

# 鄂尔多斯盆地南部上古生界泥岩盖层封闭性能评价

石鸿翠<sup>1</sup>,江晨曦<sup>2</sup>,孙美静<sup>1</sup>,廖宗宝<sup>3</sup>,程国秀<sup>1</sup>,齐同胜<sup>1</sup>

(1.中国地质大学(武汉)构造与油气资源教育部重点实验室,湖北武汉 430074; 2.浙江大学地球科学系,浙江杭州 310027; 3.中海油研究总院,北京 100027)

**摘要:**根据钻井、测井、岩心分析、地层埋藏史、古地温等资料,研究了鄂尔多斯盆地南部上古生界泥岩的空间展布范围、成岩与封闭性演化模式及孔隙度、渗透率、突破压力分布特征。在此基础上,提出相应的评价标准和评价方法,并对其封闭性能进行综合评价。结果表明:鄂尔多斯盆地南部石千峰组泥岩 I 类盖层发育,封闭性能最好,特别是在镇探1、黄深1井区,综合评价权值达到3.5;上石盒子组泥岩发育异常高压,IV类盖层分布广泛,物性封闭性能最差;下石盒子组泥岩在研究区的西部和南部为IV类盖层,北东方向发育 I 类、II类盖层;山西组达到晚成岩C阶段的泥岩为 III类、IV类盖层,晚成岩B阶段的泥岩发育 I 类、II类盖层。工业性气流井分布在盖层封闭性能好的区域内,封闭性能评价结果与勘探实践相匹配。

**关键词:**泥岩 盖层封闭性评价 突破压力 异常高压 成岩阶段 上古生界 鄂尔多斯盆地南部

中图分类号:TE112.25

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2015)02-0009-08

## Sealing capability assessment of mudstone caprock in the Upper Paleozoic, south Ordos Basin

Shi Hongcui<sup>1</sup>, Jiang Chenxi<sup>2</sup>, Sun Meijing<sup>1</sup>, Liao Zongbao<sup>3</sup>, Cheng Guoxiu<sup>1</sup>, Qi Tongsheng<sup>1</sup>

(1.Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources, Ministry of Education, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan City, Hubei Province, 430074, China; 2.Department of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou City, Zhejiang Province, 310027, China; 3.CNOOC Research Institute, Beijing City, 100027, China)

**Abstract:** According to basin drilling data, logging, core analysis, burial history, paleotemperature, etc., the spatial distribution, diagenesis and sealing capability evolution mode, porosity, permeability and breakthrough pressures of mudstone in the Upper Paleozoic of south Ordos Basin were studied. And based on that, corresponding evaluation standard and method were proposed to make a comprehensive assessment of the sealing capability of mudstone in the Upper Paleozoic. The obtained results show that: class I mudstone caprock in the Shiqianfeng Formation developed with the best sealing capability in the south Ordos Basin, especially in well areas of Zhentan1 and Huangshen1 where the comprehensive evolution weighted value reaches 3.5; abnormal high pressures develop in the Upper Shihezi Formation, where class IV caprock distributes widely with the worst physical sealing capability. Class IV mudstone caprock is developed in the Lower Shihezi Formation in the west and the south of the research area and class I and class II caprock are in the northeast. For mudstone in the Shanxi Formation, those at the late diagenesis C stage is class III or class IV caprock and those at the late diagenesis B stage is class I or class II caprock. Industrial gas flow wells distribute in areas with good caprock sealing capability. The comprehensive evaluation results coincide with the exploration practice, which can provide references for gas exploration of the south area.

**Key words:** mudstone; sealing capability assessment; breakthrough pressures; abnormal high pressures; diagenesis stage; the Upper Paleozoic; south Ordos Basin

鄂尔多斯盆地是中国第2大含气盆地,目前上古生界的气田多集中在盆地北部,如苏里格气田、

乌审旗气田、榆林气田、大牛地气田、米脂气田、神木气藏等<sup>[1]</sup>。南部地区在富古1、富古4及耀参1井

收稿日期:2015-01-15。

作者简介:石鸿翠(1988—),女,江苏徐州人,在读硕士研究生,从事沉积学及盖层测井解释方面的研究。联系电话:13419617311, E-mail: hongcui\_shi@163.com。

基金项目:国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”(2011ZX05005)。

奥陶系见天然气流,在建1、鄂铜1井奥陶系见气显示,仅在镇探1井上古生界获工业性气流。因此,加强南部地区的勘探具有重要意义。盖层是烃类聚集的必要条件,其封闭性能直接影响气藏的形成、规模及其保存条件<sup>[2]</sup>。尽管前人对鄂尔多斯盆地做了大量研究<sup>[1,3-12]</sup>,但主要是关于盆地构造演化、沉积相与储层及天然气成藏特征方面,对盆地盖层封闭性能与油气聚集关系的研究很少,而对盆地南部泥岩盖层封闭性能的系统评价至今仍是空白。为此,笔者尝试从盖层的宏观发育特征、成岩及封闭性演化、微观封闭能力3个方面进行分析并提出相应的分类评价标准,对鄂尔多斯盆地南部山西组、上石盒子组、下石盒子组及石千峰组泥岩封闭性能进行评价,以期为上古生界的天然气勘探提供参考和依据。

