

中国大气田盖层封气能力综合评价 及大气田形成所需盖层条件

付 广, 孙 迪

(东北石油大学 地球科学学院, 黑龙江 大庆 163318)

摘 要: 通过统计中国 45 个大气田盖层封闭特征, 利用所建立的盖层封气能力综合评价参数对盖层的封气能力进行综合评价, 并研究了大气田形成所需的盖层条件。研究发现, 中国 45 个大气田盖层的厚度小于 200 m, 排替压力 10~15 MPa, 气藏压力系数 1.0~1.2, 盖层封闭能力综合评价参数 0.8~1.0, 具有较强的盖层封气能力。盖层封气能力综合评价参数与天然气地质储量之间成正比关系, 即盖层封气能力综合评价参数越大, 气田地质储量越大; 反之则越小。大气田形成所需要盖层条件是盖层封气能力综合评价参数大于或等于 0.09。

关键词: 大气田; 盖层; 封闭能力; 综合评价; 排替压力; 压力系数

中图分类号: P618.13

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2013)01-0001-09

Comprehensive Evaluation of Eaprock Sealing Ability and Conditions to Form Effective Caprock for Large Gas Fields in China

Fu Guang, Sun Di

(College of Earth Sciences, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China)

Abstract: Through statistics of caprock sealing features of forty-five large gas fields in China, comprehensive evaluation parameter of gas-sealing ability of caprock established was utilized to evaluate the sealing ability of caprock and study caprock conditions to form it. The study shows that when caprock thickness is mainly under 200 m, displacement pressure mainly between 10-15 MPa, pressure coefficient mainly between 1.0-1.2 and comprehensive evaluation parameter of caprock sealing ability mainly between 0.8-1.0, the caprock sealing ability is excellent. There is direct ratio between comprehensive evaluation parameter of caprock and geologic reserves of natural gas, that is, the larger the comprehensive evaluation parameter and the larger geologic reserves, or vice versa. Condition for effective caprock of large gas fields is that comprehensive evaluation parameter is equal to or greater than 0.09.

Key words: large gas fields; cap rock; sealing ability; comprehensive evaluation; displacement pressure; pressure coefficient

天然气与石油相比,分子小,重量轻,活动性强,在地下具有更强的散失性^[1]。这些特征决定了天然气藏的形成,尤其是大气田的形成需要更高的盖层条件。而盖层条件的优劣在很大程度上受到盖层厚度、排替压力和气藏内部压力 3 个因素的影响,即盖层厚度越大,排替压力越高,气藏内部压力越低,气藏的盖层条件越好,越有利于形成大气田;反之,盖层条件越差,越不利于大气田的形成。然而,由于受盖层岩性、压实程度以及储层条件等因素的影响,同是大气田,其形成的盖层厚度、排替压力和气藏内部压力条件也不相同,这 3 个条件大小差异较大,它们共同作用封盖形成了大气田。由此看出,一个气藏盖层条件的好坏并不取决于上述 3

收稿日期: 2012-02-19

基金项目: 国家油气重大专项(2011ZX05007)

作者简介: 付 广(1962—),男,辽宁新宾人,教授,博士,主要从事油气藏形成与保存条件方面的研究。

E-mail: fuguang2008@126.com

个条件中某个单一条件的优劣,而取决于 3 个条件共同作用的结果。前人^[1-3]对气藏盖层综合封气能力曾做过大量研究和探讨,庞雄奇等^[4]在国内较早建立了包括盖层埋深、厚度、流体密度、盖层岩性和欠压实程度等地质因素影响在内的盖层封闭性综合定量评价的计算机模拟系统;王显东等^[5]利用盖层厚度、砂岩厚度百分含量和排替压力值,建立了盖层封闭性综合评价指数与评价标准。综合来看,前人^[6-11]在盖层综合封闭能力评价过程中采用的参数较多,方法多种多样,但以盖层厚度、排替压力和盖层内部压力 3 个条件来综合评价气藏盖层条件的优劣,目前仍鲜有报道,因此,以盖层厚度、排替压力和气藏内部压力综合评价我国大气田盖层封气能力,并研究大气田形成所需的盖层条件,对于正确认识我国大气田形成条件和指导大气田天然气勘探均具有重要意义。

1 盖层封闭特征

1.1 盖层厚度

厚度是影响盖层封闭天然气能力的重要参数之一,它不仅影响盖层空间展布面积的大小,还在一定程度上影响着盖层封闭质量。盖层厚度越大,其空间展布面积越大,封闭质量越好,越有利于天然气的大规模聚集藏;反之,则不利于天然气的大规模聚集藏^[12-13]。表 1 中大气田储量资料来源于 2008 年我国气田天然气申报地质储量。由表 1 可以看出,我国目前已发现的 45 个大气田盖层厚度差异较大,最大的是莺歌海盆地的东方 1-1 和乐东 22-1 气田,盖层厚度可达到 1600 m;而最小的是塔里木盆地的柯克亚气田,盖层厚度只有 26 m,两者相差 60 倍。由图 1 中可以看出,我国 45 个大气田盖层厚度主要分布在小于 200 m 内,其次是 200~400 m,再次是 1400~1600 m,400~600 m 相对较少,最少的是 600~800 m 和 1000~1200 m。从盆地来看,大气田盖层厚度最大的是莺歌海盆地,盖层厚度平均为 1600 m,其次是柴达木盆地,盖层厚度平均为 761.7 m;再次是东海和琼东南盆地,盖层平均厚度分别为 380 m 和 330 m;塔里木和松辽盆地盖层厚度相对较小,盖层平均厚度分别为 266.4 m 和 275 m,四川和鄂尔多斯盆地盖层平均厚度最小,分别只有 120.3 m 和 81.2 m。造成这一现象的原因可能与盖层形成时代有关,盖层形成的时代越新,压实成岩程度越低,孔渗性越高,封闭能力越弱,要封闭大气田盖层厚度就要大;反之,盖层厚度相对越小。

