

泥质岩盖层封盖性能综合评价方法探讨

付广 陈章明 吕延防

(大庆石油学院, 黑龙江安达 151400)

卢连生

(大庆采油十一厂, 150000)

选取盖储层排替压力差、异常孔隙流体压力、异常含气浓度和断层封闭性、泥质岩单层厚度、沉积环境分别作为泥质岩盖层微观封闭能力和宏观展布的评价指标。通过对其进行等级划分, 赋存权值, 并根据其在泥质岩盖层中的发育特征及其对封盖性能的影响程度对其进行权重分配, 再利用加权平均法计算泥质岩盖层封盖性能综合评价权值大小, 探讨了泥质岩盖层封盖性能的综合评价方法, 并将其应用于大庆长恒及其以西地区嫩二段泥岩盖层封盖性能的综合评价中, 其结果与该区实际地质条件十分吻合, 证实了该方法的可行性。

关键词 泥质岩盖层 封盖性能 综合评价方法 大庆长恒及其西部 嫩二段

第一作者简介 付广 男 33 岁 高级工程师 石油地质

近年来, 盖层研究发展迅速, 评价方法已由以往单一的微观能力的分析和总结, 逐渐向综合评价(付广等, 1995)方向发展。然而, 由于受盖层形成地质条件复杂性以及人们认识水平的限制, 对泥质岩盖层封盖性质影响因素的认识尚不全面和深入, 没有能够把对封盖性能影响极大的断层封闭性考虑进去, 对各影响因素在其封盖性能中所起到的作用也缺乏合理的认识, 而简单地把它所起的作用认为相同, 这不仅不符合客观实际, 而且缺少科学性。因此, 在一定程度上, 限制了这些评价方法的实用性, 为此, 本文在全面总结前人工作的基础上, 进一步探讨泥质岩盖层封盖性能的综合评价方法。

1 泥质岩盖层封盖性能及其影响因素

根据目前研究, 泥质岩盖层的封盖性能主要反映在两个方面上, 一是其微观封闭能力的强弱; 二是其宏观展布面积的大小; 泥质岩盖层只有同时具有较强的微观封闭能力和一定的宏观展布范围, 才能在整个油气成藏系统内对油气进行封盖; 否则两者缺少哪一个, 泥质岩盖层也不能在整个油气成藏系统内对油气形成有效封盖。因此, 泥质岩盖层封盖性能评价应包括微观封闭能力评价和宏观展布评价。

1.1 泥质岩盖层微观封闭能力及其影响因素

1.1.1 毛细管封闭机理及其能力的主要影响因素

通常情况下, 若泥质岩盖层为正常压实, 内部不

存在异常高孔隙流体压力, 那么其对游离相运移的油气主要具有毛细管封闭作用。所谓毛细管封闭是由于盖层岩石与下伏储集层岩石之间存在着明显的物性差异, 即盖层岩石较储集层岩石具有更小的孔隙喉道, 根据岩石排替压力定义(岩石中润湿相流体被非润湿相流体排替所需要的最小压力, 其数值大小近似等于岩石中最大连通孔隙喉道的毛细管压力), 盖层岩石较储集层岩石具有更大的排替压力。地下游离相油气欲通过盖层孔隙运移必然受到盖层岩石与储集层岩石之间排替压力差的阻挡, 只有当油气的能量大于其盖层岩石与储集层岩石之间的排替压力差时, 油气才能驱替盖层岩石孔隙中的水而发生渗滤运移; 否则, 油气将被封盖在盖层之下聚集起来。由此可以看出, 盖层岩石与储集层岩石之间的排替压力差大小是决定盖层毛细管封闭能力的最主要因素。

1.1.2 压力封闭机理及其能力的主要影响因素

若泥质岩盖层由于单层厚度大, 沉积速率与压实排液不相平衡, 水热增压, 粘土矿物转化大量脱水, 造成内部欠压实具有异常高的孔隙流体压力时(付广等, 1995), 其对油气的封闭, 除了毛细管封闭外, 还存在压力封闭。所谓压力封闭是由于泥质岩盖层欠压实, 大量的孔隙流体不能及时排出, 骨架颗粒一膨胀性粘土性软和体积收缩, 而承受上覆地层部分负荷产生了较正常压实泥岩盖层异常高的孔隙流体压力, 使原来向上递减的压力减