## 1 区域地质概况

鄂尔多斯盆地位于华北地台西缘,是一个大型多旋回克拉通盆地,在太古代陆核地块的基础上,经历了中晚元古代克拉通拗拉谷、早古生代浅海台地、晚古生代滨海平原、中生代内陆盆地、新生代周边断陷5个构造—沉积演化阶段<sup>[4,13]</sup>。研究区位于鄂尔多斯盆地南部,东侧与晋西挠褶带相接,西侧与天环拗陷相连,涉及伊陕斜坡和渭北隆起2个构造单元。

在早古生代陆表海沉积后,研究区受加里东运动影响而隆升,遭受约140 Ma的风化剥蚀。晚石炭世进入海陆交互阶段,沉积了含煤碎屑岩及灰岩、泥灰岩建造,形成中上石炭统海相碳酸盐岩气源岩、本溪组古风化壳区域盖层和太原组局部盖层;早二叠世山西组沉积时期海水退出,发育河湖相含煤建造和三角洲沉积,形成上古生界的石炭系—二叠系煤系气源岩和良好的区域盖层。早二叠世末期北部地区隆升,南北差异升降加剧,南部地区湖侵范围增大,发育辫状河、三角洲和稳定的湖泊相泥岩沉积<sup>[11]</sup>。泥岩分布面积广、厚度大、横向连续性好、岩性纯,形成石盒子组和石千峰组重要的区域性盖层。南部地区上古生界具有良好的烃源条件及储盖组合,勘探潜力巨大。

## 2 宏观评价参数

### 2.1 厚度

盖层厚度是决定其宏观展布范围的重要指

标。厚度越大,表明沉积环境在区域上越稳定,泥岩被断裂破坏的可能性越小<sup>[14]</sup>,微渗漏空间不易沟通,从而抑制了烃类的运移散失速率,使其在漫长的地质演化过程中得以聚集保存。鄂尔多斯盆地自早二叠世进入南北隆坳分区的演化阶段,发育陆相湖泊—三角洲沉积体系,泥岩在上古生界各层系中广泛分布,但厚度有一些差别(图1)。山西组( $P_{1s}$ )泥岩累积厚度最小,一般小于100 m,北厚南薄。下石盒子组( $P_{1x}$ )泥岩累积厚度约为40~120 m,在庆阳—富县—宜川一线以北厚度较大,以南厚度较小。上石盒子组( $P_{1s}$ )沉积时期,厚层泥岩的分布范围向研究区的西部和南部扩展,普遍大于65 m,较薄泥岩分布在彬县—铜川—富县—宜川一线以南及以东地区。石千峰组( $P_{2sh}$ )沉积时期,南北差异升降加剧,南部湖盆面积更加广泛,泥岩厚度加大,最大可达200 m,其中富县、延安、铜川及宜川地区泥岩厚度均在135 m以上。从山西组到石千峰组,泥岩累积厚度高值由研究区的北部向西部、南部和东部迁移,厚度分布格局由南北差异变为东西差异,这可能与早二叠世秦岭微板块向华北板块由东向西聚俯冲及晚二叠世西缘贺兰拗拉槽萎缩聚敛有关。

### 2.2 成岩阶段与封闭性演化

成岩作用控制着孔隙度、比表面等参数的变化,影响烃类演化、粘土矿物组成和排列方式,与泥岩封闭性密切相关。通过分析盆地地层埋藏史、热演化史、孔隙度演化史,并参照前人对盆地成岩演化序列及泥岩封闭性演化的研究<sup>[3,15-18]</sup>,归纳了鄂尔多斯盆地南部上古生界泥岩成岩阶段与封闭性演化模式(图2)。早成岩A阶段地层埋深小于900 m,孔隙度大于20%,基本上不具备毛细管封闭能力。进入晚成岩A<sub>1</sub>阶段,泥岩处于固结状态,孔隙度降低到10%以下,伊蒙混层中蒙脱石含量约为35%~50%,除具有较强的毛细管阻力外又兼备很强的塑性与膨胀性,封闭性最好。晚成岩A<sub>2</sub>亚段,伊利石含量进一步增加,同时蒙脱石分解产生的镁、铁离子促进高岭石向绿泥石转化,绿泥石含量增加,泥岩的膨胀性与塑性减弱,封闭性能降低。晚成岩B阶段开始,古地温大于170℃,镜质组反射率( $R_o$ )大于1.3%,泥岩进入高演化阶段。传统研究认为,泥岩在晚成岩A<sub>2</sub>期以后趋于致密化和脆化,封闭性能变差。然而,油气勘探实践证明,高演化泥岩仍可以成为气藏的有效盖层<sup>[19-20]</sup>。不少学者通过实验证明<sup>[21-22]</sup>,随着围压增加,岩石的塑性变形阶段增长,泥岩在高温高压情况下,不是塑性降低,而是向塑

