

非常规天然气

深盆地形成机理与成藏阶段划分

——以鄂尔多斯盆地为例

王传刚¹, 高莉², 许化政¹, 尹伟¹, 陈新军¹, 刘春燕¹, 李松¹

(1. 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院, 北京 100083;

2. 中国石化集团华北石油局, 河南 郑州 712000)

摘要: 上古生界煤系是鄂尔多斯盆地深盆地形成的基础, 煤层在埋藏初期排出大量有机酸, 有机酸溶解铝硅酸盐矿物, 使岩石变松软、易于压实, 以及地层水中 Al^{3+} 和 Si^{2+} 的有机络合物随温度升高分解形成 SiO_2 沉淀, 造成煤系砂岩的区域致密化。晚侏罗世—早白垩世, 随埋深加大和构造热事件的发生, 鄂尔多斯盆地上古生界煤层在由贫煤向无烟煤的演化过程中, 大量生成天然气并逐渐稀释、扩散和溶解汽化的地层水, 形成只见气而不见水的深盆地。晚白垩世—古新世, 鄂尔多斯地区的不均衡抬升剥蚀和东北高西南低大型单斜构造的形成, 使二叠系煤层埋藏变浅, 地温梯度降低, 大量天然气散失, 深盆地边界萎缩, “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”, 并出现气水倒置、负压异常等一系列变化。

关键词: 鄂尔多斯盆地; 上古生界煤系; 深盆地; 气水倒置; 负压异常

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-1926(2011)01-0015-08

引用格式: 王传刚, 高莉, 许化政, 等. 深盆地形成机理与成藏阶段划分——以鄂尔多斯盆地为例[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(1): 15-22.

1 深盆地的非常规特征

上古生界煤系是鄂尔多斯盆地深盆地形成的基础^[1-3]。深盆地具有如下非常规特征: ①深盆地领域内只含气而不含水。地层水去哪里了? 过去曾解释为天然气置换了地层水, 如此广阔领域内、如此巨量的地层水完全被排出“封存箱”外, 这是无法想象和不可理解的地质现象。②深盆地领域内或呈高压异常, 或呈负压异常。高压异常深盆地压力系数可达2.0以上(如大绿河盆地、丹佛盆地, 等); 负压异常深盆地压力系数仅为0.7~0.8(如阿尔伯达盆地、圣胡安盆地、鄂尔多斯盆地等)。同样是深盆地, 为何地层压力差异如此之大? ③深盆地储集层形成于三角洲平原相或海陆交互相的含煤岩系中, 无论其现今埋深多大, 成岩程度如何, 次级沉积相(滩砂、障蔽、河道等)差别多大, 均为低孔低渗的致密砂岩。这种区域上近均质性的致密化岩性是如何形成的?

④致密砂岩中发育丰富的网状微裂隙, 导致深盆地储层孔隙度低而渗透率偏高。它们是如何形成的? ⑤深盆地分布于含煤岩系中, 含气范围与煤的演化程度有关, 一般发育在 $R_o > 1.25\%$ 的区域内, 煤层 $R_o < 1.0\%$ 的区域一般不含深盆地。⑥深盆地领域内一般不含地层水, 偶尔钻遇的“酸点”水分布零散, 具低矿化度特征, 如何理解? 只有研究深盆地的形成机理和发育过程, 才能深入解释和认识上述问题。

2 深盆地的形成演化阶段划分

现今的鄂尔多斯盆地是晚古生代—早白垩世华北盆地的一部分, 晚白垩世—第三纪, 盆地的东半部遭受挤压变形和抬升剥蚀, 并改变了鄂尔多斯盆地先期南北高、东西延伸的大型不对称拗陷盆地形态, 形成后期东北高、西南低的大型单斜^[4]。根据盆地演化历史, 鄂尔多斯盆地深盆地的形成和演化可划

收稿日期: 2010-03-20; 修回日期: 2010-05-29.

基金项目: 国家重大专项(编号: 2008ZX05002); 中国石化科技研发项目(编号: P09014)联合资助.

作者简介: 王传刚(1970-), 男, 山东莒县人, 博士, 主要从事石油地质综合研究. E-mail: wangcg@pepris.com.

分出 4 个阶段。

2.1 上古生界二叠系煤系砂岩致密化阶段

相当于煤系有机质演化的生化甲烷阶段($R_o < 0.65\%$),即从埋藏到三叠纪末的演化阶段,煤系埋深在 1 500~2 500 m 之间。这一阶段的初期($R_o = 0.25\% \sim 0.35\%$,地温为 40~50℃),褐煤阶段高含氧的Ⅲ型干酪根能产生大量的含氧羧酸。这些羧酸在压实过程中以水溶性阴离子和酚的形式从煤层中释放出来,从而使地层水中的有机酸浓度达到最高值($>10\,000\text{ mg/L}$)。铝硅酸盐是否稳定,取决于地层水中二元羧酸阴离子的浓度。由于褐煤产出的二元羧酸远比一元羧酸多,二元羧酸通过溶解砂岩中的铝硅酸盐(钾长石、岩屑、粘土等)产生大量次生孔隙,大大降低了砂岩的抗压强度,使煤系中的砂岩较其他岩系中的砂岩更易压实。由于这种反应是在煤与砂岩之间距离很近、交互成层和构造稳定、地层平缓的大背景下完成的,反应进行地较为彻底,地层水中的有机酸大量消耗,形成 Al^{3+} 和 Si^{2+} 的有机酸络合物。当地温升至 70~100℃ 时($R_o = 0.5\% \sim 0.65\%$), Al^{3+} 和 Si^{2+} 的络合物分解形成 SiO_2 沉淀,成为硅质胶结物或石英颗粒加大边。