小甚至出现向下递减的压力,而对下伏呈游离相和水溶相运移的油气形成的封闭作用,如图1所示。由图1中可以看出,地下游离相和水溶相油气欲通过这种欠压实泥质岩盖层孔隙渗滤运移,必然受其异常孔隙流体压力的阻挡,只有当油气的能量大于欠压实泥质岩盖层的异常孔隙流体压力时,油气才能通过盖层孔隙运移;否则,油气则被封盖在欠压实泥质岩盖层之下聚集起来。由此可以看出,欠压实泥质岩盖层的异常孔隙流体压力大小是决定其压力封闭能力的最主要影响因素。

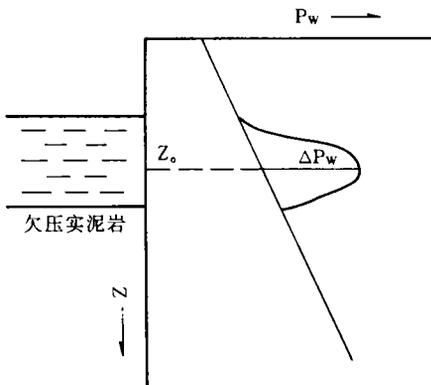


图1 欠压实泥岩盖层封闭模式图

1.1.3 烃浓度封闭机理及其能力的主要影响因素

若泥质岩盖层本身具有生烃能力,且又已进入大量生烃阶段,其除了具有毛细管封闭外,还具有烃浓度封闭。所谓烃浓度封闭是泥质岩盖层由于具有生烃能力,其生成的天然气溶于其内孔隙水中使其含气浓度增大,尤其是当泥质岩盖层又欠压实具有异常孔隙流体压力时,其含气浓度更大,结果使原来向上递减的含气浓度出现向下递减的含气浓度,而形成的对下伏呈分子扩散相运移天然气的封闭作用,如图2所示。由图2中可以看出,地下呈分子扩散相运移的天然气欲通过这种烃浓度盖层扩散运移,必然受到其异常高含气浓度的阻挡,只有当天然气扩散初始浓度大于其异常高含气浓度时,天然气才能通过这种烃浓度盖层扩散运移;否则,天然气将被封闭在盖层之下聚集起来。由此可以看出,异常含气浓度大小是决定烃浓度盖层封闭能力的最主要影响因素。

1.2 泥质岩盖层宏观展布及其影响因素

泥质岩盖层能否在空间上保持连续展布,除了

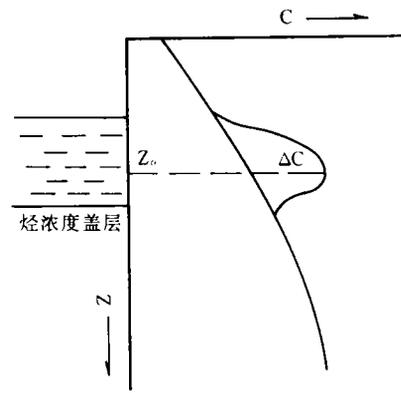


图2 烃浓度盖层封闭模式图

要受到自身形成条件的限制外,还要受到后期断裂破坏的影响。

对原始沉积的泥质岩盖层来说,其空间展布范围主要受其形成的沉积环境限制。一般来说,泥质岩盖层只有形成于槽盆相、广海陆棚相、半深湖—深湖相和一些开阔的深湖、潮坪等环境中,由于其水体深,水动力条件弱,分布广泛,才能形成厚度大、分布广的泥质岩盖层,而滨浅湖相、三角洲相、河流相和冲积扇相由于其水浅,水动力强,只能形成厚度小、分布局限的泥质岩盖层。泥质岩盖层厚度大小是沉积环境的最终物质反映,在某种程度上可以更好地反映泥质岩盖层空间展布范围大小,一般来说,泥质岩单层厚度越大,空间展布的范围也就越大;反之则越小。由此可以看出,沉积环境和泥质岩单层厚度大小是影响泥质岩盖层原始空间展布的主要影响因素。