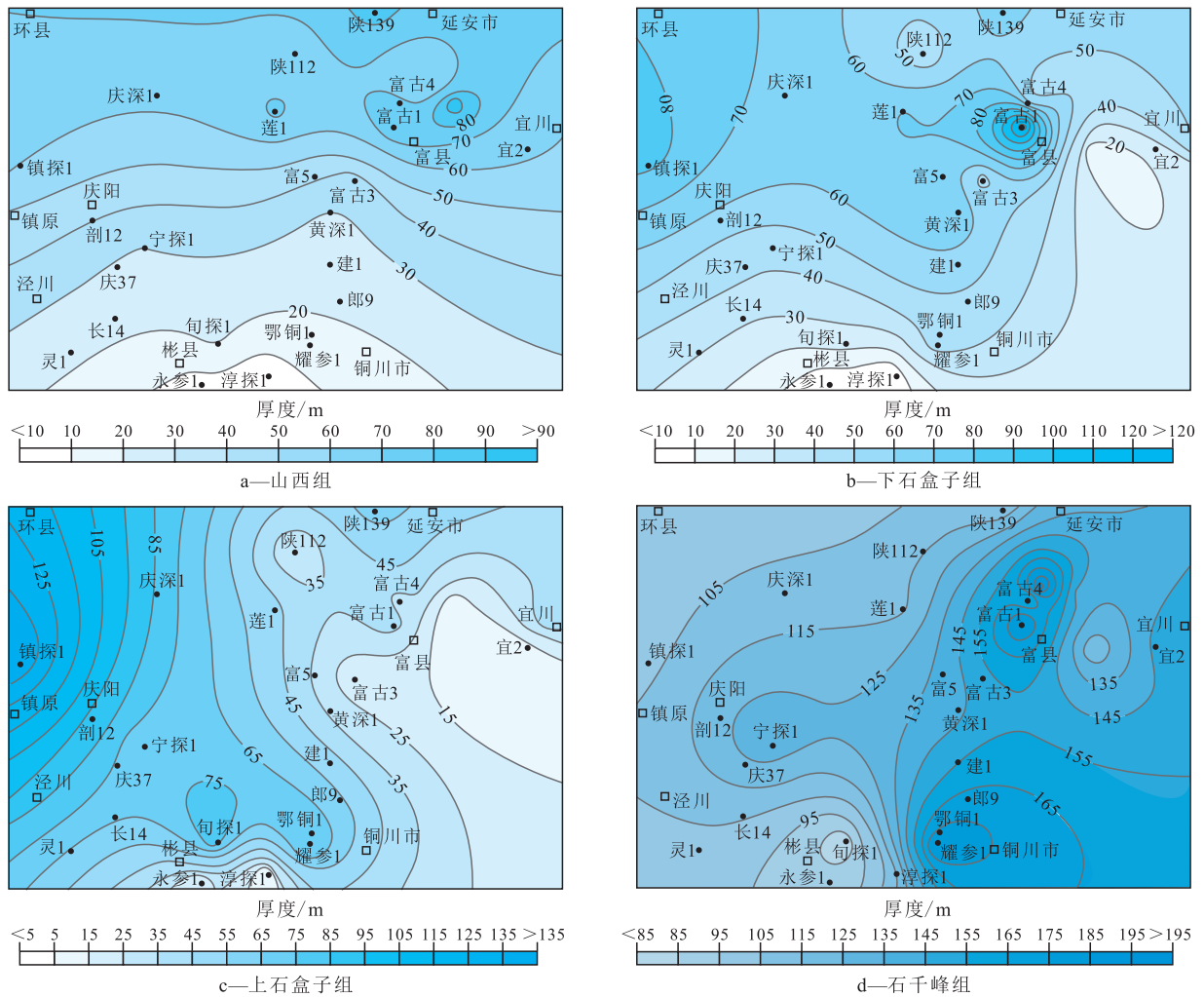


图1 鄂尔多斯盆地南部泥岩厚度等值线分布

Fig.1 The contour maps of mudstone thickness in south Ordos Basin

成岩阶段	埋深/m	温度/°C	$R_o$ , %	I/S中S含量, %	绿泥石	高岭石	烃类演化	$\phi$ , %	固结程度	可塑性	封闭性
早成岩阶段	A	900	<40	0.35	$\geq 70$	长石高岭石化	生物甲烷	>20	未固结	中	差
	B				$\geq 50$	绿蒙混层	自生高岭石	10~20	半固结	大	中-差
晚成岩阶段	A <sub>1</sub>	3000	108	0.7	$\geq 35$	凝析油和湿气	热降解烃	3.5~10	固结	中-大	最好
	A <sub>2</sub>				$\geq 15$		1.5~3.5	小		中	
	B				$\geq 15$		1.5~3.5	中		较好	
	C				0~15		<1	中-小		中-差	

图2 鄂尔多斯盆地南部上古生界泥岩成岩阶段与封闭性演化模式

Fig.2 Diagenesis stage and sealing capability evolution mode of mudstone in the Upper Paleozoic, south Ordos Basin

