

文章编号: 0253-9985(2009)02-0203-07

多套源岩天然气扩散损失量评价 ——以松辽盆地北部浅层气源岩为例

王民¹, 郭晓博², 薛海涛¹, 卢双舫¹, 付广¹, 陈勇³(1 大庆石油学院 地球科学学院, 黑龙江 大庆 63318 2 中国石油天然气股份有限公司 大庆油田有限责任公司
勘探开发研究院, 黑龙江 大庆 163712 3 中油测井技术服务有限责任公司, 北京 100101)

摘要: 根据天然气扩散原理、物质平衡原理和烃浓度封闭机理建立了多套源岩天然气扩散损失评价模型。选取松辽盆地北部浅层多套生物气源岩为例进行应用, 结果表明, 研究区4个层位现今累积生气量达 $385.7 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 浅层生物气源岩主要生气层位中嫩江组二段生气量最大, 主要生气期在嫩江组沉积末期。实际扩散气量计算表明, 嫩二段实际扩散气量最大, 其次为嫩一段、青山口组一段和青山口组二三段, 不考虑烃浓度封闭和考虑烃浓度封闭的累积实际扩散气量分别达 $199.42 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 和 $105.44 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。考虑烃浓度封闭时各时期的评价扩生比(实际扩散气量和生气量比值)都低于不考虑烃浓度封闭时的扩生比, 后者约为前者的2~3倍。

关键词: 扩散损失量; 物质平衡; 烃浓度封闭; 多套源岩; 松辽盆地

中图分类号: TE122.1 文献标识码: A

Assessment of natural gas diffusion loss from multiple source rocks —an example from shallow gas source rocks in the northern Songliao Basin

Wang Min¹, Guo Xiaobo², Xue Haitao¹, Lu Shuangfang¹, Fu Guang¹, Chen Yong³(1 Daqing Petroleum Institute, Daqing, Heilongjiang 163318, China; 2 Exploration and Development Research Institute of Daqing
Oilfield Company Ltd, Daqing, Heilongjiang 163712, China; 3 China National Logging Corporation, Beijing 100101, China)

Abstract Based on principles of natural gas diffusion, mass balance and hydrocarbon concentration sealing a model was established to assess natural gas diffusion loss from multiple source rocks. The model was applied to the shallow multiple source rocks in the north of the Songliao Basin. There are four shallow gas source rock intervals with a total accumulative gas volume generated of 387.5 TCM, in which the 2nd member of the Cretaceous Nenjiang Formation (K_1n^2) is the largest in gas volume generated. Peak gas generation occurred at the end of the Nenjiang age. Calculation of the actual gas diffusion loss shows that K_1n^2 is the highest in diffusion loss, followed by the 2nd and 3rd member of the Cretaceous Qingshankou Formation (K_1qn^{2+3}), K_1n^1 and K_1qn^1 . The actual cumulative gas diffusion loss with and without hydrocarbon concentration sealing effect considered are 199.42 TCM and 105.44 TCM, respectively. The ratio of diffusion loss to generation with hydrocarbon concentration sealing effect considered is lower than that without hydrocarbon concentration sealing effect considered. The latter is around 2–3 times as the former.

Key words multiple source rock; diffusion loss; mass balance; hydrocarbon concentration sealing; Songliao Basin

目前世界上发现的油气藏大部分都是经历过各种破坏因素后的“残余”油气藏, 对于现存的气

藏而言, 发生大规模的沿断层运移损失并不常见。相反, 低速率、长时间的扩散却是气藏被破坏的重

收稿日期: 2008-12-20。

第一作者简介: 王民(1981—), 博士研究生, 油气成藏与油气地球化学。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2006CB202307); 国家自然科学基金项目(40572079)。

要因素。扩散作用是天然气在地下发生运移的一种重要机制,它不需要压力差的存在,只要有浓度差存在,即可由高浓度区向低浓度区通过岩石孔隙发生运移。它是一种由集中到分散的迁移过程,尽管天然气在地下岩石中的扩散速度十分缓慢,但在漫长的地质历史时期中,它却可以连续不断地进行,其累积扩散量是十分可观的,大量的研究表明^[1~5],它足以破坏掉一个具有工业开采价值的天然气藏。因此,扩散损失量的大小直接影响着天然气的聚集与保存量的大小。