硅质胶结作用较强是华北盆地(包括现今鄂尔多斯盆地)上古生界低孔低渗储层的主要成因,表现为:①石英次生加大缩小了孔喉;②硅质胶结物呈嵌晶式—连晶式胶结堵塞孔隙;③微晶硅质物充填溶孔,减少孔隙;④自生石英挤压高岭石集合体,使变小的孔喉难以再度开启。上古生界砂岩中的自生石英与面孔率的关系表明,当硅质含量为 8%~10% 时,面孔率仅存 2%,两者呈反比关系。同时,砂岩中长石溶解形成较多书页状高岭石,电镜下可见其压实变形厉害,反映为有机酸溶解铝硅酸盐矿物骨架及机械压实变形的结果。

煤系砂岩的碳酸盐胶解物含量低,也是埋藏初期的酸性介质所致。在埋藏环境由酸性介质转变为碱性介质以后,即使碳酸盐胶解物被地层水溶解也难以产生更多次生孔隙。因此,煤系砂岩在成岩早期即变得较为致密,并延续到高成岩阶段(图 1)。

2.2 深盆地孕育阶段

相当于煤系有机质演化的热降解阶段($R_o = 0.70\% \sim 1.25\%$),即煤岩演化的长焰煤—气煤—肥煤阶,发生在晚三叠世—中侏罗世末,煤系埋深在 3 000~3 500 m 之间。

该阶段二叠系煤层以产高分子气态烃和液态烃为主,但煤层的高吸附能力使这些高分子烃并不能

大量排出。热解分析证明,鄂尔多斯盆地二叠系山西组气煤的氢指数(I_H)可达 300~500 mg/g,说明其具有很高的生烃率,大量的吸附烃(S_1)仍被保存在煤层里;贫煤的氢指数(I_H)仅 130 mg/g 左右,无烟煤的氢指数(I_H)则小于 40 mg/g。褐煤的降解潜力可以达到每吨褐煤生成 10~100 kg 烃。核磁共振资料也说明褐煤具有生成大量液态烃的能力,因为它们含有 30%~40% 的脂肪族基团^[5]。吐哈盆地八道湾组长烟煤($R_o = 0.7\% \sim 0.9\%$)的 S_1 平均为 6.92 mg/g, $S_1 + S_2$ 为 38.7~162.4 mg/g,模拟试验获得的液态烃产率达 10~100 mg/g^[6]。

煤的孔隙总比表面积一般在 100~200 m²/g 范围内,其中 90% 以上为微孔隙所具有,而且以气煤至焦煤阶段微孔隙最为发育,煤中孔径小于 $20 \times 10^{-4} \mu\text{m}$ 的微孔孔隙体积可达 50% 左右,即埋藏条件下的气煤和焦煤具有最大吸附功能。因此,热降解阶段生成的大量液态烃并不能向外排驱。

这一阶段煤系生烃主要满足其自身吸附,烃排出量还不够大,煤层内流体含量的增多表现为其自身流体势能的增加,逐渐形成高压势体。临近煤层的砂岩以含高矿化度地层水为主,呈常压特征。自此,以上石盒子组泥岩为区域性盖层、以本溪组铝土质页岩为底部封闭层的流体封存箱内不再具备统一的势场。

2.3 深盆地形成阶段

晚侏罗世—早白垩世,二叠系煤系进入生烃高峰期,煤岩内早期液态烃和煤层干酪根共同热裂解形成以甲烷为主的气态烃。促使煤系有机质热解生烃速度加快的原因有 2 个:

(1)煤系埋深加大。早白垩世,华北盆地(包括现今鄂尔多斯盆地)拗陷速度加快,盆地范围扩大,厚度恢复表明下白垩统在东部黄河附近原始厚度约 700~800 m,向西至杭锦旗西、定边—平凉一带增厚至 1 400~1 800 m^[7],这使煤系埋深增加至 4 000~5 000 m。

(2)古大地热流值的升高。与埋深加大同步的是全盆地共同经历的构造热事件。镜质体反射率、包裹体和磷灰石裂变径迹确定的早白垩世古大地热流值达 95~118 mW/m²,导致古地温梯度由侏罗纪的小于 3.2℃/100m 升高至晚白垩世的 4.15~5.5℃/100m^[5],包裹体均一温度高达 140~170℃。上升的高古热流通过具较高热导率的下古生界碳酸岩进入低热导率的煤系,导致煤系有机质成熟度迅速升高。如从山西组到太原组不足 250 m 的地层