表 1 我国大型气田盖层封闭特征及能力表

Tab. 1 Seal characteristics and ability of caprock of large gas fields in China

大型气田	所在盆地	储层层位	储量 / 10^8 m^3	盖层排替压力 /MPa	盖层厚度/m	气藏压力系数	盖层层位	盖层岩性	盖层性质	盖层封气能力综合评价参数
苏里格	鄂尔多斯	$P_1 x_8$	8715.26	14.4	100	0.97	$P_2 sh$	泥岩	区域盖层	1.03
靖边	鄂尔多斯	O_1, P_1	4699.96	14.0	110	0.94	O_1	碳酸盐岩与泥质岩过渡岩性	直接盖层	1.06
							O_2, C	泥岩、铝土岩	区域盖层	
大牛地	鄂尔多斯	P_1, C	3522.30		60	0.75~1.05	$P_2 sh$	泥岩	区域盖层	
榆林	鄂尔多斯	$P_2 s_2$	1807.50	13.0	60	0.96	$P_2 s_2$ 上部	泥岩	直接盖层	
							$P_2 sh$	泥岩	区域盖层	1.04
子洲	鄂尔多斯	$P_2 s_2, P_1 x_8$	1151.97		45	1.02	$P_2 s_1, P_1 x_7$	泥岩	直接盖层	
乌审旗	鄂尔多斯	$P_1 x_8$	1012.10	10.0	105	0.85	$P_2 sh$	泥岩	区域盖层	1.18
							$C_3 t, P_2 s_{1-2}$	泥岩	直接盖层	
神木	鄂尔多斯	$P_2 s_2$	934.99	11.0	35~142	0.84	$P_2 s_1$	泥岩	区域盖层	1.18
米脂	鄂尔多斯	$P_1 x_{6-8}$	358.48			1.09	$P_1 s$	泥岩	直接盖层	
合川	四川	$T_3 x$	2299.35			1.21~1.36	$T_3 x, J$	黑色页岩、灰岩夹煤层或煤线	区域盖层	

续表 1

大型气田	所在盆地	储层层位	储量/ 10^8 m^3	盖层排替压力/MPa	盖层厚度/m	气藏压力系数	盖层层位	盖层岩性	盖层性质	盖层封气能力综合评价参数
新场	四川	J ₃ p、J ₃ s、J ₃ q、T ₃	2045.22	18.4	>300	1.65~2.00	J ₃ s	泥岩	区域盖层	0.55
广安	四川	T ₃ x	1355.58	9.0	58~101	1.38	T ₃ x ₅ 、T ₃ x ₆	泥岩夹煤层或煤线	区域盖层	0.65
八角场	四川	J、T	351.07		106	1.79	T ₃ x ₅	黑色页岩、碳质页岩、及薄煤层	区域盖层	
洛带	四川	J ₃ p、J ₃ sn、J ₃ s	323.83	22.4	30~80	0.94~1.22	J ₃ sn J ₃ p	泥岩 页岩、灰岩	区域盖层 局部盖层	0.93
邛西	四川	J、T	323.25		175	1.15	T ₃ x ₃	泥岩、煤层	区域盖层	
普光	鄂尔多斯	T ₁ f、P ₂ ch	3762.91				T ₁ j ₂ 、T ₁ j ₄ 及 T ₂ ¹	膏盐岩	区域盖层	
塔中 1 号	塔里木	C、O	2376.04				P O ₃ s	凝灰岩 砂泥岩	区域盖层 区域盖层	
和田河	塔里木	C、O	616.94	17.0	400	1.16	C ₁ 、C ₂ 、C ₃	灰岩、泥岩	区域盖层	0.86
塔河	塔里木	K、T、O、C	364.98		50~156		C ₁ b O ₁ 及 O ₃ ¹	双峰泥岩、灰岩 致密灰岩	区域盖层 局部盖层	
柯克亚	塔里木	N ₁ x	348.86	11.0	26	2.00	N ₁ x ₃ 下部	泥岩	区域盖层	0.50
大天池	四川	T ₁ f	1067.55			1.12	P ₁ ¹	黑色页岩夹煤	区域盖层	
罗家寨	四川	T、P	797.36			1.21	P ₃	致密灰岩、膏质云岩、泥岩	区域盖层	
磨溪	四川	T	702.31	21.0	60	1.19	T ₂ l ₃	石膏层、石膏质白云岩	区域盖层	0.84
卧龙河	四川	T、P	408.86	16.0	60	1.22	P ₁ ¹ P ₁ q-T ₁ j ₂	泥页岩及泥质粉砂岩 石灰岩、白云岩、膏岩	直接盖层 区域盖层	0.82
威远	四川	P、Z	408.61	21.0	200	1.03	O ₃ 和 S ₁ O ₁	页岩 砂泥岩	直接盖层 局部盖层	0.97
铁山坡	四川	T	373.97			1.35	ε ₁ j T ₁ j	泥岩 膏盐岩	区域盖层 区域盖层	
渡口河	四川	T	359.00	19.0	47	1.07	T ₁ f ₃ T ₁ f ₄	致密灰岩、泥质灰岩 泥灰、石灰、石膏	直接盖层 直接盖层	
克拉 2	塔里木	E、K	2840.29	19.5	448	2.20	T ₁ j-J E ₁₋₂	石膏、泥岩、致密灰岩、砂岩及过渡岩类 膏盐岩	区域盖层 区域盖层	0.93
迪那 2	塔里木	E ₂₋₃ s	1752.18	15.4	1433		E ₁₋₂ N ₁ j	膏盐岩	区域盖层	0.45
大北 1	塔里木	J ₁ a	586.99	7.5	312		E ₁₋₂	膏盐岩	区域盖层	
牙哈	塔里木	E ₁₋₂ km	373.89	11.0	160	1.38	E ₁₋₂	膏盐岩	区域盖层	0.72
英买 7 号	塔里木	E ₁₋₂	309.15	11.0	210	1.10	E 上部 E 中下部	泥岩 膏盐岩	区域盖层 区域盖层	0.91
克拉美丽	准格尔	C	1053.34		205	1.53	P ₃ wt	泥岩、煤层	区域盖层	
玛河	准格尔	E ₁₋₂ z ₃	313.98			1.48	E ₂₋₃	泥岩	区域盖层	
崖城 13-1	琼东南	E ₃ L ₃	978.51	13.5		1.05	N ₁ m	钙质泥岩	区域盖层	0.95
东方 1-1	莺歌海	N ₁ h	951.18	13.5	1600	1.08	N ₂ y	泥岩	区域盖层	0.93
荔湾 3-1	珠江口	N ₁ z、E ₃ z	475.81					泥岩		
乐东 22-1	莺歌海	QP、N ₂ Y ₂	431.04	13.5	1600	1.63	N ₂ y	泥岩	区域盖层	0.61