尽管天然气扩散损失已经受到广大石油地质工作者的重视,由于天然气在地下岩石中的扩散并非像其他单相介质(如空气)中的扩散那么简单,它除了受到岩石孔隙结构形态的影响外,而且还要受到孔隙介质性质以及其所处温压环境等多种因素的影响^[6]。以往学者更多的是模拟单一气源条件下的扩散量,而我国众多盆地则是多套气源供气;另外,扩散作用发生的前提是生成的气满足源岩的吸附、水溶、油溶,否则就是无源之水。因此,这种客观、全面地评价地质条件下的天然气扩散损失量难度较大,是天然气资源评价中的薄弱环节。本次研究从多套气源角度出发,依据物质平衡原理和烃浓度封闭机理尝试建立一套定量评价多套气源供气条件下的扩散损失气量方法,最后以松辽盆地北部浅层气源岩为例进行实际应用研究。

1 天然气扩散损失评价模型

1.1 最大扩散气模型

研究表明,浓度差异是天然气分子发生扩散的根本原因。天然气在地下岩石中的扩散有两种方式,一种是天然气分子通过岩石矿物颗粒的扩散,另一种是天然气分子通过岩石孔隙介质的扩散,其中天然气在地下岩石中的扩散以后者为主。由费克第一定律可以看出,在稳态条件下,天然气的扩散量大小主要取决于天然气在岩石中的扩散系数、浓度梯度、扩散流经面积和扩散时间 4 个变量:^[5]

$$Q = \int_0^t A \frac{dC}{dx} dt \quad (1)$$

Q 为天然气扩散损失量, m^3 ;

D 为天然气扩散系数, m^2/s ;

A 为天然气扩散流经面积, m^2 ;

t 为天然气扩散时间, s ;

C/dx 为天然气浓度梯度, $(m^3 \cdot m^{-3})/m$ 。

其中浓度梯度、扩散面积及时间 3 个变量不受地层岩性的影响,只有天然气扩散系数明显受地层岩性因素的影响。在地层剖面中,不论是水平还是垂向方向,其岩性都会发生很大变化,致使天然气在地层中的扩散更加复杂。天然气在地层条件下的扩散既要穿过上覆砂岩地层,又要穿过上覆泥岩地层和灰岩地层。通常情况下由于灰岩、泥岩孔隙小于砂岩孔隙,所以天然气在灰岩、泥岩中的扩散速度较在砂岩中扩散速度慢,即天然气在灰岩、泥岩中的扩散系数小于其在砂岩中的扩散系数。由于地层岩性的变化就给天然气扩散系数的准确取值带来了困难,同时又因为天然气扩散系数的大小受岩石孔隙大小的制约,所以不同埋深处岩石对天然气扩散系数也是不同的,即天然气扩散系数应是其埋深的函数。因此,为了研究问题的方便,将天然气通过 H 厚地层(其中灰岩层厚度为 H_1 ,泥岩层厚度为 H_m ,砂岩层厚度为 H_s) 在单气源条件下的扩散,首先视其为通过 H 厚泥岩层的扩散,然后将其视为通过 H 厚砂岩层的扩散,再将其视为通过 H 厚灰岩层的扩散;最后根据 H 厚地层中泥岩层、砂岩层和灰岩层所占百分比 ($R_m = H_m/H$, $R_s = H_s/H$, $R_1 = H_1/H$) 由串联原理,可得到混和岩性地层的天然气扩散系数 D_{msl} 即:

$$D_{msl} = \frac{D_m D_s D_1}{R D_m D_s + R_m D_s D_1 + R_s D_m D_1} \quad (2)$$

前人在天然气扩散气量计算过程中都假设地层水是饱和天然气的^[5,6],即假设扩散过程中天然气的量是充足的。本文将地层水饱和气的情况下计算得到的扩散气量称为天然气的最大扩散损失量,又称为最大扩散气量。