性转化,封闭能力增强<sup>[23]</sup>。鄂尔多斯盆地南部上古生界泥岩 $R_o$ 值普遍大于1.3%,除西缘逆冲构造带和晋西挠褶带在后期遭受强烈构造挤压外,内部构造简单,泥岩脆性破裂的可能性小,推测其封闭性能较好。晚成岩C阶段以后, $R_o$ 值大于2.0%,伊蒙混层矿物消失,泥岩逐渐向极低变质作用转化,抗张剪性变差,封盖性能变差。

鄂尔多斯盆地热史和埋藏史资料表明,盆地在早白垩世发生一次明显的构造热事件<sup>[15,24-26]</sup>,早白垩世末期全盆隆升遭受剥蚀<sup>[27]</sup>。盆地古地表温度取值为20℃,根据恢复的早白垩世末期地层剥蚀量和古地温梯度,结合南部地区泥岩成岩演化模式,对上古生界泥岩在中生代晚期最大古埋深、古温度及成岩演化程度的研究表明,南部渭北隆起的淳探1、永参1、耀参1等井区泥岩演化程度最低,处于晚成岩A<sub>2</sub>早期和晚成岩A<sub>2</sub>中晚期。山西组泥岩演化程度较高,大多已达到晚成岩C阶段。石盒子组泥岩在整个研究区演化程度较一致,一般为晚成

岩B期。石千峰组泥岩演化阶段范围较广,在庆阳—富县—延安所围限的范围之内为晚成岩A<sub>2</sub>—

晚成岩B期或晚成岩B期,其他地区为晚成岩A<sub>2</sub>晚期(表1)。

表1 鄂尔多斯盆地南部早白垩世末期地温梯度、地层剥蚀量及泥岩演化程度  
Table1 Geothermal gradient and strata erosion and mudstone evolution in Late Early Cretaceous, south Ordos Basin

井号	地温梯度/ ( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{hm}^{-1}$ )	剥蚀 厚度/m	演 化 阶 段			
			石千峰组	上石盒子组	下石盒子组	山西组
镇探1	3.6	300	晚成岩A <sub>2</sub> 晚期	晚成岩B期	晚成岩B期	晚成岩B期
宁探1、蓬1、 富古1、富古2	3.9	760~1 620	晚成岩B期	晚成岩B期	晚成岩B期	晚成岩C期
陕112、宜探1	3.9	1 100~1 800	晚成岩A <sub>2</sub> 晚期	晚成岩A <sub>2</sub> 晚期	晚成岩B期	晚成岩B期
黄深1、富古 3、富古6、宜2	3.9	1 215~1 805	晚成岩A <sub>2</sub> 晚期	晚成岩B期	晚成岩B期	晚成岩B期
陕139、 富古5	3.9	1 380~1 620	晚成岩B期	晚成岩B期	晚成岩B期	晚成岩C期
陕113、富 古4、旬探1	3.9/4.5	1 200~1 530	晚成岩A <sub>2</sub> —晚成岩B期	晚成岩B期	晚成岩B期	晚成岩C期
耀参1、永 参1、淳探1	4.5	1 250~1 360	晚成岩A <sub>2</sub> 早期、中晚期	晚成岩A <sub>2</sub> 早期、中晚期	晚成岩A <sub>2</sub> 早期、中晚期	晚成岩A <sub>2</sub> 早期、中晚期

### 3 微观评价参数

#### 3.1 孔隙度与渗透率

孔隙度与渗透率是反映盖层微观封闭性能的重要参数。孔隙度越小,孔喉半径越小,渗透率越低,毛细管力越大,盖层封闭性越好;反之,封闭性越差。由于实测岩心数据较少,不能满足整个研究区上古生界泥岩的孔隙度、渗透率研究。为此,利用测井声波时差建立孔隙度解释模型并对实测孔隙度与渗透率进行拟合,得到未取心层段的孔隙度和渗透率,进而对其分布特征进行分析。上古生界泥岩孔隙度一般为0.01%~3.8%,渗透率为 $0.005\times 10^{-3}\sim 0.025\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。整体来看上石盒子组泥岩孔隙度较高,平均为0.96%,最大可达3.85%。其次为下石盒子组和山西组,两者孔隙度分布范围相近,平均为0.7%,最大值约为2.5%,最小值约为0.15%。石千峰组泥岩孔隙度最小,平均为0.68%,最小值低于0.01%。渗透率的变化规律与孔隙度相似,上石盒子组泥岩渗透率整体较高,平均为 $0.013\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ,最高达 $0.035\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ,其他3个组的渗透率均较小,最大值约为 $0.024\times 10^{-3}\sim 0.027\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。

#### 3.2 突破压力

盖层综合评价中,突破压力作为衡量毛细管封闭能力的尺度,一直是研究和应用的重点<sup>[28]</sup>。通过实测突破压力与声波时差的函数关系计算出研究区各单井泥岩段的突破压力后,便可得到突破压力