内,陕参 1 井 R_o 值从 1.4% 增加到 2.0%; 天 1 井 R_o 值从 1.15% 增加到 1.95%。榆绥地区 5 口井 R_o 系统测定资料表明,在 50~250 m 间隔内, R_o 增长率平均为 0.32%/100m^[8]。CH₄ 气体的产生速度在不同的有机质成熟阶段明显不同, R_o 值在 1.4% 时,CH₄ 生成量迅速增加,可占烃类总量的 50% 以上;在 R_o 值为 2.2% 时,CH₄ 的含量可达

95% 以上。高古地温一方面促使煤系有机质快速熟化,天然气大量生成;同时,地层水发生相态变化,由液态转变为气态,大大增加了二者的互溶能力。甲烷气逐渐稀释、溶解和扩散致密储层中的水蒸气,双相流转变为单相流,二者一起无孔不入地渗透到封存箱的各种空隙中,流体封存箱内逐渐被气饱和,只见气而不见水的深盆气藏自此形成。

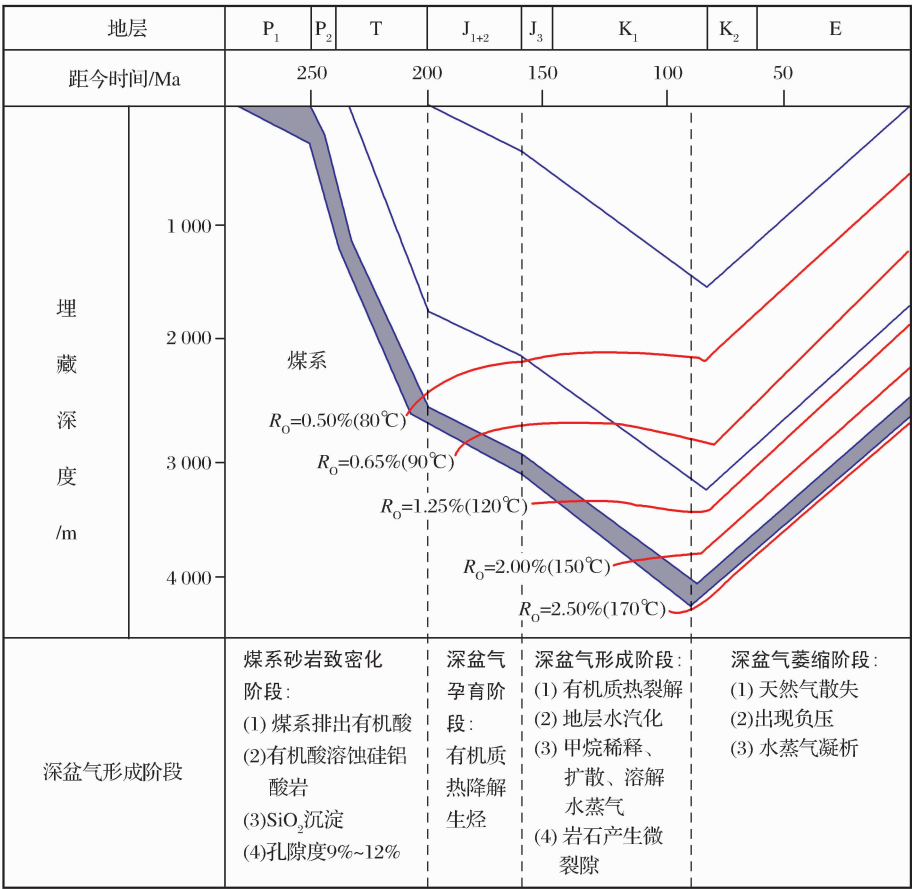


图 1 鄂尔多斯盆地二叠系煤层埋藏史与深盆气形成阶段划分

地层水的溶解度随温度上升而降低,特别是在其由液态转变为气态的过程中,水中溶解的盐类被析出,再一次使砂岩致密化。

模拟试验测得山西组煤层的产气率可达 200~300 m³/t_煤,由此计算晚侏罗世—早白垩世山西组煤层的生烃强度可达 (20~50) × 10⁸ m³/km²,排烃速率可达 7.5 × 10¹² m³/Ma^[9],生排气量大且集中;与此同时发生的地层水汽化也使地层中流体体积呈级数增加。高温、深埋和流体体积的逐渐增大,促使孔隙压力逐渐升高,形成超压气藏。超压作为流体扩散的原动力,把溶有水分子的甲烷气“泵”入到各类岩石的各类空隙中,从而实现天然气和地层水的扩散,使深盆气领域内的气体浓度逐渐趋于均匀,流

体压力趋于平衡。由于生气和聚气主要发生在 $R_o > 1.25\%$ 的范围内,所以,超压现象也主要在煤系 $R_o > 1.25\%$ 的区域内出现,超压程度与有机质的丰度、成熟度呈很好的正相关关系。当地层超压达到一定程度时,可使岩石产生不规则微裂隙,储层性能得到改善,这就是鄂尔多斯盆地上古生界煤系砂岩普遍存在的孔隙度低、而渗透率偏高的地质成因。