1.2 实际扩散气模型

假设进入生气门限以后,气源岩生成的天然气只有在满足了吸附、油溶、水溶以后才可以以游离相排出。在实际地质情况下,当有机质丰度、演化程度、类型并不理想时,气源岩的生气量不能满足岩石残留而无法向外扩散排出。即使生气量满足了岩石残留而开始有扩散发生,也未必有足够

的气量达到最大扩散气量的要求。理论上可以计算地层水欠饱和情况下的天然气扩散气量, 只要知道对应深度处的天然气在地层水中的溶解度, 即为实际气相压力下的溶解度而不是该深度泡点压力下的溶解度。但实际计算过程中, 地层水中实际气相压力下的溶解度是难以获得的参数, 因此使直接用公式 (1) 计算实际扩散气量成为一件困难的事, 这也是一直以来人们只计算天然气的最大扩散气量而不计算其实际扩散气量的原因^[5-6]。因此以物质平衡原理为基础, 比较可排气量 (将可排气量定义为生气量与岩石残留气量的差值, 即可排气量 = 生气量 - 残留气量) 与最大扩散气量 (QKS_{zi}), 取二者中的小者为实际扩散气量^[7-8] (QKS_{sj})。

1.3 多套气源岩扩散损失量模型

由于多套气源岩的存在, 在生气过程中势必会有浓度封闭作用发生。烃浓度封闭机理在于上覆气源岩 (或盖层) 天然气浓度大于下伏气源岩的天然气浓度, 按照其对扩散相天然气的封闭机理不同, 可将泥岩盖层对扩散相天然气的封闭作用划分为两类, 即抑制浓度封闭作用和替代浓度封闭作用^[9]。研究浓度封闭的关键是确定浓度封闭作用的开始和结束时期。付广认为可将

泥岩盖层的生烃门限作为替代或抑制浓度封闭的形成门限, 对应时期作为替代或抑制浓度封闭形成时期, 抑制浓度封闭作用最终转化成替代浓度封闭作用, 而替代浓度封闭作用则没有终止时期^[9]。本次研究把上覆源岩生成的气刚好满足源岩吸附、水溶和油溶后, 即有游离气出现的时刻作为下伏源岩的浓度封闭作用发生的时刻。根据天然气在地下实际扩散气量计算原理, 结合烃浓度封闭机理, 多套气源岩扩散损失地质模型如图 1。

随着上覆地层沉积, 第一套源岩 (S_1) 首先进入产气阶段。根据上述原理, 假设生成的气满足了地层水的溶解, 源岩的吸附和油溶后发生扩散, 而只有满足了当生气量 - 水溶气 - 吸附气 - 油溶气 - 最大扩散气大于零时, 才会有游离气出现。示意图 (左侧) 中, 当第一套源岩埋深达到 H_1 时, 开始有游离气出现。根据烃浓度封闭机理, 当上覆烃源岩有游离气时将会对下伏源岩产生烃浓度封闭, 可以认为下伏源岩扩散终止。示意图 (右侧) 中, 当埋深达到 H_2 时, 第二套源岩的生气量刚好满足水溶、吸附、扩散气量的消耗而有游离气出现时, 该套扩散系统的扩散面转移到第二套气源岩的顶面, 此时可以认为下伏气源岩层扩散停止 (实际上是烃浓度抑制扩散和替代扩散作用发