如果泥质岩盖层遭到后期的断裂破坏,其空间连续性则受到断层封闭与开启性的影响,如果断层封闭性好,仍然可以保持其空间上的连续性,否则其空间展布的连续性将遭破坏。因此,断层封闭性也是影响泥质岩盖层空间展布的一个重要因素。

2 泥质岩盖层封盖能力综合评价方法

2.1 评价参数及其等级划分标准

2.1.1 泥质岩盖层微观封闭能力评价参数及其等级划分标准

由上述分析可知,毛细管封闭在泥质岩盖层中是普遍存在的,而压力封闭和烃浓度封闭只能存在

于特殊的泥质岩盖层中。对于不同的泥质岩盖层，由于其形成的地质条件不同，其所具有的封闭机理及其能力是有差异的，亦即是说，泥质岩盖层的微观封闭能力主要受到具几种封闭机理及其能力大小的影响。因此，泥质岩盖层微观封闭能力的评价应是其 3 种封闭能力的综合反映。

根据上述分析可知，泥质岩盖层与储集层之间的排替压力差，异常孔隙流体压力和异常含气浓度分别是决定泥质岩盖层毛细管封闭、压力封闭和烃浓度封闭能力的主要影响因素，为此，本文将其选为泥质岩盖层微观封闭能力综合评价参数。

根据 Smith(1966)提出的利用盖层与储集层岩石排替压力差计算盖层所能封闭的最大气柱高度的公式(式 1)可以得到，当盖层岩石与储集层岩石之间的排替压力差为 0.1MPa 时，盖层所能封闭住的最大气柱高度为 10m，表明其已开始具备封闭油气能力，可作为盖层封闭油气能力的下限。而当盖层岩石与储集层岩石之间的排替压力差为 2MPa 时，盖层可封闭住的最大气柱高度可达到 200m，表明盖层毛细管封闭性已达到一定程度，完全可以作为工业油气藏的封盖层，可作为盖层封闭油气的上限。所以，据此可以将盖层的毛细管封闭能力由强至弱划分为 4 个等级，具体标准如表所示。

$$H_g = \frac{P_{dm} - P_{ds}}{(\rho_w - \rho_g) \cdot g} \quad (1)$$

H_g 为盖层所能封闭住的最大气柱高度(m)；

P_{dm} 为盖层岩石排替压力(Pa)；

P_{ds} 为储集层岩石排替压力(Pa)；

ρ_w 为地层水密度(g/cm³)；

ρ_g 为天然气密度(g/cm³)；

g 为重力加速度(m/s²)。

根据李明诚(1994)研究，盖层依靠异常孔隙流体压力可封闭住的最大气柱高度，可由式 2 计算得到。

$$H_g = \frac{\Delta P_w}{(\rho_w - \rho_g) \cdot g} \quad (2)$$

式中： ΔP_w 为盖层异常孔隙流体压力(Pa)

不难看出，式 2 与式 1 除了前者是依靠异常孔隙流体压力封闭油气，而后者则是依靠毛细管压力封闭油气外，其属性是相同的，都是依靠压力封闭油气。只要 $P_{dm} - P_{ds}$ 与 ΔP_w 大小相同，其所能封闭住的最大气柱高度就应是相同的。因此，可以按照上述对盖层毛细管封闭能力的等级划分标准对盖层压力封闭能力的等级进行划分，具体标准如表 1 所示。

表 1 盖层微观封闭能力评价参数等级划分标准

封闭机理	评价参数	等级划分			
		好	较好	中等	差
毛细管封闭	盖层岩石与储集层岩石排替压力差(MPa)	>2.0	2.0~0.5	0.5~0.1	<0.1
压力封闭	异常孔隙流体压力(MPa)	>2.0	2.0~0.5	0.5~0.1	<0.1
烃浓度封闭	异常含气浓度(m ³ /m ³)	>1.0	1.0~0.5	0.5~0.1	<0.1

