

松辽盆地三肇凹陷扶余油层天然气 扩散量及其地质意义

傅 广 姜振学

(大庆石油学院, 黑龙江安达 151400)

在地史恢复的基础上, 利用费克第一定律对三肇凹陷扶余油层天然气扩散量进行了计算, 结果表明其天然气扩散量占其气源岩总生气量的 27.39%, 充分证实了扩散作用是天然气远景评价中不可忽视的重要因素。

关键词 天然气扩散作用 综合扩散系数 盖层 松辽盆地 扶余油层

第一作者简介 傅 广 男 30岁 讲师 石油与天然气地质

天然气与石油相比, 分子小、重量轻、活动性强。自气源岩排出进入储集层中的天然气, 除了会因储集层水溶解、围岩吸附和通过盖层粗孔隙及连通裂隙发生渗滤作用而损失外, 还会因气层与盖层之间存在气体浓度差发生扩散作用而损失。Leythaeuser^[1]的计算结果充分证实, 天然气在漫长的地质历史时期中的扩散量是十分可观的, 足以毁掉一个具有工业开采价值的气藏。因此, 开展各地质时期天然气扩散损失量的定量研究, 对于准确估算一个地区或一个气藏的天然气聚集量以及远景评价都具有十分重要的意义。

本文试图以松辽盆地三肇凹陷扶余油层天然气扩散量计算为例, 阐明天然气的扩散作用是天然气远景评价中不可忽视的重要因素。

一、三肇凹陷一般地质概况

三肇凹陷位于松辽盆地中央坳陷区内, 西接大庆油田, 东到朝阳沟油田, 北抵滨洲铁路, 南至松花江边。

该区油气勘探程度较高, 截止 1990 年底, 三肇凹陷扶余和杨大城子油层共钻探井 54 口, 探明了一定的含气面积, 拿到了一定的天然气储量。

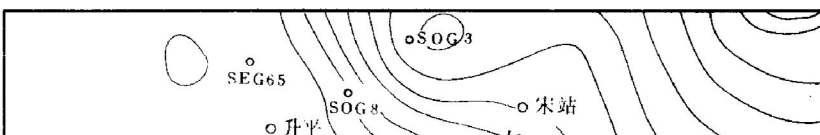
扶余油层位于下白垩统的泉四段 (图 1), 在该区厚度为 80—100 m, 主要为滨、浅湖相和三角洲相的砂岩和粉砂岩, 孔渗条件较好, 是有利的储集岩。扶余油层中的天然气主要是来自下伏深层的下白垩统登娄库组 and 上侏罗统气源岩生成的煤型气, 该气源岩于泉头组沉积末期就已进入高成熟阶段^[2], 故自此时期以后, 天然气便可以不断地运移到扶余油层聚集起来。

扶余油层的直接盖层是其上的具有超高压的青山口组的大套暗色泥岩, 厚度一般大于 370 m, 横向分布稳定, 断裂并未断穿整个青山口组的泥岩而使其失去封闭的有效性。11 块泥岩样品的实测排替压力值平均为 7.4 MPa, 具有较强的封闭能力, 因此可以认为该区扶余油层天然气的损失以扩散作用为主。

二、三肇凹陷扶余油层天然气扩散量计算

(一) 天然气通过盖层扩散的计算模型

扩散是物质传递的一种方式，通常所指的扩散作用是物质在浓度梯度的作用下，从高浓度区向低浓度区转



$$\frac{dQ}{dt} = D \cdot \frac{dc}{dx}$$

式中： $\frac{dQ}{dt}$ ——天然气扩散速率 (m^3/s)， D ——天然气扩散系数 (m^2/s)， $\frac{dc}{dx}$ ——天然气浓度梯度 ($\text{m}^3/\text{m}^3 \cdot \text{m}$)。

由(1)式可得 t 时间内天然气通过面积为 S 的上覆盖层的扩散量为：

$$\begin{aligned} Q &= \int_0^t \frac{dQ}{dt} \cdot S \cdot dt = \int_0^t D \cdot \frac{dc}{dx} \cdot S \cdot dt \\ &= \int_0^t D \cdot \frac{C_1 - C_0}{Z} \cdot S \cdot dt = D \cdot \frac{C_1 - C_0}{Z} \cdot S \cdot t \end{aligned} \quad (2)$$

式中： C_1 ——气层水中天然气浓度 (m^3/m^3)， C_0 ——地表条件下水中天然气浓度 (m^3/m^3)， Z ——气层埋藏深度 (m)， S ——天然气扩散面积 (m^2)， t ——天然气扩散时间 (s)。