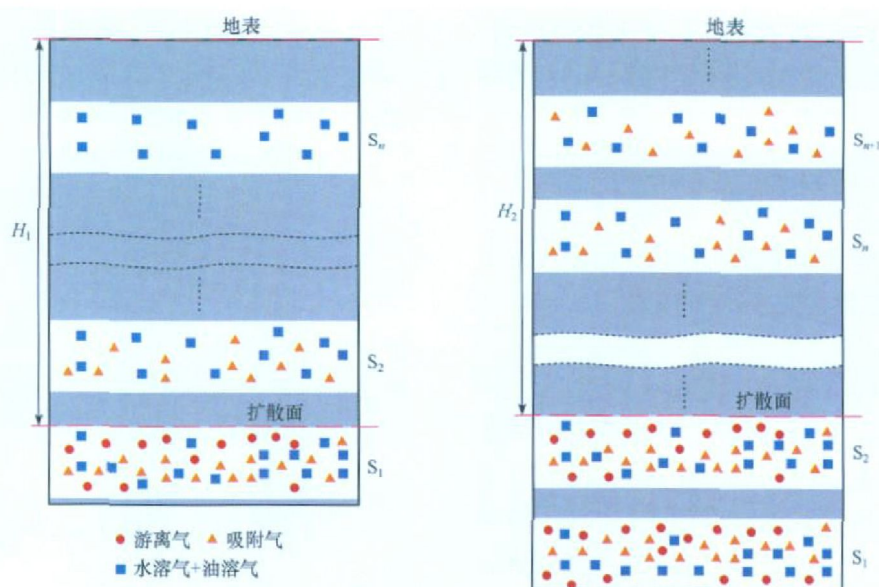


图 1 多套气源岩扩散气量计算示意图

Fig. 1 Map showing the calculation of gas diffusion loss from multiple source rocks

(图中 S_1 表示第一套气源岩地层, S_2 表示第二套气源岩地层, S_n 表示第 n 套气源岩地层; 红色虚线表示扩散面)

生)。从表地层至新地层,扩散面逐渐上移,据此分别计算各层气源岩在相应历史时期发生的扩散气量。其中气源岩生气模型^[10],油溶气模型^[11],水溶气模型^[12]和吸附气模型^[13]前人已进行研究。

2 实例应用

以松辽盆地浅层生物气源岩为例,工区范围为滨北地区、朝阳沟阶地、三肇凹陷、齐家古龙及部分西部斜坡区,总面积约 $12 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。根据松辽盆地的地层特点选取上覆岩层的砂泥比例为砂:泥 = 0.71:0.29。纯泥岩、砂岩的扩散系数见文献 8 由公式 (2) 可以确定上覆岩层的扩散系数,进而为扩散气量的计算提供必要的参数。本次研究主要评价了青一段 (K_1qn^1)、青二三段 (K_1qn^{2+3})、嫩一段 (K_1n^1) 和嫩二段 (K_1n^2) 4 套源岩从沉积末期到嫩江组沉积末期 (73 Ma)、明水组沉积末期 (65 Ma)、泰康组沉积末期 (2 Ma) 及现今四个时间段的生气量、水溶气量、吸附气量和扩散气量。通过计算生气量、水溶气量、吸附气量和理论扩散气量以及根据物质平衡原理比较可排气量 (= 生气量 - 残留气量) 与最大扩散气量来确定实际扩散气量,并结合上述多套气源岩扩散地质模型来评价各套气源岩实际扩散气量。本次研究动态计算了气源岩在不同时期的生气量、可排气量、残留气量 (吸附气和溶解气)、最大扩散气量,进而计算出考虑烃浓度封闭和不考虑烃浓度封闭条件下的实际扩散气量。

2.1 源岩特征

根据松辽盆地北部浅层气源岩干酪根元素分析数据,绘制了主要气源岩的氢碳氧元素组成范氏图 (图 2),从图中可以看出嫩一段的有机质类型主要为 I 型,也含有 II 型和 II 型干酪根;嫩二段有机质类型主要为 II 型;而青山口组的有机质类型主要为 I 和型 II₁ 型。

统计有机碳分析数据表明 (图 3),青一段平均值最大 (达 3.0),其次为嫩一段 (达 2.4),嫩二段次之,青二三段最小。图 4 是统计不同层位暗色泥岩厚度柱状图,从图中可以看出嫩二段暗色泥岩平均厚度最大 (达 126 m),其次为青二三段 (达 90 m)。