续表 1

大型气田	所在盆地	储层层位	储量/ 10^8 m^3	盖层排替压力/MPa	盖层厚度/m	气藏压力系数	盖层层位	盖层岩性	盖层性质	盖层封气能力综合评价参数
番禺 30-1	莺琼	N_1	300.92				N_{1h} 上部、 N_{1y}	泥岩	区域盖层	
春晓	东海	E_3H, E_2P	330.43	11.0	380	1.00	N_{1l}	泥岩	区域盖层	1.00
涩北一号	柴达木	Q_{1+2q}	990.61	1.3	792	1.19	Q	泥岩	区域盖层	0.12
涩北二号	柴达木	Q_{1+2q}	826.33	1.3	481	1.22	Q	泥岩	区域盖层	0.11
台南	柴达木	Q_{1+2q}	951.62	1.0	1012	1.14	Q	泥岩	区域盖层	0.09
徐深	松辽	K_{1yc}	2217.59	8.7	275	0.98	$K_{1q1}, K_{1q2}, K_{1d2}$	泥岩	区域盖层	0.89
长岭 I 号	松辽	K_{1yc}	706.30			1.13	K_{1d2}	泥岩	区域盖层	
松南气田	松辽	K_{1yc}	380.99				K_{2qn}	泥岩	区域盖层	
							$K_{1q1} - K_{1d}$	泥岩	直接盖层	

1.2 盖层排替压力

排替压力指岩石中最大连通孔隙的润湿相流体被非润湿相流体排替所需要的最低压力,其大小等于岩石中最大连通孔隙的毛细管压力。排替压力是影响盖层封闭能力最根本的参数,排替压力越大,盖层封闭天然气的能力越强,越有利于天然气的大规模聚集成藏;反之,则越弱,越不利于天然气的大规模聚集成藏。由表 1 可以看出,我国 45 个大气田除了柴达木盆地 3 个大气田盖层排替压力相对较低外,其余大气田盖层排替压力相对较高,均大于 7 MPa。由图 2 可以看出,我国 45 个大气田盖层排替压力主要为 10~15 MPa,其次 15~20 MPa, 0~5 MPa 和 20~25 MPa 最少。从盆地来看,四川盆地大气田盖层排替压力最高,平均达 18.1 MPa;其次是塔里木、琼东南、莺歌海、鄂尔多斯和东海盆地,盖层平均排替压力分别为 13.5, 13.5, 13.5, 12.5 和 11 MPa;松辽盆地大气田盖层排替压力相对较小,平均为 8.7 MPa;最小的是柴达木盆地,大气田盖层排替压力平均只有 1.2 MPa。不同盆地大气田盖层排替压力特征与厚度特征相反,也是由于盖层形成时代不同造成的,盖层形成时代越老,压实成岩程度越高,孔渗性越差,排替压力越高;反之,排替压力越低。