由上述分析可知，盖层烃浓度封闭能力的大小主要取决于其内异常含气浓度的大小。由式 3 可以看出，盖层异常含气浓度(ΔC)的大小主要取决于其异常孔隙流体压力(ΔP_w)的大小，因为，对于确定埋深条件下的泥质岩盖层来说， P_{wo} 、 T_o 和 X_{ko} 就是确定不变的，因此，由上述盖层压力封闭能力等级划分标准的异常孔隙流体压力值，根据天然气在地层孔

隙中溶气量函数关系(f)可计算得到与之对应的异常含气浓度(ΔC)，亦即得到了利用异常含气浓度(ΔC)划分盖层烃浓度封闭能力的等级划分标准，如表 1 所示。

$$\Delta C = f(P_{wo} + \Delta P_w, T_o, X_{ko}) - f(P_{wo}, T_o, X_{ko}) \quad (3)$$

式中： ΔC 为盖层异常含气浓度(m³/m³)；

f 为含气浓度随压力、温度和矿化度的变化函数；

P_{∞} 为盖层欠压实主带 (Z_0) 处的正常压实的孔隙流体压力 (Pa);

ΔP_w 为盖层异常孔隙流体压力 (Pa);

T_0 为盖层欠压实主带 (Z_0) 处的温度 ($^{\circ}\text{C}$);

X_{k_0} 为盖层欠压实主带 (Z_0) 处的矿化度 (mg/l)。

2.1.2 泥质岩盖层宏观展布评价参数及其等级划分对比

由上述分析可知,沉积环境、泥质岩单层厚度和断层封闭性是决定泥质岩盖层宏观展布面积的大小的主要影响因素。为此,本文将其选为泥质岩盖层封盖性能综合评价参数。

根据大量油田实例的沉积环境、泥质岩单层厚度大小和断层封闭性与其宏观展布面积大小关系统计得到,其等级标准如表 2 所示。

表 2 泥质岩盖层宏观展布评价标准表

评价参数	等级划分(权值)			
	好(4)	较好(3)	中等(2)	差(1)
沉积环境	半深—深湖相 盆地相 广海陆棚相	台地相 滨—浅湖相 三角洲前缘相	台地边缘相 滨岸相 三角洲 分流平原亚相	河流相 冲积扇相
泥质岩单层厚度(m)	>20	20~10	10~2.5	<2.5
断层封闭性	好	较好	中等	差

2.2 泥质岩盖层封盖性能综合评价权值的计算方法

有了上述泥质岩盖层封盖性能的评价参数及等级划分标准,本文按照各评价参数由好至差等级分别赋予其 4、3、2、1 的权值,然后由式 4 计算泥质岩盖层封盖性能的综合评价权值。

$$Q = n \sum_{i=1}^n a_i q_i \quad (4)$$

式中:Q 为泥质岩盖层封盖能力的综合评价权值;

q_i 为第 i 项评价参数权值, $i=1, 2, 3, 4, 5$;

a_i 为第 i 项评价参数的权重系数;

n 为评价参数的个数。

式中的 q_i 可根据泥质岩盖层上述 6 种评价参数的特征,按照表 1、2 中的等级划分标准得到, a_i 可根据各评价参数在泥质岩盖层中的特征及对盖层封盖性能所起作用不同进行权重分配,详见图 3 所示。