的垂向分布(图3)。从图3中可以看出,鄂尔多斯盆地南部地区上古生界泥岩突破压力总体变化规律为西高东低、北高南低,且东西向突破压力的降低速率要大于南北向。不同井及不同地区的泥岩突破压力不同。以富古1井为界,研究区的西部即天环坳陷和伊陕斜坡的西部突破压力相对较高,主要为15~20 MPa,局部达到20 MPa以上,其次是北部延安地区,突破压力一般为10~20 MPa。富县地区和渭北隆起除少数几口井在局部表现出高值外,总体突破压力较低,一般小于15 MPa。

纵向上各组泥岩的突破压力分布存在差异。山西组、下石盒子组及石千峰组泥岩突破压力除在渭北隆起区的耀参1、淳探1和黄深1井附近为5~15 MPa外,一般大于15 MPa,其中石千峰组和下石盒子组局部压力大于20 MPa。而上石盒子组、石千峰组中下部、下石盒子组上部及山西组部分泥岩的突破压力普遍较低,一般小于10 MPa。

正常情况下,随着深度增加,泥岩的压实成岩作用增强,毛细管力增大。如果不均衡压实、水热增压、粘土矿物脱水或烃类的大量生成使孔隙流体没有及时排出,就会在泥岩内部形成异常高压<sup>[29-31]</sup>,岩石孔径增大,突破压力出现低值。晚三叠世—早侏罗世盆地快速沉降<sup>[1,32]</sup>,较高的沉积沉降速率、较大的沉积厚度,使泥岩在叠加压实过程中排液受阻,石盒子组及石千峰组下部形成明显的非均衡压实带<sup>[33-34]</sup>。早白垩世鄂尔多斯盆地岩石圈深部热活动增强,受秦岭造山带陆内俯冲的影响,盆地南部

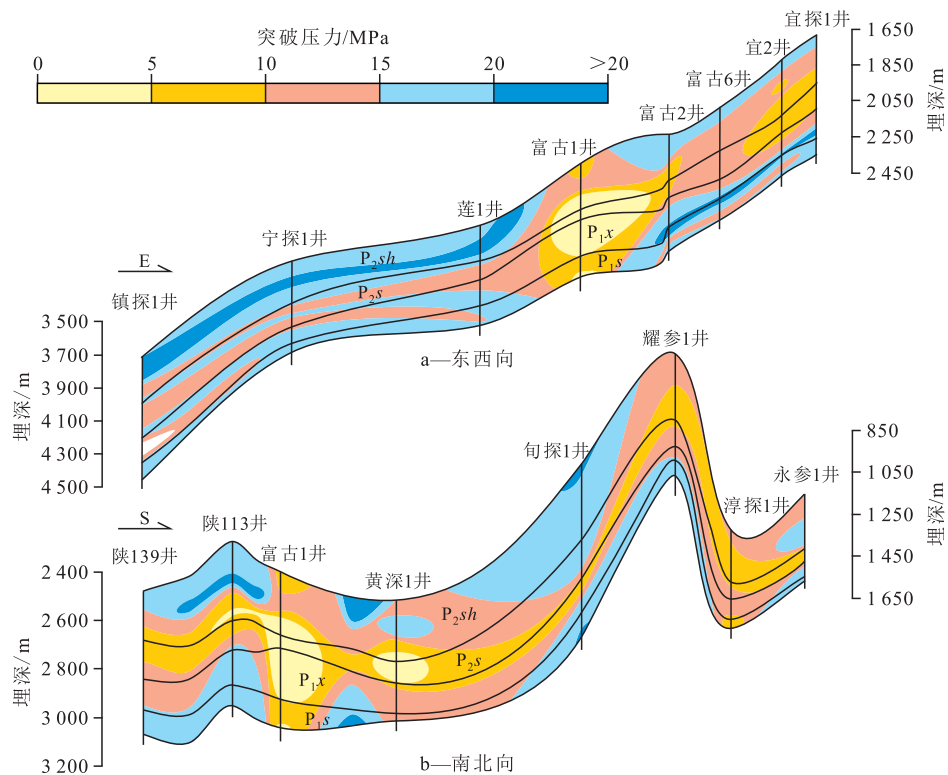


图3 鄂尔多斯盆地南部泥岩突破压力垂向分布

Fig.3 Vertical distribution of mudstone caprock breakthrough pressures in the Upper Paleozoic, south Ordos Basin

特别是富县—黄陵—宜川—延安一带成为主要的热演化异常区<sup>[15,35]</sup>,构造热异常使水热增压、粘土矿物转化脱水,加大了流体异常压力。早二叠世山西组沉积时期为海陆过渡相至陆相的三角洲平原和湖沼相泥岩、煤及炭质泥岩沉积,有机质丰度高。早白垩世的构造热事件,使煤系烃源岩迅速升温,达到生气高峰,烃源岩生气增压,形成山西组泥岩内部古高压。因此,自三叠世开始,上古生界泥岩便发育过剩压力<sup>[36]</sup>,上石盒子组及石千峰组、下石盒子组和山西组局部受超压影响,突破压力不按正常埋深规律变化,而是出现低值。