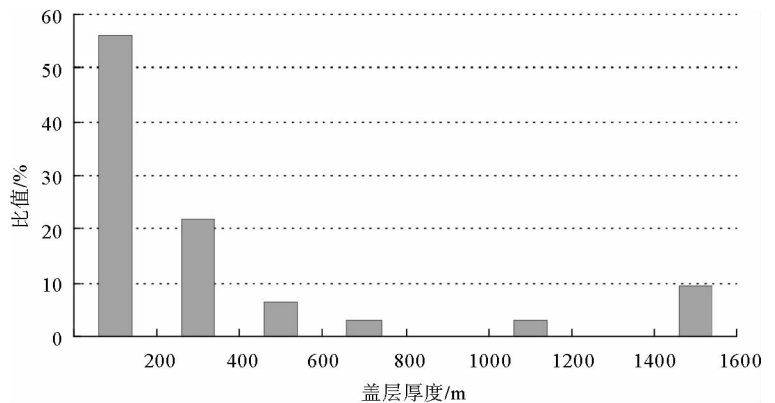


图 1 我国大气田盖层厚度分布图

Fig. 1 Distribution of caprock thickness of large gas fields in China

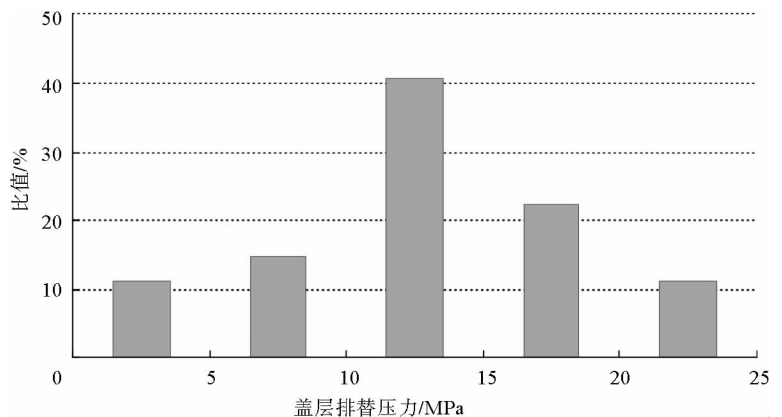


图 2 我国大气田盖层排替压力分布图

Fig. 2 Distribution of displacement pressure of large gas fields in China

1.3 气藏内压力

由于天然气本身的不可压缩性,圈闭封堵性和构造挤压等作用的结果,气藏内部往往具有不同于正常压实地层的异常孔隙流体压力(即地层压力系数大于1)。随着气藏内天然气储量的增大,地层孔隙流体压力和地层压力系数也增大。由表1中可以看出,我国45个大气田压力系数变化较大,最大的是塔里木盆地的克拉2气田,压力系数达2.20;最小的是鄂尔多斯盆地的神木气田,压力系数只有0.84。由图3可以看出,我国45个大气田压力系数主要分布在1.0~1.2,其次是0.8~1.0和1.2~1.4,1.4~1.6和1.6~1.8最少。从盆地来看,塔里木和准噶尔盆地大气田压力系数最高,平均达1.57;其次是莺歌海盆地和四川盆地,大气田压力系数分别达1.36和1.29;柴达木和松辽盆地大气田压力系数相对较低,分别平均为1.18和1.06;东海盆地和鄂尔多斯盆地大气田平均压力系数最低,分别只有1.00和0.95。

2 盖层封气能力综合评价

2.1 盖层封气能力综合评价方法

由上述分析可知,气藏盖层封气能力的强弱主要受到盖层厚度、排替压力和气藏内部压力的共同作用,为了表示盖层厚度、排替压力和气藏内部压力对盖层封气能力的共同作用,建立了盖层封气能力综合评价参数:

$$a = \frac{P_d \cdot H}{k} \quad (1)$$

其中: a 为盖层封气能力综合评价参数,无量纲,通常是一个小于1的常数,只有当气藏压力系数非常小时其值大于1。 P_d 为盖层排替压力,可由实测获得。计算时为了比较,应对气田盖层排替压力值进行归一化处理,按照文献[14]中盖层排替压力评价标准,如果盖层排替压力值 ≥ 10 MPa, P_d 取1;如果盖层排替压力值小于10 MPa, P_d 取 $P_d/10$,也无量纲。 H 为盖层厚度,可由钻井资料统计得到。计算时也应对其进行均一化处理,按照文献[14]盖层厚度评价标准,如果盖层厚度 ≥ 25 m时, H 取1;如果盖层厚度小于25 m, H 取 $H/25$,也无量纲。 k 为气藏内部压力系数,可由气藏内实际压力除以静水压力获得。

由式(1)可以看出, a 值大小与盖层厚度和盖层排替压力成正比,与气藏内部压力成反比,既反映了每个参数对盖层封气能力的贡献,又反映了3个参数对盖层封气能力的共同作用,是一个综合评价参数,其值越大,盖层封气能力越强;反之,盖层封气能力越弱。

2.2 盖层封气能力综合评价

通过统计中国45个大气田盖层厚度、排替压力和气藏压力系数(表1),首先对其进行均一化处理,再由式(1)对气田盖层封气能力进行综合评价,结果如表1所示。由表1中可以看出,中国45个大气田盖层封气能力综合评价参数值差异较大,最大的是鄂尔多斯盆地的乌审旗和神木气田,盖层封气能力综合评价参数达1.18,而最小的是柴达木盆地的台南气田,盖层封气能力综合评价参数只有0.09,两者相差10余倍。由图4中可以看出,中国45个大气田盖层封气能力综合评价参数主要分布在0.8~1.0之间,其次是1.0~1.2,0.6~0.8,0.4~0.6和0~0.2相对较少;从盆地来看,盖层封气能力综合评价能力最强的是鄂尔多斯盆地和东海盆地,分别平均达1.10和1.00;其次是琼东南、松辽和四川盆地,盖层封气能力综合评价参数平均分别为0.95,0.89和0.81;莺歌海和塔里木盆地盖层封气能力综合评价参数值相对较小,平均分别为0.77和0.69;柴达木盆地封气能力综合评价参数最小,平均只有0.11。这一封气特征主要是由于盖层厚度和排替压力不同造成的。