2.4 深盆气萎缩阶段

晚白垩世—古新世,华北盆地东部隆起褶皱并遭受剥蚀,深盆气被破坏,鄂尔多斯地区相对稳定,成为一个独立的盆地,深盆气被保存下来。这时期的鄂尔多斯盆地以整体不均匀抬升剥蚀为主,东部抬升剥蚀速度快(黄河两岸剥蚀厚度约 1 400 m),

西部抬升剥蚀幅度相对小(天环坳陷剥蚀厚度 800 m),并在抬升过程中改先期不对称坳陷盆地(早白垩世)为东北高、西南低的单斜构造。抬升剥蚀使煤系埋藏变浅、地温梯度降低(地温梯度由早白垩世的 $3.5\sim 5.5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 降至晚白垩世的 $2.4\sim 3.1^{\circ}\text{C}/100\text{m}$)、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地发生流体压力降低、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,但“气舱”尚在,“气舱”内普遍含气的本质未变,应该还是深盆地。

3 深盆地特征与地质解释

鄂尔多斯地区因剥蚀厚度大,盆地变形相对厉害,深盆地有其特殊性。现对某些特征作以下地质解释:

3.1 深盆地内“酸点”的地质解释

苏里格—榆林气田内已有 12 口井测试产地层水,它们呈散点状分布于很大的范围内。一个奇怪的地质现象是,含气区 9 口产水井水的矿化度均很低,在 $16\,546\sim 23\,802\text{ mg/L}$ 之间。含气区外的产水井水矿化度则较高,如苏里格气田北部鄂 6 井盒 8 段地层水矿化度为 $65\,339\text{ mg/L}$,鄂 7 井为 $61\,253\text{ mg/L}$;镇川堡气田东部气水过渡带镇川 2 井山 2 段地层水矿化度为 $113\,283\text{ mg/L}$;榆林气田东部气水过渡带牛 1 井在 $2\,589.8\sim 2\,592.6\text{ m}$ 段地层水矿化度为 $135\,000\text{ mg/L}$ 。含气区“酸点”水矿化度仅为含气区外地层水矿化度的 $1/3\sim 1/4$ 。尽管矿化度含量差别较大,但水型均为 CaCl_2 型,表明它们是在封闭条件下形成的(图 2)^①。

含气区地层水矿化度低的原因源于其相态的变化。在深盆地形成阶段,地层水因汽化失去盐分;在深盆地萎缩阶段,水蒸气凝析形成低矿化度地层水。在较致密的岩性里,凝析水呈水珠状弥散在甲烷中,和甲烷一起产出后水矿化度仅为 $790\sim 2\,163\text{ mg/L}$ (苏 4 井、苏 6 井、苏 20 井、桃 5 井、陕 28 井);在渗透性相对好的砂体里,凝析水在重力作用下重新聚集,形成“酸点”。凝析水在聚集过程中重新“俘获”地层中的盐离子,增加自身含盐度。凝析水随埋藏时间长短不同和运移距离不同,重新聚集形成的“酸点”水矿化度也不同,但与常规地层水相比,因埋藏时间短和运移距离有限,“酸点”水的矿化度远低于气藏外同层位正常地层水矿化度,但水型均为 CaCl_2 型。

利用测井曲线并不能有效识别“酸点”水,储集层

致密和水的矿化度低常使“酸点”水层具高阻特征。

榆林气田东部牛 1 井区,镇川堡气田镇川 2 井、镇川 7 井区,上覆盖层已剥蚀至三叠系,目的层太原组现今埋深仅 2 200 余米;井区周围发育较多断层,且具低幅度鼻隆构造,说明该地区构造活动较活跃,深盆地被改造的较厉害,牛 1 井、镇川 2、镇川 7 井的高地层水矿化度反映它们与气田外的常规地层水有沟通。

3.2 深盆地压力特征的地质解释

晚白垩世—早第三纪的剥蚀卸载,必然会引起封闭压力的降低和天然气的大量散失,并逐渐使深盆地天然气压力降低到区域静水压力之下,从而使早白垩世的超压气藏演变成现今的负压气藏。压力的降低幅度取决于剥蚀卸载的幅度。大绿河盆地、丹佛盆地因后期剥蚀厚度小,深盆地的压力特征仍保持着深盆地形成阶段的超压特征,如瓦腾贝格气田压力系数达 2.12。阿尔伯达盆地、圣胡安盆地因后期剥蚀厚度较大,深盆地范围内的各气藏均表现为负压或超负压(压力系数 < 0.8)^[10]。由深盆地形成阶段的高温高压向低温负压的演变过程中,因剥蚀厚度不同或地质环境不同,而形成气藏压力不同的现象就不难理解了。压力降低的程度,取决于上覆地层剥蚀厚度的大小、地温降低的程度。鄂尔多斯盆地后期剥蚀厚度较大且分布不均,地温降低也不均匀,靠近盆地边缘构造变动较大,导致气藏压力分布也较为复杂(图 3)^[11],大致如下:

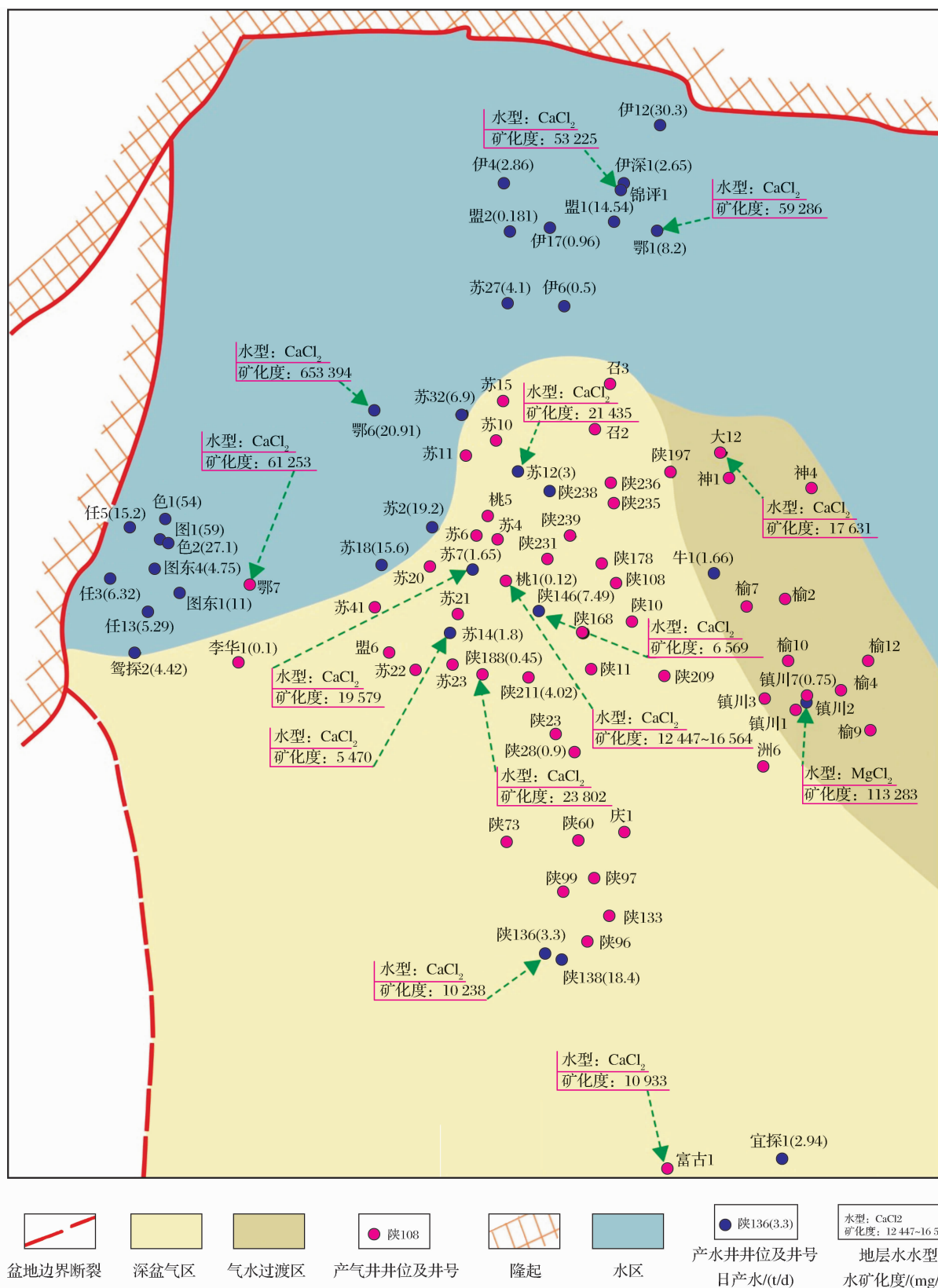
苏里格气田:整体低于静水压力。盒 8 气藏压力系数在 $0.73\sim 0.93$ 之间;山 1 气藏压力系数在 $0.85\sim 0.96$ 之间。压力分布的总趋势是剥蚀厚度相对小的气藏中心区压力系数低,向北、北东方向随盒 8 段埋藏变浅压力系数升高并逐渐接近 1.0,至任 12 井—鄂 6 井—鄂 2 井一线以外的常规水区为常压区。

榆林气田:整体以低压为主,压力系数为 $0.9\sim 1.0$,东部气水过渡带出现常压(牛 1 井区、镇川堡区)。

靖边和乌审旗气田:处于构造下倾方向,主要为低压,压力系数 < 0.95 。

米脂气田:以常压为主。西部靠盆地一侧为低压区,压力系数为 $0.95\sim 1.0$;东部镇川 2 井—铺 2 井以东出现偏高压,压力系数为 $1.05\sim 1.10$;中间地区为常压。东区压力系数的正异常可能与其所处构造部位有关(靠近东部露头区)。

① 水型与矿化度数据部分来自李贤庆等著. 鄂尔多斯盆地中部气田地层流体特征与天然气成藏. 地质出版社, 2005.