### 4 封闭性能评价

根据5个评价参数不同取值范围对泥岩封闭性能的影响程度进行等级划分,并将其由好至差赋予4,3,2,1的权值(表2),再根据5个参数对盖层封闭性能的贡献,对其进行权重分配;然后将各评价参数的权值与权重分别相乘再求和,得到泥岩封盖性能评价的总权值;并规定总权值大于3.0的盖层为I类盖层,总权值为2.5~3.0的为II类盖层,总权值为2.0~2.5的为III类盖层,总权值小于2.0的为IV类盖层。

通过对研究区19口井泥岩封闭性能评价参数

表2 鄂尔多斯盆地南部泥岩盖层封闭性能评价标准  
Table2 Evaluation standard of sealing capability of mudstone caprock in south Ordos Basin

评价等级划分(权值)	厚度/m	成岩阶段	孔隙度, %	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	突破压力/MPa
I (4)	>140	晚成岩 A <sub>1</sub> — 晚成岩 A <sub>2</sub> 早期	<0.4	<0.006	>20
II (3)	100~ 140	晚成岩 B	0.4~0.6	0.006~ 0.008 5	15~20
III (2)	50~100	晚成岩 A <sub>2</sub> 中晚期	0.6~1	0.008 5~ 0.05	10~15
IV (1)	<50	晚成岩 C、 早成岩 B	>1	>0.05	<10
权重	0.2	0.2	0.1	0.1	0.4

的处理,并参考李国平建议的标准<sup>[37]</sup>,采用突破压力大于等于0.5 MPa、泥岩厚度大于等于5 m作为有效厚度下限,对盆地南部山西组、下石盒子组、上石盒子组及石千峰组底部泥岩封闭性能进行了综合评价(图4)。石千峰组泥岩I类盖层发育,封闭性能最好;上石盒子组泥岩IV类盖层分布广泛,封闭性能最差;下石盒子、山西组泥岩除在局部发育I类盖层外,以II类、III类盖层为主。石千峰组泥岩厚度大,微观封闭能力强,特别是在镇探1、黄深1井区,综合评价权值达到3.5,而研究区的北部和宜2、耀参1井区,尽管泥岩发育,但微观封闭能力小,且