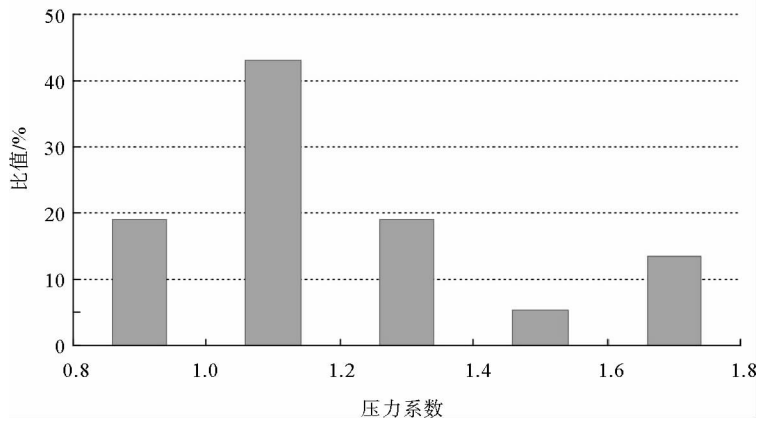


图3 我国大气田压力系数分布图

Fig. 3 Distribution of pressure coefficient of large gas fields in China

3 我国大气田形成所需要的盖层条件

由中国 45 个大气田天然气地质储量与其盖层封气能力综合评价参数的关系(图 5)可以看出,二者之间具较好的正相关关系,即随着盖层封闭能力评价参数逐渐增大,大气田储量逐渐增大;反之,大气田储量逐渐减小。由图 5 可以得出,当盖层封气能力综合评价参数约为 0.09 时,对应大气田的储量为 $3 \times 10^{10} \text{ m}^3$,这表明大气田形成所需要的最低盖层封气能力综合评价参数值应为 0.09。

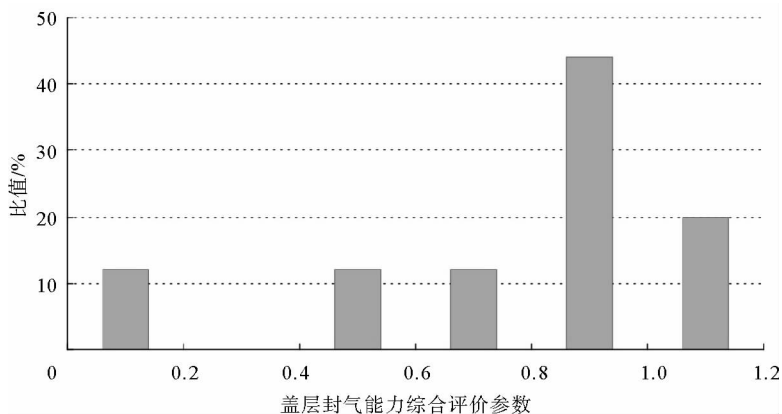


图 4 大气田盖层封气能力综合评价参数分布图

Fig. 4 Distribution of comprehensive evaluation parameter of caprock sealing ability for large gas fields

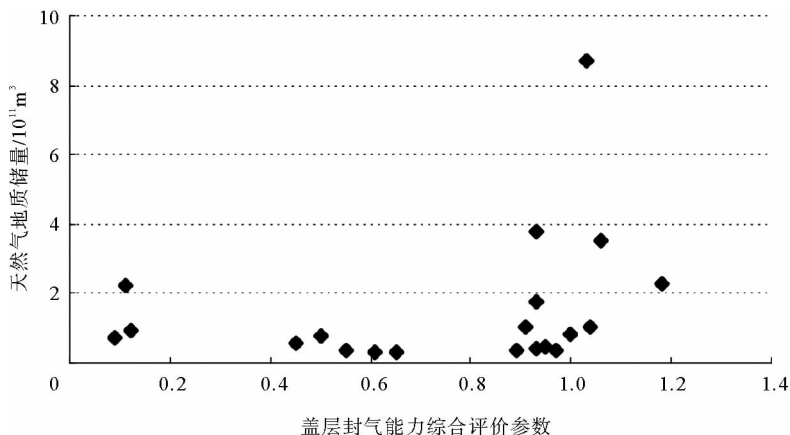


图 5 大气田天然气地质储量与其盖层封气能力综合评价参数之间关系图

Fig. 5 Relationship between geologic reserves of nature gas and comprehensive evaluation parameter of caprock sealing ability for large gas fields

4 应用实例

塔里木盆地库车坳陷克拉苏构造带为库车前陆盆地中部北侧,总体呈北东东-东西向展布,构造的发育与演化主要受区域逆冲断裂的控制,圈闭高度集中。该构造带成藏地质条件优越,紧临拜城生烃凹陷,发育优质的储盖组合,勘探潜力巨大,克拉 2 气田就位于该坳陷内。