2.3 泥质岩盖层封盖性能综合评价等级划分标准

根据上述各评价参数的权值大小以及式 4 中的计算方法,可以得到利用泥质岩盖层封盖性能综合评价权值划分泥质岩盖层封盖性能的等级标准,如表 3 所示。

表 3 泥质岩盖层性能等级划分标准

泥质岩盖层封盖性能等级划分	好	较好	中等	差
Q	>3.5	3.5~2.5	2.5~1.5	<1.5

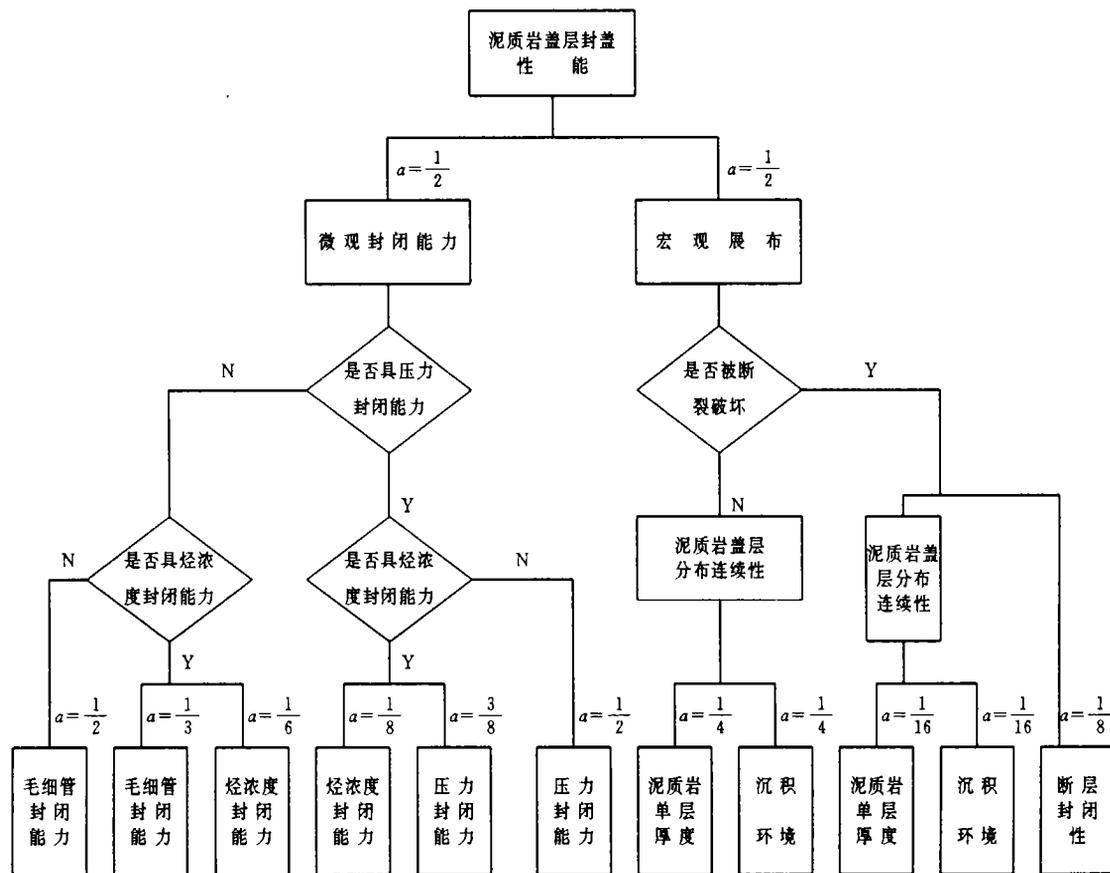


图 3 泥质岩盖层封盖性能与其各评价参数之间关系图

3 应用举例

本文选取大庆长恒及其西部嫩二段泥岩盖层为例,利用上述评价方法综合评价其封盖性能。

大庆长恒及其西部地区是松辽盆地北部天然气较为富集地区,已发现了阿拉新、白音诺勒、萨尔图、喇嘛甸等十几个气藏。其天然气主要产于萨尔图、葡萄花和高台子油层中,由此可知,嫩二段泥岩盖层是该区天然气的主要封盖层,其封盖性能的强弱对该区天然气聚集成藏具有重要的控制作用。

由于嫩二段沉积时期是盆地最大一次水侵期,水体遍布盆地北部,在该区沉积了较厚的滨浅湖—深湖相的暗色泥岩,如图 4 所示。泥岩单层厚度最大可达 240m,最小为 80m,高值区位于古龙凹陷中心,由此向其四周嫩二段泥岩单层厚度逐渐减小。该区断穿嫩二段泥岩盖层的断层(T₂-T₀^{*}或 T₁-T₀^{*})虽发育,但断距(一般小于 100m)小,未能错开嫩二段

泥岩盖层,使其失去横向分布的连续性。又由于嫩二段泥岩目前普遍欠压实具异常孔隙流体压力(图 5),表明断穿其内的断层应是封闭的,由此看出,嫩二段是较理想的区域性盖层。