- Li Jian, Luo Xia, Shan Xiuqin, et al. Natural gas accumulation in the Upper Paleozoic of Ordos Basin, China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2005, 32(4): 54-59.
- [2] 郝石生, 黄志龙. 天然气盖层实验研究及评价[J]. *沉积学报*, 1991, 9(4): 20-26.
- Hao Shisheng, Huang Zhilong. Natural gas caprock experimental researches and assessment [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1991, 9(4): 20-26.
- [3] 严建萍. 鄂尔多斯盆地南部晚古生代沉积-构造演化及天然气勘探潜力研究[D]. 西安: 西北大学, 2010.
- Yan Jianping. Sedimentary-tectonic evolution and gas-potential exploration of Late Paleozoic in South Ordos Basin [D]. Xi'an: Northwestern University, 2010.
- [4] 杨俊杰. 鄂尔多斯盆地构造演化与油气分布规律[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002: 33-38.
- Yang Junjie. Tectonic evolution and gas reservoirs distribution in Ordos Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002: 33-38.
- [5] 蔡玥, 赵乐, 肖淑萍, 等. 基于恒速压汞的特低-超低渗透储层孔隙结构特征——以鄂尔多斯盆地富县探区长3油层组为例[J]. *油气地质与采收率*, 2013, 20(1): 32-35.
- Cai Yue, Zhao Le, Xiao Shuping, et al. Study on pore structure characteristics of super-low permeability and ultra-low permeability reservoirs by means of constant-speed mercury intrusion technique—case of oil layers of Chang3 of the Yanchang Formation in Fuxian exploration area of the Ordos Basin [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2013, 20(1): 32-35.
- [6] 马春林, 王瑞杰, 罗必林, 等. 鄂尔多斯盆地马岭油田长8油层组储层特征与油藏分布研究[J]. *天然气地球科学*, 2012, 23(3): 514-519.
- Ma Chunlin, Wang Ruijie, Luo Bilin, et al. Characteristics of Chang8 oil reservoir and distribution of oil reservoirs in Maling oilfield, Ordos basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2012, 23(3): 514-519.
- [7] 兰朝利, 王建国, 周晓峰, 等. 鄂尔多斯盆地彭阳油田侏罗系延安组油藏成藏规律[J]. *油气地质与采收率*, 2014, 21(5): 45-48.
- Lan Chaoli, Wang Jianguo, Zhou Xiaofeng, et al. Hydrocarbon accumulation rules of sandstone reservoirs of Jurassic Yan'an Formation, Penyang oilfield of Ordos basin, China [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2014, 21(5): 45-48.
- [8] 代金友, 李建霆, 王宝刚, 等. 鄂尔多斯盆地里151油藏延8—延10油组沉积特征及其与油气的关系[J]. *油气地质与采收率*, 2013, 20(4): 5-9.
- Dai Jinyou, Li Jianting, Wang Baogang, et al. Sedimentary microfacies study for Yan8—Yan10 layers of Yan'an formation in Li151 oilfield, Ordos Basin [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2013, 20(4): 5-9.
- [9] 高淑梅, 陈娟, 胡剑, 等. 鄂尔多斯盆地马岭油田延长组长8储层特征及影响因素分析[J]. *特种油气藏*, 2013, 20(2): 34-37.
- Gao Shumei, Chen Juan, Hu Jian, et al. Ordos basin Ma Ling oilfield extended leader8 reservoir characteristics and influence factors analysis [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2013, 20(2): 34-37.
- [10] 王欢, 廖新维, 赵晓亮, 等. 超低渗透油藏分段多簇压裂水平井产能影响因素与渗流规律——以鄂尔多斯盆地长8超低渗透油藏为例[J]. *油气地质与采收率*, 2014, 21(6): 107-110.
- Wang Huan, Liao Xinwei, Zhao Xiaoliang, et al. A study on productivity and flow regimes of segmented multi-cluster fractured horizontal well in ultra-low permeability reservoir—a case of Chang8 ultra-low permeability reservoir in Ordos Basin [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2014, 21(6): 107-110.
- [11] 杨仁超, 樊爱萍, 韩作振, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界天然气成藏的地质特征[J]. *山东科技大学学报: 自然科学版*, 2005, 24(1): 53-57.
- Yang Renchao, Fan Aiping, Han Zuozhen, et al. Geological features of natural gas pool formation in the Upper Paleozoic Erathem in the Erdos Basin [J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science*, 2005, 24(1): 53-57.
- [12] 刘行军, 杨双定, 谢刚, 等. 鄂尔多斯盆地合水地区长8段裂缝发育特征及其对产油量的影响[J]. *油气地质与采收率*, 2014, 21(6): 57-60.
- Liu Xingjun, Yang Shuangding, Xie Gang, et al. The study of relationship between fracture characteristic and yield of Chang8 section in Heshui area, Ordos Basin [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2014, 21(6): 57-60.
- [13] 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: 66-83.
- He Zixin. Evolution and petroleum in Ordos Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 66-83.
- [14] Ingram G M, Urai J L, Naylor M A. Sealing processes and top seal assessment [M]// Pederson P M, Koestler A G. Hydrocarbon seals—Importance for exploration and production, NPF special publication no. 7. Amsterdam: Elsevier, 1997: 165-174.
- [15] 刘新社. 鄂尔多斯盆地上古生界盆地分析模拟[D]. 西安: 西北大学, 2005.
- Liu Xinshe. Basin analyses and simulation of Up-Paleozoic in Ordos Basin [D]. Xi'an: Northwestern University, 2005.
- [16] 付金华. 鄂尔多斯盆地上古生界天然气成藏条件及富集规律[D]. 西安: 西北大学, 2004.
- Fu Jinhua. The gas reservoir-forming conditions and accumulation rules of Upper Paleozoic in Ordos Basin [D]. Xi'an: Northwestern University, 2004.
- [17] 马力, 陈焕疆, 甘克文, 等. 中国南方大地构造和海相油气地质[M]. 北京: 地质出版社, 2004: 328-364.
- Ma Li, Chen Huanjiang, Gan Kewen, et al. Geotectonics and petroleum geology of marine sedimentary rocks in South China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004: 328-364.
- [18] 李双建, 沃玉进, 周雁, 等. 影响高演化泥岩盖层封闭性的主控因素分析[J]. *地质学报*, 2011, 85(10): 1 691-1 697.
- Li Shuangjian, Wo Yujin, Zhou Yan, et al. Controlling factors affecting sealing capability of well-developed muddy cap rock [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(10): 1 691-1 697.
- [19] 戴金星, 宋岩. 中国大中型气田形成的主要控制因素[J]. *中国科学: D辑 地球科学*, 1996, 26(6): 481-487.
- Dai Jinxing, Song Yan. The main controlling factors on formation of large and medium gas fields in China [J]. *Science in China: Se-*