根据对库车坳陷天然气聚集层位及地层岩性分析,该区主要存在两套盖层,一套是古近系库姆格列木群膏泥岩,另一套是新近系吉迪克组膏泥岩。这两套盖层为优质区域性盖层,也是库车坳陷内天然气富集的关键因素。本文主要对库姆格列木群盖层的综合封闭能力进行研究。

结合地震与录井资料,对库姆格列木群盖层厚度进行了研究(图 6)。库姆格列木群膏泥岩盖层厚度受断裂发育控制,高值区呈东西向条带状分布,最厚达 4000 m,由中央高值区向四周逐渐减薄。

建立库车坳陷实测岩心排替压力与其声波时差之间的关系,并通过拟合公式,结合主要气井的测井资料,对库姆格列木群盖层和吉迪克组两套区域盖层的排替压力分布特征进行研究。库姆格列木群盖层排替压力分布具有东西部高,中部低的特征。最大值为 15.5 MPa,位于吐北 1 井西部;最小值为 5 MPa,位于克拉 3 井东部。主要含气区域的排替压力分布为 5~9 MPa(图 7)。

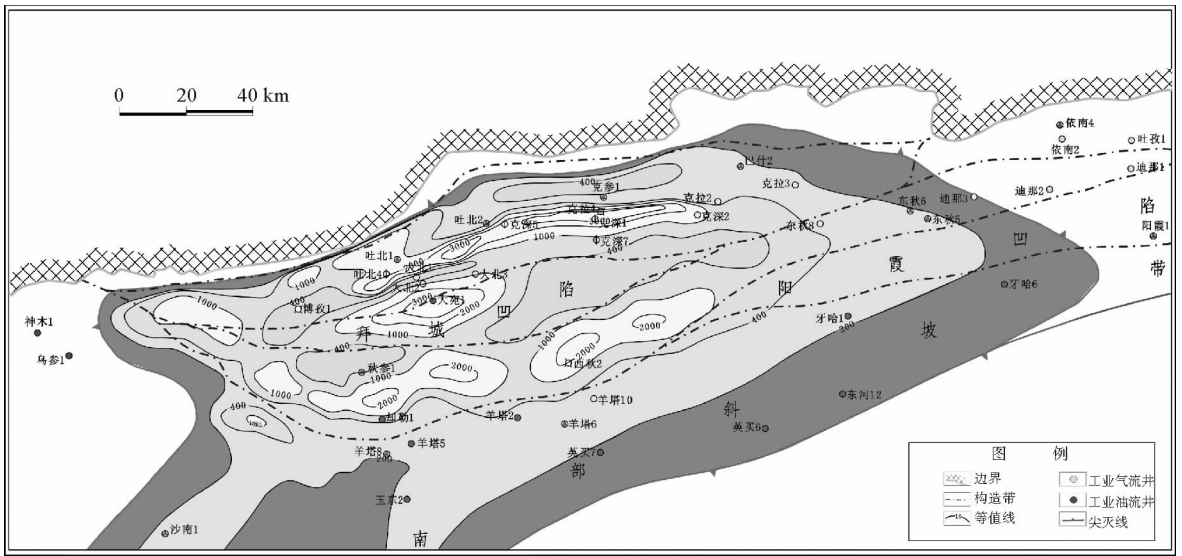


图 6 库姆格列木群盖层厚度分布图

Fig. 6 The caprock thickness map of Kumugeliemu Formation

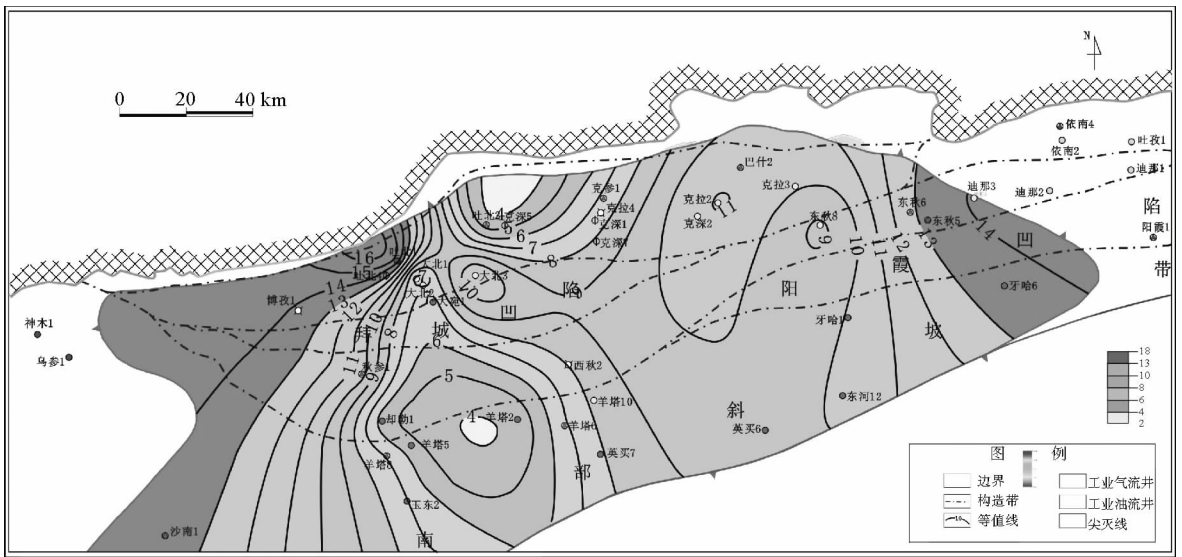


图 7 库姆格列木群盖层排替压力分布图

Fig. 7 The caprock displacement pressure map of Kumugeliemu formation

根据对库车坳陷主要探井储层位置地层压力的统计,得到库姆格列木群盖层以下的气藏排替压力的分布特征,发现沿山前一侧为气藏超压系统,压力系数均大于 1.6,最高为 2.2,分布在克拉 2 井附近。由此向南,储层压力系数逐渐降低到 1.2 左右(图 8)。

