,张德宝,等. 运用火山地质学理论研究竹田头火山机构[J]. 火山地质与矿产,2000,21(2):87—95.

[9] 陈利. 济阳拗陷火成岩岩相分布模式研究[J]. 新疆石油学院学报,2004,16(3):13—15.

(编辑 韩 或)