- ries D Earth Science, 1996, 26(6): 481-487.
- [20] 蒙晓灵, 张宏波, 冯强汉, 等. 鄂尔多斯盆地神木气田二叠系太原组天然气成藏条件[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(1): 37-41.  
Meng Xiaoling, Zhang Hongbo, Feng Qianghan, et al. Gas accumulation conditions of the Permian Taiyuan Formation in Shenmu gas field, Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(1): 37-41.
- [21] 彭秀美. 用岩石力学试验方法研究区域盖层的埋深和厚度标准[C]// 扬子海相地质与油气. 北京: 石油工业出版社, 1993: 262-269.  
Peng Xiumei. Study on standard of regional cap rock depths and thickness by rock mechanics test [C]// Marine Geology and petroleum in Yangtze. Beijing: Petroleum Industry Press, 1993: 262-269.
- [22] 潘国恩, 杨传忠. 中国南部海相碳酸盐岩油气保存条件[J]. 石油与天然气地质, 1992, 13(3): 332-343.  
Pan Guoen, Yang Chuangzhong. Oil-gas preservation condition of marine carbonate rocks in South China [J]. Oil & Gas Geology, 1992, 13(3): 332-343.
- [23] 张长江, 潘文蕾, 刘光祥, 等. 中国南方志留系泥质岩盖层动态评价研究[J]. 天然气地球科学, 2008, 19(3): 301-310.  
Zhang Changjiang, Pan Wenlei, Liu Guangxiang, et al. Dynamic evaluation to the cap formation of Silurian Argillaceous Rock, Southern China [J]. Natural Gas Geoscience, 2008, 19(3): 301-310.
- [24] 任战利, 张盛, 高胜利, 等. 鄂尔多斯盆地构造热演化史及其成藏成矿意义[J]. 中国科学: D辑 地球科学, 2007, 37(增刊): 23-32.  
Ren Zhanli, Zhang Sheng, Gao Shengli, et al. Tectonic thermal evolution history of Ordos Basin and its hydrocarbon accumulation and metallogenic significance [J]. Science in China: Series D Earth Science, 2007, 37(supplement): 23-32.
- [25] 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): 56-65.  
Ren Zhanli, Zhao Chongyuan, Zhang Jun, et al. Research on paleotemperature in the Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1994, 12(1): 56-65.
- [26] 任战利. 利用磷灰石裂变径迹法研究鄂尔多斯盆地地热史[J]. 沉积学报, 1995, 38(3): 339-349.  
Ren Zhanli. Thermal history of Ordos Basin assessment by apatite fossil track analysis [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1995, 38(3): 339-349.
- [27] 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.  
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.
- [28] 付金华. 鄂尔多斯盆地古生界盖层封闭性研究[J]. 天然气工业, 1991, 11(6): 6-11.  
Fu Jinhua. A study of the sealing properties of the Palaeozoic cap-rocks in Ordos Basin [J]. Natural Gas Industry, 1991, 11(6): 6-11.
- [29] 付广, 张发强. 利用声波时差资料研究欠压实泥质盖层古压力封闭能力的方法[J]. 石油地球物理勘探, 1998, 33(6): 812-819.  
Fu Guang, Zhang Faqiang. A method for analyzing the palaeo-pressure sealing ability of poorly compacted shale barrier with the use of acoustic logging data [J]. Oil Geophysical Prospecting, 1998, 33(6): 812-819.
- [30] 付广, 陈章明, 姜振学. 盖层封堵能力评价方法及其应用[J]. 石油勘探与开发, 1995, 22(3): 46-51.  
Fu Guang, Chen Zhangming, Jiang Zhenxue. Evolution of the sealing ability of caprock and its application [J]. Petroleum Exploration and Development, 1995, 22(3): 46-51.
- [31] Swarbrick R E, Osborne M J. Mechanisms that generate abnormal pressures: An overview [C]// Law B E, Ulmishek G F, Slavin V I. Abnormal pressures in hydrocarbon environments. AAPG Memoir, 1998, 70: 13-34.
- [32] 王震亮, 陈荷立. 鄂尔多斯中部上古生界古流体动力分析[J]. 沉积学报, 1998, 12(4): 105-108.  
Wang Zhenliang, Chen Heli. A palaeohydrodynamic analysis of Upper Palaeozoic Group in Middle Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1998, 12(4): 105-108.
- [33] 闵琪, 付金华, 席胜利, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界天然气运移聚集特征[J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(4): 26-32.  
Min Qi, Fu Jinhua, Xi Shengli, et al. Characteristics of natural gas migration and accumulation in the Upper Paleozoic of Ordos Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2000, 27(4): 26-32.
- [34] 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.  
Li Zhongdong, Hao Shumin, Li Liang, et al. Compartments in the Upper Paleozoic of northern Ordos Basin and their relationship with gas enrichment [J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28(4): 466-472.
- [35] 任战利, 张盛, 高胜利, 等. 鄂尔多斯盆地热演化程度异常分布区及形成时期探讨[J]. 地质学报, 2006, 80(5): 674-684.  
Ren Zhanli, Zhang Sheng, Gao Shengli, et al. Research on region of maturation anomaly and formation time in Ordos Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(5): 674-684.
- [36] 刘全有, 金之钧, 王毅, 等. 鄂尔多斯盆地海相碳酸盐岩层系天然气成藏研究[J]. 岩石学报, 2012, 28(3): 847-858.  
Liu Quanyou, Jin Zhijun, Wang Yi, et al. Gas filling pattern in Paleozoic marine carbonate reservoir of Ordos Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(3): 847-858.
- [37] 李国平, 石强, 王树寅. 储盖组合测井解释方法研究[J]. 测井技术, 1997, 20(2): 98-104.  
Li Guoping, Shi Qiang, Wang Shuyin. A study of reservoir-caprock log interpretation method [J]. Well Logging Technology, 1997, 20(2): 98-104.