综合以上对库车坳陷盖层厚度、排替压力和储层压力系数三方面的分析,利用盖层综合评价公式对库车坳陷库姆格列木群盖层封气能力进行定量评价,根据图 5 中得到的大型气田形成的盖层封闭能力综合评价参数值 0.09,发现该套盖层除了北部、东部、南部以及中部局部地区外,均具备封闭大型气田的能力,目前主要的油气田均分布在该区域内(图 9)。

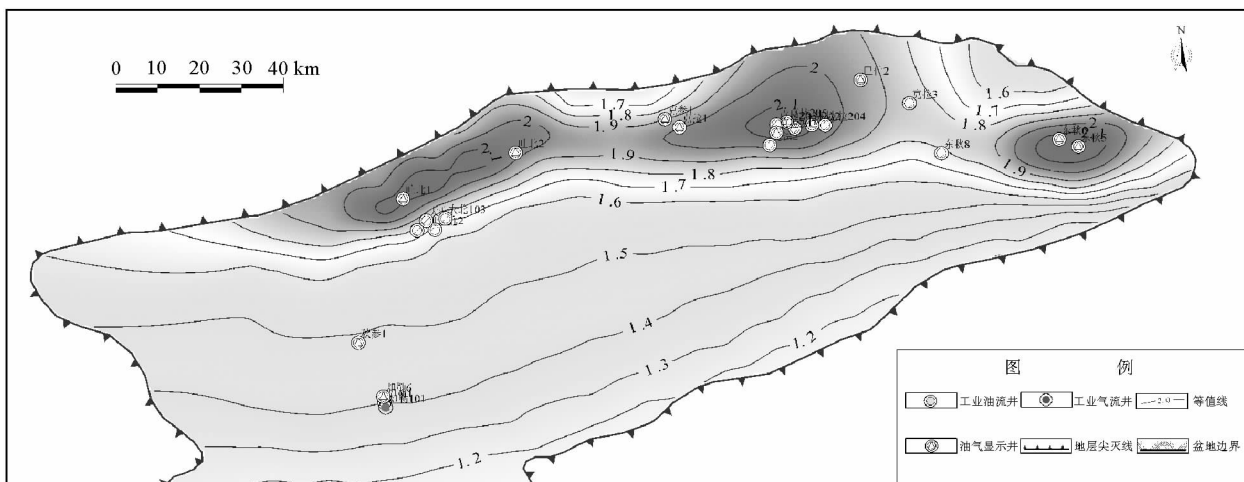


图 8 库姆格列木群盖层下部储层压力系数分布图

Fig. 8 The pressure coefficient map of reservoir under the caprock of Kumugeliemu formation

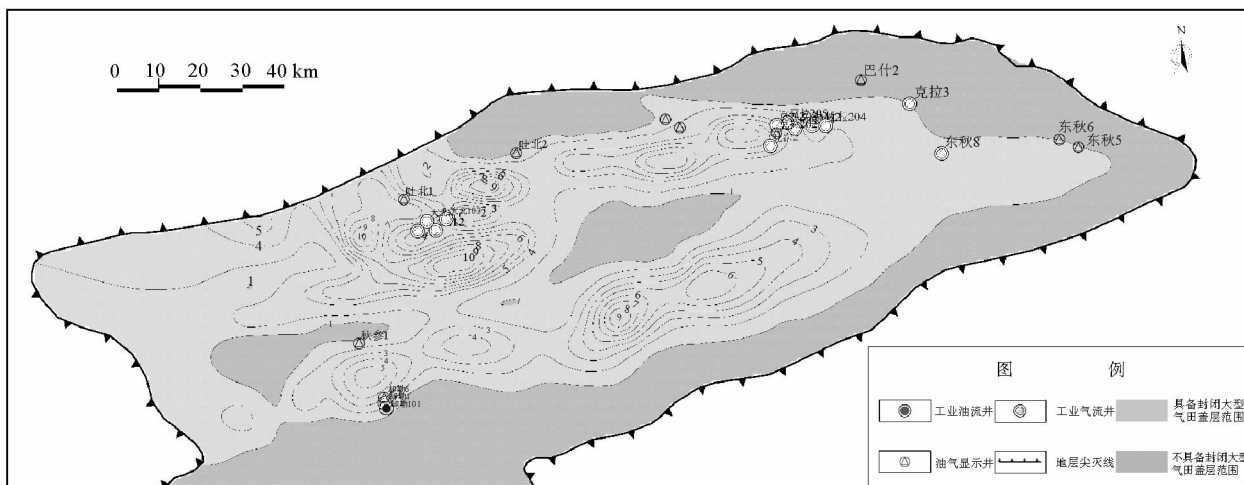


图 9 库车坳陷库姆格列木群盖层封气能力综合评价图

Fig. 9 Comprehensive evaluation of the gas caprock sealing ability of Kumugeliemu formation in Kuqa depression