3.3 深盆气圈闭条件的地质解释

很难用“圈闭”一词形容深盆气的保存条件。深盆气实际上是由各种岩石组成的含气共同体,而不

是一个又一个独立的岩性气藏。含气领域内圈闭模糊、储盖不分,稳定的构造、平缓的倾角、致密的岩性滞缓了天然气的流动,分散的气柱压力降低了天然

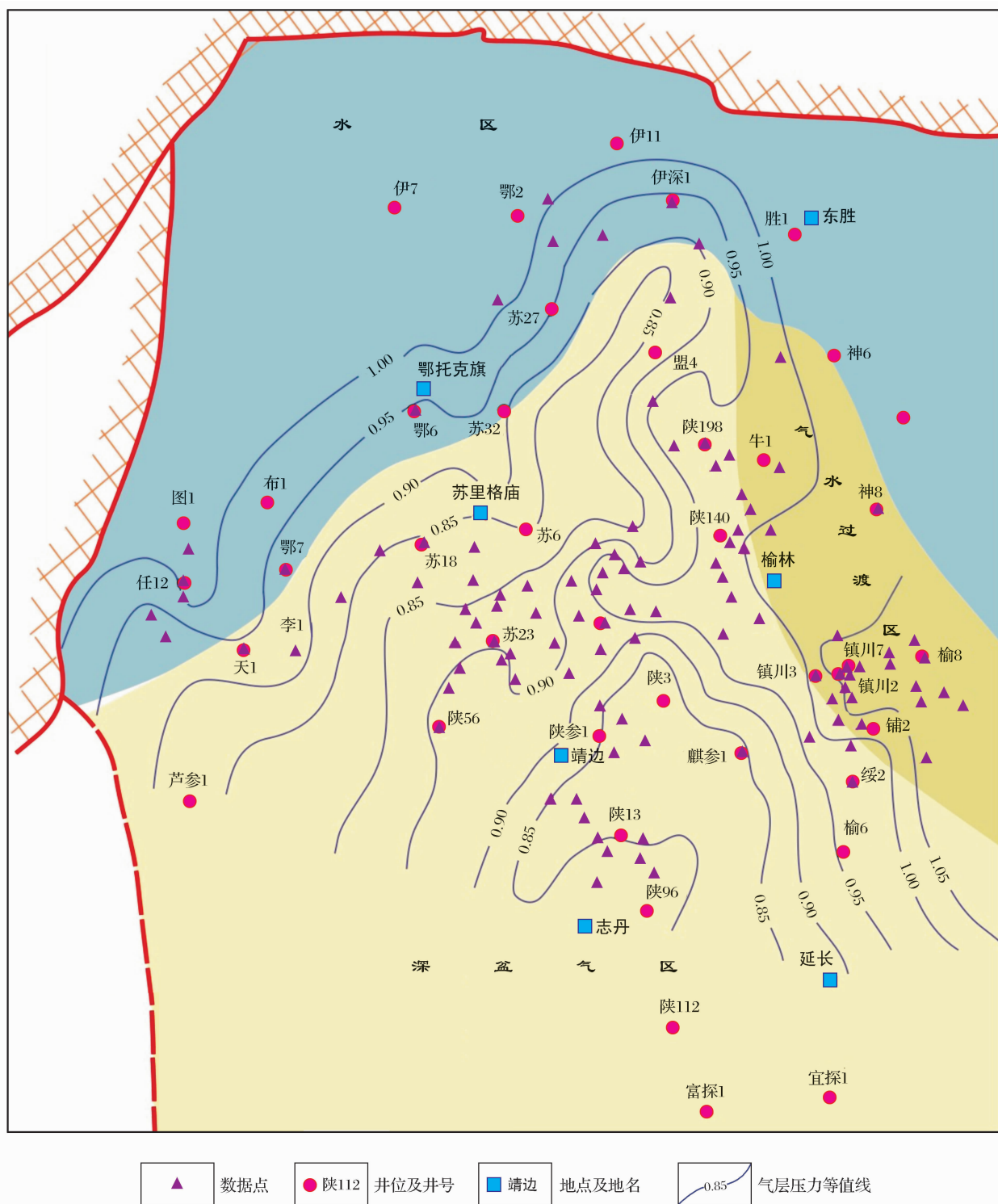


图3 鄂尔多斯盆地盒8段地层压力系数等值线(据马新华等^[11], 2002, 修改)

气的突破能力,煤层在高演化阶段的大量生气和在压力降低时解析煤层气使深盆气长盛不衰。如此之大面积的深盆气藏不可能仅依靠“岩性”或“水封”圈闭天然气。

阿尔伯达盆地艾尔姆华士下白垩统 Cadomin 层深盆气的气水倒置是特殊地质条件下形成的特殊地

质现象,含水致密砂岩形成的水锁加强了其对下倾方向气流体的阻挡作用。Masters 在评价这个圈闭时说:已经有大量的天然气通过这个“窗口”扩散了。

苏里格气田探明天然气主要分布在伊8井、苏6井、苏26井以南的盒8段三角洲平原分流河道体系中,以北地层上倾方向为冲积扇沉积,冲积平原相

的砂质砾岩渗透率极低,地层条件下通常小于 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}$,由此形成对下倾方向深盆气的封堵。伊盟隆起区大量的油气显示属于自生自储,不可能是深盆地领域散失的天然气。