(二) 计算参数的确定与选取

1. 天然气的综合扩散系数

天然气在由气层向地表扩散的过程中，首先穿过上覆直埡泥岩盖层，然后再穿过上方砂、泥岩层才能扩散到地表。由于天然气在砂岩中的扩散系数明显高于在泥岩中的扩散系数，亦即天然气穿过砂岩的扩散速度明显大于其穿过泥岩的扩散速度。天然气向地表的扩散速度除了与泥岩、砂岩本身的扩散系数大小有关外，很大程度上取决于气层上方泥岩与砂岩层的相对发育程度。因此，本文采用综合扩散系数来描述天然气向地表的扩散速度，即：

$$D = R_m \cdot D_m + R_s \cdot D_s \quad (3)$$

式中： D ——综合扩散系数 (m^2/s)， D_m 、 D_s ——泥岩、砂岩的扩散系数 (m^2/s)， R_m 、 R_s ——泥岩、砂岩占整个上覆盖层厚度的百分比。

Krooss (1986) 的实验结果表明，随着碳原子数的增加，烃类气体的扩散系数呈指数关系减小，故烃类气

图1 松辽盆地沉积特征图

体的扩散作用以轻烃最为显著。该区扶余油层天然气组分中甲烷含量多数大于90%以上,重烃气含量较少,因此可以在计算时不考虑乙烷以上重烃气的扩散作用。

(1) 泥岩甲烷扩散系数 (D_m)

该区泉头组和登娄库组的含砂泥岩和粉砂质泥岩的实测甲烷扩散系数如表1所示。

温度升高,可以增大天然气的扩散速度。本文将通过天然气扩散系数的温度校正来考虑温度对天然气扩散作用的影响。在统计热力学中,扩散系数随温度的升高迅速增长,其关系式为:

$$D_T = D_0 e^{\frac{E_A}{R}(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T})} \quad (4)$$

式中: D_T —— T 温度下泥岩甲烷扩散系数 (m^2/s), D_0 —— 实验室条件下泥岩甲烷扩散系数 (m^2/s), T_0 —— 实验室温度 (K), E_A —— 是扩散分子的活化能 (kJ/mol), R —— 气体常数 $8.315J/mol \cdot K$ 。

表1 三肇凹陷泥岩甲烷扩散系数数据表

井 号	井 深 (m)	岩 性	扩散系数 (95℃) ($10^{-10}m^2/s$)	温度校正后的扩散系数 ($10^{-10}m^2/s$)
芳深2	2572.0	灰色粉砂泥岩	2.08	4.27
芳深2	2882.0	灰绿色含砂泥岩	2.12	6.77
芳深3	2827.8	暗紫色粉砂质泥岩	0.94	2.84
芳深3	2869.0	暗紫色粉砂质泥岩	1.14	3.64
芳深4	2744.0	灰色含砂泥岩	0.75	2.03
芳深4	2993.2	紫灰色粉砂质泥岩	2.25	6.44
卫深2	2851.6	灰色含砂泥岩	3.64	11.64

由式(4)对表1中甲烷扩散系数温度校正结果如表1所示。

甲烷的扩散系数在地史时期中受许多因素的影响,诸如扩散介质的特征、扩散系统所处的温度和分子扩散的孔隙空间结构形态等。岩石在压实成岩过程中,孔隙不断减小,当其具备阻止下伏气体渗透的封闭性后,仍会因孔隙的存在而产生气体向上扩散作用。孔隙大小对其扩散作用的影响很大,若气体分子的平均自由程远小于岩石孔径,则分子间碰撞是扩散分子运动的主要形式;若岩石孔径小于分子的平均自由程,则分子与孔壁碰撞的机会就多于分子之间的碰撞。显然后一种情况的扩散阻力大于前一种情况,即是说,岩石孔径大者扩散速度大,反之则小。扩散系数与岩石孔隙的经验关系如下式所示^[3]:

$$D = A \cdot \varphi \quad (5)$$

式中: D —— 扩散系数 (m^2/s), φ —— 岩石孔隙度 (小数), A —— 与地区有关的常数。

根据式(5)由表中校正后的扩散系数整理得到该区泥岩甲烷扩散系数与孔隙度之间的变化关系式为:

$$D_m = 1.38 \cdot \varphi \quad (6)$$

由该区青山口组泥岩孔隙度在地质时期中的变化规律根据式(6)可以恢复计算得到该区青山口组泥岩甲烷扩散系数。

(2) 砂岩甲烷扩散系数 (D_s)