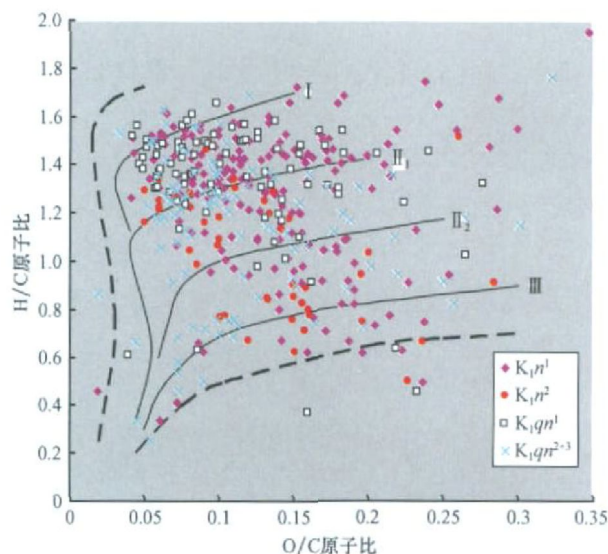


图 2 松辽盆地北部浅层气源岩干酪根元素组成范氏图
Fig. 2 The Van Krevelen diagram of elementary composition of kerogen in the shallow gas source rocks in the northern part of the Songliao Basin

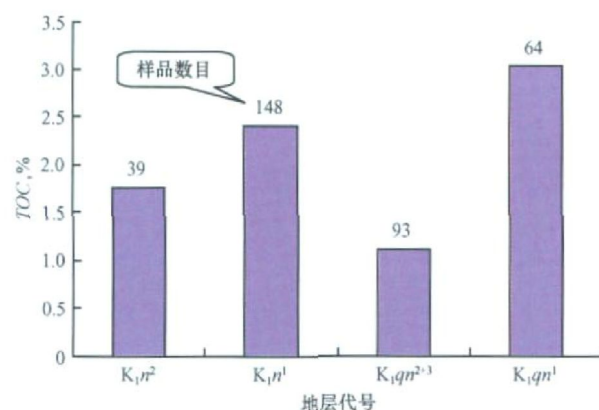


图 3 松辽盆地北部浅层气源岩各层位 TOC 含量统计
Fig. 3 Statistical chart of TOC content of the shallow gas source rocks in the northern part of the Songliao Basin

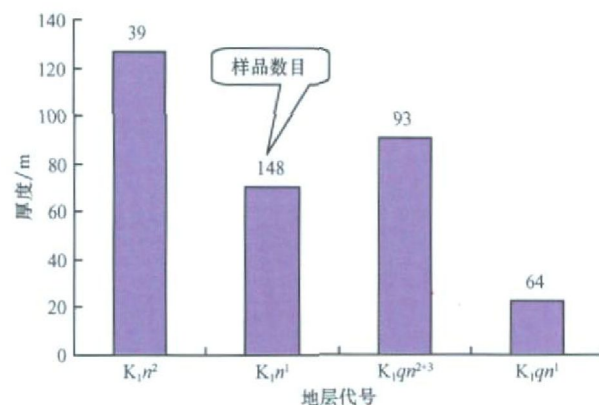


图 4 松辽盆地北部浅层气源岩各层位暗色泥岩厚度统计

Fig. 4 Average thickness of the shallow gas source rocks (dark mudstone) in the northern part of the Songliao Basin

2.2 源岩生气剖面

大量的研究证明, 有机质成气是一个非常复杂的动力学过程, 而且这过程可以用平行一级反应进行描述, 生物气是微生物发酵有机质成气过程, 理论上也可以用平行一级反应进行描述, 因此选用这一模型来描述生物气的生成过程^[10]。根据化学动力学模型结合松辽盆地埋藏史和热史资料, 计算得出松辽盆地北部各套源岩生气史, 图 5 给出了青山口组气源岩生气史, 从图中可以看出青山口组生物气源岩主要生气阶段在 86 Ma(姚家组沉积末期)以前。

3 应用结果分析

表 1 和表 2 给出了松辽盆地北部浅层气源岩在不同地质历史时期(嫩江组末期、明水组末期、太康组末期及现今)的生气量表和实际扩散气量表。可以看出主要生气层段中嫩二段生气量最大,