由于该区实测泥岩排替压力资料表明,嫩二段泥岩饱含水排替压力为 1.83~13.17MPa,平均为 4.99MPa,表明其具有较强的毛细管封闭能力。

在齐家—古龙凹陷及周边地区,嫩二段泥岩由于单层厚度大,普遍欠压实,其异常孔隙流体压力位于凹陷中心处,最大达到 7MPa,由凹陷中心向其四周,其超压值逐渐降为零(图 5),表明其又具有较强的压力封闭能力。

嫩二段不仅是该区主要的天然气盖层,而且又具有一定的生烃能力,有机质较为丰富,类型好,且已进入大量生烃期。由于异常孔隙流体压力的存在,其应具较强浓度封闭能力。

在上述嫩二段泥岩盖层微观封闭能力宏观发育特征的分析基础上,本文首先根据嫩二段泥岩盖层

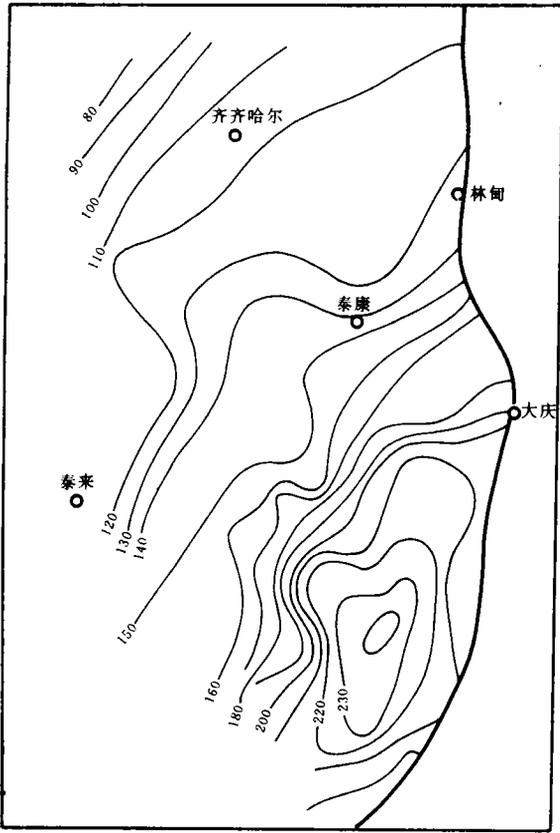


图4 大庆长恒及其西部地区嫩二段泥岩等厚图

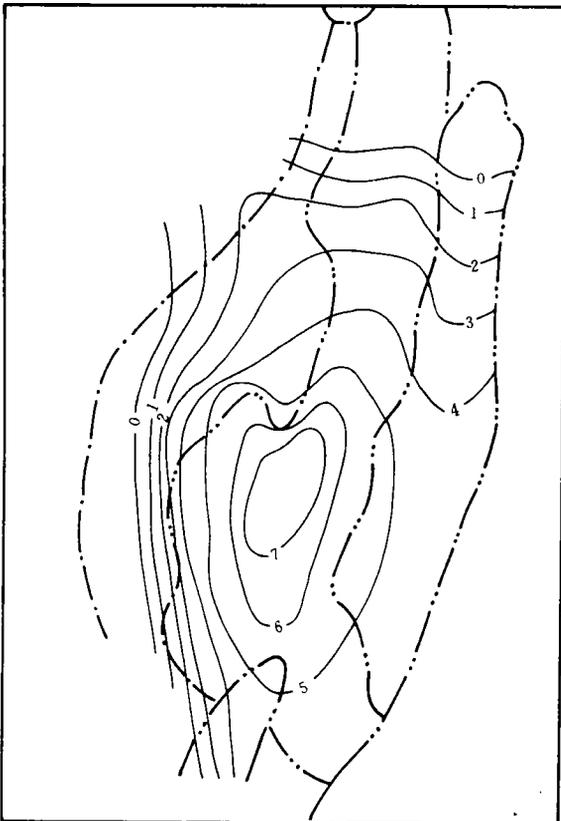


图5 大庆长恒及其西部地区嫩一、二段泥岩异常孔隙流体压力平面分布图

的超压大小,分别将其分为4个评价单元,然后根据各评价单元内盖层的微观封闭能力和宏观展布特征,按照表1和表2中的标准分别赋予权值,然后根据图1确定其权重系数,再利用式4计算其封盖性能综合评价权值,最后按照表3中泥质岩盖层封盖性能等级划分标准,得到该区嫩二段泥岩盖层封盖性能的等级评价结果如图6所示,由图6中可以看