根据吉林扶余油田研究院实测甲烷扩散系数(实验室条件为压力101325Pa,温度20℃)数据资料,松辽盆地地下白垩统的泥岩甲烷扩散系数为 $1.61 \times 10^{-6} cm^2/s$,细砂岩甲烷扩散系数为 $4.74 \times 10^{-6} cm^2/s$,砂岩甲烷扩散系数为泥岩甲烷扩散系数的2.94倍,若假设这种倍数关系在地质时期中保持不变,则砂岩的甲烷扩散系数可由泥岩中甲烷扩散系数来求得即:

$$D_s = 2.94 \cdot D_m \quad (7)$$

2. 气层中甲烷气体浓度 (C_1)

天然气在地下通过盖层的扩散途径主要有两个,一个途径是天然气分子通过岩石孔隙水介质的扩散;另

一个途径是天然气通过岩石矿物颗粒的扩散。由于后者的扩散速度远小于前者^[3],故计算时可以忽略甲烷气体通过岩石矿物质的扩散量。气层中的天然气只有满足了水中溶解和围岩吸附后,方可聚集成藏。这也就表明气层水中总是被天然气饱和的,扩散损失的气量会因游离气的存在和气源不断补充而弥补,故可以用各地质时期中甲烷在单位体积孔隙水中的最大溶气量近似作为气层中甲烷扩散作用的初始浓度。

本文主要采用大庆油田实测地层水中甲烷溶解量资料的回归结果,计算扶余油层各地质时期甲烷在水中的最大溶解量,即:

$$C_1 = 0.7965 e^{0.000475z} \quad (8)$$

式中: C_1 ——甲烷在水中的最大溶解量 (m^3/m^3), Z ——气层埋藏深度 (m)。

3. 地表条件下水中天然气浓度 (C_0)

由式 (8) 当 $Z=0$ 时便可得到该区地表条件下水中天然气浓度 $C_0=0.7965 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。

4. 天然气扩散面积 (S)

由于地下甲烷气体主要是通过上覆盖层岩石孔隙水介质向外扩散的,故天然气通过上覆单位面积盖层的扩散面积为:

$$S = \varphi \quad (9)$$

5. 天然气扩散时间 (t)

一旦上覆盖层沉积开始以后,从源岩运移进入气层中的天然气,便在气层与上覆盖层之间气体浓度差的作用下发生扩散散失,本文从青山口组沉积时期开始计算扶余油层天然气扩散量,各地质时期的绝对年龄主要参考大庆石油勘探开发研究院的研究结果 (表 2)。

表 2 各地质时期延续时间数据表

地质时期	$Q+N+E+K_2m$	K_2s	k_1n	K_1y	K_1q
延续时间 (Ma)	77.9	14.7	16.5	3.5	8.5

6. 气层埋深 (Z)

气层各地质时期的古埋深可根据物质平衡法^[4]进行恢复计算得到。

(三) 三肇凹陷扶余油层天然气扩散量计算

本文在该区各探井地层进行古埋深恢复的基础上,根据上述计算参数的确定方法,首先对其各计算参数进行地史恢复计算,然后按 (2) 式,选取该区 184 口井进行扶余油层天然气通过单位面积覆盖层的扩散量的计算,其结果如图 2 所示。

三、地质意义

从图 2 中可以看出,三肇凹陷扶余油层天然气通过单位面积覆盖层的累积扩散量相对较四周地区低,最大值为 $1000 \text{ m}^3/\text{m}^2$,最小值为 $400 \text{ m}^3/\text{m}^2$,由面积加权平均法计算得到整个三肇凹陷 (面积为 6500 km^2) 扶余油层中天然气通过上覆盖层的累积扩散损失量为 $3.575 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。

根据大庆石油勘探开发研究院周平等对该凹陷生气量的计算结果,整个三肇凹陷登娄库组 and 上侏罗统的气源岩总生气量之和为 $13.05 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。由此可知,三肇凹陷扶余油层天然气的累积扩散量占其气源岩总生气量的 27.39%,这充分证实了天然气扩散损失量是十分可观的,是天然气远景评价中不可忽视的重要因素。

由于该凹陷扶余油层天然气扩散损失量如此之高,根据天然气运聚动平衡原理,该凹陷扶余油层必须从源岩那里获得大于生气量 27.39% 的气量,方可弥补其天然气的扩散损失,才能有剩余气量聚集成藏;小于生气量 27.39% 的地区,则不能成藏。