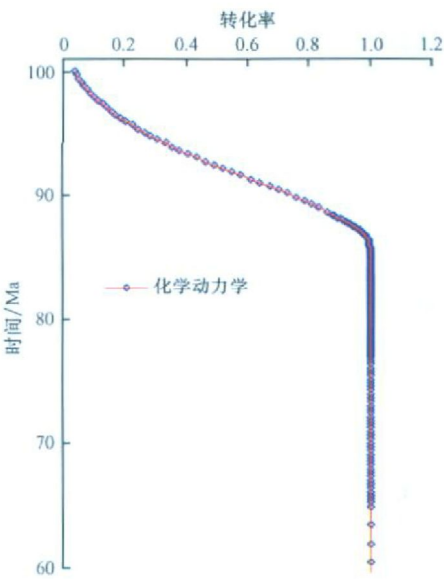


图 5 化学动力学模型计算的青山口组源岩生气史
Fig. 5 Biogenic gas generation history of source rocks in the Cretaceous Qingshankou Formation based on chemical kinetic models

表 1 松辽盆地北部浅层气源岩不同时期生成生物气量
Table 1 Biogas volume generated from the shallow gas source rocks during different periods in the northern part of the Songliao Basin(TCM)

地层	代号	生气量 /(10 ¹² m ³)			
		现今	泰康组沉积末期	明水组沉积末期	嫩江组沉积末期
嫩二段	K ₁ n ²	141.55	128.32	87.89	81.90
嫩一段	K ₁ n ¹	134.15	130.02	100.47	99.38
青二三段	K ₁ qn ²⁺³	57.19	57.49	52.71	51.36
青一段	K ₁ qn ¹	52.81	52.47	48.80	47.35
总计		385.70	368.30	289.88	280.00

表 2 松辽盆地北部浅层气源岩不同时期扩散气量
Table 2 The gas diffusion loss from the shallow gas source rocks during different periods in the northern part of the Songliao Basin(TCM)

地层	代号	生气量 /(10 ¹² m ³)							
		现今		泰康组沉积末期		明水组沉积末期		嫩江组沉积末期	
		a	b	a	b	a	b	a	b
嫩二段	K ₁ n ²	66.43	67.03	56.40	57.40	11.19	11.79	9.85	9.85
嫩一段	K ₁ n ¹	67.62	15.64	64.31	13.71	16.86	2.28	12.16	2.47
青二三段	K ₁ qn ²⁺³	31.66	11.30	32.04	11.46	13.41	3.70	10.01	2.98
青一段	K ₁ qn ¹	33.70	11.46	32.09	11.48	12.67	5.15	10.15	3.68
总计		199.42	105.44	184.83	94.05	54.14	22.93	42.17	18.98

注: a. 不考虑烃浓度封闭; b. 考虑烃浓度封闭。

其余依次为嫩一段、青二三段和青一段,主要的生气期在嫩江组末期。现今总生气量达 $385.70 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。嫩二段扩散气量最大,其次为嫩一段、青一段和青二三段,不考虑烃浓度封闭和考虑烃浓度封闭的累积扩散气量分别达 $199.42 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 和 $105.44 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。

从不同时期扩生比表来看(表 3),考虑烃浓度封闭和不考虑烃浓度封闭两种情况下从嫩江组沉积末期到现今各层系的扩生比依次增加,主要原因在于主生气期在嫩江组沉积末期,扩散气量的增加速率超过生气量的增加速率。考虑烃浓度封闭时各时期的评价扩生比都低于不考虑烃浓度封闭时的扩生比,前者约为后者的 2~3 倍。