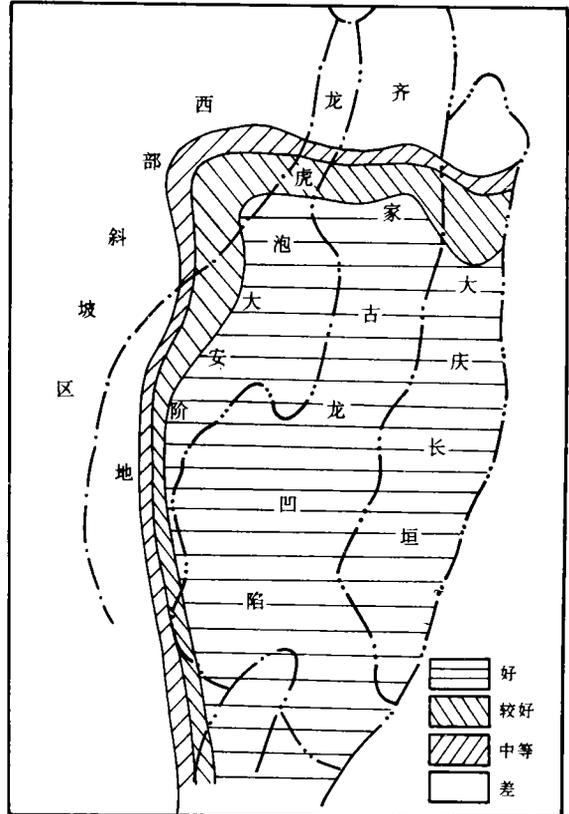


图6 大庆长恒及其西部地区嫩二段泥岩盖层封盖性能综合评价图

出,该区嫩二段泥岩盖层好的封盖性能区主要分布在齐家—古龙凹陷内,由此向外逐渐过渡为较好、中等和差封盖性能区。好封盖性能区面积最大,其次是差封盖性能区,再次是较好封盖性能区,最差为中等封盖性能区。总体上看,该区嫩二段泥岩盖层具有较强的封盖性能,有利于天然气的聚集与保存,这或许是在该区萨、葡油层中找到一批中小型天然气重要原因。

4 结语

上述泥质岩盖层封盖性能综合评价方法,在大庆长恒及其以西地区的应用表明,该方法用于盖层

封盖性能的综合评价是可行的,不仅考虑了断层对盖层封盖性能的影响,而且对各评价参数进行了不同权重分配,较以往的评价方法更全面和科学,然而,该方法仍属于初步尝试,还有待于进一步完善和提高。

探与开发,1995,22(3):45~50

- 2 付广,陈章明,姜振学. 轮南地区石炭系泥岩盖层的压力封闭特征. 新疆石油地质,1995,16(1):19~23

(收稿日期:1997年5月2日)

参 考 文 献

- 1 付广,陈章明,姜振学. 盖层封堵能力评价方法及其应用. 石油勘

**COMPREHENSIVE EVALUATION OF SEALING
ABILITY OF MUDSTONE CAPROCK**

Fu Guang Chen Zhangming Lu Yanfang

(Daqing Petroleum College)

Lu Liansheng

(Daqing No. 11 Oil Extraction Plant)

Abstract

The displace pressure difference between caprock and reservoir, abnormal pore fluid pressure, abnormal gas-bearing concentration, sealing ability of faults, thickness of mudstone, and depositional environment were choosed as parameters in evaluating the microcosmic sealing ability and macroscopic distribution of mudstone caprocks. By grading and weighting of the parameters, in accordance with their development and efficiency, the weight for comprehensive evaluation of sealing ability of mudstone caprock was calculated by weighted average method. It was applied to evaluate the sealing ability of mudstone caprock in member N2 of Daqing placanticline and the area to its west. The result was consistent to the actual geological conditions in the region. It indicated that the method was practical for evaluation of mudstone caprock.