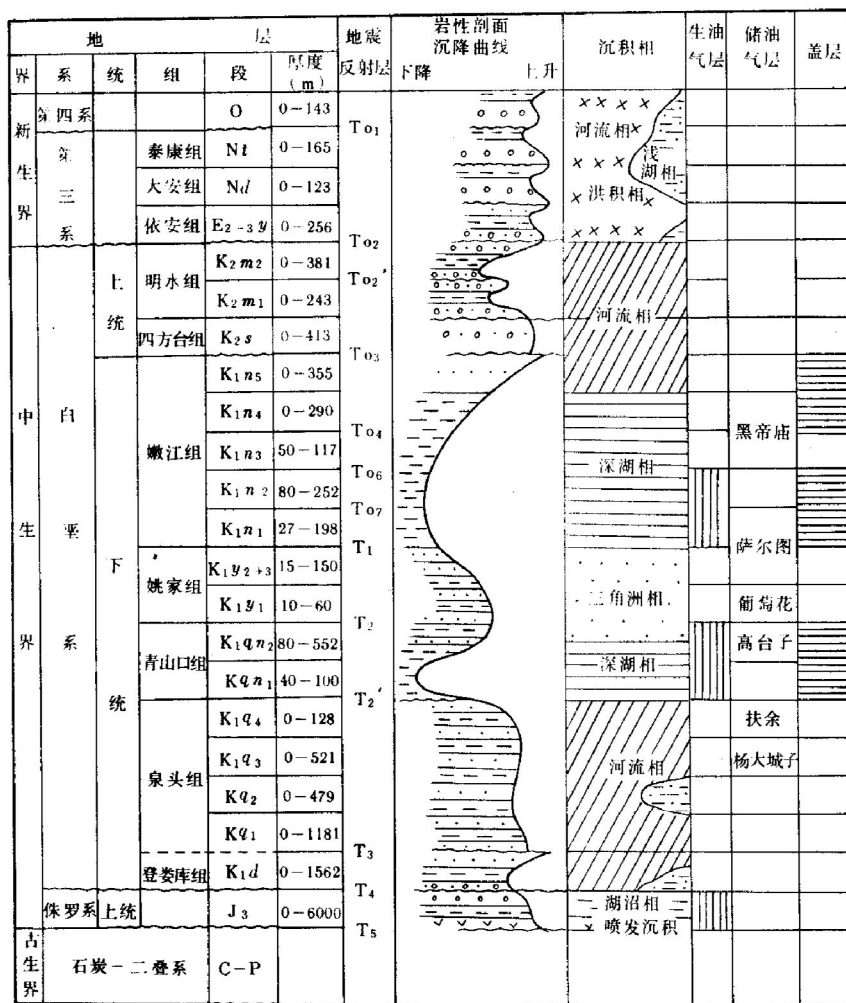


图2 松辽盆地三肇凹陷扶余油层天然气通过单位面积
上覆盖层累积扩散量 (m^3/m^3) 等值线图

四、结 语

从上述计算结果分析可以得知,天然气在漫长的地质历史时期的扩散量是十分可观的,足以毁掉一个具有工业价值的油气藏。因此,在天然气远景资源评价中应充分重视天然气扩散作用的研究,以便更加准确地估算天然气资源量,减少勘探的风险。

由于至今人们对天然气在地下的扩散机理的认识尚不统一,对一些计算参数(如扩散系数、天然气浓度和盖层厚度等)选取上仍存在争议;本文这里虽然在某些计算参数选取上作了一些新的尝试,但由于水平有限,仍存在着许多不足之处,还有待于进一步完善和提高。

参 考 文 献

- 1 Leythaeuser D. et al: Role of diffusion in primary migration of hydrocarbons. AAPG Bull. 1982, 66 (4): 408—429
- 2 陈章明, 莺山-杏山地区上侏罗统有机质演化史. 大庆石油学院学报, 1988, (1): 7—12
- 3 维蒙茨基 ИВ. 天然气地质学. 戴金星等译. 北京: 石油工业出版社, 1986: 26—28
- 4 庞雄奇等. 地震资料用于地层古厚度与剥蚀量计算方法探讨, 大庆石油学院学报, 1991, 15 (4): 1—8

GAS DIFFUSIVE FLUX OF FUYU OIL LAYER IN SANZHAO DEPRESSION OF SONGLIAO BASIN AND ITS GEOLOGICAL SIGNIFICANCE

Fu Guang Jiang Zhenxue

(Daqing Petroleum Institute)

Abstract

Sanzhao Depression is an important oil and gas exploration region in Songliao Basin and Fuyu oil layer is the main gas productive layer. Based on the Fick First Law, the total gas diffusive flux of Fuyu layer in the depression is calculated through geological resumption of natural gas diffusion coefficient and etc. The result indicates that the gas diffusive flux of Fuyu oil layer in Sanzhao Depression is 27.39% of the total gas generation amount of the source rocks. Fuyu oil layer must get much more gas amount than 27.39% of gas generation amount from the source rocks, and has surplus gas to form gas pools, otherwise the gas of the layer would be completely lost and no gas deposit could be found. Therefore, it has been demonstrated that the action of gas diffusion is an important factor that can not be neglected in natural gas reserve evaluation.