图 6 至图 8 给出了上述模型计算的排气量、扩散气及扩生比对比图。可以看出,考虑烃浓度

封闭后各层系(嫩二段除外)排气量高于不考虑烃浓度封闭时排气量(图 6),几乎高出 1/2。嫩二段做为最顶部源岩(本次研究中选取四套源岩,从下到上依次为青一段、青儿三段、嫩一段和嫩二段),所以考虑和不考虑烃浓度封闭得出的实际扩散气量基本相当,因此可排气量也相当。从扩散气量上来看,不考虑烃浓度封闭时扩散气量远大于考虑烃浓度封闭时扩散气量(图 7),甚至超出考虑烃浓度封闭扩散气量的 2 倍(嫩二段除外)。从各自的扩生比图(扩散气量与生气量比值)可以看出,考虑烃浓度封闭时扩生比低于不考虑烃浓度封闭的扩生比(图 8),考虑烃浓度封闭后扩生比平均值约 25%,不考虑烃浓度封闭时扩生比约 55%,也就是说在不考虑烃浓度封闭时,约生成天然气总量的 1/2 将扩散损失。

表 3 松辽盆地北部浅层气源岩不同时期扩生比

Table 3 Ratios of diffusion loss to generation during different periods in the northern part of the Songliao Basin

地层	代号	泰康组沉积末期		明水组沉积末期		嫩江组沉积末期		泰康组沉积末期	
		a	b	a	b	a	b	a	b
嫩二段	K_1n^2	0.47	0.47	0.44	0.45	0.13	0.13	0.12	0.12
嫩一段	K_1n^1	0.51	0.12	0.50	0.11	0.17	0.02	0.12	0.02
青二三段	K_1qn^{2+3}	0.56	0.20	0.57	0.20	0.26	0.07	0.19	0.06
青一段	K_1qn^1	0.64	0.22	0.62	0.22	0.27	0.11	0.21	0.08
平均值		0.55	0.25	0.53	0.24	0.21	0.08	0.16	0.07

注: a. 不考虑烃浓度封闭; b. 考虑烃浓度封闭。

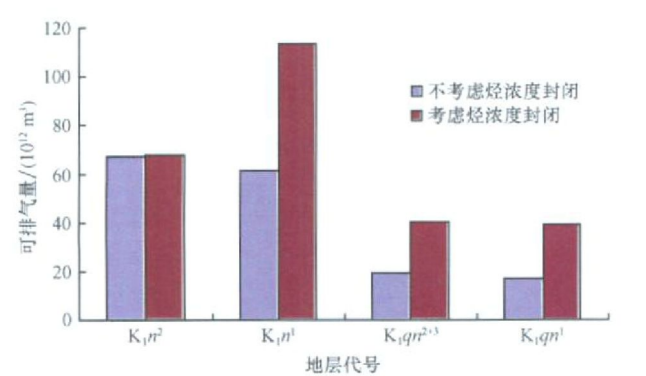


图 6 考虑烃浓度封闭与不考虑烃浓度封闭的多套气源岩排气量对比(现今)

Fig. 6 Comparison of the gas expulsion (present) with and without hydrocarbon concentration sealing effect considered

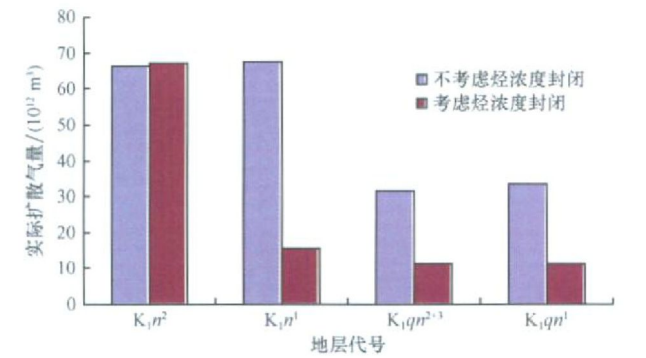


图 7 考虑烃浓度封闭与不考虑烃浓度封闭的多套气源岩扩散气量对比(现今)

Fig. 7 Comparison of the diffusion loss (present) of multiple source rocks with and without hydrocarbon concentration sealing effect considered