尽管如此,深盆地总有个边界,含气边缘气水过渡带的岩性变化也应当起着辅助性的圈闭作用。鄂尔多斯盆地北部伊盟隆起是盆地沉积的物源,上古生界、中生界各地层均依次自南向北超覆,其间出现三角洲平原辫状河道砂砾岩向冲积扇砾岩的过渡,宽缓的岩性过渡区致密砂岩在饱和水的条件下,产生较大

的毛细管阻力,对下倾方向的气层有封堵作用。

盆地东部地区,强烈抬升形成晋西挠折带,破坏了该区深盆地。盆地向西地层下倾方向,构造逐渐稳定,气水过渡带移至米脂地区山2段。再往西,除山2段深盆地逐渐稳定外,盒8段气藏也开始出现。至榆林、靖边地区,稳定分布着太原—山2段—盒8段各期气藏,气层累计厚度逐渐加大。除构造稳定、岩性致密的主体因素外,自北而南条带状分布的间湾相泥岩沉积(与南北向三角洲河道砂岩平行),也为深盆气的保存做出了贡献(图4)。

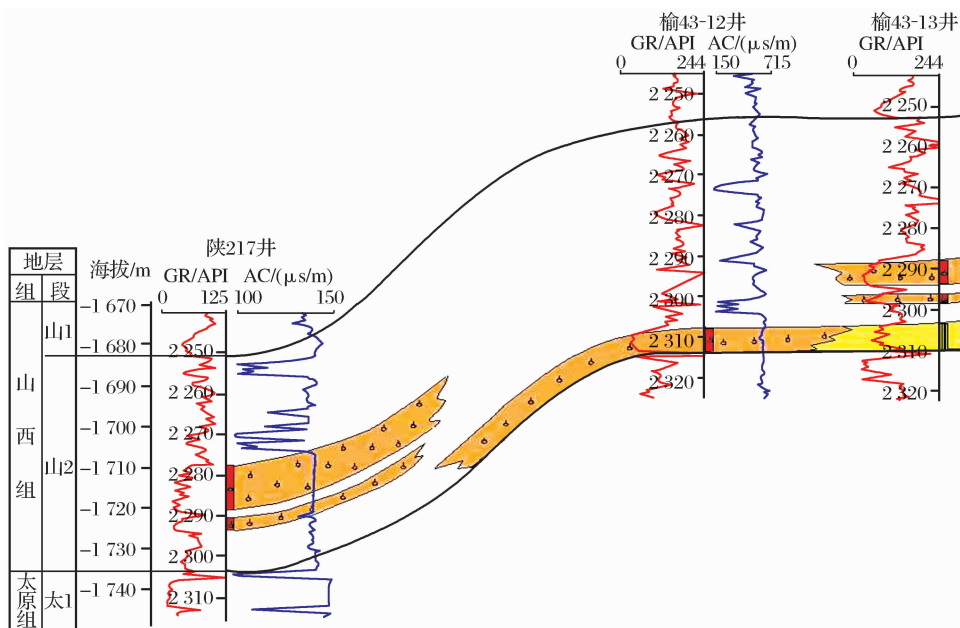


图4 榆林区山2段三角洲河道砂岩与间湾相泥岩分布特征^[12]

4 结论

(1)上古生界二叠系煤系的存在是鄂尔多斯盆地深盆地形成的基础。二叠系煤层在埋藏初期排出大量有机酸,有机酸溶解临近砂岩中的铝硅酸盐矿物(长石、岩屑、泥质等),使岩石变松软易于压实;地层水中 Al^{3+} 和 Si^{2+} 的有机络合物性质不稳定,随温度变高分解形成 SiO_2 沉淀,成为硅质胶结物或石英颗粒加大边,使煤系砂岩在埋藏初期即变致密,这为深盆气的形成奠定了基础。

(2)深盆地甲烷含量大于97%,主要形成于 $R_0 > 1.25\%$ 的有机质热裂解演化阶段。在由贫煤向无烟煤的演化过程中,大量生成的甲烷气逐渐稀释、扩散和溶解汽化的地层水,形成只见气而不见水的深盆地。固态的有机质和液态的地层水气化后,其体积呈级数增加,高温环境中形成超压气藏。超压促使气体扩散,促进解理面、层间面、小型剥蚀面等空

隙间的沟通,同时产生大量微裂隙,使深盆地压力、浓度逐渐统一。

(3)鄂尔多斯盆地由中生代华北盆地改造演化而来,中生代的华北深盆地范围包括现今的沁水盆地、济源—洛阳等地区。晚白垩世—古新世,华北盆地东部隆起褶皱并遭受剥蚀,深盆地被破坏;鄂尔多斯地区地块稳定,成为一个独立的盆地,深盆地被保存下来,但抬升剥蚀使煤系埋藏变浅、地层温度下降、储集层孔隙膨胀及气体散失,促使发生流体压力降低、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,并出现气水倒置、负压异常等特殊地质现象,这些都是深盆地演化过程中出现的阶段性特征,不是深盆地的共性。

(4)依深盆地形成保存机理分析,鄂尔多斯盆地大多数地区的深盆地尚未勘探或确认,长庆油田研究、勘探、开发深盆地的先进技术尚未推广,推广这

些新技术将会快速出现深盆气勘探的新局面。

参考文献:

- [1] Wang Hongyan, Zhang Jianbo, Chen Mengjin, *et al.* The relationship of coalbed methane & deep basin gas in Ordos basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2003, 14(6): 453-455. [王红岩, 张建博, 陈孟晋, 等. 鄂尔多斯盆地煤层气与深盆气的关系 [J]. *天然气地球科学*, 2003, 14(6): 453-455.]
- [2] Zhang Jinliang, Zhang Jingong, Hong Feng, *et al.* Geologic controls of deep gas accumulation in the lower Permian sequence of the Ordos basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2005, 16(4): 526-534. [张金亮, 张金功, 洪峰, 等. 鄂尔多斯盆地地下二叠统深盆气藏形成的地质条件 [J]. *天然气地球科学*, 2005, 16(4): 526-534.]
- [3] Chang Xiangchun, Wang Mingzhen. Unconventional gas system of upper Paleozoic in Ordos basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2005, 16(6): 732-735. [常象春, 王明镇. 鄂尔多斯盆地上古生界非常规含气系统 [J]. *天然气地球科学*, 2005, 16(6): 732-735.]
- [4] Petroleum Geology Composing group of Changqing Oil Company. *Petroleum Geology of China: Ordos Basin Petroliferous Province*; Volum 12 [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1987. [长庆油田石油地质志编写组. *中国石油地质志*; 卷 12 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1987.]
- [5] Translated by Mei Bowen, revised by Yang Wenkuan. *Reservoir Geochemistry* [C]. Xi'an: Northwest University Press, 1991. [梅博文译, 杨文宽审. *储层地球化学* (译文集) [C]. 西安: 西北大学出版社, 1991.]
- [6] Translated by Zhu Yangming, revised by Yang Wenkuan. *Organic and Inorganic Interactions and the Sandstone Diagenesis*, (from: AAPG Bulletin, 1989, 73: 1-23) [M]. Xi'an: Northwest University Press, 1991. [朱杨明译, 杨文宽审. *有机-无机相互作用和砂岩成岩作用* (原载 AAPG Bulletin, 1989, 73: 1-23) [M]. 西安: 西北大学出版社, 1991.]
- [7] Chen Ruiyin, Luo Xiaorong, Chen Zhankun, *et al.* Estimation of denudation thickness of mesozoic strata in the Ordos basin and its geological significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(5): 685-693. [陈瑞银, 罗晓容, 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.]
- [8] Ren Zhanli. Thermal history and oil-gas accumulation in the Ordos basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1996, 17(1): 17-24. [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.]
- [9] Yang Junjie, Pei Xigu. *Natural Gas Geology in China: Volum 4* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996. [杨俊杰, 裴锡古. *中国天然气地质学*: 卷四 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1996.]
- [10] Zhang Jinchuan, Jin Zhijun. Deep basin gas pool and its elementary features in rock region, America [J]. *Oil & Gas Prospecting Abroad*, 2000, 12(6): 651-658. [张金川, 金之钧. 美国落基山地区深盆气及其基本特征 [J]. *国外油气勘探*, 2000, 12(6): 651-658.]
- [11] Ma Xinhua, Wang Tao, Pang Xiongqi, *et al.* Pressure features and trapping mechanism of deep basin gas pool [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2002, 2(5): 23-27. [马新华, 王涛, 庞雄奇, 等. 深盆气藏的压力特征及成因机理 [J]. *石油学报*, 2002, 2(5): 23-27.]
- [12] He Zixin. *Evolution and Oil-gas of Ordos Basin* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003. [何自新. *鄂尔多斯盆地演化与油气* [M]. 北京: 石油工业出版社, 2003.]

Forming Mechanism and Evolution Stages Division of Deep Basin Gas Accumulation: Taking Ordos Basin as an Example

WANG Chuan-gang¹, GAO Li², XU Hua-zheng¹, YIN Wei¹, CHEN Xin-jun¹, LIU Chun-yan¹, LI Song¹

(1. *Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China;*

2. *SINOPEC Huabei Oilfield Company, Zhengzhou 712000, China*)

Abstract: Coal-bearing series, which expel bulk of organic acid during early burial stages is the base of deep basin gas accumulation. Organic acid would dissolve aluminum silicate minerals and cause rocks loosen and easy to be compacted. Furthermore, with the increasing of temperature, organic complex with Al^{3+} and Si^{2+} in from formation water decomposes into silica sediments causing high density of regional coal series sandstones. With the increasing of buried depth from late Jurassic to early Cretaceous, accompanied with the thermal event and the conversion procedure from lean coal to anthracite, mass gas gradually diluted, diffused, and dissolved formation water, and ultimately forming deep basin gas accumulation. Disproportion ablation and the formation of the massive southward monocline from late Cretaceous to Palaeocene Epoch caused the shallow buried depth of Permian coal series and the geothermal gradient decline. Deep basin gas borderline decreases because of the dissipation of bulk gas. Water vapour in "gas bin" re-condensated to water and condensate water, named "acid point", which present gas/water inversion and abnormal pressure features.

Key words: Ordos basin; Neopaleozoic coal-bearing series; Deep basin gas; Gas/water inversion; Underbalance abnormal.