5 结论

- 1) 中国 45 个大气田盖层厚度主要分布小于 200 m, 排替压力主要为 10~15 MPa, 气藏压力系数主要分布在 1.0~1.2 范围内。
- 2) 中国 45 个大气田盖层封气能力综合评价参数主要为 0.8~1.0, 具有强的封气能力。
- 3) 中国大气田天然气储量与盖层封气能力之间具正相关关系, 即盖层封气能力越强, 气田天然气储量越高; 反之则越低, 要形成大气田所需要的盖层条件是盖层封气能力综合评价参数值大于或等于 0.09。
- 4) 库车坳陷内的库姆格列木群膏泥岩盖层总体上综合封气能力较强, 除了北部、东部、南部以及中部局部地区外, 均具备封闭大型气田的能力, 目前主要的油气田均分布在该区域内。

参考文献:

[1] 戴金星, 宋岩, 张厚福. 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 Jingxing, Song Yan, Zhang Houfu. Main factors controlling the foundation of medium-giant gas fields in China[J]. Science in China Series D: Earth Sciences 1996, 26(6): 481-487.

- [2]赵庆波,杨金凤. 中国气藏盖层类型初探[J]. 石油勘探与开发,1994,21(3):15-23.
Zhao Qingbo, Yang Jinfeng. A preliminary discussion on the types of caprocks in Chinese gas reservoir and their control on the gas accumulation[J]. Petroleum Exploration and Development, 1994, 21(3): 15-23.
- [3]张立含,周广胜. 气藏盖层封气能力评价方法的改进及应用:以我国46个大中型气田为例[J]. 沉积学报,2010,28(2):388-394.
Zhang Lihan, Zhou Guangsheng. Improvement and application of the methods of gas reservoir cap sealing ability[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(2): 388-394.
- [4]庞雄奇,付广,方祖康. 地震资料用于盖层封闭油气的综合定量评价方法[J]. 石油地球物理勘探,1994,2(29):179-188.
Pang Xiongqi, Fu Guang, Fang Zukang. Quantitative barrier hydrocarbon sealing evaluation using seismic data[J]. Oil Geophysical Prospecting, 1994, 2(29): 179-188.
- [5]王显东,姜振学,庞雄奇,等. 塔里木盆地志留系盖层综合评价[J]. 西安石油大学学报:自然科学版,2004,19(4):49-57.
Wang Xiandong, Jiang Zhenxue, Pang Xiongqi, et al. Comprehensive evaluation of sealing ability of Silurian cap rocks in Talimu Basin[J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2004, 19(4): 49-57.
- [6]马永生,蔡勋育,赵培荣,等. 四川盆地大中型天然气田分布特征与勘探方向[J]. 石油学报,2010,31(3):347-354.
Ma Yongsheng, Cai Xunyu, Zhao Peirong, et al. Distribution and further exploration of the large-medium sized gas fields in Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(3): 347-354.
- [7]付广,吕延防,于丹. 我国不同类型盆地高效大中型气田形成的主控因素[J]. 地球科学:中国地质大学学报,2007,32(1):82-88.
Fu Guang, Lv Yanfang, Yu Dan. Major factors controlling formation of large and intermediate gas fields with high gas accumulation efficiency in different types of basins in China[J]. Editorial Committee of Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2007, 32(1): 82-88.
- [8]胡国艺,汪晓波,王义凤,等. 中国大中型气田盖层特征[J]. 天然气地球科学,2009,20(2):162-166.
Hu Guoyi, Wang Xiaobo, Wang Yifeng, et al. Cap rock characteristics of medium and large gas fields in China[J]. Natural Gas Geoscience, 2009, 20(2): 162-166.
- [9]付广,刘江涛. 中国高效大中型气田形成的封盖保存条件[J]. 石油勘探与开发,2006,33(6):662-666.
Fu Guang, Liu Jiangtao. Sealing and preservation conditions for large and medium gas fields of China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(6): 662-666.
- [10]鲁雪松,蒋有录,宋岩. 盖层力学性质及其应力状态对盖层封闭性能的影响:以克拉2气田为例[J]. 天然气工业,2007,27(8):48-51.
Lu Xuesong, Jiang Youlu, Song Yan. Influence of mechanical properties and stress state of caprock on its sealing performance: Taking Kela-2 gas field as an example[J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(8): 48-51.
- [11]张水昌,朱光有. 中国沉积盆地大中型气田分布与天然气成因[J]. 中国科学(D)辑:地球科学,2007(S2):1-11.
Zhang Shuichang, Zhu Guangyou. The distribution of natural gas origin of the large and medium gas fields of the sedimentary basins in China[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2007(S2): 1-11.
- [12]王庭斌. 中国大中型气田分布的地质特征及主控因素[J]. 石油勘探与开发,2005,32(4):1-8.
Wang Tingbin. Distribution of large-middle sized gas fields in China: Geological characteristics and key controlling factors [J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(4): 1-8.
- [13]张林晔,包友书,刘庆,等. 盖层物性封闭能力与油气流体物理性质关系探讨[J]. 中国科学(D)辑:地球科学,2010,40(1):28-33.
Zhang Linye, Bao Youshu, Liu Qing, et al. Effects of hydrocarbon physical properties on caprock's capillary sealing ability [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2010, 40(1): 28-33.
- [14]吕延防,付广,高大玲. 油气藏封盖研究[M]. 北京:石油工业出版社,1996:35-42.