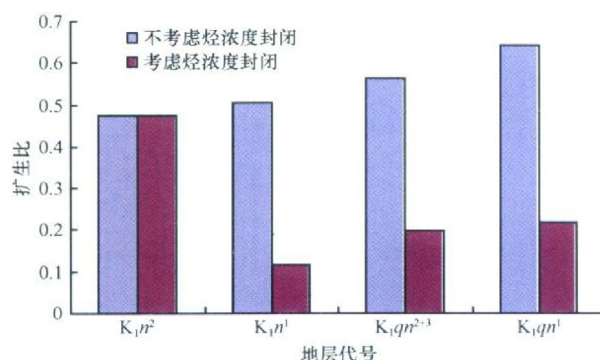


图 8 考虑烃浓度封闭与不考虑烃浓度封闭的多套气源岩扩生比对比 (现今)

Fig. 8 Comparison of the ratios of diffusion loss to generating (present) with and without hydrocarbon concentration sealing effect considered

4 结论

1) 根据物质平衡原理和烃浓度封闭机理建立了多套气源岩扩散气损失量评价地质模型,并结合前人建立的源岩生气、扩散气、吸附气、油溶气和水溶气模型,以松辽盆地北部浅层多套气源岩为例进行实际应用。

2) 松辽盆地北部浅层生物气源岩主要生气层段中嫩二段生气量最大,其余依次为嫩一段、青二三段和青一段,主要的生气期在嫩江组末期。现今总生气量达 $385.70 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。嫩二段扩散气量最大,其次为嫩一段、青一段和青二三段,不考虑烃浓度封闭和考虑烃浓度封闭的累积扩散气量分别达 $199.42 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 和 $105.44 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。

3) 在地质情况下,不考虑烃浓度封闭时扩散气量远大于考虑烃浓度封闭时扩散气量。不考虑烃浓度封闭时各时期的评价扩生比都高于不考虑烃浓度封闭时的扩生比,前者约为后者的 2~3 倍。表明在实际天然气资源评价工作中应该重视扩散气量计算。

参 考 文 献

- 1 Leythaeuser D, Schaefer R G, Yukler A. Role of diffusion in primary migration of hydrocarbons [J]. AAPG Bulletin, 1982, 66 (4): 408-429

- 2 Leythaeuser R, Schaefer R G, Yukler A. Role of diffusion in primary migration of hydrocarbons [J]. AAPG Bulletin, 1982, 66 (4): 408-429
- 3 郝石生, 黄志龙. 天然气盖层研究与评价 [J]. 沉积学报, 1991, 9(4): 20-26
- 4 Nelson J S, Simmons E C. Diffusion of methane and ethane through the reservoir cap rocks. Implications for the timing and duration of catagenesis [J]. AAPG Bulletin, 1995, 79(7): 1064-1074
- 5 付广, 吕延防. 天然气扩散作用及其研究方法 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1999, 1-88
- 6 付广, 付晓飞. 天然气扩散量的多气源模式估算方法初探 [J]. 海相油气地质, 1998, 3(3): 54-58
- 7 张玉明, 李明, 李瑞磊. 松辽盆地南部深层系天然气成藏规律 [J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(6): 841-848
- 8 薛海涛. 碳酸盐岩烃源岩评价标准研究 [D]. 大庆: 大庆石油学院, 2004, 78-79
- 9 付广, 吕延防, 付晓飞. 泥岩盖层浓度封闭演化特征——以松辽盆地白垩统泥岩为例 [J]. 地质科学, 2003, 38(2): 165-171
- 10 王民, 卢双舫, 胡慧婷, 等. 生物气生成的化学动力学模型及其应用——以柴达木盆地为例 [J]. 地质学报, 2007, 81(3): 428-432
- 11 薛海涛, 卢双舫, 付晓泰. 甲烷、二氧化碳和氮气在油相中溶解度的预测模型 [J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(8): 44-449
- 12 付晓泰, 王振平, 卢双舫. 天然气在盐溶液中的溶解机理及溶解度方程 [J]. 石油学报, 2000, 21(3): 89-94
- 13 薛海涛, 卢双舫, 付晓泰, 等. 烃源岩吸附甲烷研究 [J]. 石油学报, 2003, 24(6): 45-50

(编辑 董 立)